

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU & YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ÇİMENTO

ÜRETİMİ
ÖZELLİKLERİ
ETKİLERİ

“Dayanıklı ve Uzun Ömürlü Yapılar için”

İnş.Yük.Müh. Yasin ENGİN
yasin.engin@gmail.com
www.betonvecimento.com



2015

Yüksek fırın cürufunun tarihsel gelişimi

1774 - Yüksek fırın cürufu sönmüş kireçle beraber harç yapımında ilk kez kullanılmaya başlanmıştır.

1862 - Yüksek fırın cürufunun bağlayıcı olma özelliği Emil Langen tarafından Almanya'da bulunmuştur.

1865 - Öğütülmüş yüksek fırın cürufu kireçle karıştırılarak Almanya'da üretilmeye başlanmıştır.

1880 - Öğütülmüş yüksek fırın cürufu Almanya'da klinker ile üretilerek satılmaya başlanmıştır.

1888 - Yüksek fırın cürufu çimento Almanya'da üretilmeye başlanmıştır.

1889 - Yüksek fırın cürufu çimento Fransa'da yer altı metrosu yapımında kullanılmıştır.

1896 - Yüksek fırın cürufu çimento Amerika'da üretilmeye başlanmıştır.

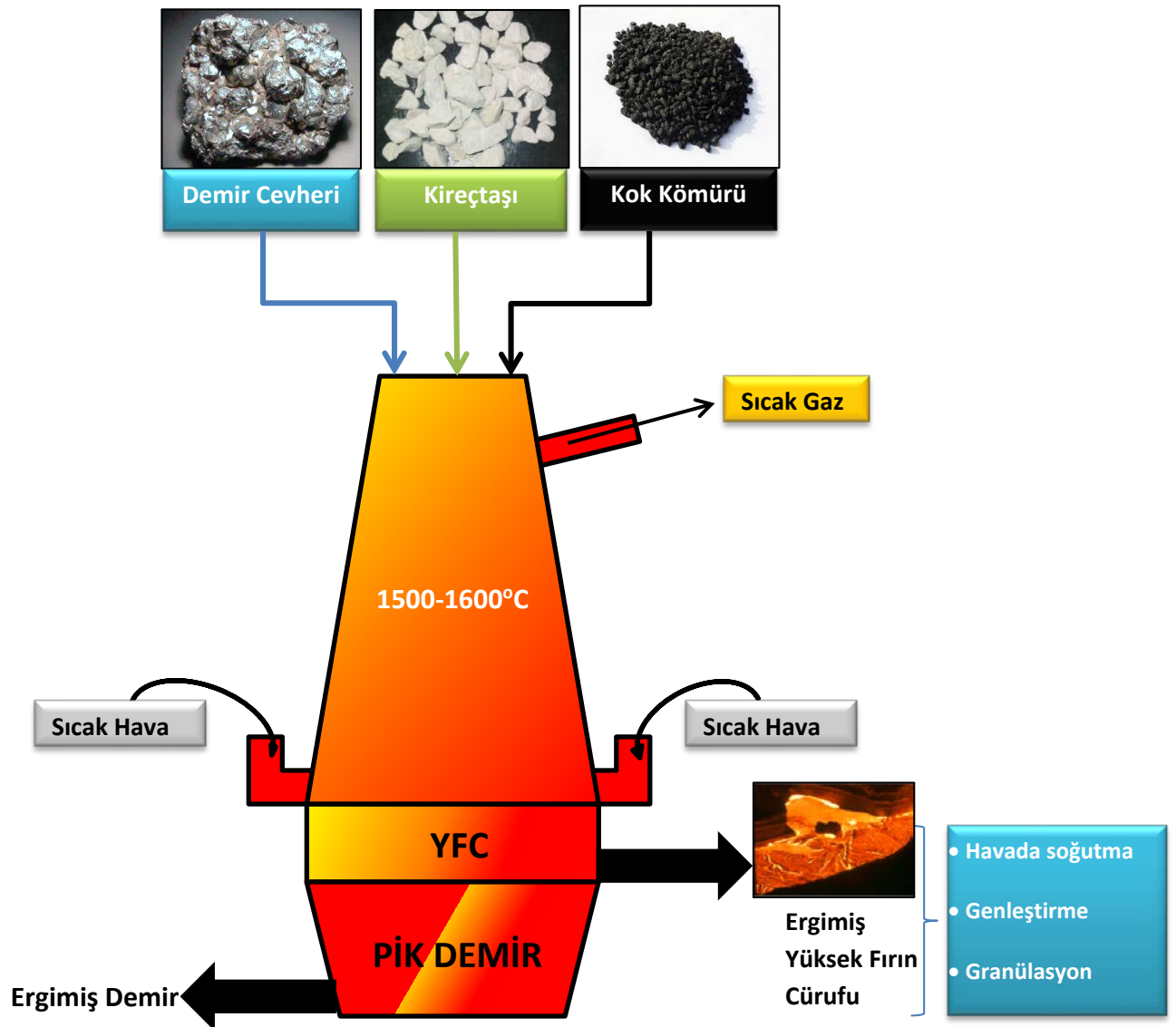
1917 - Yüksek fırın cürufu çimento ile ilgili ilk standard Almanya'da yürürlüğe girmiştir.

1950'ler - Yüksek fırın cürufu çimento ile birlikte beton üretiminde Amerika'da, İngiltere'de, Güney Afrika'da, Avustralya'da, Japonya'da ve Kanada'da kullanılmaya başlanmıştır.

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU NEDİR?

Yüksek fırın cürufu (YFC) , demir-çelik tesislerindeki yüksek fırınlarda demir üretimi esnasında açığa çıkan bir yan üründür. Demir üretiminde hammadde olarak demir cevheri, kireçtaşı ve kok kömürü kullanılmaktadır. Demir cevheri demir oksit ile birlikte silis, kükürt ve alümin gibi demir dışı maddeleri de içermektedir. Yüksek fırındaki işlem sonucu bu maddeler ayrışır. Kireçtaşı bu süreçte yardımcı bir hammadde olarak görev yapar. Kok kömürü ise gerekli olan yakıtı sağlar[1].

Hammaddelerle sürekli olarak beslenen yüksek fırınlarda sıcaklık 1600°C'lere ulaşmaktadır. Yüksek sıcaklık sonucu ergiyen malzemeler üstte cüruf ve altta pik demir olacak şekilde fırının alt kısmında toplanır. Ergimiş cüruf ve demir ayrı ayrı tahliye edilir. Yaklaşık 1500°C'de olan yüksek fırın cürufunun tahliye edilmesinden sonra uygulanacak soğutma yöntemi, oluşacak ürünün özelliklerini ve kullanım yerini belirler[1].



Şekil 1: Pik demir ve yüksek fırın cürufunun üretim süreci

Yüksek Fırın Cürufunun Soğutulması

Havada soğutma: YFC, havada soğutma yöntemiyle ile atmosferik koşullarda yavaş bir şekilde soğutulur ve minerolojik olarak iri kristalli bir malzeme oluşur. Camsı fazı düşük olan bu malzeme kırılarak beton veya asfalt agregası ya da stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabilir.

Genleştirme: YFC kontrollü miktarda su, basınçlı hava ve buhar etkisiyle soğutulduğu takdirde gözenekli yapıda, iri kristal taneli bir malzeme oluşur. Bu malzeme hafifliği nedeniyle hafif beton üretiminde kullanılabilir.



Resim 1: Su jetleri ile cürufun granülasyonu

Granülasyon: Genleştirmeye oranla daha fazla miktarda su kullanılarak yapılan ani soğutma işlemi sonucu kuma benzer amorf(camsı) yapıda, hidrolik özelliği olan granüle bir malzeme oluşur. Bu malzeme değirmende öğütülerek “öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu” elde edilir. 1 ton granüle YFC elde etmek için 10 ton suyun harcandığı yöntem en verimli yol olsa da ekonomik değildir. Son yıllarda bunun yerine peletleme yöntemi tercih edilmektedir. Peletleme sonucu elde edilen malzemenin 4mm’den küçük olan kısmı camsı yapıda olup öğütülerek granüle YFC elde edilir[2,3].



Resim 2: Genleştirilmiş YFC



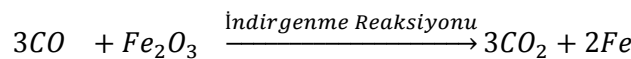
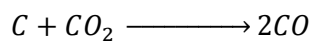
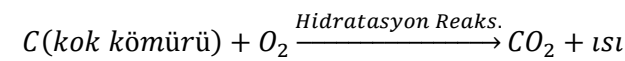
Resim 3: Granüle YFC



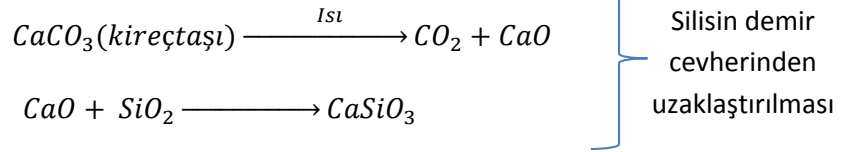
Resim 4: Öğütülmüş YFC

YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN KİMYASAL VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Yüksek fırınlarda pik demir elde etmek için demir cevherinden demir dışı maddeleri ve demire bağlı olan oksijeni ayırmak esas amaçtır. Fırında aşağıdaki reaksiyonlar oluşur:



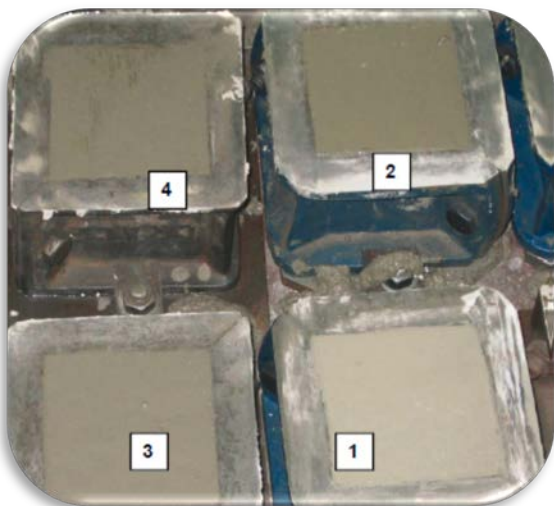
Demir oksitten
oksijenin
ayrıştırılması



Tablo 1’de öğütülmüş YFC ve Portland çimentosunun kimyasal bileşenleri görülmektedir. YFC, Portland çimentosuna oranla daha az kalsiyum oksit(CaO) ve daha fazla silisyum dioksit(SiO₂) içermektedir. YFC’nun yoğunluğu çimentoya oranla düşüktür. İncelik cürufun öğütülmesine göre farklılık gösterebilmektedir. YFC’nun Portland çimentosuna oranla bir diğer farkı da alüminyumoksit(Al₂O₃) ve kükürt(SO₃) miktarının yüksek olmasıdır. Bileşenlerin oranı bağlayıcı malzemelerin kimyasal özelliklerini etkilediği gibi özellikle cürufun yüksek miktarda SiO₂ içeriği çimentoya göre daha zor öğütülmesine neden olmaktadır.

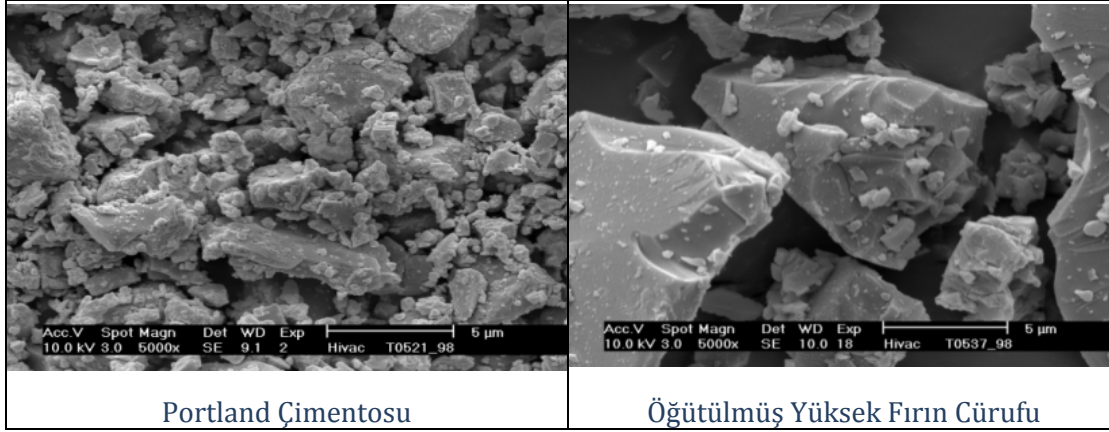
Tablo 1 : Portland çimentosu ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun kimyasa bileşimi[4]

	Portland Çimentosu	Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu
SiO ₂ (%)	22,00	35,00
Al ₂ O ₃ (%)	5,00	12,00
Fe ₂ O ₃ (%)	3,50	1,00
CaO (%)	65,00	40,00
SO ₃ (%)	1,00	9,00
Na ₂ O (%)	0,20	0,30
K ₂ O (%)	1,00	0,40
Kızdırma kaybı (%)	0,20	1,00
Özgül yüzey alan (cm ² /g)	3500 -4000	4000 - 5000
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3,15	2,94



Resim 5: 1 numaralı numune yüksek fırın cürufu çimento ile; 2, 3 ve 4 numaralı numuneler Portland çimentosu ile yapılmıştır.

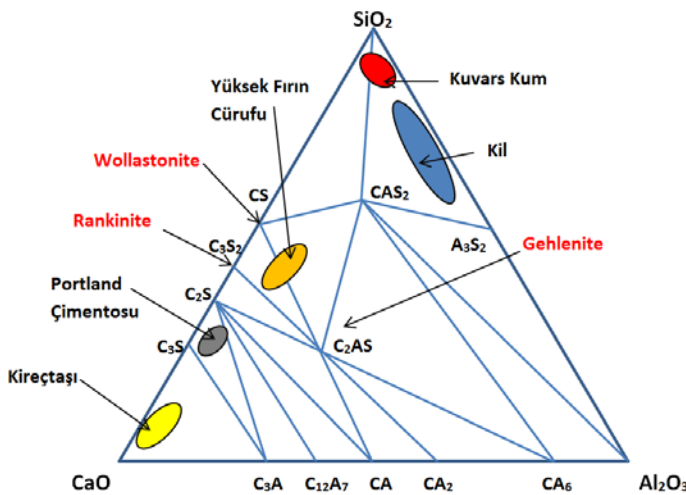
YFC, Portland çimentosuna oranla daha açık renklidir. Bunun nedeni çimentoya gri rengini kazandıran C₄AF bileşeninin yüksek fırın cürufunda oluşmamasıdır. Bu renk farklılığı beton fazında da gözlemlenmektedir. Bu durum bazen yanlış anlamalara neden olmaktadır. Çimento ve betonda renk kalitenin bir göstergesi değildir. Hatta açık renk brüt yüzeylerde estetik açıdan tercih edilebilir.



Resim 6: Tarayıcı elektron mikroskopta 5000 defa büyütülmüş Portland çimentosu ve öğütülmüş yüksek fırın cürufuna ait mikrograflar

Resim 6'da yüksek fırın cürufunun Portland çimentosuna kıyasla daha keskin köşeli olduğu, ancak yüzeyinin ise daha pürüzsüz bir yapıda olduğu görülmektedir.

Yüksek fırın cürufunun kimyasal açıdan Portland çimentosu ile karşılaştırılması



Şekil 2: Çeşitli malzemelerin kimyasal yapısı [5]

Yüksek fırın cürüflü çimento, Portland çimentosuna oranla daha yüksek miktarda Al_2O_3 içermektedir; ancak yüksek fırın cürufunda C_3A fazı oluşmadığından cürüflü çimentoda C_3A oranı düşüktür[6]. Bununla birlikte çimentoda erken dayanıma etkisi olan C_3S bileşeni de YFC'unda oluşmaz. Bu durum yüksek fırın cürüflü çimentoda erken yaş dayanımının bir miktar düşük, ileri yaş dayanımının ise daha yüksek olmasını açıklamaktadır. Ayrıca düşük C_3A içeriği de sülfat atağına karşı çimentonun daha dirençli olmasına neden olmaktadır.

Portland çimentosu ile YFC'nun kimyasal bileşimi Tablo 1'de görülmektedir. Şekil 2'de ise Portland çimentosu ve YFC'nun ana bileşenleri üçlü diagramda gösterilmiştir. Portland çimentosu C_3S , C_2S , C_3A fazlarını içermektedir. Yüksek fırın cürufu ise ana bileşen olarak bu fazları içermemektedir. Sadece az bir miktar C_2S fazı içermektedir. Bu fark iki malzemenin bağlayıcı olarak farklı etkilere sahip olmasını açıklamaktadır.

Tablo 1 : Çimento ana bileşenleri ve etkileri

Bileşenler	Etkiler
C_3S	Erken dayanımı sağlar
C_2S	Geç dayanımı sağlar
C_3A	Dayanıma etkisi yok. Alçı ve su ile tepkimeye girerek etrenjit oluşturur. Sülfatlı ortamlarda miktarı sınırlandırılır.
C_4AF	Dayanıma etkisi yok. Klinker pişme sıcaklığını düşürür ve çimentonun gri rengini sağlar.

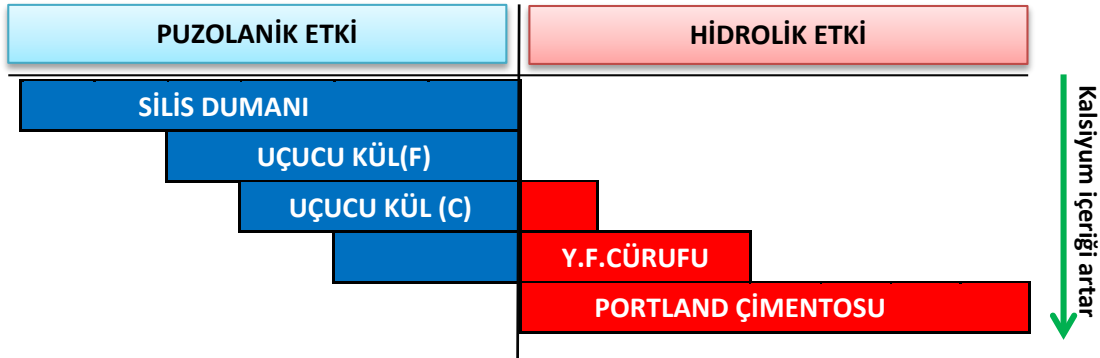
YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ÇİMENTO

TS EN 197-1 Standardı 5 ana tipte çimento sınıfı tanımlamıştır. Bu ana sınıflardan birisi de “Yüksek Fırın Cürufu Çimento”dur. Bununla birlikte “Portland Kompoze Çimento” ve “Kompoze Çimento” ana sınıflarındaki çimentolar belli oranda yüksek fırın cürufu içermektedir.

Tablo 2 : TS EN 197-1’e göre ana çimento tipleri

Ana Çimento Tipi		Klinker Oranı(%)
CEM I	Portland Çimentosu	95 – 100
CEM II	Portland Kompoze Çimento	65 – 94
CEM III	Yüksek Fırın Cürufu Çimento	5 – 64
CEM IV	Puzolanlı Çimento	45 – 89
CEM V	Kompoze Çimento	20 - 64

Standardın tanımladığı çimento sınıflarında yüksek fırın cürufu adıyla bir çimento sınıfının olması cürufu diğer mineral katkılardan ayırt eden önemli bir göstergedir. Cürufun silis dumanı, uçucu kül ve doğal puzolanlara oranla en önemli farkı çimentoya en yakın hidrolik bağlayıcı özellikli özgün bir mineral katkı olmasıdır.



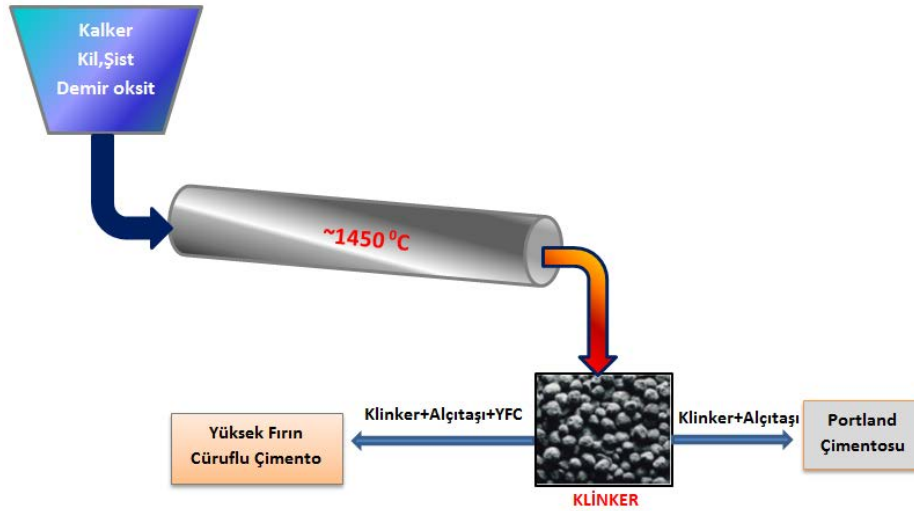
Şekil 3: Mineral katkıların puzolanik ve hidrolik etkileri[7]

Tablo 3: TS EN 197-1 Standardına göre yüksek fırın cürufu içeren çimento sınıfları

	Ana Bileşenler			Minör Bileşen Oranı(%)
		Klinker Oranı(%)	Y.F.C. Oranı(%)	
Yüksek Fırın Cürufu Çimento	CEM III/A	35 – 64	36 – 65	0 – 5
	CEM III/B	20 – 34	66 – 80	0 – 5
	CEM III/C	5 – 19	81 – 95	0 – 5
Portland-Cürufu Çimento	CEM II/A-S	80-94	6-20	0 – 5
	CEM II/B-S	65-79	21-35	0 – 5
Kompoze Çimento	CEM V/A	40-64	18-30	0 – 5
	CEM V/B	20-38	31-50	0 – 5

Yüksek fırın cürüflü çimentonun üretimi

Kireçtaşı(kalker), alümin, demiroksit ve silis bileşimli hammaddelerin uygun oranda karıştırılıp 1400-1500°C sıcaklıkta pişirilmeleri sonucu elde edilen yarı-mamül malzemeye klinker denir. Klinker bir miktar alçıtaşı ile öğütülerek Portland çimentosu elde edilir. Yüksek fırın cürüflü çimento üretiminde ise klinker, cüruf ve alçıtaşı ile birlikte öğütülür(inter grinding), ya da cüruf ile çimento klinkeri ayrı ayrı öğütülüp belirli oranlarda karıştırılır(seperate grinding).



Şekil 4: Yüksek fırın cürüflü çimento üretim prosesi

Yüksek fırın cürüflü çimentonun bağlayıcılık özelliklerini etkileyen başlıca faktörler:

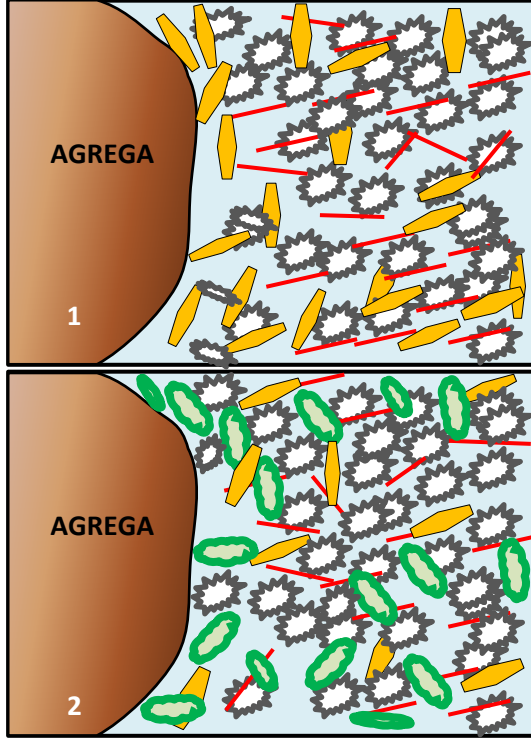
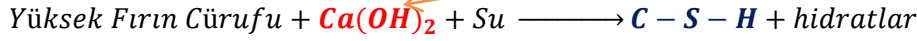
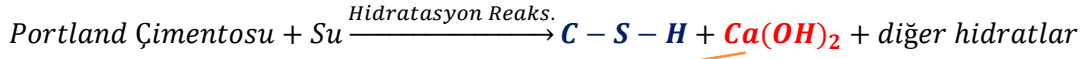
1. Kimyasal bileşim
2. Klinker oranı
3. İncelik
4. Camsı yapı

YÜKSEK FIRIN CÜRÜFLÜ ÇİMENTONUN HİDRATASYONU

Bağlayıcı malzeme ile su arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyona “hidratasyon reaksiyonu” denir. Hidratasyon reaksiyonu dışarıya ısı veren(ekzotermik), su ve sıcaklığa bağımlı bir reaksiyondur. Yüksek fırın cürufu bir miktar hidrolik özelliğe sahiptir ve su ile girdiği reaksiyon Portland çimentosuna oranla çok yavaş ve daha düşük etkidedir. Bu nedenle yüksek fırın cürufunun aktive edilmesi gerekmektedir. Cürufun aktivasyonu üç farklı yolla olur:

- ✓ Çimento ile birlikte kullanılması
- ✓ Alkali veya sülfat tuzları ile aktive edilmesi
- ✓ Betonda mineral katkı olarak kullanılması

Çimento hidratosyunu sonucu oluşan kalsiyum hidroksit($Ca(OH)_2$) ile YFC aşağıda gösterildiği gibi tepkimeye girerek ikinci bir reaksiyon oluştururlar. Bu reaksiyon sonucu betona dayanım kazandırma özelliği olan kalsiyum silikat hidrat(C-S-H) jeli daha fazla miktarda oluşur[8].



	Kalsiyum silikat hidrat C-S-H (PÇ kaynaklı)
	Etrenjit C-A-S-H
	Kalsiyum Hidroksit Ca(OH) ₂
	Kalsiyum silikat hidrat C-S-H (YFC kaynaklı)

Şekil 5.1 ve 5.2'de Ca(OH)₂ ve C-S-H jeli miktarının değiştiği görülmektedir. Yüksek fırın cürufu çimento ile üretilen betonda dayanıma etkisi olmayan Ca(OH)₂ oluşumu azalır ve dayanıma etkisi olan C-S-H jeli oluşumu artar. Ayrıca çimento hamuru tarafından kusulan ve agregaya ile hamur arasındaki ara yüzeyde toplanan Ca(OH)₂ oranının azalması ile daha kuvvetli aderans sağlanır.

Şekil 5.1 – 5.2: Portland çimentosu ve yüksek fırın cürufu çimentonun hidratasyon ürünleri: PÇ kaynaklı(1) ve YFC kaynaklı(2)

Tablo 4: Yüksek fırın cürufu çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan başlıca ürünler

Hidratasyon Ürünleri	Açıklama
Kalsiyum silikat hidrat C-S-H	C-S-H jelleri betonda dayanımı sağlayan üründür. Yüksek fırın cürufu çimentoda daha fazla miktarda oluşur.
Kalsiyum hidroksit CH	CH betonda bazik ortamı sağlar. Suda çözünen yapıdadır. Dayanıklılık açısından olumsuz etkileri vardır. Çimento hamuru ile agregaya arasındaki aderansı zayıflatır. Yüksek fırın cürufu çimentolarda daha düşük miktarda oluşur.
Etrenjit (AFt) C₆A₃H₃₂	Betonda ilk oluşan ürünlerdendir. Dayanıma etkisi yoktur. Yüksek fırın cürufu çimentoda daha düşük miktarda oluşur.
Monosülfat (AFm) C₄A₃H₁₂	Yarı-kararlı bir üründür. Sülfatlı ortamda etrenjite dönüşür ve hacimsel genişlemeye neden olur.

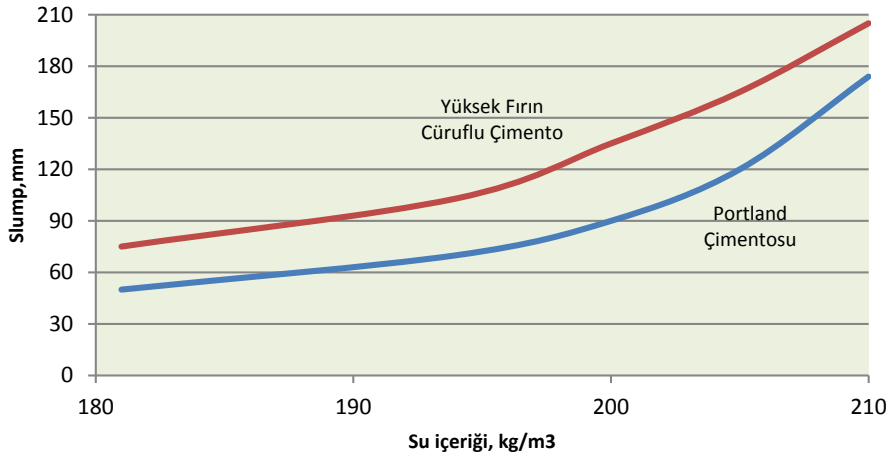
Kısaltmalar:

C → CaO S → SiO₂
H → H₂O S̄ → SO₃
A → Al₂O₃

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ÇİMENTONUN BETONDA ETKİLERİ

Taze Beton Özelliklerine Etkisi

İşlenebilirlik: Yüksek fırın cürufunun taneleri köşeli olmasına rağmen(bknz. Resim6) camsı, pürüzsüz ve daha az emici bir yapıdadır. Ayrıca, Portland çimentosuna oranla özgül ağırlığı daha düşüktür ve böylece aynı dozajda daha fazla çimento hamuru oluşmasını sağlar. Bu nedenlerle betonda işlenebilirlik olumlu yönde etkilenir. YFC betonda hidrasyon reaksiyonunu yavaşlattığı ve reaksiyon ısısını düşürdüğü için betonda kıvam kaybını azaltmaktadır. İşlenebilirlik ve su ihtiyacı cürufun inceliğine ve miktarına göre değişmektedir[9].



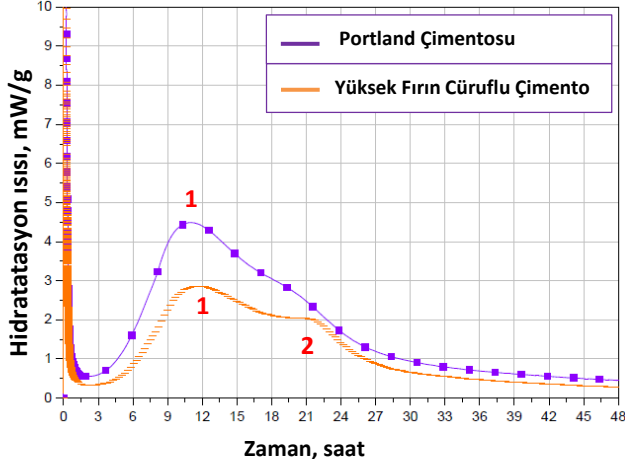
Şekil 6: Aynı dozaj ve incelikte yüksek fırın cürufu çimento ile yapılan beton Portland çimentoluya kıyasla aynı kıvamı daha az su ile sağlamaktadır[9].

Terleme: Terleme, taze betonda suyun yüzeye doğru hareketi olarak tanımlanır. Terleme kapasitesi ve miktarı; bağlayıcı malzeme miktarına ve inceliğine, çimento reaktivitesine, ince malzeme miktarına, hava içeriğine bağlıdır. Yüksek fırın cürufu çimentoda hidrasyon reaksiyonları için gerekli su ihtiyacı Portland çimentosuna oranla daha azdır. Yapılan araştırmalar sonucu Portland çimentosuna oranla daha ince olan yüksek fırın cürufu çimentonun, betonda terleme kapasitesini ve hızını bir miktar azalttığı tespit edilmiştir[9,10].



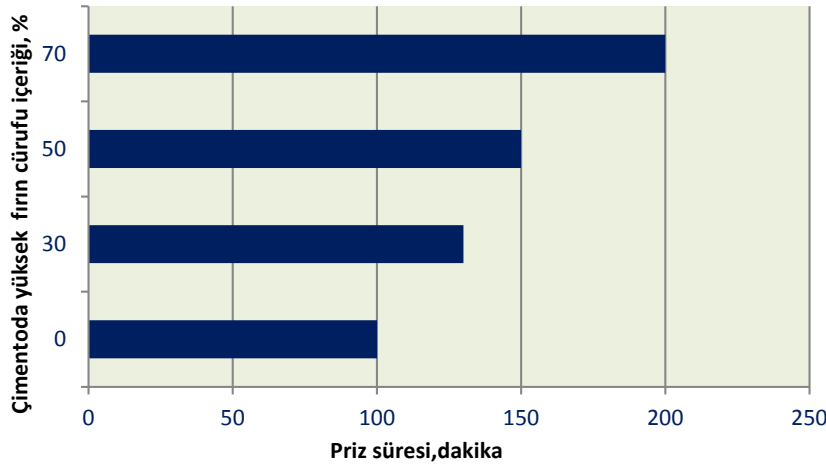
Resim 7: YFC çimento ile yapılan sel bariyerleri, Oosterschelde, Hollanda

Hidrasyon Isısı: Yüksek fırın cürufu çimentonun en önemli ve etkin faydalarından biri hidrasyon ısısını düşürmesidir. Bilindiği üzere hidrasyon ısısı kütle betonlarında termal(ısı) gerilmelere neden olmaktadır. Özellikle sıcak hava koşullarında büyük kesitli betonlarda iç ve dış sıcaklık farkı, telafisi olmayan ısıl çatlaklara neden olmaktadır. Bu nedenle yüksek fırın cürufu çimentonun kütle betonlarında kullanımı idealdir[9].



Şekil 7: Portland çimentosunun hidratasyonunda tek bir yerel maksimum nokta vardır . Yüksek fırın cürufllu çimento da ise iki yerel maksimum nokta vardır.Yüksek fırın cürufllu çimentoda hidratasyon reaksiyonu oluşum ısı daha düşüktür ve reaksiyon daha geniş zaman aralığında gerçekleşir[9].

Priz Süresi: Yüksek fırın cürufllu çimentoda hidratasyon ısısının düşük olması, çimento içindeki bileşenlerin reaksiyonlarının daha yavaş gelişmesi nedeniyle priz süresi uzamaktadır. Hava sıcaklığının yüksek olduğu dönemlerde betonun hızlı priz alması uygulamada sorunlar yaratmaktadır. Bu nedenle yüksek fırın cürufllu çimento kullanımı sıcak havalarda oldukça faydalıdır. Kış aylarında ise hava sıcaklığının düşük olması nedeniyle priz süresi doğal olarak uzamaktadır. Ancak, uygun oranda cüruf içeriği ve priz hızlandırıcı katkılarla bu durumun önüne geçilmektedir[9,10].



Şekil 8: Farklı oranlarda yüksek fırın cürufunun priz süresine etkisi[10].

Hava içeriği: İlk önce hidrolik ve daha sonra puzolanik reaksiyon sonucu daha fazla C-S-H jeli oluştuğundan beton daha geçirimsiz olmakta ve hava içeriği azalmaktadır. Bu durum genel olarak dayanıklılık açısından olumludur. Ancak, betonda bir miktar hava boşluğunun olması gereken durumlarda (donma-çözünme etkisi gibi) hava sürükleyici katkı kullanılarak betonda kontrollü hava boşlukları sağlanabilmektedir[11].

Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi

Yüksek fırın cürüflü çimentoların betonda basınç dayanıma etkisini erken yaş ve ileri yaş dayanımları olarak değerlendirmek gerekmektedir. Eşit su/bağlayıcı oranı ve eşit çimento miktarı kullanıldığında Portland çimentosuna oranla erken yaş dayanımı düşük, ileri yaş dayanımı ise yüksektir. Bu durum hidrasyon reaksiyonlarının gelişim hızlarından farklılık kaynaklanmaktadır.

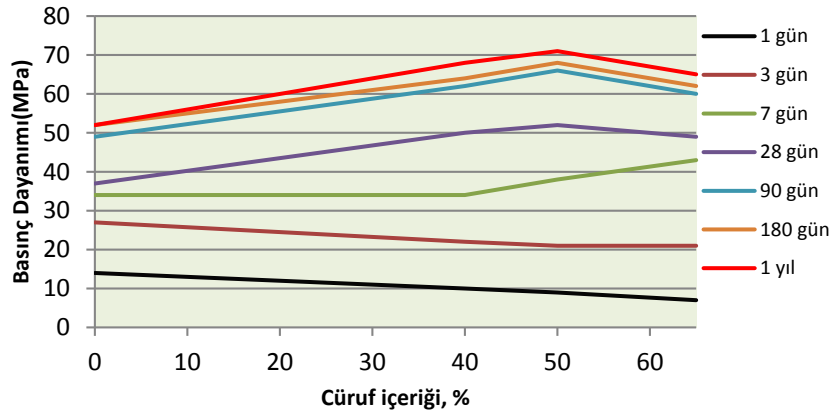
Erken Yaş Basınç Dayanımı: Yüksek fırın cürüflü çimentoda klinker oranı daha düşük olduğundan ve cürufun etkinleşmesi geç gerçekleştiğinden erken yaş dayanımı bir miktar düşüktür. Standardlarda erken yaş dayanımı için herhangi bir sınır değer mevcut değildir. Erken yaş dayanımı özellikle prefabrik üretimlerde ve tünel kalıp gibi inşaatlerde istenen bir özelliktir. Bu durumda priz hızlandırıcı katkıları ve uygun incelikte ve miktarda cüruf içeriği erken yaş dayanımlarının daha yüksek olmasını sağlayabilir. Bilindiği üzere, dayanım tek başına yeterli bir tasarım kriteri değildir. Dayanım kadar önemli bir diğer hususta yapının çevresel etkilere karşı dayanıklı olmasıdır[9,10]. Diğer bir deyişle, üstün dürabilitenin(dayanıklılığın) sağlanması esastır. Eğer önce dayanıklılık gözönüne alınarak beton tasarımı yapılırsa dayanım kolaylıkla sağlanır.



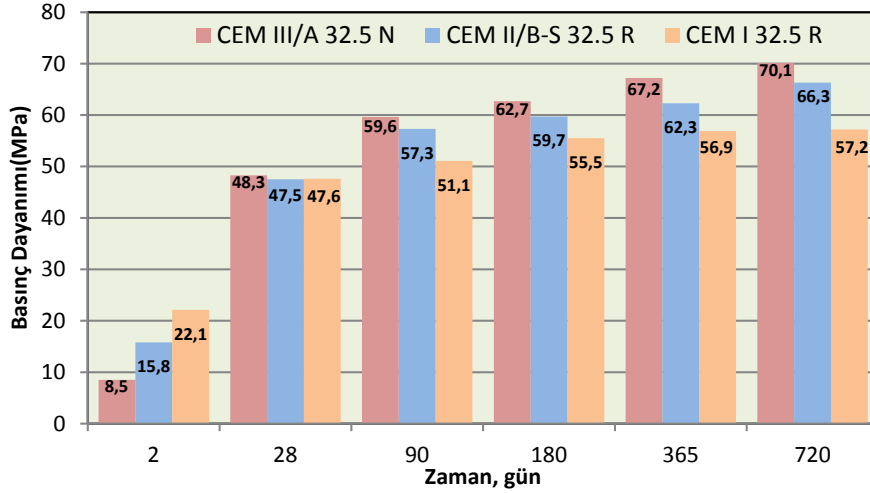
Resim 8: YFC çimento ile yapılmış kanalizasyon altyapısı

Örnek: Kanalizasyon beton boruları prekast olarak üretilir ve kalıp alma süresi işletme için önemlidir. Bu nedenle erken yaş dayanımın hızlı gelişmesi istenir. Ancak beton borular için tasarımda dayanım kadar önemli bir diğer kriter de dayanıklılıktır. Dayanıklılık elemanın çevresel koşullara karşı dirençli olmasını ve yeterli hizmet süresini sağlaması olarak tanımlanabilir.

İleri Yaş Basınç Dayanımı: Betonda ileri yaş dayanımı olarak standardın öngördüğü 28 günlük değerdir. Ancak, cürüflü çimentoların dayanım gelişimi 56, 90 hatta 150 günde daha iyi değerlendirilir. Yapılan laboratuvar çalışmalarında yüksek fırın cürüflü çimentoların 28 günde referans betona oranla daha yüksek dayanım verdiği ve bu değer ileri yaşlarda daha da arttığı tespit edilmiştir. Bunun ana nedeni yüksek fırın cürufunun Portland çimentosu ile su arasındaki reaksiyonlar sonucu oluşan $Ca(OH)_2$ ile tepkimeye girerek dayanım kazandıran C-S-H jellerini oluşturmasıdır[9,10].



Şekil 9: Farklı oranda cüruf içeriği ile basınç dayanımının zamana göre değişimi[9]

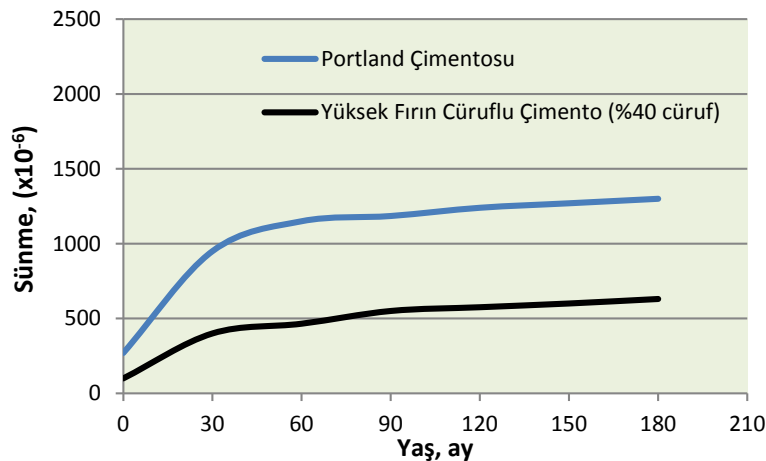


Şekil 10: CEM III, CEM II ve CEM I çimentolarının zamanla basınç dayanımı gelişimi[12]

Çekme Dayanımı: Yüksek fırın cürüflü çimento az da olsa çekme dayanımını olumlu etkiler. Bu etki basınç dayanımında olduğu gibi ileri yaşlarda daha belirgin biçimde görülmektedir[9,10].

Geçirgenlik: Yüksek fırın cürüflü çimentonun su ile reaksiyonu sonucu oluşan hidrasyon reaksiyonu iki kademedeyi gerçekleştirir. Dayanım kazandırma özelliği olan C-S-H jeli oluşumu yüksek miktarda gerçekleşir. $Ca(OH)_2$ ve etrenjit miktarı ise daha az olur. Bu sayede daha yoğun, daha küçük ve az boşluklu bir yapı meydana gelir. Bu durum cüruf miktarı arttıkça daha da gelişir[5,9].

Rötre ve Sünme: Rötre betonda su kaybı ve kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan hacim değişikliği olarak ifade edilir. Plastik, kuruma, termik ve otojen rötre olarak çeşitleri vardır. Bağlayıcı malzemenin yapısı, ince malzeme miktarı, su/bağlayıcı oranı ve hava sıcaklığı rötreyi doğrudan etkiler. YFC çimentonun, rötre ile ilişkisi net olarak tespit edilememiştir. Ancak %50'den az yüksek fırın cürufu içeren çimento ile yapılan betonlarda rötrenin değişmediği veya az bir miktar düştüğü bilinmektedir. Sünme, betonun uzun süre sabit bir yük altında deformasyona uğramasıdır. YFC çimentolu betonda sünme deformasyonu daha düşüktür[10].



Şekil 11: Portland çimentolu ve yüksek fırın cürufu çimentolu betonda sünme davranışı[10]

Cürüflu Çimentonun Betonun Dayanıklılık Özelliklerine Etkisi

Dayanıklılık, malzemenin veya yapının çevresel etkilere karşı dirençli olması ve hizmet ömrünün asgari olarak tasarım kriterlerini karşılamasıdır. Beton hizmet ömrü boyunca sürekli ya da geçici olarak çeşitli çevresel etkilere maruz kalabilir. Çevresel etkiler dışında beton, içerdiği malzemelerden kaynaklanan iç etkilere de maruz kalabilmektedir. Betonda dayanıklılık kavramı sadece dayanıma bağlı değildir. Dayanımdan daha çok betonun geçirimsizliği ile ilişkilidir.

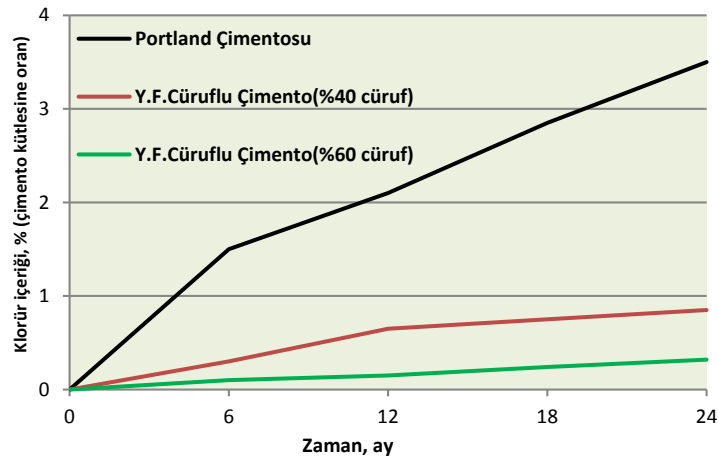
Çevresel etkiler

- Sülfat etkisi
- Donma – çözünme etkisi
- Aşınma
- Asit etkisi
- Klor etkisi
- Karbonatlaşma

İçsel etkiler

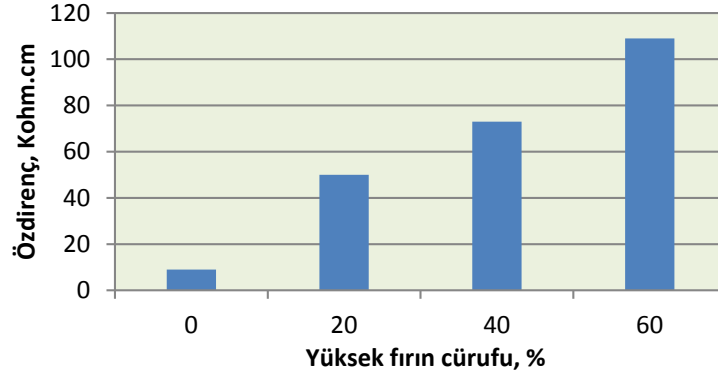
- Alkali-silika reaksiyonu
- Alkali-karbonat reaksiyonu
- Gecikmiş etrenjit oluşumu

Su/bağlayıcı oranı ile birlikte çimentonun kimyasal özellikleri betonun geçirimsizliğini etkiler. Bir diğer önemli husus da betonun ayrıştırılmadan kalıbına yerleştirilmesi ve sıkıştırılmasıdır. Yüksek fırın cürüflu çimentoların su ihtiyacı düşük olduğundan betonda su/bağlayıcı oranını olumlu etkiler. Ayrıca Portland çimentosuna oranla C-S-H oluşumu daha fazladır ve suda çözünen $Ca(OH)_2$ miktarı düşüktür. Bu sayede daha yoğun bir yapı oluşumunu sağlar. Betonda geçirimsizliğin artması çevresel etkilere direnci sağlar. Su ve suyun içerdiği zararlı maddeler betona nüfuz edemez. Yüksek fırın cürüflu çimentolar, özellikle beton içerisindeki donatının korozyonuna neden olan **klorüre** karşı betonun geçirimsizliğini olumlu etkiler[10].



Şekil 12: Portland çimentosu ve farklı oranlarda yüksek fırın cürufunun klorür geçirgenliği[9].

Su çimento oranının düşürülmesi sonucu klor geçirirliği 2-3 kat azalır, ancak yüksek fırın cürüflü çimento kullanımı ile bu oran 20 kata çıkabilmektedir. YFC, çimento hamurunda boşluk miktarı azalır ve boşluk yapısı değişir . Bunun sonucu daha yoğun ve Şekil 13'de görüldüğü gibi elektriksel öz direnci yüksek bir yapı oluşur[13].



Şekil 12: Öğütülmüş yüksek fırın cürufu oranının elektriksel öz dirence etkisi[13]

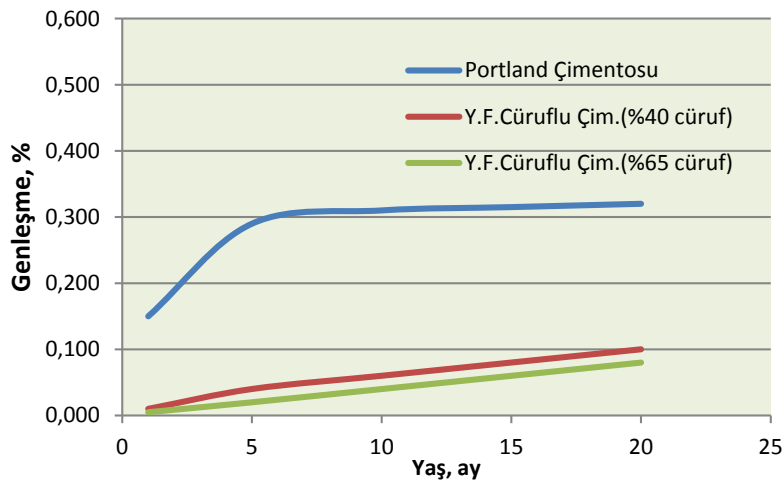
Alkali-silika reaksiyonu(ASR): ASR çimentodaki alkali tuzlar (Na, K, OH) ile aktif silis içeren agregalar arasında oluşan bir reaksiyondur. ASR sonucu beton içerisinde oluşan jeller yeterli miktarda suyun mevcut olması durumunda hacimsel olarak genişleyen bir yapıdadır. Genleşme sonucu betonda ciddi hasarlar oluşur. ASR reaksiyonu yavaş ilerleyen ve kısa vadede gözlemlenmeyen bir reaksiyondur. Yüksek fırın cürüflü çimentoda klinker miktarı düşük olduğu için toplam alkali miktarı da azdır ve bunun sonucu ASR riski de azalmaktadır[9,10].



Resim 9: Alkali-silika reaksiyonu sonucu oluşan hasar

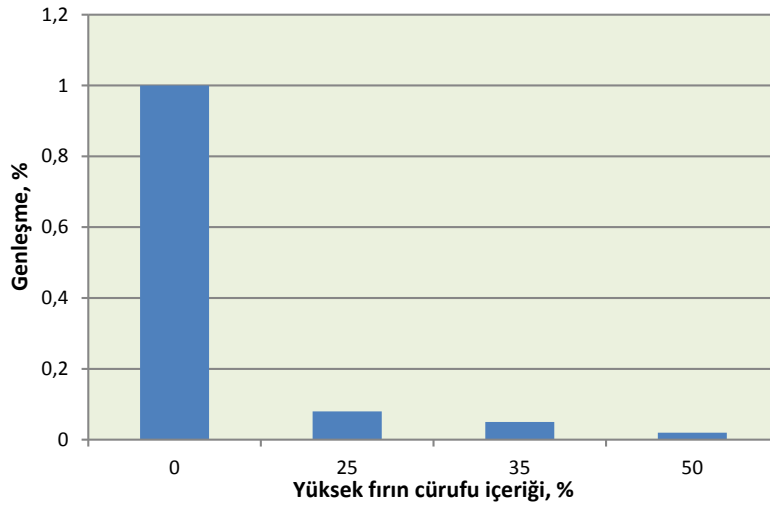


Resim 10: Betonarme yapıda sülfat etkisi



Şekil 14: Portland çimentosu ve farklı oranlarda cüruf içeren çimentoların reaktif pırlama ile reaksiyonu sonucu oluşan genleşme[9].

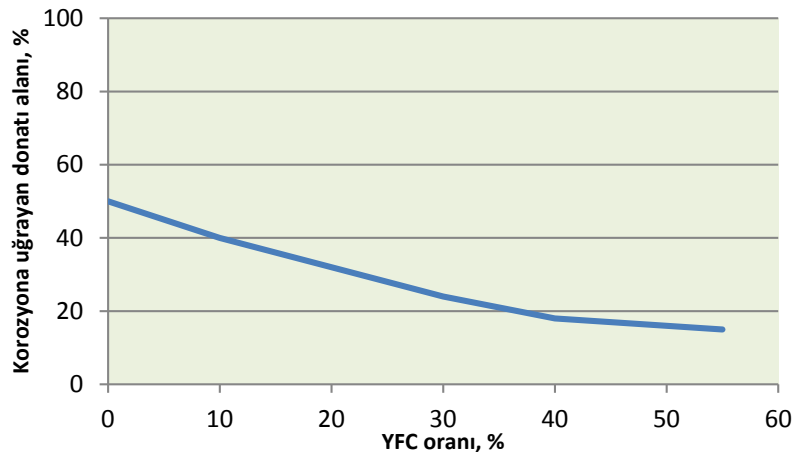
Sülfata dayanıklılık: Sülfat etkisi betonarme yapılar için oldukça ciddi sorunlar doğuran çevresel bir etkidir. Sülfat, özellikle deniz suyunda, yeraltı suyunda, atık suda ve toprakta mevcuttur. Bu etkinin olduğu yerlerde yapılacak yapılar sülfat etkisine karşı olacak şekilde tasarlanmalıdır. Yüksek geçirimli betona çeşitli yollarla giren sülfat iyonları çimentoda bulunan C_3A ve $Ca(OH)_2$ ile tepkimeye girerek genişleme potansiyeli olan etrenjit oluşumuna neden olur. Yüksek fırın cürüflü çimentoda C_3A ve $Ca(OH)_2$ oranı Portland çimentosuna oranla daha düşüktür. Ayrıca YFC içeren beton daha geçirimsizdir. Bu nedenle sülfat etkisine karşı oldukça dirençlidir[14].



Şekil 15: Farklı oranlarda yüksek fırın cürufunun sülfat kaynaklı genişlemeye etkisi[10]

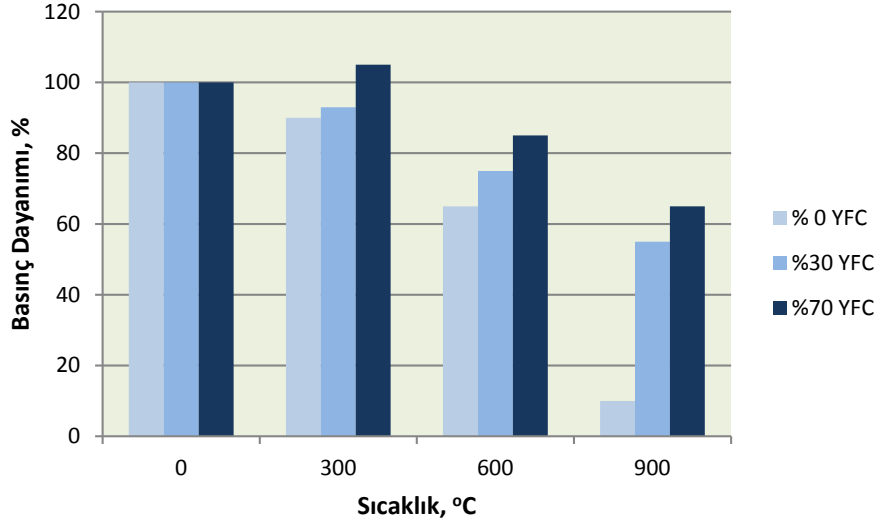
Yüksek fırın cürüflü çimentolar “sülfata dayanıklı çimentolar”ın kullanılacağı her yerde muadil olarak kullanılabilir.

Donatı Korozyonu: Yüksek fırın cürüflü çimentolarla yapılan laboratuvar çalışmalarında cürufun donatı korozyonuna karşı Portland çimentosuyla yapılanlara kıyasla daha dayanıklıdır. Bilindiği üzere yüksek fırın cürüflü çimentoların, betonda donatı korozyonuna neden olan klorür geçirgenliği düşüktür.



Şekil 16: Paspayı 2cm olan beton numunelerde donatı korozyonu[10]

Sıcaklık: Yüksek fırın cürufllu çimentolar, yüksek sıcaklıklarda bile betonun dayanıklılığını korur. Şekil 14'de görüldüğü gibi 600°C'de Portland çimentolu beton dayanımının yaklaşık %40'ını kaybederken, yüksek fırın cürufllu çimentolu betonda bu kayıp daha düşüktür.

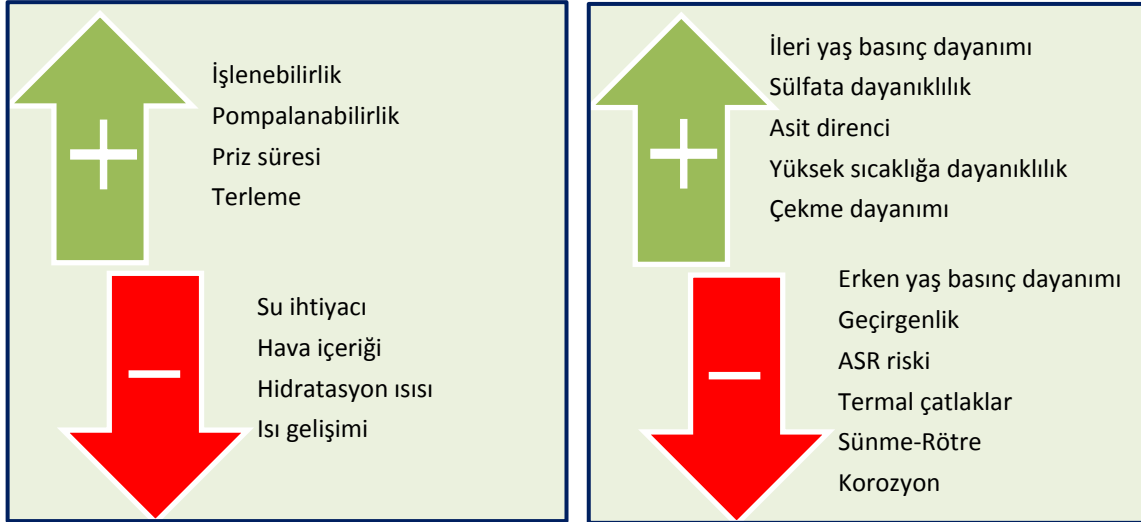


Şekil 17: Farklı oranlarda yüksek fırın cürufllunun sıcaklığa bağlı basınç dayanım değişimleri[15]

ÖZET

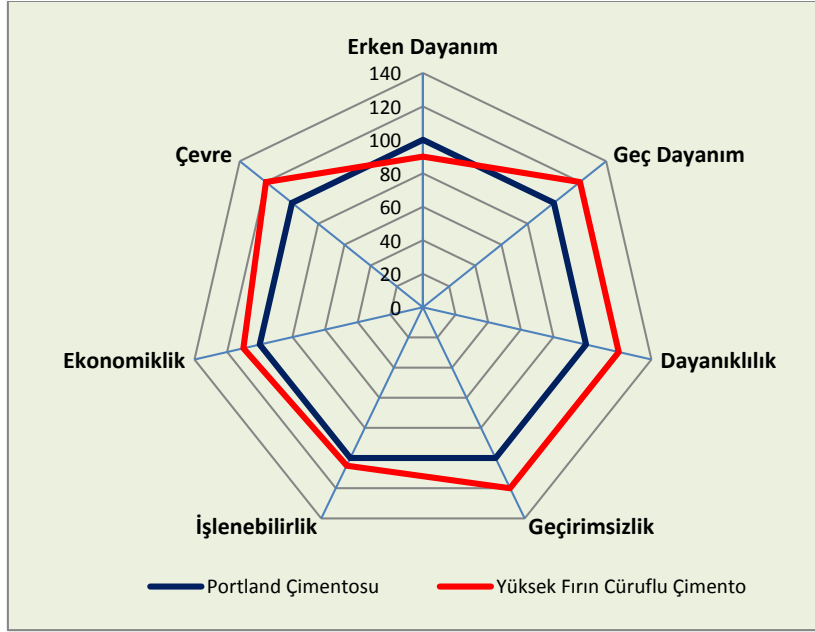
Yüksek Fırın Cürufllu Çimentoların Üstünlükleri

Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi (+) işareti artışı, (-) işareti ise azalmayı ifade etmektedir.



Şekil 18: Yüksek fırın cürufllu çimentonun taze(soldaki) ve sertleşmiş(sağdaki) beton özelliklerine etkisi [4]

Yüksek fırın cürufllu çimentoların **donma-çözünme, karbonatlaşma ve aşınma dayanıklılığına** etkileri oldukça karışıktır. Bağlayıcı miktarı ve inceliği bu etkilerde baş rol oynar. Yapılan araştırmalar sonucu Portland çimentosuna benzer etkilere sahip olduğu ortaya çıkmıştır.



Şekil 19: Portland çimentosu ve yüksek fırın cürüflü çimentonun kıyaslaması

YÜKSEK FIRIN CÜRÜFLÜ ÇİMENTONUN KULLANIM ALANLARI

Yüksek fırın cürüflü çimentolar Portland çimentosunun kullanıldığı tüm yapılarda kullanılabilir. Ancak Portland çimentosu yüksek fırın cürüflü çimentonun kullanıldığı yerlerde aynı performansı veremeyebilir.

Tablo 5: Yüksek fırın cürüflü çimentoların 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

SÜRDÜRÜLEBİLİR YAPILAŞMA BAKIMINDAN YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ÇİMENTONUN ÜSTÜNLÜKLERİ

Son yıllarda bir çok sektörde olduğu gibi çimento sektöründe de ana gündemdeki konularından biri “sürdürülebilirlik”tir. Sürdürülebilirlik, BM Çevre ve Kalkınma Komisyonu tarafından “İnsanlığın, gelecek kuşakların gereksinimlerine cevap verme yeteneğini tehlikeye atmadan, günlük ihtiyaçlarını temin ederek, kalkınmayı sağlaması yeteneğidir” şeklinde tarif edilmiştir. Kyoto protokolü ile çevrenin korunması, CO₂ emisyonunun azaltılması, alternatif yakıt ve hammaddelerin kullanılması birçok ülke tarafından orta ve uzun vadeli hedefler haline gelmiştir. Çimento sektöründe enerji tüketimi, hammadde çeşitliliği ve CO₂ emisyonu sürdürülebilirlik açısından iyileştirilmesi gereken konulardır. Bunun sağlanması için alternatif yakıt ve hammadde kullanımı son yıllarda güncelliğini korumaktadır.

Yüksek fırın cürufu çimento, bu kapsamda çevre açısından oldukça olumlu etkilere sahip bir ürün olarak öne çıkmaktadır. Yüksek fırın cürufu çimentolar daha az klinker içerdiğinden daha az CO₂ ve daha az zararlı gaz emisyonu sağlar. Bununla birlikte klinker oranının düşmesi enerji tasarrufu sağlar. Böylece, öğütülmüş yüksek fırın cürufu hem ekonomik hem de ekolojik bakımdan büyük öneme sahiptir.

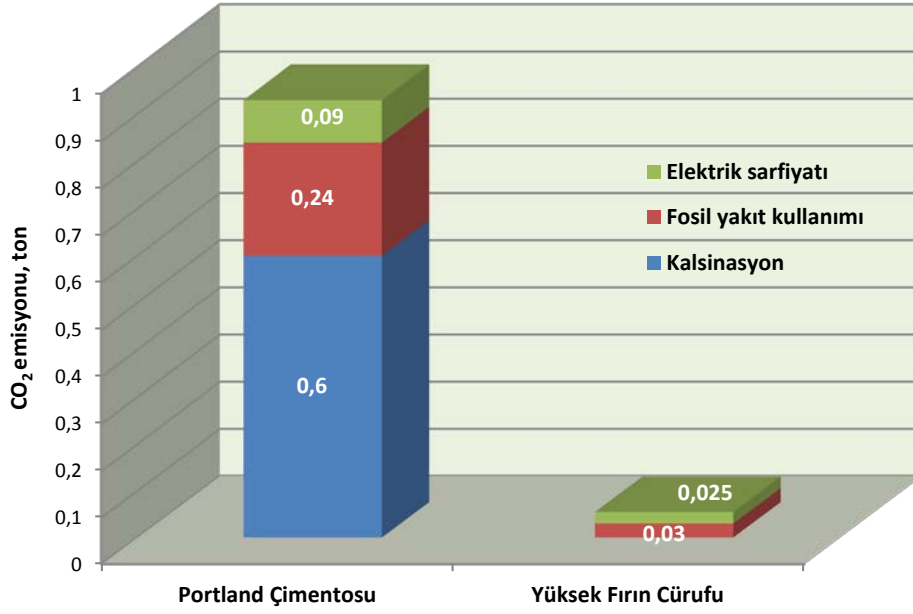
Tablo 6: CEM I, CEM II ve CEM III çimentolarının üretiminde açığa çıkan CO₂ emisyonu[16]

Çimento Cinsi	Mineral Katkı Oranı % Düşük - Yüksek	CO ₂ Emisyonu (kg CO ₂ / ton) Düşük - Yüksek
CEM I	-	930
CEM II/B – S	21-35 (yüksek fırın cürufu*)	740 – 620
CEM III/A	36-65(yüksek fırın cürufu*)	610 – 360

Tablo 7: Çimento tiplerinin emisyon faktörleri[17]

Çimento cinsi	Emisyon faktörü
CEM I	100
CEM II/A	89
CEM II/B	79
CEM III/A	59
CEM IV	63
CEM V	58

Tablo 6 ve Tablo 7’de farklı çimento tiplerinin emisyon değerleri verilmiştir. CEM III (yüksek fırın cürufu çimento) çimentosunun CO₂ emisyon faktörü CEM I ve CEM II çimentolarına oranla çok daha düşüktür. CEM III’deki klinker oranı azaldıkça bu değer de düşmektedir. Tablo 7’de belirtilmiş olmasa da CEM III/C çimentosu en düşük emisyon faktörüne sahip çimento tipidir.



Şekil 20: Portland çimentosu ve yüksek fırın cürufunun üretimi sonucu açığa çıkan CO₂ emisyonu[15]



Şekil 21: Yüksek fırın cürüflü çimentonun çevresel etkileri

Kaynaklar

1. ERDOĞAN, T. Y., “ Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri” , THBB Yayınları, 2004
2. WINTER, N., “Understanding Cement”, WHD Microanalysis Consultants, 2009
3. TOKYAY, M., ve ERDOĞDU, K., “ Cürüflar ve Cürüflu Çimentolar” , TÇMB Yayınları, 2011
4. KOSMATKA, STEVEN H., KERKHOFF, PANARESE., and WILLIAM, C., “Design and Control of Concrete Mixtures” Portland Cement Association Publication, 2003
5. HEWLETT, P. C., “Lea’s Chemistry of Cement and Concrete” , Elsevier Science and Technology Books, 2004
6. Slag Cement Association, Technical Bulletin, “Mitigating Sulfate Attack” , No:7, 2002
7. http://blogs.cae.tntech.edu/hydration-kinetics/files/2009/08/02_scrivener_scms.pdf/
8. BOUGARA, A., KHATIB, J., and KHELLAFI, H., “Some Parameters Affecting the Heat of Hydration of Slag Cement”, 1st International Conf. on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries”, Algeria, 2009
9. ACI 233R-03, “Slag Cement in Concrete and Mortar”, 2003
10. SIDDIQUE, R., KHAN, and MOHAMMAD I., “Supplementary Cementing Materials” , Springer, 2011
11. ACI Education Bulletin E3-01, “ Cementitious Materials for Concrete”, 2001
12. GIERGICZNY, Z., “Promotion of Slag Cements in Poland”, Heidelberg Cement Presentation
13. ŞENGÜL, Ö., TAŞDEMİR, M.A., KOÇ, İ., TARHAN, M., ve ERENOĞLU, T., “ Doğal ve Endüstriyel Katkılar İçeren Betonların Tasarımı, Mekanik Özellikleri ve Dürabilitesi” , 7.Ulusal Beton Kongresi, 2007, s.
14. ASTM C989 – 99, “Standard Specification for GGBFS for use in Concrete and Mortar” , 1999
15. <http://www.ecocem.ie/>
16. <http://www.sustainableconcrete.org.uk/>
17. <http://www.cnci.org.za/>