

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

**GRANÜLE YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN
ÇİMENTONUN MEKANİK ve DURABİLİTE
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüseyin ULUGÖL

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : YAPI MALZEMESİ
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kemalettin YILMAZ

Mayıs 2015

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GRANÜLE YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN
ÇİMENTONUN MEKANİK ve DURABİLİTE
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüseyin ULUGÖL

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI MALZEMESİ

Bu tez 12 / 06 / 2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Kemalettin YILMAZ
Jüri Başkanı


Prof. Dr. Ayhan ŞENGİL
Üye


Doç. Dr. Mücteba UYSAL
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Hüseyin ULUGÖL

15.05.2015

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimime başladığım ilk günden beri ilgi ve alakasını üzerimden esirgemeyen, bilgi birikimi ve tecrübesi sayesinde kendisinden mesleğimle ve hayatla ilgili pek çok şey öğrendiğim danışman hocam Prof. Dr. Kemalettin YILMAZ'a, çalışmalarım sırasında yardımlarıyla bana destek olan Doç. Dr. Mücteba UYSAL ve Doç. Dr. Metin İPEK'e teşekkürü borç bilirim.

Çalışmalarımı yaptığım Nuh Çimento A.Ş. yetkililerine, çalışmalarım sırasında bana her türlü yardımı sunan Naci BEKAR beye ve tüm laboratuvar çalışanlarına, ayrıca malzeme temini konusunda kolaylık sağlayan Karçimsa A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Ayrıca bugünlere gelmemi sağlayan, hayatım boyunca bana her türlü maddi ve manevi desteği sağlayan annem Elifhan GÜNEŞ'e ve tüm aileme sevgi ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

BEYAN	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
ÇİMENTO.....	5
2.1. Bağlayıcı Maddeler ve Çimento	5
2.2. Çimentonun Üretimi	6
2.2.1. Üretimde kullanılan malzemeler.....	6
2.2.2. Üretim süreci	7
2.2.3. Çimento üretiminin ekonomik ve çevresel etkileri.....	8
2.3. Çimento Oksitleri ve Ana Bileşenleri.....	11
2.4. Çimento Tipleri	12
2.5. Çimento Hidratasyon Mekanizması	14
BÖLÜM 3.	
YÜKSEK FIRIN CÜRUFU	18
3.1. Yüksek Fırın Cürufunun Tanımı	18
3.2. Cürufun Oluşum Süreci.....	20
3.2.1. Havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu	21
3.2.2. Genleştirilmiş yüksek fırın cürufu	21
3.2.3. Granüle yüksek fırın cürufu.....	22
3.3. Cürufun Kimyasal Bileşimi.....	23

3.4. Cürufun Çimentoda Kullanımı ve Puzolanik Aktivite	24
3.5. Cürufllu Çimento Üretimi ve Kullanımının Avantajları	26
3.5.1. Çevresel ve ekonomik avantajlar	26
3.5.2. Teknik faydalar	26
BÖLÜM 4.	
DURABILİTE	28
4.1. Çimentodan Beklenen Performans	29
4.2. Geçirimsizliğin Sebep Olduğu Hasarlar	31
4.2.1. Donma çözünme hasarı	32
4.2.2. Donatı korozyonu	33
4.2.3. Karbonatlaşma	34
4.3. Kimyasal Kompozisyonun Sebep Olduğu Hasarlar	35
4.3.1. Alkali silika reaksiyonu	35
4.3.2. Sülfat atağı	36
BÖLÜM 5.	
YAPILAN ÇALIŞMALAR	39
5.1. Deneysel Çalışmaların Yapıldığı Nuh Çimento Tesisi	39
5.2. Kullanılacak Malzeme ve Analizleri	39
5.3. Referans ve Cürufllu Çimentoların Üretimi	40
5.4. Harç Üretimi	42
5.5. Kür ve Sülfat Ortamı	43
5.6. Deneysel Çalışmalar	44
BÖLÜM 6.	
DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMESİ	46
6.1. İncelik, Özgül Yüzey ve Özgül Ağırlık	46
6.2. Priz Süreleri ve Kıvam Suyu	49
6.3. Hacim Genleşmesi	49
6.4. Mekanik Özellikler	50
6.5. Durabilite Özellikleri	52
BÖLÜM 7.	
SONUÇ VE ÖNERİLER	55
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	60

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Al ₂ O ₃
C	: CaO
ÇC	: Çelikhane Cürufu
F	: Fe ₂ O ₃
GYFC	: Granüle Yüksek Fırın Cürufu
H	: H ₂ O
M	: MgO
N	: Na ₂ O
S	: SiO ₂
\bar{S}	: SO ₃

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Çimento üretimi akış şeması	7
Şekil 2.2. 2001 yılından 2013'e kadar çimento üretimindeki artış	9
Şekil 2.3. Almanya'da 1990-201 arasında çimento üretiminde kullanılan enerji kaynaklarının değişimi	10
Şekil 2.4. Klinker ve ana bileşenler (karma oksitler)	12
Şekil 2.5. SEM ile 10^4 kez büyütülmüş çimento hamuru, CSH jeli (tobermorit) ve sönmüş kireç ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	15
Şekil 2.6. C_3A ile alçıtaşının miktar farklılıklarına bağlı olarak ani priz ve yalancı priz olayları	16
Şekil 2.6. C_3A ile alçıtaşının miktar farklılıklarına bağlı olarak ani priz ve yalancı priz olayları	16
Şekil 2.7. Hidratasyon ısı çıkış hızı – zaman ilişkisi	17
Şekil 3.1. Dünyada yıllara göre çelik üretimi	19
Şekil 3.2. Yüksek fırın	20
Şekil 3.3. Havada soğutulmuş cüruf agregası	21
Şekil 3.4. Granülasyon yönteminde kullanılan sistem	22
Şekil 3.5. Paletleme yönteminde kullanılan sistem	23
Şekil 4.1. Çimento hamurundaki boşluklar	30
Şekil 4.2. Su/çimento oranına bağlı olarak permeabilite katsayı değişimi	30
Şekil 4.3. Çimento hamurunda zaman – permeabilite ilişkisi	31
Şekil 4.4. Donma-çözünme hasarlı yapı elemanları	32
Şekil 4.5. Zamanla korozyona uğrayan donatının taşıma kapasitesi kaybı	34
Şekil 5.1. GYFC kimyasal içeriği	39
Şekil 5.2. 4 kg. kapasiteli bilyalı klinker değirmeni	41
Şekil 5.3. Üretilen çimentolardaki oksit miktarları	42
Şekil 5.4. Harç üretiminde kullanılan cihazlar	42

Şekil 5.5. Çimento harcınının yerleştirilmesi	43
Şekil 5.6. Kür ortamı	44
Şekil 5.7. Basınç presi	45
Şekil 6.1. GYFC miktarına bağlı incelik değişimi	48
Şekil 6.2. Suda kür edilen farklı çimento gruplarına ait harçların basınç dayanımı gelişimleri	51
Şekil 6.3. Farklı günlerde çimento grupları arasındaki dayanım ilişkisi	51
Şekil 6.4. 180 gün sonunda ayrı ayrı sülfat çözeltilerinde ve suda bırakılan farklı çimento harçlarının ortalama basınç dayanımları	53
Şekil 6.5. GYFC içeriğine bağlı sülfat performansları	54

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Çimento oksit miktarları için bazı modüller	11
Tablo 2.2. Çimento ana bileşenleri	12
Tablo 2.3. TS EN 197-1’de tanımlı 27 farklı tip çimento.....	13
Tablo 2.4. Beton basınç dayanımının 1 ay sonunda hedef dayanıma göre rölatif değeri	17
Tablo 3.1. Cüruf soğutma yöntemlerinin karşılaştırılması	23
Tablo 3.2. Ülkelerin YFC kimyasal içeriklerinin portland çimentosuyla karşılaştırılması	24
Tablo 4.1. Çevresel etki sınıfları ve buna göre dizayn kriterleri	29
Tablo 4.2. Çimento türlerinin sülfata dayanıklılık seviyeleri	38
Tablo 5.1. GYFC kimyasal içeriği	39
Tablo 5.2. Çalışmada kapsamında üretilen çimentolar	41
Tablo 5.3. XRF sonuçlarına göre çimentoların kimyasal bileşimleri	41
Tablo 6.1. İncelik, özgül ağırlık ve özgül yüzey değerleri	46
Tablo 6.2. Tane dağılım analizi sonuçları	47
Tablo 6.3. Kıvam suyu ve priz süreleri	49
Tablo 6.4. Kızdırma kaybı ve sülfat içerikleri	49
Tablo 6.5. Le Chatelier sonuçları	50
Tablo 6.6. Suda kür edilen harçların ortalama basınç dayanımı değerleri	50
Tablo 6.7. Farklı günlerde referans numuneye göre bağıl basınç dayanımları	52
Tablo 6.8. Her grup için sülfat atağı sonucu oluşan basınç dayanımı kaybı	52
Tablo 6.9. Sülfata maruz kalan cürufllu harçların dayanım kaybı yüzdelerinin referans numuneye karşılaştırılması	54

ÖZET

Anahtar kelimeler: Yüksek Fırın Cürufu, Sülfat Direnci, Basınç Dayanımı

Yüksek silika içeriğine sahip ve kimyasal bileşim olarak çimentoyla benzerlik gösteren amorf haldeki granüle yüksek fırın cürufu çimentoda katkı olarak kullanıldığı zaman puzolanik etkisi dolayısıyla hem ileri zamanlarda çimento hamurunun mekanik özelliklerini iyileştirecek hem de durabilite performansına olumlu etki edecektir. Özellikle önemli durabilite sorunlarından birisi olan sülfat etkisine karşı cürufu çimentoların olumlu performans verdiği bilinmektedir.

Ayrıca cüruf ve benzeri atık malzemelerin çimento üretiminde kullanılması hem atık malzemenin depolanma gibi çevresel sorunlarını azaltmakta hem de klinker kullanımını azalttığı için çimento üretiminde CO₂ salınımının azalmasını sağlamaktadır.

Bu tez kapsamında Kardemir firmasındaki yüksek fırınlardan elde edilen cürufun cürufu çimento üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bunun için üretilen cürufu çimento harçlarının mekanik özellikleri ve durabilite performanslarıyla içyapıları incelenmiştir. Yüksek fırın cürufu öğütüldükten sonra bir adet referans ve altı adet farklı oranlarda cüruf içerecek şekilde toplam yedi farklı çimento grubu üretilmiştir. Bu çimentolar incelik, özgül yüzey gibi fiziksel özellikleri bakımından incelenip, XRF ile kimyasal bileşimleri tespit edildikten sonra 84 adet 40x40x160 mm. ölçülerinde prizmatik harç üretilmiştir. Bu harçların bir kısmı 180 gün kür edilerek farklı günlerdeki basınç dayanımları tespit edilmiş, diğer kısmıysa 28. günde %10 derişime sahip ayrı ayrı sodyum ve potasyum sülfat çözeltilerine yerleştirilerek dayanım kayıpları incelenmiştir.

Çalışma sonunda belirli bir miktara kadar yüksek fırın cürufu kullanımının çimento harcının durabilite performansına olumlu etki ettiği görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan cüruf için optimum kullanım oranı %20 olarak tespit edilmiştir.

THE EFFECTS OF GRANULATED BLAST FURNACE SLAG ON MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF CEMENT

SUMMARY

Keywords: Blast Furnace Slag, Sulphate Resistance, Compressive Strength

Granulated Blast Furnace Slag which is amorph, has high silica ratio and is similar with cement chemical composition. It can increase mechanical properties and durability performance of cement paste because of its pozzolanic effect when it is used as admixture in cement. It is known that, slag cement deliver great performance to sulphate effect which is one of the important durability issues.

Besides using slag and waste materials in cement production reduce both enviromental problems such as waste storage and clinker production that cause CO₂ emission.

In this study, usability of slag which is obtained from blast furnaces wasted by Kardemir company is investigated to product slag cement. Mechanical properties, durability performance and internal structure of slag cement mortars are analyzed. After blast furnace slag is grinded, reference and 6 slag cements which have different slag ratios are produced. Physical properties in terms of fineness, specific surface of these cements are investigated and chemical composition is determined. After that totally 84 prismatic mortars which are 40x40x160 mm. are produced. Some of these mortars are cured along 180 days and determined compressive strengths, so the rest of them are exposed %10 sodium and %10 potasium sulphate since 28th day and determined loss of strength.

It's concluded that using granulated blast furnace slag to a certain degree, can be useful for durability performance of cement mortars. It determined that optimum ratio for slag in this study is %20.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Çelik tüm dünyada 2 milyonun üzerinde insanın doğrudan çalıştığı, 4 milyon insanın da buna bağlı alanlarda dolaylı olarak çalıştığı bir endüstridir. Dünya çelik örgütünün rakamlarına göre Türkiye 2011 yılında 34,1 milyon ton olan ham çelik üretimini 2012 yılında toplam 35,9 milyon tona çıkarmış, 1547 milyon ton olan dünya üretiminde %2,3 paya sahip olarak tüm ülkeler içinde 10. sıradan 8. sıraya yükselmiştir. İlk sırada ise 2012 yılındaki 716,5 milyon ton üretimiyle %46,3 paya sahip olan Çin bulunmaktadır [1].

Çelik endüstrisinin atık malzemelerinden birisi olan yüksek fırın cüruflarının depolanmak yerine bir endüstriyel simbiyoz dahilinde farklı sektörlerde kullanımı hem depolama masraflarından ve depolamanın getirdiği çevresel sorunlardan uzak kalmayı sağlayacağı düşünülmekte hem de kullanıldığı endüstride fayda sağlaması beklenmektedir. Yavaş soğutulduktan sonra kristal yapılı hale gelen cüruf puzolanik özellik göstermediği için agrega, dolgu malzemesi veya demiryollarında balast agrega olarak kullanılabilirken hızlı soğuma yapılarak camsı yapı kazanan cürufun puzolanik ve hidrolik bağlayıcılık özellik gösterdiği bilinmektedir.

Amorf yapıya sahip granüle yüksek fırın cürufunun kullanılabilirdiği sektörlerden birisi çimentodur. Çimento üretimi sırasında yüksek miktarda enerji tüketimi olur ve atmosfere CO₂ salınımı gerçekleşir, bu hem üretim maliyetini arttıran hem de çevre kirliliğine sebep olan bir durumdur. 1 ton çimentonun üretimi sonrasında atmosfere 1 ton CO₂ salınmış olur [2].

Çimentodan beklenen performans sadece dayanımıyla değil, dayanıklılığıyla da ilgilidir. Granüle yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların belirli miktarlarda kullanımının çimento hamurunun durabilite özelliklerine olumlu etkisi olduğu bilinmektedir. Çimentonun üretiminde klinkerin öğütülme aşamasında katılacak olan

granüle yüksek fırın cürufunun hem durabilite özelliklerine katkı sağlaması hem de daha az klinker kullanımı dolayısıyla atmosfere salınan CO₂ gazının miktarını azaltması mümkündür.

Yüksek fırın cürufunun çimentoda temel olarak iki çeşit kullanımı söz konusudur. Birinci uygulamada YFC, klinker ve alçıtaşı birlikte öğütülerek cürufllu çimento üretimi yapılabilir, ikincisinde öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu portland çimentosuna sonradan katkı olarak ilave edilebilir [3].

Bu iki durum kıyaslandığı zaman cürufun ayrı öğütülüp katkı olarak kullanılması daha fazla öğütülerek yeterli inceliğe getirilebilmesini ve daha iyi performans göstermesini sağlar [3]. Bununla birlikte cürufun klinker ve alçıtaşıyla birlikte öğütülmesi ayrı ayrı öğütme işlemine göre iş kaleminin azalmasını ve üretimin daha hızlı yapılmasını sağlar.

K.M. Arslan tarafından yapılan “Sülfat Etkisine Maruz Kalmış Mineral ve Nano Katkılı Harçların Durabilitesi” adlı çalışmada bu yöntemlerden ikincisi kullanılmıştır. %20, %40 ve %60 oranlarında GYFC ilaveli harçlar ile referans harç numuneleri üretilmiş ve durabiliteye etkileri incelenmiş. XRD analizleri sonucu sülfat çözeltilisinde hasara uğrayan numunelerin büyük ölçüde Ca(OH)₂'in sülfatla reaksiyona girerek oluşturduğu alçıtaşı sebebiyle zarar gördüğü tespit edilmiş, referans numunelerden sülfatta bekletilenin basınç dayanımı suda bekletilene göre %38 düşük çıkmış. Ayrıca sülfata maruz kaldıktan sonra en yüksek dayanım değerini %40 GYFC içeriğine sahip numune vermiştir [4].

Çağlar G. “Investigation of The Properties of Portland Slag Cement Produced by Separate Grinding And Intergrinding Methods” adlı çalışmasında YFC ile klinkeri hem beraber hem de ayrı ayrı öğüterek cürufllu çimento üretmiş, bunların basınç dayanımlarını karşılaştırmıştır. 3000 cm²/gr, 3500 cm²/gr ve 4000 cm²/gr özgül yüzeye sahip numunelerde cüruf ve klinkerin birlikte öğütüldüğü harçlar daha yüksek basınç dayanımı verirken, 4500 gr/cm² değerindeki numunelerde ayrı öğütme daha iyi mekanik özellikler sağlamıştır. Ayrı ve birlikte öğütülmüş %30 GYFC katkılı çimento harcı referans numuneye göre 2. 7. ve 28. günde düşük basınç

dayanımı değerleri verirken 90. günde referans numuneden yüksek değer vermiştir. Ayrıca 4000 cm²/gr özgül yüzeye sahip, birlikte ve ayrı öğütülmüş %30 katkılı örneklerin 2, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri birbirine oldukça yakın sonuçlar vermiştir [5].

Kılınçkale F.M. yaptığı “Çeşitli Puzolanların Puzolanik Aktivitesi ve Bu Puzolanlarla Üretilen Harçların Dayanımı” adlı çalışmada portland çimentosuna %20 oranında YFC, uçucu kül, silis dumanı ve pirinç kabuğu külünü ayrı ayrı katarak farklı harç numuneleri üretmiş ve mekanik özelliklerini incelemiştir. 28. günde YFC katkılı çimento harcı referans numuneye göre %10 düşük basınç dayanımı vermiştir. Silis dumanı, pirinç kabuğu külü ve tras 28. günde referans numuneye göre yüksek basınç dayanımı verirken, YFC ve uçucu kül düşük değer vermiştir [6].

YFC ve klinkerin birlikte öğütüldüğü başka bir çalışmada Topçu İ.B. ve Karakurt C. %10, %20, %30, %40 ve %45 uçucu kül ve YFC’yi ayrı ayrı kullanarak klinkerle birlikte öğütmüş ve çimento harçları hazırlamışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda YFC’nin uçucu külden daha zor öğütüldüğünü ve bunun YFC’nin daha sert bir malzeme olmasından kaynaklanabileceğini söylemişlerdir. Priz süreleri incelendiğinde %10 YFC katkılı harçların priz başlangıç ve bitişi referans numuneden erken gerçekleşirken, artan YFC miktarlarıyla birlikte priz başlangıç ve bitiş süreleri de artarak referans numunenin daha üzerinde çıkmıştır. Eğilme dayanımları incelenince 28. günde YFC içeren tüm numuneler referansa göre düşük değer verirken, 90. günde YFC numunelerin tamamı referansı geçmiş, en büyük eğilme dayanımı değerini %30 YFC katkılı numune vermiştir. Basınç dayanımları incelenince 28 günlük %10, %20, %30 ve %40 YFC numuneleri referans numunenin üzerinde değer verirken %45 YFC referansın altında kalmıştır. 180. günde ise tüm YFC numuneleri referansın üstünde basınç dayanımı vermiş, en yüksek basınç dayanımını eğilme dayanımında olduğu gibi %30 YFC numunesi vermiştir. 180 günlük numuneler yapılan SEM analizleri sonucu YFC katkılı harç numunelerinde agrega etrafındaki Ca(OH)₂’lerin de SiO₂ ile reaksiyona girerek C-S-H jeli oluşturduğu ve daha boşluksuz bir yapı teşkil edildiği gözlenmiştir [7].

Özkan Ö. “Çelikhane ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Portland Çimentosunun Özellikleri” adlı çalışmasında ayrı ayrı GYFC, Çelikhane cürufu ve GYFC + ÇC karışıma dahil etmiş, ve diğerlerinden farklı olarak cüruflarla yer değişimi yaparken sadece klinkerle değil klinker + alçıtaşıyla yer değişimi yapmıştır. Malzemeler ayrı ayrı öğütüldükten sonra karışım oranlarında bir araya getirilip tekrar öğütülmüştür. Üretilen harçların 90. güne kadar basınç dayanımlarına bakılmış, sülfat dayanıklılığının incelenmesi için 7. günde %4 Na₂SO₄ ve %4 MgSO₄ çözeltilerine bırakılan prizma harçların 28. günde basınç dayanımına bakılarak sülfat etkisi araştırılmıştır. İncelik değerlerine bakılarak GYFC'nin ÇC'den daha sert olduğu tespit edilmiştir. GYFC miktarının artışıyla beraber klinkerle birlikte alçıtaşı da azaldığı için priz sürelerinin az miktarda artıp bazı kısımlarda azaldığı görülmüştür. 28. gün basınç dayanımlarında %10 ve %20 GYFC içeren harçların dayanımları referansa yakınken GYFC artışıyla birlikte dayanımın düştüğü gözlenmiş, 90. günde ise %10, %20, %30 ve %40 GYFC içeren harçlar referanstan az miktarda yüksek değer vermiş, daha fazla GYFC içeren numuneler yine referans numunenin altında kalmıştır. Basınç dayanımlarında genel olarak ÇC içeren numuneler düşük değer verirken en yüksek değerleri 3:2 oranında hazırlanan GYFC+ÇC karışımları vermiştir [8].

Daha önce gerçekleştirilmiş olan çalışmalar dikkate alınarak yapılan bu çalışmada, farklı ikame oranlarında kullanılan önceden öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun klinker ve alçıtaşıyla birlikte tekrar öğütülüp kullanılabilirliği araştırıldı. Böylece sert olduğu bilinen ve sadece klinkerle birlikte öğütülmesi durumunda yeterli inceliğe gelmeyeceği düşünülen yüksek fırın cürufunun iki kez öğütülerek uygun inceliğe getirilmesi amaçlandı. Çalışma kapsamında üretilen çimentoların fiziksel özellikleri ve XRF ile kimyasal bileşimleri, bu çimentolardan üretilen harçların belirli günlerdeki mekanik özellikleri ve sülfat dayanıklılıkları incelendi.

BÖLÜM 2. ÇİMENTO

2.1. Bağlayıcı Maddeler ve Çimento

Çimentolar genel tanım olarak taş, agrega gibi malzemeleri birbirine bağlayan ve sert, yekpare bir kütle meydana gelmesini sağlayan bağlayıcı maddeler olarak tanımlanır. Bazı kaynaklarda çimentolar kimyasal yapısı itibarıyla organik ve inorganik çimentolar olmak üzere ikiye ayrılırlar. Bu kaynaklara göre yol yapımında kullanılan asfalt, katran, kauçuk gibi bitümlü malzemeler organik çimentolar olarak adlandırılmaktadır [9].

Hidrokarbonlu malzemeler olan bu organik çimentolar belirli sıcaklıklarda plent adı verilen tesislerde agregayla karıştırılarak asfalt üretiminde ve yol katmanlarının üst tabakaları olan binder tabakasında ve aşınma tabakasının yapımında kullanılır. Yapılan bu kimyasal sınıflandırmaya göre inorganik çimentolarsa alçı, kireç, portland çimentosu gibi malzemelerdir.

Bazı kaynaklara ve genel kaniya göreyse portland çimentosu dışındaki bağlayıcı malzemeler “çimento dışı bağlayıcı malzemeler” olarak tanımlanmaktadır [10]. Bu kaynaklara göre ince toz halde bulunan, su eklenince plastik hale gelip şekil alabilir duruma gelen, zamanla priz alıp katlaşılarak ve sertleşerek plastiklik özelliğini kaybeden ve dayanım kazanan malzemeler bağlayıcı malzemelerdir. Bu süreçte katılma kısa sürerken dayanım kazanma çok daha uzun sürmektedir. Bu malzemelerden kireç tarihte bilinen en eski bağlayıcı malzemelerdendir.

Bağlayıcı malzemeleri hem havada hem de suda priz alabilen ve suda erimeyen hidrolik bağlayıcılar ile sadece havada priz alan ve suyla teması halinde çözünen hava bağlayıcıları olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Portland çimentosu hidrolik bağlayıcıyken yağlı kireç hava bağlayıcıya örnektir [11].

Yürürlükteki çimento standardı olan TS EN 197-1'e göre çimento su ile karıştırıldığı zaman hidrasyon reaksiyonları ve prosesler nedeniyle priz alan ve sertleşen bir hamur oluşturan ve sertleştikten sonra su altında bile dayanım ve kararlılığını koruyan, inorganik ve ince öğütülmüş bir malzemedir [12].

Başka bir genel tanıma göre çimento ana hammaddeleri kalker ve kil olan, mineral parçalarını (kum, çakıl, tuğla, briket vb.) yapıştırma suyla birlikte kullanılan bir malzemedir [13].

2.2. Çimentonun Üretimi

Çimento, üretimi için gerekli olan hammaddelerin (kalker, kil, marn) doğadaki ocaklardan alınarak fabrikaya getirilmesi ve burada gerekli kırma, öğütme, homojenize etme, pişirme gibi işlemlerle üretilen bir malzemedir. Bu üretimin enerji tüketimi, küresel ısınma, CO₂ gibi zararlı gazların atmosfere salınımı, gibi olumsuz etkileri mevcuttur.

2.2.1. Üretimde kullanılan malzemeler

Çimento, belli oranlarda kullanılan kalker (CaCO₃) ve kil (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃) malzemelerinin belirli sıcaklıklara kadar pişirilmesiyle elde edilen, gri veya beyaz renkli olan inorganik esaslı bağlayıcı malzemedir [14].

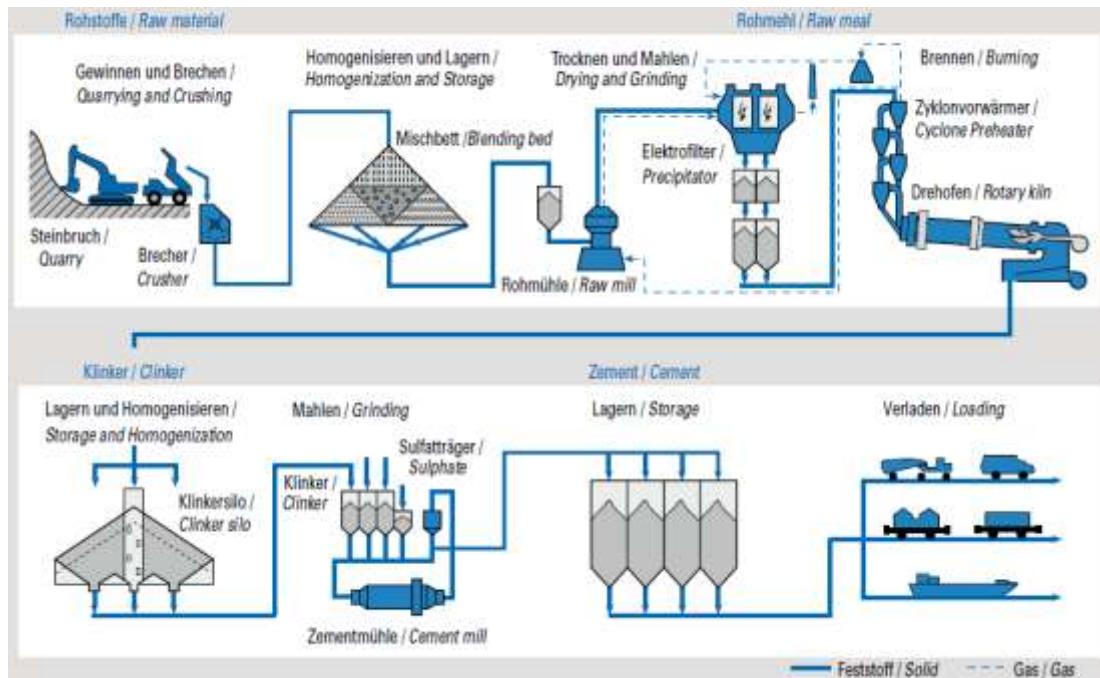
Buna göre çimento üretiminde ilk önce kalker, marn ve killi malzemeler ocaktan alınır. Bu malzemeler CaCO₃ içermekle birlikte bunun yanında bir miktar (MgCO₃) magnezyum karbonat da barındırabilir. Aynı zamanda silika, demir oksit, alümin, kükürt ve alkaliler de bulunur [3].

Klinkeri oluşturan malzemeler esasen kalsiyum oksit ve silisyum dioksittir, klinkerin pişme sıcaklığını düşürmek için de alüminyum oksit ve demir oksite ihtiyaç vardır. Aynı zamanda kalker ve kilin kullanımıyla ya da her ikisini de ihtiva eden marnın kullanımıyla bu malzemeler temin edilir. Böylece klinkerdeki kalsiyum oksit (CaO)

kalkerden; silisyum dioksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) kilden sağlanmış olur. Eğer SiO_2 ve Fe_2O_3 miktarı yeterli değilse harmana bir miktar kuvars kumu veya demir cevheri katılır. Klinker üretimi için döner fırına giren karışımdaki CaCO_3 miktarının %75-79 arasında olması uygundur [15].

2.2.2. Üretim süreci

Eskiden çimento üretiminde yaş sistem kullanılıyordu, bunun sebebi malzemenin sadece bulamaç haldeyken homojenize edilebilmesiydi. Ancak fırında ıslak durumda bulunan malzemenin mevcut suyundan arındırılabilmesi için daha fazla enerji harcanması gerekiyordu, bu hem maliyeti hem de atmosfere salınan CO_2 miktarını arttıran bir durumdu. Günümüzde malzemelerin kuru haldeyken de homojenize edilebilmesi mümkün olduğu için kuru sistem kullanılmaktadır [15].



Şekil 2.1. Çimento Üretimi Akış Şeması [16]

Kuru sistemde konkasörlerde kırılarak belli boyutlara getirilen hammaddeler homojenize edilir, daha sonra bu malzeme farin değirmenlerinde öğütülerek farin depolarına aktarılır. Farin (Fransızca un anlamına gelir) adı verilen bu malzeme son kısmındaki sıcaklığı $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ olan bir döner fırına girer ve gittikçe artan sıcaklığa maruz bırakılır. Bu fırına girmeden önce kullanılan siklonlar oluşan tozun giderilmesi ve farine ön ısıtma uygulanması için kullanılır.

Isıtılan malzemenin sıcaklığı arttıkça çimentonun oksitleri oluşmaya başlar. İlk önce çok kompleks yapıya sahip olan kil 500 – 600 °C sıcaklıklar civarında ayrışır ve SiO₂ ile Al₂O₃ oksitlerini oluşturur.

Sıcaklığı artan CaCO₃ 900°C civarında sıcaklığa geldiği zaman (2.1) ile gösterilen kalsinasyon reaksiyonu, malzeme içerisinde MgCO₃ bulunması durumundaysa 700°C sıcaklıkta (2.2) ile gösterilen reaksiyon gerçekleşir:

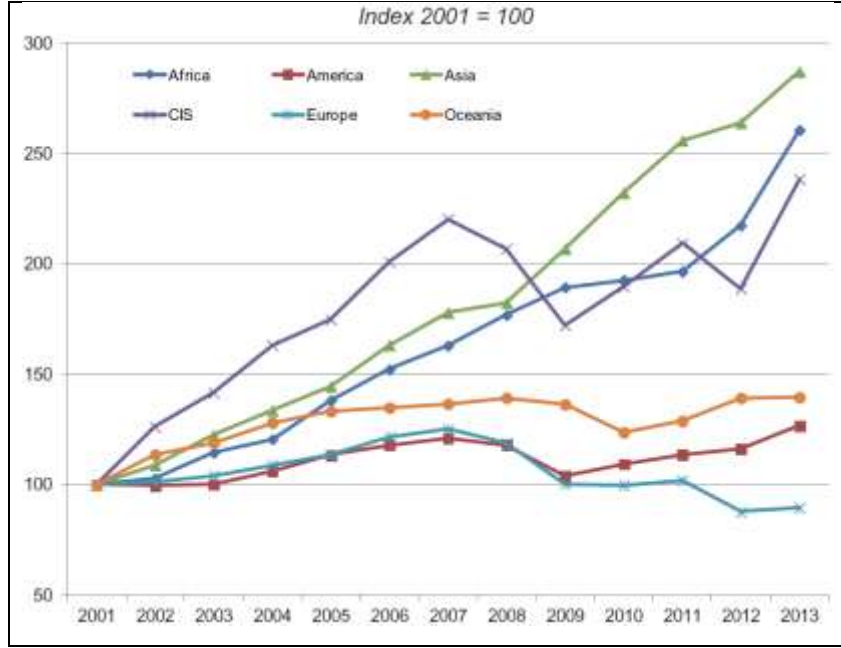


600 °C civarında oluşan SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ ile 900 °C civarında oluşan CaO oksitleri 1200 °C civarındaki sıcaklıklarda reaksiyonlara başlar, 1250 - 1300 °C sıcaklıkta sıvılaşmaya, 1400 °C civarındaysa bir araya gelerek çimentonun ana bileşenlerini oluşturmaya başlarlar. Böylece sinterlenmeyle oluşan klinker koyu renkte, sert ve 1-25 mm. civarında çapa sahip olarak meydana gelir [3].

Klinker elde edildikten sonra %3 civarında alçıtaşı ile birlikte öğütülerek CEM-I portland çimentosu elde edilir. Diğer çimento tipleri içinse klinker ve alçıtaşının öğütülmesi aşamasında mineral katkı maddeleri kullanılır ve böylece katkı çimento elde edilmiş olur.

2.2.3. Çimento üretiminin ekonomik ve çevresel etkileri

Türkiye ekonomisinde 2013 yılında %4 büyüme görülürken çimento endüstrisindeki büyüme %7,4 olmuş, 2013 yılındaki çimento üretimi 2012'ye göre %10 artarak 70,8 milyon tona ulaşmıştır. Buna göre G20 ülkeleri içerisinde Türkiye çimento üretimi bakımından 6. sırada yer almıştır [17]. Dünyada ise 2013 yılı çimento üretimi 2012 yılındaki 3,7 milyar tonluk üretime göre %9,4 artarak 4 milyar tona yükselmiştir. Şekil 2.2'de 2001 yılından 2013'e kadar çimento artışı gösterilmiştir.



Şekil 2.2. 2001 yılından 2013'e kadar çimento üretimindeki artış [17]

Çimento endüstrisinin, atmosfere salınan CO₂ gazları, enerji tüketiminin sebep olduğu küresel ısınma gibi çevresel sorunları ve bunlara karşı yerine getirmesi gereken sorumlulukları mevcuttur.

Bir çimento tesisinde CO₂ salınımına sebep olan unsurlar şunlardır [18]:

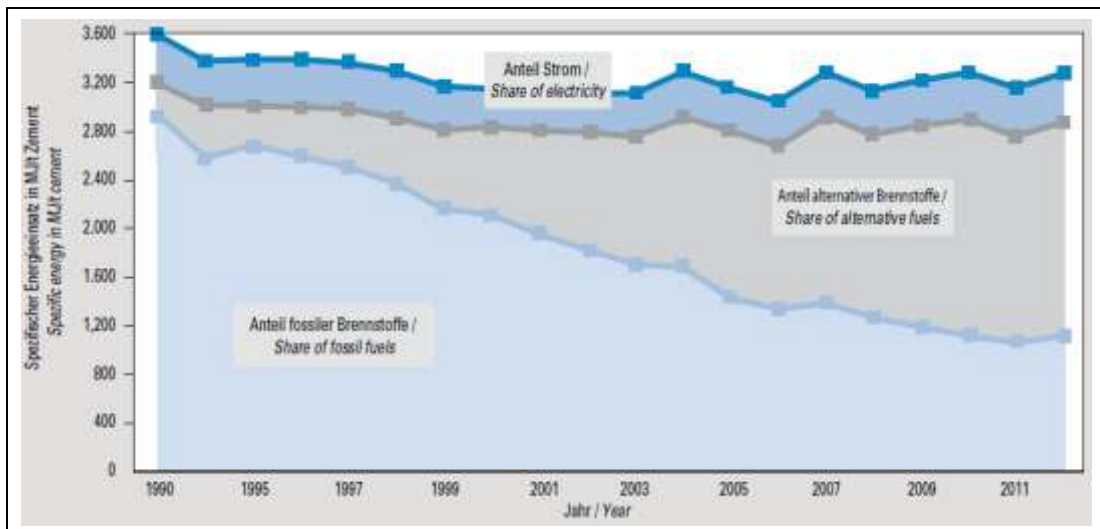
- Karbonatların (CaCO₃ ve MgCO₃) kalsinasyonu, bu işlem CaCO₃ için 900 °C civarında gerçekleşir ve CaO ile CO₂ ortaya çıkarken MgCO₃ için aynı reaksiyon 700 °C civarında meydana gelmektedir.
- Klinker üretiminde ocakta kullanılan yakıtlar. Bu yakıtlar geleneksel yakıtlar olabileceği gibi, alternatif fosil yakıtlar ya da biyoyakıtlar olabilir.
- Değirmenlerde meydana gelen tozlanmanın engellenmesi için ıslatılan malzemenin tekrardan kurutulması sırasında yapılan ısıtma işlemleri
- Tesisin genelinde harcanan enerji için kullanılan yakıtlar.

Üretim sürecinde meydana gelen CO₂ salınımının düşürülmesi, enerji verimliliği, klinker üretimi için termal verimlilik, geleneksel yakıtlarla birlikte daha az emisyonu olan fuel-oil gibi alternatif yakıtların ve biyoyakıtla ilgili çalışmalar yapılmaktadır.

Ayrıca atık ısı geri kazanım sistemleriyle kaybolan ısı enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülmekte ve atık lastik, atık yağ, atık su arıtma tesislerinin çamuru yakıt olarak kullanılmaktadır [19].

1990-2012 yılları arasında Avrupa Birliği ülkelerinde çimento üretimi %39 azalmışken üretimden kaynaklanan CO₂ emisyonu üretimle aynı ölçüde azaltılamamış ve %31,4 oranında düşürülebilmıştır [17].

Bununla birlikte Almanya'da 1990-2012 yılları arasında üretilen 1 ton çimentoya karşılık salınan CO₂ gazı %49 azaltılarak 178 kilograma düşmüştür. Bunu yaparken puzolan gibi farklı malzemeler kullanılarak klinker/çimento oranının düşürülmüş, yeni üretim tekniklerinin kullanılmış, alternatif enerji kaynakları da kullanılmaya başlanmıştır. Örneğin 2012 yılında lastik atığı, atık yağ ve atık ahşap gibi atıkların kullanılması Almanya çimento endüstrisinde klinker üretiminin yapıldığı döner fırınların enerji ihtiyacının %61'ini karşılamıştır. Şekil 2.3 Almanya'da 1990-2011 yılları arasında 1 ton çimentonun üretimi için gereken enerji sarfiyatı ve bu enerjinin sağlandığı kaynaklar gösterilmektedir. 1990'da enerjinin büyük kısmı fosil yakıtlardan sağlanıyorken 2011'de alternatif yakıtların payı artarak fosil yakıt tüketiminin azalmasını sağlamıştır [16].



Şekil 2.3. Almanya'da 1990-2011 arasında çimento üretiminde kullanılan enerji kaynaklarının değişimi [16]

Çimento tesislerinde üretim özdenetimle kontrollü olarak gerçekleştirilir ve çimento üretiminin farklı aşamalarında atmosfere salınan CO₂ miktarı farklı yöntemlerle tespit edilmektedir.

Örneğin kalsinasyon sonucunda ne kadar CO₂ gazı çıkacağı temel olarak iki yöntemle bulunur. Bunlardan ilkinde girdiler yöntemi adı verilir, tüketilen hammaddenin hacmi ve karbonat içeriği hesap için temel alınır. İkincisi çıktılar yöntemidir, üretilen klinkerin ve fırından atılan tozun hacmini ve kimyasal kompozisyonunu esas alır [18].

2.3. Çimento Oksitleri ve Ana Bileşenleri

Çimento bünyesinde bazı oksitler ihtiva eder. Bu oksitler klinker elde etmek için farinin pişirilmesi sürecinde belli sıcaklık değerlerinde ortaya çıkar, serbest hale gelir, ilerleyen sıcaklıklarda oksitler birleşerek çimentonun ana bileşenlerini oluşturur. Bu oksitlerden CaO çimento üretiminde kullanılan kalkerden gelirken, SiO₂, Al₂O₃ gibi diğer oksitler kilden gelmektedir. Oksitler belli sıcaklıklarda bir araya gelerek ana bileşenleri oluşturduğu için oksit miktarlarının belli değer aralıklarında olması tavsiye edilmektedir. Bunun için hidrolik modül, kireç doygunluk faktörü, hidrolik indeks, silika modülü, demir modülü gibi bazı nicelikler kullanılmaktadır.

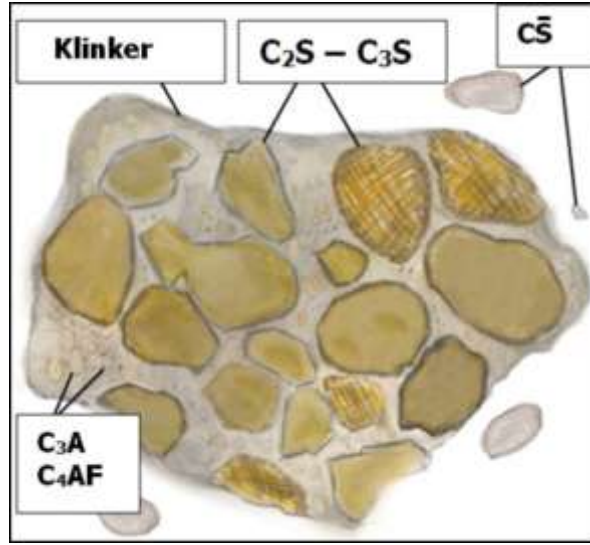
Tablo 2.1. Çimento oksit miktarları için bazı modüller

Kireç Doygunluk Faktörü	$\frac{\text{CaO}}{2,8\text{SiO}_2 + 1,18\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65\text{Fe}_2\text{O}_3}$	0,85 - 0,90
Silika Modülü	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$	2,00 - 2,50
Hidrolik Modül	$\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$	1,80 - 2,20
Alümin Modülü	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$	1,50 - 2,00

Çimentonun ana bileşenleri belli sıcaklıklarda oluşan bu oksitlerin daha da yüksek sıcaklıklarda birleşmesi sonucu oluşur. Karma oksitler diye de adlandırılan bu ana bileşenlerin en önemlileri Tablo 2.2’de görüldüğü gibidir [10].

Tablo 2.2. Çimento ana bileşenleri

	Silikatlar		Alüminatlar	
Kimyasal Bileşim	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$
Ana Bileşen	Trikalsiyum Silikat (C_3S)	Dikalsiyum Silikat (C_2S)	Trikalsiyum Alüminat (C_3A)	Tetrakalsiyum Alüminoferrit (C_4AF)
Reaksiyon Hızı	Orta	Az	Yüksek	Orta
Hidratasyon Isısı (kalori/gr)	120	62	207	100
İlk Gün Dayanımı	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Nihai Dayanım	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük



Şekil 2.4. Klinker ve ana bileşenler (karma oksitler) [20]

Bu ana bileşenlerin çimentonun mekanik özellikleri ve durabilite davranışı açısından belli miktarlarda bulunması gerekmektedir. Üretimden sonra ana bileşen miktarlarının tespiti için X ışını kırınımı (XRD), X ışını floresans (XRF) ya da bir çeşit hesap yöntemi olan Bogue formülleri kullanılır [3].

Çimento hamurunun özelliklerine her bir ana bileşenin etkisi farklı olmaktadır. Dayanım değeri açısından C_2S ve C_3S ile gösterilen kalsiyum-silikatlar önemliyken durabilite özellikleri açısından C_3A trikalsiyum alüminat önem kazanmaktadır.

2.4. Çimento Tipleri

Yürürlükteki çimento standardı olan TS 197-1'e göre 5 ana tip çimento ve 27 farklı çimento çeşidi mevcuttur. 5 ana çimento çeşidi şu şekilde isimlendirilmiştir:

- CEM I Portland Çimentosu
- CEM II Portland Kompoze Çimento
- CEM III Portland Yüksek Fırın Cürüflü Çimento
- CEM IV Puzolanik Çimento
- CEM V Kompoze Çimento

CEM I Portland çimentosu klinker ve alçıtaşından oluşan tek tip katkısız çimentodur. CEM II Portland kompoze çimento cüruf, silis dumanı, uçucu kül, pişmiş şist gibi puzolanik katkılardan sadece birini çeşitli oranlarda içeren çimentodur.

Silisli veya silis ve alüminli olup, kendi başlarına bağlayıcılığı az olan ya da hiç olmayan, ince öğütülüp sulu ortamda kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek bağlayıcılık gösteren malzemelere puzolanik malzeme denilmektedir [21].

Tablo 2.3. TS EN 197-1’de tanımlı 27 farklı tip çimento [22]

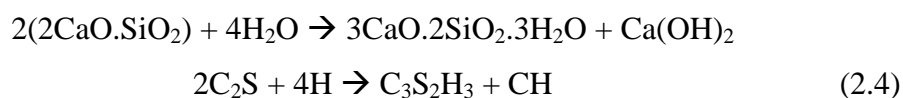
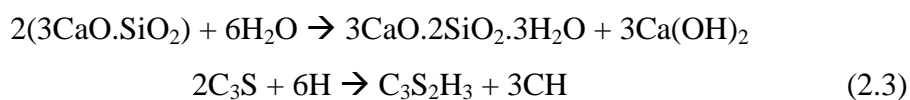
Çimento Türü	Adı	Notasyon	Ana Bileşenler (Kütlece % olarak)											
			Klinker K	Yüksek Fırın Cürufu S	Silis Dumanı D	Doğal Puzolan P	Endüstriyel Puzolan Q	Silissi Uçucu Kül V	Kalkersi Uçucu Kül W	Pişmiş Şist T	Kalker (Kireç Taşı) L	Kalker (Kireç Taşı) LL		
CEM I	Portland Çimento	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEM II	Portland Cürüflü Çimento	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Portland Silis Dumanlı Çimento	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Portland Puzolanlı Çimento	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-
	CEM II/B-P		65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-
	CEM II/A-Q		80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-
	CEM II/B-Q		65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-
	Portland Uçucu Küllü Çimento	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-
	Portland Pişmiş Şistli Çimento	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-
	Portland Kalkerli Çimento	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-
CEM II/B-LL		65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	
Portland Kompoze Çimento	CEM II/A-M	80-94	12-20											
	CEM II/B-M	65-79	21-35											
CEM III	Yüksek Fırın Cürüflü Çimento	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEM IV	Puzolanik Çimento	CEM IV/A	65-89	-	11-35							-	-	-
		CEM IV/B	45-64	-	36-55							-	-	-
CEM V	Kompoze Çimento	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30				-	-	-	-	
		CEM V/B	20-38	31-49	-	31-49				-	-	-	-	

Çimento sınıflarını bir örnek üzerinden izah edecek olursak; CEM II/A-S 42,5 R şeklinde isimlendirilmiş bir çimentodaki A harfi mineral katkı miktarını göstermektedir ve A harfi %6 ile %20 arasında (istisna olarak silis dumanında üst sınır %10 olmaktadır) katkıya işaret eder, S harfi bu katkının türünün cüruf olduğunu, R harfi erken dayanımın yüksek olduğunu ve 42,5 MPa ise bu çimentonun norm dayanımını göstermektedir.

CEM II/B-S cürufli çimentoda %21 ile %35 arasında cüruf mevcutken daha fazla cüruf ihtiva eden çimentolar için CEM III tipi çimento tanımlanmıştır. CEM IV ve CEM V ise birden fazla mineral katkıya sahip çimento tipleridir.

2.5. Çimento Hidratasyon Mekanizması

Çimento suyla birleştirildiği zaman çimento hamurunda hidratasyon adı verilen egzotermik reaksiyonlar gerçekleşmeye başlamakta ve bu reaksiyonlarla birlikte çimento hamurunda katılaşma (priz) gerçekleşip, zamanla sertleşmekte yani dayanım kazanmaktadır. Portland çimentosundaki ilk hidrolik sertleşme kalsiyum silikatların hidratasyonu ile gerçekleşir. Sırasıyla (2.3) ile trikalsiyum silikat (C_3S) ve (2.4) ile dikalsiyum silikat (C_2S) hidratasyon reaksiyonları açık olarak kimyasal ifadeleriyle ve kısaltılmış halleriyle verilmiştir [3, 10].

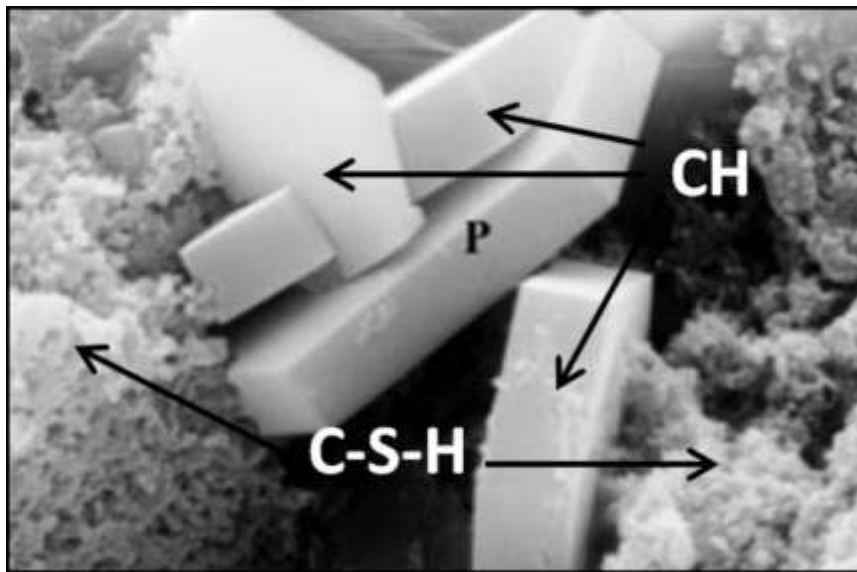


Bu reaksiyonların sonunda ortaya çıkan ürünler aynı olmakla birlikte sayıları ve reaksiyona giren su molekülü miktarı farklıdır. CH şeklinde gösterilen $Ca(OH)_2$ sönmüş kireçtir, C_3S 'in reaksiyonu ile 3 adet oluşurken C_2S reaksiyonu sonunda 1 adet oluşur. $C_3S_2H_3$ ise kısaca CSH jeli diye adlandırılan tobermorit isimli

hidratasyon ürünüdür. Çimento hamurunun dayanım kazanması doğrudan tobermoritle ilgilidir.

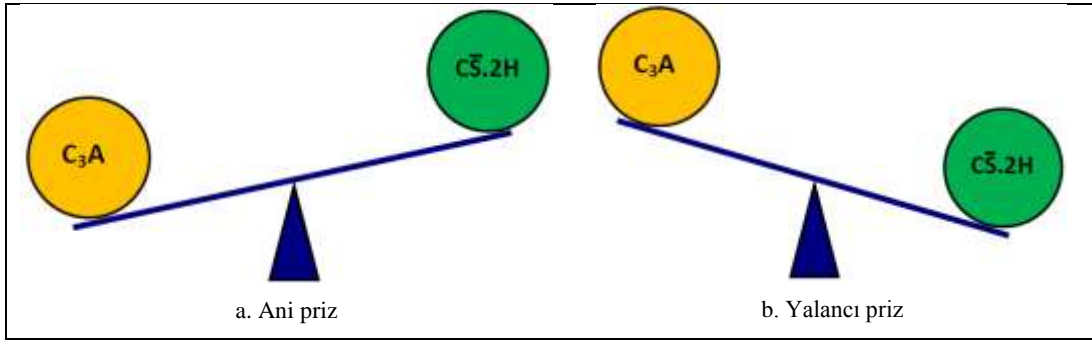
Kalsiyum silikatların hidratasyonu sonucu ortaya çıkan ürünlerinden birisi olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sülfatlı su vb. etkilere maruz kalacak ortamlarda çözünüp betonun boşluklu bir yapı kazanmasına sebep olabilir ve önlem alınmalıdır. Bunun için granüle yüksek fırın cürufu gibi puzolanik katkı malzemeleri kullanılarak bu puzolanların sönmemiş kireçle reaksiyona girmesi ve CSH jeli (tobermorit) oluşturması sağlanır. Böylece sönmemiş kirecin suyla temas ettiği zaman çözünmesi riski ortadan kaldırılmış olur. Bununla birlikte betona donatının korozyondan korunmasını sağlayan yüksek pH değerine sahip alkali ortamı kazandıran da sönmemiş kireçtir. Yine de donatı korozyonuna karşı yeterli paspayı ve geçirimsiz, yüksek dayanımlı beton gibi fiziksel korumanın daha etkili olduğu düşünülürse puzolan kullanımıyla birlikte $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in de reaksiyona sokularak CSH jeli elde edilmesi daha yüksek basınç dayanımı ve daha geçirimsiz beton elde edilmesi bakımından önemlidir [3, 23].

Bir diğer kalsiyum silikat hidratasyonu ürünü olan CSH jeli her iki kalsiyum silikatın reaksiyonundan da birer tane oluşur. Çimento hamuru dayanımını kalsiyum silikatların hidratasyonundan kazanır ve bunun büyük kısmı CSH jeli (tobermorit) oluşumuyla gerçekleşir.



Şekil 2.5. SEM ile 10^4 kez büyütülmüş çimento hamuru, CSH jeli (tobermorit) ve sönmüş kireç ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) [20]

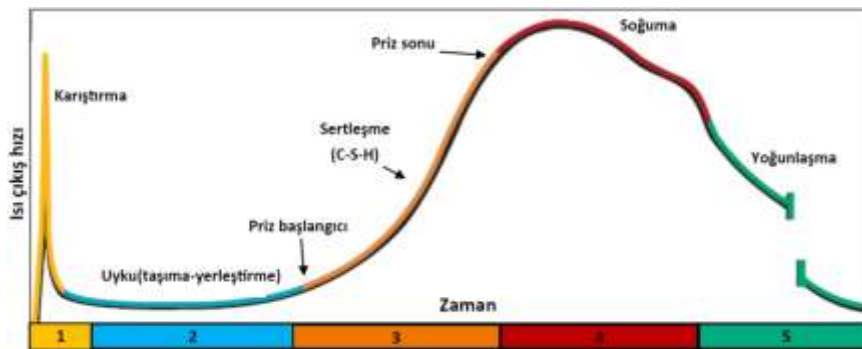
Trikalsiyum alüminat (C_3A) hidratasyonu yüksek ısı açığa çıkarır ve hızlı gerçekleşir, bunun sonucunda kalsiyum alümino hidratlar oluşur. Hızlı hidratasyon çimento hamurunda **ani priz** denilen olaya sebep olur ve ani priz olayıyla yeterli dayanım sağlanamaz. Bu istenmeyen durumu önlemek için çimento üretimi sırasında klinkerle birlikte % 3-6 civarında alçıtaşı da ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$ $C\bar{S}.2H$) öğütülmektedir. Ani prizi önleyen alçıtaşının fazla olması durumundaysa **yalancı priz** denilen olay ortaya çıkar. Yalancı priz alçıtaşının suyla reaksiyona girerek geçici olarak sertleşmesidir. Hamur karıştırılmaya devam edilirse yalancı priz ortadan kalkar. Ani priz zararlı bir olayken yalancı priz zararsızdır ve her ikisi de yanlış miktarda alçıtaşı kullanımından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.6. C_3A ile alçıtaşının miktar farklılıklarına bağlı olarak ani priz ve yalancı priz olayları [20]

C_3A 'nın alçıtaşıyla birleşmesinden oluşan **candlot tuzu** ya da diğer ismiyle **etrenjit** 31 su molekülü içerdiği için büyük hacimlidir. Bu oluşum taze betonda zararlı bir durum oluşturmaz ancak sertleşmiş betona nüfuz eden sülfatın C_3A ile tepkimesi gecikmiş etrenjit oluşumuna ve sertleşmiş betonda çatlak oluşumuna sebep olabilir.

Şekil 2.7'de hidratasyonun 5 farklı süreci görülmektedir. Karıştırma anı ısı çıkış hızının çok yükseldiği bir evre olup C_3A ile alçıtaşı miktarına bağlı olarak ani priz tehlikesinin geçerli olduğu ve yalancı prizin görülebildiği evredir. Karıştırma sırasında yeterli miktarda mevcut olan alçı suyla reaksiyona girerek alüminatların etrafında bir jel tabakası oluşturur ve bunları çok hızlı reaksiyon oluşumundan koruyarak ani prize engel olur. Uyku sürecinde reaksiyonlar çok yavaş devam eder, $Ca(OH)_2$ kristalleri meydana gelir ve çok düşük hızda ısı çıkışı olur. Betonun karıştırıldıktan sonra taşınıp sağlıklı bir şekilde kalıplara yerleştirilebilmesi için yaklaşık 2-4 saat süren bu evreye ihtiyaç duyulmaktadır [20].



Şekil 2.7. Hidratasyon ısı çıkış hızı – zaman ilişkisi [20]

Sertleşme süreciyle birlikte priz başlar ısı çıkış hızı artar ve kalsiyum silikatların hidratasyonu ile CSH jeli oluşmaya, çimento hamuru hızlı şekilde dayanım kazanmaya başlar. Bu süreçte kür işlemi yapılarak hidratasyonun sürekliliği için ihtiyaç duyulan su ve sıcaklık sağlanmalıdır. Priz sonuyla birlikte sertleşme süreci sonlanır, dayanım artışı devam eder ve soğuma başlar. Yoğunlaşma süreci beton kütle içinde hidrate olmamış çimento tanelerinin reaksiyona girebileceği su olduğu sürece devam eder. Çimento hidratasyonu bu şekilde yıllarca sürebilir [20].

Yoğunlaşma sürecinde çimento hidratasyonu devam etse bile hidratasyon ve dayanım artışının büyük kısmı ilk günlerde olur. İngiltere’de 1980 - 1990 yılları arasında üretilmiş 54 farklı beton üzerinde yapılan çalışmalara göre 1 ayda istenen dayanımına ulaşan beton numuneleri henüz 3. gününde istenen dayanımın %51’ine 14. Günde %88’ine ulaşmıştır. 5 yılın sonundaysa 1 ay sonundaki dayanımın %39 arttığı görülmüştür [10].

Tablo 2.4. Beton basınç dayanımının 1 ay sonunda hedef dayanıma göre rölatif değeri [10]

Yaş	Beton rölatif dayanım aralığı	Beton rölatif dayanım ortalaması
3 gün	0,39 – 0,63	0,51
7 gün	0,59 – 0,86	0,72
14 gün	0,77 – 1,00	0,88
1 ay	1,00	1,00
2 ay	1,01 – 1,25	1,11
1 yıl	1,11 – 1,52	1,28
5 yıl	1,12 – 1,76	1,39

Çimentonun suyla birleşmesinden bir süre sonra priz olayıyla hamurda katılma gözükürken, daha sonrasında sertleşmeyle birlikte dayanım kazanma başlar [3].

BÖLÜM 3. YÜKSEK FIRIN CÜRUFU

3.1. Yüksek Fırın Cürufunun Tanımı

Granüle yüksek fırın cürufu (letiyeye), yüksek fırında dökme demirin ekstraksiyonu sırasında yan ürün olarak ortaya çıkan cürufun hızlı şekilde soğutulmasıyla oluşan ve öğütülüp ince tanecikli hale getirilince puzolanik özellik ve hidrolik bağlayıcılık gösteren malzemedir. Tüm dünyada her yıl ortalama 100 milyon ton yüksek fırın cürufu ortaya çıkmaktadır. Ancak bunun bir kısmı bağlayıcılık özelliği gösteren granüle halde olmaktadır [24, 25].

Hızlı şekilde soğutulduğu için amorf yapıya sahip olan GYFC demir cevherlerinden gelen SiO_2 ve Al_2O_3 sayesinde, ince öğütülüp sulu ortamda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile bir araya getirildiği zaman puzolanik özellik gösterir. Yüksek fırındaki arıtma işlemine yardımcı olması için katılan kalkertaşı sayesinde CaO ihtiva ettiği için de kendi başına bir miktar bağlayıcılık özelliği bulunmaktadır [3].

Çelik doğada %4.2'lik oranla en yaygın bulunan 4. metal olan demirin karbon ve gerekli durumlarda kullanılan krom, nikel ve tungsten ile olan bir alaşımıdır. Demir 7,85 civarında özgül ağırlığa sahip, 1536 °C'de eriyen bir metaldir. Doğada en çok oksit halde Magnetit (Fe_3O_4), kükürtlü cevher olarak Pirit (FeS_2) ve karbonatlı cevher Spathik demir (FeCO_3) olarak bulunur. Türkiye'de ise en zengin demir cevheri limonittir ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) [26].

1970 yılında dünya ham çelik üretimi 595 milyon ton olmuşken sanayi ve teknolojiye gelişmelerle beraber bu değer sürekli artarak Şekil 3.1'de de görüldüğü gibi 2012 yılında 1547 milyon tona ulaşmıştır [1].



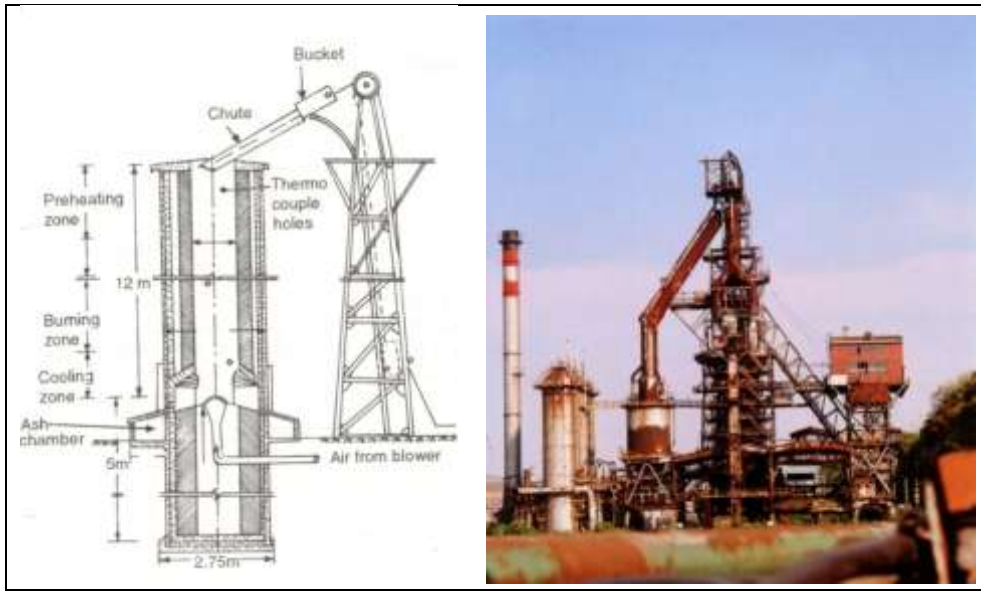
Şekil 3.1. Dünyada yıllara göre çelik üretimi [1]

Gelişen teknolojiler ve disiplinli çevresel düzenlemeler sayesinde 1970 yılında çeliğin yarısı atık halini alırken günümüzde bu oran %4'e düşmüştür. Ayrıca günümüzde çelik geri dönüşüm sayesinde hurda çelikten (üretimin %40'ı) tekrar üretilmektedir [27]. Bununla birlikte artan çelik üretimiyle birlikte kayda değer miktarda cüruf elde edilmektedir. Bu da cürufun değerlendirilmesini önemli kılmaktadır.

2009 yılı itibarıyla Türkiye'de yaklaşık 5 milyon ton cüruf atığı oluşmuştur [28]. Çevre ve Orman Bakanlığının hazırlanmış olduğu Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelikte 10 02 02 şeklinde kodlanmış olan bu atık malzeme yönetmeliğe göre tehlikesiz olarak tanımlanmaktadır [29]. Ayrıca cürufun inert bir atık oluşu depolandığı yerde suyla temas etse bile çözünüp zararlı bileşenler ortaya çıkarmayacağı bilinmektedir. Bununla birlikte hem atık bu malzemenin depolanma masraflarından kurtulmak hem de başka sektörlere fayda sağlamak açısından cürufun kullanılabilirliği pek çok endüstri dalında araştırılmıştır.

3.2. Cürufun Oluşum Süreci

Demir cevheri izabe işlemi için 1400-1600 °C'deki yüksek fırınlarda ergitilir. Bu işlem sırasında özgül ağırlığı yüksek olan dökme demir altta kalırken, daha hafif olduğu için bunun üzerinde kireç, silika ve alümin içeren cüruf oluşur [30]. Demir cevheri olarak Hematit (Fe_2O_3) veya Magnetit (Fe_3O_4) kullanılır. Bu demir cevherleri 1600°C sıcaklıklara çıkarılınca oksijen ve yabancı maddelerden arınır. Bu işleme izabe denilmektedir.



Şekil 3.2. Yüksek fırın [31]

Bu işlem sırasında kok kömürü yakıt olarak kullanılır, ayrıca arıtma işlemini kolaylaştırması için ocağın içerisine kalkertaşı ($CaCO_3$) katılır. Yüksek sıcaklıkta kömürden gelen karbon ile metal demir oksitteki oksijen birleşir ve CO ya da CO_2 ortaya çıkar. Dipte eriyik demir onun üzerinde CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , MgO, MnO, S içeren cüruf kalır [3].

Cüruf bu durumda 1500°C civarında sıcaklığa sahiptir. Eğer yavaş şekilde soğutulursa cüruf kristal yapıya sahip olur, bazalta benzer mekanik özellikler gösterir ve agrega olarak kullanılabilir. Hızlı şekilde soğutulması durumundaysa akışkanlığındaki hızlı azalma kristal oluşumun önüne geçer, bunun sonucunda camsı yani amorf yapıya sahip olan ve hidrolik özellik gösteren granüle yüksek fırın cürufu elde edilir [32].

3.2.1. Havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu

Soğutma işlemi için esas olarak 3 yöntem mevcuttur. Bunlardan ilkinde cüruf doğal ortamda mevcut hava koşulları altında yavaş şekilde soğur. Soğuma işlemi yavaş gerçekleştiği için kristal yapıda kalsiyum-silikatlar oluşur. Kristal yapılı cürufun hidrolik bağlayıcılık özelliği yoktur. Elde edilen cürufa havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu denilmektedir. Bu cüruf agrega olarak kullanılabilir ancak beton agregası olacaksa bünyesindeki kükürt hacim sabitliğinde değişiklik yapabileceğinden kontrollü kullanım sağlanmalıdır [33].

Havada soğutulmuş cüruf ayrıca yol kaplama malzemesi olarak, kagir yapı elemanlarında, makadam yüzeylerde, bitümlü yol kaplamalarında, kaymaya dirençli yüzeylerde, demiryollarında balast agrega olarak, yalıtım elemanlarında hammadde olarak, dolgu malzemesi ve şev malzemesi olarak kullanılabilir [34].



Şekil 3.3. Havada soğutulmuş cüruf agregası [34]

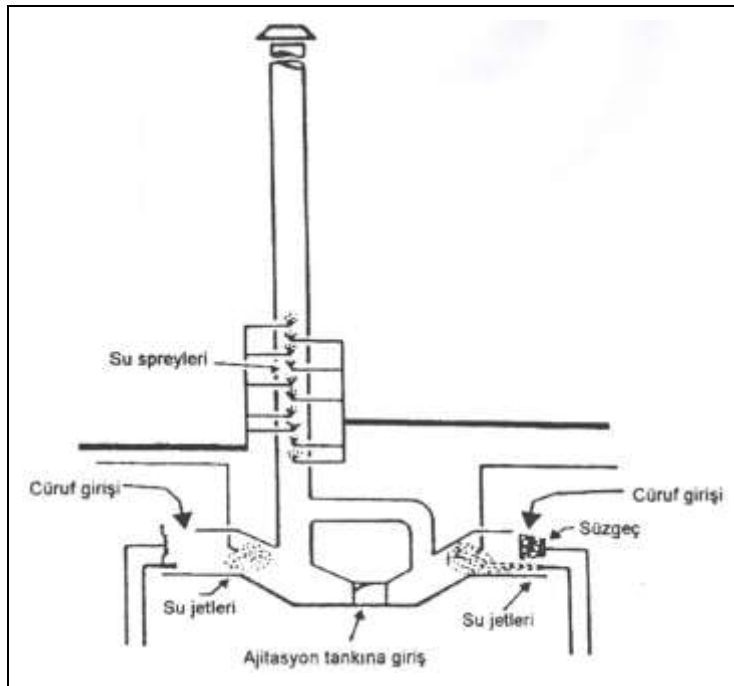
3.2.2. Genleştirilmiş yüksek fırın cürufu

Bu yöntemde su, basınçlı hava veya buhar kullanılır. Cüruf içerisine buhar hapsediği için gözenekli yapıya sahip olurlar, bundan dolayı elde edilen cürufa genleştirilmiş yüksek fırın cürufu veya köpürtülmüş yüksek fırın cürufu denilmektedir. Genleştirilmiş yüksek fırın cürufunda da kristal yapı hakimdir bunun sebebi soğumanın yeterince hızlı olmayışdır. Bu cüruf hafif beton yapımında agrega olarak kullanılabilir [33].

3.2.3. Granüle yüksek fırın cürufu

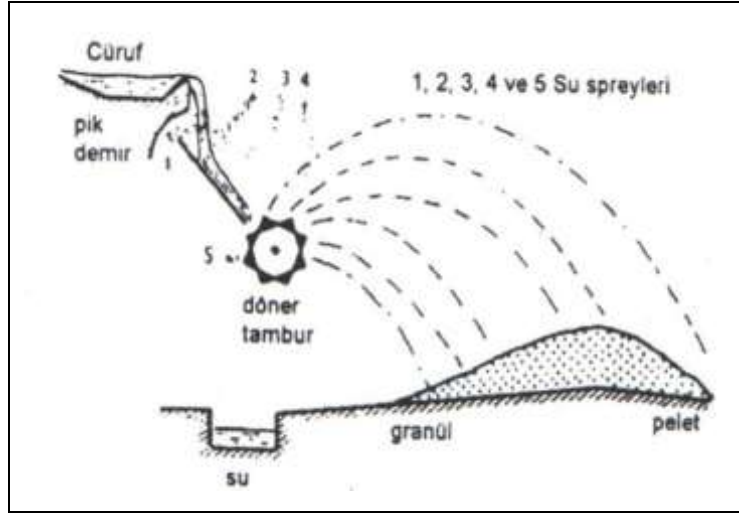
Üçüncü yöntem çabuk soğumanın sağlandığı yöntemdir ve bu şekilde granüle yüksek fırın cürufu oluşur. Çabuk soğutmada cürufun aniden suya daldırılması, hava granülasyonu ya da çok fazla miktarda suyun basınçlı olarak cürufa püskürtülmesi gibi yöntemler mevcuttur. Soğuma hızlı olduğu için viskozite değişimi de hızlı olur ve atomların kristal yapı oluşturmasına fırsat kalmadan camsı yapı oluşumu gerçekleşir. Kurutulduktan sonra öğütülüp ince hale getirilen GYFC NaOH ya da CaOH gibi aktivatörlerle bir araya getirilince veya $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile aynı ortamda bulunmaları durumunda bunlarla reaksiyona girer ve hidrolik bağlayıcılık özelliği gösterir [34].

Hızlı soğumanın sağlandığı özel bir yöntem granülasyon yöntemidir. Bu yöntemde 1 ton cüruf için 100 ton su kullanılır ve elde edilen cüruf %30 civarında su içeriğine sahip olur. GYFC'nin özellikleri bakımından paletlemeye göre daha verimli bir yöntemdir ancak kullanılan suyun çok olması ve cürufun bünyesindeki suyu uzaklaştırma işlemleri bakımından daha az tercih edilen bir yöntemdir [32].



Şekil 3.4. Granülasyon yönteminde kullanılan sistem [32]

Diğer yöntemse yarı-kuru bir işlem olan paletlemedir. Paletlemeyle soğutma yaparken 1 ton cüruf için 1 ton su kullanılır ve elde edilen soğutulmuş durumdaki cürufun su içeriği %10 civarındadır. Bu yöntemde suyla soğutulan cüruf dakikada 300 tur dönen bir tambur aracılığıyla havaya fırlatılır [32].



Şekil 3.5. Paletleme yönteminde kullanılan sistem [32]

Tablo 3.1. Cüruf soğutma yöntemlerinin karşılaştırılması

	Su İhtiyacı	Cüruf Su İçeriği	Uygulama Kolaylığı	Elde Edilen Cüruf Kalitesi
Granülasyon Yöntemi	1 ton cürufa 100 ton su	30%	Zor	Yüksek
Paletleme Yöntemi	1 ton cürufa 1 ton su	10%	Kolay	Düşük

3.3. Cürufun Kimyasal Bileşimi

ASTM C125 yüksek fırın cürufunu dökme demirle eş zamanlı olarak yüksek fırında oluşan, eriyik halde bulunan, silikat, alümin, kalsiyum ve diğer bazı bazları içeren ametalik ürün olarak tanımlamaktadır. Dökme demirin üretimi sırasında yüksek fırına demir cevheri, kalkertaşı ve yakıt olarak kok kömürü konulur ve nihai olarak eriyik demir ve cüruf olarak iki farklı ürün elde edilir. Cürufun içeriğinde ilk göze çarpan demir cevherinden gelen silika ile alümina ve kalker taşından gelen kalsiyum oksit ve magnezyum oksittir. Esasen kalker kökenli bazik bir malzemedir. SiO_2 , Al_2O_3 , CaO ve MgO temel bileşenlerdir ve cürufun yaklaşık olarak %95'ini

oluşturur. Bu bileşenler serbest halde yer almaz, melilit, mervinit, volastonit gibi silikat ve alüminosilikatların mineralleri şeklinde bulunur [34].

Tablo 3.2’de farklı ülkelerin YFC kimyasal kompozisyonları ve portland çimentosu kimyasal kompozisyonu için yaklaşık üst ve alt sınır değerleri mevcuttur. Bu tablodan görüleceği üzere YFC ile portland çimentosu arasında kimyasal olarak bir benzerlik mevcuttur.

Cürufun kimyasal yapısı puzolanik özelliklerini etkilediği için önemlidir. Genel olarak alkalitesi yüksek cürufun bağlayıcılığının da iyi olduğu bilinmektedir. Ayrıca CaO/SiO₂ oranı artışı da belli bir değere kadar puzolanik özelliği artırır. Ancak CaO oranının belli bir değer üstüne çıkması durumunda granülasyon güçleşeceği için hidrolik özellikte azalma olacaktır. Sabit CaO/SiO₂ oranında Al₂O₃’ün artması ise aktiviteyi artırır [33, 34].

Tablo 3.2. Ülkelerin YFC kimyasal içeriklerinin portland çimentosuyla karşılaştırılması [34]

Oksit Cinsi	ABD ve Kanada	Güney Afrika	Avustralya	Türkiye	Portland Çimentosu
CaO (%)	29 - 50	30 - 40	38 - 44	34 - 41	60 - 67
SiO ₂ (%)	30 - 40	30 - 36	33 - 37	34 - 36	17 - 25
Al ₂ O ₃ (%)	7 - 18	9 - 16	15 - 18	13 - 19	3 - 8
Fe ₂ O ₃ (%)	0,1 - 1,5	-	0 - 0,7	0,3 - 2,5	0,5 - 6
MgO (%)	0 - 19	8 - 21	1 - 3	3,5 - 7	0,1 - 4
MnO (%)	0,2 - 1,5	-	0,3 - 1,5	1 - 2,5	-
S (%)	0 - 2,0	1 - 1,6	0,6 - 0,8	1 - 2	-
SO ₃ (%)	-	-	-	-	1 - 3

3.4. Cürufun Çimentoda Kullanımı ve Puzolanik Aktivite

Öğütülmüş GYFC’nin temel olarak üç şekilde kullanımı söz konusudur; sulu ortamda kireçle bir araya getirilerek bağlayıcı madde olarak kullanılabilir, klinker ve alçıtaşıyla birlikte öğütülerek cürufu çimento üretiminde kullanılabilir, betona sonradan katılarak katkı malzemesi olarak kullanılabilir [25].

Katkılı portland çimentosu ASTM standardına göre %65 oranına kadar granüle yüksek fırın cürufu içerebilmektedir, bununla birlikte piyasadaki katkılı çimentolarda cüruf oranı genelde %50'yi geçmemektedir. TS EN 197-1'e göreyse CEM II Portland-Kompoze çimentoda cüruf %35'e kadar yer alabiliyorken, CEM III Yüksek Fırın Cürufllu çimentoda %95'e kadar cüruf bulunabilmektedir [12, 25].

ASTM C595 standardına göre öğütölüp sonradan katkı olarak ilave edilen cürufun aktivitesini belirlemek amacıyla iki harç hazırlanır, bunlardan ilki referans ikincisi cürufllu numunedir:

Referans Numune:

- 500 gr. portland çimentosu
- 1375 gr. standart kum

Cürufllu Numune:

- 250 gr. portland çimentosu
- 250 gr. cüruf
- 1375 gr. standart kum

Numuneler hazırlanırken su/çimento oranı 0,485 olacak şekilde 242 gr. su ilave edilir. Böylece 6 adet 5 cm. (2 inc) kenara sahip küp numune üretilir. 7. ve 28. günde kırılan numuneler karşılaştırılarak cüruf aktivitesi belirlenir. Aktivite hesaplanırken cürufllu numunenin basınç dayanımı değeri, referans numunesinin basınç dayanımına bölünür. Bu şekilde bulunan aktivitenin 28. günde minimum değeri 0,90 (%90) olmalıdır [35, 36].

Cürufllu çimento üretimindeyse ASTM C595 standardına göre aktivite indeksinin 28. günde minimum %75 olması gerekmektedir. Bunun için harçlar hazırlanırken referans ve test harçlarından 5 cm. ölçüsünde üçer küp kalıp çıkacak şekilde karışım hazırlanmalıdır. Test numunesi hazırlanırken referanstaki portland çimentosunun %35'i katkılı çimento ile yer değiştirir [37].

Referans Numune:

- 250 gr. portland çimentosu
- 687,5 gr. standart kum

Cürufllu Numune:

- 162,5 gr. portland çimentosu
- 87,5 gr. katkılı çimento
- 687,5 gr. standart kum

3.5. Cürüflu Çimento Üretimi ve Kullanımının Avantajları

3.5.1. Çevresel ve ekonomik avantajlar

İnşaat sektörü tüm dünyadaki CO₂ emisyonunda %39 oranla en çok paya sahiptir. Çimento endüstrisininse toplam emisyonda %5 payı vardır. 2012'den 2040'a kadar da bu emisyonda %1,8 oranında artış olacağı tahmin edilmektedir [38, 39, 40].

Yapılan çalışmalar göstermiştir ki %65 cüruf içeren 1 ton cürüflu çimento üretimi için harcanan enerji 1 ton portland çimentosu üretimi için harcanan enerjinin yarısı kadardır [32].

Cürüflu çimento üretiminde ilave edilen cüruf kadar klinkerin karışımdan eksilmesi ve klinker talebinin azalması, klinkerin üretimine kadar var olan süreçteki çevreye zararlı bütün olumsuzlukları azaltacaktır. Bunların başında farinin pişirildiği ve klinker elde edildiği döner fırından salınan CO₂ gazları gelmektedir. sırasında gerçekleşen CO₂ salınımını hem kömür vb. kaynakların tüketilmesini azaltacaktır.

3.5.2. Teknik faydalar

GYFC çimento hamurunun işlenebilirliğini artırır. Aynı çökme değerini verecek şekilde üretilen betonlardan cüruf içeren beton numunelerinin daha az su kullanılarak üretilbildiği görülmektedir. Bunun sebebi cüruf tanelerinin daha pürüzsüz olması ve cürufun geç reaksiyona girmesidir. Su miktarının azaltılması sayesinde dayanım artışı sağlanır ve su kaybına bağlı büzülme yaşanması riskini azaltır [3, 41].

GYFC priz süresini uzatır, bu durum sıcak hava koşullarında bir avantajken soğuk havada dezavantaj olmaktadır. Betondaki terlemeyi azaltarak plastik büzülme ve plastik oturma çatlaklarının önüne geçilmesini sağlamaktadır. Prizi yavaşlattığı için hidratasyon ısı da azalır, böylece kütle betonlarının daha kolay şekilde dökülebilmelerini sağlar [3].

Çimento hamurunun daha boşluksuz olmasını sağlayan GYFC böylece su geçirimsizliğini de azaltır. Geçirimsizliği azalmış olan hamurun, suyu ve suyla birlikte sülfat vb. zararlı kimyasalları bünyesine alması durumunda donma-çözünme, sülfat etkisi, gecikmiş etrenjit oluşumu, asit saldırısı, alkali-silika reaksiyonu gibi pek çok olumsuz durumdan korunması sağlanmış olur. Ayrıca GYFC, hidrasyon ürünü olan ve sülfat etkisinde etrenjit oluşturması muhtemel Ca(OH)_2 'i bağladığı için hem etrenjit sülfat hasarı riskini azaltır hem de bu reaksiyondan C-S-H jeli oluştuğu için hem boşluklar azaltılmış hem de dayanım artışına katkı sağlamış olur [3].

BÖLÜM 4. DURABİLİTE

Bir yapıdan ya da onu oluşturan yapı elemanları ve yapı malzemesinden beklenen tek şey yeterli taşıma kapasitesi ve dayanım değildir. Bunun yanı sıra zamanın yıpratıcı etkilerine karşı da kararlı durması, yapının servis ömrü boyunca kendisinden beklenen yeterli performansı sağlaması gerekmektedir.

Yapı malzemelerinin ve yapıların görevlerini ömürleri boyunca bozulmadan, ilk gün olduğu gibi yerine getirebilmesine dayanıklılık ya da kalıcılık, diğer bir ismiyle durabilite denilmektedir [23].

Bir yapıdaki durabilite o yapıda tercih edilen malzeme cinsine göre ayrı ayrı incelenmelidir. Betonarme yapılar için düşünecek olursak betonun buna bağlı olarak da betonda kullanılan çimentonun durabilite özellikleri önem kazanır. Beton için içerisinde bulunduğu ortamın sıcaklığı ve iklim koşulları, ortamın ve betonun kendi kimyasal durumu, maruz kalabileceği tekrarlı etkiler, durabiliteye göre tasarım yapabilmek ve zaman içerisinde bozulmaya karşı koyabilmek için dikkate alınması gereken parametrelerdir.

Bu bozulma süreçlerinde etkili olan en önemli unsur su ve rutubettir. Su beton bünyesine kimyasal maddeler taşınması istenmeyen reaksiyonların gerçekleşmesine sebep olabileceği gibi tek başına betona girmesi de donma-çözünme gibi olaylarla betonun çatlamasına yol açabilmektedir [23].

Betonun yeterli durabilite özellikleri göstermesi için bulunduğu ortama ve etkisinde kalacağı fiziksel olaylara göre çevresel etki sınıfının belirlenmesi ve buna göre dizayn edilmesi gerekmektedir. Belirlenen çevresel etki sınıfına göre yeterli çimento dozajı, uygun su/çimento oranı ve beton sınıfı belirlenir.

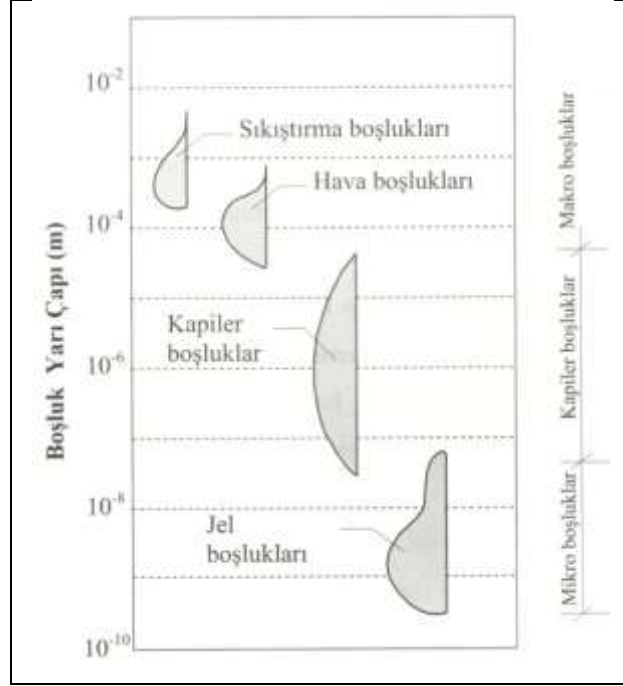
Tablo 4.1. Çevresel etki sınıfları ve buna göre dizayn kriterleri [42]

	Etki sınıfları																				
	Korzyon veya zararlı etki tehlikesi yok	Karbonatlaşma nedeniyle				Klorürün sebep olduğu korzyon									Donma/çözülme etkisi				Zararlı kimyasal ortam		
		Korzyon veya zararlı etki tehlikesi yok	Karbonatlaşma nedeniyle				Deniz suyu			Deniz suyu harcında			Donma/çözülme etkisi				Zararlı kimyasal ortam				
X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3				
En büyük su/çimento oranı	-	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,55	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45			
En küçük dayanım sınıfı	C12/25	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45			
En az çimento içeriği (kg/m ³)	-	260	280	280	300	300	320	340	300	300	320	300	300	320	340	300	320	360			
En az hava içeriği (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,0*	4,0*	4,0*	-	-			
Diğer şartlar											prEN 12620 - 2000'e uygun donma/çözülme dayanıklılığına sahip agrega				Sülfata dayanıklı çimento ¹⁾						
<p>a Hava süzülmemiş betonda, beton performansı ilgili etki sınıfı için donma/çözülme etkisine dayanıklılığı kanıtlanmış betonla mukayese edilerek uygun deney metoduna göre belirlenmelidir.</p> <p>b XA2 ve XA3 etki sınıfında basınç etkisinin SO₄²⁻ den kaynaklanması halinde sülfata dayanıklı çimento kullanılması zorunludur. Sülfata dayanıklılık bakımından çimento sınıflandırılması halinde orta ve yüksek dayanıklı olarak sınıflandırılan çimento X A2 etki sınıfında uygulanabiliyorsa X A1 etki sınıfında ve yüksek dayanıklı çimento ise XA3 etki sınıfında kullanılmalıdır.</p>																					

4.1. Çimentodan Beklenen Performans

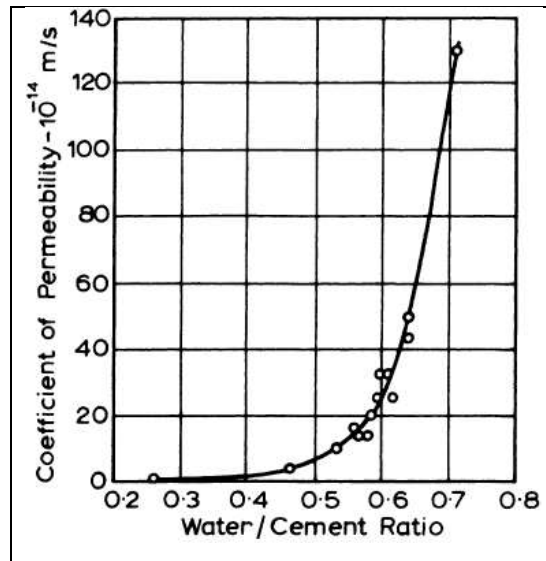
Betondan yeterli durabilite performansının alınabilmesi için çevresel etki sınıflarının göz önüne alınması gerekirken betonu oluşturan fazlardan biri olan çimento hamurunun da kendi başına belirli bir performans göstermesi gerekmektedir. Betonun geçirimsizliği büyük oranda çimento hamurunun geçirimsizliğine bağlıdır. Çimento hamurunun geçirimsizliği oksijen ve suyun nüfuz etmesine engel olarak donatı korozyonunu önlerken, CO₂ geçirimsizliği sayesinde karbonatlaşmayı ve bu şekilde pH değerini koruyarak donatı korozyonunu önler, ayrıca asitlerin beton bünyesine girmesine engel olarak hacim artışıyla sonuçlanan çeşitli asit reaksiyonlarından da korunma sağlar.

Betondaki ve çimento hamurundaki boşluklar geçirimsizliğe sebep olurlar. Bu boşluklar makro, kapiler (kılcal) ve mikro boşluklar olarak sınıflandırılabilir. Bu boşluklardan kılcal (kapiler) ve makro olanları durabiliteye önemli etki yapar. Mikro boşluklar daha çok jel boşluklarıdır. Çimento hamurundaki en küçük boşluklar jel boşluklarıdır, geçirimsizliği 7×10^{-16} m/s civarında olan bu boşlukların jel hacmi içerisinde %28 gibi büyük bir orana sahip olmasına karşın çok küçük oluşları, beton bünyesine giren suyun daha büyük olan boşluklara ilerlemesine yol açar. Bunun sonucu olarak çimento hamurunun geçirimsizliği jel geçirimsizliğinden 20 ile 100 kat arasında daha fazladır ve bu geçirimsizliğe en büyük etki kılcal boşluklardan olur [23].



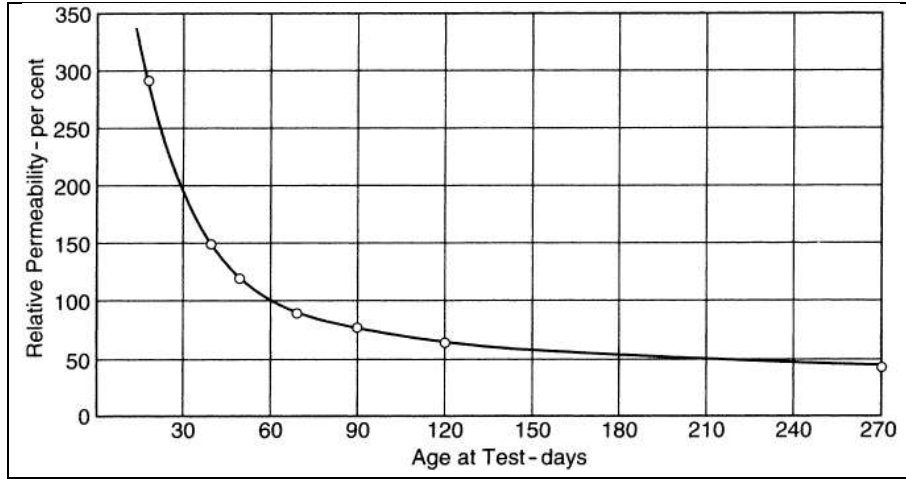
Şekil 4.1. Çimento hamurundaki boşluklar [23]

Jel boşlukları çimento hidratasyonu sırasında gerçekleşen ve hamura dayanım kazandıran C-S-H jellerinin oluşumuyla alakalı ve geçirimsizlik için çok da etkili değilken kapiler boşluklar su/çimento oranıyla yakından alakalıdır ve bundan dolayı su/çimento oranı geçirimsizliği ve basınç dayanımı değerini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Şekil 4.2 su/çimento oranına bağlı olarak permeabilite katsayısının değişimini göstermektedir.



Şekil 4.2. Su/çimento oranına bağlı olarak permeabilite katsayısı değişimi [43]

Çimento hamurunun geçirirliği zamana da bağlıdır, çimentonun suyla karılmaya başladığı ancak itibaren hidrasyon ilerledikçe jel oluşumu artar, ve boşlukları dolduran jeller sayesinde geçirirlilik azalır [23].



Şekil 4.3. Çimento hamurunda zaman – permeabilite ilişkisi [43]

Çimento hamurunun permeabilitesini azaltan unsurlar genel olarak dayanımı yükseltmek için gereken unsurlardır. Çimento dozajının artırılması, su/çimento oranının düşürülmesi, yeterli kür uygulanması gibi dayanımı arttırmaya yönelik önlemler permeabiliteyi de azaltmaktadır.

4.2. Geçirirliđin Sebep Olduğu Hasarlar

Permeabilitesi ve geçirirliği yüksek olan bir çimento hamuru ve buna bağlı olarak fazla geçirirli olan betonun bünyesine su, kimyasal maddeler ve karbondioksit vb. gazların girişi kolay olacaktır. Bu durumun beton bünyesi üstünde direkt ve dolaylı olumsuz etkileri vardır. Direkt olanlar bünyeye giren suyun donma-çözünmesi, donatı korozyonu, karbonatlaşma gibi etkilerken, dolaylı etkiler bu olayların daha sonra sebep olacağı başka hasarlardır. Örneğin donatıda meydana gelen korozyon beton örtü tabakasında kapak atmaya sebep olacak ve artan geçirimsizlikle beraber sülfat vb. kimyasalların beton içerisine nüfuz edip ileride sülfat etkisi gibi hasarlara yol açmasına sebep olacaktır.

4.2.1. Donma çözünme hasarı

Su, 4 °C sıcaklığa kadar soğudukça büzüşür, 4 °C altına düştüğü zamansa diğer pek çok sıvıdan farklı olarak tekrardan genişlemeye başlar ve sıcaklığı düştükçe genişlemeye devam eder. Donduğu anda da devam eden bu genişleme dolayısıyla donan suyun hacmi %9 kadar artar [44].

Soğuk havalarda geçirimsizlik sorunu olan betonun bünyesine giren su beton içerisinde donduğu zaman hacim artışı yaşar, bu sırada artan hacmin ilerleyebileceği başka boşluklar yoksa betonun çekme gerilmesinin aşılması halinde beton çatlayabilir. Bu olayın tekrarlı şekilde gerçekleşmesi halindeyse beton ve çimento hamuru her seferinde daha geçirimli hale gelir. Şekil 4.4'te bu etkiyle sebebiyle zarar görmüş elemanlar görülmektedir.

Bununla birlikte çimento hamurunun fazla geçirimli ve boşluklu olması donma çözünme olayları sırasında donarak hacmi artan suya bir rezerv boşluk sağladığından bu olaydan daha az etkilenmelerine de sebep olabilmektedir.



Şekil 4.4. Donma-çözünme hasarlı yapı elemanları[23]

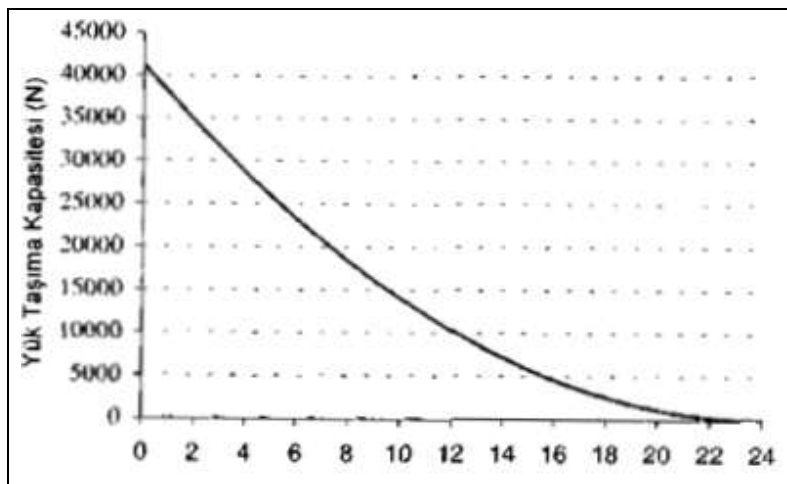
4.2.2. Donatı korozyonu

Betonda geçirimsizliğin sebep olabileceği bir sorun oksijen ve suyun donatıya ulaşmasıyla birlikte gerçekleşecek olan korozyondur. Korozyon, normal şartlarda uyum içerisinde çalışan betonla donatının birlikte çalışmasını azaltan ve yapıya ciddi anlamda hasar veren bir kimyasal süreçtir. Korozyona uğrayan tabakayla birlikte donatının çapı ve en kesit alanı buna bağlı olarak betonarme elemanın taşıma gücü azalır. Korozyon reaksiyonu hacim artışıyla birlikte gerçekleştiği için paspayında kapak atma görülebilir. Ayrıca korozif tabaka donatının betonla olan aderansında azalmaya sebep olmaktadır.

Korozyonla alakalı İstanbul'un 6 farklı ilçesinde yapılan bir çalışmada 100 adet bina incelenmiş, 100 binanın 49'unda korozyon hasarı tespit edilmiş, bazı binalardaki korozyon hasarlarının taşıma gücü kaybına neden olacak kadar ciddi boyutlarda olduğu gözlenmiştir. Yapılan bu incelemelerde korozyona sebep olan unsurlar şu şekilde tespit edilmiştir [45]:

- Pas payı yetersizliği
- Betonun kalitesiz ve tuz içeren deniz kumundan imal edilmiş olması
- Kötü granülasyon
- Yetersiz vibrasyon
- Yetersiz drenaj

Korozif bozulmanın gerçekleştiği donatının zamanla en kesiti azalacak buna bağlı taşıma gücünde de azalma olacaktır. Şekil 4.5'te alkalinitesi bozulan ve buna bağlı olarak 4-10 arasında pH değerine sahip bir betondaki donatının kesit kaybının da 0,25 mm/yıl olduğu düşünülürse, zaman içerisindeki yük taşıma kapasitesi değişimi görülmektedir.

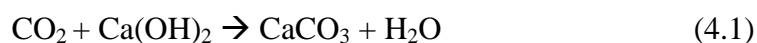


Şekil 4.5. Zamanla korozyona uğrayan donatının taşıma kapasitesi kaybı [45]

Aderans dayanımı da korozyon dolayısıyla düşmektedir. Yapılan bir çalışmada korozyona maruz bırakıldıktan 2 gün sonra aderans dayanımının bir miktar arttığı ancak ilerleyen zamanlarda korozyona maruz kalan donatıların aderans dayanımlarında ciddi düşüşler olduğu gözlenmiştir [46].

4.2.3. Karbonatlaşma

Betonda donatının korozyondan korunmasını sağlayan unsurlardan birisi betonun yüksek pH değeri sayesinde mevcut alkali ortamın sağladığı kimyasal korumadır. Bu alkali ortam hidrasyon ürünü olan Ca(OH)_2 sayesinde mevcuttur. Beton bünyesine nüfuz eden karbondioksit kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek kalsiyum karbonat oluşturur ve bunun sonucunda pH değeri düşer, alkali ortam bozulur. 4.1 reaksiyonunda gösterilen karbonatlaşma adı verilen bu olay dolayısıyla donatı korozyonuna karşı kimyasal koruma ortadan kalkmış olur.



Karbonatlaşma olayında CO_2 gazının difüzyonu söz konusu olduğu için çimento hamuru ve betonu geçirimsiz hale getirmeye yönelik her türlü tedbir bu reaksiyonun da önlenmesini sağlayacaktır. Düşük su/çimento oranı tercih etmek, puzolan kullanımı, yüksek çimento dozajı ve yeterli kür gibi uygulamalar geçirimsiz çimento hamuru için sağlanmalıdır [23].

Özellikle CO₂ yoğunluğu yüksek olan sanayi bölgelerindeki yapılarda görülme ihtimali yüksek olan karbonatlaşma olayı için bu yapılarda donatı korozyonunun da görülme ihtimali fazladır. Karbonatlaşmaya önlem olarak betonda geçirimsizlik sağlanmalı ve yeterli paspayı bırakılmalıdır.

4.3. Kimyasal Kompozisyonun Sebep Olduğu Hasarlar

Sülfat etkisi, alkali-silika reaksiyonu, gecikmiş etrenjit oluşumu gibi hasarların sebeplerinden birisi geçirimsizlik gibi görünse de bu olaylarda esas tetikleyici unsur, çimento hamurunun kimyasal özellikleridir.

4.3.1. Alkali silika reaksiyonu

Çimentodan kaynaklanan alkaliler ile agregada yer alan reaktif silis ve suyun varlığında iki aşamalı olarak gerçekleşen, hacim artışına ve yüzeyde harita çatlakları şeklinde bozulmalara sebep olan bir olaydır. Bu reaksiyon için çimento alkali içeriği, agregadaki reaktif silis ve nem şarttır. Bununla birlikte ortamın yüksek pH değerine de sahip olması gerekir. Çünkü agregadaki reaktif silika alkalitesi yüksek ortamda çözünebilir [23].

ASR olayının önüne geçmek için agrega analiz edilmeli, zorda kalınmadığı sürece reaktif mineralleri ihtiva eden agregalar kullanılmamalıdır. GYFC gibi puzolanik malzemelerin katkı olarak kullanımı ya da doğrudan puzolanlı çimento kullanımı çimento hamurunun ve betonun olabildiğince geçirimsiz olmasını sağlayacağı ayrıca Ca(OH)₂ ile reaksiyona girip CSH jeli oluşturacakları ve böylece ortam pH değerini düşürecekleri için tercih edilebilir [23].

4.3.2. Sülfat atağı

Çimento hamuru içerisindeki C_3A veya $Ca(OH)_2$ hamur içerisine giren sülfatlarla tepkimeye girerse hacim artışıyla birlikte çatlak vb. hasara yol açan sülfat atağı gerçekleşir. Sülfat atağının oluşumu için ortamda sülfatla birlikte suyun da bulunması gerekir.

Sülfat atağında en çok sodyum, potasyum, kalsiyum ve magnezyum sülfatlarının etkisi görülür. Kalsiyum sülfat ve sodyum sülfat saldırısı hamuru yumuşak hale getirip zarar verirken en yüksek zararı veren ve suda yüksek çözünürlüğe sahip olan magnezyum sülfat ise hamuru parçalayacaktır [47].

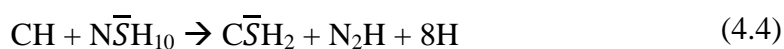
Magnezyum sülfatın sodyum sülfat ve diğerlerinden bu şekilde daha zararlı sonuçlar doğurmasının sebebiyse temel dayanım kaynağı olan C-S-H jeliyle de reaksiyona girebilmesi ve çözünmesine neden olmasıdır. Çimento hamurunun bağlayıcılık ve dayanımının büyük kısmını sağlayan C-S-H jellerinin parçalanmasıyla sonuçlanan reaksiyonlar (4.2)'de gösterildiği gibidir [3] .



Hidrate durumdaki C_3A sodyum sülfatla (4.3)'deki reaksiyonu yapabilir. Burada $C_3A.C_3\bar{S}H_{31}$ ile verilen kimyasal bileşik hacim artışıyla ortaya çıkan etrenjittir. Çok miktara su alarak oluştuğu için hacim artışı görülür [23].



Kalsiyum hidroksitin reaksiyonu sonucu (4.4)'de görüldüğü gibi alçıtaşı oluşur ve %124 hacim artışına sebep olur [23].



Sülfat atağının şiddetini etkileyen unsurlar şunlardır:

- Sülfatın cinsi vereceği hasarda etkilidir, çimento hamuruna en çok hasarı magnezyum sülfat verir.
- Çimento hamurundaki mevcut trikalsiyum alüminat (C_3A) miktarı arttıkça sülfat atağı reaksiyonları ve hasarı da artar.
- Çimento hamurunun geçirimsizliği artınca sülfatların çimento hamuru bünyesine nüfuz etmesi kolaylaşır.
- Reaksiyonda su gerekli olduğu için içinde bulunan ortamdaki su miktarı arttıkça da sülfat atağı kolaylaşır.

Trikalsiyum alüminatın reaksiyonu sonucunda etrenjit (candlot tuzu), $Ca(OH)_2$ ile sülfatın reaksiyonuyla alçıtaşı ($C\bar{S}2H$) oluşur. Alçıtaşı oluşumuyla hacimde %124 artış olurken etrenjit oluşumuyla %227 hacim artışı gerçekleşir ve sertleşmiş çimento hamurunda çatlak oluşumu sebep olur.

Sülfat etkilerine karşı sülfata dayanıklı çimento ve süper sülfat çimentoları üretilmektedir. Sülfata dayanıklı çimento C_3A içeriği %5'in altında olan çimentolardır. Bu sayede sülfatlı bileşenlerin C_3A ile etrenjit oluşturma ihtimali azaltılmış olur. Bununla birlikte sülfat sebebiyle deniz ortamında etrenjit oluşsa bile hacim artışına yol açmadığı tespit edilmiş ve C_3A 'nın klor iyonlarını bağlayarak Friedel tuzu oluşumu sağladığı, bu sayede donatı korozyonu riskini azalttığı bilindiği için deniz ortamında C_3A 'nın çok düşürülmemesi gerekmektedir [23, 48].

Özellikle deniz yapıları, kanalizasyon gibi yapılarda kullanılabilecek süper sülfat çimentosu ise %20 civarında anhidrit ($CaSO_4$) ve %80 civarında granüle yüksek fırın cürufu içeren çimentolar olup, $4000-5000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ gibi özgül yüzey değerine sahip çimentolardır. [43, 48].

Tablo 4.2.'de çimento türlerinin sülfat dayanıklılıkları gösterilmiştir. Buna göre süper sülfat çimentoları ile alüminli çimentolar en yüksek sülfat direncine sahiptir. Alüminli çimentolar kireçtaşı ve alümin kaynağı olarak boksitten üretilen, yüksek miktarda alümin ve kireçten, geri kalan kısmıysa bir miktar demirli ve az miktar

silikatlı bileşiklerden meydana gelen çimentodur. Bu çimentolar hızlı priz alıp genişleme yapmayan, deniz ortamına, yüksek sıcaklığa ve donmaya dayanıklı çimentolardır. Silikatlı karma oksitlerden sadece az miktarda C_2S içerdiği ve bunun hidrasyonundan $Ca(OH)_2$ oluşmadığı için sülfat direncine sahiptir [43, 49].

Tablo 4.2. Çimento türlerinin sülfata dayanıklılık seviyeleri [47]

Çimento Türü	Sülfata Dayanıklılık
Portland Çimentosu	Düşük
Erken dayanımı yüksek çimento	Düşük
Özel çimentolar (Hidrofob çimento, renkli çimentolar vb.)	Düşük
Erken dayanımı ve hidrasyon ısı düşük çimento	Orta
Yüksek fırın cürufu çimentosu	Orta
Puzolanik çimento	Yüksek
Sülfata dayanıklı çimento	Yüksek
Alüminli Çimento	Çok yüksek
Süper sülfat çimentosu	Çok yüksek

BÖLÜM 5. YAPILAN ÇALIŞMALAR

5.1. Deneysel Çalışmaların Yapıldığı Nuh Çimento Tesisi

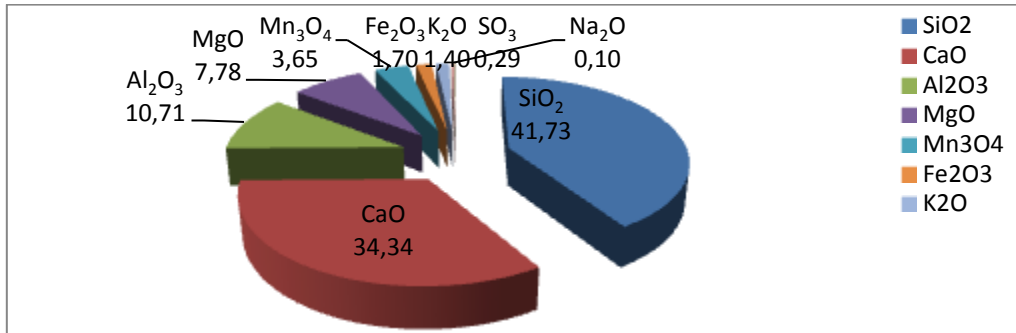
Yapılmış olan bu çalışmada çimentonun üretimi ve deneysel çalışmaların yapılmasıyla alakalı olarak Nuh Çimento Sanayi A.Ş.'ye ait olan Hereke çimento fabrikasından ve laboratuvarlarından faydalanılmıştır. 1966'da kurulmuş olan şirket en yüksek kapasitelisi 1500 ton/dk olan 3 kırıcı, en büyüğü 480 ton/dk olan 3 farin değirmeni bulunmaktadır. Ayrıca 3 farklı döner fırına sahip olup bu fırınlardan en büyüğünün 5,5 m çapı 60 m boyu bulunmaktadır ve 6000 t/d kapasitelidir.

5.2. Kullanılacak Malzeme ve Analizleri

Bu çalışmada kullanılan granüle yüksek fırın cürufu Akçansa A.Ş. ile Kardemir A.Ş. ortak iştiraki olan Karçimsa tesislerinden temin edilmiştir. Kullanılan yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi Nuh Çimento Çimento Laboratuvarındaki firmaya ait XRF cihazı ile tespit edilmiş olup Tablo 5.1 ve Şekil 5.1'de görüldüğü gibidir.

Tablo 5.1. GYFC kimyasal içeriği

Bileşen	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Mn ₃ O ₄	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O
Miktar (%)	41,73	34,34	10,71	7,78	3,65	1,70	1,40	0,29	0,10



GYFC içeriğinde en yüksek miktarda bulunan oksitin %41 ile SiO₂ olduğu onu %34 oranında CaO ve %10 ile Al₂O₃ oksitlerinin izlediği görülmektedir. Literatürde yer alan (5.1) hidrolik modülüne göre kimyasal bileşimi bakımından bu GYFC yeterli görülmektedir. (5.2)'de görülen bir başka hidrolik modüle yine 1'den büyük değer alması gerekirken 0,93 değerini alarak yetersiz sonuç vermiştir.

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} \geq 1 \quad (5.1)$$

$$\frac{34,34 + 7,78 + 10,71}{41,73} = 1,27 \geq 1$$

$$\frac{\text{C} + \text{M} + \text{A}/3}{\text{S} + 2\text{A}/3} = 0,93 \quad (5.2)$$

GYFC'nin hidrolik özelliğinin CaO/SiO₂ oranının artışıyla birlikte belli bir değere kadar arttığı bilinmektedir. SiO₂'nin %41 gibi yüksek sayılabilecek bir değer almasıyla CaO/SiO₂ değeri 0,8'de kalmıştır. %10'a kadar zararsız kabul edilen MgO ise %8 civarında bulunmaktadır.

Puzolanik aktivite için yapılan mekanik deneyde Ca(OH)₂ ile puzolanik malzeme karışımından üretilen harcın 7. günde en az 4 MPa basınç dayanımı değeri vermesi gerekmektedir [6, 50]. Bu çalışmada Ca(OH)₂ ile GYFC karışımlarından üretilen harçların 7. gündeki basınç dayanımı değeri ortalaması 10,4 MPa sonuç verdiği için alt sınır değer üzerinde çıktığı ve yeterli puzolanik aktiviteye sahip olduğu görülmüştür.

5.3. Referans ve Cürüflü Çimentoların Üretimi

Atık malzemelerin kullanım amaçlarına uygun olarak maliyeti azaltmak ve üretimi hızlandırmak adına bu çalışmada önceden öğütülmüş YFC klinker ve alçıtaşıyla birlikte aynı anda tekrar öğütülmüş ve cürüflü çimento üretilmiştir. Öğütme işlemi için 4 kg. kapasiteli firmaya ait bilyalı değirmen kullanılmıştır.



Şekil 5.2.4 kg. kapasiteli bilyalı klinker değirmeni

Tablo 5.2. Çalışmada kapsamında üretilen çimentolar

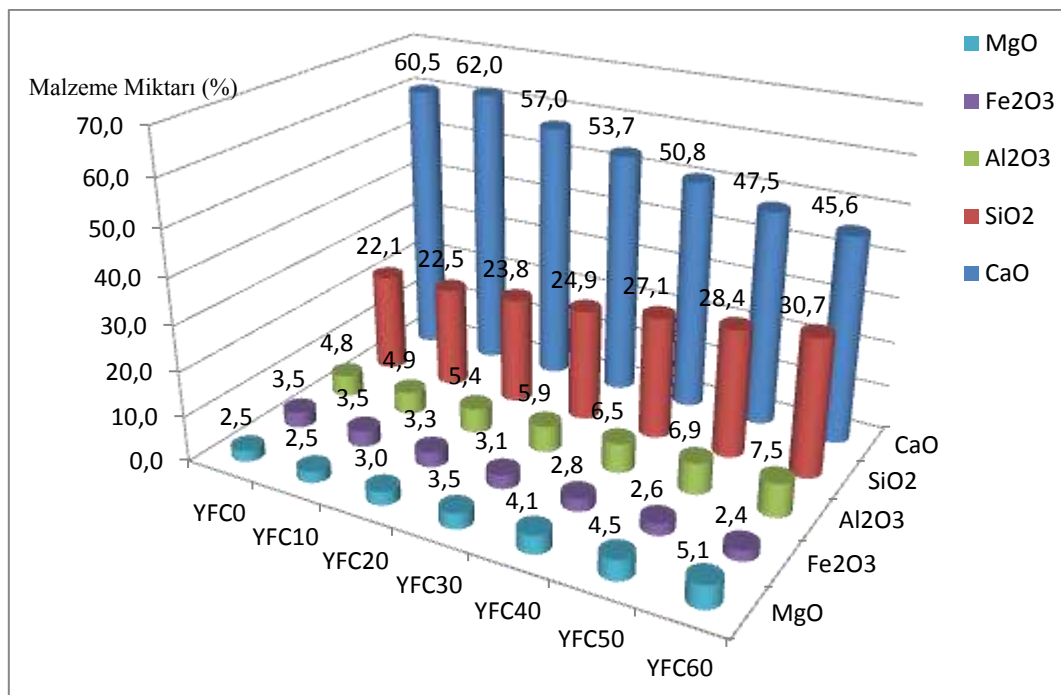
	YFC0	YFC10	YFC20	YFC30	YFC40	YFC50	YFC60
Klinker (gr)	3800	3400	3000	2600	2200	1800	1400
Alçıtaşı (gr)	200	200	200	200	200	200	200
GYFC (%)	-	10	20	30	40	50	60
GYFC (gr)	-	400	800	1200	1600	2000	2400

Tablo 5.2’de görüldüğü üzere, şahit numuneden başlayan ve her seferinde GYFC miktarının %10 arttığı 7 farklı numune üretilmiştir. Çimentoların üretimi sırasında klinker, alçıtaşı ve GYFC gerekli miktarda tartılıp bilyalı değirmene yerleştirilmiş ve birlikte 1 saatlik öğütme sonunda katkılı çimento elde edilmiştir.

Üretilen çimentoların XRF analizleri yapılmış ve içerdikleri oksit miktarlarıyla sülfat miktarları tayin edilmiştir. Katkısız üretilen çimento yaklaşık %60 CaO ve %22 SiO₂ ihtiva ederken, Tablo 5.1’de verilen değerlere göre GYFC %34 CaO ve %41 SiO₂ içerdığı için ikame oranının artışıyla birlikte cürufllu çimentoların CaO oranı azalırken SiO₂ oranının arttığı Tablo 5.3’de görülmektedir.

Tablo 5.3. XRF sonuçlarına göre çimentoların kimyasal bileşimleri

Çimento Grubu	Çimentolardaki oksit miktarları (%)							
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Mn ₃ O ₄
YFC0	60,47	22,05	4,81	3,46	2,46	0,02	0,74	0,68
YFC10	62,01	22,50	4,94	3,53	2,47	0,02	0,76	0,67
YFC20	56,99	23,77	5,43	3,32	2,99	0,00	0,82	1,01
YFC30	53,66	24,92	5,86	3,05	3,47	0,00	0,83	1,30
YFC40	50,76	27,13	6,53	2,82	4,10	0,01	0,90	1,63
YFC50	47,47	28,42	6,94	2,63	4,49	0,03	0,96	1,94
YFC60	45,60	30,68	7,46	2,39	5,08	0,04	1,05	2,22



Şekil 5.3. Üretilen çimentolardaki oksit miktarları

5.4. Harç Üretimi

Her bir çimento grubu için 4 set 12'şer adet 40x40x160 mm. ölçülerindeki prizma harç numuneleri üretilmiştir. Her bir setin üretiminde 1350 gr. Standart Rilem kumu, su/çimento oranı $\frac{1}{2}$ olacak şekilde 225 gr. su ve 450 gr. çimento kullanılmıştır. 1/100 gr. hassasiyete sahip Precisa XB3200C ile ağırlık ölçümü yapılmış, Malzemelerin karıştırılmasında Atom Teknik firmasının 4 dakika boyunca karıştırma yapan harç mikseri kullanılmıştır.



Şekil 5.4. Harç üretiminde kullanılan cihazlar

Mikserde karıştırılan harç standart 40x40x160 mm. ölçülerindeki üç gözlü kalıplara iki seferde doldurulup her seferinde bir dakika boyunca saniyede bir düşme yapacak şekilde çalışan Atom Teknik marka sarsma tablasıyla sıkıştırılarak yerleştirildi ve standart masterlarla yüzeyi düzeltildi.



Şekil 5.5. Çimento harcınının yerleştirilmesi

5.5. Kür ve Sülfat Ortamı

Hazırlanmış olan harç numuneleri, ihtiyaç duyacakları sıcaklık ve suyun karşılanması için küre tabii tutulmak üzere sıcaklığın 20 °C nemin % 90 olduğu kür odasındaki kür dolabına kalıplarıyla beraber yerleştirildi. Bir gün sonra kalıplarından çıkarılan numuneler aynı kür dolabındaki su tanklarına yerleştirildi. Durabilite deneyleri için ağırlıkça %10'luk sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltileri hazırlandı ve durabilite deneylerine tabii tutulacak olan harç numuneleri 28. günde sudan çıkarılarak bu çözeltilerin içerisine yerleştirildi. 3 ayın sonunda sülfat çözeltileri aynı çözünürlükte olacak şekilde hazırlanarak yenilendi.



Şekil 5.6. Kür ortamı

5.6. Deneysel Çalışmalar

Çimentolar üretildikten sonra incelik, özgül yüzey, özgül ağırlık gibi fiziksel özellikleri tespit edildi. Özgül yüzey için Atom Teknik marka Blaine cihazı kullanıldı.

Özgül ağırlık içinse Micromeritics AccuPyc II 1340 marka gazlı piknometre cihazı kullanıldı. Bu cihazla ölçüm yapılırken cihazın içerisindeki hacmi belli olan bölmeye ağırlığı ölçülmüş numune yerleştirildi, kapağı kapatıldıktan sonra cihazın içerisine verilen numunenin küçük boşluklarına dahi girebilecek belli miktardaki gazın bölmeye bağlı basınç ölçerdeki değerine göre numune hacmi hesaplanmış ve özgül ağırlığı bulunmuş oldu.

Priz başlangıç, bitiş ve kıvam suyunun tayini için üretilen çimento hamurları uygun kalıplara yerleştirildikten sonra bilgisayar kontrollü olarak çalışan Toni Teknik marka otomatik vicat aletine yerleştirilerek priz başlangıç, bitiş süreleri tespit edildi. Ayrıca üretilen hamurlar Le Chatelier aparatına yerleştirilerek hacim genleşme deneyleri yapıldı.

Su dolu kür tankında ve sülfatta bekletilen prizmatik çimento harçları 2, 7, 28 ve 180. günlerde Toni Teknik marka 240 kN/s yükleme hızına sahip pres cihazında kırılarak

basınç dayanımları tespit edildi. Her bir ortalama değer 2 adet harç numunesinin her iki ucundan kırılarak elde edilen toplam 4 değer dikkate alınarak hesaplandı.



Şekil 5.7. Basınç presi

BÖLÜM 6. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMESİ

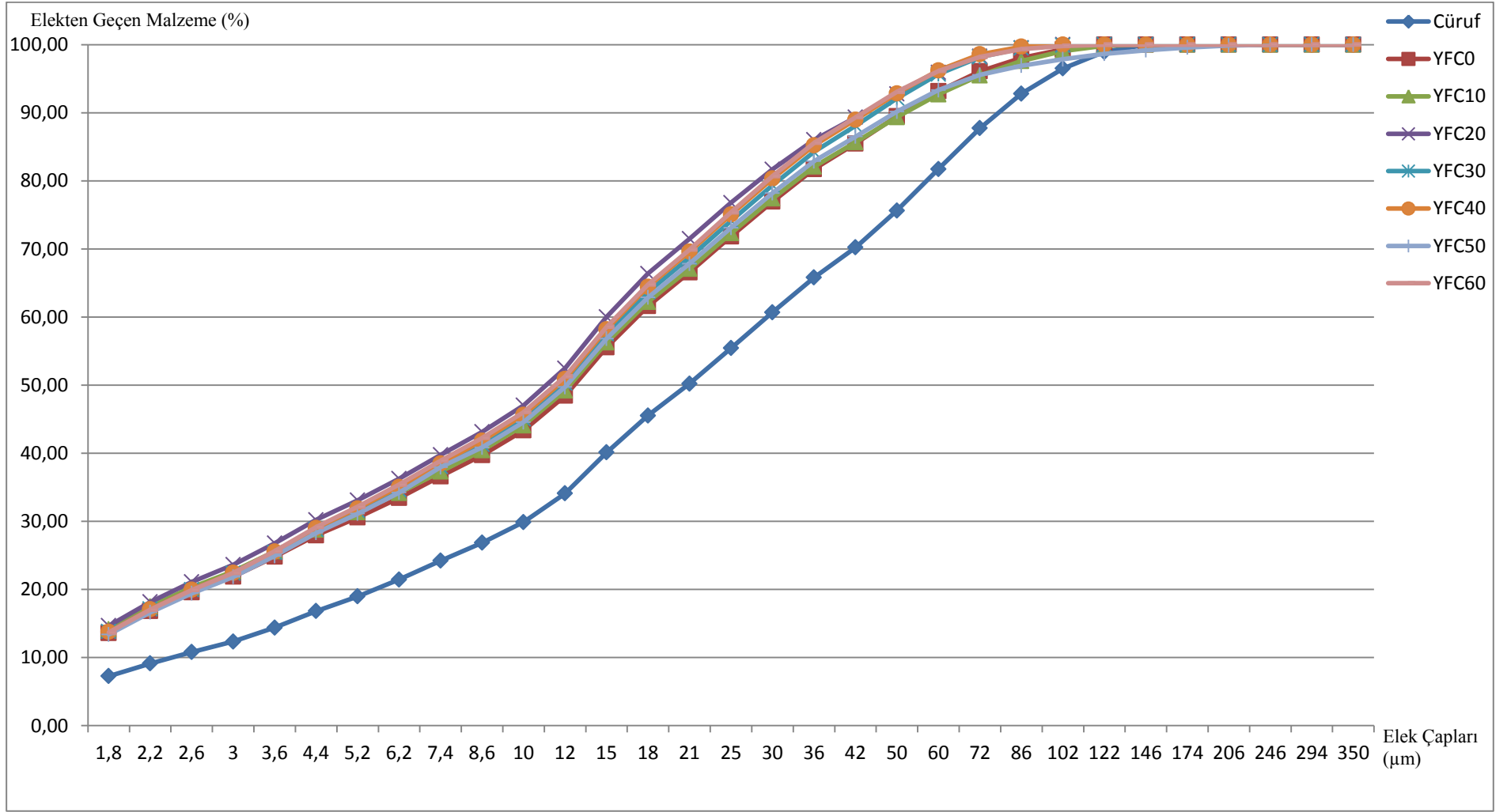
6.1. İncelik, Özgül Yüzey ve Özgül Ağırlık

Tablo 6.1’de incelik, özgül ağırlık ve özgül yüzey değerleri görülmektedir. Belirli ağırlığa sahip numunenin içerisinde geçiren havanın geçiş süresine göre Blaine yöntemiyle özgül yüzey tespit edilmiş, GYFC miktarı arttıkça özgül yüzey değerinin arttığı görülmüştür. Referans numunede 3,21 olan özgül ağırlık değeri GYFC artışıyla birlikte her numunede düşmüş, YFC60 numunesinde 3,03 değerini almıştır.

Tablo 6.1. İncelik, özgül ağırlık ve özgül yüzey değerleri

Çimento Grubu	İncelik (%)		Özgül Ağırlık	Özgül Yüzey		
	90 µm	200 µm		Numune Miktarı (gr)	Hava Geçiş Süresi (sn)	Blaine değeri (cm ² /gr)
YFC0	3,6	1,3	3,21	117,15	86,4	3451
YFC10	2,8	1,2	3,18	116,23	92,5	4081
YFC20	1,7	0,3	3,15	115,19	91,9	4098
YFC30	1,0	0,3	3,13	114,19	93,1	4154
YFC40	1,8	1,0	3,10	113,07	91,6	4164
YFC50	1,3	0,4	3,07	112,00	93,9	4261
YFC60	1,6	0,4	3,03	110,46	93,4	4304

Tablo 6.2’deyse 1,8 ile 350 mikron arası çap değerlerine sahip eleklerle yapılan elek analizi sonuçları ve Şekil 6.1’de granülasyon eğrisi görülmektedir. Elek üzerinde kalan yığılımlı malzeme miktarlarına bakınca YFC20 çimento grubunun granülasyon eğrisinin diğerlerinden daha yukarıda kaldığı görülmektedir ve diğerlerinden daha ince olduğu söylenebilir.



Şekil 6.1. GYFC miktarına bağlı incelik değişimi

6.2. Priz Süreleri ve Kıvam Suyu

GYFC katkısının artışıyla birlikte priz başlangıç ve priz bitiş daha geç gerçekleşmiş, toplam priz süresi de uzamıştır. Bu durum GYFC'nin priz geciktirici etkisiyle örtüşmektedir. Daha önce Blaine cihazı kullanılarak özgül yüzey tespit edildiği zaman artan cürufıyla birlikte özgül yüzeyin de arttığı görülmüştü. Özgül yüzeye ilişkili olan kıvam suyu da Tablo 6.3'den görüldüğü gibi artan cüruf ve özgül yüzeye bağlı olarak beklendiği şekilde artmıştır.

Tablo 6.3. Kıvam suyu ve priz süreleri

Numune	Su Alma (Kıvam suyu)		Priz Süreleri (dk)		
	Su (cc)	Su (%)	Başlangıç	Bitiş	Süre
YFC0	114	22,8	117	153	36
YFC10	122	24,4	116	158	42
YFC20	124	24,8	142	202	60
YFC30	126	25,2	160	230	70
YFC40	128	25,6	187	256	69
YFC50	135	27	201	280	79
YFC60	137	27,4	236	329	93

6.3. Hacim Genleşmesi

Hacim sabitliğinin ölçülmesi için yapılan kızdırma kaybı deneyi sonuçları ve hacim sabitliğini bozan unsurlardan biri olan SO_3 içeriği Tablo 6.4'de görüldüğü gibi olup kızdırma kaybı değerleri ASTM C595 standardında kızdırma kaybı için verilen %3 sınırının oldukça altında kalmıştır. XRF ile bulunan SO_3 miktarlarıysa üst sınır olan %3,5 altında kalmıştır.

Tablo 6.4. Kızdırma kaybı ve sülfat içerikleri

Çimento Grubu	YFC0	YFC10	YFC20	YFC30	YFC40	YFC50	YFC60
Kızdırma Kaybı	1,21	0,92	0,59	0,54	0,48	0,36	0,59
SO_3	3,17	3,23	3,30	3,25	3,17	2,74	2,70

Çimentonun hacim genişlemesini ölçmek amacıyla TS EN 196-3'e uygun olarak yapılan Le Chatelier sonuçları Tablo 6.5'de verildiği gibi olup tamamı 10 mm. sınır değerini sağlamaktadır.

Tablo 6.5. Le Chatelier sonuçları

Çimento Grubu	İğne Ucu Açıklığı		
	A	C	C-A
YFC0	10	11	1
YFC10	8	9	1
YFC20	10	11	1
YFC30	8	9	1
YFC40	8	9	1
YFC50	7	8	1
YFC60	10	11	1

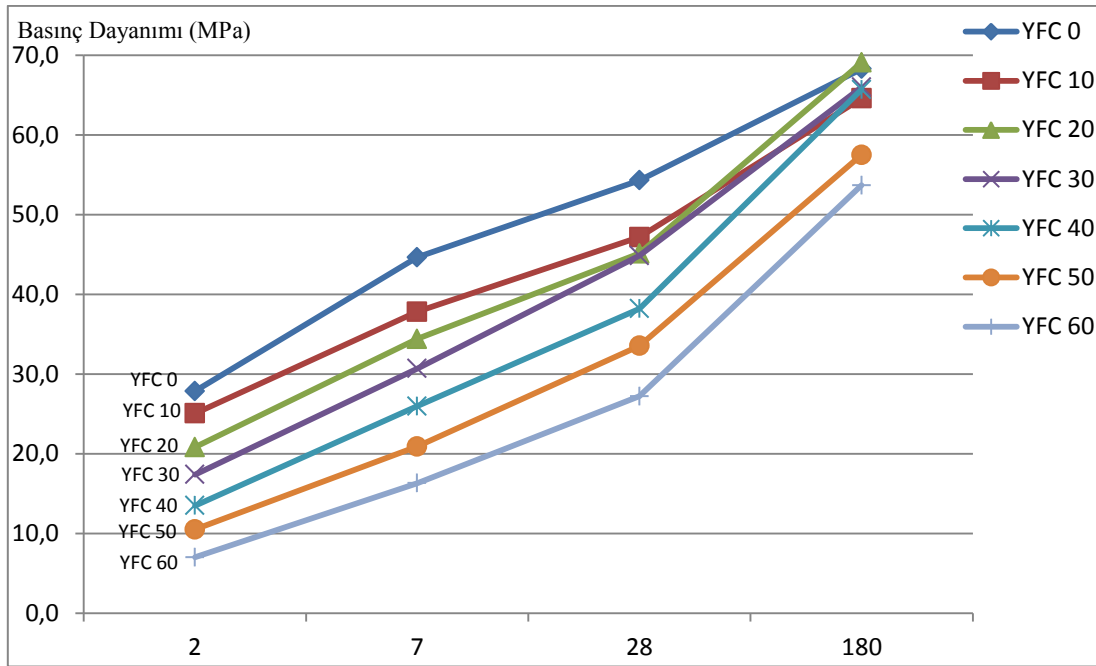
6.4. Mekanik Özellikler

Suda bekletilen tüm harçların 2, 7, 28 ve 180 günlük ortalama basınç dayanımı değerleri Tablo 6.6 ve Şekil 6.2'de verilmiştir. Suda bekletilen numunelerden sadece YFC20 numunesinin basınç dayanımı değeri 180. günde YFC0 referans numunesini geçmiştir. Tane dağılımı sonuçlarına bakıldığı zaman da YFC20 grubunun granülasyon eğrisinin en üstte olduğu görülmüştü, inceliği diğerlerinden fazla olduğu için 180. günde daha yüksek basınç dayanımı değeri vermiştir.

Tablo 6.6. Suda kür edilen harçların ortalama basınç dayanımı değerleri

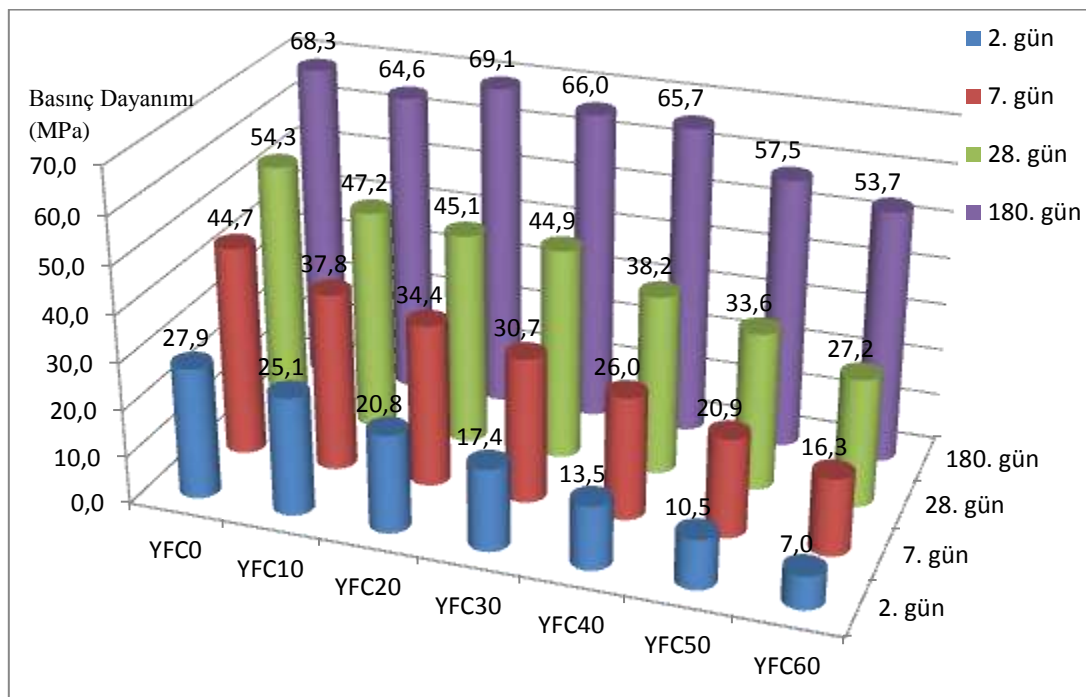
Çimento Grubu	YFC0				YFC10				YFC20				YFC30				YFC40				YFC50				YFC60			
	Gün	2	7	28	180	2	7	28	180	2	7	28	180	2	7	28	180	2	7	28	180	2	7	28	180	2	7	28
Basınç Dayanımı (Mpa)	27,9	44,7	54,3	68,3	25,1	37,8	47,2	64,6	20,8	34,4	45,1	69,1	17,4	30,7	44,9	66,0	13,5	26,0	38,2	65,7	10,5	20,9	33,6	57,5	7,0	16,3	27,2	53,7

Klinkerden sert olduğu bilinen GYFC'nin klinkerle birlikte aynı bilyalı değirmen içerisinde öğütülmesinden dolayı yeterli inceliğe gelmediği ve 180. günde kendisinden beklenen puzolanik etkiyi göstermediği söylenebilir. Bununla birlikte YFC30 ve YFC40 çimento gruplarının grafik eğimleri incelendiği zaman daha ileri zamanlarda referans harçlarını geçebilecek bir dayanım kazanma hızına sahip oldukları düşünülmektedir.



Şekil 6.2. Suda kür edilen farklı çimento gruplarına ait harçların basınç dayanımı gelişimleri

Şekil 6.3'den görüleceği üzere 2. günde GYFC miktarı artıkça basınç dayanımı hızlı şekilde düşmektedir. 7. ve 28. günde ise GYFC miktarının artışı basınç dayanımını azaltmış ancak GYFC artışına bağlı gerçekleşen azalma 2. günde olduğu kadar hızlı gerçekleşmemiştir. 180. günde ise GYFC miktarına artışıyla basınç dayanımı dalgalı değerler göstermiştir.



Şekil 6.3. Farklı günlerde çimento grupları arasındaki dayanım ilişkisi

Tablo 6.7. Farklı günlerde referans numuneye göre bağıl basınç dayanımları

Gün	YFC0		YFC10		YFC20		YFC30		YFC40		YFC50		YFC60	
	Dayanım (MPa)	Bağıl Değer	Dayanım (MPa)	Bağıl Değer	Dayanım (MPa)	Bağıl Değer	Dayanım (MPa)	Bağıl Değer	Dayanım (MPa)	Bağıl Değer	Basınç Dayanımı	Bağıl Değer	Dayanım (MPa)	Bağıl Değer
2	27,9	100	25,1	90	20,8	75	17,4	62	13,5	48	10,5	38	7,0	25
7	44,7	100	37,8	85	34,4	77	30,7	69	26,0	58	20,9	47	16,3	36
28	54,3	100	47,2	87	45,1	83	44,9	83	38,2	70	33,6	62	27,2	50
180	68,3	100	64,6	95	69,1	101	66,0	97	65,7	96	57,5	84	53,7	79

6.5. Durabilite Özellikleri

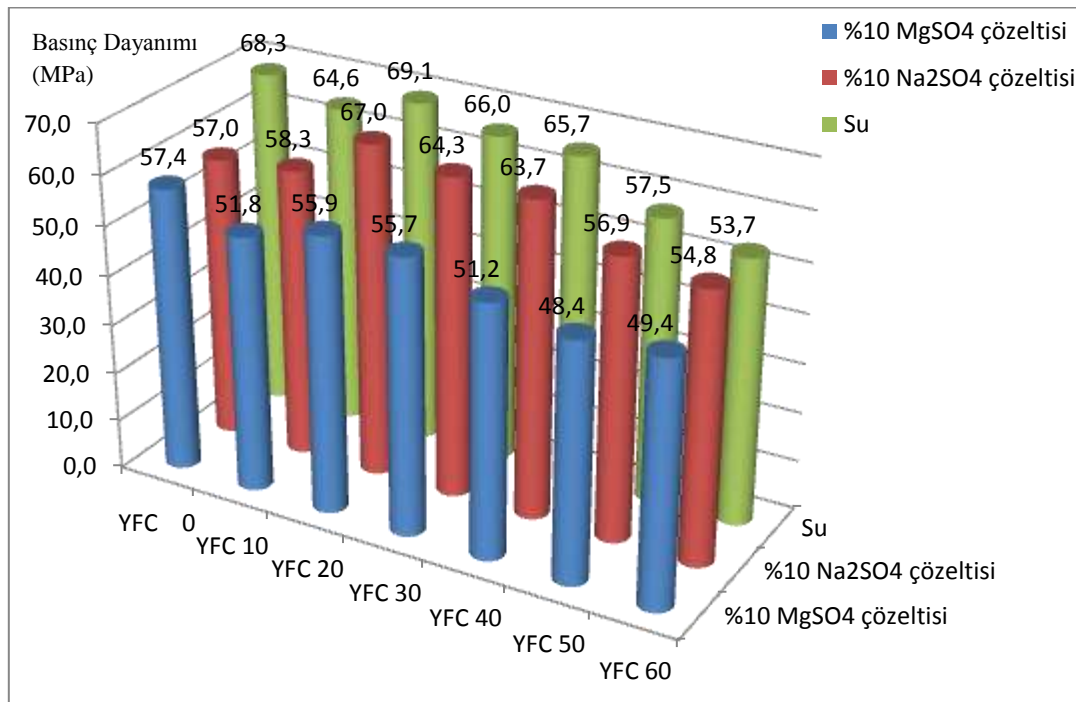
28 gün suda bekletildikten sonra %10 Na₂SO₄ ve %10 MgSO₄ çözeltilerine bırakılan ve 180 gün bekletilen bu çözeltilerde bekletilen her bir çimento grubundan 2'şer adet harç numunesi ve bunlardan elde edilen 4 adet basınç dayanımının ortalama değerleri Tablo 6.8'de ve Şekil 6.4'te gösterilmiş ve suda kür edilen numunelerle kıyaslanmıştır.

Tablo 6.8. Her bir grup için sülfat atağı sonucunda oluşan basınç dayanımı kaybı

Çimento grubu	Kür ortamı	Basınç dayanımı (MPa)	Her çimento grubunun kendi içerisinde su kürü ile mukayesesi		Suda kür edilen referans YFC0 harcı ile mukayese (Bağıl değer)
			Dayanım değişimi (%)	Bağıl değer	
YFC 0	Su	68,3		100,0	100,0
	%10 Na ₂ SO ₄ çözeltisi	57,0	-16,5	83,5	83,5
	%10 MgSO ₄ çözeltisi	57,4	-16,0	84,0	84,0
YFC 10	Su	64,6		100,0	94,6
	%10 Na ₂ SO ₄ çözeltisi	58,3	-9,8	90,2	85,4
	%10 MgSO ₄ çözeltisi	51,8	-19,8	80,2	75,8
YFC 20	Su	69,1		100,0	101,2
	%10 Na ₂ SO ₄ çözeltisi	67,0	-3,0	97,0	98,1
	%10 MgSO ₄ çözeltisi	55,9	-19,1	80,9	81,8
YFC 30	Su	66,0		100,0	96,6
	%10 Na ₂ SO ₄ çözeltisi	64,3	-2,6	97,4	94,1
	%10 MgSO ₄ çözeltisi	55,7	-15,6	84,4	81,6
YFC 40	Su	65,7		100,0	96,2
	%10 Na ₂ SO ₄ çözeltisi	63,7	-3,0	97,0	93,3
	%10 MgSO ₄ çözeltisi	51,2	-22,1	77,9	75,0
YFC 50	Su	57,5		100,0	84,2
	%10 Na ₂ SO ₄ çözeltisi	56,9	-1,0	99,0	83,3
	%10 MgSO ₄ çözeltisi	48,4	-15,8	84,2	70,9
YFC 60	Su	53,7		100,0	78,6
	%10 Na ₂ SO ₄ çözeltisi	54,8	2,0	102,0	80,2
	%10 MgSO ₄ çözeltisi	49,4	-8,0	92,0	72,3

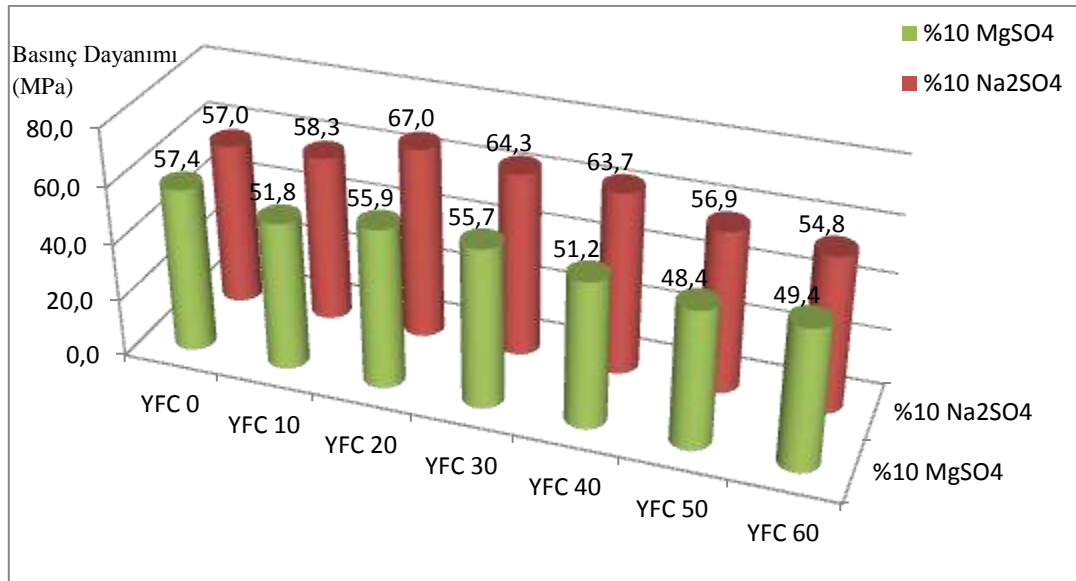
%10 Na₂SO₄ çözeltisinde kalan numunelere bakılacak olursa GYFC içermeyen grupta sülfat etkisi dolayısıyla dayanım kaybı %16,5 olurken GYFC ikamesi ve miktarının artmasıyla birlikte dayanım kaybı gittikçe azalmış, YFC60 grubunda sodyum sülfat çözeltisine maruz kalan harçlarda suda kür edilen harçlara göre %2'lik bir dayanım artışı gözlenmiştir. Böylece cüruf çimentoların Na₂SO₄'e maruz kalması durumunda yeterli performans gösterdiği söylenebilir.

%10 MgSO₄ çözeltisi içinse GYFC miktarının değişimi dayanım kaybında dalgalanmalara sebep olmuş, cüruf olmayan referans çimento grubunda MgSO₄ dolayısıyla %16 dayanım kaybı gözlenirken, %60 GYFC içeriğine sahip çimento grubunda dayanım kaybı %8 ile referans numunenin altında kalmıştır.



Şekil 6.4. 180 gün sonunda ayrı ayrı sülfat çözeltilerinde ve suda bırakılan farklı çimento harçlarının ortalama basınç dayanımları

Şekil 6.5'de sülfatlı ortamlara maruz kalan çimento harçlarının cüruf içeriğine bağlı basınç dayanımı değişimi mevcuttur. %50 ve %60 GYFC içeren harçlar hariç diğer tüm harçlarda Na₂SO₄ çözeltisine maruz kalanlar, cüruf içermeyen referans çimentodan daha yüksek basınç dayanımı vermiştir. MgSO₄ içinse GYFC'nin performansının diğer sülfattaki kadar iyi olmadığı görülmüştür.



Şekil 6.5. GYFC İçeriğine Bağlı Sülfat Performansları

MgSO₄ çözeltisine maruz kalan cürüflü harçların basınç dayanımları nicel olarak referans çimentoya göre düşmüş olsa da Tablo 6.8'de verilmiş olan YFC0 referans numunesinin sülfattaki basınç dayanımı kaybıyla cürüflü numunelerin basınç dayanımı kaybı yüzdeleri karşılaştırıldığı zaman Tablo 6.9'da da görüldüğü üzere YFC50 ve YFC60 harçlarının sülfatta bekletilenlerinin suda bekletilenlere göre dayanım kaybının YFC0'a göre daha az olduğu görülmektedir.

Tablo 6.9. Sülfata maruz kalan cürüflü harçların dayanım kaybı yüzdelerinin referans numuneyle karşılaştırılması

Kür Ortamı	Na2SO4 çözeltisi						MgSO4 çözeltisi					
YFC 0 dayanım kayıpları (%)	-16,5						-16,0					
Çimento Grubu	YFC 10	YFC 20	YFC 30	YFC 40	YFC 50	YFC 60	YFC 10	YFC 20	YFC 30	YFC 40	YFC 50	YFC 60
Sülfat dayanım kayıpları (%)	-9,8	-3,0	-2,6	-3,0	-1,0	2,0	-19,8	-19,1	-15,6	-22,1	-15,8	-8,0
Kayıp kıyas	<	<	<	<	<	<	>	>	<	>	<	<
Sonuç	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	✓	x	✓	✓

Aynı şekilde dayanım kaybı yüzdeleri bakımından incelenince Na₂SO₄ çözeltisinde kalan cürüflü çimentoların tamamı YFC0 referans numunesine göre iyi sonuç vermiştir.

BÖLÜM 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çimentoya genellikle sonradan ilave edilen granüle yüksek fırın cürufunun klinkerle birlikte öğütülerek kullanıldığı bu çalışmada hedeflenen yüksek fırın cürufunun puzolanik özelliği sayesinde çimento hamurunun durabilite performansını arttırmasıydı.

180. gündeki sonuçlara bakıldığı zaman GYFC katkısının %10, %20, %30 ve %40 oranlarında kullanılması durumunda Na_2SO_4 çözeltisindeki harçlara olumlu etki yaptığı ve referans numuneden daha yüksek basınç dayanımı değerleri elde edilmesini sağladığı tespit edilmiştir. Sodyum sülfatta bekletilen harçlardan en yüksek dayanımı %20 YFC içeriğine sahip çimento grubu vermiştir. Bununla birlikte her bir çimento grubu içerisinde suda kür edilen ve Na_2SO_4 'e maruz kalan çimento harçları karşılaştırılıp basınç dayanımı kayıpları incelendiği zaman cürufllu çimentoların tamamındaki basınç dayanımı kayıpları referans çimentodan düşük çıkmıştır. Cüruf puzolanik etkisi sayesinde $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'i bağladığı ve bu şekilde sertleşmiş hamur içerisinde muhtemel bir alçıtaşı oluşumunu engellendiği için sodyum sülfat içerisinde durabilite açısından yeterli performans göstermiştir.

MgSO_4 çözeltisinde kalan tüm harçların dayanım değerleri referans numuneninkinden düşük olurken, her bir çimento grubu kendi içerisinde su ve sülfat arasındaki dayanım kayıpları açısından incelendiği zaman %30, %50 ve %60 GYFC içeren çimentoların referans numuneye göre daha az kayba uğradığı tespit edilmiştir. Cürufllu çimentoların MgSO_4 çözeltisi içerisinde Na_2SO_4 çözeltisinde olduğu kadar iyi performans göstermemesinin sebebi Magnezyum Sülfatın çimento hamurundaki hidratasyon ürünü olan C-S-H jellerine de zarar vermesidir. Önlem olarak çimento üretimine katılmadan önce yüksek fırın cürufunun daha fazla öğütülerek daha ince bir hale getirilmesi, böylece sülfata maruz kalana kadar olan süreçte daha hızlı şekilde $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'i bağlayarak yeni C-S-H jelleri oluşturması sağlanabilirse hem jel

miktarı arttırılmış hem de daha geçirimsiz bir beton elde edilerek sülfatın tobermoriti yıkıcı etkisi azaltılmış olur. Otoklav kürü gibi erken dayanımı arttırıcı önlemler de cürufun puzolanik etkisini hızlandıracağından uygulanabilir.

Mekanik özelliklere bakıldığı zaman %20'lik cürufllu çimento referans numuneyi 180. günde geçmiştir. Sodyum sülfat çözeltisinde de en yüksek basınç dayanımını bu çimentonun verdiği düşünülürse bu çalışma için optimum cüruf kullanım oranının %20 olduğu söylenebilir.

GYFC miktarı %50, %60 gibi miktarlara çıktığı zaman basınç dayanımları oldukça düşük kalmıştır. Puzolanik malzemelerin klinkerde bulunan kalsiyum silikatların hidratasyonu ile oluşan Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek C-S-H jeli oluşturduğu ve bu şekilde dayanım artışına katkı sağladığı düşünülürse cürufun klinkerle ikameli olarak yer değiştirmesi ve artan cüruf miktarıyla birlikte azalan klinker daha az Ca(OH)_2 oluşumu göz önüne alındığı zaman çok yüksek cüruf içeriğinin yeterli performans sağlamadığı düşünülebilir. Yüksek GYFC içeriği kullanılmak isteniyorsa bunların alkalilerle aktivasyonu gibi önlemler alınarak azalan Ca(OH)_2 sorununa çözüm üretilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] World Steel In Figures 2013 – World Steel Association.
- [2] Özodabaş, A., Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufllu Harçların Performansının Geliştirilmesi. 2013.
- [3] Erdoğan, T., Beton. ODTÜ Yayıncılık, 2007.
- [4] Arslan, K.M., Sülfat Etkisine Maruz Kalmış Mineral ve Nano Katkılı Harçların Durabilitesi. İTÜ, 2014.
- [5] Geven, Ç., Investigation of The Properties of Portland Slag Cement Produced by Separate Grinding And Intergrinding Methods. METU, 2009.
- [6] Kılınçkale, F.M., Çeşitli Puzolanların Puzolanik Aktivitesi ve Bu Puzolanlarla Üretilen Harçların Dayanımı. İMO Teknik Dergi, 91:1217-1229, 1996.
- [7] Topçu, İ.B., Karakurt, C., Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufunun Çimento Üretiminde Katkı Olarak Kullanımı. 7. Ulusal Beton Kongresi, sf:395-404, Kasım 2007.
- [8] Özkan, Ö., Çelikhane ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Portland Çimentosunun Özellikleri. İMO Teknik Dergi, 257-284, Temmuz 2006.
- [9] Avcıoğlu, M., Malzeme Bilimi Yapı Malzemeleri ve Deneyleri. 2000.
- [10] Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Tosun, K., Aydın, S., Yardımcı, M.Y., Topal, A., Öztürk, A.U., Beton. DEU, 334, 2012.
- [11] Baradan, B., Yapı Malzemesi 2. DEU, 2009.
- [12] TS EN 197-1 – Çimento – Bölüm 1. TSE, Mart 2002.
- [13] Beton Kullanıcıları İçin Teknik Bilgiler Kılavuzu, THBB.
- [14] Ersoy, H.Y., Kompozit Malzemeler. Literatür, 2001.
- [15] Yalçın, H., Gürü, M., Çimento ve Beton. Palme, 2006.

- [16] Environmental Data of the German Cement Industry. Verein Deutscher Zementwerke, 2012.
- [17] Activity Report 2013. Cembureau, 2014.
- [18] The World Business Council for Sustainable Development Publication. İsviçre, Mayıs 2011.
- [19] Engin, Y., Tarhan, M., Kumbaracıbaşı, S., Çimento Endüstrisinde Sürdürülebilir Üretim. Hazır Beton Kongresi, İstanbul, 2013.
- [20] Teknik Notlar 3, Akçansa.
- [21] ASTM C125-14, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. 2006.
- [22] Engin, Y., Tarhan, M., TS EN 197-1:2002 Standardındaki Değişiklikler.
- [23] Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite). THBB, 2010.
- [24] Erdoğan, T., Materials of Construction. METU, 2007.
- [25] Mehta, K., Advancements In Concrete Technology. Sf:73, 1999.
- [26] Baradan, B., Malzeme Bilgisi. DEU, 2006.
- [27] Demir-Çelik Sektörü. Birleşik Metal İş Yayınları No:2, 2003.
- [28] Recycling Industry Publication.
- [29] Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2008.
- [30] Duggal, S.K., Building Materials. Balkema, 1998.
- [31] http://en.wikipedia.org/wiki/File:Alto_horno_antiguo_Sestao.jpg, Erişim tarihi: 15.02.2015.
- [32] Tokyay, M., Erdoğan, K., Cüruflar ve Cürüflü Çimentolar. TÇMB, 2009.
- [33] Erdoğan, T., Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu ve Kullanımı. ODTÜ.
- [34] National Slag Association Publication. PI 207-1.
- [35] ASTM C989/C989M - Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars.

- [36] ASTM C109/C109M - Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars.
- [37] ASTM C595/C595M - Standard Specification for Blended Hydraulic Cements.
- [38] Engin, Y., Tarhan, M., Kumbaracıbaşı, S., Çimento Endüstrisinde Sürdürülebilir Üretim. Hazır Beton Kongresi, 155-165, 2013.
- [39] The U.S. Energy Information Administration (EIA), Annual Energy Outlook 2014 With Projections to 2040.
- [40] Damineli, B.L., Kemeid, F.L., Aguiar, P.S., John, V.M., Measuring The Eco-efficiency of Cement Use. Cement and Concrete Composites 32:555-562, 2010.
- [41] Newman, J., Choo, B.S., Advanced Concrete Technology Constituent Materials. Oxford, 2003.
- [42] TS EN 206-1 – Beton - Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk. TSE, 2002.
- [43] Neville, A.M., Properties Of Concrete. Prentice Hall, 2012.
- [44] Addleson, L., Materials for Building. Volume 3, Iliffe Books, 1972.
- [45] Coşgun, T., İstanbulda Deprem Sonrası Yapılan İncelemelerde Karşılaşılan Korozyon Hasarı Üzerine Bir İnceleme. 5. Ulusal Beton Kongresi, 2003.
- [46] Topçu, İ.B., Boğa, A.R., Betonarmede Donatı ve Beton Arasındaki Aderansa Korozyonun Etkisi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi, C.XXI, S.1, 2008.
- [47] Peter, C.H., Lea's Chemistry of Cement and Concrete. 4th Edition, 2003.
- [48] Topçu, İ.B., Beton Teknolojisi. Eskişehir, 2006.
- [49] Gopi, S., Basic Civil Engineering. Pearson India, 2009.
- [50] TS 25 - Doğal Puzolan - Çimento Ve Betonda Kullanılan - Tarifler, Gereklere ve Uygunluk Kriterleri. TSE, 2008.
- [51] Concrete Through The Ages. British Cement Association, 1999.

ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin Ulugöl 17.06.1982 tarihinde Kayseri’de doğdu. İstanbul’da ilköğretimden mezun olduktan sonra Kayseri Sümer Lisesini 1999 yılında bitirdi. 1999 yılında girdiği Erciyes Üniversitesi Fizik Bölümünden 2004 yılında mezun oldu. 4 yıl Servus Bilgisayar A.Ş.’de çalıştıktan sonra 2009’da Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girdi, 2012’de mezun oldu. 2012 yılından beri Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.