



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

KÖPÜK BETONUN FİZİKSEL, MEKANİK, ISIL VE MİKROYAPISAL
ÖZELLİKLERİNE ATIK FERROKROM CÜRUFUNUN ETKİLERİ

İSMAİL ÜMİT ÇIKMAN

DANIŞMAN

PROF. DR. OSMAN GENÇEL

BARTIN-2025



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KÖPÜK BETONUN FİZİKSEL, MEKANİK, ISIL VE MİKROYAPISAL
ÖZELLİKLERİNE ATIK FERROKROM CÜRUFUNUN ETKİLERİ**

DOKTORA TEZİ

İsmail Ümit ÇIKMAN

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman : Prof. Dr. Osman GENÇEL
Üye : Prof. Dr. Mücahit SÜTÇÜ
Üye : Prof. Dr. Vedat Veli ÇAY
Üye : Doç. Dr. Muhammed Yasin DURGUN
Üye : Doç. Dr. Emin HÖKELEKLİ

BARTIN-2025

KABUL VE ONAY

İsmail Ümit ÇIKMAN tarafından hazırlanan “KÖPÜK BETONUN FİZİKSEL, MEKANİK, ISIL VE MİKROYAPISAL ÖZELLİKLERİNE ATIK FERROKROM CÜRUFUNUN ETKİLERİ” başlıklı bu çalışma, 27.05.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Osman GENÇEL

Üye : Prof. Dr. Mücahit SÜTÇÜ

Üye : Prof. Dr. Vedat Veli ÇAY

Üye : Doç. Dr. Muhammed Yasin DURGUN

Üye : Doç. Dr. Emin HÖKELEKLİ

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mustafa Sabri GÖK
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Prof. Dr. Osman GENÇEL danışmanlığında hazırlamış olduğum “KÖPÜK BETONUN FİZİKSEL, MEKANİK, ISIL VE MİKROYAPISAL ÖZELLİKLERİNE ATIK FERROKROM CÜRUFUNUN ETKİLERİ” başlıklı doktora tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

27.05.2025

İsmail Ümit ÇIKMAN

ÖNSÖZ

“Köpük betonun fiziksel, mekanik, ısı ve mikroyapısal özelliklerine atık ferrokrom cürufunun etkileri” adlı çalışma Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu çalışmanın hazırlanma esnasında tez danışmanlığımı yapan benimle bu çalışmanın başından sonuna kadar ilgilenen ve çalışmanın her safhasında engin bilgi birikimi ile bana yol gösteren ve çalışmanın daha kapsamlı ve ilgi çekici olmasında yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Osman GENÇEL’e teşekkür ederim.

Tezin ilerlemesinde destek veren bilgi birikim ve tecrübelerini esirgemeyen ve bu tez çalışmasında jüri üyesi olma nezaketinde bulunan Prof. Dr. Mücahit SÜTÇÜ, Prof. Dr. Vedat Veli ÇAY, Doç. Dr. Muhammed Yasin DURGUN ve Doç. Dr. Emin HÖKELEKLİ hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışma kapsamında yardımları yadırganmayacak düzeyde olan Prof. Dr. Hasbi YAPRAK ile Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ hocalarıma ve kardeşim Levent ÇIKMAN’a teşekkür ederim.

Son olarak benim bu seviyeye gelmemde hayatım boyunca maddi manevi desteğini esirgemeyen annem ve rahmetli babama minnettarım.

İsmail Ümit ÇIKMAN

ÖZET

Doktora Tezi

KÖPÜK BETONUN FİZİKSEL, MEKANİK, ISIL VE MİKROYAPISAL ÖZELLİKLERİNE ATIK FERROKROM CÜRUFUNUN ETKİLERİ

İsmail Ümit ÇIKMAN

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Osman GENÇEL

Bartın-2025, sayfa: 110

İnşaat sektöründe en yaygın olarak kullanılan yapı malzemesi betondur. Beton ise üretim teknolojisinde önemli gelişmeler gösteren ve oluşan farklı ihtiyaçlara cevap verebilen özel betonlar üretilmesine imkan veren bir malzeme haline gelmiştir. Bu ihtiyaçlara cevap verebilen ve üretilen özel betonlardan bir tanesi de köpük betondur. Köpük beton ise harç ve köpük ajanının bir birine ilave edilmesiyle elde edilen özel bir beton türüdür. Bununla birlikte inşaat sektöründeki ilerlemelere paralel olarak köpük betona daha iyi özelliklere sahip yeni malzemeler de entegre edilebilmektedir. Beton üretiminde kullanılan bileşenler arasında en büyük oran agregaya aittir ve agrega üretiminde doğal kaynakların kullanılması bu kaynakların zamanla azalmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucu olarak gelecekte standartlara uygun agrega ulaşılması zorlaşacaktır. Beton üretimine olan talebin her geçen gün artmasıyla agrega ihtiyacı giderek derinleşmektedir. Azalan doğal agrega kaynaklarına karşın artan agrega üretimi beraberinde enerji tüketimi ile CO₂ salınımı arttırmakta ve maliyet oluşturmaktadır. Bu sebeple atık ürünlerin inşaat sektöründe değerlendirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Ayrıca günümüzün en büyük problemlerinden biri hızlı tüketime bağlı olarak ortaya çıkan atık ürünlerin bertaraf edilmesidir. Ferrokrom üretimi neticesinde atık ürünlerin meydana geldiği tesislerden biri Elazığ ili Maden ilçesinde yer alan Eti Krom A.Ş.'dir. Tesiste ferrokrom üretimine paralel olarak birçok yan ürün oluşmaktadır. Oluşan yan ürünlerden ferrokrom cürufunun inşaat

sektöründe değerlendirilmesi hedeflenmiş ve atık ferrokrom cürufu köpük betona entegre edilmiştir. Çalışma kapsamında karışımların çimento dozajı 500 kg/m^3 olarak belirlenmiş ve ferrokrom cürufu kırmataş agregası yerine ağırlıkça %0, %50 ve %100 oranlarında karışımlara ilave edilmiştir. Köpük içeriği karışımlarda 25 kg/m^3 ve 50 kg/m^3 olacak şekilde iki farklı oranda kullanılmıştır. Üretilen köpük beton numuneleri üzerinde fiziksel, mekaniksel, ısı ve mikroyapısal testler gerçekleştirilmiş olup ayrıca maliyet analizi, gömülü enerji ve gömülü CO_2 değerleri araştırılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında, kuru birim hacim ağırlıklarının $995\text{-}1050 \text{ kg/m}^3$, 28 günlük basınç dayanımlarının $10,13\text{-}17,68 \text{ MPa}$ ısı iletkenlik katsayılarının $0,228\text{-}0,246 \text{ W/mK}$ aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Maliyet ve sürdürülebilirlik açısından köpük beton içerisinde ferrokrom cürufunun kullanılması ise faydalı sonuçlar vermiştir. Elde edilen sonuçlar köpük beton içerisinde ferrokrom cürufunun değerlendirilmesinin mümkün olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Akıllı atık yönetimi, akıllı ve sürdürülebilir çevre, akıllı ve sürdürülebilir ekonomi, ferrokrom cürufu, fiziksel ve mekanik özellik, gömülü enerji ve CO_2 , karbon ayak izi, köpük beton

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

EFFECTS OF WASTE FERROCHROME SLAG ON THE PHYSICAL, MECHANICAL, THERMAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF FOAM CONCRETE

İsmail Ümit ÇIKMAN

Bartın University

Graduate School

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor: Prof. Dr. Osman GENÇEL

Bartın-2025, pp: 110

The most commonly used building material in the construction sector is concrete. Concrete has become a material that allows the production of special concretes that show significant developments in production technology and can meet different needs. One of the special concretes that can meet these needs and are produced is foam concrete. Foam concrete is a special type of concrete obtained by adding mortar and foaming agent to each other. However, in parallel with the developments in the construction sector, new materials with better properties can be integrated into foam concrete. The largest proportion among the components used in concrete production belongs to aggregate, and the use of natural resources in aggregate production causes these resources to decrease over time. As a result, it will be difficult to reach aggregates that comply with the standards in the future. As the demand for concrete production increases day by day, the need for aggregate is gradually deepening. Despite the decreasing natural aggregate resources, increasing aggregate production increases energy consumption and CO₂ emissions and creates costs. For this reason, the necessity of evaluating waste products in the construction sector has emerged. In addition, one of the biggest problems of today is the disposal of waste products resulting from rapid consumption. One of the facilities where waste products are produced as a

result of ferrochrome production is Eti Krom A.Ş. located in Maden district of Elazığ province. Many by-products are produced in parallel with ferrochrome production in the facility. It was aimed to evaluate the ferrochrome slag from the by-products formed in the construction sector and the waste ferrochrome slag was integrated into foam concrete. Within the scope of the study, the cement dosage of the mixtures was determined as 500 kg/m³ and ferrochrome slag was added to the mixtures at 0%, 50% and 100% by weight instead of crushed stone aggregate. Foam content was used in the mixtures at two different rates as 25 kg/m³ and 50 kg/m³. Physical, mechanical, thermal and microstructural tests were performed on the produced foam concrete samples and also cost analysis, embodied energy and embodied CO₂ values were investigated. Within the scope of this thesis, it was determined that dry unit weights varied between 995-1050 kg/m³, 28-day compressive strengths varied between 10.13-17.68 MPa and thermal conductivity coefficients varied between 0.228-0.246 W/mK. In terms of cost and sustainability, the use of ferrochrome slag in foam concrete yielded beneficial results. The results obtained showed that it is possible to evaluate ferrochrome slag in foam concrete.

Keywords: Carbon footprint, embodied energy and CO₂, ferrochrome slag, foam concrete, physical and mechanical property, smart waste management, smart and sustainable economy, smart and sustainable environment

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	ii
BEYANNAME	iii
ÖNSÖZ	iv
ÖZET.....	5
ABSTRACT	7
İÇİNDEKİLER	9
ŞEKİLLER DİZİNİ	12i
TABLolar DİZİNİ	14v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	15
KISALTMALAR	15i
1. GİRİŞ.....	Error! Bookmark not defined.
1.1 Elazığ Ferrokrom Cürufu	3
1.1.1 Elazığ Ferrokrom Cürufunun Oluşumu	4
1.1.2 Krom Atıklarının Çevre Kirliliği Üzerindeki Etkisi	8
1.2 Beton	8
1.3 Hafif Beton.....	9
1.4 Hafif Betonların Sınıflandırılması	12
1.4.1 Üretim Yöntemlerine Göre Hafif Betonların Sınıflandırılması.....	12
1.4.2 Basınç Dayanımlarına Göre Hafif Betonların Sınıflandırılması	13
1.4.3 Birim Hacim Ağırlığına Göre Hafif Betonların Sınıflandırılması.....	14
1.5 Köpük Beton	15
1.5.1 Köpük Betonun Tarihçesi	16
1.5.2 Köpük Betonun Tanımlanması ve Sınıflandırılması.....	17
1.5.3 Köpük Betonun Bileşenleri	18
1.5.3.1 Çimento	18
1.5.3.2 Agrega	19
1.5.3.3 Mineral Katkılar	19
1.5.3.4 Köpük Ajanı.....	19
1.5.4 Köpük Beton Üretimi	21
1.5.5 Köpük Betonun Özellikleri	23
1.5.5.1 Taze Köpük Betonun Özellikleri.....	23

1.5.5.2 Sertleşmiş Köpük Betonun Özellikleri	23
2. LİTERATÜR ÖZETİ	28
2.1 Köpük Betona ait Literatür Özeti	28
2.2 Ferrokrom Cürufuna ait Literatür Özeti	38
3. MATERYAL VE METOT	45
3.1 Çimento	45
3.2 Kırmataş	45
3.3 Ferrokrom Cürufu	46
3.4 Karma Suyu	47
3.5 Köpük Ajanı	48
3.6 Karışım Oranları	48
3.7 Köpük Betonların Üretimi	49
3.8 Uygulanan Testler ve Yöntemleri	54
3.8.1 İşlenebilirlik	54
3.8.2 Fiziksel Özellikler	55
3.8.3 Basınç ve Eğilme Dayanımı	55
3.8.4 Asit (H_2SO_4) ve Sülfat (Na_2SO_4) Etkisi	58
3.8.5 Donma-Çözülme Etkisi	58
3.8.6 Yüksek Sıcaklık Etkisi	59
3.8.7 Isıl İletkenlik	60
3.8.8 Ekonomik ve Ekoloji Analiz	60
3.8.9 SEM (Scanning Elecrton Microscope) ile Numunelerin Karakterizasyonu	61
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	63
4.1 Ferrokrom Cürufunun Karakterizasyon Buguları	63
4.2 Taze Köpük Betonun Özelliklerinin Değerlendirilmesi	66
4.3 Köpük Betonların Fiziksel Özelliklerinin Değerlendirilmesi	67
4.4 Köpük Betonların Basınç ve Eğilme Dayanımlarının Değerlendirilmesi	71
4.5 Köpük Betonların Asit ve Sülfat Dayanımlarının Değerlendirilmesi	74
4.6 Köpük Betonların Donma-Çözülme Dayanımlarının Değerlendirilmesi	76
4.7 Köpük Betonların Yüksek Sıcaklık Dayanımlarının Değerlendirilmesi	78
4.8 Köpük Betonların Isıl İletkenlik Katsayılarının Değerlendirilmesi	80
4.9 Köpük Betonların Ekonomik ve Ekolojik Analizlerinin Değerlendirilmesi	81
4.10 Köpük Betonların SEM ve EDS Görüntülerinin Değerlendirilmesi	84
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	90

5.1 Sonuçlar	90
5.2 neriler	92
KAYNAKLAR	94
ÖZGEÇMİŞ	109

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
No	No
1.1: Ferrokrom cüruflarının kimyasal bileşimleri	4
1.2: Ferrokrom tesisi	5
1.3: Tesis sahasında istiflenen ham cevher yığını	6
1.4: Sıvı ferrokromun potalara aktarılması (a), potalardan kalıplara dökülmesi (b)	6
1.5: Soğuması için tesisi alanına dökülen cüruf	7
1.6: Hafif beton çeşitlerinin içyapı formları	13
1.7: Köpük betona dair bir görüntü	17
1.8: Köpük ajanlarının sınıflandırılması	20
1.9: Köpük beton üretim yöntemi	22
1.10: Köpük betonun karıştırma ve üretimine ait örnek	22
3.1: Çalışmada kullanılan kırmataşın hazırlanması	46
3.2: Bilyeli değirmen cihazı	47
3.3: Çalışmada kullanılan cürufun hazırlanması	Error! Bookmark not defined.
3.4: Kuru (a), ıslak (b) karışım işlemi	50
3.5: Köpük ajanı ve suyun karıştırılması (a), köpüğün elde edilmesi (b)	50
3.6: Köpüğün ıslak karışıma ilave edilmesi	51
3.7: Köpük beton karışımlarının küp kalıba (a), prizma kalıba (b), dökülmesi	52
3.8: Köpük betonların küp kalıptan (a), prizma kalıptan (b), sökülmüş hali	52
3.9: Deney planının şematik gösterimi	53
3.10: Köpük beton karışımlarının yayılma tayini	54
3.11: Basınç ve eğilme dayanımı tespit cihazı	56
3.12: Köpük betonların eğilme dayanımı tespiti	57
3.13: Köpük betonların basınç dayanımı tespiti	57
3.14: Köpük betonların H ₂ SO ₄ (a), Na ₂ SO ₄ (b), çözeltisinde bekletilmiş halleri	58
3.15: Köpük betonların 300°C (a), 400°C (b), 500°C (c), sıcaklık sonrası halleri	59
3.16: Köpük betonların ısı iletkenlik katsayılarının tespiti	60
3.17: SEM görüntüleme cihazı	62
4.1: Ferrokrom cürufunun partikül boyut dağılımı	63
4.2: Ferrokrom cürufunun TGA analizi	64
4.3: Ferrokrom cürufunun XRD analizi	65

4.4: Ferrokrom cürufunun SEM görüntüsü.....	65
4.5: Ferrokrom cürufunun EDS görüntüsü	66
4.6: Köpük betonların yayılma çapları	67
4.7: Köpük betonların kuru birim hacim ağırlıkları	68
4.8: Köpük betonların su emme değerleri.....	69
4.9: Köpük betonların görünür porozite değerleri.....	70
4.10: Köpük betonların basınç dayanımları	72
4.11: Köpük betonların eğilme dayanımları.....	73
4.12: Köpük betonların sülfürik asit (H_2SO_4) dayanımları	75
4.13: Köpük betonların sodyum sülfat (Na_2SO_4) dayanımları	76
4.14: Köpük betonların donma-çözülme dayanımları	77
4.15: Köpük betonların yüksek sıcaklık dayanımları	79
4.16: Köpük betonların ısı iletkenlik katsayıları	81
4.17: Köpük betonların maliyet değerleri	82
4.18: Köpük betonların gömülü enerji miktarları.....	82
4.19: Köpük betonların gömülü CO_2 miktarları	83
4.20: M1 serisine ait köpük betonun SEM görüntüleri.....	84
4.21: M2 serisine ait köpük betonun SEM görüntüleri.....	85
4.22: M3 serisine ait köpük betonun SEM görüntüleri.....	85
4.23: M4 serisine ait köpük betonun SEM görüntüleri.....	85
4.24: M5 serisine ait köpük betonun SEM görüntüleri.....	86
4.25: M6 serisine ait köpük betonun SEM görüntüleri.....	86
4.26: M1 serisine ait köpük betonun EDS görüntüleri	87
4.27: M2 serisine ait köpük betonun EDS görüntüleri	87
4.28: M3 serisine ait köpük betonun EDS görüntüleri	88
4.29: M4 serisine ait köpük betonun EDS görüntüleri	88
4.30: M5 serisine ait köpük betonun EDS görüntüleri	88
4.31: M6 serisine ait köpük betonun EDS görüntüleri	89

TABLULAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
1.1: İşlevlerine göre hafif betonlar.....	13
1.2: Hafif betonların basınç dayanımlarına göre sınıflandırılması.....	14
1.3: Hafif betonların yoğunluklarına göre sınıflandırılması.....	15
3.1: CEM II/A-M (V-L) 42.5 R çimentosunun özellikleri.....	45
3.2: Köpük ajanına ait özellikler.....	48
3.3: Karışım oranları.....	49
3.4: Hammadde ve enerji birim fiyatları.....	60
3.5: Hammadde ve enerjinin gömülü enerji ve karbon ayak izi	61
4.1: Ferrokrom cürufunun kimyasal bileşimi	64

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

μm	: Mikrometre
$^{\circ}\text{C}$: Santigrat derece
Al_2O_3	: Alüminyum Oksit
CaCl_2	: Kalsiyum Klorür
CaO	: Kalsiyum Oksit
Cl	: Klor
Cr_2O_3	: Krom Oksit
D	: Hafif betonun birim hacim kütlesi (yoğunluğu)
Fe_2O_3	: Demir (III) Oksit
H_2SO_4	: Sülfürik Asit
K_2O	: Potasyum Oksit
kg/dm^3	: Kilogram / Desimetre küp
kg/m^3	: Kilogram / Metreküp
kPa	: Kilopaskal
MgO	: Magnezyum Oksit
MPa	: Megapaskal
mW/mK	: Miliwatt / Metre Kelvin
N/mm^2	: Newton / Milimetre kare
Na_2O	: Sodyum Oksit
Na_2SiO_3	: Sodyum Metasilikat
Na_2SO_4	: Sodyum Sülfat
NaOH	: Sodyum Hidroksit
SiO_2	: Silisyum Dioksit
SO_3	: Kükürt Trioksit
V	: Hacim
W	: Ağırlık
W/mK	: Watt / Metre Kelvin

KISALTMALAR

ACI	: American Concrete Institute
EDS	: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektrometresi
FC	: Ferrokrom Cürufu
SEM	: Scanning Elektron Microscope
TGA	: Termogravimetrik Analiz
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
XRD	: X-ışını Difraksiyonu
XRF	: X-ışını Floresansı
YDD	: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

1. GİRİŞ

Günümüzde nüfusun hızla artış göstermesi ve mevcut kaynakların giderek azalmaya başlamasına karşın, sanayi sektöründeki kayda değer gelişmeler ve ilerlemeler üretimle paralel olarak atık madde olgusunu ortaya çıkarmaktadır. Dünya çapında üretilen katı atıklar incelendiğinde, bu atıklar içerisinde en büyük paya sahip olan maden işletmeciliği atıkları olduğu bilinmektedir. Hiçbir malzemenin yoktan var olmadığı gibi her malzemenin bir dönüşüm evresi içerisinde olduğu dünyamızda, atık maddelerin değerlendirilmesi şüphesiz ki çok önem arz etmektedir. İlerleyen yıllarda atıkların tekrardan değerlendirmesine yönelik çalışmalar hayata geçirilmez ise birçok sektörün yan ürünleri ve atıkları; acilen ele alınması gereken ve yaşamı tehdit eden bir sorun haline evrilecektir. Atıkların yok edilmesi en son uygulanacak yöntem olarak düşünülmeli, çeşitli üretim aşamalarından geçirilerek geri dönüştürülmesi daha ekonomik ve çevre için daha yararlı olacaktır. Endüstriyel bir atık olarak meydana gelen cüruf vb. çeşitli atıkların değerlendirilebilecekleri sektörlerin başında kütleli olarak büyük ölçekte malzemeye gereksinim duyan inşaat sektörü gelmektedir.

Evrensel olarak inşaat sektöründeki gelişmeler ile birlikte ülkemizde de bu sektörde kayda değer gelişmeler dikkat çekmektedir ancak bu sektörün gelişim göstermesinde şüphesiz ana rolü doğal kaynaklar oynamaktadır. Maalesef bu gelişimlere doğal kaynakların sürekli olarak cevap vermesi mümkün değildir. Diğer taraftan ise doğal kaynakların azalmasına paralel olarak endüstriyel atıkların arttığı gerçeği karşımıza çıkmaktadır. Bu atık malzemelerin çevreye verdiği zararı minimize etmek ve doğal kaynakların yerine alternatif diğer malzemeler kullanmak, yeni kompozit malzemeler üretmek ve atık malzemelerin dönüştürülerek değerlendirilmesi inşaat sektörünün bu alana yapacağı en önemli katkı olacaktır (Yıldız, 2013).

Son yıllarda Türkiye’de de endüstriyel atıkların tekrar kullanılması, bu atıklardan çeşitli kompozit malzemelerin üretilmesi ve elde edilen kompozit malzemelerin mühendislik özelliklerinin irdelenmesi bilim dünyasının gündeminde önemli bir yer tutmaktadır. Bu kapsamda çeşitli endüstriyel kuruluşların üretimleri esnasında veya sonucunda oluşan birçok yan ürünün bir şekilde geri dönüştürülüp, değerlendirilip tekrar kullanılması hedeflenmektedir. Bu atık ürünün bir şekilde değerlendirilmesi önem arz etmektedir.

Çeşitli endüstriyel tesislerde veya üretim yapan farklı işletmelerde üretim aşamaları sonucunda meydana gelen ve istenmeyen özellikteki atık maddelere katı atık veya cüruf denmektedir. Metalürjik katı atık olan cürufların sanayi alanlarında değerlendirilip kullanılması senelerdir çeşitli bilim alanları ve dallarının yakından ilgilendiği konu başlıkları arasında yer almaktadır. Günümüzde ise cüruflar ana hatları itibariyle inşaat sektörü veya sanayi tesislerinde de değerlendirilebilir. Bu değerlendirme cürufların genel itibari ile sahip oldukları özelliklere göre aşağıdaki şekilde yapılabilmektedir.

- Çimento üretiminde katkı maddesi olarak,
- Çeşitli yapı elamanları üretiminde yapay agrega olarak,
- Mineral katkı üretiminde (çimento esaslı) hidrolik bağlayıcı olarak,
- Kompozit malzeme üretiminde dolgu malzemesi olarak,
- Yalıtım malzemesi üretiminde hammadde, gibi birçok farklı alan ve disiplinde bu atık değerlendirilmektedir.

Geçmişte olduğu gibi günümüzde de yapı malzemelerinin değişik özelliklerinin geliştirilmesi için çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Bu değişim ve gelişimde genel hatlarıyla çevre kirliliğine sebebiyet veren endüstriyel atık malzemelerin işlenmesi ve ekonomik bir yapı malzemesi üretimi için malzemelerin bünyevi özelliklerine uygun katkı malzemelerin entegrasyonu vurgulanmaktadır. Bu gaye ile hem kimyasal katkılar hem de farklı doğal ve yapay malzemeler yapı malzemelerinin üretimi aşamalarında çeşitli nedenlerle kullanılmaktadır.

Detaylı olarak bakıldığında, yapı malzemesinin esas bileşenleri arasında yer almayan bu malzemelerin kullanımı ile devamlı gelişen yapı malzemeleri ile başta üretim teknolojisinde meydana gelen gelişme olmak üzere, malzemelerinin mukavemet gibi özelliklerini geliştirmekle beraber üretim safhasında da ekonomiklik sağlamaktadır. Bu kapsamda yüksek fırın cüruflarının artık atık bir madde olarak nitelendirilmesi yerine ekonomik, fiziksel ve mekanik katkısı olduğu düşünülüp bir yan ürün formatında değerlendirilmesi hiç şüphesiz ki tartışılmazdır.

Dünyada krom yataklarının bulunduğu başlıca ülkeler Türkiye, Güney Afrika Cumhuriyeti, Zimbabve, Küba, Hindistan, Kazakistan, Finlandiya, İran, Brezilya ve Filipinler'dir. Dünya

genelinde kromit kaynakları toplamının 7,6 milyar ton düzeyinde olduğu bu değerin 3,6 milyar tonluk kısmının rezerv olduğu tahmin edilmektedir. T¼rkiye’de 2021 yılında 7 milyon ton 2022 yılında ise 5,4 milyon ton krom cevheri üretimi yapılmıştır (URL-1 ve URL-2, 2024)

D¼nyada Avrupa ilk sırayı almak üzere, metal¼rjik c¼rufun neredeyse tamamı tekrardan kullanılmaktadır. Bu açıdan bakılacak olunursa d¼nyada daha sürdürülebilir bir gelecek için bir end¼striyel yan ürünün diğer bir end¼stri alanının ham maddesi olarak ele alınabileceği ve bu kapsamda farklı end¼stri alanlarının çevreye vermiş olacakları zararın minimize edilebileceğidir. Ülkemizde ise bu konu nazarında çalışmalar yapılmaya devam etmekte olup halen istenilen seviyelere ulaşılmış değildir. (Yüksel ve Bilir, 2005; Yıldız, 2013).

Diğer taraftan ise insanlığın son zamanlarına damga vurmuş olan yapı malzemelerinden biri de beton olarak ifade edilmektedir. İnsanların barınmasından büyük sanayi yapılarına, baraj inşaatlarından karayolu inşaatlarına kadar birçok inşaat mühendisliği çalışma alanında rol almış bir yapı malzemesidir. Ancak yapılan inşaatların hizmet edeceği alanlar birbirinden farklılık arz ettiği için aslında her alan için farklı özelliklere haiz betonlar üretilmiştir. Bu sebeple amaç odaklı beton üretimi karşımıza çıkmakta olup bunlara özel betonlar denmektedir. Özel betonlardan bir tanesi de hafif beton olup inşaat sektöründe son zamanlarda kendine uygulama alanı bulmuş bir yapı malzemesidir.

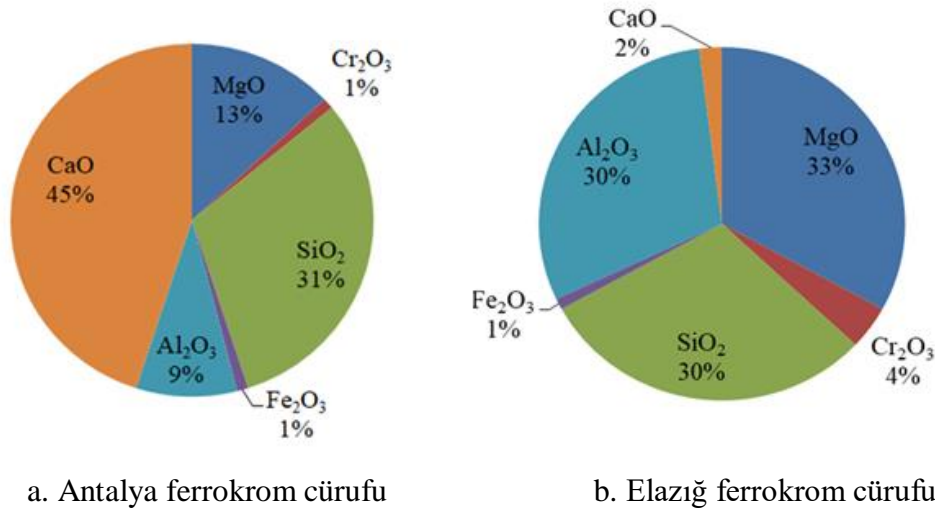
1.1 Elazığ Ferrokrom C¼rufu

Çelik üretiminde kullanılan ısıya karşı dayanıklı ve paslanmaz özelliğe sahip ferrokromun elektrik-ark fırınlarında üretimi sonucunda silikoferrokrom ve ferrokrom c¼rufu adında atık ürünler meydana getirmektedir. T¼rkiye’de başlıca c¼ruf ortay çıkan 2 adet işletme bulunmaktadır bunlar Antalya Ferrokrom İşletmesi ile Elazığ Ferrokrom İşletmesidir.

Ortaya çıkan c¼rufların neredeyse tamamı depolanmaktadır. Ayrıca depolanmakta bulunan bu c¼rufların günümüze kadar kayda değer bir şekilde işlenip değerlendirilmesi maalesef söz konusu olmamıştır (Yılmaz, 2002, Yılmaz ve S¼tař, 2008). Ancak son zamanlarda genel itibariyle c¼rufun öğüt¼lerek çimento klinkerine eklenmesi veya karayollarında beton yol stabilizesi işleminde temel altı malzemesi olarak değerlendirilmesi şeklindeki

çalışmalarla karşılaşmak mümkündür. Bununla birlikte beton içerisinde kullanımı veya köpük betona ilave edilmesi gibi çalışmaların genel itibariyle bilim dünyasında pek etki yaratmadığı söylenebilir ve bu çalışmalara rastlamak pek mümkün değildir, bunun en önemli sebebi ise Elazığ ferrokrom cürufu ile ülkemizdeki ve dünyadaki yüksek fırın cürufunun kompozisyon açısından farklılara sahip olmasıdır (Yıldız, 2013).

Atık bir ürün olan ferrokrom cürufunun ülkemizdeki kompozisyonları değerlendirilmesi için 2 farklı tesiste meydana gelen cüruflar ele alınabilir. Ferrokrom çıkarılan iki tesis olan Antalya ferrokrom tesisi ile Elazığ ferrokrom tesisinin üretimi sonucu ortaya çıkan ferrokrom cürufuna ait kompozisyon bilgileri Şekil 1.1'de verilmiştir. Antalya ferrokrom cürufunun kimyasal kompozisyonunda yüksek miktarda CaO olmasına karşın Elazığ ferrokrom cürufunun kimyasal kompozisyonunda yüksek miktarda MgO yer almaktadır. (Yılmaz ve Süttaş, 2008; Yıldız, 2013).



Şekil 1.1: Ferrokrom cürufularının kimyasal bileşimleri (Yılmaz ve Süttaş, 2008; Yıldız, 2013)

1.1.1 Elazığ Ferrokrom Cürufunun Oluşumu

Elazığ ilinin Alacakaya (Guleman) ilçesindeki krom cevheri yataklarının tespiti ilk olarak 1935 yılına dayanmaktadır. Tespit edildiği yıldan bir yıl sonra Alacakaya lokasyonunda Şark Kromları T.A.Ş. kurulmuş, 1939 senesinde ise Etibank Şark Kromları İşletme Müessesesi kurulmuştur ve Etibank Genel Müdürlüğü himayesi altına girmiştir. Tesis, 1984 yılında Etibank Şark kromları-Ferrokrom İşletmesi Müessesesi Müdürlüğü ismini

almış, 1998 senesinde ise Eti Krom A.Ş. Genel Müdürlüğü ismine dönüştürülmüştür. Yıldırım şirketler grubu özelleştirme bünyesinde tesisin tüm haklarını 2004 yılında devralmıştır. Eti Krom A.Ş. Genel Merkezi ile Ferrokrom Üretim Tesisleri konum olarak Elazığ-Bingöl yolunun 55. km'sinde yer almaktadır (Yıldız, 2013).



Şekil 1.2: Ferrokrom tesisi

Esas hammaddesi krom cevheri olan ferrokrom, parça ve konsantre formda işlenmesi sonucunda oluşur. Ferrokrom üretiminde krom cevherinin yanında kok kömürü, soderberg, kuvarsit ve boksit ilave maddeler olarak kullanılmaktadır. İşlenen hammadde ve ilave maddeler arzu edilen boyutlarda kırılarak ferrokrom tesisinin hammadde depolarında muhafaza edilir. Dijital kantarlar yardımıyla belirlenen oranlarda birbirine dahil edilen hammadde ile ilave maddeler fırınlara sevk edilmekte ve erime işlemi gerçekleşen malzemeler belirli periyotlarla dışarı aktarılmaktadır.



Şekil 1.3: Tesis sahasında istiflenen ham cevher yığı

Yan duvarları ile zemini refrakter örgülü olan ark fırınlarının yan duvarları su yardımıyla zemini hava yardımıyla soğutulmaktadır. Erime için istenen sıcaklık 1700-1800°C olup bu sıcaklık seviyesine ulaşmak için fırına soderberg tip elektrotlarla elektrik enerjisi aktarılmaktadır. Fırın içerisinde peşi sıra meydana gelen kimyasal reaksiyonlar neticesinde meydana gelen sıvı formdaki ferrokrom, potalar vasıtasıyla fırından alınarak kalıplara aktarılır.



Şekil 1.4: Sıvı ferrokromun potalara aktarılması (a), potalardan kalıplara dökülmesi (b)

Kalıplara aktarılmış olan ve bünyesinde %70-85 oranında ferrokrom barındıran küçük bloklar tesisin mamul madde kısmında paketlenmekte ve istek doğrultusunda ihraç edilmekte veya ferrokrom işleyen diğer sanayi işletmelerine satılmaktadır. İşlenmiş ana üründen sonra geriye bu çalışma kapsamında kullanılmış olduğumuz cüruf maddesi kalmaktadır.

Tesiste Ferrokrom üretimi esasen iki farklı şekilde olmaktadır. Bunlardan ilki kapalı üretim sistemi ikincisi ise açık üretim sistemidir. Tesisin özelleştirilmesinden sonra kapalı üretim sisteminden vazgeçilmiştir. Bunun sebebi ise su püskürtülerek granüle hale getirilen granüle cürufun toz haline gelmesi ve bünyesinde yüzde 5 miktarında ferrokrom cevheri ihtiva etmesidir. Güncel olarak tesiste açık üretim sistemi kullanılmakta olup üretimi yapılan metal, kum kalıplara aktarılmakta akabinde ana ürün temin edilmektedir daha sonra kalan cüruf malzemesi tesiste sahalara dökülerek veya dışarıdan su püskürtülerek kısmen soğutulup öylece istiflenmektedir.

Cürufların farklı şekillerde soğutulmalarından ötürü barındırdıkları nitelikler de farklılık göstermektedir. Yavaş bir şekilde havada soğutulmaları sayesinde kristal form kazanırlar ve buda yüksek mekanik özelliklere sahip olmasını sağlayarak genellikle agrega olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Fırından çıktığında eriyik formda olan cüruf süratli bir şekilde soğutulduğunda akışkan özelliğindeki hızlı azalma ile kristalleşmeye engel olan camsı formda bir madde oluşur bu şekliyle ise genellikle çimento ve beton üretiminde yer alır (Stevenson, 1997; Proctor vd., 2000).



Şekil 1.5: Soğuması için tesis alanına dökülen cüruf

Nihai olarak elde edilen iri ebatlardaki cüruf blokları tesiste yer alan çeneli kırıcılar vasıtasıyla ilk olarak 50 ila 150 mm boyutlarına akabinde ise 5 ila 10 mm boyutlarındaki çakıl durumuna getirilir. Halen bünyesinde yüksek oranda ferrokrom muhafaza eden bu taneler mıknatıs yardımı ile ayrıştırılmakta bu sayede bünyesinde %5 miktarında ferrokrom bulunduran maden geri kazanılmış olmaktadır.

Konkasörden geçirilerek bünyesindeki son ferrokrom kalıntısı da çıkarılan cüruf, nihai durumda atık madde olarak nitelendirilen forma bürünmüş olmaktadır. Son halinde 1 ila 7 mm boyutunda kum-çakıl formuna gelen cüruf bu şekliyle istiflenmektedir.

1.1.2 Krom Atıklarının Çevre Kirliliği Üzerindeki Etkisi

Elazığ ferrokrom işletmesinde yıllık olarak 150000 ton ferrokrom üretimi gerçekleşmekte ve 3 kg ferrokromdan yaklaşık olarak 1 kg cüruf ve yılda yaklaşık 50000 ton cüruf meydana gelmektedir (Yazıcı ve Kaya, 2003).

Öte yandan istiflenme alanlarının çevresinde orman alanları ve yerleşim yerleri olması halinde yörenin iklim şartları ile ekolojik dengesinin tahrip olması durumu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca istiflenen bu atık malzemelerin oluşturdukları yığınların sel ve erozyon gibi doğal afetler durumunda güvenlik açısından tehdit doğurması da kaçınılmazdır ve rüzgâr yoluyla havaya karışan toz haldeki malzemenin hava kirliliği ile beraber sağlık problemleri oluşturması da söz konusudur. Aydoğdu (2014) yapmış olduğu çalışmada bu kirliliğe vurgu yapmıştır.

1.2 Beton

Beton, belirli yöntemlerle karışım hesabı yapılan içerisinde çimento, su, agrega ve ihtiyaç halinde kimyasal katkıları bulunduran, kullanılacak yerin şekli ve ebatlarına istinaden yerleştirilen, uygun kür koşullarında prizini tamamlayan bir kompozit malzeme olarak ifade edilmektedir. Başlangıçta plastik bir kıvamda olup zamanla çimentonun hidrasyonu ile sert bir form kazanan bir yapı malzemesidir (Özdemir ve Altan, 2023). Agrega bu yapı içerisinde dolgu malzemesidir. Su ve çimento harcı ise agregalar arasındaki boşluğu doldurmakta ve agregaların birbirine bağlanmasını sağlamaktadır. Böylece belli bir kütle

meydana gelmektedir. Ayrıca betonu diğer yapı malzemelerinden farklı kılan en önemli özelliği ise plastik formdaki haline şekil verilebilmesidir (Binici vd., 2000).

Çağdaş dünyada en fazla kullanılan yapı malzemeleri sıralandığında, beton ilk sırada yer alacaktır. Bu sebeple beton teknolojisinde süre gelen bir ilerleme ve gelişme durumu söz konusudur. Bu gelişme ve ilerlemelerle neredeyse yılın her günü en elverişsiz iklim ve hava şartlarında bile beton üretimi ve dökümü gerçekleştirilebilmektedir. Kabaca su, çimento ve agregadan oluşan geleneksel beton maalesef teknolojinin gelişimine bağlı oluşan ihtiyaçları karşılayamamaktadır. Bu sebeple hedeflenen özelliklere göre beton üretimi ön plana çıkmıştır. Örneğin;

- Artan enerji ihtiyacıyla beraber nükleer santrallerin kurulması ve üretimin yapılabilmesi için geleneksel beton yerine özel beton olarak ifade edilen ağır beton üretilmesidir.
- Artan nüfusla beraber yaşam tarzlarının değişmesiyle yüksek katlı yapılara ihtiyaç duyulmuş, bu da beraberinde yapıların inşası için yüksek dayanımlı betonların üretilmesine yol açmıştır.
- Yapıların depreme dayanıklı olarak inşa edilebilmesi için donatı yoğunluğunun artmasıyla kendiliğinden yerleşen betonların üretilmesine neden olmuştur.
- Son zamanlarda yaşanan depremler ile daha da önem kazanan onarım ve güçlendirme işlerinde ise özel bir beton olan polimer betonlar sıklıkla telaffuz edilmeye başlanmıştır.

Bu ve bunun gibi verilebilecek örneklerle de anlaşılacağı gibi, her koşulda kullanılacak mükemmel bir beton tasarımı mümkün değildir. Dolayısıyla kullanılacak alana uygun, amaca göre beton kavramı ortaya çıkmaktadır. Bunlara genel anlamda özel beton da denilmektedir. Bu beton türlerinden biri de hafif betondur.

1.3 Hafif Beton

Hafif betonun genel tanımı ile bileşiminde normal betona kıyasla özgül ağırlığı daha düşük olan hafif agregaları bulduran veya hava boşlukları içeren, dolayısıyla yoğunluk değeri normal betonun yoğunluk değerinden ($2200-2600 \text{ kg/m}^3$ ya da $2300-2400 \text{ kg/m}^3$) daha

düşük olan betondur. Hafif betonun yoğunluğu ele alındığında, farklı kaynaklarda farklı değerlere ulaşmak mümkündür. Bunun asıl nedeni ise yoğunluk, kullanılan hafif agreganın cinsine ve miktarına, hafif beton türüne göre değişkenlik göstermesidir.

Neville'e (1995: 844) göre tüm hafif betonlar dikkate alındığında yoğunluk değerlerinin 300-1850 kg/m³ aralığında olduğunu belirtirken, sadece maksimum dayanıma sahip yapısal betonlar dikkate alındığında bu değer 1120-1940 kg/m³ ve 1400-1800 kg/m³ aralıklarında değişkenlik gösterdiği belirtilmiştir. Farklı kaynaklarda ise yoğunluk değerinin 1840 kg/m³ geçmemesi gerektiği ve 800 kg/m³'e kadar düşebileceği bildirilmektedir (Taşdemir, 2003).

Hafif betonların yoğunlukları Türk standartlarına göre ele alındığında;

- TS EN 206+A2'de (2021) hafif beton, birim hacim ağırlığı etüv kurusu durumda 800 kg/m³'ten büyük, 2000 kg/m³'ten küçük olan beton olarak ifade edilmektedir. Hafif betonlar çeşitli tip ve özellikteki hafif agregaların yapım aşamasında kullanılmasıyla da üretilebilmektedir.
- TS 2511'e (1977) göre, karakteristik basınç dayanımı 17 MPa'dan büyük aynı zamanda birim hacim ağırlığı maksimum 1900 kg/m³ olan hafif agregaya sahip betonlar taşıyıcı hafif beton şeklinde sınıflandırılmaktadır. Ayrıca imalat aşamasında kullanılan agregaların karakteristik özellikleri hafif betonların özelliklerini değiştirdiği bilinmektedir.
- TS 1114 EN 13055-1'e (2004) istinaden hafif agregaya, su, çimento ve ihtiyaç halinde katkı maddeleri ile birleştirilerek hafif beton üretiminde kullanılan, gevşek birim ağırlığının maksimum değeri 1200 kg/m³'ü veya tane yoğunluğu 2000 kg/m³'ü geçmeyen, kırılmış veya kırılmamış gözenekli inorganik agregaya olarak tanımlanmaktadır.

TS 1114 EN 13055-1'e (2004) göre ayrıca hafif agregalar tabii (doğal) ve suni (yapay) şeklinde iki ayrı sınıfta tanımlanmıştır. Doğal agregaya, sadece mekanik işlem görmüş bunun dışında herhangi bir işleme tabi tutulmadan mineral kaynaklardan temin edilen agregadır. Meydana gelme esnasında gözenekli forma bürünmüş olan, pomza (bims), volkanik tüf, lav cürufu, diatomit, sünger taşı gibi kırılmış ya da kırılmamış agregalardır. Doğal hafif agregalar iki sınıfa ayrılır bunlar; volkanik kökenli olan ve volkanik kökenli olmayan

şeklinde. Volkanik kökenli agregalar esasen lavın volkandan aşağı doğru akarken havayla etkileşime girmesinden ötürü hızlı bir şekilde soğur ve matlaşır böylece kristalize yapı yerine düzensiz bir yapıya sahiptir. Diğer bir ifadeyle bu çeşit hafif agregalar yapısal olarak amorf veya camsı özelliktedir. Yapay agrega ise, çeşitli endüstriyel işlemler neticesinde meydana gelen mineral kökenli agregadır. Bunlara cüruf, vermikülit, arduaz, perlit, kil, şeyl, gibi agregalar örnek olarak verilebilir.

Türk standartlarındaki sınır değerlerini aşmayan ve farklı şekillerde üretimi yapılabilen hafif betonların normal betonlara kıyasla avantajlı özellikleri şu şekilde sıralanabilir (Baradan vd., 2015: 825).

- Yapı yüklerinde azalma sağladığı için yapıya etki eden deprem yükleri azalır.
- Yoğunluk değeri düşük beton kullanımı ile taşıyıcı sistem elemanlarının enkesitlerinde, temel ebatlarında ve kullanılan donatı oranının azalmasına olumlu katkı sunar.
- Kalıp ve iskele maliyetlerinin azalmasına pozitif etkisi vardır. Çünkü kalıplara normal betona göre daha az bir basınç uygulanması durumu söz konusudur ve buna istinaden kalıp kesitlerinde bir azalma gerçekleşmektedir.
- Isıl iletkenliği düşük, ısı ve ses yalıtım değeri yüksektir.
- Yangın direnci yüksektir.
- Nakliyesi ve yerleştirmesi zahmetsizdir ayrıca endüstriyel üretimlerde kolaylık sağlar.

Hafif betonların normal betonlara kıyasla dezavantajlı özellikleri şu şekilde sıralanabilir (Baradan vd., 2015: 825).

- Boşluklu yapıları nedeniyle dayanım değerleri düşüktür bu sebeple taşıyıcı beton olarak kullanımları tercih sebebi değildir.
- Aşınmaya karşı direnci düşüktür.
- Su ve rutubet gibi durumlara karşı yalıtım önlemleri gerektirir.
- Maliyeti yüksektir çünkü hafif agregalar her yerde bulunmamakta temin işlemleri güçlük çıkarmaktadır.

- Normal betonlara kıyasla üretim aşamasında daha fazla çimento ihtiyacı doğurmaktadır bu sebeple üretimi maliyetlidir.
- Normal betonlara kıyasla düşük elastisite modülüne sahiptirler bu sebeple şekil değiştirme miktarı daha yüksektir.
- Ayrışma riski bulunmasından dolayı üretiminden taşınmasına, yerleştirilmesinden kür edilmesine kadar nitelikli işçilik ve hassasiyet arz eder.
- Normal betona kıyasla rötre ve sünme miktarları daha yüksektir.

1.4 Hafif Betonların Sınıflandırılması

Birçok türde hafif beton mevcut olduğundan hafif betonların sınıflandırılmasında farklı şekillerde yapılmaktadır. Üretim metotlarına ve kullanım alanlarına istinaden bunlar aşağıdaki gibidir (Uygunoğlu, 2008).

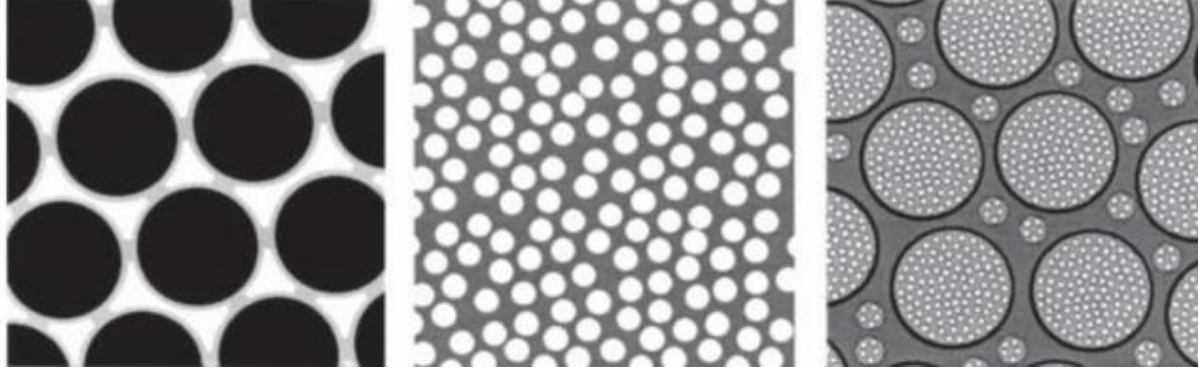
- Üretim Yöntemlerine Göre Sınıflandırma
- Basınç Dayanımlarına Göre Sınıflandırma
- Birim Hacim Ağırlığına Göre Sınıflandırma

1.4.1 Üretim Yöntemlerine Göre Hafif Betonların Sınıflandırması

Hafif beton üretilebilmesi için farklı yöntemler mevcuttur. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Düşük özgül ağırlığa sahip agreganın normal ağırlıktaki agregaya yerine kullanılması. Hafif agregaların özgül ağırlığı $2,6 \text{ kg/dm}^3$ ten küçük olup bu şekildeki beton hafif agregalı beton olarak ifade edilir.
- Harç veya beton içerisinde hava kabarcıkları meydana getirilerek. Bu şekilde üretilen betonlara hücreli, köpürmüş, gözenekli, hava sürüklenmiş veya gaz beton denir.
- Karışımdan ince agreganın bertaraf edilerek yerine normal ağırlığa sahip kaba agregaya entegre edilmesi ile gerçekleştirilen üretim. Bu şekilde üretilen betona ince agregasız beton denir (Neville ve Brooks, 1987: 460).

Chandra ve Berntsson (2002: 450) ise; hafif betonları, üretim süreçlerine göre hafif agregalardan yapılan betonlar, ince taneciksiz betonlar, kimyasal katkıları kullanımıyla yapılan betonlar şeklinde köpük beton veya gaz beton olarak sınıflandırmaktadırlar.



a) İnce agregasız beton

b) Gözenekli beton

c) Hafif agregalı beton

Şekil 1.6: Hafif beton çeşitlerinin içyapı formları (Newman ve Choo, 2003:704)

1.4.2 Basınç Dayanımlarına Göre Hafif Betonların Sınıflandırılması

Basınç dayanımı açısından hafif betonların birçok şekilde sınıflandırılması durumu söz konusudur. Bunun sebebi hafif agregalı beton üretiminde dayanımları farklılık gösteren hafif agregaların kullanılmasıdır.

Uluslararası Yapı Malzemeleri, Sistemleri ve Yapı Laboratuvarları ve Uzmanları Birliği ile Avrupa Beton Komitesi hafif betonları dayanımlarına, ısı iletkenliklerine ve ağırlıklarına göre yapısal, yapısal-yalıtım ve yalıtım betonu olarak 3 sınıfta toplamıştır. Bu sınıflandırma aşağıdaki Tablo 1.1’de detaylı olarak gösterilmiştir.

Tablo 1.1: İşlevlerine göre hafif betonlar (ACI 213R-14, 2014)

Sınıflandırma ve Tipi	Özellik		
	Basınç Dayanımı (MPa)	Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	Birim Ağırlık (kg/m ³)
Yapısal	> 17	> 0,75	1440-1840
Yapısal/Yalıtım	3,5-17	< 0,75	< 1600
Yalıtım	< 3,5	< 0,30	<1200

TS EN 206+A2'ye (2021) göre ise hafif betonlar Tablo 1.2'de belirtildiği gibi basınç dayanımları esas alınarak 8 MPa ile 80 MPa arasında değişen şekillerde gruplandırılmıştır. Bilhassa son yıllarda kimyasal katkılardaki kayda değer gelişmelerle yüksek dayanımlara sahip hafif agregalı betonlar oluşturulabilir duruma gelmiştir. Bu sayede hafif betonlar 80 MPa basınç dayanımı sergileyecek şekilde üretilebilmektedir. (Uygunoğlu, 2008).

Tablo 1.2: Hafif betonların basınç dayanımlarına göre sınıflandırılması (TS EN 206+A2, 2021)

Basınç Dayanım Sınıfı	En Düşük Karakteristik Silindir Dayanımı N/mm²	En Düşük Karakteristik Küp Dayanımı N/mm²
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	34	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

1.4.3 Birim Hacim Ağırlığına Göre Hafif Betonların Sınıflandırılması

Birim hacim ağırlığı ile karşıladığı basınç dayanımına istinaden hafif betonlar, aşağıdaki gibi gruplandırılabilir. (ACI 213R-87, 1987; ACI 213R-03, 2003).

- Düşük yoğunluklu yalıtım betonları: Yapısal bir hedef gözetilmeden yalıtım amaçlı kullanılırlar. 800 kg/m³'den daha küçük hava kuru birim hacim ağırlığına sahiptirler. Basınç dayanım değerleri 0,7 ile 7 MPa aralığında olup

ısı geçirgenlik katsayıları düşüktür. Düşük yoğunluk ve dayanıma sahip vermikülit ile geliştirilmiş perlit kullanılarak üretim yapılır.

- Orta mukavemetli hafif betonlar: Basınç dayanımları 7 ila 17 MPa aralığında olan ve birim hacim ağırlığı 1400 ile 1600 kg/m³ arasında olup yapısal olarak basınç dayanım değerleri kabul edilebilir seviyededir. Yalıtım değerleri ise iyi olarak nitelenebilecek değerde olan betonlardır.
- Yapısal hafif betonlar: Dayanım değerleri nispeten daha iyi olan agregalar; geliştirilmiş kil, cüruf, şeyl, pomza kullanılarak elde edilen betonlardır. Basınç dayanımları 17 MPa'dan büyüktür. Birim hacim ağırlığı 1600 ile 1900 kg/m³ arasındadır.

TS EN 206+A2 (2021) standartında hafif betonlar birim hacim ağırlıklarına göre Tablo 1.3'te gösterildiği gibi D 1,0 - D 2,0 skalasında farklı değerlere göre gruplandırılmıştır.

Tablo 1.3: Hafif betonların yoğunluklarına göre sınıflandırılması (TS EN 206+A2)

Yoğunluk Sınıfı	D 1,0	D 1,2	D 1,4	D 1,6	D 1,8	D 2,0
Birim Hacim	≥ 800	≥ 1000	≥ 1200	≥ 1400	≥ 1600	≥ 1800
Ağırlığı (kg/m ³)	≤ 1000	≤ 1200	≤ 1400	≤ 1600	≤ 1800	≤ 2000

Alman standartı olan DIN 1045 esas alındığında ise betonların birim hacim ağırlıklarına göre sınıflandırılması şu şekildedir:

- Hafif betonlar: Birim ağırlık < 2000 kg/m³
- Normal Betonlar: 2000 kg/m³ < birim ağırlık < 2800 kg/m³
- Ağır betonlar: Birim ağırlık > 2800 kg/m³

1.5 Köpük Beton

Hücreli veya gözenekli beton olarak da isimlendirilen köpük beton hafif betonun bir türüdür. Köpük beton esasında içerisinde çimento, su, agrega ve köpük ajanı ile elde edilen köpüğün entegrasyonu ile oluşan kompozit bir malzemedir. Yapısal olarak incelendiğinde hacminin yaklaşık %75-80 oranında kapalı gözenekler yer almaktadır. Köpük betonun hafif olması, ısı ve ses yalıtımı sağlaması, çevreci olması, üretim maliyeti düşük olması

gibi özellikleri ile yapılarda iç ve dış duvar imalatlarında, yapı zeminlerde uygulanan standart yapı malzemeleri yerine kullanılması öngörülen bir malzemedir. (Ekinci, 2014).

Köpük beton dünya üzerinde Amerika, Almanya, Filipinler ve Türkiye gibi çeşitli ülkelerde kullanım alanına sahiptir. Ayrıca sahip olduğu hafif yapı itibariyle farklı yapı elemanlarında yapı malzemesi olarak inşaat sektöründe yer almaktadır (Weigler ve Karl, 1980; Mydin ve Wang, 2011; Amran vd., 2015).

1.5.1 Köpük Betonun Tarihçesi

Tarihsel olarak 2000 yıl kadar öncesinde Romalılar, sıcak kirece, su ile birlikte küçük çakıl ve iri kum ilave edip bir beton karışımı oluşturmuşlardır. Oluşturulan karışıma hayvanlardan elde edilen kanı da entegre etmişlerdir. Karışımında uygulanabilirlik ve dayanım açısından olumlu katkı sunan küçük hava kabarcıklarının meydana geldiğini keşfetmişlerdir. Diğer taraftan ise 5000 yıl öncesinde bu kapsamda mısırlıların aynı mantık ile havayı beton içerisinde hapsetmeleri ile oluşturmuş oldukları kompozit malzeme kalıntılarına rastlamak mümkündür (Aldridge, 2005).

Hava sürüklenmiş çimento bazlı malzemelerin ticari üretimi, 20. yüzyılın başlarında İsveç ve Danimarka'da başlamıştır. Patenti 1923 yılında Axel Eriksson tarafından alınmış olup ilk Portland çimentosu esaslı köpük betona kadar bu alanda veya bu formdaki malzemelerde kayda değer bir gelişme olmamıştır (Beningfield vd., 2005; Jones ve McCarthy, 2005).

Özellikle son 20-25 yıllık süre zarfı dikkate alındığında inşaat sektöründe kullanılan araç, gereç ve ekipmanların daha üstün özelliklere sahip olduğu açıktır. Ayrıca köpük ajanlarında meydana gelen gelişmeler de dikkate alındığında köpük betonun inşaat sektöründe kendine daha fazla yer bulduğu söylenebilir. Buna istinaden daha önce yapılan çalışmalar köpük betonun detaylı bir şekilde özelliklerinin belirlenmesine, davranışının saptanmasına ve daha etkili kullanımına olanak sağlamıştır. Çeşitli çalışmalar köpük betonun yapı ve temel ebatlarında bir küçülme sağladığı, taşınma ve yerleştirmede kolaylıklar sunduğu ayrıca sahip olduğu gözenekli yapısı sayesinde yangın dayanımı, ses yalıtımı ve akustik gibi parametreleri iyileştirdiği tespit edilmiştir (Kunhanandan Nambiar

ve Rammamurthy, 2008; Rammamurthy vd., 2009; Richard ve Ramli, 2013; Amran vd., 2015).

1.5.2 Köpük Betonun Tanımlanması ve Sınıflandırılması

Köpük beton esas itibariyle harcın içine, üretilen köpüğün ya da direkt olarak köpük ajanının ilave edilmesi ile yapısında rastgele boşlukların oluştuğu hafif beton olarak nitelendirilmektedir. Köpük beton sahip olduğu düşük çimento miktarı ve hafif agregalar ile yüksek akıcılığı ve oldukça iyi seviyedeki ısı yalıtım özelliği olan bir malzeme olarak bilinmektedir (Valore, 1954; Richard vd., 1975; Jones ve McCarthy, 2005; Rammamurthy vd., 2009).



Şekil 1.7: Köpük betona dair bir görüntü

ACI 523.2R-96'da (1996), genel anlamda hücreli veya gaz beton şeklinde isimlendirilen malzeme:

Portland çimentosunun kireç ile kum, cüruf veya uçucu kül gibi silisli ince malzemenin, homojen bir boşluk veya hücreli yapıya sahip bir hamur oluşturmak için suyla karıştırılması neticesinde oluşan hafif bir üründür. Esasında hücreli yapıya gaz salınımı gerçekleştiren bir kimyasal tepkime veya mekanik olarak başka gazların entegre edilmesi ile oluşturulur.

Köpük beton İngiliz Çimento Birliğine göre; çimento hamuruna veya harç esaslı karışıma evvelce üretilmiş köpüğün tescilli veya standart bir karıştırma tesisi aracılığıyla ilave edilmesi sonucu elde edilen hafif malzeme olarak ifade edilmiştir (British Cement Association,1994).

Ülkemizde ise TSE K 314 (2014) standardı esas alındığında, köpük beton yapısında düzgün bir şekilde dağılmış 0,1 ile 1,0 mm boyutlarında değişen, yüksek miktarda hava boşluğuna sahip 300 kg/m³ ile 1800 kg/m³ kuru birim ağırlığı olan, mikserde agrega, çimento, su, köpük ajanı ve mineral-kimyasal katkı malzemelerinin harmanlanmasıyla meydana gelen ürün olarak nitelendirilmektedir. Ayrıca köpük betonun sahip olduğu hava içeriğinin bünyesindeki katı hacmin %20'sinden fazla olduğu vurgulanmıştır.

1.5.3 Köpük Betonun Bileşenleri

Köpük betonu oluşturan bileşenler, Portland çimentosu, su, köpük ajanı ve çeşitli ince malzemeler şeklinde sıralanabilir. Ayrıca köpük betona farklı mineral ve kimyasal katkılarında ilave edildiği söylenebilir. Köpük betonu oluşturan malzemeler daha detaylı bir şekilde aşağıda sunulmuştur.

1.5.3.1 Çimento

Genel anlamda Portland çimentosu kalker ve kilin harmanlanarak pişirilmesi ve içerisine üretim aşamasında gereksinim duyulan diğer malzemelerin eklenmesi ile oluşturulan bir yapı malzemesidir. Çimento için farklı tanımlamalar yapmak mümkündür ancak bu kısımda TS EN 197-1:2012 standardı referans alınarak tanımlama yapılacaktır. Su ile birleştirildiğinde hidrasyon reaksiyonlarıyla priz alan ve sertleşen bir hamur meydana getiren, sertleşme sonrasında suyun altında bile kararlılığını ve dayanımını muhafaza eden, ince öğütülmüş inorganik bir malzemedir. Yine bu standartta uygun çimento CEM çimentosu olarak isimlendirilmektedir. Malzeme ve üretim süreçleri kalite güvencesiyle gerçekleştirilen ve bileşimleri istatistiksel homojenliğe sahip çeşitli malzemelerin bir araya getirilmesi CEM çimentoları olarak nitelendirilmektedir.

Köpük betonu meydana getiren ana unsurlardan biri olan çimento, köpük beton içerisinde 75 ila 1400 kg/m³ şeklinde çeşitli dozajlarda kendine uygulama alanı bulmuştur. Fakat

uygulamada bu durum amaç esasına göre 300 ila 500 kg/m³ aralığındadır (British Cement Association, 1994; Jones ve McCarthy, 2005; Papayianni ve Milud, 2005; ACI 523.1R-06, 2006).

1.5.3.2 Agregalar

Köpük beton üretiminde iri agregalar kullanılmamakla beraber boyutu 5 mm geçmeyen ince agregalardan yararlanır. Köpük beton içerisinde genel olarak uçucu kül, kalker, pomza, bazalt, perlit, dolomit gibi agregalar kullanılmaktadır (Ekinci, 2014). İnce agregalar olarak geri dönüştürülmüş agregalarında kullanılabileceği ve bu agregaların köpük betonun özelliklerini iyileştirdiği söylenebilir (Jalal vd., 2017).

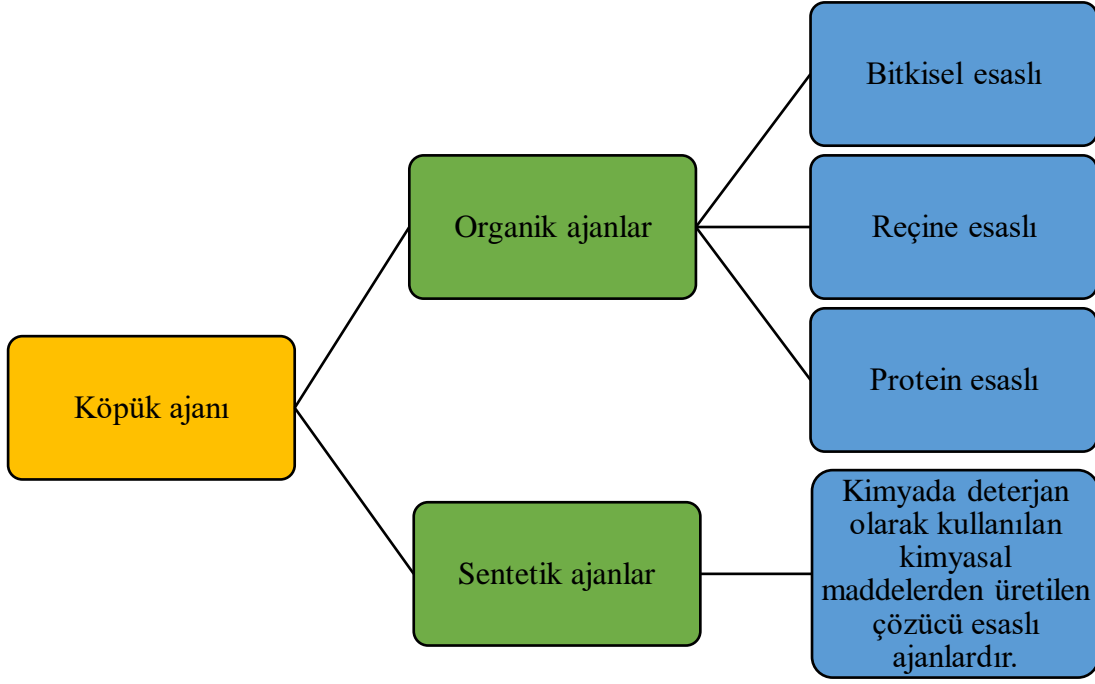
1.5.3.3 Mineral Katkılar

Köpük beton üretiminde çimentoya alternatif olarak çeşitli malzemeler ilave edilebilmektedir. İlave edilen bu malzemelerden bazıları silis dumanı, uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve pirinç kabuğu külü şeklinde sıralanabilir (Rakam vd., 2024). Mineral katkı kullanılması ile kıvam iyileştirilmesi, hidrasyon ısısının kontrol edilmesi ve basınç dayanım değerlerinde değişiklik yapması sağlanmaktadır (Gençel vd., 2022b). Ayrıca ekonomiklik elde etmek ve azaltılmış ekolojik ayak izi sağlamak için mineral katkı kullanılmaktadır.

1.5.3.4 Köpük Ajanı

Beton içerisine hava sürüklemek amacıyla köpük kabarcıklarının oluşmasını sağlayan köpüğün ana malzemesine köpük ajanı denilmektedir. Esasında köpük ajanı 0 ila 2 mm ebatlarındaki hava kabarcıkları içermesi, değişik yoğunluk ve yalıtım parametrelerinde beton harcı üretimi sağlamaktadır (Tuzlak, 2017).

TSE K 134'e (2014) göre köpük ajanı sulu çözelti şeklindeyken suyun yüzey gerilmesini azaltan ve köpük meydana getiren kimyasal bir katkı malzemesi olarak nitelendirilmektedir. Tescilli kaynaklardan elde edilen köpükler sentetik veya organik bazlı olabilirler. Köpük ajanları aşağıdaki Şekil 1.8'de sınıflandırılmıştır.



Şekil 1.8: Köpük ajanlarının sınıflandırılması (Tuzlak, 2017)

Günümüzde kullanılan protein esaslı köpüklerin kaynağında hayvansal ürünler yatmaktayken sentetik esaslı köpükler ise amin ve aminoasitlerden, naftalin sülfonat formaldehit vs.den oluşmaktadır. Ele alınan köpük ajanlarının çevre üzerinde tehlike arz edebilecek birkaç madde içermeleri söz konusu olabilmektedir bundan ötürü kullanılan bu ürünlerin bilhassa formaldehit kondensatlarına dayanan çeşitleri kullanıldığında tedbirli olunmalıdır. Dayanım ve daha iyi kapalı hücreli kabarcık yapısına sahip olan protein esaslı köpükleştiricilere karşın sentetik esaslı köpükleştiriciler daha fazla genleşme ile daha düşük yoğunluk oluşturmaya sahiptirler. Ayrıca protein esaslı köpükler, daha yüksek miktarda havanın girişine olanak tanır ve kararlı hava boşluğu ağı oluşumu sağlarlar. Protein esaslı köpüklerin raf ömrü kısadır. Sentetik esaslı köpüklerin raf ömrü daha uzundur (Ören, 2017).

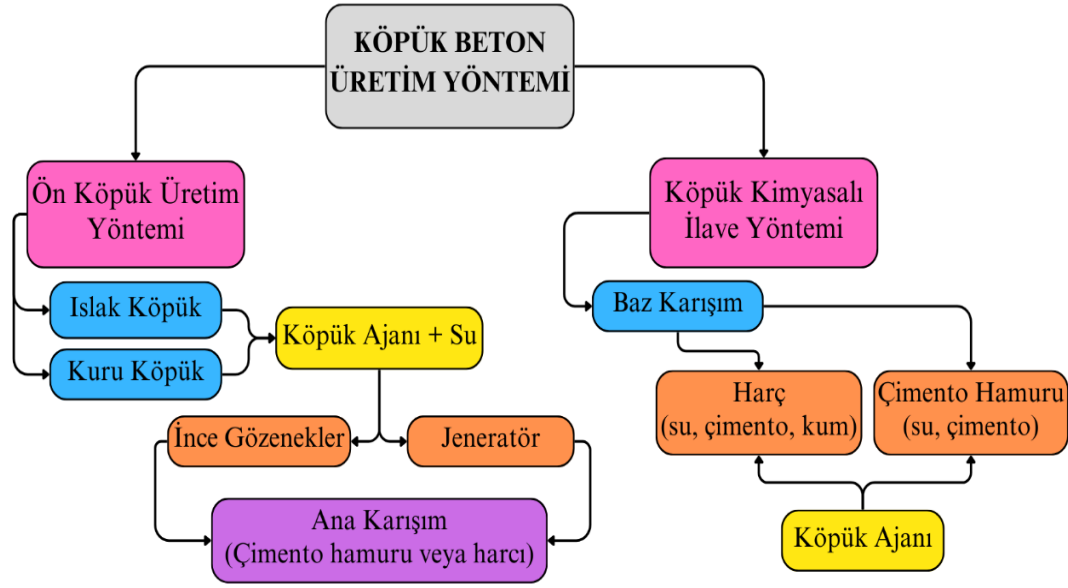
Dikkat edilmesi gereken bir noktada köpük kalitesi olarak ifade edilmektedir. Bu kalitenin tayini aslında köpük ajanının çeşitli değişkenleri doğrultusunda farklılık arz etmektedir. Köpük ajanının; seyreltilme oranı, şekillendirme işlemi, sıkıştırılmış hava basıncı, yoğunluğu, harçla birlikte ilave ve karıştırılma işlemleri köpük kalitesini etkilemektedir (Taylor, 1965: 639). Diğer bir husus ise köpük hacminin oranıdır çünkü köpük hacminin artmasıyla akışkanlığın düştüğü saptanmış ve akışkanlığın karışım esansında önem arz

eden bir etken olduğu belirtilmiştir. Ayrıca karıştırma sũresinin artması ise içeri hapsolan hava miktarının azalmasına neden olacağı vurgulanmıştır (Bindiganavile ve Hoseini, 2019). Yaygın olarak kullanılan kũpũk beton uygulamalarında hava boşluğu oranının toplam karışım hacminin %6'sı ile %35'i aralığında olması ˆnerilmektedir (Penasar, 2013).

1.5.4 Kũpũk Beton ˆretimi

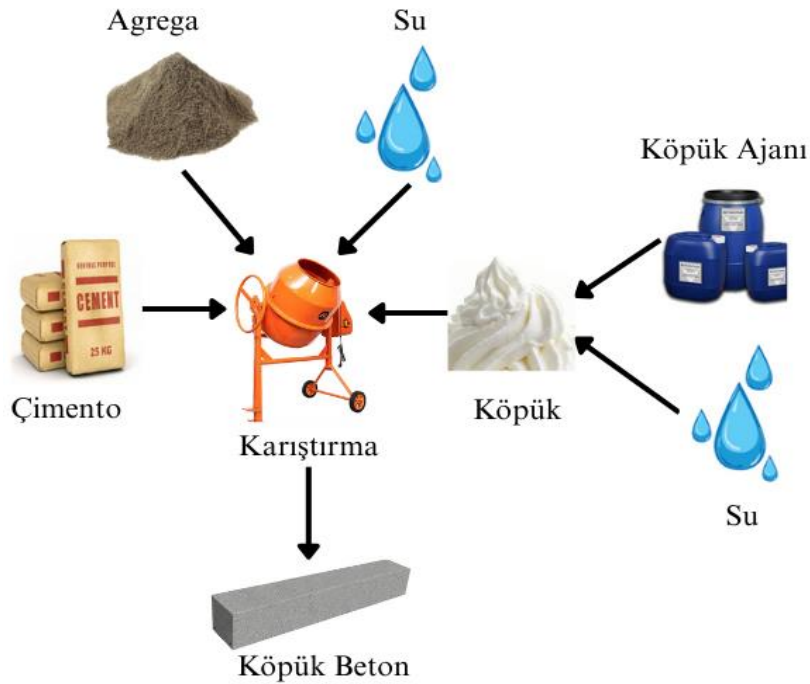
Kũpũk beton ˆretiminde iki temel yaklaşım durumu sˆz konusudur bunlardan ilki evvelce hazırlanmış olan kũpũgũn harç içerisine dahil edilip karıştırılması iken ikinci yaklaşımda karışım sırasında harç içerisine toz kũpũgũn entegrasyonudur (Aldridge, 2005; Nambiar ve Ramamurthy, 2007).

Hamad'da (2014) kũpũk beton ˆretimini ˆn kũpũk ˆretim yˆntemi ve kũpũk ajanının karışıma ilave edilmesi şeklinde iki kategoriye ayırmıştır. ˆn kũpũkleme yˆntemi, tasarlanmış harcın içerisine, ˆnceden su ile kũpũk ajanının karıştırılması ile meydana gelen kũpũgũn harç karışımına dahil edilmesi şeklinde dir. Bu kısımda ˆretilen kũpũk için iki farklı yaklaşım durumu sˆz konusudur. Bu yaklaşımlar ıslak kũpũk ve kuru kũpũk olarak nitelendirilmektedir. Islak kũpũk, kũpũk maddesinin su ile seyreltikten sonra ince bir hasır ˆzerine pũskũrtũlmesi ile ˆretilmektedir. 2 ila 5 mm aralığında boyuta sahiptir. Kabarcık yapısının geniş olması ve kısmen kararlı olmasına karşın yoğunluğu dũřũk olan kũpũk betonların tasarlanmasında kullanımının tavsiye edilmediği sˆylenebilir (ˆren ve Gençel, 2017). Kuru kũpũk, kũpũk ajanının su ile seyreltikten sonra kũpũk oluşturma makinasının basıncılı hava ˆzelliđi ile kũpũk haline dˆnũřmesi olarak ifade edilebilir. Kuru kũpũk azami kararlılığa ve 1 mm'den daha kũũk boyuta sahiptir ve bu durum pompalanabilirliğini kolaylaştırmaktadır (Aldridge, 2005). Kũpũk kimyasalının karışıma ilave edildiği ikinci kategoride ise esas karışım bileşenlerine yˆzey aktif ajanı ilavesi yapılarak hũcresel forma sahip kũpũk beton elde edilir.



Şekil 1.9: Köpük beton üretim yöntemi (Hamad, 2014)

Köpük beton üretiminde yaygın yöntem, önceden elde edilmiş köpüğün karışıma dahil edilmesidir. Diğer bir ifade ile önceden oluşturulmuş köpük yöntemidir. Bu yöntem esas itibari ile üç kısma ayrılır. Bu kısımlar harcın hazırlanması, köpüğün evvelce hazırlanması ve basınçlı hava yardımıyla köpüğün oluşturulmasıdır (Hamidah vd., 2005).



Şekil 1.10: Köpük betonun karıştırma ve üretimine ait örnek

1.5.5 Köpük Betonun Özellikleri

Köpük betonun sahip olduğu özellikleri etkileyen birçok değişken vardır. Bu değişkenler köpük ajanı, çimento, mineral ve kimyasal katkıları, agregalar, karışım tasarımı, üretim şekli, köpük hacmi şeklinde sıralanabilir (Bindiganavile ve Hoseini, 2019). Bu kısımda köpük betonların sahip olduğu çeşitli özellikler hakkında genel bilgiler ise aşağıdaki gibidir.

1.5.5.1 Taze Köpük Betonun Özellikleri

Taze formdaki köpük beton kendiliğinden yerleşen ve yayılan yani serbestçe akan bir malzeme olması münasebetiyle çökme göstermesi beklenir, lakin tiksotropik bir davranışa sahip olduğu bilinmektedir (British Cement Association, 1994). Düzensiz ve sınırlı boşluklara rahatlıkla akar ve pompalanması rahattır. (British Cement Association, 1994; Jones ve McCarthy, 2005).

İşlenebilirlik taze betonun en önemli özelliği olarak nitelendirilebilir. Kıvam, sıkışabilirlik akışkanlık tanımlarını da kapsayan işlenebilirlik, en düşük enerji sarfiyatıyla taze betonun karılması ve ayrışmadan yani homojen olarak kalıba eksiksiz yerleşmesi özelliğidir (Şahin ve Taşdemir, 2007). Köpük beton bünyesinde yüksek miktarda hava gözenekleri bulundurması sebebiyle işlenebilirliği yüksektir.

1.5.5.2 Sertleşmiş Köpük Betonun Özellikleri

Sertleşmiş köpük betonun özellikleri esas olarak üç ayrı sınıflandırmadan oluşmaktadır. Bunlar; kuruma büzülmesi, su emme, gözeneklilik ve birim hacim ağırlık gibi özellikleri bünyesinde barındıran fiziksel sınıf, basınç ve eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı gibi özellikleri bünyesinde barındıran mekanik sınıf, yangın dayanımı ve akustik gibi özellikleri bünyesinde barındıran fonksiyonel sınıf olarak ifade edilebilir (Ramamurthy vd., 2009).

Birim Hacim Ağırlık

Birim hacim ağırlık tespiti taze halde ve sertleşmiş halde ayrı ayrı gerçekleştirilebilmektedir. Taze ve kuru yoğunluk arasında farkın genel olarak 100 – 120

kg/m³ aralığında olması tavsiye edilmektedir. Kuru yoğunluk esas itibariyle köpük betonun mekanik, fiziksel ve dayanıklılık özellikleri üzerinde etkin rol oynarken, taze yoğunluk tasarım karışımı ve dökme kontrolü için gerekli hesaplamaları sağlar (Gençel vd., 2022b). Taze ve kuru birim ağırlık arasında oluşan fark karışımda kullanılan agrega miktarı ve türü, çimento ve su miktarı ile üretim yöntemleri ile ilişkilidir. Köpük betonların birim ağırlık değerleri genel olarak 150 ile 1840 kg/m³ aralığında olduğu söylenebilir (Köksal vd., 2020).

Su Emme

Beton tarafından kendi bünyesine fiziksel olarak su çekilmesi olayı su emme olarak nitelendirilmektedir. Beton içerisindeki boşluk hacminin miktarı diğer bir yaklaşımla birim hacim ağırlık değeri ile betonun su emme miktarı ilişkilidir. Su emme mekanizması, ilk olarak iri boyutlu gözeneklerin akabinde ise küçük boyutlu gözeneklerin su ile dolması ile gerçekleşmektedir. Bu sebeptir ki su emme başlangıçta yüksek ve zamanla azalan bir hızla ilerlemektedir. Su emme miktarı boşluk hacmi, karışıma dahil olan malzemelerin cinsi ve oranı, gözenek yapısı ve köpük stabilitesi gibi çeşitli unsurlardan etkilenmektedir. Ayrıca betonun dayanım değerlerini etkileyen parametrelerden biridir (Nergiz, 2007).

Köpük betonun su emme kapasitesi ile birim hacim ağırlığı birbiriyle bağlantılıdır. Birim hacim ağırlık azaldığında su emme kapasitesi artış göstermektedir. 700-1800 kg/m³ birim hacim ağırlık aralığında su emme %15-35 aralığında değişmektedir (Ören ve Gençel, 2017).

Porozite (Gözeneklilik)

Köpük betonun sahip olduğu çeşitli özellikler gözeneklilik ile ilişkilendirilebilir. Gözeneklerin miktarı, dağılımı, büyüklüğü ve aralarındaki bağlar köpük betonun yük vb. etkenlere karşı nasıl bir davranış sergileyeceğini etkileyen esas faktörlerdendir. Gözenekler genel anlamda jel gözenekleri, kılcal gözenekler ve makro gözenekler olarak sınıflandırılmaktadır. Köpük betonun gözenek durumu bileşenlerin cinsi, oranları ve özellikleri ile ilişkilendirilmesine karşın esas belirleyicinin köpük ajanının bünyesinde barındırdığı gözenek yapısıdır (Bodur vd., 2021). Köpük betonların sahip olduğu gözenek aralığı %20-95 şeklinde geniş bir yelpazeye sahiptir (Köksal vd., 2020).

Basınç Dayanımı

Köpük içeren ve içermeyen beton arasında basınç dayanımında fark oluşması beklenmektedir. Bunun asıl sebebi kuşkusuz ki köpük miktarının karışımda artması harç miktarını azaltacak yani kuru yoğunluğu düşürecektir. Kuru yoğunluğun azalması basınç dayanımında düşüş meydana getirecektir. Ören ve Gençel (2017) basınç dayanımı üzerinde daha belirleyici parametrenin yoğunluk olduğu ve yoğunlukta oluşan azalmanın katlanarak basınç dayanımında düşüş yarattığı belirtmiştir.

Köpük betonda basınç dayanımı karışımın ve köpük ajanının sahip olduğu özelliklere dayalı bir fonksiyon olarak nitelendirilmektedir (Brady vd., 2001). Karışımın sahip olduğu bileşenler ve oranlar, yoğunluk, beton yaşı, kürlenme yöntemi ve süresi basınç dayanımı üzerinde etkin rol oynamaktadır. Köpük betonların basınç dayanımlarının 0,1-43 MPa gibi değerler alabileceği belirtilebilir (Köksal vd., 2020).

Falliano vd. (2018) yapmış oldukları çalışmada köpük betonların basınç dayanımları üzerinde rol oynayan çeşitli parametrelerin etkinliğini irdelemişlerdir. Bu kapsamda sabit su/çimento oranına ve 350 ila 850 kg/m³ aralığındaki kuru yoğunluğa sahip 109 adet köpük beton üretilmiştir. İki farklı çimento türü, üç farklı köpük ajanı ve çeşitli kür koşullarının ele alınması ile irdeleme gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak yoğunluk ile basınç dayanımı arasında doğrusal bir ilişki olduğu ve protein esaslı köpük ajanının basınç dayanımında daha belirgin rol oynadığı ifade edilmiştir.

Eğilme Dayanımı

Köpük betonun eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki oran 0,2 ile 0,4 aralığında değişkenlik göstermektedir. Ayrıca bu oranın normal betona göre daha yüksek bir değer olduğu ifade edilebilir (Byun vd., 1998). Köpük betonların eğilme dayanımı, hafif agregalı ve eşdeğer normal ağırlıktaki betona kıyasla daha düşüktür. Narayanan ve Ramamurthy (2000) eğilme dayanımının basınç dayanımına oranının 300 kg/m³'den daha düşük yoğunluktaki köpük betonlarda 0,15 ile 0,35 arasında olduğunu ifade etmişlerdir. Eğilme dayanımı üzerinde etkin rol oynayan parametrelerden biri lif takviyesidir. Yeterli uzunluk, sayı ve büyüklükteki lifler ile köpük betonların eğilme dayanımı artırılabilir.

Isıl İletkenlik

Betonun ısı iletkenlik değeri gözeneklilik ve kuru yoğunluk ile ilişkilidir. Köpük betonlar bünyesinde yer alan boşluklar sayesinde düşük ısı iletkenlik değerine sahiptirler diğer bir ifade ile yalıtım değerleri yüksektir. Bu özellik ile köpük betonlarla yapılardaki soğutma ve ısıtma için kullanılan enerji sarfiyatının düşürülebileceği vurgulanabilir. Köpük oranının değişmesi kuru yoğunluğu değiştirmekte, kuru yoğunluktaki değişim ise ısı iletkenlik değerini etkilemektedir (Li vd., 2020). Yoğunluk, agrega türü, gözenek boyutu, mineral katkı içermesi köpük betonların ısı iletkenlik parametresi üzerinde değişkenlik göstermektedir (Raj vd., 2019).

Kuru yoğunluk değeri arttıkça ısı iletkenlik değeri artış göstermektedir. Kuru yoğunluk değeri 600 ile 1600 kg/m³ arasında olan köpük betonların ısı iletkenliği 0,1 W/mK ile 0,7 W/mK arasındadır (Jones ve McCarthy, 2005). Kuru yoğunluktaki azalma ısı iletkenlik değerinde düşüş meydana getirir. 1200 kg/m³ kuru yoğunlukta ısı iletkenlik katsayısı 0,38-0,42 W/mK aralığında iken 1000 kg/m³ kuru yoğunlukta bu değer 0,23-0,30 W/mK aralığındadır (British Cement Association, 1994).

Yüksek Sıcaklık Dayanımı

Yüksek sıcaklık etkisi ile betonda oluşacak dayanım kaybı çimento ve agrega çeşidine göre değişkenlik göstermektedir. Köpük betonun sahip olduğu özellikler ile yangına karşı dayanım gösterme kabiliyeti yüksektir. Normal ağırlıklı betona kıyasla düşük sıcaklıklarda daha iyi bir yangın dayanımı sergilemektedir (Ören ve Gençel, 2017).

Köpük beton, yüksek buharlaşma oranı ile yüksek sıcaklıklar altında aşırı büzülme sergiler (Gençel vd., 2022b). Köpük betonun basınç dayanımı 400°C'ye ulaşmadan hafifçe artar. Bu durum bağlayıcıların reaktivitesinin yüksek sıcaklıklarda uyarılması olarak açıklanabilir. Ancak sıcaklığın artması devam ettikçe mukavemeti giderek azalmaktadır (Shi vd., 2021). Ayrıca köpük betonların boşluk yapıları yüksek sıcaklığın yıpratıcı etkisini azaltmaktadır (Canbaz vd., 2019). Gözenek yapısının yoğunluk ile ilişkili olduğu ve yüksek sıcaklıklarda köpük betonun etkilenmediği ifade edilmiş olup mukavemet kaybının köpük betonun kimyasal bileşenlerden ileri geldiği belirtilmiştir (Mydin ve Wang, 2012).

Donma-Çözülme Dayanımı

Betonun servis ömrü boyunca oluşabilecek dayanıklılık problemlerinden biri de donma-çözülme döngüsüdür (Zhou ve Su, 2023). Donma-çözülme sırasında betona su girişi olmakta ve giren su donmaktadır. Donmakta olan su beton içerisinde bir gerilme oluşturmaktadır. Sıcaklığın yükselmesi ile buz erimekte ve beton içerisine daha fazla su girecek bir boşluk oluşmaktadır. Bu çevrim devam ettikçe beton üzerinde çatlak oluşumuna, kütle kaybına ve mekanik özelliklerin azalmasına neden olmaktadır (Koci ve Cerny, 2022).

Köpük betonun gözenekli yapısı bünyesine su girişi sağlayan kanallar görevi üstlenmesi sebebiyle donma-çözülmeye karşı savunmasız hale gelmesine neden olmaktadır. Bu sebeple köpük betonlar maruz kaldıkları donma-çözülme döngüleri neticesinde kütle ve basınç dayanımı kaybına uğrayabilirler (Zhang vd., 2022).

Diğer yaklaşımda ise köpük betonun geleneksel betona nispeten daha üstün bir donma-çözülme direncine sahip olduğunu belirtmiş bunun sebebinin normal betonda kılcal gözeneklerde suyun donup genişlemesine karşın köpük beton bünyesinde yer alan geniş gözeneklerin suya doymaması veya donan suyun büyük gözenekler üzerinde hasar oluşturmamasıdır (Bindiganavile ve Hoseini, 2019).

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Çalışmada literatür özetinin daha etkin olarak aktarılabilmesi için köpük beton ve ferrokrom cürufu için ayrı ayrı literatür taraması gerçekleştirilmiş ve başlıklar aşağıdaki gibi sunulmuştur.

2.1 Köpük Betona Ait Literatür Özeti

Bekaroğlu (2012) yapmış olduğu çalışmada Kayseri bölgesine ait pomza agregası kullanarak kompozit yapıya haiz polimerik selüloz bileşenli köpük beton üretimini hedeflemiştir. Bu kapsamda üretilen numunelere farklı standartlar dikkate alınarak çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak ise oluşturulan kompozit malzemenin ısı yalıtım değeri ile su buharı geçirgenliği değerinin gayet iyi olduğu saptanmıştır. Kullanılan polimerlerin malzemenin porozitesini arttırmasıyla birim hacim kütle değerinde düşüş sağladığı saptanmıştır. Böylece ısı yalıtımında kayda değer olumlu etki yarattığı bulunmuştur.

Davraz vd. (2016) kalker tozu, polipropilen elyaf, süper akışkanlaştırıcı ve protein esaslı köpük ajanı ile 300-1400 kg/m³ yoğunluk aralığında köpük betonlar üretmiş ve üretilen numunelerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri irdelenmiştir. Üretilen köpük beton numunelerinin kuru yoğunluk, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve ısıl iletkenlik özellikleri incelenmiştir, elde edilen bulgulardan kuru yoğunluğa bağlı basınç dayanımı, çekme dayanımı ve ısıl iletkenlik katsayılarının tahminine yönelik bağıntılar önerilmiştir. Basınç dayanımlarının 1 ila 11 MPa aralığında, ısıl iletkenlik katsayılarının ise 90 ila 500 mW/mK aralığında değiştiği tespit edilmiştir.

Tuzlak (2017) taze beton reolojisinin köpük betonun özellikleri üzerindeki etkinliğini irdelemek için yapmış olduğu çalışmada agrega boyutları ile tane boyutlarını değiştirmeden su-çimento oranı, çimento dozajı ve köpük miktarını değiştirerek köpük betonlar üretmiştir. Köpük beton reolojisi ile taze beton özelliklerinin; ısıl iletkenlik ve dayanım üzerindeki etkisi irdelenmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak ise ısıl iletkenlik ve dayanım parametrelerinin birim hacim ağırlık ile ilişki olduğu saptanmış ve Herschel-Bulkley modeli ile köpük betonun reoloji özelliklerinin tanımlanabileceği saptanmıştır.

Dakman (2017) yapmış olduğu çalışmada köpük betonun yapısındaki fiziksel-mekanik ve mikroskobik farklılıkların yüksek sıcaklık altında nasıl değiştini irdelemiştir. İlk olarak farklı hacimsel oranlara sahip köpük solüsyonları ilave edilerek oluşturulan köpük beton numunelerinin yüksek sıcaklık altında en iyi performans değeri saptanmaya çalışılmıştır. Kullanılan şartname esas alınarak oluşturulan köpük solüsyonları çimento harcına %0, %20, %40, %60 hacimsel olarak eklenmiş ve 80 adet 15×15×15 cm boyutunda numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 28 gün boyunca kür havuzunda bekletilmiş ve her bir gruptan üçer adet 15×15×15 cm ve üçer adet 5×5×5 cm boyutundaki numuneler hazır hale getirilmiştir. Numuneler 20°C, 100°C, 400°C ve 700°C sıcaklığa 3 saat tabi tutulmuş ve işlem sonucunda 24 saat soğumaya bırakılmışlardır akabinde gerekli mühendislik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak köpük solüsyonu miktarıyla ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımının arttığı, elastisite modülünün düştüğü tespit edilmiştir. 100°C’de büzülmeden dolayı numune boyutlarında küçülme saptanmış daha sonraki sıcaklıklarda ise mikro çatlaklar oluşumu nedeniyle boşluk formunda artış tespit edilmiştir.

Lim vd. (2017) yapmış oldukları çalışmada taş kesme, kırma, eleme ve öğütme sonucu bir yan ürün olarak ortaya çıkan taş ocağı tozunun çok miktarda bulunması ve çevre problemleri oluşturması nedeniyle nehir kumu yerine alternatif olarak köpük betonda değerlendirilmesini ele almıştır. Kum yerine taş ocağı tozu %75 ve %100 oranlarında kullanılmıştır. Dört farklı su oranı dikkate alınarak numuneler oluşturulmuştur. Yüksek hacimli taş ocağı tozunun belirli bir su/çimento oranı için akışkanlıkta düşüş sergilediği ve köpük betonun termal iletkenliği ile basınç dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir.

Rybakov vd. (2018) diatomit, mikro silika, perlit, vermikülit ve granit kullanılarak köpük beton numuneleri oluşturmuşlardır. Kullanılan çeşitli katkı maddelerinin köpük betonun nem göstergesi ve mukavemeti üzerine bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Dayanım olarak en iyi sonucu perlit ilaveli köpük betonların sağladığı tespit edilmiştir. Vermikülit ilaveli köpük betonların ise en düşük neme sahip oldukları bulunmuştur.

Işıldar (2018) yapmış olduğu çalışmada hafif beton türü olan köpük betonun rötre çatlaklarının güncel bir problem olarak önemini koruduğu vurgulamış bu kapsamda köpük ajanı (350, 500, 650 kg/m³) kullanarak perlit ve uçucu kül ilavesinin köpük betonun kuruma büzülmesi parametresinde nasıl bir etki yaratacağı irdelenmiştir. Su-bağlayıcı miktarı sabit bırakıldığında 28 günlük genleşme oranlarında uçucu külün etkili bileşen

olduğu saptanmış 151. gün sonunda en kk rötre oranında bu numuneye ait olduğu vurgulanmıştır. Perlit ve uçucu külün köpük ajanı miktarı ile basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımında asıl rolü oynadığı saptanmıştır.

Atabey (2018) endüstriyel atık olarak ifade edilen mermer tozu, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ilavesi ile köpük beton bloklar üretmiştir. Mermer tozunun ana ham madde olarak kullanılabilirliğini incelemiştir. Çimento oranının %0,5'i oranına tekabül eden değerde polipropilen elyaf kullanmıştır. 15×15×15 cm boyutlarında numuneler üretmiş ve çeşitli testler gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda numunelerin ısıl iletkenlikleri 0,14 ile 0,20 W/mK değerleri arasında tayin edilmiş ve rötre değerleri ise mermer tozu ilave edilen numunelerde %0,09 olarak gerçekleşmiştir. %0,11 olan en büyük rötre değerinin uçucu kül kullanılan seriye ait olduğu bulunmuştur. Numunelerin basınç dayanım değerleri ise 1,60–4,35 MPa arasında değerler aldığı saptanmıştır.

Türeyen (2019) vermikülit tozu ilave edilerek oluşturulan köpük betonların fiziksel-mekanik özelliklerini irdelemiştir. Köpük betonların üretim aşamasında imento, genleştirilmiş vermikülit tozu ve 3 farklı değerde köpük miktarları kullanılarak 27 seri numune üretimi gerçekleştirmiştir. Üretilen numuneler çeşitli testlere tabi tutulmuş ve sonuçlar tayin edilmiştir. Sonuçlar ele alındığında ise köpük ve genleştirilmiş vermikülit oranı ile birim ağırlığın ve basınç dayanımının ters orantılı, su emme ile porozitenin doğru orantılı olduğu saptanmıştır. Ayrıca köpük oranı ile genleştirilmiş vermikülit oranındaki artışa göre termal iletkenlik katsayısının düştüğü tespit edilmiştir. 405 kg/m³ ile minimum kuru birim ağırlık değerleri elde edilmiştir. Maksimum su emme ile porozite değerleri %75,2 ve %40,3 olarak tespit edilmiştir. 0,063 W/mK ile minimum termal iletkenlik katsayısı kaydedilmiştir. Köpük betonların 0,47-3,49 MPa aralığında basınç dayanımları sergilediği ifade edilmiştir.

Dede (2019) yapmış olduğu çalışmada ısı ve ses yalıtımı özelliğinden dolayı enerji ve evre koruma niteliğine sahip bir yapı malzemesi olan ve binaların dış duvarlarında uygulama alanı bulan düşük yoğunluğa sahip bir köpük beton oluşturmuştur. Numuneler ise uçucu kül, Portland imentosu, hidrojen peroksit, ince kum ve kimyasal katkılar ilave edilerek oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında ilk olarak deneme dökümleri gerçekleştirilmesine karşın dikkate alınan yönetmelikte belirlenen 1,5 MPa basınç dayanımına erişilememiştir. Akabinde karışım reçetesine 5 farklı oranda uçucu kül

eklenmiştir. Eklenen uçucu külün köpük betonların dayanım ve birim ağırlık değerlerinde olumlu bir etki yarattığı saptanmıştır. Ayrıca süper akışkanlaştırıcı numunelere entegre edilerek mukavemet değerleri kıyaslanmaya çalışılmıştır. Uçucu kül ilavesinin betonun mukavemet değerlerini iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Ören vd. (2020) köpük beton üretiminde bağlayıcı malzeme olarak uçu kül, ince agrega olarak granüle yüksek fırın cürufu ve protein esaslı köpük ajanı kullanmışlardır. Toplamda 9 seri köpük beton üretilmiş ve köpük betonlara çeşitli mühendislik testleri uygulanmıştır. Sonuç olarak bağlayıcı içeriğinin azalmasıyla artan su/bağlayıcı oranının köpük betonların porozitesinde artışa neden olmasına karşın birim hacim ağırlık, basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı gibi parametrelerde bir düşüşe yol açtığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda, daha yüksek su/bağlayıcı oranında kum ikamesi %100 olan granüle yüksek fırın cürufu köpük betonların, kontrol köpük betonunkinden daha düşük, birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı ve ısı iletkenlik sergilediği ve daha yüksek bir basınç dayanımı sağladığı bulunmuştur.

Yanardağ (2020) yapmış olduğu çalışmada kalsiyum alüminat çimentosu ihtiva eden köpük beton tasarlayarak mühendislik özelliklerini irdelemeye çalışmış ve geliştirme yönteminden faydalanarak alternatif hafif beton üretimi de araştırmıştır. Bu kapsamda içerisinde; kalsiyum alüminat çimentosu, karboksimetil selüloz, lityum karbonat, potasyum iyodür, hidrojen peroksit, genişmiş perlit ve köpük kullanılarak oluşturulan numunelerde 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değerinin $\leq 500 \text{ kg/m}^3$ ve 45 günlük basınç dayanım değerinin ise $\geq 250 \text{ kPa}$ bulunması hedeflenmiştir. Numuneler çalışma süresince 141-546 kg/m^3 aralığında kuru birim hacim ağırlık ve 61-1538 kPa aralığında basınç dayanımı değerlerine erişmiştir. Genleştirme yöntemiyle üretilen numunelerin hedeflenen değerlere en yakın sonuçları verdiği tespit edilmiştir.

Kocakerimoğlu (2020) sentetik bazlı köpük ajanı ve CEM I 42,5 Portland çimentosu kullanarak köpük beton üretmiştir. Yapılan çalışmada kıyaslanabilir sonuçlar elde etmek için mineral katkı olarak uçucu kül, doğal kum ve geliştirilmiş perlit kullanılmıştır. Ayrıca polikarboksilik esaslı akışkanlaştırıcı kullanılarak karışım suyunun azaltılması hedeflenmiş ve alkali aktivatör olarak ise NaOH, hidrasyonu hızlandırmak için ise CaCl_2 belirli oranlarda karışıma entegre edilmiştir. Polipropilen lif katkısıyla da oluşması muhtemel rötre çatlakları engellenmeye çalışılmıştır. Köpük beton numuneleri 460-630

kg/m³ aralığında üretilmiştir. Numunelere 60°C sıcaklıkta buhar kürü uygulanarak dayanım kazandırılmıştır. Numuneler üzerinde farklı mühendislik testleri gerçekleştirilmiş ve irdelenmiştir. Sonuç olarak bünyesinde genleştirilmiş perlit ihtiva eden köpük betonların diğer karışımlara nazaran daha düşük ısı iletim değerlerine sahip olduğu saptanmıştır. Doğal kum ilave edilen numunelerin uçucu kül ilave edilen numunelere göre mekanik özellikler bakımından daha iyi sonuçlar gösterdiği tespit edilmiştir.

Köksal vd. (2020) yapmış oldukları çalışmayla ısı yalıtım özelliği gösteren köpük beton üretimine yoğunlaşmışlardır. Bu kapsamda köpük betonların oluşturulmasında sırasıyla silis dumanı, çimento, genleşmiş vermikülit tozu ile çeşitli konsantrasyonlar elde etmek için protein esaslı köpük ajanı kullanmışlardır. Oluşturulan numunelere çeşitli deneyler uygulanmış ve sonuç olarak, basınç dayanımları 0,4–3,7 MPa, kuru birim ağırlıkları 587–1040 kg/m³ olan köpük betonların, 0,059-0,237 W/mK termal iletkenlik ve %70,6-%89,5 gözeneklilik değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Genleşmiş vermikülit tozuna sahip köpük betonlar, termal iletkenlik açısından umut verici sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Gençel vd. (2021a) uçucu kül ve geri dönüştürülmüş ince beton agregası ihtiva eden köpük betonlar üzerinde bir inceleme yapmışlardır. Bu kapsamda köpük betona kum yerine değişik oranlarda geri dönüştürülmüş beton agregası eklenerek üretimler yapılmış ve çeşitli parametreler incelenmiştir. İnceleme neticesinde geri dönüştürülmüş beton agregası ilavesinin ultrases geçiş hızı, dinamik elastisite modülü ve termal iletkenlik gibi değerlerde düşüşe karşın porozite ve su emme değerlerinde hafif bir artışa yol açtığı saptanmıştır. Bulgular, çevresel faydalara katkı sağlayacak hafif yapı malzemelerinin üretimine yönelik bir beklenti oluşturmuştur.

Elabade (2021) yapmış olduğu çalışmada çimento yerine pirinç kabuğu külü ve kum yerine atık mermer tozu yerleştirmiştir. Yüksek sıcaklık ve donma çözünme döngüsüne tabi tutulan köpük betonun çeşitli özellikleri irdelenmiştir. Bu kapsamda hazırlanmış reçeteye çeşitli numuneler oluşturulmuştur. Sonuç olarak 40 kg/m³ köpük içeriğine sahip, çimento ikamesi %10 pirinç kabuğu külü ve kum ikamesi %50 atık mermer tozu olan numunenin 90 günlük yaşlarda optimum yüzdeyi verdiği saptanmıştır. En düşük kapilarite ise %10 pirinç kabuğu külü ve %25 atık mermer tozu kullanıldığında elde edilmiştir.

Yarar (2021) bazalt lif ve atık mermer tozu ihtiva eden köpük betonun özelliklerini irdelenmiştir. Bu kapsamda köpük içeriği 30 kg/m³, 40 kg/m³, 50 kg/m³ olarak alınmıştır. Karışım hacminin %0, %1 ve %2 oranında bazalt lif içeriğine sahip köpük betonun birçok parametresi incelenmiştir. Çalışma kapsamında çeşitli testler için farklı ebatlara sahip numuneler üretilmiş ve gerekli incelemeler yapılmıştır. Sonuçlar ise;

- Yayılma çapları 18,3-8,4 cm
- Porozite %24,43-12,6
- Su emme %16,91-6,86
- Kuru birim hacim ağırlık 1924-1370 kg/m³
- Eğilme dayanımı (28 gün) 12,22-4,09 MPa
- Basınç dayanımı (28 gün) 33,53-19,4 MPa
- Kuruma büzülmesi (90 gün) 751-1951 µm
- Kapilarite 1,91-6,72 mm
- Termal iletkenlik katsayısı 0,645-0,757 W/mK arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

Kurtuluş (2021) Endüstriyel atık olarak ortaya çıkan uçucu kül ile öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun geri dönüşüm ile kazanılması ve ekonomik olarak kayıpların azaltılması amacıyla çalışma planlamıştır. Bu kapsamda uçucu külün geopolimer köpük beton üretiminde kullanılabilirliği irdelenmiştir. Çalışmada 54 seriye sahip reçete oluşturulmuştur. Geopolimer köpük betonun mekanik-fiziksel özelliklerinin uçucu kül miktarı, kürlenme sıcaklığı, molarite, kalsiyum stearat miktarı, perlit miktarı ve hidrojen peroksit miktarı ile nasıl değiştiği irdelenmiştir. Sonuç olarak ise kuruma büzülmesi probleminin katkı maddesi olarak kullanılan kalsiyum stearat ile azaldığı tespit edilmiştir. 350 kg/m³ yoğunluk değeri ile 1 MPa üstünde mukavemet değerlerine erişilmiştir. Isıl iletkenlik değeri 0,089 W/mK olan geopolimer köpük beton üretimi gerçekleştirilmiştir.

Öztürk Yarar (2021) ince agrega, polipropilen lif ve taban külü barındıran köpük betonun çeşitli özelliklerini irdelenmiştir. Bu kapsamda çimento dozajı 300 kg/m³ ve 400 kg/m³ köpük dozajı ise 40 kg/m³, 50 kg/m³, 60 kg/m³ olarak alınmıştır. Ayrıca köpük betonlara hacimce %0, %0,5 ve % 1 propilen lif eklenmiştir. Sonuçlar ise aşağıdaki gibi bulunmuştur;

- Köpük miktarının artmasıyla görünür porozite, kapilarite ve su emme değerleri artmıştır.
- Çimento, propilen lif ve köpük miktarının artması gözeneklilik, büzülme ve ısı iletkenlik değerlerini düşürmüştür.
- Yüksek sıcaklık sonucunda, köpük ajanı miktarı köpük betonun kütle kaybında bir azalmaya ve basınç dayanımı ile eğilme dayanımında bir artışa neden olduğu saptanmıştır.
- Ayrıca yüksek oranda köpük içeriği, polipropilen lif ve çimento içeriğine haiz köpük betonun donma-çözülme direncini arttırdığı tespit edilmiştir. Sonuçlar dikkate alındığında taban külü ve polipropilen lif ihtiva eden köpük beton numunelerinin Amerikan Beton Enstitüsü yönergesine göre orta mukavemetli beton olarak nitelendirilebileceği vurgulanmıştır. Bu durumun sürdürülebilir yapı tasarımına olumlu katkı sağlayacağı vurgulanmıştır.

Varlı (2021) köpük betonun çekme yüklerine karşı zayıf olmasından ötürü çeşitli durumlarda çatladığını vurgulamış, bu kapsamda 3 boyutlu tekstil köpük betona entegre edilerek deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak 3 boyutlu tekstil kullanımının deney numunelerinin mekanik özelliklerine olumlu katkı sağladığı tespit edilmiş ve bu katkı oranlarının eğilme dayanımında %46'lık artış, basınç dayanımında %23'lük artış sergilediği ifade edilmiştir. Ayrıca kum/bağlayıcı oranı ile boşluk oranının paralel olduğu tespit edilmiştir.

Li vd. (2021) uçucu külü ıslak öğütme işlemi ile işlemiş ve Portland çimentosu ile yaş öğütülmüş uçucu külü kullanarak köpük beton tasarlamıştır. Islak öğütülmüş uçucu külün, ıslak/kuru yoğunluk ve basınç dayanımı dâhil olmak üzere köpük betonun temel performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak ıslak öğütülmüş uçucu kül yerine çimento kullanılan köpük betonun yüksek aktiviteye sahip olduğu ve ıslak öğütülmüş uçucu külün daha iyi bir performans gösterdiği vurgulanmıştır.

Balcı (2022) yapmış olduğu çalışmada köpük betona agrega malzemesi olarak geri dönüştürülmüş ince beton agregası, kalker ve taban külü entegre ederek elde edilen kompozit malzemenin fiziko-mekanik ve termo-dayanıklılık gibi özelliklerini irdelemiştir. Bu kapsamda üretilmiş 25 adet karışıma mühendislik testleri uygulanarak sonuçlar elde

edilmiştir. Sonuç olarak ise fiziko-mekanik bakımdan taban külü ve geri dönüştürülmüş ince agrega ile üretilen köpük betonların kalker ile üretilen köpük betonlara nispeten daha iyi bir sonuç gösterdiği saptanmıştır. Çalışmanın yalıtım açısından önemi de vurgulanmıştır.

Söylemez (2022) köpük betonda atık lastik ve silis dumanı kullanarak elde edilen kompozit malzemenin H_2SO_4 ve donma çözünme maruziyeti sonucunda mekanik, kapilarite ve aşınma özelliklerini irdelemiştir. Çalışmada Portland çimentosunun yerine %0 ve %20 oranında silis dumanı ile ince agrega olarak %100 atık lastik kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca 300 kg/m^3 , 400 kg/m^3 , 500 kg/m^3 çimento ile 20 kg/m^3 , 40 kg/m^3 ve 60 kg/m^3 köpük kullanılmıştır. Sonuç olarak 20 kg/m^3 köpük içeriğine sahip 500 kg/m^3 çimento içeriğinin 300 kg/m^3 çimento içeriğine nispeten basınç dayanımında %204,50 maksimum artış olduğu saptanmıştır. Ayrıca çimento dozajı 300 kg/m^3 , 500 kg/m^3 ve köpük içeriği 20 kg/m^3 olan karışımlar için sırasıyla 5032×10^{-6} ve 7065×10^{-6} mm/mm en düşük ve en yüksek rötre değerlerinin elde edildiği saptanmıştır. 500 kg/m^3 köpük içeriğine ve 20 kg/m^3 silis dumanı katkısına sahip karışımın aşınma, donma-çözülme döngüsü ve asit saldırısına maruz kaldıktan sonra en iyi direnci gösterdiğini belirlenmiştir.

Gençel vd. (2022a) köpük betonun yapısı gereği yüksek gözenekliliğe sahip olduğu belirtmişlerdir. Bundan ötürü kimyasalların ve serbest suyun beton gözeneklerine girmesiyle kuruma büzülmesi gibi fiziko-dayanıklılık problemlerin ortaya çıktığı vurgulanmıştır. Bu sorunu ele almak ve gözenek ağı bağlantısını azaltmak için, çalışma kapsamında beton karışımlarında ana agrega olarak geliştirilmiş perlit ve ince boyutlu atık cam kullanılmışlardır. Bu kapsamda 10 adet köpük beton karışımı su bağlayıcı oranı 0,5 olan ve sırasıyla 50 kg/m^3 ve 100 kg/m^3 köpük beton içeriğine sahip numuneler hazırlanmıştır. Karışımlarda genişmiş perlit, atık cam ile değiştirilmiştir. Sonuç olarak cam kumu takviyesinin köpük betonun fiziko-mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerinde olumlu sonuçlar doğurduğu tespit edilmiştir. Genleştirilmiş perlitin kuma nazaran daha gözenekli olması nedeniyle köpük betona daha yalıtımsal bir özellik kazandırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca sürdürülebilir yalıtkan köpük beton üretiminde cam kumunun kullanılmasının uygun olacağı saptanmıştır.

Tek (2022) yapmış olduğu çalışmada köpük betona kenevir lif ve uçucu kül ilave etmiş, elde edilen köpük betona dair fiziko-mekanik, dayanıklılık ile termal özellikler

irdelenmiştir. Bu kapsamda sırasıyla 50 kg/m³, 70 kg/m³ ve 100 kg/m³ köpük içeriğine sahip 3 seri karışım üretilmiştir. Üretilen serilerde referans karışımlar kenevir lif ve uçucu kül içermemektedir. Diğer karışımlar ise çimento ikamesi yüzde olarak sırasıyla %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında uçucu kül barındırmaktadır. Ayrıca karışımlara çimento yerine ağırlıkça %0,75, %1,5 ve %3 oranında değişen lif entegre edilmiş ve çeşitli testler üretilen numunelere uygulanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar Taguchi optimizasyon yaklaşımından faydalanarak irdelenmiştir. Sonuç olarak kenevir lif eklenmesinin yüksek basınç ve eğilme mukavemeti meydana getirdiği saptanmıştır. Uçucu kül ilavesinin kuruma büzülmesi ile ısı iletkenliği azalttığı ayrıca yüksek sıcaklık dayanımında artış sağladığı tespit edilmiştir.

Dang vd. (2022) yapmış olduğu çalışmada, köpük betona çimento ağırlığına göre %0, %3, %5, %7,5, %10 ve %12,5 polietilen tozunu dahil ederek 6 karışım oluşturmuşlardır. Bu kapsamda ısı iletkenliği ve polietilen tozu dozajlarının köpük betonun kuru yoğunluğu, basınç dayanımı, su emmesi, ısı iletkenliği ve mikro yapısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak köpük betonun kuru yoğunluğunun ve basınç dayanımının genel itibarıyla azaldığını, yüksek dozda polietilen tozu ile su emmesinin arttığı belirlenmiştir. Polietilen tozlu köpük betonun ısı iletkenliği, dozajın artmasıyla birlikte artarken, ısı iletkenliği büyük ölçüde engellenmiştir.

Selvakumar vd. (2023) metal döküm ve döküm endüstrisindeki büyük miktarlarda ortaya çıkan atık ürünün çevreye salındığını ve çevreyi kirlettiğini belirterek bu malzemenin betona entegre edilmesiyle mukavemet özelliği gösterdiği vurgulanarak kullanılabilirliği irdelenmiştir. Bu kapsamda toz hale getirilmiş kum ile döküm kumu %20, %40 ve %60 oranlarında değiştirilerek köpük beton özellikleri irdelenmiştir. Ayrıca köpük betonun mukavemetini artırmak için karışıma ek bağlama mukavemeti sağlayan stiren-bütadien kauçuk lateks dâhil edilmiştir. Döküm kumu betonun mukavemetinde artış açısından olumlu sonuçlar göstermiştir. Dolayısıyla, döküm kumu kullanılarak çevreye atılan atık malzemelerin azaltılabileceği vurgulanmıştır.

Li vd. (2023) yapmış oldukları çalışmada Portland çimentosu yerine ultra ince cüruf kullanarak basınç dayanımı arttırmayı hedeflemişlerdir. Ultra ince cürufun çimentoya ikame oranı %10, %20, %30 ve %40 olarak düzenlenmiştir. Cüruf içeriği bulunmayan köpük betonun 28 günlük basınç dayanımı 6,99 MPa iken %40 cüruf içerikli köpük

betonun 28 günlük basınç dayanımı %11'lik artışla 5,59 MPa olarak bulunmuştur. Böylece Portland çimentosu ve ultra ince cüruf içerikli köpük betonların basınç dayanımları, Portland çimentosu içerikli köpük betonlara kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Shareef vd. (2023) otoklavlanmış gazbeton blokların ve seramik karoların köpük betonda ince agreganın kısmi ikamesi olarak kullanılabilceğini araştırmışlardır. İki atık türü için kuma göre ikame oranları %25, %50 ve %75 olarak belirlenmiştir. Her iki atık türünün de köpük betonda kullanımı mukavemet değerlerinde olumlu bir etki yarattığı tespit edilmiştir.

Guo vd. (2023) katı atıklardan köpük beton üretim yöntemini önermişlerdir bu kapsamda bağlayıcı olarak soda kalıntısı, kalsiyum karbür cürufu, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ile köpük maddesi olarak alüminyum tozu kullanılmışlar. Çalışmada sonuç olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun uçucu kül ile yer değiştirmesinin kuru yoğunluk ve basınç dayanımın azalmasına sebep olduğu belirlenmiştir. Tatmin edici kuru yoğunluk ve basınç dayanımı sayesinde endüstriyel atık malzemelerin, sürdürülebilir hafif beton üretme potansiyeline sahip olduğu vurgulanmıştır.

Vishavkarma ve Venkatanarayanan (2024) yağmış oldukları çalışmada öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile çimentonun ağırlıkça %0, %15, %30, %45, %60 yer değiştirmesi şeklinde 5 seri köpük beton oluşturmuşlardır. Yapılan deneysel incelemeler neticesinde öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren tüm köpük beton karışımlarının gerekli basınç dayanımını sağladığı ve şartnamelere göre betonarme uygulamalarda kullanılabilceği tespit edilmiştir. %30 granüle yüksek fırın cürufu içeriğine kadar mekanik dayanımda kesin bir artış eğilimi olduğu vurgulanmıştır.

Song vd. (2024) yapmış oldukları çalışmada çimento yerine kömür gangi kullanmışlardır. Isı yalıtımı, mekanik ve dayanıklılık gibi özelliklerin köpük içeriği ve su/bağlayıcı oranı ile nasıl değişim sergilediğini ele almışlardır. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar ise şöyledir. Betonun mekanik özelliklerinin köpük içeriği ile değişim gösterdiği yani köpük içeriğinin belirleyici bir etkisi olduğu vurgulanmış. Su emme ve ısı iletkenlik değerlerinde ise su/bağlayıcı oranının önemli bir etken olduğu bulunmuştur.

Lin vd. (2024) kum ile bantlı demir oluşumlarının %5, %10, %15, %20, %25 yer değiştirmesi sonucu köpük beton tasarımı gerçekleştirmişlerdir böylece bantlı demir oluşumlarının köpük betonda ince agrega olarak kullanılabilirliğini irdelemişlerdir. Taze özelliklerin yanı sıra basınç dayanımı, eğilme dayanımı gibi mekanik özellikler ile termal performans incelenmiştir. Sonuç olarak 7 günlük basınçta %10'luk değişimin kontrol karışıma nispeten %55,88'lik bir dayanım artışı olduğu tespit edilmiştir. SEM (Scanning Elektron Mikroskope) incelemesinde bantlı demir oluşumu içeren karışımların, bantlı demir oluşumu içermeyen kontrol karışımına kıyasla daha iyi bir gözenek düzenlemesi gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, atık bantlı demir oluşumlarının köpük betona ince agrega olarak dâhil edilmesinin inşaat malzemelerinin mekanik ve termal özelliklerini geliştirmekte umut verici olduğu ve inşaat sektöründe dayanıklı yapı malzemelerinin önünü açmakta öncü olabileceği vurgulanmıştır.

Shahabi ve Klemes (2024) köpük betonun fiziksel ve mekanik niteliklerinin köpüğün hacmi, mineral veya kimyasal ilavelerin varlığı ve karıştırma işlemi gibi faktörlere bağlı olduğunu belirtmiştir. Çalışmada ince hafif agrega ilavesinin ve çimento ile uçucu külün kısmen değiştirilmesinin sertleşmiş köpük betonun basınç dayanımı ve dayanıklılığı üzerindeki etkisi irdelenmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak köpük betonun ısı iletkenliğinin büyük ölçüde kuru yoğunluk ve agrega bileşimi tarafından belirlendiği, ince hafif agrega kullanımının köpük betonun kuruma büzülmesini büyük ölçüde düşürdüğü ve agreganın özelliklerine göre dayanımda olumlu bir katkı sağladığı vurgulanmıştır.

2.2 Ferrokrom Cürufuna Ait Literatür Özeti

Erşimşek (2006) enjeksiyon yöntemi kullanılarak üretilen granüle ferrokrom cürufu ilaveli betonların fiziksel niteliklerini, basınç dayanımlarını, donma-çözülmelerini ve Los Angeles ağırlık kayıplarını testler uygulayarak irdelemiştir. Agrega malzemesi olarak 0-4 mm granüle ferrokrom cürufu ve 4-19 mm normal agrega kullanılmıştır. Betonda çakıl malzeme yerine %10, %20, %30 granüle ferrokrom cürufu ilave edilmiştir. Sonuç olarak granüle ferrokrom cürufu miktarının artışı ile basınç dayanımında, aşınma ve donma-çözülme direncinde artış olduğu tespit edilmiştir.

Kantarcı (2013) Elazığ ferrokrom cürufunu çimento inceliğinde öğütüp sodyum hidroksit ve sodyum silikat aktivatörleri ile karıştırarak bağlayıcı bir madde elde etmiştir.

Oluşturulan bağlayıcı maddeye dere agregası ile kırma kum ilave edilerek geopolimer beton numuneler üretilmiştir. Numuneler yangın dayanımı tespiti için 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır ve mikro yapıları incelenmiştir. Basınç dayanımları 3, 7 ve 28 gün için elde edilmiş ve bazı fiziksel özellikler incelenmiştir. Ayrıca normal Portland çimentosu ile numuneler üretilmiş ve karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak Elazığ ferrokrom cürufu, aktivatör ve dere agregası kullanılarak üretilen geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları (28 günlük) yaklaşık olarak 35 MPa olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bu değer Portland çimentosu ile üretilen numunelerden yaklaşık olarak 31,8 MPa daha büyük olduğu saptanmıştır. Yangın dayanım değerlerinde ise 100°C ile 300°C sıcaklıkta basınç dayanımlarının arttığı fakat 700°C de düştüğü saptanmıştır.

Maraş (2013) çimento inceliğinde öğütülmüş Elazığ ferrokrom cürufunu alkali ile aktive ederek bağlayıcı özelliği olan geopolimer bir malzeme oluşturmayı planlamıştır. Numuneler 3 ayrı silis modülü ile 4 ayrı sodyum oksit içeriğiyle elde edilmiştir. Çimento yerine geopolimer bağlayıcı kullanılarak 3 ayrı su/çimento oranı ve 3 ayrı kür ortamında harç numuneler oluşturulmuş ve su/çimento oranının artmasıyla genel olarak basınç dayanımlarında azalma tespit edilmiştir.

Panda vd. (2013) betonda agrega malzemesi olarak ferrokrom cürufunun çevresel ve teknik açıdan değerlendirilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında iri agrega olarak ferrokrom cürufu ve doğal taş, ince agrega olarak kum ve ferrokrom cürufu içeren farklı karışım oranlarına sahip beton numuneler oluşturulmuştur. Çalışmada ayrıca farklı tipte çimentolarda kullanılmıştır. Sonuç olarak ferrokrom cürufunun iri ve ince agrega olarak kullanımını basınç dayanımı olarak çok iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiş ve genel amaçlı beton işlerinde kullanımının uygun olduğu vurgulanmıştır.

Yıldız (2013) tuğla ve beton parke taşı üretiminde Elazığ ferrokrom cürufunun nasıl bir etki yaratacağını irdelenmiştir. Bünyesinde %30 civarında MgO bulunduran Elazığ ferrokrom cürufunun çimentoda istenmeyen malzeme olması sebebiyle çimento sanayinde veya mineral katkı olarak kullanım alanı bulamaması vurgulanmıştır. Bu sebeple cürufun öncelikli olarak parke taş üretiminde suni agrega şeklinde değerlendirilmesi akabinde ise katkı maddesi şeklinde kiremit ve tuğla üretiminde değerlendirilmesi irdelenmiştir. Sonuç olarak cüruf agregası içeren parke taşların geleneksel parke taşlarına kıyasla daha iyi

basınç dayanımı sergilediği saptanmıştır. Tuğla yapımında ise %25'lik cüruf katkısının basınç dayanım değerlerinde önemli bir katkı sağladığı ve %50'lik cüruf katkısında bu değerlerin bilinen tuğlalara eşit olduğu saptanmıştır. Ayrıca cüruf katkılı tuğlaların su emme oranlarının bilinen tuğlalara göre daha düşük olduğu belirtilmiştir. Cüruf içeren tuğlaların normal tuğlalara göre daha hafif olduğu tespit edilmiştir.

Taşgın (2014) ferrokrom cürufu, cam tozu tozu ve mermer tozu atıklarının filler malzemesi olarak esnek üst yapılarda kullanılabilirliği irdelenmiş ve genel olarak kullanım görüşü kırmataş tozu ile kıyaslamıştır. İlk olarak farklı bitüm yüzdeleri ile Marshall stabilite deney sonuçlarına istinaden optimum bitüm yüzdeleri tayin edilmiştir. Ferrokrom cürufu, mermer atıkları, cam atıkları ve kırmataş tozu ile farklı bitüm yüzdelerinde gerçekleştirilen Marshall stabilite deney verileriyle stabilite, asfaltta dolu boşluk yüzdesi, pratik özgül ağırlık, agregalar arası boşluk yüzdesi ile akma parametrelerinin değişim miktarları belirlenmiştir. Sonuç olarak ferrokrom cürufu karışımından en yüksek stabilite değeri elde edilmiş olup esnek üst yapılarda filler malzemesi olarak kırmataş yerine ferrokrom cürufu, cam tozu ve mermer tozu atıklarının kullanılabilmesi belirtilmiştir.

Mahmut (2015) Elazığ ferrokrom cürufunu çimento inceliğinde öğütmüş ve sodyum hidroksit ile sodyum silikat kullanarak 40°C, 65°C, 90°C aktivasyon sıcaklığı ile harç üretimi yapmıştır. Elde edilen harç üzerinde kıvam tespiti ve priz başlama ve sona erme süreleri tespiti yapılmıştır. Farklı aktivasyon sıcaklıklarında 1, 2 ve 4 gün etüvde bekletilmiş olan sertleşmiş harç numunelerinde, ultrases, basınç dayanımı, birim ağırlık ve kapiler su emme değerleri belirlenmiştir. Sonuçlar ise aşağıdaki gibi bulunmuştur.

- Karışımlarda aktivatör malzemelerin mol değerlerinin artışına karşın yayılma çapında bir azalma olduğu tespit edilmiştir.
- Çimento kullanılmaksızın Elazığ ferrokrom cürufu kullanılarak 15 MPa değeri üzerinde geopolimer harç elde edilebileceği saptanmıştır.
- Sıcaklık ve molar değerlerinin artması ile ultrases geçiş hızında artış gözlemlenmiştir.

Kalkan (2017) bağlayıcı madde olarak Elazığ ferrokrom cürufu kullanılarak geopolimer beton üretimi gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda 0,045 mm altında öğütülme işlemi gerçekleştirilen Elazığ ferrokrom cürufu sodyum metasilikat ve sodyum hidroksit

karışımından oluşan alkali aktivatörlerle aktive edilmiştir. Agregası olarak ise dere agregası kullanılarak geopolimer beton numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan geopolimer betonlarda 3 farklı silis modülü belirlenmiştir. Bağlayıcı malzeme yerine %10 ve %20 oranlarında silis dumanı ilave edilerek numuneler oluşturulmuştur. Totalde 9 farklı grupta geopolimer beton numunesi üretimi gerçekleştirilmiştir. Farklı kür süreleri ve sıcaklıkları dikkate alınarak basınç dayanım değerleri belirlenmiştir. Sonuç olarak kür sıcaklığı ve süresi ile basınç dayanımının doğru orantılı olduğu fakat silis dumanı ilavesinin yüksek kür sıcaklığında numunelerin basınç dayanımında düşüş oluşturduğu tespit edilmiştir.

Özcan (2018) yüksek fırın cürufu ve Elazığ ferrokrom cürufu dahil edilerek oluşturulan geopolimer betonların sülfat, asit ve tuz, etkilerine karşı dayanımını irdelenmiştir. Bu kapsamda 5 grup geopolimer beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça 5 farklı oranda Elazığ ferrokrom cürufu yerine yüksek fırın cürufu dahil edilerek numuneler oluşturulmuştur. 28 gün küre tabi tutulan geopolimer beton numuneler daha sonra 12 hafta süresince %5 konsantrasyon değerine sahip çeşitli sülfat ve asit çözeltilerine maruz bırakılmıştır. Deney numunelerinin ultrasonik ses hızları, ağırlık ve boy değişimleri ile basınç dayanımları tespit edilmiş ve referans numuneler ile kıyaslanmıştır. Basınç dayanımı verilerine göre en büyük etkiyi sülfürik asit çözeltisi oluştururken en düşük etkiyi sodyum klorür çözeltisi oluşturmuştur. Ayrıca diğer asit ve sülfat çözeltilerinin de belirli oranlarda etki oluşturdukları tespit edilmiştir. Diğer taraftan tuz ve sülfata maruz bırakılan numunelerde bir bozulma gözlenmemesine karşın hidroflorik asit, fosforik asit ve sülfürik asit karışımında bekletilen numunelerin yüzeylerinde tahribat ve çatlaklar meydana gelmiştir. Hidroklorik asit çözeltisine maruz bırakılan numunelerin ise renginde koyulaşma gözlemlenmiştir.

Özdal (2019) yüksek fırın cürufu ile Elazığ ferrokrom cürufu kullanılarak oluşturulan geopolimer betonların donma çözülme dayanımları irdelenmiştir. Bu kapsamda 5 grup geopolimer beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerde Elazığ ferrokrom cürufu yerine ağırlıkça 5 farklı oranında yüksek fırın cürufu ilave edilmiştir. 28 gün küre tabi tutulan numuneler daha sonra ASTM C666 standartı baz alınarak 50 çevrimlik döngülerle 300 çevrime kadar donma-çözülme etkisine maruz bırakılmıştır. Deney numunelerinin ultrasonik ses hızları ağırlık ve boy değişimleri ile basınç dayanımları tespit edilmiş ve referans numuneler ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak basınç dayanımlarının Elazığ ferrokrom cürufu miktarının artmasıyla azaldığı tespit edilmiştir. Görsel olarak

numuneler ele alındığında köşelerde ve yüzeylerde donma-çözülme etkisi ile dağılma gözlemlenmiştir.

Mısır (2021) çimento yerine aynı incelik değerine sahip ferrokrom cürufu ile katkı maddesi olarak cam lifi ve mermer tozu kullanılarak alkalilerle aktive edilen harç oluşturmayı planlamıştır. Sodyum hidroksit (NaOH) ile sodyum silikat (Na_2SiO_3) çözeltileri alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Yapılan ön denemelerle NaOH/ Na_2SiO_3 oranı 1/2 olarak, aktivatör (NaOH+ Na_2SiO_3) / bağlayıcı (cüruf) oranı sırasıyla 0,35, 0,40 ve 0,45 şeklinde belirlenmiştir. Karışım oranları oluşturulurken %5, %10 ve %15 oranında mermer tozu ilavesi gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan numunelere toplam karışımın % 0,5'i oranında cam lifi ilavesi yapılmıştır. 7 ve 28 günlük deney sonuçları irdelenmiş harç numunelerine priz başlama-bitiş süresi ile kıvam tayini deneyleri yapılmıştır. Farklı oranlara sahip harç numunelerine çeşitli mühendislik deneyleri uygulanmış ve sonuçlar irdelenmiştir. Sonuç olarak mermer tozu ve Elazığ ferrokrom cürufunun bir arada kullanılmasında mermer tozu artışının belli bir değere kadar basınç dayanımı üzerinde olumlu etki yarattığı tespit edilmiştir. Ayrıca çimento kullanımı olmaksızın Elazığ ferrokrom cürufu ile 20 MPa ve üzerinde alkali aktivasyonlu karışımların elde edilebileceği tespit edilmiştir.

Dash ve Patro (2021) endüstriyel bir atık olan su soğutmalı ferrokrom cürufunun geleneksel kum yerine betonda kullanımının performans değerleri üzerindeki etkinliğini irdelenmişlerdir. Bu amaçla 5 farklı ikame oranına sahip beton numuneler oluşturulmuştur. Hazırlanan numuneler çeşitli testlere tabi tutulmuş sonuç olarak kumun yerine ferrokrom cürufunun ilave edilmesi mukavemet açısından düşüş yarattığı ancak %30 ferrokrom cürufu ikamesinin referans betonla karşılaştırılabilir sonuçlar verdiği saptanmıştır.

Aslan (2022) düşük priz süresi ve hızlı işlenebilirlik kaybı sorunları nedeniyle uygulamada alkali aktivasyonlu cüruf bağlayıcıların kullanımına engel olan durumların süper akışkanlaştırıcı katkı ve boraks kullanımı ile giderilmesini hedeflemiştir. %70, %80 ve %90 oranında Elazığ ferrokrom cürufu ile ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında F sınıfı uçucu kül kullanılarak alkali aktive edilmiş harçlar üretilmiştir. Katı halde 18 ve 22 molarite değerine sahip sodyum hidroksit ile sıvı haldeki sodyum silikat çözeltileri alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. NaOH/ Na_2SiO_3 1/2 oranında sabit değer olarak tayin edilmiştir. Aktivatör (NaOH+ Na_2SiO_3) / bağlayıcı (cüruf) oranı sırasıyla 0,35, 0,40 ve 0,45 şeklinde belirlenmiştir. Boraks ve süper akışkanlaştırıcı katkıları ağırlıkça %0, %3 ve

%6 oranlarında alınmıştır. Alınan karışım parametreleri Taguchi metoduyla optimize edilmiş ve en iyi karışım reçetesi oluşturulmuştur. Elde edilen numunelere çeşitli mühendislik deneyleri uygulanmış ve deney sonuçları Taguchi metoduyla analiz edilmiştir. Sonuç olarak boraks ve süperakışkanlaştırıcı katkılarının alkali aktivasyonlu karışımlarda priz süresini geciktirici etkisinin olduğu ve işlenebilirlik üzerinde olumlu etki yarattığı tespit edilmiştir. 24,27 MPa değeriyle en yüksek basınç dayanım değeri tespit edilmiştir.

Miyan vd. (2023) genel olarak verimli bir şekilde değerlendirilemeyen ve atık ürün olarak nitelendirilen paslanmaz çelik endüstrisinin bir yan ürünü olan ferrokrom cürufunu alkali aktive edilmiş harç üretiminde değerlendirmişlerdir. Bu kapsamda yüksek fırın cürufu yerine kısmi ikame olarak ferrokrom cürufu ilave edilmiştir. Hazırlanan numunelere çeşitli deneyler uygulanmıştır. Sonuç olarak %30 ferrokrom cürufu ikamesinin akma gerilmesinde %54'ten, plastik viskozitede %70'ten fazla bir azalma sağlayarak akışkanlığı iyileştirdiği vurgulanmıştır. Ayrıca ferrokrom cürufu ilavesinin harçların fiziksel niteliklerinde bir olumsuzluk oluşturmadığı belirtilmiştir.

Zhu vd. (2023) ultra yüksek performanslı betonda normal agregaya yerine ferrokrom cürufunun agregaya olarak değerlendirilebileceğini vurgulamışlardır. Böylece sınırlı olan doğal agreganın eksikliği giderilebilecek ve ultra yüksek performanslı betonun maliyeti azalacaktır. Bu kapsamda 9 seri numune dökümü gerçekleştirilmiş ve analizler yapılmıştır. Sonuç olarak ferrokrom cürufunun normal agregaya yerine kullanılabilirliği tespiti yapılmış ve ferrokrom cürufu kullanımının mekanik özelliklerde olumlu etki yarattığı belirtilmiştir.

Fares vd. (2023) iri ve ince doğal agregaların ferrokrom cürufu ile yer değiştirmesi neticesinde betonun ısı dayanım değerlerinin nasıl değiştiğini belirlemek için bir çalışma planlamışlardır. Bu kapsamda referans numunelerin yanı sıra doğal taş agregaları ile ferrokrom cürufu %25, %50, %75 ve %100 ikame yüzdeleri ile yer değiştirmiştir. Oluşturulan 4 farklı karışım numuneleri 200°C ile 1000°C arasında yüksek sıcaklığa tabi tutulmuştur. Sonuç olarak ferrokrom cürufunun doğal agregaya yerine kullanılması yüksek sıcaklık sonrasında betonun daha iyi bir performans göstermesini sağlamıştır. Ayrıca ferrokrom cürufu kullanımının yüksek sıcaklıklarda ağırlık kaybını önemli ölçüde azaltabileceği vurgulanmıştır.

Atlı ve İpek (2024) reaktif pudra beton üretiminde kullanılan yüksek mukavemete sahip agregaların yerine ferrokrom üretimi esnasında ortaya çıkan atıkları kullanmışlardır. Ayrıca reaktif pudra betonda genel olarak kullanılan mikro çelik liflerin yerine atıl duruma gelmiş araç lastiklerinden temin edilen liflerin kullanılması değerlendirilmiştir. Ferrokrom atıkları olarak olivin, serpantin, rom, cüruf ve saf atıklar yeşil reaktif pudra betonda toz ve agrega olarak kullanılmıştır. Bu sayede atık malzemelerden elde edilmiş yeşil reaktif pudra betonu geliştirmişlerdir. Sonuç olarak olivin ve ferrokrom cürufu kullanılan numunenin referans numunesine yakın basınç dayanımına sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca atık malzemelerin değerlendirilerek ekonomik, sürdürülebilir, çevre dostu ve iyi mekanik özelliklere sahip yüksek performanslı beton üretilebileceği vurgulanmıştır.

Literatür incelemesinde verilen çalışmalar dikkate alındığında ferrokrom cürufunun beton içerisinde agrega olarak, karayolu inşaatında dolgu malzemesi olarak, tuğla ve parke taş üretiminde agrega olarak kullanılması görülmektedir. Ayrıca köpük beton ile yapılan çalışmalarda çeşitli agregaların kullanıldığı görülmektedir. Ancak köpük beton içerisinde ferrokrom agregasının kullanıldığı çalışmalar bulunmamaktadır. Bu nedenle bu tez çalışmasında ferrokrom cürufunun, kırmataş agregası yerine köpük betonda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu açıdan ferrokrom cürufunun köpük betonda geri dönüştürülmesine dair bir çalışmadır. Ürün yelpazesi açısından bu çalışma ile ferrokrom cürufunun yeni bir kullanım alanı sunulmuştur. Bu kapsamda farklı karışım oranlarında üretilen köpük betonlar üzerinde çeşitli mühendislik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında ferrokrom cürufunun köpük betona dahil edilmesinin çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi de yapılarak literatüre kazandırılmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

Bu kısımda ferrokrom cürufunun köpük betona entegre edilmesi ile elde edilen kompozit malzemenin teknik açıdan incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sunulmaktadır. Ayrıca tez kapsamında kullanılan Portland çimentosu, ferrokrom cürufu, karışım suyu, kırma taş ve köpük ajanı hakkında elde edilen bilgiler sunulmaktadır.

3.1 Çimento

Çevre dostu, maliyeti düşük ve geniş kullanım alanına sahip olmasından ötürü Baştaş çimento ürünü olan Portland çimentosu CEM II/A-M (V-L) 42,5 R bu çalışmada kullanılmıştır. Çimentonun detaylı özellikleri aşağıdaki Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1: CEM II/A-M (V-L) 42,5 R çimentosunun özellikleri

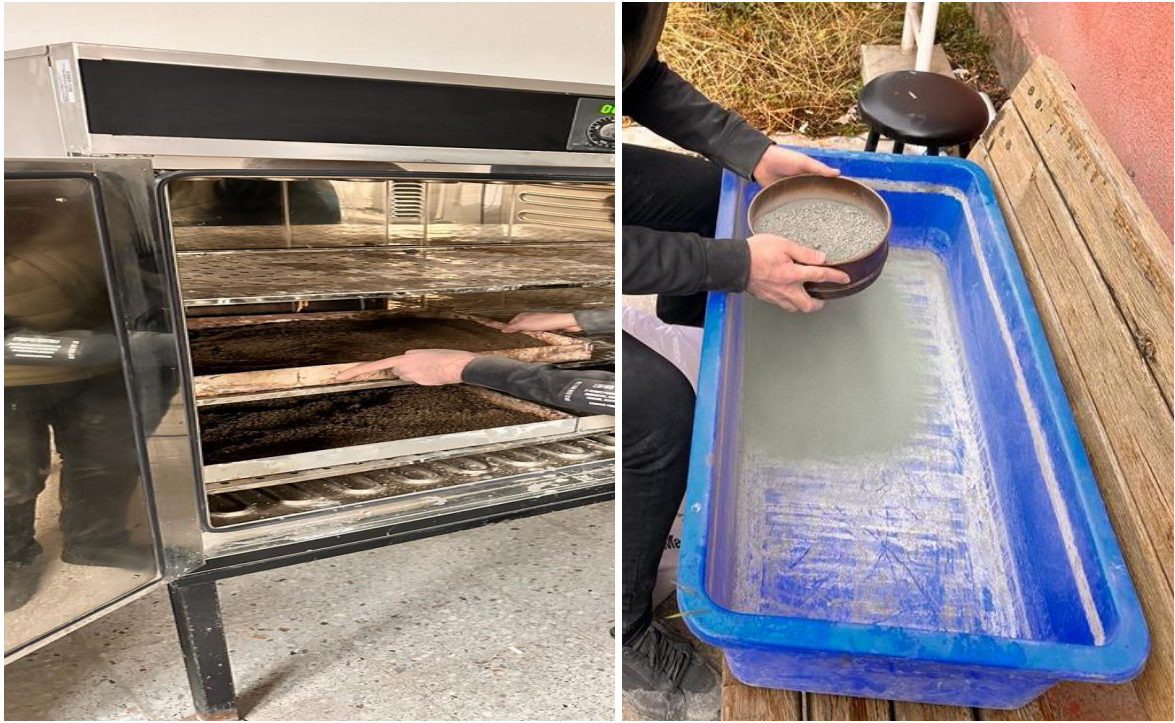
KİMYASAL ÖZELLİKLER		FİZİKSEL ÖZELLİKLER	
SiO ₂ (%)	18,64	Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g)	3664
Fe ₂ O ₃ (%)	2,90	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,09
Al ₂ O ₃ (%)	4,76	İncelik (32-40 mikron) (%)	12,9-6,6
CaO (%)	61,48	Priz Başı-Sonu (dakika)	179-233
MgO (%)	1,68	Hacim Genleşmesi (mm)	1
SO ₃ (%)	3,17	DAYANIM DEĞERLERİ	
CI (%)	0,02	2 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	28,8
Na ₂ O (%)	0,25	7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	40,9
K ₂ O (%)	0,97	28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	50,3
Kızdırma Kaybı (%)	4,88		
Çözünmeyen Kalıntı (%)	2,19		

3.2 Kırmataş

Agregalar direkt olarak doğadan (deniz kıyıları, akarsu yatakları, çöl gibi) taneli bir şekilde tedarik edilebileceği gibi taşocağı işletmeciliğiyle üretilen taş blokların kırılıp, elenmesi ile de elde edilebilirler. Bu yöntem ile elde edilen taneli malzeme kırmataş olarak adlandırılır.

Yine kırmataş tesisinin atıl malzemesi olan ince forma sahip taneli malzeme ise kırma kum olarak adlandırılmaktadır (Arioğlu vd., 1999: 178).

Çalışma için temini gerçekleştirilen kırmataşın ıslak olmasından ötürü etüvde kurutulup elemesi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1’de kurutma ve eleme işlemlerine ait görseller sunulmuştur. Agreganın elenerek istenen boyuta indirgenmesindeki amaç tane boyutunun artmasına bağlı olarak köpük beton içerisindeki köpüklerin sönmesinin önüne geçmektir. Kullanılan kırmataşın partikül boyut dağılımı dikkate alındığında, D50 (ortalama partikül boyutu) 127 μm , D10 ve D90 değerleri ise sırasıyla 5,43 μm ve 370 μm olarak tespit edilmiştir. Kırmataşın yoğunluğu ise 2,84 g/cm^3 tür.



a. Kırmataşın etüvde kurutulması

b. Kırmataşın elenmesi

Şekil 3.1: Çalışmada kullanılan kırmataşın hazırlanması

3.3 Ferrokrom Cürufu

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere Elazığ ferrokrom tesisinden temin edilen cüruf, bilyeli değirmen yardımıyla öğütülme işlemine tabi tutulmuştur. Bilyeli değirmen 60 devir/dakika şeklinde çalıştırılmıştır. Toz olarak elde edilmek istenen cüruf cihazda 60 dakikalık bir süre zarfında 3600 devir yapılarak öğütülmüştür.



Şekil 3.2: Bilyeli değirmen cihazı

Çalışmada kullanılan cürufun öğütmeden önceki hali ve bilyeli değirmen aletinde öğütülüp elendikten sonraki hali Şekil 3.3'te verilmiştir.



a. Öğütülmeden önce cüruf

b. Öğütülüp elenmiş cüruf

Şekil 3.3: Çalışmada kullanılan cürufun hazırlanması

3.4 Karma Suyu

Beton karışım suyunun esas olarak 2 görevi bulunmaktadır bunlar işlenebilirliği sağlamak ve çimento ile reaksiyon göstererek agregalar arasındaki bağlayıcılığı sağlamaktır. Genel olarak içilebilir nitelikteki bütün sular beton karışım suyu olarak değerlendirilebilmektedir.

Üretim aşamasında kullanılacak suyun temiz olması istenmekte olup betona olumsuz bir etki yaratmaması önem arz etmektedir. Bu amaçla çalışmada TS EN 1008'e uygun olarak şebeke suyu kullanılmıştır.

3.5 Köpük Ajanı

Bu çalışma kapsamında Fatsa Kimya ürünü olan protein esaslı köpük ajanı kullanılmıştır. Kullanılan köpük ajanına ait özellikler Tablo 3.2'de verilmiştir. Köpük ajanı, su ağırlığının %3 oranında karıştırılarak nihai ürün olan köpük elde edilmiştir. Köpüğün yaklaşık yoğunluğu 110 g/l olarak elde edilmiştir.

Tablo 3.2: Köpük ajanına ait teknik özellikler

Kimyasal Bileşim	Protein Esaslı
Görünüm (Renk)	Koyu kahverengi
Yoğunluk kg/l	1,1-1,2 kg/l
pH	7-9,5
Depolama Sıcaklığı	-10°C, +45°C

3.6 Karışım Oranları

Bu çalışma kapsamında, kırmataş agregası ile ferrokrom cürufunun ağırlıkça yer değiştirmesi ve köpük miktarlarının değişimine bağlı olarak karışım oranları tayin edilmiştir. Çalışmada kullanılacak karışım oranlarının tam olarak tespit edilmesi için deneme numuneleri üretilmiş ve ön yorumlama gerçekleştirilmiştir. Nihai olarak ise köpük betonların üretiminde köpük içeriği 25 ve 50 kg/m³ olacak şekilde iki oranda kullanılmış olup, karışımın çimento dozajı ise 500 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Ferrokrom agregası ağırlıkça sırasıyla %0, %50 ve %100 oranlarında kullanılmıştır. Bu veriler ışığında 6 seri köpük beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Köpük betonlar üzerinde gerçekleştirilen analizler için 3'er adet köpük betonda değer tespiti yapılmış ve sonuçların ortalaması alınarak değerler tayin edilmiştir. Tablo 3.3'te köpük betonların karışım oranları verilmiştir.

Tablo 3.3: Karışım oranları

Karışım Kodu	Çimento Dozajı (kg/m ³)	Köpük Miktarı (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Kırmataş Agregası (kg)	Ferrokrom Cürufu (kg)
M1	500	25	282	500	0
M2				250	250
M3				0	500
M4	500	50		500	0
M5				250	250
M6				0	500

3.7 Köpük Betonların Üretimi

Çalışma kapsamında deney numunelerinin hazırlanmasına ilişkin süreç sistematik bir biçimde açıklanır, ilk olarak karışım ana malzemelerinin temin işlemi gerçekleştirildi. Ardından numune üretiminde kullanılacak olan ferrokrom cürufu bilyeli değirmende öğütülme işlemine tabi tutuldu ve öğütülmüş ferrokrom cürufu ile kırmataş agregası 300 mikronluk eleklerden elendi. Daha sonra karışım oranlarına göre malzemeler hassas terazide teker teker tartılarak belirlenen miktarlarda hazır hale getirildi. Bu şekilde malzemelerin çalışma öncesinde hazırlanması çalışmanın hızlı ve kusursuz bir şekilde ilerlemesinde önemli bir yer tutmaktadır.

Karışımların hazırlanmasında öncelikli olarak çimento ve agregalar kuru olarak 1 dakika bir kaşık ile karıştırıldı daha sonra mikserde bu karışım 2 dakika kuru olarak karıştırıldı. Akabinde su ekleme işlemine geçildi yavaş bir şekilde su, karıştırma yapan mikserin içerisine ilave edildi suyun yavaş bırakılmasındaki amaç mikserin dönmesiyle beraber dışarı sıçramasını engellemektir aksi durumda karışım oranında farklılık oluşacaktır.



Şekil 3.4: Kuru (a) ve ıslak (b) karışım işlemi

Islak karıştırma sonrasında mikserden alınan karışımın altında çöken kuru malzeme kalmaması için bir kaşık yardımı ile malzeme karıştırılmıştır. Diğer taraftan köpük ajanı ve su bir plastik kap içerisine aktarılmış olup el mikseri yardımıyla karıştırılmış ve köpük elde edilmiştir.



Şekil 3.5: Köpük ajanı ve suyun karıştırılması (a), köpüğün elde edilmesi (b)

Elde edilen köpük hassas teraziye alınan ıslak karışımın içerisine eklenerek yavaş yavaş kenarlardan dibe doğru köpükler söndürülmeden bir kaşık yardımı ile 2 dakika süreyle karıştırılmıştır. Bu kısımda dikkat edilmesi gereken iki husus bulunmaktadır; bunlardan ilki köpüğün bekletilmemesi zira köpük bekletilirse zamana bağlı olarak sönecek ve muhafaza ettiği suyu salacaktır. Bu su dibe çökecek ve çöken su miktarı harca yanlışlıkla ilave edilirse, karışım oranı maalesef değişecektir. Köpük, doğrudan çimentolu karışıma

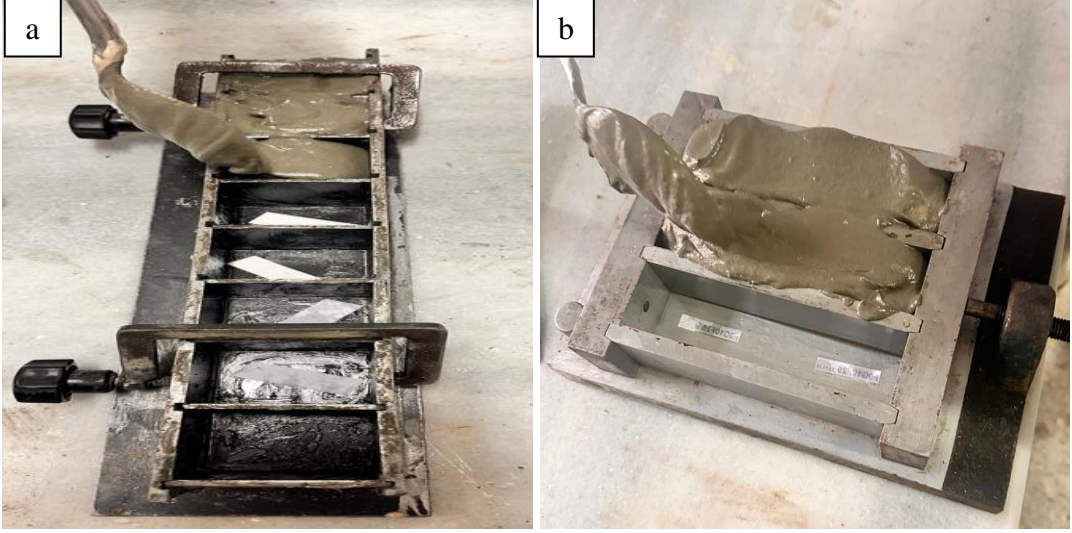
eklendiğinde karışımın viskoz yapısı sayesinde su salımı ve köpük sönmesi büyük ölçüde engellenmektedir. Bu nedenle kritik olan nokta, köpüğün çimento hamuruna ilavesinden önce bekletilmeden doğrudan karışıma aktarılmasıdır. İkinci husus ise, karıştırma süresinin fazla uzun olmaması ve mevcut köpüklerin bozulmasına neden olmadan gerçekleştirilmesidir. Aksi takdirde, köpüklerin sönmesi durumunda istenen gözenekli yapı elde edilemez ve hedeflenen özelliklerde köpük beton üretimi mümkün olmaz.



Şekil 3.6: Köpüğün ıslak karışıma ilave edilmesi

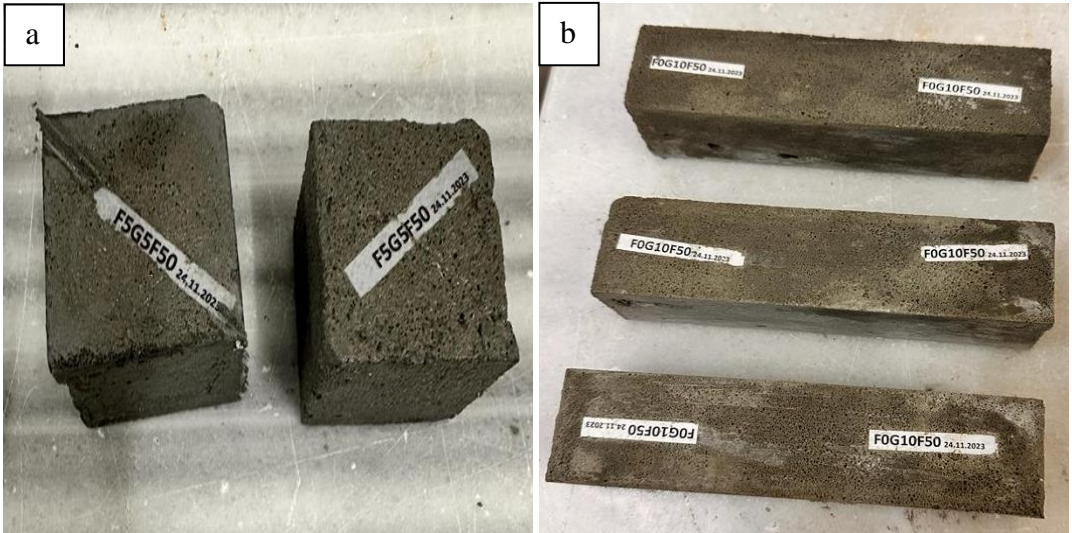
Yine çalışma esnasında dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise köpük üretiminin hassas bir süreç olmasıdır. Aynı köpük ajanı ve su oranı karıştırılmasına rağmen aynı yoğunluk değeri elde edilemeyebilir. Bu nedenle köpük üretimi dikkatli bir şekilde gerçekleştirilmelidir. Hazır hale gelen köpük beton karışımlarının yapılacak deneylere istinaden 50×50×50 mm küp ve 40×40×160 mm prizma kalıplara aktarılması işlemine geçilmeden önce kalıplar özenle sert fırça, spatula ve yumuşak fırça ile temizlenip yağlanmıştır. Kalıpların yağlanması elzem bir durumdur aksi durumda kalıptan numunelerin düzgün bir şekilde çıkarılması mümkün olmayacaktır.

Yağlama işlemi yapılan kalıplara her bir serinin kodları düzgünce yerleştirildi, bu sayede her bir numunenin takibi kolaylaşmıştır. Akabinde beton karışımları kalıplara dökülmeye başlandı. Dökülen betonların tam olarak yerleşmesi için beton içerisindeki hava kabarcıklarını söndürmeden bir şişleme işlemi gerçekleştirildi. Şişleme işlemi yapılmadığı takdirde beton karışımı kalıba tam olarak yerleşmeyecek ve kalan boşluklar deneysel çalışmaların hatalı sonuçlar vermesine neden olacaktır.

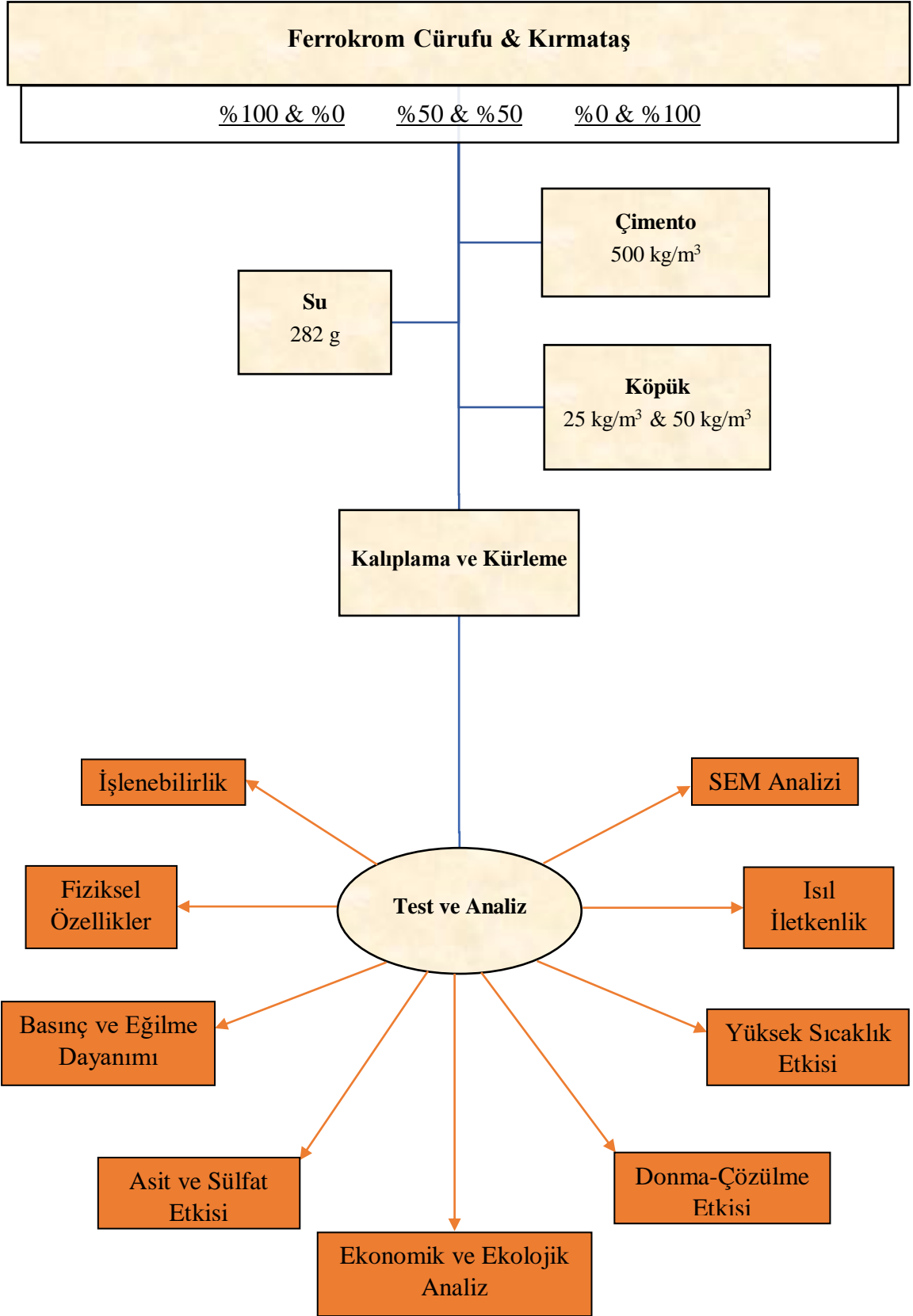


Şekil 3.7: Köpük beton karışımlarının küp kalıba (a), prizma kalıba (b), dökülmesi

Dökümü gerçekleştirilen numunelerin yüzeylerinde, gerekli deneylerin rahatlıkla yapılıp yanlış sonuçlara mahal vermemesi için düzeltilme işlemi yapılmıştır. Tam anlamıyla sertleşmiş olan numunelerin kalıp sökümü işlemine geçildi. Dikkatli bir şekilde numunelere zarar verilmeden kalıplar söküldü. Akabinde ise yapılacak deneyler için numuneler gerekli şartlarda muhafaza edilmeye bırakılmıştır.



Şekil 3.8: Köpük betonların küp kalıptan (a), prizma kalıptan (b) sökülmüş hali



Şekil 3.9: Deney planının şematik gösterimi

3.8 Uygulanan Testler ve Yöntemleri

Bu çalışma kapsamında, ilk aşamada üretilen yaş köpük betonların işlenebilirliği, yayılma tablası yöntemi ile belirlenmiştir. Kuru hale getirilen köpük beton numuneleri üzerinde ise, kuru birim hacim ağırlığı, su emme kapasitesi ve görünür porozite gibi temel fiziksel özellikler incelenmiştir. Ayrıca, mekanik ve dayanıklılık performanslarını değerlendirmek amacıyla basınç dayanımı, eğilme dayanımı, asit ve sülfat etkisine karşı direnç, donma-çözülme çevrimlerine karşı dayanım, yüksek sıcaklık etkisi ile ısıl iletkenlik testleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapısal analizler kapsamında Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) incelemeleri yapılmıştır. Bununla birlikte, malzemenin çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği açısından maliyet analizi, gömülü enerji ve gömülü CO₂ emisyon analizleri de yürütülmüştür. Uygulanan testler ve gerçekleştirilen analizlerde takip edilen adımlar aşağıda detaylı olarak belirtilmiştir.

3.8.1 İşlenebilirlik

Hazırlanan köpük beton karışımlarının taze hal özellikleri yani işlenebilirliklerinin belirlenmesi yayılma çaplarının tespiti ile gerçekleştirilmiştir. Köpük betonların yayılma çapları üst ve alt yüzeyleri sırasıyla 70 mm ve 100 mm çaplı, açık ve yüksekliği 50 mm olan silindir kase vasıtasıyla cam yüzey üzerinde ölçülmüştür. ASTM C 1437'ye göre 15 saniyelik periyotta totalde 25 kez vurularak hazırlanan karışımın yayılması beklenmiş akabinde çap değerleri X ve Y doğrultularında ölçülmüş ve ortalama bir değer tespit edilmiştir.



Şekil 3.10: Köpük beton karışımlarının yayılma tayini

3.8.2 Fiziksel Özellikler

Hazırlanan köpük betonların su emme, sertleşmiş birim hacim ağırlık ve görünür porozite gibi fiziksel özellikleri ASTM C 642 standardı esas alınarak 40×40×160 mm prizma numunelerde Arşimet deneyi ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda etüvde 24 saat kurutulduktan sonra köpük betonların etüv kuru ağırlıkları hassas terazide tartılarak tespit edilmiştir (W_1). Daha sonra kür havuzunda 48 saat bekletilen numunelerin yüzeyleri üzerindeki serbest suyun kurulanmasına özen gösterilerek suya doymuş durumdaki halleri hassas terazi yardımı ile tartılmıştır (W_3). Bu şekilde DKY (Doymuş kuru yüzey) halinde tartılma işlemi gerçekleştirilmiştir. Son olarak numunelerin su içerisinde asılı ağırlıkları tespit edilmiştir (W_2). Elde edilen kuru ve suya doymuş ağırlıklar aşağıdaki denklem 1, 2 ve 3 kullanılarak köpük betonların su emme, görünür porozite ve birim hacim ağırlık değerlerine ulaşılmıştır.

$$\text{Su emme (\%)} = \left(\frac{W_3 - W_1}{W_3} \right) * 100 \quad (1)$$

$$\text{Görünen porozite (\%)} = \left(\frac{W_3 - W_1}{W_3 - W_2} \right) * 100 \quad (2)$$

$$\text{Kuru birim hacim ağırlık (kg/m}^3\text{)} = \left(\frac{W}{V} \right) \quad (3)$$

(W: Ağırlık, V: Hacim = 4×4×16 cm = 256 cm³)'tür.

Kuru birim hacim ağırlık numunenin kuru haldeki ağırlığının hacmine oranı olarak ifade edilmektedir. Bundan ötürü ilk olarak numunelerin kuru ağırlıkları hassas terazi ile ölçülmüş ve hacmine bölünerek değerler elde edilmiştir.

3.8.3 Basınç ve Eğilme Dayanımı

Köpük betonların eğilme ve basınç dayanımları 40×40×160 mm prizma numunelerle tespit edilmiştir. Bu kapsamda üretimi gerçekleştirilen numuneler kalıplardan sökülmüş ve deneylerin gerçekleşeceği güne kadar küre tabi tutulmuştur. Günü gelen numuneler ilk olarak ASTM C 348 standartına uygun olarak eğilme testine tabi tutulmuştur. Yükleme hızı ise 50 N/s olan 3 noktalı eğilme cihazı ile test gerçekleştirilmiştir. Eğilme deneyi neticesinde ikiye ayrılan numunelerin her bir parçası için basınç dayanımları tespit

edilmiştir. Basınç dayanımı ise ASTM C 349 standardı referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Mekanik özellikler 3, 7 ve 28. günlerde tayin edilmiştir.



Şekil 3.11: Basınç ve eğilme dayanımı tespit cihazı

Eğilme dayanımı tayininde kullanılan üç noktalı eğilme deneyi düzeneği şu şekilde özetlenebilir. Her bir numune aralarındaki uzaklığın 100 mm olduğu iki silindir üzerine yerleştirilmekte ve numunenin üst yüzeyinin orta noktaya denk gelen aynı ebatlardaki silindir ile numune kırılıncaya kadar bir yükleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Tespit edilen kırılma yükü ile eğilme dayanımı hesabı gerçekleştirilmektedir.

Eğilme dayanımı hesabında aşağıdaki denklem 4'te verilen bağıntıdan faydalanmıştır.

$$\sigma_e : \frac{3}{2} \times \frac{F \times L}{b \times d^2} \quad (4)$$

Formülasyonda:

σ_e : Eğilme dayanımı, MPa

F: Kırılma yükü, kN

L: Mesnet silindirleri arasındaki açıklık, mm

b: Numunenin en kesit genişliği, mm

d: Numunenin en kesit yüksekliği, mm



Şekil 3.12: Köpük betonların eğilme dayanımı tespiti

Basınç dayanımı tayininde tek eksenli basınç cihazından faydalanılmıştır. Öncelikli olarak beton döküm yönü ve yüzey düzgünlüğü tespiti yapılır yüzeyin düzgün olması deney sonuçlarının daha doğru tespit edilmesi için önem arz etmektedir. Eğer yüzey düzgün değilse ya yüzey aşındırılmalı ya da başlık yapılmalıdır. Çalışma kapsamında üretilen numunelerin yüzeyleri düzgün olduğu için böyle bir yonteme gereksinim duyulmamıştır. Akabinde numuneler presin tam merkezine gelecek şekilde yerleştirilir ve yüklenmeye başlanır. Numune kırılıncaya kadar yüklemeye devam edilir.

Basınç dayanımı hesabında aşağıdaki denklem 5’de verilen bağıntıdan faydalanmıştır.

$$f_c = \frac{P}{A_c} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (5)$$

Formülasyonda:

f_c : Beton deney numunesi basınç dayanımı (N/mm²).

P: Kırılma yükü (N).

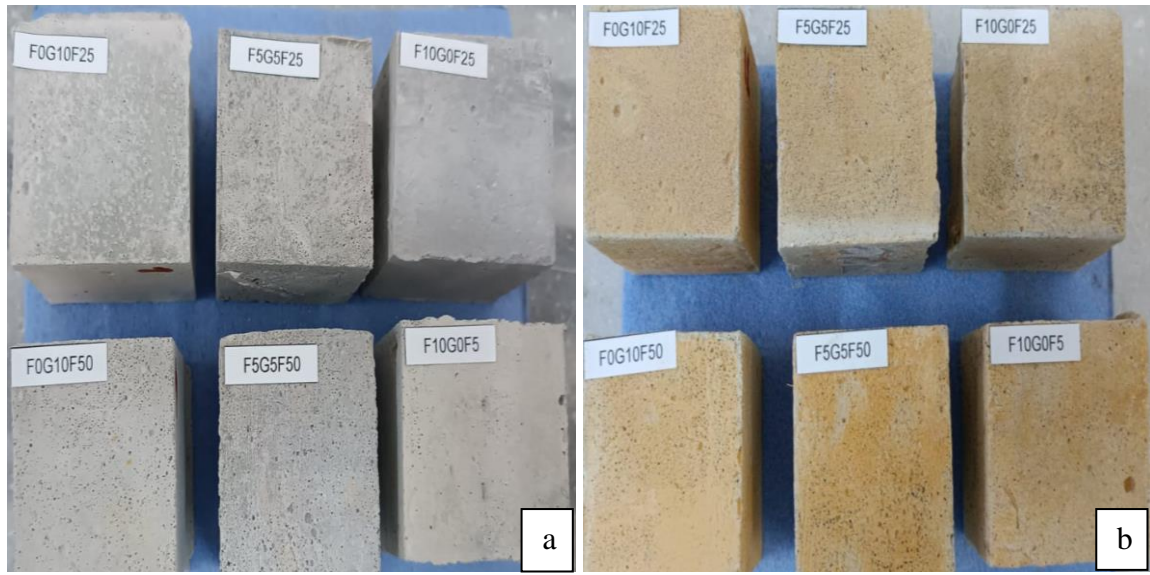
A_c : Deney yükü, uygulama yönüne dik deney numunesi ortalama kesit alanı (mm²)



Şekil 3.13: Köpük betonların basınç dayanımı tespiti

3.8.4 Asit (H_2SO_4) ve Sülfat (Na_2SO_4) Etkisi

Ferrokrom agregasının durabiliteye etkisinin tayini için üretilen köpük betonlar %5'lik H_2SO_4 ve %5'lik Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilmiştir. Deney ASTM C 267 ve ASTM C 1012 standartı esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda sülfürik asit (H_2SO_4) ve sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltilerine yerleştirilen $50 \times 50 \times 50$ mm boyutundaki küp numunelerin 90. gün itibari ile basınç dayanımları ölçülmüştür. Deneyin gerçekleştirilmesi sırasında asit ve sülfat solüsyonları her ay yenilenmiştir.



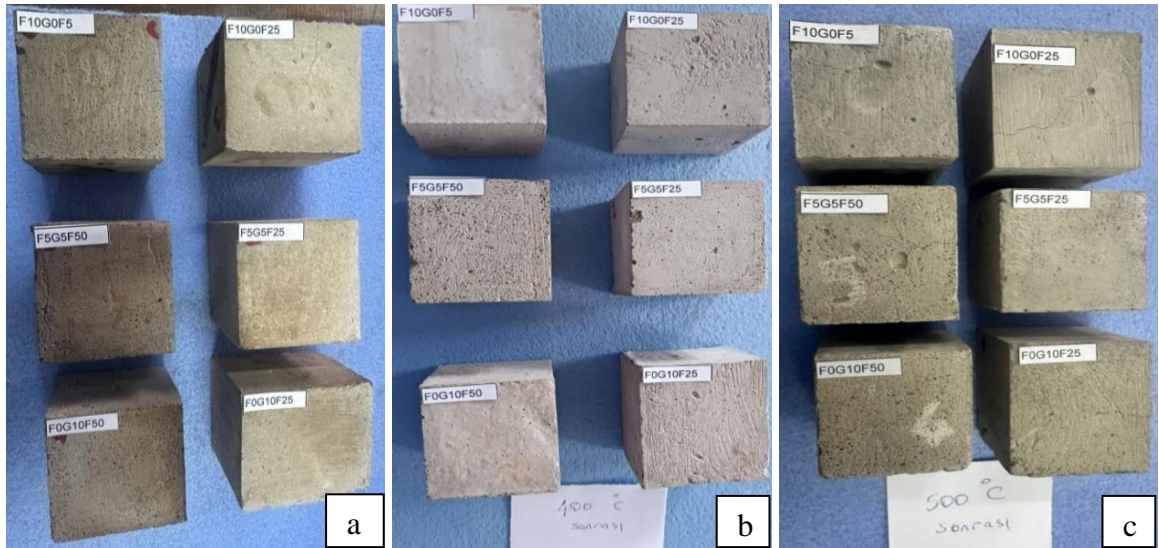
Şekil 3.14: Köpük betonların H_2SO_4 (a), Na_2SO_4 (b), çözeltisinde bekletilmiş halleri

3.8.5 Donma-Çözülme Etkisi

Çalışma kapsamında üretilen köpük beton numunelerinin donma-çözülme dirençlerinin tespiti ASTM C 666'da belirtilen yöntemden esinlenerek belirlenmiştir. Donma-çözülme deneyinin gerçekleştirilmesi için öncelikli olarak numuneler 3 günlük bir süre zarfında suda bekletilmiştir. Böylece numunelerin suya doymun bir hal alması sağlandı akabinde ise donma-çözünme deneyi için numuneler $-20^\circ C$ 'de 2 saat donma ve çeşme suyu içerisinde 1 saat çözülme olacak şekilde toplamda 3 saatlik bir döngüye tabi tutulmuştur. Donma-çözünme periyodu ise 25 döngüden oluşmaktadır. Döngüsü sona ermiş numunelerin donma-çözünme direnci, basınç dayanımlarının tespiti ile belirlenmiştir. Donma çözülme etkisi $40 \times 40 \times 160$ mm ebatlarındaki prizma numuneler üzerinde tespit edilmiştir.

3.8.6 Yüksek Sıcaklık Etkisi

Yüksek sıcaklık dayanımlarının tespiti için kalıptan sökülen 50×50×50 mm ebadındaki küp numuneler 28 günlük bir süre zarfında su kürüne tabi tutulmuştur. Kürden çıkarılan numuneler ilk olarak 24 saat boyunca oda sıcaklığında muhafaza edilerek kurumaları sağlanmıştır akabinde ise içeriğindeki suyun tam olarak atılması amacıyla 105°C (±5°C) etüvde 24 saat muhafaza edilmiştir. Köpük beton numunelerinin 300°C, 400°C, ve 500°C’de yüksek sıcaklık dirençleri ölçülmüştür. Köpük betonun 530°C’ye kadar olan sıcaklıklarda termal stabilitesini büyük ölçüde koruyabildiği, ancak bu sınırın üzerinde kimyasal ve fiziksel bozulmaların hızlandığını göstermektedir (Mydin ve Wang, 2012). Bu nedenle, 500 °C, köpük betonun güvenli kullanım sınırı olarak kabul edilmiş ve yüksek sıcaklık analizlerinde referans noktası olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda ısıtma hızı dakikada 5°C/dk olan kül fırını kullanılarak numuneler belirtilen sıcaklıklara ulaştıklarında 120 dakika boyunca yüksek sıcaklığa tabi tutulmuştur. Yüksek sıcaklıktan çıkarılan numunelerin oda sıcaklığında bekletilerek soğumaları sağlanmıştır. Mekanik özelliklerindeki değişimin tespiti için soğuma işlemi tamamlanan numuneler basınç testine tabi tutularak elde edilen veriler kayıt altına alınmıştır.



Şekil 3.15: Köpük betonların 300°C (a), 400°C (b), 500°C (c), sıcaklık sonrası halleri

3.8.7 Isıl İletkenlik

Bir malzemenin ısı aktarma yeteneği yani malzeme tarafından aktarılabilen ısı miktarı ısı iletkenlik veya termal iletkenlik olarak ifade edilmektedir. 50×50×50 mm ebadında üretilen köpük betonların ısı iletkenlik katsayıları Tci Thermal Conductivity Analyzer cihazı ile ölçülmüştür. Cihaz değiştirilmiş geçici düzlem kaynağı (Modified Transient Plane Source) yöntemine göre ölçüm gerçekleştirmektedir. Isıl iletkenlik katsayısı ASTM D 7984 standartı esas alınarak yapılmıştır.



Şekil 3.16: Köpük betonların ısı iletkenlik katsayılarının tespiti

3.8.8 Ekonomik ve Ekolojik Analiz

Çalışma kapsamında ferrokrom cürufu kullanılarak üretilen köpük betonun sürdürülebilirlik açısından ekonomik ve ekolojik irdelenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda öncelikli olarak üretimde kullanılan hammaddelerin ve enerji sarfiyatının maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Ekonomik analiz aşamasında piyasadan elde edilen birim fiyatlardan faydalanılmış ve üretim yapılan köpük betonların yaklaşık maliyetleri çıkarılmıştır.

Tablo 3.4: Hammadde ve enerji birim fiyatı

Malzeme	Maliyet
Kırmataş Agregası	0,52 ₺/kg
Ferrokrom Cürufu	0 ₺/kg
Çimento	2,3 ₺/kg
Köpük Ajanı	2,21 ₺/kg
Su	0,0266 ₺/kg
Enerji	1,899 ₺/sa

Ekolojik analiz kısmında ise Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) yönteminin içerisinde yer alan gömülü (somutlaştırılmış) enerji ve gömülü (somutlaştırılmış) CO₂ kavramları dikkate alınmıştır. Gömülü enerji, üretilecek yapı malzemesinin hammadde olarak çıkarılması, üretilmesi, nakliye edilmesi gibi geniş bir süreç içerisinde harcanan toplam enerji olarak ifade edilebilir. Gömülü karbon, üretimi gerçekleştirilen yapı malzemesinin hammadde tedarikinden kullanıma konulması süresince doğaya salınan sera gazı olarak ifade edilebilir. Bu doğrultuda literatürden faydalanarak elde edilen birim değerler ile köpük beton numunelerinin ekolojik analizi gerçekleştirilmiştir. Ferrokrom cürufu gibi çeşitli cürufların atık veya yan ürün olmaları sebebiyle gömülü enerji ve CO₂ emisyon değerlerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu belirten çalışmalar mevcuttur (Tait ve Cheung, 2016; Mohanty vd., 2023). Bu çalışmada ise Acharya ve Patro'nun (2024) belirttiği gibi agrega üretimi esasında 4 aşamadan oluşmaktadır. Bunlar hammaddenin çıkarılması, üretim birimine taşınması, istenen boyuta indirgenmesi, üretilen malzemenin harmanlanma sahasına taşınmasıdır. Ferrokrom cürufu atık malzeme olmasından dolayı sadece son aşamada belirtilen nakliyeden oluşabilecek enerji ve CO₂ değerleri analizlerde dikkate alınmıştır. Ferrokrom cürufu için envanter verilerinin yokluğu nedeniyle, kırmataş agregasının sahip olduğu değerlerin 4'te 1'i alınarak analiz gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.5: Hammadde ve enerjinin gömülü enerji ve karbon ayak izi (Botto, 2009; Hammond vd., 2011; Lu vd., 2021; Neupane, 2022; Acharya ve Patro, 2024; Ifzaznah vd., 2024)

Malzeme	Gömülü enerji (Mj/kg)	Gömülü karbon (kgCO₂e/kg)
Kırmataş agregası	0,083	0,0052
Ferrokrom cürufu	0,02075	0,0013
Çimento	5,6	0,86
Köpük ajanı	18,1	2,05
Su	0	0,00091
Enerji	9,28	0,4262

3.8.9 SEM (Scanning Electron Microscope) ile Numunelerin Karakterizasyonu

Taramalı Elektron Mikroskobu diğer bir ifadeyle SEM, yapısında bulunan elektron tabancasıyla inceleme yapılacak numuneden bir elektron koparmak için elektron bulutu göndererek onun karakterize edilmesine yarayan bir sistemdir. Mantık olarak numunenin kompozisyonu ve topoğrafyası ile ilgili bilgilerin üç boyutlu görüntüsünün alınmasıdır. Bu

kapsamda Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı kullanılarak hammadde olan ferrokrom cürufu ile üretilen köpük betonların içyapıları incelenmiştir. Köpük betonların SEM incelemesi 28 gününü dolduran 50×50×50 mm küp numuneler üzerinde doğrudan gerçekleştirilmiştir.



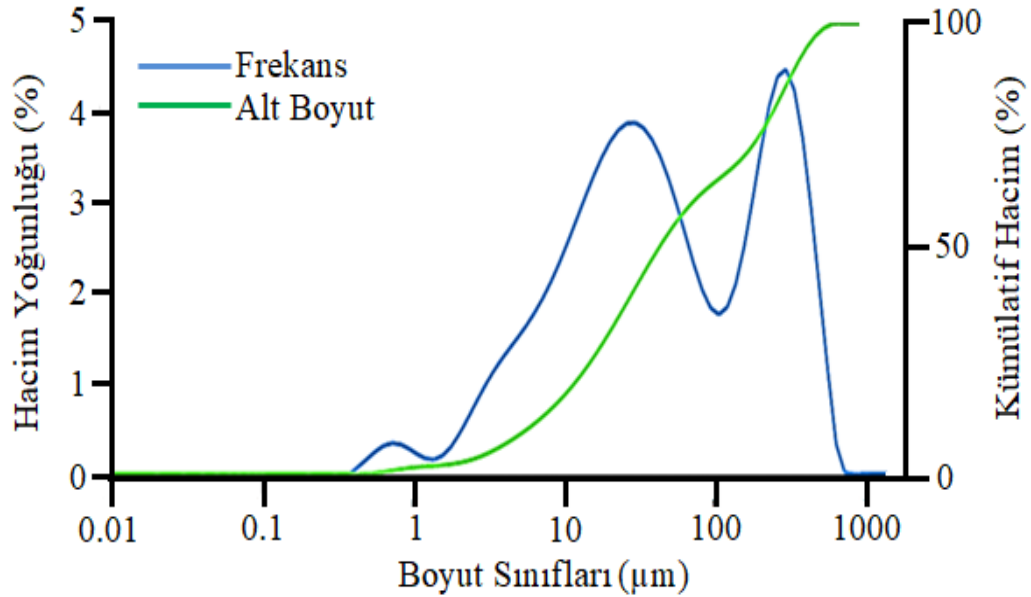
Şekil 3.17: SEM görüntüleme cihazı (URL-3, 2025)

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu kısımda ana ürün olan ferrokrom cürufuna ait bulgular ile köpük betonlar üzerinde yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen bulgular izah edilmiştir.

4.1 Ferrokrom Cürufunun Karakterizasyon Bulguları

Bu bölümde ana hammadde olan ferrokrom cürufuna ait yapılmış olan çeşitli analiz sonuçları verilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak Şekil 4.1’de ferrokrom cürufunun partikül boyut dağılımı görülmektedir. Bu analiz sonucuna göre ferrokrom cürufunun üç modlu karmaşık bir partikül şekline ve boyut dağılımına sahip olduğu anlaşılmaktadır. Yani, iri tanelerin olduğu 100-700 μm aralığında bir dağılıma, 1-100 μm aralığında orta boyutlu dağılıma ve 1 μm ’den küçük ince boyutlu bir dağılıma sahip tozlardan oluştuğu söylenebilir. Genel analiz sonucuna göre ise, cürufun D50 (ortalama partikül boyutu) 41,6 μm , D10 ve D90 değerleri ise sırasıyla 5,63 μm ve 333 μm olarak tespit edilmiştir. Ferrokrom cürufunun yoğunluğu ise 3,32 g/cm^3 tür.



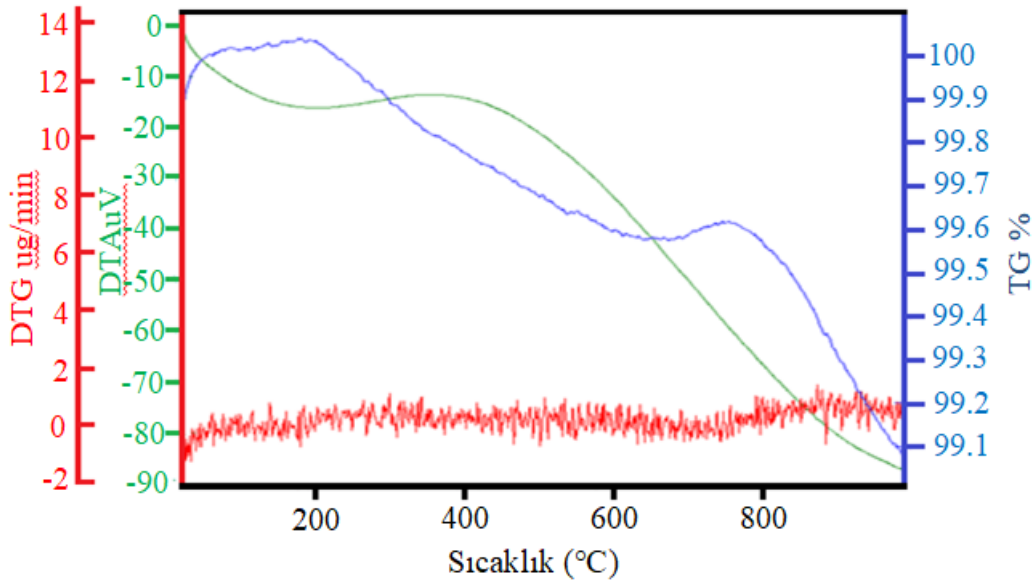
Şekil 4.1: Ferrokrom cürufunun partikül boyut dağılımı

Ferrokrom cürufunun kimyasal bileşimi X-ışını floresan spektrometresi (XRF) analizi ile tespit edilmiş ve Tablo 4.1’de verilmiştir. Görüldüğü üzere kullanılan ferrokrom cürufunun büyük bir kısmı SiO_2 , MgO ve Al_2O_3 bileşiğinden oluşmaktadır.

Tablo 4.1: Ferrokrom cürufunun kimyasal bileşimi

Bileşenin Adı	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Ağırlık kaybı
İçeriği (%)	4,35	30,29	0,92	1,06	36,32	25,72	0,2	0,1	0,88

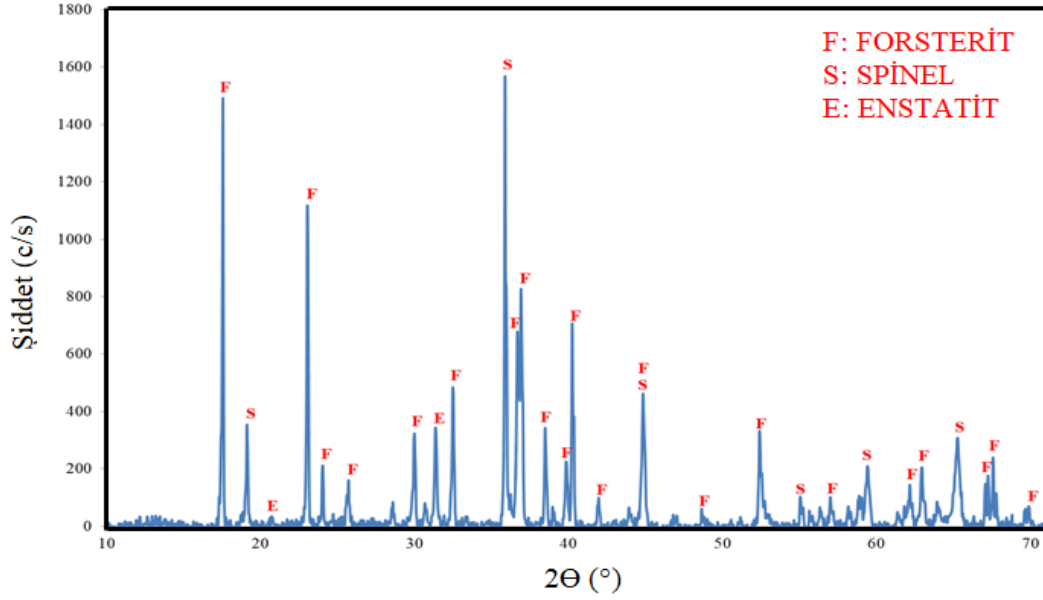
Termogravimetrik analiz (TGA), artan sıcaklıkla numune kütesinde meydana gelen artış veya azalışın tespiti için gerçekleştirilir. Analiz fırın içerisine yerleştirilen numunenin hassas terazi üzerindeki ağırlık değişiminin kayıt altına alınması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Çalışma kapsamında TGA analizi gerçekleştirilen ferrokrom cürufunun kütle değişimi Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde kayda değer bir kütle değişimi gerçekleşmemekle birlikte 25°C ile 225°C arasında adsorpsiyon nedeniyle küçük bir kütle artışı (%0,15) gerçekleşmiştir. 225°C ile 700°C arasında ise yanma ile kütle kaybı (%0,4) olurken, 700°C ile 780°C arasında oksidasyon sebebiyle yine küçük bir kütle artışı (%0,05) ve sonra 1000°C’ye kadar tekrar bir kütle kaybı (%0,5) söz konusudur. 1000°C kadar ısıtılan ferrokrom cürufunun kütle kaybı toplamda %0,88 değerinde gerçekleşmiş olup kütesini neredeyse koruduğu söylenebilir.



Şekil 4.2: Ferrokrom cürufunun TGA analizi

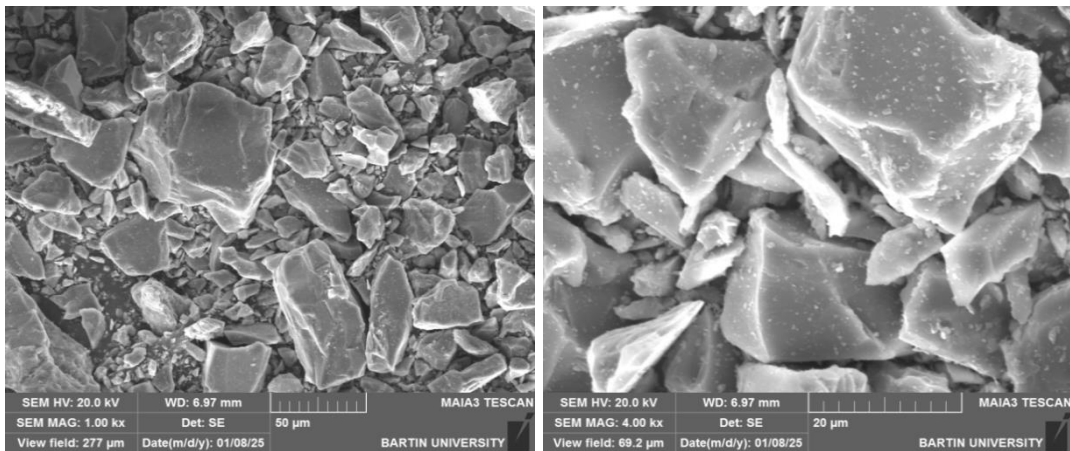
Malzemenin haiz olduğu kristal yapısına X-ışınları difraksiyonu (XRD) cihazı ile gönderilen ışının değişik açıda ve şiddette kırılmasına göre analiz yapılmaktadır. Malzemenin mineralojik bünyesinde oluşan kristalleşme çeşitlerinin pik seviyeleri hakkında bilgi vermektedir. Bu çalışma kapsamında ana hammadde olan Elazığ ferrokrom

cürufu için yapılmış olan XRD analizi Şekil 4.3'te verilmiştir. Analiz 10° - 70° aralığında ve $0,04^{\circ}$ adım hızı ile gerçekleştirilmiştir. Elazığ ferrokrom cürufunun XRD analizi irdelendiğinde yaygın fazların amorf cam, forsterit ($Mg_2SiO_4-Fe_2SiO_4$), spinel ($MgAl_2O_4$) ve enstatit ($MgSiO_3$) olduğu görülmektedir.



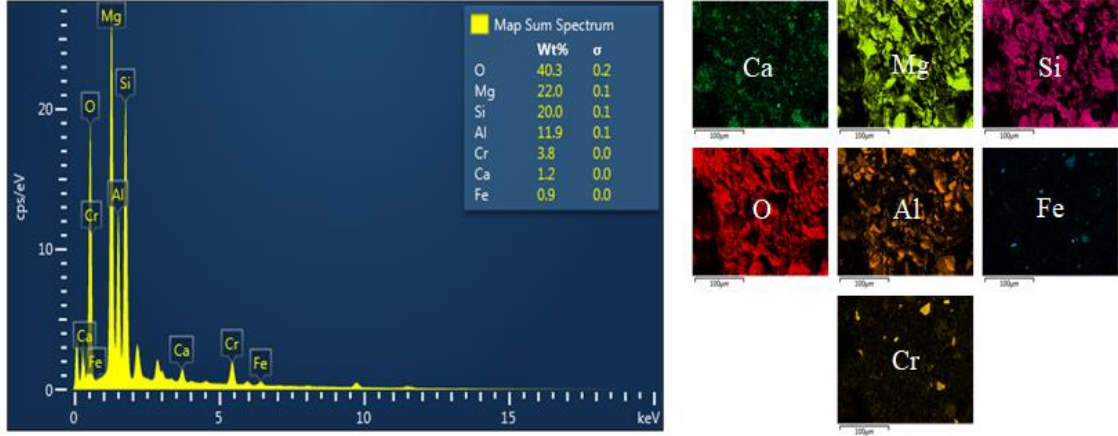
Şekil 4.3: Ferrofrom cürufunun XRD analizi

Çalışma bünyesinde öncelikli olarak kullanılan ferrokrom cürufunun SEM görüntüleri Şekil 4.4'te verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde ferrokrom cürufunun yüzey profilinin köşeli ve iyi yapışma özelliğine sahip olduğu söylenebilir. Ferrokrom cürufunun sahip olduğu bu form çimento ile aderansının artmasında etken olduğu vurgulanabilir.



Şekil 4.4: Ferrokrom cürufunun SEM görüntüsü

Enerji Dağılımlı X-ışını Spektrometresi (EDS), bir numunenin bünyesinde yer alan elementleri tanımlamak ve ölçmek için kullanılan yaygın bir mikro analitik yöntemdir. Bu kapsamda ana ürün olan ferrokrom cürufuna ait EDS analizi Şekil 4.5'te verilmiştir. Belirlenen oranların XRF analiziyle uyumlu olduğu söylenebilir.



Şekil 4.5: Ferrokrom cürufunun EDS görüntüsü

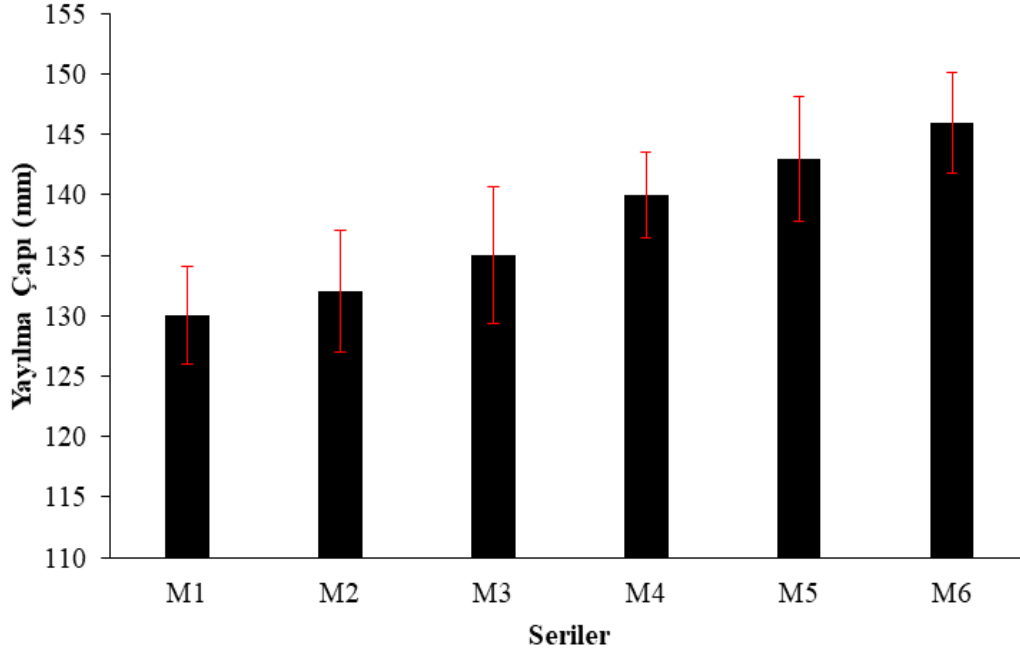
4.2 Taze Köpük Beton Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Üretilen köpük beton numunelerinin taze haldeki yayılma çapları Şekil 4.6'da verilmiştir. Yayılma çapları en düşük 130 mm ile en yüksek 146 mm aralığında değişkenlik sergilemiştir.

Yayılma çapları incelendiğinde köpük betonda FC miktarının artmasıyla işlenebilirliğin yani yayılma çaplarının arttığı görülmektedir. Bu durum iki farklı köpük içeriğine sahip serilerin kendi içerisinde değerlendirilmesiyle şu şekilde ifade edilebilir. 25 kg/m³ köpük içeriğine sahip, M1 serisine göre M2 ve M3 serinin yayılma çaplarında sırasıyla %1,54'lük ve %3,85'lik artış olduğu saptanmıştır. Aynı şekilde 50 kg/m³ köpük içeriğine sahip, M4 serisine göre M5 ve M6 serisinin yayılma çaplarında sırasıyla %2,14'lük ve %4,29'lük artış olduğu saptanmıştır.

Bu artışın temel nedeni olarak, ferrokrom cürufunun kırmataş agregasına kıyasla daha yüksek özgül ağırlığa sahip olması ve bu durumun taze karışımda yerçekimi etkisini artırarak yayılma kabiliyetini kısmen iyileştirmesi şeklinde değerlendirilebilir.

Yayılma çapındaki artış değerleri çeşitli durumlarda gerçekleşebileceği ifade edilmiştir (Kumar vd., 2022). Ancak yapılan çalışmada ferrokrom cürufu ile kırmataş agregasının yer değiştirmesi ile yayılma çaplarının birbirine yakın değerler sergilediği belirlenmiştir. Panda vd. (2013) bu doğrultuda sonuçlar elde etmişlerdir.



Şekil 4.6: Köpük betonların yayılma çapları

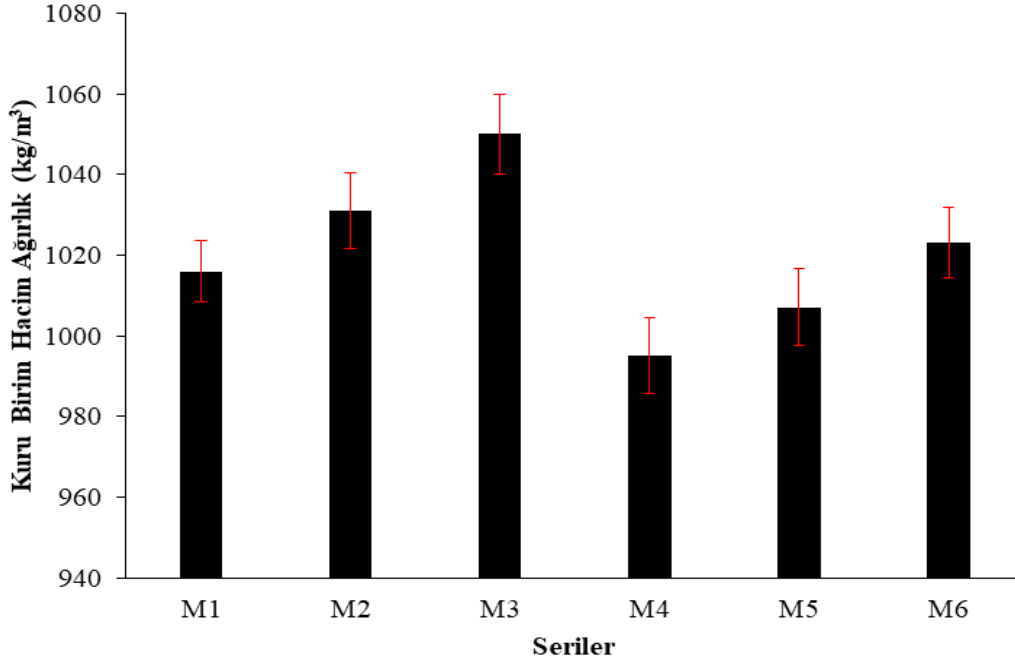
Diğer taraftan 25 kg/m^3 köpük içeriğine sahip serilerin 50 kg/m^3 köpük içeriğine sahip serilere kıyasla yayılma çaplarının daha düşük olduğu gözlenmiştir. Buradan hareketle köpük miktarının artışının işlenebilirlik ile doğru orantılı olduğu söylenebilir.

50 kg/m^3 köpük içeriğine sahip seriler ile 25 kg/m^3 köpük içeriğine sahip serilerin yayılma çaplarının ortalama değeri alındığında bu iki ana grup arasında yaklaşık olarak yayılma çaplarında %8,06'lık bir fark olduğu saptanmıştır. Belirtildiği gibi köpük dozajının artması ile yayılma çaplarında bir artış olduğu söylenebilir. Yapılan çalışmalar da bu durumu destekler niteliktedir (Othman vd., 2021; Bayraktar ve Kaplan, 2021).

Chen ve Liu (2013) artan köpük içeriği ile yayılma çapındaki artışı, köpük içeriğinin artışıyla hacmin arttığı böylece yoğunluğun azaldığı ve köpük içerisinde yer alan hava kabarcıklarının bilyeli rulman gibi davranması, şeklinde açıklamıştır.

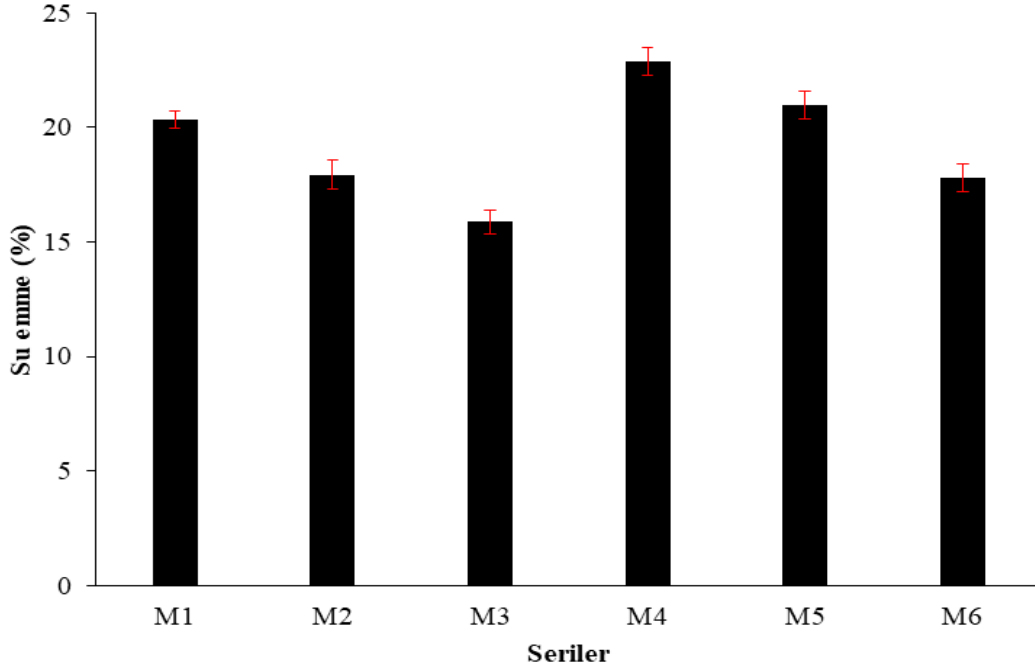
4.3 Köpük Betonların Fiziksel Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Köpük betonların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için kuru birim hacim ağırlık, su emme ve görünür porozite değerleri tespit edilmiştir. Şekil 4.7’de verilmiş olan köpük betonların kuru birim hacim ağırlıklarının agrega cinsi ve köpük içeriği ile değişkenlik gösterdiği söylenebilir. Bu kapsamda 25 kg/m³ köpük içeriğine sahip M1 serisine göre M2 ve M3 serisinin kuru birim hacim ağırlığında %1,48’lik ve %3,35’lik artış olduğu belirlenmiştir. Aynı şekilde 50 kg/m³ köpük içeriğine sahip M4 serisine göre M5 ve M6 serisinin kuru birim hacim ağırlığında %1,21’lik ve %2,81’lik artış olduğu belirlenmiştir. Ferrokrom cürufunun, kırmataş agregasına göre özgül ağırlık değerinin yüksek olması bu durumu açıklar niteliktedir (Islam vd., 2021; Ojha vd., 2021).



Şekil 4.7: Köpük betonların kuru birim hacim ağırlıkları

Ayrıca artan köpük içeriği ile köpük betonların kuru birim hacim ağırlıklarının düştüğü görülmektedir. 25 kg/m³ ve 50 kg/m³ köpük içeriğine sahip serilerin ortalama değerleri alınıp bir kıyaslama yapıldığında %2,32’lik bir azalmanın artan köpük miktarıyla gerçekleştiği söylenebilir. Köpük içeriği ile kuru birim hacim arasında ters orantı olduğu yani artan köpük içeriğinin kuru birim hacim ağırlığı düşürdüğü vurgulanabilir (Kozłowski ve Kadela, 2018; Gençel vd., 2022b).



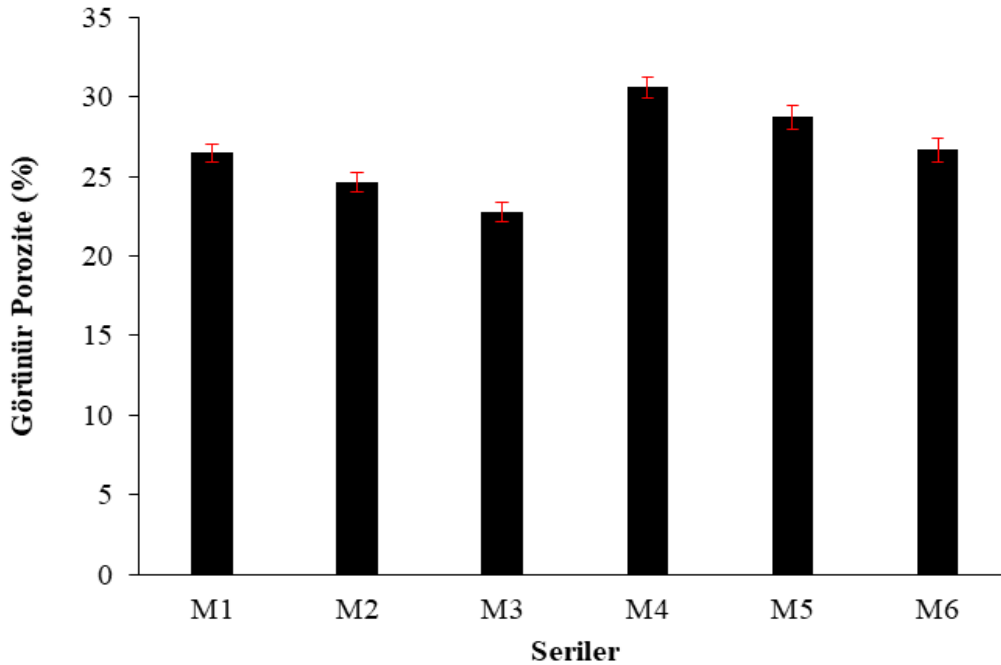
Şekil 4.8: Köpük betonların su emme değerleri

Sertleşmiş betonun dayanıklılığının belirlenmesinde su emme önemli bir parametre olup su emmenin azaltılması betonun uzun süreli performansını kayda değer ölçüde artırabilir. Köpük beton numunelerinin su emme değerleri ise Şekil 4.8'de verilmiştir. Bulunan değerler incelendiğinde köpük beton numunelerinin su emme değerleri ferrokrom cürufunun karışımdaki oranın artmasıyla azaldığını göstermektedir. Bu kapsamda 25 kg/m^3 köpük içeriğine sahip M1 serisine göre M2 ve M3 serisinin su emme değerlerinde %12,25'lik ve %22,06'lık azalma olduğu söylenebilir. Aynı şekilde 50 kg/m^3 köpük içeriğine sahip M4 serisine göre M5 ve M6 serinin su emme değerlerinde %8,30'luk ve %22,27'lik azalma olduğu söylenebilir. Su emme değerinin ferrokrom cürufunun karışımında artmasına bağlı olarak azalması ferrokrom cürufunun ortalama partikül boyutunun, kırmataşın ortalama partikül boyutuna göre daha küçük olması ve bu sebeple köpük beton boşluklarında dolgu etkisi oluşturmasından kaynaklanabilir.

Hang vd. (2023) çimento yüzey alanına göre ferrokrom cüruf tozunun spesifik yüzey alanının daha büyük olduğu bu sebeple çimento hidrasyon ürünleri ile agregalar arasındaki boşlukları doldurabileceği ve betonda oluşabilecek mikro çatlak sayısını düşürebileceğini belirtmiştir. Böylece su emme oranının azalabileceği vurgulanmıştır. Dey vd. (2022) yapmış oldukları çalışmada geleneksel kaba agregaya nispeten ferrokrom cüruf agregasının su emmesinin daha düşük olduğu belirtilmiştir.

Ayrıca artan köpük içeriği ile köpük betonların su emme değerlerinin arttığı görülmektedir. 25 kg/m³ ve 50 kg/m³ köpük içeriğine sahip serilerin ortalama değerleri alınıp bir kıyaslama yapıldığında %13,87'lik bir artışın artan köpük miktarıyla gerçekleştiği söylenebilir. Köpük içeriği ile su emme arasında doğru bir orantı olduğu yani artan köpük içeriği ile su emmenin arttığına tespit edildiği çalışmalar bu durumu destekler niteliktedir (Cong ve Bing, 2015; Zhang vd., 2022).

Görünür porozite değerleri incelendiğinde su emme değerleri ile orantılı olduğu gözlenmektedir. Çünkü görünür porozite miktarındaki artış ile su emme miktarının artması durumu söz konusudur. Köpük betonların görünür porozite değerleri ise Şekil 4.9'da verilmiştir. Değerler köpük betonların görünür porozite değerlerinin ferrokrom cürufunun karışımındaki oranın artmasıyla azaldığını göstermektedir. Bu kapsamda 25 kg/m³ köpük içeriğine sahip M1 serisine göre M2 ve M3 serisinin görünür porozitesinde %7,17'lik ve %13,96'lık azalma olduğu söylenebilir. Aynı şekilde 50 kg/m³ köpük içeriğine sahip M4 serisine göre M5 ve M6 serisinin göre görünür porozitesinde %6,21'lik ve %12,75'lik azalma olduğu söylenebilir.



Şekil 4.9: Köpük betonların görünür porozite değerleri

Ayrıca artan köpük içeriği ile köpük betonların görünür porozite değerlerinin arttığı görülmektedir. 25 kg/m³ ve 50 kg/m³ köpük içeriğine sahip serilerin ortalama değerleri alınıp bir kıyaslama yapıldığında %16,40'lık bir artışın artan köpük miktarıyla gerçekleştiği belirtilebilir. Bu duruma paralel sonuçların elde edildiği çalışmalar mevcuttur (Mastali vd., 2018; Bayraktar vd., 2021; Gençel vd., 2021b).

4.4 Köpük Betonların Basınç ve Eğilme Dayanımlarının Değerlendirilmesi

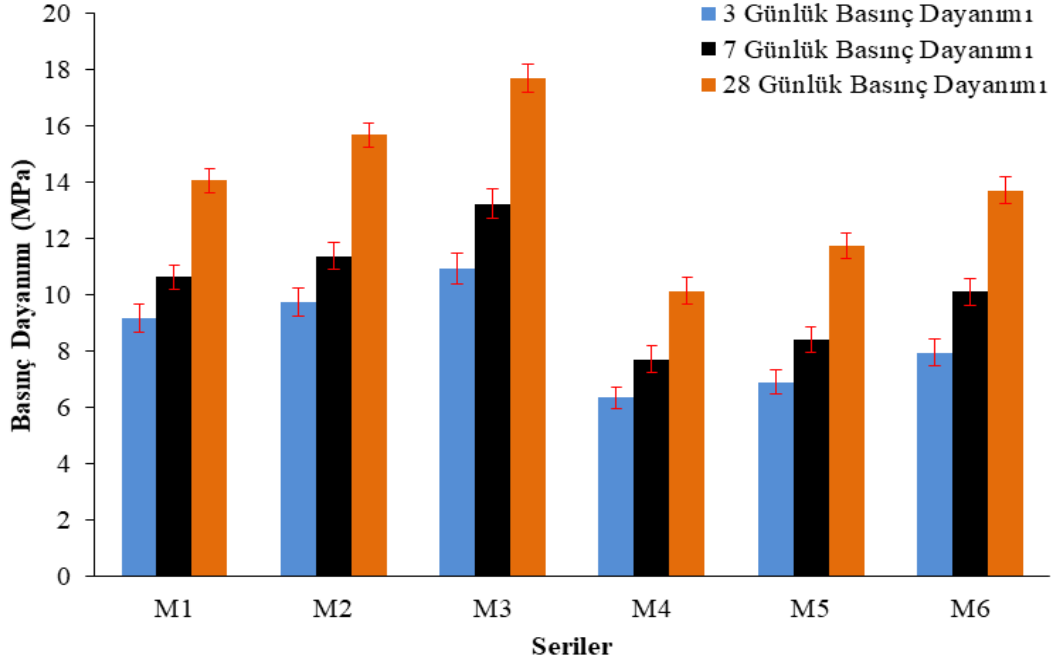
Bu kısımda köpük beton numunelerinin mekanik dayanımları yani basınç ve eğilme dayanımları hakkında elde edilen veriler paylaşılmıştır. Ferrokrom cürufu ve/veya kırmataş kullanılarak üretilen köpük betonlara ait basınç dayanımları Şekil 4.10'da verilmiştir. Mekanik dayanımın köpük miktarı ile agrega cinsine göre değişim sergilediği saptanmıştır. Yine karışımların erken yaşta daha düşük bir basınç ve eğilme dayanımı sergilediği vurgulanabilir. Bu kapsamda 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında en düşük değer 50 kg/m³ köpük içeriğine sahip ve bünyesinde ferrokrom cürufu barındırmayan M4 serisine aittir. Aynı seriye ait değerler 3, 7 ve 28 günlük yaşlar için sırasıyla 6,35 MPa 7,70 MPa ve 10,13 MPa şeklindedir. 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında en büyük değerler ise 25 kg/m³ köpük içeriğine sahip ve bünyesinde kırmataş barındırmayan M3 serisine ait olduğu belirtilebilir aynı seriye ait değerler 3, 7 ve 28 günlük yaşlar için sırasıyla 10,93 MPa, 13,23 MPa ve 17,68 MPa şeklindedir.

Her bir yaş grubunu kendi arasında değerlendirecek olursak 25 kg/m³ köpük içeriğine sahip M1 serisine göre M2 ve M3 serisinde;

- 3 günlük basınç değerlerinde %6,44'lük ve %19,32'lik artış olduğu
- 7 günlük basınç değerlerinde %7,06'lık ve %24,46'lık artış olduğu
- 28 günlük basınç değerlerinde %11,53'lük ve %25,84'lük artış olduğu ifade edilebilir.

Aynı kapsamda 50 kg/m³ köpük içeriğine sahip M4 serisine göre M5 ve M6 serisinde;

- 3 günlük basınç değerlerinde %8,82 ve %25,20'lik artış olduğu
- 7 günlük basınç değerlerinde %9,09 ve %31,17'lik artış olduğu
- 28 günlük basınç değerlerinde %15,79'lük ve %35,24'lük artış olduğu ifade edilebilir.



Şekil 4.10: Köpük betonların basınç dayanımları

Sonuçlar esas alındığında FC miktarındaki artış ile basınç dayanımlarında bir iyileşme olduğu vurgulanabilir. Yapılan birçok çalışmada da aynı doğrultuda sonuçlar elde edilmiştir (Zelic, 2005; Panda vd., 2013; Rajashekar ve Reddy, 2015; Al-Jabri vd., 2018; Kopuri ve Ramesh, 2019; Fares vd., 2023).

Ferrokrom cürufunun mekanik dayanım üzerinde olumlu etki göstermesi, sahip olduğu form sayesinde çimento ile iyi kenetlenmesi ve kırmataş agregasına göre yüksek tokluğa sahip olması ile izah edilebilir (Al-Jabri ve Shoukry, 2018).

Basınç dayanımlarında fark teşkil eden diğer bir parametre ise köpük içeriğidir. Köpük miktarındaki artış basınç dayanımlarında bir azalma yaratmıştır. Bu durum kısaca değerlendirilecek olunursa 3, 7 ve 28 günlük yaş gurubuna ait köpük betonların artan köpük miktarına göre ortalama değer kayıpları sırasıyla %28,94, %25,70 ve %25 şeklindedir. Köpük beton numunelerinin eğilme dayanımları Şekil 4.11'de verilmiştir. Şekil dikkate alındığında köpük betonların eğilme dayanımları agrega cinsi ve köpük miktarıyla değişkenlik gösterdiği belli olup buna benzer bulguların tespit edildiği çalışmalar mevcuttur (Kopuri ve Ramesh 2019; Al-jabri vd., 2018; Islam vd., 2021). Bu kapsamda 3, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımlarında en düşük değer 50 kg/m³ köpük içeriğine sahip ve bünyesinde FC barındırmayan M4 serisine ait olduğu belirtilebilir aynı

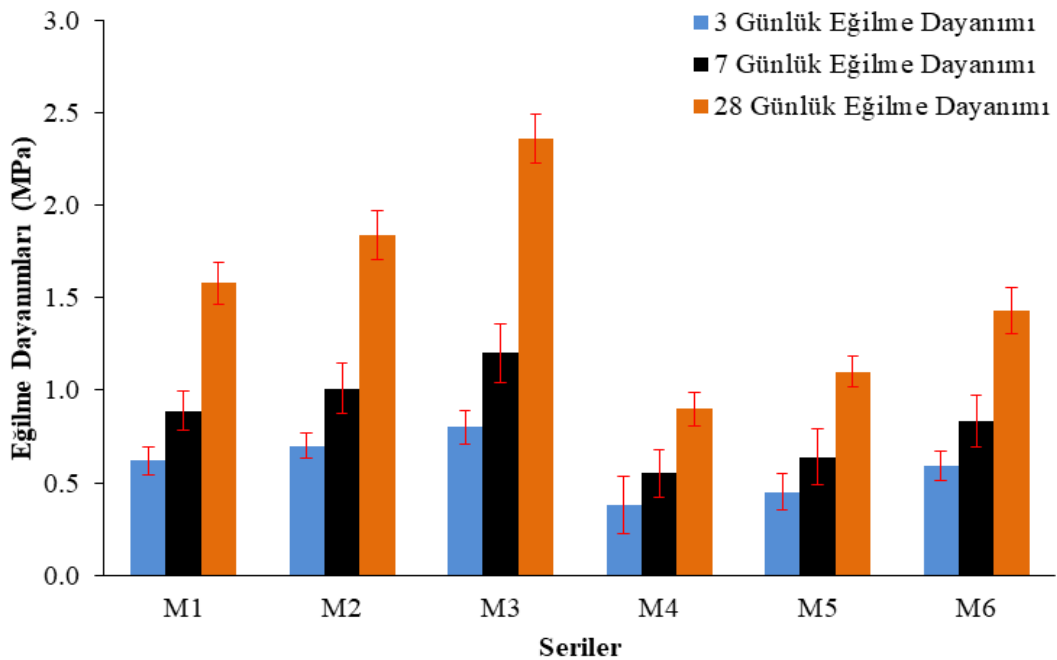
seriye ait değerler 3,7 ve 28 günlük yaşlar için sırasıyla 0,38 MPa, 0,55 MPa ve 0,9 MPa şeklindedir. 3, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımlarında en büyük değerler ise 25 kg/m³ köpük içeriğine sahip ve bünyesinde kırmataş barındırmayan M3 serisine ait olduğu belirtilebilir aynı seriye ait değerler 3, 7 ve 28 günlük yaşlar için sırasıyla 0,80 MPa, 1,20 MPa ve 2,36 MPa şeklindedir.

Her bir yaş grubunu kendi arasında değerlendirilecek olursak 25 kg/m³ köpük içeriğine sahip M1 serisine göre M2 ve M3 serisinde;

- 3 günlük eğilme değerlerinde %12,90'lık ve %29,03'lük artış olduğu
- 7 günlük eğilme değerlerinde %13,48'lik ve %34,83'lük artış olduğu
- 28 günlük eğilme değerlerinde %16,46'lık ve %49,37'lik artış olduğu ifade edilebilir.

Aynı kapsamda 50 kg/m³'lük köpük içeriğine sahip M4 serisine göre M5 ve M6 serisinde;

- 3 günlük eğilme değerlerinde %18,42'lik ve %55,26'lık artış olduğu
- 7 günlük eğilme değerlerinde %16,36'lık ve %50,91'lik artış olduğu
- 28 günlük eğilme değerlerinde %22,22'lik ve %58,89'lük artış olduğu ifade edilebilir.



Şekil 4.11: Köpük betonların eğilme dayanımları

Eğilme dayanımlarında fark teşkil eden diğer bir parametre ise köpük içeriğidir. Köpük miktarındaki artış eğilme dayanımlarında bir azalma yaratmıştır. Bu durum kısaca değerlendirilecek olunursa 3, 7 ve 28 günlük yaş gurubuna ait köpük betonların artan köpük miktarına göre ortalama değer kayıpları ise sırasıyla %33,8, %34,95 ve %40,65 şeklindedir.

Artan köpük içeriği ile basınç ve eğilme dayanımı gibi mukavemet değerlerinde düşüşün tespit edildiği farklı çalışmalar bu durumu destekler niteliktedir (Bing vd., 2012; Bayraktar ve Kaplan, 2021; Yarar, 2021; Gençel vd., 2022b; Jiang vd., 2016; Krishna vd., 2021; Falliano vd., 2018; Bayraktar vd., 2021).

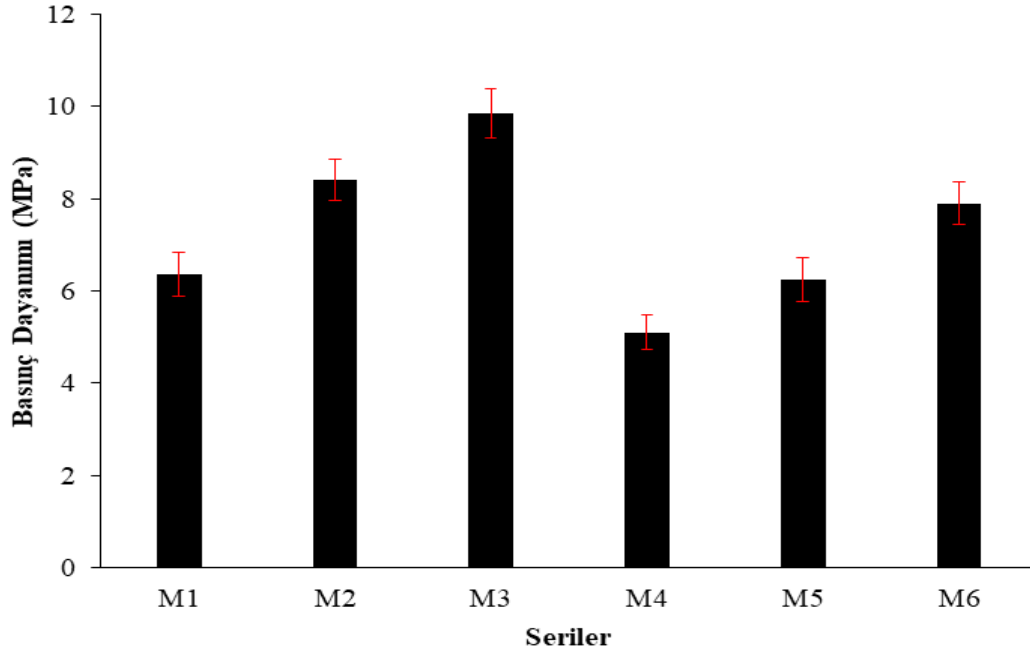
4.5 Köpük Betonların Asit ve Sülfat Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Şekil 4.12’de köpük beton numunelerinin sülfürik asitte (H_2SO_4) bekletildikten sonra elde edilen basınç dayanımları verilmiştir. Şekil incelendiğinde en düşük dayanım değerinin 5,10 MPa ile M4 serisine ait olduğu ve en yüksek dayanım değerinin ise 9,85 MPa ile M3 serisine ait olduğu görülmektedir. Deney neticesinde seriler arasında dayanım farklılığı iki sebebe bağlanabilir bunlar, artan köpük içeriği ve kırmataş agregası ile FC’nin yer değiştirmesidir.

Artan köpük içeriği ile asit çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerlerindeki değişimi belirtmek için 25 kg/m^3 ve 50 kg/m^3 köpük içeriğine sahip serilerin ortalama basınç dayanım değerleri tespit edilmiş olup bu değerler sırasıyla 8,2 MPa ve 6,42 MPa’dır. Artan köpük içeriği ile asit çözeltisinde bekletilen numunelerin dayanımında düşüş yaşandığı söylenebilir.

Kırmataş agregası ile FC’nin yer değiştirmesi sonucu asit çözeltisinde bekletilen numunelerin dayanımındaki değişim serilerin birbiriyle kıyaslanması neticesinde belirlenebilir. Bu kapsamda 25 kg/m^3 köpük içeriğine sahip M1 serisine göre M2 ve M3 serisinin basınç dayanımında sırasıyla %32,28’lik ve %55,12’lik artış olduğu belirtilebilir. Aynı şekilde 50 kg/m^3 köpük içeriğine sahip M4 serisine göre M5 ve M6 serisinin basınç dayanımlarında sırasıyla %22,55’lik ve %54,90’lik artış olduğu belirtilebilir.

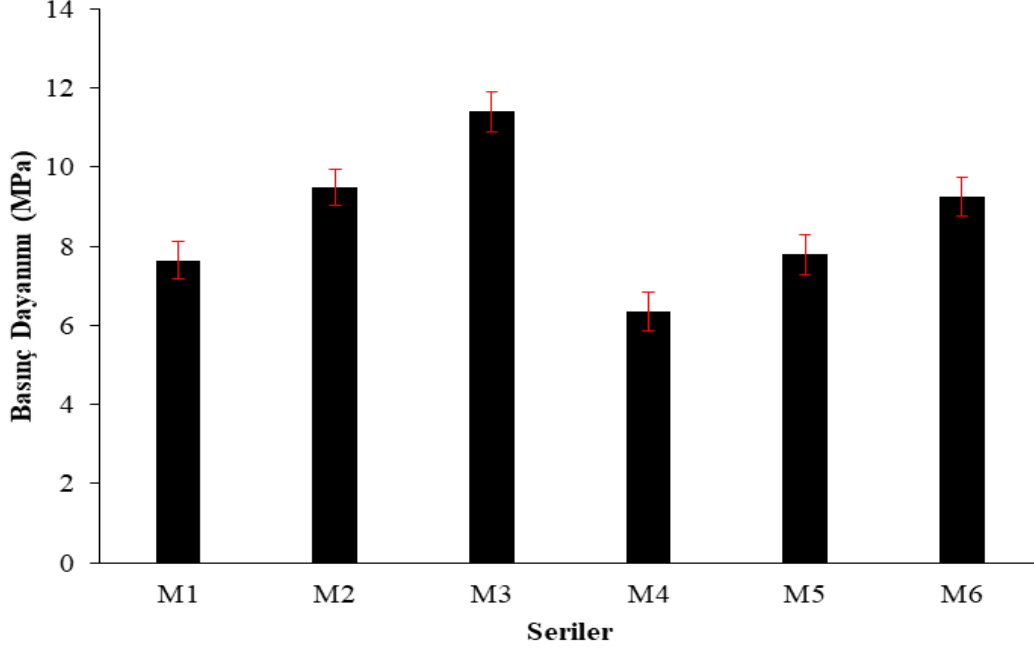
Köpük betonların sülfürik asit (H_2SO_4) maruziyeti öncesi ve sonrası basınç dayanımları karşılaştırıldığında M1, M2, M3, M4, M5 ve M6 serierinde sırasıyla %54,80, %46,39, %42,29, %49,65, %46,72 ve %42,34 azalma olduğu belirtilebilir.



Şekil 4.12: Köpük betonların sülfürik asit (H_2SO_4) dayanımları

Şekil 4.13'te köpük beton numunelerinin sodyum sülfatta (Na_2SO_4) bekletildikten sonra elde edilen basınç dayanımları verilmiştir. Şekil incelendiğinde en düşük dayanım değerinin 6,35 MPa ile M4 serisine ait olduğu ve en yüksek dayanım değerinin 11,40 MPa ile M3 serisine ait olduğu görülmektedir. Deney neticesinde seriler arasında dayanım farklılığı iki sebebe bağlanabilir bunlar, artan köpük içeriği ve kırmataş agregası ile FC'nin yer değiştirmesidir.

Artan köpük içeriği ile sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerlerindeki değişimi belirtmek için 25 kg/m^3 ve 50 kg/m^3 köpük içeriğine sahip serilerin ortalama basınç dayanım değerleri tespit edilmiş olup bu değerler sırasıyla 9,52 MPa ve 7,80 MPa'dır. Artan köpük içeriği ile sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin dayanımında düşüş yaşandığı söylenebilir (Mamun ve Bindiganavile, 2021; Gençel vd., 2021c; Ye vd., 2024).



Şekil 4.13: Köpük betonların sodyum sülfat (Na_2SO_4) dayanımları

Kırmataş agregası ile FC'nin yer değiştirmesi sonucu sülfat çözeltisinde bekletilen köpük betonların basınç dayanımındaki değişim ise serilerin bir biriyle kıyaslanması neticesinde belirlenebilir. Bu kapsamda 25 kg/m^3 köpük içeriğine sahip M1 serisine göre M2 ve M3 serisinde sırasıyla %24,18'lik ve %49,02'lik artış olduğu belirtilebilir. Aynı şekilde 50 kg/m^3 köpük içeriğine sahip M4 serisine göre M5 ve M6 serisi kıyaslandığında sırasıyla %22,83'lük ve %45,67'lik artış olduğu belirtilebilir. Ferrokrom cürufunun betonda kullanımının agresif ortamlarda etkili olduğu söylenebilir (Kopuri ve Ramesh, 2019; Özcan ve Karakoç, 2019; Sohel vd., 2022; Pujary vd., 2024).

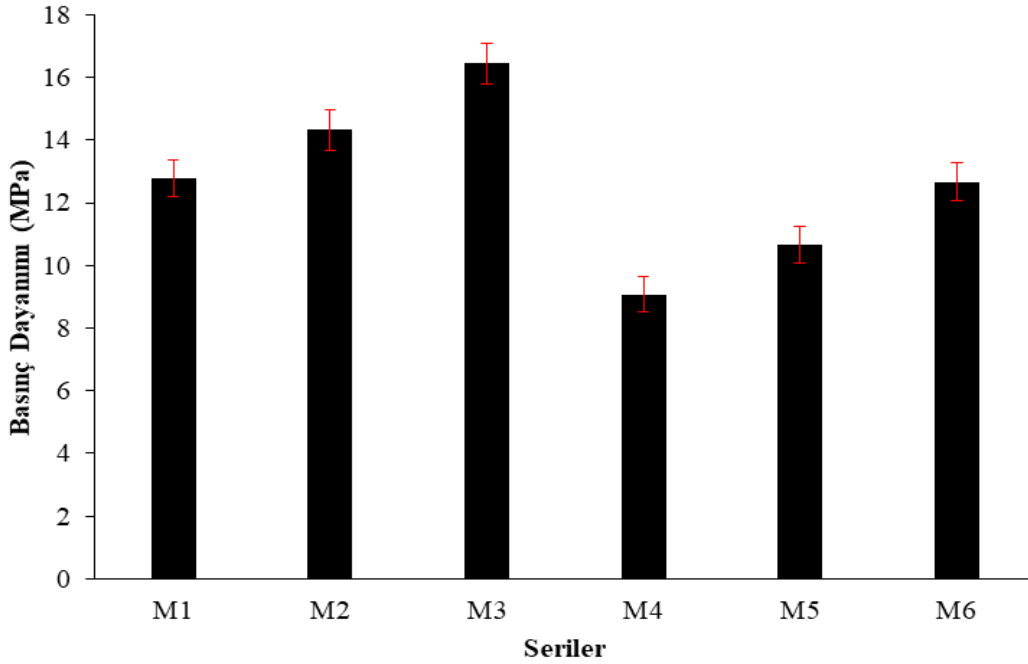
Köpük betonların sodyum sülfat (Na_2SO_4) maruziyeti öncesi ve sonrası basınç dayanımları karşılaştırıldığında M1, M2, M3, M4, M5 ve M6 serierinde sırasıyla %50,18, %39,37, %35,52, %37,31, %33,50 ve %32,48 azalma olduğu belirtilebilir.

4.6 Köpük Betonların Donma-Çözülme Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Hazırlanan köpük beton numunelerinin donma-çözülme dayanımlarının tespiti 25 döngü sonunda basınç dayanım değerlerinin tespiti ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.14'te köpük beton numunelerinin donma-çözülme sonunda ölçülen dayanım değerleri verilmiştir. Değerler incelendiğinde donma-çözülme dayanımlarının değişkenlik göstermesinin ana

sebepleri FC ile kırmataşın yer değiştirmesi ve artan köpük miktarıdır. Donma-zzlme döngüsü sonunda en yüksek basınç dayanımı 16,45 MPa değeri ile M3 serisine ve en düşük basınç dayanım değeri 9,07 MPa değeri ile M4 serisine ait olduğu görülmektedir.

Artan köpük içeriğinin donma-zzlme üzerindeki etkisini belirtmek için 25 kg/m³ ve 50 kg/m³ köpük içeriğine sahip iki ana grubun ortalama değerleri incelenmelidir. Sırasıyla bu değerler 14,52 MPa ve 10,80 MPa olup %25,62'lik değişim söz konusudur. Köpük içeriğinin artması beton içerisinde gözeneklerin artmasına yol açar artan gözenekler ise köpük beton numunelerinin donma-zzlme sonucu dayanım değerlerinin düşmesine neden olmaktadır. Yani yoğunluğun düşmesi üretilen köpük betonların donma-zzlme direncini dşurmektedir (She vd., 2018; Wu vd., 2021; Zhang vd., 2022; Chen vd., 2024).



şekil 4.14: Köpük betonların donma-zzlme dayanımları

Agrega değişiminin donma-zzlme direnci üzerindeki etkisi ise serilerin birbiriyle kıyaslanması neticesinde belirlenebilir. Bu kapsamda 25 kg/m³ köpük içeriğine sahip M1 serisi M2 ve M3 serisi ile kıyaslandığında donma-zzlme sonrası basınç dayanımlarında sırasıyla %12,05 ve %28,72'lik artış görülmektedir. Aynı şekilde 50 kg/m³ köpük içeriğine sahip M4 serisi M5 ve M6 serisi ile kıyaslandığında donma-zzlme sonrası basınç dayanımlarında sırasıyla %17,42 ve %39,69'luk artış görülmektedir. Gençel vd. (2012) yapmış oldukları çalışmada iri agrega olarak kullanılan ferrokrom cürufunun, içerik olarak

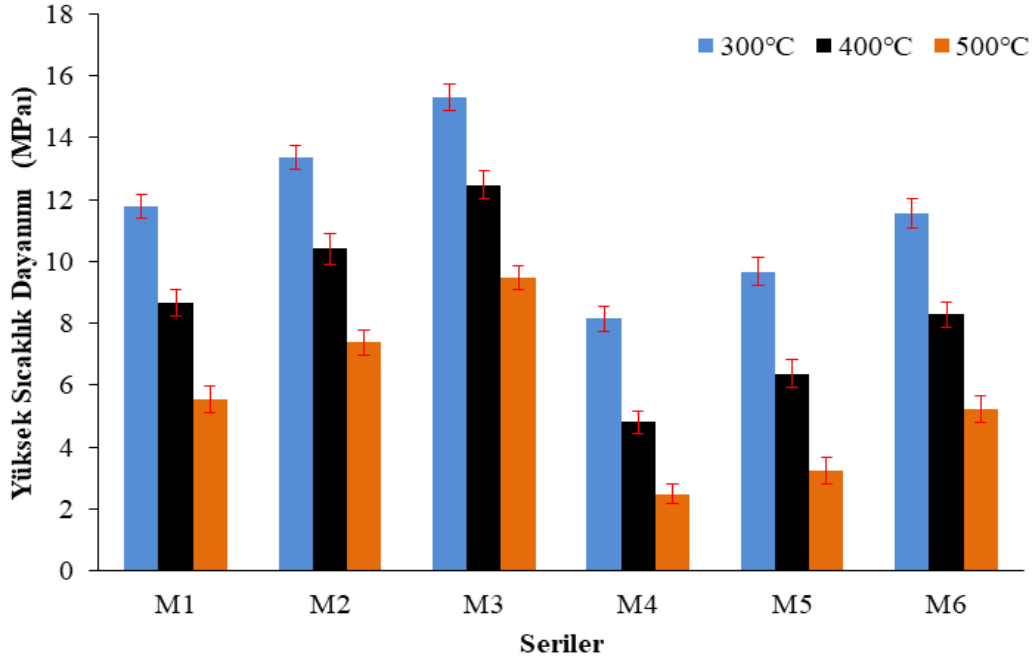
%25'ten %75'e yükselmesi durumunda donma-çözülme direncinde olumlu bir katkı sağladığını tespit etmiştir.

Köpük betonların donma-çözülme öncesi ve sonrası basınç dayanımları karşılaştırıldığında M1, M2, M3, M4, M5 ve M6 serierinde sırasıyla %9,04, %8,62, %6,96, %10,46, %9,21 ve %7,52 azalma olduğu belirtilebilir.

4.7 Köpük Betonların Yüksek Sıcaklık Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Yüksek sıcaklık etkisinin belirlenmesi için hazırlanan köpük betonlar 300°C, 400°C ve 500°C gibi sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık ile köpük betonlardaki değişim tespiti basınç dayanımlarının elde edilmesi ile belirlenmiştir. Elde edilen basınç dayanımları Şekil 4.15'de verilmiş olup her bir serinin farklı sıcaklık değerlerindeki dayanımları görülmektedir. Bu kapsamda her bir sıcaklık değeri için bulgular incelendiğinde 300°C'de köpük betonların daha az bir basınç dayanım kaybına uğramasına karşın 400°C ve 500°C'de daha fazla basınç dayanım kaybı söz konusudur.

İki farklı köpük içeriğinde yüksek sıcaklıkla oluşan dayanım değişimleri serilerin ortalama değeri ile irdelenebilir. Bu kapsamda 25 kg/m³ köpük içeriğine sahip serilerin 300°C, 400°C ve 500°C'deki ortalama basınç dayanım değerleri sırasıyla 13,49 MPa, 10,52 MPa ve 7,47 MPa şeklindedir. 50 kg/m³ köpük içeriğine sahip serilerin 300°C, 400°C ve 500°C'deki ortalama basınç dayanım değerleri ise sırasıyla 9,79 MPa, 6,48 MPa ve 3,65 MPa şeklindedir. Bu dayanım değerleriyle anlaşılacağı üzere aratan köpük miktarının yüksek sıcaklık dayanımında bir düşüş yarattığı söylenebilir. Artan köpük içeriği ve artan yüksek sıcaklık değeri ile basınç dayanımlarında sürekli bir azalma olduğu belirtilebilir (Mydin ve Wang, 2012; Dakman, 2017; Tan vd., 2017).



Şekil 4.15: Köpük betonların yüksek sıcaklık dayanımları

Ele alınması gereken diğer bir parametre ise kırmataş agregası ile yer değiştiren FC'nin yüksek sıcaklık üzerindeki etkisidir. FC miktarının artışı ile dayanımlarda artış eğilimi olduğu saptanmıştır. Bu duruma paralel sonuçların elde edildiği çalışmalar mevcuttur (Islam vd., 2021; Fares, vd., 2023; George vd., 2024). Bu kapsamda üç farklı yüksek sıcaklık değeri için serilerin kendi içerisinde değerlendirilmesi gerekmektedir.

Her bir yüksek sıcaklık etkisini kendi arasında değerlendirecek olursak 25 kg/m³ köpük içeriğine sahip M1 serisine göre M2 ve M3 serisinde;

- 300°C'de %13,40'lık ve %29,77'lik basınç dayanımı artışı olduğu
- 400°C'de %20,07'lik ve %43,94'lük basınç dayanımı artışı olduğu
- 500°C'de %32,97'lik ve %70,81'lik basınç dayanım artışı olduğu ifade edilebilir.

Aynı kapsamda 50 kg/m³ köpük içeriğine sahip M4 serisine göre M5 ve M6 serisinde;

- 300°C'de %18,65'lik ve %41,60'lık basınç dayanımı artışı olduğu
- 400°C'de %32,71'lik ve %72,50'lik basınç dayanımı artışı olduğu
- 500°C'de %30,65'lik ve %110,48'lik basınç dayanımı artışı olduğu ifade edilebilir.

Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası köpük betonların basınç dayanımları karşılaştırıldığında yüksek sıcaklık sonrası dayanım kaybı yaşanmıştır. Dayanım kayıpları ise M1, M2, M3, M4, M5 ve M6 serilerinde sırasıyla;

- 300°C sonrası; %16,09, %14,68, %13,46, %19,55, %17,56, %15,77 olarak
- 400°C sonrası; %38,29, %33,57, %29,41, %52,62, %45,69, %39,56 olarak
- 500°C sonrası; %60,50, %52,90, %46,38, %75,52, %72,38, %61,90 olarak gerçekleşmiştir.

4.8 Köpük Betonların Isıl İletkenlik Katsayılarının Değerlendirilmesi

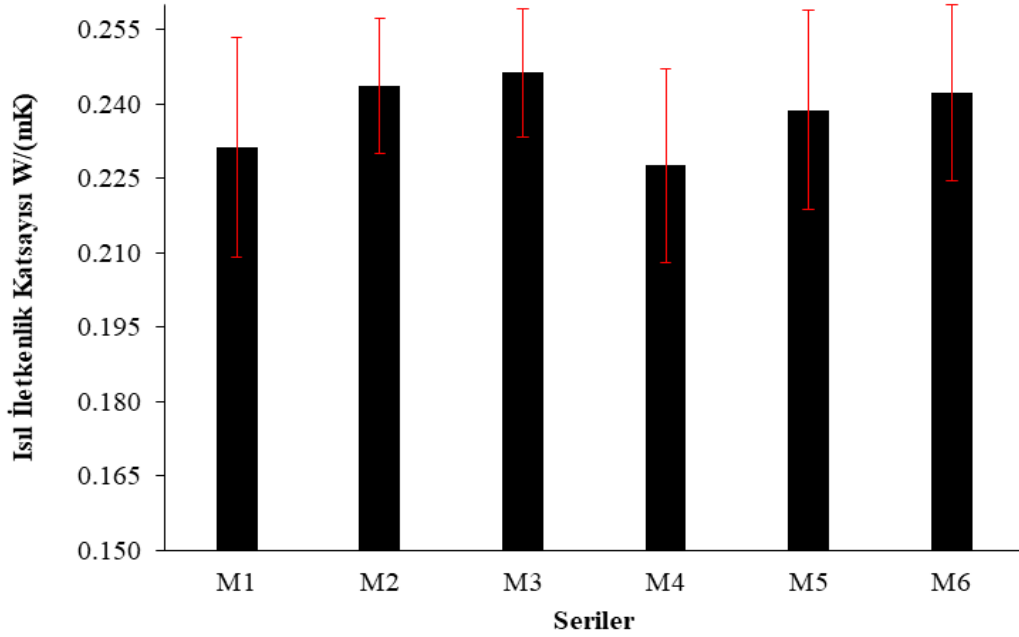
Isıl iletkenlik katsayısı malzemenin karışım bileşenlerin türü, miktarı ve köpük içeriği ile değişkenlik göstermektedir. Yapılan çalışmada ise bu değişkenliğin ana sebepleri FC ile kırmataş agregasının yer değiştirmesi ve artan köpük miktarıdır.

Üretilen köpük betonların Şekil 4.16'da ısıl iletkenlik katsayıları verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ısıl iletkenlik katsayıları 0,228 W/mK ile 0,246 W/mK aralığında değişkenlik göstermektedir. Isıl iletkenlik katsayısındaki düşüş malzemenin ısıl performansının yükselmesi yani ısı yalıtımının artması anlamına gelmektedir.

Artan köpük içeriğinin ısıl iletkenlik katsayısı üzerindeki etkisini belirtmek için 25 kg/m³ ve 50 kg/m³ köpük içeriğine sahip iki ana grubun ortalama değerleri incelenmelidir. Sırasıyla bu değerler 0,240 W/mK ve 0,236 W/mK şeklinde olup %1,67'lik değişim söz konusudur. Köpük içeriğinin artması beton içerisinde hapsolan hava kabarcıklarının artmasına yol açar artan hava kabarcıkları ise köpük beton numunelerinin ısıl iletkenlik katsayısının düşmesine neden olmaktadır. Yani köpük miktarının artışı üretilen betonun ısı yalıtım değerlerini arttırmaktadır (Zahari vd., 2009; Alengaram vd., 2013; Cong ve Bing, 2015; Bayraktar vd., 2021; Gołaszewski vd., 2022; Bayraktar vd., 2023).

Diğer parametre olan agrega değişiminin ısıl iletkenlik katsayısı üzerindeki etkisi ise serilerin birbiriyle kıyaslanması neticesinde belirlenebilir. Bu kapsamda 25 kg/m³ köpük içeriğine sahip M1 serisine göre M2 ve M3 serisinin ısıl iletkenlik katsayısında sırasıyla %5,63'lük ve %6,49'lük artış olduğu ifade edilebilir. Aynı şekilde 50 kg/m³ köpük içeriğine sahip M4 serisi M5 ve M6 serisi ile kıyaslandığında ısıl iletkenlik katsayısında sırasıyla %4,82'lik ve %6,14'lük artış olduğu ifade edilebilir. Artan FC miktarının ısıl

iletkenlik katsayısı üzerinde artışa sebep olması FC'nin yüksek miktarda metalik bileşiklerden meydana gelmesi yani içerisinde alüminyum ve magnezyum bileşiklerinin bulunmasıdır. (Fares vd., 2023; Al-Jabri vd., 2018). Ayrıca FC'nin özgül ağırlığının kırmataş agregasına göre daha yüksek olması ısı iletkenlik katsayısının artmasında etken olabilir.

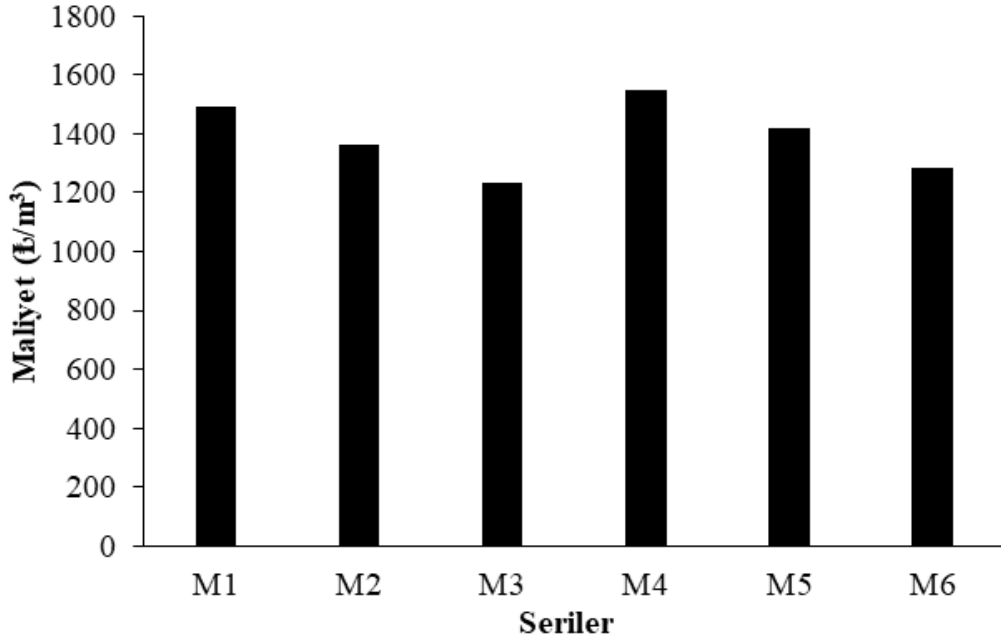


Şekil 4.16: Köpük betonların ısı iletkenlik katsayıları

4.9 Köpük Betonların Ekonomik ve Ekolojik Analizlerinin Değerlendirilmesi

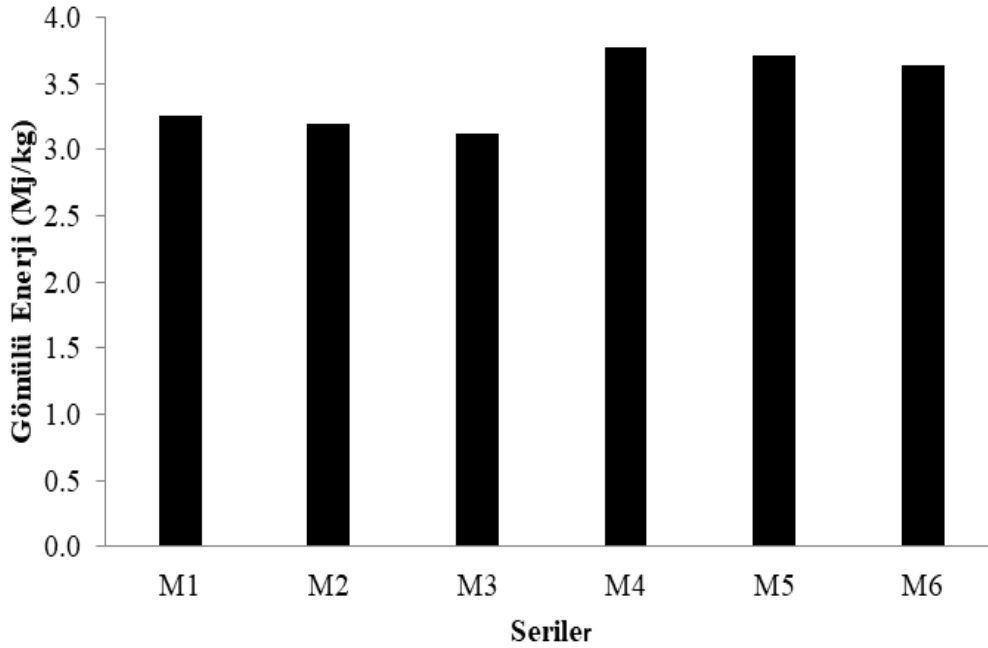
Köpük betonların üretim neticesinde meydana gelen maliyet analizi Şekil 4.17'de verilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde üretim maliyetinin yaklaşık olarak 1232 $\text{₺}/\text{m}^3$ ile 1547 $\text{₺}/\text{m}^3$ arasında değiştiği görülmektedir.

Köpük içeriğinin artması maliyet kısmında artışa sebep olmuştur. 25 kg/m^3 köpük içeriğine sahip serilerin ortalama değerleri ile 50 kg/m^3 köpük içeriğine sahip serilerin ortalama değerleri alınıp bir kıyaslama yapılacak olunursa %4,04'lük fark durumu söz konusudur. Ferrokrom cürufunun karışım içerisindeki oranının artması ise maliyeti düşüren bir etki sergilemiştir. Bu kapsamda 25 kg/m^3 köpük içeriğine sahip M1 serisine göre M2 ve M3 serisinin maliyet değerinde sırasıyla %8,71'lik ve %17,43'lük düşüş olduğu ifade edilebilir. Aynı şekilde 50 kg/m^3 köpük içeriğine sahip M4 serisine göre M5 ve M6 serisinin maliyet değerinde sırasıyla %8,40'lık ve %16,81'lik düşüş olduğu ifade edilebilir.



Şekil 4.17: Köpük betonların maliyet değerleri

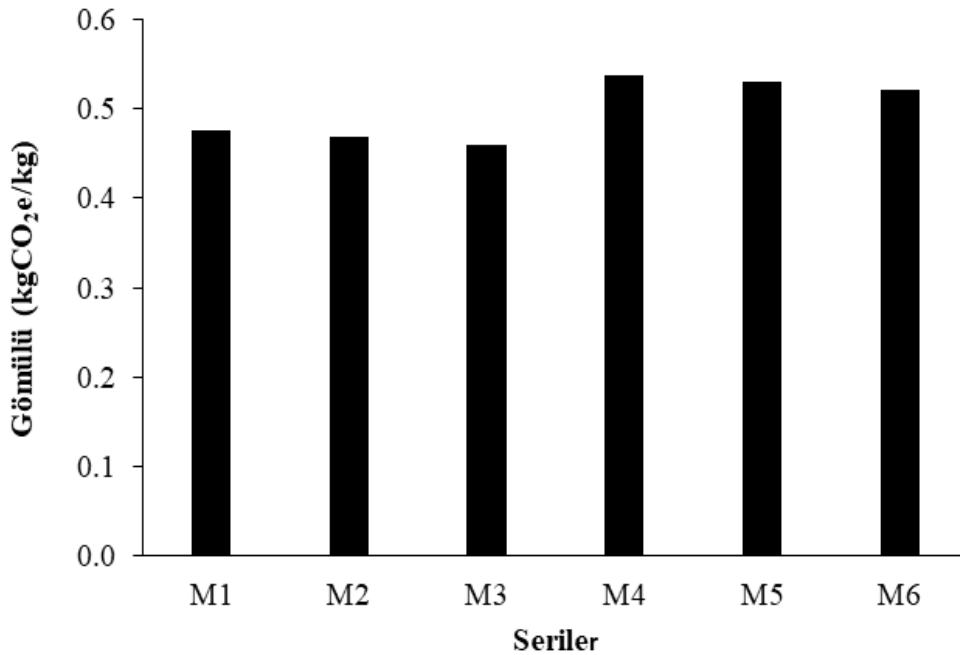
Köpük betonların üretiminde kullanılan hammadde ve harcanan enerji neticesinde oluşan gömülü enerji ve gömülü CO₂ değerleri Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da verilmiştir. Değerler incelendiğinde gömülü enerji miktarının 3,12 ile 3,77 Mj/kg aralığında, gömülü CO₂ miktarının ise 0,46 ile 0,54 kgCO₂e/kg aralığında olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.18: Köpük betonların gömülü enerji miktarları

Köpük içeriğinin artması gömülü enerji ve gömülü CO₂ miktarında artışa sebep olmuştur. 25 kg/m³ köpük içeriğine sahip serilerin ortalama değerleri ile 50 kg/m³ köpük içeriğine sahip serilerin ortalama değerleri alınıp bir kıyaslama yapılacak olunursa gömülü enerjide %16,32'lik ve gömülü CO₂'de %12,77'lik fark durumu söz konusudur. Ferrokrom cürufunun karışım içerisindeki oranının artması ise gömülü enerji ve gömülü CO₂ miktarını düşüren bir etki sergilemiştir. Bu kapsamda 25 kg/m³ köpük içeriğine sahip M1 serisine göre M2 ve M3 serisinin gömülü enerjisinde sırasıyla %1,85'lik ve %4'lük düşüş ve gömülü CO₂'sindede sırasıyla %2,08'lik ve %4,17'lik düşüş olduğu ifade edilebilir. Aynı şekilde 50 kg/m³ köpük içeriğine sahip M4 serisine göre M5 ve M6 serisinin gömülü enerjisinde sırasıyla %1,59'luk ve %3,45'lik düşüş ve gömülü CO₂'sinde sırasıyla %1,85'lik ve %3,70'lik düşüş olduğu ifade edilebilir.

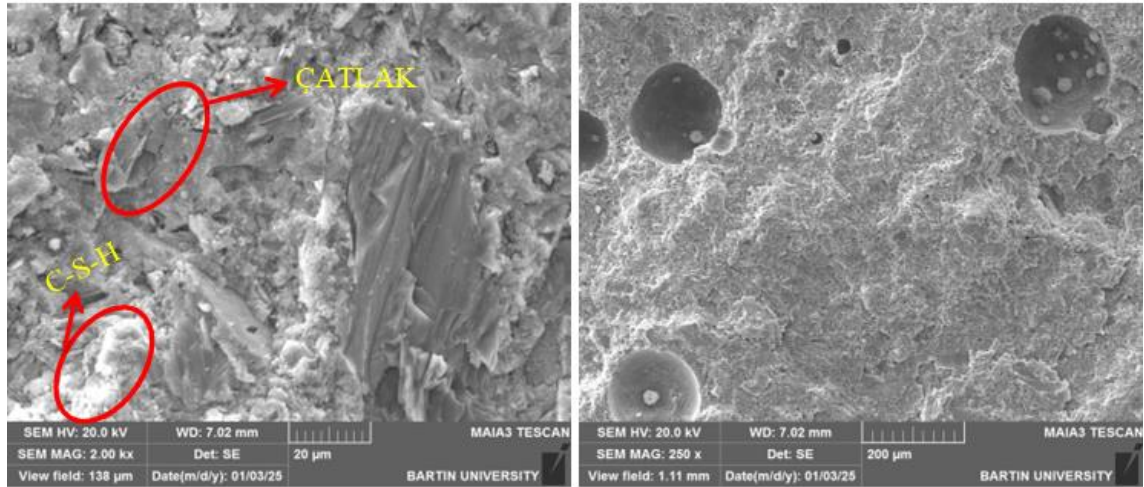
Ferrokrom cürufunun köpük betonda kullanılmasının sağladığı düşük gömülü enerji ve CO₂ değeriyle sürdürülebilir olduğu söylenebilir. Acharya ve Patro (2024) yapmış oldukları çalışmada bu doğrultuda sonuçlar elde etmişlerdir.



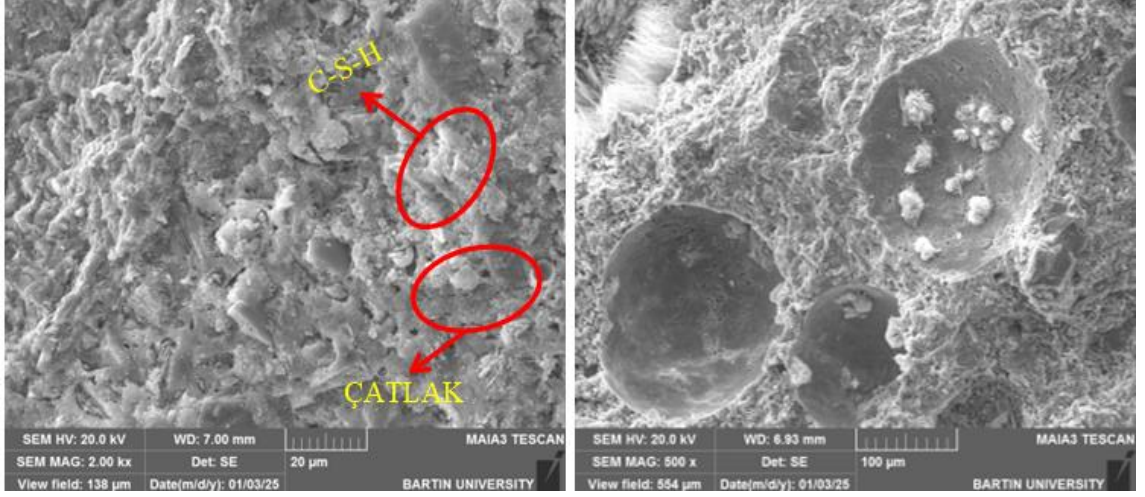
Şekil 4.19: Köpük betonların gömülü CO₂ miktarları

4.10 Köpük Betonların SEM ve EDS Görüntülerinin Değerlendirilmesi

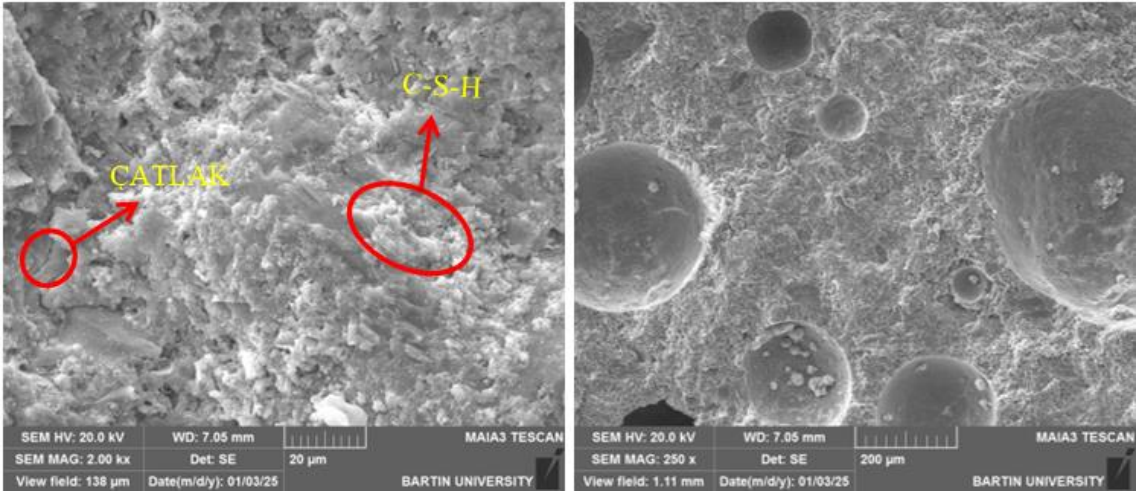
Şekil 4.20-4.25'te köpük betonların 28 gün sonundaki SEM görüntüleri verilmiştir. Bu kapsamda genel bir değerlendirme yapmak daha faydalı olacaktır. SEM görüntüleri ele alındığında bünye içerisindeki gözeneklerin farklı boyutlarda ve şekillerde meydana geldiği görülmektedir. Gözenek dağılımlarının tam olarak homojen olmadığı, ancak sıklıkları ile birbirleri arasındaki bağlantılar dikkate alındığında köpük betona has gözenekli bir bünyenin olduğu gözlenmektedir. Şekil 4.20-4.25'te verilen SEM görüntülerinde üretilen köpük beton numunelerde mikro çatlaklar görülmektedir. Ancak bu mikro çatlaklar yapı içerisinde çok seyrek düzeyde olup mikron boyutundadır. Çatlakların seyrek ve mikron boyutunda olmasına rağmen mekanik dayanım değerlerinde kayba sebebiyet verebilmektedir. Ayrıca köpük betonların bünyesinde C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) oluşumları gözlenmiştir. C-S-H jeli genel anlamda bağlayıcılık özelliği ve dayanım kazanımı sağlayan bir mineral bileşen olup hidrate olan ürünlerin yaklaşık olarak %60'ını meydana getirebilmektedir.



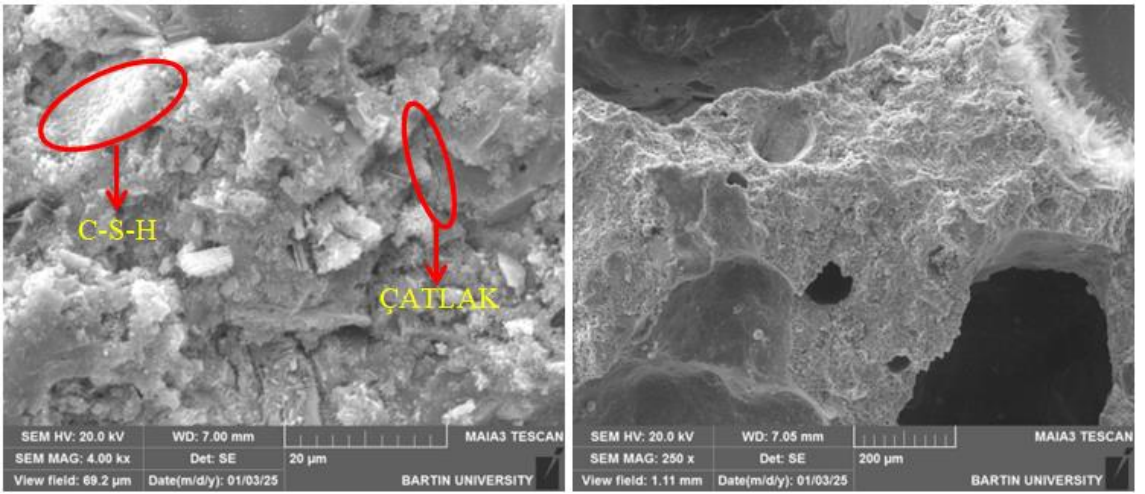
Şekil 4.20: M1 serisine ait köpük betonun SEM görüntüleri



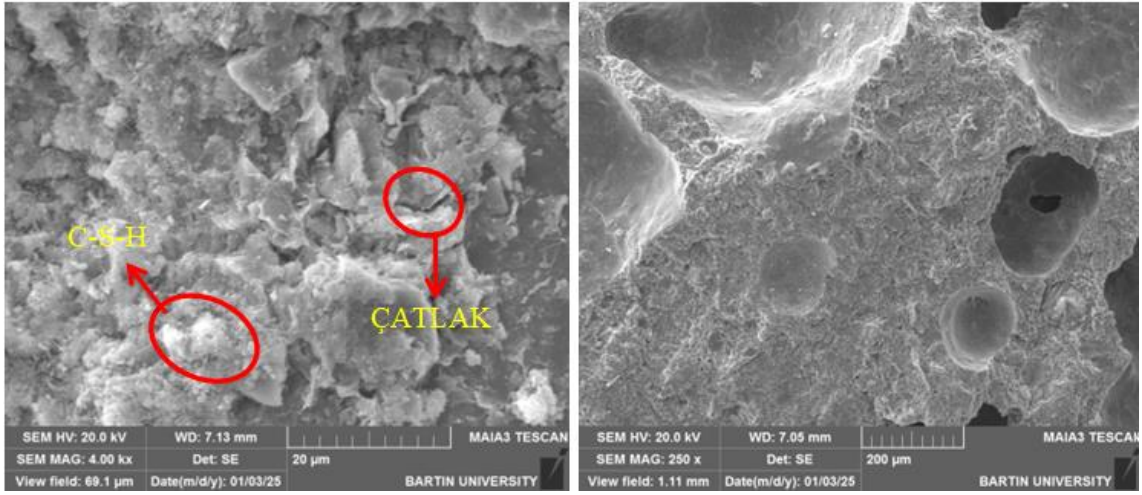
Şekil 4.21: M2 serisine ait köpük betonun SEM görüntüleri



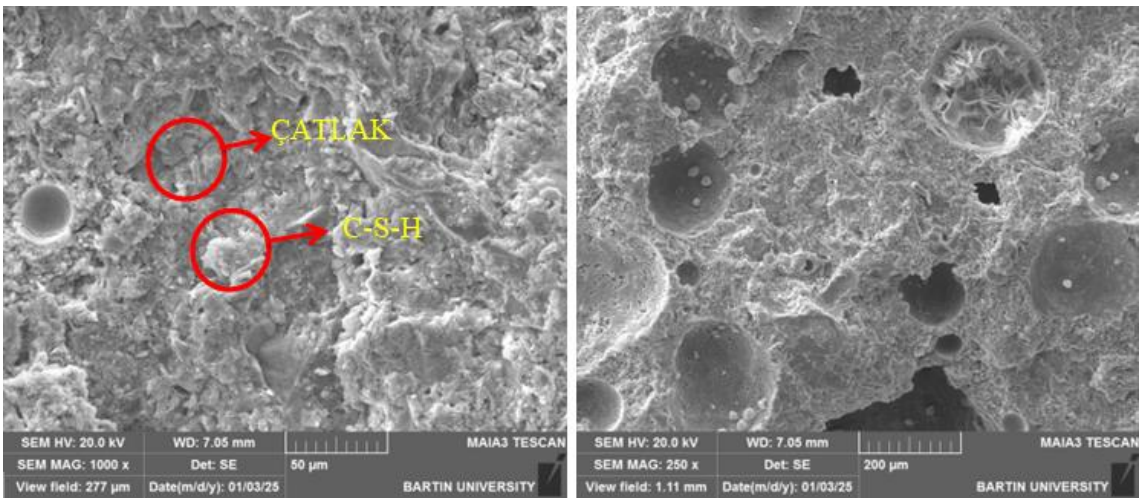
Şekil 4.22: M3 serisine ait köpük betonun SEM görüntüleri



Şekil 4.23: M4 serisine ait köpük betonun SEM görüntüleri



Şekil 4.24: M5 serisine ait köpük betonun SEM görüntüleri

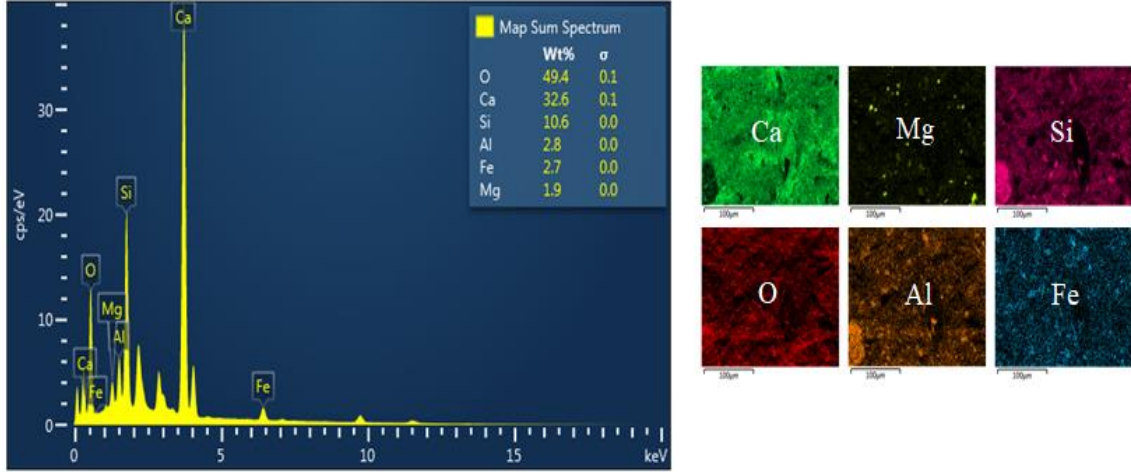


Şekil 4.25: M6 serisine ait köpük betonun SEM görüntüleri

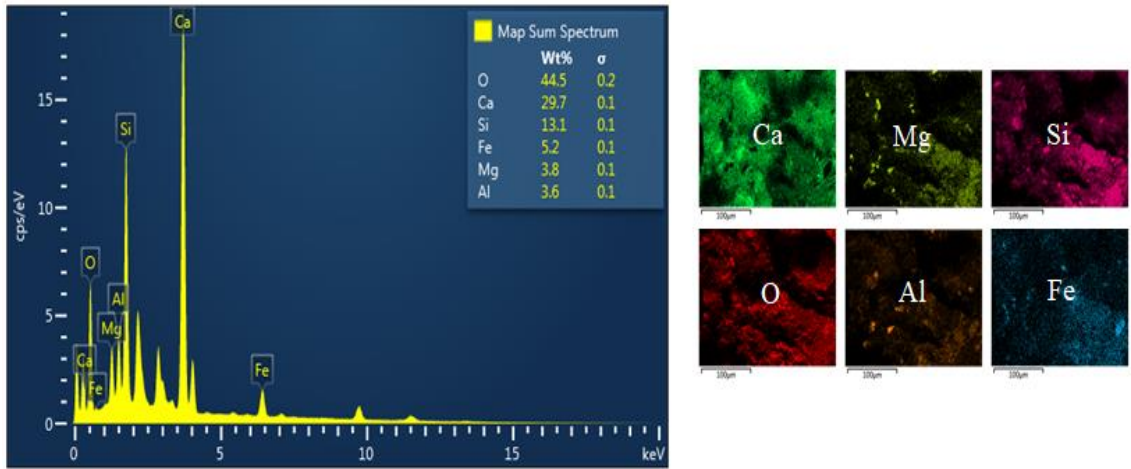
Şekil 4.26-4.31'de köpük beton numunelerinin 28 gün su küründe bekletildikten sonraki EDS görüntüleri verilmiştir. EDS görüntüleri incelendiğinde 50 kg/m^3 köpük içeriğine sahip M4, M5, M6 serilerine ait köpük betonların, 25 kg/m^3 köpük içeriğine sahip M1, M2, M3 serilerine ait köpük betonlara göre daha fazla oksijen içeriğine sahiptir, bu durum hapsolmuş oksijen içeriğiyle açıklanabilir. Artan oksijen miktarı daha yüksek köpük içeriğini böylece daha fazla gözeneklilik ve daha düşük mekanik özellik sonuçları ile önceki bölümlerde belirtilen sonuçlarla tutarlıdır. Gençel vd. (2022c) yapmış oldukları çalışmada bu paralelde sonuçlar elde etmişlerdir.

Kunther vd. (2017) Ca/Si oranının genel anlamda betonun mekanik özellikleri hakkında bilgi verebileceğini belirtmişlerdir. Yani Ca/Si oranındaki azalmanın daha yüksek bir

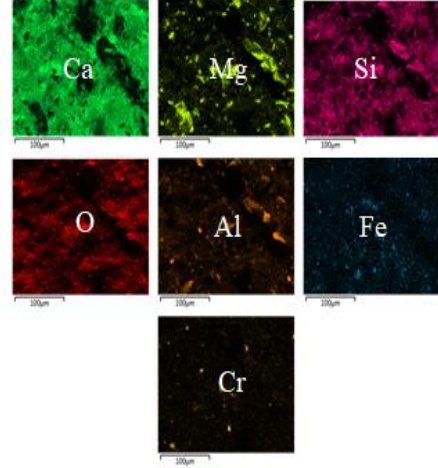
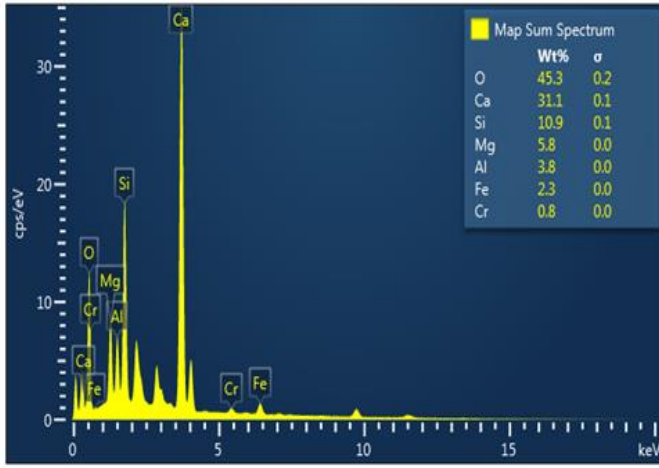
basınç dayanımı teşkil ettiği belirtilmiştir. Çalışma kapsamında ise bu sonuca kısmen benzer sonuçlar elde edildiği söylenebilir. Ferrokrom cürufu içermeyen M1 ve M4 serilerinin ferrokrom cürufu içeren diğer serilere istinaden daha yüksek Ca/Si oranına ve daha düşük basınç dayanımına sahip oldukları tespit edilmiştir.



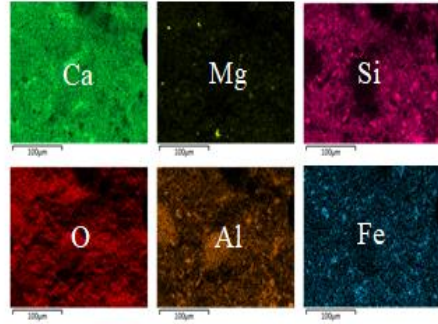
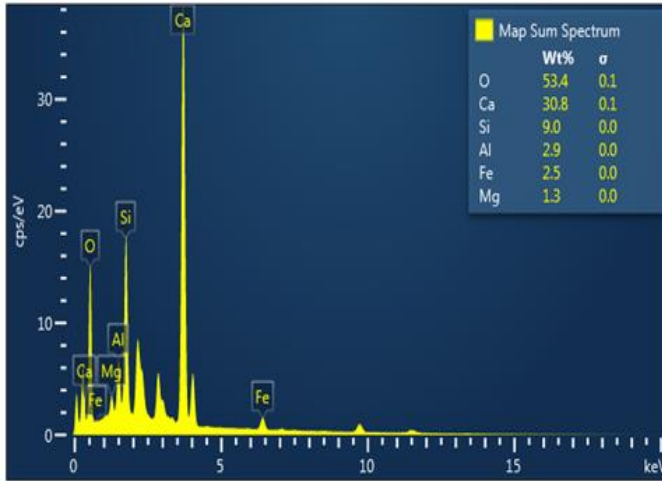
Şekil 4.26: M1 serisine ait köpük betonun EDS görüntüleri



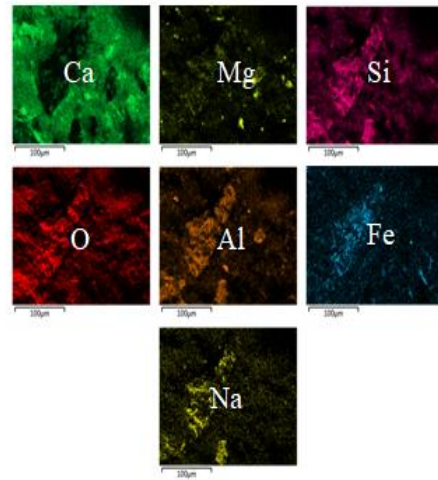
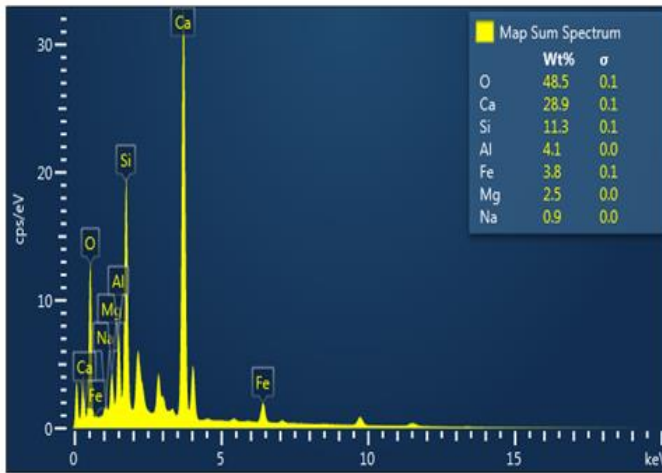
Şekil 4.27: M2 serisine ait köpük betonun EDS görüntüleri



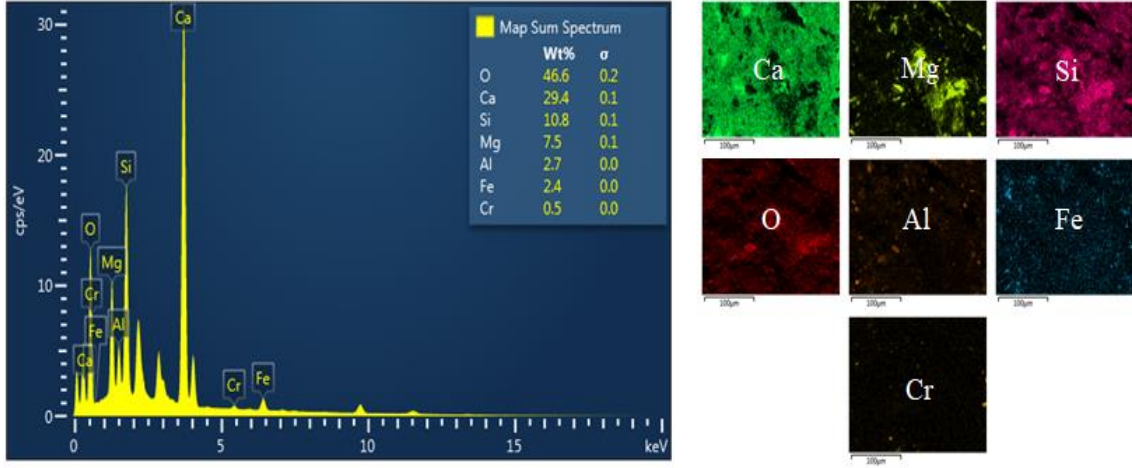
Şekil 4.28: M3 serisine ait köpük betonun EDS görüntüleri



Şekil 4.29: M4 serisine ait köpük betonun EDS görüntüleri



Şekil 4.30: M5 serisine ait köpük betonun EDS görüntüleri



Şekil 4.31: M6 serisine ait köpük betonun EDS görüntüleri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar ve çalışmanın bundan sonraki çalışmalara referans olması için çeşitli öneriler bu kısımda belirtilmiştir.

5.1 Sonuçlar

Endüstriyel bir atık olarak ifade edilen FC'nin kırmataş agregası ile yer değiştirmesi ve köpük dozajının, köpük betonun özellikleri üzerindeki etkisinin araştırıldığı bu çalışmada tespit edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- ❖ Köpük betonlarda kırmataş agregası yerine FC'nin kullanılması işlenebilirlikte yani yayılma çapında çok minimal bir artış sağladığı söylenebilir. Yayılma çaplarının yakın olması FC'nin işlenebilirlik açısından köpük betonda olumsuz bir etki yaratmadığı söylenebilir. Artan köpük içeriği ise akışkanlığı artırarak yayılma çaplarını arttırmıştır.
- ❖ Köpük betonların fiziksel özelliklerinin irdelenmesi kapsamında kuru birim hacim ağırlık, su emme ve görünür porozite tespiti gerçekleştirilmiştir. FC'nin kırmataş agregasına kıyasla daha yüksek özgül ağırlığa sahiptir. Bu sebeple FC miktarının karışımdaki oranının artması kuru birim hacim ağırlık değerlerini arttırmıştır. Ayrıca artan köpük içeriği ile hacim artışı durumu söz konusudur. Artan hacim ile köpük beton numunelerinin kuru birim hacim ağırlıklarının azaldığı tespit edilmiştir.
- ❖ Sertleşmiş betonun ömrü boyunca daha iyi bir performans sergilemesi için su emme değerinin olabildiğince düşük olması istenir. Artan FC ile su emme oranında düşüş olsa da köpük betonda köpük miktarının artması gözenek miktarını artırmış ve su emme değerini yükseltmiştir. Görünür porozite değerleri de su emme ile paralel sonuçlar vermiştir.
- ❖ Köpük betonların mekanik dayanımlarının irdelenmesi basınç ve eğilme dayanımlarının 3,7 ve 28. gün sonunda tespiti ile gerçekleştirilmiştir. Artan köpük miktarının dayanım açısından bir kayba sebebiyet verdiği aşikardır

fakat ferrokrom cürufunun köpük betonda kullanılması dayanım açısından çok değerli sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. 28 günlük basınç dayanımları dikkate alındığında bu değerlerin 10,13 MPa ile 17,68 MPa arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu dayanım değerleri köpük betonları yapısal veya yapısal/yalıtım sınıfına dahil etmektedir.

- ❖ Köpük betonların agresif ortamdaki dirençlerinin tespiti için asit (H_2SO_4) ve sülfat (Na_2SO_4) karışımları hazırlanmış ve köpük betonlar 90 gün boyunca karışımda bekletilmiştir. 90 gün agresif ortamda bekletilen köpük beton numunelerinin basınç dayanım değerleri tespit edilmiştir. Agresif ortam sonucundaki basınç dayanımları 28 günlük basınç dayanımları ile karşılaştırıldığında dayanım değerlerinde düşüş görülmesi beklenen bir sonuçtur. Ayrıca artan köpük içeriğinin agresif ortama karşı direnci düşürdüğü tespit edilmiştir. Köpük betonlarda FC miktarının artması agresif ortama karşı direnci artırmaktadır.
- ❖ Köpük betonların donma-çözülme dirençleri 25 döngü sonucunda basınç dayanımlarının tespiti ile gerçekleştirilmiştir. Donma-çözülme döngüsüne tabi tutulan köpük beton numunelerinin, 28 günlük basınç dayanımlarına kıyasla dayanım kaybına uğradıkları tespit edilmiştir. Dayanım kaybını etkileyen faktör köpük beton numunelerinin bünyesindeki köpük içeriğinin artmasıyla ilişkilendirilebilir. Köpük miktarının artması gözenek artışına sebebiyet vermekte bu nedenle donma-çözülme direnci düşmektedir. Diğer taraftan FC miktarının karışımlarda artış göstermesi donma-çözülme direncine olumlu bir katkı sağlamıştır.
- ❖ Köpük betonların yüksek sıcaklığa karşı dirençlerinin tespiti için köpük betonlar sırasıyla 300°C, 400°C ve 500°C sıcaklığa maruz bırakılmışlardır. Artan sıcaklıkla bilhassa 400°C ve 500°C'de köpük betonların dayanım düşüşü sergilemesi tahmin edilebilir bir sonuçtur. FC miktarının karışımda artması köpük betonların yüksek sıcaklıklara karşı iyi direnç sergilemesini sağlamıştır. Ferrokrom cürufunun genel olarak 1200°C sıcaklıktan itibaren erimeye başlaması bu dirençte önemli bir rol oynamaktadır. Diğer taraftan

köpük içeriğindeki artış maalesef yüksek sıcaklığa karşı direnci düşürme eğilimindedir.

- ❖ Köpük betonların ısı iletkenlik değeri irdelendiğinde literatürde genişçe yer bulmuş olan artan köpük miktarının ısı iletkenlik katsayısını düşürdüğü sonucuna bu çalışmada da varılmıştır. Yani köpük, betona iyi bir ısı yalıtım değeri kazandırmaktadır. Fakat artan FC miktarı için aynı durumu söylemek mümkün değildir çünkü FC miktarı arttıkça köpük betonun ısı iletkenlik katsayısı artma eğilimindedir. Bu durum ferrokrom cürufunun içerisinde yer alan alüminyum ve magnezyum bileşikleri ile ilişkilidir.
- ❖ Köpük betonların SEM görüntüleri incelendiğinde gözeneklerin farklı boyut ve şekillere sahip olduğu ayrıca sıklıkları ve birbirleriyle olan bağlantıları sayesinde köpük betona ait bir bünye oluşturduğu söylenebilir.
- ❖ Köpük betonlar üzerinde gerçekleştirilen maliyet analizi dikkate alındığında ferrokrom cürufunun karışıma dahil edilmesinin ekonomiklik sağladığı, artan köpük miktarının ise maliyeti arttırıcı bir unsur olduğu tespit edilmiştir. Ancak unutulmamalıdır ki köpük beton iyi bir yalıtım performansı sergilemesiyle oluşturulacak herhangi bir yapı için ısıtma ve soğutmada kullanılacak enerji miktarını düşürerek ekonomiklik sağlayacaktır.
- ❖ Köpük betonların ekolojik olarak irdelenmesi, maliyet analizinde olduğu gibi köpük miktarının artması ekolojik sürdürülebilirlik için olumsuz katkı sunarken ferrokrom cürufunun kullanılması ekolojik açıdan olumlu katkı sağlamıştır. Köpük beton iyi bir yalıtım performansı sergilemesiyle oluşturulacak herhangi bir yapı için ısıtma ve soğutmada kullanılacak enerji miktarını düşürerek ekolojik sürdürülebilirliğe olumlu katkı sağlayacağı aşıkardır.

5.2 Öneriler

Gerçekleştirilen tez çalışmasıyla ileriki dönemlerde yapılacak çalışmalara yön göstermek hedefiyle şunlar önerilebilir.

- ❖ Doğal kaynakların tüketiminin azaltılması, endüstriyel atıkların doğada istiflenmesi ile çevre üzerindeki bozucu ve yıkıcı zararın azaltılması, atıkların faydalı ürünlere dönüştürülmesi kapsamında bu tarzdaki çalışmalara yenileri eklenmelidir. Ayrıca atıkların dönüşüm ve değişim süreci ile tekrardan kullanılabilir hale gelmesi ekonomik açıdan da önem arz etmektedir.
- ❖ Köpük betonda kırmataş agregası yerine FC kullanımını arttırılmalıdır. Literatür taramasıyla da belirtildiği gibi genellikle FC'nin karayolu inşaatı veya betona entegrasyonu tarzındaki çalışmalara rastlamak mümkünken köpük betonla yapılmış çalışmalara rastlamak mümkün değildir. Diğer bir husus FC'nin iri agrega veya ince-iri agrega olarak kullanılmasıyla ilgili çalışmalara rastlamak mümkünken başlı başına ince agrega olarak kullanılması ile ilgili çalışmalar pek bulunmamaktadır. Bu sebeple bu malzemenin köpük betona entegrasyonu ile ilgili çalışmalar arttırılmalıdır.
- ❖ Çalışma kapsamında FC'nin köpük betonun mühendislik özellikleri üzerinde birçok olumlu sonuç doğurduğu tespit edilmiştir. Ancak literatürde bu durumun farklı olduğunu belirten çalışmalar bulunmaktadır. Bu durumun daha detaylı ve kapsamlı çalışmalar yapılarak tekrardan irdelenmesinde fayda vardır.
- ❖ FC'nin köpük betonda kullanılması ile oluşabilecek olumsuz durumların bertaraf edilmesi için köpük beton reçetesi hazırlanırken farklı malzemelerin reçeteye dahil edilmesi ile ilgili yeni çalışmalar yapılmalıdır.
- ❖ Köpük beton üretimi hassasiyet gerektiren zahmetli bir süreçtir. Bu nedenle çalışma sürecinde sabırla üretime devam edilmeli ve hedeflenen köpük beton karışımı elde edilmelidir.

KAYNAKLAR

- Acharya, P.K. ve Patro, S.K. (2024). Strength, wear-resistance, degree of hydration, energy and carbon performance of concrete using ferrochrome waste materials. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 48 (1): 353-362.
- ACI 213R-14, (2014). Guide for structural lightweight-aggregate concrete. *American Concrete Institute, USA, 2014, 57.*
- ACI 523.1R-06, (2006). Guide for cast-in place low density cellular concrete. *American Concrete Institute, USA, 2006, 25.*
- ACI 523.2R-96, (1996). Guide for precast cellular concrete floor, roof, and wall units. *American Concrete Institute, USA, 1996, 5.*
- ACI Committee 213R-03, (2003). Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete, *American Concrete Institute, USA, 2003, 38.*
- ACI Committee 213R-87, (1987). Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete, *American Concrete Institute, USA, 1987, 27.*
- Aldridge, D. (2005). Introduction to foamed concrete: what, why, how?. *In Use of foamed concrete in construction: Proceedings of the international conference held at the University of Dundee, 5 July 2005, Scotland, 1-14.*
- Alengaram, U.J., Al Muhit, B.A., Bin Jumaat, M.Z. ve Jing, M.L.Y. (2013). A comparison of the thermal conductivity of oil palm shell foamed concrete with conventional materials. *Materials and Design*, 51, 522-529.
- Al-Jabri, K. ve Shoukry, H. (2018). Influence of nano metakaolin on thermo-physical, mechanical and microstructural properties of high-volume ferrochrome slag mortar. *Construction and Building Materials*, 177: 210-221.
- Al-Jabri, K., Shoukry, H., Khalil, I.S., Nasir, S. ve Hassan, H.F. (2018). Reuse of waste ferrochrome slag in the production of mortar with improved thermal and mechanical performance. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30 (8): 04018152.
- Amran, Y.H.M., Farzadnia, N. ve Ali, A.A.A. (2015.) Properties and applications of foamed concrete; a review. *Construction and Building Materials*. 101: 990–1005.
- Arioğlu, E., Arioğlu, N. ve Yılmaz, A.O. (1999). *Çözümlü beton agregaları problemleri*. İstanbul: Evrim Yayınları.
- Aslan, H. (2022). Elazığ Ferrokrom Cürufu İle Üretilen Alkali Aktivasyonlu Harçların Taze Harç Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Teknolojileri Programı, Elazığ, 133.

- ASTM C 1012, (2024). Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution. *American Society for Testing and Materials International*, West Conshohocken, PA, USA, 2024, 8.
- ASTM C 1437, (2020). Standard test method for flow of hydraulic cement mortar. *American Society for Testing and Materials International*, West Conshohocken, PA, USA, 2020, 2.
- ASTM C 267, (2020). Standard test methods for chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacings and polymer concretes. *American Society for Testing and Materials International*, West Conshohocken, PA, USA, 2020, 7.
- ASTM C 348, (2021). Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars. *American Society for Testing and Materials International*, West Conshohocken, PA, USA, 2021, 6.
- ASTM C 349, (2018). Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure). *American Society for Testing and Materials International*, West Conshohocken, PA, USA, 2018, 4.
- ASTM C 642, (2021). Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. *American Society for Testing and Materials International*, West Conshohocken, PA, USA, 2021, 3.
- ASTM C 666, (2015). Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing. *American Society for Testing and Materials International*, West Conshohocken, PA, USA, 2015, 7.
- ASTM D 7984, (2021). Standard test method for measurement of thermal effusivity of fabrics using a modified transient plane source (mtps) instrument. *American Society for Testing and Materials International*, West Conshohocken, PA, USA, 2021, 5.
- Atabey, V. (2018). Mermer Atıklarından Köpük Beton Blok Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon, 84.
- Atlı, İ. ve İpek, M. (2024). Investigation of the Mechanical Behaviors of Sustainable Green Reactive Powder Concrete Produced Using Ferrochrome Slag and Waste Fiber. *Sustainability*. 16 (11): 4714.
- Aydoğdu, İ.B. (2014). Yerel ve bölgesel düzeyde çevre kirliliği sorunları: Elazığ ili örneği. *Fırat Üniversitesi Harput Araştırmaları Dergisi*, 1 (1): 133-148.
- Balcı, B. (2022). Taban Külü Ve Geri Dönüşüm Agregalarından Üretilen Köpük Betonların Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kastamonu, 83.
- Baradan, B., Yazıcı B. ve Aydın, S. (2015). *Beton*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.

- Bayraktar, O.Y. ve Kaplan, G. (2021). Farklı çimentolardan üretilen köpük betonlarda atık lastiklerin hafif agrega olarak kullanımı. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11 (3): 692-703.
- Bayraktar, O.Y., Kaplan, G., Gençel, O., Benli, A. ve Sutcu, M. (2021). Physico-mechanical, durability and thermal properties of basalt fiber reinforced foamed concrete containing waste marble powder and slag. *Construction and Building Materials*, 288, 123128.
- Bayraktar, O.Y., Yarar, G., Benli, A., Kaplan, G., Gençel, O., Sutcu, M., Kozłowski, M. ve Kadela, M. (2023). Basalt fiber reinforced foam concrete with marble waste and calcium aluminate cement. *Structural Concrete*, 24 (1): 1152-1178.
- Bekaroğlu, M. (2012). Kompozit Yapıda Pomza Agregası İçeren Köpük Betonun Özellikleri ve Teknik Parametrelerinin İrdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 124.
- Beningfield, N., Gaimster, R., ve Griffin, P. (2005). Investigation into the air void characteristics of foamed concrete. *Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction, University of Dundee, 5 July 2005, Scotland*, 51–60.
- Bindiganavile, V. ve Hoseini, M. (2019). Foamed Concrete. S. Mindess (Ed.). *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete* içinde (365-390). Amsterdam, The Netherlands: Woodhead Publishing.
- Bing, C., Zhen, W. ve Ning, L. (2012). Experimental research on properties of high-strength foamed concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 24 (1): 113-118.
- Binici, H., Çağatay, İ.H. ve Kaplan, H. (2000). Değişik faktörlerin beton mukavemetine etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6 (3): 203-209.
- Bodur, B., Bayraktar, O.Y. ve Kaplan, G. (2021) Kalsiyum alüminat çimentolarının köpük beton üretiminde kullanımının incelenmesi, *1. uluslararası mühendislik ve mimarlık kongresi*, İstanbul.
- Botto, S. (2009). Tap water vs. bottled water in a footprint integrated approach. *Nature precedings*, 1-1.
- Brady, K.C., Watts, G.R.A. ve Jones, M.R. (2001). Specification for foamed concrete.
- British Cement Association. (1994). *Foamed concrete: Compositions and properties*. Camberley, UK.
- British Cement Association. (1994). *Foamed concrete: Compositions and properties*. Camberley, UK.

- Byun, K.J., Song, H.W., Park, S.S. ve Song, Y. (1998). Development of structural lightweight foamed concrete using polymer foam agent. *ICPIC-98*, 9.
- Canbaz, M., Dakman, H., Arslan, B. ve Büyüksungur, A. (2019). The effect of high-temperature on foamed concrete. *Computers and Concrete, An International Journal*, 24 (1): 1-6.
- Chandra, S. ve Berntsson, L. (2002). Lightweight aggregate concrete: science, technology and applications. Norwich, New York: *William Andrew Publishing*.
- Chen, B. ve Liu, N. (2013). A novel lightweight concrete-fabrication and its thermal and mechanical properties. *Construction and building materials*, 44: 691-698.
- Chen, J., Chen, B., Qiang, S. ve Chen, S. (2024). Study on strength deterioration mechanism of foamed concrete under freeze-thaw cycles: Experiment and numerical simulation. *Construction and Building Materials*, 438, 137083.
- Cong, M. ve Bing, C. (2015). Properties of a foamed concrete with soil as filler. *Construction and Building Materials*, 76, 61-69.
- Dakman, M.H. (2017). Köpük Betonda Yüksek Sıcaklık Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Bilim Dalı, Eskişehir, 99.
- Dang, J., Zhao, S., Chen, G., Cao, X. ve Yang, J. (2022). Effect of polyethylene powder and heating treatment on the microstructure and hardened properties of foam concrete. *Journal of Building Engineering*. 50, 104143.
- Dash, M.K. ve Patro, S.K. (2021). Performance assessment of ferrochrome slag as partial replacement of fine aggregate in concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 25 (4): 635-654.
- Davraz, M., Kılınçarslan, Ş. Koru, M. ve Tuzlak, F. (2016). Investigation of relationships between ultrasonic pulse velocity and thermal conductivity coefficient in foam concretes. *Acta Physica Polonica A*. 130 (1): 469-470.
- Dede, H. (2019). Köpük Beton Üretiminde Genleştirme Yönteminin Deneysel Yöntemlerle Optimize Edilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon, 86.
- Dey, S., Anurag, A. ve Praveen Kumar, V.V. (2022). An experimental study on strength and durability properties of concrete with partial replacement of aggregate with ferrochrome slag. *Architecture, Structures and Construction*, 2 (3): 335-347.
- DIN 1045, (1988). Reinforced concrete structures – design and construction, Beuth Verlag, Berlin.
- Ekinci, D. (2014). Türkiye’de Köpük Beton, *Yapı Teknolojisi ve Malzeme, Mimarlık Dergisi*, 376. Sayısı.

- Elabade, W.A.T. (2021). Atık Mermer Tozu ve Pirinç Kabuğu Külü Katkılı Köpük Betonların Mekanik ve Bazı Durabilite Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kastamonu, 115.
- Erşimşek, M. (2006). Enjeksiyon Yöntemiyle Üretilen Granüle Yapılı Ferrokrom Cürufu Katkılı Betonların Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ, 57.
- Falliano, D., De Domenico, D., Ricciardi, G., & Gugliandolo, E. (2018). Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density. *Construction and Building Materials*, 165, 735-749.
- Fares, A.I., Sohel, K.M.A., Al-Jabri, K. ve Al-Saidy, A. (2023). Influence of ferrochrome slag as coarse and fine aggregates on thermal and strength properties of concrete at high temperatures. *Construction and Building Materials*, 400, 132807.
- Gençel, O., Bayraktar, O.Y., Kaplan, G., Asrlan, O., Nodehi, M., Benli, A., Gholampour, A. ve Özbakkaloğlu, T. (2022a). Lightweight foam concrete containing expanded perlite and glass sand: Physico-mechanical, durability, and insulation properties. *Construction and Building Materials*. 320, 126187.
- Gençel, O., Oğuz, M., Gholampour, A. ve Özbakkaloğlu, T. (2021a). Recycling waste concretes as fine aggregate and fly ash as binder in production of thermal insulating foam concretes. *Journal of Building Engineering*. 38, 102232.
- Gençel, O., Bayraktar, O.Y., Kaplan, G., Benli, A., Martinez-Barrera, G., Brostow, W., Tek. M. ve Bodur, B. (2021c). Characteristics of hemp fibre reinforced foam concretes with fly ash and Taguchi optimization. *Construction and Building Materials*, 294, 123607.
- Gençel, O., Bilir, T., Bademler, Z. ve Özbakkaloğlu, T. (2022b). A detailed review on foam concrete ccesomposites: Ingredients, properties, and microstructure. *Applied Scien*, 12 (11): 5752.
- Gençel, O., Kazmi, S.M.S., Munir, M.J., Kaplan, G., Bayraktar, O.Y., Yarar, D.O., Karimipour, A. ve Ahmad, M.R. (2021b). Influence of bottom ash and polypropylene fibers on the physico-mechanical, durability and thermal performance of foam concrete: An experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 306, 124887.
- Gençel, O., Koksall, F., Ozel, C. ve Brostow, W. (2012). Combined effects of fly ash and waste ferrochromium on properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 29, 633-640.
- Gençel, O., Nodehi, M., Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Benli, A., Gholampour, A. ve Ozbakkaloglu, T. (2022c). Basalt fiber-reinforced foam concrete containing silica fume: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 326, 126861.

- George, E.S., Hari, R. ve Madhavan, M.K. (2024). Performance assessment of blended self-compacting concrete with ferrochrome slag as fine aggregate using functional ANOVA. *Journal of Building Engineering*, 89, 109390.
- Gołaszewski, J., Klemczak, B., Smolana, A., Gołaszewska, M., Cygan, G., Mankel, C., Peralta, C., Röser, F. ve Koenders, E.A. (2022). Effect of foaming agent, binder and density on the compressive strength and thermal conductivity of ultra-light foam concrete. *Buildings*, 12 (8): 1176.
- Guo, R., Xue, C., Guo, W., Wang, S., Shi, Y., Qiu, Y. ve Zhao, Q. (2023). Preparation of foam concrete from solid wastes: Physical properties and foam stability. *Construction and Building Materials*. 408, 133733.
- Hamad, A.J. (2014). Materials, production, properties and application of aerated lightweight concrete. *International journal of materials science and engineering*, 2 (2): 152-157.
- Hamidah, M.S., Azmi, I., Ruslan, M.R.A., Kartini, K. ve Fadhil, N.M., (2005). Optimization of foamed concrete mix of different sand-cement ratio and curing conditions. *Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction, University of Dundee, 5 July 2005, Scotland*, 37–44.
- Hammond, G., Jones, C., Lowrie, E.F. ve Tse, P. (2011). Embodied carbon. *The inventory of carbon and energy (ICE). Version (2.0)*, 16.
- Hang, M., Wang, J., Zhou, X. ve Sun, M. (2023). Design and study of physical and mechanical properties of concrete based on ferrochrome slag and its mechanism analysis. *Buildings*, 13 (1): 54.
- Ifzaznah, H.H.H., Güllü, A., Memiş, S., Yaprak, H., Gencel, O. ve Ozbakkaloglu, T. (2024). Performance, cost, and ecological assessment of fiber-reinforced high-performance mortar incorporating pumice powder and ground granulated blast furnace slag as partial cement replacement. *Journal of Cleaner Production*, 476, 143720.
- Islam, M.Z., Soheli, K.M., Al-Jabri, K. ve Al Harthy, A. (2021). Properties of concrete with ferrochrome slag as a fine aggregate at elevated temperatures. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00599.
- Işıldar, N. (2018). Köpük Betonda Kuruma Büzülmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 67.
- Jalal, M. D., Tanveer, A., Jagdeesh, K. ve Ahmed, F. (2017). Foam concrete. *International Journal of Civil Engineering Research*, 8 (1): 1-14.
- Jiang, J., Lu, Z., Niu, Y., Li, J. ve Zhang, Y. (2016). Study on the preparation and properties of high-porosity foamed concretes based on ordinary Portland cement. *Materials and Design*, 92, 949-959.

- Jones, M.R. ve McCarthy, A. (2005). Behavior and assessment of foamed concrete for construction application. *Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction, University of Dundee, 5 July 2005, Scotland*, 61–88.
- Kalkan, Y. (2017). Farklı Kür Şartlarının Elazığ Ferrochrom Cürufundan Üretilen Geopolimer Betonların Mekanik Özellikleri ve Mikro Yapısı Üzerine Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Malatya, 77.
- Kantarıcı, F. (2013). Elazığ Ferrochrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Malatya, 131.
- Kocakerimoğlu, F. (2020). Köpük Beton Üretiminde Farklı Mineral Katkıların Fiziksel ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon, 103.
- Koci, V. ve Cerny, R. (2022). Directly foamed geopolymers: A review of recent studies. *Cement and Concrete Composites*, 130, 104530.
- Kopuri, N.A.G.K.M. ve Ramesh, K. (2019). Durability studies on concrete with ferro chrome slag as partial replacement of fine aggregate. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 8, 159-164.
- Kozłowski, M. ve Kadela, M. (2018). Mechanical characterization of lightweight foamed concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1, 6801258.
- Köksal, F., Şahin, Y. ve Gençel, O. (2020). Influence of expanded vermiculite powder and silica fume on properties of foam concretes. *Construction and Building Materials*. 257, 119547.
- Krishna, A.S., Siempu, R. ve Kumar, G.S. (2021). Study on the fresh and hardened properties of foam concrete incorporating fly ash. *Materials Today: Proceedings*, 46, 8639-8644.
- Kumar, B.A.V.R., Keshav, L., Sivanantham, P.A., Arokiaraj, G.G.V., Rahman, D.R.Z., Kumar, P.M. ve Somashekar, D. (2022). Comprehensive characterization of ferrochrome slag and ferrochrome ash as sustainable materials in construction. *Journal of Nanomaterials*, 1, 8571055.
- Kunhanandan Nambiar, E.K. ve Ramamurthy, K. (2007). Air-void characterisation of foam concrete. *Cement and concrete research*, 37 (2): 211-230.
- Kunhanandan Nambiar, E.K. ve Ramamurthy, K. (2008). Fresh state characteristics of foam concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 20 (2): 111-117.
- Kunther, W., Ferreira, S. ve Skibsted, J. (2017). Influence of the Ca/Si ratio on the

compressive strength of cementitious calcium–silicate–hydrate binders. *Journal of Materials Chemistry A*, 5 (33): 17401-17412.

- Kurtuluş, C. (2021). Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Köpük Beton Özelliklerinin Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon, 192.
- Li, G., Tan, H., He, X., Zhang, J., Deng, X., Zheng, Z. ve Guo, Y. (2021). The influence of wet ground fly ash on the performance of foamed concrete. *Construction and Building Materials*. 304, 124676.
- Li, M., Tan, H., He, X., Jian, S., Li, G., Zhang, J., Deng, X. ve Lin, X. (2023). Enhancement in compressive strength of foamed concrete by ultra-fine slag. *Cement and Concrete Composites*, 138, 104954.
- Li, T., Huang, F., Li, L., Zhu, J., Jiang, X. ve Huang, Y. (2020). Preparation and properties of sulphoaluminate cement-based foamed concrete with high performance. *Construction and Building Materials*, 263, 120945.
- Lim, S.K., Tan, C.S., Li, B., Ling, T.C., Hossain, M.U. ve Poon, C.S. (2017). Utilizing high volumes quarry wastes in the production of lightweight foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 151: 441-448.
- Lin, Y., Zhou, W., AlAteah, A. H. ve Mostafa, S. A. (2024). Recycling and reuse of waste banded iron formation as fine aggregate in the production of lightweight foamed concrete: Fresh-state, mechanical, thermal, microstructure and durability properties assessment. *Construction and Building Materials*. 439, 137369.
- Lu, W., Ye, J., Zhu, L., Jin, Z. ve Matsumoto, Y. (2021). Intumescent flame retardant mechanism of lignosulfonate as a char forming agent in rigid polyurethane foam. *Polymers*, 13 (10): 1585.
- Mahmut, O. (2015). Geopolimer Harç Üretiminde Elazığ Ferrokrom Cürufu Kullanımının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Düzce, 53.
- Mamun, M. ve Bindiganavile, V. (2011). Sulphate resistance of fibre reinforced cement-based foams. *Construction and Building Materials*, 25 (8): 3427-3442.
- Maraş, M.M. (2013). Elazığ Ferrokrom Cürufundan Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Sülfat Direncinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Malatya, 185.
- Mastali, M., Kinnunen, P., Isomoisio, H., Karhu, M. ve Illikainen, M. (2018). Mechanical and acoustic properties of fiber-reinforced alkali-activated slag foam concretes containing lightweight structural aggregates. *Construction and Building Materials*, 187, 371-381.
- Mısır, M.N. (2021). Elazığ Ferrokrom Cürufu İle Alkali Aktive Edilmiş Cam Lifi ve Atık

Mermer Tozu Katkılı Harçların Mühendislik Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemesi Programı, Elazığ, 63.

- Miyan, N., Omur, T., Kabay, N. ve Birol, B. (2023). The potential usage of waste ferrochrome slag in alkali-activated mixes. *Journal of Building Engineering*, 75, 107026.
- Mohanty, I., Saha, P., Patra, S.R. ve Jha, S.K. (2023). Waste to valuable resource: Application of copper slag and steel slag in concrete with reduced carbon dioxide emissions. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8 (4): 122.
- Mydin, M.A.O. ve Wang, Y.C. (2011). Structural performance of lightweight steelfoamed concrete–steel composite walling system under compression. *Thin walled Structures*, 49 (1): 66–76.
- Mydin, M.A.O. ve Wang, Y.C. (2012). Mechanical properties of foamed concrete exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 26 (1): 638-654.
- Narayanan, N. ve Ramamurthy, K. (2000). Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement and Concrete composites*, 22 (5): 321-329.
- Nergiz V, (2007). Yüksek Dayanımlı Betonlarda Durabilite ve İşlenebilirlik. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 111.
- Neupane, K. (2022). Evaluation of environmental sustainability of one-part geopolymer binder concrete. *Cleaner Materials*, 6, 100138.
- Neville, A.M. (1995). *Properties of concrete*. (4th Edition). London: Longman Group.
- Neville, A.M. ve Brooks, J.J. (1987). *Concrete technology*. England: Longman Scientific and Technical.
- Newman, J. ve Choo, B.S. (2003). *Advanced concrete technology 3: processes*. Oxford: Elsevier.
- Ojha, P.N., Singh, A., Singh, B. ve Patel, V. (2021). Experimental investigation on use of ferrochrome slag as an alternative to natural aggregates in concrete structures. *Reserch on Engineering Structures and Materials*, 7 (2): 225-244.
- Othman, R., Jaya, R.P., Muthusamy, K., Sulaiman, M., Duraisamy, Y., Abdullah, M.M.A.B., Przybył, A., Sochacki, W., Skrzypczak, T., Vizureanu P. ve Sandu, A.V. (2021). Relation between density and compressive strength of foamed concrete. *Materials*, 14 (11): 2967.
- Ören, O.H. (2017). Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Köpük Beton Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, 85.

- Ören, O.H. ve Gençel, O. (2017). Köpük Beton. *Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5 (2): 129-136.
- Ören, O.H., Gholampour, A. Gençel, O. ve Özbakkaloğlu, T. (2020). Physical and mechanical properties of foam concretes containing granulated blast furnace slag as fine aggregate. *Construction and Building Materials*. 238, 117774.
- Özcan, A. (2018). Ferrokrom Cürufu ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Asit, Tuz ve Sülfat Etkilerine Karşı Dayanıklılığının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Malatya, 133.
- Özcan, A. ve Karakoç, M.B. (2019). The resistance of blast furnace slag-and ferrochrome slag-based geopolymer concrete against acid attack. *International Journal of Civil Engineering*, 17, 1571-1583.
- Özdal, M. (2019). Ferrokrom Cürufu ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Donma Çözülme Etkilerine Karşı Dayanıklılığının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Malatya, 82.
- Özdemir, H. ve Altan, M.F. (2023). Su geçirimsizlik sağlayan sıvı beton katkılarının incelenmesi. *Journal of Technical and Applied Sciences*, 3 (1): 32-48.
- Öztürk Yarar, D. (2021). Polipropilen Lif İle Güçlendirilmiş Köpük Betonlarda Taban Külünün Hafif Agregata Olarak Kullanımının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kastamonu, 73.
- Panda, C.R., Mishra, K.K., Panda, K.C., Nayak, B.D. ve Nayak, B.B. (2013). Environmental and technical assessment of ferrochrome slag as concrete aggregate material. *Construction and Building Materials*, 49: 262-271.
- Panesar, D.K. (2013). Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents, *Construction and building materials*, 44: 575–584.
- Papayianni, I. ve Milud, I.A. (2005). Production of foamed concrete with high calcium fly ash. *Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction, University of Dundee, 5 July 2005, Scotland*, 23–28.
- Proctor, D.M., Fehling, K.A. Shay, E.C. Wittenborn, J.L. Green, J.J. Avent, C. Biggam, R.D. Connolly, M. Lee, B. Shepker, T.O. Zak, M. A. (2000). Physical and chemical characteristics of blast furnace basic oxygen furnace and electric arc furnace steel industry slags. *Environment Science and Technology*, 34 (8): 1576-1582.
- Pujary, A., Rath, T. P., Mohanty, S., Pradhan, N., Jena, T., & Panda, C. (2024). Degradation effects in concrete bound ferrochrome slag under aggressive sulphuric acid and sulphate attack. *Materials and Structures*, 57 (6): 148.

- Raj, A., Sathyan, D. ve Mini, K.M. (2019). Physical and functional characteristics of foam concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 221, 787-799.
- Rajashekar, K. ve Reddy, C. S. (2015). An experimental study on use of ferrochrome slag aggregate in concrete making. *ICI Journal*, 15 (4): 25-29.
- Rakam, A., Sahu, S.S. ve Pillalamarri, B. (2024). State-of-the-art review on advancement in foam concrete production technology using mineral admixtures. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9 (11): 439.
- Ramamurthy, K., Nambiar, E. K. ve Ranjani, G. I. S. (2009). A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and concrete composites*, 31 (6): 388-396.
- Richard, A.O., ve Ramli, M. (2013). Experimental production of sustainable lightweight foamed concrete. *British Journal of Applied Science and Technology*. 3 (4): 994-1005.
- Richard, T.G., Dobogai, j., Gerhardt, T.D. ve Young, W.C. (1975). A Cellular concrete – a potential load-bearing insulation for cryogenic applications. *IEEE Transactions on Magnetics*, 11 (2): 500-503.
- Rybakov, V., Seliverstov, A., Petrov, D., Smirnov, A. ve Volkova, A. (2018). Strength characteristics of foam concrete samples with various additives. *In MATEC Web of Conferences*, 245, EDP sciences.
- Selvakumar, M., Srimathi, C., Narayanan, S. ve Mukesh, B. (2023). Study on properties of foam concrete with foundry sand and latex. *Materials Today: Proceedings*. 80, 1055-1060.
- Shahabi, E. ve Klemes, J.J. (2024). Optimizing compressive strength and durability of foamed concrete with fine lightweight aggregate and Fly Ash Incorporation. *International Journal of Researches on Civil Engineering with Artificial Intelligence*. 1 (1): 40-58.
- Shareef, Z. A., Ahmed, S. Y., & Abdulkareem, O. M. (2023). Potential Use of Wastes of Thermostone Blocks and Ceramic Tiles as Recycled Aggregates in Production of Foam Concrete. *Civil Engineering and Architecture*, 11(3): 1280-1296.
- She, W., Du, Y., Zhao, G., Feng, P., Zhang, Y. ve Cao, X. (2018). Influence of coarse fly ash on the performance of foam concrete and its application in high-speed railway roadbeds. *Construction and Building Materials*, 170, 153-166.
- Shi, J., Liu, B., He, Z., Liu, Y., Jiang, J., Xiong, T., ve Shi, J. (2021). A green ultra-lightweight chemically foamed concrete for building exterior: A feasibility study. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125085.
- Sohel, K.M.A., Al-Jabri, K., Islam, M.Z. ve Al-Shereiqi, A.A.R. (2022, May). Use of waste ferrochrome slag as a sustainable building material for extreme environments. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1026, No. 1, p. 012011). IOP Publishing.

- Song, Q., Zou, Y., Xu, S., Yang, Y., Bao, J., Xue, S., Zhang, P. ve Sun, M. (2024). Performance study of foam concrete prepared by the synergistic utilization of agricultural waste and coal gangue based on double orthogonal experiments. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03677.
- Söylemez, H. (2022). Atık Lastik ve Silis Dumanı Kullanılarak Üretilen Köpük Betonların Mekanik ve Bazı Durabilite Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kastamonu, 98.
- Stevenson, J. (1997). *Slag Characterization and Utilization*. Research Experience, Langston University, Langston OK.
- Şahin, R., Taşdemir, M. A., Gül, R. ve Çelik, C. (2007). Taze beton özelliklerinin optimizasyonu. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 38 (2): 127-135.
- Tait, M. W. ve Cheung, W. M. (2016). A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of three concrete mix designs. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 847-860.
- Tan, X., Chen, W., Wang, J., Yang, D., Qi, X., Ma, Y., Wang X., Ma, S. ve Li, C. (2017). Influence of high temperature on the residual physical and mechanical properties of foamed concrete. *Construction and building materials*, 135, 203-211.
- Taşdemir, C. (2003). Hafif betonların ısı yalıtım ve taşıyıcılık özellikleri. *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği İnşaat Mühendisleri Odası Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, 427: 57-61.
- Taşgın, Y. (2014). Mermer, Ferrokrom Cürufu ve Cam Atıklarının Asfalt Beton Kaplamalarında Filler Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Tunceli, 94.
- Taylor, W.H. (1965). *Concrete Technology and Practice*. (3.Baskı). Amerika: American Elsevier Publishing Company.
- 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, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kastamonu, 128.
- TS 1114 EN 13055-1, (2004). Hafif agregalar - Bölüm 1: Beton, harç ve şerbette kullanım için. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2004, 39.
- TS 2511, (1977). Taşıyıcı hafif beton karışım hesap esasları. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1977, 13.
- TS EN 1008, (2003). Beton – karma suyu – numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu

- olarak uygunluğunun tayini kuralları. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2003, 18.
- TS EN 197-1, (2012). Genel Çimentolar - Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2012, 29.
- TS EN 206+A2, (2021). Beton-özellik, performans, imalat ve uygunluk. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2021, 105.
- TSE K 314, (2014). Köpük Betondan Mamul Yerinde Döküm, Taşıyıcı Olmayan Duvar Elemanları - Binalar İçin Standart. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2014, 16.
- Tuzlak, F. (2017). Taze Beton Reolojisinin Köpük Beton Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 62.
- Türeyen, A.C. (2019). Genleştirilmiş Vermikülit Kullanılarak Üretilen Köpük Betonların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yozgat, 141.
- URL-1 (2024). https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/7ffc95363387c_ek.doc, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, Krom, (Erişim tarihi:06.12.2024).
- URL-2 (2024). <https://enerji.gov.tr/bilgimerkezi-tabii-kaynaklar-krom>, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Krom, (Erişim tarihi:06.12.2024).
- URL-3 (2025). <https://bumlab.bartın.edu.tr/laboratuvarlar/taramali-elektron-mikroskobu-laboratuvari.html>, Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), (Erişim tarihi:04.04.2025).
- Uygunoğlu, T. (2008). Hafif Agregalı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Özellikleri. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 170.
- Valore, R.C. (1954). Cellular concretes Part 2 physical properties. *ACI Journal of Proceedings*, 50 (6): 817-836.
- Varlı, U. (2021). Üç Boyutlu Tekstil İle Üretilen Köpük Betonların Mekanik Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Bilim Dalı, Eskişehir, 87.
- Vishavkarma, A., ve Venkatanarayanan, H.K. (2024). Assessment of pore structure of foam concrete containing slag for improved durability performance in reinforced concrete applications. *Journal of Building Engineering*, 86, 108939.
- Weigler, H. ve Karl, S. (1980). Structural lightweight aggregate concrete with reduced density-lightweight aggregate foamed concrete. *International Lightweight Concrete*, 2 (2): 101-104.
- Wu, J., Lv, C., Pi, R., Zhang, H., Bi, Y., Song, X. ve Wang, Z. (2021). The stability and

durability of silt-based foamed concrete: A new type of road engineering material. *Construction and Building Materials*, 304, 124674.

- Yanardağ, B. (2020). Kalsiyum Alüminat Çimentolu Köpük Beton Tasarımı ve Mühendislik Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemeleri Bilim Dalı, Isparta, 138.
- Yarar, G. (2021). Kalsiyum Alüminat Çimentolarının Köpük Beton Üretiminde Bazalt Lif İle Kullanımının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kastamonu, 101.
- Yazıcı, A. ve Kaya, M. (2003). Ferrokrom cürufunun karakterizasyonu. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15: 539-548.
- Ye, G., Chen, Y., Zhang, Z. ve Shen, H. (2024, May). Strength degradation of foamed cement paste under sulfate attack. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1334, No. 1, p. 012002). IOP Publishing.
- Yıldız, İ. (2013). Elazığ Ferrokrom Cürufunun Beton Parke Taşı ve Tuğla Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum, 224.
- Yılmaz, A. (2002). Antalya Ferrokrom İşletmesinin Elektrik-Ark Fırını Cüruflarının ve Baca Tozu Atıklarının Asfalt Betonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya, 97.
- Yılmaz, A. ve Süttaş, İ. (2008). Ferrokrom cürufunun yol temel malzemesi olarak kullanımı. *Teknik Dergi*, 19 (93): 4455-4470.
- Yüksel, İ. ve Bilir, T. (2005). Yüksek fırın cürufunun parke ve bordür üretiminde kullanılması. *Kocaeli Deprem Sempozyumu*, 23-25 Mart 2005, Kocaeli, 870-880.
- Zahari, N.M., Rahman, I.A., Zaidi, A.M.A. ve Mujahid, A. (2009). Foamed concrete: potential application in thermal insulation. *In Malaysian Technical Universities Conference on Engineering and Technology*, 20-22 June 2009, Malaysia, 47-52.
- Zelic, J. (2005). Properties of concrete pavements prepared with ferrochromium slag as concrete aggregate. *Cement and concrete research*, 35 (12): 2340-2349.
- Zhang, S., Qi, X., Guo, S., Zhang, L. ve Ren, J. (2022). A systematic research on foamed concrete: The effects of foam content, fly ash, slag, silica fume and water-to-binder ratio. *Construction and Building Materials*, 339, 127683.
- Zhou, G. ve Su, R.K.L. (2023). A review on durability of foam concrete. *Buildings*, 13 (7): 1880.

Zhu, Y., Rong, Z., Jiao, M., Jiang, Q. ve Wu, J. (2023). Valorization and enhancement mechanism of ferrochrome slag as aggregate for manufacturing ultra-high performance concrete (UHPC). *Cement and Concrete Composites*, 144, 105298.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı :

Doğum Yeri ve Tarihi :

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi :

Yüksek Lisans Öğrenimi :

Bildiği Yabancı Diller :

Bilimsel Faaliyet/Yayımlar :

İş Deneyimi

Stajlar :

Çalıştığı Kurumlar :

İletişim

E-Posta Adresi :

Tarih : 27/05/2025 (Tez Savunma Tarihi)