



TÜRKİYE ÇİMENTO MÜSTAHSİLLERİ BİRLİĞİ

CÜRUFLAR ve CÜRUFLU ÇİMENTOLAR

(Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve
Durum Değerlendirmesi Raporu)

TÇMB / AR-GE / Y 97.2

Prof. Dr. Mustafa TOKYAY
İnşaat Mühendisliği Bölümü, ODTÜ
İnş. Y. Müh. Korhan ERDOĞDU

Nisan 2011, ANKARA

9. BASKI

ISBN 975-8136-03-08

TÇMB / AR-GE ENSTİTÜSÜ

Yerleşim Adresi:

Ankara Teknoloji Geliştirme Bölgesi 1605. Cadde Dilek Binası

06800 Bilkent-Çankaya/ANKARA

Yazışma Adresi:

P.K. 2 Bakanlıklar 06582 ANKARA

Tel: 444 50 57 • Faks: (0312) 265 09 06

www.tcma.org.tr • info@tcma.org.tr

Kaynak göstermek kaydıyla bu kitaptan alıntı yapılabilir.

ÖNSÖZ

Yüksek fırın cüruflarının bağlayıcı özelliklere sahip olduğunun belirlenmesiyle birlikte dünyada 19. yüzyılın ikinci yarısından itibaren bu malzemeyi içeren bağlayıcıların ticari olarak üretimine başlanmıştır. Yüksek fırın cüruflarının gerek portland çimentosu hammaddesi gerekse mineral katkı maddesi olarak kullanılması, sırasıyla 1883 ve 1892 yıllarına rastlamaktadır. Günümüzde dünyanın birçok ülkesinde değişik isimlerle yüksek fırın cürufu içeren çimentolar üretilmekte ve kullanılmaktadır.

Avrupa Çimento Standardında (prEN 197-1) Portland Cüruf Çimentosu genel adı altında iki (II/A-S ve II/B-S), Yüksek Fırın Cürufu Çimentosu adı altında ise üç (III/A, III/B, III/C) olmak üzere, %6'dan %95'e kadar değişik miktarlarda yüksek fırın cürufu içeren, toplam beş çimento tanımlanmıştır. 1994 verilerine göre, bu çimentoların Avrupa ülkelerindeki iç satışları toplamın %13.3'ünü oluşturmaktadır. Ülkemizde de CÇ 32.5, CÇ 42.5, SDÇ 32.5 ve SSÇ 32.5 adları altında %20'den %65'e kadar yüksek fırın cürufu içeren çimentolarla ilgili Türk Standartları bulunmaktadır. TÇMB üyesi olan Çimento fabrikalarının bir kısmında bu çimentoların üretimi yapılmakla birlikte, tüketim Avrupa ülkeleriyle kıyaslandığında çok düşüktür.

Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği AR-GE Enstitüsü yayını olarak çıkarılan bu kitapta cüruflar ve cürufu çimentolar teknik açıdan geniş kapsamlı olarak ele alınmaya çalışılmıştır. Çimento sektörümüze ve çimento kullanıcılarına yararlı olacağını umarak ilgilerinize sunuyoruz.



Adnan İĞNEBEKÇİLİ

Yönetim Kurulu Başkanı

Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği

ÖNSÖZ

Cüruflu çimentolarla ilgili bir kitap hazırlama fikri TÇMB Yönetim Kurulu'nda gündeme gelip görev AR-GE Enstitüsü'ne verildikten sonra araştırmaların gözden geçirilmesi ve durum raporu (State of-the-Art-Report) niteliğinde bir kitap hazırlanması kararlaştırılmıştır. Bu maksatla, büyük bir çoğunluğu son 10-15 yılda yayınlanmış olan, toplam, 52 kaynaktan yararlanılarak elinizdeki çalışma ortaya çıkarılmıştır. Elbette ki yıllardan beri çok sayıda araştırmaların yapıldığı ve ciltler dolusu makale ve bildirilerin yayınlandığı bir konuda tüm araştırmaları kapsamak mümkün değildir. Bu kitapta yapılmak istenen, yüksek fırın cürufları, cüruflu çimentolar ve cüruflu çimentolarla üretilen betonlar hakkında genel bilgileri sunmaktır.

Kitabın hazırlanmasında emeği geçen Sn. Zerrin OĞUZ'a teşekkürü bir borç biliriz.

Çimento ve beton sektörlerindeki tüm ilgililerin yararına olması dileğimizle...

Mustafa TOKYAY ve
Korhan ERDOĞDU
24.04.1997
Ankara

İÇİNDEKİLER

1	GİRİŞ	9
2	YÜKSEK FIRIN CÜRUFU	9
2.1	Üretim.....	9
2.2	Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Yapısı.....	13
2.3	Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Kompozisyonu	15
2.4	Yüksek Fırın Cüruflarının Hidrolik Aktivitelerinin Belirlenmesi için Önerilen Çeşitli Yöntemler.....	18
2.5	Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Hidratasyonu	21
3	CÜRUFU ÇİMENTOLAR.....	22
3.1	Üretim.....	22
3.2	Cürufu Çimentoların Hidratasyonu	23
3.2.1	Cürufun Camsı Fazının ve Kristalinitesinin Etkileri	25
3.2.2	Klinker Özellikleri ve Cüruf İnceliğinin Etkileri	25
3.2.3	Isıl İşlemlerinin Etkileri	27
3.3	Fiziksel Özellikler	27
3.4	Dayanım Özellikleri	28
3.5	Dayanıklılık Özellikleri.....	29
3.5.1	Sülfat Etkisine Dayanıklılık	29
3.5.2	Klor Etkisine Dayanıklılık	30
3.5.3	Deniz Suyu Etkisine Dayanıklılık	32
3.5.4	Karbonatlaşmaya Dayanıklılık.....	33
3.5.5	Alkali-Agrega Reaksiyonu	33
3.5.6	Donma-Çözülme Direnci.....	34
4	CÜRUFU ÇİMENTOLARLA ÜRETİLEN BETONLARIN ÖZELLİKLERİ HAKKINDA MEVCUT BİLGİ BİRİKİMİ	36
4.1	Taze Beton Özellikleri	36
4.2	Sertleşmiş Beton Özellikleri.....	37

4.3	Dayanıklılık Özellikleri.....	38
4.4	Cürüflü Çimentoların Beton Kimyasal Katkı Maddeleriyle Uyumu...	38
5	CÜRUF VE CÜRUF LU ÇİMENTO STANDARDLARI	39
5.1	Cürüf Standartları.....	39
5.1.1	Çimento veya Beton Katkı Maddesi Olarak Kullanılacak GYFC Standartları.....	41
6.	KAYNAKLAR.....	44

1. GİRİŞ

Cüruflar çeşitli metalurji tesislerinden elde edilen atık madde gruplarından birisidir. Kimyasal kompozisyonları ve özellikleri elde edildikleri sanayi kuruluşlarının ürettiği ana ürün tipine ve üretim yöntemine bağlı olarak birbirinden çok farklılık gösterir. Örneğin, yüksek fırın cüruflarının kendi başına bağlayıcı özelliği olmasına karşın nikel ve bakır cüruflarının yalnızca puzolanik özellikleri vardır. Çeşitli cürufların kimyasal kompozisyonlarına örnekler Çizelge 1.1’de verilmiştir.

Cürufların çimento ve beton sektörlerinde çok çeşitli kullanım olanakları bulunmaktadır. Konvansiyonel çelik üretim teknikleriyle elde edilen cüruflar kristal yapıya sahip kütleler olarak ortaya çıkar. Bu tür cüruflar ya hiç kullanılmaz ve atılırlar ya da yol malzemesi veya beton agregası olarak kullanılırlar. Buna karşılık, modern teknolojiyle çelik üretimi yapılan tesislerde camsı yapıya ve bir miktar hidrolik özelliklere sahip olan cüruflar elde edilir. Bunları çimentolu sistemlerde kullanmak mümkün olmaktadır.

Tüm cüruflar arasında en önemlisi ve en yaygın kullanım alanına sahip olanı yüksek fırın cüruflarıdır (YFC).

2. YÜKSEK FIRIN CÜRUFU

2.1 Üretim

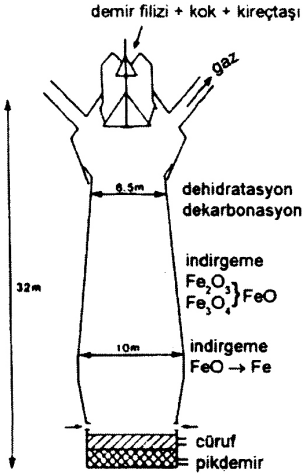
Ham demir üretiminde atık malzeme olarak elde edilen YFC yüksek fırınlarda, daha hafif olmasından dolayı, ham demirin üstünde yer alır. Demir filizi gangı, kok ve kireçtaşının yanma sonrası artıkları YFC’yi meydana getirirler. Yüksek fırındaki proses basit olarak Şekil 2.1’de gösterilmiştir. YFC’nin oluşum sıcaklığı 1400-1600 °C’dir.

YFC’nin kimyasal kompozisyonu bir üçlü diagramda ($\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) (Şekil 2.2) diğer bazı malzemelerle birlikte karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

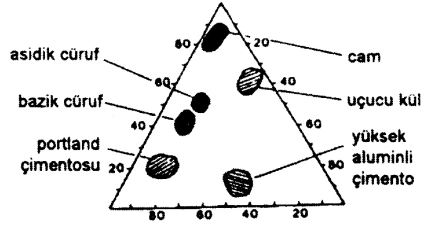
YFC yavaş soğutulduğu taktirde kristal bir yapıya sahip olur. Bu haliyle bazalta benzer mekanik özelliklere sahiptir ve beton agregası olarak kullanılabilir. Öte yandan, hızlı soğutma uygulanması sonucunda ise camsı yapıda cüruf elde edilir. Bu tür cüruf lar granüle yüksek fırın cüruf u (GYFC) olarak adlandırılırlar. GYFC bir miktar hidrolik özelliğe sahiptir.

Çizelge 1.1. Çeşitli cüruf ların kimyasal kompozisyonlarına örnekler (1,2)

Oksit (%)	Demir Cüruf ları					Diğer Cüruf lar			
	Yüksek Fırın Cüruf ları				Linz Donawitz Cüruf u (Almanya)	Kuşun-Çinko Cüruf u (İngiltere)	Nikel Cüruf u (Kanada)	Bakır Cüruf u (Güney Afrika)	Fosfor Cüruf u (ABD)
	1 (Fransa)	2 (Japonya)	3 (Türkiye)	4 (Türkiye)					
SiO ₂	35	31	40.2	38.6	13	18	29	34	41
CaO	43	37	34.5	31.7	47	20	4	9	44
MgO	8	8	9.4	9.3	1	1	2	4	1
Al ₂ O ₃	12	16	11	15,2	1	6	1	6	9
Fe ₂ O ₃	0.4	0.7	0.8	0.8	31	38	53	44	1



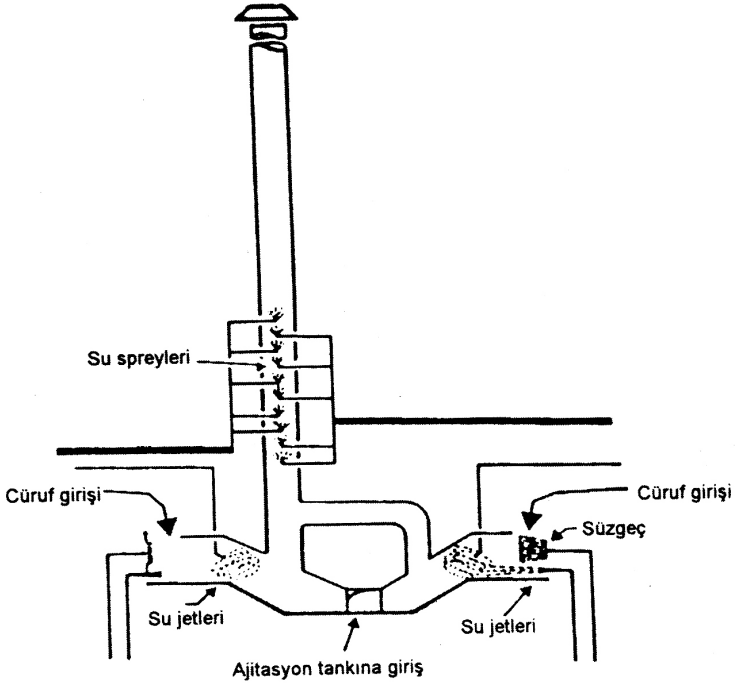
Şekil 2.1. Yüksek fırın şeması

Şekil 2.2. CaO-SiO₂-Al₂O₃ üçlü diagramında YFC'nin yeri.

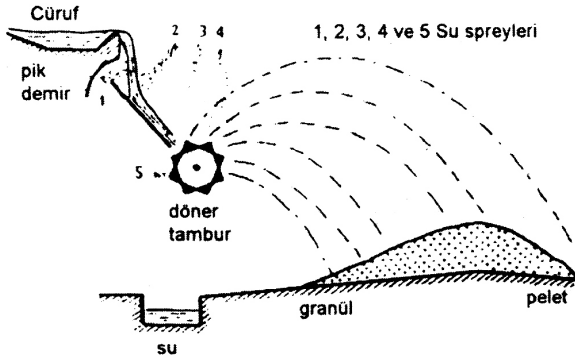
Erimiş haldeki cüruf yüksek fırından çıktığında hızlı olarak soğutulduğu takdirde akışkanlığındaki ani azalma kristal yapılaşmayı engeller ve camsı yapıda bir katı eriyik elde edilmesini sağlar. Bu, yarı-kararlı camsı malzeme sodyum hidroksit veya kalsiyum hidroksit gibi aktivatörler kullanılarak ya da ince öğütülmek ve portland çimentosunun hidratasyonu ile ortaya çıkan Ca(OH)_2 'yi kullanmak suretiyle, hidrolik özelliğe sahip olur. Aktivasyon sonucunda, kalsiyum silikat hidratlar meydana gelir (3).

1862 yılında Emil Largens yüksek fırın cürufunun suyla granülasyonu sonucunda elde edilen malzemenin kireçle karıştırılmasıyla bağlayıcı özelliğe sahip olduğunu gözlemlemiştir (14A).

Yüksek fırın cürufunun ani soğutulması için iki yöntem uygulanmaktadır. Bunlardan birincisi Granülasyon Yöntemi (Şekil 2.3), ikincisi ise Peletleme Yöntemi (Şekil 2.4) dir. Granülasyon yönteminde soğutma işlemi için çok miktarda ($100\text{m}^3/\text{ton}$ cüruf) su kullanılması zorunluluğu vardır. Bu işlem sonucunda cürufun içerdiği su miktarı yaklaşık %30 civarındadır. Bu su ya kurutucu değirmenler veya filtreli havuzlarda cüruftan uzaklaştırılır. Elde edilen GYFC'nin özellikleri bakımından en iyi yöntem olmakla birlikte çok pahalı olması bu yöntemin kullanımını sınırlamaktadır (1).



Şekil 2.3. Granülasyon yönteminin şematik gösterimi



Şekil 2.4. Peletleme yönteminin şematik gösterimi

Öte yandan, Kanada'da geliştirilmiş, daha yeni bir yöntem (Paletleme) daha yaygın kullanım alanı bulmuştur. Bu yarı-kuru proseste erimiş haldeki cüruf önce suyla soğutulur daha sonra dönen (dakikada 300 tur) bir tambur vasıtasıyla havaya fırlatılır. Bu yöntemde kullanılan su miktarı 1 ton cüruf için yaklaşık 1 m^3 'tür. İşlem sonucunda cüruf içinde kalan su miktarı ise %10'un altındadır.

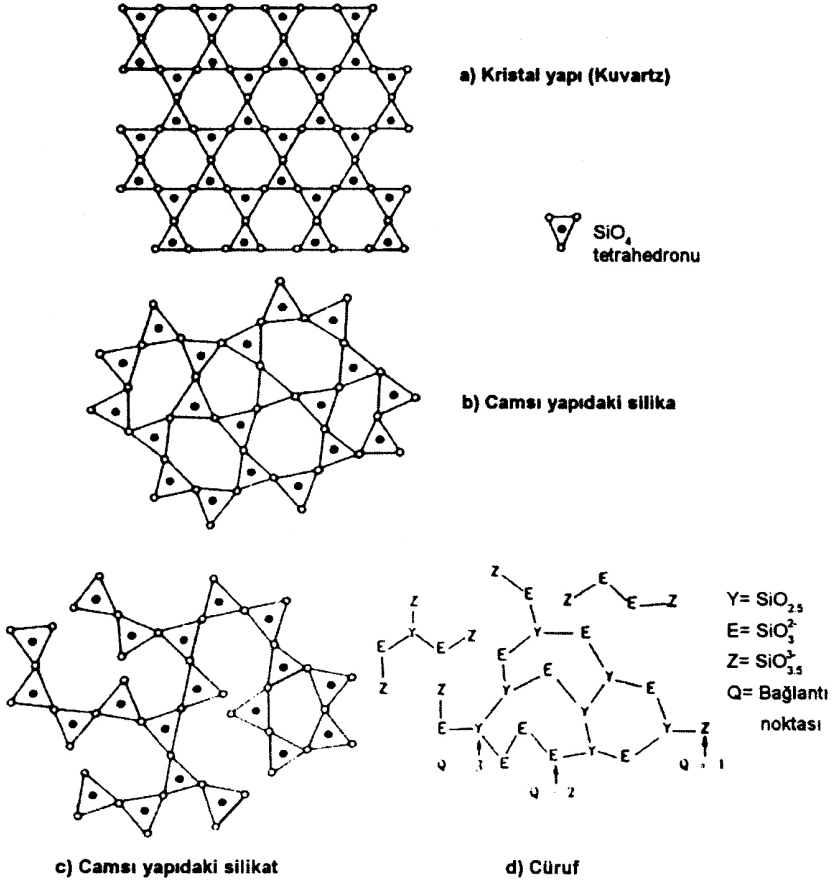
Peletleme yöntemi sonucunda birkaç değişik boyda malzeme elde edilir. Büyük boyutlu (4-15mm) olanlar çok gözenekli ve kısmen kristal bir yapıya sahiptir. Bunlar daha çok hafif beton agregası olarak kullanılabilirler. 4 mm'den küçük boyutlu olanlar ise camsı yapıya sahiptirler ve çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılırlar.

1862 yılında Langens'in YFC'lerin bağlayıcı özelliklere sahip olduğu gözleminin ardından 1865 yılında ilk kez YFC-kireç karışımından elde edilen bağlayıcılar ticari olarak üretilmeye başlamıştır. YFC'nin çimento hammaddesi olarak kullanımı ise ilk kez 1883 yılındadır. Portland çimentosu klinkerini GYFC ile birlikte öğütürerek Portland Yüksek Fırın Cürufu çimentosunun üretimi de 1892 yılında Almanya'da başlamıştır (4).

2.2 Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Yapısı

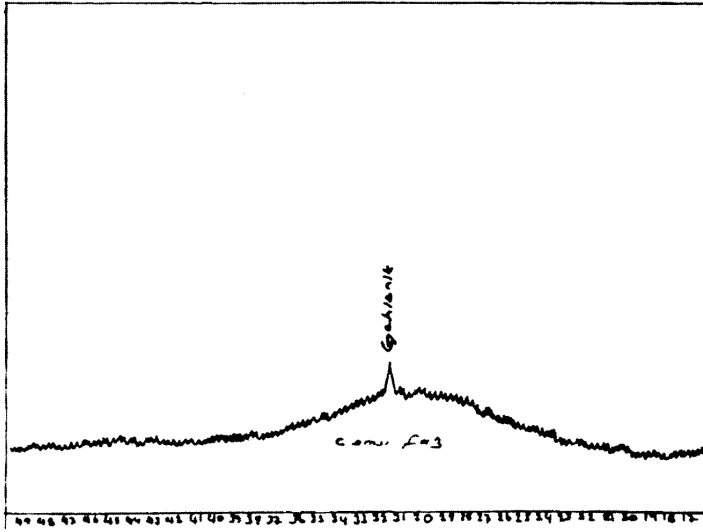
Yüksek fırın cürufunun camsı yapısını önce kristal yapıdaki silika olan kuartzın yapısından yola çıkarak açıklamak mümkündür (Şekil 2.5). Şekil 2.5a'da kuartzın SiO_4 tetrahedronlarından oluşan düzgün kristal yapısı şematik olarak gösterilmiştir. Bu yapıyı oluşturan tetrahedronların her köşesi birer başka tetrahedronla ortaktır. Camsı silikada, yukarıda belirtilen yapı, tetrahedronların düzgün ve birbirini düzenli olarak tekrarlayan şekilde dizilmesinin bazı Si-O-Si bağlarının kırılması ve araya bazı metal katyonlarının girmesi nedeniyle bozulmuştur (Şekil 2.5b). Kristal yapıdaki her terahedronun dört köşede birer tetrahedrona komşu olması durumu camsı silikat yapısında 1-4 komşu tetrahedron bulunması haline dönüşmüştür. (şekil 2.5c). Artık, üç boyutlu bir kafes yapıdan söz etmek mümkün değildir. Son olarak Şekil

2.5d’de görülen camsı cüruf yapısında ise bazı Si konumları diğer atomlar tarafından işgal edilmiştir. Örneğin, Si^{4+} yerine Al^{3+} ’nın gelmesi bir SiO_2 ’nin bir AlO_2 ile yer değiştirmesi anlamına gelmektedir. Bu durumda, nötr olan elektriksel yük eksi hale dönüşür. Nötr yapıyı sağlayabilmek için de araya magnezyum ve kalsiyum katyonları girer (1).



Şekil 2.5. Cürufun camsı yapısının şematik açıklaması

Cürufun camsı kısmı bir X-ışınları difraktogramında ($\text{CuK}\alpha$) $20\text{-}30^\circ$ ’ye tekabül eden bir geniş pikle kendini gösterir. Şekil 2.6’da bir GYFC’nin X-ışınları difraktogramı verilmiştir.



Şekil 2.6. Bir GYFC'nin X-ışınları difraktogramı.

Camsı faz miktarı GYFC'nin hidrolik özelliklerini belirleyici en önemli unsurlardan birisidir. Lea'nın (4) belirttiğine göre, camlı faz miktarıyla dayanım arasında, kabaca da olsa doğrusal bir ilişki söz konusudur.

2.3 Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Kompazisyonu

Granüle yüksek fırın cüruflarının hidrolik özelliklerinin belirlenmesindeki önemli parametrelerden birisi de kimyasal kompozisyonlarıdır.

Genel olarak, cürufun alkalitesi ne kadar yüksekse hidrolik özelliğinin de o kadar iyi olduğu kabul edilir. Cürufların kimyasal kompozisyonlarıyla hidrolik özellikleri arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla çok sayıda araştırma yapılmış olmakla birlikte, kesin ve basit kurallar bulunmuş değildir (4).

Bir GYFC'nin hidrolik özelliği, belirli bir sınır değere kadar, CaO/SiO_2 oranının artmasıyla artar. Ancak, bu sınır aşıldığında, diğer bir deyişle, CaO miktarının çok yüksek olması durumunda granülasyon güçleştiğinden hidrolik özellikte azalma görülür. Sabit bir CaO/SiO_2 oranı için Al_2O_3 miktarının

artması cürufun aktivitesini artırır. Cüruf içindeki demir ve mangan oksitler dayanım özelliklerini olumsuz etkiler. %10'a kadar MgO bulunmasının dayanıma kötü bir etkisi bulunmaz. Ancak, daha yüksek MgO miktarları zararlı etkiler yaratabilir (4).

Kimyasal kompozisyon cürufun alkalinitesini belirlediği gibi camsı fazın niteliği hakkında da bir fikir verir. Cürufların kimyasal analiz sonuçlarından elde edilen çeşitli hidrolik modüller önerilmiştir. Bu modüller, cürufun içerdiği temel oksitler olan CaO (C), SiO₂ (S), Al₂O₃ (A) ve MgO (M) in birbirlerine oranlarıdır (5). İlk önerilen ve Almanya'da Eisenportland ve Hochofen çimentolarının üretimi için kullanılan modül aşağıda verilmiştir.

$$\frac{C + M + \frac{1}{3}A}{S + \frac{2}{3}A} \dots\dots\dots(2.1)$$

Daha sonra, 1940'lardan itibaren

$$\frac{C + M + A}{S} \dots\dots\dots(2.2)$$

kullanılmaya başlanmıştır.

Şartnamelerde yer almamakla birlikte, kimyasal kompozisyonun diğer bileşenlerini de içeren bir başka modül ise

$$\frac{CaO + CaS + \frac{1}{3}MgO + Al_2O_3}{SiO_2 + MnO} \dots\dots\dots(2.3)$$

şeklinde (2.1) ve (2.2)'de verilen modüllerin 1'den büyük olması tercih edilmektedir (2.3) formülünden elde edilen modül 1.9'un üstünde ise hidrolik özellik açısından "çok iyi", 1.5 ile 1.9 arasında ise "iyi", 1.5'in altında ise "kullanılabilir" bir cüruf ifade etmektedir. Çizelge 2.1'de 1. Bölümde Çizelge 1.1'de verilmiş olan YFC örneklerinin günümüzde kullanılan bazı hidrolik modülleri verilmiştir.

Genel olarak kabul edilen bir anlayışa göre, düşük hidrolik modül değerleri düşük hidrolik reaktiviteyi göstermektedir. Ancak, her zaman, hidrolik modüllerin yüksek olması dayanımların da yüksek olmasını sağlamaktadır (5).

Cüruf → Hid. Modül ↓	1	2	3	4
$\frac{C}{S}$	1.23	1.19	0.86	0.82
$\frac{C + M + A}{S}$	1.80	1.97	1.37	1.46
$\frac{C + M + \frac{2}{3} A}{S + \frac{1}{3} A}$	1.51	1.53	1.17	1.17
$\frac{A}{S}$	0.34	0.52	0.27	0.39

GYFC'lerin hidrolik modülleri konusunda çok sayıda araştırma yapılmış ve yapılmaktadır. Bu çalışmalarda daha karmaşık başka modüller de önerilmiştir. Bu önerilerde, toplam kimyasal analiz sonuçlarının ve kristal faz miktarının cürufun hidrolik özelliklerinin tesbiti açısından birlikte değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca, optimal reaktivite için cürufun tamamıyla camsı yapıya sahip olması zorunluluğunun bulunmadığı saptanmıştır (Şekil 2.6) (6)

27 değişik YFC üzerinden 15 farklı Hidrolik Modülün 2,7 ve 28 günlük dayanım değerleriyle arasındaki korelasyonlarının çalışıldığı bir çalışmada Çizelge 2.1'de belirtilmiş olanlara ek olarak bazı yeni Modüller önerilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen ve dayanımlarla anlamlı korelasyonlar veren modüler Çizelge 2.2'de belirtilmiştir.

Yüksek fırın cüruflarının hidrolik reaktivitelerinin konvansiyonel hidrolik modüllerle belirlenmesinin her zaman geçerli olamayacağı bir başka araştırmanın sonucunda da belirlenmiştir (7). Bu çalışmada (C+M+A)/S modülleri 1.89, 1.86 ve 1.82 ve camı faz miktarları ve hidratasyonları kalorimetrik yöntemlerle takip edilmiştir. Sonuçta birbirine çok benzeyen ve konvansiyonel olarak nitelikleri iyi kabul edilen bu cüruflar arasında hidrolik reaktivite bakımından önemli farklar olduğu saptanmıştır. Araştırmacılar, camı fazın özelliklerinin hidrolik reaktiviteyi etkileyeceğini belirtmişlerdir (7).

Akermanit (C_2MS_2) ve gehlenit (C_2AS) kompozisyonlarına sahip camı fazlar üzerinde yapılan çalışmalarda, akermanit esaslı olanlarla ilgili olarak net bir sonuç almak mümkün olmamıştır. Bazı çalışmacılara göre, akermanit camı faz suda sertleşirken, diğerleri aynı sonucu elde etmemişlerdir (4). Öte yandan, gehlenit esaslı camı fazların suda sertleşmediği bilinmekle birlikte, kireç bulunan ortamda dayanım kazandıkları saptanmıştır (4).

Yüksek miktarlarda MgO içeren YFClerin hidrolik özelliklerinde bir miktar olumsuzluk görülmekle birlikte, cüruf içindeki MgO, Portland çimentosunda olduğu şekilde bir hacim sabitliği problemi yaratmaz. YFClerde tamamıyla kristal yapıda oldukları ekstrem durumlarda dahi, serbest MgO bulunmaz (4).

ASTM C 151'de belirtilen otoklavla hacim sabitliği deneyinin uygulandığı %20'ye varan MgO miktarlarına sahip farklı cüruflar kullanılmış olan Portland Yüksek Fırın Cürufu Çimentolarında hiçbir hacim sabitliği problemine rastlanmamış (4).

2.4 Yüksek Fırın Cüruflarının Hidrolik Aktivitelerinin Belirlenmesi için Önerilen Çeşitli Yöntemler

Daha önce belirtilmiş olan hidrolik modüllerin hesaplanması ve camı faz miktarı ve yapısı ile ilgili belirlemelerin yanı sıra, cürufun hidrolik aktivitesinin tayini için çeşitli pratik, mekanik, optik ve kimyasal yöntemler önerilmiştir. Aşağıda belirtilen bu yöntemlerle elde edilecek sonuçlar ancak cürufun

hidrolik özelliği hakkında bir fikir sahibi olmak için kullanılmalıdır. En doğru sonuçlar her bir cürufun kullanım miktarı ve şekline uygun koşullarda yapılacak olan deneylerden elde edilebilir.

Keil (4) tarafından bir YFC'nin birlikte kullanıldığı çimentonun dayanımına katkısını belirlemek için önerilen yöntemde (A) Portland Yüksek Fırın Cüruf Çimentosu, (B) aynı klinkerden elde edilmiş Portland Çimentosu ve (C) 4000cm²/g (Blaine) inceliğe öğütülmüş kuartzın aynı klinkerden elde edilen çimentoya (A)'da kullanılan cüruf miktarı kadar konmasıyla elde edilen üç çimentonun dayanımları (sırasıyla, a, b ve c) bulunur. Aşağıdaki formülle hesaplanan hidrolik indeks ne kadar yüksekse cürufun aktivitesi o kadar iyidir.

$$\text{Hidrolik Indeks}_{\left(\frac{c}{k}\right)} = \frac{a - c}{b - c} \times 100 \dots\dots\dots (2.4)$$

burada c ve k, sırasıyla, çimento içindeki cürufun ve klinkerin % olarak miktarıdır.

Öte yandan, Hooton ve Emery (8) 37 değişik yüksek fırın cürufu kullanarak %70 cüruf ve %30 portland çimentosu karışımlarında Keil'in kullandığı yöntemi kullanarak deneyler yapmışlar ve 7, 28 ve 90 gün yaşları için ayrı Hidrolik İndeksler önermişlerdir. Bu indeksler cürufun camsı faz miktarı, kimyasal kompozisyonu ve Çizelge 22'de verilen bazı Hidrolik Modüllerle dayanım arasındaki ilişkileri vermektedir. Önerilen Hidrolik indekslerden 7 gün için olanlarının camsı faz miktarı ve kimyasal kompozisyonla korrelasyonu diğerlerine göre daha yüksektir. Hooton ve Emery tarafından, çoklu regresyon analizi yapılarak, önerilen formüller aşağıda verilmiştir.

Almanya'da kullanılan optik bir yöntemde, cüruf numunesine ultraviyole ışık altında mikroskopla bakılır. Camsı taneciklerden kırmızı ve pembe yansıma alınırken kristal yapıda taneciklerden mavi ve mor yansıma alınır. Numunenin kırmızı yansıma veren kısmının yüzdesi kimyasal analiz sonucunda bulunan C/S oranıyla çarpılarak cüruf için bir hidrolik değer belirlenir (4).

$$HI_{7G} = 0.688 (\text{camsı faz}) + 3.03 (\text{CaO}) - 7.97 (\text{SiO}_2) \\ - 14.24 (\text{Mn}) + 177.1 \dots\dots\dots (2.5)$$

$$HI_{7G} = 0.682 (\text{camsı faz}) + 216.5 \left(\frac{C}{S} \right) - 239.5 \dots\dots\dots (2.5a)$$

$$HI_{7G} = 0.58 (\text{camsı faz}) + 153.8 \left(\frac{C + M + A}{S} \right) - 243.0 \dots\dots\dots (2.5b)$$

$$HI_{28G} = 1.105 (\text{camsı faz}) - 7.08 (\text{SiO}_2) + 251 \dots\dots\dots (2.6)$$

$$HI_{90G} = 1.143 (\text{camsı faz}) - 6.92 (\text{SiO}_2) + 254 \dots\dots\dots (2.7)$$

$$HI_{90G} = 1.138 (\text{camsı faz}) + 166 \left(\frac{C}{S} \right) - 178.8 \dots\dots\dots (2.7a)$$

Lieber tarafından önerilen kimyasal bir yöntemde ise 5g GYFC numunesi 3200 cm²/g (Blaine) inceliğe öğütülür ve 3 saat süreyle %5'lik NaOH eriyiğinde 80°C sıcaklıkta karıştırıldıktan sonra süzülür. Numune dört kez 40ml metanol ve 2 kez de 25ml dietileterle yıkanır. Daha sonra numune yarım saat 60°C'de kurutulur ve 60°C'de kızdırma kaybı, kimyasal olarak bağlanmış olan suyun miktarının bir göstergesi olarak, saptanır (4).

Yukarıda belirtilen her üç yöntemden elde edilen sonuçlarla, cürufun hidrolik aktivitesi arasında oldukça iyi korelasyonlar bulunmuştur. (4).

2.5 Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Hidratasyonu

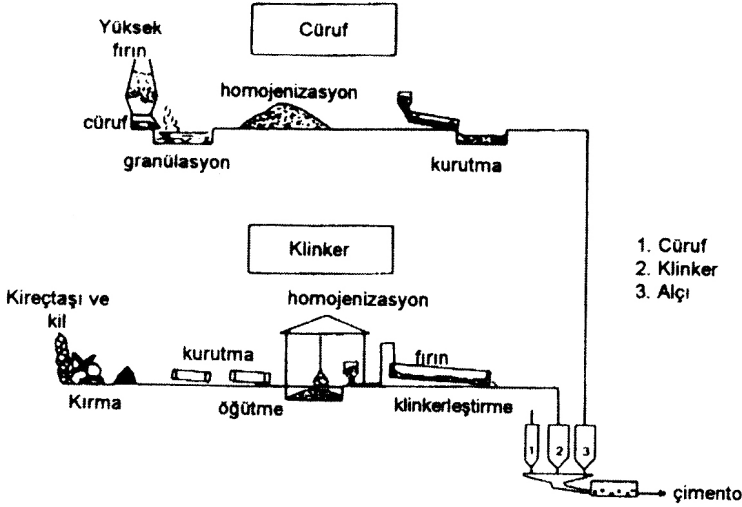
GYFC'lerin kendi başlarına suyla reaksiyonu, Portland Çimentolarının hidratasyonu ile kıyaslandığında, oldukça yavaş gelişir. Cürufun hidratasyonu cürufun su içinde kısmi olarak erimesiyle C-S-H, hidrate aluminatlar ve hidrate siliko aluminatların çökmesi olarak tanımlanabilir (9). Cüruf hidratasyonunun başlangıç aşamasında silikat iyonları eriyiğe geçer, daha sonra, ilk C-S-H çökmesinin ardından, eriyiğin kireç konsantrasyonu artar ve son olarak da alumina konsantrasyonunda, hidrate aluminat kristallerinin oluşumuna kadar, artış görülür. YFC hamurlarındaki hidrate fazların belirlenmesine yönelik bir araştırmada $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ dördü sisteminde C-S-H, C_2ASH ve $\text{C}_4\text{AH}_{13-19}$ bileşenlerinin oluştuğu belirlenmiştir (1).

GYFCnin suyla kendi başına reaksiyonunun çok yavaş seyretmesi birçok araştırmacıyı bu reaksiyonu hızlandıracak aktivatörler konusunda çalışmaya yöneltmiştir (10, 11). Yaklaşık 60 yıldan bu yana yapılan çalışmalar (12, 13, 14) sonucunda cürufların kimyasal aktivasyonu için kullanılan malzemeleri iki ana grupta toplamak mümkündür: (1) Alkalın aktivatörler (soda, kireç, sodyum, karbonat, sodyum silikat, vb.) ve (2) Sülfat aktivatörler (alçı, anhidrit, fosfijips, vb.). Her iki grup malzeme de cürufların hidratasyon ürünlerinin oluşumunu hızlandırır (15). Yukarıda belirtilen aktivatörlerin kullanımı sonucunda C_4AH_{19} , C_4ASH_8 , $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ aktivatör olarak kullanıldığında meydana gelmez ve etringittir.

3. CÜRUFLU ÇİMENTOLAR

3.1 Üretim

Cürüflü çimentolar granüle yüksek fırın cürufunun portland çimentosu klinkeri ve alçı taşı ile birlikte veya ayrı ayrı öğütülüp karıştırılmasıyla elde edilir. Cürüflü çimentonun üretimi şematik olarak Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Cürüflü çimento üretiminde kullanılan cüruf miktarı değişik ülkelerde, çimento tipine de bağlı olarak, önemli farklılıklar göstermektedir. Amerika Birleşik Devletleri’nde ASTM C 595’de belirtilen Portland Yüksek Fırın Cürufu Çimentoları (Portland Blast Furnace Slag Cement)nda cüruf oranı %25-65’dir. Almanya’da DIN 1164’de Eisenportland ve Hochofen çimentoları olarak iki tip cürüflü çimento tanımlanmıştır. Bunlardan birincisinde cüruf miktarı en fazla %40, ikincisinde ise %41-85’dir. Fransa’da Ciment de Fer %25-35 Ciment Métallurgique Mixte %45-55, Ciment de Haut Fourneau %65-75 ve Ciment de Laitier au Clinker %80’in üstünde granüle yüksek fırın cürufu içerir. Ülkemizde standardı bulunan üç tür cürüflü çimentodan TS 20’de belirtilen

cüruflu çimentolar CÇ 32.5 ve CÇ 42.5'da %20 80, TS809'da belirtilen Süper Sülfat çimentosu SSÇ 32.5'da ise en az %65 granüle yüksek fırın cürufu bulunur.

Genel hatlarıyla, üretim enerjisi ve hammadde kullanımı değerlerine bakıldığında, 1 ton %65 cüruf (%15 rutubetli) içeren bir cüruflu çimento üretimi için 1 ton Portland Çimentosu üretiminde gerekli olan hammadde miktarında yaklaşık %65, kullanılan enerji miktarında ise yaklaşık %50 bir azalma sağlanır (1).

3.2 Cüruflu Çimentoların Hidratasyonu

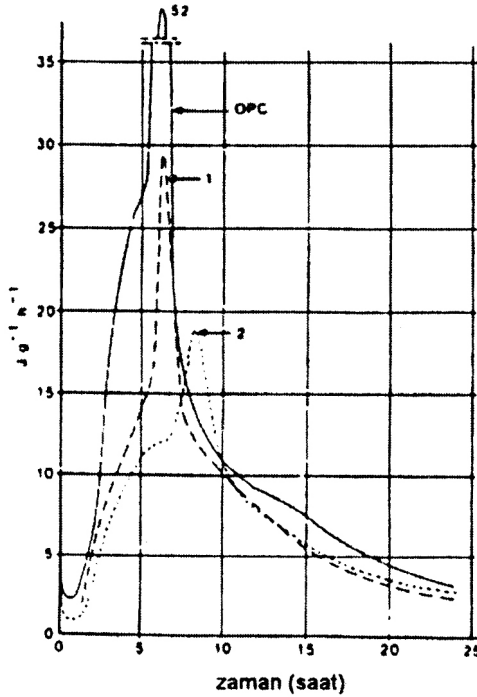
Yüksek fırın cüruflarının kendi başlarına veya bazı aktivatörlerle birlikte suyla reaksiyonlarına bölüm 2.5'de değinilmiştir. GYFCLerin hidratasyonlarının hızlandırılması için gereken iki kutup aktivatör çimentolu sistemlerde zaten bulunmaktadır: (1) alçı ve (2) çimentonun silikat bileşenlerinin hidratasyonu ile elde edilen Ca(OH)_2 . Bütün ticari cüruflu çimentolarda klinker kısmı cüruftan daha hızlı olarak hidrate olur. Ancak, cüruf da, aşağıdaki kalorimetre eğrilerinde de (Şekil 3.2) görüleceği gibi, çok erken yaşlarda suyla reaksiyona girmektedir (1, 16). %70 cüruf ve %30 portland çimentosu içeren bu karışımlarda 1. cürufun ikincisine göre daha reaktif olduğu anlaşılmaktadır. Açığa çıkan hidratasyon ısılarının piklerine bakıldığında, birinci cüruflu çimento ile Portland çimentosunun yaklaşık aynı sürede (~6 saat) maksimum hidratasyon ısısına ulaştıkları görülür. Ayrıca, bu süre zarfında yalnızca %30 portland çimentosundan elde edilecek hidratasyon ısı 15.6 J/gh olacakken 70/30'luk cüruflu çimentolardan, birinci cüruf için, 29 J/gh, ikinci cüruf için de 18 J/gh ısı açığa çıkmıştır. Bu durum da cürufların daha çok erken yaşlardan itibaren hidrate olmaya başladığını göstermektedir.

Cüruflu çimentolarda cüruf ve klinker fazlarının hidratasyonu ile meydana gelen C-S-H jelleri Tarayıcı Elektron Mikroskop ve EDAX'la incelendiğinde cüruf taneciklerinin yüzeylerinin klinkerin hidratasyonu ile oluşan C-S-H'ın kompozisyonuna göre Al_2O_3 ve MgO bakımından daha zengin olan bir

C-S-H tabakası ile kaplandığı saptanmıştır. Sülfat iyonları bu tabakayı eriterek daha pürüzlü bir yapıya sahip ve dolayısıyla suyun penetrasyonunu engellemeyen ikinci bir jel oluşturmaya neden olur (16, 17, 18).

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ aktivasyonu ile ilk olarak etringit oluşur. Daha ileri yaşlarda, alçı tamamıyla tüketildikten sonra, etringit monosülfat formuna dönüşür ve tetrakalsiyum aluminat hidratla (C_4AH_{13}) katı eriyik haline gelir (1, 16).

Düşük MgO içeren cürüflü çimentolarda $\text{C}_3\text{ASH}_{14}$, yüksek MgO içerenlerde ise C_4AH_x ve bunun magnezyum analogu olan M_4AH_x , diğer hidratasyon ürünleri olarak gözlenmiştir (19, 20, 21). Bunların dışında, cürüflü çimentoların hidratasyonu sonucunda afwillit (C_3SH_3) ve tobermorit ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$) oluşumu da söz konusudur (22).



Şekil 3.2. Bir portland çimentosu ve iki cürüflü çimentonun 1 günlük hidratasyon ısılarını gösteren kalorimetrik eğriler (1).

3.2.1 Cürufun Camsı Yapısının ve Kristalinitesinin Etkileri

GYFCnin hidratasyonuna Bölüm 2.5’de değinilmiştir. Demoulian ve ekibine göre (6) cürufun mükemmel bir camsı yapıya sahip olması cürufllu çimentolarda optimum reaktiviteye sahip olduklarının bir göstergesi değildir. Bu araştırmacılar %3-5 merwinite (C_3MS_2) içeren cüruflların kullanıldığı çimentolarla en yüksek dayanımları elde etmişlerdir.

Satarin’e göre de, Bu bölüm 2.2’de sözü edilen, silika tetrahedronları cürufun camsı fazı içinde bir tür polimer halinde bulunurlar. Eğer bu moleküllerin polimerleşme derecesi çok yüksekse cürufun hidrolik aktivitesinde azalma söz konusu olur (23).

Aynı portland çimentosu ve yedi değişik GYFC kullanılarak üretilen cürufllu çimentolar üzerine yapılan bir mikro yapı araştırmasında cürufun hidratasyon hızıyla, rekristalize hale geldikten sonra, içerdiği akermanit (C_2MS_2) miktarı arasında 0.98 korelasyon katsayısına sahip bir bağıntı saptanmıştır. Buna göre, rekristalize cüruf içindeki akermanit miktarı ne kadar yüksekse cüruf o kadar yavaş hidrate olmaktadır (16).

3.2.2 Klinker Özellikleri ve Cüruf İnceliğinin Etkileri

Cürufllu çimentoların hidratasyonunda GYFCyle portland çimentosu arasında karşılıklı bir etkileşim söz konusudur. Normal inceliklerde ($3000\text{ cm}^2/\text{g}$) öğütölmüş olan cürufllu çimentolarda klinker özellikleri, çok ince ($6000\text{ cm}^2/\text{g}$) öğütölmüş olanlardakine göre, daha önemlidir (6). C_3S miktarı yüksek olan klinkerler cürufun erken yaşlarda aktivasyonu için daha elverişlidir. 28 günün üstündeki yaşlarda ise cürufun inceliği ve reaktivitesi klinker özelliklerinden daha fazla önem kazanmaya başlar (1, 6, 16). Genel olarak %70’in üstünde cüruf içeren çimentolarda erken dayanımlar daha çok cüruf reaktivitesine, daha az cüruf içeren çimentolarda ise daha çok klinker özelliklerinin etkisine bağlıdır (1).

Cürüflu çimento üretiminde cüruf ve klinkerin birlikte öğütülmesi klinkerin daha ince buna karşılık cürufun daha kaba kalmasına yol açar. Aynı öğütme sonucunda daha ince cüruf elde etmek mümkün olur.

X-ışınları Diffraksiyonu ve Tarayıcı Elektron Mikroskop analizleri ile aynı klinkerden üretilen bir portland çimentosunun ve %85 cüruf içeren bir cürüflu çimentonun hidrasyonlarının takibinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır (16):

1. İki günlük hidrasyon sonucunda, cürüflu çimentoda meydana gelen etringit miktarı portland çimentosuna oranla daha fazladır. Bu fazlalığın nedeni alçının hem klinkerdeki C_3A hem de cürufun alumina fazıyla reaksiyona girmesi ile açıklanmıştır. Öte yandan, cürüflu çimentonun X-ışınları difraktogramında C-S-H'a tekabül eden yaygın ve geniş pikin altındaki alanın portland çimentosundakine göre %30 daha fazla olması, cürufun hidrasyonu ile da erken yaşlarda C-S-H jeli meydana geldiğinin göstergesidir.
2. Hidrasyonun yedinci gününde etringitin kısmen monosülfat formuna transformasyonun başladığı gözlenmiştir. Cürüflu çimentonun X-ışınları difraktogramlarında C-S-H jeli yansımalarında artış olmuştur. Etringit, cürüflu çimentoda, portland çimentosuna göre, hala daha fazladır.
3. Yedi ve yirmi sekizinci günler arasında C-S-H oluşumu devam etmiştir.

Cüruf inceliğinin etkisine hızlandırılmış deneylerle bakılmış olan bir araştırmada aynı cüruf $6310 \text{ cm}^2/\text{g}$ (Blaine) ve $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ inceliklerde öğütülmüş ve 6 ve 24 saat sonunda çimentoların dayanımları belirlenmiştir (16). Bu çalışmada portland çimentosunun inceliği sabit ($3500 \text{ cm}^2/\text{g}$) tutulmuş, cürufun aktivasyonu soda kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde kullanılan cürüflu çimentolar %85 GYFC, %13 portland çimentosu ve %2 alçı içermektedir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 İki Ayrı İncelikte Öğütülmüş Cüruflla Üretilmiş Çimentoların Hızlandırılmış Dayanım Deney Sonuçları (16).

Yaş (saat)	6310 cm ² /g		3500 cm ² /g	
	σbasınç (MPa)	σeğilme (MPa)	σeğilme (MPa)	σbasınç (MPa)
6	23.7	5.7	2.2	8.5
24	32.2	8.8	4.5	15.7

3.2.3 Isıl İşlemlerinin Etkileri

Bütün kimyasal reaksiyonlarda olduğu gibi, ortam sıcaklığının artması hidrasyon hızının artmasına neden olur. Hidrasyon sırasında meydana gelen reaksiyonlar için gerekli alan aktivasyon enerjisi cürufllu çimentolarda, eşdeğer portland çimentolarına göre yaklaşık %8 daha yüksektir (16, 24, 25). Bu nedenle, cürufllu çimento içeren sistemlere ısıtma işlemi uygulanması, dışarıdan ilave bir enerji kaynağı sağlayarak hidrasyonu kolaylaştırıcı ve hızlandırıcı bir yöntem olarak kabul edilmektedir.

Ayrıca, çok yüksek sıcaklıklar ve basınç altında otoklavlama yöntemi uygulanarak yaptırılan hidrasyon cürufllu çimentoların dayanımlarını çok artırmaktadır (16).

3.3 Fiziksel Özellikler

Portland Yüksek Cürufllu Çimentoları Portland Çimentosundan daha açık renklidir. Özgül ağırlığı, Portland Çimentolarına oranla biraz düşüktür (3.00-3.05). Priz süreleri, rötre, sünme, betonarmede donatı aderansı özellikleri bakımından portland yüksek fırın cürufu çimentolarıyla portland çimentoları arasında önemli farklılıklar yoktur (4).

Portland Yüksek Fırın Cürufu çimentolarının hidrasyon ısıları kullanılan klinkerin ve GYFC nin kompozisyonu ve miktarıyla orantılı olarak değişir ancak, genel olarak, normal portland çimentolarınıninkinden daha düşüktür (4,7).

3.4 Dayanım Özellikleri

Cürüflu çimentolar hidrasyon mekanizması ve hidrasyon ürünleri bakımından portland çimentolarıyla benzer nitelikler göstermekle birlikte, normal incelikte öğütülmüş durumda dayanım kazanma hızı, özellikle erken yaşlarda, portland çimentolarından daha düşüktür. Aynı 28 günlük dayanımın elde edildiği, birbirine çok yakın inceliklerdeki (3000 cm²/g) bir portland çimentosuyla %65 cüruf içeren bir cürüflu çimento karşılaştırıldığında, erken yaşlarda portland çimentosunun geç yaşlarda ise cürüflu çimentonun daha yüksek dayanıma sahip olduğu bilinmektedir (1,5). Durum betonda incelendiğinde, eğilme dayanımlarının %25-45 cüruf içeren çimentolarla yapılan betonlarda, normal portland çimentosuyla yapılanlara göre, ya eşit ya daha yüksek olduğu saptanmıştır (26).

Cürüflu çimentoların uygun erken dayanımlara sahip olabilmesi için özgül yüzeylerinin ve cüruf miktarlarının ayarlanması gerekir. Erken yaşlarda dayanımın yükseltilmesi için uygulanan bir başka yöntem de ağırlıkça %0.5 miktarında trietanolamin kullanılmasıdır (27).

Cüruf inceliğinin etkilerine bölüm 3.2.2’de değinilmiştir. Cürufun klinkere oranla daha zor öğütülebilir bir malzeme olması, birlikte öğütme koşullarında, klinkerin ince cürufun ise daha kaba kalması durumunu ortaya çıkarmaktadır. Ayrı öğütme koşullarında elde edilmiş, %30-50 cüruf içeren çimentolarla yapılan betonlarda gerek işlenebilirlik gerekse erişen dayanım bakımından önemli artışlar sağlanmıştır (28).

Cürüflu çimentoların dayanımlarının tahmini için önerilen çeşitli Hidrolik İndeksler Bölüm 2.4’de verilmiştir. Bunların yanı sıra, iki Japon araştırmacı tarafından önerilen bir çoklu regresyon denkleminde cürüflu çimentoyla aynı klinkerden elde edilmiş olan bir normal portland çimentosunun 28 günlük dayanımlarının oranı (Y) cürufun alkalinitesine (X_1), camı faz miktarına (X_2)

ve Cürüflu çimentonun pikrik asit-metanol karışımında eritildikten sonraki kalıntı miktarına (X_3) bağlı olarak verilmiştir (29):

$$Y = -73.33 + 74.06X_1 + 0.482X_2 - 2.41X_3 \dots\dots\dots (3.1)$$

3.5 Dayanıklılık Özellikleri

Sülfatlı sular, deniz suları, klorlu sular, karbonatlı sular, termal sular, buz çözücü maddeler vb. ile yapılan uzun süreli deneyler sonucunda cürüflu çimentoların zararlı kimyasal etkiler altında performanslarının yüksek olduğu belirlenmiştir (1).

3.5.1 Sülfat Etkisine Dayanıklılık

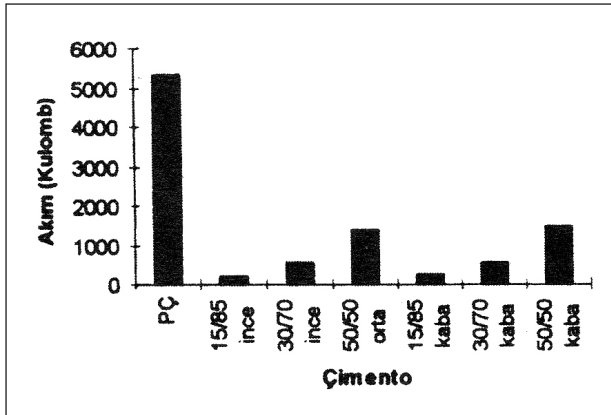
Regourd (16) tarafından yapılmış olan bir çalışmada sentetik olarak hazırlanmış, %50 C_3S +%15 C_3A +%5 alçı+%30 kuartz içeren numuneler %5 $MgSO_4$ eriyiğine batırılmıştır. İlk günden başlayarak, numunelerde genleşme gözlenmiş ve yedinci günde tüm numuneler dağılmıştır. daha sonra bu numuneler X-Işınları Difraksiyonu ve Tarayıcı Elektron Mikroskop kullanılarak incelendiğinde, $Mg(OH)_2$, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, etringit ve C-M-S-H olduğu saptanmıştır. Aynı çalışmada, ikinci seri numuneler kuartz yerine GYFC kullanılarak hazırlanmış ve aynı koşullara tabi tutulmuştur. Sonuçta, GYFC içeren numunelerde hiçbir bozulma görülmemiştir. X-Işınları Difraksiyonu ve Tarayıcı Elektron mikroskop analizleri bu numunelerde yoğun bir CSH, bir miktar $Ca(OH)_2$, monosülfat formu ve çok az etringit oluştuğunu göstermiştir. Benzer sonuçlar %60 cüruf içeren çimentolarla yapılan beton numuneler üzerinde de elde edilmiştir (30). Aynı çalışmadan çıkan bir başka sonuç ise kullanılan cürufun inceliğinin artmasıyla, betonun porozitesini azalttığından dolayı, kimyasal etkilere karşı direncin yükselmesidir.

$MgSO_4$, $CaSO_4$ ve Na_2SO_4 eriyiklerinin kullanıldığı benzeri bir başka çalışmada da 130 değişik çimento kullanılmış ve yüksek fırın cürüflarının, miktarlarıyla orantılı olarak, sülfat direncini artırdığı saptanmıştır (31).

3.5.2 Klor Etkisine Dayanıklılık

Cürüflu çimentoların klor direnci konusunda çok sayıda değişik deney yöntemlerinin uygulandığı araştırma yapılmıştır. Bunlardan bazıları burada özetlenmiştir.

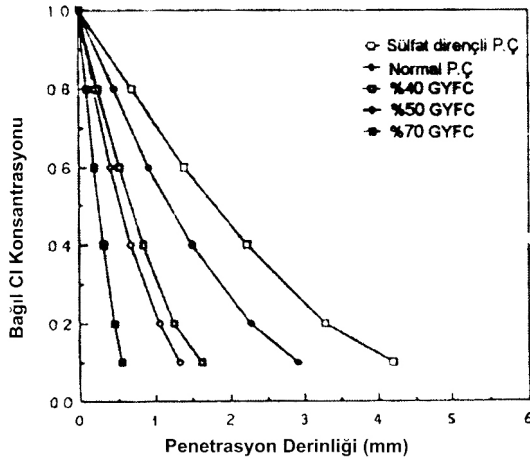
Hızlandırılmış Klor Permeabilite deneyi uygulanarak yapılan bir araştırmada değişik inceliklerde ve değişik cüruf miktarı içeren çimentolar kullanılarak 102mm çap ve 52mm boyda silindir harç numuneleri hazırlanmış ve 14 günlük standard bakımdan sonra numunelerin bir yüzü sodyum klorür diğer yüzü sodyum hidroksit eriyiklerine batırılarak 60 V sabit potansiyel farkı uygulanmış ve bir yüzden öbürüne geçen elektriksel akım ölçülerek klor permeabilitesiyle ilişkilendirilmiştir. Bu araştırmalarda kullanılan kontrol çimentosu (portland çimentosu) 0.865 m²/g (BET) kaba cürüflu çimentolar 0.866 m²/g (BET), orta cürüflu çimentolar 1.083 m²/g (BET) ve ince cürüflu çimentolar 1.337 m²/g (BET) inceliktedir. İnce cürüflu çimentolarda ağırlıkça %70 ve %85, orta cürüflu çimentoda %50 ve kaba cürüflu çimentolarda %50, %70 ve %85 cüruf kullanılmıştır. elde edilen sonuçlar grafik olarak Şekil 3.3'de gösterilmiştir (32).



Şekil 3.3. Cürüflu çimentolarla klor permeabilitesi (31).

Benzer bir araştırma da %8 silis dumanı, %25 uçucu kül, %50 GYFC içeren numuneler üzerinde yapılmış ve cürufun diğer mineral katkılara göre daha etkin olduğu saptanmıştır (33).

Klor permeabilitesinin tayini ile ilgili ilginç bir başka yöntemde ise 100x200x300mm boyutlarındaki 28 günlük beton plakaların üst yüzeyine %5 NaCl eriyiği göllendirme suretiyle 4 gün uygulanmakta, bunu takip eden 3 günde ise saf su uygulanmaktadır. Söz konusu çevrim 48 hafta sürdürülmekte ve daha sonra yüzeyden 10, 20, 30, 40 ve 50 mm derinliklerden numuneler alınıp klor analizi yapılmaktadır. Bu deney yönteminin uygulandığı bir araştırmada bir sülfata dayanıklı çimento, bir normal portland çimentosu ve %40, 50 ve 70 GYFC içeren üç cürufli çimento kullanılmıştır. Bu araştırmanın sonucunda yüksek fırın cürufu kullanımının klor permeabilitesini azalttığı ve kullanılan cüruf miktarı arttıkça bu etkinin daha belirginleştiği saptanmıştır. Elde edilen sonuçlar 3.4'de gösterilmiştir (34).



Şekil 3.4. 48 hafta sonunda çeşitli çimentolar için klor penetrasyonları

3.5.3 Deniz Suyu Etkisine Dayanıklılık

Cürüflu çimentoların deniz suyu etkisine maruz betonlardaki yüksek performansı yıllardır bilinmektedir. Deniz suyuna tamamıyla batırılmış 40x40x160mm harç numunelerle yapılan deneylerde kullanılan cüruf miktarının etkisi araştırılmış ve çimento içindeki GYFC miktarının artmasıyla genişlemenin azaldığı saptanmıştır (1, 16). Bu araştırmadan elde edilen sonuçlar Çizelge 3.2 ve 3.3’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.2 Deniz suyuna batırılmış harç numunelerinde bir yıl sonra meydana gelen boy uzamaları (Doğrusal genişleme) (1, 16)

Çimento	$\Delta l/l$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)
P.Ç.	1000
%75 P.Ç.+25 GYFC	750
%70 P.Ç.+%30 GYFC	690
%20 P.Ç.+%80 GYFC	190

Çizelge 3.3 Deniz suyuna batırılmış harç numunelerinde cüruf miktarı-Klinker kompozisyonu-Yaş-Dayanım ilişkileri (1, 16)

Deniz suyunda tutulan numune dayanımı/Standart numune dayanımı (%)											
PÇ			Cüruf<%30			%30<Cüruf<%60			Cüruf>%60		
6 ay	1 yıl	3 yıl	6 ay	1 yıl	3 yıl	6 ay	1 yıl	3 yıl	6 ay	1 yıl	3 yıl
73*	57	-	66	51	33	68	86	118	99	124	191
64 ⁹	33	-	59	41	-	63	63	52	95	140	193
58 [#]	24	-	53	25	-	68	63	-	108	133	160

Çizelge 3.3a Kullanılan klinkerlerin ana bileşen kompozisyonu (1, 16).

Klinker	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
*	46	32	6	16
ğ	55	22	10	13
#	60	17	10	13

Diğer bir araştırmada ise 100x50x50 mm beton numuneler yarı boylarına kadar deniz suyuna batırılarak deneyler yapılmıştır (31). Bu araştırmada ASTM Tip V'ye tekabül eden 24, Tip II'ye tekabül eden 16, Tip I'e tekabül eden 17, %15 GYFC, uçucu kül ve tras ieren 5'er %30 cüruf içeren 12 ve %70'in üstünde cüruf içeren 35 çimento kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek performans %70'in üstünde cüruf içeren çimentolarla elde edilmiştir.

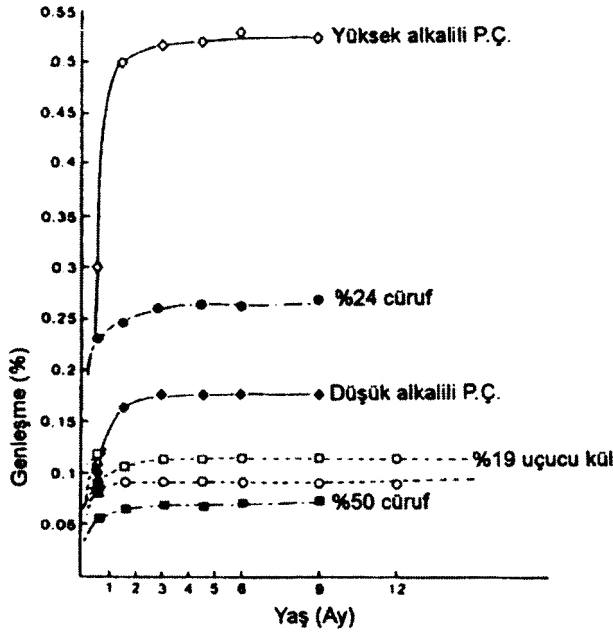
3.5.4 Karbonatlaşmaya Dayanıklılık

Betonda karbonatlaşma açısından, beton yeterince yoğun ve ortamda yeterli rutubet var olduğu sürece, portland çimentosuyla cürufllu çimento arasında bir fark yoktur (1, 5, 16). Longuet (35) tarafından yapılan bir araştırmada %80'in üstünde cüruf içeren çimentoların, karbonatlaşmanın neden olduğu deposivasyon sonucunda betonarme donatıların paslanmasını portland çimentoları kadar etkin bir şekilde önlediği saptanmıştır. Öte yandan, bir başka araştırmada, daha kısa sürelerle bakımı yapılan (1, 3 ve 7 gün) harç numunelerde yukarıda belirtilenen tam tersi sonuçlar alınmıştır. Sözü edilen bu araştırmada, karbonatlaşma direncinin artırılabilmesi için bakım süresinin uzatılması gerektiği belirtilmiştir (36).

3.5.5 Alkali - Agrega Reaksiyonu

Amorf yapıdaki silisli agregaların çimentonun içerdiği alkali oksitlerle yaptığı reaksiyon sonucunda oluşan ve alkali-silika adı verilen ürünün rutubet alarak aşırı genişleme göstermesi betonda çatlamlar ve bozulmalara neden olur.

Cürüflu çimentolar kullanılarak yapılan çok sayıda araştırma cüruf miktarının artmasıyla alkali-agrega reaksiyonunun neden olduğu genleşmelerin azaldığını göstermiştir (1, 16, 37). Yüksek miktarda alkali içeren bir portland çimentosunu %24 ve %50 oranlarıyla GYFC ile ikame edilmesi sonucunda ulaşılan alkali-agrega reaksiyonu genleşmeleri karşılaştırmalı olarak Şekil 3.5’de verilmiştir (1).



Şekil 3.5 Cürüflu çimentolarla Portland çimentolarının Alkali-Agrega genleşmeleri bakımından karşılaştırılması.

3.5.6 Donma-Çözülme Direnci

Yüksek Fırın Cürüflu çimentoların betonların donma-çözülme direncine etkileri, dayanım ve betonun hava miktarı sabit tutulduğu sürece, portland çimentolarınınkinden farklı değildir. Ancak, cüruf miktarı çok yüksek olduğu takdirde, az bir miktar düşüş görülebilir (38).

Öte yandan, yüksek fırın cürufu kullanımının beton içindeki gözenek boyutlarında, gerek fiziksel gerekse hidrasyon sonucunda, azalmaya neden olması betonun donma çözülme direncini yükselttiği görüşü de öne sürülmektedir (39).

Yapılan tüm araştırmalarda hemfikir olunan bir sonuç cürufllu çimentoların, betonda sabit bir hava miktarı sağlamak için, portland çimentolarına göre daha fazla hava sürükleyici katkıya ihtiyaç gösterdikleri hususudur (1, 38, 39, 40).

4. CÜRUFLU ÇİMENTOLARLA ÜRETİLEN BETONLARIN ÖZELLİKLERİ HAKKINDA MEVCUT BİLGİ BİRİKİMİ

Bu bölümde cüruflu çimentolar kullanılarak üretilmiş betonların taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri konusundaki mevcut bilgi birikimi genel hatlarıyla özetlenmiştir.

4.1 Taze Beton Özellikleri

□□İlenebilme

Yüksek fırın cürufunun, klinkere göre, daha az bir yüzey pürüzlülüğüne sahip olması ve özgül ağırlığının daha düşük olması, dolayısıyla hacimce daha fazla çimento hamuru elde edilmesi cüruflu çimentoların betonun işlenebilirliğini olumlu yönde etkileyeceğinin göstergeleridir. Ancak, bu iyileşme çökme deneyi sonuçlarında tam olarak gözlenemez (41).

Eşdeğer kohezyon için cüruflu çimento kullanımı karışım suyu gereksinmesinde yaklaşık %5'lik bir azalmaya yol açar (42).

Priz Süresi ile Zaman □çinde □□İlenebilme Kaybı

Cüruflu çimentoların priz sürelerinin portland çimentolarına göre daha uzun olduğu ve dolayısıyla zamanla işlenebilme kaybının da daha az olduğu yönündeki genel kaniya karşın düşük sıcaklıklarda priz sürelerinin çok uzadığı, normal sıcaklıklarda ise portland çimentolarıyla bir fark olmadığı saptanmıştır (41). Aynı şekilde, çökme kaybı konusunda cüruflu çimentolarla portland çimentoları arasında önemli fark bulunmamaktadır (28, 41).

Terleme

Yapılan deneysel çalışmalarda cüruflu çimento kullanılarak üretilmiş betonların hem terleme hızlarının hem de terleme miktarlarının daha fazla olduğu saptanmıştır (41, 43). (Öte yandan, şantiye koşullarında cüruflu

çimentoların neden olduğu terlemenin yarattığı ciddi problemlere ilişkin bir çalışma veya rapor bulunmamaktadır (41).

Hidratasyon Isı

Cüruflu çimento kullanımı hidratasyon ısını azaltarak hem maksimum beton sıcaklığını düşürmekte hem de bu maksimum sıcaklığa erişilen süreyi uzatmaktadır (44, 45).

4.2 Sertleşmiş Beton Özellikleri

Dayanımlar

Eşit çimento miktarı ve eşit su-çimento oranları söz konusu olduğunda cüruflu çimentolar normal portland çimentolarına göre, erken yaşlarda nisbeten düşük, geç yaşlarda ise yüksek beton dayanım değerlerine neden olurlar (41, 42). Buradan anlaşılabacağı gibi, eşdeğer 28 günlük beton dayanımları söz konusu olduğunda beton karışımlarında cüruflu çimento miktarı normal portland çimentosu miktarına göre biraz daha fazla olmalıdır. Bu durumda geç yaşlardaki dayanımlar cüruflu çimento ile yapılmış betonlarda çok daha yüksek olmaktadır (41, 42).

Elastisite Modülü

Dayanımlar için belirtilmiş olan durum Elastisite Modülü için de geçerlidir. Eşit 28 günlük dayanımlar için, cüruflu çimento kullanılarak yapılmış olan betonların Elastisite Modülleri az bir miktar daha yüksek olmaktadır (41, 44, 45).

Rötre

Cüruflu çimentolarla üretilmiş betonların rötreleri konusunda yapılan araştırmaların sonuçları birbirlerinden, deney koşulları ve kullanılan malzemelerin değişik olması nedeniyle, farklılıklar göstermekle birlikte bu farklar çok önemli ölçüde değildir (41). Genel olarak ifade etmek gerekirse, cüruflu çimento kullanımının rötreyi portland çimentosu kullanıldığı durumlardan daha değişik etkilemediği söylenebilir (41).

Sünme

Betonun sünme davranışıyla ilgili en önemli parametre uygulanan gerilme-dayanım oranıdır. Bu oran sabit olduğu sürece, çimentoların sünme davranışları arasında önemli bir farklılık söz konusu değildir (46).

Isıl Genleşme ve Isıl İletkenlik

Betonun bu özellikleri büyük ölçüde kullanılan agrega tipi ve özelliklerine bağlı olduğundan çimento tipinin önemli bir etkisi söz konusu değildir (41).

4.3 Dayanıklılık Özellikleri

Betonların dayanıklılık özelliklerine cüruflu çimento kullanımının etkileri Bölüm 3.5’de etraflıca ele alınmış olduğundan bu bölümde ayrıca değinilmemiştir.

4.4 Cüruflu Çimentoların Beton Kimyasal Katkı Maddeleriyle Uymu

Genel olarak, cüruflu çimentolar çoğu kimyasal katkı maddeleriyle sorunsuz olarak kullanılabilir. Ancak, tüm diğer çimentolarda olduğu gibi, cüruflu çimentolarla üretilen betonlarda kimyasal katkı kullanmak gerektiği taktirde, gerçek koşullara uygun koşullarda denemeler yapılmasında yarar vardır (41).

5. CÜRUF ve CÜRUFLU ÇİMENTO STANDARDLARI

Birçok ülkede cüruf ve cürufllu çimentolarla ilgili çok sayıda standard bulunur. Bunların tamamının burada kapsanması gereksiz olacağından belli başlı birkaç tanesine atıfta bulunulmuştur.

5.1 Cüruf Standardları

Bu bölümde bahsedilmiş olan çeşitli cüruf özellikleri, ulusal ve uluslararası standartlara göre bu standartlarda agrega ve çimentolar için uygulanan deney yöntemleriyle belirlenen özelliklerdir. GYFC dışındaki cürufllar GYFC kadar geniş kullanım alanı bulamadıklarından standartlarda bu cürufllardan söz edilmez. Genellikle cüruf sözcüğü GYFC anlamında anılmaktadır.

1. Havada Soğutulmuş YFC Agregalar Standardları

Betonda kullanılacak havada soğutulmuş YFC agregaları ile ilgili olarak ülkemizde 1993 yılında çıkarılmış olan TS 3787 "Beton Agregası-Havada Soğutulmuş Yüksek Fırın cürufundan" (47) standardı bulunmaktadır. TS 3787 esas itibarıyla BS 1047 "British Standard Specification for Air-cooled Blastfurnace Slag Aggregate for Use in Construction" (48) örnek alınarak hazırlanmıştır. Her iki standard da maksimum tane boyu 40 mm'ye kadar olan agregalarını konu etmektedir. Gerek TS 3787 ve gerekse BS 1047'de cüruf agregaları bulma yöntemlerine göre (a) Havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu beton agregası, (b) iri cüruf agregası, (c) Çukura dökme cüruf agregası ve (d) Şeve dökme cüruf agregası olarak dört gruba; boyutlarına göre ise (a) iri agrega, (b) incesiz agrega ve (c) ince agrega olarak üç gruba ayrılır.

Çizelge 5.1'de belirtildiği gibi, TS 3787 ve BS 1047 birçok konuda benzer yaklaşımlar beklemekle birlikte BS 1047'de agreganın hacim sabitliği, mekanik özellikleri ve şekli ile ilave hükümler bulunmaktadır. Bunların dışında, BS 1047 YFC'nin beton agregası dışındaki kullanım alanları için de çeşitli kalite koşulları verilmiştir.

Amerikan standartlarında ise beton agregası olarak veya diğer yapı malzemelerinde kullanılabilecek havada soğutulmuş YFC için bir şartname bulunmamaktadır.

Çizelge 5.1 Havada Soğutulmuş YFC için TS 3787 ve BS 1047 Kriterleri

Özellik	TS 3787	BS 1047	
		Beton Agregası	Diğer
Genel	- Sert ve yoğun - İnce taneli kristal yapılı - Yüzeyi lekesiz ve yapışkan maddelerden arınmış	- Sert ve yoğun - İnce taneli kristal yapılı - Yüzeyi lekesiz ve yapışkan maddelerden arınmış	
Birim Ağırlığı (minimum) (kg/m ³)	1250 (kuru, gevşek) TS 3529'a göre bulunur.	1100 (kuru, sıkıştırılmış) BS 812'ye göre bulunur.	
Ufalanmaya Yatkınlık	TS 3525'e göre bulunur.	—	
Süngerimsi ve camsı madde oranı (maks.) (%)	5.0 TS 3524'e göre bulunur.	—	
Çözünabilir Sülfat (maksimum) (%)	0.7 (asitte) TS 3674'e göre bulunur.	0.7 (asitte) BS 1047'ye göre bulunur.	2 g/l (suda) BS 1047'ye göre bulunur.
Toplam Kükürt (maksimum) (%)	2.0 TS 3674'e göre bulunur.	2.0 BS 1047'ye göre bulunur.	2.75 1047'ye göre bulunur.
Su Emme (maksimum) (%)	10.0 TS 3526'ya göre bulunur.	10.0 BS 812'ye göre bulunur.	10.0 BS 812'ye göre bulunur.
Şekil Yapısı Endeksi	—	15-50* BS 812'ye göre bulunur.	25 BS 812'ye göre bulunur.
Mekanik Özellikler (Ezilmeye %10 ince elde edilen yük (min.) kN	—	50-150* BS 812'ye göre bulunur.	50 BS 812'ye göre bulunur.
Demir Hacim Sabitliği	—	Deney sonucunda bozulma, çatılma vb. olmamalı, BS 812'ye göre bulunur.	—
"Dikalsiyum Silikat" Hacim Sabitliği	—	CaO±0.9 SiO ₂ + 0.6Al ₂ O ₃ + 1.755 BS 1047'ye göre bulunur.	CaO + 0.8MgO± 1.2 SiO ₂ + 0.4 Al ₂ O ₃ + 1.755 BS 1047'ye göre bulunur.

* Agreganın kullanılacağı beton sınıfına ve yere göre değişir.

5.1.1 Çimento veya Beton Katkı Maddesi Olarak Kullanılacak GYFC Standardları

Çimento veya betonda kullanılabilecek GYFClerle ilgili bir Türk Standardı mevcut değildir.

ASTM C 595 "Standard Specification for Blended Hydraulic Cements" (49) standardında katkılı çimentolarda kullanılabilecek GYFCye ilişkin koşullar genel olarak belirtilmiştir. Bu standardta, GYFCnin kullanılabilirliğinin belirleneceği deney yöntemi GYFC içeren çimentoların üretiminde uygulanan öğütme şekline göre değişiklik gösterir. Klinker ve cürufun ayrı öğütüldüğü durumlarda, ıslak eleme ile 45 µm elek bakiyesi %20'den fazla olmayan bir incelikteki cürufun 28 günlük aktivite endeksinin %75'den yüksek olması gerekmektedir. Söz konusu aktivite endeksi, kısaca, portland çimentosuyla bir kısım portland çimentosu yerine GYFC kullanılmış cürufllu çimentonun dayanımlarının oranıdır. Birlikte öğütme koşullarında ise cüruf aktivite endeksi bulunurken kullanılacak cürufun inceliğinin cürufllu çimento içindeki tahmini inceliğiyle aynı olması gerekmektedir.

Bunun dışında, ASTM C 1073 "Test Method for Hydraulic Activity of Ground Slag by Reaction With Alkali" (50) standardında cürufun hidrolik aktivitesini 24 saatte belirleyen bir test yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemde, öğütülmüş GYFC ve karışım suyu olarak sodyum hidroksit çözeltisi kullanılmış olan küp numunelerde, hızlandırılmış bakım uygulandıktan sonra, basınç dayanımı bulunur. Söz konusu yöntem aynı kaynaktan düzenli olarak alınan cürufların kalite kontrolünü amaçladığından bulunan bu dayanım değeri ile ilgil bir sınırlama bulunmamaktadır.

Beton ve harçta kullanılacak öğütülmüş GYFClerle ilgili bir başka standard da ASTM C 989 "Specification for Ground Granulated Blast Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars" (51) standardıdır. Buna göre GYFCler 80 sınıfı, 100 sınıfı ve 120 sınıfı olmak üzere üç sınıfa ayırmışlardır. Bu sınıfların aktivite endeksleri 50-50'lik portland çimentosu cüruf karışımları kullanılarak bulunmaktadır.

ASTM C 989'da GYFCler için belirtilen sınırlamalar Çizelge 5.2'de verilmiştir.

İngiltere'de GYFC'nin hem betonda hem de çimentoda kullanımını birlikte kapsayan BS 6699 "Specification for Ground Granulated Blastfurnace Slag for Use With Portland Cement (52) standardı bulunmaktadır. Bu standardta belirtilen sınırlamalar Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.2 ASTM C 989 Sınırları (51)

İncelik (45µm elek bakiyesi) (maks.) (%)		20.0	
Cürufllu harcın hava miktarı (maks.) (%)		12.0	
SO ₃ (maks.) (%)		4.0	
Kükürt (sülfid olarak) (maks.) (%)		2.5	
		En son 5 numune ortalaması	Herhangi bir numune
7 G Aktivite Endeksi (min.) (%)	Sınıf 80 Sınıf 100 Sınıf 120	- 75 95	- 70 90
28 G Aktivite Endeksi (min.) (%)	Sınıf 80 Sınıf 100 Sınıf 120	75 95 115	70 90 110

Çizelge 5.3 BS 6699 Sınırları (52)

Cüruf dışında yabancı madde (%)	maksimum 10.0
Cüruf lu harcın hava miktarı (%)	minimum 67.0
Çözünmeyen Kalıntı (%)	maksimum 1.5
MgO (%)	maksimum 13.0
Kükürt (sülfür olarak) (%)	maksimum 2.0
SO ₃ (%)	maksimum 2.5
Kızdırma Kaybı (%)	maksimum 3.0
Mn ₂ O ₃ (%)	maksimum 2.0
Cl (%)	maksimum 0.1
(C+M)/S	minimum 1.0
C/S	maksimum 1.4
Rutubet miktarı (%)	maksimum 1.0
İncelik (cm ² /g)	minimum 2750
Hacim sabitliği (mm)	maksimum 10.0
GYFC + PÇ karışımının priz süresi	en az PÇ kadar
Bas. Dayanımı (N/mm ²)	7G 28G 12 32.5

6. KAYNAKLAR

1. REGOURD, M., "Slags and Slag Cements", Cement Replacement Materials (Ed. R.N. Swamy), s. 73-99, Surrey Univeristy Press, 1986.
2. TÇMB AR-GE Enstitüsü Çimento Tekniği Bölümü Laboratuar analizleri.
3. SPELLMAN, L.U., "Granulated Blast Furnace Slag es a Material Admixture", Cencrete International, Temmuz 1982, s. 66-71.
4. LEA, F.M., The Cemistry of Cement and Concrete, Edward Arnold Ltd, 1970.
5. SMOLCZYK, H.G., "Slag Structure and identification of Slag", Principal Report, 7th Int. Congr. Chemistry of Cement, C.I., s.III-1-17, Paris, 1980.
6. DEMOULIAN e., GOURDIN, R, HAWTHORN, F. ve VERNET, C., "Influence de la Composition Chimique et de la Texture des Laitiers sur leur Hydraulicite", 7 th Int. Congr. Chemistry of Cement, C. II, s.III-89-94, Paris, 1980.
7. TOTANI, Y., SAITO, Y, KAGEYAMA, M. ve TANAKA, H., "The Hydration of Blast Furnace Slag Cement" 7th Int. Congr. Chemistry of Cement, C. II, s. III-95-98, Paris, 1980.
8. HOOTON, R.D. ve EMERY, J.J., "Glass Content Determination and Strength Development Predictions for Vitirified Blast Furnace Slag", 1 st Int. Confr. On Fly Ash, Silica Fume and Slag in Concrete, ACI Sp. Publ. SP-79, C.2, s. 943-962, Montebello, 1983.
9. DRON, R. ve BRIVOT, E., "Approche du Probleme de la Rectivite du Laitier", 7th Int. Congr. Chemistry of Cement, C. II, s. III-134-1339, Paris, 1980.
10. DAIMON, M., "Mechanism and Kinetics of Slag Cement Hydration", Principal Paper, 7th Int. Congr. Chemistry of Cement, C.III, s.III 2-8, Paris, 1980.
11. TALLING ve BRANDSTER, "Present State and Future of Alkali-Activated Slags", 3rd Int. Confr. on Fly Ash, Silica Fume and Slag in Concrete, s. 1519-1545, Trondheim, 1989.
12. FERET, R., "Slags for the Manufacture of Cement", Rev. mater. Constr. Trav. Publ., 1939.
13. PURDON, A.O., "The Activation of Alkalines on Blast Furnace Slag", J. Soc. Chem. Ind., C.59, s.191-202, 1940.
14. FERON, R., "Hydraulic Properties of Cement", Silic. Ind., C.15, s.199-206, 1946.
15. METSO, J. ve KAJAUS, E., "Activation of BFS by Some Inorganic Materials", 1st Int. Confr. on Fly Ash, Silica Fume and Slag in Concrete, ACI Sp. Publ. SP-79, C.2, s. 1059-1073, Montebello, 1983.
16. REGOURO, M., "Structure and Behavior of Slag Portland CEment Hydrates", 7th int. Congr. Chemistry of Cement, C. I, s.III-2/10-26, Paris, 1980.
17. D'ANS, J. ve EICK, H., "The System CaO-Al₂O₃-CaSO₄-H₂O at 20 C Zement, Kalk-Gips, C.6, No.9, s. 302-311, 1953.
18. DE JONG, J.G.M., "Le Mecanisme de Reaction de l'hydratation des Ciments Metalurgiques" Silicate Industriel, C.42, No. 1, s.5-11, 1977.
19. TANEJA, C.A., "Role of Magnesia on Hydration of High Alumine Slags", 6 th Int. Congr Chemistry of Cement, Supplementary Paper, Sect. III, Moskova, 1974.
20. SERSALE, R., AIELLO, R., COLLELA, C. ve FRIGIONE, G., "Utilisations Alternatives des Laitiers de Haut Fourneau", Silicate Industriel, C.41, No. 12, s. 513-519, 1976.

21. MASCOLO, G., NASTRO, A. ve SABATELLI, V., "Study of the Hydration and Hydraulic Behaviour of Vitreous Blastfurnace Slags in Relation to the MgO Content", *Il Cemento* C. 74, No.2, s.45-52, 1977.
22. KOERTH, W., "Volume Stoichiometry of the Formation of Hydrate Cement-a Contribution to Developing a Practicable Theory of Hardening", *Silicatechnik*, C.27, No.7, s.244-246, 1976.
23. SATARIN, V.I., "Slag Portland Cement", 6th Int. Congr Chemistry of Cement, Principal Paper, Moskova, 1974.
24. REGOURD, M., MORTUREUX, B., GAUTIER, E., HORNAIN, H. ve VOLANT, J., "Caracterisation et Activation Thermique des Ciment au Laitier", 7th Int. Congr. Chemistry of Cement, C.II, s.III-105-111, Paris, 1980.
25. ROY, D.M. ve IDORN, G.M., "Development of Structure and Properties of Blast Furnace Slag Cements", *J. of A.C.I.*, C.97, 5.444-57, 1982.
26. MALHOTRA, V.M., "Strength and Durability Characteristics of Concrete Incorporating a Pelitized Blast Furnace Slag" 1st Int. Confr on Fly Ash, Silica Fume and Slag in Concrete, ACI Sp. Publ. SP-79, C.2, S.891-922, Montebello, 1983.
27. TACHIBATA, S., KOTANI, H. ve JYO, Y., "The Effect of Triethanolamine on the Strength Development of Slag Cements", Review of the 36th General Meeting of CAJ, s.53-54, 1982.
28. MEUSEL, J.W. ve ROSE, J.H., "Production of Granulated Blast Furnace Slag at Sparrows Point and the Workability and Strength Potientol of Concrete Incorporating the Slag" 1 st Int. Confr. on Fly Ash, Silica Fume and Slag in Concrete, ACI Sp. Publ. SP-79, C.2, s.867-890, Montebello, 1983.
29. KAMESHIMA, N. ve TAKEMURA, A., "Relationship Between Chemical properties of Blast Furnace Slags and Strength of Portland Blast Furnace Slag Cements", Review of the 36th General Meeting of CAJ, s.55-75, 1982.
30. KODAMA, K. ve KITAMURA, M., "Properties of Concrete Containin Granulated Blast Furnace Slag Powder", Review of the 32nd General Meeting of CAJ, s. 152-154, 1978.
31. GUYOT, R., RANC, R. ve VARIZAT, A. "Comparison of the Resistance of Sulfate solutions and to Sea Water of Different Portland Cements With and WWithout Secondary Constituents" 1 st Int. Confr. on Fly Ash, Silica Fume and Slag in Concrete, ACI Sp. Publ. SP-79, C.2, S.453-469, Montebello, 1983.
32. ROY, D.M., "Hydration Microstructure, and Chloride Diffusion of Slag-Cement Pastes and Mortars", 3rd Int. Confr. On Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI Sp. Publ. SP-114, C.2, s.1265-1282, Trondheim, 1989.
33. PLANTE, P. ve BILODEAU, A., "Rapid Chloride Ion Permeability Test: data on Concretes Incorporating Spplementary Cementing Materials", 3rd Int. Confr. Of Fly Ash, Silica Fume. Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI Sp. Publ. Sp-114, C.1, 5.625844, Trondheim, 1989.
34. DECTER, M.H., SHORT, N.R., PAGE, C.L. ve HIGGINS, D.D., "Chloride Ion Penetration into Blended Cement Pastes and Concrete". 3rd Int. Confr. On Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI Sp. Publ. SP-114, C.2, s.625-644, Trondheim, 1989.
35. LONGUET, P., "La Protection des armatures dans le Beton arme elabore avec des Ciments de Later", *Silicates Industr.*, C.41, s.397-413, 1976.

36. YOSHIO, K. MATSUI, I. FUKUSHIMA, Y. ve KAMOHARA, H., "Air Permeability and Corbation of Blended Cement Mortars", 3rd Int. Confr. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI Sp. Publ. SP-114, C.1, S.397-413, Trondheim, 1989.
37. SMOLCZYK, H.G., "Slag Cements and Alkali-Reactive Aggregates", 6th Int. Congr Chemistry of Cement, Bölüm III. Supplementary Paper, Moskova, 1974.
38. VIRTANEN, J., "Freez-Thaw Resistance of Concrete Containing Blast-Furnace Slag, Fly Ash or condensed Silica Fume", 3rd Int. Confr. on FlyAsh, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI Sp. Publ. SP-114, C.2, s.923-941, Trondheim, 1989.
39. PIGEON, M. ve REGOURD, M., "Freezing-Thawing Durability of Three Cements with Various Granulated Blast Furnace Slag Contents" 3rd Int. Confr. On Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI Sp. Publ.SP-114, C.2, S.979-997, Trondheim, 1989.
40. MALHOTRA, V.M., "Strength and Durability Characteristics of Concrete Incorporating a pelletized Blast Furnace Slag". 3rd Int. Confr. of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI Sp. Publ. SP-114, C.2, S.891-921, TRONDHEIM, 1989.
41. WAINWRIGHT, P.J., "Properties of Fresh and Hardened Concrete Incorporating Slag Cements", Cement Replacement Materials (Ed. R.N. Swamy), s. 100-133, Surrey University Press, 1986.
42. REEVES, C.M., "The Use of ground granulated Blast Furnace slag to Produce Durable Concrete", Durability of Concrete Conference, Inst. of Civ. Engineers, s.37-54, Londra, 1985.
43. CESARINI, C. ve FRIGIONE, G., "A Contribution to the Study of the Physical Properties of Hardened Pastes of Portland Cement Containing Granulated Blast Furnace Slag", 5th Int. Congr. Chemistry of Cement, C.4, s.237-247, Tokyo, 1968.
44. WAINWRIGHT; P.J. ve TOLLOCZKO, J.J.A., "The Early and Later Age Properties of Temperature Cycled OPC Concretes", 2nd Int. Confr. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, C.2, S. 1293-1321, MADRID, 1986.
45. BAMFORTH, P.B., "in Situ Measurement of the Effect of Partial Portland Cement Replacement Using Either Fly Ash or Ground Granulated Blast Furnace Slag on the Performance of mass Concrete". Proc. of Inst. of Civ. Engrs., C.69, s.777-800, 1980.
46. NEVILLE, A.M., DILGER, W.H. ve BROOKS, J.J., Creep of Plain and Structural Concrete, Construction University Press, Londra, 1983.
47. Türk Standardı, "TS 3787, Beton Agregası Granüle Yüksek Fırın Cürufundan", 1983.
48. İngiliz Standardı, "BS 1047, British Standard Specification for Air-cooled Blastfurnace Slag Aggregate for use in Construction", 1983.
49. Amerikan Standardı, ASTM C595, Standard Specification for Blended Hydraulic Cements", 1995.
50. Amerikan Standardı, "ASTM C1073, Test Method for Hydraulic Activity of Ground Slag by Reaction with Alkali", 1991.
51. Amerikan Standardı, "ASTM C989, Specification for Ground Granulated Blastfurnace Slag for Use in Concrete and Mortars", 1995.
52. İngiliz Standardı, "BS 6699, Specification for Ground Granulated Blastfurnace Slag for Use with Portland Cement", 1992.

TÜRKİYE ÇİMENTO MÜSTAHSİLLERİ BİRLİĞİ AR-GE ENSTİTÜSÜ'NÜN YAYINLARI

1. TÇMB/AR-GE/Y96.1 Türkiye Çimento-Beton Araştırmacı Envanteri (1996)
2. TÇMB/AR-GE/Y96.2 Türkiye Çimento-Beton Ekipman Envanteri (1996)
3. TÇMB/AR-GE/Y97.1 Türkiye Çimentoları, prEN 197 Çimentoları ve Avrupa Ülkelerinde İç Satış İstatistikleri
4. TÇMB/AR-GE/Y97.2 Cüruflar ve Cüruflu Çimentolar Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Raporu
5. TÇMB/AR-GE/Y97.3 Çimento ve Beton Tez Özetleri (1995, 1996)
6. TÇMB/AR-GE/Y98.1 Avrupa Çimento Standartları ve Testleri
7. TÇMB/AR-GE/Y98.2 Türkiye Çimento Endüstri Enerji ve Emisyon Düşünceleri
8. TÇMB/AR-GE/Y98.3 Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu
9. TÇMB/AR-GE/Y98.4 Cumhuriyetimizin 75. Yılında Türk Çimento Sektörü
10. Proceedings of 1st International Symposium on Admixtures in Cement (1. Uluslararası Çimentoda Mineral Katkılar Sempozyumu Bildiriler Kitabı)
11. TÇMB/AR-GE/Y99.1 TÇMB Çimento ve Beton Araştırma Geliştirme Enstitüsü
12. TÇMB/AR-GE/Y99.2 Traslar ve Traslı Çimentolar
13. Proceedings of 2nd International Symposium on "Cement and Concrete Technology in the 2000's" (2. Uluslararası Sempozyum "2000'lerde Çimento ve Beton Teknolojisi" Bildiriler Kitabı)
14. TÇMB/AR-GE/Y01.01 Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı
15. TÇMB/AR-GE/Y02.01 Beton Yollar
16. TÇMB/AR-GE/Y03.01 Uluslararası Beton Yollar Kongresi-Konuşma Metinleri
17. TÇMB/AR-GE/Y03.02 Çimento/Yeni Bir Çağın Malzemesi
18. TÇMB/AR-GE/Y03.03 Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri
19. TÇMB/AR-GE/Y04.01 Çimentoda Yeni Standartlar ve Mineral Katkılar
20. TÇMB/AR-GE/Y04.02 Türkiye'de Çimento ve Beton Konularında Araştırmacılar ve Laboratuvarlar

YAYIN TALEP FORMU

Aşağıda yayın numarası sunulmuş olan yayınlarınızın adresime gönderilmesini arz ederim.

Adı :

Soyadı :

Mesleği :

Çalıştığı Kurum :

Adres :

İstenen Yayınlar

Yayın talepleriniz için bu formu 0.312.265 09 06 numaralı faksa gönderebilir veya info@icma.org.tr adresine mail atabilirsiniz.