

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**OLİVİN, KROM CÜRUFU VE ATIK KROM TOZU İÇEREN
ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN MÜHENDİSLİK
ÖZELLİKLERİ**

Mustafa PALA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Nihan GÜLMEZ

TUNCELİ-2023

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**OLİVİN, KROM CÜRUFU VE ATIK KROM TOZU İÇEREN
ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN MÜHENDİSLİK
ÖZELLİKLERİ**

Mustafa PALA
200150015

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Nihan GÜLMEZ

TUNCELİ-2023

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**OLİVİN, KROM CÜRUFU VE ATIK KROM TOZU İÇEREN
ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN MÜHENDİSLİK
ÖZELLİKLERİ**

Mustafa PALA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 07/04/2023 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

İmza:

Prof. Dr. Niyazi Uğur
KOÇKAL
(Akdeniz Üniversitesi)

BAŞKAN

İmza:

Doç. Dr. Nihan GÜLMEZ
(Munzur Üniversitesi)

DANIŞMAN

İmza:

Dr. Öğr. Üyesi Selim
CEMALGİL
(Munzur Üniversitesi)

ÜYE

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

Doç. Dr. Murat KORUNUR
Enstitü Müdürü

Bu çalışma, Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

Proje No: YLMUB021-17

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

29.04.2023

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

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

Mustafa PALA

Doç. Dr. Nihan GÜLMEZ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde değerli bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen, her zaman güler yüzü ve samimiyetiyle bana yol gösteren, her türlü konuda varlığını, bilgisini ve desteğini hissettiren danışman hocam Doç. Dr. Nihan GÜLMEZ' e, deneysel çalışmaların yürütülmesi kısmında yardımcı olan Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Servet Yıldız' a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin temininde yardımcı olan ERKROM Madencilik firması yetkilisi Yalçın Metin Bey ve Erdem Bey' e, Elazığ ETİ Krom Fabrikası Ar-Ge birimine ve SEZA çimento fabrikası Ar-Ge birimine teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen yanımda olup bana güç veren değerli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu çalışmanın ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Mustafa PALA
Tunceli-2023

İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	I
TEŞEKKÜR.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	V
TABLolar LİSTESİ.....	VI
RESİMLER LİSTESİ.....	VII
SEMBOLLER LİSTESİ	VIII
KISALTMALAR LİSTESİ	IX
ÖZET	XI
ABSTRACT	XII
1. GİRİŞ.....	13
2. BETONUN TANIMLANMASI VE TARİHSEL GELİŞİMİ	2
3. KROM CÜRUFU	6
4. KROM TOZU.....	9
5. OLİVİN	12
6. ÇİMENTO	17
7. BETONUN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ	23
8. BETONUN MİKROYAPISAL ÖZELLİKLERİ	27
8.1. SEM ve EDS Analizi.....	27
8.2. XRD Analizi.....	30
9. BETONUN SÜLFAT DİRENCİ.....	31
10. BETONUN ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA ÖZELLİKLERİ.....	34
11. MATERYAL VE YÖNTEM.....	36
11.1. Materyal	36
11.1.1. Agrega	37
11.1.2. Çimento	38
11.1.3. Olivin.....	40
11.2. Yöntem	41
11.2.1. Numunelerin hazırlanması ve karışım oranlarının belirlenmesi	41
11.2.2. Çökme deneyi.....	45
11.2.3. Taze betonun birim hacim ağırlık deneyi.....	46
11.2.4. Sertleşmiş betonun birim hacim ağırlık deneyleri.....	46
11.2.5. Kütlece su emme ve görünür porozite deneyleri.....	47
11.2.6. Sülfat etkisi deneyi	49
11.2.7. Basınç dayanımı deneyi	49
11.2.8. Eğilme dayanımı deneyi.....	50
11.2.9. SEM ve EDS analizi.....	51
11.2.10. XRF analizi	54
11.2.11. XRD analizi.....	54
11.2.12. Elektromanyetik kalkanlama deneyi	55
12. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	57
12.1. Taze Beton Deneyleri.....	57
12.1.1. Çökme deneyi sonuçları	57
12.1.2. Taze betonun birim hacim ağırlık deneyi sonuçları	58
12.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri	59
12.2.1. Sertleşmiş betonun birim hacim ağırlık deney sonuçları	60

12.2.2. Kütlece su emme ve görünür porozite deney sonuçları	62
12.2.3. Sülfat etkisi deneyi sonuçları	64
12.2.4. Basınç dayanımı deney sonuçları	65
12.2.5. Eğilme dayanımı deney sonuçları	67
12.2.6. SEM-EDS analizi sonuçları	68
12.2.7. XRD analizi sonuçları	74
12.2.8. Elektromanyetik kalkanlama deneyi sonuçları	77
13. SONUÇ VE �NER�LER.....	80
KAYNAKLAR.....	82
�ZGE�M��	



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Şekil 11.1. Karışımında kullanılan agregaların granülometri eğrileri	38
40	Şekil 11.2. Çimentoya ait olan parçacık boyutu analiz grafiği	
41	Şekil 11.3. Olivin mineraline ait olan parçacık boyutu analiz grafiği	
58	Şekil 12.1. Çökme deneyi değerleri	
59	Şekil 12.2. Taze betonun birim hacim ağırlık değerleri	
60	Şekil 12.3. Suya doymun kuru yüzey yığın yoğunluk değerleri	
61	Şekil 12.4. Kuru yığın yoğunluk değerleri	
63	Şekil 12.5. Kütlece su emme değerleri	
	Şekil 12.6. Görünür porozite değerleri	64
65	Şekil 12.7. Numunelerin basınç dayanımı değerleri	
	Şekil 12.8. Basınç dayanım değerleri	66
68	Şekil 12.9. Eğilme dayanımı değerleri	
75	Şekil 12.10. 0MOC100 numunesine ait XRD analiz grafiği	
75	Şekil 12.11. 0MOC80 numunesine ait XRD analiz grafiği	
76	Şekil 12.12. 0M5C80 numunesine ait XRD analiz grafiği	
76	Şekil 12.13. Olivin mineraline ait XRD analiz grafiği	
77	Şekil 12.14. Elektromanyetik kalkanlama değerleri	

TABLÖLAR LİSTESİ

	Tablo 2.1. Türkiye’ de hazır beton üretimi	5
36	Tablo 11.1. Krom cürufunun kimyasal analizi	
37	Tablo 11.2. Karışımda kullanılan agregaların fiziksel özellikleri	
39	Tablo 11.3. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri	
40	Tablo 11.4. Olivin mineralinin kimyasal analizi	
42	Tablo 11.5. Karışımda kullanılan malzemelerin hacimsel olarak yüzdeleri (%)	
72	Tablo 12.1. 7 günlük OMOC100 numunesinin atomik ve kütlece yüzdeleri	
74	Tablo 12.2. 28 günlük OM5C80 numunesinin atomik ve kütlece yüzdeleri	
78	Tablo 12.3. Numunelerin dielektrik sabiti değerleri	

RESİMLER LİSTESİ

6	Resim 3.1. Krom cürufu	
12	Resim 5.1. Dünit minerali	
12	Resim 5.2. Olivin minerali	
37	Resim 11.1. Agregaların elek analizi için kullanılan sarsma cihazı	
43	Resim 11.2. Beton karışım mikseri	
44	Resim 11.3. Sarsma tablası	
44	Resim 11.5. Numunelerin işaretlenmiş görüntüsü	
	Resim 11.6. Kür havuzuna konulan numunelerin görüntüsü	45
45	Resim 11.7. Çökme değerinin belirlenmesi	
46	Resim 11.8. Taze harcın deney kovası ile birlikte tartımı	
47	Resim 11.9. Arşimet terazisi	
48	Resim 11.10. Numunelerin etüv içindeki görüntüsü	
48	Resim 11.11. Numunelerin doygun yüzey kuru ve sudaki ağırlıklarının ölçümü	
49	Resim 11.12. Sodyum sülfat çözeltisi ve çözelti içerisindeki numuneler	
50	Resim 11.13. Basınç dayanım cihazı ve kırılan bir numunenin kırılma anındaki değeri	
51	Resim 11.14. Eğilme dayanım cihazı	
52	Resim 11.15. Kaplama makinesine ait görüntü	
52	Resim 11.16. Alüminyum kotalar üzerine yerleştirilen numuneler	
53	Resim 11.17. Kaplama makinesi içerisine konulan numuneler	
	Resim 11.18. SEM ve EDS analiz cihazı	53
53	Resim 11.19. SEM analizi cihazı içerisine konulan numuneler	
54	Resim 11.20. XRF analiz cihazı	
	Resim 11.21. XRD analiz cihazı	55
55	Resim 11.22. Deney için yapılan karışım ve kullanılan kalıp	

56	Resim 11.23. Deney için üretilen numunelerin numaralandırılıp paketlenmesi
56	Resim 11.24. EM kalkanlama etkinliği ölçüm cihazı
57	Resim 11.25. Numunelerin cihaz içerisindeki görüntüleri
69	Resim 12.1. 7 günlük OMOC100, OMOC80 ve OM5C80 numunelerinin SEM görüntüleri
70	Resim 12.2. 28 günlük OMOC100, OMOC80 ve OM5C80 numunelerinin SEM görüntüleri
72	Resim 12.3. 7 günlük OMOC100 numunesinin EDS analiz sonuçları
73	Resim 12.4. 28 günlük OM5C80 numunesine yapılan EDS analizi

SEMBOLLER LİSTESİ

dk	: Dakika
g	: Gram
keV	: Kiloelektron volt
kg	: Kilogram
kN	: Kilonewton
L	: Litre
m	: Metre
MPa	: Megapascal
s	: Saniye
S2	: Çökme deneyine göre çökme miktarı 50-90 mm olan kıvam sınıfı
W/mK	: Isı iletkenlik katsayısı
ρ	: Yoğunluk
%	: Yüzde
°C	: Santigrat
μm	: Mikrometre

KISALTMALAR LİSTESİ

ABD	: Amerika Birleşik Devleti
Al₂O₃	: Alümin
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BS14	: 28 günlük karakteristik silindir basınç dayanımı 14 MPa olan beton sınıfı
C₂S	: Dikalsiyum silikat
C30	: 28 günlük karakteristik silindir basınç dayanımı 30 MPa olan beton sınıfı
C₃A	: Trikalsiyum alüminat
C₃S	: Trikalsiyum silikat
C₄AF	: Tetrakalsiyum aluminoferrit
Ca(OH)₂	: Kalsiyum hidroksit
CaFeSiO₄	: Kirstenit
CaMgSiO₄	: Montisellit
CaMnSiO₄	: Glukokroit
CaO	: Kalsiyum oksit
CO₂	: Karbondioksit
Cr₂O₃	: Krom oksit
CuO	: Bakır (II) oksit
dB	: Desibel
DCP	: Kurutulmuş çimentomu toz
EDS	: Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
EM	: Elektromanyetik
EN	: Avrupa Standardı
(Fe,Mg)(Cr,Al,Fe)₂O₄	: Kromit
Fe₂O₃	: Demir (III) oksit
FeMnSiO₄	: Fayalit-knebelit
FeO	: Demir (II) oksit
FeSiO₄	: Fayalit fazı
GBP	: Granüle bazaltik pomza
GDA	: Geri dönüştürülmüş agrega
GDHT	: Geri dönüştürülmüş harç tozu
GHz	: Gigahertz
HMK	: Hacim merkezli kübik
HPGe	: Yüksek saflıkta germanyum dedektörü
ITC	: İzotermal titrasyon kalorimetri
KA	: Krom atığı
KOH	: Potasyum hidroksit
Mg₂SiO₄	: Forsteritik olivin
MgAl₂O₄	: Magnezyum alüminat spinel
MgO	: Magnezyum oksit
MgSiO₃	: Enstatit
MgSO₄	: Magnezyum sülfat
Mn₂SiO₄	: Teforit
MnO	: Mangan oksit
MT	: Mermer tozu

Na₂O	: Sodyum oksit
Na₂SO₄	: Sodyum sülfat
NaI (TI)	: Sodyum iyodür sintilasyon dedektörü
NaOH	: Sodyum hidroksit
OM2,5C100	: %2,5 olivin ve %100 oranında krom cürufu içeren karışım
OM2,5C80	: %2,5 olivin ve %80 oranında krom cürufu içeren karışım
OM2,5C90	: %2,5 olivin ve %90 oranında krom cürufu içeren karışım
OM5C100	: %5 olivin ve %100 oranında krom cürufu içeren karışım
OM5C80	: %5 olivin ve %80 oranında krom cürufu içeren karışım
OM5C90	: %5 olivin ve %90 oranında krom cürufu içeren karışım
OMOC100	: %0 olivin ve %100 oranında krom cürufu içeren karışım
OMOC80	: %0 olivin ve %80 oranında krom cürufu içeren karışım
OMOC90	: %0 olivin ve %90 oranında krom cürufu içeren karışım
ÖGYFC	: Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu
P₂O₅	: Fosfor pentoksit
PÇ	: Portland çimentosu
pH	: Potansiyel Hidrojen
RCWCM	: Geri dönüştürülmüş inşaat atığı çimentolu malzeme
s/ç	: Su/çimento
SD	: Silis dumanı
SDKY	: Suya doymuş kuru yüzey
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SiFeCr	: Silikoferrokrom
SiO₂	: Silisyum dioksit
SO₃	: Kükürt trioksit
SSB	: Silindirle sıkıştırılmış beton
TEM	: Geçirimli elektron mikroskobu
TGA	: Termogravimetrik analiz
TiO₂	: Titanyum dioksit
TS	: Türk standartı
UHPC	: Ultra yüksek performanslı beton
UK	: Uçucu kül
UPV	: Ultrases geçiş hızı
XPS	: X-ışını fotoelektron spektroskopisi
XRD	: X-ışını difraksiyonu
XRF	: X-ışını floresans
YFC	: Yüksek fırın cürufu
YMK	: Yüzey merkezli kübik

ÖZET

Günümüz inşaat sektörü yirmi birinci yüzyıla birlikte hızlı ve gelişen bir endüstriyel oluşum içerisine girmiştir. Bu gelişim medeniyet açısından fayda sağlamakta ama endüstriyel atıkların olumsuz sonuçları esas alındığında ise sorunlar oluşturmaktadır. Dünya nüfusunun artmasıyla atık madde miktarı da artacağından bu durum gelecek yıllar için büyük sorun oluşturacaktır. Bu sorunun en çevreci çözüm yollarından biri bu atık malzemeleri tekrar kullanılabilir duruma getirip farklı sektörlerde değerlendirmektir.

Literatürde krom cürufu, krom tozu ve olivin mineralinin kullanıldığı çalışmalara bakıldığında; beton içerisine hacimsel olarak doğal agrega yerine ya da ince boyutlarda öğütülüp çimentoyla birlikte ayrı ayrı farklı çalışmalarda kullanılmıştır. Bu üç malzemenin farklı deneysel çalışmalarda beton içerisinde birlikte kullanıldığına literatürde pek rastlanmamıştır. Yapılan çalışmada; agrega yerine %0, %10 ve %20 oranında atık krom tozu, %80, %90 ve %100 oranında krom cürufu ve bağlayıcı malzeme yerine ise %0, %2,5 ve %5 oranında olivin minerali karışıma ikame edilmiştir. Bu malzemelerin sertleşmiş betonun mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla; taze beton numuneleri üzerinde, birim hacim ağırlık ve çökme deneyi; sertleşmiş beton numuneleri üzerinde ise suya doygun kuru yüzey yığın yoğunluk, kuru yığın yoğunluk, kütlece su emme yüzdesi, görünür porozite yüzdesi, sodyum sülfat direnci, basınç dayanımı, eğilmede çekme deneyleri ve elektromanyetik kalkanlama deneyleri ile çalışmada kullanılan malzemelerin ve üretilen numunelerin mikroyapısal özelliklerini incelemek için SEM-EDS ve XRD deneyleri yapılmıştır.

Deney sonuçlarına göre; olivin ve atık krom tozunun karışım içerisinde kullanım miktarı arttıkça; taze betonun yoğunluğunda, numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarında artış gözlenmiştir. Beton numunelerinde en iyi mekanik ve fiziksel özellikler olivin minerali ve atık krom tozu içeren numunelerde görülmüştür. Beton numunelerinde yapılan elektromanyetik kalkanlama (EM) deneyinde frekans aralıklarında beton içeriğindeki atık krom tozu ve olivin miktarının artması sonucunda EM kalkanlama değerlerinde bir artış gözlenmiştir. XRF analizi ile kimyasal analizi yapılan atık krom tozu ve olivin minerallerinin içyapılarında Fe_2O_3 , Cr_2O_3 ve MnO bileşiklerine sahip olmaları kalkanlama değerlerine olumlu yansımıştır.

Genel bir değerlendirilme yapıldığında, olivin mineralinin betonda %2,5-%5 arasında çimento ile ikame edilerek, atık krom tozunun %20, krom cürufunun ise %80 oranında agrega yerine kullanımı betonun mekanik, fiziksel özelliklerini ve bu çalışmanın ana amaçlarından olan EM kalkanlama özelliğini olumlu etkilemiştir. Bu çalışma ile beton üretiminde kullanılan agrega ve çimento üretimi için kullanılan doğal kaynakların tüketimini azaltıp verimli kullanarak yine çimento üretimi için harcanan enerjinin tasarrufu sağlanacaktır. Beton içerisine değişik oranlarda olivin ve atık krom tozunun eklenmesiyle, normal yapıdaki betona EM kalkanlama özelliği kazandırılıp nükleer santrallerde, sağlık sektöründe ve doğrudan radyasyona maruz kalınan yerlerde kullanarak inşaat sektörüne yenilik ve sürdürülebilirlik getirileceği söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Krom cürufu, atık krom tozu, olivin, elektromanyetik kalkanlama, geri dönüşüm

ABSTRACT

Properties of cement-based composites containing olivine, chromium slag and waste chromium powder

Today's construction sector has entered into a fast and developing industrial formation with the twenty-first century. This development provides benefits from the point of view of civilization, but it creates problems when the negative consequences of industrial waste are taken as a basis. Since the amount of waste material will increase with the increase of the world population, this situation will pose a big problem for the coming years. One of the most environmentally friendly ways to solve this problem is to make these waste materials reusable and evaluate them in different sectors.

When we look at the studies in which chromium slag, chromium powder and olivine mineral are used in the literature; they were used in different studies by substituting natural aggregate in volume or replacing it with cement after fine grinding. It has not been found in the literature that these three materials have been used together in concrete in different experimental studies. In the study, 0%, 10% and 20% waste chromium powder, 80%, 90% and 100% chromium slag and 0%, 2.5% and 5% olivine mineral were substituted into the mixture instead of aggregate and binding material. To investigate the effect of these materials on the engineering properties of hardened concrete; unit weight and slump experiment were performed on fresh concrete samples; saturated surface dry bulk density, oven dry bulk density, water absorption percentage by mass, apparent porosity percentage, sodium sulfate resistance, compressive strength, flexural strength experiments and electromagnetic shielding experiments were performed on hardened concrete samples, as well as SEM-EDS and XRD experiments to study the microstructural properties of the samples produced in the study.

According to the results of the experiment; as the amount of use of olivine and waste chromium powder in the mixture increases, an increase in the density of fresh concrete, the compressive and flexural strengths of the samples were observed. The best mechanical and physical properties in concrete samples were observed in samples containing olivine mineral and waste chromium powder. In the electromagnetic shielding (EM) experiment conducted on concrete samples, an increase in EM shielding values was observed as a result of an increase in the amount of waste chromium powder and olivine in the concrete. The presence of Fe_2O_3 , Cr_2O_3 and MnO compounds in the internal structures of waste chromium powder and olivine minerals, which were chemically analyzed by XRF analysis, had a positive effect on shielding values.

When a general assessment is made, the use of olivine mineral in concrete between 2.5%-5% by replacing cement, waste chromium powder of 20% and chromium slag of 80% instead of aggregate will positively affect the mechanical, physical properties of concrete and the EM shielding property, which is one of the main objectives of this study. With this study, the consumption of natural resources used both for cement production and as concrete aggregate will be reduced, and the energy consumed for cement production will be saved. By adding olivine and waste chromium powder in different proportions to the concrete, EM shielding feature will be given to the normal concrete and innovation and sustainability will be brought to the construction sector by using it in nuclear power plants, the health sector and places directly exposed to radiation.

Keywords: Chromium slag, waste chromium powder, olivine, electromagnetic shielding, recycling

1. GİRİŞ

Günümüz inşaat sektörü yirmi birinci yüzyıla birlikte hızlı ve gelişen bir endüstriyel oluşum içerisine girmiştir (Tulga, 2017). Bu gelişim medeniyet açısından fayda sağlamakta ama endüstriyel atıkların olumsuz sonuçları esas alındığında ise sorunlar oluşturmaktadır. Atık malzemelerin faydalı geri dönüşüm sistemleri ile değerlendirilmesi maliyet açısından ve çevreye olan zararlı etkilerini minimuma indirdiğinden dolayı değerini arttırmaktadır. Geri dönüşü olmayacak boyutlarda çevresel olarak sorun teşkil eden ve inşaat sektöründe kullanılan atık araç lastiği, uçucu kül, silis dumanı, granüle yüksek fırın cürufu ve mermer tozu atığı gibi endüstriyel atık ürünlerinin tekrar değerlendirilmesi çevre bakımından ve betonun niteliklerini geliştirme yönünden topluma büyük fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Atık malzemelere geri dönüşüm uygulaması yapıldıktan sonra inşaat sektöründe kullanarak herhangi bir sektörden kaynaklı oluşacak atık malzemeleri ve çevresel problemleri engelleyip aynı zamanda ekonomik getiri de sağlanmış olur.

İnşaat sektöründe ve diğer çalışma alanlarında olduğu gibi madenlerin işletilmesi ile açığa çıkan atıklar geri dönüştürülmeden direkt olarak çevreye bırakıldıklarında diğer atıklar gibi insanların ve diğer canlıların hayatını tehlikeye atmaktadır. (Çoban, 2014). Ülkemizde ve Avrupada maden işletilmesinden kaynaklanan fazla miktarda geri dönüştürülmemiş maden atığı mevcuttur. Örneğin, Avrupa Birliğinde madencilik etkinlikleri sonucunda ortaya çıkan atık miktarı, Avrupa’ da yıl içerisinde oluşan toplam atık miktarının %29’ unu meydana getirmektedir ve maden atıkları yılda 400 milyon tonu geçmektedir. Avrupa’ da özellikle 1990-2000 yılları arasında maden atıklarının toplanıp biriktirildiği yerlerde, barajlarda oluşan kazaların ciddi çevresel etki yaratmasıyla bu konu üzerindeki çalışmalar artmıştır.

Günümüzde atık malzemeye ayrılan maddelerin büyük bir bölümü tekrar geri dönüştürülerek kullanılabilen malzemelerden oluşmaktadır (Arguhan, 2017). Dünya nüfusunun artmasıyla atık madde miktarı da artacağından bu durum gelecek yıllar için büyük sorun oluşturacaktır. Bu sorunun en çevreci çözüm yollarından biri bu atık malzemeleri tekrar kullanılabilecek duruma getirip farklı sektörlerde değerlendirmektir.

2. BETONUN TANIMLANMASI VE TARİHSEL GELİŞİMİ

Çimento, su, agrega ve üretilecek betonun özelliğine göre katkı maddelerinin (mineral, kimyasal, fiber vb.) gerekli şartlar ve oranlarda eklenmesiyle oluşan taze haldeyken şekil verilebilen, daha sonra çimento ve su arasındaki hidratasyonun gerçekleşmesiyle sertleşerek dayanım kazanan kompozit yapı malzemesine beton denir.

Betonun üretiminin kolay olması, daha basit teknikle üretilebilmesi, yapı malzemelerinde taşıyıcı olarak kullanılan malzemeler içerisinde maliyetinin diğerlerine göre daha uygun olması, karışım oranına göre farklı dayanım ve dayanıklılık seçeneklerine sahip olması, kullanım özelliğine ve ihtiyaca göre tasarımında değişiklik yapılabilmesi ve bazı atık malzemeler kullanıp üretilerek yapısına çevreci ve yenilikçi özellikler kazandırıldığından dolayı yapı malzemeleri içerisinde en çok tercih edilen malzemedir (Özel ve Kaplan, 2017).

Beton, hayatın ilerlemesinde ve eski uygarlıklar döneminde yapılan eserlerin günümüze kadar gelmesinde önemli bir pay sahibidir (Demiryürek, 2007). Eski çağlarda, insanlar kalsiyum minerali içerikli bağlayıcı malzemeler kullanarak ihtiyaçlarına göre malzemeler yapmışlardır. Tarihteki önemli mühendislik yapılarından olan piramitlerin yapımında kireç minerali esaslı bağlayıcı özelliği olan malzemeler kullanılmıştır. Roma tarihinin önemli tapınaklarından olan Pantheon' un ve yine Roma tarihinde gladyatör oyunları gibi toplu eğlencelere ev sahipliği yapan ve dönemin önemli eserlerinden olan Colosseum' un yapımında doğal hidrolik bağlayıcı özelliği olan puzolanlar kullanılmıştır. Orta Asya' ya gelindiğinde ise Anadolu coğrafyasında Horasan Harcı adı verilen bir bağlayıcı kullanılmıştır. Bu durum günümüzde kullanılan betona benzer özellikteki malzemelerin geçmiş tarihlerde kullanıldığını göstermektedir. İnşaat sektörünün temel malzemesi olan betonun tarihi, 1800' lü yılların başında Louis Vicat tarafından ilk yapay çimentonun bulunması ve ardından Joseph Aspdin' in portland çimentosunun patentini almasıyla başladığı bilinmektedir. Ardından modern betonarme yapı sistemlerinin kullanılması betonun kullanımını artırmış ve uygulama alanını genişletmiştir. 1900' lü yıllara gelindiğinde beton üretiminde yenilik ve insan gücünü azaltma yolunda çalışmalar yapılarak hazır beton patenti alınmıştır. Hazır betonun bulunmasından sonra betonun üretim teknolojisinde yenilikçi çalışmalar artmıştır ve betonu oluşturan malzemelere ek olarak betona yeni özellikler kazandıran kimyasal katkılarda da

olumlu gelişmeler olmuştur. Bundan dolayı beton günümüzde çok geniş kullanım alanına sahip olup inşaat sektörünün en çok kullanılan malzemelerindendir. Hazır beton Dünyada ilk kez 1903 yılında Almanya’ da oluşturularak kullanılmıştır. Daha sonra birkaç yıl içerisinde ABD’ de kullanılmaya başlanılmıştır.

Hazır beton, bilgisayar sisteminde karışım içerisine girecek malzemelerin kullanım oranları belirlendikten sonra beton santralinde karıştırılması ile üretilen yapı malzemesidir (Akakın ve ark., 2020). 1914 yılında Amerika’da Stephanian adında bir Türkiye göçmeni tarafından beton taşıma amaçlı kullanılan transmikser aracının geliştirilmesi ile hazır beton sektörünün yaygınlaşması hızlanmış ve özellikle 1. Dünya Savaşından sonra hazır beton firmalarının sayılarında artış olmuştur.

1927 yılında beton harcını iletme makinesinin patenti alındıktan sonra yeni bir dönem içerisine girilmiştir (Tulga, 2017). Hazır betonun diğer ülkelerde kullanımının yaygınlaşması ile inşaat sektörünün gerekli ihtiyaç malzemesi haline gelmiş ve ülkemizde de beton tüketim miktarlarında artış yaşanmıştır. Günümüzde beton tüketimine bakıldığında her yıl artış yaşanmıştır. Her yıl dünyada yaklaşık 11 milyar ton hazır beton kullanıldığı bilinmektedir. Son 60 yıla bakıldığında dünyada hazır beton kullanımında büyük bir artış gerçekleşmiştir. Amerika’da 10.000 hazır beton tesisini işleten 3700 firma bulunmaktadır. Bu firmalar ülkedeki toplam beton üretiminin üçte ikisini karşılamaktadır. Bu firmaların içerisinde kapasite olarak diğerlerine göre daha büyük olan 600-700 firma ülkede kullanılan betonun %50’sini üretmektedir. Günümüzde inşa edilen yapıların çoğunda beton çeşidi olarak hazır beton kullanılmaktadır ve hazır beton ABD, İngiltere, Avustralya, Güney Afrika gibi ülkelerde hazır-karışmış beton anlamına gelen ready-mixed concrete olarak tanımlanmaktadır. Avrupa ülkelerinde ve hazır beton kullanılan diğer ülkelere üretilen çimentonun %50’ den fazlası beton üretiminde kullanılmaktadır. Avrupa Hazır Beton Birliği’ ne göre 2021 yılında hazır beton sektöründe 12000 hazır beton tesisinde 350 milyon m³ hazır beton üretilmiştir. Bu değerlere göre bir yılda kişi başına düşen hazır beton miktarı 0.3-1.40 m³ olmuştur. (Tulga, 2017).

İnşaat sektörünün temel yapı malzemelerinden olan betonun kullanılması her yıl bir önceki yıla göre artış göstermektedir (URL-1, 2020). Dünya nüfusunun hızla artması ve son zamanlarda yaşanan zorunlu göçlerden dolayı göç alan ülkelere konut ihtiyacının hızla artmasına neden olmuştur. Ayrıca modern toplumlarda estetik yapılara olan talebin artması

gibi durumlar betonun üretim kolaylığı, dayanıklı ve sürdürülebilir olma gibi özellikleri bu ihtiyaçları karşılayarak kullanılma oranının artmasını sağlamıştır.

Beton insan hayatının sürdürülmesinde gerekli olan karayolu, tünel, köprü ve baraj gibi yapılarda kullanım amacına göre betonun içeriğinde yapılan değişiklik ile bu yapılara özgü olarak üretilmiş gibi kullanılarak ihtiyaçları karşılamaktadır.

Tarihte çeşitli yapılarda betonun özelliklerine benzer özellikte Horasan harcı ve Roma betonu gibi yapı malzemeleri kullanılmıştır. Bunların içerisine üretildikleri coğrafyada bulunan doğal malzemeler eklenerek üretimleri yapılmıştır. Günümüzde ise üniversitelerde, laboratuvarlarda, bilimsel kuruluş ve enstitülerde çimento ve betonun özelliklerini geliştirmeye yönelik çalışmalar devam etmektedir. Yapılan çalışmalar ile betonun dayanımı ve dış etkilere karşı dayanıklı olma gibi özellikleri iyileştirilmiştir.

Türkiye’de beton üretimi her yıl artış göstermiştir (Akakın ve ark., 2011). Türkiye’ de 1988 yılında Hazır Beton Birliği kurulduğunda beton üretimi 1.5 milyon m³ iken günümüzde bu rakam 80 milyon m³ değerine ulaşmıştır. Türkiye ekonomisi 1988’ den 2010 yılına kadar yaklaşık 8 kat büyüme göstermiştir. Bu büyüme Hazır Beton sektöründe yaklaşık 60 kat olmuştur. 2000 yılından bu zamana kadar gelen süreçte Türkiye ekonomisi 3 kat büyümüş, beton üretiminde ise yaklaşık olarak 4 kat artış olmuştur. 2000’ li yıllara kadar yaşanan büyümenin başlıca nedeni insan gücüyle dökülen beton miktarının azalmasıdır. 2000 yılından önce yapılan çoğu yapıda hazır beton kullanılmamıştır. 2000’ li yıllardan önce dökme çimentonun iç piyasaya satış oranı %40 iken bugün bu oran %70’ e kadar ulaşmıştır.

Beton üretimi Türkiye’ deki ekonomik gelişmelerle birlikte artış göstermiştir (Akakın ve ark., 2020). Beton santrallerinde otomasyon sistemleri ile üretilen beton, üretilen betonun standartlarına uygun olarak içeriğindeki malzeme miktarları bilgisayar sistemine girilerek hazırlanmaktadır. Hazır betonun Türkiye’ deki inşaat sektöründe kullanımına bakıldığında 2000’ li yıllardan sonra artış göstermiştir. Bundan dolayı 2000 yılından önce yapılan yapıların neredeyse tamamında hazır beton kullanılmamıştır. Türkiye’ de farklı yıllarda üretilen beton üretim miktarlarına bakıldığında bir önceki yıllara göre artış görülmüştür. Avrupa ülkelerine bakıldığında ise beton üretiminde önceki yıllara göre çok fazla değişkenlik görülmemekte olup bazı ülkelerde üretim miktarlarında azalma görülmüştür. 2010 ve 2011 yıllarında Avrupa’ da inşaat sektöründe %7 ve %0,3 oranında küçülme olmuştur. Bu durum Avrupa ülkelerinde beton üretim miktarlarında değişkenliğe neden olmuştur. İspanya’da 2009 yılında 49 milyon m³ olurken 2011 yılında 31 milyon m³ ten daha

düşük bir miktarda üretim olmuştur. İtalya’da ise 2009 yılında 59 milyon m³ beton üretimi yapılmış, 2011 yılında bu üretim 52 milyon m³, ün altına inmiştir. Fransa’ ya bakıldığında ise 2009 yılında 37 milyon m³ beton üretimi yapılmış 2011 yılında yapılan üretim miktarı ise 41 milyon m³ olmuştur. Almanya’ da 2009 yılında 38 milyon m³ beton üretimi yapılırken bu rakam 2011 yılında 48 milyon m³ olmuştur. Ülkelerde kişi başı beton tüketimlerine bakıldığında Türkiye birçok Avrupa ülkesini geride bırakarak kişi başı beton tüketimi 1 m³, ü geçmiştir.

Tablo 2.1. Türkiye’ de hazır beton üretimi (URL-7, 2017)

Yıllar	Şirket Sayısı	Tesis Sayısı	Üretim (Milyon m ³)
2003	238	439	25,8
2004	247	482	31,6
2005	277	568	46,3
2006	409	718	70,73
2007	477	845	74,3
2008	462	825	69,6
2009	467	845	66,4
2010	500	900	79,7
2011	520	945	90,5
2012	540	980	93,05
2013	580	1040	102,0
2014	580	1040	107,0
2015	621	1098	107,0
2016	570	1120	109,0
2017	540	1184	115,0
2018	495	1100	100,0
2019	450	900	77,0
2020	542	1032	95,0

3. KROM CÜRUFU

Ferrokrom, genel olarak paslanmaz ve ısıya karşı dayanıklı çelik üretimi aşamasında kullanılan bir metal alaşımıdır. Ferrokrom tesislerinde üretim süreçleri sonucunda elektrik-ark fırınlarında ferrokrom ve silikoferrokrom cürufları gibi atık malzemeler oluşur (Yılmaz ve Süttaş, 2008).

Dünyada son 20-25 yıl içerisinde, endüstriyel atıkların zamanla miktarlarının artması ve bu atıkları zararsız hale getirme çalışmaları işletmelere fazla maliyet oluşturması sebebiyle bu atıkların değişik sektörlerde değerlendirilmesini yaygınlaştırmıştır. Günümüzde özellikle yüksek fırın cüruflarını atık ürün kategorisinden çıkarıp piyasada bir değeri olan ürün haline getirmek için çalışmalar yapılmaktadır. Yurtdışında metalurji sektöründe atık olarak oluşan cürufun tekrar kullanımında özellikle Avrupa ilk sırada olmak üzere diğer ülkelerde cürufun neredeyse tamamını yan ürün olarak değerlendirip kullanmaktadır.



Resim 3.1. Krom cürufu (Yılmaz, 2017)

Cüruf, yüksek fırından çıktığı zaman katı eriyik halindedir. Bu halde hızlı bir şekilde soğutulduğu zaman akışkanlığındaki ani azalma cürufun kristalleşmesini engeller ve bundan dolayı camsı bir malzeme görünümünde madde elde edilir. Zayıf hidrolik özelliğe sahip olan bu camsı malzeme çimento ve beton üretiminde kullanılır.

Ülkemizde Antalya Ferrookrom işletmesi ve Elazığ Ferrookrom işletmesinde endüstriyel boyutlarda cüruf çıkarılmaktadır. Çıkarılan cürufların neredeyse tamamı depo alanlarında biriktirilmektedir ve bu zamana kadar olan süreçte bu cürufların planlı bir değerlendirilmesi yapılmamıştır. Antalya'daki tesisten yılda yaklaşık 35.000 bin ton Ferrookrom (FeCr) cürufu, 10.000 ton Silikoferrookrom (SiFeCr) cürufu çıkarılmaktadır (Yılmaz ve Süttaş, 2008). Açık sahada stoklanan cüruflar çevresel kirliliğe ve görüntü kirliliğine neden olmaktadır.

Pirometalürjik üretimde fazla miktarda cüruf açığa çıkar ve oluşan bu cüruflar çevreye duyarlı bir şekilde geri dönüştürülmediği ve kullanılmadığı zaman atık miktarını arttırmış olurlar. Sanayileşmenin gelişmesine bağlı olarak metalürjik cüruflar için düzenli stok alanları gerekmektedir. Depolanan cürufun miktarı arttıkça stoktan kaldırma maliyetleri de artmaktadır. Ayrıca bu cüruf depo alanları hava, toprak ve su kirliliğine neden olmaktadır. Bu durum da dolaylı olarak insan sağlığını ve canlıların doğal hayatını etkilemektedir (Uysal ve Bahar, 2018). Türkiye'de sayıları binden fazla olan taş ocağı tesisleri inşaat sektörüne agrega temin etmek için işletilmektedir. Cüruf ve cüruf yan ürünlerini inşaat sektöründe doğal agrega yerine kullanılması ile doğal kaynakların korunmasını ve atık malzemelerin değerlendirilmesi ile çevresel ve ekonomik kazançlar sağlanacaktır.

Ferrookrom tesislerinde üretim miktarının artması sebebiyle fazla miktarda ferrookrom cürufu oluşmaktadır. Dünyada ferrookrom cüruf üretiminin yaklaşık 12-16 milyon ton/yıl olduğu bilinmektedir (Uysal ve Bahar, 2018). Ferrookrom üretim aşamasında açığa çıkan fazla miktardaki cürufun geri dönüştürülüp değerlendirilmesi ferrookrom üreticileri için büyük bir sorun olduğu bilinmektedir. Elazığ ferrookrom cürufunun yıllık üretiminin yaklaşık 50.000 ton olduğu bilinmektedir. Bu nedenden dolayı cürufun inşaat ve diğer sektörlerde kullanımı önemli hale gelmiştir.

Xu ve ark., (2022) tarafından yapılan çalışmada, nano-silika kullanımı, yüksek hacimli cüruf içeren harmanlanmış çimentonun erken özelliklerini iyileştirmek için etkili bir yöntem olduğunu ve yapılan çalışma ile yüksek hacimli cüruf (ağırlıkça %40, %60 ve %80) ve nano-silika ile harmanlanmış çimentonun hidratasyonu, priz süresi, hidratasyon ısısı, basınç dayanımı, hidratasyon ürünleri ve gözenek boyutları test edilerek incelenmiştir. Sonuçlara göre; nano-silikanın cüruf ve çimentonun hidrasyonunu (trikalsiyum silikat (C_3S) hidrasyonu ve etrenjitten monosülfata geçiş dahil) 3 günden önce iyileştirebileceğini göstermiştir.

Santillan ve ark., (2022) tarafından yapılan çalışmada daha yüksek mekanik performansa sahip ve elektriksel özellikleri değiştirilip çok işlevli betonlar elde etmek için;

doğal agregalar, İspanyol endüstrilerinden farklı çelik cüruf agregaları ile yer değiştirilmiştir. Üretilen cüruf ve metalik lifli beton için istenen sonuçlar elde edilmiş, elektrik iletkenliği kapasitesi neredeyse %70 oranında ve mekanik performans %14 oranında iyileştirilmiştir.

Jiang ve ark., (2018) tarafından yapılan çalışmada, çelik cüruflarının çimento ve beton ürünlerinde katma değerli amaçlarla daha iyi kullanılabilirliğini araştırmak için; 400-500 kg/m³ boyutunda toz haline getirilip çimento ikamesi olarak ve agregası olarak karışıma katılmıştır. Sonuç olarak; temel oksijen fırın cürufu karışımında yeteri kadar performans göstererek ağırlıkça %10-20 ikame oranında ek çimentolu malzemeler olarak kullanılabilen, elektrik ark ocağı fırın cürufu ve pota fırın cürufundan daha alkali ve reaktiftir. Bazik oksijen fırın cürufunun kaya benzeri görünümü, betonda agregası olarak kullanılmasına da izin verir.

Zhu ve ark., (2022) tarafından yapılan çalışmada, karışım içerisinde katı atık bazlı çimento boyutundaki malzemeleri hazırlamak için çelik cürufu, fosfojips ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Çelik cürufu, fosfojips ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun bağlayıcı olarak kullanıldığı numunelerde basınç dayanımını artırmak amacıyla, karışımın içerisindeki ham yüksek fırın cürufunu ultra ince cüruf yerine ikame ederek kullanmıştır. Sonuçlara bakıldığında, çelik cürufu, fosfojips ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile hazırlanan harçların 7 ve 28 gün dayanımlarının 17,0 MPa ve 24,0 MPa olduğunu, %20 oranında ultra ince cüruf kullanılarak hazırlanan harçların dayanımının ise 33,2 MPa ve 44,9 MPa olduğu görülmüştür.

Palankar ve ark., (2016) tarafından yapılan çalışmada çelik cürufu ve normal agregası kullanıp cürufun farklı oranlarda olduğu beton karışımları üretilmiştir. Kullanılacak agreganın %50' si oranında çelik cürufu kullanarak hazırlanan karışımın 28 günlük numunelerinde 51,9-56,3 MPa, 90 günlük numunelerinde 58,7-61,1 MPa, 180 günlük numunelerinde 58,1-62,3 MPa ve 360 günlük beton numunelerinde ise 58,5-62,9 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Agregası olarak %100 oranında çelik cürufu kullanılarak üretilen numunelerin 28 günlük numunelerinde 48,5-51,2 MPa, 90 günlük numunelerinde 53,7-54,5 MPa, 180 günlük numunelerinde 53-55,6 MPa ve 360 günlük numunelerinde ise 55,3-56,2 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir

Panda ve ark., (2013) yaptıkları çalışmada beton içerisinde agregası yerine ferrokrom cürufu kullanarak ürettikleri beton numunelerinde 7 günlük basınç dayanımını 29 MPa, 28 günlük basınç dayanımını ise 37 MPa olarak bulmuşlardır.

4. KROM TOZU

Krom, atom numarası 24, atom ağırlığı 51.9961 g/mol olan oda sıcaklığında gümüş rengine yakın renkte olup metalik katı halde bulunan bir metaldir (Çoban, 2014).

Doğada bulunan minerallerden içerisinde krom minerali bulunan yaklaşık 25 kadar mineral vardır (Çoban, 2014). Bunların içerisinde en önemli olanları kromit, uvarovit ve kemererittir. Kromit doğada daha fazla oranda bulunan krom mineralidir (Parlayan, 2019). Kromit, siyah koyu kahve renkli, kübik kristal sistemine sahip, yoğunluğu 4,5-5,09 kg/m³ olan, zayıf magnetik özellikli, radyoaktif özellik göstermeyen, ergime ısısı 1850-2200°C olan ve orta derecede ısıl genişlemesine sahip bir endüstriyel mineraldir. Benzer minerallerin çizgisinin 21 olması, tozlarının kahverengi oluşu ve tabiattaki mevcut bulunma şekliyle diğer minerallerden farklıdır. Kimyasal yapısı %68 Cr₂O₃ ve %32 FeO içermektedir ancak doğal durumda kromitin kimyasal yapısında Cr ve Fe yanında Mg, Al, Ni, Co da bulunmaktadır. Bu nedenle kromitin kimyasal formülü (Fe,Mg)(Cr,Al,Fe)₂O₄ olarak ifade edilmektedir.

Krom alaşımlı yapılara ısı direnci, korozyon direnci, aşınma direnci, mukavemet, sertlik, hijyen ve renk gibi özellikler kazandırdığından dolayı çeşitli sektörlerde kullanılıp vazgeçilmez malzemelerden olmuştur (Tahtakıran, 2007). Türkiye sınırları içerisinde bulunan kromit maden yatakları genelde Alpin tipinde, küçük boyutlarda, düzensiz şekilli (merceksi), Cr/Fe oranı 3/1-2/1 arasında ve yüksek metalurjik kalitede cevher bulundurlar. Dünyada bulunan kromit madeninin yaklaşık %0,2'si ülkemiz sınırları içerisinde bulunmaktadır. Kromit cevheri, alaşımlı yapılar oluşturup bu yapılara çeşitli özellikler kazandırdığından dolayı; metalürji, kimya, refrakter ve döküm sanayii gibi farklı sektörlerde kullanılmaktadır.

Krom cevherinin en çok tercih edildiği alanların başında metalurji sektörü gelmektedir. Bu sektörde kullanılan krom cevherinin fiziksel olarak sert, parça cevher olması istenirse de konsantre krom tozları da kullanılmaktadır (Çoban, 2014).

1797 yılında Fransız kimyacı Nicolas-Louis Vauquelin tarafından krom minerali keşfedilmiştir. Krom mineralinin keşfedilmesiyle krom madenciliği ilk olarak Ural Dağları (Rusya) ve Maryland (ABD)'de başlamıştır (Parlayan, 2019). Krom madenciliği ile ilgili

Ülkemizdeki ilk çalışma ise Amerikalı jeolog Laurance Smith tarafından 1848 yılında Bursa Harmancık yöresinde yapılmıştır. Bu bölgede bulunan krom yataklarının yüksek tenörlü olduğu tespit edilmiştir.

1860'lı yıllarda ABD' de bulunan Maryland yataklarındaki krom rezervinin bitmesinden sonra 1868 yılında Türkiye' de krom madenciliği çalışmaları başlamıştır. Türkiye' de 19.yy' da krom minerali temel olarak kimya sanayisinde boya pigmentinde ve deri sanayisinde kullanılmıştır. 20.yy'ın başlarına gelindiğinde ise paslanmaz elik üretiminde, ferrokromun kullanılmasının yaygınlaşması ile krom cevheri zamanla daha çok metalurji sanayisinde kullanılmıştır.

Dünyada krom cevheri üreten ülkelere bakıldığında Türkiye ilk sıralarda yer almaktadır (Parlayan, 2019). Dünyada yıllık krom üretimi 22 milyon ton civarındadır. Türkiye' nin bu üretimdeki payı ise yaklaşık %10'dur. Ülkemizdeki işlenmemiş kromit cevheri üretiminde yıllar arasında dalgalanmalar yaşanmış olmasına rağmen yılda en az 1 ile 2,5 milyon ton arasında üretim yapılmaktadır. Çıkarılan ham cevherin %80'i ihraç edilmektedir. Geri kalan cevherler ise ferrokrom tesislerinde işlenerek yarı mamül haline getirilip satışa sunulmaktadır. Türkiye'de Elazığ ve Antalya'da olmak üzere iki ferrokrom tesisi bulunmaktadır.

Dubrovskii ve ark., (1965) yaptıkları çalışmada içerisinde kromit ve ateş tuğlası kili bulunan ısınmaya karşı dayanıklı beton üreterek bu betonun nükleer reaktörlerde ısıl kalkan olarak kullanılmasını araştırmışlardır. Radyoaktif dalgaların nötron değerlerini, gama akışını ve kalkan betonun ısı emisyonu değerlerini belirlemişlerdir. Farklı nötron akışları, kalkan betonu kalınlığı ve soğutma koşulları gibi değişkenler için sıcaklık hesapları yaparak ısıya dayanımlı radyasyon kalkanı özelliği gösteren betonarme yapıların ısıl gerilmelerini hesaplamışlardır. Yapılan alışmalar sonucunda kromit katkılı Portland çimentosundan yapılan betonun çok iyi seviyede kalkan olabilme özelliği sağladığı tespit edilmiştir.

Mesci ve Elevli (2011) tarafından yapılan çalışmada geri dönüştürülmüş krom atığının betonda kullanımının etkilerini araştırmak için kromit ve süper akışkanlaştırıcıyı hacimce %5 ve %15 oranları arasında kullanarak betonun basınç dayanımı üzerinde oluşturduğu etkiyi incelemişlerdir. Yapılan alışmalar sonucunda naftalin slfanatın %5 oranında kromit atığı ile birlikte beton içerisine eklendiğinde 28 kr gününün sonunda basınç dayanımında çok fazla negatif bir etki yapmadığı tespit edilmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında kromit atığının nötralizasyon işlemi sonrasında inşaat sektöründe kullanılabileceği belirlenmiştir.

Demirci (2018) yaptığı çalışmada pirit, krom ve magnetit minerallerini doğal agregaya yerine belli oranlarda kullanarak 0,40-0,50-0,60 su/çimento oranında ağır betonlar üretmiştir. Üretilen bütün numunelerin basınç dayanımları, elastisite modülleri, ultrases hızları ve farklı frekans aralıklarında radyasyon soğurma değerleri tespit edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda; su/çimento oranının artması numunelerin basınç dayanımlarının ve elastisite modüllerinin azalmasına neden olmuştur. Üretilen tüm numuneler içerisinde krom agregası kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımları diğer numunelere göre daha düşük çıkmıştır. Radyasyon soğurma deneyi 59,5 keV ve 661 keV enerji seviyelerinde yapılmış olup deneydeki soğurma katsayıları HPGe (High Purity Germanium Detectors) gama dedektörü kullanılarak tespit edilmiştir. Radyasyon soğurma deneyi sonuçlarına bakıldığında, enerji arttıkça soğurmanın azaldığı görülmüştür. Üretilen beton numuneleri içerisinde magnetit agregası kullanılarak üretilen numunelerin radyasyonu en iyi soğuran beton olduğu belirlenmiştir.

5. OLİVİN

Olivin, yüksek sıcaklık silikat mineral grubu içerisinde olan magnezyum ve demir içeren bir mineraldir (Altuğ, 2019). Bu mineral grubu içerisinde ekonomik değeri yüksek olan mineral forsterit' tir. Forsterit minerali adını, bir İngiliz mineral koleksiyoncusu olan A. Jacob Forster'dan alır. Olivin doğada serbest halde olduğu gibi çeşitli kayaların yapısında da bulunur. Dünit kayaları yüksek oranda olivin minerali içeren magmatik kökenli bir kayadır ve bu kayaca ait bir görüntü Resim 5.1'de verilmiştir. Doğada serbest halde kristal olarak da bulunabilen olivine ait görüntü Resim 5.2'de verilmiştir.



Resim 5.1. Dünit minerali (URL-8, 2015)



Resim 5.2. Olivin minerali (Çoban, 2014)

Orthorhombik sisteminde kristal yapıdaki olivin içerikli mineraller temel olarak Mg^{+2} ve Fe^{+2} silikatlardan oluşmaktadır ve orto-silikat sınıfında bulunurlar. Mg^{+2} ve Fe^{+2} elementlerinin diğer minerallere göre daha yoğun olduğu uç mineraller Mg_2SiO_4 (forsterit) ve $FeSiO_4$ (fayalit) olarak adlandırılmıştır (URL-1, 2019). Genelde olivin mineralinin olduğu yerde forsterit ve fayalit düşünülmektedir. Mg^{+2} ve Fe^{+2} 'nin diğer minerallere göre daha yoğun olduğu uç mineraller içerisinde teforit (tephorite, Mn_2SiO_4), fayalit-knebelit (fayalite-knebelite, $FeMnSiO_4$), pikroteforit (picrotephorite), montisellit (monticellite, $CaMgSiO_4$), kirstenit (kirchsteinite, $CaFeSiO_4$), glokokroit (glauochroite, $CaMnSiO_4$) gibi mineraller de bulunmaktadır. Bu mineraller forsterit ve fayalit gibi doğada çok fazla görülmezler.

Olivin büyük oranda zeytin yeşili renklerde bulunmaktadır (Sivri, 2021). Bunun yanında renksiz, beyaz (forsterit), renksiz-gri (montisellit), mavimsi gri (glokokroit), açık yeşilimsi sarı ve kahvemsı-siyah (fayalit), açık kırmızımsı-kül grisi (tefroit), ayrıca içeriklerindeki minerallere bağlı olarak koyu yeşil, grimsi yeşil, sarımsı kahverengi olan türleri de bulunmaktadır. Olivin mineralleri alterasyon sonucu kırmızımsı ve siyahımsı renklere dönüşebilir.

Mohs sertlik skalasına göre sertlik derecesi 6,5-7 arasında olan olivin, içerisindeki demir mineralinin yoğunluğuna göre yoğunluğu $3,22 \text{ g/cm}^3$ - $4,40 \text{ g/cm}^3$ arasındadır (URL-2, 2019). Olivinler magmada ultra bazik kayalar içerisinde ilk kristal yapıya dönüşen minerallerdir. Magnezyum oranı yüksek olan olivinler genellikle ultrabazik kayalar içerisinde bulunurlar. Ultrabazik kayalar içerisinde en fazla olivin bulunan kayalar dünitlerdir. Dünit kayaları içerisindeki olivin miktarı %95-99 oranında değişmektedir. Dünitler çoğunlukla doğada kütleler halinde bulunurlar (URL-2, 2019).

Dünitler ismini Yeni Zelanda'da bulunan Dun Dağları'ndan alırlar. Dünit kayaçları kimyasal olarak yapılarında %90' dan fazla olivin içermektedirler (Çoban, 2014). Dünyada ülkelerin sınırları içerisinde bulunan dünit rezervlerine bakıldığında; İtalya' da Torino şehrinin Vidrocco ve Castellamonte kasabaları yakınlarında bulunan dünit rezervleri yaklaşık 100 milyon tondur. İspanya' da bulunan Galicia bölgesindeki dünit rezervinin de 100 milyon tondan fazla olduğu tespit edilmiştir. İsveç' te ise 1980 yılına kadar refrakter endüstrisinde ve ısıtıcılarda (radyatör şeklinde) kullanılmak üzere yılda 50.000 tondan fazla dünit üretilmiştir ancak İngiltere' ye yapılan satışların durmasından sonra olivin üretimine son verilmiştir. ABD' de Washington ve North Carolina bölgelerinde önemli taze olivin içeren dünit kayaçları bulunmaktadır ve Washington civarında 200 milyon tondan fazla rezerv bulunmuştur.

Türkiye'nin en büyük olivin yatağı Kızıldağ ultramafikleri içinde yer alır (Sivri, 2021). Dünitlerin en önemli bileşeni forsteritik olivin (Mg_2SiO_4) olup ortalama %50,25 MgO, %37,5 SiO_2 ve Fe_2O_3 'tür. Demir-çelik ve refrakter sanayisinde kullanılabilecek olivinin içeriği de bu oranlarda olmalıdır. Dünya' da bilinen en büyük olivin yatağı Norveç' te bulunan Aheim rezerv bölgesidir. Ayrıca Türkiye'de bulunan Kızıldağ bölgesinin olivin rezervi ise yaklaşık 9 milyar ton' dur ve bu bölge Dünya' da bulunan önemli olivin yataklarından birine sahiptir. Olivin mineralinin yurtiçindeki en büyük dezavantajı endüstriyel alanlarda iyi seviyede tanınmamış olmasıdır.

Olivin, serbest kristal silikaya sahip olmaması nedeniyle sağlıklı ve çevreci olması, polimorfik dönüşümünün olmaması, hidrasyon eğiliminin olmaması ve bu nedenle depolama için özel bir dikkat gerektirmemesi, düşük ısı iletkenliğine (0.031 W/mK) ve iyi yalıtım özelliklerine sahip olması, stabilizeye sahip, yüksek sıcaklık prosesleri için kolayca uygulanabilir olması, refrakter malzemelerle iyi uyumlu ve fiyatının uygun olması nedeniyle refrakter, demir-çelik ve döküm sanayilerinde, aşındırıcı, elektrikli ısıtıcı, denge malzemesi olarak, çevre teknolojilerinde ve tarımda, kuyumculuk sektöründe ve daha birçok alanda kullanılmaktadır (Turan, 2022).

Yapılan bir çalışmada, yüksek demir oksit içeriğine sahip olivin kayacının (fayalit) nükleer atık havuzlarında redoks tamponu olarak kullanılabileceğini göstermiştir (Turan, 2022). Araştırmacılar bu çalışmada, Olivinin nükleer atıklardan çözünmüş radyonüklitleri tutma kabiliyeti sebebiyle yakındaki nükleer atıklardan radyonüklitlerin göçünü kontrol

etmede çok önemli olduğunu, içerdiği demir ve az miktarda manyetit sebebiyle redoks potansiyelini kontrol edebildiği görülmüştür (Turan, 2022).

Endüstriyel atıkların arıtılmasında kireçtaşının kullanılması, yüksek miktarda ağır metal içeren alçıtaşı açığa çıkarır. Benzer problemlerin çözüm yöntemlerinden biri de nötralizasyonda olivin kullanılmasıdır (Altuğ, 2019). Böylece hem atık sular temizlenir hem de endüstriyel değeri yüksek yan ürünler elde edilir. Olivin çözündüğünde ortamın pH' ı 9-9,3 civarına ulaşır. Başlangıçta 70-100°C sıcaklık gerekir. Ekzotermik reaksiyonlar meydana geldiğinden daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaz ve sistem ısı vermeye başlar. Dört aşamada gerçekleşen ilk reaksiyon adımıyla çöken silis süzülür. Elde edilen mikronize silika; seramik, cam, kauçuk, kâğıt, temizlik ve deterjan endüstrilerinde dolgu maddesi olarak kullanılır. İkinci aşamada filtrelenmiş mikronize manyetit; fotokopi makinelerinde toner olarak ve elektronik endüstrisinde kullanılır. Üçüncü aşamada elde edilen magnezyum sülfat; kâğıt sektöründe ve gübre sanayinde kullanılır. Nötralize su bu aşamada atılır. Atık içeriğine bağlı olarak daha ileri ara aşamalarda krom, nikel, titanyum ve vanadyum gibi ürünler elde edilebilir.

Demir-çelik endüstrisinde cüruf düzenleyici olarak yüksek fırınların içerisinde olivin minerali kullanılmaktadır (Acar, 2021). Olivin refrakter malzemenin ham maddesi olarak ve döküm kumu gibi farklı kullanım alanları da bulunmaktadır. Olivin; aşındırıcı ve denge malzemesi olarak, asitli toprakların ıslahında, endüstriyel, tıbbi ve nükleer atıkların uzaklaştırılmasında, CO₂ salınımının kontrolünde, maden bölgesindeki asit suyunun uzaklaştırılması gibi pek çok farklı uygulama alanları bulunmaktadır.

Westgate ve ark., (2019) tarafından, olivin kumunun yapı malzemesi katkısı olarak normal agregaların veya puzolanik malzemelerin yerine kullanılabilirliğini incelemek amacıyla yapılan bir çalışmada, olivin birlikte kullanılabileceği kireç harcının içinde ayrılarak magnezyum karbonatların oluşumunu kolaylaştırır ve CO₂ emilimini artırır. Ticari kuvars kumunun kullanıldığı harçlarla kıyaslandığında olivin içerikli harcın yapısında daha fazla karbonat bulunmuştur. Olivinin agrega olarak kullanılması sebebiyle artan karbonat formasyonları, saf silis kumu agregası kullanılarak oluşturulan harcın verdiği 0,5 MPa basınç dayanımı 2,5 MPa değerine kadar çıkarmıştır.

Furlani ve Maschio (2013) yaptıkları bir çalışmada olivinin doğrudan işlem görmeden kullanıldığı bir refrakter malzeme üretme amacı ile hem şekilli hem de şekilsiz refrakterlere uygun olarak farklı malzemelerle reçeteler geliştirilmiştir. Kiremit üretimi için

olivin kumu denemişlerdir. Olivin kumu ve kaolin kili belirli oranlarda kullanılarak 1250 °C gibi sıcaklıklarda sinterlenip sertlik, tokluk, eğilme mukavemeti, su emme, şekil bozukluğu gibi birçok özelliği incelenmiştir. Hacimce %60 olivin kumu ve %40 kaolin kullanılarak optimum özellikler sağlanmıştır.

Sancak ve Çoban (2015) tarafından hedef dayanımı C30 olarak seçilen betona gömülü donatının korozyon direnci üzerine olivin atıklarının etkisi araştırılmıştır. Çimento inceliğine kadar öğütülen olivin atıkları hacimsel olarak %5, %10, %20 ve %40 oranlarında çimentoya ikame edilmiştir. 150x150x150 mm boyutlarındaki küp numuneler 7 ve 28 gün boyunca su içerisinde $21\pm1^{\circ}\text{C}$ ’ de kürleme sıcaklığına maruz bırakılmıştır. Deney sonuçlarına bakıldığında; olivin atıklarının betonun yoğunluğu ve basınç dayanımı değerleri üzerinde negatif etkisi olduğu belirlenmiştir ancak %5, %10 ve %20 oranlarında olivin ikamesi ile hedef basınç dayanımının üzerine çıkılabildiği de gözlenmiştir.

Canpolat ve ark., (2021) tarafından yapılan deneysel çalışmada ferrokrom tesislerinden elde edilen olivin atıklarının üstyapılarda filler olarak kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla doğal kalker agregası tozuna hacimsel olarak %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında olivin ikame edilmiştir. Kalker agregası kullanılarak yapılan deneysel çalışmada filler oranı %4,7 oranında, bitüm oranı ise %3,5, %4,0, %4,5, %5,0, %5,5 oranlarında kullanılıp optimum bitüm oranı belirlenmiştir. Belirlenen bu oranlara göre olivin katkılı ve kalker agregalı numuneler üzerinde stabilite, akma, özgül ağırlık, boşluk yüzdesi, asfalt dolu boşluk yüzdesi ve agregalar arasındaki boşluk miktarını belirlemek için deney yapılmıştır. Deney sonuçlarına bakıldığında olivinin sıcak karışım asfalt betonlarda filler malzeme olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

Şah ve Scott (2022) yaptıkları çalışmada, olivinden asitle parçalama işlemi ile geri kazanılmış silis karışıma %5, %10, %15 ve 30’luk oranlarda çimentoya ikame edilmiştir. Hidrasyon özelliklerini analiz etmek için izotermal titrasyon kalorimetri (ITC), XRD (X-ray diffraction) ve TGA (Termogravimetrik analiz) deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş harç bağlayıcı özellikleri basınç dayanımı, gözeneklilik ve elektriksel özdirenç kullanılarak değerlendirilmiştir. Geri kazanılmış silis kullanılan karışımların performansı, eşdeğer silis dumanı ve uçucu kül karışımlarıyla karşılaştırılmıştır. Geri kazanılan silis, 7 günden itibaren hem dolgu maddesi hem de puzolanik etki sağlamıştır. Portland çimentosuna kıyasla daha iyi veya aynı basınç dayanımı tüm karışım oranlarında ve 7-28 günde elde edilmiştir. Olivin

mineralinden geri kazanılan silis, potansiyel olarak önemli çevresel faydalar sağlamanın yanı sıra bağlayıcı özelliklerinin iyileştirilmesine yardımcı olmaktadır.

6. ÇİMENTO

Çimento üretiminde kullanılan klinkerin bileşenleri kalker, kil, demir cevheri ve boksittir (Ateş, 2022). Farklı bölgelerden alınan kalker ve kil örneklerinden içeriği yoğun olanlar daha çok tercih edilmektedir. Daha sonra bunlar % bakiye olarak bilinen ince boyutlara kadar öğütülerek farin malzemesi elde edilir. % bakiye olarak adlandırılan bu incelik, üretilcek klinkerin çeşidine göre kimyasal analizler ve klinkere özgü testler yapılarak tespit edilir. Çimento üretim aşamasındaki en önemli bölüm klinkerin oluşturulduğu aşamadır. Farin malzemesi döner fırın ünitesi içerisinde 1350-1400°C'ye kadar ısıtılarak pişirilir. Pişirildikten sonra oluşan malzemeye klinker denir. Pişirme işlemi için gereken ısı enerjisi çoğunlukla taş kömüründen karşılanmaktadır.

Fırından çıkarıldığında 1200°C sıcaklığında olan klinkerin sıcaklığı 100°C'nin altına düşecek şekilde ani soğutma işlemi yapılır (Ateş, 2022). Yapılan bu işlem, klinkerin pişirilmesi sırasında oluşacak kristal yapısını korumak için gereklidir. Soğutma işlemi tamamlandıktan sonra klinker uygun depolama bölümlerine yerleştirilir. Klinkerin saflık

yüzdesi, fiziksel ve kimyasal özellikleri çimentonun aktivite indeksinin belirlenmesinde önemlidir.

İnşaat sektöründe yapı malzemesi olarak en çok tercih edilen betonun içeriğinin önemli bir kısmını çimento oluşturmaktadır. Gelişen dünyada modern yaşam standartlarına ayak uydurup güvenli ve toplumun ihtiyacını karşılayacak düzeyde şehirler inşa etmek ve toplumlar arası etkileşimi sağlamak için çimentoyu kullanacağız (Kızıltan ve Doğan, 2021).

Çimento sözcüğü, Latince yontulmuş taş kırıntısı anlamına gelen caementum sözcükten türetilmiştir. Daha sonra ise bağlayıcı anlamında kullanılarak günümüzdeki yerini almıştır. Eski tarihlerde insanlar yapı inşaatlarında bağlayıcı olarak kireç gibi çeşitli malzemeler kullanmışlardır (URL-3, 2022).

Dünya’ da çimentonun ilk üretimine bakıldığında 1824 yılında İngiltere’nin Leeds kentinde yaşayan Joseph Aspdin adlı bilim insanı tarafından ince taneli kalker ve kil karışımının pişirilip öğütülmesiyle ilk çimento üretimi gerçekleştirilmiştir (Kapkaç, 2022). Üretilen bu çimento İngiltere’nin Leeds kentine yakın olan Portland isimli bir adadan getirilen kayacın özelliklerini taşıdığından Portland çimentosu adı verilmiştir. Çimento, üretimi sırasında uygun sıcaklıkta pişirilmediği zamanlarda bazı olumsuz durumlar ortaya çıkmıştır. Daha sonra 1845 yılında Isaac Johnson adlı İngiliz bilim adamı, Portland çimentosunu uygun sıcaklıkta pişirerek bu olumsuz durumları ortadan kaldırarak kullanılabilir hale getirmiştir. 1845 yılından itibaren üretilen çimento, günümüzde önemli bir yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. 1845 yılından günümüze kadar olan bu süre içerisinde çimento üretim tekniklerinde büyük bir ilerleme kaydedilerek üretilen çimentonun özellikleri geliştirilmiştir. İlk üretildiği yıllarda çeşit olarak sadece Portland çimentosu olarak piyasada yer bulan çimento günümüzde çimento klinkerine tras, yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi puzolanik özellik gösteren maddelerin eklenmesiyle farklı özelliklerde ve farklı ihtiyaçlara yönelik çimento çeşitleri üretilmiştir.

Ülkemizde çimentonun kullanılmadığı dönemlere bakıldığında; eski Hitit kentleri içerisinde yer alan Çorum, Tokat ve Malatya illerindeki antik kentlerde manyezitli kireç esaslı ve puzolanik özellik gösteren doğal malzemelerin katılmasıyla oluşturulan malzeme bağlayıcı olarak harç yapımında kullanılmıştır (URL-3, 2022). Ülkemizin doğu bölümlerinde ise geçmişte Asurlulardan kalma tarihi eserlerde normal kireç ile bazaltik puzolanik maddenin kullanılması Anadolu’da Romalılar ve Yunanlılar’dan önce çimento özelliği gösteren bağlayıcıların kullanıldığı söylenebilir. Batı Anadolu tarafına bakıldığında ise Efes-İzmir,

Teos-İzmir, Kinidas-Muğla Afrodissias-Aydın antik kentlerinde çimento ve harcın kullanıldığı görülmüştür. Türkiye’ de inşaat sektöründe çimentonun kullanılması 1912 yılında olmuştur. 1900’ lü yıllarda yaşanan siyasi sorunlar ülkemizin çimentoyla geç tanışmasının başlıca nedeni olmuştur.

Günümüzde en çok kullanılan çimento çeşiti olan Portland çimentosu kalker ve kilin yüksek sıcaklıklarda pişirildikten sonra elde edilen klinkerin öğütülerek ince toz haline getirilmesiyle elde edilir (Temizel, 1998). Çimento üretiminde; kil, kalker taşı, az miktarda demir oksit ve alçı taşı kullanılır. Kilin bileşiminde silis (SiO_2), alümin (Al_2O_3) ve demir oksit, kalkerde ise kireç (CaO) ve magnezyum oksit (MgO) bulunur.

Günümüz dünyasında ülkelerin kalkınmasında önemli rolü olan inşaat sektörünün temel yapı malzemesi betondur (Özcan, 2018). Çimento, betonu oluşturan bileşenlerden ekonomik olarak en maliyetlisidir. En çok kullanılan çimento sınıflarından olan portland çimentosunun (PÇ) üretim aşamasında doğal kaynaklar kullanıldığından ve ekonomik olarak da maliyetli olduğundan yerine alternatif olarak kullanılacak bir yapı malzemesi arayışı devam etmektedir. Bu nedenden dolayı sürdürülebilir ve yeşil beton için çalışmalar yapılmaktadır.

ASTM standartlarında Portland çimentosu çeşitleri 5 farklı şekilde belirtilmiştir (Tulga, 2017). Çimentoyu oluşturan ana bileşenlere göre çimentolar farklı sınıflara ayrılmışlardır. Tip I çimentosu geleneksel yapılarda kullanılan bir çimento çeşitidir. Hava sıcaklığının düşük olduğu ve betonun dayanım kazanma hızı arttırılmak hedeflenmişse Tip III çimentosu kullanılmalıdır. Çimentonun içerisindeki temel bileşenlerden olan C_3S ’in miktarı arttırılırsa istenilen bu özellikler betona kazandırılabilir ancak çimento daha küçük boyutlara ininceye kadar öğütülüp kullanılırsa betonun dayanım kazanma hızı bakımından daha etkili bir sonuç alınabilir. Yapılan işleme genel olarak bakıldığında; çimentonun incelik miktarı arttırılırsa yüzey alanı artar ve çimento taneleri su ile daha fazla temas eder buna bağlı olarak hidratasyon tepkimesinin hızı arttığından dayanım kazanma süresi azalmış olur. Bu iki çimento çeşiti birbiri ile karşılaştırıldığında Tip III çimentosu kullanıldığında ilk 24 saat sonunda betonun dayanım kazanma miktarı diğer çimento kullanılarak üretilen betonun dayanım kazanma miktarının iki katı olur. Çimentoyu oluşturan temel bileşenlerden olan C_3S ’in miktarı fazla ise buna bağlı olarak hidratasyon hızı da yüksek olur ve bundan dolayı tepkime sonrası oluşan hidratasyon ısı da yüksek olur. Hidratasyon ısı beton içerisinde dışarıya çıkmaz ise sıcaklık artışı yüksek olacak ve betonda yapısal hasarlar oluşacaktır.

Özellikle büyük miktarlarda dökülen kütle betonlarda hidratasyon ısısı oldukça önemlidir. Bundan dolayı beton kalınlığı 0,5 m'den fazla olan kütle betonlarında Tip III çimentosu tercih edilmemelidir. Baraj inşalarında büyük miktarda kütle betonları döküldüğünden ısıl rötre çatlakları önemli bir sorun oluşturmaktadır. Tip IV düşük hidratasyon ısılı çimento kullanılarak bu sorun aşılabılır. Yapı inşaatlarında beton döküldükten sonra erken yaşlardaki beton dış etkilerden (yağmur suyu, zemin vb.) kaynaklı sülfat etkisine maruz kalabilir. Bunun için Tip V çimentosu kullanılarak sülfat etkisine karşı direnci yüksek olan beton üretilir ve Tip V çimentosu kullanıldığından dolayı çimento içeriğindeki C_3A miktarı düşürülerek C_4AF' ye dönüştürülür ve beton sülfat etkisine karşı güçlendirilmiş olur (Tulga, 2017).

Beton üretiminde çevreci ve sürdürülebilir olarak yapılabilecek çalışmalara bakıldığında; çimento üretiminde çimentoya uçucu kül ve buna benzer puzolonik özellik gösteren endüstriyel atık malzemeleri ekleyip çimento üretiminde kullanarak çimento üretimi ile açığa çıkan CO_2 miktarını azaltılabilir, çimento üretimi için gereken enerjiyi fosil yakıt yerine güneş enerjisi gibi çevreci kaynaklardan temin edebilir, beton karışımlarında direkt olarak doğadan temin edilen kaynaklar yerine kullanım amacına göre farklı kimyasal katkıları kullanılabilir yine beton içerisinde kullanılan agrega için farklı geri dönüştürülmüş endüstriyel malzemeler kullanılabilir (Özcan, 2018).

Endüstriyel atıklar maliyetlerinin düşük olması ve kolay temin edilebildiklerinden dolayı alüminosilikat kaynağı olarak fazla miktarda kullanılmaktadırlar (Mahmut ve Emiroğlu, 2016). Farklı sanayi atıkları değerlendirilip geopolimer betonlarda bağlayıcı olarak kullanıldığında sıradan Portland çimentosunun üretimi ile açığa çıkan CO_2 miktarı yaklaşık %80 oranda azaltılabilecektir. Geopolimer olarak tasarlanan betonlarda kullanılan çimentonun neredeyse tamamının yerine çevreci bir bağlayıcı kullanması yine agrega yerine endüstriyel atık kullanması bu betonların doğal çevreye olan katkısından dolayı bu alanda pek çok araştırma yapılmaktadır.

Çimento bulunmasından sonraki süreçte nüfusun artması ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte toplumların inşasında kullanılan temel bir yapı malzemesi olmuştur. 21. yüzyılda modern ve gelişen toplumun ihtiyaçlarını karşılamak için üretilen çimento, inşaat sektöründe kilit malzeme olarak yerini almıştır (Tunçez, 2021).

Beton içerisindeki anabilesenlerden olan portland çimentosu üretim aşamasında %5-8 oranında havaya CO_2 salınımına neden olduğundan dolayı doğal hayatı olumsuz etkilenmektedir ve küresel ısınma gibi insan hayatını tehdit eden sorunlara doğrudan katkı

sağlamaktadır (Koç Keskinç, 2019). İnşaat sektöründe kullanılan yapı malzemelerin üretiminden kaynaklı neden olduğu çevresel problemlerin azaltılması, bu malzemelerin yerine kullanılabilecek ve sürdürülebilir yeşil malzemelerin üretimi için literatürde fazla sayıda çalışma bulunmaktadır.

Dayı ve ark., (2013) yaptıkları çalışmada, Portland çimentosunun üretiminde zeolit, uçucu kül ve atık camını hacimce %5 ve %10 oranlarında klinker ile birlikte çimentonun üretiminde kullanmışlardır. Üretilen çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri ile 7, 28 ve 90 günlük numunelerin eğilme ve basınç dayanım deneyleri yapılmış ve standart Portland çimentosu ile üretilen numunelerin deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde üretilen çimentoların TS EN 197-1'e uygun olduğu ve çimento üretiminde zeolit, uçucu kül ve atık camın çimento içerisinde klinker ile birlikte kullanılabileceği belirlenmiştir.

Korkmaz (2019) tarafından yapılan çalışma Yozgat yöresine ait farklı bölgelerden alınan tuf örneklerini ve Portland çimentosu klinkerini %20 ve %40 oranında hacimce karışıma ilave edip bu malzemelerin betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışma kapsamında; kimyasal, fiziksel, mekanik testler ile hidrasyon ısı ve kızdırma kaybı deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde malzemenin $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplam içeriği %77,97-%82,25 arasında değişen volkanik kökenli porfirik traki andezit olduğu görülmüştür. Yozgat yöresi volkanik tüfleri ile üretilen numunelerin basınç dayanımları 6,3-10,7 MPa arasında bulunmuştur. Basınç dayanım değerlerinin oksit oranlarıyla ilişkisi de belirlenmiştir. Pozolanik çimento üretiminde %40 oranında tras kullanılan numunelerin erken kür günlerindeki basınç dayanımları %20 oranında tras kullanılan numunelerin basınç dayanımlarına göre daha düşük çıkmıştır ancak 28 günlük dayanımlarında ise standartlar değerler elde edilmiştir. Deneyde kullanılan tuf örneklerinin reaktif silis ve pozolanik aktivite test sonuçları TS EN 197-1 ve TS 25 standartlarının tras kriterlerine göre uygundur. Yozgat yöresine ait volkanik tüflerin CEM IV/B pozolanik çimentolarına %40'a kadar ikame ederek kullanılabileceği sonucu bulunmuştur.

Çelik ve ark., (2004) tarafından yapılan çalışmada, Soma termik santralinden alınan uçucu kül, iki farklı tras (Yenişehir, Bilecik) ve silis dumanı, çimento içerisine %5 silis dumanı, %10 uçucu kül ve %30, %35 ve %40 oranlarında tras eklenmiş ve elde edilen harçların basınç dayanım sonuçları incelenmiştir. Üretilen numunelerin Blaine özgül yüzey alanı değerleri belirlendikten sonra basınç dayanım sonuçları incelenmiştir. Üretilen

numuneler içerisinde en yüksek dayanım Bilecik trası kullanılan, incelik miktarı fazla ve puzolan içeren numunede görülmüştür.

Günel ve ark., (2022) yaptıkları çalışmada atık beton numunelerini kırıp öğütürerek elde ettikleri geri dönüştürülmüş harç tozunu (GDHT) %0 ile %25 arasında değişen oranlarda çimento yerine ikame etmiş ve oluşturulan harcın priz süreleri, mekanik ve mikroyapı özelliklerini incelemişlerdir. 7, 28 ve 90 günlük su kürüne maruz bırakılan numuneler üzerinde eğilme ve basınç dayanım testleri 7 ve 90 günlük numuneler üzerinde ise mikroyapı analizleri yapılmıştır. Sonuçlara bakıldığında GDHT ikame oranının artması harçların priz sürelerinde artışa neden olmuştur. Genel olarak bakıldığında GDHT %25 oranına kadar çimento yerine kullanılması uygundur.

Qian ve ark., (2020) yaptıkları çalışmada geri dönüştürülmüş inşaat atığı çimentolu malzeme (RCWCM) kullanılarak yeşil ultra yüksek performanslı beton (UHPC) üretilmek istenmiştir. RCWCM' nin ısıtılması ile suyu alınmış çimentomsu toz (DCP) elde edilmiş ve DCP, çimentoya ikame edilmiştir. Daha sonra üretilen UHPC' nin fiziksel ve kimyasal özellikleri değerlendirilmiştir. Sonuçlara bakıldığında %25'e kadar çimentonun yerine DCP kullanıldığında, UHPC basınç dayanımında çok az bir değişiklik olduğunu görülmektedir. Buna karşılık olarak, DCP çimentoya %25'ten az eklendiğinde geliştirilen yeşil UHPC' nin mikro yapısı ve dayanıklılığını üzerinde pozitif bir etki yapmıştır. Ekolojik olarak değerlendirildiğinde, DCP' yi içeren UHPC' nin çevre üzerinde olumlu olarak küçük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir ve bu da UHPC' nin gelecekteki sürdürülebilir gelişimi için geniş bir olasılık sunmaktadır.

Das ve ark., (2022) yaptıkları çalışmada kaba agregaya yerine alternatif olarak %100 ferrokrom cürufu ve çimento yerine ise (%0-40) oranlarında uçucu kül ikame ederek betonun tekno-çevresel sürdürülebilirliğini, sürdürülebilir bir karışım tasarım yöntemi olarak partikül paketleme optimizasyon tekniğini benimseyerek araştırmıştır. Karışım tasarımı yöntemleri kullanılarak toplam on çeşit beton karışımı hazırlanmıştır. Karışım tasarımına göre hazırlanan doğal agregalı beton, referans karışım olarak alınmıştır. Betonun teknik değerlendirmesi, basınç dayanımı ve çekme dayanımı açısından deneyler yapılmıştır. Sonuçlara bakıldığında %30'a kadar uçucu kül içeren ferrokrom cüruf agregalı betonun referans betona göre daha yüksek mukavemete sahip olduğu belirlenmiştir.

Gudainiyan ve Kishore (2022) yaptıkları çalışmada Hindistan' ın geniş tarım arazileri ve ürün çeşitliliği ile tarımsal ürünlerden elde edilen atık malzemeleri çimento harcı

retiminde imento içeriğine ikame edilerek kullanmışlardır. Harç üretimine uygun puzolanik özelliklere sahip olduğu belirlenen tarımsal atıkların imento harcının mukavemeti üzerindeki etkisi belirlenmek amacıyla şeker kamışı küspesinin külü gibi tarımsal atık malzemeler ikame edilerek betona olumlu etkiler yaratmıştır.

Pires ve ark., (2022) tarafından yapılan çalışmada, bir fosfat madeninden elde edilen atık kaya parçalarını Portland çimentosuna ikame ederek imento üretimine dahil etmişlerdir. Çimento karışımı imentonun 400 °C ve 600°C sıcaklıklarda %25 içerikli atık fosfat kaya parçalarının ikamesi ile oluşturulmuştur. Oluşturulan imentolu kiremit karoları görsel ve boyutsal analiz, su emme, asit atağı ve dayanıklılık gibi bazı parametrelere göre değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, tüm karolar, standartın gerektirdiği sınırlar dahilinde 3,5 MPa' nın üzerinde bir dayanım göstermiştir. 600 °C' de ısıtılan karolar en iyi pigmentasyonu göstermiştir. Üretim aşamasında yapılan ısıtılma işlem pigmentasyon sürecine yardımcı olmasına rağmen mukavemeti etkilememiştir. Bu şekilde portland imentosu tüketimi azaltılmış yeterli dayanımlı ve estetik açıdan uygun maden atıkları kullanılarak pigmentli imento karoları üretilmiştir.

7. BETONUN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında;

Demir (2009) tarafından yapılan çalışmada çimentoya hacimce %5, %10, %15, %20, %25 oranlarında silis dumanı ve uçucu kül eklenerek bu malzemelerin betonun yarmada çekme dayanımına etkisi incelenmiştir. Farklı kür günlerinde numuneler üzerinde basınç ve yarmada çekme dayanımı testi yapılmıştır. Deney sonuçlarına bakıldığında; silis dumanı kullanılan betonların dayanımları diğer betonlara göre daha iyi olduğu grlmştir. Basınç ve yarmada çekme dayanımı deneylerinde en iyi sonuç %20 oranında silis dumanı kullanılan betonlarda elde edilmiştir.

Gülan ve ark., (2016) yaptıkları çalışmada cam lifini hacimce %25, %50, %75 ve %100 oranlarında filler malzemesi ile yer değiştirip yerine mermer tozu ilave edip 25 çeşit

beton serisi hazırlayarak karbonatlaşmanın betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde oluşturduğu etkiyi incelemişlerdir. Üretilen numuneler üzerinde porozite, kılcal su emme ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deney çalışmaları sonucunda, karbonatlaşma deneyi yapılan numunelerin, porozite, kapilarite, basınç ve yarmada çekme dayanımı değerlerinde azalma, ultrases geçiş hızı değerinde ise artış olduğu tespit edilmiştir.

Kara ve Yazıcıoğlu (2016) tarafından yapılan çalışmada %5, 10, 15 oranlarında mermer tozu (MT), %10 silis dumanı (SD), % 5MT + %10 SD, %10 MT + %10 SD ve %15 MT + %10 SD ikame edilerek sekiz çeşit hedef dayanımı C30 olan beton üretilmiştir. 28 gün su kürü uygulanan numuneler kür havuzundan çıkarıldıktan sonra 56 gün boyunca su havuzu içerisinde karbonatlaşmaya maruz bırakılmıştır. Havuzdan çıkarılan numunelerde meydana gelen fiziksel ve mekanik değişim incelenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde; farklı oranlarda MT, SD ve MT + SD içeren beton örneklerinde karbonatlaşma yoğunluğu arttıkça ultrases hızı değerlerinin arttığı, kapilarite katsayılarının azaldığı, aşınma miktarının düştüğü ve basınç dayanımının arttığı görülmüştür.

Özel ve Zengin (2013) yaptıkları çalışmada hematit ve kalker kökenli agregalar, 300-400-500 kg/m³ dozajlı CEM I 42.5 R çimentosu ve alüminatlı çimento kullanarak radyasyon soğurma için yapılarda kullanılan ağır betonların segregasyon riski yüksek olduğu için bu betonları kendiliğinden yerleşen beton olarak kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Ağır agregalar (hematit) ile üretilen betonların kalkerli üretilen betonlara göre birim hacim ağırlık değerleri yaklaşık %27,7 daha fazla olmuştur. Hematit agregası ile üretilen numunelerin basınç dayanımı kalkerli numunelere göre %1,2-29,7 oranında fazla çıkmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde ağır agregalar kullanılarak kendiliğinden yerleşen beton üretimi yapılabileceği ancak segregasyon riski taşıdığından dolayı akışkanlaştırıcı katkı ile birlikte ya da yüksek oranda ince agregalar kullanılmasının daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Gülbüz ve Aydın (2014) yaptıkları deneysel çalışmada agregalar içerisinde farklı oranlarda bulunan kil miktarının betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek için ince agregaya %5, %10, %15, %20 oranlarında kil ikame edilmiş ve referans beton numuneleri ile birlikte beş çeşit küp ve kiriş numuneler üretilmiştir. Taze harçlarda kıvam (çökme), sertleşmiş beton küp numunelerinde ise ultrases geçiş hızı, basınç dayanım deneyleri ve kiriş numunelerde de eğilme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde taze beton içerisinde kil miktarının artışı ile işlenebilirlik düzeyinin arttığı, sertleşmiş betonda ise

kil miktarı arttıkça basınç ve eğilme dayanımlarında büyük oranda azalma olduğu belirlenmiştir. Beton içerisinde kil-silt oranı arttıkça taze betonda çökme miktarının %43'e varan oranlarda artış gösterdiği, basınç dayanımının %39 ve eğilme dayanımının ise %84 oranında azaldığı tespit edilmiş olup ultrases geçiş hızlarının da artan kil oranı ile birlikte azaldığı belirlenmiştir.

Hattab ve ark., (2021) tarafından yapılan çalışma doğal agreganın %20'sinin yerine geri dönüştürülmüş refrakter tuğla agregası ikame edilerek yapılan betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde yüksek sıcaklığın etkisini belirlemek amacıyla üç su/çimento oranına (s/ç:0,59-0,47-0,38) sahip beton karışımı üretmek için iki farklı refrakter tuğla agregası kullanılmıştır. Karışıma girecek malzemeler 3°C/dk hızla 20°C'den 800°C'ye ısıtılmış, ardından 1 saat (istenen sıcaklığa ulaştıktan sonra) bekletildi ve oda sıcaklığına kadar soğutuldu. Daha sonra yoğunluk, gözeneklilik, kütle kaybı, hacim değişimi, ultrasonik darbe hızı, hasar derecesi, basınç dayanımı ve dinamik elastik modülü değerlendirmek için refrakter tuğla agregası ile yapılan beton üzerinde ısıtmadan önce ve sonra testler yapılmıştır. Sonuç olarak; refrakter tuğla agregası, beton imalatında doğal kaba agregası için bir alternatiftir ve ısıtma sonrasında beton özelliklerinin korunmasına yardımcı olmuştur.

Biçer (2020) tarafından yapılan çalışmada, agrega olarak volkanik cüruf kullanılarak elde edilen hafif betonların termal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmadan şu sonuçlar elde edilmiştir; volkanik cüruf agrega bakımından kumdan daha hafiftir, mukavemet açısından incelendiğinde standartların gerektirdiği BS14 beton sınıfını sağlayabilir. Isı ve ses yalıtım özelliğinden dolayı iyi bir yapı malzemesidir.

Pektaş ve Karakurt (2016) yaptıkları çalışmada, çimentoya %10, %20 ve %30 oranında uçucu kül (UK) ve yüksek fırın cürufu (YFC) ikame edilmiş, ülkemizde yol uygulaması alanında son yıllarda kullanılmaya başlanan silindire sıkıştırılmış betonun (SSB) mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde UK ve YFC' nin etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre UK ve YFC katılarak üretilen beton numunelerinin ileriki kür günlerinde çekme dayanımına olumlu katkı sağladığı tespit edilmiştir.

Karalar ve Konak (2019) tarafından yapılan çalışmada granüle yüksek fırın cürufunu ve termik santrallerde yanma sonucunda atık ürün olarak oluşan taban külünü beton içerisinde ince agrega yerine %25, %50, %75 ve %100 oranlarında kullanarak betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Üretilen 7 ve 28 günlük numunelere su kürü uygulanmış ve mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında; beton

üretiminde ince agrega olarak kum yerine maliyeti daha uygun olan taban külü ve granüle yüksek fırın cürufunun kullanımının tercih edilmesi ve bunun üzerine yönelik çalışmaların arttırılması gerektiği düşünülmektedir.

Birinci ve ark., (2008) yaptıkları çalışmada yüksek fırın cürufunu (YFC) ve granüle bazaltik pomza (GBP)' yı birlikte ve ayrı olarak ince agrega yerine farklı oranlarda beton içerisinde kullanarak betonun durabilite özellikleri incelenmiştir. Deniz suyunda bekletilen beton numunelerinin kimyasal aşınmaları, basınç dayanımı ve mikroyapıları araştırılmıştır. Musluk suyunda bekletilen numunelerin ise mekanik aşınma değerleri incelenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde YFC ve GBP' nin betonun basınç dayanımına ve kimyasal aşınmaya olumlu katkı yaptığı ve beton durabilitesinin, katkı tipi ve katkı miktarına bağlı olduğunu göstermiştir. YFC katkılı örneklerin aşınma değerleri GBP katkılı örneklerin aşınma değerlerine göre daha az çıkmıştır. En az aşınma değerleri eşit oranda GBP + YFC kullanılan numunelerde görülmüştür. Çalışma sonucunda deniz yapılarında kullanılacak betonlarda, ince agrega yerine GBP ve YFC katkılarının kullanılmasının beton durabilitesini geliştirebileceği tespit edilmiştir.

Çakır ve Sayaca (2021) tarafından yapılan çalışmada öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunu (ÖGYFC) %0, %15 ve %30 oranlarında çimentoya ikame ederek geri dönüştürülmüş agregayı da %100 oranında agrega yerine kullanarak beton numuneleri üretilmiştir. Bu numunelerin 7. 28. ve 90. kür günlerinde fiziksel ve mekanik deneyleri yapılmıştır. Taze betonda yapılan birim ağırlık, işlenebilme (çökme) ve hava içeriği deneyleri ile sertleşmiş betonda birim ağırlık, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ultrases geçiş hızı, kılcal su emme, hacimce su emme deneylerinin referans betona göre karşılaştırılması yapılmıştır. %30 oranında öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren geri dönüştürülmüş agregalı beton serilerin performansları özellikle 28. ve 90. günlerde doğal agregalı beton serilerine göre daha iyi sonuç vermiştir. Deney sonuçları incelendiğinde; öğütülmüş yüksek fırın cürufunun çimento ile birlikte kullanılabileceği ve geri dönüştürülmüş agregaların ise iri ve ince doğal agregalar yerine kullanarak betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde olumlu bir etki yaptığı görülmüştür.



8. BETONUN MİKROYAPISAL ÖZELLİKLERİ

8.1. SEM ve EDS Analizi

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) elektronları kullanıp numune yüzeyinden yüksek çözünürlüklü üç boyutlu görüntü alan bir sistemdir (URL-4, 2022). SEM analizini yapan cihaz tarihte ilk defa 1930 yılında Manfred ARDENNE tarafından icat edilmiştir. Daha sonra ise Charles OATLEY adlı akademisyen SEM cihazını ticari hale getirmiştir.

Antony Van Leeuwenhoek 17. Yüzyılda yaptığı çalışmada mikroskopta tek lens kullanıp maddeleri 400X (400 kat) büyüterek kırmızı kan hücrelerini şekillerine göre gruplara ayırmıştır. Tek lens kullanarak yaptığı bu çalışma ile günümüzde farklı alanlarda kullanılan optik mikroskopların gelişmesine büyük bir katkı sağlamıştır (URL-4, 2022).

Optik alanında görülen gelişmeler ile mikroskoplarda kullanılan lens üretimi sayısında artış olmuştur. Lens sayısının artması ile birlikte kaliteli lens üretimi de gerçekleştirilmiştir. Bu durumda günümüzde kullanılan optik mikroskoplarındaki çözünürlük oranını 100 nm' ye ve büyütme oranını ise 1000X seviyelerine çıkarmıştır.

Avrupa' daki fizik alanında çalışan bilim insanları 1920 yaptıkları çalışmalar ile yüksek hızda hareket eden elektronların ışık gibi davrandığını ve dalga boylarının ışığından 100.000 kat daha az olduğunu fark ettiler. Bu çalışmalar doğrultusunda Almanya'da yaşayan Ernst Ruska 1931 yılında yaptığı çalışma ile ilk transmisyon elektron mikroskopunu (TEM) keşfetti. Yapmış olduğu elektron mikroskopunda 3 manyetik lens kullanarak 100 nm çözünürlük elde etti. Bu çözünürlük kendi döneminde kullanılan mikroskoplara göre 2 kat daha iyi çözünürlüğe sahipti. Daha sonra Ernst Ruska yapmış olduğu çalışmalardan dolayı 1986 yılında Nobel ödülünü kazandı.

Bir taramalı elektron mikroskopunda görüntünün oluşması için; elektron demetinin numunenin yüzeyi ile fiziksel bir etkileşim (elastik, elastik olmayan çarpışmalar) yapması ve bu etkileşim sonucunda ortaya çıkan sinyallerin toplanıp incelendikten sonra görüntü oluşur (URL-4, 2022).

Taramalı elektron mikroskobu, yüksek voltaj ile hızlandırılan elektronların numune yüzeyinden getirdikleri sinyalleri görüntüye dönüştüren bir elektron mikroskobudur (URL-5, 2022). Elektronlar numune yüzeyindeki atomlarla etkileşime girerek numune yüzeyinin haritasını çıkarıp bu bilgileri sinyaller aracılığıyla gönderir. Bu sinyaller dedektörler tarafından toplanıp sinyal güçlendiriciden geçirildikten sonra katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla görüntü elde edilir.

Özcan (2018) tarafından yapılan çalışmada SEM görüntülerine bakıldığında; geopolimer beton karışımlarında yüksek fırın cürufu oranı arttıkça, geopolimerizasyon işleminin yoğunlaşması ve boşlukların azalması nedeniyle, bağlayıcı olarak %100 oranında yüksek fırın cürufu kullanılan geopolimer betonda en yüksek basınç dayanımı elde edildiği düşünülmektedir. Ayrıca yüksek fırın cürufunun krom cürufuna göre geopolimer jeli oluşturacak elementleri daha fazla içermesinden dolayı, yüksek fırın cürufu kullanılan geopolimerlerde boşluk oranı daha az bir yapı elde edilmiştir.

Orhan (2022) yaptığı çalışmada yüksek fırın cürufu esaslı ve hacimce %0, %5, %10 ve %15 oranlarında atık lastikleri, ince agrega yerine kullanıp beton üretmiştir. Karışımda 500 kg/m³ yüksek fırın cürufu, agrega olarak atık lastik içermeyen ve bunun yanısıra 500 kg/m³

fırın cürufu, agrega olarak da %15 oranında atık lastik içeren hem %5 $MgSO_4$ hem de %5 Na_2SO_4 çözeltilerinde bekletilen geopolimer beton numunelerinin SEM görüntülerine bakıldığında, sülfat etkisiyle numunelerin içyapılarında çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Sülfat iyonları numunenin içerisine geçtiğinden dolayı numunelerde çatlak ve gözeneklilik oluşmuştur. Donma çözülme etkisindeki numunelerin görüntülerinde bakıldığında çatlaklar oluştuğu görülmektedir. Atık lastik oranı arttıkça çatlakların miktarı ve genişliği azalmıştır. Oluşan bu çatlaklar geopolimerlerin mekanik özelliklerinde etkili olmuştur ve oluşan çatlakların donma-çözülme olayı sonrası buz hacminin artması neticesinde meydana gelen gerilmelerin, betonun çekme gerilmelerini aşmasından dolayı kaynaklandığı bilinmektedir.

Sivri (2021) yaptığı çalışmada olivin kumunun çeşitli bölgelerinde içyapı görüntülemesi yapmış olup matrisin genel görüntüsü ve elementlerin bölgesel dağılımlarını incelemiştir. Olivinin mikroyapısında farklı bölgelerdeki elementel dağılım EDS ile incelendiğinde oksitli yapı homojen bir şekilde görülmektedir. EDS analizi ile olivinin bir kesitinden alınan kimyasal içerik, ağırlıkça; O: %44,10, Mg: %31,06, Al: %0,05, Si: %18,45, Ca: %0,19, Fe: %6,15 şeklinde bulunmuştur. Haritalandırmada O elementi beklendiği üzere oksit içerikli olivin mikro yapısına tamamen dağılmıştır. Mg ve Si elementleri ana bileşen forsteriti oluşturduğu için yapıda hakim elementler konumundadır. Bir miktar fayalit fazı içeriğindeki Fe yapıda göreceli olarak düşük yer kaplarken, Al ve Ca forsterit dışı alanlarda düzensiz olarak dağılım göstermiştir.

Uğurlu (2020) yüksek fırın cürufunu bağlayıcı olarak kullandığı çalışmada üretilen numunelerin içyapı analizlerinin yapılması için SEM deneyi yapılmıştır. Alınan görüntülerde çimento dozajının fazla olduğu numunelerin içyapısının daha yoğun olduğu görülmüştür. %3 $MgSO_4$ ve %1,5 $MgSO_4$ + %1,5 Na_2SO_4 çözeltilerinde 12 hafta bekletilen numunelerden alınan SEM görüntülerine bakıldığında, sülfat etkisinden dolayı numunelerin içyapılarında çatlakların oluştuğu ve boşlukların olduğu gözlemlenmiştir. Numunenin içyapısında oluşan çatlaklar geopolimer jelin yapısını bozarak, durabilite kayıplarına neden olmuştur. Bu durum numunelerin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemiştir.

Xie ve ark., (2019) bağlayıcı olarak uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu agrega olarak ise geri dönüştürülmüş agregayı kullanarak yaptıkları çalışmada beton karışımında kullanılan bu malzemelerin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir.

Yapılan SEM analizinde; numunelerde C-S-H jeli, Ca(OH)_2 ve etrenjit oluşumu tespit edilmiştir. SEM görüntülerinde, geri dönüştürülmüş agrega (GDA) içeren numunelerde oluşan çatlaklar normal portland çimentolu numunelere göre daha fazla görülmüştür.

8.2. XRD Analizi

XRD analizi, malzemelerin kristallografik özelliklerinin ve içerdikleri fazların kendine özgü atomik dizilimlerinin belirlenmesini sağlayan numunelere hasar vermeden yapılan bir analiz yöntemidir (URL-6, 2022). Her malzemenin kırınım profilleri kendine özgüdür ve kendi kristal yapısını açıklar. XRD analizi, deney yapılan numuneye zarar vermez ve az miktardaki numunelerin dahi analizlerinin yapılmasını sağlar.

Sivri (2021) yaptığı çalışmada olivin kumu üzerinde yapılan XRD deneyinde; analizde hammadde içindeki teorik içeriği Mg_2SiO_4 olan saf forsterit fazının yanında bulunan az miktarda FeSiO_4 formüllü fayalit fazı ile birlikte oluşan forsterit ferroan içeriği tespit edilmiştir. Forsterit ferroanın bu malzeme içerisindeki kimyasal formülü analiz sonucuna göre $\text{Fe}_{0,15}\text{Mg}_{1,85}\text{SiO}_4$ olup hesaplanan yoğunluğu $3,3 \text{ g/cm}^3$ ve hücre hacmi $292,77 \times 10^6 \text{ pm}^3$ 'tür. Teorik olivin kristal yapısı olan orthorhombik yapıya sahiptir. Simetri merkezli kristallerdir. Bu faz Fe ve Mg elementlerinin kristal içi dağılımıyla oluşmuştur. Kimyasal isim olarak Magnezyum Demir Silikat olarak da anılabilir. EDS ve XPS (X-ışını fotoelektron spektroskopisi) içerikleri incelendiğinde de elementel olarak atomik oranların kimyasal formüldeki bu değerleri desteklediği görülmüştür.

Şahin ve Koçak (2022) yaptıkları çalışmada Portland çimentosuna yüksek fırın cürufunu belli oranlarda ikame ederek yaptıkları karışımın XRD analizinde alit, belit, trikalsiyum alüminat ve tetrakalsiyum alüminaferrit gibi kalsiyum silikat hidratlar tespit etmişlerdir. Çimentoya uygulanan XRD deneyinde parçacıkların örüntüsünün bir Portland çimentosuna uygun şekilde kristallenmiş yapıda olduğu görülmüştür. Yüksek fırın cürufunun (YFC) XRD analizinde gehlenit ve anhidrit gibi yapılara daha fazla oranda rastlanılmıştır. Ayrıca yüksek fırın cürufunun camsı fazının 2θ 'nın 20-38 derece arasında en iyi durumda olduğu ve SiO_2 , CaO ve Al_2O_3 'den oluşan yoğun bir düzensiz yapı tespit edilmiştir. Camsı faz miktarı YFC' nin hidrolik özelliklerinin belirlenmesinde önemli unsurlardan biridir bundan dolayı, camsı faz miktarıyla dayanım arasında, doğrusal bir ilişki olabileceği belirlenmiştir.

Acar (2021) yaptığı çalışmada, ferrokrom cürufu ve elektrik ark fırını tozu numunelerini esas alarak ferrokrom atıklarını tehlikelilik açısından incelemiştir. Yapılan XRD deneyine göre; ferrokrom cürufu ve elektrik-ark fırını tozu örneklerinin hakkında; cüruf örnekleri ağırlıklı olarak magnezyum-silikat ve magnezyum-alüminat mineralleri içinde ayrıca muhtemelen yavaş hava nedeniyle yüksek kristallik sergilemiştir. Spesifik olarak, forsterit ((Mg,Fe)₂SiO₄), Fe-Mg-Cr-Alspinel (MgAl₂O₄) ve enstatit (MgSiO₃) fazları kullanıldığı XRD analizinden belirlenmiştir. Ayrıca, elektrik ark fırını tozu' nun kristal inklüzyonları forsterit olarak belirlenmiştir.

Bosna (2017) tarafından yapılan çalışmada krom katkılı spinel malzemelerin kızılötesi fosforesans özellikleri incelenmiştir. Farklı sıcaklıklarda sinterlenen numunelerin yapılan XRD analizine göre LiGa₅O₈:Cr⁺³ yapısının bulunduğu belirlenmiştir. LiGa₅O₈:Cr⁺³ yapısı LiGa₅O₈ kristali ile uyumludur ve pikler daha küçük açılar oluşturmuştur. LiGa₅O₈ kristal yapısında galyum atomları ile krom atomlarının yer değiştirmesi sonucunda atomlar arası uzaklık değişmiştir. Yapı içerisine giren krom atomlarının iyonik yarıçapları daha büyük olduğundan LiGa₅O₈ yapısındaki pikler daha küçük açılar oluşturmuştur.

9. BETONUN SÜLFAT DİRENCİ

Betonun sülfat direnci ve sülfat etkisinde görülen değişimler konusunda yapılan çalışmalara bakıldığında;

Akçay ve Çullu (2022) yaptıkları çalışmada, farklı dayanım sınıflarında hazırlanan beton numunelerinin içerisindeki karışım suyu miktarını %10 ve %20 oranında azaltarak numunelerin sülfat direnci deneyine karşı değişimlerini incelemişlerdir. Sülfat direnci deneyi yapılmadan önce, numuneler üzerinde ıslanma kuruma döngüsü yapılmıştır. Bu döngü tamamlandıktan sonra numunelerdeki kütle kayıpları belirlenmiştir. Numuneler 105 °C' de 2 gün süre ile kurutulduktan sonra %5 içerikli Na₂SO₄ çözeltisi içerisine konularak 2 gün

bekletilmiştir. Deney sonucunda, karışım suyu miktarının azaltılması veya arttırılması ve farklı dayanım sınıfları betonun sülfat direnci üzerinde önemli bir etki yaptığı belirlenmiştir.

Binici ve ark., (2011) tarafından yapılan çalışmada %2,5, %5, %10 oranlarında bazaltik pomza, barit, yüksek fırın cürufu ve %0,25, %0,5 %0,75 oranlarında kolemanit mineralini bağlayıcı ve ince agrega yerine kullanıp 13 farklı karışım hazırlanmıştır. Karışımda kullanılan bu malzemelerin betonun mekanik dayanımı ve sülfat dayanıklılığı üzerine etkisi incelenmiştir. Numuneler %5 derişimli Na₂SO₄ çözeltisi içerisinde bekletildikten sonra basınç dayanım testleri yapılmıştır. Sodyum sülfat çözeltisi içerisinde bekletilen numuneler içerisinde 180 ve 360 günlerde en iyi basınç dayanımı cüruf katkılı numunede, en düşük dayanımı ise barit katkılı numunelerde görölmüştür. 7 günlük numunelerin basınç dayanımında en yüksek değer referans numunesinde ve en düşük basınç dayanım değeri ise hidratasyon süresi uzun ve en fazla oranda kolemanit minerali içeren numunede görölmüştür. 28 ve 180 günlük numunelerin basınç dayanımında en yüksek değer yüksek fırın cürufunun %10 oranında kullanıldığı numunelerde görölürken, en düşük basınç dayanımı değeri ise çimento yerine eklenen baritin en fazla kullanıldığı numunelerde görölmüştür.

Karapınar (2021) yaptığı çalışmada, sülfat direncinin beton numunelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde etkisini incelemek amacıyla; silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, kireçtaşı dolgusu, sönmüş kireç ve portland çimentosu içeren beton karışımları hazırlamıştır. Beş farklı seri beton karışımı yapılmış ve numuneler 365 gün süreyle kirece doymun su ve 50 g/l içerikli sodyum sülfat çözeltisi içerisine konulmuştur. Bu deney numuneler üzerinde sülfat etkisinin incelenmesi, basınç dayanımı ve numunelerin ağırlıklarındaki değışimin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Sülfat etkisine karşı numunelerin gösterdiği direncin, mineral katkıların oranına göre değıştiğı görölmüştür. Deney sonuçları incelendiğinde; beton karışımlarında çimento yerine kullanılan katkı malzemelerinin durabilite performansını önemli ölçüde arttırdığı görölmüştür.

Uğurlu (2020) tarafından yapılan çalışmada bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu (YFC), agrega olarak da geri dönüştürölmüş agregayı (GDA) %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında kullanarak 15 farklı geopolimer beton numunesi oluşturulup bu numunelerin donma-çözölme ve sülfat etkilerine karşı dayanıklılığı incelenmiştir. Üretilen numuneler üzerinde basınç dayanımı, ultrasonik geçiş hızı (UPV), kılcal geçirimlilik katsayısı, su emme oranları ve ağırlık kaybı değışim deneyleri yapılmıştır. %1,5 Na₂SO₄+%1,5 MgSO₄ ve %3 MgSO₄ çözeltisi içerisinde fazla kalan numunelerin basınç dayanımında düşüş görölmüştür.

Numunelerde GDA kullanım oranı arttıkça basınç dayanımında azalma görülmüş, bu numunelerde çimento dozajının artırılması ile dayanım da artmıştır. Numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayıları ve su emme oranları; sülfat çözeltisi içerisinde kaldıkça artmış, çimento dozaj miktarı ve GDA kullanım oranı artırıldığında ise bu değerlerde azalma olmuştur.

Liu ve ark., (2022) yaptıkları çalışmada demir cevheri atıklarının betonda agrega olarak kullanılması ile betonun mekanik özelliklerine ve sülfat direncine etkisini görmek amacıyla yapılmıştır. Karışımında bağlayıcı olarak; çimento ve uçucu kül, agrega olarak; nehir kumu, kireçtaşı agregası ve demir cevheri atıkları kullanılmıştır. Demir cevheri atıkları %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında karışıma ikame edilmiştir. Demir cevheri atık katkılı betonun mekanik özellikleri, ikame oranının %0'dan %100'e çıkmasıyla önce artar, sonra azalır. %40 demir cevheri atığı içeren beton en iyi mekanik özellikleri göstermiştir. Bu nedenle demir cevheri atıklarının ikame oranının %40 olması önerilmiştir. Demir cevheri katkılı numunelerinin %5 Na_2SO_4 çözeltisinde aldığı etkiler deney hedefleri ile uyumludur. Sonuç olarak; betonda agrega yerine %20-%40 oranında demir cevheri atığı kullanılması betonda yol gösterici bir öneme sahip olduğunu göstermiştir.

Cheng ve ark., (2022) tarafından yapılan çalışmada, çelik cürufu kaba agreganın sülfat ortamında betonun korozyon direnci üzerindeki etkisini araştırmak için farklı kütle oranlarında sülfat çözeltisinin etkisi altında çelik cürufu kaba agregalı betonun korozyon direnci, mekanik deneyleri ve mikroyapısal analizleri gerçekleştirmiştir. Sonuçlara bakıldığında; beton hazırlamak için kaba agrega yerine çelik cürufunun kullanılmasının sülfat çözeltilerinin neden olduğu hasarı önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir. %15 sülfat çözeltisi ortamında ise çelik cüruf ikame oranı %60 olduğunda maksimum basınç dayanımı artış oranı %20,7 olarak elde edilmiştir. SEM görüntülerinde, çelik cürufundaki aktif bileşenlerin (dikalsiyum silikat (C_2S) ve trikalsiyum silikat (C_3S) gibi) betonda hidratlı kalsiyum silikat üretimine ortam hazırlayarak malzemenin mukavemetini ve dayanıklılığını artırdığını ortaya koymaktadır. Çelik cürufunun eklenmesi, betonun sülfat direncini belirli bir seviyeye kadar arttırabildiği gözlemlenmiştir.

10. BETONUN ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA ÖZELLİKLERİ

Betonun elektromanyetik kalkanlama özellikleri üzerinde yapılan çalışmalara bakıldığında;

Binici ve ark., (2016) tarafından yapılan çalışmada, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis kumu ve pomza NaOH ile aktive edilip geopolimer beton üretiminde kullanarak mekanik deneyler, ultrasonik ses geçirgenlik ve EM kalkanlama etkinliği katsayısı deneyi yapılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde, yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonun su emme oranı diğer numunelere göre daha düşük çıkmıştır, eğilme ve basınç dayanım

değerleri ise diğer numunelere göre daha fazla çıkmıştır. En yüksek lineer EM kalkanlama etkinliği katsayısı yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer beton numunesinde görülmüştür. Bundan dolayı bu numunede kullanılan malzeme radyoaktif geçirgenliği az olduğundan radyasyon etkisine maruz kalan yapılarda kullanılabilir.

Akyıldırım (2011) yaptığı çalışmada farklı agrega tipleri kullanarak dört tip ağır betonun gama radyasyonu kalkanlama etkinliği özelliklerini incelemiştir. Çalışmalarında üretilen beton numunelerin birim hacim ağırlıkları kullanılan agreganın cinsine göre değişiklik göstermiştir. Normal agrega kullanılan betonun birim hacim ağırlığı $\rho=2,476 \text{ g/cm}^3$, olivin kullanılarak üretilen ağır betonun birim hacim ağırlığı $\rho=2,72 \text{ g/cm}^3$ ve farklı oranlarda barit kullanılarak üretilmiş iki çeşit ağır betonun birim hacim ağırlığı ise $\rho=2,994$ ve $\rho=3,463 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Üretilen bu numunelerin gama ışını kalkanlama etkinliği incelenmiş ve standart zırh malzemesi olarak kullanılan kurşun için bulunan değerler ile karşılaştırılmıştır. Deneyde 0,662, 1,173 ve 1,332 MeV enerjili gama ışınlarının ölçümü NaI(Tl) sintilasyon dedektörüyle yapılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde, üretilen ağır betonlar içerisinde en iyi gama zayıflatma özelliği barit içeren numunede görülmüştür. Ayrıca beton içerisinde kullanılan barit oranının artması betonun zayıflatma özelliklerini olumlu yönde etkilediği görülmüştür.

Demirci (2018) tarafından yapılan çalışmada pirit, krom, magnetit ve normal agregalı ağır betonlar üretilerek, numuneler üzerinde radyasyon soğurma deneyi yapılmıştır. Beton numunelerinin 59,5 keV ve 661 keV enerji seviyelerinde radyasyon soğurma katsayıları HPGe gama dedektörü kullanılarak belirlenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde; enerji seviyesi arttıkça radyasyon soğurma azalmış, betonun birim hacim ağırlığı arttıkça radyasyon soğurma artmıştır. Magnetit agregası ile üretilen numunelerin radyasyonu en iyi soğurduğu tespit edilmiştir.

Yavaş (2018) yaptığı çalışmada karışım içerisindeki bağlayıcı miktarının %40' ı oranında standart kum, pirit, krom ve magnetit tozu ikame edip hazırladığı numunelerin gama ışını ve 122 keV-834 keV foton enerjilerinde radyasyon soğurmaları incelenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde; karışıma eklenen malzemelerin, numunelerin mekanik özellikleri üzerinde olumsuz bir etki yapmadığı görülmüştür. Foton enerji seviyeleri arttıkça soğurmanın azaldığı ve magnetit tozu içeren numunelerin radyasyonu en iyi soğurduğu belirlenmiştir.

Alwaeli (2017) yaptığı çalışmada tufal, granüle kurşun-çinko ve cüruf atık malzemelerin gama radyasyon kalkanı ve betonun basınç dayanımı özellikleri üzerindeki

etkilerini araştırmıştır. Numunelerin radyasyon soğurma katsayısı ve basınç dayanımı deneysel olarak ölçölerek hesaplanmış ve ardından deneysel değerler geleneksel betonun sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara bakıldığında, hibrit ölçekli atık ve granüle boyutlardaki kurşun-çinko cüruf atık betonunun geleneksel betondan daha iyi radyasyon koruması ve basınç dayanımı özelliklerine sahip olduğunu göstermiştir.



11. MATERİYAL VE YÖNTEM

11.1. Materyal

Çalışmada, bağlayıcı olarak; çimento ve olivin, agrega olarak; krom cürufu ile atık krom tozu ve karışım suyu materyal olarak kullanılmıştır. Deney karışımalarında kullanılan malzeme özelliklerinin standartlara uygunluğu dikkate alınarak bu bölümde incelenmiştir.

11.1.1. Agregat

Çalışmada gerekli olan krom cürufu ve atık krom tozu Elâzığ Ferrochrom işletmesinden temin edilmiştir. Krom cürufunun İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Üniversitesinde Spectro IQ II cihazında yapılan XRF (X-Işını Floresans Spektroskopisi) deneyine göre kimyasal analizi Tablo 11.1’de verilmiştir.

Tablo 11.1. Krom cürufunun kimyasal analizi

Oksit	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	Na ₂ O	MnO	CuO
(%)	36,74	27,49	24,39	7,47	1,41	0,30	0,14	0,11	0,14	0,05

Agregatlar üzerinde elek analizi çeyrekleme yöntemi kullanılarak TS 3530 EN 933-1 standartına göre tane büyüklüğü dağılımı, TS 3529’a göre gevşek-sıkışık birim ağırlık tayini, TS 3526’ ya göre özgül ağırlık ve su emme oranı deneyleri yapılmıştır. Agregatların elek analizi yapılırken kullanılan elek seti makinesi Resim 11.1’de verilmiştir.

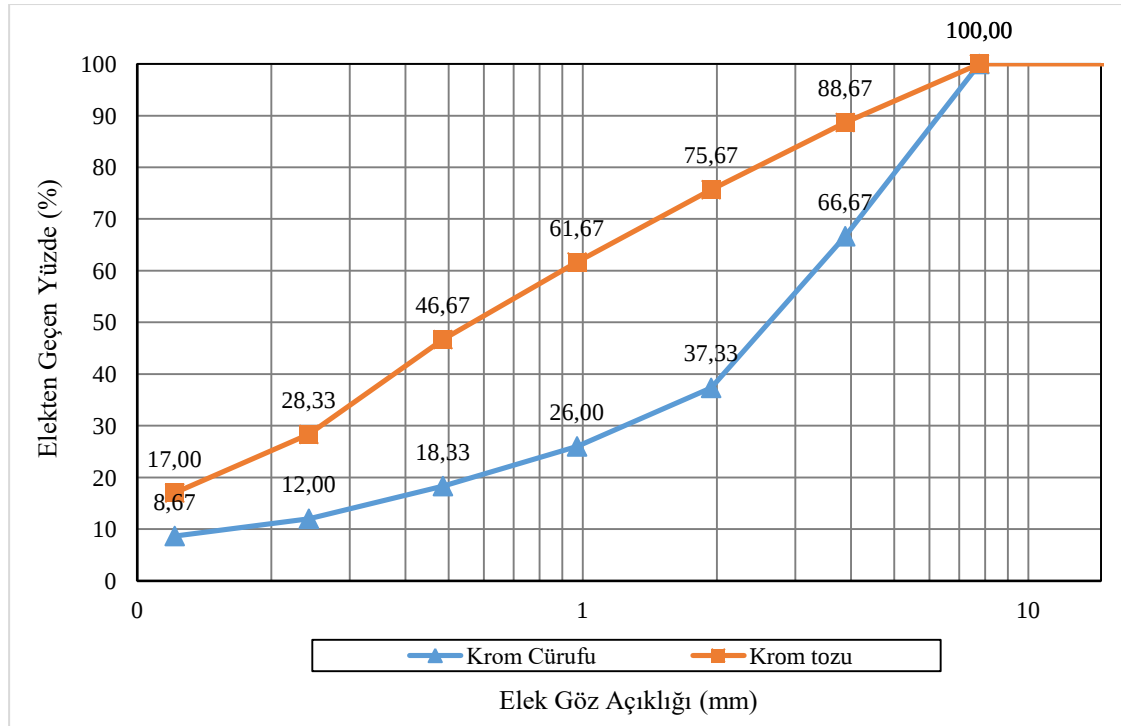


Resim 11.1. Agregatların elek analizi için kullanılan sarsma cihazı

Karışımında kullanılan agreganın fiziksel özellikleri Tablo 11.2’de ve granülometri eğrisi Şekil 11.1’de verilmiştir.

Tablo 11.2. Karışımında kullanılan agregatların fiziksel özellikleri

Deneyin Adı		Krom cürufu	Krom tozu	Standart
Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	Gevşek	1,59	2,52	TS 3529
	Sıkışık	1,80	2,93	TS 3529
Özgül Ağırlık		2,86	4,94	TS 3526
Su emme oranı (%)		3,63	-	TS 3526



Şekil 11.1. Karışımda kullanılan agregaların granülometri eğrileri

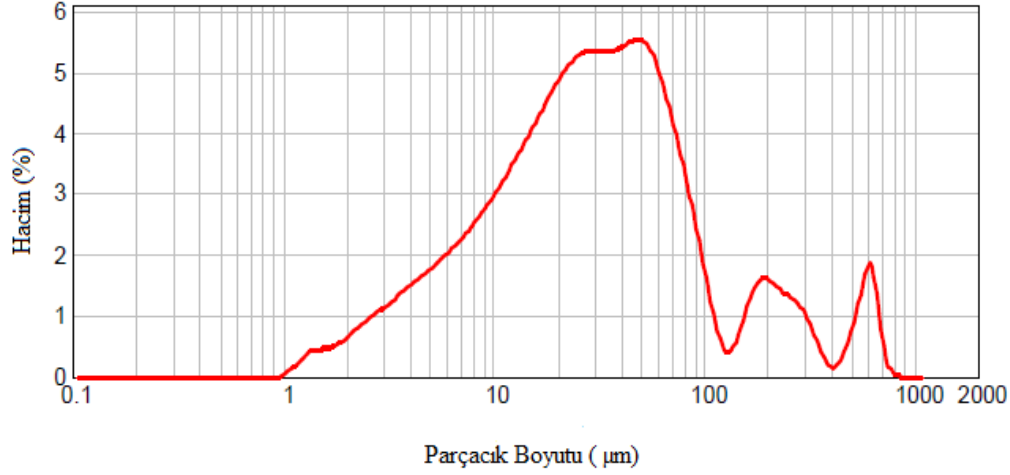
11.1.2. Çimento

Deney karışımlarında gerekli olan çimento, Elazığ Çimentaş Çimento Fabrikası'nda üretilen CEM I 42,5 R Portland Çimentosu olarak kullanılmıştır. TS EN 197-1'e uygun olarak üretilen çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 11.3'de verilmiştir. Parçacık boyutu analizi Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarında Malvern Zetasizer Nano ZS cihazıyla yapılmış ve bu deneye ait grafik Şekil 11.2'de verilmiştir.

Tablo 11.3. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Çimento Tipi (Cement Type)	CEM I 42,5 R	Analiz Değerleri	TS EN 197-1 Standart (Spec. Limit)	Analiz Metodu (Test Method)
SiO ₂ (%)		18,66		XRF Method
Al ₂ O ₃ (%)		4,77		XRF Method
Fe ₂ O ₃ (%)		3,67		XRF Method
CaO (%)		63,03		XRF Method
MgO (%)		1,54		XRF Method
SO ₃ (%)		2,87	Max. 4,0	XRF Method
K ₂ O (%)		0,56		XRF Method
Na ₂ O (%)		0,34		XRF Method
CI (%)		0,01	Max. 0,1	TS EN 196-2
Kızdırma Kaybı (%) (LOI %)		3,69	Max. 5,0	TS EN 196-2
Çözünmeyen Kalıntı % (IR %)		0,37	Max. 5,0	TS EN 196-2
Özgül Ağırlık (g/cm ³) (Specific Gravity g/cm ³)		3,11		TS EN 196-6
Özgül Yüzey (cm ² /g) (Blaine cm ² /g)		3760		TS EN 196-6
İncelik (45 µ) (Fineness 45 µ)		5,7		TS EN 196-6
Priz Başı (dk) (Initial Setting min.)		140	Min. 60	TS EN 196-3
Priz sonu (dk) (Final Setting min.)		240		TS EN 196-3
Hacim Sabitliği (mm) (Le Chatalier mm)		1	Max. 10	TS EN 196-3
Basınç Dayanımı (N/mm ²) (Compressive Strength N/mm ²)				
2 Gün (2 Days)		29,0	≥ 20,0	TS EN 196-1
7 Gün (7 Days)		41,0		TS EN 196-1

28 Gün (28 Days)	51,6	$\geq 42,5$	TS EN 196-1
------------------	------	-------------	-------------



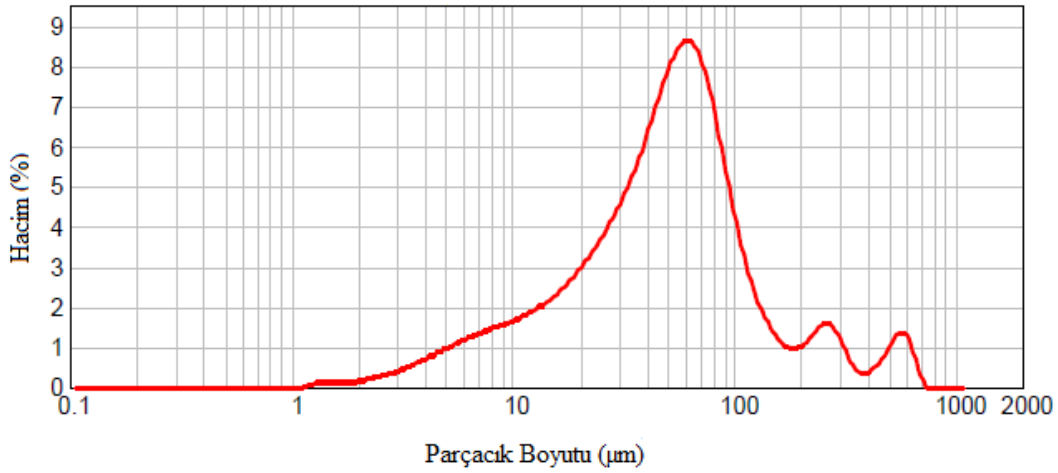
Şekil 11.2. Çimentoya ait olan parçacık boyutu analiz grafiği

11.1.3. Olivin

Beton karışımlarında kullanılan ve çimento ile ikame edilen olivin Erzincan’ da faaliyette olan Erkrom Madencilik A.Ş.’nin maden sahasından temin edilmiştir ve özgül ağırlığı 3,3’ tür. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Üniversitesinde Spectro IQ II cihazında yapılan XRF deneyine göre kimyasal analizi Tablo 11.4’de verilmiştir. Parçacık boyutu analizi Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarında Malvern Zetasizer Nano ZS cihazıyla yapılmış ve bu deneye ait grafik Şekil 11.3’de verilmiştir.

Tablo 11.4. Olivin mineralinin kimyasal analizi

Oksit	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	MnO
(%)	48,04	34,80	1,03	0,55	12,72	1,56	0,35	0,11	0,16



Şekil 11.3. Olivin mineraline ait olan parçacık boyutu analiz grafiği

11.2. Yöntem

Bu deneysel çalışmada agrega yerine kullanılan atık krom tozu ve krom cürufunun ve bağlayıcı malzeme yerine olivin minerali ikame edilerek sertleşmiş betonun mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla; taze beton numuneleri üzerinde, birim hacim ağırlık ve çökme deneyi; sertleşmiş beton numuneleri üzerinde suya doymun kuru yüzey yığın yoğunluk, kuru yığın yoğunluk, kütlece su emme yüzdesi, görünür porozite yüzdesi, sodyum sülfat direnci, basınç dayanımı, eğilmede çekme deneyleri ve elektromanyetik kalkanlama deneyleri ile çalışmada kullanılan malzemelerin mikroyapısal özelliklerini incelemek için SEM-EDS ve XRD deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar bu bölümde detaylı olarak açıklanmıştır.

11.2.1. Numunelerin hazırlanması ve karışım oranlarının belirlenmesi

TS EN 206-1'e uygun beton numuneleri, maksimum agrega dane çapı 8 mm ve çökme miktarı S2 sınıfı (75-100 mm) olarak belirlenerek TS 802'e uygun olacak şekilde karışımlara girecek malzeme miktarları hesaplanmıştır. Hesaplanan malzeme miktarları Tablo 11.5'de verilmiştir.

Tablo 11.5. Karışımda kullanılan malzemelerin hacimsel olarak yüzdeleri (%)

Seri adı	Malzeme türü ve oranları			
	Bağlayıcı		Agrega	
	Olivin	Çimento	Krom cürufu	Krom tozu
OM0C100	% 0	%100	%100	%0
OM0C90	%0	%100	%90	%10
OM0C80	%0	%100	%80	%20
OM2,5C100	%2,5	%97,5	%100	%0
OM2,5C90	%2,5	%97,5	%90	%10
OM2,5C80	%2,5	%97,5	%80	%20
OM5C100	%5	%95	%100	%0
OM5C90	%5	%95	%90	%10
OM5C80	%5	%95	%80	%20

Karışımda kullanılacak olivin minerali 0-100 μm aralığına gelinceye kadar bilyeli değirmende öğütülmüştür. Karışımda kullanılacak boyuta getirilen olivin minerali beton karışımına hacimce %0, %2,5 ve %5 oranlarında çimentoya ikame edilmiştir. Yapılan bütün seri karışımlarda çimento dozajı 500 kg/m^3 ve s/ç oranı 0.41 olarak seçilmiştir. Karışıma girecek malzemeler hazırlandıktan sonra tartılmış ve Resim 11.2’de verilen 60 litre kapasiteli beton mikseriyle karışım işlemleri yapılmıştır.

7 gün ve 28 günlük kürleme koşullarına maruz bırakılmak üzere, $10*10*10 \text{ cm}$ boyutlarında küp ve $10*10*50 \text{ cm}$ boyutlarında kiriş numuneler olarak 9 seri karışım için toplam 108 adet numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Dökümü yapılan küp numuneler üzerinde birim hacim ağırlık, kütlece su emme, görünür porozite, basınç dayanımı deneyleri ve sodyum sülfat deneyleri yapılmıştır. Üretilen kiriş numunelerin tamamında eğilmede çekme deneyleri yapılmıştır. Elektromanyetik kalkanlama deneyi için seri karışımların malzeme oranlarına göre $10*10*1 \text{ cm}$ boyutlarında 9 adet numune üretilmiştir.

Seri karışımları temsil etmek üzere, numunelerin üretiminde kullanılan malzeme oranlarına göre kodlama yapılmıştır. C100, C90 ve C80 simgeleri %100, %90 ve %80 oranlarında betonda agrega yerine kullanılan krom cürufunu, OM0, OM2,5, OM5 ifadeleri %0, %2,5 ve %5 oranlarında çimento ile hacimce yer değiştirilerek betona ikame edilen olivin minerali katkılı beton numunelerini ifade etmektedir.



Resim 11.2. Beton karışım mikseri

Karışım işlemlerinin yapılmasının ardından kalıplara yerleştirilen Resim 11.3’de verilen sarsma cihazıyla 15-30 s sarsılarak yerleştirilme işlemi gerçekleştirilmiştir.



Resim 11.3. Sarsma tablası

Sarsma cihazı ile kalıplara yerleştirilen numuneler Resim 11.4’de verildiği gibi sertleşmeye bırakılmıştır.



Resim 11.4. Kalıp içerisindeki numunelerin görüntüsü

Kalıptan çıkarılabilecek sertliğe ulaşan numuneler kalıptan çıkarıldı. Karışım sıraları ve dayanım günlerine bağlı olarak Resim 11.5’de verildiği gibi işaretlenmiştir.



Resim 11.5. Numunelerin işaretlenmiş görüntüsü

Numunelerin işaretlenmesi tamamlandıktan sonra Resim 11.6’da verilen kür havuzuna bırakılmıştır.



Resim 11.6. Kür havuzuna konulan numunelerin görüntüsü

11.2.2. Çökme deneyi

Beton tasarımında kullanılan olivin ve atık krom tozunun taze betonun kıvamına olan etkisinin tespit edilmesi için TS EN 12350-2 standartına uygun olarak Çökme deneyi yapılmıştır. Çökme deneyi Resim 11.7’de verilmiştir.



Resim 11.7. Çökme değerinin belirlenmesi

11.2.3. Taze betonun birim hacim ağırlık deneyi

Karışım beton mikserinde hazırlandıktan sonra TS 12350-6 standartına göre içerisine 3 kademedeki ve her kademedeki 25 kez demir çubukla şişlenerek taze harç koyuldu ve Resim 11.8'deki gibi içerisindeki beton ile tartımı yapıldı ve (11.1)'de verilen formül yardımı ile taze betonun birim hacim kütlesi hesaplandı. Tüm seri karışımlar için aynı işlemler tekrarlandı.



Resim 11.8. Taze betonun deney kovası ile birlikte tartımı

$$D = \frac{(m_{\text{kap+ numune}}) - (m_{\text{kap darası}})}{v}$$

(11.1)

D: Birim hacim kütlesi, (g/cm³)

m: Kütle (g)

v: Hacim (cm³)

11.2.4. Sertleşmiş betonun birim hacim ağırlık deneyleri

7 ve 28 gün kür havuzunda bekletilen sertleşmiş beton numunelerinin, suya doygun kuru yüzey (SDKY) ve kuru yığın yoğunluk deneyleri TS EN 12390-7'ye göre Resim 11.9'da

verilen Arşimet terazisi yardımıyla bulunmuş ve yoğunlukları aşağıda verilen denklemlerle (11.2, 11.3) hesaplanmıştır.

$$\text{Suya doymun kuru yüzey (SDKY)} = \frac{W_{\text{doymun}}}{(W_{\text{doymun}} - W_{\text{suda}})} \quad (11.2)$$

$$\text{Kuru yığın yoğunluk} = \frac{W_{\text{kuru}}}{(W_{\text{doymun}} - W_{\text{suda}})} \quad (11.3)$$

W_{doymun} : Suya doymun ağırlığı

W_{suda} : Sudaki ağırlığı

W_{kuru} : Kuru ağırlığı



Resim 11.9. Arşimet terazisi

11.2.5. Kütlece su emme ve görünür porozite deneyleri

7 ve 28 günlük kür ortamında bekletildikten sonra elektronik terazi yardımıyla suya doymun ağırlıkları belirlenen beton numunelerin arşimet terazisi ile sudaki ağırlıkları ve sabit kütleye gelinceye Resim 11.10'daki etüvde kurutularak kuru ağırlıkları belirlenip kütlece su emme yüzdeleri ve yapılarındaki boşluk miktarının belirlendiği porozite, Denklem (11.4) ve Denklem (11.5) yardımı ile hesaplanmıştır. Numunelerin su içerisindeki ve doymun ağırlık ölçümleri Resim 11.11'de verilmiştir.

$$\text{K tलेce su emme yüzdesi} = \frac{(W_{\text{doygun}} - W_{\text{kuru}})}{W_{\text{kuru}}} * 100 \quad (11.4)$$

$$\text{Görünür Porozite} = \frac{(W_{\text{doygun}} - W_{\text{kuru}})}{(W_{\text{doygun}} - W_{\text{suda}})} * 100 \quad (11.5)$$

W_{doygun} : Suya doygun ağırlığı

W_{suda} : Sudaki ağırlığı

W_{kuru} : Kuru ağırlığı



Resim 11.10. Numunelerin etüv içindeki görüntüsü



Resim 11.11. Numunelerin doygun yüzey kuru ve sudaki ağırlıklarının ölçümü

11.2.6. Sülfat etkisi deneyi

Üretilen tüm seri karışımların sodyum sülfata karşı dayanıklılığı ASTM C1012 standartına göre belirlenmiştir. Her seriden üretilen küp numuneler 7 ve 28 gün boyunca çözelti içerisinde bekletilmiştir.

Sülfat etkisini değerlendirmek amacıyla, %10 oranında hazırlanan sodyum sülfat çözeltisi Resim 11.12’de gösterilmiştir. 7 ve 28 gün laboratuvar koşullarında sülfata maruz bırakılan numuneler, çözeltilerden çıkarıldıktan sonra etüvde kurutularak basınç dayanımı testine tabii tutulmuştur.



Resim 11.12. Sodyum sülfat çözeltisi ve çözelti içerisindeki numuneler

11.2.7. Basınç dayanımı deneyi

7 ve 28 gün kür havuzunda bekleyen beton numuneleri kür havuzundan çıkarılmış ve numuneler değişmez sabit kütleye gelinceye kadar kurutulmuştur. Daha sonra TS EN 12390-3 standartına uygun şekilde Resim 11.13’de verilen 300 ton kapasiteli basınç dayanımı cihazıyla kırılma yükleri elde edilmiştir. Basınç makinasının basınç uygulayacağı numune yüzeyi pürüzsüz olacak şekilde yerleştirilmiş ve 3 kN/s hızında üniform olarak numuneler aksel biçimde yüklenmiştir. Basınç dayanım değerleri Denklem (11.6) ile hesaplanmıştır.

Her serinin 7 ve 28 günlük küp numuneler üzerinde basınç deneyi yapılmıştır ve elde edilen sonuçların ortalaması alınarak kayıt edilmiştir.

$$\sigma = \frac{P}{A_c} \quad (11.6)$$

σ : Numunenin basınç dayanımı, (N/mm²)

P: Kırılma yükü, (N)

A_c: Uygulama yönüne dik deney numunesi kesit alanını (mm²), belirtmektedir.



Resim 11.13. Basınç dayanım cihazı ve kırılan bir numunenin kırılma anındaki değeri

11.2.8. Eğilme dayanımı deneyi

Tüm seri karışımların 7 ve 28 günlük kür havuzunda bekleyen 10*10*50 cm boyutlarındaki beton kiriş numuneleri kür havuzundan çıkarılmış ve etüv kurusu durumuna getirilerek TS EN 12390-5 standartına uygun olarak Resim 11.14’de verilen üç noktadan yük uygulayan eğilme dayanımı cihazıyla kırılma yükleri elde edilmiştir. Numuneler cihaza yerleştirilmiş ve yükleme hızı 2 kN/m olarak ayarlanmış ve yükleme yapılmıştır. Kırılma sonuçları (11.7)’de verilen formülde yerine yazılarak her serinin 7 ve 28 günlük numunelerinin dayanım sonuçlarının ortalaması alınarak bulunmuştur.

$$\sigma = \frac{3P \times L}{2b \times d^2} \quad (11.7)$$

σ : Eğilme dayanımı (N/mm²)

P : Numunenin kırıldığı anda etki eden kuvvet (N)

L : Mesnetler arasındaki uzaklık (mm)

b : Numunenin eni (mm)

d : Numunenin yüksekliği (mm)



Resim 11.14. Eğilme dayanım cihazı

11.2.9. SEM ve EDS analizi

Farklı oranlarda üretilen numunelerin mikro yapısını incelemek için SEM analizi yapılmıştır. OMOC100 kodlu karışım, OM5C80 kodlu karışım ile OM0C80 kodlu karışımların 7 ve 28 günlük numuneleri üzerinde SEM analizi gerçekleştirilmiştir. SEM analizi ile görüntüleri alınan numunelerin EDS deneyi ile de kimyasal analizleri yapılarak içyapılarında bulunan elementler belirlendi.

Analiz yapılmadan önce deney hazırlık aşamasında, numuneler Resim 11.15’de görülen SBC-900-C kaplama makinesinin alüminyum kotoları üzerine yapıştırılan çift taraflı karbon bantları üzerine Resim 11.16’daki gibi konuldu. Resim 11.17’de görülen kaplama cihazı içerisine bırakılan numunelere iletkenliği sağlamak için altın minerali ile kaplandı. Yüzeylerine elektron bombardımanı yapılarak yüzey kaplaması gerçekleştirildi ve SEM

görüntüleme cihazı içerisine konuldu. Analiz yapılırken her numune için 500×, 1000× ve 2500× mikrogram çekim boyutlarında görüntüleme alındı.

SEM ve EDS analizi Munzur Üniversitesi Merkez Laboratuvarında yapılmıştır. Deneyde Hitachi SU3500 ekipmanı ile karakterizasyon sağlanmış olup cihaz Resim 11.18’de; cihaz içerisine yerleştirilen numuneler Resim 11.19’da verilmiştir.



Resim 11.15. Kaplama makinesine ait görüntü



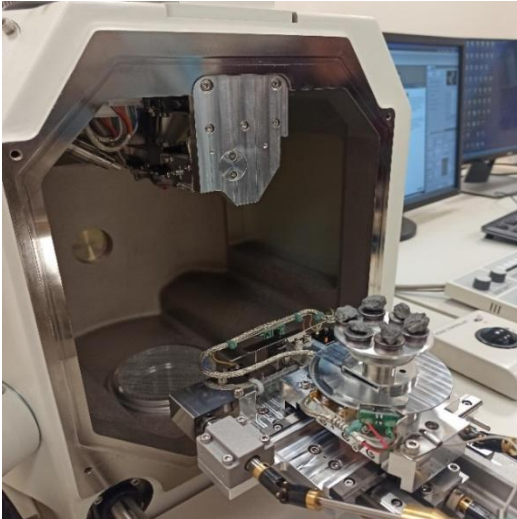
Resim 11.16. Alüminyum kotalar üzerine yerleştirilen numuneler



Resim 11.17. Kaplama makinesi içerisine konulan numuneler



Resim 11.18. SEM ve EDS analiz cihazı



Resim 11.19. SEM analizi cihazı içerisine konulan numuneler

11.2.10. XRF analizi

Deney çalışmalarında bağlayıcı malzeme olarak kullanılan olivin ve agregaya yerine kullanılan krom cürufunun elementel analizleri için İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde XRF deneyi yapılmıştır. Spectro IQ II cihazı ile yapılan deney Resim 11.20'de verilmiştir.



Resim 11.20. XRF analiz cihazı

11.2.11. XRD analizi

Deney çalışmalarında farklı birleşim oranlarında üretilen numunelerin mineralojik özelliklerini incelemek için XRD analizi yapılmıştır. OMOC100 kodlu karışım, OM5C80 kodlu karışım ile OM0C80 kodlu karışımların 7 ve 28 günlük numuneleri üzerinde XRD analizi gerçekleştirilmiştir.

XRD analizi İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde Resim 11.21'de gösterilen Philips X'Pert Pro cihazı ile yapılmıştır.



Resim 11.21. XRD analiz cihazı

11.2.12. Elektromanyetik kalkanlama deneyi

Yapılan deney çalışmalarında farklı birleşim oranlarında üretilen numunelerin EM kalkanlama etkinliğinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Deneye gönderilen numuneler aynı birleşim oranlarında ölçüm yapacak cihaza göre Resim 11.22'deki gibi 10*10*1 cm boyutundaki kalıplara dökümü yapılmıştır. Prizini alan numuneler kalıptan çıkarılıp karışım oranlarına göre numara verilerek Resim 11.23'deki gibi paketlenmiştir.

Deneyde kullanılan cihaz Resim 11.24'de verildi. Resim 11.25 gibi cihaza konumlandırılan numuneler; 2,17-3,3, 3,3-4,9, 4,9-7,1 frekans aralığında elektromanyetik dalgalara maruz bırakılmıştır. Bütün numunelere 3 frekans aralığında da elektromanyetik dalga verilmiştir. Deney çalışmaları Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında yapılmıştır.



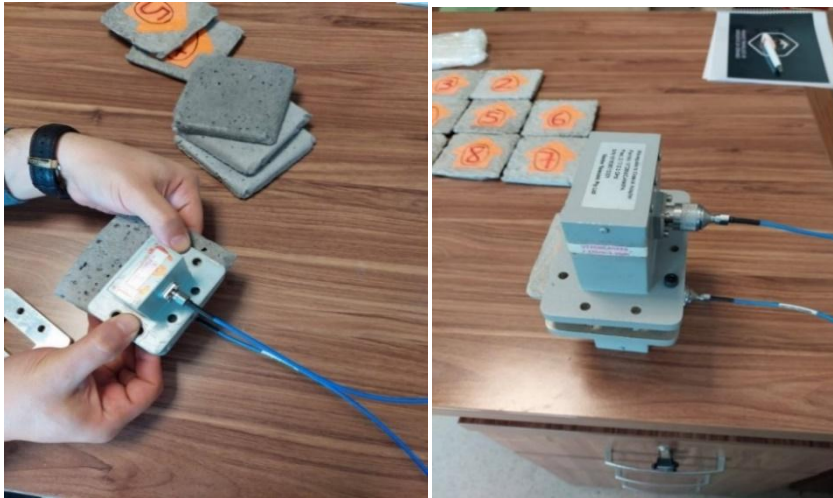
Resim 11.22. Deney için yapılan karışım ve kullanılan kalıp

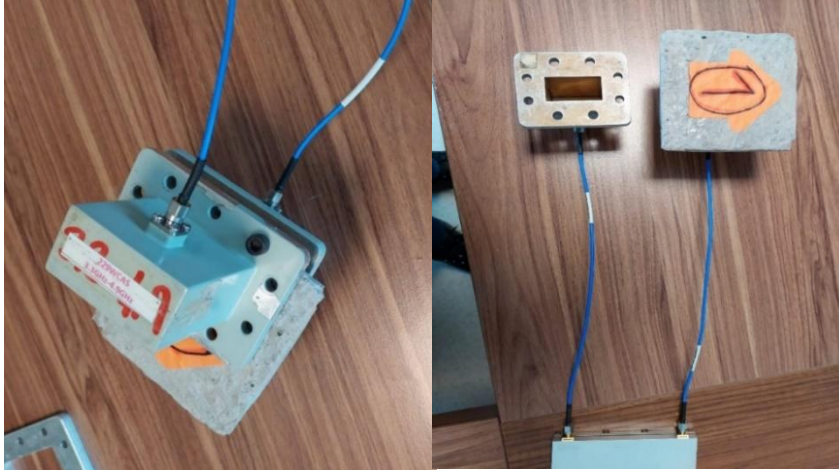


Resim 11.23. Deney için üretilen numunelerin numaralandırılıp paketlenmesi



Resim 11.24. EM kalkanlama etkinliği ölçüm cihazı





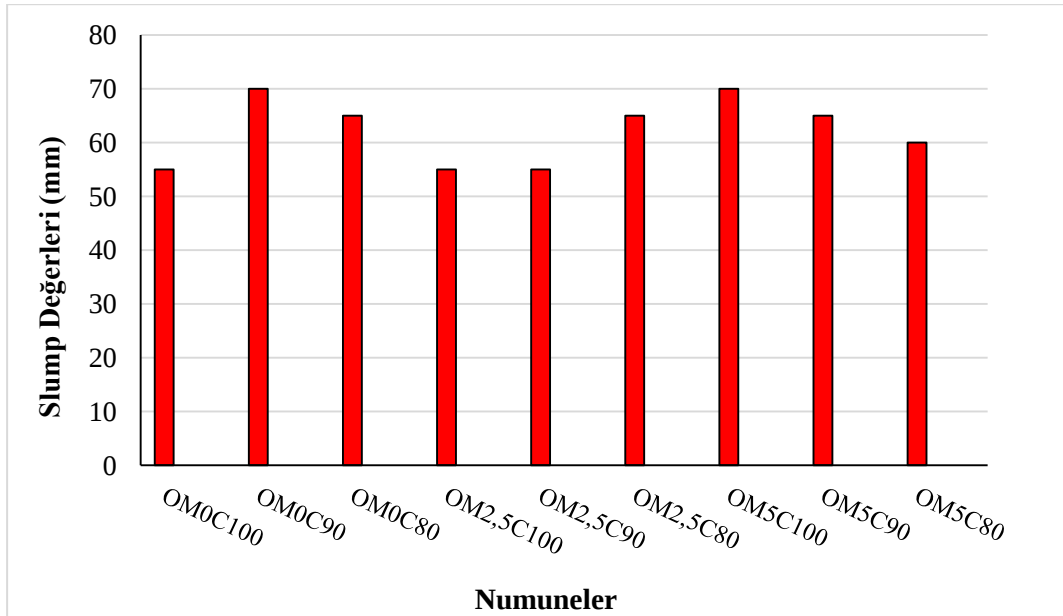
Resim 11.25. Numunelerin cihaz içerisindeki görüntüleri

12. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

12.1. Taze Beton Deneyleri

12.1.1. Çökme deneyi sonuçları

Karışım hesapları aşamasında, çökme sınıfı 50-90 mm aralığında yer alan S2 sınıfı seçilerek TS EN 12350-2 standartına uygun olarak yapılan çökme deneyinin sonuçları Şekil 12.1’de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 12.1. Çökme Değerleri

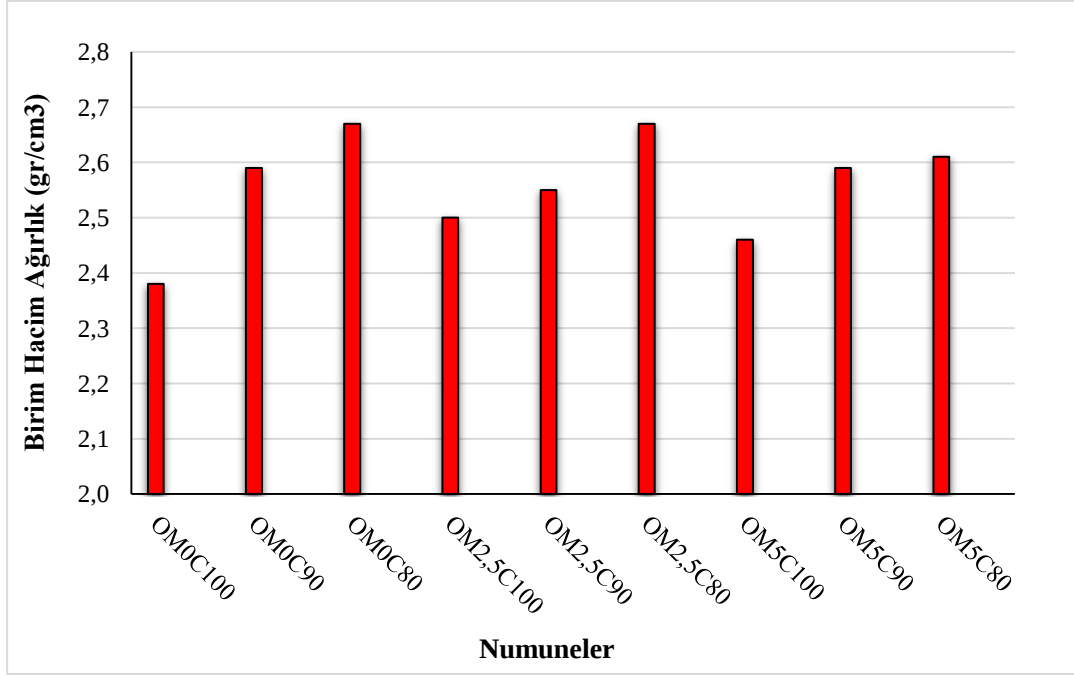
Şekil 12.1’de verilen grafikte olivin içermeyen numunelerde en düşük çökme değeri %100 krom cürufu kullanılan numunede ve en yüksek çökme değeri %90 oranında krom cürufu içeren numunede görülmüştür. %5 olivin ve %100 oranında krom cürufu kullanılan OM5C100 numunesinin hiç olivin kullanılmayan ve %100 oranında krom cürufu içeren OM0C100 numunesine göre %27 oranında çökme değeri daha fazladır. %5 olivin içeren OM5C100 numunesi %2,5 olivin içeren OM2,5C100 numunesine ve %0 olivin içeren OM0C100 numunelerine göre %27 oranında çökme değeri artış göstermiştir. Bu durumda olivin miktarı arttıkça çökme miktarının arttığını ve dolayısıyla betonun işlenebilirliğini arttırdığı söylemek mümkündür.

Tüm numuneler içerisinde en yüksek çökme değeri %5 olivin ve %20 oranında atık krom tozu içeren numunede görülmüştür. Olivin minerali bulunan numunelerde olivin miktarının artmasıyla çökme miktarında doğrusal bir değişim gözlenmemiştir.

Çoban (2014) yaptığı çalışmada krom atığı (KA) ilaveli taze beton numunelerinin çökme miktarlarını %10 KA içeren numunelerde %14.29, %20 KA içeren numunelerde %21.43, %40 KA içeren numunelerde ise %42.85 oranında arttırdığı sonucuna varmıştır. Tulga (2017) tarafından uçucu kül gibi endüstriyel atık kullanarak yaptığı çalışmada çökme değeri 150 mm’ de sabit kalmıştır. Elmi (2022) yaptığı çalışmada %10 oranında yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılan numunelerin çökme değerinde %20, %15 oranında YFC kullanılan numunelerin çökme değerinde ise %30 oranında artış olmuştur.

12.1.2. Taze betonun birim hacim ağırlık deneyi sonuçları

Deney çalışmalarında TS EN 12350-6 standartına göre yapılan deney sonuçlarına ait grafik Şekil 12.2’de verilmiştir.



Şekil 12.2. Taze betonun birim hacim ağırlık değerleri

Şekil 12.2’de verilen grafikte,%0, %2,5 ve %5 oranında olivin miktarının sabit ve atık krom tozu miktarının %0, %10 ve %20 oranında arttığı numunelerde doğru orantılı olarak birim hacim ağırlık da artmıştır. %0 olivin, %2,5 olivin ve %5 olivin içeren numune serisinde en yüksek birim hacim ağırlık %20 atık krom tozu içeren numunede görülmüştür. %2,5 oranında olivin içeren OM2,5C100 numunesi %0 olivin içeren OM0C100 numunesine göre %5 oranında birim hacim ağırlığı fazla çıkmıştır. %5 olivin içeren OM5C100 numunesi %0 olivin içeren OM0C100 numunesine göre birim hacim ağırlığı %4 fazla çıkmıştır.

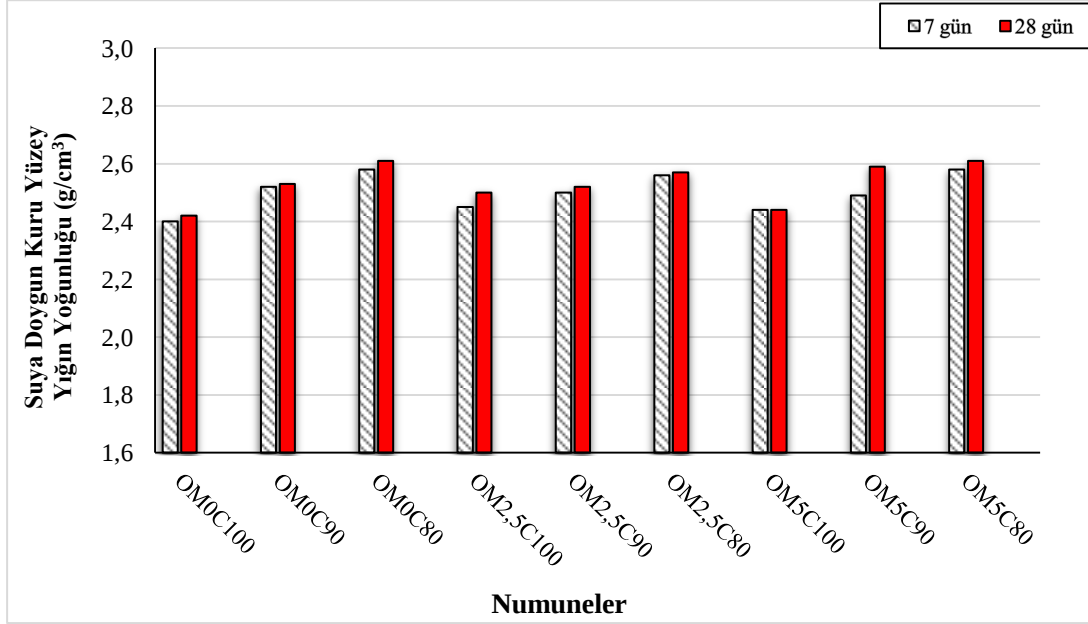
Olivin miktarının sabit ve atık krom tozu miktarının %0, %10 ve %20 oranında arttığı numunelerde birim hacim ağırlık doğru orantılı bir şekilde artmıştır.

Özel ve Zengin (2013) hematit ve kalker kökenli agregalar kullanılarak yaptıkları çalışmada kendiliğinden yerleşen betonlardan elde edilen sonuçlara göre hematit agregası kullanılarak üretilenlerin kalkerli üretilen betonlara göre birim hacim ağırlık değerleri yaklaşık %27,7 daha fazla olmuştur. Kan ve ark., (2004) tarafından yapılan çalışmada, %0 %10, %20, %40 ve %48,8 oranlarında agrega olarak sadece demir cevheri kullanarak ürettikleri betonda kullanım oranı arttıkça taze betonun birim hacim ağırlığı da artmıştır.

12.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

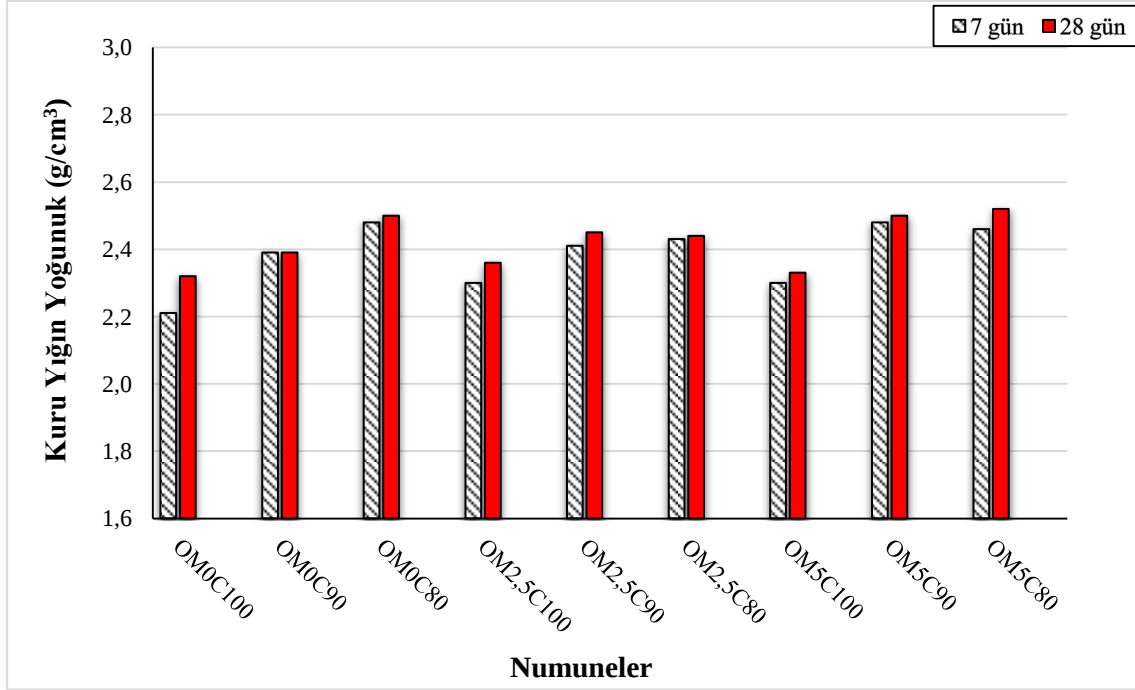
12.2.1. Sertleşmiş betonun birim hacim ağırlık deney sonuçları

Sertleşmiş beton numunelerinin, suya doygun kuru yüzey yığın yoğunluk ve kuru yığın yoğunluk deneyleri TS EN 12390-7 standartına göre yapılmıştır. Deney sonuçlarına ait grafik Şekil 12.3 ve Şekil 12.4’de verilmiştir.



Şekil 12.3. Suya doygun kuru yüzey yığın yoğunluk değerleri

Şekil 12.3’e göre 7 günlük olivin ve %20 atık krom tozu içeren numunelerden elde edilen değerler, olivin içermeyen (%0) numunelerle karşılaştırıldığında; % 2,5 olivin ve %20 atık krom tozu içeren beton numunelerinde %1, % 5 olivin ve %20 atık krom tozu içerenlerde ise %1,5 oranında bir artış olmuştur. 28 günlük numunelerde ise % 2,5 olivin %20 atık krom tozu içeren numunede %1 oranında ve %5 olivin %20 atık krom tozu içeren numunelerde ise %1,5 değerinde artış olmuştur. Bu değerlere bakıldığında atık krom tozu oranı arttıkça genel olarak sertleşmiş betonun suya doygun kuru yüzey değerlerinde artış olduğu söylenebilir.



Şekil 12.4. Kuru yığın yoğunluk değerleri

Şekil 12.4'e göre 7 günlük olivin bulunmayan numunelerden %20 atık krom tozu içeren numunenin kuru yığın yoğunluk değeri atık krom tozu içermeyen numuneden %12 fazla, %2,5 olivin ve %20 atık krom tozu içeren numune aynı oranda olivin içeren ve atık krom tozu içermeyen numuneye göre %6 fazla, %5 olivin ve %20 atık krom tozu içeren numune aynı oranda olivin içeren ama atık krom tozu bulunmayan numuneye göre %7 oranında kuru yığın yoğunluk değerinde bir artış olmuştur.

28 günlük olan numunelerden ve %20 oranında atık krom tozu içeren numunelerden %5 olivin içeren numune %2,5 olivin içeren numuneye göre %3,5 oranında değerinde bir artış olmuştur.

Sertleşmiş betonda en yüksek birim hacim ağırlık %5 olivin ve %20 oranında atık krom tozu içeren numunede görülmüştür. Bu artış olivin ve atık krom tozu yoğunluklarının (Olivin: $3,30 \text{ g/cm}^3$, krom tozu: $4,94 \text{ g/cm}^3$) krom cürufu yoğunluğuna göre (Cüruf: $2,86 \text{ g/cm}^3$) daha fazla bir değere sahip olmasıyla ilgili olabilir.

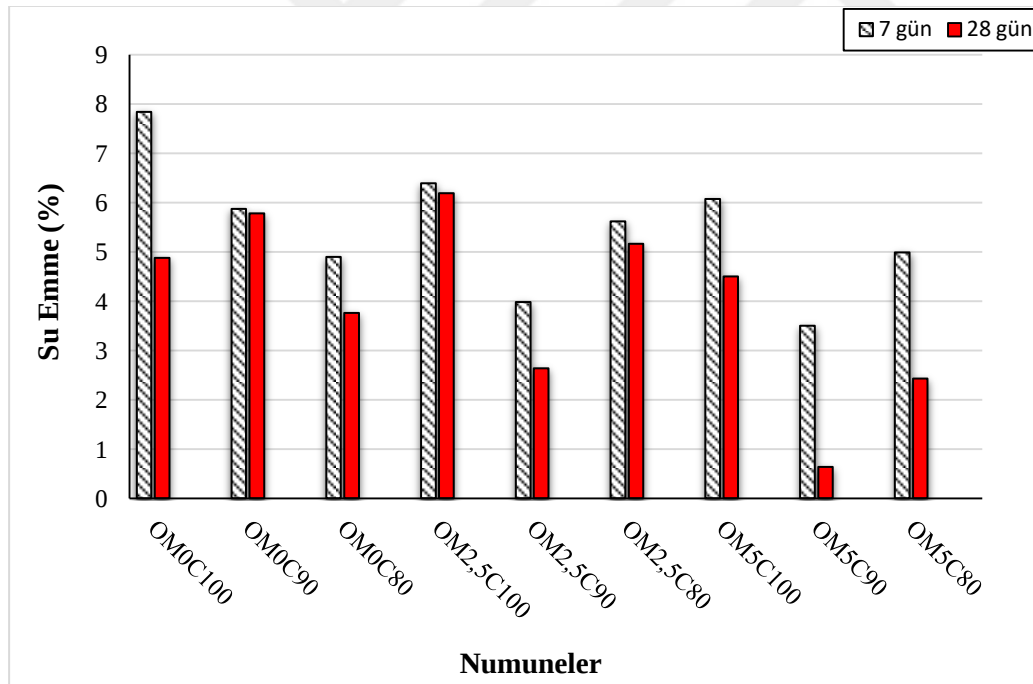
Binici ve ark., (2016) yaptıkları çalışmada üretilen geopolimerler betonların yüksek fırın cürufu miktarı arttıkça birim hacim ağırlık değerleri de artmıştır. Sancak ve Çoban (2015) olivin atıklarını betonda kullanarak çimentoyla hacimce %5, %10, %20 ve %40

oranlarında yer değiştirip yaptıkları çalışmada, sertleşmiş betonun yoğunluğunda belirli oranlarda düşüş meydana gelmiştir.

Kılıç ve Gök (2021) yaptıkları çalışmada yüksek fırın cürufu kullanmadan hazırladıkları karışıma kıyasla %30 oranında cüruf kullandıkları karışımda birim hacim ağırlıkta en yüksek azalma miktarı, ağırlıkça, kuru ve doymun birim hacim ağırlık değerinde ise yaklaşık %2 oranında azalma olmuştur.

12.2.2. Kütlece su emme ve görünür porozite deney sonuçları

7 ve 28 günlük olan numunelerin suya doymun ağırlıkları ölçüldükten sonra kütleleri sabit oluncaya kadar etüvde kurutulmuştur. Kuru ağırlıkları bulunarak elde edilen kütlece su emme oranı değerleri ile boşluk miktarının belirlendiği porozite değerleri Şekil 12.5 ve Şekil 12.6'da verilmiştir.



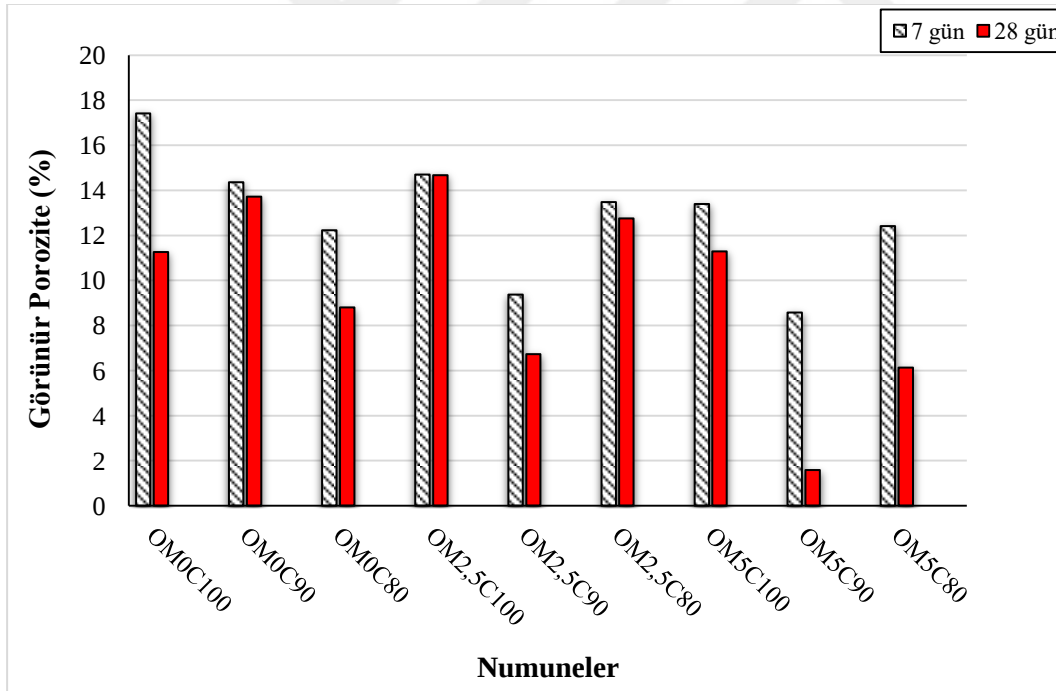
Şekil 12.5. Kütlece su emme değerleri

Şekil 12.5 incelendiğinde 7 günlük olivin içermeyen ve %100 oranında krom cüruf içeren numune aynı oranda krom cürufu ve %2,5 olivin içeren numuneye göre %23 ve %5 olivin içeren numuneye göre ise %29 daha fazla su emme oranına sahip olmuştur.

28 günlük %80 oranında krom cürufu içeren numunelerden %2,5 olivin içeren numune aynı oranda krom cürufu bulunan ve olivin içermeyen numuneye göre %37,5 ve %5 olivin içeren numuneye göre ise %112 oranında daha fazla bir su emme oranına sahip olmuştur. En yüksek su emme değeri olivin içermeyen ve %100 cüruf içeren numunede görülmüştür. Bu durum; cürufun kendi içyapısında bulunan boşluklardan dolayı su emme oranının daha fazla olması ile açıklanabilir. Buna göre; krom cürufu oranı arttıkça su emme oranının arttığı ve atık krom tozu ile olivin miktarının arttıkça su emme oranının azaldığı söylenebilir.

Furlani ve Maschio (2013) olivinin doğrudan işlem görmeden kullanıldığı bir refrakter malzeme üretme amacı ile yaptıkları çalışmada %60 olivin kumu ve %40 kaolin içeriği ile ürettiği numunelerde optimum su emme oranına ulaşmıştır.

Şahan (2006) tarafından yapılan çalışmada çimentoya %17, %33 ve %50 oranlarında yüksek fırın cürufu ikame ederek betonlar üretmiş ve %33 yüksek fırın cürufu eklenen numuneler en iyi su emme oranı sağlamıştır.



Şekil 12.6. Görünür porozite değerleri

Şekil 12.6 incelendiğinde 7 günlük olivin içermeyen %100 oranında krom cürufu içeren OM0C100 numunesi aynı oranda cüruf içeren ve %2,5 oranında olivin içeren OM2,5C100 numunesine göre %18,5, aynı oranda cüruf ve %5 oranında olivin içeren

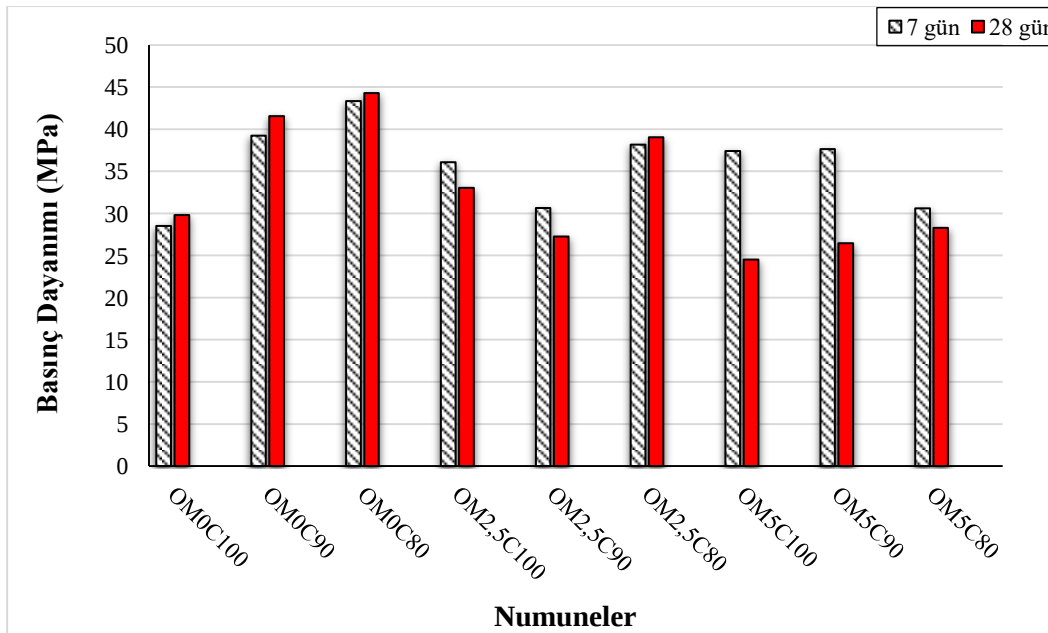
numuneye göre ise %30 oranında daha fazla porozite değerine sahip olmuştur. %80 oranında cüruf içeren numunelerden %2,5 olivin içeren numune %5 olivin içeren numuneye göre %8,6 oranında fazla porozite değerine sahip olmuştur. En yüksek porozite değeri %100 cüruf içeren ve olivin içermeyen numunede görülmüştür. Bu değerlere göre aynı oranda olivin içeren numunelerde cüruf oranı azaldıkça betonun porozite değeri de azaldığı söylenebilir.

Kılıç ve Gök (2021) tarafından yapılan çalışmada çimentoya %10, %20 ve %30 oranlarında krom cürufu ikame edilmiş ve hazırlanan karışımlarda %10 cüruf kullanımıyla betondaki boşluk miktarı minimum duruma getirmiştir. Bu durum betonun mekanik özelliklerini iyileştirmiştir.

Küçüköğlu (2006) yaptığı çalışmada endüstriyel olarak üretilen forsteritik olivin refrakterinin porozite ve soğuk basma mukavemetleri karşılaştırıldığında, porozite miktarındaki artışın malzemenin mukavemetinde azalmaya neden olduğu doğrulanmıştır.

12.2.3. Sülfat etkisi deneyi sonuçları

Seri karışımların küp numuneleri 7 ve 28 gün boyunca %10 oranında Na_2SO_4 içeren çözelti içerisinde bekletilmiştir. Daha sonra etüvde kurutularak basınç deneyi uygulanmış ve Şekil 12.7’de verilen sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 12.7. Numunelerin basınç dayanımı değerleri

Şekil 12.7 incelendiğinde 7 gün sodyum sülfat etkisine maruz bırakılan numunelerden olivin içermeyen ve %80 oranında cüruf içeren OM0C80 numunesi aynı oranda cüruf ve %2,5 oranında olivin içeren OM2,5C80 numunesine göre %13,5, aynı oranda cüruf ve %5 oranında olivin içeren OM5C80 numunesine göre ise %41,6 oranında fazla basınç dayanımına sahip olmuştur.

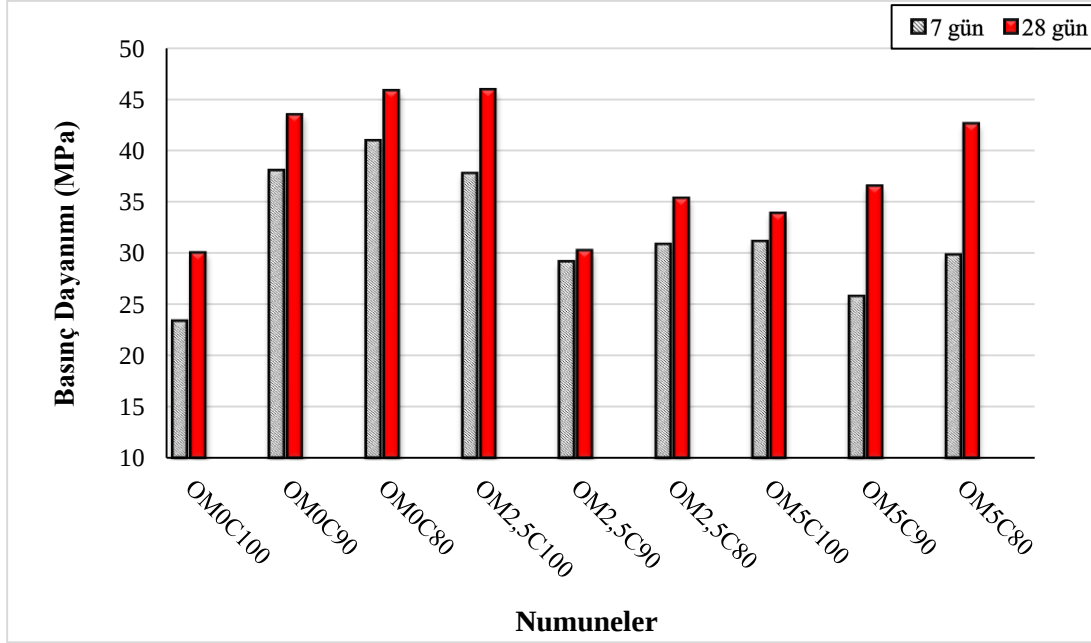
%80 oranında cüruf içeren numunelerden 28 gün sülfat etkisine maruz bırakılan %5 olivin içeren numunenin basınç dayanımı, 7 gün sülfat etkisi sonrası elde edilen dayanıma göre %8, %2,5 olivin içeren numunede %2,2 ve olivin bulunmayan numunede ise %2 oranında bir düşüş olmuştur. Grafikteki verilere göre 28 gün sülfat çözeltisinde bekleyen numuneler arasında en yüksek dayanım olivin içermeyen %80 cüruf içeren numunede ve en düşük dayanım ise %5 olivin ve %100 cüruf içeren numunede görülmüştür.

Kılınç (2003) sodyum sülfat çözeltisi içerisindeki beton numunelerinin 7 günlük basınç mukavemetleri tüm çözelti oranlarında sodyum sülfat kullanılmayan numunelere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Sodyum sülfata maruz bırakılan numunelerin içyapılarında hasar oluşması basınç dayanımlarının daha düşük çıkmasına neden olmuştur.

Yazıcı (2006) yaptığı çalışmada değişik oranlarda yüksek fırın cürufu içeren harçların altı ay boyunca sodyum sülfat çözeltisi içerisinde farklı koşullarda bekletilerek yüksek fırın cürufu kullanımının harçların sülfat dayanıklılığı olumlu yönde etkilenmiştir.

12.2.4. Basınç dayanımı deney sonuçları

7 ve 28 günlük beton numuneleri TS EN 12390-3 standartına uygun olarak basınç dayanımı deneyi yapılmış ve elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 12.8’de verilmiştir.



Şekil 12.8. Basınç dayanım değerleri

Şekil 12.8 incelendiğinde 7 ve 28 günlük olivin içermeyen numunelerde atık krom tozu miktarı arttıkça basınç dayanımı arttığı ve %5 olivin içeren 28 günlük numunelerde de atık krom tozu oranı arttıkça basınç dayanımının arttığı görülmektedir.

Grafikteki değerlere bakıldığında 28 günlük olan numunelerin dayanımları 7 günlük olan numunelerin dayanımlarına göre değişimlerine bakıldığında; olivin içermeyen numunelerin dayanımları sırasıyla %28,5, %14,3, %11,9, %2,5 oranında olivin içeren numuneler %21,6, %3,6, %14,6 ve %5 olivin içeren numunelerin ise %8,7 %41,6, %42,9 oranında basınç dayanımında artış olmuştur.

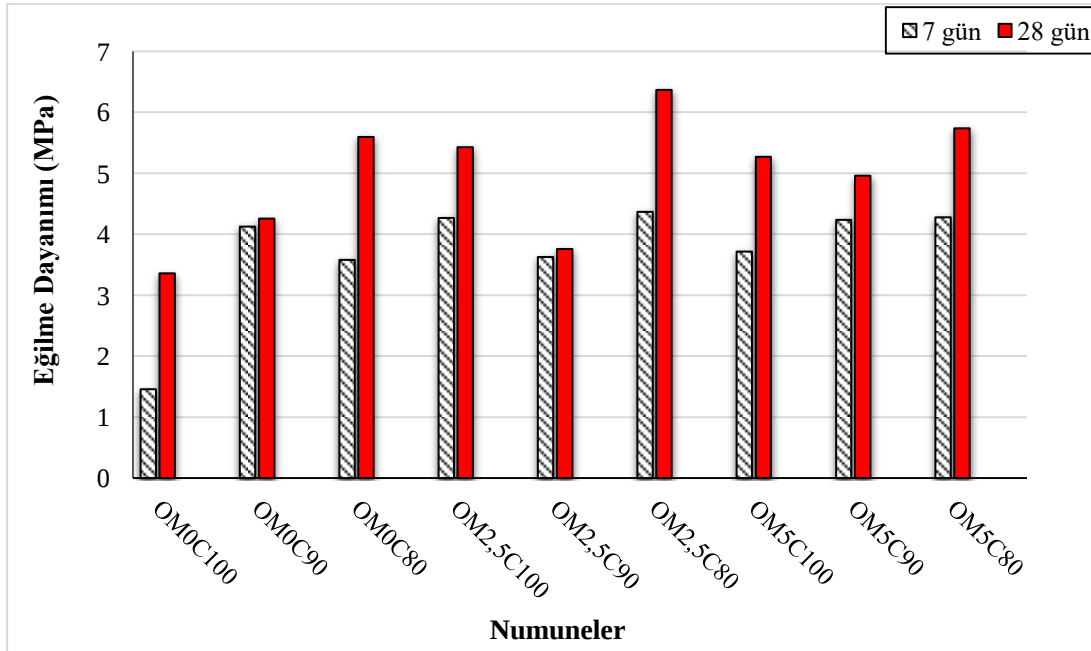
Numuneler içerisinde porozite değeri en yüksek olan numune en düşük basınç dayanımına sahip olmuştur. Çimento ve olivin üzerinde yapılan parçacık boyutu analizine göre; çimentonun 50-80 μm boyutunda olması hidrasyon sürecini hızlandırarak betonun daha hızlı dayanım kazanmasını sağlamıştır. Olivinin ise 45-110 μm boyutunda olması deneyde bağlayıcı olarak kullanılmasına olanak sağlamıştır. Yapılan XRF deneyine göre; karışımlarda kullanılan krom cürufunun, atık krom tozunun ve olivin mineralinin içeriğinde demir ve atık krom tozu miktarının fazla olması numunelerin basınç dayanımının artmasını sağlamıştır.

Karaduman (2010) yaptığı çalışmada çimentoya %15 oranında yüksek fırın cürufu ikame edilerek üretilen beton numuneleri üzerinde yapılan basınç dayanımı deney sonuçları 7. günde 22,51 MPa ve 28. günde 29,93 MPa bulunmuştur.

Zhu ve ark., (2022) tarafından yapılan çalışmada çelik cürufu, fosfojips ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu bağlayıcı olarak kullanıldığı betonun dayanım sonuçlarına bakıldığında harçların 7 ve 28 gün dayanımlarının 17,0 MPa ve 24,0 MPa olduğu, %20 oranında ultra ince cüruf kullanılarak hazırlanan harçların dayanımının ise 33,2 MPa ve 44,9 MPa olduğu görülmüştür. Binici ve ark., (2021) yaptıkları çalışmada ürettikleri demir tozu katkılı beton numunelerinde %20 demir tozu katkılı beton numunesinin basınç dayanımı demir tozu kullanılmayan numunenin basınç dayanımına göre %50 oranında daha fazla bulunmuştur.

12.2.5. Eğilme dayanımı deney sonuçları

7 ve 28 günlük beton kiriş numuneleri üzerinde TS EN 12390-5 standartına uygun olarak eğilme dayanımı deneyi yapılmış ve elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 12.9'da verilmiştir.



Şekil 12.9. Eğilme dayanımı değerleri

Şekil 12.9 incelendiğinde 7 günlük ve aynı oranda cüruf içeren (%80) numunelerden %2,5 olivin içeren OM2,5C80 numunesi olivin içermeyen OM0C80 numunesine göre %22 ve %5 olivin içeren OM5C80 numunesine göre ise %2 daha fazla dayanıma sahip olmuştur. 28 günlük ve aynı oranda cüruf (%80) içeren numunelerden %2,5 olivin içeren numune %5 olivin içeren numuneye göre %11; olivin içermeyen numuneye göre ise %13,8 oranında fazla eğilme dayanımına sahip olmuştur. Krom tozu krom cürufuna göre daha dayanıklı ve demir esaslı mineralleri içerdiğinden eğilme dayanımını arttırmıştır.

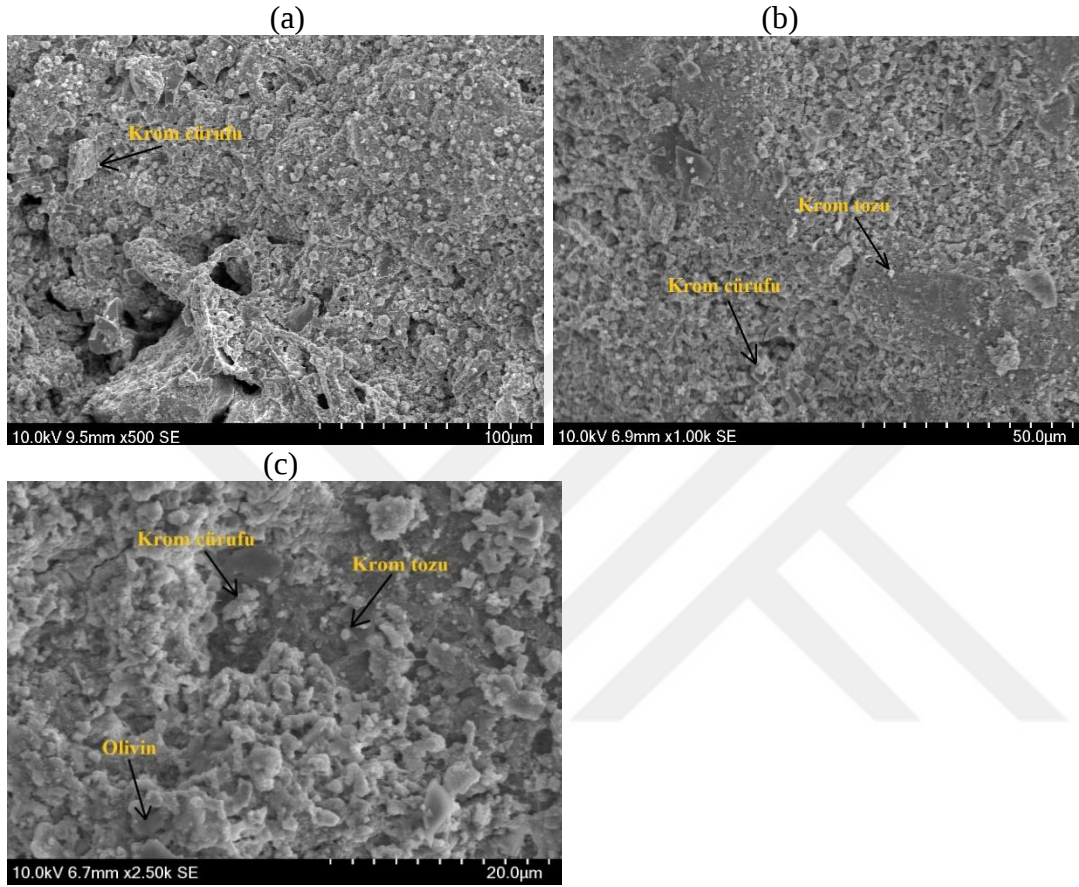
Numuneler içerisinde porozite değeri en yüksek olan numune en düşük eğilme dayanımına sahip olmuştur.

Kaya (2010) tarafından yapılan çalışmada çimentonun %30 azaltıldığı cürufun ise çimentoya hacimsel olarak %30 ve %60 oranlarında eklendiği üretimler karşılaştırıldığında cürufun eklenmesi ile eğilme dayanımının arttığı görülmüştür.

Günel ve ark., (2022) yaptıkları çalışmada geri dönüştürülmüş harç tozunu kullanarak %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında çimento yerine ikame etmiş ve geri dönüştürülmüş harç tozunun %25 oranına kadar çimento yerine kullanılmasını tavsiye etmişlerdir.

12.2.6. SEM-EDS analizi sonuçları

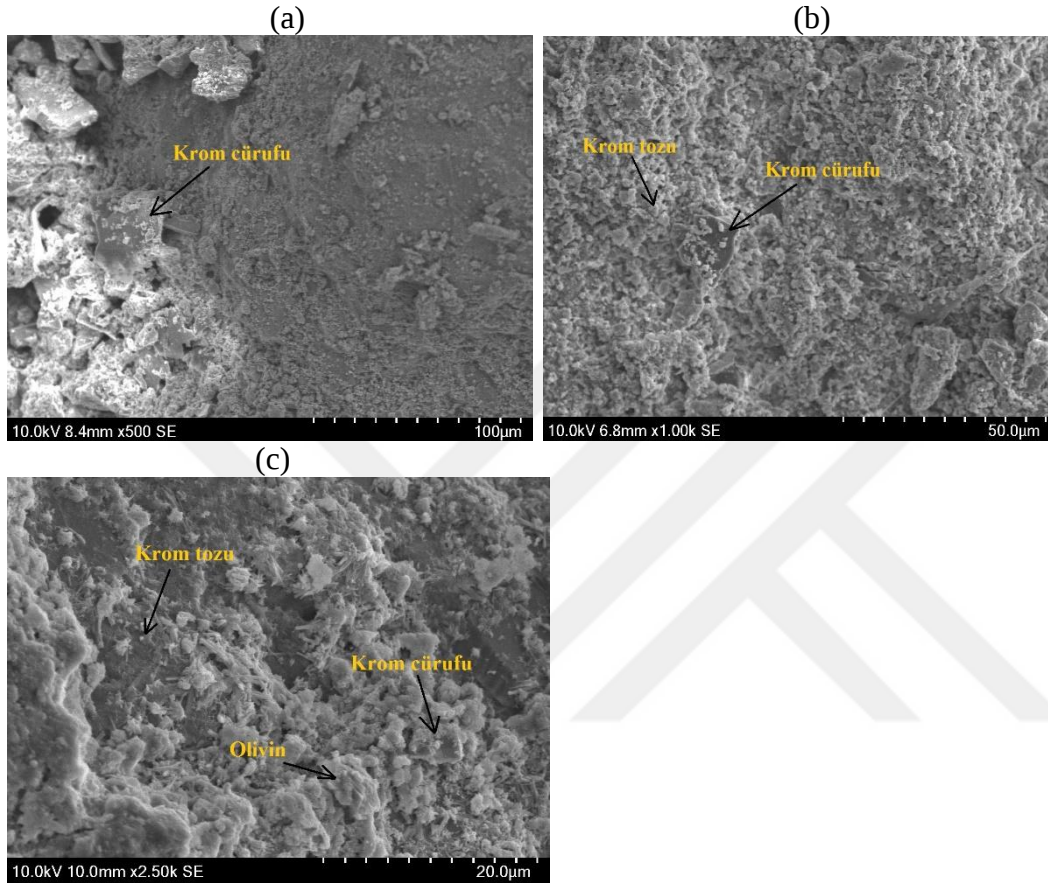
Numunelerin SEM görüntüleri alınırken her numune için 500×, 1000× ve 2500× mikroskop çekim boyutlarında görüntüleme alındı. 7 günlük olan numunelerin görüntüleri Şekil 12.1’de verilmiştir ve OMOC100 numunesinin 500× boyutundaki görüntüsü; a, OMOC80 numunesinin 1000× boyutundaki görüntüsü; b ve OM5C80 numunesinin 2500× boyutundaki SEM görüntüsü c ile gösterilmiştir.



Resim 12.1. 7 günlük OMOC100, OMOC80 ve OM5C80 numunelerinin SEM görüntüleri

Resim 12.1 incelendiğinde numunelerin 7 günlük olması sebebiyle boşluklu bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Magnezyum, silisyum, alüminyum ve cüruf içerisinde az miktarda bulunan atık krom tozunun oksijen elementi ile reaksiyona girip oksit oluşturarak düzenli bir şekilde yayılım göstermiştir. Köşeli yapısıyla olivin, cüruf ve atık krom tozu içerisinde de bulunan Fe minerali numunede düzenli dağılım göstermiştir.

28 günlük olan numuneler ise Şekil 12.2’de verilmiştir ve OMOC100 numunesinin 500× boyutundaki görüntüsü; a, OMOC80 numunesinin 1000× boyutundaki görüntüsü; b ve OM5C80 numunesinin 2500× boyutundaki SEM görüntüsü c ile gösterilmiştir.



Resim 12.2. 28 günlük OMOC100, OMOC80 ve OM5C80 numunelerinin SEM görüntüleri

Resim 12.2 incelendiğinde numunelerin 28 günlük olmaları sebebiyle boşluklu yapının çok daha az olduğu ve oksit ile bileşik oluşturmayan serbest elementler daha az görülmektedir. Olivin minerali ve cüruf içerisinde bulunan magnezyum ve alüminyum elementi oksijen ile MgO ve Al_2O_3 oksiti oluşturarak numune içerisinde düzenli olarak yayılım göstermiştir. Görüntüler incelendiğinde karışımda agrega olarak kullanılan krom cürufu ve atık krom tozu, çimento ve olivin ile yeterli birleşimi sağladığından agrega ve matris arasındaki ara yüzey geçiş bölgesinde yoğun bir yapı görülmektedir. Karışımlarda agrega yerine krom cürufunun içerdiği demir ve atık krom tozu numunelerin basınç dayanımının artmasını sağlamıştır.

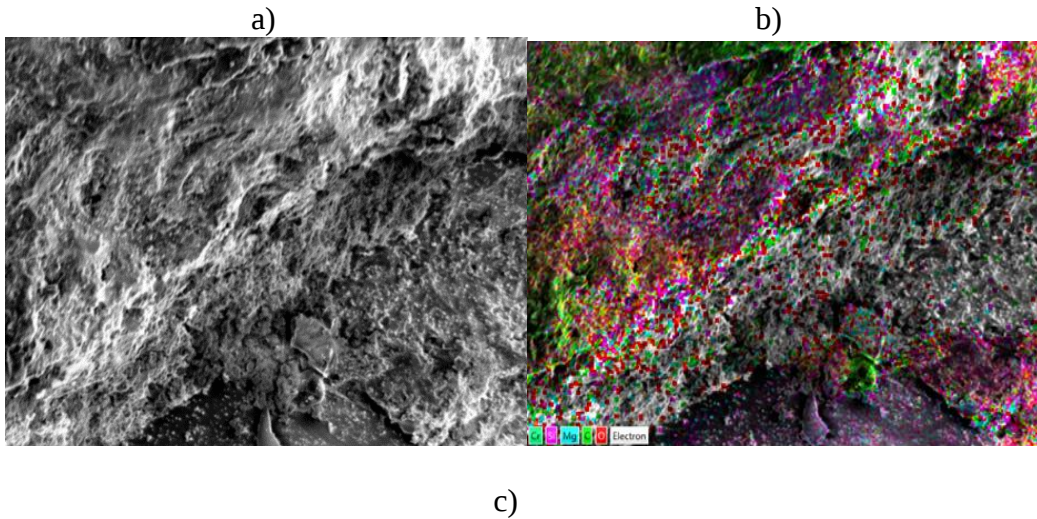
Derinpınar (2021) çalışmasında cüruf katkılı beton numunelerinin içyapı kimyasal analizlerinde %20 CaO, %14 SiO₂, %11 Na₂O, %13 Al₂O₃, %26 Fe₂O₃ elementleri tespit edilmiştir.

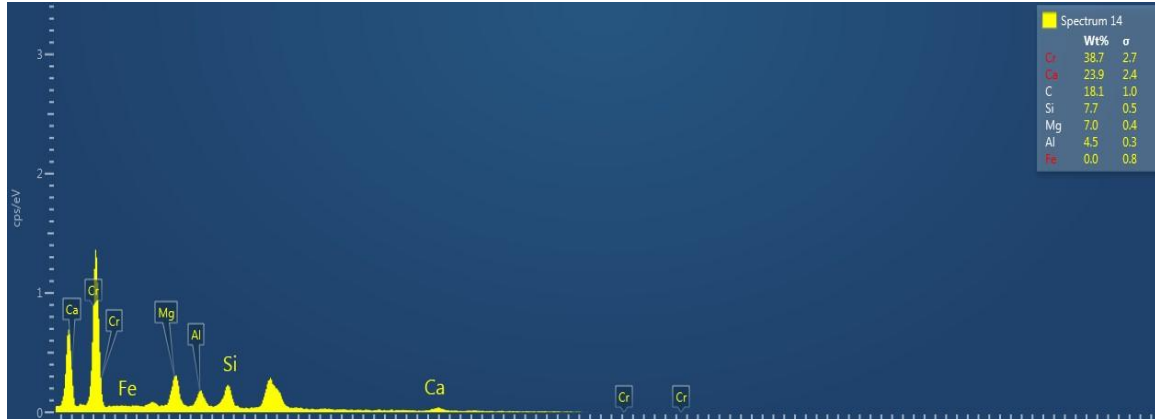
Sarıhan ve ark., (2006) çalışmalarında kullandığı yüksek fırınlardan çıkan cürufların ortalama %40 SiO₂, %35 CaO, %12 Al₂O₃, %0,20 FeO, %8 MgO, %1,5 MnO %0,80 K₂O ve %0,58 TiO₂ içerdiğini tespit etmişlerdir.

Şahin ve Koçak (2022) yaptıkları çalışmada çimentoya %5, %10, %15 ve %20 oranlarında yüksek fırın cürufu ikame edilmesiyle oluşturulan beton numunelerinin kimyasal analizlerinde %19,8 SiO₂, %5,38 Al₂O₃, %3,35 Fe₂O₃, %63,39 CaO ve %1,35 MgO tespit etmişlerdir.

Uğurlu (2020) tarafından yapılan çalışmada yüksek fırın cürufu bağlayıcılı beton numunelerin SEM görüntülerine bakıldığında çimento dozajı arttıkça beton numunelerin içyapısının daha yoğun olduğu ayrıca sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin SEM görüntülerinde sülfat etkisiyle numunelerin içyapılarında çatlakların oluştuğu ve boşlukların meydana geldiği görülmüştür.

SEM görüntüleri alınan numuneler aynı cihaz içerisinde EDS deneyine tabi tutularak numunelerin elementel kompozisyonu tanımlanmıştır. Analizi yapılan 7 günlük OMOC100 numunesi Resim 12.3 (a)'da numunenin elementel haritası (b)'de, kütlece elementel dağılımı (c)'de, elementlerin atomik ve kütlece yüzdeleri ise Tablo 12.1'de verilmiştir.





Resim 12.3. 7 günlük OMOC100 numunesinin EDS analiz sonuçları

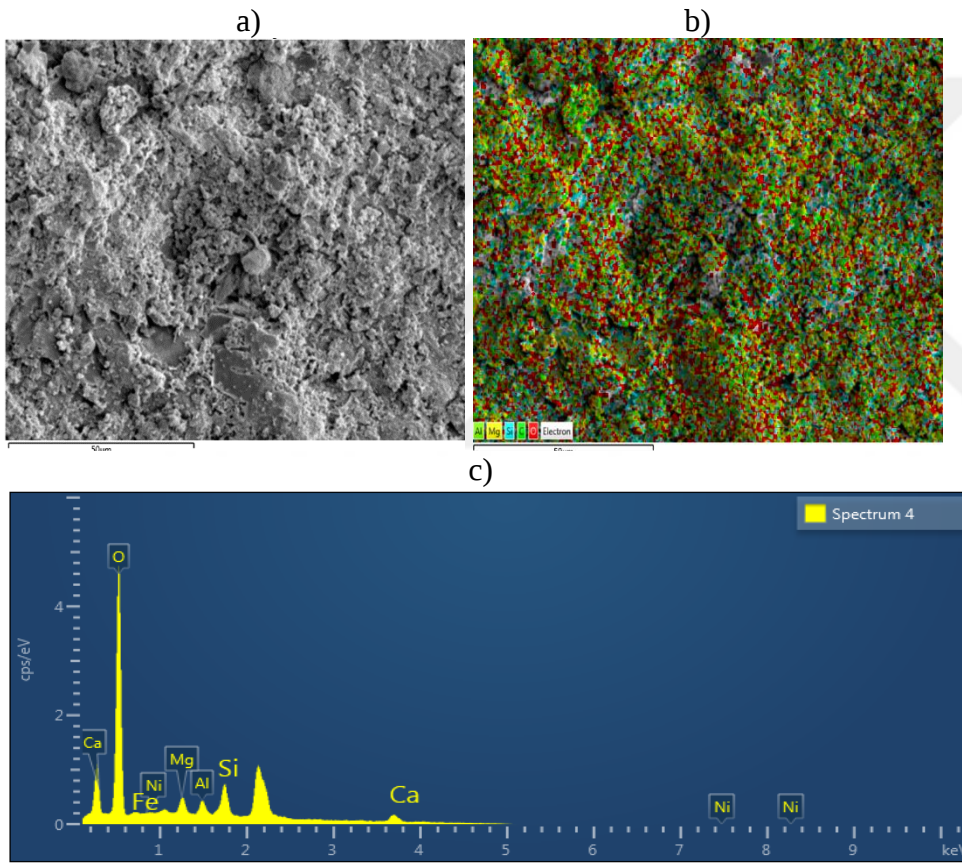
Tablo 12.1. 7 günlük OMOC100 numunesinin atomik ve kütlece yüzdeleri

Element	Atomik (%)	Kütlece Yüzdesi (%)
Cr	20,66	38,38
Ca	17,13	24,54
C	41,97	18,01
Si	7,64	7,66
Mg	7,95	6,91
Al	4,64	4,47
Fe	0,01	0,02
Toplam	100,00	100,00

7 günlük OMOC100 numunesinin EDS analizi sonuçları incelendiğinde Cr, Ca ve Al elementlerinin yoğun olduğu görülmektedir. Ca ve Al elementleri karışım içerisinde bağlayıcı bir yapı oluşturmuştur. SEM görüntülerindeki agrega ve matris arasındaki ara yüzey geçiş bölgesi bir yapı görünümü de bunu doğrulamaktadır.

Ünal ve ark., (2020) yaptıkları çalışmada ferrokrom cürufunun mikro yapısını incelemek için yaptığı analizde cüruf örneklerinin yüzeylerinin gözenekli yapıda olduğu ve çok yüksek miktarda Ni, Cr ve Fe elementleri içerdiği tespit edilmiştir.

28 günlük OM5C80 numunesinin EDS analizi yapılan kısmı Resim 12.4 (a)'da numunenin elementel haritası (b)'de, kütlece elementel dağılımı (c)'de, elementlerin atomik ve kütlece yüzdeleri ise Tablo 12.2'de verilmiştir.



Resim 12.4. 28 günlük OM5C80 numunesine yapılan EDS analizi

Tablo 12.2. 28 günlük OM5C80 numunesinin atomik ve kütlece yüzdeleri

Element	Atomik (%)	Kütlece Yüzdesi (%)
---------	------------	---------------------

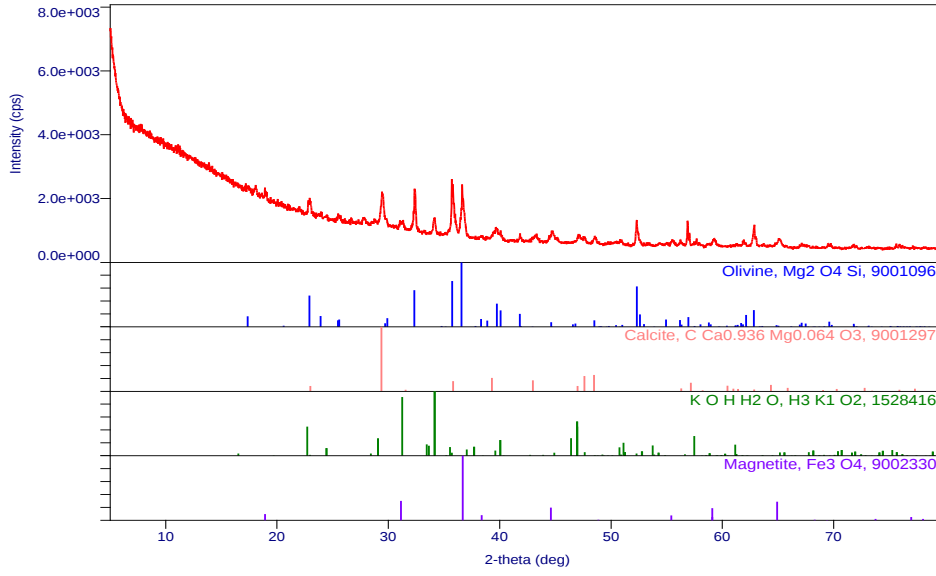
O	42,55	57,98
Ca	37,68	20,50
C	6,15	11,17
Si	6,96	5,40
Mg	2,44	2,19
Al	2,69	2,17
Fe	1,27	0,50
Ni	0,25	0,09
Toplam	100,00	100,00

28 günlük OM5C80 numunesinin EDS sonuçları incelendiğinde Ca ve O elementlerin daha yoğun olduğu gözlenmiştir. Agregaya yerine kullanılan krom cürufu ve tozu içerisindeki mineraller ile bağlayıcı olarak kullanılan olivin içerdiği minerallerin kristal yapıları (YMK, HMK) farklılığı agregaya ile bağlayıcı arasındaki bağlayıcılığı arttırmıştır. Ayrıca atık krom tozu ve olivinin içerdiği krom ve demir minerali ile çalışmanın amaçlarından olan EM kalkanlama etkinliği sağlanmıştır.

Sivri (2021) çalışmasında kullandığı olivinin iç yapısının çeşitli bölgelerinde elementlerin bölgesel dağılımlarını incelemiştir. EDS deneyi ile olivinin bir kesitinden alınan kimyasal içerik; O, %44,10; Mg, %31,06; Al, %0,05; Si, %18,45; Ca, %0,19; Fe, %6,15 şeklinde bulunmuştur.

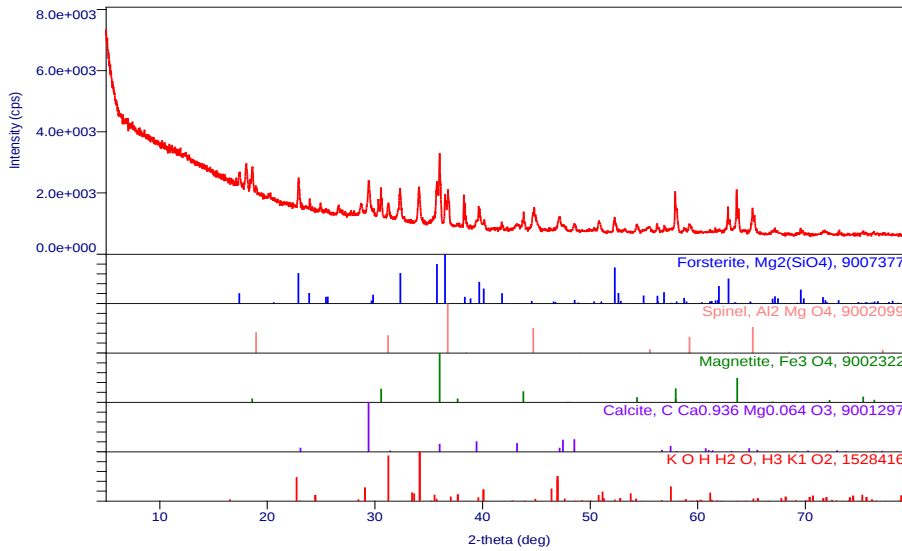
12.2.7. XRD analizi sonuçları

Deney karışımlarından OM0C100, OM0C80 ve OM5C80 numuneleri ve olivin minerali üzerinde XRD analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 12.10, Şekil 12.11, Şekil 12.12 ve Şekil 12.13’de verilmiştir.



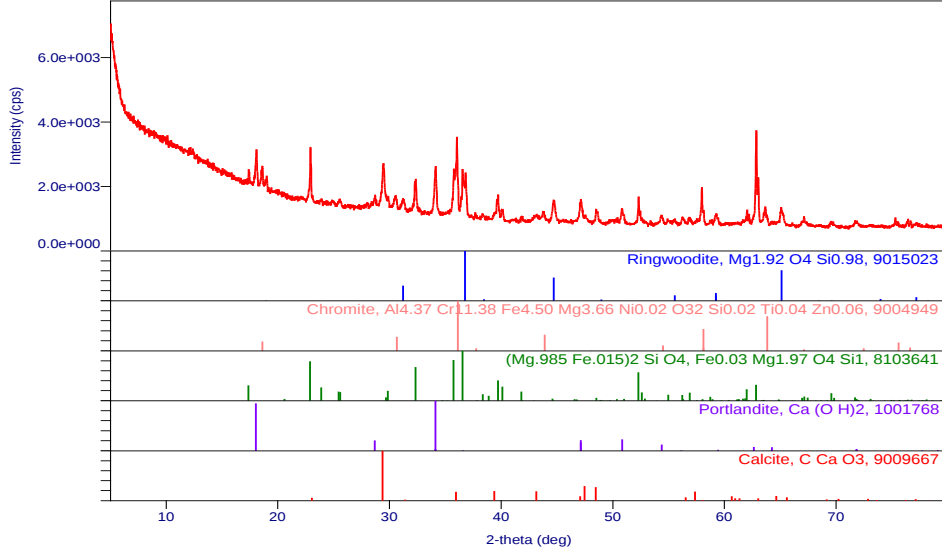
Şekil 12.10. OMOC100 numunesine ait XRD analiz grafiği

Şekil 12.10 incelendiğinde, OMOC100 numunesinin XRD analizinde Mg_2O_4 oksiti, Kalsit, $KOHH_2O$ bileşikleri ve Magnetit minerali görülmüştür.



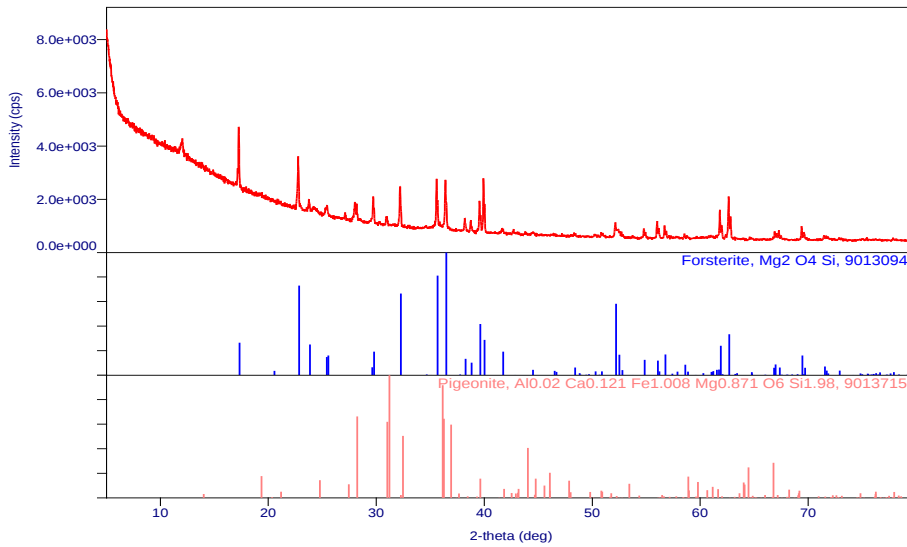
Şekil 12.11. OMOC80 numunesine ait XRD analiz grafiği

Şekil 12.11 incelendiğinde, OM0C80 numunesinin XRD analizinde $\text{KOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ bileşiği, Forsterit, Spinel, Magnetit ve Kalsit mineralleri tespit edilmiştir.



Şekil 12.12. OM5C80 numunesine ait XRD analiz grafiği

Şekil 12.12 incelendiğinde, OM5C80 numunesinin XRD analizinde SiO_4 bileşiği, Ringwoodit, Kromit, Portlandit ve Kalsit mineralleri görülmüştür.



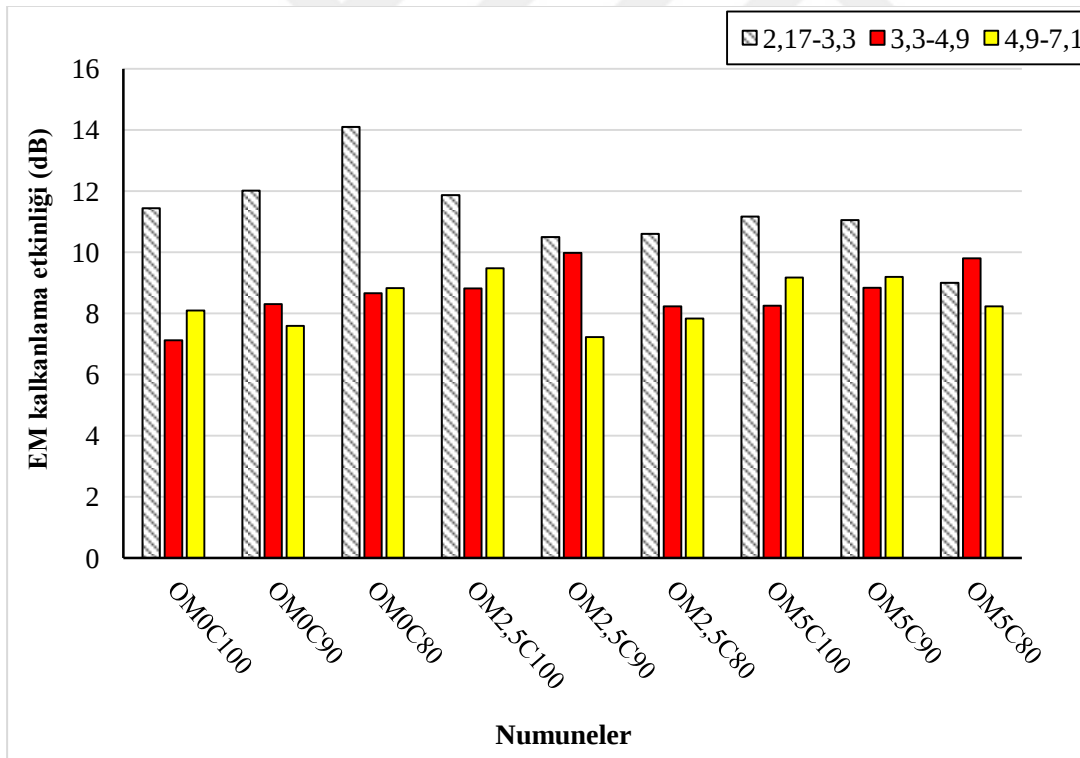
Şekil 12.13. Olivin mineraline ait XRD analiz grafiği

Şekil 12.13 incelendiğinde Forsterit ve Pigeonit mineralleri gözlenmiştir. Yalçinyiğit (2021) yüksek fırın cürufunu çimento yerine belli oranda kullanarak yaptığı çalışmada numunelerin XRD analizinde C-H, etrenjit ve C-S-H yapıları tespit edilmiştir.

Bosna (2017) tarafından yapılan krom katkılı numunelerde yapılan XRD analizine göre $\text{LiGa}_5\text{O}_8:\text{Cr}^{+3}$ yapısının oluştuğu desteklenmiştir ve LiGa_5O_8 yapısı ile uyumludur. Pikler daha küçük açılara doğru kaydığı ve LiGa_5O_8 kristal yapısında galyum atomlarının yerini krom atomlarının yer alması sonucunda atomlar arası uzaklık değişmiştir.

12.2.8. Elektromanyetik kalkanlama deneyi sonuçları

Seri karışımlarda üretilen tüm numuneler 3 farklı frekans aralığında elektromanyetik dalgalara maruz bırakılarak EM kalkanlama etkinliği miktarları Şekil 12.14’de dielektrik sabiti değerleri ise Tablo 12.3’de verilmiştir.



Şekil 12.14. Elektromanyetik kalkanlama değerleri

Şekil 12.10 incelendiğinde tüm frekans aralıklarında; olivin bulunmayan numunelerde en yüksek EM kalkanlama etkinliği %20 oranında atık krom tozu içeren OM0C80

numunesinde, %2,5 oranında olivin bulunduran numunelerde en yüksek EM kalkanlama etkinliği %100 oranında krom cürufu içeren OM2,5C100 numunesinde, %5 oranında olivin bulunduran numunede ise en yüksek EM kalkanlama etkinliği %100 oranında cüruf içeren OM5C100 numunesinde olmuştur.

Frekans aralıklarındaki en yüksek EM kalkanlama değerlerine bakıldığında; 2,17-3,3 aralığında olivin bulunmayan ve %20 oranında atık krom tozu içeren numunede 3,3-4,9 GHz aralığında %2,5 olivin ve %10 atık krom tozu içeren numunede ve 4,9-7,1 frekans aralığındaki en yüksek EM kalkanlama değeri %2,5 olivin ve %100 krom cürufu içeren numunede görülmüştür. Tüm frekans aralıklarındaki en yüksek EM kalkanlama değeri ise olivin içermeyen ve %20 atık krom tozu içeren numunede görülmüştür.

Tablo 12.3. Numunelerin dielektrik sabiti değerleri

Numuneler	Frekans Aralıkları (GHz)		
	2,17-3,3	3,3-4,9	4,9-7,1
	Dielektrik Sabiti Değerleri		
OMOC100	4,89	2,35	2,81
OMOC90	5,10	2,30	2,51
OMOC80	5,29	2,73	2,81
OM2,5C100	5,35	2,53	2,63
OM2,5C90	5,18	2,92	2,35
OM2,5C80	5,04	2,27	2,75
OM5C100	5,12	2,29	3,06
OM5C90	5,13	2,34	2,84
OM5C80	4,97	2,46	2,63

Bir elektromanyetik dalganın dielektrik sabiti, verilen yönde yayılan dalganın genliğindeki değişimin bir ölçüsüdür. Numuneler elektromanyetik dalgaları, sahip oldukları dielektrik değerleri sayesinde soğurmuşlardır. Dielektrik değerleri elektromanyetik dalganın malzeme içindeki yayılım hızını etkiler ve bu değer malzeme içinde depolanan

elektrostatik enerjinin bir ölçüsüdür. Tablo 12.3'e bakıldığında 2,17-3,3 GHz frekans aralığındaki en yüksek dielektrik değeri %2,5 olivin ile atık krom tozu içermeyen OM2,5C100 numunesinde, 3,3-4,9 GHz frekans aralığındaki en yüksek dielektrik değeri %2,5 olivin ve %10 atık krom tozu içeren OM2,5C90 numunesinde görülmüş ve 4,9-7,1 GHz frekans aralığındaki en yüksek dielektrik değeri ise %5 olivin içeren ve atık krom tozu bulunmayan OM5C100 numunesinde görülmüştür. OM2,5C100 numunesi OM2,5C90 numunesinden %83,2 ve OM5C100 numunesinden ise %74,8 oranında fazla bir değere sahip olmuştur.

2,17-7,1 frekans aralıklarındaki en yüksek dielektrik değeri ise %2,5 olivin bulunan ve atık krom tozu içermeyen OM2,5C100 numunesinde görülmüştür.

Akyıldırım (2011) yaptığı çalışmada beton içeriğindeki barit minerali miktarının %50 ve %100 oranlarında artması sonucunda radyasyon zayıflatma özellikleri belirgin bir şekilde değişmiştir.

Özen (2013) demir cevheri, çelikhane cürufu, tufal ve barit kullanarak yaptığı çalışmada çelikhane cürufunun yüksek radyasyon geçirme özelliğine sahip olduğu, tufal agregası ile üretilen numunenin yüksek EM kalkanlama etkinliği özelliği olduğu ve deneydeki agregalar ile üretilen betonların kalınlığı arttıkça EM kalkanlama etkinliği özelliklerinin de arttığı belirlenmiştir.

Demirci (2018) magnetit, barit ve krom agregaları kullanarak yaptığı çalışmada betonun birim hacim ağırlığı arttıkça EM kalkanlama etkinliği değerinin arttığını ve en yüksek kalkanlama etkinliği değeri magnetit agregasının kullandığı numunelerde elde edilmiştir.

Gümüş ve ark., (2020) kalker, barit, siderit minerallerini agrega olarak kullanıp 3 çeşit beton numunesi üretmişlerdir. Bu numunelerin gama ışını lineer azaltma katsayısı değerleri belirlenmiş ve barit ile üretilen numunenin radyasyonu en fazla soğurduğu gözlemlenmiştir.

13. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, krom cürufunu ve atık krom tozunu agrega olarak olivin mineralini de çimento ağırlığının belirli oranlarında ikame edip kullanarak olivin ve atık krom tozunun çimento esaslı kompozitlerin mühendislik özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

Araştırma kapsamında farklı oranlarda krom cürufu ve olivin minerali içeren beton numuneleri üzerinde bazı fiziksel, mekanik deneyler ve sülfat etkisi deneyi yapılmıştır. Ayrıca mikroyapı özellikleri tayin edecek analizlerin yanısıra atık krom tozu ve olivin mineralinin kullanımı ile üretilen numunelerde elektromanyetik kalkanlama deneyi yapılmış ve EM kalkanlama etkinliği değerleri (dB) ile dielektrik sabiti değerleri bulunmuştur. Yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Numuneler, işlenebilirlik açısından karşılaştırıldığında; numunelerde olivin miktarı arttıkça çökme miktarının arttığını dolayısıyla olivinin betonun işlenebilirliğini arttırdığı söylemek mümkündür.

- Krom tozu ve olivin oranının artışıyla taze betonun yoğunluğunda doğrusal bir değişim görülmüştür. En fazla yoğunluk %2,5 olivin ve %20 atık krom tozu içeren OM2,5C80 numunesinde görülmüştür.

- En yüksek kütlece su emme ve porozite değerleri, olivin içermeyen ve agrega olarak %100 oranında krom cürufu içeren numunelerde görülmüştür. Buna göre; krom cürufu oranı arttıkça su emme oranının ve porozitenin arttığı ve atık krom tozu ile olivin miktarının arttıkça su emme oranının ve porozitenin azaldığı söylenebilir.

- Beton numuneleri 28 gün boyunca %10 oranında sodyum sülfat içeren Na_2SO_4 çözeltisine maruz bırakılmışlardır ve sodyum sülfat çözeltisinin 28 gün sürede betonun dayanımında negatif bir etki yaptığı belirlenmiştir. En düşük mukavemet 28 günlük OM5C100 numunesinde görülmüştür.

- Beton numunelerden elde edilen basınç dayanımı değerlerine bakıldığında genel olarak olivin minerali ve atık krom tozu miktarı arttıkça basınç dayanımlarında da artış eğilimi görülmüştür. Bunun dışında numunelerin neredeyse tamamı hedef basınç dayanımı olan C30 beton sınıfının üzerinde kalmışlardır. En yüksek basınç dayanımı %2,5 olivin ve %100 oranında krom cürufu içeren 28 günlük OM2,5C100 numunesinde görülmüştür.

- Beton numunelerden elde edilen eğilme dayanımı değerlerine bakıldığında genel olarak olivin minerali ve atık krom tozu miktarı arttıkça eğilme dayanımlarında da artış eğilimi görülmüştür. En yüksek eğilme dayanımı 7 günlük %2,5 olivin ve %20 oranında atık krom tozu içeren OM2,5C80 numunesinde görülmüştür.

- Beton numunelerine genel olarak bakıldığında en iyi mekanik ve fiziksel özellikler olivin minerali ve atık krom tozu içeren numunelerde görülmüştür.

- SEM analizinde elde edilen görüntülerde 7 günlük numunelerin boşluklu bir yapıya sahip olduğu ve ara yüz bölgesindeki bağ özelliklerinin yeteri kadar sağlanmadığı görülmektedir. 28 günlük numunelerde ise boşluklu yapının çok daha az olduğu ve bileşik oluşturmayan serbest elementlerin daha az olduğu görülmektedir.

- Beton numunelerinde yapılan EM kalkanlama deneyine bakıldığında frekans aralığında beton içeriğindeki atık krom tozu ve olivin miktarının artması sonucunda EM kalkanlama değerlerinde bir artış gözlenmiştir. XRF analizi ile kimyasal analizi yapılan atık krom tozu ve olivin minerallerinin içyapılarında Fe_2O_3 , Cr_2O_3 ve MnO bileşiklerine sahip olmaları kalkanlama değerlerine olumlu yansımıştır.

- Tüm frekans aralıklarındaki en yüksek EM kalkanlama etkinliği değeri %0 olivin ve %20 atık krom tozu içeren numunede görülmüştür.

Genel bir değerlendirilme yapıldığında, olivin mineralinin betonda %2,5-%5 arasında çimento ile ikame edilerek, atık krom tozunun %20 krom cürufunun ise %80 oranında agrega yerine kullanımı betonun mekanik, fiziksel özelliklerini ve bu çalışmanın ana amaçlarından olan EM kalkanlama özelliğini olumlu etkileyecektir. Bu çalışma ile beton üretiminde kullanılan agrega ve çimento üretimi için kullanılan doğal kaynakların tüketimini azaltıp verimli kullanarak yine çimento üretimi için harcanan enerjinin tasarrufu sağlanacaktır. Beton içerisine değişik oranlarda olivin ve atık krom tozunun eklenmesiyle, normal yapıdaki betona EM kalkanlama özelliği kazandırılıp nükleer santrallerde, sağlık sektöründe ve doğrudan radyasyona maruz kalınan yerlerde kullanarak inşaat sektörüne yenilik ve sürdürülebilirlik getirilecektir.

Bu çalışmada betonda kullanılan olivin mineralinin ve atık krom tozunun yapılacak analizler ile maliyet çalışması ve ekonomiklik açısından değerlendirilmesi ileri çalışmalar için önerilebilir.

KAYNAKLAR

- Acar, İ.,** 2021. Investigation of ferrochromium wastes for their hazardous hexavalent chromium content. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 27:204-209.
- Acar, İ.,** 2021. Olivinin refrakter hammaddesi olarak kullanımı için demir içeriğinin manyetik ayırma ile azaltılması. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 60:41-49.
- Akakın, T., Kılınç, C., Işık, A., Zengin, H.,** 2020. Hazır beton sektörü ve beton kullanımındaki gelişmeler. *Türkiye Hazır Beton Birliği*, 1-13.
- Akakın, T., Zengin, H., Öztürk, A.,** 2011. Hazır beton sektörü ve beton kullanımındaki gelişmeler. *Türkiye Hazır Beton Birliği*, 70-76.
- Akçay, O., Çullu, M.,** 2022. Farklı karışım özelliklerine sahip betonların sülfat dirençlerinin belirlenmesi. *Alkü Fen Bilimleri Dergisi*, 4(1):21-31.
- Akyıldırım, H.,** 2011. Ağır betonların radyasyon zırhlama özelliklerinin araştırılması. *Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta*, 108s.

- Altuğ, C.,** 2019. Türkiye'deki olivin mineralinin fiziksel ve optiksel özelliklerinin farklı tekniklerle incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa 57s.
- Alwaeli, M.,** 2017. Investigation of gamma radiation shielding and compressive strength properties of concrete containing scale and granulated lead-zinc slag wastes. *Journal of Cleaner Production*, 166, 157-162.
- Arguhan, Z.,** 2017. Yapı elemanlarında kullanılan atık lastiklerin ısı performansının incelenmesi. *Mühendislik dergisi*, 3:621-630.
- ASTM C-1012.** 1987. Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to sulphate solution.
- Ateş, T.K.,** 2022. Yapay zeka algoritmalarında kullanılan tahmin metotları ile çimento ve betonunun basınç dayanımına etki eden faktörlerin incelenmesi. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 34(2):242-261.
- Biçer, A.,** 2020. Make use of volcanic slag as aggregate in the production of concrete. *Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi*, 2(2):337-347.
- Binici, H., Eken, M., Aksoğan, O.,** 2016. Cüruf, uçucu kül, silis kumu ve pomza esaslı geopolimerlerin fiziksel, mekanik ve radyasyon geçirgenlik özellikleri. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(2):12-25.
- Binici, H., Sevinç, H.A., Durgun, Y.M.,** 2011. Pomza, barit, kolemanit ve yüksek fırın cürufu katkılı harçların dayanımı ve sülfat direnci. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1):37-51.
- Birinci, H., Kaplan, H., Temiz, H., Görür, B.E.,** 2008. Yüksek fırın cürufu ve bazaltik pomza katkılı betonların bazı durabilite özellikleri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(3):309-317.
- Bosna, S.,** 2017. Krom katkılı lityum spinal malzemelerde kızılötesi fosforesans özelliklerinin geliştirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 77s.
- Canpolat, M., Beycioğlu, A., Morova, N., Çetin, S., Çetin, H.M.,** 2021. Atık olivin mineralinin asfalt betonunda filler olarak kullanımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2:555-566.
- Cheng, X., Tian, W., Gao, J., Gao, Y.,** 2022. Performance evaluation and lifetime prediction of steel slag coarse aggregate concrete under sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 344:128203.
- Çakır, Ö., Sayaca, S.,** 2021. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren geri kazanılmış agregalı betonların fiziksel ve mekanik özellikleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(2):939-952.

- Çelik, Ö., Yurter G., Kan, S., Yeprem, H.A., 2004.** Farklı puzolanik katkıların çimento harçlarının mekanik özellikleri üzerine etkisi. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 2:147-154.
- Çoban, Ö., 2014.** Krom ve olivin atıklarının betonda kullanımının durabilite özelliklerine etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 147s.
- Das, P., Cheela, S.R.V., Mistri, A., Chakraborty, S., Dubey, B., Barai, V. S., 2022.** Performance assessment and life cycle analysis of concrete containing ferrochrome slag and fly ash as replacement materials - a circular approach. *Construction and Building Materials*, 347:128609.
- Dayı, M., Aruntaş, Y.H., Çavuş M., Şimşek, O., 2013.** Zeolit, uçucu kül ve atık cam malzemelerin portland kompoze çimento üretiminde kullanılabilirliğin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 3:491-499.
- Demir, İ., 2009.** Aynı oranlarda ikame edilen silis dumanı ve uçucu külün betonun mekanik özelliklerine etkisi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 1(2,1):1-7.
- Demirci, M., 2018.** Pirit, krom ve magnetit agregalı ağır betonların mekanik ve radyasyon soğurma özelliklerinin tayini. *Yüksek Lisans Tezi*, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize, 62s.
- Demiryürek, E.B., 2007.** Türkiye’de hazır beton sektörü ve sektördeki büyüme. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi. İstanbul, 189s.
- Derinpınar, N.A., 2021.** Cam tozu katkılı ve yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonların yangın dayanımının araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, İnönü Üniversitesi, Malatya, 94s.
- Dubrovskii, V.B., Krasnoyarov, N.V., Kulakovskii, M.Y., Pergamenschik, B.K., Pinkhasik, M.S., Savitskii, V.I., 1965.** Use of concretes for high-temperature shielding of nuclear reactors. *Atomnaya Energiya*, 19,6:524-529.
- Elmi, M.S., 2022.** Cüruf kullanımının beton basınç dayanımı etkisinin deneysel incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Çankırı, 92s.
- Furlani, E., Maschio, S., 2013.** Mechanical properties and microstructure of fast fired tiles made with blends of kaolin and olivine powders. *Ceramics International*, 39:9391-9396.
- Gudainiyan, J., Kishore, K., 2022.** A review on cement concrete strength incorporated with agricultural waste. *Materials Today:Proceedings*,71.
- Gülan, L., Yıldız, S., Keleştemur, O., 2016.** Atık mermer tozu ve cam lif katkılı betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine karbonatlaşmanın etkisi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2):189-200.

- Gümüş, M., Demir, Ş., Sevim, Ö.,** 2020. Agregat tipinin ağır betonların radyasyon soğurma özelliklerine etkisi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 12(2):777-786.
- Günel, G., Alakara, H.E., Sevim, Ö., Demir, İ.,** 2022. Geri dönüştürülmüş çimento harç tozunun çimento bağlayıcılı kompozitler üzerindeki etkisi. *Journal of Polytechnic*.
- Gürbüz, G., Aydın, F.,** 2021. Agregat kil Oranının betonun mekanik özelliklerine etkilerinin araştırılması. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 10(1):144-149.
- Hattab, M., Hachemi, S., Ajlouni, M.F.,** 2021. Evaluating the physical and mechanical properties of concrete prepared with recycled refractory brick aggregates after elevated temperatures exposure. *Construction and Building Materials*, 311:125351.
- Jiang, Y., Ling, T.C., Shi, C., Pan, Y.S.,** 2018. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete - a review. *Resources Conservation and Recycling*, 136:187-197.
- Kan Y.C., Pei K.C., Chang C.L.** 2004. Strength and fracture toughness of heavy concrete with various iron aggregate inclusions. *Nuclear Engineering and Design*, 228(1-3):119-127.
- Kapkaç, F.,** 2022. Çimento çeşitleri, özellikleri, hammaddeleri ve üretim aşamaları. *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, 33:223-232.
- Kara, C., Yazıcıoğlu, S.,** 2016. Mermer tozu atığı ve silis dumanının betonun karbonatlaşmasına etkisinin araştırılması. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2):191-202.
- Karaduman, O.,** 2010. Yüksek fırın cürufunun betonun perfonmasına ve klor geçirimliliğine etkilerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 65s.
- Karalar, M., Konak, S.,** 2019. Granüle yüksek fırın cürufu ve taban külü ince agregaları ile üretilmiş betonun gerilme şekil değiştirme davranışının incelenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(3):1119-1141.
- Karapınar, S.I.,** 2021. A comparative study on the sodium sulfate resistance of concrete with the supplementary cementitious materials. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1):241-246.
- Kaya, H.,** 2010. Yüksek fırın cürufu katkılı betonda su/çimento oranının etkinlik katsayısına ve kırılma parametrelerine etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 100s.
- Kılıç, İ., Gök, G.S.,** 2021. Yüksek fırın cürufu katkılı silindirle sıkıştırılmış betonların özellikleri. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(4):1077-1087.

- Kılınç, K.**, 2003. Beton karışım suyundaki magnezyum sülfat, sodyum sülfat ve sodyum sülfür tuzlarının taze ve sertleşmiş çimento harcı özelliklerine etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 100s.
- Kızıltan, B., Doğan U.D.**, 2021. Çimento sektöründe karbon ayak izlerinin raporlanması amacıyla bir çerçeve önerisi. *Çağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 1:40-58.
- Koç Keskin Kılınç M.**, 2019. Alkali aktive edilmiş harç üretiminde krom cürufu ve atık mermer tozunun değerlendirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 64s.
- Korkmaz V.A.**, 2019. Yozgat yöresi tüflerinin çimento katkısı olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi. *Yerbilimleri Dergisi*, 3:253-267.
- Küçüköğlu, Ö.**, 2006. Yerli olivin cevherinden refrakter malzemeye uygun hammadde üretimi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 71s.
- Liu, K., Wang, S., Quan, X., Jing, W., Xu, J., Zhao, N., Liu, B.**, 2022. Effect of iron ore tailings industrial by-product as eco-friendly aggregate on mechanical properties, pore structure, and sulfate attack and dry-wet cycles resistance of concret. *Case Studies in Construction Materials*, 17:e01472.
- Mahmut, O., Emiroğlu, M.**, 2016. Elazığ ferrokrom cürufunun alkali aktive edilmiş harç üretiminde kullanım potansiyelinin araştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi*, 28:23-34.
- Mesci, B., Elevli, S.**, 2011. Recycling of chromite waste for concrete: full factorial design approach. *International Journal of Enviromental Research*, 6,1:145-150.
- Orhan, Y.T.**, 2022. Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonların donma-çözülme ve sülfat direncine ince lastik atığının etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, İnönü Üniversitesi, Malatya, 111s.
- 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, Malatya, 133s.
- Özel, C., Kapkan, A.N.**, 2017. Kendiliğinden yerleşen beton özellikleri üzerinde agrega özelliklerinin etkisi. *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, 1:1-6.
- Özen, S.**, 2013. Denge ağırlığı ve radyasyonlu ortamlarda zırh işlevi amacına yönelik ağır beton tasarımı. *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 85s.
- Palankar, N., Shankar, A.U.R., Mithun, B.M.**, 2016. Durability studies on ecofriendly concrete mixes incorporating steel slag as coarse aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 129:437-448.

- Panda, C.R., Mishra, K.K., Panda, K.C., Nayak, B.D., Nayak, B.B., 2013.** Environmental and technical assessment of ferrochrome slag as concretes aggregate Material. *Construction and Building Materials*, 49:262-271.
- Parlayan, Y., 2019.** Yüksek sıcaklık etkisinde kromit katkılı betonların basınç dayanımlarının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 85s.
- Pektaş, R.M., Karakurt, C., 2016.** Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılı silindire sıkıştırılmış betonların özellikleri. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2,1):1-8.
- Pires, M., Fidelis, A.J.R., 2022.** Phosphate rock waste in the production of cement tile. *Results in Engineering*, 16:100701.
- Qian, D., Yu, R., Shui, Z., Sun, Y., Jiang, C., Zhou, F., Ding, M., Tong, X., He, Y., 2020.** A novel development of green ultra-high performance concrete based on appropriate application of recycled cementitious material. *Journal of Cleaner Production*, 261:121231.
- Sancak, E., Çoban, Ö., 2015.** Olivin atıklarının betonda kullanımının betonarme donatısının korozyon özelliklerine etkisi. *Selçuk Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4:27-41.
- Santillan, N., Speranza, S., Torrents, J., Segura, I., 2022.** Evaluation of conductive concrete made with steel slag aggregates. *Construction and Building Materials*, 360:129515.
- Sarıhan, E., Avşar, D., Lugal Göksu, M.Z., Polat, S., Çevik, C., Çevik, F., Özütok, M., Fındık, Ö., Dural, M., Piner, M.P., Keskinan, O., 2006.** İskenderun demir çelik fabrikasından çıkan cürufun yapısı, çözünürlüğü ve denizel ortama olası etkileri. *Su Ürünleri Dergisi*, 23(1):127-134.
- Sivri, K., 2021.** Olivin esaslı refrakter malzemelerin korozyon direnci ve alternatif kullanım alanlarının bulunması. *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi, İzmir, 234s.
- Şahan A.M., 2006.** CEM I 42,5 çimentolu düşük dozajlı betonlarda yüksek fırın cürufunun etkinliği. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 89s.
- Şah, V., Scott, A., 2022.** Pozzolan characteristics of silica recovered from olivine. *Construction and Building Materials*, 332:127378.
- Şahin, İ.Y., Koçak, Y., 2022.** Yüksek fırın cürufu ikameli çimentoların yapısal ve mekanik özelliklerinin araştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(2):802-814.
- Tahtakıran, E., 2007.** Kromit, ferrokrom ve paslanmaz çelik sektörlerine genel bir bakış. *Madencilik Bülteni*, 19:44-47.

- Temizel, K.E.,** 1998. Samsun ili bafra ilçesi kızılırmak havzasındaki doğal agrega ocaklarından alınan agregaların ve bu agregalardan üretilen betonun bazı özelliklerinin belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, 85s.
- Tulga, İ.,** 2017. Endüstriyel atıkların çimento yerine ikame edilmesi ile oluşturulan beton numunelerinin mühendislik özelliklerindeki değişimin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, 108s.
- Tunçez, D.F.,** 2021. Sürdürülebilir çimento üretiminde çevre yönetimi yasal bileşenleri. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 4:41-56.
- Turan, B.,** 2022. Olivin mineralinin seramik sırlarında kullanım olanaklarının araştırılması ve uygulamaları. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 128s.
- TS EN 197-1,** 2012. Çimento - genel çimentolar - bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS 206-1,** Betonun özellik, performans, imalat ve uygunluk kriterleri. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS 802,** 2009. Beton karışım tasarımı hesap esasları. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara
- TS 3526,** 1980. Beton agregalarında özgül Ağırlık ve su emme oranı tayini. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS 3529,** 1980. Beton agregalarının birim ağırlıklarının tayini. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS 3530 EN 933-1,** 1999. Tane büyüklüğü dağılımı tayini - eleme metodu. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 12350-2,** 2010. Taze beton deneyleri - çökme (slump) deneyi. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 12350-6,** 2010. Taze beton deneyleri - yoğunluk. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 12390-3,** 2010. Sertleşmiş beton deneyleri - deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 12390-5,** 2010. Sertleşmiş beton deneyleri - deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 12390-7,** 2010. Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Uğurlu, İ.A.,** 2020. Yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların donma çözülme ve sülfat direncine geri dönüştürülmüş agreganın etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, İnönü Üniversitesi, Malatya, 95s.

- Uysal, F.F., Bahar, S.,** 2018. Cüruf çeşitleri ve kullanım alanları. *Trakya University Journal of Engineering Sciences*, 19(1):37-52.
- URL-1,** 2019. www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/olivin. Olivin.
- URL-2,** 2019. www.erkrommaden.com.tr/olivin. Olivin. 11 Nisan 2019.
- URL-3,** 2022. www.turkcimento.org.tr/tr/cimentouretimintarihcesi. Çimento. 10 Haziran 2022.
- URL-4,** 2022. www.acikders.ankara.edu.tr/sem. Sem. 25 Kasım 2022.
- URL-5,** 2022. www.arum.ogu.edu.tr/taramali-elektron-mikroskobu-sem. Sem. 12 Eylül 2022.
- URL-6,** 2022. www.merlab.metu.edu.tr/tr/x-isini-difraktometresi. X ışını. 10 Ekim2022.
- URL-7,** 2017. www.thbb.org/media/290192/thbb-%C4%B0statistikler. Hazır beton. 20 Haziran 2017
- URL-8,** 2015. www.maden.itu.edu.tr/muze/drnkyl.htm. Derinlik kayaçları.
- Ünal, O., Bayram, E., Kızıl, Ç., Ünal, A., Antep, V.M., Bayram, B.,** 2020. Kristal viole kobalt (II) nitrat ve krom (III) nitrat moleküllerinin sulu çözeltilerinden cüruf üzerine adsorpsiyonunun araştırılması. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 9:126-134.
- Westgate, P., Ball, R.J., Paine, K.,** 2019. Olivine as reactive aggregate in lime mortars. *Construction and Building Materials*, 195:115-126.
- Xie, J., Wang, J., Rao, R., Wang, C., Fang, C.,** 2019. Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled. *Composites Part B:Engineering*, 164:179-190.
- Xu, Z., Guo, Z., Zhao, Y., Li, S., Luo, X., Chen, G., Liu, C., Gao, J.,** 2022. Hydration of blended cement with high-volume slag and nano-silica. *Journal of Building Engineering*, 64:105657.
- Yalçınıyğıt, G.,** 2019. Yüksek fırın cüruf katkılı derin karıştırma kolonu davranışlarının deneysel olarak araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, 116s.
- Yavaş, H.,** 2018. Öğütülmüş pirit, krom ve magnetit ilaveli harçların mekanik ve radyasyon soğurma özelliklerinin tayini. *Yüksek Lisans Tezi*, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize, 61s.
- Yazıcı, H.,** 2006. Yüksek fırın cürufu katkılı harçların sülfat dayanıklılığının incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 8(1):51-58.

- Yılmaz, A., 2017.** Yol üstyapısında kullanılan cüruf atıklarının çevresel etkilerinin incelenmesi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(2):123-134.
- Yılmaz, A., Süttaş, İ., 2008.** Ferrokrom cürufunun yol temel malzemesi olarak kullanımı. *İMO Teknik Dergi*, 294:4455-4470.
- Zengin, B., Özel, C., 2013.** Kendiliğinden yerleşen hematit agregalı betonun bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi* 5(2):95-102.
- Zhu, C., Tan, H., Du, C., Wang, J., Deng, X., Zheng, Z., 2022.** Enhancement of ultra fine slag on compressive strength of solid waste-based cementitious materials: Towards low carbon emissions. *Journal of Building Engineering*, 63:105475.

