

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE ÇELİKHANE CÜRUFUNUN FARKLI
KOMPOZİSYONLARDA BETON ÜRETİMİNDE KULLANIMININ
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim TORLAK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

EKİM 2023

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE ÇELİKHANE CÜRUFUNUN FARKLI
KOMPOZİSYONLARDA BETON ÜRETİMİNDE KULLANIMININ
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim TORLAK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kemalettin YILMAZ

EKİM 2023

İbrahim Torlak tarafından hazırlanan “Yüksek Fırın Cürufu Ve Çelikhane Cürufunun Farklı Kompozisyonlarda Beton Üretiminde Kullanımının Araştırılması” adlı tez çalışması 05.10.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE ÇELİKHANE CÜRUFUNUN FARKLI KOMPOZİSYONLARDA BETON ÜRETİMİNDE KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(05/10/2023).

İbrahim TORLAK





Aileme ve dostlarıma



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim ve bu araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Kemalettin Yılmaz'a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca zamanını hiç esirgmeden bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, her konuda yardımlarıyla destek olan ve yol gösteren başta Doç. Dr. İlker Tekin olmak üzere tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarım için malzeme tedarikinde yardımcı olan Kardemir A.Ş., Karçimsa A.Ş. ve İnci Beton kurumları teknik personellerine, deneysel çalışmalarım konusunda yardımlarını esirgemeyen laboratuvar çalışanlarına, çalışmalarım sırasında manevi desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Doğduğum günden bugüne kadar hayatımın her anında maddi ve manevi desteklerini her daim hissettiren, bana varlıklarıyla güç veren ve her zaman yanımda olan, beni yetiştiren ve bu günlere gelmemi sağlayan haklarını hiçbir şekilde ödeyemeyeceğim çok değerli aileme sonsuz teşekkür ve minnetlerimi sunarım.

İbrahim Torlak



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Kapsamı	2
1.2. Tezin Amacı	3
1.3. Literatür Araştırması	3
2. KURAMSAL TEMELLER	9
2.1. Beton ve Bileşenleri	9
2.1.1. Çimento	10
2.1.2. Su	10
2.1.3. Agrega	11
2.1.4. Mineral katkıları	11
2.1.5. Kimyasal katkıları	13
2.2. Durabilite	14
2.2.1. Betonda sülfat etkisi	16
2.2.1.1. Betonda sodyum sülfat etkisi	19
2.2.1.2. Betonda magnezyum sülfat etkisi	20
2.3. Metalurjik Cüruf Çeşitleri	21
2.3.1. Çelik üretimi	23
2.3.2. Yüksek fırın cürufu	25
2.3.2.1. YFC'nin kimyasal özellikleri	28
2.3.2.2. YFC'nin beton üretiminde kullanımı	29
2.3.3. Çelikhane cürufu	32
2.3.3.1. Çelikhane cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri	34
2.3.3.2. Çelikhane cürufunun inşaat sektöründe değerlendirilmesi	34
3. MALZEME VE METOT	37
3.1. Malzeme	37
3.1.1. Çimento	37
3.1.2. Agrega	37
3.1.3. Granüle yüksek fırın cürufu	38
3.1.4. Çelikhane cürufu	39
3.1.5. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu	40
3.1.6. Karma suyu	41
3.1.7. Kimyasal katkı	41

3.2. Metot.....	42
3.2.1. Agrega deneylerinde kullanılan yöntemler	42
3.2.2. Beton karışım oranları	45
3.2.3. Numunelerin üretimi	47
3.2.4. Slump (çökme) deneyi	50
3.2.5. Sertleşmiş betonda su emme ve porozite deneyi.....	50
3.2.6. Basınç dayanımı deneyi	52
3.2.7. Ultrasonik ses hızı ölçümü	53
3.2.8. Sülfat etkisi deneyi	54
3.2.9. Ağırlık değişimi.....	55
3.2.10. Beton test çekici deneyi	55
3.2.11. XRD analizi.....	56
3.2.12. Taramalı elektron mikroskobu analizi.....	56
4. DENEY SONUÇLARI.....	59
4.1. Agrega Deneyleri İle İlgili Bulgular.....	59
4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri İle İlgili Bulgular	59
4.2.1. Su emme oranı ve porozite değeri.....	59
4.2.2. Görsel inceleme.....	61
4.2.3. Ultrases geçiş hızı.....	63
4.2.4. Beton test çekici deneyi	66
4.2.5. Ağırlık değişimi.....	68
4.2.6. Basınç dayanımı	69
4.3. Mikroyapı İnceleme.....	72
5. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇ	83
KAYNAKLAR.....	87
ÖZGEÇMİŞ.....	93

KISALTMALAR

ASTM	: The American Society for Testing and Materials
A.Ş.	: Anonim Şirketi
BOF	: Bazık Oksijen Fırını
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrat
ÇÇ	: Çelikhane Cürufu
DEF	: Delayed Ettringite Formation, Gecikmiş Etrenjit Oluşumu
EAF	: Elektrik Ark Fırını
FHWA	: Federal Highway Administration, Federal Karayolu İdaresi
GYFC	: Granüle Yüksek Fırın Cürufu
KÜB	: Katkı Üreticileri Birliği
PÇ	: Portland Çimentosu
ÖYFC	: Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu
SEM	: Scanning Electron Microscope, Taramalı Elektron Mikroskobu
S/Ç	: Su/Çimento
TÇÜD	: Türkiye Çelik Üreticileri Derneği
UPV	: Ultrasonic Pulse Velocity, Ultrasonik Dalga Hızı
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
WSA	: World Steel Association, Dünya Çelik Birliği
XRD	: X-Işını Difraktometresi, X Işını Kırınım Yöntemi



SİMGELER

cm	: Santimetre
mm	: Milimetre
g	: Gram
kg	: Kilogram
N	: Newton
sn	: Saniye
GPa	: Gigapaskal
MPa	: Megapaskal
Na₂SO₄	: Sodyum Sülfat
MgSO₄	: Magnezyum Sülfat
Fe₂O₃	: Demir Oksit
SiO₂	: Silisyum Dioksit
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
Ca(OH)₂	: Kalsiyum Hidroksit
CaCO₃	: Kalsiyum Karbonat, Kalsit
C₃A	: Trikalsiyum Alüminat
C₂S	: Dikalsiyum Silikat
C₃S	: Trikalsiyum Silikat
CaO	: Kalsiyum Oksit
MgO	: Magnezyom Oksit
MnO	: Mangan Oksit
P₂O₅	: Fosfor PentaOksit
CO₂	: Karbondioksit



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Cürufların özelliklerine göre kullanım alanları.....	35
Tablo 3.1. Agregaların elek analizi ve fiziksel özellikleri.....	37
Tablo 3.2. GYFC'nin kimyasal analizi.	39
Tablo 3.3. Çelikhane cürufunun kimyasal analizi.	40
Tablo 3.4. Akışkanlaştırıcı analiz sonuçları.	42
Tablo 3.5. Beton karışım serileri.	46
Tablo 3.6. Beton karışımlarında kullanılan malzeme miktarları.	47
Tablo 4.1. Agregas özgül ağırlık ve su emme oranları.	59
Tablo 4.2. Kontrol numunelerin su emme oranları.	60
Tablo 4.3. Kontrol numunelerin porozite değerleri.	60
Tablo 4.4. UPV deney sonuçları.	63
Tablo 4.5. Beton test çekici deney sonuçları.	66
Tablo 4.6. Sülfat etkisi sonrası numunelerdeki ağırlık değişimi.	69
Tablo 4.7. Basınç dayanımı deney sonuçları.	69



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Puzolanların sınıflandırılması.....	12
Şekil 2.2. Betonda hasar oluşum mekanizması.....	15
Şekil 2.3. Betonun sülfat etkisi sonrası görünümü	17
Şekil 2.4. Sülfat etkisinin oluşumunda gerçekleşen kimyasal aşamalar.....	18
Şekil 2.5. Betonda sülfat etkisiyle çatlak oluşumu	19
Şekil 2.6. Kardemir A.Ş. endüstriyel atık depolama tesisi.	22
Şekil 2.7. Bir ton sıvı çelik üretiminde oluşan cüruf miktarları	23
Şekil 2.8. Yüksek fırını genel görünümü	24
Şekil 2.9. Elektrik ark ocağı genel görünümü.....	25
Şekil 2.10. Yüksek fırın cürufunun oluşum süreci	26
Şekil 2.11. Granülasyon yöntemi.....	27
Şekil 2.12. Peletleme yönteminin şematik görünümü	28
Şekil 2.13. Yüksek fırında gerçekleşen kimyasal tepkimeler.....	28
Şekil 2.14. Yüksek fırın cürufunun betonda göstereceği etki.....	30
Şekil 2.15. Portland çimentosu ve YFC'li çimentonun özelliklerinin kıyaslanması .	31
Şekil 2.16. Bazik oksijen fırını ve yardımcı bölümlerin görünümü	33
Şekil 3.1. Karışımların agrega gradasyon eğrisi.	38
Şekil 3.2. Karçimsa A.Ş granüle yüksek fırın cürufu stok sahası.....	38
Şekil 3.3. Çelikhane cürufunun genel görünüşü.	40
Şekil 3.4. ÖYFC'nin genel görünüşü.....	41
Şekil 3.5. Suda ve etüvde bekletilen agrega numuneleri.	42
Şekil 3.6. Kaba agreganın sudaki ağırlığının ölçümü.	43
Şekil 3.7. İnce agrega için özgül ağırlık deneyi.....	44
Şekil 3.8. Beton karışımının görünümü.	47
Şekil 3.9. Slump Deneyi görseli.	48
Şekil 3.10. Sarsma tablası.	49
Şekil 3.11. Kalıplanmış beton numuneler.....	49
Şekil 3.12. Standart kürde bekletilen beton numuneler.	50
Şekil 3.13. Sertleşmiş betonda su emme deneyine ait görseller.	51
Şekil 3.14. Beton test presi.	53
Şekil 3.15. UPV deney cihazı.	54
Şekil 3.16. $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 çözeltilerindeki beton numuneler.	55
Şekil 3.17. XRD cihazı.	56
Şekil 3.18. a)SEM analizi öncesi altın kaplama işlemi b)Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	57
Şekil 4.1. Kontrol numunelerin 90 günlük kür sonunda görünüşleri (1; Standart kür, 2; %5 Na_2SO_4 çözeltisi, 3; %5 $MgSO_4$ çözeltisi).....	61
Şekil 4.2. Standart kür esnasında çatlayan cürufu numuneler.	62
Şekil 4.3. Beton numunelerin 90. günde UPV değerleri.....	64
Şekil 4.4. Beton numunelerin basınç dayanımı ve UPV değerleri arasındaki ilişki. .	64
Şekil 4.5. Beton numunelerin 90. günde beton test çekici geri tepme sayıları.	67

Şekil 4.6. Beton numunelerin basınç dayanımı ve geri tepme sayısı arasındaki ilişki.	67
Şekil 4.7. Beton numunelerin 90 günlük basınç dayanımları.	71
Şekil 4.8. a) Standart kürde bekletilen A1 numunesine ait SEM görüntüsü b) EDS analizi.	73
Şekil 4.9. a) Standart kürde bekletilen B1 numunesine ait SEM görüntüsü b) EDS analizi.	74
Şekil 4.10. a) $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen A1 numunesine ait SEM görüntüsü b) EDS analizi.	75
Şekil 4.11. a) $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen B1 numunesine ait SEM görüntüsü b) EDS analizi.	76
Şekil 4.12. a) Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen A1 numunesine ait SEM görüntüsü b) EDS analizi.	77
Şekil 4.13. a) Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen B1 numunesine ait SEM görüntüsü b) EDS analizi.	78
Şekil 4.14. Farklı ortamlarda (a: Standart kür, b: Na_2SO_4 çözeltisi, c: $MgSO_4$ çözeltisi) kür edilen A1 numunesinin XRD ölçüm sonuçları.	80
Şekil 4.15. Farklı ortamlarda (a: Standart kür, b: Na_2SO_4 çözeltisi, c: $MgSO_4$ çözeltisi) kür edilen B1 numunesinin XRD ölçüm sonuçları.	80

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE ÇELİKHANE CÜRUFUNUN FARKLI KOMPOZİSYONLARDA BETON ÜRETİMİNDE KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Çelik üretimi esnasında oluşan cüruf ve diğer atık malzemeleri zamanla atık sahalarında birikerek çevre ve insan sağlığı açısından tehdit oluşturmaya devam etmektedir. Bu çevresel problemi ortadan kaldırabilmek ve sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla cürufun farklı endüstri uygulamalarında ikincil hammadde olarak kullanılmasına yönelik pek çok araştırma yapılmaktadır. Yapı sektöründe en çok kullanılan malzeme olan beton içerisinde de cürufun farklı şekillerde değerlendirilmesi çevresel ve ekonomik kazanımlar sağlayabilmektedir. Çimento yerine betonda kullanılması klinker kullanımının azalmasına ve dolayısıyla çimento üretiminde oluşan CO₂ salınımının düşürülmesine katkı sağlayacaktır. Aynı zamanda betonda agrega olarak kullanılması doğal hammaddelerin korunması ve alternatif ürün haline gelmesi bakımından ülke ekonomisine kazanç sağlayacaktır.

Cüruf türleri arasında büyük bir bölümü yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufu oluşturmaktadır. Yüksek fırın cürufu, yüksek silika içeriği ve çimentoya benzerlik gösteren kimyasal bileşimi sayesinde çimentoda puzolanik malzeme olarak kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda cüruf katkılı çimentoların ileriki yaşlarda mekanik özelliklerinin iyileştiği ve durabilite performansının geliştiği gözlemlenmiştir. Bir diğer cüruf türü olan çelikhane cürufunun fiziksel özellikleri genel itibarıyla normal agregaya benzemesinin yanında çelikhane cürufunun daha yüksek dayanım ve daha sert bir malzeme yüzeyine sahip olması betonda kaba agrega olarak kullanımının önünü açmaktadır.

Bu çalışmada Kardemir A.Ş.'de çelik üretimi esnasında oluşan çelikhane cürufu (ÇC) ile granüle yüksek fırın cürufunun (GYFC) ve Karçimsa A.Ş.'de üretilen öğütülmüş yüksek fırın cürufunun (ÖYFC) farklı kompozisyonlarda beton üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Beton üretimi agrega içeriği farklı olan iki seri halinde gerçekleştirilmiştir. Birinci seride doğal agrega olarak kırma kum ve kırma taş kullanılmıştır. İkinci seride ise ince agrega olarak GYFC, kaba agrega olarak ÇC tamamen doğal agrega ile yer değiştirmiştir. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu puzolan şeklinde her iki seride belli oranlarda (%0, %10, %20, %30, %40) çimento ile ikame edilerek kullanılmış ve toplamda 10 farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Üretilen bu beton numuneler başlangıçta 28 gün standart kürde bekletilmiştir. 28 gün sonunda standart kürden alınan beton numuneler %5 konsantrasyonlu sodyum sülfat ve %5 konsantrasyonlu magnezyum sülfat çözeltilerinde her bir karışımdan 3'er adet olacak şekilde sülfat etkisine maruz bırakılmıştır. Ayrıca karşılaştırma yapabilmek için her bir karışımdan elde edilen beton numuneler birer grup halinde deney süresi boyunca standart kürde bekletilmiştir. Böylelikle farklı puzolan oranlarının etkisinde agrega olarak cüruf içeren betonlar ile doğal agregalarla üretilen betonların mekanik ve durabilite özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Beton numuneler üzerinde ultrasonik ses hızı, beton test çekici ve basınç dayanımı ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca beton numunelerin morfolojik yapısını ve kimyasal kompozisyonundaki değişimlerini incelemek için SEM ve XRD analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre %100 GYFC ve ÇC agregası kullanımının betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Buna karşılık çimento içerisinde ÖYFC ikame oranı arttıkça hem cüruf agregalı hem de doğal agregalı betonların performansında genel olarak artışlar görülmüştür. 28 gün standart kürde bekletildikten sonra 90 gün boyunca sülfat etkisine maruz bırakılan numuneler ile aynı süre zarfında standart kürde bekletilen numunelerin mekanik özellikleri kıyaslandığında, cüruf agregalı numunelerde doğal agregalı numunelere göre daha fazla kısmi dayanım artışı görülmüştür. Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen numunelerde MgSO_4 çözeltisinde bekletilen numunelere göre genel olarak daha fazla dayanım artışı yaşandığı da tespit edilmiştir. Buna göre sülfat etkisi sonrası %32 oranla en fazla dayanım artışı Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen, cüruf agregalı ve %40 ÖYFC ikameli B5 beton numunesinde görülmüştür.



INVESTIGATION OF THE USAGE OF BLAST FURNACE SLAG AND STEEL SLAG IN DIFFERENT COMPOSITIONS IN CONCRETE PRODUCTION

SUMMARY

In today's industrialized world, a wide variety of solid wastes are produced as a result of production. Solid waste must be disposed of or transported to solid waste sites and stored in piles. The labor required for these operations poses a great financial burden to businesses. Efforts are being made to reduce the amount of solid waste generated, but it is often not preferred because it reduces production efficiency. For this reason, the most logical solution is to direct the solid waste generated to the right applications and instead of turning it into waste, use it as a product. Maximum recycling of solid waste is possible by correctly determining and recognizing the physical and chemical properties of solid waste and directing them to appropriate projects.

Slag is a waste material formed during steel production. In other words, slag is a by-product that is formed by the processing of metal-containing ores in melting furnaces, has an oxide and silicate complex structure and accumulates on the surface of the liquid metal with the difference in density. These slags, which are formed in steel production, contain undesirable impurities such as sulfur and phosphorus in the metal. At the same time, it acts as an interface on the liquid metal, ensuring that the metal is not contaminated and the trapped heat is not lost. Although the slag can gain different properties with the changes in the components it contains, it is shown among the common features that it has a low density and melting temperature in general.

Slag and other waste materials formed during steel production accumulate in waste areas over time and continue to pose a threat to the environment and human health. In order to eliminate this environmental problem and to ensure sustainability, many researches are carried out on the use of slag as a secondary raw material in different industrial applications. Evaluating slag in different ways in concrete, which is the most used material in the construction industry, can provide environmental and economic gains. Using it in concrete instead of cement will contribute to the reduction of the use of clinker and thus to the reduction of CO₂ emissions in cement production. At the same time, using it as aggregate in concrete will provide a benefit to the country's economy in terms of protecting natural raw materials and becoming an alternative product.

Steel production takes place in an integrated system of blast furnace and basic oxygen furnace or in an electric arc furnace. In the integrated system, rock pieces with intense iron content are subjected to melting by exposing them to 1400 °C in blast furnaces. The molten liquid iron stays below due to its high unit weight and is transported to the steel plant by being unloaded on wagons. The remaining residues are allowed to cool in the open air and form blast furnace slag with grain sizes of 2-5 mm, resembling sand in appearance. Carbon and other elements are added to the liquid iron, which is transported to the steel plant by wagons, according to the desired properties. A large amount of lime is also added at this stage. The mixture, which takes its final form, is

sized in various ways and steel production is realized with the desired properties. The residues remaining after the mixing processes in the steel mill are called steel slag.

Limestone and dolomite are used as sources of CaO and MgO for iron melting in blast furnaces. In this way, slag chemistry is controlled in the melting process, foreign materials are removed and the furnace refractory lining is protected from wear. Iron ore is usually found in nature in combination with oxides or silicates of other metals. During smelting, when the ore is exposed to high temperatures, the impurities separate from the molten metal and combine with the basic oxides in dolomite or limestone to form slag grains containing CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃ compounds.

The physical properties of the slag are affected by the cooling process. When air-cooled blast furnace slag is crushed and sieved, its physical properties become more advantageous than other aggregates. It stands out with the fact that it does not contain clay and silt, has good friction properties thanks to its rough surface, and therefore has good adhesion. Granulated blast furnace slag, which has a porous structure, glassy structure similar to sand, and exhibits hydraulic properties, can also be obtained by spraying certain amounts of water on the slag with the sudden cooling process. The color of blast furnace slag is light and cream-colored, while the color of steel slag is dark due to the high amount of iron and magnesium in it.

Blast furnace slag and steel slag make up the majority of slag types. Blast furnace slag (YFC) is a by-product and is released during iron production in blast furnaces in iron and steel plants. YFC contains a low amount of iron and it is not important to recover the iron in it during production. Blast furnace slag is used as a pozzolanic material in cement due to its high silica content and chemical composition similar to cement. In the studies, it has been observed that the mechanical properties of slag-added cements improve in later ages and their durability performance improves.

Steel slag is a by-product of steel production with a varying range of chemical and mineral composition resulting from different feed materials and melting conditions. Basic Oxygen Furnace (BOF) Slag and Electric Arc Furnace (EAF) Slag are referred to as steel slags. While the physical properties of steel slag are generally similar to normal aggregate, steel slag has higher strength and a harder material surface, which paves the way for its use as coarse aggregate in concrete.

In this study, the usability of steel slag (ÇC) and granulated blast furnace slag (GYFC) produced during steel production in Kardemir A.Ş and ground blast furnace slag (ÖYFC) produced in Karçimsa A.Ş. in concrete production with different compositions were investigated. Concrete production was carried out in two series with different aggregate content. In the first series, crushed sand and crushed stone were used as natural aggregates. In the second series, GYFC as fine aggregate and ÇC as coarse aggregate were completely replaced by natural aggregate. Ground blast furnace slag was used in the form of pozzolan, replacing it with cement at certain rates (0%, 10%, 20%, 30%, 40%) in both series, and a total of 10 different concrete mixtures were prepared. These produced concrete samples were initially kept in standard curing for 28 days and then exposed to the effect of sulfate in a solution of sodium sulfate with 5% concentration and magnesium sulfate with 5% concentration for 90 days. In addition, in order to make comparisons, the concrete samples obtained from each mixture were kept in standard curing as a group during the experiment period. Thus, under the influence of different pozzolanic ratios, the mechanical and durability properties of concretes containing slag as aggregate and concrete produced with natural aggregates were examined comparatively.

Ultrasonic sound velocity, concrete test hammer and compressive strength measurements were made on concrete samples. According to the results obtained, it was determined that the use of 100% GYFC and ÇC aggregates adversely affected the mechanical and physical properties of the concrete. On the other hand, the performance of both slag aggregate and natural aggregate concretes increased as the ÖYFC substitution ratio in cement increased. When the mechanical properties of the samples exposed to the effect of sulfate for 90 days and the samples kept in the standard curing for the same time were compared, more partial strength increases were observed in the samples with slag aggregates compared to the samples with natural aggregates. It has also been determined that there is generally a greater increase in strength in samples kept in Na_2SO_4 solution than in samples kept in MgSO_4 solution. Accordingly, the highest strength increase of 32% after the sulfate effect was seen in the B5 concrete sample with slag aggregate and 40% PFC replacement, kept in Na_2SO_4 solution.





1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişimi üretime dayalı endüstri sektörünü de doğrudan etkilemektedir. Artan dünya nüfusu ve ihtiyaçları göz önüne aldığımızda üretim hızı da buna bağlı olarak artmaktadır. Üretimin bu denli arttığı günümüzde üretim esnasında yan ürün olarak çıkan, bertaraf ve geri dönüştürülmesi gereken atık malzemeler de atık sahalarında birikerek doğal yaşam için tehlike arz etmektedir. Ortaya çıkan atıkların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin doğru tespit edilerek farklı sektörlerde uygun noktalarda alternatif ürün olarak değerlendirilmesi hem hammadde açısından ülke ekonomimize katkı sağlayacak hem de atıkların geri kazanımı ile temiz bir çevre yolunda adım atılmış olunacaktır.

Ülkemizde demir-çelik sektörü, birçok sanayi koluna hammadde sağlayarak sanayileşmede en önemli itici gücü oluşturan sektörlerin başında gelmektedir. Ancak ülke ekonomisine sağladığı bu katkı yanında, üretim sürecinde yüksek miktarda cüruf oluşturması nedeniyle ülkemizdeki en büyük atık üretici sektörler arasında yer almaktadır. Geri kazanılamayan cüruflar çevre için risk barındırmasının yanında oluşturulacak depolama alanının boyutu nedeniyle de işletmeler için ek maliyetlere neden olabilmektedir. Bu nedenle oluşan cürufların depolanması yerine hammadde gibi kullanılarak yeni bir maddeye dönüştürülmesi sürdürülebilirlik açısından da değerlendirdiğimizde en mantıklı tercih olarak gözükmektedir.

Demir-çelik sektöründe faaliyet gösteren tesislerden elde edilen verilere göre çelik üretimi esnasında, 1 ton ham cevherden yaklaşık olarak %10-40 oranında cüruf oluşmaktadır (Birol, 2013). Bu cüruflar arasında yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufunun inşaat sektöründe hammadde olarak kullanılabileceği, geri kazandırılabilir katı atık malzeme olduğu yapılan bilimsel çalışmalarda ortaya konmuştur. Çalışmalardan elde edilen sonuçlar incelendiğinde cürufların; yol temel ve alt temel malzemesi, beton ve asfalt agrega, tuğla ve briket yapımında, yalıtım malzemesi üretiminde, çimento sanayi, tarım ve çevre uygulamalarında, dolgu malzemesi olarak geniş bir alanda kullanılabileceği belirtilmektedir (TÇÜD, 2016).

Demir-elik tesislerinde yüksek fırınlarda yan ürün olarak oluşan yüksek fırın crufununun bir kısmı öğütülerek bir kısmı ise granüle cüruf olarak imento sanayinde değerlendirilmektedir. Yüksek fırın cürufu, puzolanik özelliği sayesinde portland imentosu ile birleştiğinde bağlayıcılık özelliği kazanabilen, erken basınç dayanımında olumsuz etki göstermesine karşın geç dayanım ve beton durabilitesinde sağladığı artışla betonun mekanik özelliklerine olumlu katkı sağlayan bir malzemedir (Erdoğan, 2007). Bir başka yan ürün olan elikhane cürufu üzerine yapılan çalışmalar ise yüksek dayanım özelliği sebebiyle; zemin iyileştirme malzemesi, demiryollarında ve karayollarında temel ve dolgu malzemesi, beton endüstrisinde de iri agrega olarak kullanılması yönünde ilerlemiştir (Maslehuddin ve ark, 2003).

Türkiye’de çok sayıda taş ocağında inşaat sektörü için agrega üretildiği düşünüldüğünde; beton üretiminde doğal agregalar yerine demir elik üretimi esnasında oluşan yan ürünlerin değerlendirilmesi ülkemiz için enerji kaynaklarının ve hammaddelerin efektif kullanılmasını aynı zamanda atık malzemelerin azaltılarak önemli ölçüde çevresel kazançlar sağlanması yönünden isabetli bir uygulama olacaktır.

1.1. Tezin Kapsamı

Bu alışma, demir elik üretimi esnasında bir yan ürün olarak oluşan ve atık sahalarında depo edilmesiyle hava, toprak ve su kirliliği yaratan cürufların geri kazanılması ve başta insan sağlığı olmak üzere çevresel ve ekonomik anlamda olumsuz etkilerinin en aza indirilmesine yönelik bir çözüm yolu olarak en yaygın yapı malzemesi olan betonda mineral katkı malzemesi ve agrega olarak değerlendirilmesini kapsamaktadır. Bu kapsamda granüle yüksek fırın cürufu ve elikhane cürufu agrega sınıfı olarak beton karışımında kaba ve ince agrega ile tamamen yer değiştirilerek betonda göstereceği mekanik ve fiziksel etkileri incelenmeye çalışılmıştır. Bunun yanında öğütülmüş yüksek fırın cürufu çimentoya %0, %10, %20, %30, %40 ikame oranlarında eklenerek betonda göstereceği etki gözlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca üretilen beton numuneler ayrı ayrı olmak üzere %5 $MgSO_4$ ve %5 Na_2SO_4 konsantrasyonlu çözeltilere maruz bırakılıp dayanım ve durabilite performansları hakkında çıkarımlarda bulunulmuştur.

Üretilen beton numuneleri üzerinde 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı, beton test çekici, ultrasonik test cihazı, sülfat etkisi deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre

beton numunelerin dayanım ve dayanıklılıkları hakkında kıyaslamalı olarak yorumlamalarda bulunup farklı karışım oranlarında eklenen cürufların betondaki olumlu ve olumsuz etkileri gözlemlenerek gerekli çıkarımlar elde edilmiştir.

1.2. Tezin Amacı

Bu çalışma, yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufunun alternatif karışım oranlarında portland çimentosuna eklenerek farklı kompozisyonlardaki beton üretiminde kullanılmasını ve üretilen bu beton numunelerin fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerinin deneysel olarak incelenmesini amaçlamıştır.

1.3. Literatür Araştırması

Doğal kaynakların korunması ve endüstriyel atıkların azaltılması üzerine çalışmalar artan çevresel bilinçle son yıllarda önem kazanarak devam etmektedir. Demir çelik endüstrisinde oluşan cürufların çeşitli sektörlerde ürün kategorisinde tekrar üretime sokulması; işletmeler tarafından depolama ve bertaraf maliyetlerini azaltması ve ekstra kazançlar sağlaması açısından da ilgi odağı haline gelmiştir. Geri kazanılan cüruflar alternatif ürüne dönüştüğünde doğal kaynaklara nispeten daha ucuz ve sürekliliği olacak bir hammadde olması tercih edilme olasılığını da arttıracaktır.

Çelikhane cürufu, yüksek dayanım performansı ve doğal agregaya benzer yapısı sebebiyle inşaat sektöründe çeşitli alanlarda yapılan bilimsel çalışmalarda araştırma konusu haline gelmiştir. Aynı şekilde yüksek fırın cürufu da geniş yelpazede çimento ve beton endüstrisinde kullanılmaktadır. Bunların başında; öğütülmüş haliyle çimento üretiminde, puzolanik özelliği sayesinde çimento ile ikame edilerek, katkı malzemesi olarak ve ince agrega ile ikame edilerek beton üretiminde kullanılması gelmektedir.

Demir çelik endüstrisi atık malzemelerinin yukarıda bahsi geçen avantajlı durumlarını değerlendirmek maksadıyla geri dönüşüm ile ilgili olarak tüm dünyada kayda değer araştırmalar yapılmaktadır. Bu kapsamda literatürde geçen çalışmalardan bazıları aşağıda özet halinde sunulmuştur.

Dongsheng Shi ve ark. (2018) çalışmalarında ince agrega olarak betonda granüle yüksek fırın cürufu kullanımının doğal nehir kumu kullanımına kıyasla betonun durabilite performansında göstereceği etkiyi incelemişlerdir. Bu kapsamda 0.5, 0.30, 0.25'lik üç farklı su/çimento oranı ve %0, %50 ve %100'lük üç farklı kum ikame

oranıyla üretilen beton numuneler ilgili deneylere tabi tutularak donma-çözülme, kuru büzülme ve klorür önleyici-geçirgenlik performansı yönünden değerlendirilmiştir.

Test sonuçları, yüksek fırın cürufunun ince agrega olarak kullanılmasının, düşük su-çimento oranı durumunda betonun klor önleyici-geçirgenlik performansını ve kuru büzülme performansını bir miktar iyileştirebileceğini göstermektedir. Aynı beton karışım oranında yüksek fırın cüruf içeren betonun donma-çözülme performansı doğal kum ile üretilen betona nispeten daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Öte yandan, yüksek fırın cürufunun ve doğal nehir kumunun ince agrega olarak kullanılması betonun dayanıklılığı açısından benzer sonuçlar verdiği görülmektedir.

N. Santillan ve ark. (2022) çalışmalarında betonda doğal agrega yerine farklı çelik cürufları ve çelik lifler kullanarak betonun mekanik performansı, elastisite modülü, çekme dayanımı ve elektriksel özellikleri hakkında incelemelerde bulunmuşlardır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarda çelik cüruf agregalarının betona dahil edilmesi, mineralojik bileşimlerinden dolayı betonun iletkenlik kapasitesini önemli ölçüde arttıracak, liflerin katılması durumunda ise malzemenin öz direncini azaltacak ifade edilmiştir. Özellikle simgeler içeriği yüksek cüruf kullanımı ile daha düşük elektrik direncine sahip beton elde edilebileceği belirtilmiştir. Cüruf ve metalik lif içeren betonun elektrik iletkenliği kapasitesi neredeyse %70 oranında ve mekanik performansı %14 oranında iyileştirildiği tespit edilmiştir.

Xu Cheng ve ark. (2022) tarafından demir endüstrisi atıklarının değerlendirilmesi kapsamında çelik cürufu iri agregalı betonun sülfat saldırısı altında basınç dayanımı, kütle değişimi, görünüm değişikliği ve bağıl dinamik elastik modülü gibi performans indeksleri incelenmiş ve ömür tahmini hakkında değerlendirmelerde bulunulmuştur. Deney için üretilen beton numunelerde çelikhane cürufu kaba agrega olarak %0, %30, %60 ve %90 ikame oranlarında kullanılmıştır. Üretilen numuneler %5, %10, %15 olmak üzere 3 farklı sülfat (Na_2SO_4) çözeltili ortamda bırakılmıştır. Deney sonuçları beton hazırlamak için kaba agrega yerine çelikhane cürufunun kullanılmasının sülfat çözeltilerinin saldırısının neden olduğu hasarı önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir. %15 sülfat çözeltili ortamda çelikhane cüruf ikame oranı %60 olduğunda maksimum basınç dayanımı artış oranı %20,7 olarak elde edilmiştir. Mikroskobik çalışma, çelik cürufundaki aktif bileşenlerin (dikalsiyum silikat (C_2S) ve trikalsiyum silikat (C_3S) gibi) betonda hidratlı kalsiyum silikat jel üretimini teşvik ederek malzemenin mukavemetini ve dayanıklılığını artırdığını ortaya koymaktadır.

GM (1, 1) modelinin tahmin sonuçları, sülfat çözeltisine bırakılan %60 çelik cürufu kaba agregaya ikame oranına sahip betonun hizmet ömrünün diğer üç gruba göre daha iyi olduğunu ve tahmin edilen sonuçların GM ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

Lais Cristina Barbosa Costa ve ark. (2022) tarafından yürütülen çalışma, agregaya olarak çelikhane cürufu ve çelikhane cürufu tozu mineral katkısı kullanılarak üretilen betonların klorür saldırısı altında mekanik ve durabilite performanslarını hakkında değerlendirmeler içermektedir. Karşılaştırma amacıyla, geleneksel agregalar ve ticari mineral katkıları (silis dumanı ve metakaolin) kullanılarak referans betonlar üretilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde çelikhane cüruf agregaları ve çelikhane cüruf tozu ile üretilen betonlar, geleneksel betonlara göre daha düşük klorür penetrasyon derinliklerine sahip olduğu ifade edilmektedir. Çelik cüruf agregaları ile üretilen beton, referans betona kıyasla daha düşük su emme ve daha yüksek basınç/çekme mukavemeti sergilemiştir. Genel olarak, bu araştırma çelik cüruf betonların inşaat sektörü için teknik olarak uygulanabilir seçenekler olduğunu gözlemlemiştir.

M.H.Lai ve ark. (2022) çalışmalarında “daha yeşil beton” üretmek için geleneksel betonun kaba ve ince agregalarının yerini almak üzere farklı yer değiştirme oranlarında bazik oksijen fırını çelikhane cürufu beton karışımına eklenmiştir. Çalışma sabit S/Ç değeri 0,31 olan toplam 15 beton karışımından oluşmaktaydı ve iki gruba ayrılabilirdi. Grup no.1’de çelikhane cürufu kaba agregaya, ağırlıkça %10’luk bir aralıkla %0’dan %80’e ikame oranında geleneksel agregaya yerine kullanıldı. Grup no. 2’de, 1. grupta optimum çelikhane cürufu kaba agregaya ikame düzeyine sahip numune bazında ağırlıkça %10’luk bir aralıkla %0 ila %60’lık değiştirme oranında geleneksel ince agregaya yerine çelikhane cürufu ince agregaya kullanıldı. Sonuçlar, kaba ve ince agregaların optimum ikame oranlarının sırasıyla %50 ve %30 olduğu saptanmış ve bu oranlarla, betonun ileri yaş basınç dayanımı ve mikro yapısı önemli ölçüde iyileştirilebileceği ortaya konmuştur. Ayrıca bu yer değiştirme oranıyla, zararlı gözenek hacmi, ortalama gözenek çapı ve toplam gözenek hacmi önemli ölçüde azalırken betonun kütle yoğunluğu ve geçirimsizliğe karşı dayanıklılığı artmıştır. Çelikhane cürufunun mineralojik yapısı sayesinde çimentomu özelliği gösterip C-S-H jeli oluşturarak betonun arayüzey geçiş bölgesini önemli ölçüde iyileştirebileceği de belirtilmiştir.

Humberto Dias Andrade ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada üç basınç dayanımı sınıfında, geleneksel agregaların tamamen çelik cüruf agregaları ile değiştirildiği, hiçbir kimyasal katkı içermeyen betonlar üretilmiştir. Bu ürünlerin mekanik performansı ve karbonatlaşmaya karşı direnci değerlendirilmiştir. Beton karışımları eşit çökme değerine (80 mm) ve akışkanlaştırıcı oranına (%1) sahip olup aynı dayanım sınıfında olan betonlar için eşit S/Ç oranı kullanılmıştır. Araştırmada zaman çerçevesi içinde karbonatlaşma olgusunu daha iyi anlamak için hızlandırılmış karbonatlaşma testi uygulanmıştır. Çelik cürufllu betonlar, geleneksel betonlara kıyasla daha yüksek basınç dayanımları ve karbonatlaşma derinliklerinde %60'a varan azalmalar göstermiştir. Buna ilaveten çelik cüruf agregalarının (EAF ve BOF) kullanılması genel olarak betonların özgül ağırlığını arttırmış, boşluk oranını ve su emmeyi azaltmıştır.

Shekhar Saxena ve A.R. Tembhurkar (2018) tarafından yapılan çalışmada doğal iri agreganın %15, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında çelik cürufu agregası ile ikame edilmesinin ve atık suyun beton yapımında yeniden kullanılmasının betonun taze ve sertleşmiş özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bazalt agregasının %50'sinin çelik cüruf agregası ile değiştirilmesinin, betonun 28 günlük basınç dayanımında %33, eğilme dayanımında %9.8 ve elastisite modülünde %22 iyileşme gösterdiği bulunmuştur. SEM analizi, ultrasonik darbe hızı ve hızlı klorür geçirgenliği testleri, yoğun mikro yapıyı ve gelişmiş dayanıklılığı göstermektedir.

Ch.Srinivasarao ve S. Vijaya Bhaskar Reddy (2020) çalışmalarında granüle yüksek fırın cürufunun betonda ince bir agrega olarak kullanıldığında basınç, eğilme ve ayırık çekme dayanımı gibi mekanik özellikleri ve su geçirgenliği, hızlı klorür geçirgenliği gibi dayanıklılık özelliklerine etkilerini araştırmıştır. Beton karışımları %40 sabit S/Ç oranı ve C40 basınç dayanımına göre hazırlanmıştır. Bu karışımlar içerisinde ince agrega yerine farklı oranlarda granüle yüksek fırın cürufunun kısmen ve tamamen yer değiştirilmesiyle etkileri incelenmeye çalışılmıştır. Granüle yüksek fırın cürufu, nehir kumu ve kırma kumu ile %30, %50, %80 ve %100 yer değiştirilerek portland çimentosu, portland puzolanlı çimento ve portland cürufllu çimento ile 3 farklı bağlayıcı ile karışımında kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde optimum yer değiştirme yüzdesinin 3 farklı çimento tipi ile üretilen beton için de %50 nehir kumu ve %50 granüle yüksek fırın cürufu ile elde edildiği gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin

GYFC'nin daha kaba parçacıkların varlığından oluşması ve bu yüzden gözenekleri doldurmak için daha ince parçacık bulunması gerekebileceği ile açıklanmıştır.

Luca Rondi ve ark. (2016) tarafından; Elektrik Ark Fırını (EAF) çelik cürufunun özellikleri, çevresel uygunluğunu ve ayrıca agrega olarak %100 EAF taze ve yaşlandırılmış cürufu ile tasarlanmış betonun mekanik davranışını, hacimsel kararlılığını değerlendirmek için kapsamlı bir deneysel çalışma yürütülmüştür. Çalışma kapsamında betonun mekanik özellikleri, sadece doğal agrega içeren referans karışımların özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre;

-EAF cürufunun fiziksel özellikleri hem taze hem de yaşlandırılmış koşullar için uygun sonuçlar göstermiştir. Parçalanma (%18–23) ve aşınma (%7–8) direnci, doğal agregalarla karşılaştırılabilir düzeyde çıkmıştır (%21–27 parçalanma ve %9–10 aşınma direnci).

-Taze cürufun hacimsel genleşmesi, %0,5 sınır değerinin biraz altında sonuçlanmıştır. Bu nedenle, beton karışımlarında çatlama olayını önlemek için, EAF cürufunun en az 3-4 aylık bir yaşlandırma süresi tavsiye edilir.

-Uzun süreli basınç testleri, EAF cürufu içeren beton karışımlarının güvenilirliğini doğrulamıştır. Bir yıllık süre sonunda basınç dayanımı geleneksel betondan beklendiği gibi kararlı bir davranış göstermiştir. EAF cürufu içeren beton, 35–45 MPa basınç dayanımı ve 46 GPa'ya kadar esneklik modülü ile inşaat yapılarında kullanıma uygun mekanik özellikler göstermiştir.

Liwu Mo ve ark. (2017) çalışmalarında bağlayıcı malzeme ve agrega olarak çelik cürufu ile yapılan betonun hızlandırılmış karbonatlaşması ve performansı üzerine incelemelerde bulunmuşlardır. Bağlayıcı karışımları hazırlamak için %60 oranında yüksek serbest CaO içeriği içeren çelik cürufu tozları, %20 oranında Portland çimentosu ve %20'ye kadar reaktif magnezya ve kireç karıştırılmıştır. Bağlayıcı karışımlar daha sonra, doğal agregaların %100'e kadarının çelik cüruf agregaları ile değiştirildiği betonu dökmek için kullanıldı. Deney sonuçlarına göre; nemli kürlenme altında, doğal agregaların çelik cürufu ile değiştirilmesi, betonun basınç dayanımı üzerinde ihmal edilebilir etkilere neden olurken, CO₂ kürlenme koşulunda cüruf betonun basınç dayanımının doğal agrega ile üretilen betona göre daha yüksek basınç dayanımı gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum, kaba çelik cüruf parçacığı çevresinde oluşan yoğun karbonat ürünlerinin, suyun çelik cüruf agregasının iç kısmına

yayılmasını önlemesi ve dolayısıyla serbest CaO ve MgO bileşenlerinin sürekli hidrasyonunu ve genleşmesini engellemesine atfedilmiştir. Çelik cüruf ile hazırlanan beton prizmalarda dezavantaj olarak cüruf içerisinde serbest halde bulunan MgO ve CaO'nun hidratasyonu sonucu yüksek genleşme gösterdiği ve numunelerde çatlamalara yol açtığı ifade edilmiştir. Ancak bu genleşmenin, agrega türünden bağımsız olarak, beton prizmalar üzerinde uygulanan CO₂ kürü sayesinde gerçekleşen karbonatlaşma olayı sayesinde önemli ölçüde azaldığı XRD analizi sonuçlarıyla ortaya koyulmuştur.

Yongchang Guo ve ark. (2018) tarafından ince agrega olarak çelik cürufu kullanılan betonda, eksenel darbe sıkıştırması altındaki statik ve darbe davranışları incelenmeye çalışılmıştır. Beton karışımlarında ince agrega yerine %0, %10, %20, %30 ve %40'ı oranlarında çelik cürufu ikame edilmiştir. Sonuçlar, ince agrega olarak çelik cürufunun eklenmesinin betonun statik ve dinamik basınç dayanımını iyileştirebileceğini göstermektedir. Darbe yüküne maruz kalan çelik cürufu betonun basınç dayanımı, monoton sıkıştırma altındaki çelik cürufu betona benzer şekilde, çelik cüruf içeriğindeki artışla önce artmış daha sonra azalmıştır. Ayrıca, darbe yükü altında çelik cürufu betonun bozulma modu normal betonunkine benzer olmakla birlikte çelik cürufunun betona katılması sertliğin ve kırılganlığın artmasına neden olmuştur. Monoton ve darbeli sıkıştırmaya maruz kalan çelik cürufu beton için geliştirilmiş performans elde etmek için, ince agrega olarak önerilen optimum çelik cüruf içeriği %20'dir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Beton ve Bileşenleri

Beton; çimento, agrega, su ve ihtiyaca göre uygun mineral ve/veya kimyasal katkıların hesaplar neticesinde belirli oranlarda karıştırılmasıyla oluşan, istenen boyutta kalıplar içerisine boşluksuz bir şekilde yerleştirilen, başlangıçta plastik kıvamda olan ve uygun bakım koşullarıyla birlikte zamanla çimentonun hidrasyonu sonucu sertleşerek istenilen şekli alan kompozit bir yapı malzemesidir (Baradan ve ark, 2012).

Betonun plastikliğini koruduğu süreçteki durumu (yani, çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonlar nedeniyle katılaşmanın başladığını ana kadarki haline) taze beton, katılaşma olayından sonraki safhada sertleşmiş beton olarak anılmaktadır.

Taze haldeki beton için işlenebilme, homojenlik ve priz süresi önemli parametreler arasında yer almaktadır. İşlenebilme, betonun kolayca karılabileceği, yerleştirilebileceği ve sıkıştırılabileceği, son olarak üzerinin düzeltilebileceği kıvama sahip olması anlamına gelen fiziksel bir özelliktir. Homojenlik, betonu oluşturan malzemelerin yeterince karıştırılması sonrası ayrışma olmadan kalıba yerleştirilmesini ifade etmektedir. Priz süresi (plastik halden katı hale geçme süresi); betonun taşınımı, dökümü ve yerleştirilmesi işlemleri düşünülerek ortam şartlarına göre gerekli kimyasal katkılarla (priz hızlandırıcı, priz geciktirici) ayarlanması gereken fiziksel ve kimyasal bir süreçtir (Erdoğan, 2007).

Beton sertleşmiş halde iken hedeflenen dayanımdan daha az bir dayanım göstermemesi önemli hususların başında gelmektedir. Bunun yanında çeşitli iç ve dış etkilere karşı (Aşınma, donma-çözülme, ıslanma-kuruma, asit ve sülfat etkisi ve alkali agrega reaksiyonu vb.) dayanıklı olması, hizmet süresi boyunca betondan beklenen performansın karşılanması açısından önem arz etmektedir. Çevredeki su ve diğer sıvıların betona nüfuz ederek olumsuz bir etki yaratmaması için betonun yeterince geçirimsiz olması, rötre ve genleşme göstermeyerek hacim sabitliğinde kararlı olması istenilen diğer özellikler arasında yer almaktadır (Erdoğan, 2007).

Sertleşmiş beton, taze betonun katılaşmasından sonraki safhayı ifade ettiğinden, taze betonda meydana gelen değişimler sertleşen betonda da etkisini gösterecektir. Buna

bağlı olarak hem taze betonun hem de sertleşmiş betonun özellikleri, beton karışımında kullanılan malzemelerin özellikleri ve karışım oranları ile doğrudan ilişkili olmaktadır.

2.1.1. Çimento

Çimento, kalker ve kil malzemelerinin belirli sıcaklıklara kadar pişirilmesi ve alçı taşı eklenerek öğütülmesiyle elde edilen, gerek kendi başına gerekse kum, çakıl ve kırma taş gibi malzemelerle birlikte suyla karıştırılarak hem havada hem de suda priz alarak sertleşebilen ince öğütülmüş bağlayıcı bir maddedir (Şimşek, 2012).

Çimento, betonda kullanılan agrega tanelerinin yüzeyini kaplayarak taneler arası boşlukları dolduran ve taneleri birbirine bağlayarak matris özelliği gösteren bir malzemedir.

Çimentonun suyla tepkimeyi girmesi sonucu başlangıç safhasında gösterdiği plastik özelliği sayesinde beton karışımının kolayca karıştırılabilmesini, kalıba yerleştirilebilmesini ve istenilen şeklin verilebilmesini sağlamaktadır. Hidratasyon tepkimesiyle birlikte çimento hamuru zamanla sertleşerek betona istenilen dayanım ve dayanıklılığı kazandırmaktadır. Bu sebeple betonun göstereceği performans çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerine göre değişim göstermektedir (Topgül, 2016).

2.1.2. Su

Suyun betonda kullanım şekillerini karışım suyu, yıkama suyu ve kür suyu olarak sıralabiliriz. Beton üretimini sağlamak için çimentonun ve agregayla birlikte karılmasını sağlamada “karışım suyu” olarak; kalıba yerleştirilmiş beton yüzeyinin ıslak tutularak içerisindeki suyun buharlaşmasının önlenmesi ve böylelikle betonda gerçekleşen hidratasyon olayının devamının sağlanması amacıyla “kür suyu” olarak; beton karışımında kullanılacak iri ve ince taneli agregaların yıkanması için “yıkama suyu” olarak kullanılmaktadır (Erdoğan, 2007).

Karışım suyunun beton üretiminde 3 önemli işlevi vardır. Birinci işlevi, hidratasyon tepkimesiyle çimentonun kimyasal yapısının değişmesine neden olup çimentoya dayanım kazandırmasıdır. İkinci işlevi, çimento hamuru sayesinde agregaların birbirine yapışmasını sağlamaktır. Üçüncü işlevi ise, işlenebilirliğin sağlanması için gerekli olan su olup taze betonun boşluksuz ve homojen bir şekilde kalıba yerleştirmesinde etkin rol üstlenmesidir (Şimşek, 2012).

Beton karışımında optimum düzeyde su miktarı kullanılmalıdır. Optimum düzeyden fazla kullanılması halinde çimentonun dayanımı ve yapışkanlığını düşürürken; az kullanılması halinde ise agrega yüzeylerinin tam ıslanmamasına neden olup agregaların çimento hamuru ile oluşturacağı aderansı azaltmaktadır (Şimşek, 2012).

2.1.3. Agrega

Betonun ana iskeletini oluşturan ve beton içerisinde yaklaşık %70-%75'lik hacmi dolduran agregalar; doğal (kum, çakıl vb.) ve yapay (genleştirilmiş kil, genleştirilmiş perlit, cüruf vb.) malzemelerden oluşabilmektedir. Betonda yer alan agreganın görevleri arasında; betonda hedeflenen dayanıma ulaşılmasında yardımcı olmak, çevre şartlarına karşı betonun dayanıklılığını arttırmak ve betonda zamanla meydana gelebilecek hacimsel değişiklikleri önlemek yer almaktadır (Topgöl, 2016).

Kaliteli bir beton üretimi için agregalarda aranan özelliklerin:

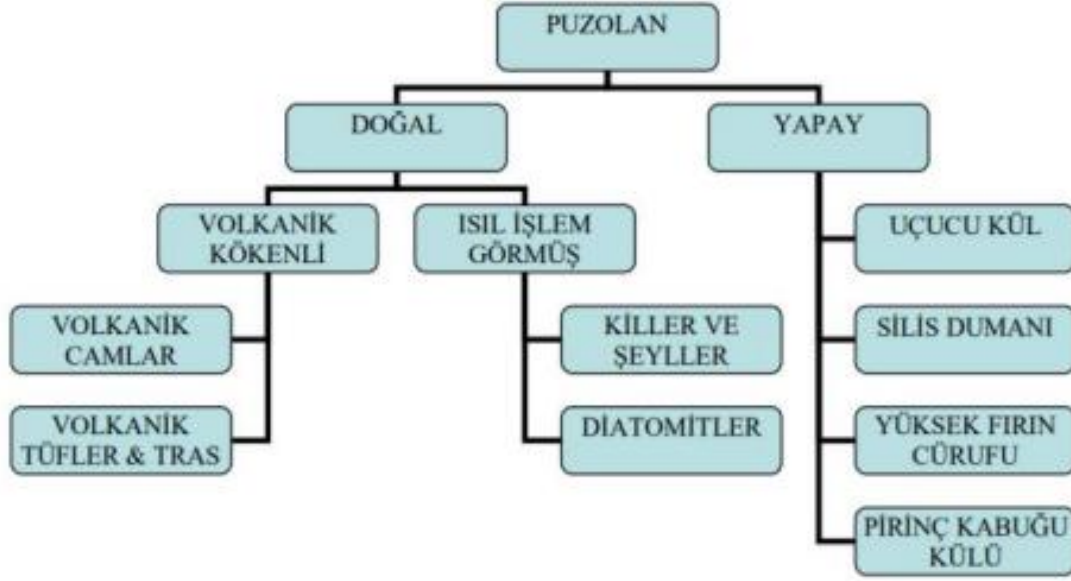
- a) Aşınmaya karşı sağlam ve dış etkilere karşı dayanıklı olması,
- b) Çimento ile zararlı reaksiyonlar gerçekleştirmemesi,
- c) Tane şekilleri ve dağılımı uygun olması ve
- d) Zayıf taneler (deniz kabuğu, odun vb.) içermemesi gerekmektedir (Şimşek, 2012).

2.1.4. Mineral katkılar

American Society for Testing and Materials (ASTM) C 618'e göre, puzolanik malzemeler, kendi başlarına bağlayıcı özelliği olmayan veya çok az bağlayıcılık gösteren ancak ince öğütölmeleri durumunda uygun nem şartları ve normal ortam sıcaklığı sağlandığında kireçle tepkimeye girerek bağlayıcılık özelliği kazanabilen silis ve alüminli malzemeler olarak tanımlanmaktadır.

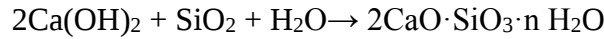
Puzolanlar, mineral bileşen olarak yüksek oranda reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) içermekle birlikte geri kalan kısmında demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer oksitleri barındırmaktadır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

Puzolanlar, doğal ve yapay puzolanlar şeklinde iki gruba ayrılmaktadır. Doğal puzolanlar; genellikle volkanik kökenli kayalardan oluşmakta ve ince şekilde öğütöldüklerinde puzolanik özelliğe sahip olmaktadır. Yapay puzolanlar ise termik santrallerde oluşan uçucu kül, çelik üretiminde yan ürün olarak elde edilen cüruf, silis dumanı gibi endüstriyel tesislerde meydana gelen atık malzemeleri kapsamaktadır (Bulut, 2008). Şekil 2.1'de puzolan sınıflandırması şema üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Pozolanların sınıflandırılması (Ramachandran, 1996).

ASTM C 618’ye göre doğal pozolanların portland çimentosunda kullanılabilmesi için içeriğindeki SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 bileşenlerin oranı en az %70 olması gerekmektedir. Pozolanlar, bağlayıcı özelliğe sahip malzemelerle karıştırıldıklarında kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcı malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirebilmektedir. Pozolanik reaksiyonda, çimento ve kireç gibi bağlayıcı malzemelerin içerisinde bulunan kalsiyum hidroksit ile pozolan tepkimeye girmekte ve bağlayıcı özelliği olan kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) ürünü oluşmaktadır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007). Pozolanik tepkime sonrası ortamda artan C-S-H ürünü, yapının mukavemetini de artırmaktadır. Ayrıca pozolanların ince öğütülerek kullanılması, çimento hamurundaki boşlukların azalmasına ve daha geçirimsiz bir beton elde edilmesine olanak sağlar (ACI Committee 234, 2006). Temel pozolanik reaksiyonu aşağıda verilmiştir.



Pozolanların istenilen aktiviteyi sağlayabilmesi için, yeterince ince taneli ve amorf yapıda olması, asgari miktarda silis, alümin ve demir oksit içermesi gerekmektedir (Erdoğan, 2009).

Pozolanik malzemeler beton içerisinde çimentoya ağırlıkça değişik oranlarda katılarak kullanılmaktadır. Bu oran %15 ile %40 arasında değişmektedir (Gündeşli, 2008). Aktivitesi yüksek ve ideal oranda kullanılan pozolan sayesinde betonun özellikleri de iyileşebilmektedir. Pozolan kullanımının betondaki olumlu etkileri aşağıda sıralanmıştır.

- Karışımın işlenebilirliğini artırmaktadır.
- Hidratasyon ısını azaltmaktadır.
- Nihai basınç dayanımını artırmaktadır.
- Alkali silika reaksiyonu kontrol altına alınmaktadır.
- Sülfata etkisine karşı dayanıklılığı artırmaktadır.
- Donma-çözölmeye karşı direci artırmaktadır.
- Su geçirgenliğini azaltmaktadır (Şimşek, 2012).

Yapı sektöründe yapay puzolan olarak en sık kullanılan malzemelerden biri olan yüksek fırın cürufunun özellikleri ile sağladığı avantaj ve dezavantajları aşağıda ayrı bir başlık altında açıklanmaya çalışılmıştır.

2.1.5. Kimyasal katkılar

Kimyasal katkılar, taze ve/veya sertleşmiş betonun özelliklerinin değiştirilmesinde kullanılan ve beton bileşenlerinin karıştırılmasından önce veya karıştırılma esnasında bağlayıcının toplam miktarının %5 ini aşmayacak oranda karışıma katılan organik ya da inorganik esaslı maddelerdir (Topgöl, 2016).

Su azaltıcı katkı malzemeleri (akışkanlaştırıcılar) beton yapımında kullanılarak ihtiyaç duyulan su miktarının azaltılmasını ve bu sayede daha dayanıklı beton elde edilmesini sağlamaktadır. Bir başka deyişle akışkanlaştırıcılar betondaki çimento miktarını azaltmadan ve dayanımı düşürmeden betonun istenilen kıvamda üretilmesine olanak sağlar. Çimento taneleri birbirleriyle birleşip ufak topaklar oluşturma eğilimindedirler. Akışkanlaştırıcılar ise suyun yüzey gerilimini azaltmakta ve negatif yüklü olmalarından dolayı su yüzeyinde hareket etmektedirler. Bu yönüyle akışkanlaştırıcılar, topaklanmanın önüne geçerek çimento tanelerinin birbirleri arasında kaymalarını sağlayacak yağlama görevi görmektedir. Bu durum beton karışımında meydana gelen iç sürtünmelerin azalması, işlenebilirliğin ise artması ile sonuçlanır (KÜB, 2023).

Normal, süper ve hiper olmak üzere 3 tip akışkanlaştırıcı mevcuttur. Betondaki karışım suyunu normal akışkanlaştırıcı katkılar %5-11 oranında, süper akışkanlaştırıcılar minimum %12 civarında, hiper akışkanlaştırıcılar ise %30 oranında azaltmaktadır (Yılmaz, 2003).

2.2. Durabilite

Durabilite; yapıların inşası sırasında kullanılan yapı malzemelerinin, işlevlerini servis ömürleri boyunca koruyarak yerine getirebilmesi, kimyasal ve fiziksel etkilere karşı direnir dayanabilmesi anlamına gelmektedir. Durabilite diğer bir deyişle kalıcılık veya dayanıklılık olarak da isimlendirilebilir (Doğan, 2008).

Geçmişte inşa edilen betonarme yapılar mekanik yüklere karşı yeterli dayanımı sağlayabilmeleri üzerine tasarlanmıştır. Başta basınç olmak üzere çekme, kesme, eğilme gerilmeleri altında yeterli dayanım gösteren binalar kullanıma uygun görülerek inşa edilmiştir. Ancak gelinen süreçte sadece bu mekanik yüklerin karşılanması yapıyı uzun süre ayakta tutabilmesi için tek başına yeterli olmadığı farkedilmiş olup zamana bağlı çevre şartlarının beton üzerindeki olumsuz etkilerinin de hasaba katılması gerektiği anlaşılmıştır. Bu sebeple betonarme yapıların maruz kaldığı mekanik yükler dışında zaman ve çevre şartlarının da etkisi düşünülerek yapıların servis ömürleri boyunca özelliklerini korumasını ifade eden durabilite kavramı ortaya çıkmıştır (Claisse, 2016).

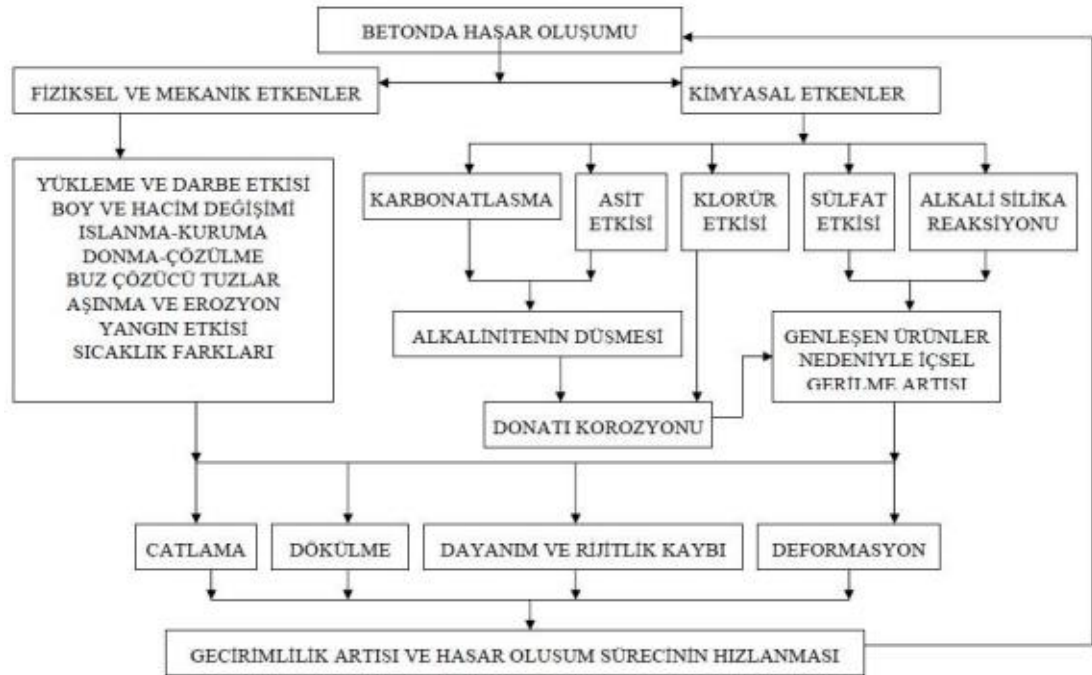
Betonun durabilitesini olumsuz yönde etkileyen faktörlerin oluşma nedenleri incelendiğinde betonun bünyesinde bulunan boşlukların bu duruma zemin oluşturduğu görülmektedir. Betonun işlevselliği için tehdit oluşturabilecek gazların, suyun ve zararlı maddelerin betonun iç kısmına ilerlemesine ve betonla etkileşime girerek bozulma sürecinin oluşmasına bu boşluklar sebebiyet vermektedir. Zararlı maddelerin beton içerisinde taşınımı boşlukların ve çatlakların çapına ve dağılıma bağlı olarak değişmektedir (Aitcin, 2019).

Agrega yüzeyinin çimento hamuru ile kaplanmış olması ve içerisinde az boşluk bulundurmasından dolayı betonun geçirimsiz olması büyük oranda çimento hamuruna ve agrega çimento arayüzeyinin boşluksuz yani geçirimsiz olmasına bağlıdır. Betonda yer alan boşluklar kapiler, mikro ve makro olarak gruplandırılabilir. Durabiliteyi en çok etkileyenler kılcal ve makro boyutta olan boşluklardır (Erden, 2021).

Betonda boşluk oranını etkileyen en önemli parametre su/çimento oranıdır. S/Ç oranı dışında betonun dökümü, yerleştirilmesi, bakımı işlemleri beton teknolojisi kurallarına uygun bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Beton üretiminde hidrasyon olayı için gereğinden fazla kullanılan su kalıplama aşaması sonrası betondan terleme yoluyla uzaklaşarak betonda boşluklu yapı oluşturacaktır. Ayrıca betonun kalıba

sıkıştırılarak yerleştirilmesi ve kalıplama sonrası uygun bakım koşullarının sağlanması betonun en az boşluklu şekilde üretilmesine olanak sağlayacaktır. Bu önlemler dışında beton karışımına çeşitli kimyasal ve mineral katkıların katılması betondaki boşluk oranının azaltılmasına katkı sağlayacaktır (Baradan vd., 2013).

Zararlı maddelerin doğrudan ya da dolaylı olarak beton içerisine taşınımı 3 farklı şekilde gerçekleşir. Bunlar emilim, difüzyon ve geçirimsiliktir (Baradan vd., 2013). Emilim, betonun yüzeyine temas halinde olan suyun zamanla betonun içerisine nüfuz etmesine denilmektedir. Kılcal ve yüzeyden su emme yöntemleriyle bulunabilmektedir. Yabancı maddelerin çok yoğun olduğu ortamdaki az yoğun olduğu beton içerisine geçişi difüzyon diye tanımlanmaktadır. Difüzyon, betonun bünyesinde olan boşlukların su ile dolması sonucu çözünmüş halde bulunan maddelerin betona geçebilmesi, gazların ise kuru boşluklar olması şartıyla doğrudan beton içerisine taşınabilmesi şeklinde olabilmektedir. Geçirimsilik, gaz ve sıvıların basınçlı ortamda beton içerisine geçişi şeklinde ifade edilmektedir (Altındağ, 2019). Bu taşınma modelleriyle betonda oluşabilecek hasar mekanizmaları Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Betonda hasar oluşum mekanizması (Doğan, 2008).

Yapıların zamanla bozulmasına sebep olacak fiziksel, kimyasal, mekanik ve biyolojik kökenli etkenlerden bazıları aşağıda verilmiştir.

Fiziksel ve Mekanik Etkenler

- Aşırı yüklemeye darbe etkisi
- Hacim ve boy değişikliği
- Islanma-kuruma
- Donma-çözülme
- Aşınma

Kimyasal Etkenler

- Sülfat etkisi
- Klorür etkisi
- Asit etkisi
- Korozyon
- Karbonatlaşma
- Alkali-agrega reaksiyonu

2.2.1. Betonda sülfat etkisi

Sülfat iyonlarının, çimentonun bazı bileşenleriyle reaksiyona girerek betonun hasar almasına yol açması sülfat etkisi olarak adlandırılmaktadır. Sülfat saldırısı, betondaki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve C_3A bileşenlerin sülfat iyonları ile tepkimeye girerek betonun hacimce artışına neden olan etrenjit ve alçı taşı ürünlerin meydana gelmesiyle oluşur. Bu hacimce genişlemeyle bir yandan betonda çatlaklar ve dağılmalar gözükürken, diğer taraftan çimento hamuru ile agrega arasındaki aderans da olumsuz anlamda etkilenir (Sun ve ark, 2019).

Sülfat saldırısı sonrası betonun genel görünümünde, köşe ve kenarlardan başlayıp tüm kütleyle yayılmış olan çatlaklar, beyaz lekeler ve dökülmeler gibi değişiklikler meydana gelir (Şekil 2.3). Hasarın zamanla ilerlemesiyle betonda ufalanma, yumuşama ve dayanım kaybı görülmeye başlanır (Ustabaş, 2008).



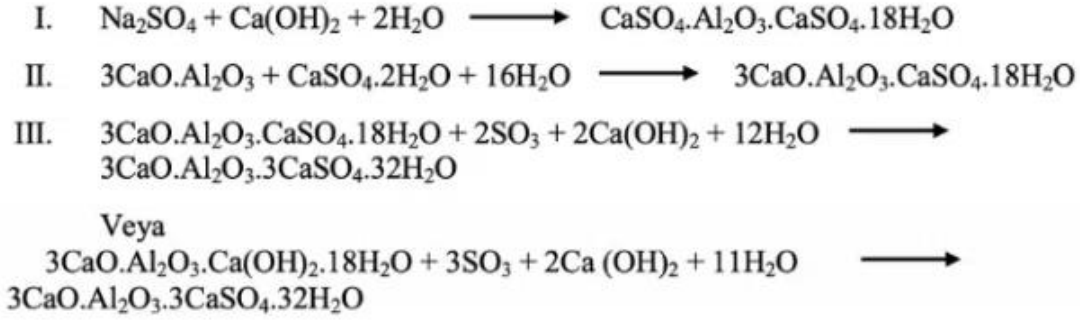
Şekil 2.3. Betonun sülfat etkisi sonrası görünümü (Ustabaş, 2008).

Sülfat etkisinin oluşumu ortam koşulları, betonun geçirimli olması, çimentonun tipi ve kimyasal yapısı, deniz suyu ile yer altı suyunun varlığı ile doğrudan ilişkilidir. Sülfat iyonları büyük ölçekte yer altı suyu, deniz suyu veya topraktan beton içerisine taşınabilir. Çevremizde rastladığımız, üzerinde çalılık hariç bitki yetişmemiş, yüzeyi beyaz tuz lekeleri ile kaplanmış topraklarda sülfat içeriği etkisini göstermiştir. Deniz yapılarında da ıslanma kuruma olayı ile deniz suyundan beton içerisine taşınan sülfatlar buharlaşma olayı ile betondaki sülfat yoğunluğunu artırmaktadır (Baradan ve Aydın, 2013).

Beton ve harçta sülfat etkisiyle oluşan ve betonda hasarlara yol açabilen bir başka faktör de etrenjit oluşumudur. Etrenjit, hidrasyon tepkimesinde en erken oluşan fazlardan biridir. İlk aşamada beton taze haldeyken sudan gelebilecek sülfat, kalsiyum sülfata diğer bir ifadeyle alçıya dönüşür. Daha sonra hidrate olan alçı betonda genişlerken betona zarar verebilir. Ancak ihmal edilebilecek bu genişleme için betonda yeterince alan mevcuttur (Tosun, 2007).

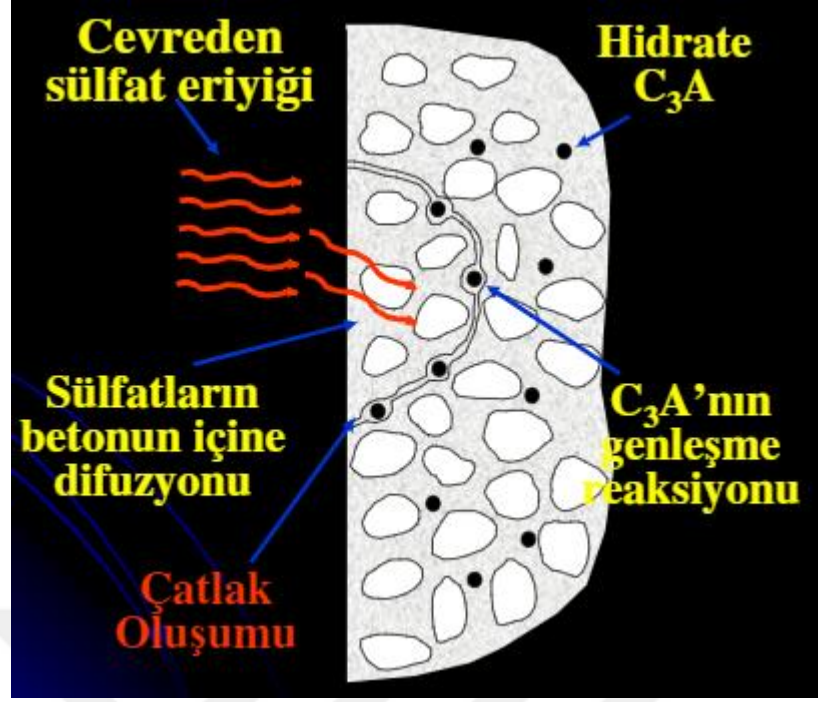
Etrenjit prizin ayarlanması açısından da gerekli bir üründür. C_3A 'nın ani priz almaması, mukavemet gelişiminin iyileştirilmesi ve kuruma büzülmesinin azaltılması için üretim esnasında çimentoya kasıtlı olarak alçıtaşı ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) eklenmektedir. Daha sonra alçı ve diğer sülfatlı bileşikler, suyla karıştırıldıktan birkaç saat sonra kalsiyum alüminat (C_3A) bileşeni ile reaksiyona girerek etrenjit ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) ürünü meydana getirir. Böylelikle oluşan etrenjit C_3A 'nın yüzeyine çökerek hızlı priz alması engellenmiş olur. Priz sırasında olan

beton sıvı kıvamda olduğu için bu etrenjit oluşumundan zarar görmez. Aksi bir durum yaşanmaması için alçıtaşının oluşturacağı sülfat miktarı çimento ağırlığının %3'ünü aşmaması ve böylece betonun mukavemetinin olumsuz anlamda etkilenmemesi sağlanır (Baradan ve Aydın, 2013). Sülfat etkisinin oluşumunda gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Sülfat etkisinin oluşumunda gerçekleşen kimyasal aşamalar (Tosun, 2007).

Prefabrik yapı elemanlarının üretimi esnasında, dayanımın hızlı kazanılması için betona yoğun buhar kürü uygulanmaktadır. Ancak bu işlem sırasında beton yüksek sıcaklıklara (70-80 °C) maruz kaldığı için alçıtaşının çözünürlüğü düşer ve C₃A bileşeni ile erken yaşlarda tepkimeye giremez. Bu tepkime, betonun sertleştikten sonra zaman içerisinde nemin olduğu ortamlarda gerçekleşerek sülfat saldırısının bir çeşidi olan gecikmiş etrenjit oluşumu (DEF) ile sonuçlanır. Bu oluşum sonucunda genleşen tuz sertleşmiş haldeki betonu çatlatır ve parçalanmasına neden olur (Şekil 2.5). Buhar kürü uygulanmayan fakat kütle betonları gibi içi ısısı yüksek olan ve beton bacalar gibi dış ortamdan dolayı ısınan beton ve betonarme yapılarda da gecikmiş etrenjitin zararlı etkileri görülmektedir (Baradan ve Aydın, 2013).

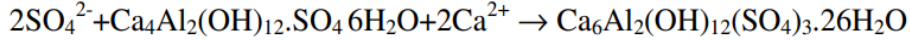


Şekil 2.5. Betonda sülfat etkisiyle çatlak oluşumu (ÇİMSA, 2023).

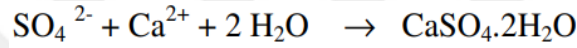
Sülfat etkisine önlem olarak, betonun mümkün mertebe geçirimsiz üretilmesi, çimento dozajının ve S/Ç oranının kimyasal katkıyla olabildiğince düşürülmesi gerekir. Bu durumda işlenebilirliği sağlamak için akışkanlaştırıcı madde kullanılmalıdır. Düşük C_3A oranına sahip özel çimentolar kullanmak veya puzolanik katkı kullanarak beton üretmek sülfat saldırısına karşı alınabilecek diğer önlemler arasındadır. ASTM standartlarına göre çimentodaki C_3A oranı ≤ 8 olan çimentolar orta seviyede sülfata dayanıklı, ≤ 5 olan çimentolar ise yüksek seviyede sülfata dayanıklı çimento olarak tanımlanmaktadır. Normal portland çimentolarını, içeriğindeki C_3A oranı %8-11 aralığında olduğundan, sülfata maruz kalacak yapılarda kullanmak oldukça sakıncalıdır. Ayrıca betonda puzolan kullanımı, doğru kür tekniği uygulanması koşuluyla geçirimsizliği arttırmasının yanında betondaki $Ca(OH)_2$ 'i bağlayarak sülfatla tepimeye girmesini engelleyebilmektedir. Örneğin; beton yapımında uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların kullanımı betonun sülfat saldırısına karşı dayanıklılığını arttırmaktadır (Baradan vd., 2013).

2.2.1.1. Betonda sodyum sülfat etkisi

Dış ortamdan betona nüfuz eden sodyum sülfat iyonları çimento hidratasyon ürünleriyle tepkimeye girerek beton içerisinde alçıtaşı ve etrenjit oluşumlarına neden olur.



Etrenjit oluşumunun verildiği yukarıdaki tepkimenin gerçekleşebilmesi için gerekli olan Ca^{+2} iyonu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in çözünmesiyle sağlanmaktadır. Betonda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in bitmesine rağmen ortamda sülfat iyonlarının bulunması halinde yukarıdaki denklem için gerekli olan Ca^{2+} iyonu C-S-H jelinden sağlanmaya başlanır. Bu durumda çimentoya bağlayıcılık özelliği katan C-S-H jelin yapısındaki CaO/SiO_2 oranının azalmasına ve bağlayıcılık özelliğinin kaybolmasına sebep olur. Eğer sülfat iyonu etkisiyle betondaki Al^{3+} iyonu tükenmiş ve ortamda halen sülfat iyonu bulunuyorsa etrenjit yerine alçıtaşı oluşmaktadır. Tepkimeye giren Al^{3+} iyonları hidrasyon ürünü olan C^3A 'dan da sağlanabilmektedir. Beton yüzeyinde sülfat iyonlarının alüminat iyonlarından fazla olması alçıtaşının yüzeye yakın yerde oluşmasına neden olmaktadır (Skalny, 2001).



Betona suyla yüksek miktarda sodyum sülfat girmesi durumunda betonda zamanla suyun buharlaşmasıyla birlikte gözeneklerde kalan sülfat tuzları kristalleşebilmektedir. Bu oluşumlar genellikle betonun yüzeyine yakın yerlerde meydana gelmektedir. Sodyum tuzlarının kristalleşmesi betonda hacim artışına neden olmakta ve bunun sonucunda iç gerilmeler oluşarak betonda hasar oluşumu yaşanabilmektedir (Skalny, 2001).

2.2.1.2. Betonda magnezyum sülfat etkisi

Betona nüfuz eden magnezyum sülfat iyonları $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile tepkimeye girerek brusit ve alçıtaşını oluşturmaktadır.



Tepkimeyle oluşan brusit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), suda az çözünen bir ürün olduğu için betonda yer alan boşlukları doldurarak geçirimsizliği sağlamaktadır. Kalsiyum sülfat (alçıtaşı) ise çözünebilen üründür ve magnezyum sülfat etkisinde beton yüzeyinde veya yüzeye yakın yerlerde oluşmaktadır. Sülfat etkisiyle betonda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in tükenmesi durumunda tepkime için gerekli olan Ca^{2+} iyonu C-S-H jelinden sağlanmaya başlanır ve C/S oranında azalma gerçekleşir. C-S-H jelinde dekalsifikasyonun meydana gelmesi C-S-H jelinin amorf hidrit silikaya ($\text{SiO}_2 \cdot \text{aq}$) veya zayıf kristal yapıdaki magnezyum silika hidrata ($\text{M}_3\text{S}_2\text{H}_2$) dönüşmesine neden olur. Magnezyum sülfat

etkisinin devam etmesi durumunda C-S-H jelindeki Ca^{2+} iyonlarının tamamı Mg^{2+} iyonları ile yer değişir ve yapısındaki C/S oranı sıfır olur. Sülfat saldırıları içerisinde betondaki C-S-H jelini en hızlı bozma etkisi gösteren magnezyum sülfattır. Magnezyum sülfatın betona etki etmesi sonrası beton yüzeyine hareket eden hidroksit iyonları çözünmeyen brusit oluştururken betonun iç kısmına hareket eden sülfat iyonları ise alçıtaşı ve etrenjit oluşturmaktadır (Skalny, 2001).

2.3. Metalurjik Cüruf Çeşitleri

Cüruf, demir çelik sektörü başta olmak üzere metal cevherlerin eritilmesiyle oluşan, metala göre daha hafif oksitli ve silikatlı bileşenler içeren ve yoğunluk farkıyla birlikte erimiş olan sıvı metalin yüzeyinde biriken endüstriyel bir yan üründür (Ünal, 2017). Metal üretiminde önemli bir yere sahip olan cürufların farklı görevleri de bulunmaktadır. Bunlardan bazıları, ergitme işleminde metalin içerisindeki fosfor ve kükürt gibi safsızlık oluşturan maddeleri bünyesine almak, eriyik metalin kirlenmemesi ve ısı kaybı yaşamaması için sıvı metalin üzerinde ara yüzey oluşturmaktır (Wang, 2016b).

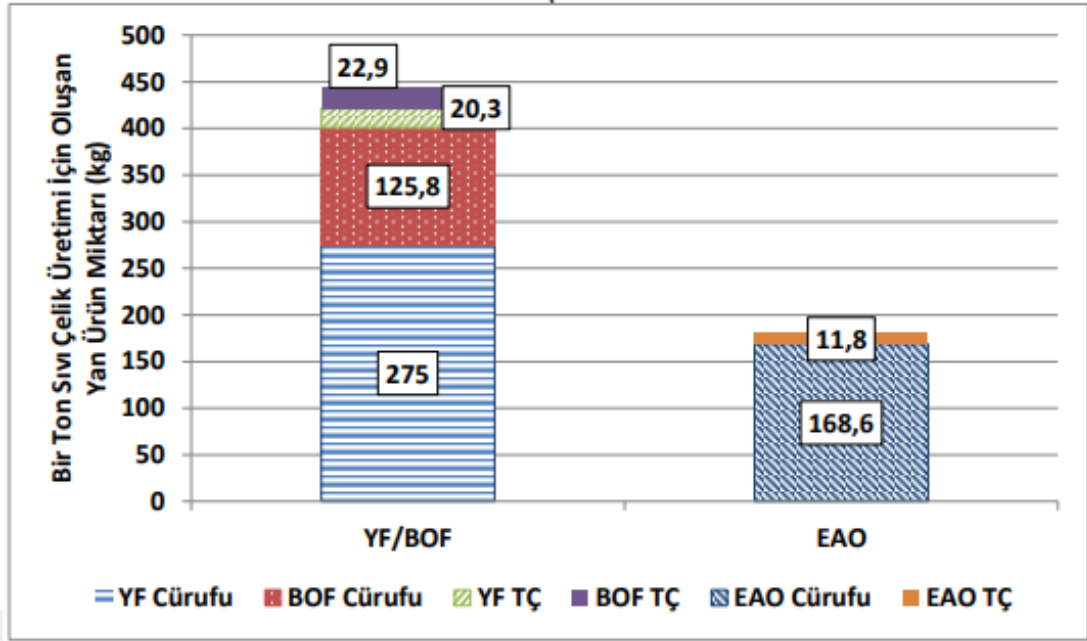
Cüruflar, geri dönüştürülmediği veya kullanılmadıkları takdirde üretim tesisleri için büyük sorun teşkil eden bir atık kaynağı haline dönüşür. Endüstri sektörünün gelişmesiyle birlikte cürufların düzenli depolanması için yeterli alanların ayrılması gerekmektedir. Cürufun geri kazanılmadan zamanla birikmesi işletme açısından bertaraf maliyetlerini artırmaktadır. Atık malzemelerin doldurduğu sahalar çevre için tehdit saçarak toprak, hava ve su kirliliği neden olur ve buna bağlı olarak insan ve bitki sağlığını da olumsuz anlamda etkiler (Reuter ve ark, 2004). Şekil 2.6'da Kardemir A.Ş.'de oluşan endüstriyel atıkların depolama tesisi gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Kardemir A.Ş. endüstriyel atık depolama tesisi.

Dünya Çelik Örgütü çelik üretiminde ortaya çıkan cüruf ve toz gibi yan ürünlerin geri kazanılması veya farklı sektörlerde tekrar kullanılmasıyla çelik endüstrisinde atık oluşumunu sıfıra indirmeyi hedeflemektedir. Tekrar işlenerek geri kazanılan cüruf birçok sektörde kullanılan maliyetli malzemelerin yerini alabilecek potansiyele sahiptir. Atıkların üretime yeniden dahil edilmesi bertaraf maliyetini azaltacak ve enerji tasarrufunu beraberinde getirecektir (Dietz, 2014).

Çelik üretimi esnasında oluşan atıkların % 90'ı yüksek fırın cürufu, çelikhane cürufu, çamur ve tozdan meydana gelmektedir. Ham cevherden 1 ton sıvı çelik elde ederken birincil üretim olan yüksek fırın ve bazik oksijen fırınlarında yaklaşık olarak 445 kg cüruf çıkmaktadır. 1 ton sıvı çelik üretiminde ortaya çıkan cüruf türlerinin miktarları Şekil 2.7'de verilmiştir. Buna göre 275 kg'ını yüksek fırın cürufu, geri kalan yaklaşık 126 kg'ını da bazik oksijen cürufu oluşturmaktadır. Elektrik ark fırınlarında ikincil üretimle 1 ton sıvı çelik eldesinde yaklaşık olarak 169 kg elektrik ark ocağı cürufu oluşmaktadır (WSA, 2010).

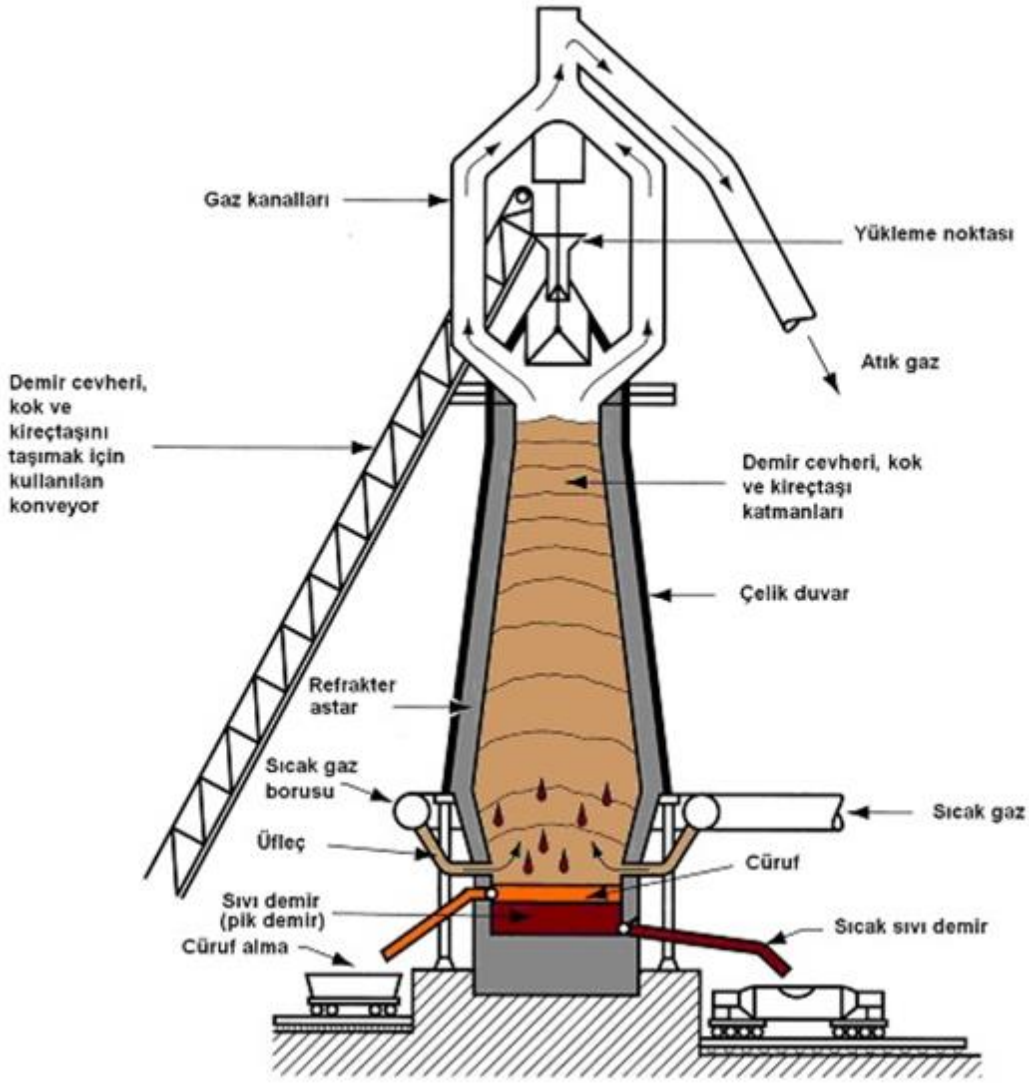


Şekil 2.7. Bir ton sıvı çelik üretiminde oluşan cüruf miktarları (WSA, 2010).

2.3.1. Çelik üretimi

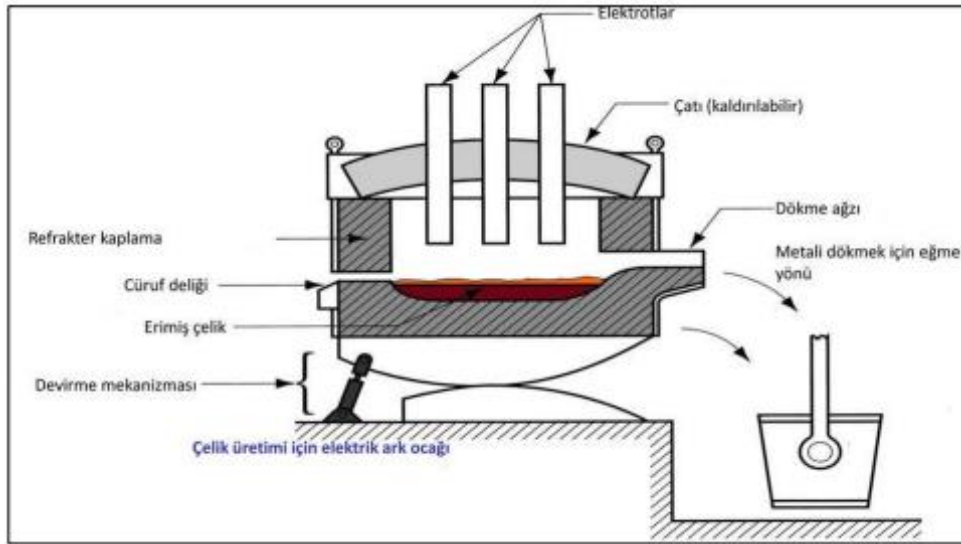
Çelik üretimi, cevher halindeki demirin kömür ve diğer redüktantlar yardımıyla indirgenerek sıvı demir haline gelmesi, ardından içerisine oksijen üflenerek çeliğe dönüştürülmesi şeklinde gerçekleşen birincil üretim ve hurda kullanılarak çelik üretim modeline dayalı olan ikincil üretim şeklinde sağlanmaktadır.

Birincil üretimde çelik üretimi yüksek fırın ve bazik oksijen fırınların entegre çalıştığı tesislerde yapılmaktadır. Entegre tesislerde çelik iki aşamada üretilmektedir. İlk olarak demir oksit yüksek fırında yakıt olarak kok kömürü kullanılarak redüklenir. Bu işlem sonunda içerisinde çeşitli elementlerle (mangan, fosfor...) birlikte karbon içerikli sıvı metal elde edilir. Sıvı metali saf hale getirmek için içerisine kireçtaşı eklenir ve alümin, mangan, sülfür gibi istenmeyen maddeler eriyik halde diğer bir deyişle cüruf halinde toplanır. İkinci aşamada, safsızlık oluşturan maddelerden uzaklaşan sıvı metal bazik oksijen fırınlarına alınır ve oksijen üflenerek içerisindeki karbon miktarı kimyasal reaksiyonlarla düşürülür. Çelik üretimi istenilen özelliklerde sahip olması için çeşitli alaşımlar eklenerek son bulur (Coudurier ve ark, 1985). Şekil 2.8’de tipik bir yüksek fırının genel görünümü resmedilmiştir.



Şekil 2.8. Yüksek fırını genel görünümü (TÇÜD, 2016).

İkincil üretim metoduyla çelik üretimi, servis ömürlerini doldurmuş hurda demirlerin elektrik ark ocağında eritilerek sıvı çeliğin elde edilmesiyle sağlanmaktadır. Elektrik ark ocaklarında fırının içine yerleştirilen elektrotlara elektrik akımı verilerek ark oluşturulur ve bu sayede hurdanın eriyebileceği sıcaklık oluşturulur. Fırına ayrıca kireçtaşı veya dolomit eklenerek okside haldeki alüminyum, silikon, karbon gibi safsızlık oluşturan maddeler cüruf haline dönüşür. Sıvı çeliğe göre daha az yoğunlukta olan cüruf yüzeyde toplanır ve fırına eğim verilerek sistemden uzaklaştırılır. Bu sayede geride saf halde sıvı çelik eldesi sağlanır (Coudurier ve ark, 1985). Şekil 2.9’de tipik bir elektrik ark ocağı resmedilmiştir.



Şekil 2.9. Elektrik ark ocağı genel görünümü (TÇÜD, 2016).

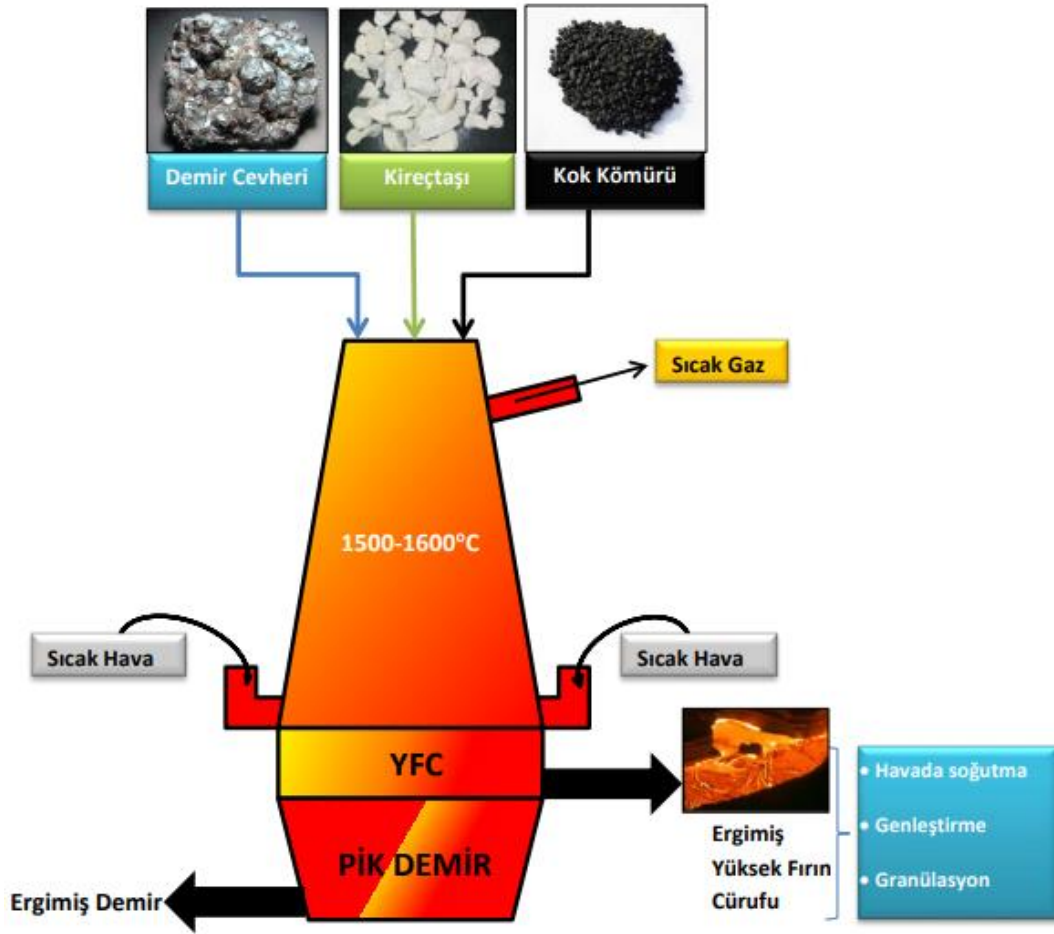
Cüruf, içindeki bileşenlerin farklılık göstermesiyle değişik özelliklere sahip olabilmektedir. Buna karşılık yoğunluk ve ergime sıcaklığının düşük olması cürufların ortak özellikleri arasında gösterilmektedir. Nihai üründe olması istenen özellikler ve uygulanan üretim metoduna göre cüruf yapısında da farklılaşmalar görülmektedir.

Dünya genelinde demir-çelik endüstrisinde oluşan yıllık cüruf miktarı 400 milyon tonu aşarak dikkatleri üzerine çekmektedir. Çelik üretiminde oluşan başlıca cüruf türleri yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufu olarak sıralanmaktadır. Oluşan bu cüruf türleri, içinde barındırdıkları kimyasal bileşenler ve minerallere göre çimentolaştırıcı veya puzolanik madde olarak beton endüstrisinde kullanılmaktadır. Ayrıca bazı cüruf sınıfları farklı imalatlarda agrega şartlarını da sağlamaktadır (Kourounis ve ark, 2007).

2.3.2. Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırın cürufu (YFC), demir-çelik tesislerinde ham cevherin pik demire dönüştüğü yüksek fırınlarda oluşan bir yan üründür. Demir üretimi için yüksek fırına hammadde olarak demir cevheri, kok kömürü ve kireçtaşı konulmaktadır. Demir cevheri yüksek oranda demir oksit içermekle birlikte alümin, silis, kükürt gibi demir dışı istenmeyen maddeleri de içinde barındırmaktadır. Yakıt olarak kok kömürü kullanılan yüksek fırınlarda safsızlık oluşturan bu maddeler kireçtaşının yardımıyla uzaklaştırılmaktadır. Kok kömüründeki karbonla, demir cevherindeki oksitler reaksiyona girerek karbondioksit ve karbon monoksit gazlarını oluşturur ve fırından çıkar. Geride eriyik halde demir, karbon, alümin, silis, fosfor ve sülfür bileşenlerinin

oluşturduğu yüksek fırın cürufu kalır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007). Yüksek fırın cürufunun oluşma süreci Şekil 2.10’da gösterilmiştir.

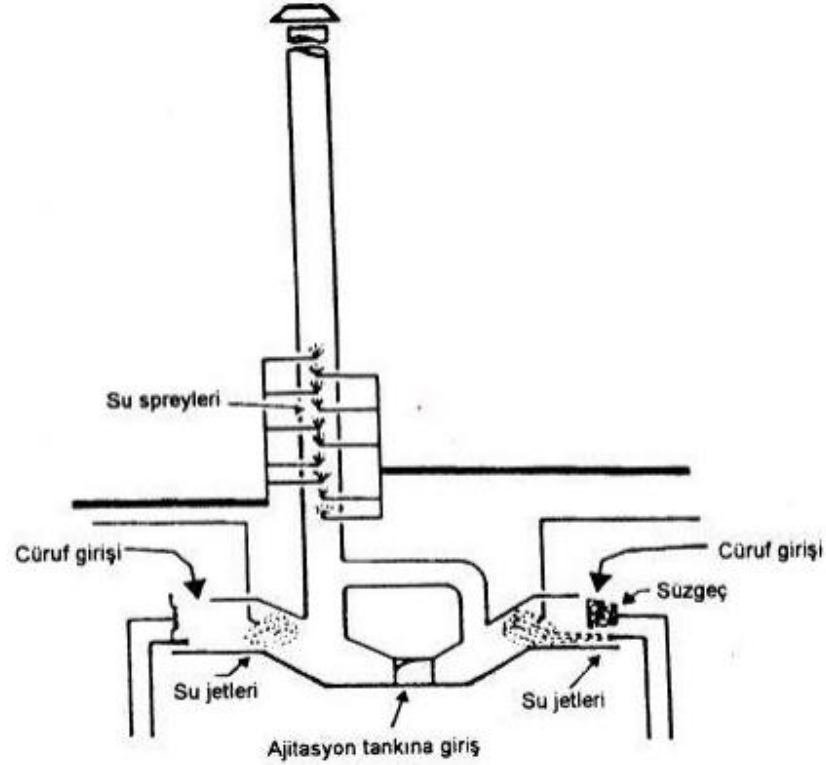


Şekil 2.10. Yüksek fırın cürufunun oluşum süreci (Engin, 2023).

Yüksek fırında sıcaklığın 1600°C’lere ulaşmasıyla eriyen malzemeler yoğunluk farkının etkisiyle üst kısımda cüruf alt kısımda pik demir olacak şeklinde toplanır. Eriyik haldeki cüruf ile pik demir fırından farklı çıkışlardan tahliye edilerek birbirinden ayrılır. Eriyik haldeki yüksek fırın cürufu için 3 farklı soğutma yöntemi mevcuttur. Soğutma tekniğine göre cürufun özellikleri ve kullanım alanlarını değişiklik göstermektedir.

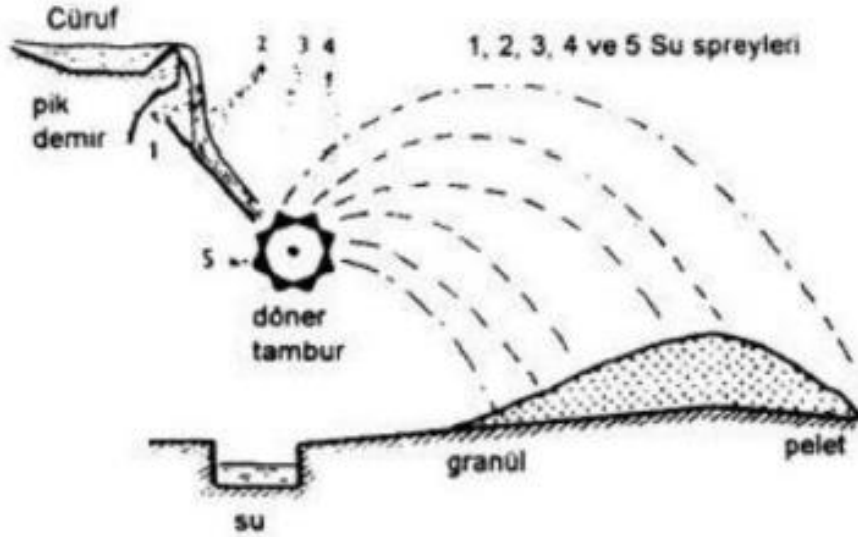
Sıcak halde fırından çıkan YFC’ nin aniden soğutulması için iki farklı metot kullanılmaktadır. Bu metotlar Granülasyon ve Peletleme metodu olarak adlandırılmaktadır. Su ile soğutma işlemi olan granülasyon yönteminde YFC, amorf (camsı) yapıya dönüşür ve hidrolik özelliği kazanarak iri tane boyutundaki kum gibi granüle bir malzeme halini alır. Granülasyon yönteminin şematik halde çizimi Şekil 2.11’de gösterilmiştir. Bu yöntem, çok fazla miktarda su harcandığı için ekonomik

olarak dezavantajlıdır. 1 ton granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) elde edebilmek için yaklaşık 10 ton su kullanılmaktadır. Bu yöntemle karşılık peletleme metodu daha ekonomik oluşuyla öne çıkmaktadır (Tokyay ve Erdoğan, 2011).



Şekil 2.11. Granülasyon yöntemi (Tokyay ve Erdoğan, 2011).

Peletleme yönteminde eriyik halde sisteme dahil olan cüruf, bant üzerinde su spreyleriyle soğutulmaktadır. Ardından dönen tambur vasıtasıyla havaya atılır ve aniden soğumaları sağlanır. Bu yöntemde 1 ton cüruf soğutmak için yaklaşık olarak 1 m³ su harcanmaktadır. Granülasyon metodundan 6 kat daha ucuza maliyet edilmesi bu metodu işletmeler için daha cazip hale getirmektedir (Tokyay ve Erdoğan, 2011). Peletleme yönteminin şematik halde çizimi Şekil 2.12’de gösterilmiştir.

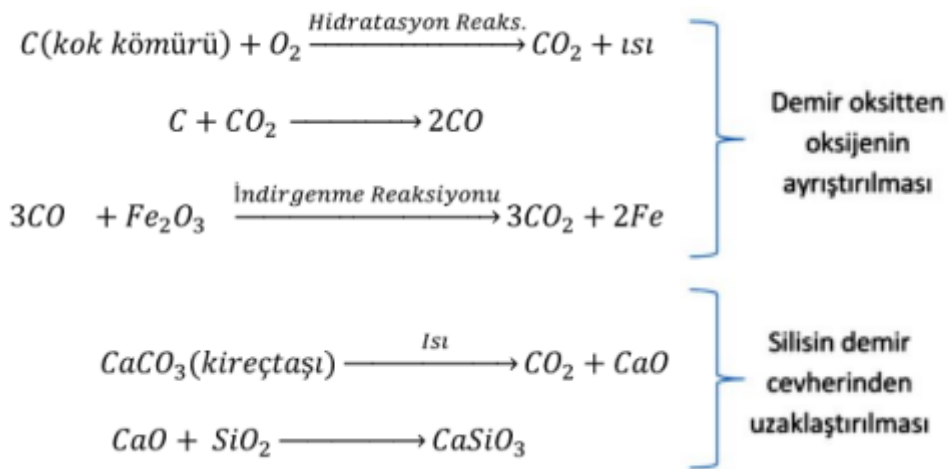


Şekil 2.12. Peletleme yönteminin şematik görünümü (Tokyay ve Erdoğan, 2011).

Peletleme metoduyla granüle şeklini alan cüruf lar içinde kalmış olan sudan arındırılır ve bağlayıcı özellik kazanabilmesi için değ irmenlerde ç imento ile aynı inceliğe gelinceye kadar öğ ütülür. Öğ ütölmüş yüksek fırın cüruf ları alkali aktivatörlerle beraber kullanılarak hidrolik özelliği kazanmaktadır. Bu sayede cüruf lu ç imento üretimi ve beton katkı malzemesi olarak beton endüstrisinde kullanılabilir (Özcan, 2018).

2.3.2.1. YFC'nin kimyasal özellikleri

Yüksek fırınlarda ham cevherden pik demir eldesi için esas olan cevherdeki yabancı maddeler ve oksijeni ayırmaktır. Buna göre fırınlarda gerçekleş en tepkimeler Şekil 2.13'de gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Yüksek fırında gerçekleş en kimyasal tepkimeler (Engin, 2023).

YFC'nun bileşimi kullanılan hammaddeye, eritken maddeye ve kok malzemesinden beslenme dengesizliğine göre değişmektedir. Yüksek fırın cürufu çimentoya göre içerisinde yüksek miktarda Al_2O_3 ve SiO_2 barındırmaktadır. Buna karşılık içerisindeki CaO oranı çimentoya göre nispeten daha düşük seviyededir. Bununla birlikte YFC, çimentoya göre daha düşük yoğunluğa sahiptir. Bağlayıcı malzemelerin incelik ve bileşenlerinin oranları işlevlerini etkilediği gibi yüksek fırın cürufunun da yüksek miktarda SiO_2 içermesi çimentoya göre daha zor öğütülmesine neden olmaktadır (Engin, 2023).

YFC'nun hidrolik bağlayıcılık değeri kimyasal içeriğinin uygunluğu ile ilişkilidir. CaO/ SiO_2 oranının artmasıyla bağlayıcılık özelliği de artış göstermektedir. Bu oranın 1'den büyük olması gerekirken belli bir eşik değeri aşması halinde ise granülasyon zorlaşacağından hidrolik özelliğinde azalmalar gerçekleşebilir. Buna karşılık bileşimin sabit tutulması ve Al_2O_3 miktarının artırılmasıyla hidrolik aktivitesinde artış sağlanabilmektedir. MgO oranının %10'a kadar cürufta bulunması dayanımı etkilemezken bu değerden fazla bulunması durumunda ise dayanımı düşürebilir. Bununla birlikte içerisindeki demir ve mangan oksitlerin de etkisiyle dayanım olumsuz anlamda etkilenmektedir (Tokyay ve Erdoğan, 2011).

2.3.2.2. YFC'nin beton üretiminde kullanımı

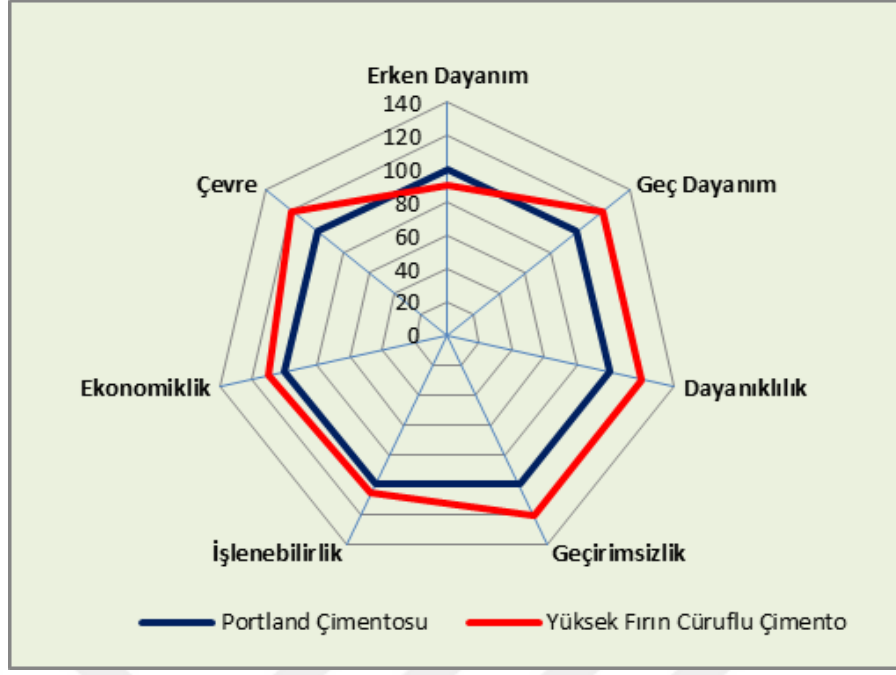
Yüksek fırın cürufları, genellikle betonda puzolanik malzeme olarak kullanılmaktadır. Bu yüzden çok ince tane şeklinde öğütülüp betona katılır. Beton üretiminde ÖYFC kullanılması, taze ve sertleşmiş haldeki betonun özelliklerini iyileştirmekte ve içerisinde hiç cüruf içermeyen betonlara kıyasla çevre koşullarına karşı daha dayanıklı yapı oluşmasını sağlamaktadır (Babu ve Kumar, 2000). YFC'nin taze ve sertleşmiş haldeki betonda göstereceği etkiler Şekil 2.14'de verilmiştir.



Şekil 2.14. Yüksek fırın cürufunun betonda göstereceği etki (Engin, 2023).

Yüksek fırın cürufu, betona genellikle öğütülmüş halde katılmaktadır. ÖYFC betonda 3 farklı şekilde kullanabilmektedir. Bunlar; sulu ortamda kalsiyum hidroksitle bir araya getirilerek bağlayıcı madde olarak, klinker ve alçıtaşı ile birlikte veyahut ayrı ayrı öğütülerek cürufllu çimentonun üretiminde ve katkı malzemesi olarak betonda kullanılması şeklinde sıralanmaktadır (Mehta, 1999).

YFC, çimentoyla birlikte kullanıldığında betonun özelliklerine olumlu yönde katkı sağlaması beklenmektedir. Çimentoyla belli oranlarda (% 30 ve % 40) yer değiştirilerek kullanılması durumunda erken dayanımda düşüşler görülse bile puzolanik reaksiyonlarla 28 günlük dayanımda bu farkın kapandığı hatta belli bir süre sonra dayanımın katkısız betona göre daha yüksek seviyelere ulaştığı görülmüştür. Ayrıca içinde YFC barındıran betonlar suda ve sülfatlı çözeltide bekletildiğinde, düşük genleşmeler gösterirken standart limitleri de sağladığı tespit edilmiştir (Yazıcı, 2006). Şekil 2.15’de PÇ ile YFC’li çimentonun sergiledikleri performanslar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 2.15. Portland çimentosu ve YFC'li çimentonun özelliklerinin kıyaslanması (Engin, 2023).

GYFC, betonun işlenebilirliğini artırmaktadır. Bu durum, cüruf tanelerinin çimento partiküllerine göre yüzey özelliklerinin daha pürüzsüz ve yoğun olmasından kaynaklı daha az su emmesiyle elde edilmektedir (ACI Committee 233, 2000).

Cürüflu çimentoların priz süresini uzattığı yapılan çalışmalarda ortaya konmuştur. Bu durum sıcak havalarda avantaj olarak gözükmekle soğuk havalarda ise dezavantaj olmaktadır. Yüksek fırın cürufu, çimentoda hızlı tepkimeye girerek çok ısı açığa çıkmasına sebep olan C_3A bileşenini içermediği için terlemeyi düşürür ve priz süresini de uzatmış olur. Priz olayının yavaşlaması, hidrasyon ısısının azalmasına ve böylece kütle betonların dökümünde görülebilecek olumsuzlukların ortadan kalkmasına katkı sağlayacaktır. İşlenebilirlik özelliğinin artmasıyla betonun daha boşluksuz bir şekilde yerleşmesini sağlayan GYFC bu sayede geçirimsizliği de azaltmayı sağlar. Geçirimsizliğin azalmasıyla birlikte donma çözünme, sülfat ve asit saldırısı, klorür etkisi, alkali-silika reaksiyonu gibi birçok olumsuz durumdan korunmuş olunur (Emiroğlu ve ark, 2011).

GYFC, hidrasyon sonucu oluşan ve sülfat varlığında etrenjit oluşmasına neden olan $Ca(OH)_2$ 'i bağlayarak hem gecikmiş etrenjitin meydana getirebileceği hasarı engellemiş olur hem de bu tepkimeden C-S-H jeli oluşturarak boşlukları azaltmasına ve dayanımın artmasına katkı sağlamış olur (Erdoğan, 2007).

2.3.3. Çelikhane cürufu

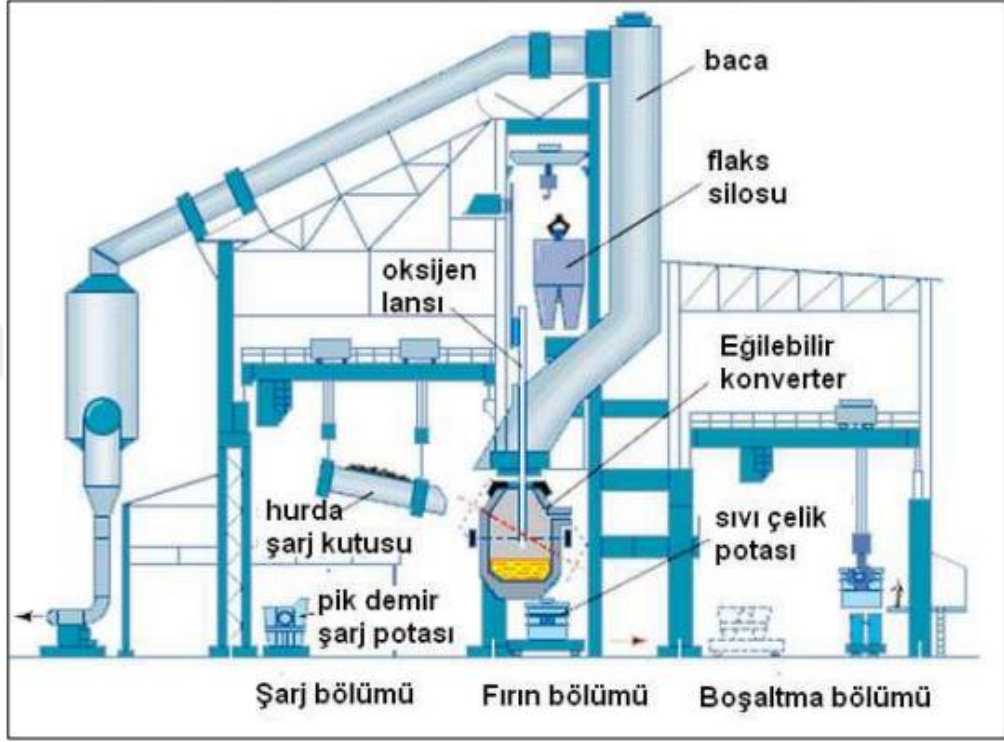
Çelik cürufu, çelik üretimi esnasında Bazik Oksijen Fırını (BOF) ve Elektrik Ark Fırınında ortaya çıkan cürufları ifade etmektedir (TÇÜD, 2016). Çelik cürufları farklı besleme malzemelerinin ve ergitme tekniklerinin kullanılmasıyla oluşan içerisindeki kimyasal bileşimi değişkenlik gösterebilen bir atık malzemesidir. Yüksek fırın cürufundan farklı olarak Çelikhane Cürufu ve Elektrik Ark Fırını cürufların oluşumu yükseltgenme reaksiyonlarıyla gerçekleşmektedir (Reuter ve ark, 2004). Çelik cürufu CaO , MgO , SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MnO , P_2O_5 gibi çeşitli değerli maddelerden oluşmaktadır. Kimyasal bileşimi fırın türü ve ön işlemlerdeki prosese göre değişmektedir.

Çelik üretiminde oluşan cüruf miktarı, üretilen toplam sıvı çeliğin yaklaşık yüzde 15'ine denk gelmektedir. İçerisinde barındırdığı demir oranı, demir oksit ile demir taşıyan diğer mineraller ile yüzde 7 ile 10 arasında değişmektedir. Bu demir miktarı maden işleme tekniğiyle cüruftan geri alınıp sinterlemede, yüksek fırınlarda ve çelik üretiminde şarj malzemesi olarak kullanılabilir. Ayrıca çelik cürufu, yüksek oranda içerdiği MgO , CaO ve MnO sayesinde kireçtaşı ve dolomit yerine demir-çelik üretim prosesinde kullanılarak maliyeti azaltmaktadır.

Oksijenle çelik üretimi (BOF) yapılan tesislerde hammedde olarak; sıvı pik demir, hurda/soğutucular ve cüruf yapıcı malzemeler kullanılmaktadır. Yüksek fırından $1482-1537^\circ\text{C}$ 'de elde edilen sıvı metal transfer potası aracılığıyla çelikhaneye taşınır. Sıvı metal konventöre alınır ve ardından hurda veya soğutucular da içerisine katılır. Hurda ilave ederek hem malzemenin geri dönüşümü sağlanmış olur hem de konventör içinde oluşan yüksek sıcaklık düşürülmeye çalışılır. Sıcak metalde bulunan Fe, C, Si, P ve Mn gibi maddelerin oksijenle yakılması sonucu oldukça fazla ısı açığa çıkmaktadır. Bu durum fırının iç yüzeyine zarar verdiği gibi metal sıcaklığının döküm için elverişsiz bir değere ulaşmasına neden olur. Bu yüzden hurda ve/veya soğutucular kullanılarak fazla ısı alınmaya çalışılır (Wang, 2016a).

Konventöre eklenen diğer bir madde ise cüruf yapıcılarıdır. Pik demir içindeki safsızlıkları ve oksitli elementleri toplayarak önemli bir görevi yerine getirmektedir. BOF'da tercih edilen cüruf yapıcılar (flaks) genel itibarıyla yüksek CaO 'lu kireç ve dolomittir. Hurda ve cüruf yapıcı malzemeler sıvı metale eklendikten sonra konventörde karıştırılır ve ardından konventör içine daldırılan bir lans yoluyla oksijen gazı yüksak basınçta beslenir. BOF sisteminde C, Mn, S, P elementleri oksijenle

tepkimeye girer ve oksitlenmiş halde metal havuzundan uzaklaşır. İşlem bitmesiyle safsız hale gelen sıvı çelik ve eriyik cüruf ayrı ayrı potalara dökülerek birbirinden ayrıştırılır. Son olarak, çıkan cüruflar soğumaya bırakılmak üzere stok sahalarına alınır ve bekletilir (Wang, 2016a). Bazık oksijen fırınının yardımcı bölümleriyle birlikte genel görünümü Şekil 2.16’de verilmiştir.



Şekil 2.16. Bazık oksijen fırını ve yardımcı bölümlerin görünümü (Franklin vd., 2008).

Çelikhane cürufunun olduğu diğer proses elektrik ark ocağında meydana gelmektedir. Bazık oksijen fırınından ayrılan yönü şarj etmek için sıvı pik demir yerine hurda metal kullanılmasıdır. Bu yöntemde en az iki elektrot, içi hurda metal ve kireçle dolu olan konvektöre indirilir. Elektrotlarda dolaşan elektrik akımı, hurda metal ile elektrotlar arası ark oluşturarak yüksek ısının ortaya çıkmasına ve hurda metalin ergimesine neden olur. Hurda metaldeki safsızlıkların oksitlenmesi amacıyla ortama oksijen verilir. Safsızlıklar ve oksijen arasında tepkime gerçekleşerek elektrik ark ocağı cürufu oluşur. Üretim prosesinin süresi 3 ila 7 saat arasında değişebilmekte ve 300 tona kadar üretim gerçekleştirilebilmektedir (Wang, 2016a).

2.3.3.1. Çelikhane cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Çelikhane cüruflarının fiziksel görünüşleri; koyu gri renkte, köşeli ve pürüzlü yüzey şeklindedir. Yüksek fırın cürufuna göre daha sert ve dayanıklı yapıda olup özgül ağırlıkları %20-%25 daha fazladır. Çelik cürufunun pH seviyesi 8-10 arasında değişmekle birlikte gözenekli yapıya ve büyük yüzey alanına sahip olması diğer özellikleri arasında gösterilmektedir (Soysal, 2014).

BOF cürufu, içerisinde bulunan dikalsiyum silikat (C_2S), trikalsiyum silikat (C_3S), tetrakalsiyum alüminaferrit (C_2F) fazları sayesinde çimentolaşma özeliği göstermektedir. Ancak C_2S ve C_3S 'in aktivitesi soğutma işleminin yavaş olmasından dolayı normal portland çimentosuna göre daha düşüktür. Çelik cürufu çimentolar daha az suya ihtiyaç duyar ve daha uzun sürede priz alırlar. Ayrıca betona uygun oranlarda katılarak betonun mekanik özelliklerinde iyileştirmeler sağlanabilmektedir (Soysal, 2014).

Çelik cürufu tanelerinin su ve atmosferle temas etmesi sonucu Tufa tipinde çökeleklerin oluştuğu bilinmektedir. Tufa içerisinde $CaCO_3$ barındıran beyaz renge sahip toz halinde biriken bir çökelektir. Çelik cürufunda bulunan kireç ile su reaksiyona girerek $Ca(OH)_2$ oluşturmaktadır. Zaman içerisinde atmosferdeki CO_2 'e maruz kalması sonucu $CaCO_3$ (kalsit) oluşarak yüzeysel Tufa veya toz sediment şeklinde malzeme yüzeyinde çökelmektedir (FHWA, 2023).

Çelik cürufu agregaları yapıları gereği genleşme eğilimindedir. Bu durum silika yapılarıyla tepkimeye girmeyerek serbest halde bulunan kalsiyum ve magnezyum oksitlerin varlığından kaynaklanmaktadır. Serbest halde bulunan bu bileşenler nemli ortamlarda hidratize olup genleşme göstermektedir. Bu genleşme sonucu malzemenin hacminde %10'a kadar artış görülebilmekte ve içerisinde çelik cürufu olan ürünler için gerilmelere neden olabilmektedir (FHWA, 2023).

Agrega olarak kullanılacak olan çelik cürufu öncelikle neme veya spreylemeyle suya aylarca maruz bırakılması gerekebilir. Böylece parçalanmaya yol açan hidratasyona izin verilmiş olup agreganın uygulamaları için önceden genleşmeleri sağlanmış olacaktır (FHWA, 2023).

2.3.3.2. Çelikhane cürufunun inşaat sektöründe değerlendirilmesi

Çelik cürufları havada soğumaya bırakılan yüksek fırın cürufuna benzer bir yöntemle kurutulmakta ve benzer amaçlara hizmet etmektedir. Ancak üretilen çeliğin yapısı ve

üretim sürecinin farklılaşması sonucu cürufun kimyasal özellikleri değişebilmektedir. Bu yüzden YFC kadar rahat kullanım alanı bulunmamaktadır. Çelikhane cürufu, bilimsel araştırmalardan elde edilen bulgularda özellikle karayolu ve demiryolu yapımında, çimento endüstrisinde, tarım uygulamalarında ve cüruf yünü üretiminde konvansiyonel malzemeler yerine kullanılabileceği ortaya konmuştur. Çelik cürufunun agrega olarak temel ve temel altı malzemesi, dolgu, sıcak asfalt karışımı, balast malzemesi ve ana yol banketi gibi uygulamalarda gerekli kriterleri sağladığı için tercih edilen malzeme halini almıştır. Bu tip alanlarda çelik cürufu kullanılmadan önce kırılarak elenmeli ve hidrasyon olayı ile genleşeceği göz önünde bulundurularak yaşlandırma prosesine tabii tutulmalıdır. Ayrıca serbest kireç ve nadir elementleri içinde barındırmasından dolayı tarımda toprağın koşullandırılması için de kullanılabilmektedir (Das ve ark, 2007). Çelikhane cürufunun özellikleriyle ilgili olarak nerelerde kullanılabileceği Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Cürufların özelliklerine göre kullanım alanları (Yi ve ark, 2012).

Çelikhane Cürufunun Özellikleri	Kullanım Alanları
Sert, aşınmaya dayanıklı, adhezif ve pürüzlü	Hidrolik yapılarda ve yol inşaatlarında agrega olarak
Poroz ve alkali	Su arıtma işlemlerinde
Yapısında FeOx ve Fe bileşenlerini içermesi	Demir ıslah çalışmalarında
Yapısında CaO, FeO, MgO, MnO bileşenlerini içermesi	Flux yapıcı olarak
Yapısında çimentomsu bileşenler (C2S, C3S ve C4AF) içermesi	Çimento ve beton yapımında
Yapısında CaO, MgO bileşenlerini içermesi	CO2 yakalama ve baca gazı desülfürizasyonunda
Yapısında FeO, CaO ve SiO2 bileşenlerini içermesi	Çimento klinkeri yapı malzemesi olarak
Yapısında gübre bileşenlerini (CaO, MgO, FeO ve SiO2) içermesi	Gübre olarak ve toprak iyileştirmesinde



3. MALZEME VE METOT

3.1. Malzeme

3.1.1. Çimento

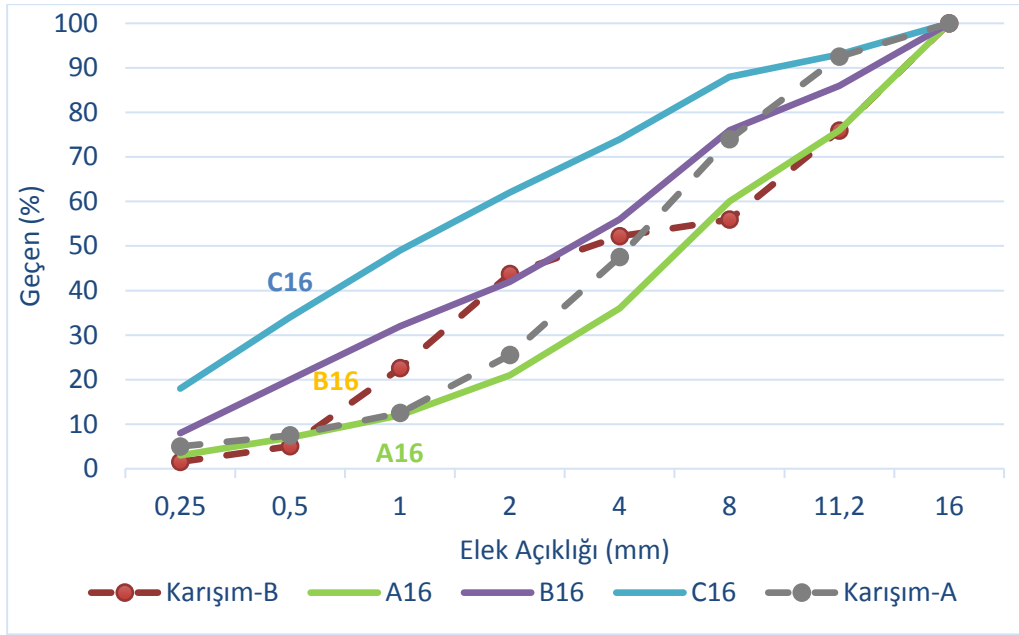
Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmada, çimento türünde özgül ağırlığı 3,17 g/cm³ olan CEM I 42,5 R portland çimentosu kullanılmış olup Çimsa A.Ş.'den temin edilmiştir.

3.1.2. Agregas

Araştırmaya konu olan cüruf çeşitlerinin agrega olarak beton üzerinde etkisini gözlemleyebilmek için 2 seri halinde beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada kaba ve ince agrega sınıfları kullanılmıştır. A serisinde kullanılan agregalar kırma kum ve kırma taş iken B serisinden kullanılan agregalar granüle yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufudur. Her iki seri için iri agrega boyutları 4 mm ile 16 mm arasında, ince agrega boyutları ise 4 mm altındadır. Agregalar beton üretiminde toplam hacmin yaklaşık %70'ini oluşturmaktadır. Agregas sınıfı kullanım oranları yüzde %50 ince agrega, %50 iri agrega olarak belirlenmiştir. Elek analizi sonuçlarına göre düzenlenen agrega gradasyon eğrileri Şekil 3.1'de, bu gradasyona sahip bileşimlerin elek analizi sonuçları Tablo 3.1'de verilmiştir. Doğal agrega ile üretilen A serisi betonun agrega bileşimi Karışım A, cüruf agregası ile üretilen B serisi betonun agrega bileşimi Karışım B ile isimlendirilmiştir.

Tablo 3.1. Agregaların elek analizi ve fiziksel özellikleri.

Agrega	Elek Boyutu (mm)							
	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25
Kırma Kum	100	100	100	94	51	25	15	10
Kırma Taş (I)	100	85	48	1	0	0	0	0
Karışım A	100	92	74	47	26	12	8	5
GYFC	100	100	100	98	87	45	10	3
ÇC	100	52	12	4	0	0	0	0
Karışım B	100	76	56	52	43	23	5	2



Şekil 3.1. Karışımların agrega gradasyon eğrisi.

3.1.3. Granüle yüksek fırın cürufu

Bu çalışmada granüle yüksek fırın cürufu Karabük ilindeki Karçimsa firması tarafından temin edilmiştir. B grubu beton üretiminde ince agrega olarak kırma kum yerine %100 oranında ikame edilerek kullanılmıştır. Şekil 3.2’de Karçimsa A.Ş.’de stok sahasında bekletilen yüksek fırın cürufu gösterilmiştir. Çalışmada kullanılmış olan yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri XRF cihazında tespit edilerek Tablo 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Karçimsa A.Ş granüle yüksek fırın cürufu stok sahası.

Tablo 3.2. GYFC'nin kimyasal analizi.

İçeriği	Tipik Değerler (%)
SiO ₂	36,01
CaO	30,13
Al ₂ O ₃	11,49
MgO	8,66
Mn ₂ O ₃	5,66
Fe ₂ O ₃	1,65
K ₂ O	0,84
Na ₂ O	0,60
SO ₃	0,63

3.1.4. Çelikhane cürufu

Çelikhane cürufu, beton üretiminde agrega olarak kullanılmak üzere Karabük Demir Çelik Fabrikasından temin edilmiştir. Çelikhane Cürufu anti manyetik ve manyetik olarak iki gruba ayrılmaktadır. Anti manyetik çelikhane cürufu döner sürücülü manyetik seperatörden geçerek manyetik bileşenlerinden ayrılmış olan, manyetik çelikhane cürufu ise manyetik ayırma işlem yapılmadan servis edilen cüruf anlamına gelmektedir. Bu çalışmada havada soğutulmuş antimanyetik çelikhane cürufu B grubu beton üretiminde iri agrega olarak kırmataş yerine %100 oranında ikame edilerek kullanılmıştır. Temin edilen cürufun tane boyutları büyük olduğu için elek aletiyle 4 mm ile 16 mm arasında elenerek karışıma eklenmiştir. XRF cihazıyla elde edilen çelikhane cürufunun kimyasal içeriği Tablo 3.3'de gösterilmiş ve görseli ise Şekil 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3. Çelikhane cürufunun kimyasal analizi.

İçeriği	Tipik Değerler (%)
SiO ₂	14,73
CaO	44,88
Al ₂ O ₃	2,44
MgO	12,65
MnO	5,77
Fe ₂ O ₃	19,53



Şekil 3.3. Çelikhane cürufunun genel görünüşü.

3.1.5. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu

Bu çalışmada puzolan olarak Karabük ilindeki Karçimsa firmasından alınan öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmada ÖYFC puzolan olarak hem A hem de B grubu beton üretiminde 5 farklı ikame oranlarında (%0, %10, %20, %30, %40) çimentoya eklenip beton üzerinde etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Temin edilen ÖYFC' nin özgül yüzeyi 3996 cm²/g ve özgül ağırlığı 2.86 g/cm³ 'tür. ÖYFC'nin görseli Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4. ÖYFC'nin genel görünüşü.

3.1.6. Karma suyu

Beton karışımında içilebilir nitelikte olduğu öngörülerek Sakarya Üniversitesi mevcut şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.7. Kimyasal katkı

Akışkanlaştırıcılar, betonda işlenebilirliğin veya kıvamın daha az su kullanılarak elde edilmesini sağlayan kimyasal katkılardır. Başka bir özelliği karışımındaki su miktarı değiştirilmeden yayılımın artmasını sağlamasıdır. Akışkanlaştırıcı kullanılarak S/Ç oranı düşürüldüğünde daha az boşluklu beton dolayısıyla daha yüksek dayanım ve dayanıklılıkta beton elde edilecektir.

Bu çalışmada betonların aynı slump değerlerinde (5 ± 2 cm) üretilmesi için su azaltıcı kimyasal katkı olarak İnci Beton'dan temin edilen yüksek oranda su azaltıcı / süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan akışkanlaştırıcı malzemenin özellikleri Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.4. Akışkanlaştırıcı analiz sonuçları.

Analiz	Deney Sonuçları	Standart Değerler	Deney Metodu
Görünüm	Homojen	Homojen	Gözle
Renk	Kahverengi	Kahverengi	Gözle
Yoğunluk	1,063	1,045 - 1,085	ISO 758
Ph	4,32	3,50 - 5,50	ISO 4316
Alkali Miktarı	<%5	<%5	EN 480-12
Suda Çözünebilir Klor (%)	0,09	<%10	EN 480-10

3.2. Metot

3.2.1. Agrega deneylerinde kullanılan yöntemler

Beton karışımında maksimum tane çapı 16 mm olan çelikhane cürufu ve kırma taş, maksimum tane çapı 4 mm olan kırma kum ve granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Beton üretiminde kullanılan agregaların hacimce yüzdeleri %50 ince agrega, %50 iri agrega olacak şekilde belirlenmiştir.

Özgül ağırlığı ve su emme değerlerini bulmak için kaba agregalar 0.1 hassasiyetli terazide 2 kg gelecek şekilde özdeş iki ayrı tepsiye konulur. Tartılmış halde tepside bulunan agregalara yüzeyini geçecek şekilde su ilavesi yapılır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Suda ve etüvde bekletilen agrega numuneleri.

Bu şekilde 24 saat bekledikten sonra tepkideki su dökülerek agregelardan uzaklaştırılır. Kuru bez yardımıyla yüzeyleri kurularak tartılır ve doymuş kuru yüzey

ağırlıkları elde edilmiş olur. Ardından agregalar tel sepete dökülür ve üstünden yaklaşık 5 cm su içinde kalacak şekilde suyla dolu kovaya daldırılır (Şekil 3.6). Agregalar arasında boşluk kalmaması için tel sepet birkaç defa sallanır. Böylece terazide elde edilen değer, agreganın sudaki ağırlığı olarak not edilir. Bu işlemden sonra tepsiye alınan agregalar etüvde 105°C’de 24 saat boyunca bekletilir. 24 saat sonunda etüvden çıkarılan agregalar terazi yardımıyla tartılır ve kuru ağırlıkları elde edilir. Elde edilen değerler aşağıda verilen formülde yerine konularak agreganın özgül ağırlığı ve su emme değeri hesaplanır.



Şekil 3.6. Kaba agreganın sudaki ağırlığının ölçümü.

M_{DKY} = Agreganın DKY Ağırlığı (g)

M_{Suda} = Agreganın Su İçindeki Ağırlığı (g)

M_{Kuru} = İri Agreganın Kuru Ağırlığı (g)

$$\text{Kuru özgül ağırlık (g/cm}^3\text{)} = \frac{M_{Kuru}}{M_{DKY} - M_{Suda}} \quad (3.1)$$

$$\text{DKY özgül ağırlık (g/cm}^3\text{)} = \frac{M_{DKY}}{M_{DKY} - M_{Suda}} \quad (3.2)$$

$$\text{Görünen özgül ağırlık (g/cm}^3\text{)} = \frac{M_{Kuru}}{M_{Kuru} - M_{Suda}} \quad (3.3)$$

$$\text{Su Emme (g/cm}^3\text{)} = \frac{(M_{DKY} - M_{Kuru}) * 100}{M_{Kuru}} \quad (3.4)$$

İnce agregalar özgül ağırlık ve su emme deneyleri için öncelikle 0.1 hassasiyetli terazide 1 kg gelecek şekilde özdeş iki ayrı tepsiye konulur. Tartılmış halde tepside bulunan agregalara yüzeyini geçecek şekilde su ilavesi yapılır. Bu şekilde 24 saat bekledikten sonra tepkideki su dökülerek agregelardan uzaklaştırılır. Dibe çöken agregalar sıcak hava yardımıyla doymuş kuru yüzey hale getirilir. Doymuş kuru yüzey hali koni metoduyla tayin edilmektedir. Metal koniye numuneler her seferinde bir çubuk yardımıyla belli sayıda vuruşlar yapılarak 3 tabaka halinde yerleştirilir. Sıkıştırılan numuneler koninin ters çevrilmesiyle düz bir yüzeye konulur. Koni, numunelerin üzerinden alındıktan sonra birikmiş halde duran numune yığını mala yardımıyla ikiye bölünür. Bu haldeki numune yığını kendini tutarak dağılmıyorsa kurutma işlemine devam edilir. Numuneler tekrar kurutulduktan sonra aynı işlem uygulanır. Yığın haldeki numunelerde dağılmalar gözüküyorsa ise doymuş kuru yüzey sağlanmış olur ve teraziyle tartılarak ağırlıkları belirlenir. Bu aşamadan sonra piknometre aracılığıyla deneye devam edilmektedir. Piknometrenin sırasıyla boş ağırlığı ve numune ile doldurulmuş hali tartılır. Ardından piknometre içindeki numunelerin üzerine Şekil 3.7’de olduğu gibi su eklenir ve birkaç kez sallanarak içerisinde boşluk kalmaması sağlanır. Bu şekilde piknometre terazide tartılarak ağırlığı tespit edilir.



Şekil 3.7. İnce agregalar için özgül ağırlık deneyi.

Piknometreler içindeki numuneler alındıktan sonra sadece suyla tartılarak da ağırlığı not edilir. Piknometreden tepsiye alınan numuneler kuruması için 24 saat boyunca 105°C etüvde bekletilir ve çıkarıldıktan sonra numunenin kuru ağırlığı bulunur. Elde

edilen değerler aşağıda verilen formülde yerine konularak agreganın özgül ağırlığı ve su emme değeri hesaplanır.

M_P = Piknometre Ağırlığı (g)

M_{P+S} = Piknometre ve İçindeki Suyun Ağırlığı (g)

M_{P+A} = Piknometre ve İçindeki İnce Agreganın Ağırlığı (g)

M_{P+A+S} = Piknometre, İçindeki Su ve İnce Agreganın Ağırlığı (g)

M_{Kuru} = İnce Agreganın Kuru Ağırlığı (g)

$$\text{Kuru özgül ağırlık (g/cm}^3\text{)} = \frac{M_{Kuru}}{(M_{P+A} - M_P) - (M_{P+A+S} - M_{P+S})} \quad (3.5)$$

$$\text{DKY özgül ağırlık (g/cm}^3\text{)} = \frac{M_{P+A} - M_P}{(M_{P+A} - M_P) - (M_{P+A+S} - M_{P+S})} \quad (3.6)$$

$$\text{Görünen özgül ağırlık (g/cm}^3\text{)} = \frac{M_{Kuru}}{M_{Kuru} - (M_{P+A+S} - M_{P+S})} \quad (3.7)$$

$$\text{Su Emme Oranı (\%)} = \frac{[(M_{P+A} - M_P) - M_{Kuru}] * 100}{M_{Kuru}} \quad (3.8)$$

3.2.2. Beton karışım oranları

Bu tez çalışmasında, yapay agregalar kullanılarak üretilen betonların doğal agregaya ile üretilen betonlara kıyasla dayanımları ve sülfata karşı dirençleri, farklı ikame oranlarında kullanılan puzolanın etkisiyle birlikte incelenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla çalışma kapsamında 2 seri halinde beton üretimi yapılmıştır. A serisinde agregaya olarak kırma kum ve kırma taş kullanılırken B serisinde çelikhane cürufu ve granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır.

Beton karışımları için bağlayıcı dozajı 400 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Bağlayıcı malzeme olarak beton üretiminde çimento ve ÖYFC kullanılmıştır. Çimento yerine her iki seride ağırlıkça %0, %10, %20, %30, %40 oranında ÖYFC kullanılarak toplamda 10 farklı grup beton üretimi yapılmıştır. Kimyasal katkı/bağlayıcı oranı 0,01 olarak kullanılmıştır. Tablo 3.5’de beton karışımlarında kullanılan malzemelerin oranlarıyla birlikte verilmiştir.

Tablo 3.5. Beton karışım serileri.

Beton Grubu	Beton Bileşenleri			
	İnce Agregası (%100)	İri Agregası (%100)	Bağlayıcı (CEM I/ 42,5 R)	Puzolan (ÖYFC)
A1	Kırma Kum	Kırma Taş	100%	0%
A2	Kırma Kum	Kırma Taş	90%	10%
A3	Kırma Kum	Kırma Taş	80%	20%
A4	Kırma Kum	Kırma Taş	70%	30%
A5	Kırma Kum	Kırma Taş	60%	40%
B1	GYFC	ÇC	100%	0%
B2	GYFC	ÇC	90%	10%
B3	GYFC	ÇC	80%	20%
B4	GYFC	ÇC	70%	30%
B5	GYFC	ÇC	60%	40%

10 farklı grup için yapılan beton üretiminde aynı kıvama yani aynı çökme değerine sahip betonlar üretilmiştir. Tablo 3.6’da 1 m³ beton üretimi için 10 farklı grupta kullanılan malzeme miktarları gösterilmiştir. Üretilen betonlar çeşitli mekanik ve durabilite deneylerine tabii tutulmuştur.

Tablo 3.6. Beton karışımlarında kullanılan malzeme miktarları.

Beton Tasarımı		Beton Karışımları									
		A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
Malzeme (kg)	Çimento	400	360	320	280	240	400	360	320	280	240
	ÖYFC	0	40	80	120	160	0	40	80	120	160
	Su	191	190	188	186	184	217	215	213	211	209
	Kırma Kum	850	850	850	850	850	0	0	0	0	0
	Kırma Taş	850	850	850	850	850	0	0	0	0	0
	GYFC	0	0	0	0	0	850	850	850	850	850
	ÇÇ	0	0	0	0	0	850	850	850	850	850
	Akışkanlaştırıcı	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Özellikler	S/Ç Oranı	0,48	0,48	0,47	0,47	0,46	0,54	0,54	0,53	0,53	0,52
	Slump Deneyi (cm)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

3.2.3. Numunelerin üretimi

Bu çalışmada beton üretimleri 25 litre hacme sahip mikser kullanılarak yapılmıştır. Her bir beton karışımı 25 dm³ hacimde üretilmiştir. Beton üretimi için kullanılacak kırma kum, kırma taş, GYFC, ÖYFC, çelikhane cürufu, çimento, su elektronik terazi kullanılarak tartılmıştır. Akışkanlaştırıcı, hassas terazi ile ölçülerek kullanılmıştır. Karışımın yapıldığı mikserde betonun görünümü Şekil 3.8’de verilmiştir.

**Şekil 3.8.** Beton karışımının görünümü.

Üretime başlarken önce 0-4 mm ve 4-16 mm boyutundaki agregalar mikserin içinde kuru olarak karıştırılmıştır. Daha sonra karışımın üzerine çimento ve ÖYFC eklenerek tekrar kuru karışım yapılmıştır. Yeterince kuru karışım işlemi yapıldıktan sonra karışım suyu ve kimyasal katkının yarısı miksere yavaşça dökülmüştür ve 2 dk boyunca karıştırılmıştır. Ardından istenilen kıvam elde edilinceye kadar suyun ve katkının kalan yarısı miksere dökülmüştür ve homojen kıvam oluncaya kadar karıştırılarak üretim tamamlanmıştır. Üretilen betonun kıvamının ölçülebilmesi için mikserden yeterli miktarda beton numunesi alınarak slump deneyi yapılmıştır. Slump deneyinde tüm grupların beton kıvam sınıfı S2 olacak şekilde ayarlanmaya çalışılmıştır. Çökme değeri istenilen aralıktan daha düşük bir seviyede çıkarsa karışıma yavaşça su eklenip bir müddet daha karıştırılarak istenilen kıvam elde edilmeye çalışılmıştır. Şekil 3.9’da slump deneyi görseli verilmiştir.



Şekil 3.9. Slump Deneyi görseli.

Kıvamı hazır hale gelen beton, 100x100x100 mm küp boyutlara sahip, iç yüzeyleri yağlanmış kalıplar içerisine yerleştirilmiştir. Betonun kalıba boşluksuz bir şekilde yerleşebilmesi için Şekil 3.10’de veriliği şekilde kalıplar sarsma tablosuna koyulup bir süre bekletilmiştir.



Şekil 3.10. Sarsma tablası.

Sarsma tablosundan alınan kalıp içerisindeki betonun üzeri Şekil 3.11’de gösterildiği gibi mala yardımıyla tesviye edilerek düz hale getirilmiştir. Daha sonra beton numuneler sertleşmesi için 24 saat kalıpta bekletilir. Ertesi gün priz alarak sertleşen betonlar, kalıpların altında yer alan deliklerden kompresör ile hava verilerek zarar verilmeden kalıplardan çıkartılmıştır.



Şekil 3.11. Kalıplanmış beton numuneler.

Kalıptan çıkarılan beton numuneler standart kür havuzuna konularak teste tabi tutulacakları 7., 28. ve 90. güne kadar bekletilmişir. Şekil 3.12’de standart kürde bekletilen numuneler gösterilmiştir. 28. günde standart kürden alınan numuneler, hazırlanan iki ayrı sülfat çözeltisine her karışımdan 3 er adet numune olacak şekilde bırakılmıştır. 90 gün bekletildikten sonra numuneler üzerinde mekanik deneyler

uygulanarak dayanıklılıkları hakkında diğer kür koşullarına kıyasla yorumlamalarda bulunulmuştur.



Şekil 3.12. Standart kürde bekletilen beton numuneler.

3.2.4. Slump (çökme) deneyi

Beton mikserinde üretilen her grup beton için TS EN 12350-2 standartına uygun şekilde slump deneyi yapılarak kıvamları ölçülmüştür. Deneye başlamadan önce slump deneyinde kullanılacak gerekli araçlar beton üretimin yapıldığı mikserin yakınına getirilmiştir. Huninin iç yüzeyi nemli bezle silinerek deneye hazır hale getirilmiştir. Sağlam bir zemine yerleştirilip mahmuzlarına basılmasıyla huninin sabit kalması sağlanır. Ardından kürek yardımıyla mikserden alınan beton 3 eşit tabaka halinde huninin içine doldurulur. Huniye yerleştirilen beton her tabakadan sonra şişleme çubuğuyla 25 defa şişlenmiştir. Huni tamamen betonla doldurulup şişlenmesinin ardından üzeri mala ile tesviye edilmiştir. Daha sonra huni, betonu sarsmadan düşey yönde yukarı doğru yavaşça çekilir. Boş huni ters çevirilerek çöken betonun yanına konulur. Şişleme çubuğu ters konan huninin üzerine yatay şekilde konularak çubuğun alt hizası ile çökmüş betonun üst yüzeyi arasındaki mesafe metre aracılığıyla ölçülür. Bu sayede üretilen her grup betonun çökme miktarları belirlenmiş olur.

3.2.5. Sertleşmiş betonda su emme ve porozite deneyi

10x10x10 cm boyutlarındaki beton numunelerin su emme deneyi TS EN 480-11'e uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak numuneler 24 saat boyunca su içinde bekletildikten sonra sudan çıkarılıp yüzeyi kuru bir bez yardımıyla silinerek hassas terazi ile tartılmış ve doymuş kuru yüzey ağırlıkları tespit edilmiştir. Ardından doymuş

kuru yüzey haldeki numunelerin Arşimet terazisi yardımıyla su içindeki ağırlıkları belirlenmiştir. Daha sonra numuneler 24 saat boyunca 105°C’de kurutmaya bırakılmıştır. 24 saatin sonunda etüvden çıkarılarak hassas terazide tartılan numunelerin etüv kurusu ağırlıkları bulunmuştur. Şekil 3.13’de sertleşmiş betonda su emme deneylerine ait görseller yer almaktadır.



Şekil 3.13. Sertleşmiş betonda su emme deneyine ait görseller.

Her beton serisinden 3 adet numune üzerinde su emme deneyleri gerçekleştirilmiş ve deney sonuçlarının ortalaması alınarak o seriye ait ağırlıkça su emme oranı hesaplanmıştır. Numunelerin ağırlıkça su emme oranları Denklem 3.9 ve görünen porozite oranları Denklem 3.10 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$S_A = \frac{(W_{DKY} - W_K) * 100}{W_K} \quad (3.9)$$

$$p = \frac{(W_{DKY} - W_K) * 100}{(W_{DKY} - W_S)} \quad (3.10)$$

S_A ; ağırlıkça su emme oranı (%)

p : görünen porozite (%)

W_{DKY} ; doyun kuru yüzey ağırlığı (g)

W_K ; etiv kuru ağırlık (g)

W_S : su içindeki ağırlık (g) olarak ifade edilmektedir.

3.2.6. Basınç dayanımı deneyi

Beton numunelerin basınç dayanımları TS EN 12390-3 (2019) standartına uygun şekilde belirlenmiştir. Çalışma kapsamında üretilmiş olan 10 grup beton karışımının 7., 28. ve 90. günlük kür süreleri sonundaki basınç dayanımları her gruptan alınan 3 er adet numune üzerinden ölçülmüştür. Elde edilen sonuçların ortalaması alınmış ve numunenin basınç dayanımı olarak not edilmiştir. Sülfat çözeltisindeki numuneler 90 gün bekletilmiş ve ardından aynı şekilde her grup için 3 adet numuneler halinde basınç dayanımları ölçülmüştür. Numuneler deneyden önce 24 saat boyunca laboratuvar şartlarında kurutularak basınç deneyine tabii tutulmuştur. Numuneler cihaza yerleştirilmeden önce test cihazının alt ve üst başlıkları temizlenmiştir. 100x100x100 mm boyutundaki numuneler, cihazın yükleme yönü beton döküm yönüne dik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Cihaz ekranında numunenin ebatları seçilmiş ve yükleme hızı 1.40 kN/s'a getirilerek yükleme başlatılmıştır. Numunelerin basınç dayanımı Denklem 3.11'de gösterilen formül yardımıyla bulunmuştur.

$$F_c = \frac{P}{A_c} \quad (3.11)$$

F_c = Basınç Dayanımı (MPa)

P = Kırılma anındaki en büyük yük (N)

A_c = Numuneye yük uygulanan yüzeyin en kesit alanı (mm²)

Beton test presinin görseli Şekil 3.14'de verilmiştir.



Şekil 3.14. Beton test presi.

3.2.7. Ultrasonik ses hızı ölçümü

Ultrasonik ses deneyinde, beton içerisine gönderilen ultrasonik dalganın geçiş hızı ölçülerek betonun homojenliği, elastisite modülü, mukavemeti gibi mekanik özellikleri hakkında çıkarımlarda bulunmaktadır. Malzemenin içyapısı yoğun ve dolu ise ultrasonik dalga geçiş hızı yüksek, boşluklu ise daha yavaş olacaktır. Genel itibariyle 4570 m/s üzerindeki hızların görüldüğü betonun kaliteli, 3050 m/s altında geçiş hızlarının görüldüğü beton ise kalitesiz olarak kabul edilmektedir (Şimşek, 2012). UPV ölçümleri ASTM C 39 597'deki standartlara göre yapılmıştır. Ölçümlere başlamadan önce UPV cihazı doğruluğu bilinen ölçüm aparatı yardımıyla kalibre edilerek varsa sapmaları düzeltilmiştir. Kür havuzundan çıkarılan numuneler kuruyana kadar bekletildikten sonra yüzeyleri kuru bezle silinerek deneye hazır hale getirilmiştir. Deneyde sinyal göndermek için kullanılacak yüzeyler pürüzsüz olmalı ve herhangi bir çatlak vb. içermemelidir. Daha sonra cihaza bağlı olan alıcı ve gönderici uçların yüzeyine ultrason jeli sürülür ve karşılıklı denk gelecek şekilde numunenin yüzeylerine tutulur. Bu esnada sinyal gönderici ve alıcı uçlar hareket ettirilmeyerek doğru ölçüm yapılması sağlanmıştır. Her bir numunede birbiriyle karşılıklı olan yüzeylerden toplamda iki kez ölçüm alınır ve sonuçların ortalaması numunenin ultrasonik dalga geçiş süresi olarak not edilir. Numunelerin ayrı ayrı UPV ölçüm değerleri ultrasonik dalga geçiş süreleri kullanılarak denklem 3.12 yardımıyla hesaplanmıştır. Deneyin uygulanışına ait görsel Şekil 3.15'de verilmiştir.

$$V = \frac{L}{T} \quad (3.12)$$

V= Dalga Hızı (m/s)

L= Numunein uzunluğu (mm)

T= Geçiş süresi (sn)



Şekil 3.15. UPV deney cihazı.

3.2.8. Sülfat etkisi deneyi

Normal kür havuzunda 28 gün bekletilen beton numuneler havuzdan çıkarılarak iki ayrı kaptaki hazırlanmış %5 $MgSO_4$ ve %5 Na_2SO_4 çözeltilerine konulmuştur. Sülfat etkilerini karşılıklı olarak gözlemleyebilmek için hem magnezyum sülfat hem de sodyum sülfat çözeltilerine her gruptan ayrı ayrı 3'er adet numune bırakılmıştır. Çözeltilere konulan numuneler Şekil 3.16'de gösterilmiştir. Beton numuneler sülfatlı çözeltilerde 90 gün bekletilerek sülfat saldırısına maruz bırakılmıştır. Belli zaman aralıklarında çözelti suyu değiştirilerek ortamda zamanla dengelenmiş olan ve etkisini yitiren sülfat içeriği tekrar aktif hale getirilmiştir. 90 gün sonunda çözeltilerden alınan numuneler 24 saat boyunca laboratuvar ortamında kurutulmuş ve ardından tahribatlı ve tahribatsız yöntemler yardımıyla dayanım ve diğer özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda numuneler üzerinde öncelikle tahribatsız yöntemlerden olan UPV, Schmidt çekici deneyleri uygulanmıştır. Daha sonra basınç dayanımları beton test presisi cihazıyla ölçülerek not edilmiştir. Sonuçlar, farklı karışımların sülfata karşı dirençleri bakımından değerlendirilmiş ve normal suda 90 gün kür edilen numunelerin deney sonuçları ile kıyaslanmıştır.



Şekil 3.16. MgSO₄ ve Na₂SO₄ çözeltilerindeki beton numuneler.

3.2.9. Ağırlık değişimi

Sülfat etkisinde kalan beton numunelerde meydana gelen deformasyonun boyutunu ortaya koymak için ağırlık değişimleri incelenmiştir. Sülfat etkisine maruz bırakılan her numunenin sülfat etkisi öncesi ve sonrası ağırlıkları 0.01 g hassasiyetli terazide tartılmıştır ve ağırlık değişimleri Denklem 3.3 ile hesaplanmıştır.

$$\text{Ağırlık Kaybı (\%)} = \frac{(W - W_0)}{W_0} * 100 \quad (3.13)$$

W₀: Numunenin başlangıçtaki ağırlığı, g.

W: Deney sonrası numunenin ağırlığı, g.

3.2.10. Beton test çekici deneyi

Beton test çekici deneyi sayesinde sertleşmiş betonda yüzey sertliği ölçülmekte ve beton dayanımı hakkında tahminde bulunmaktadır. Ölçüm, alet üzerindeki pistonun beton yüzeyine bastırılması sonrası içerisindeki yaylı bir sistem sayesinde çalışan kütlenin geri sıçraması ve alet üzerindeki göstergeden değerin okunması esasına dayanmaktadır. Çıkan sonuç betonun yüzey sertliğine bağlı olarak değişmektedir. Böylece betonun geri sekme indeksi ile basınç dayanımı arasında ilişki kurarak basınç dayanımı belirlenmeye çalışılır.

Deney için öncelikle beton numunelerin yüzeyleri temizlenmiş ve deney esnasında sabit kalması için pres cihazıyla sıkıştırılmıştır. Ardından test çekici ile numunenin belirlenen bir yüzeyinden farklı noktalardan olmak koşuluyla 12 adet okuma yapılmıştır. En yüksek ve en düşük değerler ihmal edilerek kalan okumaların ortalamasını alınarak deney yapılan yüzey için Schmidt değeri (R) elde edilir. Bulunan

R değeri dönüşüm eğrisinde yerine konularak R değerine karşılık gelen basınç dayanımı okunmuştur. Bu işlem, numunenin karşılıklı yüzeylerinde uygulanmış ve sonuçların ortalaması alınarak numunenin basınç dayanımı tayin edilmiştir.

3.2.11. XRD analizi

Beton numunelerin kimyasal kompozisyonundaki değişimlerini incelemek için X-ışını kırınımı (XRD) analizi yapılmaktadır. XRD analizi, her bir kristal fazın kendine özgü atomik dizilimine bağlı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içinde kırması esasına dayanır. Her kristalin, faz için bir kırınım profili vardır. Bu profillere göre numunelerin yapısı belirlenmektedir. Bu çalışmada, numunelerin XRD analizi Karabük Üniversitesi Margem Laboratuvarında yer alan Şekil 3.17'deki Rigaku Ultima IV markalı XRD cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

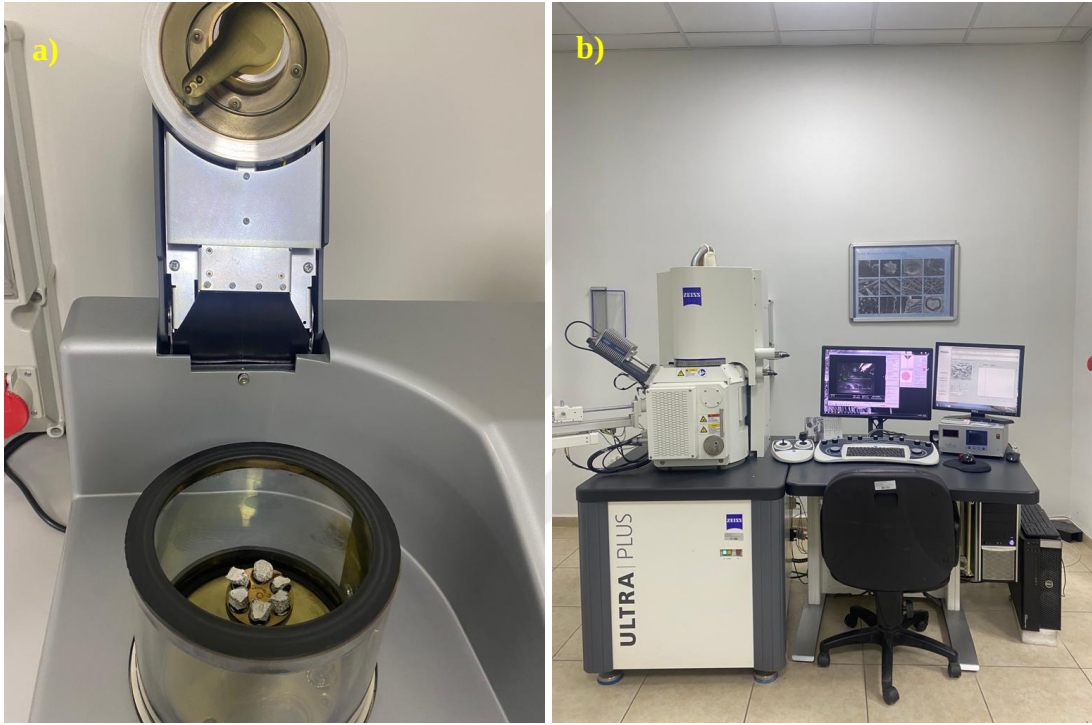


Şekil 3.17. XRD cihazı.

3.2.12. Taramalı elektron mikroskobu analizi

Beton numunelerin morfolojik yapısını incelemek için optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM), vb. cihazlar kullanılmaktadır. Taramalı elektron mikroskobu, odaklanmış bir elektron demetiyle numune yüzeyini tarayarak yüksek

özünürlüklerde görüntü elde eden bir elektron mikroskobu türüdür. Bu analiz için, önceden beton numunelerin yüzeyinden veya iç kısmından örnekler alınır ve bu örnekler inceleme için ince boyutlu hale getirilerek elektron mikroskopunda incelenir. Böylece, zamana bağlı olarak numunenin bünyesinde oluşan yeni ürünler ve yapısındaki değişimler belirlenmektedir. Bu çalışmada numunelerin SEM analizi Karabük Üniversitesi Margem Laboratuvarında yer alan şekil 3.18'deki Zeiss Sigma 300 markalı cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



şekil 3.18. a) SEM analizi öncesi altın kaplama işlemleri b) Taramalı elektron mikroskobu (SEM)



4. DENEY SONUÇLARI

4.1. Agregada Deneyleri İle İlgili Bulgular

Bu çalışmada iki farklı agregada çeşidiyle üretilen beton serilerinden A serisinde kırma kum ve kırma taş, B serisinde ise granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) ve antimanyetik çelikhane cürufu (ÇC) kullanılmıştır. İnce agregada olarak kullanılan kırma kum ve GYFC 4 mm elekten geçilerek kullanılmıştır. İri agregada olarak 4-16 mm boyutlarında kırma taş ve çelikhane cürufu kullanılmıştır. Elde edilen ince ve iri agregaların görünen yüzey özgül ağırlık, doymuş yüzey özgül ağırlık, kuru yüzey özgül ağırlıklarını ve su emme oranları bulmak için Arşimed deneyi yapılmış ve sonuçları Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Agregada özgül ağırlık ve su emme oranları.

Özellik	Doğal Agregada		Yapay Agregada	
	Kırma Kum	Kırma Taş	GYFC	ÇC
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,39	2,60	2,26	3,01
Su Emme (%)	2,40	1,30	3,76	4,76

4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri İle İlgili Bulgular

Hazırlanan beton numunelerden sülfat etkisine maruz bırakılan ve standart kürde bekletilenler üzerinde basınç dayanımı, UPV, beton test çekici deneyi gibi bazı mekanik özellikleri ile su emme oranı, ağırlık kaybı gibi çeşitli fiziksel özellikleri incelenmiş ve aşağıda başlıklar halinde değerlendirilmiştir.

4.2.1. Su emme oranı ve porozite değeri

Doğal ve cüruf agregasıyla üretilmiş kontrol numunelerin su emme oranları Tablo 4.2’de verilmiştir. Beton numuneler standart kürde 28. gün sonunda, sülfatlı çözeltilerde 7. gün ve 28. gün sonunda su emme deneylerine tabi tutulmuştur.

Tablo 4.2. Kontrol numunelerin su emme oranları.

Su Emme Oranları (%)						
Numune	Standart Kür	28 Gün Standart+ %5 MgSO ₄ Kür		Standart Kür	28 Gün Standart+ %5 Na ₂ SO ₄ Kür	
	28 gün	7 gün	28 gün	28 gün	7 gün	28 gün
A1	3,33	3,06	2,61	3,38	3,08	3,04
B1	4,98	4,65	4,47	5,53	5,43	5,23

Deney sonuçları incelendiğinde kür süresi artmasıyla birlikte su emme oranlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Su emme oranlarında en fazla düşüş A1 numunesinin 28 gün %5 MgSO₄ etkisine maruz kalması sonucu görülmüştür. Doğal agregalı A1 beton serisinde %5 MgSO₄ kürü sonrası su emme oranlarında 7. günde %10,5 oranında, 28. günde 24,7 oranında düşüş yaşanmıştır. Yine A1 serisi için %5 Na₂SO₄ kürü sonrası su emme oranlarında 7. günde %8,6 oranında, 28. Günde 9,8 oranında düşüş görülmüştür. Cüruf agregalı B1 beton serisinde %5 MgSO₄ kürü sonrası su emme oranlarında 7. günde %6,6 oranında, 28. Günde 10,2 oranında, %5 Na₂SO₄ kürü sonrası su emme oranlarında 7. günde %3,7 oranında, 28. Günde 7,3 oranında düşüş görülmüştür. Ayrıca doğal ve cüruf agregasıyla üretilmiş kontrol numunelerin porozite değerleri Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3. Kontrol numunelerin porozite değerleri.

Görünen Porozite (%)						
Numune	Standart Kür	28 Gün Standart+ %5 MgSO ₄ Kür		Standart Kür	28 Gün Standart+ %5 Na ₂ SO ₄ Kür	
	28 gün	7 gün	28 gün	28 gün	7 gün	28 gün
A1	7,69	7,36	6,26	7,73	7,41	7,28
B1	10,93	10,74	10,27	12,51	12,33	11,90

Porozite değerleri sülfat etkisi bakımından incelendiğinde MgSO₄’e maruz bırakılan numunelerde Na₂SO₄’e bırakılan numunelere göre daha fazla düşüş tespit edilmiştir. Kontrol numuneleri kendi aralarında kıyaslandığında; aynı kür ortamında eşit süre bekletilen cüruf agregalı B1 numunesinin porozitesi A1 numunesinin porozitesinden yüksek olmuştur.

4.2.2. Görsel inceleme

Tez kapsamında agrega malzemeleri farklı olan iki seri halindeki beton numunelerin sülfat etkisindeki performansları normal suda bekletilen numunelerle karşılaştırmalı olarak incelenmeye çalışılmıştır. A serisinde %100 doğal agregalar ile üretilen beton numuneleri ve B serisinde cüruf agregaları ile üretilen beton numuneleri 28 gün normal suda kürlemeden sonra 90 gün boyunca %5 $MgSO_4$ ve %5 Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilmiş ve dış yüzeylerindeki değişimler Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Kontrol numunelerin 90 günlük kür sonunda görünüşleri (1; Standart kür, 2; %5 Na_2SO_4 çözeltisi, 3; %5 $MgSO_4$ çözeltisi)

Sülfata maruz bırakılmış numunelerin karakteristik görünüşleri incelendiğinde genel olarak köşe ve kenarlardan başlayan ve tüm yüzeye yayılan beyaz lekeler olduğu gözlemlenmiştir. $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen numunelerde beyaz lekeler kabarmış şekilde oluşmuşken Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen numunelerde yüzeysel şekilde oluşmuştur.

Magnezyum sülfat etkisindeki beton yüzeyinde görülen bu değişikliklerin, Mg^{+2} iyonlarının hidratasyon ürünü olan $Ca(OH)_2$ ile tepkimeye girmesi sonucu $Mg(OH)_2$ ’in (brusit) oluşmasıyla gerçekleştiği düşünülmektedir. Hidroksit iyonlarının beton yüzeyine hareket etmesinden dolayı yüzeyde tabaka halinde suda çözünmeyen

brusit oluşmaktadır. Ayrıca sülfat iyonları, betonun iç kısmında alçıtaşı oluşturarak brusit tabakası altında ilave bir tabaka oluşmasına sebep olmaktadır. Aynı şekilde sodyum sülfat etkisindeki betonda, yüzeye yakın yerlerde sülfat iyonlarının fazla olmasından dolayı alçıtaşı beton yüzeyinde oluşabilmektedir. Betonda suyun buharlaşması sonucu gözeneklerde kalan sodyum tuzları beton yüzeyine yakın yerlerde kristalleşmektedir. Ancak magnezyum sülfatın etkisi diğer sülfat saldırılarına göre daha hızlı gerçekleştiği için numunelerde daha erken görünüm değişikliğine sebep olmaktadır (Skalny, 2001).

Standart kürde bekletilen bazı cüruf agregalı numunelerde 28 gün dolmadan hacimce genleşme sonucunda çatlaklar meydana gelmiş ve hatta kopmalar, kırılmalar gerçekleşerek mekanik deneyler uygulanamayacak kadar hasar oluşmuştur. Şekil 4.2’de standart kür esnasında hasar almış olan cürufllu numuneler gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Standart kür esnasında çatlayan cürufllu numuneler.

Literatürde yapılan benzer çalışmalarda cürufllu numunelerde görülen bu hasarların sebebi olarak çelikhane cürufunun mineralojik içeriği gösterilmektedir. Bu durumu destekleyici olarak çelikhane cürufu, içerisinde serbest halde bulunan CaO ve MgO bileşenlerinin suyla tepkimeye girmesiyle hacimce %10’a kadar genleşebileceği ifade edilmiştir. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında çelikhane cürufunun agrega olarak betonda kullanılması şişme potansiyeline sahip olmasından ötürü numunelere hasar vermesiyle sonuçlanmıştır (FHWA, 2023).

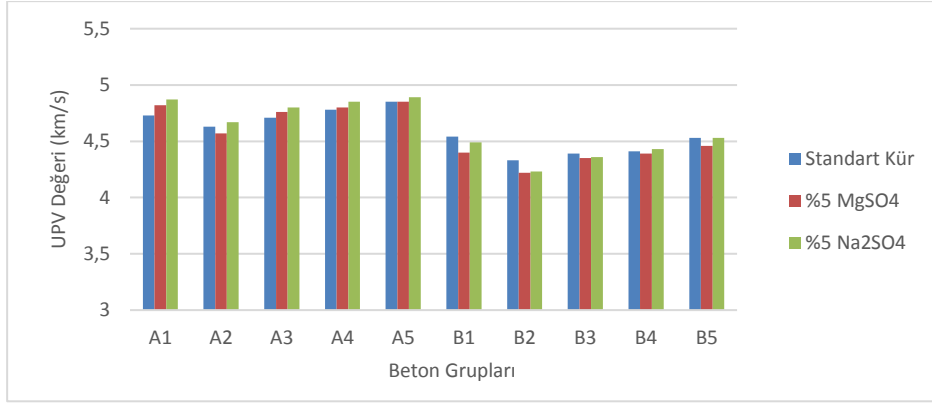
4.2.3. Ultrases geçiş hızı

Sertleşmiş beton numunelerinde uygulanan ultra ses deneylerinin sonuçları Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.4. UPV deney sonuçları.

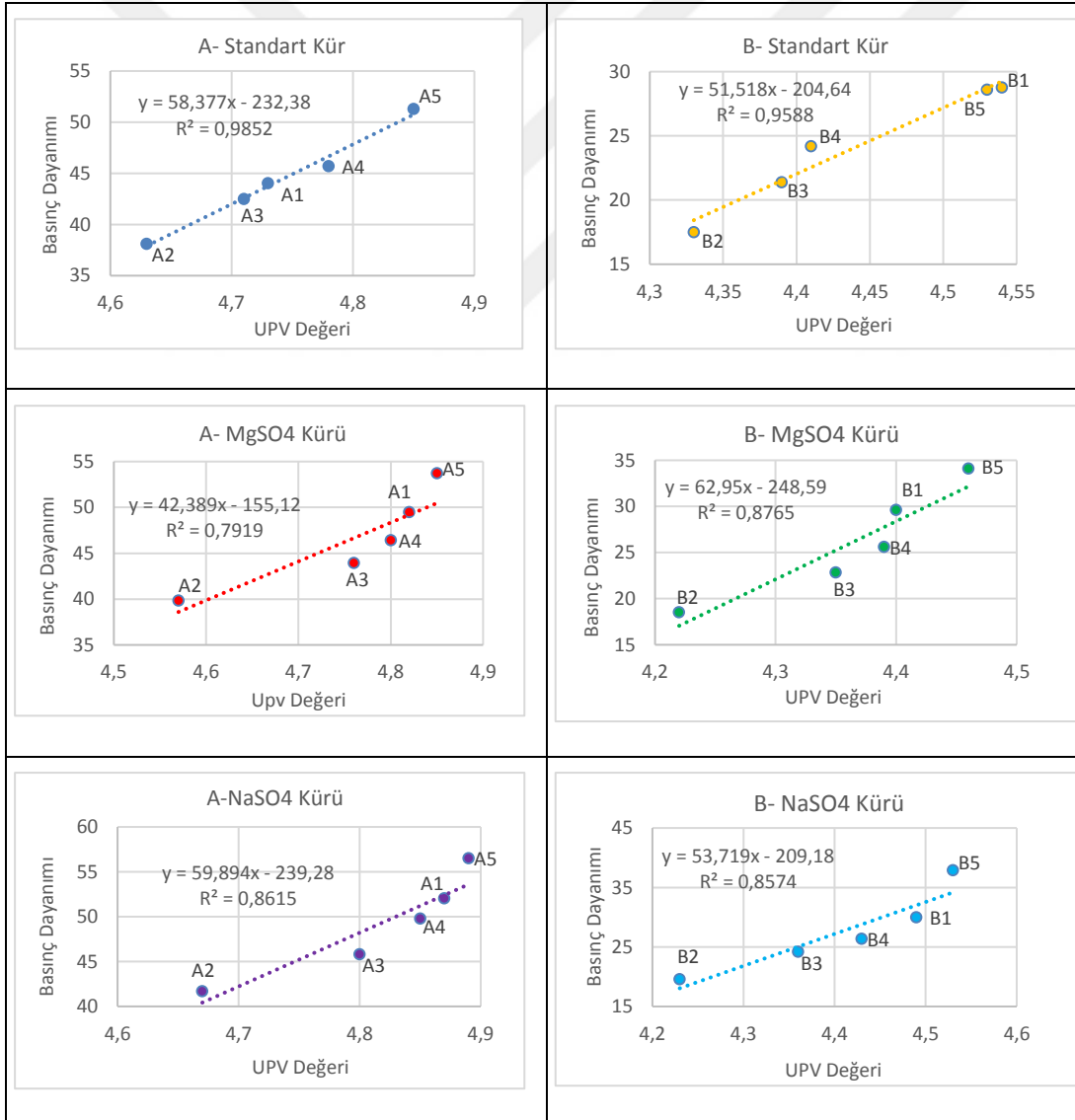
Beton Grubu	UPV Değeri (km/sn)				
	Standart Kür			28 Gün Standart+ %5 MgSO ₄	28 Gün Standart+ %5 Na ₂ SO ₄
	7 gün	28 gün	120 gün	90 gün	90 gün
A1	4,45	4,65	4,73	4,82	4,87
A2	4,08	4,54	4,63	4,57	4,67
A3	4,36	4,48	4,71	4,76	4,8
A4	4,43	4,61	4,78	4,80	4,85
A5	4,50	4,80	4,85	4,85	4,89
B1	4,28	4,40	4,54	4,40	4,49
B2	3,66	4,25	4,33	4,22	4,23
B3	4,11	4,23	4,39	4,35	4,36
B4	4,20	4,31	4,41	4,39	4,43
B5	4,38	4,44	4,53	4,46	4,53

Sonuçlar incelendiğinde, agrega türü ve kür koşullarının etkisiyle numunelerin boşluklu yapısının farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Deney sonuçları kür sürelerine göre değerlendirildiğinde, aynı grupta yer alan ve benzer koşullarda tutulan numunelerde kür süresi ile dalga geçiş hızının arasında doğru orantı olduğu görölmektedir. Bu durum hidratasyon olayının artmasıyla beton içindeki boşluk miktarının azaldığını göstermektedir. Dolayısıyla geçiş süresi azalarak sesin yayılma hızı artış göstermiştir. Şekil 4.3’de standart kürde ve sülfatlı ortamda bırakılan beton numunelerin 90. gündeki UPV değerleri verilmiştir.



Şekil 4.3. Beton numunelerin 90. günde UPV değerleri.

Şekil 4.4’de A ve B beton grubu numunelerin 90 günlük kür süresi sonunda basınç dayanımları ile ultrases geçiş hızları arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 4.4. Beton numunelerin basınç dayanımı ve UPV değerleri arasındaki ilişki.

Aynı grup içerisinde ama farklı koşullarda bekletilen numunelerde hem Na_2SO_4 ve hem MgSO_4 çözeltisinde bekletilen numunelerdeki ultra ses yayılma hızı aynı süre içerisinde normal suda bekletilen numunelere göre çoğunlukla daha yüksek olduğu görülmüştür. Her iki sülfat etkisinde, betonların gözeneklerinde sülfat iyonlarının hidratasyon ürünleriyle tepkimeye girmesi sonucu yeni ürünlerin oluşması numunelerin UPV değerlerinin yüksek çıkmasını sağlamıştır. Yine aynı koşullarda sülfat çözeltileri kendi içinde değerlendirildiğinde Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen numunelerde ultrasonik dalganın yayılma hızı Mg_2SO_4 çözeltisinde bekletilen numunelere göre genel itibariyle daha yüksek seviyede seyrettiği farkedilmiştir.

Aynı koşullarda ve aynı kür süresinde bekletilen numunelerin içeriğinde öğütülmüş yüksek fırın cürufu oranı arttıkça ultrasonik dalga hızı da artış göstermiştir. Bu durum çok ince halde öğütülmüş olan YFC'nin çimentoyla ikame etmesi sonucu betonda boşluk miktarını azalttığı anlamına ve dolayısıyla dayanımın yükseleceği anlamına gelmektedir.

GYFC ve çelikhane cürufunun agrega olarak kullanıldığı B serisi beton numuneleri, doğal agregalar ile üretilen A serisi beton numunelerine kıyasla daha düşük UPV değerlerine sahiptir. Çelikhane cürufunun gözenekli yapısı yanında şişme olayı göstererek betonda boşluklar oluşturması düşük UPV değerlerin oluşmasına neden olduğu düşünülmektedir.

Tüm numuneler arasında en yüksek UPV değerleri, çimento yerine %40 ÖYFC kullanılan ve doğal agregalarla üretilen A5 serisi beton numunelerde elde edilmiştir. En düşük UPV değerleri ise bağlayıcı olarak %10 ÖYFC ikameli çimentonun kullanıldığı ve yapay agregalarla beton üretiminin gerçekleştiği B2 serisi numunelerde görülmüştür. Bu bağlamda her iki serideki beton karışımlarında ÖYFC miktarı ile UPV değerleri arasında doğrusal bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. ÖYFC miktarının artmasıyla karışımlardaki S/Ç oranı azalmış ve dolayısıyla daha boşluksuz beton üretimleri gerçekleştiği için ultrases dalga hızları yüksek çıkmıştır.

Çalışma kapsamında 10 farklı grupta üretilen beton numunelerin farklı koşullar ve kür sürelerinden bağımsız olarak ultrases geçiş hızları genel olarak 3500 m/sn ile 4500 m/sn arasında değişmesinden dolayı beton kalitelerinin “iyi” olduğu söylenebilir. Bununla birlikte sonuçlar arasında UPV değeri 4500 m/sn üzerinde çıkan numunelerin beton kalitesinin “mükemmel” olduğu sonucuna ulaşılabilir.

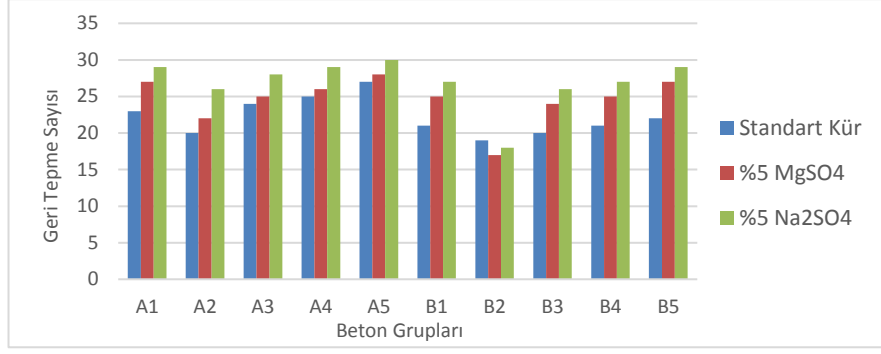
4.2.4. Beton test çekici deneyi

Beton test çekici deneyinde, tahribatsız bir yöntemle beton yüzeyinin sertliği ve tek eksenli basınç dayanımı tayin edilir. Deney, normal kürde 7, 28 ve 90 gün ve sülfatlı ortamda 90 gün bekletilen numuneler üzerinde uygulanmıştır. Her gruptan alınan 3 er adet numunenin, döküm yönlerine dik olacak şekilde, karşılıklı iki yüzeyine 10'ar kez deney uygulanmış ve elde edilen geri tepme sayılarının ortalaması Tablo 4.5'de verilmiştir.

Tablo 4.5. Beton test çekici deney sonuçları.

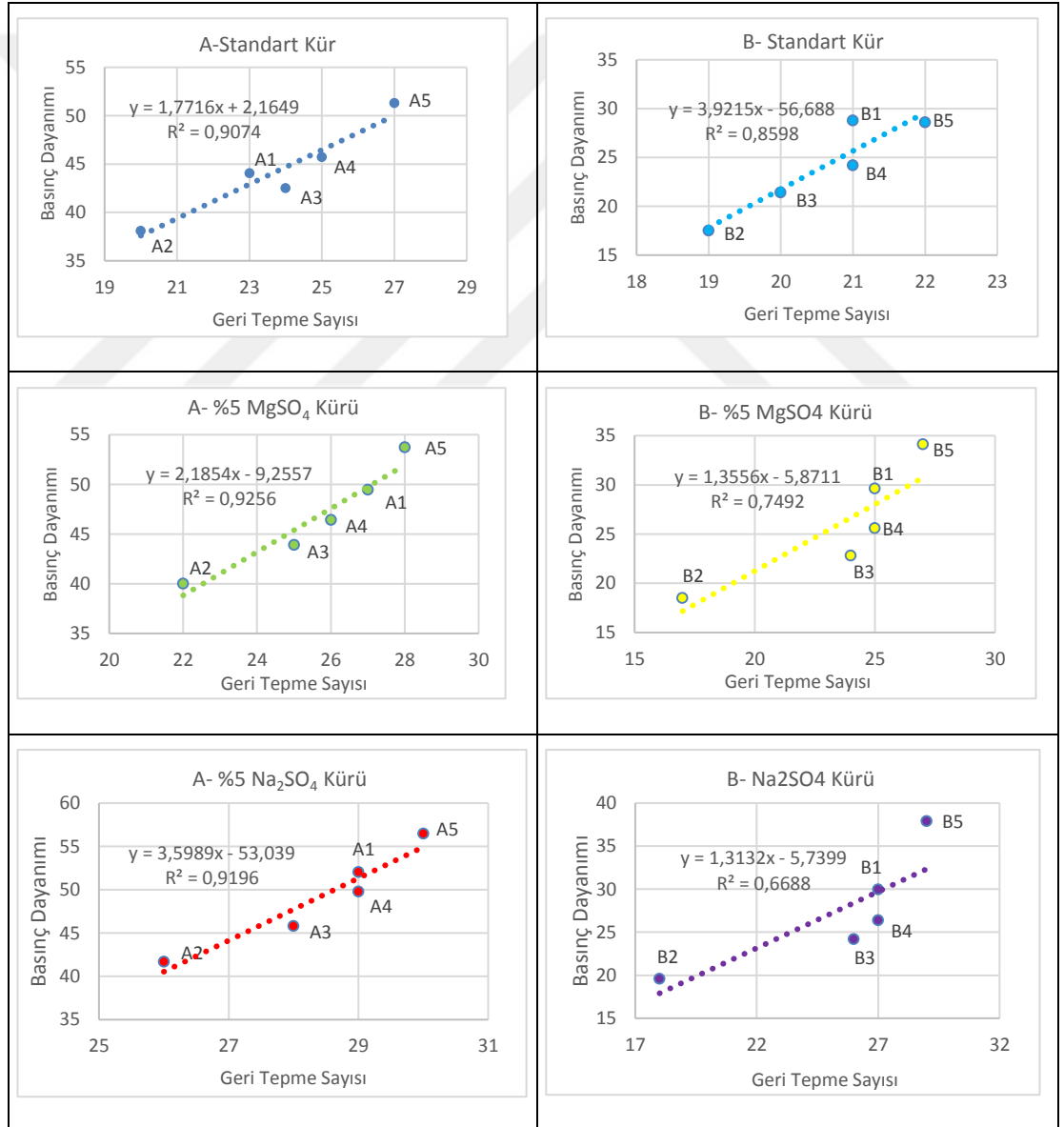
Beton Grubu	Beton Test Çekici Geri Tepme Sayısı				
	Standart Kür			28 Gün Standart+ %5 MgSO ₄	28 Gün Standart+ %5 Na ₂ SO ₄
	7 gün	28 gün	120 gün	90 gün	90 gün
A1	17	21	23	27	29
A2	16	19	20	22	26
A3	17	22	24	25	28
A4	18	23	25	26	29
A5	19	24	27	28	30
B1	18	19	21	25	27
B2	18	18	19	17	18
B3	15	18	20	24	26
B4	16	17	21	25	27
B5	17	18	22	27	29

Sonuçlar incelendiğinde genel olarak geri tepme sayısı en yüksek olan beton grubu A5 iken en düşük geri tepme sayısı B2 numunesinde elde edilmiştir. Deney sonuçları kür sürelerine göre değerlendirildiğinde, aynı grupta yer alan ve benzer koşullarda tutulan numunelerde kür süresi ile geri tepme sayısı arasında doğru orantı olduğu görülmektedir. Bu durum hidrasyon olayının artmasıyla beton istenilen mukavemete ulaştığını göstermektedir. Dolayısıyla daha sert bir malzemeye dönüşerek geri tepme sayısı artış göstermiştir. Şekil 4.5'de standart kürde ve sülfatlı ortamda bırakılan beton numunelerin 90. gündeki beton test çekici geri tepme sayıları verilmiştir.



Şekil 4.5. Beton numunelerin 90. günde beton test çekici geri tepme sayıları.

Şekil 4.6'da A ve B beton grubu numunelerin 90 günlük kür süresi sonunda basınç dayanımları ile beton test çekici geri tepme sayıları arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 4.6. Beton numunelerin basınç dayanımı ve geri tepme sayısı arasındaki ilişki.

Aynı grup içerisinde ama farklı koşullarda bekletilen numunelerde hem Na_2SO_4 ve hem MgSO_4 çözeltisinde bekletilen numunelerdeki geri tepme sayısı aynı süre içerisinde normal suda bekletilen numunelere göre çoğunlukla daha yüksek olduğu görülmüştür. Yine aynı koşullarda sülfat çözeltileri kendi içinde değerlendirildiğinde Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen numunelerde geri tepme sayısı MgSO_4 çözeltisinde bekletilen numunelere göre genel itibariyle daha yüksek seviyede seyrettiği görülmüştür.

Aynı koşullarda ve aynı kür süresinde bekletilen numunelerin içeriğinde öğütülmüş yüksek fırın cürufu oranı arttıkça geri tepme sayısı da artış göstermiştir. Bu durum çok ince halde öğütülmüş olan YFC'nin çimentoyla ikame oranı arttıkça daha yoğun ve dayanımı yüksek bir malzeme elde edileceği anlamına gelmektedir.

GYFC ve çelikhane cürufunun agrega olarak kullanıldığı B serisi beton numuneleri, doğal agregalar ile üretilen A serisi beton numunelerine kıyasla daha düşük test çekici değerlerine sahiptir. Çelikhane cürufunun (ÇC) şişme olayı göstererek betonda çatlaklar oluşturması ve aynı zamanda hem ÇC hem de GYFC'nin gözenekli yapıda olmasıyla boşluk miktarının artması düşük geri tepme sayılarının oluşmasına neden olduğu düşünülmektedir.

4.2.5. Ağırlık değişimi

Kür sürelerini tamamlayan beton numuneler 90 gün sonunda ağırlık değişimleri incelenmiştir. Sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri Tablo 4.6'de verilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde, hem %5 MgSO_4 hem de %5 Na_2SO_4 çözeltisinde tutulan, doğal ve yapay agrega ile üretilen her iki serinin beton numunelerinde belirgin bir ağırlık değişimi görülmemiştir. Cüruf agregalı B serisi numunelerde A serisi numunelere göre nispeten hafif bir ağırlık artışı görülmüştür. Gözenekli yapıda olan cürufun bünyesine daha fazla sülfat iyonlarını alması ve bünyesinde serbest halde bulunan MgO ve CaO ile tepkimeye girmesi sonucu ağırlık artışının gerçekleştiği tahmin edilmektedir. Buna karşılık tüm numuneler genel itibariyle incelendiğinde ağırlık değişiminin önemsiz düzeyde kaldığı görülmektedir. Bu nedenle 90 gün sülfatlı ortamda bırakılan doğal ve cüruf agregalı betonlarda ağırlık değişimi konusunda olumsuz bir etki oluşmadığı anlaşılmaktadır.

Tablo 4.6. Sülfat etkisi sonrası numunelerdeki ağırlık değişimi.

Beton Grubu	Ağırlık Değişimi (%)	
	28 Gün Standart+ %5 MgSO ₄	28 Gün Standart+ %5 Na ₂ SO ₄
A1	1.3	1.3
A2	0	1.2
A3	0	0.4
A4	0	0
A5	1.2	0
B1	2	0.9
B2	0.9	1.8
B3	1.3	3.1
B4	2.1	0.8
B5	2.1	0.8

4.2.6. Basınç dayanımı

Çalışma kapsamında 10 grupta üretilen beton numunelerin 7, 28 ve 90 gün normal suda ve 90 gün sülfat çözeltisinde tutulduktan sonra basınç dayanımları ölçülmüştür. Numunelerin basınç dayanımları Tablo 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.7. Basınç dayanımı deney sonuçları.

Beton Grubu	Basınç Dayanımı (MPa)				
	Standart Kür			28 Gün Standart+ %5 MgSO ₄	28 Gün Standart+ %5 Na ₂ SO ₄
	7 Gün	28 Gün	120 Gün	90 Gün	90 Gün
A1	34,5	40,1	44,0	49,4	52,0
A2	23.0	30.4	38.1	39.8	41.7
A3	25.6	30.7	42.5	43.9	45.8
A4	27.2	35.6	45.7	46.4	49.8
A5	29.7	41.0	51.3	53.7	56.5
B1	17,6	25,6	28,7	29,6	29,9
B2	13.0	15.9	17.5	18.5	19.6
B3	12.3	16.5	21.4	22.8	24.2
B4	14.6	17.3	24.2	25.6	26.4
B5	14.9	23.8	28.6	34.1	37.9

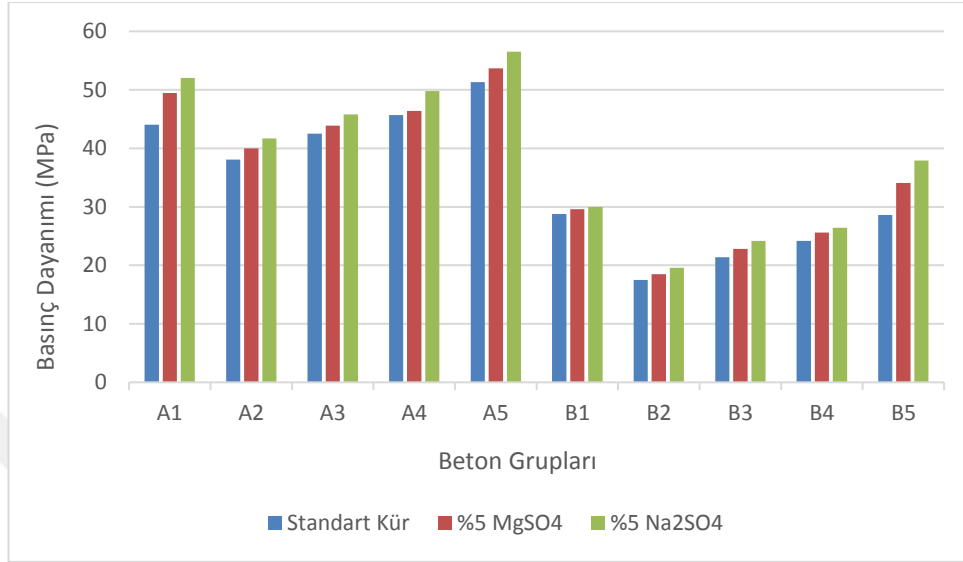
Doğal agregalar ile üretilmiş A serisinin basınç dayanımları incelendiğinde, 7 günlük basınç dayanımlarının sonuçları referans olarak kabul edilirse, A1, A2, A3, A4, A5 kodlu beton numunelerin 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla %16, %32, %20, %31, %34 oranında, 90 günlük basınç dayanımları ise aynı sırayla %28, %66, %66, %68, %73 oranında artış göstermiştir. 90 gün boyunca sülfatlı ortamda bekletilen A1, A2, A3, A4, A5 kodlu numunelerin basınç dayanımları aynı süre zarfında normal suda bekletilen numunelere kıyasla %5 $MgSO_4$ çözeltisinde %12, %4, %3, %2, %5 oranında, %5 Na_2SO_4 çözeltisinde %18, %9, %8, %9, %10 oranında artmıştır.

Yapay agregalarla üretilmiş B serisinin basınç dayanımları incelendiğinde, 7 günlük basınç dayanımları referans kabul edilirse, B1, B2, B3, B4, B5 kodlu beton numunelerin 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla %45, %22, %34, %19, %59 oranında, 90 günlük basınç dayanımları ise %63, %34, %74, %66, %92 oranında artmıştır. 90 gün boyunca sülfatlı ortamda bekletilen B1, B2, B3, B4, B5 kodlu numunelerin basınç dayanımları aynı süre zarfında normal suda bekletilen numunelere kıyasla %5 $MgSO_4$ çözeltisinde %3, %6, %7, %6, %19 oranında, %5 Na_2SO_4 çözeltisinde %4, %12, %13, %9, %33 oranında artmıştır.

Doğal agregalarla hazırlanmış ve portland çimentosu yerine %40 oranında ÖYFC ikame edilmiş A5 beton karışımı, bütün gruplar içerisinde en yüksek basınç dayanımının ölçüldüğü grup olmuştur. Normal suda bekletilen A5 numunesi 90 gün sonunda 51.3 MPa basınç dayanıma, sülfatlı çözeltilerde 90 gün bekletilerek %5 $MgSO_4$ çözeltisinde 53.7 MPa ve %5 Na_2SO_4 çözeltisinde 56.5 MPa basınç dayanıma ulaşarak en yüksek basınç dayanımına sahip olmuştur. A serisi içerisinde en düşük basınç dayanımı %90 PÇ ve %10 ÖYFC ile üretilen A2 grubunda ölçülmüş olup 90 gün boyunca standart kürde bekletilerek 38,1 MPa, sülfat çözeltilerinde bekletilerek %5 $MgSO_4$ çözeltisinde 39,8 MPa ve %5 Na_2SO_4 çözeltisinde 41,7 MPa basınç dayanımına ulaşabilmiştir.

Yapay agregalarla hazırlanmış B serisi beton karışımları arasında en yüksek basınç dayanımı, PÇ yerine %40 oranında ÖYFC ikame edilerek üretilen B5 beton grubunda ölçülmüştür. Normal suda bekletilen B5 numunesi 90 gün sonunda 28.6 MPa basınç dayanıma, sülfatlı çözeltilerde 90 gün bekletilerek %5 $MgSO_4$ çözeltisinde 34.1 MPa ve %5 Na_2SO_4 çözeltisinde 37.9 MPa basınç dayanıma ulaşarak B serisi içerisinde en yüksek basınç dayanımına sahip olmuştur. B serisi içerisinde en düşük basınç dayanımı %90 PÇ ve %10 ÖYFC ile üretilen B2 grubunda ölçülmüş olup 90 gün

boyunca standart kürde bekletilerek 17,5 MPa, sülfat çözeltilerinde bekletilerek %5 MgSO_4 çözeltisinde 18,5 MPa ve %5 Na_2SO_4 çözeltisinde 19,6 MPa basınç dayanımına ulaşabilmiştir. Şekil 4.7’de standart kürde ve sülfatlı ortamda bırakılan beton numunelerin 90. gündeki basınç dayanımları verilmiştir.



Şekil 4.7. Beton numunelerin 90 günlük basınç dayanımları.

Yapay agregalarla üretilen B serisi beton grupların basınç dayanımları doğal agregalarla üretilen A serisi beton gruplarına göre daha düşük kalmıştır. Sülfat saldırısında betondaki Ca bileşenleri ile sülfatlı bileşikler biraraya gelerek etrenjit ve alçıtaşı oluşturmaktadır. Bu bağlamda, ÇÇ ve GYFC’nin bünyesinde bulunan fazla miktarda serbest kireçten (CaO) dolayı sülfatlı ortamda bekletilen B serisi beton grupların basınç dayanımları A serisine göre daha düşük olmuştur. Ayrıca çelikhane cürufu içerisinde bulunan serbest haldeki CaO ve MgO ’in bünyesine su alarak şişmesinin de dayanım kaybında etkisi olduğu düşünülmektedir.

Her iki seri için aynı sürede suda ve sülfatta bekletilen beton karışımlarında ÖYFC miktarı arttıkça basınç dayanımları da genel olarak artış göstermiştir. Çimentoda puzolan olarak kullanılan ÖYFC işlenebilirliği artırmakta ve dolayısıyla karışım suyuna duyulan ihtiyacı azaltmaktadır. Beton karışımlarında suyun daha az kullanılması S/Ç oranını düşürdüğü için dayanım artışına katkı sağlamaktadır. Bundan dolayı hem A serisinde hem de B serisinde en yüksek basınç dayanımları %40 ÖYFC ikameli betonlarda ölçülmüştür. Ayrıca B serisi beton karışımlarında ÖYFC kullanımının basınç dayanımındaki artışa etkisi A serisinden genel olarak daha fazla olmuştur.

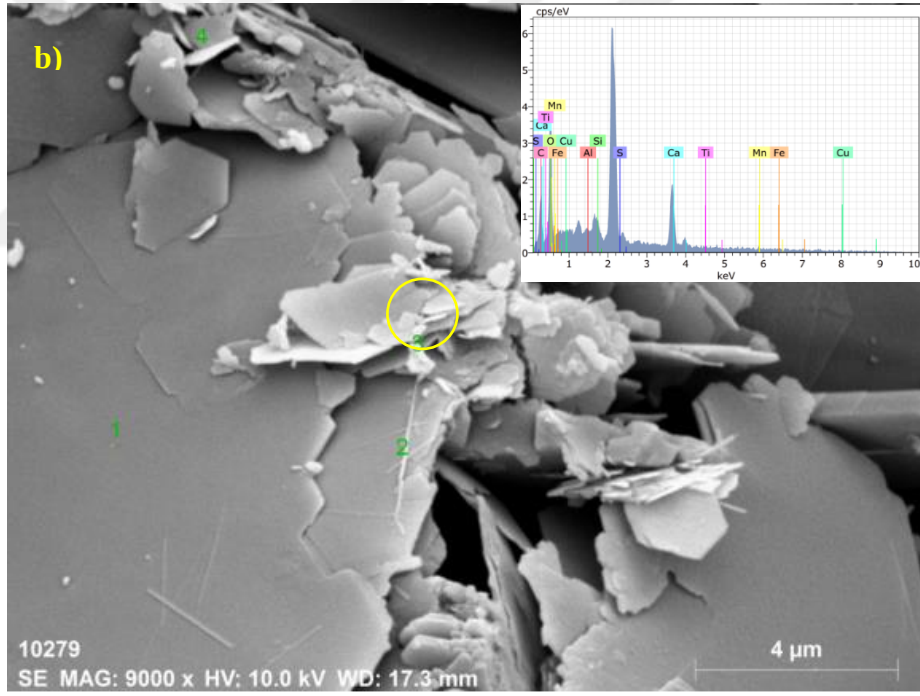
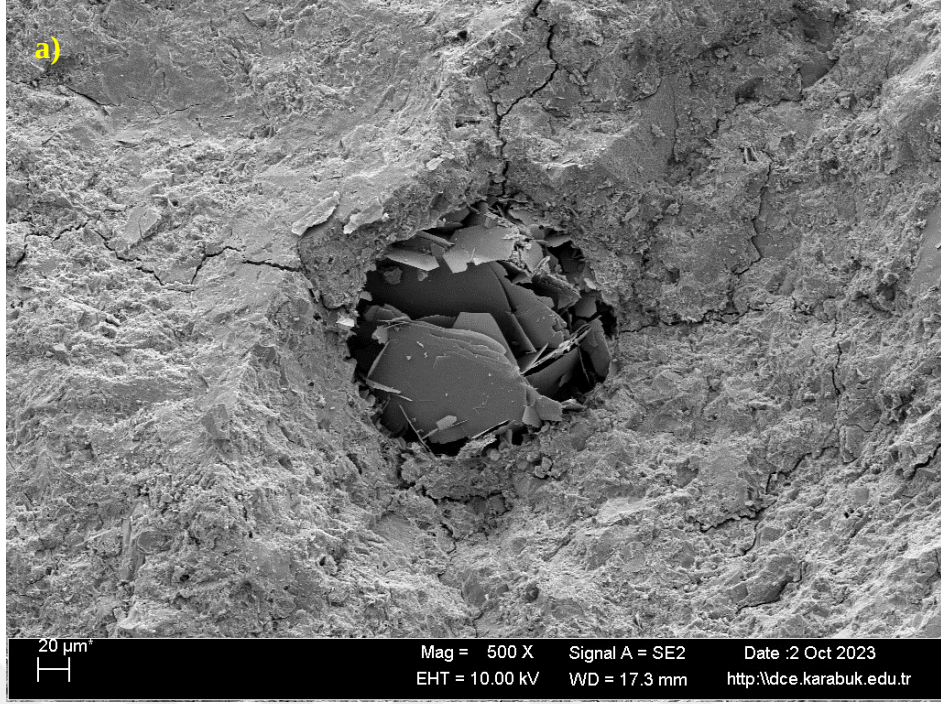
3 ay boyunca sülfata maruz kalan bütün numunelerin basınç dayanımlarında artışlar görülmüştür. Dolayısıyla numunelerin sülfat etkisinde 3 aya kadar dirençli kalabildiği ve performanslarını arttırarak koruyabildiğini söyleyebiliriz. Literatürdeki benzer çalışmalar incelendiğinde, sülfatlı ortamda bırakılan numunelerde belli bir süreye kadar basınç dayanımı artışının, kalsiyum ile sülfatlı bileşiklerin tepkimeye girerek beton içerisindeki gözenekleri doldurması ve bu sayede boşluksuz, yoğun bir malzeme elde edilmesiyle sağlandığı ifade edilmiştir. Sülfat etkisi sonrası basınç dayanımlarındaki değişimler incelendiğinde, hem A serisinde hem de B serisinde Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımında MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelere göre daha fazla artış görülmüştür. Magnezyum sülfatın betona etkisiyle C-S-H jelindeki Ca⁺² iyonu, Mg⁺² iyonu ile yer değiştirerek zayıf kristal yapıya sahip olan M-S-H ürününe dönüşmesi, betonda basınç dayanımının düşmesine sebep olmaktadır. Ayrıca magnezyum sülfatın betonun C-S-H yapısını diğer sülfat etkilerinden daha hızlı bozmasından dolayı daha erken dayanım kaybı ve bozulmalar yaşandığı düşünülmektedir.

4.3. Mikroyapı İnceleme

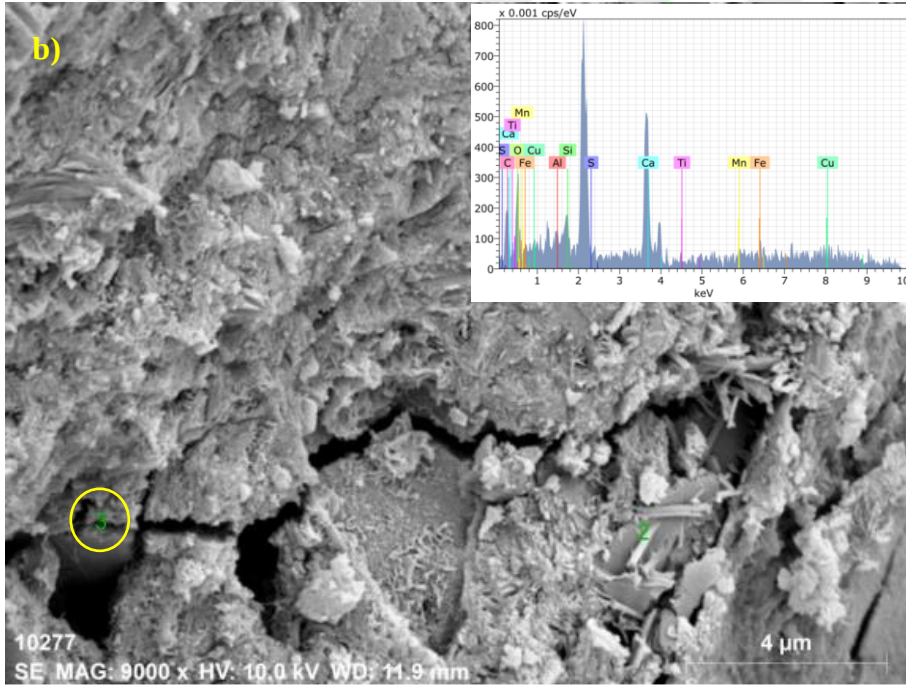
Standart kürde ve sülfatlı ortamda olmak üzere ayrı ayrı koşullarda 90 gün bekletilen A1 ve B1 referans beton numuneleri üzerinde SEM+EDS görüntüleri alınmış ve XRD ölçümleri yapılmıştır. SEM analizi, numuneler üzerinde sülfat etkisinin daha belirgin görüldüğü köşe ve kenarlardan parçalar olarak gerçekleştirilmiştir.

Literatürden elde edilen bilgiye göre sülfatlı çözeltilerde bekletilen numunelerde etrenjit oluşumunu belirlemede, EDS analizi sonucu elde edilen S/Ca ve Al/Ca oranları ve S/Al oranı kullanılmaktadır. Etrenjit kristalinin farklı yapılarda oluşabilmesinden dolayı literatürde bu oranlarla ilgili etrenjit kristal tipine bağlı olarak bazı ilişkilere yer verilmiştir. Genel olarak S/Ca ve Al/Ca oranının 0.10'dan fazla olması yapının etrenjit olduğunu göstermektedir (Tosun, 2007).

Normal suda kür edilen doğal agregalı A1 numunesi üzerinde yapılan SEM analizleri ve işaretli bölge üzerinde yapılan EDS analizi sonuçları Şekil 4.8 (a), (b)'de, cüruf agregalı B1 numunesi üzerinde yapılan SEM analizleri ve işaretli bölge üzerinde yapılan EDS analizi sonuçları Şekil 4.9 (a), (b)'de verilmiştir. SEM görüntülerinde matrisin iyi derece homojen olduğu ve içerisindeki gözeneklerin porlandit yapısıyla dolduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.8. a) Standart kürde bekletilen A1 numunesine ait SEM görüntüsü b) EDS analizi.

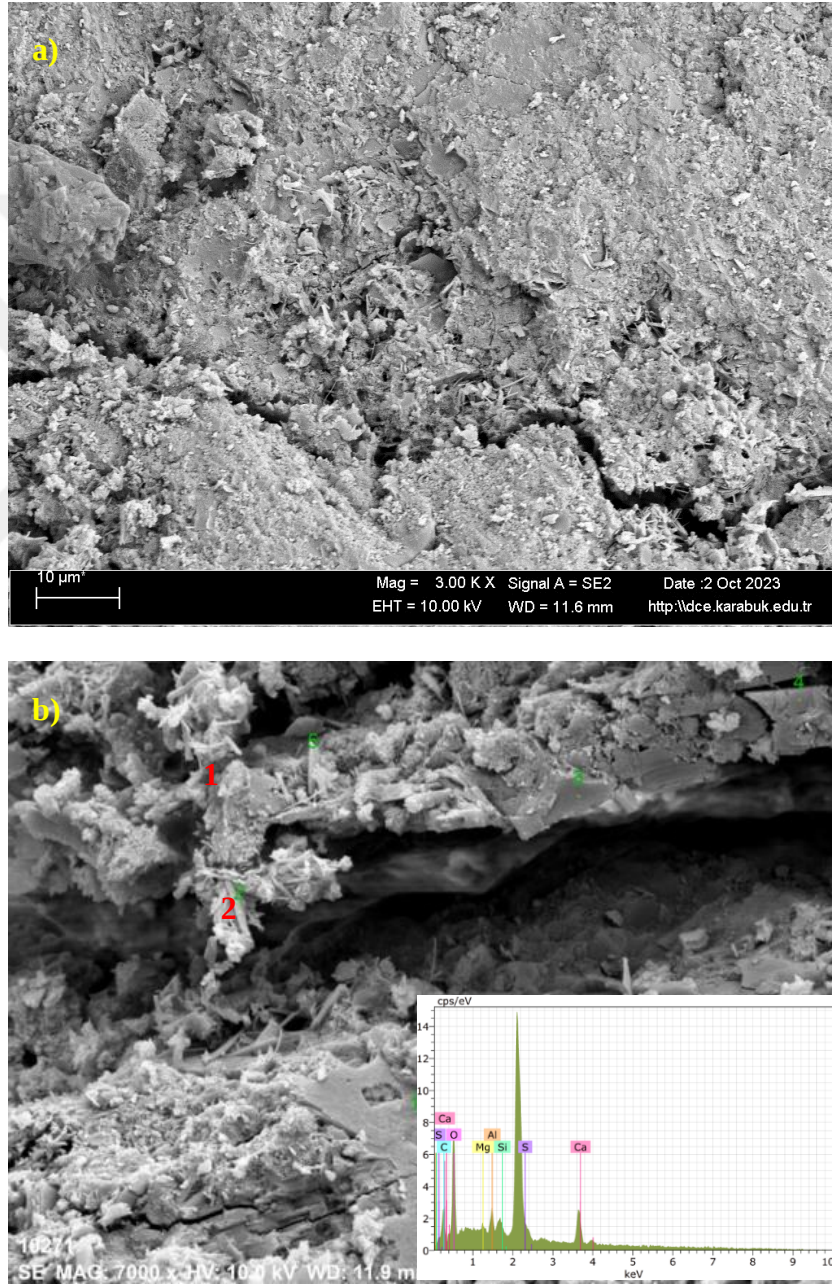


Şekil 4.9. a) Standart kürde bekletilen B1 numunesine ait SEM görüntüsü b) EDS analizi.

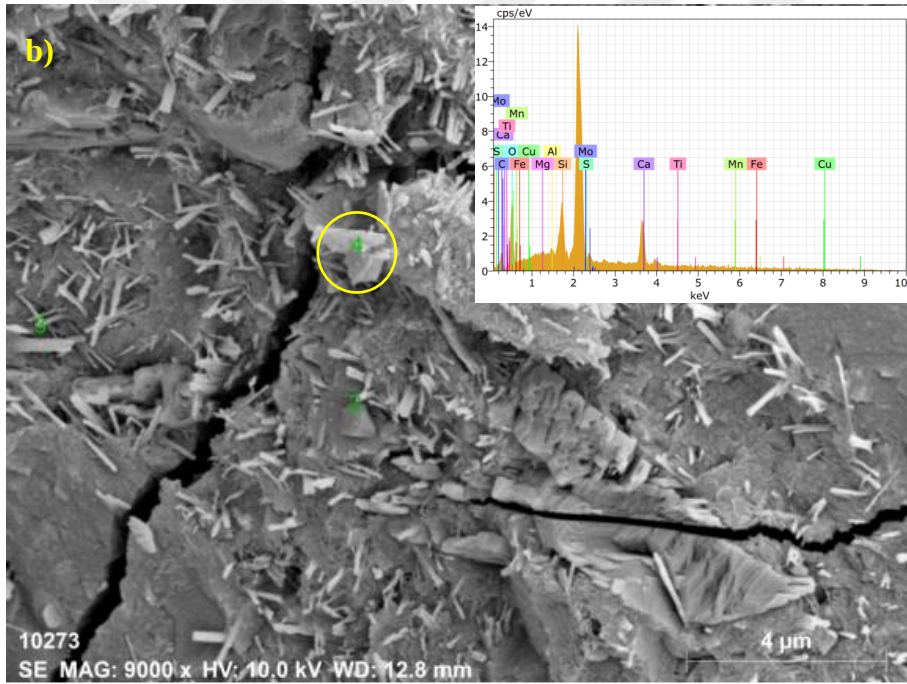
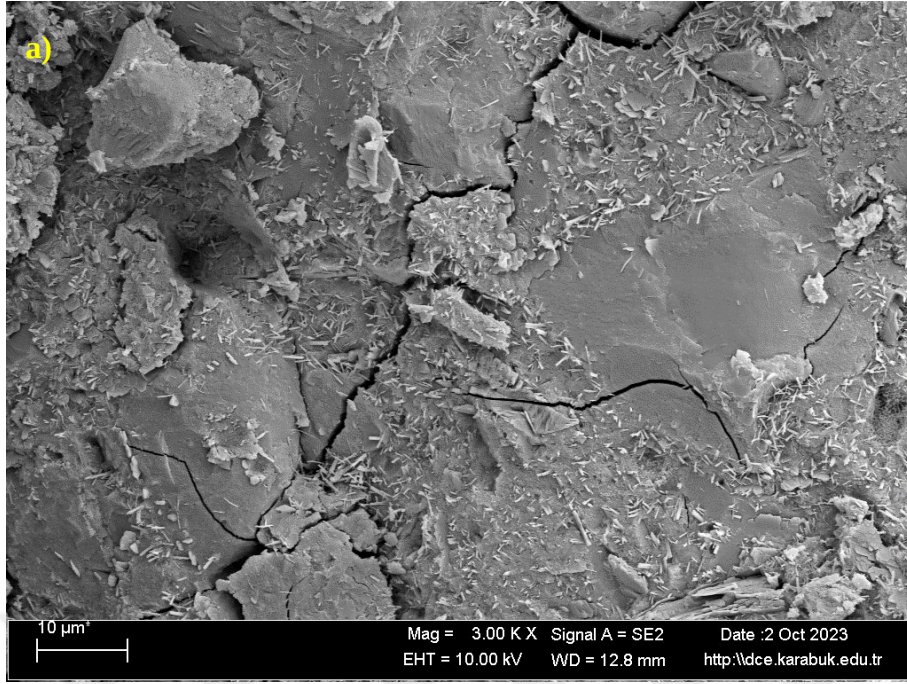
Standart kürde bekletilen referans betonların EDS analizi incelendiğinde, doğal agregalı A1 numunesine kıyasla B1 numunesinde cüruftan kaynaklı daha fazla oranda demir ve mangan bulunduğu görülmüştür. Şekil 4.8 (a)'da gösterildiği gibi standart kürde bekletilen A1 kodlu numunede oluşan gözeneklerin içi hidratasyon ürünü olan portlandit ile dolduğu gözlemlenmiştir. EDS analizi sonucunda, Ca elementi dışında

diğer elementlerden eser miktarda bulunması sebebiyle bu yapının portlandit olduğu kanısına varılmıştır.

%5 konsantrasyonlu $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen doğal agregalı A1 numunesi üzerinde yapılan SEM analizleri ve işaretli bölge üzerinde yapılan EDS analizi sonuçları Şekil 4.10 (a), (b)'de, cüruf agregalı B1 numunesi üzerinde yapılan SEM analizleri ve işaretli bölge üzerinde yapılan EDS analizi sonuçları Şekil 4.11 (a), (b)'de verilmiştir.



Şekil 4.10. a) $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen A1 numunesine ait SEM görüntüsü b) EDS analizi.

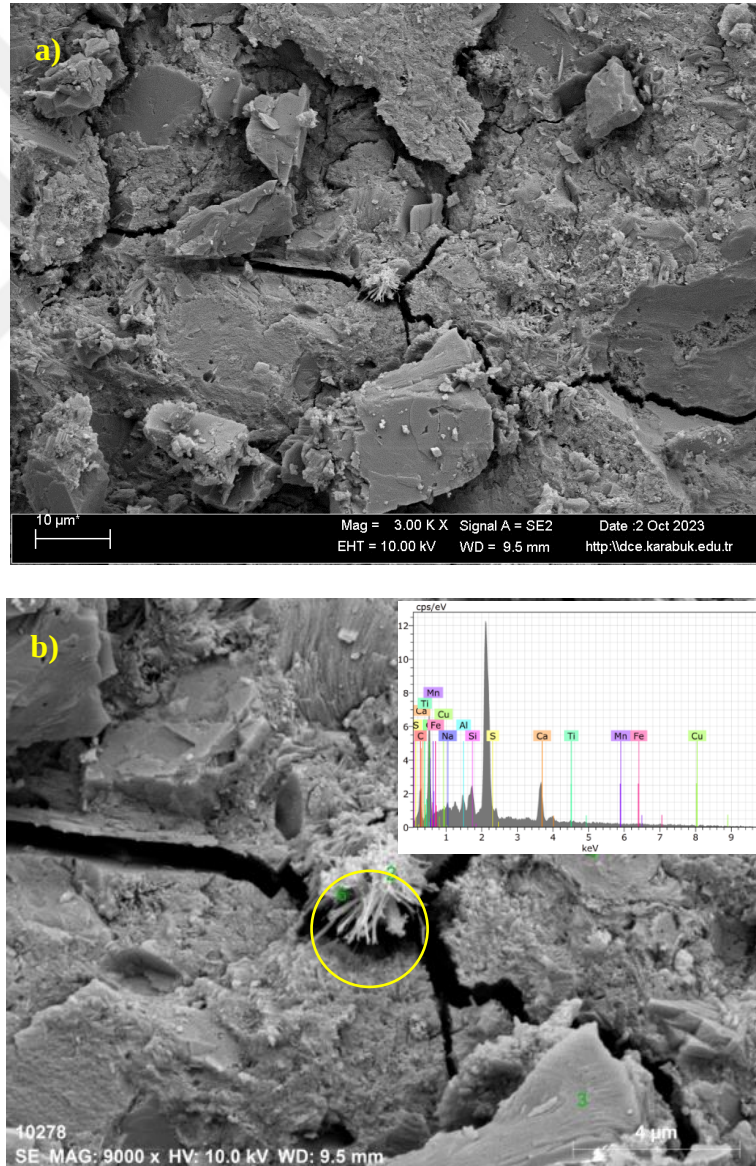


Şekil 4.11. a) $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen B1 numunesine ait SEM görüntüsü b) EDS analizi.

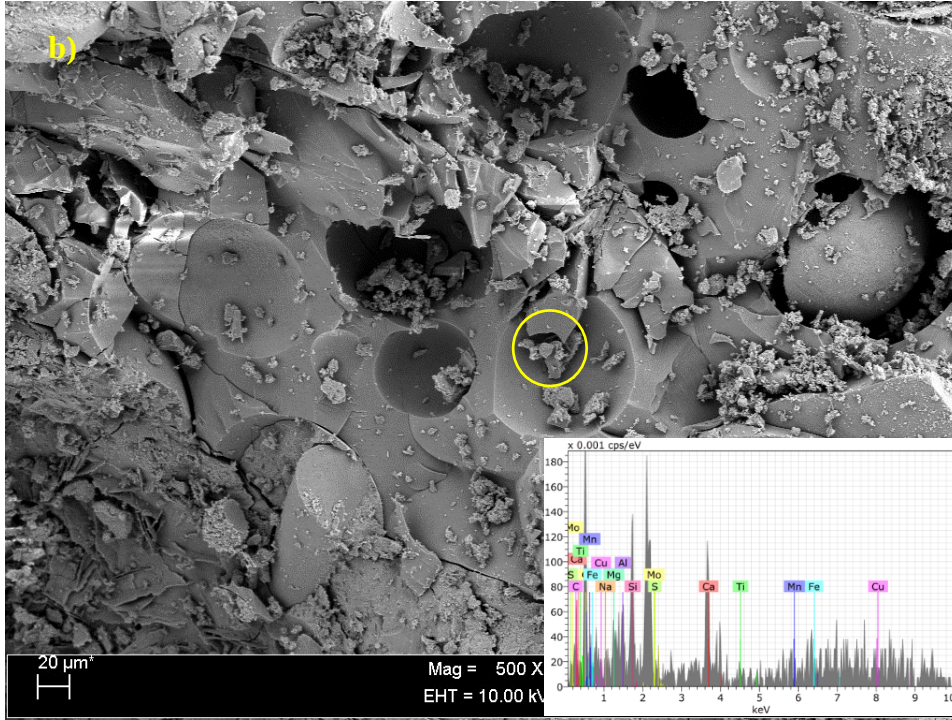
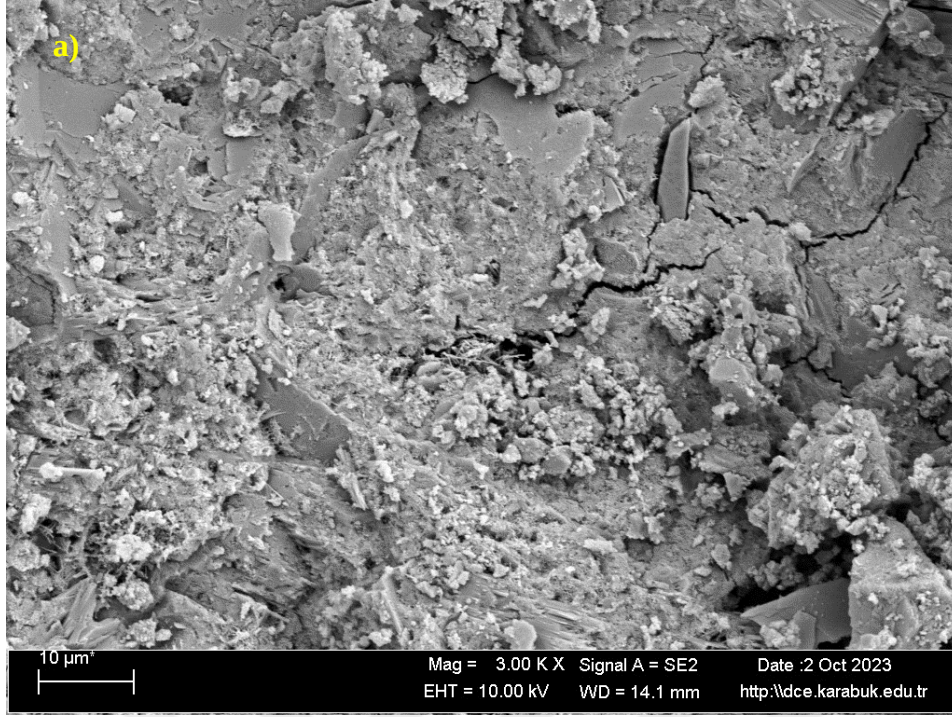
Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'deki SEM görüntüleri incelendiğinde özellikle cüruf agregalı B1 numunesinde etrenjit olarak bilinen iğneli kristal yapıdaki oluşumların yoğun bir şekilde olduğu görülmektedir. Bu durum oluşmasında cürufun mineralojik yapısının etkili olduğu söylenebilir. Şekil 4.10 (b)'de 2 nolu bölgedeki iğneli yapı üzerinde uygulanan EDS analizi sonucunda bu oluşumun S/Ca oranı 0.21 ve Al/Ca oranı ise 0.04 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde elde edilen görüntüler,

hidratasyon reaksiyonlara ek olarak sülfat etkisi sonucu beton içyapısında oluşan etrenjit kümelenmesine işaret etmektedir. Şekil 4.10 (b)'de 1 nolu bölgede EDS analizine göre Ca ve C elementlerinin stekometri oranları uygun olduğu ve diğer elementlerin de az miktarda bulunmasından dolayı CaCO_3 olduğu yargısına varılabilir.

%5 konsantrasyonlu Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen doğal agregalı A1 numunesi üzerinde yapılan SEM analizleri ve işaretli bölge üzerinde yapılan EDS analizi sonuçları Şekil 4.12 (a), (b)'de, cüruf agregalı B1 numunesi üzerinde yapılan SEM analizleri ve işaretli bölge üzerinde yapılan EDS analizi sonuçları Şekil 4.13 (a), (b)'de verilmiştir.



Şekil 4.12. a) Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen A1 numunesine ait SEM görüntüsü b) EDS analizi.



Şekil 4.13. a) Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen B1 numunesine ait SEM görüntüsü b) EDS analizi.

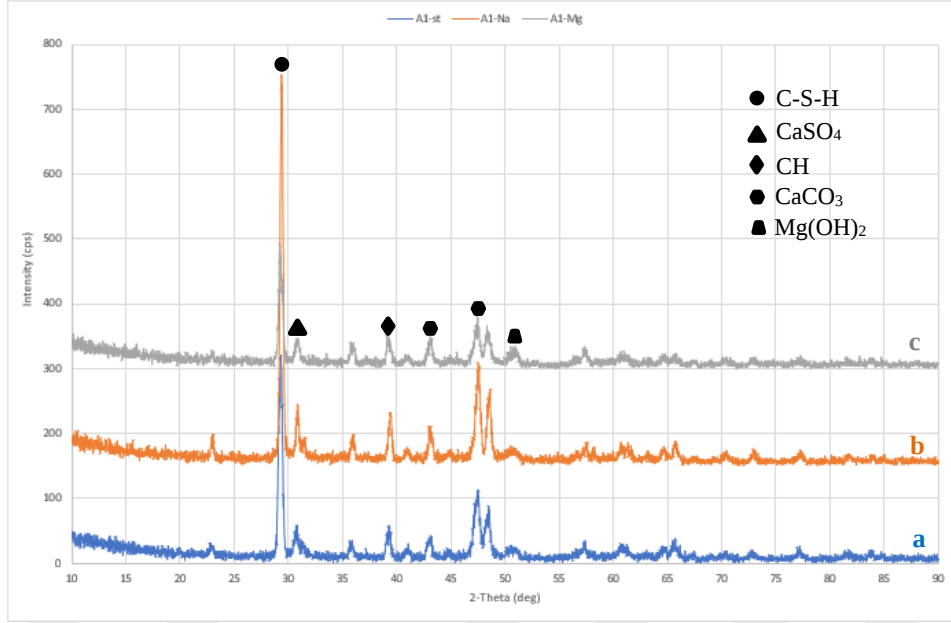
Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'deki SEM görüntüleri incelendiğinde özellikle cüruf agregalı B1 numunesinde gözeneklerin etrenjit olarak bilinen iğneli kristal yapıdaki oluşumlarla ve portlandit yapısıyla dolduğu görülmektedir. Şekil 4.12 (b)'de işaretli bölgedeki iğneli yapı üzerinde uygulanan EDS analizi sonucunda bu oluşumun S/Ca oranı 0.08 ve Al/Ca oranı ise 0.12 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar

değerlendirildiğinde elde edilen görüntüler, hidrasyon reaksiyonlara ek olarak sülfat etkisi sonucu beton içyapısında oluşan etrenjit kümelenmesine işaret etmektedir.

SEM analizleri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde genel olarak cüruf agregalı numunelerde gözenek miktarının doğal agregalı numunelere göre daha fazla olduğu görülmüştür.

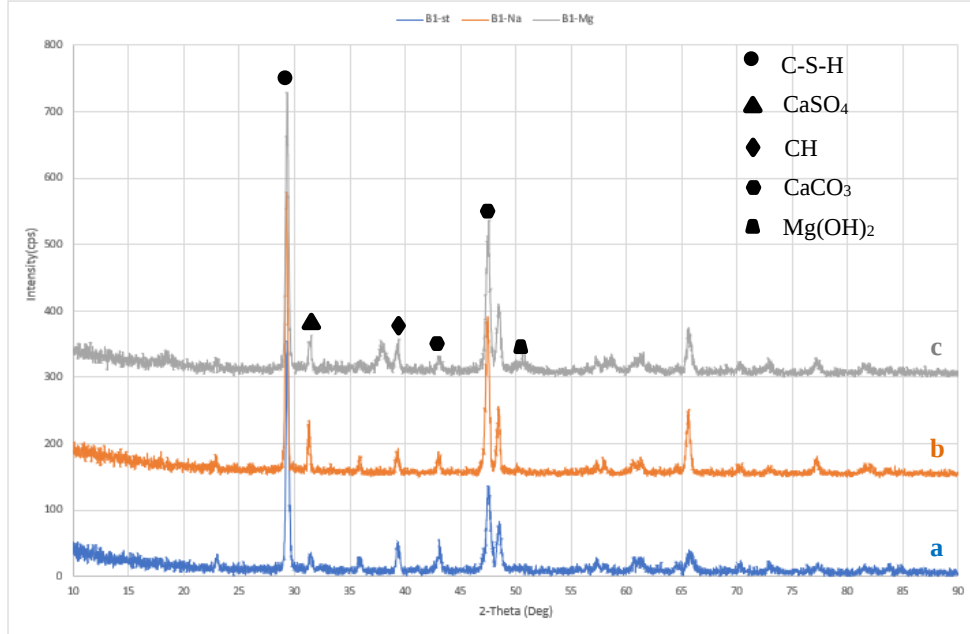
%5 $MgSO_4$ ve %5 Na_2SO_4 çözeltilerinde ayrı ayrı bekletilen kontrol beton numunelerinin SEM görüntülerinden anlaşılaçağı üzere, 12 hafta sülfat etkisine maruz kalan numuneler, içyapılarındaki boşlukların tepkimeler yoluyla oluşan etrenjit, alçı taşı ve diğler sülfatlı bileşikler ile dolmasıyla standart kürede bekletilen numunelere göre daha yoğun bir yapıya sahip olmuştur. Tepkimeler yoluyla oluşan bu oluşumların 90 günlük sülfat etkisi sonrası bariz olmamakla birlikte dayanım artışlarına yol açtığı düşünülmektedir.

Yukarıda SEM-EDS analizi ile kristal yapısı belirlenmeye çalışılan numuneler üzerinde XRD analizi de yapılmıştır. EDS analizi ile numunenin mineralojik yapısı tam olarak belirlenememektedir. Bu nedenle numuneler üzerinde XRD analizi yapılarak SEM analizi ile beraber değerlendirilmesi gerekmektedir. Doğal agregalı beton numunelerin XRD ölçüm sonuçları Şekil 4.14'da, yapay agregalı beton numunelerin XRD ölçüm sonuçları Şekil 4.15'de sunularak değerlendirilmiştir. Hazırlanan toz numuneler üzerinde yapılan XRD analizleri 2θ 5-50° arasında 2 °/dk tarama hızı ile yapılmıştır.



Şekil 4.14. Farklı ortamlarda (a: Standart kür, b: Na_2SO_4 çözeltisi, c: MgSO_4 çözeltisi) kür edilen A1 numunesinin XRD ölçüm sonuçları.

Şekil 4.14’de gösterildiği gibi XRD ölçüm sonucuna bakıldığında farklı kür ortamlarında bekletilen A1 kodlu numunelerin hepsinde CH, CaCO_3 ve C-S-H pikleri görülmüştür. Na^{+2} elementin aktivatör olmasından dolayı Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen numunede daha fazla CaSO_4 (alçıtaşı) olduğu söylenilebilir. Ayrıca MgSO_4 çözeltisinde bekletilen numunede Mg(OH)_2 (brusit) piki de görülmektedir.



Şekil 4.15. Farklı ortamlarda (a: Standart kür, b: Na_2SO_4 çözeltisi, c: MgSO_4 çözeltisi) kür edilen B1 numunesinin XRD ölçüm sonuçları.

Şekil 4.15’de gösterildiği gibi XRD ölçüm sonucuna bakıldığında farklı kür ortamlarında bekletilen B1 kodlu numunelerin hepsinde CH, CaCO_3 ve C-S-H pikleri görülmüştür. Mg^{+3} elementi CH grubuyla tepkimeye girmesi sonucu MgSO_4 çözeltisinde bekletilen numunede daha fazla Mg(OH)_2 (brusit) oluştuğu söylenilebilir. SEM ve XRD analizlerine bakıldığında, genel anlamda magnezyum sülfat ve sodyum sülfatın betona etkisi CH ve C_3A bileşenleri üzerinden CaSO_4 ve etrenjit oluşturarak göstermiştir.



5. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Bu çalışmada yapay agrega olarak granüle yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufu kullanılarak üretilen betonların doğal agregalarla üretilen betonlara kıyasla mekanik ve durabilite özellikleri incelenmiştir. Ayrıca öğütülmüş yüksek fırın cürufu, beton üretiminde çimento ile farklı oranlarda ikame edilerek kullanılmış olup 10 farklı beton grubunda göstereceği etki araştırılmıştır. Üretilen numuneler üzerinde tahribatlı ve tahribatsız deneyler yapılarak optimum sonuçlar veren beton tasarımları tespit edilmiştir. Ardından durabilite deneyi için bütün beton grupları sülfata maruz bırakılarak performanslarındaki değişim deneylerle ölçülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

- Kontrol beton numunelerinin su emme oranları kıyaslandığında; cüruf agregalı numunelerin su emme oranı doğal agregalı numuneye göre daha yüksek seviyede olduğu görülmüştür. 90 günlük sülfat etkisine bırakılan her iki beton numunesinde su emme oranları azalmakla birlikte $MgSO_4$ çözeltisinde kür edilen numunelerde bu etki daha fazla görülmüştür.
- Sülfatlı çözeltelerde kür edilen numunelerin porozite değerlerinin düşük olmasında, mikroyapı analizi sonucu gözeneklerde olduğu gözlemlenen etrenjit ve alçıtaşı oluşumlarının etkisi olduğu düşünülmektedir.
- Basınç dayanımları sonuçları incelendiğinde standart kür ve sülfatlı ortamda bekletilen numuneler arasında cüruf içeren betonlar doğal agrega ile üretilen betonlara göre daha düşük basınç dayanımlarına sahip olmuştur.
- Standart kürde bekletilen 10 farklı beton numunesi arasında en yüksek basınç dayanımı, doğal agreganın (kırmı kum ve kırmı taş) kullanıldığı ve %40 ÖYFC'nin ikame edildiği A5 beton grubunda tespit edilmiştir. Deney sonuçlarına göre A5 numunesi 90 gün sonunda 51.3 MPa basınç dayanıma ulaşmıştır.
- Standart kürde bekletilen cüruf agregalı B serisi beton numuneleri arasında en yüksek basınç dayanımı %40 ÖYFC'nin ikame edildiği B5 beton grubunda

elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre B5 numunesi 90 gün sonunda 28.6 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır.

- Doğal ve yapay agregalarla üretilen her iki beton serisinde ÖYFC miktarı arttıkça beton dayanımı da genel olarak artış göstermiştir. Ayrıca B serisi beton karışımlarında ÖYFC kullanımının basınç dayanımındaki artışa etkisi A serisinden daha fazla olmuştur.
- Kontrol beton numunelerinde erken dayanım yüksek olurken, ÖYFC'nin çimento ile ikame edildiği diğer tüm numunelerde puzolan etkisi sonucu geç dayanım kazanıldığı tespit edilmiştir.
- Cüruf agregalı beton numunelerin bazılarında 28 günlük normal kür sonunda hacimce genleşme sonucu çatlaklar görülmüştür. Cürufun mineralojik yapısındaki serbest CaO ve MgO'nun suyla teması sonrası şişerek betona zarar verdiği düşünülmektedir. Bu durum cürufllu numunelerin basınç dayanımlarının düşük olmasına da sebebiyet vermiştir.
- 3 ay boyunca %5 konsantrasyonlu sülfat çözeltilerde bekletilen numunelerin fiziksel görünüşleri incelendiğinde $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen numunelerin yüzeylerinde Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen numunelere göre daha belirgin bozulmalar meydana gelmiştir.
- 90 gün boyunca sülfatta bekletilen numunelerin basınç dayanımlarında artışlar görülmüştür. Buna göre A serisi içerisinde en yüksek basınç dayanımına sahip olan A5 numunesinde, aynı süre zarfında standart kürde bekletilene kıyasla $MgSO_4$ çözeltisinde %5 artış oranıyla 53.5 MPa ve Na_2SO_4 çözeltisinde %10 artış oranıyla 56.5 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. B serisi içerisinde en yüksek basınç dayanımına sahip olan B5 numunesinde ise, aynı süre zarfında standart kürde bekletilene kıyasla $MgSO_4$ çözeltisinde %19 artış oranıyla 34.1 MPa ve Na_2SO_4 çözeltisinde %33 artış oranıyla 37.9 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir.
- Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen numunelerdeki basınç dayanımı artış oranı $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen numunelere göre daha fazla olmuştur. $MgSO_4$ etkisinde kalan beton numunelerde C-S-H jelinin bozulması diğer sülfat etkilerinden daha hızlı olduğu için basınç dayanımı artış oranı olumsuz anlamda etkilenmiştir.

- Ultrasonik ses geçiş hızı ve beton test çekici deneyinden elde edilen sonuçlar basınç dayanımları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Sülfatlı zeltelerde bekletilen numunelerde yüksek UPV değerlerinin, SEM görüntüleri ve XRD analizlerinden de anlaşılacağı üzere, numune içerisindeki gözeneklerin etrenjit ve alçıtaşı ile dolarak boşluk oranının azalması sonucu elde edildiği düşünülmektedir.
- Beton retiminde agrega olarak %100 GYFC ve üç kullanımının beton basınç dayanımını olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Ancak GYFC ve üç agregası ile birlikte beton üretiminde YFC'nin kullanılması betonun performansını artmıştır. Bu sonuçlar neticesinde beton üretiminde agrega olarak değerlendirilmek istenen elikhane cürufu ve granüle yüksek fırın cürufunun, doğal agrega ile sadece belli oranlarda yer değiştirilerek kullanılabileceği ve bununla birlikte YFC'nin çimentoya ikame edilerek betonun mekanik ve durabilite özelliklerinin iyileştirilebileceği düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- ACI Committe 234. (2006). *Guide for the Use of Silica Fume in Concrete* (6). American Concrete Institute. <https://www.concrete.org/committees.aspx>
- ACI Committee 233. (2000). *Slag Cement in Concrete and Mortar* (3). American Concrete Institute. <https://www.concrete.org/committees.aspx>
- Aİtcin, P.-C. (2019). The Influence of the Water/Cement Ratio on the Sustainability of Concrete. İçinde P. C. Hewlett & M. Liska (Ed.), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (Fifth Edition, ss. 807-826). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100773-0.00017-4>
- Altındağ, İ. (2019). *Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Uçucu Kül Ve Kalker Tozu Kullanımının Durabilite Özelliklerine Etkisi* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Andrade, H. D., de Carvalho, J. M. F., Costa, L. C. B., Elói, F. P. da F., e Silva, K. D. do C., & Peixoto, R. A. F. (2021). Mechanical performance and resistance to carbonation of steel slag reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 298, 123910. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123910>
- Babu, K. G., & Kumar, V. S. R. (2000). Efficiency of Ggbs in Concrete. *Cement and Concrete Research*, 30(7), 1031-1036. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00271-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00271-4)
- Baradan, B., Yazıcı, H., & Aydın, S. (Ed.). (2012). *Beton*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi.
- Baradan, B., Yazıcı, H., & Ün, H. (2013). *Beton ve betonarme yapılarda kalıcılık (durabilite)*. Türkiye Hazır Beton Birliği.
- Biröl, B. (2013). *Elektro Curuf Ergitme (ESR) yöntemiyle çelik hurdalarından kaliteli çelik üretimi ve curuf özelliklerinin modellenmesi*. [Doktora Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Bulut, Ü. (2008). *Perlitin Puzolanik Aktivitesi* [Doktora Tezi], İstanbul Teknik Üniversitesi.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128203>
- Claisse, P. A. (2016). Chapter 25—Durability of Concrete Structures. P. A. Claisse (Ed.), *Civil Engineering Materials* (ss. 259-274). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100275-9.00025-5>

- Costa, L. C. B., Nogueira, M. A., Andrade, H. D., Carvalho, J. M. F. de, Elói, F. P. da F., Brigolini, G. J., & Peixoto, R. A. F. (2022). Mechanical and durability performance of concretes produced with steel slag aggregate and mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 318, 126152. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126152>
- Coudurier, L., Hopkins, D. W., & Wilkomirsky, I. (1985). *Fundamentals of Metallurgical Processes* (2nd edition, ss. 246-300). Pergamon International Library
- ÇİMSA. (2023, Temmuz 30). *Beton Dayanıklılık Sorun ve Çözümleri: Sülfat Etkisi*. <https://cimsa.com.tr/formulhane/gri-cimento/beton-dayaniklilik-sorun-ve-cozumleri-sulfat-etkisi/>
- Das, B., Prakash, S., Reddy, P. S. R., & Misra, V. N. (2007). An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 40-57. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.008>
- Dietz, S. (2014, Temmuz 22). *Zero Waste Initiatives a Boon for the Scrap Metal Industry*. <https://www.thermofisher.com/blog/metals/zero-waste-initiatives-a-boon-for-the-scrap-metal-industry/>
- Doğan, Ü. A. (2008). *Beton Bileşim Parametrelerinin Geçirimsizlik Özellikleri Ve Gömülü Çelik Donatı Korozyonuna Etkisi* [Doktora Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Emiroğlu, M., Koçak, Y., & Subaşı, S. (2011, Mayıs 16). *Yüksek Fırın Cürufunun Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi*. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, Türkiye.
- Engin, Y. (2023, Mayıs 8). *Yüksek Fırın Cürufu & Yüksek Fırın Cürufu Çimento*. <https://www.betonvecimento.com/wp-content/uploads/2015/02/Y%C3%BCKsek-F%C4%B1r%C4%B1n-C%C3%BCrufu-El-Kitab%C4%B1.pdf>
- Erden, M. (2021). *Nano Malzemeli Farklı Dayanımlara Sahip Betonlarda Mekanik Ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi.
- Erdoğan, T. Y. (2007). *Beton*. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim.
- Erdoğan, S. T., & Erdoğan, T. Y. (2007, 12-13, Nisan). Puzolanik Mineral Katkılar Ve Tarihi Geçmişleri. 2. *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyum ve Sergisi* (ss. 263-275). Ankara, Türkiye
- FHWA. (2023, Mayıs 8). *Steel Slag—Material Description—User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction*. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/97148/059.cfm>
- Franklin, F. J., Garnham, J. E., Fletcher, D. I., Davis, C. L., & Kapoor, A. (2008). Modelling rail steel microstructure and its effect on crack initiation. *Wear*, 265(9), 1332-1341. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.03.027>
- Guo, Y., Xie, J., Zhao, J., & Zuo, K. (2019). Utilization of unprocessed steel slag as fine aggregate in normal- and high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 204, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.178>

- Gündeşli, U. (2008). *Uçucu Kül, Silis Dumanı Ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton Ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması* [Yüksek Lisans Tezi]. Çukurova Üniversitesi.
- KARDEMİR. (2023, Mayıs 10). *Kardemir Ürün Kataloğu*. <https://www.kardemir.com/dosyalar/satispazarlama/urunkatalogu/kardemir-urunler.pdf>
- Kourounis, S., Tsivilis, S., Tsakiridis, P. E., Papadimitriou, G. D., & Tsibouki, Z. (2007). Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag. *Cement and Concrete Research*, 37(6), 815-822. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.03.008>
- KÜB. (2023, Mayıs 7). *Katkılar*. <https://kub.org.tr/katkilar/>
- Lai, M. H., Chen, Z. H., Wang, Y. H., & Ho, J. C. M. (2022). Effect of fillers on the mechanical properties and durability of steel slag concrete. *Construction and Building Materials*, 335, 127495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127495>
- Maslehuddin, M., Sharif, A. M., Shameem, M., Ibrahim, M., & Barry, M. S. (2003). Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, 17(2), 105-112. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00095-8](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00095-8)
- Mehta, P. K. (1999). *Advancements in Concrete Technology*. Concrete International.
- Mo, L., Zhang, F., Deng, M., Jin, F., Al-Tabbaa, A., & Wang, A. (2017). Accelerated carbonation and performance of concrete made with steel slag as binding materials and aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 83, 138-145. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.018>
- 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.
- Ramachandran, V. S. (1996). 2—Research Techniques, Standards and Specifications. İçinde V. S. Ramachandran (Ed.), *Concrete Admixtures Handbook* (Second Edition) (ss. 67-94). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-081551373-5.50006-4>
- Reuter, M., Xiao, Y., & Boin, U. (2004). Recycling and environmental issues of metallurgical slags and salt fluxes. *VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts*, (pp. 349-356). Johannesburg, Güney Afrika.
- Rondi, L., Bregoli, G., Sorlini, S., Cominoli, L., Collivignarelli, C., & Plizzari, G. (2016). Concrete with EAF steel slag as aggregate: A comprehensive technical and environmental characterisation. *Composites Part B: Engineering*, 90, 195-202. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.12.022>
- Santillán, N., Speranza, S., Torrents, J. M., & Segura, I. (2022). Evaluation of conductive concrete made with steel slag aggregates. *Construction and Building Materials*, 360, 129515. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129515>

- Saxena, S., & Tembhurkar, A. R. (2018). Impact of use of steel slag as coarse aggregate and wastewater on fresh and hardened properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 165, 126-137. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.030>
- Shi, D., Liu, Q., Xue, X., & He, P. (2018). Study on the durability of concrete using granulated blast furnace slag as fine aggregate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 322(2), 022025. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/322/2/022025>
- Skalny, J. M., Ivan Odler, Jan P. (2001). *Sulfate Attack on Concrete*. CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9780203301623>
- Soysal, B. (2014). *Çelikhane Cürufunun Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Srinivasarao, Ch., & Vijaya Bhaskar Reddy, S. (2020). Study of standard grade concrete consisting of granulated blast furnace slag as a fine aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 27, 859-865. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.024>
- Sun, D., Wu, K., Shi, H., Miramini, S., & Zhang, L. (2019). Deformation behaviour of concrete materials under the sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 210, 232-241. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.050>
- Şimşek, O. (2012). *Beton ve beton teknolojisi* (Gözd. gçrl. 4. bsk). Seçkin Yayıncılık.
- TÇÜD. (2016). *Demir Çelik Cüruf Raporu*. Türkiye Çelik Üreticileri Derneği. https://celik.org.tr/wp-content/uploads/2016/12/4-TCUD-Curuf_Rapor.pdf
- Tokyay, M., & Erdoğan, K. (2011). *Cüruflar Ve Cüruflu Çimentolar*. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği. <https://www.ecka.com.tr/ekler/cu-ruflar-ve-cu-ruflu-c-imentolar-baski-1613722362.pdf>
- Topgül, S. S. (2016). *Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Geri Kazanılmış Agregalı Betonların Özelliklerine Etkisi* [Yüksek Lisans Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Tosun, K. (2007). *Farklı Çimento Tiplerinin Gecikmiş Etrenjit Oluşumu Üzerindeki Etkileri* [Doktora Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Ustabaş, İ. (2008). *Sülfat Etkisine Maruz Mineral Katkılı Beton Ve Harçların Performansının İncelenmesi* [Doktora Tezi]. Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- Ünal, A. (2017). *Atık'tan Ürün'e Demir Çelik Cürufu*. [Yüksek Lisans Tezi]. Marmara Üniversitesi.
- Wang, G. C. (2016a). 2—Ferrous metal production and ferrous slags. G. C. Wang (Ed.), *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction* (ss. 9-33). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100381-7.00002-1>
- Wang, G. C. (2016b). 5—Slag processing. G. C. Wang (Ed.), *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction* (ss. 87-113). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100381-7.00005-7>
- WSA (World Steel Association). (2010). *Steel Industry by-Products*. https://worldsteel.org/publications/bookshop/?filter_publication-year=2010

- Yazıcı, H. (2006). Yüksek Fırın Curufu Katkılı Harçların Sülfat Dayanıklılığının İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 51-58.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/deumffmd/issue/40869/493430>
- Yılmaz, A. D. (2003). Yeni Kuşak Hiper Akışkankanlaştırmacı Beton Katkıları. *Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, 48(426).
<https://izmir.imo.org.tr/Eklenti/1398,yeni-kusak-hiper-akiskanlastirici-beton-katkilaripdf.pdf?0>
- Yi, H., Xu, G., Cheng, H., Wang, J., Wan, Y., & Chen, H. (2012). An Overview of Utilization of Steel Slag. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 791-801.
<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.108>





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : İbrahim TORLAK

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2018-2019 bahar yarıyılında Onur Belgesi almaya hak kazandı.
- 2021-2022 yıllarında Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı tarafından İstanbul'da yapımı devam eden metro projelerinde Tümaş Müşavirlik bünyesinde kontrol mühendisi olarak çalıştı.
- 2022 yılından beri Karabük Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

ESERLER VE PROJELER:

- Demir-Çelik Fabrika Atıkları ile Üretilmiş Hibrit Lifli Geopolimer Yapı Malzemelerinin Elektromanyetik Özelliklerinin Araştırılması (Ulusal Yükseköğretim Kurumları Tarafından Destekli Bilimsel Araştırma Projesi: Araştırmacı , 2023-2025