

**YENİ NESİL YÜKSEK FIRIN CÜRUFU CEM III B - C TİPLİ
ÇİMENTOLARIN YÜKSEK SÜLFATLI ORTAMLARDA PERFORMANSI**

Sadullah UĞURLU

UZMANLIK TEZİ

EKİM 2015



İL BANK
TÜRKİYE'NİN YAPICI GÜCÜ

İLLER BANKASI ANONİM ŞİRKETİ

**YENİ NESİL YÜKSEK FIRIN CÜRUFU CEM III B - C TİPİ
ÇİMENTOLARIN YÜKSEK SÜLFATLI ORTAMLARDA PERFORMANSI**

Sadullah UĞURLU

UZMANLIK TEZİ

Dr. Elif PUL

Doç. Dr. Mustafa ŞAHMARAN

EKİM 2015

ETİK BEYAN

İLLER BANKASI ANONİM ŞİRKETİ Uzmanlık Tezi Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Sadullah UĞURLU

Yeni Nesil Yüksek Fırın Cürüflü Cem III B-C Tipi Çimentoların Yüksek Sülfatlı
Ortamlarda Performansı

(Uzmanlık Tezi)

Sadullah UĞURLU

İLLER BANKASI ANONİM ŞİRKETİ

Ekim 2015

ÖZET

Bu çalışmada, sanayi tesislerinden atık malzeme olarak çıkan yüksek fırın cürüflerinin CEM-III B/C tipi çimentolar içerisinde katkı malzemesi olarak kullanımının uygunluğu, hangi oranlarda kullanıldığında en verimli sonuçların alınacağı incelenmiştir. Ayrıca Türk Standartlarında belirtilen yüksek fırın cürufu kullanım oranları da göz önünde bulundurulmuştur. Yüksek fırın cürufu kullanımının özellikle İller Bankası faaliyet alanlarının da içinde bulunduğu altyapı tesislerinde olumlu sonuçlar verdiği, betonun dayanımına olumlu yönde katkılarının olduğu tespit edilmiştir. Yüksek sülfat ihtiva eden altyapı tesislerinde atık niteliğindeki yüksek fırın cürufunun kullanımı hem daha ekonomik yapılar ortaya çıkarma hem de betonun ileri yaşlardaki dayanımını artırmada faydalı olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler : Yüksek fırın cürufu, sülfat, çimento
Sayfa Adedi : 74
Tez Danışmanı (Kurum) : Dr. Elif PUL
Tez Danışmanı (Üniversite) : Doç. Dr. Mustafa ŞAHMARAN

New Generation Blast Furnace Slag CEM III/B-C Typing Cements Performance with High Sulphate Environments

(M.S. /Ph. D. Thesis)

Sadullah UĞURLU

İLLER BANKASI A. Ş.

October 2015

ABSTRACT

In this study, suitability of use of blast furnace slag resulting from industrial plants as additives in production of CEM-III B/C and in what proportions of blast furnace slag will be most efficient were examined. Blast furnace slag utilization rates specified in Turkish Standard were also taken into account. It was revealed the use of blast furnace slag in İLBANK projects yielded positive results, utilization of blast furnace slag has positive contribution to the strength of the concrete. It is considered that utilization of blast furnace slag in infrastructure structures containing high sulfate will be more economic and contribute to the strength of concrete.

Key Words : Blast furnace slag, sulphate, cement
Page Number : 74
Supervisor (Institution) : Dr. Elif PUL
Supervisor (Üniversite) : Assoc. Prof. Mustafa ŞAHMARAN

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım sırasında kurum içerisinde değerli vaktini bana ayırarak, sabır ve bilgisiyle vermiş olduğu desteklerden dolayı saygıdeğer m¼d¼r¼m Dr. Elif PUL' a, danıőman hocam Doç. Dr. Mustafa ŞAHMARAN' a ve benden desteğini hiçbir zaman esirgemeyen eőim Saliha' ya sonsuz teőekk¼r ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. BETONUN BİLEŞENLERİ	5
2.1. Agregalar.....	5
2.1.1. Agreganın tanımı, çeşitleri ve özellikleri	5
2.2. Çimentolar.....	6
2.2.1. Çimentonun tanımı	6
2.2.2. Çimentonun tarihçesi.....	7
3. BETONDA DIŞ ETKENLERE KARŞI DAYANIKLILIK (DURABİLİTE)	11
3.1. Durabiliteye Etki Eden Fiziksel Faktörler.....	14
3.1.1. Donma ve çözülme etkisi	14
3.1.2. Erozyon Etkisi	14
3.1.3. Aşınma etkisi	14
3.1.4. Kavite etkisi	15
3.1.5. Asfalt ve beton yollarda kullanılan tuzların etkisi.....	15
3.1.6. Deniz suyu etkisi	16
3.2. Durabiliteye Etki Eden Kimyasal Faktörler	17
3.2.1. Asit ve asit yağmurlarının etkileri	17

3.2.2. Magnezyum sülfat etkileri.....	18
3.2.3. Karbonatlaşma ve alkali etkileri.....	19
3.2.4. Sülfat etkisi.....	20
3.3. Sülfatın Bulunduğu Ortamlar.....	23
3.3.1. Agregada sülfat.....	23
3.3.2. Zeminde sülfat.....	23
3.3.3. Beton karma suyunda sülfat.....	23
3.3.4. Gazlarda sülfat.....	24
3.3.5. Beton temas suyunda sülfat.....	24
3.4. Sülfat Tepkimeleri.....	24
3.5. Sülfatın Betona Etki Mekanizması ve Betonda Sülfat Tahribatı.....	26
3.6. Beton ve Harçlarda Sülfat Saldırısı Türleri.....	30
3.6.1. Dış sülfat saldırısı.....	30
3.6.2. İç sülfat saldırısı.....	31
3.7. Etrenjit Oluşumu.....	32
3.8. Sülfata Dayanıklılık Açısından Alınması Gereken Önlemler.....	33
4. YÜKSEK FIRIN CÜRUFU.....	37
4.1. Çelik Üretimi ve Cürufun Elde Edilişi.....	37
4.2. Cürufun Fiziksel ve Kimyasal Yapısı.....	39
4.3. Granüle Yüksek Fırın Cürufu.....	40
4.4. Eriyik Cürufunun Soğutulma Yönteminin Cüruf Yapısına Etkisi ve Cürufların Kullanım Alanları.....	41
4.5. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufunun Bağlayıcı Özellikli Malzeme Olarak Kullanılmaya Uygunluğu.....	44
4.6. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufunun Cürüflü Çimento Üretiminde Kullanımı.....	45
4.7. Yüksek Fırın Cürufunun Beton İçerisinde Kullanılması.....	49
4.8. Yüksek Fırın Cürufunun Betonun Durabilitesi Üzerindeki Etkileri.....	51
4.8.1. Taze beton özellikleri üzerindeki etkileri.....	51

4.8.1.1. Su ihtiyacı ve işlenebilirlik	51
4.8.1.2. Terleme	51
4.8.1.3. Priz süresi	52
4.8.1.4. Hidratasyon ısısı	53
4.8.2. Sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki etkileri	54
4.8.2.1. Basınç ve çekme dayanımı üzerindeki etkileri	54
4.8.2.2. Sülfat hücumu üzerindeki etkileri	54
4.8.2.3. Klor etkisine dayanıklılık	55
4.8.2.4. Deniz suyu etkisine dayanıklılık	57
4.8.2.5. Karbonatlaşmaya dayanıklılık	57
4.8.2.6. Aşınmaya dayanıklılık	58
4.8.2.7. Donma – Çözülme direnci	58
4.8.2.8. Asit etkisine dayanıklılık	59
4.8.2.9. Alkali – Agregata reaksiyonu	60
4.8.3. Kılcal su emme	61
4.8.4. Boşluk yapısı	62
5. LİTERATÜRDE CÜRUFULU ÇİMENTOLARIN SÜLFAT DAYANIMI İLE İLGİLİ YAPILMIŞ DENEYSEL ÇALIŞMALAR	65
5.1. YFC Kullanımının Harçların Basınç Dayanımına Etkisi	65
6. SONUÇLAR	73
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	79

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Türk standartlarındaki çimento tipleri	9
Çizelge 2.1. Türk standartlarındaki çimento tipleri (devamı).....	10
Çizelge 3.1. Amerikan beton enstitüsü tarafından tanımlanan sülfat ortamları ve önerilen su/çimento oranları	22
Çizelge 4.1. YFC kimyasal analizi	40
Çizelge 4.2. Yüksek Fırın Cürufu Kullanım Alanaları	42

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1. Yüksek fırın cürufu kullanımının basınç dayanımına etkisi (suda kür)	66
Şekil 5.2. YFC kullanımının basınç dayanımına etkisi (buhar kürü)	67
Şekil 5.3. Sülfat çözeltisine maruz bırakılmış örneklerin, suda beklemiş kontrol örneklerine kıyasla basınç dayanımları	68
Şekil 5.4. Buhar kürü geçirmiş, sülfat çözeltisine maruz bırakılmış örneklerin, suda beklemiş kontrol örneklerine kıyasla basınç dayanımları	69
Şekil 5.5. Suda kür edilmiş örneklerin 26 hafta sonundaki genleşmeleri	70
Şekil 5.6. Buhar kürü geçirmiş örneklerin 26 hafta sonundaki genleşmeleri	70

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Pik demir ve yüksek fırın cürufunun üretim süreci	38
Resim 4.2. Yüksek fırın cürufu çimento üretim prosesi	39
Resim 4.3. Yüksek fırın cürufları	42
Resim 4.4. Tarayıcı elektron mikroskopta 5000 defa büyütülmüş portland çimentosu ve öğütülmüş yüksek fırın cürufuna ait mikrograflar	43
Resim 4.5. Hava sürükleyici katkı ve katkısız beton.....	59
Resim 4.6. Avustralya'da bir köprü ayağında ASR etkisi sonucu gelişen çatlaklar	60

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklamalar
ACI	American Concrete Institute
ASR	Alkali-Silika Reaksiyonu
ASTM	American Society for Testing and Materials
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
CÇ	Cürüflu Çimento
CSH	Hidrate Kalsiyum Silikat Jeli
DIN	Alman Standartları Enstitüsü
FGD	Kükürt Giderici Uçucu Gaz
KÇ	Katkılı Çimento
MPA	Mega Paskal
OPCS	Sıradan portland çimentosu cürufu
ÖGYFC	Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu
PÇ	Portland Çimentosu
PH	Power of Hydrogen (Hidrojenin Gücü)
SDÇ	Sülfata Dayanıklı Çimento
SR	Sülfata Dayanıklı Çimento (Sulphat Resisting)
TÇ	Traslı Çimento
TS	Türk Standartları
UK	Uçucu Kül
YFC	Yüksek Fırın Cürufu

1. GİRİŞ

Çimento, yüksek enerji harcanarak üretilen bir yapı malzemesidir. Bilindiği üzere ülkemiz enerji sektöründe çoğunlukla dışa bağımlı bir ülke konumundadır. Bu durum ekonomiyi de çok yakından ilgilendirmektedir. Çimento sektöründeki bu yoğun enerji tüketiminin sonucu olarak, üretimdeki maliyetleri azaltmak amacıyla sanayi atığı konumundaki malzemelerin çimento ve beton katkısı olarak kullanılabilirliği uzun yıllar boyunca sürekli araştırılmıştır. Atık olarak tanımlanan bu malzemeler uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu olarak bilinmektedir. Günümüzde de bu malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar devam etmektedir.

İnsanların hayatın her alanında olduğu gibi inşaat sektöründe de ön planda tuttukları olgu ekonomidir. Bir kaba inşaatın maliyetinin toplam inşaat maliyetine oranının %40-50' lerde olduğu düşünüldüğünde betonu oluşturan malzemelerin maliyeti ön plana çıkmaktadır. Maliyetleri düşürmenin en önemli tarafı, çimento yapımında kullanılacak hammaddelerin büyük bir kısmının doğadan ve atıklardan elde edilecek olmasıdır [26].

Bir yapının, kullanım ömrü boyunca, dış etkenlere karşı dayanıklı olması, dayanımının yüksek olması, özellikle deprem bölgeleri düşünüldüğünde enerji sönümleme kabiliyetlerinin üst düzeyde olması beklenir [26].

Günümüzde betonların sınıflandırılması yapılırken, yüksek performanslı beton olarak nitelendirebileceğimiz betonlar, içeriğine bakıldığında çimento miktarının çok yüksek su miktarının da çok düşük seviyelerde tutulmasıyla yüksek dayanım sağlanan betonlardır. Beton ve betonarme elemanlar, yapının içinde bulunmuş olduğu çevresel koşullar ile birlikte taşımış olduğu yükler altında zamanla deformasyona uğramaktadır. Bu yüzden betonarme yapılar tasarlanırken dayanım ile birlikte dayanıklılık ilkesi de göz önünde bulundurulmalıdır [26].

Çimentonun kimyasal özellikleri ve miktarı betonun kaliteli olup olmamasına doğrudan etki etmektedir. Yüksek fırın cürufunun çimento içerisine ilave edilmesi sonucu üretilen betonlar sülfatlı ortamların zararlı etkilerine karşı daha korunaklı hale gelmektedirler. Bu olayda yüksek fırın cürufunun ince yapıda olması sayesinde betonun

boşluk yapısında meydana gelen iyileşme ve çimento içinde bulunan bazı maddelerin sülfat ile girdikleri zarar kimyasal reaksiyonların olması etkilidir. İller Bankası faaliyet alanları içerisindeki altyapı tesislerinde karşımıza atıksuyun ve yer altı suyunun zararlı etkileri çıkmaktadır. Bu zararlı etkilerin en başında da sülfat ataklarıyla birlikte betonda oluşan tahribat gelmektedir. Bankamızın faaliyet alanındaki kanalizasyon ve atıksu arıtma tesislerinde yapıların dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin üst seviyede olması beklenmektedir. Hizmet alanı gereği Anadolu' daki dar bütçeli belde veya ilçelerin ihtiyaçlarını karşılamaya dönük yapılan bu tesislerin, ilk yatırım maliyetlerinin minimum seviyede tutulması, dayanım ve dayanıklılıklarının da maksimum seviyeye çıkarılarak uzun hizmet sürelerine ulaşması amaçlanmaktadır. Bu yüzden performansı üst düzey betonlara olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır.

Yüksek fırın cürüflü çimentolar 2012 yılında TS 197-1 Standardında yapılan değişiklikle Standartta yer bulmuştur. Çimento sınıflarının tanımlandığı bu standartta yapılan en önemli değişiklik sülfat zararlı etkilerine maruz bölgelerde kullanılacak çimento çeşitleri üzerinde olmuştur. 7 adet sülfata dayanıklı genel çimento sınıfı, 3 adet düşük erken dayanımlı yüksek fırın cürüflü çimento sınıfı ve 2 adet sülfata dayanıklı düşük erken dayanımlı yüksek fırın cürüflü çimento sınıfı standartlara dahil edilmiştir. İnşaat endüstrisinde en önemli faktörün ortaya çıkan yapıların uzun yıllar boyunca hizmet etmesi olduğu düşünüldüğünde, birinci hedef, betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini geliştirmek olmalıdır. Bankamızın yürüttüğü çalışmaların, altyapı tesisleri alanında yoğunluk kazanması yeraltı suyu ile mücadeleyi de beraberinde getirmektedir. Canlıların hayatını sürdürebilmeleri için gerekli olan su her zaman masum olmamaktadır. Yer altı suyundaki zararlı maddelerden sülfatın da betona oldukça fazla zararının olduğu ve betonu çatlatıp parçalayarak kullanım ömrünü oldukça azalttığı bilinmektedir. Sülfat iyonlarının bu olumsuz etkisine karşı yüksek fırın cürufunun kullanılması ve cürufun da bazı özelliklerinin iyileştirilerek düşük reaksiyon sürelerinin daha hızlı hale gelmesinin sağlanması yüksek fırın cürufu kullanılan betonlardaki ilk yaşlarda görülen dayanım kaybının da önüne geçecek ve doğru seçilen yüksek fırın cürufu ve su miktarı ile çok yüksek dayanıma ve dayanıklılığa sahip betonların üretimi gerçekleştirilebilir [26].

Son yıllarda sadece Portland çimentosu kullanılarak üretilen betonların zararlı çevresel etkilere maruz kaldığında yeterli ve istenen dayanıklılığı gösteremediği anlaşılmış

ve özellikle betona etki eden sülfatın zararlı etkilerini ortadan kaldırmak için yüksek fırın cürufu kullanımının çok yerinde olacağı görüşünde birleşmiştir. Diğer taraftan, yüksek fırın cürufu kullanıldığı durumlarda betonun su ihtiyacında da azalma olduğundan, betona sonradan akışkanlaştırıcı madde eklendiğinde ortaya çıkan çeşitli sorunlar kendiliğinden ortadan kalkmış olur. Bunun yanında, portland çimentosu ile yüksek fırın cüruflarının belli oranlarda ikame edilmesiyle betondaki boşluk yapısı ve çevresel koşullara karşı dayanıklılık yönünde pek çok üstünlüğü vardır. Betonda yüksek fırın cürufu içeren çimento kullanımının en önemli yararı gözenek yapısını azaltarak betonun iç bölgelerine zararlı kimyasal maddelerin ulaşmasını engellemesi sayesinde dayanıklılığı arttırmasıdır.

Bu çalışmada da Bankamız tarafından yürütülen yapım işlerinde portland çimentosu-cüruf sistemlerindeki yüksek cüruf ikame oranlarıyla uzun ömürlü, sülfatın yıpratıcı etkilerinden en az etkilenen ve en düşük maliyetli eserlerin ortaya çıkarılması konusu irdelenmiştir.

2. BETONUN BİLEŞENLERİ

2.1. Agregas

2.1.1. Agreganın tanımı, çeşitleri ve özellikleri

Beton üretiminde kullanılan kum, çakıl, kırmataş gibi malzemelerin genel adı agregadır. Beton agregası, beton veya harç yapımında çimento ve su karışımından oluşan bağlayıcı malzeme ile birlikte bir araya getirilen, organik olmayan, doğal veya yapay malzemenin genellikle 100 mm' yi aşmayan (hatta yapı betonlarında çoğu zaman 63 mm' yi geçmeyen büyüklüklerdeki kırılmamış veya kırılmış tanelerin oluşturduğu bir yığındır). Beton yapımında kullanılan çeşitli agregalardan bazı örnekler şunlardır: kum, çakıl, kırmataş, yüksek fırın cürufu, pişmiş kil, bims, genişletilmiş perlit ve uçucu külden elde edilen uçucu kül agregası [27].

Beton imalatında çimento ile birlikte kullanılan agreganın en önemli faydası, beton sertleştiğinde bünyesinde meydana gelebilecek hacim değişikliklerinin önüne geçmek, betonun aşınma direncini arttırmak, çevresel faktörlere karşı dayanıklılığın artmasını sağlamak ve kendi doğal yapısının sağlam ve dayanıklı olmasından ötürü betonun taşıma gücünü iyileştirmesidir [4].

Agreganın fiziksel özellikleri denildiğinde göz önüne alınan başlıca özellikler; Agregadaki mevcut rutubet durumu ve agreganın su emme kapasitesi, özgül ağırlık, birim ağırlık ve boşluk oranı, porozite (gözeneklilik), donma-çözülme ve diğer fiziksel etkenlere karşı dayanıklılık [8].

Agregalarda aranan en önemli özellikler şunlardır:

- Sert yapıda, dayanıklılığı yüksek ve boşluk oranı minimum seviyede olmalı,
- Agregas yığınının içinde ağaç parçası vb. gibi dayanımı azaltıcı yabancı maddeler bulunmamalı,
- Agregas tanelerinin üzeri çimento ile agregas arasındaki aderansı azaltıcı toprak vb. gibi yabancı maddeler olmamalı,
- Alkali maddelerle kimyasal tepkimeye girmemeleri,

- Agregalarda Standartlarda belirtilen deneyler titizlikle yapılarak kalitenin devamlılığı kontrol edilmelidir [27].

Agrega, kaba ve ince agrega olarak iki kısımda incelenebilir. Şantiyelerde kaba agrega “mıcır” ya da “çakıl”, ince agrega “kum” olarak isimlendirilir. Beton hacminin % 60 - 80’ ini agrega bileşeni meydana getirdiği için, seçiminde titizlik gösterilmesi gerekmektedir. Agreganın, gereken mukavemete sahip olmalı ve dış etkenlere dayanabilmelidir [27].

Uygun miktarda agrega kullanılarak hazırlanan betonlarda, hiç agrega kullanılmayan betonlara göre çok daha miktarda hacim farklılıkları gözlenmiştir. Buradan agreganın betonun beton içerisinde meydana gelebilecek hacimsel değişimleri belirli oranlarda sınırladığı sonucuna varılabilir [27].

Beton yapımında kullanılacak olan agregalar 706 numaralı Türk Standardında belirtilen özelliklerde olmalıdırlar. Bunun yanında su ile teması halinde özelliğinde herhangi bir şey kaybetmemeli çimentodaki maddeler ile zararlı kimyasal reaksiyonlara girmemeli ve donatının paslanma karşı korunma direncini düşürmemelidir [4].

2.2. Çimentolar

2.2.1. Çimentonun tanımı

Çimento, ilkel maddeleri kalker ve kil olan mineral parçalarını (kum, çakıl, tuğla, briket vb.) yapıştırma için kullanılan bir malzemedir. Çimentonun bu yapıştırma özelliğini yerine getirebilmesi için mutlaka suya ihtiyaç vardır. Çimento birçok beton karışımında hacimce en küçük yeri işgal eden bileşendir; ancak beton bileşenleri içinde en önemlisidir [4].

Çimento sözcüğü, yontulmuş taş anlamındaki Latince “Caementum” sözcüğünden türetilmiştir. Çimento inşaat teknolojisine göre yapı malzemeleri grubuna giren hidrolik bağlayıcı bir inşaat malzemesidir. Çimentoya özelliklerini kazandıran iki öğeden biri hammadde bileşimi, diğeri ise klinkerin ısısal işlemleridir. Klinker bileşimi, esas olarak hammadde karışımının kompozisyonuna sıkı sıkıya bağlıdır. Ayrıca kullanılan yakıt cinsi

ve yakıt içerisinde kül meydana getiren maddelerde klinker bileşimini etkileyen faktörlerdir [10].

Çimento büyük tesislerde içinde çok fazla detay barındıran bir procesten geçerek üretilir. Çimentonun temel ham maddeleri, kireç taşı ve kildir. Silis, alümin ve demir oksitle birleşme özelliği vardır. Kıl, saf olmayan alüminyum, kalsiyum ve demir silikattır. Çimento üretiminde amaç, bu maddeleri belirli oranlarda karıştırmak ve yüksek sıcaklıkta (1350 - 1500 °C) pişirmektir. Karıştırılan bu maddeler yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılarak birtakım değişikliklere uğratılır. Kireç taşından CaO, kilden SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ meydana gelir. Bu maddeler yine yüksek sıcaklıkta aralarında birleşerek çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandıran silikat ve alüminatları meydana getirirler. Çimento üretiminde hammadde olarak, klinkere % 3 - 6 oranında alçı taşı (CaSO₄, 2H₂O) katılır. Klinker ve alçı taşı aynı anda öğütülerek bir araya getirilir. Alçı taşının görevi, çimentoda priz süresini ayarlamaktır. Klinkere öğütme sırasında katkı maddesi olarak % 2 - 3 gibi az bir oranda, kireç taşı da katılmaktadır. Kireç taşı daha kolay öğütülebildiğinden daha küçük parçalara ayrılabilir fakat klinker sert özelliğe sahip bir madde olduğundan daha iri taneli olarak kalır. Kireç taşı daha küçük taneli yapıda olduğundan çimentonun içerisindeki boşluklu yapıyı doldurarak mukavemetini ve işlenebilirliğini artırır, kolay yayılmasını sağlar [10].

2.2.2. Çimentonun tarihçesi

İnsanoğlu çok eski çağlardan günümüze kadar doğada buldukları taş ve kaya parçalarını bir araya getirip birbirlerine tutunmalarını sağlayacak yapıştırıcı özellikte bir malzeme bulmaya çalışmıştır. Eski çağlarda bile yapıştırıcı malzemenin yapı tasarımlarında insanlara daha esnek hareket etme imkânı tanıyacağına farkına varılmıştır. Dünya üzerinde geçmiş çağlardan günümüze kadar uzanan süreçte bilinen en eski yapıştırıcı madde niteliğindeki ürün çamurdur. Günümüzde bile ülkemizde ve Dünya'nın diğer birçok ülkesinde çamur ve çeşitli bitkilerin karıştırılmasıyla elde edilen ürünler yapıştırıcı malzeme olarak kullanılmaktadır [10].

M.Ö. 300' lü yıllarda eski Mısırlılar, Keops piramidini inşa ederken alçı harcı kullanmışlardır. Alçı harcı, doğada bulunan alçı taşının pişirilerek çeşitli işlemlerden geçirilmesi sonucu oluşmaktadır. Yunan ve Romalılar da killi kalkerleri pişirmiş ve su

kireci elde etmişlerdir [11].

Yapıştırıcı malzeme üzerine yapılan birkaç araştırma ve çalışmadan sonra, İngiltere' nin Leeds şehrinde yapı işlerine ilgi duyan Joseph Aspdin, bağlayıcı malzeme olarak üzerinde çalıştığı çimentonun özelliklerini geliştirerek 1824 yılında Portland çimentosunun patentini aldı. Portland çimentosunun patentinin de alınmasıyla Avrupa ve Kuzey Amerika ülkelerinde bağlayıcı malzeme olarak çimentonun kullanımı hızlı bir artış göstermiştir [11].

Çimentoların üretilmesi aşamasında döner fırınlar kullanılmaktaydı ve bu malzemenin seri bir şekilde üretilmesi için döner fırınların da geliştirilmesini gerekli kılmaktaydı. Döner fırınların geliştirilmesi için çeşitli araştırmaların yapılmış ve Fredrick Ransome isimli araştırmacı 1885 yılında döner fırını için patent aldı. Bu gelişme çimento endüstrisinin gelişimine katkı sağlayacak en önemli olaylardan biri olarak tarihe geçti. Ransome' dan ardından Amerika' lı bilim adamları bu buluşu geliştirmek için çeşitli çalışmalar yapmaya devam ettiler. Hurry ve Seaman isimli araştırmacılar Amerika' da ekonomik olarak çalışan döner fırınları geliştirerek üretime başlanmasını sağlamışlardır [11].

Döner fırınların ekonomik çalışma özelliğinin olması ve seri olarak üretimine başlanmasıyla Portland çimentosunun üretiminde de artış yaşanmıştır. Bu aşamadan sonra çimento yapımında kullanılan hammaddeler ve çimentolarla ilgili deney yöntemleri ve karakterizasyonlar üzerine çalışmalar başlamıştır. Bu süre içerisinde çok fazla miktarda laboratuvar çalışması yapılmış, 1900' lerin başlarında çimento ile ilgili yapılan deneyler büyük ölçüde standartlaşmış oldu. Günümüze kadar geline süreçte bu standartların bir bölümü gözden geçirilip değiştirilerek teknolojik gelişmelerin ışığı altında, bütün dünyada çimento standartlarıyla yeni deneyler eklendi [11].

Türkiye' de TS EN 197-1 Standardında 27 farklı çimento beş ana tipte gruplandırılmış, bu çimento tipleri Çizelge 2.1.' de verilmiştir [17,18].

Çizelge 2.1. Türk standartlarındaki çimento tipleri

Ana Tipler	Çimento Tipleri	İşaretleri	Ana Bileşen										Minör İlave Bileşen	
			Klinker	Y. Fırın Cürufu S	Silis Dumanı D	Puzolan		Uçucu Kül		Pişmiş Şist T	Kalker			
						Doğal P	Yapay Q	Silisli V	Kalkersi W		L	LL		
CEM I	Portland Çimento	CEM I	95 - 100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
CEM II	Portland Cürufu Çimento	CEM II/A-S	80 - 94	6 - 20	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
		CEM II/B-S	65 - 79	21 - 35	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
	Portland Silis Dumanlı Çimento	CEM II/A-D	90 - 94	-	6 - 10	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
	Portland Puzolanlı Çimento	CEM II/A-P	80 - 94	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-P	65 - 79	-	-	21 - 35	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/A-Q	80 - 94	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-Q	65 - 79	-	-	-	21 - 35	-	-	-	-	-	-	0 - 5
	Portland Uçucu Küllü Çimento	CEM II/A-P	80 - 94	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-P	65 - 79	-	-	-	-	21 - 35	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/A-Q	80 - 94	-	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-Q	65 - 79	-	-	-	-	-	21 - 35	-	-	-	-	0 - 5
	Portland Pişmiş Şistli Çimento	CEM II/A-T	80 - 94	-	-	-	-	-	-	-	6 - 20	-	-	0 - 5
		CEM II/B-T	65 - 79	-	-	-	-	-	-	-	21 - 35	-	-	0 - 5
	Portland Kalkerli Çimento	CEM II/A-L	80 - 94	-	-	-	-	-	-	-	-	6 - 20	-	0 - 5
		CEM II/B-L	65 - 79	-	-	-	-	-	-	-	-	21 - 35	-	0 - 5
		CEM II/A-LL	80 - 94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6 - 20	0 - 5
CEM II/A-LL		65 - 79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21 - 35	0 - 5	

Çizelge 2.2. Türk standartlarındaki çimento tipleri (devamı)

Ana Tipler	Çimento Tipleri	İşaretleri	Ana Bileşen										Minör İlave Bileşen	
			Klinker	Yüksek Fırın Curufu S	Silis Dumanı D	Puzolan		Uçucu Kül		Pişmiş Şist T	Kalker			
						Doğal P	Yapay Q	Silisli V	Kalkersi W		L	LL		
CEM II	Portland Kompoze Çimento	CEM II/A-M	80 -94	←-----6 - 20-----→										0 - 5
		CEM II/B-M	65 - 79	←-----21 - 35-----→										0 - 5
CEM III	Yüksek Fırın Cürufu Çimento	CEM III/A	35 - 64	35 - 65	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
		CEM III/B	20 - 34	66 - 80	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
		CEM III/C	5 - 19	81 - 95	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
CEM IV	Puzolanik Çimento	CEM IV/A	65 - 89	-	←-----11 - 35-----→					-	-	-	0 - 5	
		CEM IV/B	46 - 64	-	←-----36 - 55-----→					-	-	-	0 - 5	
CEM V	Kompoze Çimento	CEM V/A	40 - 64	18 - 30	-	←-----18 - 30-----→		-	-	-	-	0 - 5		
		CEM V/B	20 - 39	31 - 50	-	←-----31 - 50-----→		-	-	-	-	0 -		

3. BETONDA DIŞ ETKENLERE KARŞI DAYANIKLILIK (DURABİLİTE)

Durabilite, betonun hizmet ömrü süresince içinde bulunduğu çevresel koŐullardan, fiziksel ve kimyasal etkilerden korunarak dayanım ve dayanıklılığını uzun süre korumasıdır. Amerikan Beton Enstitüsü Őartnamelerine durabilite, betonun hava ile temas ettiğinde, kimyasal etkilere maruz kaldığında ve beton için öngörülen diğer bazı kullanım koşullarına karşı dayanabilmesi olarak tanımlanmaktadır. Avusturalya Őartnamelerine göre ise, betonun, kendisi için öngörülen kullanım koŐulları altında özellikle, fiziksel etkilerin oluşturduğu aşınmaya, sülfat iyonlarının oluşturduğu tahribata karşı dayanıklı olması ve betonun içindeki boşluk yapısının çok az olması gerekmektedir [27].

Türk Standartlarında dayanım C20, C30 gibi gösterimlerle beton sınıfı olarak gösterilir. Fakat betonun çevresel koşullar altındaki durabilite özelliklerinin ne olması gerektiği konusunda bir bölüm bulunmamaktadır. Amerikan Beton Enstitüsü Őartnamelerine bakıldığında durabilite ile ilgili ayrı bir bölümün olduğu görölmektedir. Örneğin, Amerikan Őartnamelerinde, betonun maruz kaldığı donma-çözölme etkisine karşı, ihtiva etmesi gereken en az hava sürükleyici katkı miktarı belirtilmiŐken, bu konu hakkında Türk Standartlarında herhangi bir bilgiye rastlanmamaktadır. Amerikan Őartnamelerine göre betonun sülfatın zararlı etkilerine karşı korunması için betonda kullanılacak çimentoğun cinsi, çimento miktarı, su miktarı ve minimum beton sınıfı belirlenmiŐ Türk Standartlarında bu konu “Zararlı kimyasal etkileri olan su, zemin ve gazların etkisinde kalacak betonlar için yapım kuralları” baŐlıklı standartta açıklanmıŐtır [27].

Betonarme bir yapının uzun yıllar boyunca hizmet etmesi çevresel etkilere karşı dayanıklı olmasına bağlıdır. Beton ve betonarme elemanlar, zamanla bünyelerinde meydana gelen yorulmadan dolayı işlevselliklerini kaybederek çeşitli bozukluklara uğrayabilirler. Bazı yapılar uzun yıllar hizmet etmesine rağmen, bazı yapıların ise çok kısa sürede hizmet ömürlerinin bittiği görölmektedir. Bir yapının uzun yıllar hizmet etmesi doğru bir betonarme taşıyıcı sistemin seçimi, bu sistemin uygun Şekilde projelendirilip imal edilmesinin yanında durabilite özelliklerini iyileştirici önlemler almaya bağlıdır. Betonarme yapıların kalıcı olmaları yapı ürettirilirken kullanılan malzemelerin kalitesine,

mimari yapısal düzenlemelere, detaylara, işçilik kalitesine, denetime ve bakım işlemlerine bağlıdır. Bu sebepler dikkate alındığında yapının ortaya çıkmadan önce projelendirme işlemlerini yapan kişilerin, betonun çevresel etkilere karşı vereceği tepkiler hakkında çok iyi bilgiye sahip olmalıdır [27].

Betonarme yapılar için hizmet süreleri 7543 numaralı Türk Standartlarında belirtilmiştir. Bu standartta belirtilen limit değerlere göre normal ve devlet binaları için hizmet süresi 50 yıl; köprü, viyadük, baraj gibi önemli mühendislik yapıları için ise hizmet süresi 100 yıl olarak belirlenmiştir [27].

Dayanıklı bir betonarme yapı, kendisi için öngörülen çevresel faktörler altında, fiziksel ve kimyasal etkilere karşı uzun yıllar boyunca özelliğini kaybetmeden hizmet edebilmelidir. Betonarme yapıların maruz kaldığı çevresel koşullar altında özelliklerini çok kısa süreler içerisinde kaybetmeleri mali ve mühendislik açısından bakıldığında önemli sorunlar ortaya çıkarmanın yanında, zor elde edilen kaynakların israfına ve çevresel problemlere yol açar. Bir yapının durabilitesinin yeterli ve istenen seviyede olması beton imal edilirken en uygun malzeme çeşit ve miktarının belirlenmesi ile mümkündür. En başta yapılacak hatalar betonun istenen sürenin çok altında hizmet ederek ömrünü tamamlamasına yol açacaktır [13].

Boşluk yapısı ve miktarı betonun durabilitesi açısından çok önemlidir. Betonun akışkan geçirimsizliği; basınçlı su geçirimsizliği, kılcal yolla su emme ve buhar geçirimsizliğinden oluşur. Bu geçirimsizlik çeşitlerine önlem alınmaması durumunda, ortaya çıkan olumsuz durum durabilite bakımından oldukça önemli sorunlar doğurur [5]. Betonun boşluk yapısını etkileyen en önemli etkenler, beton yüzeyinde bulunan ve dış ortamla temas halinde bulunan boşluk ve çatlaklardır. Geçirimsizliği olumsuz olarak etkileyen bu boşluk ve çatlak yapısı betonun çevresel faktörlere karşı en zayıf olduğu bölge olarak bilinen agrega çimento ara yüzeyinde çok daha fazla görülür [5]. Betonda oluşan bu büyük boşluklar çimentoyu üretirken uyulması gereken kuralların göz ardı edilip imalatın oldukça yetersiz teknik koşullar altında yapılıyor olmasından kaynaklanmaktadır. Çimento hamurundaki ve betondaki boşluklar, mikro, kapiler ve makro olarak gruplandırılabilir. Betonun durabilitesine zarar veren boşluklar ince yapıdaki kılcal boşluklar ile çok büyük yapıdaki makro boşluklardır [8].

Betondaki boşluklu yapıya etki eden en önemli faktörlerden birisi de betonun içindeki su miktarı, başka bir deyişle su/çimento oranıdır. Yapılan araştırmalar, %93 oranında bünyesindeki kimyasal reaksiyonları tamamlamış betonların su/çimento oranının 0,70' den 0,30 değerine düşmesi betonun geçirimsizlik katsayısının yaklaşık 100 kat azaldığını ispatlamıştır. Yapılan bir diğer araştırmaya göre ise su/çimento oranının 0,40' ın üzerine çıkmasıyla beton yüzeyinde bulunan boşlukların birbirleriyle irtibatının kesilememesi nedeniyle geçirimsizliğin hızlı bir şekilde artış gösterdiği anlaşılmıştır [8].

Bütün bunların yanında aynı özellikteki beton numunelerinden ilk yedi günlük bakım kürü özenli ve dikkatli bir şekilde yapılan örneklerle özensiz bir şekilde yapılan örnekler karşılaştırıldığında iki grup arasında betonun dayanım ve boşluk yapısı ile ilgili önemli değişimler olduğu bilinmektedir. Özellikle yüksek fırın cürufu gibi katkı maddelerinin yüksek olduğu betonlarda bakım ve küre çok daha fazla dikkat edilmeli ve kür süresi de mümkün olduğunca uzun tutulmalıdır [14].

Betonun içindeki çimentonun kimyasal reaksiyon sürecinin sağlıklı bir şekilde gerçekleşmesi için gereken zaman, en fazla betonun içerisindeki su miktarı ve kürün uygulandığı süre ile ilgilidir. Aynı koşullarda saklanan betonların içindeki boşluk miktarları su/çimento oranına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Örnek vermek gerekirse su/çimento oranı 0,40 olan bir betondaki boşluk yapısı 3 gün içerisinde iyileşirken su/çimento oranı 0,70 değerine kadar yükseltildiğinde buna bağlı olarak boşlukların iyileşme süresi de 1 yıla kadar uzamaktadır [8].

Durabilitenin yetersizliğinden dolayı betonda görülen dayanım ve dayanıklılık kaybı; çevresel koşulların yanı sıra, fiziksel, kimyasal, biyolojik veya mekanik durumlardan kaynaklı olması muhtemeldir.

Durabilitede yaşanan bu kayıp çoğu zaman betonun kalitesini yükseltilmesiyle ortadan kaldırılabilir. Fakat bazen öyle durumlarla karşılaşılır ki yüksek kalitede diyebileceğimiz betonlar dahi daha fazla dış korumaya ve daha farklı önlemler almaya zorlayabilirler. Genellikle, durabilitede yaşanan kayıplar çok yönlü değerlendirilmelidir [27].

3.1. Durabiliteye Etki Eden Fiziksel Faktörler

3.1.1. Donma ve çözülme etkisi

Suyun donduğunda hacminin yaklaşık %9 arttığı düşünüldüğünde, donma noktasının altındaki sıcaklıklarda beton döküldüğünde gerekli önlemler alınmazsa beton dış yüzeyinde buz tabakası oluşmaya başlar ve oluşan bu buz tabakası beton içindeki boşluklarda kendine yer edinir. Suyun boşluklara yerleşip buz haline dönüşmesiyle iç gerilmeler artarak betonun içinde bulunan agrega ile bağlayıcı malzeme arasındaki bağlar kopar [27].

Beton imalatı sırasında çimento ve suyun kimyasal reaksiyona girmesi sonucunda bir ısı ortaya çıkarılır. Isınan su betonun ısısı düşük olan bölgelerine doğru ilerler ve bu bölgede donarak daha büyük buz kütlelerinin oluşmasına yol açarlar. Herhangi bir önlem alınmadığı takdirde -12 °C' den daha düşük sıcaklıklarda betonun dayanım kazanmadığı kabul edilir. Sıcaklık donma noktasının üzerine çıktığında betonun içerisindeki buzlar çözülür ve boşluklu bir yapı ortaya çıkar. Bu durumda betonun mukavemeti istenen değerlerin çok daha altında çıkar [27].

3.1.2. Erozyon Etkisi

Erozyon, içinde askı halinde parçacıklar bulunan sıvıların özellikle yüksek hızlarda beton yüzeyini çizerek aşındırmasıdır. Bu olaya daha çok Bankamız uygulama alanlarının içinde bulunduğu su yapılarında ve beton borularda rastlanır. Erozyonun ne kadar şiddetli olacağı suyun içindeki parçacık miktarı, şekli, sertliği ve suyun akış hızına bağlıdır. Katı tanelerin miktarlarının ve büyüklüklerinin az olması, suyun akış hızının belli bir seviyenin altında kalması halinde erozyonun ihmal edilebilir mertebelerde olması muhtemeldir [27].

3.1.3. Aşınma etkisi

Betonun dış yüzeyinin sürtünmenin etkisi ile zaman içerisinde kütle kaybına uğraması olarak açıklanabilir (Yaya trafiği, araçlar, su gibi). Basınç dayanımı yüksek olan betonların aşınma dirençleri de yüksek olmaktadır. Sürtünme yoluyla aşınmaya uğrayacak

bölgelerin yoğunluk oranına göre dayanımı yüksek betonlar tercih edilmelidir [27].

Aşınmaya karşı alınabilecek diğer önlemler şöyle sıralanabilir:

- Betonun aşınmasını önleyecek sert ve sağlam agrega tercih etmek
- Su/çimento oranı düşük beton üreterek dayanımı arttırmak
- Beton yüzeyinde sürtünmenin azalmasını sağlayacak katkı maddelerini betona katmak
- Betonun yüzeyini daha sert hale getirebilecek malzemeleri tercih etmek [27].

3.1.4. Kavitasyon etkisi

Kavitasyon, su yapılarında rastlanan betonun oyulması olayıdır. Suyun yüksek hızlarda aktığı yerlerde yapılan özellikle altyapı inşaatlarında suyun hızı ile birlikte betonun da yüzeyinde bozulmalar meydana gelmektedir. Beton yüzeyinde meydana bu bozulmalar akım düzenini bozarak yapının üzerinde farklı basınç bölgelerinin oluşmasına yol açarlar. Yapının üzerinden akan sudaki basınç suyun içindeki buharın basıncından küçükse hava kabarcıkları meydana gelmektedir. Meydana gelen hava kabarcıkları suyun basıncının yüksek olduğu kısımlara doğru ilerlediğinde ani şekilde basıncın etkisiyle suyun dibine doğru çökerek beton yüzeyinde darbeler oluşturur. Bu durum sürekli tekrarlandığı takdirde beton dış yüzeyinde aşınma başlar ve betonun yüzeyinde bozulmalar meydana gelerek durabilitede azalmalar meydana getirir [27].

3.1.5. Asfalt ve beton yollarda kullanılan tuzların etkisi

Buz çözücü olarak, en çok NaCl ve CaCl₂ kullanılmaktadır. Bazen üre (NH₂CONH₂) bu amaçla tüketilir. Üre, betona NaCl ve CaCl₂ kadar zarar vermez ancak buz çözücü etkisi de diğerleri kadar güçlü değildir. Amonyum tuzları ise düşük yoğunluklarda bile zararlı olduklarından kullanılmamaları önerilir [27].

Tuzların ve bu amaçla kullanılan bazı kimyasalların buz çözücü etkisi, suyun donma noktasını düşürmeleridir. Belirli miktarda buz çözmek için en uygun tuz eriyiği miktarlarının saptanması gerekir. Fazla atılan tuzun yararı olmadığı gibi zararı da vardır. Buz tabakası üzerine atılan tuzlar, buzun çözülmesi nedeniyle betonun dışında önemli bir termal şok oluşmasına yol açarlar. Beton dış yüzü ile iç bölgesi arasındaki ısı farklılıkları

iç gerilmeler meydana getirir ve bu gerilmeler beton yüzeyinde çatlak oluşumuna yol açar. Tuzların, boşluk çapları küçüldükçe beton içinde ilerlemeleri güçleşir. Böylece buz çözücü tuzla maruz betonda, boşluk çaplarına bağlı olarak donma derecelerinde görülen farklılık azalmaktadır. Beton yüzeyinden derinlere inildikçe beton sıcaklığının ve buz çözücü tuzların miktarlarının değişken olması, beton tabakalarının farklı zamanlarda donup çözülmesine yol açar. Bu durumda betonda kabuk halinde soyulmalar ve dökülmeler görülebilmektedir. Buz çözücü tuzların beton üzerindeki olumsuz etkileri yalnızca donma-çözülme olayının şiddetini artırmaları ile sınırlı değildir. Aynı zamanda betonarme donatısında klorür korozyonuna yol açarlar [27].

Soğuk bölgelerde yolların buz tutmaması amacıyla yapılan tuzlama işlemi sonunda tuzun bir kısmı betonun üst tabakaları tarafından emilir. Böyle durumlarda osmotik basınç artar ve su betonun içerisinde soğuk bölgelere doğru ilerler. Bu durum betonun donma-çözülme etkisinden kaynaklı olarak görmüş olduğu zararın şiddetini artırır [27].

3.1.6. Deniz suyu etkisi

Deniz suları üzerinde yapılan analizler sonucunda, deniz suyunun içeriğinde değişik türlerde ve miktarlarda betona zarar verdiği bilinen tuzlar bulunmaktadır. Sülfat iyonlarının beton yapıları vermiş olduğu zararlar incelendiğinde, deniz suyunun ihtiva ettiği sülfatın yeraltı ve zemin suyu içerisindeki sülfatlara oranla daha az zararlı etkisinin olduğu ortaya çıkmıştır. Bunun sebebi ise deniz suyunun yüksek miktarda klorür ihtiva ediyor olmasıdır. Klorür iyonları sülfat atağı sonucu betonun içinde oluşan alçıtaşı ve etrenjitin bir miktar çözünmesini sağlayarak zararlı etkisini azaltmaktadır. Deniz suyu etkisine açık bölgelerde bulunan betonarme yapılar sülfatın zararlı etkilerinin yanısıra deniz suyunda bulunan farklı tuz kristallerinin de zararlı etkisine maruz kalmaktadırlar. Deniz suyunun dalgalar sonucu alçalıp artan su seviyesi ile beton ıslanma kuruma şeklinde bir döngüye maruz kalır. Bu durumda tuz kristalleri beton bünyesine girip o bölgelerde kurumaktadırlar. Bu tuzların kuruması sonucu hacimlerinde meydana gelen artışla birlikte beton içindeki gerilmeler artarak betonu çatlatıp durabilitesini azaltırlar. Bu sebeplerden ötürü deniz suyunun zararlı etkilerine maruz kalan betonların imalatına gereken hassasiyet gösterilmeli, özellikle boşluk miktarının minimum seviyelerde tutmak için su/çimento oranının çok dikkatli şekilde belirlenmesi ve en az seviyede tutulması gerekmektedir.

Ayrıca donatının korozyona karşı korunmasını sağlamak için paspayı miktarına da dikkat edilmelidir [13].

Deniz suyunun asıl zarar içeriğinde bulunan klorür iyonlarının vermiş olduğu zarardır. Klorür iyonları betonarme yapının içindeki donatının paslanmasını hızlandırarak betonun bu olaydan aşırı zarar görmesine neden olurlar [13].

3.2. Durabiliteye Etki Eden Kimyasal Faktörler

3.2.1. Asit ve asit yağmurlarının etkileri

Nemli ortamlarda, atmosferde bulunan bazı gazlar; çözünmek suretiyle asitleri oluşturarak ve çimento klinker bileşikleri ile reaksiyona girerek yumuşak, çok zayıf bir beton kitlesi oluşmasına neden olabilirler. Beton elemanlara hasar verecek ileri derecede paslanma; buz eritmek amacıyla kullanılan tuzların miktarının artması, asit yağmuru, asit sisi ve kuru asit kalıntıları formunda asit birikintilerine neden olan kükürt dioksit ve azot dioksit (SO_2 ve NO_2) nedeniyle meydana gelebilmektedir. Hemen hemen bütün asitler kireç, çimento, harç ve beton üzerine değişik şekillerde etki ederler. Beton yapının aside maruz kalmasındaki en alışılmış sebep betonun yer altı madenlerine yakın mesafelerde bulunmasıdır. Bu madenlerden çıkan drenaj sularının içerdiği asit bazen ansızın düşük pH değerlerine iner. pH 7 seviyesi nötr, 7'den yüksek değerlerde bazik, 7'den düşük değerlerde ise asidik olarak tanımlanmıştır. Yüzde 15-20 oranında sülfürik asit çözeltisinin pH değeri 1 olacaktır. Bu tür çözeltiler betona çok çabuk hasar verirler. pH 5-6 değerindeki seviyelere sahip asidik sularda eğer betona uzun süre temas ederlerse hasar verebilirler [27].

Asit betonun portland çimento harcı matrisiyle reaksiyona girer ve çimentoyu kalsiyum tuzlarına dönüştürür ve bundan akıtılan sularla yıkanarak atılabilir. Kaba agrega genellikle zarar görmemiş fakat maruz kalmış olarak kalır. Asit hasarlı betonun görünümü bir dereceye kadar aşınım hasarlarına benzerlik gösterir, yalnız kaba agreganın maruz kalması daha belirgin olmakta ve parlak görünmemektedir. Asit hasarları betonun maruz kalan dış yüzeyinde başlar ve belirginleşmeye başlar fakat azalan mesafelerle yapının iç kısımlarına doğru genişlemeye devam eder. Asit genellikle yüzeyde yoğunlaşır. Betonun

içine işlediğinde ise Portland çimentosu ile tepkimeye girerek nötrale olur. Yapının derinliklerindeki çimento tepkimelerle zayıflamaya başlar [27].

3.2.2. Magnezyum sülfat etkileri

Magnezyum, gümüş renkli, hafif ve parlak bir metaldir. Yüksek kimyasal reaksiyon kabiliyetinden dolayı tabiattaki saf olarak magnezyuma rastlanmamaktadır. Doğadaki toplam magnezyumun 2/3 kadarının silikatlardan meydana geldiği bilinmektedir [27].

Kayaçlardaki SiO_2 miktarı arttıkça, asitleşme oranı arttıkça Mg miktarında da hızlı bir düşüş yaşanmaktadır.

Sülfat iyonları betonun bağlayıcı maddesini oluşturan çimentonun içindeki bazı elementlerle kimyasal tepkimelere girerek betonun özelliğinin zamanla kaybederek dayanımında ve dayanıklılığında çok ciddi azalmalara neden olmaktadır. Sülfat iyonlarının etkisi altında uzun süre kalan betonlarda, betonun köşe ve kenar kısımlarından başlayıp her tarafa yayılan beyaz lekeler, çatlaklar ve dökülmeler görülür. Beton dayanımını iyice kaybettiğinden kolayca ufalanarak dağılır [27].

Sülfat iyonları betonun içerisine toprakla temas eden yüzeyden veya yeraltı suyu seviyesinin yüksek olduğu yerlerde zemindeki suyla birlikte girebilir. Bitki yoğunluğunun az olduğu, çalılık dışında herhangi bitki örtüsüne sahip olmayan arazilerde sülfat iyonlarının yoğun olarak bulunabileceği her zaman düşünülmelidir [27].

Sülfat Hücumuna Karşı Alınabilecek Başlıca Önlemler:

- Beton imalatında sülfatın zararlı etkisine karşı dirençli çimento tercih etmek,
- Beton boşluk yapısını iyileştirici katkı maddeleri eklemek,
- Sülfatın çok yoğun olduğu bölgelerde çimento dozajının artırılması,
- Betonun içindeki su miktarını minimum seviyeye düşürmek,
- Gereken durumlarda betonarme yapının zemininin uygun yalıtım malzemeleriyle zemin suyundan tamamen korunması şeklinde önlemler alınabilir [27].

3.2.3. Karbonatlaşma ve alkali etkileri

Betonu oluşturan agregaların hepsinin aynı özellikte olduğu söylenemez. Agregaların bazıları birbirlerinden farklı özellik göstererek çeşitli kimyasal reaksiyonlara girip betondaki genleşme miktarını arttırarak betonun çatlamasına ve bozulmasına neden olabilirler.

Beton imalatı yapılırken ince taneli, mineral katkıları kullanarak, yüksek fırın cürüflü çimentolar tercih edilerek, su/çimento oranının düşürülmesi, karbonatlaşma ve alkali agrega reaksiyonundan betonu korumak için uygulanabilecek yöntemler arasındadır. Alkali maddeler betonun içerisine çimento ve agrega dışında, beton karışım suyu, beton katkı maddeleri, buz çözücü tuzlar, zemin suyu, deniz suyu, beton dökümünden sonra uygulanan kürün içindeki su ve sanayi tesislerinin atık suları aracılığıyla girebilirler [27].

Sönmüş kireç betonun içinde bulunmaktadır ve donatıyı paslanmaya karşı koruyan en önemli maddedir. Ancak sönmüş kireç zamanla karbonatlaşma ile ortadan kalkabilir. Sönmüş kirecin (CO_2) karbondioksit ile reaksiyona girmesi sonucu kireçtaşı oluşur. İşte bu reaksiyon betonun pH seviyesini düşürür ve bunun sonucunda donatıda korozyon meydana gelir. Betonun dış yüzeyinden iç yüzeyine doğru gidildikçe karbonatlaşma miktarı azalır. Bu sebepten ötürü karbonatlaşma daha çok dış bölgelerde, paspayı bölgelerinde yoğun olarak görülür. Burada paspayının önemi çok daha fazla hissedilmektedir. Karbonatlaşma olabilecek ortamlarda, özellikle zeminin hangi özelliklerde olduğu, varsa zemin suyunun analizinin yapılması bu çıkan sonuçlara göre en uygun paspayının seçilmesi gerekmektedir.

Basınç dayanım değerleri 30 Mpa' nın (C30) altında olan betonların karbonatlaşma derinliklerinin 1,5 santimetreye sadece birkaç yıl içerisinde ulaşacağı çeşitli araştırmalar sonucu ortaya çıkmıştır [27].

Bu durumdan çıkan sonuç projelerde 2-3 cm olarak öngörülen paspaylarının karbonatlaşma etkisine karşı çok yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır. Ayrıca dayanım sınıfı C20 olan bir betonda 30 yılın sonunda yaklaşık olarak 4,5 karbonatlaşma derinliği

oluşmaktadır. Deprem yönetmeliğine göre 1. Derece deprem bölgelerinde kullanılabilir en düşük beton sınıfı olan C20 sınıfı betonun da çok yetersiz olduğu görülmektedir [27].

Bu olumsuz durumlara karşı alınabilecek önlemlerden bazıları; su/çimento oranını minimum seviyede tutmak, betonun dozajını yükseltmek, betona uygulanan küre dikkat etmek, paspayı miktarını gereken seviyede tutmak, betonun dayanım sınıfını da minimum C30 olarak belirlemek ve betonu sulu ve nemi yüksek ortamlardan mümkün olduğunca uzak tutmaktır [27].

3.2.4. Sülfat etkisi

Sülfat tuzları yeraltı sularında, topraklarda ve cüruflla doldurulmuş geniş arazilerde bulunabilmektedir. Betonun içerisine özellikle yeraltı suyu ile sızarak giren sülfat iyonları, beton içerisindeki genişleme miktarını arttırıp çatlaklar oluşmasına yol açan kimyasal reaksiyonların başlamasına neden olur. Sülfat iyonlarının betonda oluşturduğu hasara verici etkiye, "sülfat hücumu" denmektedir. Sülfat iyonlarının oluşturmuş olduğu zararlı etkiler en fazla betonarme yapıların temellerinde, istinat duvarlarında, kanal kaplama betonlarında ve altyapı işlerinde kullanılan beton borularda görülür [27].

Sülfat Hücumu Karşısında Betonda Yer Alan Reaksiyonların Mekanizması: C_2S , C_3S , C_3A ve C_4AF gibi ana bileşenler Portland çimentosunun ana maddeleridir. Çimentonun su ile bir araya gelmesiyle oluşan kimyasal reaksiyonlar sonucu ortaya değişik hidratasyon ürünlerinin çıkmasına neden olur. Çimento içerisinde bulunan C_2S ve C_3S ana maddelerinin hidrate olması sonucu, çimentoya bağlayıcılık özelliğini kazandıran kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jelleri ile kalsiyum hidroksit (CH) oluşmasına yol açmaktadır. Çimento içerisinde yer alan alçı, C_4AF ve özellikle C_3A ana maddeleri ve suyun bir araya gelmesiyle oluşan kimyasal reaksiyonlar sonucu, etrenjit ($C_6AS_3H_{32}$), ve kalsiyum-alumino-monosülfohidrat (C_4ASH_{12}) gibi ürünler oluşmaktadır. Çimentonun su ile reaksiyona girmesi sonucu oluşan en önemli hidratasyon ürünleri, C-S-H, CH, ve kalsiyum-alumino-monosülfohidratlardır [27].

Beton sertleştikten sonra sülfat etkisine bağlı olarak içerisinde oluşan alçıtaşı nedeniyle bir miktar hacim artışı meydana gelmektedir. Fakat en büyük hacim artışına

neden olan reaksiyon, alçıtaşı ile yarı kararlı durumdaki kalsiyumalümino-monosülfohidrat arasındaki meydana gelir ve bu reaksiyon sonucunda etrenjit denilen madde oluşur. Etrenjitler betonun içerisinde hacim artışına bağlı olarak çok büyük iç gerilmeler oluşturur ve betonun parçalanıp dağılmasına neden olurlar [27].

- Sodyum Sülfat İle Magnezyum Sülfatın Betona Verdikleri Zararların Karşılaştırılması: Hem sodyum sülfat, hem de magnezyum sülfat, betonun içerisinde genişleme meydana getiren ürünlerin oluşmasına neden olmaktadır. Ancak, magnezyum sülfatın beton içerisindeki reaksiyonları sadece genişleme oluşturan ürünlerin ortaya çıkmasıyla sınırlı değildir. Magnezyum sülfat, çimentoya bağlayıcı özelliğini kazandıran kalsiyumsilika-hidrat ($C_3S_2H_3$) jelleri ile reaksiyona girerek çimentonun bağlayıcılık özelliğinin de azalmasına yol açmaktadır [117]. Magnezyum sülfatın betonun içerisinde girmiş olduğu reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan maddelerin hacmi sodyum sülfatın reaksiyona girerek oluşturduğu maddelerin hacminden daha büyüktür. Fakat, magnezyum sülfatın kalsiyum hidroksitle veya kalsiyum-silikahidrat ile girdiği reaksiyonlar sonucunda magnezyum hidroksit (MH) meydana gelmekte ve magnezyum hidroksit betonda oluşan boşlukların içerisine yerleşmektedir. Bu olay sonucunda betonun içindeki boşluklu yapı kısmen kapanmakta ve sülfatın betonun içindeki ilerleyişi yavaşlayarak yıpratıcı etkisi azalmaktadır. Magnezyum sülfatın girmiş olduğu reaksiyon sonucu ortaya çıkan bu ürünle yıpratıcı etkisinde azalma meydana gelerek sodyum sülfatından daha az olmaktadır [27].
- Suda ve Toprakta Yer Alan Sülfat Konsantrasyonunun Sülfat Hücumunun Hızına Etkisi: Betonun temas ettiği toprakta veya suda sülfat konsantrasyonu ne kadar yüksek olursa sülfatın yıpratıcı o kadar etkili olmakta ve beton daha çabuk hasar görek dayanımını kaybetmektedir [27].

Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), betonun sülfatın zararlı etkisi içinde bulunabileceği ortamları, sülfatın suda veya toprakta bulunduğu durumları göz önünde bulundurarak (ACI), bu ortamları "az etkili (yumuşak) ortam", "etkili ortam", "çok etkili ortam" ve "aşırı etkili ortam" şeklinde tanımlamaktadır [22].

Çizelge 3.1. Amerikan beton enstitüsü tarafından tanımlanan sülfat ortamları ve önerilen su/çimento oranları [27].

Sülfat Ortamı	Topraktaki suda çözünebilir SO ₄ miktarı (%)	Sudaki SO ₄ miktarı (ppm)*	Betondaki Maksimum Su/Çimento Oranı
Az Etkili	0.00- 0.10	0-150	
Etkili	0.10- 0.20	150-1500	0.50
Çok Etkili	0.20- 2.00	1500-10000	0.45
Aşırı Etkili	>2.00	> 10 000	0.45

*ppm = part per million = bir milyon içerisindeki kısım

Sülfat Hücumunu Azaltıcı Önlemler: Sülfat hücumunu azaltabilmek için alınacak başlıca önlemler şunlardır:

- Betonun imalatı yapılırken geçirimsiz özellikte olmasına dikkat edilmeli,
- Beton imalatı sırasında sülfat etkilerine karşı TS197-1 de belirtilen ve özellikle yüksek fırın cürufu içeriği yüksek çimentolar kullanılmalıdır.
- Betonun "Geçirimsiz" Olmasının etkisi: Sülfat iyonları betona toprakla temas eden yüzeylerden veya yer altı suyu ile birlikte girerler. Bu yüzden beton ne kadar geçirimsiz olursa sülfat iyonlarının betonun içine girmesi daha zor olacaktır [27].
- Çimento Tipinin Etkisi: Çimentonun içeriğinde bulunan kalsiyum-alumino-sülfohidratlar, çimentonun ana bileşenlerinden trikalsiyum alüminat (C₃A) ve çimentodaki alçıtaşının su ile girdiği tepkimelerin sonucunda meydana gelirler. Çimentonun içeriğindeki C₃A miktarı ne kadar düşerse, hidratasyon sonucu oluşabilecek etrenjit ve kalsiyum-alumino-monosülfohidrat miktarı o kadar az olacaktır. Bu yüzden, sülfata dayanımı yüksek betonların imalatında, C₃A miktarı daha düşük olan çimentolar kullanılmaktadır. (ASTM Tip V ve ASTM Tip II' deki maksimum C₃A miktarı, sırasıyla %5 ve %8 olarak sınırlandırılmıştır.) [27].
- İnce Taneli Puzolanik Katkı Maddelerinin Etkisi: Puzolanik katkı maddelerinin kullanılmasıyla beton içerisinde kullanılan Portland çimentosu miktarı da doğal olarak azalmaktadır. Portland çimentosu miktarındaki bu azalma çimentonun içeriğinde bulunan C₃A' nın da daha az olmasını sağlamaktadır. Öte yandan, puzolanik katkı

maddeleriyle üretilen betonlarda hidrasyon, öncelikli olarak, portland çimentosu ile su arasında olmaktadır. Puzolanların reaksiyon gösterebilmeleri C_3S ve C_2S ana bileşenlerinin; hidrasyonu ile ortaya çıkan kalsiyum hidroksit kullanılmasıyla gerçekleşmektedir. Puzolanik katkı maddeleriyle üretilen betonlarda, C_3S ve C_2S daha az olduğundan, betonun içindeki kalsiyum hidroksit miktarı da azalmaktadır. Bunun sonucunda da sülfat iyonları ile kalsiyum hidroksit arasındaki reaksiyonların bir ürünü olan alçıtaşı ve etrenjitin miktarı da azalacak, buna bağlı olarak betonun durabilitesi de artacaktır [13].

3.3. Sülfatın Bulunduğu Ortamlar

3.3.1. Agregada sülfat

Alçıtaşı, anhidrit, barit, markasit gibi mineralojik kökene sahip taneler agrega içerisinde sülfat olarak bulunabilir [28].

3.3.2. Zeminde sülfat

Tuz yataklarının etrafında magnezyum sülfat ve sodyum sülfat gibi kolay çözünebilen tuzlar bulunabilir. Bu tür zeminlerle temas halinde olan betonların hasar görmesi yüksek ihtimaldir. Ancak beton imalatı esnasında zeminin içerisinde bulunan sülfatın bu yıpratıcı etkisine karşı önlem alındığı takdirde sülfat etkisi en aza indirilmiş olur [28].

3.3.3. Beton karma suyunda sülfat

Beton üretilme aşamasında karışımın içine ilave edilecek su ile ilgili kirlilik parametrelerinin limit değerleri tam olarak belirtilmemiştir. Fakat betonun suyunda betonu aşındırıcı karbonik asit, mangan bileşikleri, amonyum tuzları, serbest klor, silt, yağ, organik maddeler, evsel ve sanayi tesislerinden çıkan atıklar bulunmamalıdır. Kısaca su içilebilir nitelikte ve kalitede olmalıdır. pH seviyesi 7 ve daha üzerinde olmalıdır [28].

3.3.4. Gazlarda sülfat

Sanayi tesislerinin faaliyet gösterdiği çevrenin havası SO_3 gazı ile kirlenmiş ise betonda sülfat tahribatına yol açabileceği gibi, SO_3 gazı betonun muhtevasında bulunan $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girerek alçı taşına oluşumuna yol açabilir. Alçı taşının oluşumu hacim artışıyla birlikte betondaki genleşme miktarını arttırarak çatlamların meydana gelmesini sağlar. Ayrıca SO_3 gazı havadaki nemle reaksiyona girmesi durumunda sülfürik asit meydana getirir ve zararlı etki yapabilir. Sanayi tesislerinin yoğun olduğu bölgelerde betona zararlı etkisi söz konusu olacak gazların yüksek yoğunlukta olması durumunda çıkan sonuçlara göre beton uygun bir madde ile yalıtılmalıdır [28].

3.3.5. Beton temas suyunda sülfat

Betonun yapısından kaynaklanan boşlukların olması, temas ettiği ortamdaki suyu içine almasını sağladığından, betonun temas ettiği suyun betona zararlı etki edecek nitelikte kirli olmaması gerekir. Doğada bulunan suların zararlı olup olmadıkları TS-3440' da belirtilmiş olan değerlere göre belirlenir. Bu değerler durağan veya düşük hızlarda akan, büyük miktarlarda zararlı madde ihtiva eden ve betonla direk temas halinde olan sular için geçerlidir [28].

3.4. Sülfat Tepkimeleri

Sülfat saldırısı hakkında bilinenlerin çoğu saf malzemelerle oluşturulmuş basit kimyasal sistemlerle kurgulanan laboratuvar deneylerine dayanmaktadır. Ancak gerçekte durum çok daha karmaşıktır. Bu sebeple sülfat etkisi uzun süredir araştırılmasına rağmen, bugün tam anlamıyla anlaşılabilmiş değildir [29]. Sülfat etkisi aslında inşaat mühendisleri, kimyagerler ve zemin mühendislerinden kurulu bir ekibin yoğun arazi ve laboratuvar çalışmaları ile ancak ortaya koyabileceği karmaşık bir konudur. Bu denli kapsamlı bir çalışmanın ortaya konulmaması halinde, bireysel araştırmacılar kendi alanları dışına çıkarak yorum yapmak durumunda kalmakta ve böylece bu konuda birçok hata ve eksiklikler ortaya çıkmaktadır [29]. Sülfat etkisi konusunda iki temel görüş hakimdir. Birinci düşünceye göre tepki mekanizmasına bakılmaksızın ortamda sülfat bulunması sülfat saldırısını ifade etmektedir. İkinci düşüncede ise sülfat saldırısı, hidrate olmuş

çimento hamuru ve sülfat iyonları arasında, çimento hamurunun kimyasal yapısını değiştirecek şekilde bir tepkime oluşması sonucuyla sınırlandırılmaktadır [29]. Sülfat saldırısı kimyasal ve fiziksel olmak üzere ikiye ayrılabilir. Sülfat etkisiyle ortada sadece kimyasal bir değişim söz konusuysa bu kimyasal sülfat saldırısıdır. Ancak, tuzların kristalleşmesi sonucu oluşan ve fiziksel bir etki mekanizmasıyla zarar veren etki türüne de fiziksel sülfat saldırısı denmektedir. Dolayısıyla fiziksel etki diğer tuzlar için de söz konusu olabilmektedir. Ayrıca bu tür fiziksel zararlar betondan, tuğlalara ve kayalara kadar birçok malzeme bünyesinde ortaya çıkmaktadır. Fiziksel etkiler kendini daha çok yüzey kavlanması şeklinde gösterebilmektedir [29]. Dış çevreden gelen sülfat iyonları sertleşmiş portland çimentosu hamuruyla reaksiyona girerek sık sık etrenjit (ettringite) ve jips oluşumuna sebebiyet vermektedir. Ayrıca bunların yanında thenardit (Na_2SO_4), mirabilit ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ve tomasit (thaumasite, $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$) minerallerinin oluşumuna da bazı araştırmalarda rastlanmıştır. Bu çalışmalarda, bu oluşumların tıpkı magnezyum sülfat (MgSO_4) saldırısında olduğu gibi, kalsiyum hidroksitin çözünmesi ve kalsiyum hidroksitin ve/veya kalsiyum silikat hidrat bileşiklerinin bozulması ile birlikte gerçekleşmesinin mümkün olabileceği üzerinde durulmaktadır. Özellikle, sülfat tuzlarının tekrarlı kristalleşmesi sonucu oluşan zarar, çimento hamuru ve sülfat iyonları arasındaki tepkimenin türünü ayırt etmede altı çizilerek ifade edilmesi gereken bir husustur. Sülfatça zengin ortamlarda, tekrarlı ıslanma ve kurumaya maruz kalan beton yapı elemanlarında, sülfat tuzlarının tekrarlı kristalleşmesi sebebiyle çatlama ve genleşmeler görülebilmektedir. Eğer bu kristalleşme betonda yüzeye yakın boşluklarda oluşursa daha büyük basınç oluşmakta ve daha büyük zararlara sebep olabilmektedir. Oluşan basınç, özellikle düşük nitelikli betonların çekme dayanımından çok daha yüksek olabilir, dolayısıyla kolaylıkla betonu çatlatabilir. Bu tür zararlar, doğrudan sülfat iyonları ve çimento hamuru arasındaki tepkime sonucu oluşmadığından, sebepleri itibariyle buna daha çok fiziksel sülfat etkisi denilmesi gerekmektedir [29].

Tepkime sonucu, thenarditin mirabilite dönüşmesi sırasında harç örneklerinde çevresel çekme gerilmesi 10-20 MPa dolayında artmaktadır. Bu artış da kaçınılmaz olarak beton numunelerin dağılmasına sebep olmaktadır. Betonun boşluk miktarı kristallerin büyümesinde önemli bir etkendir [29]. Bazı araştırmacılar ise fiziksel sülfat etkisini, sülfat saldırısından ayırarak tuz etkilerinin bir alt kolu olarak görmektedir [29]. Bu araştırmacılara göre klasik sülfat saldırısı etrenjit ve/veya jips oluşumuyla birlikte

değerlendirilmelidir. Fiziksel sülfat etkisinde ise sülfatın kristalleşmesi söz konusudur. Magnezyum sülfat da sodyum sülfata benzer olarak betonda zarara sebep olmaktadır [29]. Büyük çaplı sülfat iyonları oluşumu ve bunların kristal değişimleri ortaya çıkmaktadır. Burada önemli bir husus ise, epsomitenin su bırakması (dehidrasyon) için 70 °C' den daha yüksek bir sıcaklığın gerekmesidir. Bu sebeple, dönüşümlü bir tepkimenin oluşması çoğu durumda düşük bir ihtimal olarak görülmektedir [29]. Sülfat iyonları ile değişik fazlardaki hidrate olmuş çimento hamuru arasındaki kimyasal tepkime olarak tanımlanan sülfat etkisinin varlığının açık bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Tuzların tekrarlı kristalleşmesi ve asidik etkiyle oluşan mikro çatlaklar, sülfat etkisine karşı dirençli beton tasarımı yapan mühendisleri yanıltabilmektedir. Örneğin bazı çalışmalarda, sodyum klorit tuzları, nitratlar veya sülfatların, betonun yüzeyince emildiğinde ve su buharı gibi kristalize olduklarında yüksek kristalleşmeye veya osmotik basınca sebep olduğu ifade edilmektedir. Böyle bir süreç sülfat tuzlarıyla gerçekleşmemektedir. Dolayısıyla böyle bir durumda, sülfata dirençli çimento kullanmak gibi yollara başvurulması, tuz kristalleşmesini engellemeyeceği için gereksiz yere maliyeti artıracaktır. Bu sebeple yanlış teşhis koyup gereksiz önlemler almamak için bu tür tepkimelerin ayırt edici özelliklerinin tam anlamıyla ortaya konulması gerekmektedir [29]. Benzer şekilde, yüksek sülfat içeriğinin her zaman zararlı sülfat saldırısına sebep olmayacağı ifade edilmektedir [29]. Oluşan etrenjitin de yalnız başına sülfat saldırısı anlamına gelemeyeceğini, doğal olarak gözlenebilen bozulma olarak ifade ettiği çiçeklenme hadisesinin de başta sodyum sülfat olmak üzere, sodyum klorit, magnezyum sülfat ve diğer tuzların etkisinden ibaret olabileceği ifade edilmektedir [29]. Çiçeklenmenin özel durumlar dışında bir zarar olarak ifade edilemeyeceğini söylemektedir [29]. Bununla birlikte bazı araştırmacılara göre, sülfat etkisinde doğrudan toprakla temas veya sızıntı suyu yoksa ancak çiçeklenme hadisesi meydana gelmişse bu sodyum ve sülfat iyonlarının betonun gözenekli yapısı içerisinde hareket halinde olduğunu göstermektedir [29]. Böyle bir durumda sülfat saldırısı betonun içerisinde gerçekleşmektedir denilebilir [29].

3.5. Sülfatın Betona Etki Mekanizması ve Betonda Sülfat Tahribatı

Sülfatın betona vermiş olduğu zarar iki türlü reaksiyon sonucu meydana gelir;

1- Serbest kireç çimentonun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan ürünlerden olup sülfat iyonları ile yapmış olduğu reaksiyonlar sonucunda, kalsiyum sülfatı (alçı) meydana

getirir. Alçının oluşumu, Ca(OH)_2 kristalleri üzerinde iyon değişimi yoluyla oluşursa, betonun hacminde % 124 oranında artış olmaktadır [29].

2- Trikalsiyum alüminat ile alçının tepkimeye girmesiyle trikalsiyum sülfalüminat meydana gelir. Beyaz renkte ve iğne kristalli olan bu tuza candlot tuzu (etringit) veya çimento basili adı verilir [29].

Candlot tuzu yapısında 31 molekül su tutar. Bu yüzden bu tuz beton içinde oluşurken betonda % 227 oranında hacim artışı oluşturur. Bu hacim artışı ile beraber beton bünyesinde meydana gelen iç gerilmelerden ötürü, betonun zayıflayarak çatlar ve zamanla özelliğini tamamen yitirir [29].

Beton karma suyu içeriğinde sülfat bulunması durumunda; çimento bileşenlerinin yaklaşık %20' sini meydana getiren trikalsiyum alüminat zararlı reaksiyonu yapacak kadar etkili değildir. Fakat betonun temas ettiği suda çok az bir miktarda sülfat içeriğine sahip olsa da eğer su sürekli hareket halinde ise betonla sürekli temasta olduğu için sülfatın zararlı etkisi çok şiddetli olabilir [29].

Aynı zamanda zemin suyunda bulunan sülfat yoğunluğu az olsa bile dikkatle incelenmelidir. Çünkü beton içerisinde oluşan kılcal boşluklardan, yer altı suyu seviyesinin üstünde bulunan yapı bölümlerine taşınarak oluşan boşluklarda sülfat birikmesiyle bu bölgelerde genleşmeyi arttırır. Böyle durumlarda zeminde ve zemin suyundaki sülfatın zararlı etkileri çok üst seviyelerde olmaktadır [29].

Betonun geçirgenliği, sülfatlı suların beton içerisine difüzyonu, kapilarite ve özellikle kütle transferi reaksiyon hızını etkilediğinden sülfat konsantrasyonunu tespit etmek güçleşir. Sülfatlı sularla sürekli ıslanıp kuruyan ve zaman içerisinde bu olayla devamlı olarak karşı karşıya bulunan beton boşlukları önce sülfatlı su ile dolar, sonra bu su çekildiğinde ise boşluk içerisindeki suyun buharlaşması sonucu boşluklarda sülfat konsantrasyonu yükselir ve sülfat tahribatının şiddeti artar [29].

Doğal ve endüstriyel puzolanların analiz edilmesi sonucunda içinde var olduğu bilinen SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 gibi oksitlerinden en fazla miktarda bulunan SiO_2 , çimento ana

bileşenlerinden olan C_3S ve C_2S ile girmiş olduğu reaksiyon sonucunda serbest sönmüş kireç oluşmaktadır. Serbest kireç betonun içinde bulunan $Ca(OH)_2$ ve su ile beraber reaksiyona girerek kalsiyumsilikahidrat' ı oluştururlar. Bu reaksiyonun betonun durabilitesi açısından çok büyük önem bulunmaktadır. Betonun içerisindeki boşluk oranını artırıcı etkide bulunan $Ca(OH)_2$, betonun daha mukavim olmasını sağlayan kalsiyum silikathidrata dönüşür. Bunun sonucunda ortaya gözenek yapısı daha az geçirimsizliği az ve olan mukavemeti yüksek betonlar ortaya çıkacak ve zararlı maddelerin betonun iç bölgelerine ilerlemesi de zorlaşacağından betonun durabilitesine olumlu yönde katkısı olacaktır. Öte yandan puzolanik maddelerin $Ca(OH)_2$ ve su ile girmiş olduğu reaksiyonların sonucunda kalsiyumsilikahidrat oluşur ve çimentoda sülfatın zararlı etkilerine karşı direnci zayıf olan alüminyumsilikathidrat miktarı da böylelikle azalır. Yukarıda sıralanan birçok olumlu özelliklerinden dolayı, puzolanik katkı malzemeleri kullanılarak üretilen, özellikle yüksek fırın cürufu katkılı portland çimentoları ile üretilen betonların Bankamızın faaliyet alanındaki su yapılarında kullanımı, inşaatlarımızın dayanım ve servis ömrünü arttıracaktır [29].

“Betonda Doğal Puzolanların Kullanımı” adlı, çalışmaya göre doğal puzolan kaynaklarının en yoğun bulunduğu ülkelere Yunanistan, İtalya, Fransa, Almanya, Türkiye, İspanya, A.B.D., Rusya, Çin, Meksika, Japonya ve Hindistan’ dır. Doğal puzolanik maddeler ile çimentonun karıştırılarak kullanılması Rusya ve Japonya’da 1930’ lu yıllardan itibaren başlamıştır. A.B.D. ise puzolanik portland çimentosu 1912 yılından Los Angeles’ da bulunan Akedükü inşaatında kullanılmıştır. A.B.D.’ de 1912 yılından günümüze değin birçok büyük kütleli su yapısında puzolanik portland çimentosu kullanılmıştır [29].

Yine bu çalışmanın başka bir yerinde: “Beton, doğal puzolanik katkı maddeleriyle üretilmesi durumunda genelde, deniz suyunun zararlı etkilerinden, sülfat iyonlarının betonda oluşturacağı tahribatlardan korunur. Betonun boşluk yapısını iyileştirerek sızdırmazlığın karşı etkili olmaktadır. Beton boruların üretiminde puzolanik katkı maddelerinin kullanılmasının olumlu yönde birçok etkisi bulunmaktadır. Uygun miktarlar bulunarak dizayn edilen puzolanik madde içeren harç karışımları betonun sızdırmazlığını arttırır ve üretilen borular asitlere ve sülfatın zararlı etkilerine karşı daha korunaklı hale gelir.” denmektedir.

“Normal Beton, Ağır Beton ve Kütle Beton için Karışım Oranları Belirlenmesi Standardı” adlı ACI 211.1-91 kodlu raporun giriş kısmında: “Çimento maliyetini düşürmek veya erken hidratasyon ısını azaltmak, betonun ileri yaş dayanımını yükseltmek, alkali-agrega arasında meydana gelen tepkimelerle oluşabilecek tahribatı önlemek veya sülfat iyonlarının zararlı etkisini azaltmak, daha geçirimsiz betonların oluşmasını sağlayarak sızdırmazlığı arttırmak ve betona zarar verici sıvıların beton içine sızmasına karşı direnç oluşturmak amaçları için portland çimentosuna veya katkıli portland çimentosuna, uçucu kül (ACI 226.3R), doğal puzolanlar, öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ACI 226.1R) ve silis dumanı gibi puzolanik maddelere belirli miktarlarda eklenebilir.” denmektedir [29].

“Dayanıklı Betonlar Kılavuzu” adlı, ACI 201.2R-77 kodlu raporda: “Yapılan deneysel çalışmalar, bazı puzolanik maddeler ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile çimento üretilen bu çimentoyu kullanmak veya bu maddeleri betona sonradan eklemek suretiyle sülfat etkisine maruz betonun dayanıklılığını belirgin şekilde arttırdığını göstermektedir.” denmektedir [29].

"Hidrolik Çimentoların Seçimi ve Kullanımı için Kılavuz" adlı, ACI 225R-85 kodlu raporda, sülfat iyonlarının betonda oluşturduğu zararlı etkiler ile ilgili olarak: “Sülfatın iyonlarının zemin, deniz suyu, yer altı suyu ve kimyasal işlem görmüş atık niteliğindeki sularda yoğun olarak bulunabilmesi ihtimalinden dolayı, sülfatın betonda oluşturduğu zararlı etkilerin önlenmesinin çok önemli bir yeri vardır. Yüksek trikalsiyum alüminat (C_3A) içeren normal portland çimentoları sülfatın zararlı etkilerine karşı dirençleri zayıf olduğundan, sülfat iyonlarının yoğun olarak bulunduğu yerlerde kullanılacak beton için trikalsiyum alüminat (C_3A) miktarı az olan çimentoların kullanılması gerekmektedir (Tip II ve V).” denmektedir. Bu kılavuzun başka bir bölümünde; sudaki sülfat iyonunun (SO_4^-) konsantrasyonu 150 ppm'e kadar ise “zayıf sülfatlı ortam”, 150-1.500 ppm arası ise “orta şiddetli sülfatlı ortam”, 1.500-10.000 ppm arası ise “şiddetli sülfatlı ortam” ve 10.000 ppm'in üstü ise “çok şiddetli sülfatlı ortam” olarak isimlendirilmiştir. Sülfat konsantrasyonu açısından zayıf olan ortamlarda herhangi bir önlem almaya gerek yoktur. Fakat orta şiddetli ortamlar için maksimum trikalsiyum alüminat oranı (C_3A) %8 olan çimento veya puzolan ilave edilmiş Tip II çimento kullanılması, şiddetli ortamlar için maksimum trikalsiyum alüminat oranı (C_3A) %5 olan

çimento kullanımı veya Tip V çimento kullanımı, çok şiddetli ortamlarda ise Tip V çimento kullanılması tavsiye edilmektedir [29].

Sülfatlı ortamlar için dikkat edilmesi gereken önemli husus, sülfat iyonu miktarının bu rakamsal değerinin yanında, sülfatın sülfürik asitten veya kalsiyum, sodyum, magnezyum gibi tuzların erimesi sonucu asidik bir ortam meydana getirmesiyle, sülfat etkisiyle betonda oluşabilecek hasarın çok daha fazla olma durumudur. Yapılan birçok deneysel çalışma, betondaki sülfat kaynaklı bozulmaların asidik ortamda çok daha fazla olacağı belirlenmiştir [29].

3.6. Beton ve Harçlarda Sülfat Saldırısı Türleri

Sülfat saldırısı iç ve dış olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Dış sülfat saldırısı, çözelti (örneğin yer altı suyunun) içindeki sülfatın emilmesi ile sülfatın betona dışarıdan girmesi şeklinde oluşurken, iç sülfat saldırısı ise beton karışımının oluşturulması sırasında çözünebilir malzemeler (agrega içerisindeki alçıtaşı gibi) etkisi ile ortaya çıkmaktadır [29].

3.6.1. Dış sülfat saldırısı

Bu tür sülfat etkisi en sık karşılaşılan sülfat saldırısı türüdür. Bu durum daha çok çözünmüş sülfat iyonları içeren suların beton içine girmesiyle oluşmaktadır. Bu tepkime en belirgin şekliyle parlatılmış kesitlerde görülmektedir. Başlangıçta beton yüzeyi normal veya normale yakın bir görünüş sergilerken daha sonra tepkime etkisiyle betonun bileşim ve mikro yapısı değişmektedir. Bu değişimin çok farklı türü ve şiddeti olmakla birlikte daha çok;

- Yaygın çatlaklar,
- Genleşme,
- Çimento hamuru ve agrega arasında aderans kaybı,
- Monosülfatın başlangıçta etrenjite ve daha sonraki aşamalarda ise jipse dönüşmesi şeklinde ortaya çıkan hamurun bileşimindeki ve diğer özelliklerindeki değişimdir. Burada fazladan gerekli olan kalsiyum ise çimento hamurundaki kalsiyum hidroksit ve kalsiyum silikat hidratlardan temin edilmektedir. Bu değişimlerin tümü betonda önemli ölçüde dayanım kaybına da neden olmaktadır. Yukarıda bahsi geçen etkiler

daha çok sodyum sülfat veya potasyum sülfat etkisinden kaynaklanmaktadır. Magnezyum sülfat içeren çözeltilerde ise bu etki çok daha şiddetli olarak ortaya çıkmaktadır. Bu sınıfa giren kalsiyum tuzları ise genellikle jipsi kapsamaktadır. Sülfat saldırısına sebep olan diğer kaynaklar ise:

- Deniz suyu,
- Beton elemanlara komşu killi zeminlerdeki sülfid minerallerinin oksidasyon etkisidir (bu tepkimeden betona zararlı sülfirik asit oluşmaktadır).
- Bakteriyel etkiler; anaerobik (oksijensiz yerde yaşayabilen) bakteriler sülfür dioksit üretir; daha sonra bu suda çözünüp oksitlenerek sülfirik asidi oluşturmaktadır.
- Yığma yapılarda ise tuğlada bulunan sülfatlar uzun süreçler sonucunda harca etki yapabilmektedir [29].

3.6.2. İç sülfat saldırısı

Bu tür sülfat saldırısı betonun karıştırılması sırasında sülfat içeren malzemelerin tepkimesiyle meydana gelmektedir; örneğin, sülfatça zengin agrega kullanımı, çimentodaki ilave alçının fazlalığı gibi durumlarda bu tür tepkimeler ortaya çıkmaktadır. Uygun gözlem ve deney yöntemleriyle bunun önüne kolayca geçilebilir. Gecikmiş etrenjit oluşumu iç sülfat saldırısının özel bir halidir. Gecikmiş etrenjit oluşumu birçok ülkede önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bu etki türü daha çok yüksek sıcaklıktaki beton kürü (buhar kürü vb.) sırasında ortaya çıkmaktadır; nitekim bu durum ilk olarak buhar ile kürlenmiş demiryolu tabanlıklarında (travers) tespit edilmiştir. Yine bu durum kütle betonlarda ortaya çıkan yüksek hidrasyon ısısı sırasında da oluşabilmektedir. Gecikmiş etrenjit, çimento hamurundaki etrenjit oluşumu ile başlayarak betonun genişlemesine ve böylece beton yapı elemanlarında ciddi hasarlara sebep olabilmektedir. Bu hasar yalnız sülfat fazlası bulunan beton veya çimento hamurlarında oluşmaz, aynı zamanda normal düzeyde sülfat içerenlerde de oluşabilir. Burada üzerinde durulması gereken en önemli husus gecikmiş etrenjit oluşumunun 70 °C üzerindeki sıcaklıklarda etkili olduğudur. Genel olarak gecikmiş etrenjit oluşumunun gerçekleşme şartları; [29].

- Yüksek sıcaklık (65 - 70 °C'den daha yüksek sıcaklıklar)
- Kür sonrası sülfata doymuş su etkisi
- Genellikle alkali-silika reaksiyonu ile birlikte ortaya çıkmaktadır.

Çimento bileşiminin bu tür sülfat saldırısı üzerine etkisi tam olarak anlaşılammakla birlikte aşağıdaki koşulların etkili olduğu düşünülmektedir:

- Yüksek sülfat miktarı,
- Yüksek alkali miktarı,
- Yüksek MgO miktarı,
- Çimento inceliği,
- Yüksek C₃A oranı,
- Yüksek C₃S oranı [29].

3.7. Etrenjit Oluşumu

Dış ortamdan gelen sülfat iyonlarının, kalsiyum hidroksit ile birlikte, alümin taşıyan fazlardaki sertleşmiş çimento hamuruyla tepkimesi sonucu etrenjit (ettringite) oluşumu söz konusu olmaktadır. Bu oluşumun sülfat iyonları ve kalsiyum hidroksitin tepkimesi sonucu oluşan jips ile alümin taşıyan fazlar (C₃A) arasındaki reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkmakta olduğu bilinmektedir [29].

Mineralojik açıdan değerlendirildiğinde ise etrenjit doğada bulunan bir mineral grubunun aile adıdır. Diğer bir deyişle, aslında etrenjit kelimesi kimyasal bileşimleri farklı ancak kristal yapıları benzer bir grup minerali tanımlamakla birlikte, sülfat içeren mineraller genel olarak etrenjit olarak adlandırılmaktadır [29]. Etrenjit denilince aslında en duraylı etrenjit grubu minerali akla gelmektedir. Bu üç sülfat iyonu altı adet su molekülü içermektedir [29]. Kristal yapısı kolon ve kanallardan müteşekkil olan etrenjitin bileşenleri tepkimelerle çok çabuk yer değiştirebilmektedir. Etrenjit genleşmesi hem yararlı hem zararlı etkilere yol açabilir [29]. Faydalı etkiden kasıt genleşen çimentolardaki genleşme tepkimesidir. Bu da büzülme önleyici veya kendinden gerilmeli çimentolarda sınırlı olarak görülmektedir. Zararlı etkiler ise bilindiği üzere, sülfat etkisiyle betondaki genleşme ve oluşan çatlaklardır [29].

3.8. Sülfata Dayanıklılık Açısından Alınması Gereken Önlemler

Betonun kimyasal direnci için esas gereklilik betonun, özel bir çimentoyla veya çimento-puzolan bileşimiyle ya da çimento-cüruf bileşimiyle yapılmasıdır. İlaveten düşük su/çimento oranıyla tam sıkıştırma ve yeterli kür ile geçirimsiz beton üretimi kimyasal atak direncinin artmasına yardımcı olacaktır. Portland çimentoları betonları genellikle pH' ı 6 ve daha yüksek kimyasal atağa karşı dirençlidir [29].

ACI 225R-85 yüksek C₃A içeren portland çimentolarının sülfat atağından çabuk etkilenebilme eğiliminden dolayı, sülfatlı ortamlardaki betonların düşük C₃A içeren Tip II ve Tip V portland çimentolarını gerektirdiğini belirtmiştir [29].

Trikalsiyum alüminat sülfatlardan etkilendiği için sülfatların betona tesiri, trikalsiyum alüminatı düşük çimento kullanmak suretiyle azaltılabilir.

ACI 201.2R-77, bazı puzolanların ve yüksek fırın cüruflarının katkılı çimentolarda kullanılmasının veya ayrı olarak karışımda betona ilave edilmesinin önemli sülfat tesirlerinde betonun ömrünü arttırdığını göstermiştir. İlaveten çimentonun hidratasyonu sırasında, birçok cüruf ve puzolanların alkaliler ve kalsiyum hidroksit ile birleşerek betonun permeabilitesine yaralı etki yaptığını belirtmektedirler [29].

Hidratasyon sırasında puzolanunun çözülebilir olarak nitelendirilebilecek olan SiO₂ içeriği klinkerden ayrılan Ca⁺² iyonunu bağlar ve ortaya çıkan yeni bileşikler jel şeklinde betondaki boşlukları kapatırlar. Bu çözülebilir SiO₂ içeriği, klinkerin Ca⁺² iyonunu bağlamak suretiyle kalsiyumhidrosilikata dönüşür ve kalsiyumsilikatın da düşük bir çözünebilirliği vardır. Deney sonuçlarına göre difüzyon sonucunda puzolanlı çimento betonlarında normal portland çimentosu betonuna göre sadece 1/3 daha fazla kalsiyumhidroksit çözülmektedir. Bu olay da puzolanlı çimentonun agresif ortamlardaki dayanıklılığının kanıtıdır. Puzolanlı çimentonun agresif ve özellikle sülfatlı ve asitli suya karşı dayanımı, betondaki gözeneklerin SiO₂, aliminyumhidroksit ve bazı durumlarda demiroksit jelleri ile tıkanmasından ileri gelmektedir. Bu jel, gözenekleri tıkararak yalıtım görevi görür. Bu yalıtımda betonun dış etkilere karşı dayanımını artırır. Oluşan jeller

arasında SiO₂ jeli en çok paya sahip olup, bu jel diğerlerine göre agresif iyonlara karşı en az geçirgenliğe sahiptir [29].

Hiçbir hidrolik çimentolu betonun, birleşimi ne olursa olsun pH' ı 3 ve daha az olan yüksek asidik konsantrasyona uzun zaman dayanamayacağı belirtilmektedir. Tamamen deniz suyuna maruz kalan betonlar için 28 günlük basınç mukavemetinin en az 35 MPa' dan az olmaması gerekmektedir [29].

Baştan belli bir konsantrasyonda oluşturulan sülfatlı su eriğinde SO₄ konsantrasyonu, beton numuneler ile çözelti arasında devam eden kimyasal reaksiyonlar sonucu zamanla değişir, baştaki değerler kalmaz. Buna bir çözüm olarak, numunelerin içine konulan çözeltilere, aylık periyotlar gibi sürelerde müdahale edilerek, çözeltideki SO₄ konsantrasyonunun devamlı baştaki değerinde sabit kalması için, çözeltilere ilaveler yapılır [29].

Na₂SO₄ ve H₂SO₄' lü çözeltiler beton numunelere farklı tahribatlar yaparlar. H₂SO₄' lü çözeltide SO₄' ün yanı sıra H⁺ iyonunun mevcudiyetinden dolayı asitlik tahribatı da söz konusudur. Sodyum sülfat gibi tuz eriyiğinden ayrılmış sülfat iyonu ile sülfirik asitli bir ortamdaki sülfat tahribatının farkını gözleyebilmek amacıyla çalışmada, aynı sülfat iyonu konsantrasyonlu H₂SO₄ çözeltili sülfatlı su ortamları oluşturulmuştur [29].

SO₄ konsantrasyonu 8000 ppm' den büyük olan çözeltiler "yüksek SO₄ konsantrasyonlu" çözeltiler, 8000 ppm' den küçük olanlar ise "düşük SO₄ konsantrasyonlu" çözeltiler olarak sınıflandırılmaktadırlar. ACI 201.2R-77 (ACI, 1977) ve ACI 225R-85'de ise 1500 ppm - 10000 ppm arası "severe (şiddetli)" , 10000 ppm' in üstü "verysevere (çok şiddetli)" olarak tanımlanmaktadır. 8000 ppm' in, 10000 ppm' e yakın olduğunu kabul edersek, Santhanam et al.' in yaptığı "yüksek SO₄ konsantrasyonlu" tanımının ACI' ların yaptığı "çok şiddetli" tanımına yakın olduğunu söyleyebiliriz [29].

80000 ppm' den fazla SO₄ iyonlu "yüksek SO₄ konsantrasyonlu" çözeltilerde uzun zaman kalan betonda daha ziyade jips (alçı taşı) oluşur.

Betonda sülfat tahribatı için, çeşitli standartlarda ve çalışmalarda farklı belirleme yöntemleri mevcuttur. Bunlar,

- Belirli boylardaki beton prizmaların bir veya beş sene sülfatlı ortamlarda kaldıktan sonra genişleme miktarını tespit eden boylarındaki uzamanın ölçülmesi,
- Numunelerin preste kırılarak basınç mukavemetlerini ölçerek baştaki ile birkaç yıl sonundaki basınç mukavemeti kaybının belirlenmesi,
- Numunelerde uzun zaman sonunda oluşan yüzeysel dökülmenin ve çatlak oluşumunun ölçülmesi olarak sınıflandırılabilir [29].

Irassar, Maio ve Batic, 1996 "Sulfate Attack on Concrete With Mineral Admixtures", Cement and Concrete Research, çalışmasında; Irassar ve Ark., Arjantin'de, ~%1 Na₂SO₄ içeren bir toprağa, Tip I ve Tip V çimento, % 20, % 40 ve % 80 dozlarda puzolan kombinezonları ile toplam 8 farklı betondan ürettikleri bir çok 15x30 cm' lik silindir numuneleri, yarılmasına kadar bu sülfatlı toprağa sokmuşlar, bu numuneleri 5 yıl burada tutmuşlar, zamanla oluşan görünüm, mukavemet, elastisite modülü özelliklerini ölçmüşlerdir. Toplam bağlayıcı dozajı ~300 kg/m³, karışım suyu, ~7 cm slump verecek miktarda 8 farklı beton üretilmiştir. Deney yapılan bölgede donma-çözülme olayı vuku bulmamakta, yılda 15-20 adet ıslanma-kuruma döngüsü oluşmaktadır. Irassar ve ark. çalışmasında, sülfat iyonunun kimyasal tahribatının yanı sıra, kapilarite ile çekilen sülfatlı sudaki moleküllerin kuruma esnasında fiziksel genişemesinin tahribatı da söz konusudur. ~%1 Na₂SO₄ içeren toprak ortamının gerçek sülfat iyonu konsantrasyonu açık olarak belirtilmemiştir. Dolayısıyla, bu ortamın tam sulu ortam ile karıştırıldığında 10000 ppm' lik sülfatlı su eriyiğinden çok daha az şiddette bir ortam olduğu anlaşılmaktadır [29].

8 farklı beton kombinezonunda üretilen 15x30 cm' lik beton numunelerinin tamamının hem 1 yıl, hem de 5 yılın sonunda 28 günlük mukavemetlerine göre artış olması da, bu çalışmadaki sülfatlı toprak ortamının şiddetli bir sülfat ortamı olmadığı bulgusunu belirtmektedir [29].

Kimyasal sülfat tahribatının yanı sıra, muhtemel fiziksel kristalleşme genişemesi tahribatı da mevcut olmasına rağmen, PÇ – 32,5'a benzer olan katkısız Tip I çimento dahil,

8 farklı betondan alınan bütün numuneler, bu sülfatlı toprak ortamında 5 yıl sonunda mukavemet kazanmıştır. Bu çalışmanın önemli noktaları aşağıdaki gibi özetlenebilir [29]:

Tip I çimentonun 314 kg/m³ dozlu, 7 cm slump' lı betonu, anılan sülfatlı toprakta 1 yılın sonunda %87 mukavemet kazanmıştır. Tip I çimentolu betonun ve %20 doğal puzolanlı Tip I çimentolu betonun 28 günlük ve 5 yıllık mukavemetleri: 24, 23; ve 45, 49 MPa olmuştur. Görüldüğü gibi, ağırlıkça % 20 puzolanlı çimentolu betonun 28 günlük mukavemeti, puzolansız betonunkinden 1 MPa daha küçük iken, 5 yılın sonunda, orta şiddetli sülfatlı ortamda, puzolanlı betonun mukavemeti, sade çimentolu betonunkini % 9 geçmiştir [29].

Irassar ve Ark., sülfatlı toprakta 5 yıl kalan beton numuneler üzerinde yaptıkları çeşitli fiziksel ve mekanik özellik deneyleri sonucu, puzolan katkılı portland çimentosu ile üretilen betonun katkısız portland çimentosu ile üretilenden daha dayanıklı olduğunu belirtmişler, çalışmalarının "sonuçlar" kısmında bunu: "Normal portland çimentosunda bağlayıcının bir kısmı yerine mineral katkı konularak üretilen betonlar, gözle inceleme, mekanik ve mineralojik özellikleri açısından, sülfatlı toprağa gömülmüş durumda, katkısız çimento ile üretilene göre daha yüksek sülfat direnci göstermiştir." diyerek belirtmişlerdir [29].

4. YÜKSEK FIRIN CÜRUFU

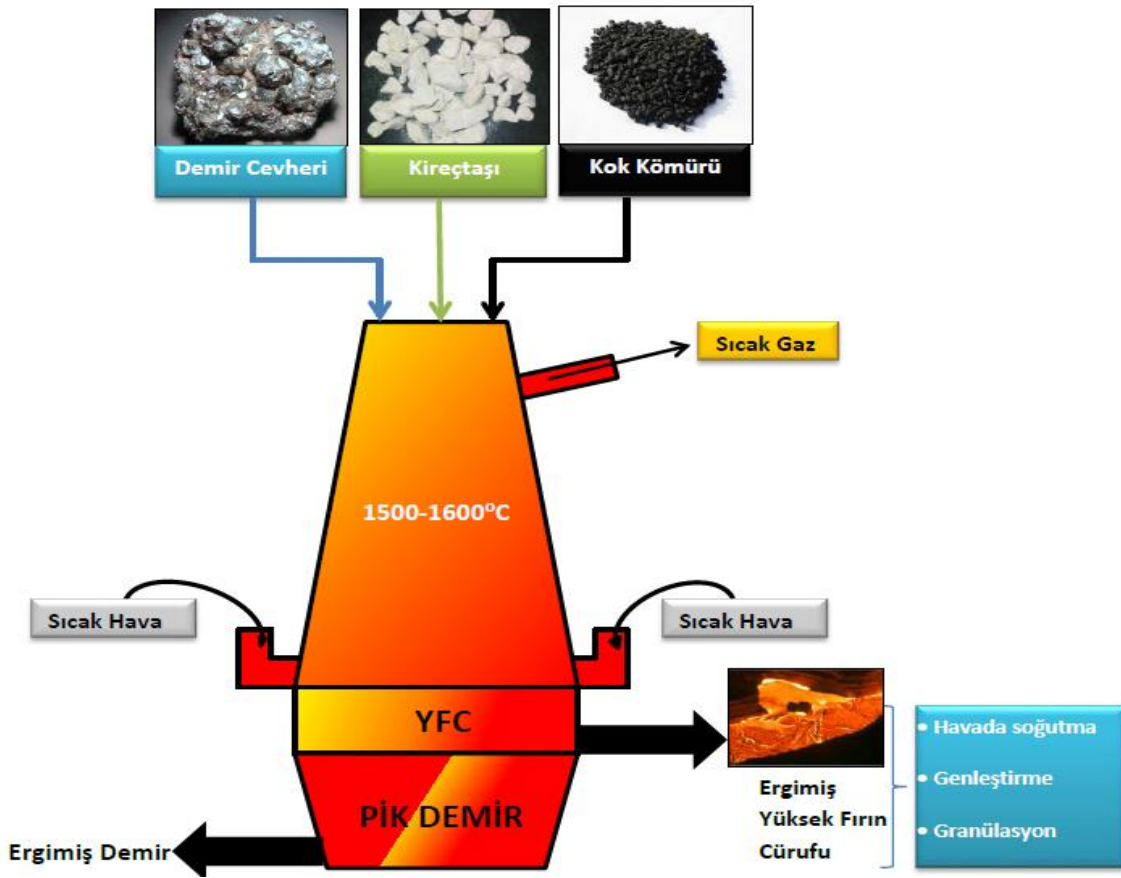
Cüruf, çelik üretim tesislerinde ortaya çıkan atık bir malzeme konumundadır. Fakat son yıllarda yapılan deneysel çalışmaların, cürufun çimento ve beton içerisinde bir katkı malzemesi olarak kullanılabilir olduğu ispat edilmiştir. Cüruf, artık atık malzeme olmaktan çıkmış ve ekonomik değeri olan bir sanayi yan ürününe dönüşmüştür. Çelik üretimi yapılırken yüksek fırınlarda demir cevherinin ısıtılarak ana kayaçtan ayrılması sonucunda hammaddenin dörtte biri civarında cüruf meydana gelmektedir. Ortaya çıkan yüksek fırın cürufu stoğunun büyük bir kısmı inşaat sektörü tarafından eritilmektedir [35].

Yapılan bir çalışmada Kazakistan'da çok büyük bir alana stoklanan yüksek miktardaki cüruf yeraltı suyuna ve havaya karışarak insan sağlığı açısından çok büyük bir tehdit oluşturduğu belirlenmiştir. Bu stok sahasında bulunan cürufu bertaraf etmek için, cürufun içerisine bor madeni ilave edilip daha büyük taneler haline getirilerek kullanılmaya başlanmış ve çok büyük alanları kaplayan cüruf atık sahaları azalmaya başlamıştır [35]. Cüruf kullanımı üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Polonya' da elektrik santrallerinde ve termal güç istasyonlarından milyonlarca ton atık elde edilmiştir. Bu atıklar incelendiğinde büyük bir kısmının çeşitli sektörlerde yardımcı malzeme olarak kullanılabilir nitelikte kül ve cüruf olduğu anlaşılmıştır. Elektrik veya ısıtma enerjisi üretimi yapan santrallerde her 1 kW enerji için kullanılan yakıtın kalitesine bağlı olarak 35 ile 220 g arasında değişen miktarlarda uçucu kül ve cüruf elde edilmektedir. Bu cüruflar dolgu amacıyla sığ göllere dökülmektedir [35]. Finlandiya'da ise yılda yaklaşık 6 milyon ton cüruf meydana gelmekte, bu cüruflar da betonda katkı maddesi olarak ve yol alt temelinde iyileştirme malzemesi olarak kullanılmaktadır. Kanada'da yapılan bir deneysel çalışmaya göre cürufun 500-900 °C' ye kadar ısıtılması sonucunda içeriğinde bulunan serbest kalsiyum oksit, kalsiyum karbonata dönüşmekte ve bu malzeme yol yapım işlerinde kullanılabilir çok önemli bir madde olmaktadır [35].

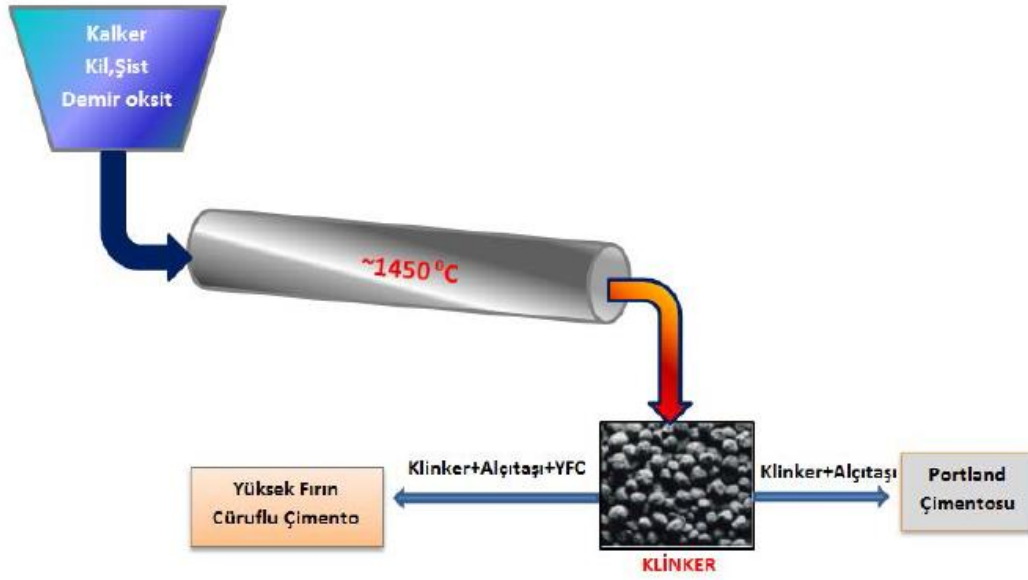
4.1. Çelik Üretimi ve Cürufun Elde Edilişi

İçerisinde demir cevheri bulunan kayaçlar büyük sanayi tesislerinde bulunan ve "Yüksek Fırın" denilen fırınlarda 1400 °C' ye kadar ısıtılarak demir cevherinin erimesi sağlanır. Eriyen demir cevheri, öz kütlesinin yüksek olmasından dolayı yüksek fırının

içinde aşağı doğru hareket etmeye başlar ve akkor halinde akar. Eriyip akkor şeklini alan demir çeşitli malzemeler elde etmek için işlenmek üzere çelik üretiminin yapıldığı bölümlere nakledilir. 1400 °C sıcaklığa kadar ısıtılan ana kayaçtan demir cevheri ayrılarak geriye bu ana kayacın atıkları kalır. Bu kalıntıların soğuması için bir müddet beklenir ve kayaçlar soğuduktan sonra ebatları 2 mm ile 5 mm arasında değişkenlik gösteren dane boyutunda ve kum görüntüsüne sahip bir hal alır. Ortaya çıkan bu malzeme Yüksek Fırın Cürufu (YFC) olarak adlandırılmaktadır [35].



Resim 4.1. Pik demir ve yüksek fırın cürufunun üretim süreci [33]



Resim 4.2. Yüksek fırın cürufu çimento üretim prosesi [33]

4.2. Cürufun Fiziksel ve Kimyasal Yapısı

Çelik üretimi esnasında birbirinden farklı iki tür cüruf bulunmaktadır. Bunlar:

1. Yüksek Fırın Cürufu (YFC)
2. Çelikhane Cürufu “Basic Oxygen Furnace” (BOF)

Demir cevheri, doğada ana kayaç içerisinde ana maddesi, demir oksit olarak bulunmaktadır. Cevherin içinde bulunduğu kayaçların içinde farklı miktarlarda silika, alümina, kükürt vb. gibi çeşitli istenmeyen maddeler de bulunmaktadır. Cevherin içinde bulunan demir madenin kayaçtan ayrılıp kullanılabilir hale getirilebilmesi için demir oksitin bünyesindeki oksijenin dışarı çıkarılması ve kayaçtaki yabancı maddelerin arındırılması gerekmektedir. Demir cevherinin ortaya çıkarılması amacıyla, yüksek fırının içerisine kademeler halinde kok kömürü, kalker taşı ve cevher yerleştirilip kok kömürünün yakılmasıyla yaklaşık 1600 °C sıcaklık uygulanmaktadır [35]. Kok kömürünün bünyesinde bulunan karbon ile demir oksitin bünyesinde bulunan oksijen birleşerek karbonmonoksit veya karbondioksit gazları halinde ortamdan uzaklaştıktan sonra, geriye, eriyik durumda demir ve yine eriyik durumda yabancı maddeler topluluğu (cüruf) kalmaktadır [35]. Bu cürufun içerisinde büyük miktarlarda silika, alümina ve kalsiyum oksit yer almaktadır. Cüruflardan bazı değişik boyutlarda malzeme üretilir. Dane çapları 4-15 mm aralığında

olanlar büyük boyutlu olarak isimlendirilirler. Bol miktarda gözeneğe sahip olup kristalize yapıdadırlar. Beton üretiminde agrega olarak kullanılmaktadırlar. Dane çapı 4 mm' den küçük olanlar ise küçük boyutlu olarak isimlendirilirler ve çimento yapımında katkı maddesi olarak kullanılırlar. Bu tür cürüflara “ hafif cüruf ” denir [35].

Çizelge 4.1. YFC kimyasal analizi (Bilgen ve ark. 2010)

	Yüksek Fırın Cürufu	Çelikhane Cürufu
CaO	36-43	48-54
CaO (Serbest)	-	1-10
SiO ₂	35-39	11-18
Al ₂ O ₃	8-12	1-4
Toplam Fe	<0,5	14-19
Toplam Mn	<0,5	1-4
Na ₂ O	<0,5	-
K ₂ O	<0,7	-
S	1.2-1.6	-
CaO/SiO ₂	1.0-1.2	2.8-4.4

4.3. Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırınlardan demir cevherinin ayrılması sonucu eriyik olarak çıkarılan cüruf, kendi halinde yavaşça soğumaya bırakıldığında, kristal yapılı olmaktadır. Su ile soğutma yöntemine tabi tutulduğunda veya soğumayı hızlandırıcı diğer yöntemler denendiğinde, iri kum taneleri büyüklüğünde granüle duruma gelmekte ve amorf yapıya sahip olmaktadır. Granüle yüksek fırın cürufu amorf yapıda olduğundan ve yeterli miktarda silika ve alümina içerdiğinden, öğütülüp çok ince boyutlara getirildiğinde çimento üretiminde rahatlıkla kullanılabilir bir malzeme haline gelmektedir. Granüle yüksek fırın cürufunun beton imalatı sırasında betona katkı maddesi olarak ilave edilmesinin, cürüflü çimento üretiminde çimento bünyesinde bulunan bazı maddelerle yer değiştirilerek kullanılmasına oranla birçok avantajı bulunmaktadır [31].

- Granüle yüksek fırın cürufu, portland çimentosunun klinkerinin fiziksel özellikleri karşılaştırıldığında cürufun klinkere oranla çok daha sert bir malzeme olduğu görülmektedir. Yüksek fırın cürüflü çimentonun üretimi sırasında klinker ile cüruf aynı anda öğütüldüğünden cüruf istenilen incelikte öğütülememektedir. Ancak cüruf ne kadar ince olursa betona sağlayacağı katkı o kadar fazla olacağından, klinkerden ayrı

bir ortamda istenilen inceliğe kadar öğütülen cüruflar betona çok daha fazla katkı sağlayacaktır [31].

- Normal şartlarda çimento stoklandığı bölgede havadaki nemden etkilenerek bozulmaya başlamaktadır. Bu durumda çimento asli görevi olan bağlayıcılığı zayıflamakta ve çimentodan istenilen verim alınamamaktadır. Yüksek fırın cürufları havadaki nemden çok fazla etkilenip reaksiyona girmediğinden uzun süre stoklanabilmektedir [31].
- Yüksek fırın cüruflarının betona sonradan ilave edilmesi beton üretiminde daha esnek davranılmasını sağlamaktadır. Cürufllu çimentoların içerisinde çimento firması tarafından katılan belirli miktarda cüruf bulunurken, cürufun mineral katkı olarak katılması ile en uygun miktarda ve incelikte kullanılarak olması istenilen beton daha kolay şekilde üretilmektedir [31].
- Yüksek fırın cürufunun ince taneli şekle gelene kadar öğütülerek betona ilave edilmesi betonun işlenebilme özelliğini artırmaktadır [31].

4.4. Eriyik Cürufunun Soğutulma Yönteminin Cüruf Yapısına Etkisi ve Cürufların Kullanım Alanları

Yüksek fırından demir cevherinden ayrılarak, eriyik haline gelmiş atık bir malzeme konumunda bulunan cüruf yaklaşık 1500 °C sıcaklıktadır. Cürufun herhangi bir amaçla kullanımı ancak istenilen sıcaklığa kadar soğutulduktan sonra mümkün olmaktadır. Soğutma yöntemleri cürufun yapısına doğrudan etki etmektedir. Bu yöntemlere bağlı olarak cüruf, yüksek fırından çıktıktan sonra farklı farklı yapısal karakterlere bürünebilmektedir [31].

Çizelge 4.2. Yüksek Fırın Cürufu Kullanım Alanları

Kütle Betonları	Deniz Yapıları	Sanat Yapıları
Barajlar Büyük Temeller HES	Kıyı ve Liman Yapıları Açık Deniz Yapıları	Köprüler Tüneller
Kimyasal Tesisler	Altyapı	Yollar
Nükleer Tesisler Biyolojik Tesisler Kimyasal Tesisler Depolar Arıtma Tesisleri	Kanalizasyon Boruları Menfezler Kuyular Fore Kazıklar Sulama Kanalları Zemin Enjeksiyonları	Otoyollar Endüstriyel Zeminler Havaalanı Pistleri Köprü Yolları

Normal şartlar altında havada yavaşça soğumaya bırakılan cüruflara “havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu” adı verilmektedir; su, basınçlı hava ve buhar etkisiyle soğutulmuş cüruflara, “genleştirilmiş yüksek fırın cürufu” veya “köpürtülmüş yüksek fırın cürufu” denilmektedir; genellikle fazla miktarda suya maruz bırakılarak, çok hızlı soğutulma işlemine tabi tutulan cüruflar, ufak parçacıklara dönüştüğünden, “granüle yüksek fırın cürufu” olarak anılmaktadır [32].



a) Genleştirilmiş YFC

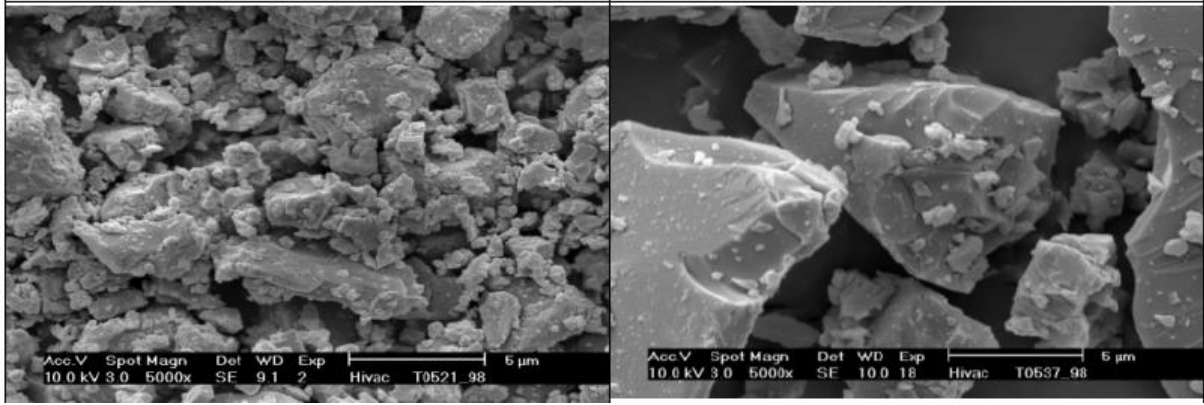


b) Granüle YFC



c) Öğütülmüş YFC

Resim 4.3. Yüksek fırın cürufları [33]



a) Portland Çimentosu

b) Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu

Resim 4.4. Tarayıcı elektron mikroskopta 5000 defa büyütülmüş portland çimentosu ve öğütülmüş yüksek fırın cürufuna ait mikrograflar [33]

Havada soğutma işleminde cüruflarda, soğuma işlemi oldukça yavaş geliştiği için, cüruf bünyesinde kristal yapıda kalsiyum-silikatlar oluşmaktadır. Kristal yapıdaki bu cüruflardan çimento yapımında bağlayıcı malzeme olarak yararlanmak mümkün değildir. Bu cüruflar oldukça sert yapıdadır. Ancak kırılarak agrega haline getirilir ve beton içerisinde kullanılabilir. Öte yandan, bu tür cürufların bünyesinde bulunabilecek bir miktar kükürt, betonun hacmini olumsuz olarak etkiler ve yapılacak olan yapıların kullanım ömrünün azalmasına neden olabilir. Bu yüzden havada soğutma yöntemiyle elde edilen cürufların kullanımında temkinli davranılmalı gerekli deneyler yapılarak cürufun kullanıma uygunluğu konusunda titiz çalışmalar yapılmalıdır [32].

Kontrollü miktarda su ile soğutularak ve bu işlem esnasında içerisinde buhar hapsolmesi nedeniyle genişmeye uğrayan cüruflar gözenekli yapıya sahip olmaktadır. Genleştirilmiş yüksek fırın cüruflarında da, soğutulma işleminin yeterince hızlı olmaması nedeniyle, kristal yapı hakimdir ve hidrolojik bağlayıcılık özelliği bulunmamaktadır. Genleştirilmiş cürufların kırılmasıyla hafif agrega elde edilebilmekte ve hafif beton yapımı mümkün olabilmektedir [32].

Çok çabuk soğutulma işlemine tabi tutularak granüle duruma getirilen cürufların bünyesinde, eriyik cürufun viskozitesindeki ani değişiklik nedeniyle, granülasyon esnasında kristal yapının oluşması engellenmekte, camsı katı solüsyon meydana gelmektedir. Camsı yapıdaki granüle yüksek fırın cürufunun elde edilebilmesi, eskiden,

basit olarak, eriyik cürufun doğrudan su içerisine ani olarak daldırılması ile sağlanmaktaydı. Modern sistemlerde, granülasyon işlemi, eriyik cürufa, su-cüruf kütlesi yaklaşık 10'a 1 olacak miktarda yüksek basınçlı su püskürtülmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu sistemlerin dışında, bazen, hava granülasyonu denilen bir yöntem de kullanılmaktadır. Havada granülasyon yöntemi, birbirini hemen takip eden ve sürekliliği olan birkaç işlemden oluşmaktadır. Bu yöntemde, eriyik cüruf bir vibrasyon plakası üzerine dökülmekte ve bu işlemle genleşen cüruf, bir miktar su püskürtülerek soğutulmakta ve buradan da, dönen bir tamburun üzerine dökülerek havaya fırlatılmaktadır; havada, çok çabuk soğutulma nedeniyle, granülasyon elde edilmektedir. Ani olarak suya daldırma, basınçlı su püskürtülmesi veya hava granülasyonu yöntemlerinin herhangi birisinin kullanılmasıyla granüle duruma getirilen cüruflar, suyu süzülüp, kurutulduktan sonra, öğütülme işlemine tabi tutulmaktadır. Öğütülmüş yüksek fırın cürufları, NaOH veya CaOH gibi aktivatörlerle bir araya getirildiklerinde veya $Ca(OH)_2$ ile birleştikleri takdirde reaksiyona girerek hidrolik bağlayıcılık değeri kazanmaktadırlar. Bu özellikleri nedeniyle, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunu, portland çimentosu klinkeri, cüruf ve küçük bir miktar alçıtaşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen cüruflu çimentoların üretiminde veya beton yapımında mineral katkı maddesi olarak kullanabilmek mümkün olabilmektedir [32].

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip olması ve bu tür malzemeden çimento ve beton üretiminde yararlanma imkanı bulunması nedeniyle, yüksek fırından atık olarak dışarı alınan eriyik cürufun soğutulmasında, genellikle çok hızlı soğutma yöntemleri kullanılmaktadır [32].

4.5. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufunun Bağlayıcı Özellikli Malzeme Olarak Kullanılmaya Uygunluğu

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun hidrolik bağlayıcılık kazanabilme etkinliği birçok faktöre bağlıdır. Bunlar:

- Cürufun kimyasal kompozisyonu
- Reaksiyon yapan sistemdeki alkali konsantrasyonu
- Cüruf içerisinde oluşmuş olan camsı yapının miktarı

- Cürufun birlikte kullanıldığı portland çimentosunun inceliği
- Hidratasyon esnasındaki sıcaklık miktarı

Cürufun hidrolik bağlayıcılık değerini etkileyen faktörlerin bu kadar karmaşık olması nedeniyle, önceki yıllarda, cürufun hidrolik bağlayıcılık değerini tayin için, basit bir yöntem kullanılmasıyla yetinilmiştir. Cüruf $\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 \geq 1$ koşuluna uygunluk gösterdiği takdirde, hidrolik bağlayıcılık değeri uygun kabul edilmiştir.

$$\text{CAI} = \text{Cüruf-Aktivite İndeksi, \%} = (\text{CP/P}) (100)$$

Burada, CP, cüruf katkılı harç küplerinin ortalama basınç dayanımı ve P, cüruf katkısız harç küplerinin ortalama basınç dayanımıdır [32].

4.6. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufunun Cürufllu Çimento Üretiminde Kullanımı

Yüksek fırın cürufunun beton yapımında bağlayıcı malzeme olarak kullanılmasının uygunluğu ile ilgili ilk çalışmalar Lariot isimli araştırmacı tarafından başlatılmıştır. Lariot 1774 yılında yüksek fırın cürufuyla söndürülmüş kireci birleştirerek birtakım deneysel çalışmalar yapmıştır [32].

1862 yılında Emil Langen' in yüksek fırından çıkan cürufun kolayca ortadan kaldırılması için yaptığı çalışmalardan sonra, camsı yapıdaki granüle yüksek fırın cürufunun özellikleri üzerinde Michaelis, Prussing, Tetmayer, Prost, Feret, ve Green gibi araştırmacılar yoğun çalışmalar yapmışlardır. Pasow, hava granülasyonu için bir yöntem önermiştir. Yapılan bu yoğun çalışmaların ardından granüle yüksek fırın cürufu hidrolik bağlayıcı olarak kullanılmaya başlanmıştır [32].

Demir üretiminde atık malzeme olarak elde edilen eriyik cüruf ani soğutulduğu takdirde camsı yapıya sahip granüller oluşmaktadır. Granüle yüksek fırın cürufu, öğütüldüğünde ve kalsiyum hidroksit ile birleştirildiğinde, bağlayıcı özelliğe sahip olmaktadır. Bu nedenledir ki granüle yüksek fırın cürufu, genel olarak, çimento klinkeri ile birlikte öğütülmekte ve puzolanik özellikli cürufllu çimentolar üretilmektedir [32].

Granüle yüksek fırın cüruflarından yararlanma yöntemlerinden birisi de, son yıllarda ABD, Avustralya, Kanada gibi birçok ülkede büyük ölçüde kullanılan, cürufun ayrı olarak öğütülmesi ve beton yapımında mineral katkı olarak kullanımı yöntemidir. Granüle yüksek fırın cürufunun ayrı olarak öğütülmesi sonucunda, cüruf, istenilen inceliğe getirilebilmekte, özellikleri bozulmadan daha sağlıklı depolanabilmekte ve istenilen kalitede beton elde edilebilmek için esneklik sağlanmaktadır [32].

Demir cevherleri, doğada, demiroksit bileşenlerinin yanısıra küçük bir miktar silis, alümin, kükürt, fosfor, mangan gibi demir cevherinin bünyesinden uzaklaştırılması gereken yabancı maddelerle birlikte bulunmaktadır. Cevher içindeki demirin ortaya çıkarılması için, cevherin bünyesinde barınan bu yabancı maddelerden temizlenmesi ve demir oksitte bulunan oksijenin de uzaklaştırılması gerekmektedir. Bunların gerçekleşmesi için, demir cevherleri, yüksek fırınlarda 1500 °C üzerindeki sıcaklıklara kadar ısıtılarak eritilirler. Bu fırınlarda yakıt olarak kok kömürü kullanılmaktadır. Demir cevheri yabancı maddelerden temizlenirken bir miktar kalkertaşı da demir cevheri ile birlikte ısıtılır. Demir cevheri, kalkertaşı ve kok kömürü ile fırının üst ucundan sürekli beslenmektedir [32].

Yüksek fırında yüksek sıcaklıklara ulaşan demir cevherinin bünyesindeki oksijen ile yüksek fırını besleyen kok kömürünün bünyesinde bulunan birleşik karbonmonoksit ve karbondioksit gazları oluşturarak fırını terk eder. Geriye, eriyik durumdaki demir ile birlikte, yine eriyik durumdaki, kireç, kok kömürünün külü, silis, alümin ve diğer yabancı maddelerden oluşan ve “cüruf” adı verilen malzeme topluluğu kalır. Eriyik halindeki malzemeler fırının bölümünde toplanmaktadır. Demirin yoğunluğu diğer atık malzemelerin yoğunluğundan fazla olduğundan demir alt bölümde bulunur ve üst bölümü de cüruf oluşturur. Eriyik durumdaki demir ve cüruf, fırının alt ucundan ayrı ayrı çıkışlarla dışarı alınmaktadır [32].

Eriyik cüruf, soğutulduktan sonra, çimento üretiminde hammadde olarak, beton yapımında agrega olarak, cürufli çimento üretiminde portland çimentosu klinkeri ve alçıtaşı ile birlikte öğütülen malzeme olarak ve beton üretiminde mineral katkı maddesi olarak değişik amaçlarla kullanılabilir [32].

Cüruf-kireç karışımı çimentoların ticari olarak ilk defa üretilmeye başlanması, 1865 yılında Almanya’ da gerçekleşmiştir. 1889 yılında, Paris metro sisteminin betonlarında cüruf-kireç karışımı çimentolar kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufu katılarak üretilen çimentolar ile ilgili Dünya’ daki birçok Şartname, cürufun tek ayrı olarak öğütülüp betona mineral katkı olarak ilave dilmesine ya da çimentonun klinkeri ile birlikte öğütülerek kullanılmasına müsaade etmiştir [32].

Cüruf katılarak elde edilen portland çimentolarının tipi ve özellikleri, çimento üretiminde kullanılan cüruf miktarına göre değişiklikler göstermektedir. Örneğin, ASTM C 595’e göre, ABD’ de cüruf katkılı üç tip çimento üretilmektedir. Bunlardan birincisi için üretimde kullanılan cüruf oranı, toplam çimento ağırlığının en çok % 25’ i iken, ikincisi için kullanılan cüruf oranı % 25 - % 70 arasında ve üçüncüsü için kullanılan cüruf oranı %70’ den fazladır [32].

Türk Standartları Enstitüsü’ nün yayımlamış olduğu 197-1 no’ lu Standart Türkiye’ de üretilebilecek çimentoların özelliklerini ve uygunluğunu açıklayan bir standarttır. 197-1 no’ lu bu standart Avrupa’ da 2011 yılının Kasım ayında, ülkemizde ise Avrupa’ daki bu yenilemenin hemen ardından 2012 yılının Şubat ayında revize edilerek çok önemli değişiklikler yapılmıştır [32].

Standarttaki değişiklikler içerisinde en dikkat çeken bölüm sülfata dayanıklı çimentoların sınıflarında olmuştur. Sülfat dayanımı yüksek, betonun ilk yaşlardaki dayanımının yüksek olmasını sağlayan, hidratasyon hızı daha düşük yeni çimentolar Standarda ilave edilmiştir. Yeni çimento sınıflarının dışında mevcut çimento sınıflarının içerikleri ile ilgili sınırlayıcı değerlerde birtakım değişiklikler yapılmıştır [34].

1. CEM II/A-M çimento sınıfı incelendiğinde %80-94 olan klinker oranı %80-88’ lere düşmüştür.
2. CEM V/B çimento sınıfı için % 31-49 aralığında olan yüksek fırın cürufu oranı 31-50 olmuştur.

Bu sınır değer değişikliklerinin yanısıra çimento sınıflarına 7 adet sülfat dayanımı yüksek çimento çeşidi ile 3 adet CEM III/A-B-C tiplerinde düşük erken dayanımlı yüksek

fırın cürüflu çimento çeşidi ve 2 adet sülfata dayanıklı düşük erken dayanımlı yüksek fırın cürüflu çimento çeşidi eklenmiştir. Yapılan bu düzenlemeyle “TS 10157 – Sülfata Dayanıklı Çimento Standardı” da yürürlükten kaldırılmıştır [34].

“Sülfat etkisine karşı direnci yüksek çimentolar isimlendirilirken SR (sulfate resisting), SR0, SR3, SR5 kısaltmaları kullanılmaktadır. Sülfatın zararlı etkilerine karşı kullanılması gereken çimentoların içermesi gereken trikalsiyum alüminat C_3A ($3CaO.Al_2O_3$) oranına üst limit tayin edilmiştir. Sülfata dayanıklı CEM I tipi çimentoların maksimum %5, CEM IV tipi çimentoların ise maksimum %9 trikalsiyum alüminat içeriğine sahip olması gerekmektedir. Yüksek fırın cürufu içeren CEM III tipi çimentolarda ise trikalsiyum alüminat miktarı ile ilgili bir limit değer belirlenmemiştir. Çimento ile su arasında meydana gelen reaksiyonda öncelikle çözünmeye uğrayan madde trikalsiyum alüminat C_3A ($3CaO.Al_2O_3$)’dır. Bu reaksiyon ile birlikte büyük miktarda ısı oluşmaktadır. Çimentonun ana maddesini oluşturan klinker ile birlikte karışıma alçıtaşı ilave edilerek trikalsiyum alüminat C_3A ’nın hızlı reaksiyona girmesini önler. Eğer çimentoya alçıtaşı katılmaz ise trikalsiyum alüminat ihtiva eden çimento hızlı bir şekilde sertleşmeye başlar. Trikalsiyum alüminat miktarı azaldıkça çimentonun sülfatın zararlı etkilerine karşı göstermiş olduğu direnç artar. Bunun sebebi ise sülfat iyonlarının C_3A ile reaksiyona girmesi sonucu oluşturdukları hasarlardır [34].

Yüksek fırın cürufu içeren CEM III/A-B-C tipli çimentolarda trikalsiyum alüminat (C_3A) miktarına herhangi bir limit değer belirlenmemesi bu çimentoların sülfatlı ortamlara karşı dirençlerinin çok üst seviyede olmasından kaynaklanmaktadır. Bu standartta yapılan önemli sayılabilecek değişikliklerden birisi de yüksek fırın cürufu ihtiva eden çimentolardaki ilk yaşlarda görülen dayanım kaybının iyileştirilmesine yönelik çimento çeşitlerinin eklenmesidir [34].

Yaklaşık yüz yıldır kullanılan cürüflu portland çimentolarının ilk andaki dayanım kazanma hızı, genel olarak, portland çimentolarinkine göre daha yavaştır. Ancak, daha sonraları dayanım değerinde büyük artış meydana gelmekte, 28 günlük ve daha sonraki dayanımları portland çimentolarınkinden daha az olmamaktadır. Cürüflu portland çimentolarının hidrasyon hızı portland çimentolarınkinden yavaştır. O nedenle, bu tür çimentoların kütle beton yapımında kullanılması daha uygun olmaktadır. Ayrıca,

cürüflü portland çimentoları, sülfatlı ortamlarda gösterdikleri dayanıklılık nedeniyle, deniz yapılarında veya sülfatlı ortamlara maruz beton yapımında kullanılabilir [32].

4.7. Yüksek Fırın Cürufunun Beton İçerisinde Kullanılması

Yüksek fırın cürufu geçirimsizliği, yüksek mukavemeti, ateşe dayanıklılığı, ekstra sertliği, yalıtkan özelliği ve hafif olmasından ötürü kullanılmaktadır. Taze betonda işlenebilmeyi artırmakta, terlemeyi azaltmaktadır. Betonda meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan hidratasyon ısısını düşürür ve betonda erken yaşlarda görülebilecek çatlakların önüne geçer, priz süresini uzatmaktadır. Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltmakta ve sülfata dayanıklılığı artırmaktadır [31]. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu betonda kullanıldığında, çimento hamurunda daha ince ve süreksiz boşluk oluştuğu, agrega-çimento ara yüzündeki boşlukların azaldığı, betonun durabilitesinin arttığı gözlenmiştir [31]. Dünyada maliyet ve kaynak kullanımının en büyük paya sahip sektörü kuşkusuz inşaatır. Her sektörde olduğu gibi inşaat sektöründe de doğal kaynakların gerektiği gibi yerinde ve zamanında kullanılamaması, çevresel birçok sorunun ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu durum sektörde sürdürülebilir gelişmenin sağlanmasında kalıcılığın önemini göstermektedir. Cürufun uygun miktarlarda çimento ikamesi olarak kullanıldığında kütle betonlarında, sıcaklığın kontrol edilmesi için etkili bir araç olduğu gözlenmiştir. Her durumda, cürüflü çimentonun ilavesi, ilk zamanlarda çimentonun neden olduğu erken ısı üretimini azaltır. Beton bünyesinde yüksek sıcaklık gelişiminin betonda çatlakların oluşması ve hacimsel kararlılığı üzerinde önemli etkileri vardır [31]. Sertleşmiş betonda geçirimsizlik ve su emme özelliği, boşluk yapısının bir göstergesidir. Bu nedenle kimyasal ve fiziksel olaylara karşı durabiliteyi etkileyen en önemli özelliklerin başında geçirimsizlik özelliği gelir. Su geçirimsizliği, suyun çözülebilen zararlı iyonları beton içerisine taşması ve kimyasal tepkimelerde bizzat yer alması nedeniyle, betonun ömrü boyunca uğrayabileceği hasarın bir göstergesi olarak kabul edilir [31].

Geçmiş bölümlerde de bahsedildiği gibi çimento ile yüksek fırın cürufunu belli oranlarda yer değiştirmesiyle yeni tip çimentolar üretilmeye başlanmıştır. Bu durumu TS 197-1 Standardında 2012 yılında yapılan değişiklikle birlikte çok daha net görebilmekteyiz. Özellikle CEM III / B-C tipli çimentolarda %60-80 arasında çimento ile

ikame oranları bulunmaktadır. Yüksek fırın cürufunun yüksek oranlarda çimentoda ikamesi sonucunda, betonun ilk yaşlardaki dayanım miktarlarında düşme gözlenmektedir. Fakat, betonun içinde gelişen kimyasal reaksiyon sürecinin tamamlanmasıyla ilk yaşlarda görülen dayanım kayıpları azalmakta ve hatta 28 günün sonunda eşitlenebilmektedir. Biraz daha uzun süre beklenildiğinde ise dayanımların normal Portland çimentosu ile üretilen betonlara göre daha fazla çıktığı da standartlarda belirtilen değerlerin sağlandığı anlaşılmıştır [31]. Endüstriyel atık olarak nitelenen yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ile ayrı ayrı deneyler yapılmış ve bu deneylerin sonucunda yüksek fırın cürufunun performansının daha iyi olduğu tespit edilmiştir [31]. Betonların sülfatın zararlı etkilerine karşı dayanımlarının artırılması için uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi puzolanik katkı malzemeleri veya sülfat konsantrasyonunun yoğunluğuna göre TS 197-1' de belirtilen 7 adet sülfat dayanımı yüksek çimento sınıfından biri tercih edilebilir. Puzolanik katkı maddeleri, Ca(OH)_2 ' i bağlayarak sülfat iyonları ile reaksiyona girmesini engellerler. Sadece Portland çimentosu kullanılması durumunda daha yüksek olan trikalsiyum alüminat oranı yüksek fırın cürufunun eklenmesiyle birlikte azalarak betona verecek olduğu zararlı etkilerde böylelikle azalmış olur [31].

ÖGYFC uygulamada 3 farklı şekilde kullanılmaktadır:

- 1- Kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştirilerek, hidrolik bağlayıcı madde olarak doğrudan kullanılabilenkte,
- 2- Portland çimentosu klinkeri ve küçük miktarda alçıtaşı ile birlikte veya ayrı ayrı öğütülerek, "cürüflü çimento" üretiminde kullanılabilenkte,
- 3- Beton katkı maddesi olarak kullanılabilenkte [31].

Cürüflü çimento üretiminde kullanılan cüruf miktarları ülkelere göre farklılıklar gösterebilmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde ASTM C 595' de belirtilen Portland Yüksek Fırın Cürufu Çimentolarında cüruf oranı % 25-65, Almanya'da DIN 1164' de Eisenportland Çimentosunda en fazla % 40, Hochofen Çimentosu'nda ise % 41-85' dir. Fransa'da ise farklı 4 tür cürüflü çimento mevcut olup, % 25-35, % 45-55, % 65-75 ve % 80'in üzerinde cüruf katılabilir. Ülkemizde ise TS EN 197-1' de belirtilen CEM II/A-S tipi çimentoda % 6-20, CEM II/B-S tipi çimentoda % 21-35, CEM III/A tipi çimentoda % 36-65, CEM III/B tipi çimentoda % 66-80, CEM III/C tipi çimentoda % 81-

95, CEM V/A tipi çimentoda % 18-30 ve CEM V/B tipi çimentoda % 31-50 oranlarında yüksek fırın cürufu kullanılmaktadır [31].

4.8. Yüksek Fırın Cürufunun Betonun Durabilitesi Üzerindeki Etkileri

4.8.1. Taze beton özellikleri üzerindeki etkileri

4.8.1.1. Su ihtiyacı ve işlenebilirlik

İşlenebilirlik, betonun sertleşmesinden önceki durumuyla ilgili bir özellik olduğundan dolayı taze betonun içindeki çimento miktarı, cüruf ikame oranı, agrega miktarı, cüruf tipi ve bütün bu malzemelerin birbirleri ile girdikleri fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar, yüksek fırın cürufu ihtiva eden betonların işlenebilme özelliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [31].

Yüksek fırın cürufu çimento ile üretilen betonlar, Portland çimentosu ile üretilen betonlara oranlara daha su ihtiva ederler [31]. Granüle yüksek fırın cürufları ile üretilen betonlarda, cürufun çimentonun önemli hammaddelerinden olan klinkere göre daha az bir yüzey pürüzlülüğüne ve daha düşük özgül ağırlığa sahip olması çimento hamurunun hacmini artırmakta ve buna bağlı olarak betonun işlenebilirliği artmaktadır [31]. Yüksek fırın cürufu harçların işlenebilme özelliğinin araştırıldığı çalışmalarda düşük su/çimento (0,20) oranında ve yüksek oranda akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılması durumunda, yüksek fırın cürufunun çimento içerisinde kısmi olarak ikame edilmesi sonucu harçların akışkan kıvamlarının artarak işlenebilme üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu tespit edilmiştir [31].

4.8.1.2. Terleme

Betondaki terleme çimentonun miktarına ve özelliğine bağlı olmakla birlikte, terleme üzerindeki en büyük etki beton içerisindeki ince malzemelerin özelliğine bağlıdır. Yüksek fırın cüruflarının kısmi olarak Portland çimentosu içerisindeki ikame edilmesi hidrasyon hızını azaltarak, terlemenin miktarında ve hızında artışa neden olmaktadır.

Yüksek fırın cürufu beton içerisinde fazla miktarda kullanıldığı takdirde terleme de o oranda artmaktadır [31].

Ulusal Beton Kongresinde, yüksek dayanımlı betonların üst yüzeylerinde terleme görülmediği, bu nedenle betonun prizini almaya başlamasından hemen sonra bakımının çok özenli ve dikkatli şekilde yapılması gerektiği raportör görüşü olarak sunulmuştur. Cürufu çimento ile hazırlanan harçların terleme karakteristikleri incelendiğinde su/bağlayıcı oranı dikkate alınmaksızın 0,35 ve 0,45 gibi oranlarda cüruf ikame oranının artmasıyla terleme miktarı ve kapasitesinde ciddi oranda artış olduğu saptanmıştır [31].

Diğer taraftan cüruf ikame edilen çimentolarla elde edilen karışımların üzerinde su oranının etkisi araştırılmış, su/bağlayıcı yüzdesinin %35'ten %45'e çıkarılması, %0, %30 ve %70 oranında yüksek fırın cürufu içeren harç karışımlarındaki terleme oranlarında sırasıyla %86, %83 ve %71 yükselme oluşturmuştur. Karışımındaki su miktarının artmasıyla meydana gelen bu artış, taneler arasındaki uzaklığın daha geniş olmasının bir sonucunda, tanelerin birbiriyle olan aderansının azalarak meydana gelen zayıf kohezif çekim kuvvetlerinden ileri gelmektedir [31].

4.8.1.3. Priz süresi

Yüksek fırın cürufu ihtiva eden çimentolarla üretilen betonlar normal Portland çimentolarla üretilen betonlara oranla daha geç priz almaya başlarlar. Beton içerisindeki yüksek fırın cürufu miktarı ne kadar fazlaysa betonun prizini alarak sertleşmesi de o kadar fazla vakit alır [31]. Yüksek fırın cürufunun bu özelliği zaman zaman olumsuz bir özellik gibi görünse de büyük kütleli ve uzun sürelerde dökülen betonlarda soğuk derz oluşma riskinin de azalmasını sağlar. Yapılan deneysel bir çalışmada 6 °C ile 80 °C sıcaklıklar arasında değişen kür sıcaklıkları altında, %50 oranına kadar yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen betonların Proctor penetrasyon dayanıklılığı incelenmiştir. Dayanıklılık hem yüksek fırın cürufu içeren betonlarda hem de normal Portland çimentosu ile hazırlanmış betonlarda sıcaklığın yükselmesiyle birlikte yükselmiştir. Ayrıca kür sıcaklığı arttıkça hem yüksek fırın cürufu ile üretilen betonların hem de normal Portland çimentosu ile üretilen betonların priz başlangıç ve bitiş sürelerinde azalmalar meydana gelmiştir. Sıcaklığın daha da artmasıyla yüksek fırın cürufu içeren betonlar daha kısa

sürede priz almaya başlamışlardır [31]. Beton içerisinde kütlece %40, %50 veya %65 oranında yüksek fırın cürufu bulunduğu takdirde, harç karışımlarının priz başlangıç ve bitiş zamanları sadece Portland çimentosu ile hazırlanmış betonlarınkine göre yaklaşık bir saat kadar daha uzundur [31]. Bu çalışmalardan görüldüğü gibi yüksek fırın cürufu ikamesi betonun priz alma süresinde ikame oranının artmasıyla birlikte önemli gecikmeler meydana getirmektedir [31].

4.8.1.4. Hidratasyon ısısı

Yüksek fırın cürufu çimentolar kimyasal özelliklerinden ötürü, portland çimentolarından daha yavaş ve daha düşük miktarda hidratasyon ısısı açığa çıkarmaktadır [31]. Yüksek fırın cürufu hidratasyon ısılarının düşük olmasından dolayı büyük hacme sahip kütle betonlarında kullanılması uygun olmaktadır. Cürufun hidratasyon ısısının düşük olması büyük kütle betonlarında betonun iç yüzeyi ile dış yüzeyi arasında meydana gelen büyük ısı farklılıklarını ortadan kaldırır ve olası çatlama riski de ortadan kalkmış olur. Katkılı çimentoların hidratasyon ısıları, artan cüruf ikame oranıyla, azalma göstermektedir. Yüksek fırın cürufunun çok fazla olduğu betonlarda cürufun inceliğine de bağlı olarak hidratasyon ısısında ve basınç mukavemetine artış olmaktadır [31]. Ayrıca, yüksek miktarda cüruf içeriğine sahip çimentolarda basınç mukavemeti SO_3 miktarındaki düşüşle birlikte artmaktadır [31]. Yüksek miktarlardaki cüruf ikame oranı, hidratasyon ısısını oldukça azaltarak büyük kütle betonlarının dökümünde ortaya çıkabilecek çatlama riskini en aza indirmektedir [31]. Yüksek fırın cürufu Portland çimentosu yerine ikame edildiğinde düşük hidratasyonlu betonlar elde etme imkânı ortaya çıkmaktadır [31]. Beton karışımların içinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan hidratasyon ısısına yüksek fırın cürufu ve mikrosilikanın nasıl etki ettiğinin araştırıldığı deneysel bir çalışmada, farklı miktarlarda yüksek fırın cürufu ve mikrosilika ilave edilerek hazırlanan beton karışımları ile sadece Portland çimentosu ile hazırlanmış harç karışımlarının mukayese edilerek hidratasyon ısıları kaydedilmiştir. Bu çalışmanın sonucu olarak, hidratasyon ısısına çimento miktarının doğrudan etki ettiği ve yüksek fırın cürufunun mikrosilikaya göre harç karışımlarında hidratasyon ısısını daha fazla azalttığı bildirilmiştir. Çimento ile ikame edilen bu malzemelerin pik sıcaklığa erişme süresini kesin olarak etkilediği ve granüle yüksek fırın cürufunun pik sıcaklığa erişim süresini geciktirirken, mikrosilikanın bu süreyi hızlandırdığı da rapor edilmiştir [31].

Yüksek fırın cürufunun beton imalatında kullanılmasıyla hem betonun ulaşacağı maksimum sıcaklık azalır hem de maksimum sıcaklığa ulaşılan süre uzamaktadır [31].

4.8.2. Sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki etkileri

4.8.2.1. Basınç ve çekme dayanımı üzerindeki etkileri

Aynı miktarda çimento ve aynı miktarda su/bağlayıcı oranına sahip yüksek fırın cürufu ikame edilen betonlar ile Portland çimentosu ile üretilen betonlar karşılaştırıldığında, cüruf ikame edilen betonların erken yaş dayanımları düşük olmakla birlikte geç yaşlarda daha yüksek dayanımlara ulaştığı görülmüştür. Bu durum yüksek fırın cüruflarının daha yavaş hidrate olmasından kaynaklanmaktadır. Cüruf ikame oranı arttıkça mukavemet gelişimi de azalmaktadır. Ancak, betonun bakım ve kuru özenli bir şekilde yapıldığında, cüruf lu betonların ileriki yaşlardaki dayanımları daha yüksek olabileceği bilinmektedir. Sıcaklığın artmasıyla cüruf ikame edilen betonların mukavemet gelişimi Portland çimentosu içeren betonlarınkinden daha fazla olmaktadır [31].

4.8.2.2. Sülfat hücumu üzerindeki etkileri

İller Bankasının faaliyet alanlarının içinde bulunan kanalizasyon, atıksu arıtma tesisi gibi altyapı tesisleri zaman zaman sülfatların olumsuz etkisine maruz kalmaktadır. Bu etkiler yer altı suyundan kaynaklandığı gibi tesislerin taşıdığı atıksuyun niteliğinde bulunan sülfatlardan da kaynaklanabilmektedir. Bu durumda sülfatın, kalsiyum hidroksit ile girdiği reaksiyon sonucu alçıtaşı meydana gelir. Daha sonra, betonun içerisinde sertleşerek bağlayıcılık kazanan çimentonun ihtiva ettiği yarı kararlı yapıdaki kalsiyum alumino monosülfhidrat (C_4ASH_{12}) ve sülfat iyonlarının zararlı etkileri sonucu kalsiyum alumino trisülfhidrat veya diğer adıyla etrenjit ($C_6AS_3H_{32}$) oluşmasına yol açar. Tesiste meydana gelen etrenjit, betonda çok büyük genleşmeler yaratmakta, betonun çatlayıp parçalanmasına yol açarak tesisin planlanan hizmet ömrünü tamamlayamadan kullanım dışı kalmasına yol açabileceği düşünülmektedir [31]. $MgSO_4$, $CaSO_4$ ve Na_2SO_4 eriyiklerinin kullanılarak yapılan bir araştırmada 130 değişik çimento kullanmış ve yüksek fırın cüruflarının, beton içindeki ikame oranlarıyla bağlantılı olarak, sülfat direncini arttırdığı saptanmıştır [31]. Yüksek fırın cürufunun beton içerisinde kütlece, %45 ve %72

oranlarında kullanılarak üretilen betonların 10,5 yıl boyunca 3000 mg/lt konsantrasyona sahip SO₄ çözeltilisinde bırakılmasının ardından yapılan incelemelerde herhangi bir bozulmaya rastlanmamasına rağmen, trikalsiyum alüminat (C₃A) içeriği % 3,55 ile % 12,3 arasında olan Portland çimentolarıyla üretilen betonların bu olayın sonucunda hasar gördüğü tespit edilmiştir [31]. 0,45 ve 0,60 su/bağlayıcı oranında, % 11,5 ve % 15,5 gibi iki farklı alümin içeriğine sahip yüksek fırın cürufu içeren betonların sülfat dayanıklılığı araştırılmıştır. Çalışma sonuçlarından, su/bağlayıcı oranı yükseltip cüruf ikame oranı düşürüldüğünde betonda sülfat atağına bağlı çatlamlar meydana gelmekte, fakat su/bağlayıcı oranı ile cüruf ikame oranı İngiltere' deki mevcut şartnamelere göre belirlenerek hazırlanan beton örneklerinde sülfat hücumuna karşı dayanıklı oldukları görülmüştür [31]. %60 ve üzeri ikame oranında hazırlanmış harç ya da betonlar, deniz suyu ve sülfat atağı nedeniyle bozulmaya ve klor girişine karşı arttırılmış dayanıklılık sağlamakta, ancak bu oran %60'ın altında kaldığı takdirde cüruf ikameli betonlar Portland çimentolu betonlar kadar dayanım gösterememektedirler [31]. Kür şartlarının yüksek fırın cürufu ikame edilen betonlardaki etkisini araştırmak amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada silis dumanı ve yüksek fırın cürufu Portland çimentosu yerine ikame edilerek hazırlanan numuneler magnezyum sülfat sodyum klorür ve sodyum sülfat etkisine maruz bırakılmışlardır. Hazırlanan harç karışımı örneklerinin sertleştikten sonra bırakıldıkları magnezyum sülfat, sodyum klorür ve sodyum sülfat gibi zararlı çözeltiler içerisinde en fazla yıpratıcı etkiyi magnezyum sülfatın gösterdiği görülmüştür. Yüksek fırın cürufu içeren numunelerin paslanmaya karşı dayanımlarının Portland çimentosu ile hazırlanan numunelerinkine oranla daha fazla olduğu da rapor edilmiştir [31].

4.8.2.3. Klor etkisine dayanıklılık

Yüksek fırın cürufunun klora karşı dayanımını belirlemek amacıyla hızlandırılmış klor permeabilite deneyi yapılmıştır. Bu deneyde farklı incelik boyutlarında ve farklı ikame oranlarında yüksek fırın cürufu ihtiva eden çimento örnekleri kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufu içeren bu çimentolarla 102 mm çap ve 51 mm boya sahip silindir şeklinde beton numuneler üretilerek 14 günlük standart bakımın ardından hazırlanan beton numunelerin bir tarafı sodyum klorür diğer tarafı sodyum hidroksit çözeltilisinin etkisine maruz bırakılarak 60 V sabit potansiyel farkı uygulanmış ve bir yüzden öbürüne geçen elektriksel akım ölçülerek klor permeabilitesi ile ilişkilendirilmiştir. Bu deneysel

çalışmanın sonucunda cüruf inceliğinin artışına bağlı olarak geçirimsizliğinin azaldığı, yüksek fırın cürufu çimentolarla üretilen betonların klor geçirimsizliği konusunda Portland çimentosu ile üretilen betonlardan daha iyi olduğu saptanmıştır [31]. %0, %25, %50 ve %75 oranlarında yüksek fırın cürufu ihtiva eden beton numuneler üzerinde, otoklav kürü (175 °C, 0,5 MPa), buhar kürü (80 °C) ve normal kür (20 °C, %100 RH) gibi değişik kür şartlarının etkileri ile ilgili bir çalışma yapılmıştır [31]. Beton en iyi dayanıma oda sıcaklığında ulaştığı, erken dayanıma ulaşılması gereken durumlarda otoklav kürü yerine buhar kürünün uygulamasının yapılabileceği ve son olarak, cüruf ikame oranındaki artışa paralel olarak klorür geçirgenliğinde de bir azalma meydana geldiği, uygulamaya da bağlı olarak, mukavemeti artırmak ve klorür geçirgenliğini azaltmak için değişik cüruf ikame oranlarının kullanılabilmesi rapor edilmiştir [31]. Klorürler betonun içinde bulunduğu çevresel şartlara bağlı olarak betonun bünyesine girebildiğinden, betonda yüksek oranlarda granüle yüksek fırın cürufu ikamesi, betonun dayanıklılığını ve klor iyonlarına karşı dayanımını arttırmaktadır [31].

Yüksek fırın cürufunun beton üretiminde kullanılmasının sağlamış olduğu en büyük faydaların başında cürufun inceliğine bağlı olarak betonun boşluk yapısını iyileştirmesi ve geçirimsizliği artırması gelmektedir. Dolayısıyla boşluk yapısında meydana gelen bu iyileşme klor iyonlarının da betona nüfuz etmesini engelleyerek betonarme yapının içinde bulunan demir donatıların paslanmaya karşı korunmasını sağlamaktadır. Öte yandan yüksek fırın cürufu Portland çimentosuna oranla çok daha fazla klor iyonunu bağlayarak zararlı etkisini azaltmaktadır [31]. Betonun boşluk yapısında meydana gelen azalma betonun iç bölgelerine zararlı kimyasal çözelti ve gazların ilerleyişinin önünün keser. Üretilen betonların geçirimsiz yapıda olması içindeki su ve çimento miktarı ile çok yakından ilgilidir. Klor iyonlarının yüksek konsantrasyon oranlarında bulunduğu ortamlarda üretilecek olan betonlarda su/bağlayıcı madde oranı minimum seviyede tutulmalı ve betona yüksek fırın cürufu gibi puzolanik katkı maddeleri eklenmelidir [31].

28 günlük test sonuçlarına göre, beton içerisinde çimentonun cürufu kısmi olarak yer değiştirilmesi durumunda, betonun klor geçirgenliğinde de azalmalar olduğu görülmüştür [76]. 28 günlük bakım ve kürden sonra alınan sonuçlara bakıldığında, Portland çimentosuyla yapılan numunelere göre, %25 cüruf ihtiva eden numunelerin %50,

%50 cüruf ihtiva eden numunelerin %70 ve %75 cüruf ihtiva eden numunelerin de %87 oranında klor iyonu geçirimsizliğini azalttığı görülmüştür [31].

4.8.2.4. Deniz suyu etkisine dayanıklılık

Deniz suyunu etkisini incelemek amacıyla yapılan bir deneysel çalışmada, deniz suyuna tamamıyla batırılmış 40x40x160 mm ebadındaki harç numunelerindeki cüruf ikame oranı arttıkça betonun içindeki genişlemenin azaldığı saptanmıştır [31].

Bir başka deneysel çalışmada 100 mm' lik küplerden hazırlanan cürufllu ve farklı C₃A oranlarındaki Portland çimentolu betonların gel-git tesiri altında ve tamamen deniz suyu içindeki numuneler üzerinde araştırma yapılmıştır. Deney sonucunda elde edilen bulgulardan, tamamen deniz suyu altındaki %70 cüruf ikamesiyle hazırlanan betonların mukavemetinin iyi olduğu ve orta seviyedeki klorür geçirgenliği ile kimyasal saldırılara karşı daha dayanıklı olduğu görülmüştür. Bunların yanında, %60 cüruf katkılı betonların en yüksek klorür difüzyonuna sahip betonlar oldukları, %80 cüruf katkılı betonların ise mukavemet gelişimleri son derece düşük olmakla birlikte klor iyonu geçirgenliğini de en aza indirdiği görülmüştür [31].

4.8.2.5. Karbonatlaşmaya dayanıklılık

Karbonatlaşma, atmosferdeki CO₂ gazının betonun boşluklarında bulunan serbest kireç ile reaksiyona girmesi sonucu oluşur. Karbonatlaşma betonun geçirimsizlik özellikleriyle doğrudan ilgilidir. Bunun dışında, betondaki karbonatlaşma; yapılan küre, betonun içindeki çimento miktarına, betonun içinde bulunduğu ortamın sıcaklığına ve kullanılan katkı malzemelerinin özelliklerine bağlıdır. Puzolanik mineral katkı maddelerinin genellikle betonun gözenekliliğini azalttığı ve böylece geçirgenlikte azalmaya neden olduğu bilinmektedir [31].

CO₂' in betonun derinliklerinde bulunan kireçle reaksiyona girmesini engellemek için ilk olarak betonun geçirgenliğini azaltılması gerekmektedir. Geçirgenlik, su/bağlayıcı oranının azalmasıyla beraber azalmaktadır. Cüruf ikame oranının, betonun karbonatlaşması ve mukavemeti üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada yapılmıştır. Normal

atmosferik koşullara maruz bırakılmış numunelerden elde edilen sonuçlar, 28 günlük bakımdan sonra basınç mukavemeti esas alındığında, yüksek fırın cürufu ile ikame edilmiş betonların karbonatlaşma derinliklerinde büyük artışlar olmasına rağmen 30 MPa' ın üzerindeki dayanımlar için betonu oluşturan malzemelerin özelliklerinin farklı olmasının çok fazla öneminin olmadığı grlmştir [31]. Diğer taraftan betonun içindeki imento miktarının azalıp su miktarının artmasıyla karbonatlaşma derinliğinde de ciddi oranda bir artışın olduğu anlaşılmıştır [31].

Yapılan bir araştırmaya göre %50'ye kadar cüruf ikamesiyle elde edilen betonlar normal ve ılıman koşullardaki karbonatlaşma miktarlarının Portland imentolu betonlarınkilerle hemen hemen aynı olduğu bildirilmiştir. Klorür, sülfat ve deniz suyu gibi zararlı ortamlara karşı üst düzey dayanımın istendiği yerlerde %70 oranında cüruf ihtiva eden betonlar kullanılabilir. Fakat karbonatlaşma riskinin yüksek olduğu koşullarda, hem kr hem donatı pas payı konusunda gerekli özel önlemler alınmalı, bu tip yerlerde cüruf ikame oranı %50' nin üzerinde olmamalıdır [31].

4.8.2.6. Aşınmaya dayanıklılık

Yüksek fırın cürufu ile hazırlana betonların aşınma ve mekanik özelliklerinin incelendiği bazı araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmaların sonucunda yüksek fırın cüruflarının imento yerine beton içerisinde ikame edilebileceği fakat bu betonların aşınmaya karşı dirençlerinin Portland çimentosuyla hazırlanan betonlara oranla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Betonun bakım ve krnn titizlikle yapılması kaydıyla, betonda yüksek fırın cürufu ikamesi aşınmaya karşı mukavemeti bir miktar arttırmaktadır [31].

4.8.2.7. Donma – zlme direnci

Donma-zlme direnci esas olarak beton içindeki hava miktarına bağlıdır. Yapılan alışmalar aynı hava içeriğine sahip yüksek fırın cürufu ile hazırlanmış betonlar Portland imentosu ile hazırlanmış betonlarla donma-çözülme dirençleri açısından karşılaştırıldığında çok az farklılığın olduğu grlmştir. Ancak %60 ve üzeri cüruf ihtiva eden hava katkısız betonlar, Portland imentoları ile elde edilen betonlara göre daha düşük bir direnç göstermektedirler. Hava sürükleyici katkının, yüksek fırın cürufu ikame edilen

betonlarda kullanılması katkının etkinliğine olumsuz etki etmemektedir [31]. Aynı dayanım ve hava miktarı olması halinde yüksek fırın cürufu betonlar ile Portland çimentolu betonların donma-çözülme dirençleri aynı olmaktadır. Fakat cüruf ikamesi çok yüksek oranlarda olduğu takdirde, donma-çözülme direncinde bir miktar düşüş görülebilir [31]. Öte yandan, yüksek fırın cürufu kullanımının betonun içindeki boşluklu yapıyı azaltması donma-çözülme direncine olumlu etki edeceği görüşü de savunulmaktadır [31]. Yapılan tüm araştırmalardaki ortak kanaat yüksek fırın cürufu içeren betonların, Portland çimentosuyla hazırlanan betonlara göre daha fazla havaya sürükleyici katkıya ihtiyaç duyduklarıdır [31].



Resim 4.5. Hava sürükleyici katkıli ve katkisiz beton

Donma-çözülme etkisine maruz bırakılan betonlar üzerinde yapılan çalışmalarda yüksek fırın cürufu içeren çimentolarla üretilen betonların dirençlerini başlangıçta düşük seviyelerde kaldığı ancak ilerleyen zamanlarda donma-çözülme döngüsü sayısı arttıkça yüksek fırın cürufu kullanımından kaynaklı olarak dayanıklılıkta artış meydana gelmektedir. Bunun nedeni tam olarak ortaya çıkarılabilmemiş değilse de yüksek fırın cürufunun çok ince yapıda olmasından dolayı betonda oluşan boşlukların da çok ince seviyelerde kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [31].

4.8.2.8. Asit etkisine dayanıklılık

Asidin bütün canlı hayatına etkisi olduğu gibi beton yapımında kullanılan Portland çimentolarına üzerinde de çok ciddi etkileri bulunmaktadır. Betonun asitten etkilenme

derecesi, betonun içinde bulunduğu çevre koşullarına ve asidin pH' ı gibi birçok faktöre bağlıdır.

Bir çalışmada yüksek fırın cürufu ile üretilen betonların pH seviyesi 3,5 ile 5,5 arasındaki ortamda asit etkisine karşı dayanıklı olduğu görülmüştür [31].

Yüksek fırın cürufu içeren çimento ve uçucu kül içeren çimento kullanılarak hazırlanan beton numunelerin davranışlarının araştırıldığı bir deneysel çalışmada %40 oranında uçucu kül ihtiva eden beton numuneleri ile sadece Portland çimentosu kullanılarak beton numuneleri. Araştırma beton örneklerinin kısa ve uzun dönemdeki performansları olarak iki kısma ayrılmıştır. 3 günlük kür uygulamasından sonra, numuneler oda sıcaklığında 4, 8, 16 ve 50 haftalık sürelerle %2 H₂SO₄ konsantrasyonuna sahip çözeltiye içine bırakılan 100x100x300 mm ebatlarındaki numunelerinden üzerinde yapılan deneylerin sonucunda, % 15 oranında yüksek fırın cürufu ile % 25 oranında uçucu kül ihtiva eden beton numunelerinin asit atağının betonda oluşturduğu tahribatlara karşı hem sadece Portland çimentosu ile üretilen betonlara göre hem de %40 uçucu kül içeren beton numunelerinkinden daha etkili olduğu anlaşılmıştır [31].

4.8.2.9. Alkali – Agrega reaksiyonu

Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun, çimentonun bir bölümü ile yer değiştirilerek kullanılması, alkali miktarını azaltabilir.



Resim 4.6. Avusturalya'da bir köprü ayağında ASR etkisi sonucu gelişen çatlaklar [36]

Beton üretimine alkali miktarı az olan çimentoların kullanılması veya CEM III/B-C tipindeki yüksek fırın cürufu miktarı yüksek oranlarda olan çimentoların tercih edilmesiyle alkali maddeler ile agrega arasında meydana gelebilecek zararlı reaksiyonların önlenebileceği görülmüştür. Yüksek fırın cürufunun betonun içerisinde çimento ile %30 oranında yer değiştirmesi sonucunda alkali miktarında 1,0 ila 1,7 kg/m³ civarında bir eksilme olduğu ve cüruf inceliğine bağlı olarak alkali maddeler ile agrega arasında görülebilecek reaksiyonların da azalacağı rapor edilmiştir.

Yapılan bir diğer çalışmada yüksek miktarda alkali ihtiva eden bir Portland çimentosu alınarak yüksek fırın cürufu ile % 24 ve % 50 oranlarında ikame edilmesi sonucu çimentonun bünyesinde bulunan alkalilerin agrega ile girmiş olduğu reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan genleşmelerin büyük ölçüde azaldığı tespit edilmiştir [79]. Beton içerisinde çimento yerine belli miktarlarda ikame edilen yüksek fırın cürufları, sülfatın zararlı etkilerine ve alkali-agrega reaksiyonundan kaynaklanan bozulmalara karşı da ciddi dayanım sağlamaktadır [31].

4.8.3. Kılcal su emme

Suyun betonun içindeki boşluklardan ilerleyerek iç bölgelere ulaşma hızı kılcallık olarak tanımlanabilir. Betonun içine sızan bu suların içinde bulunan zararlı maddeler betonun dayanımını düşürmektedir. Bu yüzden betonun kalitesi ile kılcallık arasında ters bir orantı söz konusudur. Yapılan araştırmalar beton içinde yüksek fırın cürufu ikame edildiğinde betonun kılcal su emme kapasitesinin büyük ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. [31]. Betonun basınç dayanımının yükselmesiyle birlikte kılcallığın azaldığı bildirilmiştir. [31]. Betonun içindeki su ve bağlayıcı maddenin miktarı ile basınç dayanımı ve kılcallık arasında bir ilişki olduğu bildirilmiş ve beton içindeki su miktarının arttırılıp bağlayıcı madde miktarının azaltılması sonucunda betonun kılcal su emme kapasitesinde önemli artışların olduğu rapor edilmiştir [31]. Kılcal su emme kapasitesinin artması ile porozite de bir artış meydana gelmektedir. Betonun yaşının artmasıyla kılcal su emme kapasitesinde azalma olduğu tespit edilmiştir [31].

4.8.4. Boşluk yapısı

Betonun içinde bulunan boşluk miktarı betonun dayanımını, dayanıklılığını doğrudan etkilemektedir. Betonun geçirimsiz olması dayanıklı olabileceğinin en iyi göstergelerinden birisidir. Betonun içindeki boşluk miktarının fazla olması betonun içinde bulunduğu çevredeki zararlı maddelerin çok rahat bir şekilde betonun içine girip ilerlemesine neden olur. Bu etki betonun içindeki demire kadar ulaştığında sülfatın korozif etkisi ve klorür etkisi artmakta ve karbonatlaşma karşı dayanım hızla azalmaktadır. Bu yüzden betonu oluşturan karışımı elde ederken çimentonun tipine betonun içindeki su ve bağlayıcı madde miktarının ne kadar olması gerektiğine çok dikkat edilmelidir. Ancak uygun koşullarda hazırlanmış betonlar geçirimsizlik özelliğine sahip olabilmektedir. Yüksek fırın cürufu ikame edilen betonlarda cürufun ince bir malzeme olmasından dolayı betonun içindeki boşlukların boyutu küçülmekte buna bağlı olarak toplam boşluk oranı da azalmaktadır [31]. Yüksek fırın cürufu ihtiva eden betonların yapısında, Portland çimentosu ile hazırlanan betonlarınkine oranla daha az boşluk oluşmaktadır [31]. Yüksek fırın cürufunun klor iyonu geçirgenliğinin ve bağlayıcılığının araştırıldığı bir çalışmada, yüksek fırın cürufu ikame edilerek hazırlanmış betonların içindeki boşluk miktarının daha az olduğu görülmüş ve Portland çimentosu ile hazırlanmış bir betonun içerisinde, %70 oranında yüksek fırın cürufu ikame edildiğinde ve 60 günlük bakım ve kür sürecinden sonra boşluk yapısının hayli iyileştiği bildirilmiştir [31]. Öte yandan, sülfatlar ve C_3A arasındaki şişme reaksiyonları dışındaki diğer bazı nedenlerden dolayı, sülfatların betonun boşluk yapısını beklenildiği gibi olumsuz etkilediği, bu nedenle de sülfatlarla granüle yüksek fırın cürufu betonların boşluk yapısının geliştirileceğinin doğru olmadığı rapor edilmiştir. Çimento harcının boşluk miktarına yüksek fırın cürufularının etkisinin araştırıldığı deneysel çalışmaların sonucunda, çimentonun içindeki cüruf miktarının artmasına bağlı olarak porozitede bir azalma meydana geldiğini ortaya koymuştur [31]. Porozitede gözlenen bu azalma cüruf ikame edilerek hazırlanan Portland çimentoları ile oluşturulan betonların daha dayanıklı betonlar olduğunu göstermektedir. Ancak, porozitede böyle bir azalmanın meydana gelebileceği her zaman söylenemez. Zaman zaman çok fazla yüksek fırın cürufu ilavesiyle boşluk yapısında artış dahi gözlenebilir. Bu yüzden, cüruf katkılı betonların Portland çimentosu ile üretilen betonlara göre daha dayanıklı betonlar olmasının sebebi poroziteden ziyade betonun yapısında oluşan ince boşluk sistemleri ile ilgilidir [31]. Yüksek fırın cürufu çimento içeren betonlarda

boşlukların boyutu daha kabadır fakat ilerleyen zamanlarda beton içerisindeki jel miktarı artarak daha ince boşluk sistemleri oluşturmaktadır ve esasında betonun içerisindeki toplam boşluk oranı değişmemektedir [31].

5. LİTERATÜRDE CÜRUFU ÇİMENTOLARIN SÜLFAT DAYANIMI İLE İLGİLİ YAPILMIŞ DENEYSEL ÇALIŞMALAR

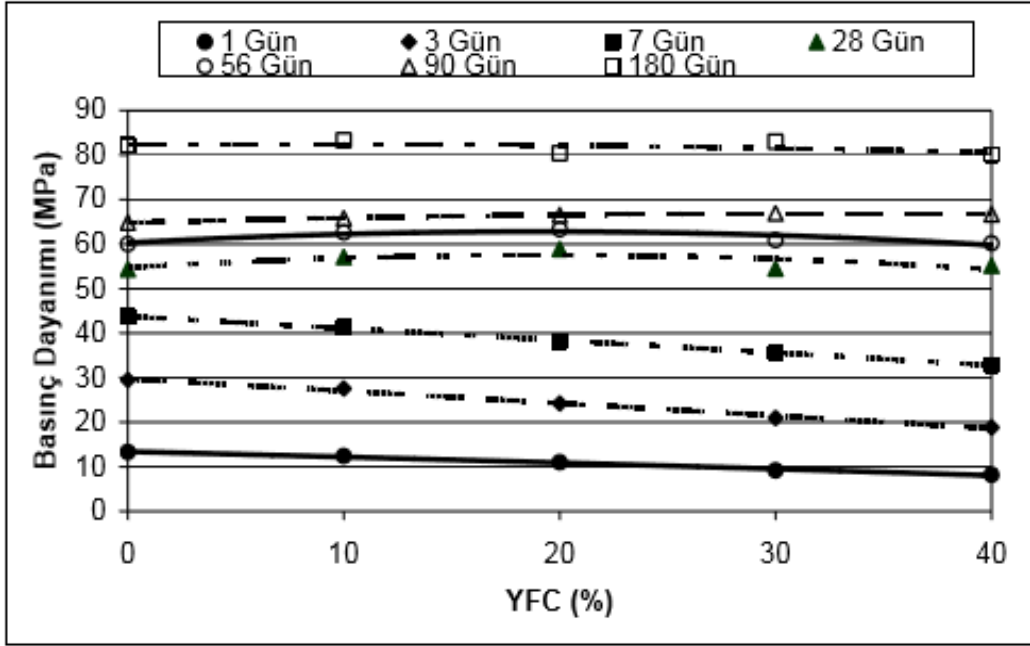
Bu bölümde, literatürde yüksek fırın cürufunun sülfat atağına karşı göstermiş olduğu tepkilerin daha iyi anlaşılması amacıyla bazı deneysel çalışmalar verilmiştir.

Aşağıda sunulan deneysel çalışmada, normal PÇ 42,5 Portland çimentosu içerisinde farklı oranlarda yüksek fırın cürufu ile ikame edilerek Amerikan Malzeme ve Test Kurumu Standartlarına uygun olarak hazırlanan numuneler üzerinde sülfatlı ortamların etkileri incelenmiştir. Portland çimentosunun içeriğinde bulunan trikalsiyum alüminat (C_3A) oranı 8,87 ve çimentonun özgül yüzeyi $3520 \text{ cm}^2/\text{g}$ ' dir. Deneysel çalışmanın yapılması için gerekli olan yüksek fırın cürufu OYSA firmasından tedarik edilmiştir. Tedarik edilen bu yüksek fırın cürufunun özgül yüzeyi ise $4850 \text{ cm}^2/\text{g}$ ' dir. Beton numuneler üzerinde sülfatın genleşmeye nasıl etki ettiğini izlemek amacıyla $25 \times 25 \times 285$ mm boyutlarında örnekler hazırlanmıştır. Sülfatın basınç dayanımına etkisinin incelenmesi amacıyla da $50 \times 50 \times 50$ mm boyutunda örnekler hazırlanmıştır. Her iki örnek için kullanılan kum/çimento oranı 2,75, su/çimento oranı ise 0,485 belirlenmiştir. Hazırlanan karışımların içerisinde yüksek fırın cürufunun, sülfat etkisine karşı dayanıklılığının belirlenmesi amacıyla %10, %20, %30, %40 oranlarında yüksek fırın cürufu ikame edilmiştir. Numuneler normal suda bekletme, sürekli sülfat etkisinde ve sülfatta ıslatılıp kurutulma şeklinde üç farklı koşula maruz bırakılmış ve genleşme etkileri 26 hafta süre ile sürekli izlenmiştir. Basınç dayanımı için hazırlanan numunelerden normal su etkisinde olanların dayanımları belirli yaşlarda ölçülmüş, sürekli sülfat etkisi altındaki ortamda bulunanların dayanımları ise 26. Haftanın sonunda ölçülmüştür. Çalışmalar buhar kürü uygulanmak suretiyle de devam ettirilmiştir. Buhar kürü numunelere uygulanırken, beton dökümünden sonra 5 saat süre betonun priz alması beklenmiş daha sonra sıcaklık $13 \text{ }^\circ\text{C}/\text{saat}$ sabit hızla arttırılarak 9 saat boyunca $60 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki ortamda bırakılmışlardır. Buhar kürü aşamasını bitiren numuneler normal koşullarda soğumaya bırakılmışlardır [30].

5.1. YFC Kullanımının Harçların Basınç Dayanımına Etkisi

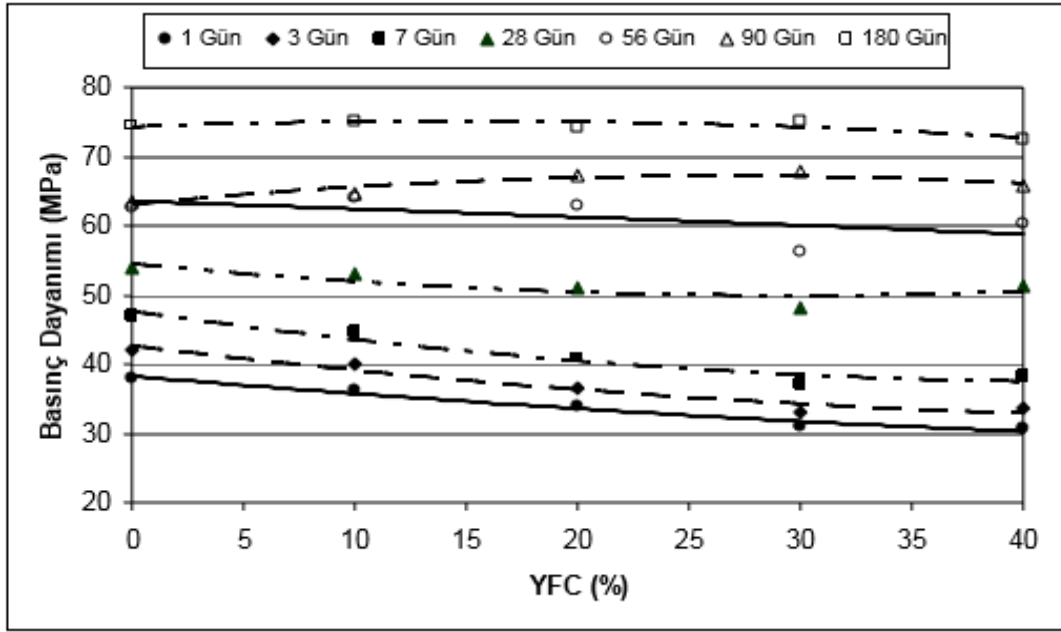
Suda bekletilen numunelerin basınç dayanımlarının yüksek fırın cürufu ikame oranına göre değişimi Şekil 5.1.' de verilmiştir. Şekil 5.1.' e bakarak şunlar söylenebilir;

çimentonun yüksek fırın cürufu ile %30 ve %40 gibi yüksek oranlarda ikame edilmesiyle elde edilen betonların erken yaşlardaki dayanımları normal Portland çimentosuyla elde edilen betonlara oranlara düşük kalmaktadır. Fakat ilerleyen zamanlarda aradaki dayanım farkı kapanmakta ve uzun vadede, bütün ikame oranlarındaki basınç dayanımları, normal Portland çimentosu içeren betonunkilerle aynı seviyede olmaktadır [30].



Şekil 5.1. Su kürü uygulanan ve yüksek fırın cürufu çimento ile hazırlanmış beton numunelerinin basınç dayanımları [30]

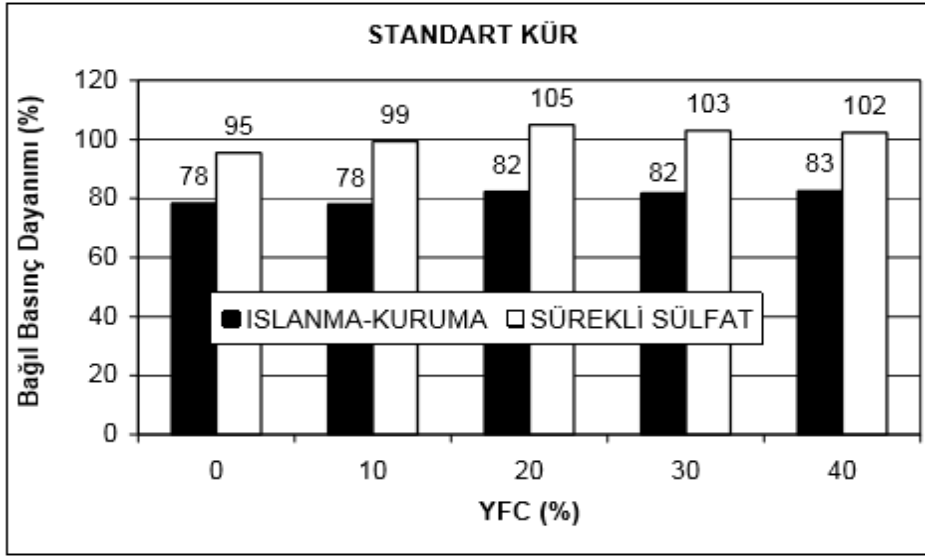
9 saat süre ile 60 °C' de buhar kürü uygulanıp, buhar kürü aşamasından sonra suda bekletilen numunelerin basınç dayanımlarının yüksek fırın cürufu ikame oranına göre zamanla değişimi Şekil 5.2.'de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere buhar kürü yüksek fırın cürufu ikame edilen betonların erken yaştaki basınç dayanımını önemli ölçüde arttırmaktadır. Şekil 5.1. ve Şekil 5.2. karşılaştırıldığında, buhar kürüne tabi tutulan numunelerin basınç dayanımları sürekli suda bekletilen numunelerin basınç dayanımlarından daha düşüktür. Bu durum, buhar kürü uygulamasının çimentonun hidrasyonunu arttırarak, normal sıcaklıktaki su içindeki betona oranla daha boşluklu bir yapı oluşturmasıyla açıklanabilir [30].



Şekil 5.2. Buhar kürü uygulanan ve yüksek fırın cürüflü çimento ile hazırlanmış beton numunelerinin basınç dayanımları [30]

Hazırlanan beton numunelerin basınç dayanımlarının 20 MPa' a ne kadar sürede ulaştığı 50x50x50 mm boyutundaki numunelerle tespit edilmiş, istenilen dayanıma ulaşan numuneler sülfat etkisine maruz bırakılmışlardır. Amerikan Malzeme ve Test Kurumu Standartlarına göre 50 g/l' lik sodyum sülfat çözeltisi kullanmak yeterli olmaktadır. Fakat geçmiş yıllarda yapılan deneysel çalışmalarda 50 g/l' lik sodyum sülfat çözeltisinin, beton numunelerin sülfata karşı dayanımlarını belirlemede yeterli olmadığı görülmüştür [106]. Bu yüzden, yapılan bu deneysel çalışmada 150 g/l' lik sodyum sülfat çözeltisi kullanılmıştır. Hazırlanan sodyum sülfat çözeltileri numunelere iki farklı şekilde etki ettirilmiştir. Birincisi sürekli sülfat etkisine maruz bırakma, ikincisi ise bir gün sülfat çözeltisine maruz bırakıp bir gün de 50 °C' de kurummasını bekleme şeklinde gün aşırı sülfat etkisine maruz bırakılmışlardır. Bu ıslanma-kuruma olayı 90 kez tekrar edilmiştir. Çözeltinin pH değerinin yükselmemesi için 4 haftada bir yeni sülfat çözeltisiyle değiştirilmiştir. Sülfat iyonlarının zararlı etkilerine maruz bırakılan numunelerin boy değişimleri ve basınç dayanımları 26. haftanın sonunda ölçülmüştür. Sülfat etkisine maruz bırakılan numunelerin suda beklemiş kontrol numunelerine göre değişen basınç mukavemetleri Şekil 5.3.' te görülmektedir. Bu deneyden, sülfat etkisi altında 90 ıslanma-kuruma devrine maruz kalan tüm numunelerde basınç dayanımında düşüşler görülmüştür. Sürekli sülfat etkisine maruz kalan numunelerin basınç dayanımındaki düşüş daha azdır.

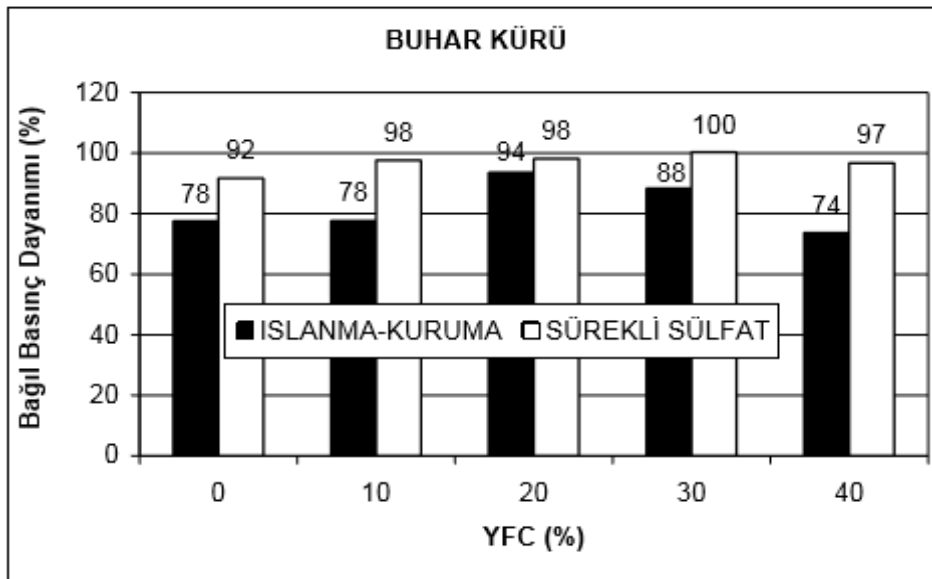
Yüksek fırın cürufu ikame edilen bazı numunelerde ise basınç dayanımlarında azalma değil artış olmuştur. Bu durum, sodyum sülfat tuzlarının numunelerin içine girerek oluşturduğu hasar, kimyasal reaksiyona girerek oluşturduğu hasardan daha fazladır şeklinde yoruma sebep olabilir. İslanma-kuruma süreci sonunda bazı numunelerin dış yüzeylerinde dökülmelerin meydana geldiği görülmüştür. Şekil 5.3.' te karışımlar kıyaslandığında, pek fazla belirgin olmasa da, yüksek fırın cürufu ikamesi ile kalan dayanımlarda çok az bir miktar artış olduğu görülmektedir [30].



Şekil 5.3. Sülfat çözeltilisine maruz bırakılmış örneklerin, suda beklemiş kontrol örneklerine kıyasla basınç dayanımları [30]

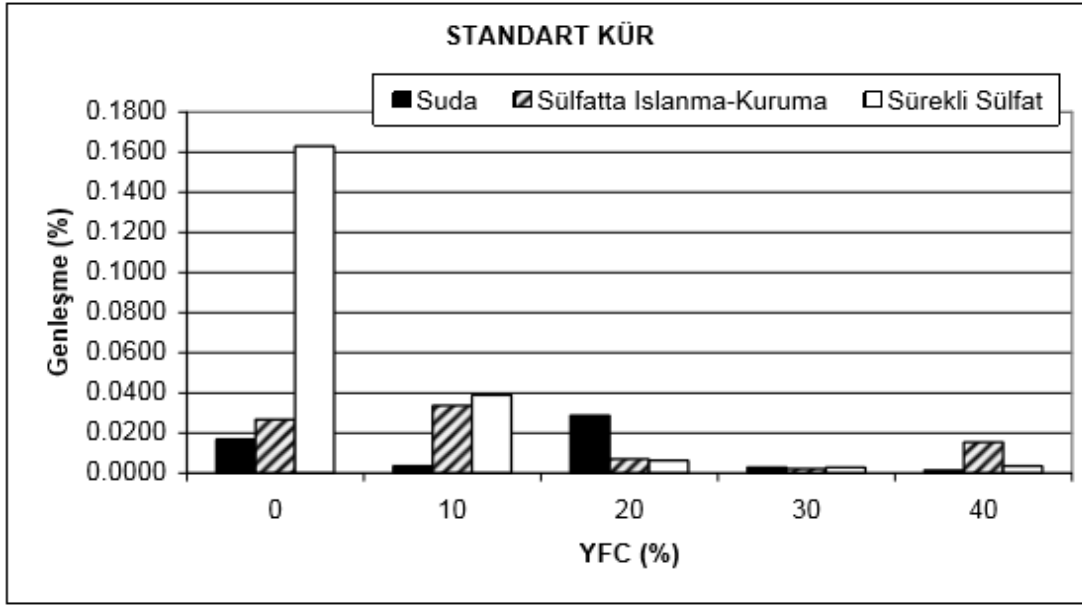
Buhar kürüne tabi tutulduktan sonra, sülfata etkisine maruz bırakılmış numunelerin basınç dayanımları, aynı yaştaki suda kür edilmiş numunelere oranla basınç dayanımlarındaki değişim Şekil 5.4.' de verilmiştir. Numunelerin buhar kürüne tabi tutulduktan sonra, sülfat etkisi altında ıslanma-kurumaya maruz bırakılması basınç dayanımında düşümlere sebep olmuştur. Hazırlanan numunelerin, suda bekletilmeleri, sürekli sülfat etkisine maruz bırakılmaları veya sülfat etkisi altında ıslanma-kurumaya tabi tutulmaları halinde 26. Haftanın sonunda betonun numunelerin bünyesinde meydana gelen genleşmeler Şekil 5.5.' te verilmiştir. Normal suda bekletilen numunelerin genleşmelerinin çok düşük olduğu Şekil 5.5.' ten anlaşılmaktadır. Sülfat etkisi altında ıslanma-kuruma döngüsüne maruz bırakılmış numunelerde sürekli genleşme ve büzülme olduğundan dolayı genleşme miktarı çok düşük seviyelerde kalmaktadır. Sürekli sülfat etkisine maruz bırakılan numuneler incelendiğinde ise, sadece Portland çimentosu ile hazırlanmış

numunelere oranla yüksek fırın cürufu ikame edilerek hazırlanan numunelerin genleşme miktarının daha az olduğu tespit edilmiştir. Amerikan Malzeme ve Test Kurumu Standartlarında betonda meydana gelebilecek 6 aylık genleşme limiti, sülfata yüksek derecede dayanıklılık için % 0,05, orta derecede dayanıklılık için % 0,1 olarak verilmektedir. Bu genleşme değerleri 50 g/l Na₂SO₄ çözeltisi için geçerlidir. Yapılan bu deneysel çalışmada 50 g/l yerine 150 g/l sodyum sülfat çözeltisi kullanılmıştır. Buna göre yüksek fırın cürufu ikame edilerek hazırlanan beton numunelerinin sülfata karşı dayanımlarının çok iyi olduğunu görmekteyiz. Normal Portland çimentosu ile hazırlanan numunelerin genleşme ile ilgili limitlerin üzerinde olmaktadır. Fakat bu çalışmada öngörülenin üzerinde bir konsantrasyona sahip sülfat çözeltisi kullanıldığında kesin yorum yapmak sakıncalıdır [30].

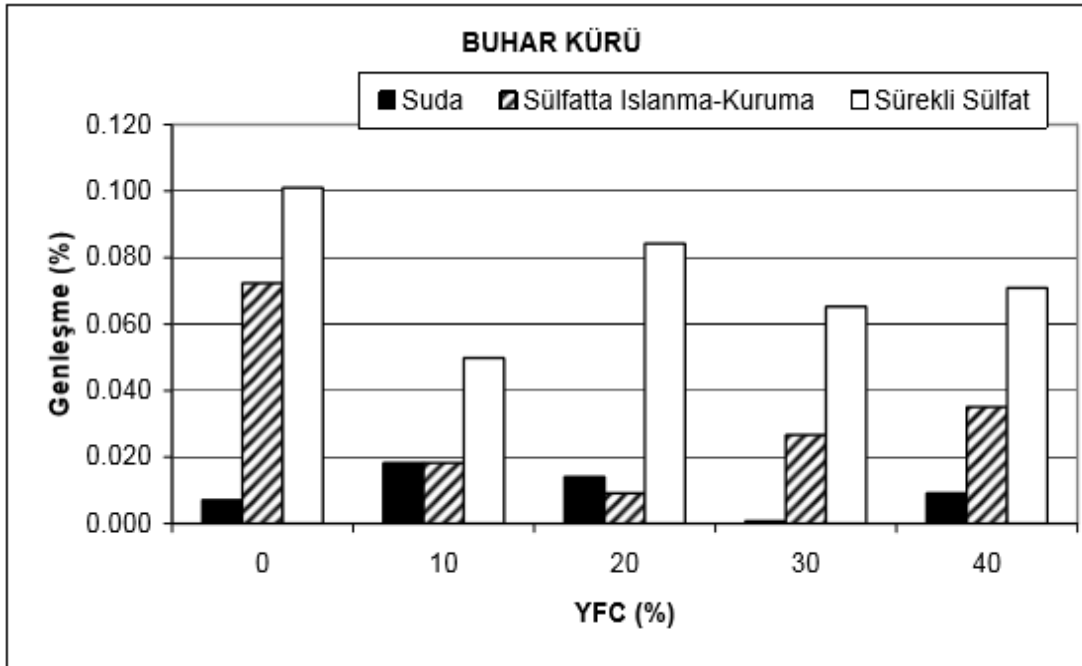


Şekil 5.4. Buhar kürü geçirmiş, sülfat çözeltisine maruz bırakılmış örneklerin, suda beklemiş kontrol örneklerine kıyasla basınç dayanımları [30]

Buhar kürüne tabi tutulduktan sonra buhar kürü geçirmiş örneklerin normal suda, sürekli sülfat etkisine maruz ve sülfatta ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmış numunelerin bünyesinde meydana gelen genleşmeler Şekil 5.6.' da verilmiştir. Yüksek fırın cürufunun beton içinde çimento ile kısmen ikame edilmesinin genleşme miktarlarında azalmaya yol açtığı söylenebilir [30].



Şekil 5.5. Suda kür edilmiş örneklerin 26 hafta sonundaki genleşmeleri [30]



Şekil 5.6. Buhar kürü geçirmiş örneklerin 26 hafta sonundaki genleşmeleri [30]

Yapılan bu deneysel çalışmadan şu sonuçlar çıkarılmıştır:

- Beton numunelerde çimentonun yerine yüksek fırın cürufu ikame edilmesi betonun erken yaş dayanımlarında düşüslere sebep olmuştur. Fakat zamanla dayanımlarda görülen bu düşüslün azaldığı ve kaybolduğu anlaşılmıştır. Buhar kürü uygulamasıyla

yüksek fırın cürufu içeren numunelerin dayanımlarında artışların meydana geldiği görülmüştür [30].

- Sürekli sülfat etkisine maruz bırakılan numuneler ile sülfat etkisi altında ıslanma-kuruma döngüsüne maruz bırakılmış örnekler kıyaslandığında, ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımlarında bir miktar düşüş gözlenmiştir. Sürekli sülfat etkisine maruz bırakılmış numunelerde yüksek fırın cürufu kullanılması durumunda ise dayanımlarda artış görülmektedir [30].
- Sülfat etkisi altında ıslanma-kuruma döngüsüne maruz kalan numunelerde 26 hafta sonunda oluşan genişleme miktarı çok düşük seviyelerde kalmıştır. Bu durumun, numunelerin kurumaya bırakıldığında bünyesinde meydana gelen büzülmeden dolayı meydana geldiği söylenebilir [30].
- Normal Portland çimentosu kullanılarak hazırlanıp sürekli sülfat etkisine maruz bırakılan numunelerin 26 hafta sonraki genişleme değerlerinin Amerikan Malzeme ve Test Kurumu Standartlarında belirtilen limit değerlerin üzerinde olduğu, numunelerin buhar kürü uygulamasına tabi tutulması durumunda ise genişleme miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Fakat bu deneysel çalışma yapılırken standartta 50 g/l olarak belirtilen sülfat konsantrasyonunun 150 g/l' ye çıkartıldığı da dikkate alınmalıdır. Yüksek fırın cürufu ikamesi ile betonun bünyesinde meydana gelen genişmelerin kontrol altına alınabildiği ve standartlarda belirtilen limit değerlerin içinde kaldığı görülmüştür. Buhar kürü uygulaması sonucunda yüksek fırın cürufu ihtiva eden numunelerin bünyesindeki genişmelerin bir miktar arttığı da gözlenmiştir [30].

6. SONUÇLAR

Cürufların sanayi atığı olarak görüldüğü dönemler sona ermiş ve cüruflar ekonomik değeri olan, özellikle inşaat sektörünün olmazsa olmaz ürünlerinden olan çimento imalatında sıkça kullanılan hammaddeye dönüşmüştür.

Hazırlanan bu çalışmada yüksek fırın cürufunun çimentoyu oluşturan ana maddelerden birisi olabileceği üzerinde durularak yüksek sülfat içeriğine sahip ortamlarda nasıl performans sergilediği araştırılmış ve bu konu üzerinde literatür taraması yapılmıştır. 5. Bölümde sunulan deneysel sonuçlarla konunun daha somut şekilde anlaşılması amaçlanmıştır.

Sülfat atağı, İller Bankası' nın faaliyet alanlarının içinde bulunan altyapı tesislerinde sıkça rastlanan bir durumdur. Çünkü sülfatların en çok buldukları ortamlar zemin ve yer altı suyudur. Faaliyet alanımız gereği Belediyelerin altyapı tesislerinin inşası üzerine yoğunlaşan Bankamızın sülfatın zararlı etkilerine karşı mücadele etmesi kaçınılmazdır. Ekonomik imkânları kısıtlı olan Belediyelere Bankamız tarafından verilecek olan hizmetlerin uzun süre kalıcılığını koruması yani durabilitesinin yüksek olması istenir. Sülfat ihtiva eden ortamlardan beton yapıları korurken hem durabilite hem de ekonomi ön planda tutulmalıdır.

2012 yılında TS 197-1' de yapılan değişiklikle standarda düşük erken dayanımlı yüksek fırın cürufu çimentolar eklenmiştir. 5 ana bölümden oluşan çimento sınıfları içerisinde üçüncü bölümdeki B ve C tipi yüksek fırın cürufu çimentolar, çimento içinde bulunan klinkerle yüksek oranda yer değiştirmesi sonucu elde edilirler.

Yüksek fırın cürufu çimento kullanımında sülfatla tepkimeye girdiğinde beton içinde genleşmelere yol açarak, betonun çatlayıp parçalanmasına neden olan C_3A içeriğinde de herhangi bir sınırlama konulmaması yüksek fırın cürufu çimentonun üstün sülfata karşı kullanımında üstün özellikte olduğunu göstermektedir.

Ülkemiz cüruf açısından zengin bir ülkedir. Ereğli, Kardemir ve İskenderun demir çelik fabrikalarından yılda milyonlarca ton cüruf çıkmakta ve bu cürufların yarısından

fazlası inşaat sektöründe kullanılabilir nitelikte cüruf özelliği taşımaktadır. Yüksek fırın cürufunun inşaat ve diğer bazı sektörlerde kullanılarak değerlendirilmesi atık niteliğindeki cürufun depolanma sorununu ortadan kaldırmakta ve çimento üretiminde kullanıldığında betonun dayanımına ve dayanıklılığına olumlu yönde birçok katkısı olmaktadır. Yüksek fırın cürufu beton ve çimento kullanıldığında ortaya çıkan CO₂ gazının daha az olmasını sağlayarak çevreye karşı da duyarlı bir malzeme ortaya çıkarmaktadır.

Ülkemizde de son yıllarda önemi gittikçe kavranmaya başlayan yüksek fırın cürufu çimentoların Bankamızca altyapı tesislerinde kullanımı zorunlu tutulduğu takdirde, zemin ve yer altı suyunda bulunan zararlı maddelerden, özellikle sülfatın yıpratıcı etkilerinden yapılarımız çok daha rahat şekilde korunabilecektir. Daha uzun yıllar Belediyelere hizmet edecek ve kaynak israfının önüne geçilmiş olacaktır.

Yüksek fırın cürufunun çimento ve beton yapımında kullanılan ve betonun özelliğine olumlu yönde katkı yapan bir madde olduğu bilinmektedir. Çimento ile birlikte kullanıldığında ve klinkerle yer değiştirilerek kullanıldığında hem teknik açıdan üstün bir malzeme elde edilmekte hem de beton imalatındaki maliyetler düşmektedir.

Yüksek fırın cüruflarından faydalanma yöntemlerinin zaman içinde çeşitlilik göstermesiyle hem çimentolar daha ucuza üretilebilecek hem de üretilen betonların çevresel koşullar altında göstermiş olduğu dayanıklılık özellikleri iyileşecektir. Bunun için cüruflar üzerinde yapılan çalışmalar yoğunlaştırılmalı ve Standartlarda belirtilen kriterlere uygun betonların üretilmesine özen gösterilmelidir.

KAYNAKLAR

1. ASTM C 618, “*Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*”, ASTM, Philadelphia (1991).
2. Aruntaş, H., Y., (1996). *Diatomitlerin Çimentolu Sistemlerde Puzolanik Malzeme Olarak Kullanabilirliği*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 1-55.
3. Rudolf, D., (1984). “*Türkiye’deki Doğal Puzolanların Çimento Katkı Maddesi Olarak Kullanımı Üzerine İncelemeler*”, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara
4. Cilason, N., (1992). “*Beton*” STFA Yayınları No:21, İstanbul
5. Erdoğan, M., “*İstanbul ve Dolayının Yapay Agreg Potansiyeli*” 3.Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu, Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi, Adana.
6. Erdoğan, T., Y., (1995). “*Betonu Oluşturan Malzemeler-Agregalar*” Türkiye Hazır Beton Birliği Yayını, İstanbul.
7. Koca, C., (1996). “*Hazır Beton Sektörü Açısından Agreg Sektörüne Bakış*” Türkiye Hazır Beton Birliği Yayını, İstanbul.
8. Akman, M., S., (1990). *Yapı Malzemeleri*, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İkinci baskı,
9. Türkiye Hazır Beton Birliği, “*Beton Kullanıcıları İçin Teknik Bilgiler Kılavuzu*”, Kavacık – İstanbul, 40s.
10. Postacıoğlu, B., (1986). “*Bağlayıcı Maddeler*”, Cilt 1, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul, 5-38
11. Snell, L.M. and Snell, B.G., (2000). “*The Early Roots of Cement*”, Concrete International, 83-85
12. DPT Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, (2001). “*Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Toprak Sanayi Hammaddeleri IV (Çimento Hammaddeleri) Çalışma Grubu Raporu*”, Ankara, DPT: 2614 – ÖİK: 625
13. Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., (2002). *Betonarme Yapılarda Kalıcılık*, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, Yayın No: 298, İzmir.
14. Taşdemir, C., (1998). *Mikrofiller Malzemelerin ve Kür Koşullarının Betonun Kılcal Geçirimsizliğine Etkisi*, DSİ Çimento-Beton ve Boya Semineri, p. 47-56, Ankara.
15. Grattan-Bellew, P.E., *Microstructural Investigation of Deteriorated Portland cement Concretes*, Construction and Building Materials
16. Özışık, G., (1998). “*Beton*” İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

17. Kütahya Magnezit İşletmeleri A.Ş.
18. TS 706, TS 3529, TS 3526, TS 3673, TS 3527, TS 3530, TS 3814, TS635 Standartları.
19. Türk Standartları Enstitüsü (TSE), (2000). *Kagir Harcı Deney Metotları-Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası ile)*, TS EN 1015-3, Ankara, Türkiye, 1-8
20. Tokyay, M., (2003). *Cüruflar ve Cürüflü Çimentolar, Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu*, 47s, TÇMB, Ankara.
21. Türk Standartları Enstitüsü (TSE), *Kagir Harcı Deney Metotları-Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Basınç ve Eğilme Dayanımının Tayini*, TS EN 1015-11, Ankara, Türkiye, 1-11 (2000).
22. Türk Standartları Enstitüsü (TSE), *Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 2: Parçalanma Direncinin Tayini İçin Metotlar*, TS EN 1097-2, Ankara, Türkiye, 1-29 (2000).
23. Atış, C. D. and Çelik, Ö. N., (2002). *Relation between Abrasion Resistance and Flexural Strength of High Volume Fly Ash Concrete*, *Materials and Structures-RILEM*, 35: 257-260
24. Yeğınobalı, A., (1999). *Betonun Dayanıklılığı II, Kimyasal Etkenler, TCMB Çimento Araştırma Enstitüsü Seminer Notları*, Ankara.
25. İnternet: *Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Çimento Tabanlı Malzemelerde Kullanılabilirliği*, URL: <http://library.cu.edu.tr/tezler/7988.pdf> Son erişim tarihi: 18.09.2015
26. Gündeşli, U. (2008). *Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 23-32, 42-63.
Kuyumcu, H.M. (2006). *Deniz Suyu ve Sülfatlı Suların Beton Dayanımın Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 1-7.
27. Kızıllıgın, B. (2008). *Çelik ve Karbon Lifli Harçların Sülfat Etkilerine Dayanıklılığının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 88-95.
28. Çavdar, A. (2008). *Farklı Puzolanik Bileşime ve Hamur Yapısına Sahip Çimento Harç Örneklerinin, Sülfat İçeren Ortam ve/veya Aşınma Etkilerine Karşı Dayanıklılığının İncelenmesi*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 17-31.
29. İnternet: *Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Harçların Sülfat Dayanıklılığının İncelenmesi*, URL: <http://web.deu.edu.tr/fmd/s22/22-04.pdf> Son erişim tarihi:18.09.2015

30. Bilim, C., Atiş, C. D. (2011). *Öğütölmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu İçeren Harçların Aşınma ve Mukavemet Özellikleri*, Politeknik Dergisi, Cilt 14, Sayı 2, 101-107
31. Y., Erdoğan, Turhan. *Öğütölmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu ve Kullanım*, ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, 1-11.
32. Engin, Y., (2015). *Yüksek Fırın Cürufu & Yüksek Fırın Cürufu Çimento Özellikleri Etkileri "Dayanıklı ve Uzun Ömürlü Yapılar İçin"*.
33. Engin, Y., Tarhan, M. *TS EN 197-1:2012 Standardı' ndaki Değişiklikler*.
34. Yılmaz, Y., (2014). *Beton Üretiminde Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanılmasının Etkileri ve Maliyet Analizi*, 47
35. Wen, H.X., (1998). *Alkali Aggregate Reaction in Concrete, Lecture Notes, Civil Engng. Dept., Hong Kong Unv., 7*

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : UĞURLU, Sadullah
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 07.07.1987-Çayeli
Medeni hali : Evli
Telefon : 0462 334 60 40
Faks : 0462 334 55 90
e-mail : sugurlu@ilbank.gov.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Avrasya Üniversitesi - İşletme	2014
Lisans	Sakarya Üniversitesi - Mühendislik Fak.	2009
Lise	Eynesil Lisesi	2004

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010-2012	Prizma Yapı Denetim	Kontrol Mühendisi
2012-2013	Emlak İnşaat A.Ş.	Kontrol Mühendisi
2013- halen	İlbank A.Ş. Trabzon Böl. Müd.	Kontrol Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce



İL BANK
TÜRKİYE'NİN YAPICI GÜCÜ