

YÜKSEK DAYANIM VE YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARDA YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KULLANIMI

USE OF BLAST FURNACE SLAG FOR HIGH STRENGTH AND HIGH PERFORMANCE CONCRETE

Özgür Okyay

OYAK Beton Samandıra Tesis
İstanbul

Yılmaz Akkaya

İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi
İstanbul

Özet

Günümüzde Yüksek fırın cürufu kullanımı hazır beton sektöründe giderek artış göstermektedir. Yüksek fırın cürufunun betonun uzun dönem dayanımını ve durabilitesini artırdığı, beton geçirimsizliğini azalttığı ve kimyasal etkenlere karşı betonun dayanıklılığını arttırdığı birçok çalışmada gözlenmiştir. Ayrıca bir atık olarak cürufun çimento ile ya da doğrudan betona katılması yolu ile doğa korunmakta, çimento üretiminde daha az hammadde kullanılmakta ve enerji tüketimi azaltılmaktadır. Sonuç olarak yüksek fırın cürufu kullanımı daha az çevre kirlenmesi, enerji tüketiminin azalması, yüksek performanslı ve servis ömrü yüksek betonların yapılmasına yardımcı olmaktadır. Bu çalışmada yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı betonların tasarımında yüksek fırın cürufu kullanımının geçirimsizlik ve durabilite özelliklerine etkileri incelenecektir.

Anahtar Kelimeler: Durabilite, Yüksek fırın cürufu, Yüksek mukavemet, mikro çatlaklar

Abstract

Use of blast furnace slag in high performance concrete has increased in the ready mixed concrete industry. It has been proven that blast furnace slag improves concrete properties such as durability, strength at later ages, impermeability and resistance to chemical attacks. Consumption of blast furnace slag, an industrial by-product, in concrete or cement production also improves service life of structures, decreases environment pollution and enables energy conservation. This experimental study investigates the durability properties of blast furnace slag in the design of concrete mixtures.

1. Giriş

Demir-çelik üretiminde kullanılan yüksek fırınlarda, demir oksit (maden filizi, peletler, sinter), akıcılık düzenleyiciler (kalker,dolomit), ve yakıt (kok) kullanılır. Fırından iki ürün elde edilir: fırının alt kısmında toplanan erimiş demir ve erimiş demir üzerinde yüzen sıvı yüksek fırın cürufu. Yüksek fırın cürufunun kompozisyonu yüksek fırına beslenen maden filizi, akıcı taş ve koktaki safsızlıklara bağlıdır. Genelde yüksek fırın cürufunun %95'i veya daha fazlası silika, kalsiyum, alüminyum, magnezyum ve oksijenden oluşur [1]. Endüstriyel bir atık olarak oluşan yüksek fırın cürufu depolanmasının zor olması nedeni ile beton sektöründe kullanılması ekonomik sürdürülebilirlik ve çevrenin korunması bakımından önem taşır.

Öğütülmüş yüksek fırın cürufu betonda kullanıldığında, çimento hamurunda daha ince ve süreksiz boşluk oluştuğu, agrega- çimento ara yüzündeki boşlukların azaldığı, betonun kalıcılığının yani dürabilitesinin arttığı gözlenmiştir. Yapı ve yapı malzemelerinin işlevlerini uzun yıllar boyu bozulmadan yerine getirebilme özelliği dayanıklılık, kalıcılık veya durabilite olarak isimlendirilir [2]. Dünyada maliyet ve kaynak kullanımının en büyük paya sahip sektörü kuşkusuz inşaatı ve doğal kaynakların verimsiz kullanımı, çevresel ve ekolojik sorunlara yol açmaktadır. Bu durum sektörde sürdürülebilir gelişmenin sağlanmasında kalıcılığın önemini göstermektedir [3].

Cürufun uygun miktarlarda çimento ikamesi olarak kullanıldığında kütle betonlarında sıcaklığın kontrol edilmesi için etkili bir araç olduğu gözlenmiştir. Her durumda, cürufu çimentonun ilavesi, ilk zamanlarda çimentonun neden olduğu erken ısı üretimini azaltır. Beton bünyesinde yüksek sıcaklık gelişiminin betonda çatlakların oluşması ve hacimsel kararlılığı üzerinde önemli etkileri vardır [4].

Sertleşmiş betonda geçirimsizlik ve su emme özelliği, boşluk yapısının bir göstergesidir. Bu nedenle kimyasal ve fiziksel olaylara karşı durabiliteyi etkileyen en önemli özelliklerin başında geçirimsizlik özelliği gelir. Su geçirimsizliği, suyun çözülebilen zararlı iyonları beton içerisine taşıdığı ve kimyasal tepkimelerde suyun bizzat yer alması nedeniyle, betonun ileri yıllarda uğrayabileceği hasarın bir göstergesidir [5].

Bu çalışmada, yüksek fırın cürufu ile üretilen yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı kendiliğinden sıkışma özelliğine sahip betonların taze hal ve mekanik dayanımlarının yanısıra, sıcaklık gelişimi, su ve klor geçirimsizliği ve donma çözülme dayanımı deneyleri de yapılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Kullanılan Malzemeler

Beton üretiminde Cem II A-M 42,5 R çimentosu ve Cem I 42,5 N çimentoları kullanılmıştır. Mineral katkı olarak öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) kullanılmıştır. Çimento ve cürufun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 1 de verilmiştir.

Çizelge 1: Çimento ve ÖYFC'nun fiziksel ve kimyasal özellikleri

	Cem I 42,5 N	Cem II A-M 42,5 R		ÖYFC
Kızdırma Kaybı (%)	1	0,64	Kızdırma Kaybı (%)	0,12
MgO (%)	1,29	2,26	Al ₂ O ₃ (%)	11,91
SO ₃ (%)	2,95	2,75	CaO (%)	33,76
Klorür (%)	0,0086	0,0119	MgO (%)	6,91
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0,3	0,23	SO ₃ (%)	0,05
2 Gün Dayanım	23,4	29	(CaO+MgO)/ SiO ₂	1
28 Gün Dayanım	55,6	58,5	45 mikron (%)	0,7
Priz Süresi (Başl./Bitiş, dk)	155 /250	170 /210	7 gün Aktivite (%)	54,5
Hacim Genleşmesi (mm)	1	1	28 gün Aktivite (%)	81,2
Blaine (cm ² /g)	3690	4430	Blaine (cm ² /g)	5298

Beton karışımında kullanılan ince agrega olarak doğal kum ve kırma kum, iri agrega olarak da kumtaşı kökenli kırma taş 1 no agrega kullanılmıştır. Agregaların elek analizleri Çizelge 2'de ve fiziksel özellikleri Çizelge 3'de verilmiştir. Beton karışımlarımda polikarboksilat esaslı yüksek oranda su kesici akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Çizelge 2: Agrega elek analizleri

Agrega	Elek göz açıklığı (mm)								
	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Doğal kum	100	100	100	100	100	97	16	1	0,9
Kırma kum	100	100	92	61	38	24	14,4	6	3,8
Kırmataş 1	100	39	2,1	1,8	1,7	1,7	1,7	2	1,5

2.2 Üretilen Karışımlar

Çalışma 2 aşamada gerçekleşmiştir. İlk aşamada laboratuvar çalışmaları yapılmış, ikinci aşamada çalışmalar, endüstriyel ölçeğe taşınmış ve yerindeki betonda ısı gelişimi etkisine farklı bir çimento tipinin etkileri de incelenmiştir. Tüm karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0,28 olarak gerçekleşmiştir. Eşdeğer çimento hesaplanırken ÖYFC nin etkinlik katsayısı 0,8 alınmıştır. Karışımın 1 m³'lük teorik bileşim miktarları Çizelge 3'de verilmiştir. M1 kodu ile CEM II A-M 42,5 R çimentosu kullanılarak laboratuvar da yapılan karışımlar, M2 yine aynı tip çimento ile endüstriyel ölçekte üretilen betonlar, M3 ise CEM I 42,5 N ile üretilen tasarımı ifade etmektedir. Her 3 beton üretim aşamasında da kullanılan karışım oranları aynıdır.

Çizelge 3: 1 m³ için bileşim oranları

Malzeme	Miktarlar (Kg)	Özgöl Ağırlık (g/cm ³)	Su emme (%)
Çimento	440	3,23 (Cem I) 3,09 (Cem II)	-
ÖYFC	100	2,78	-
Doğal Kum	473	2,62	1,2
Kırma Kum	470	2,73	0,9
1 No	787	2,73	0,4
Akışkanlaştırıcı	7,95	1,10	-

3. YAPILAN DENEYLER VE SONUÇLARI

3.1 Taze Beton Deneyleri

Betonların çökme yayılması ve T₅₀ süreleri başlangıç, 30 dk, 60 dk, 90 dk ve 120 dk sonunda ölçülmüş, ayrıca U kutusu ve V hunisi deneyleri de uygulanmıştır. Test sonuçları Çizelge 4’de yer almaktadır. Endüstriyel üretimlerde, yüksek hacimli beton kullanıldığından dolayı, işlenebilirliğin laboratuvar çalışmasına göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Kullanılan polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı sayesinde işlenebilirliğin uzun süre korunabildiği tesbit edilmiştir. Beton işlenebilirliği için verilen T₅₀, U kutusu ve V hunisi maksimum limit değerleri sırasıyla 7 sn, 25 sn ve 10 sn iki saat boyunca tüm karışımlar tarafından sağlanmıştır.

Çizelge 4: Taze beton sonuçları ve zamana bağlı değişimleri

	Zaman (dk)	Çökmede yayılma (cm)	T ₅₀ (sn)	U- kutusu (sn)	V-Hunisi (sn)
M1	0	72	4	18	7,5
M2		78	3	14	6,5
M3		73	3	16	7
M1	60	65	4	19	7,5
M2		69	3,5	15	7
M3		67	3,5	17	7
M1	90	65	4,5	21	8,5
M2		67	3	15	7
M3		67	3,5	17	7,5
M1	120	63	4,5	23	8
M2		65	4	18	7,5
M3		63	4	19	8

3.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Deneyler, çapı 150 mm ve yüksekliği 300 mm olan silindir numuneler üzerinde 13,5 kN/s sabit yükleme hızı ile gerçekleştirilmiştir. M1 ve M2 tasarımlarında 2., 3., 7. ve 28. günlerde her bir beton karışımından 3’er adet silindir numune basınç, elastisite modülü ve yarmada çekme dayanımı testine tabi tutulmuştur. M3 tasarımında ise 7., 28 ve 56.

günlerde basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Elastisite Modülü deneyi NT BUILD 205'e uygun olarak gerilme-şekil değiştirme eğrisindeki maksimum yükün % 33 üne kadar olan kısmının eğimi kullanılarak hesaplanmıştır. Yarmada çekme deneyi çapı 150 mm ve yüksekliği 300 mm olan silindir numuneler üzerinde TS EN 12390-6 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Basınç deneyi TS EN 12390-3 standardına göre yapılmış ve sonuçlar Çizelge 5'de gösterilmiştir.

Çizelge 5: Sertleşmiş beton mekanik özellikleri

Gün	Basınç Dayanımı (MPa)			Elastisite Modülü (GPa)		Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	
	M1	M2	M3	M1	M2	M1	M2
2	55,0	52,8	-	25,3	25,8	4,2	4,3
3	59,5	59,3	-	27,0	26,2	4,6	5,1
7	74,1	73,0	57,4	30,2	29,9	6,4	5,2
28	94,0	90,4	76,3	31,9	35,1	6,8	7,1
56	-	-	85,3	-	-	-	-

Laboratuvarda üretilen M1 ve endüstriyel olarak üretilen M2 karışımlarının dayanım gelişimlerinin paralellik gösterdiği görülmüştür. M1 ve M2 karışımlarında 2. ve 3. gün erken yaş dayanımları 15 X 30 cm 'lik silindir numune sonuçları 50 MPa üzerinde, 28 günlük silindir numune dayanımları ise 80 MPa'ın üzerinde gerçekleşmiştir. Isı gelişimini kontrol etmek amacıyla kullanılan CEM I 42,5 N tipi çimentonun dayanım gelişimi daha yavaş gerçekleşmiş, 50 MPa değeri üzerine 7. günde, 80 MPa değeri üzerine 56. günde çıkmıştır.

3.3 Geçirimsizlik ve Dürabilite Deneyleri

Geçirimsizlik deneyleri kapsamında M1 ve M2 tasarımlarına ait numunelere ASTM C 1202'ye uygun olarak elektriksel yöntemle hızlı klorür geçirimsizliği testi, BS EN 12390-8 standardına göre basınç altında su işleme derinliğinin tayini, ASTM C1585 standardına göre betonda kılcal su emme hızı tayini, BS 1881-5 standardına uygun olarak betonun yüzey başlangıç Su emmesi tayini (ISAT) deneyleri yapılmıştır. CEN/TS 12390-9 standardına göre sertleşmiş betonda donma çözünme dayanımı (CDF) deneyi gerçekleştirilmiştir. Özellikle kütsel elemanlarda, yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonda oluşabilecek gecikmiş etrenjit oluşumunun etkisini incelemek amacıyla ASTM C 1202'ye uygun olarak elektriksel yöntemle hızlı klorür geçirimsizliği testi, M2 karışımı için 50°C ve 70°C'lik ortamlarda kür edilen betonlarda tekrar edilmiştir. Sonuçlar Çizelge 6'da gösterilmiştir.

Yüksek sıcaklıklarda gecikmiş etrenjit hasarının oluşup oluşmadığı dayanım deneyleri ile de kontrol edilmiştir. M2 karışımında, benzer olgunluk yaşına sahip, 14 gün 70°C ve 25 gün 50°C'lik ortamlara maruz bırakılan numunelerde dayanım değerleri sırasıyla 82,6 ve 78,8 MPa olarak bulunmuştur. Dayanım değerleri arasındaki fark %5'ten az olması nedeniyle betonların maruz kaldıkları sıcaklıktan olumsuz etkilenmedikleri görülmüştür.

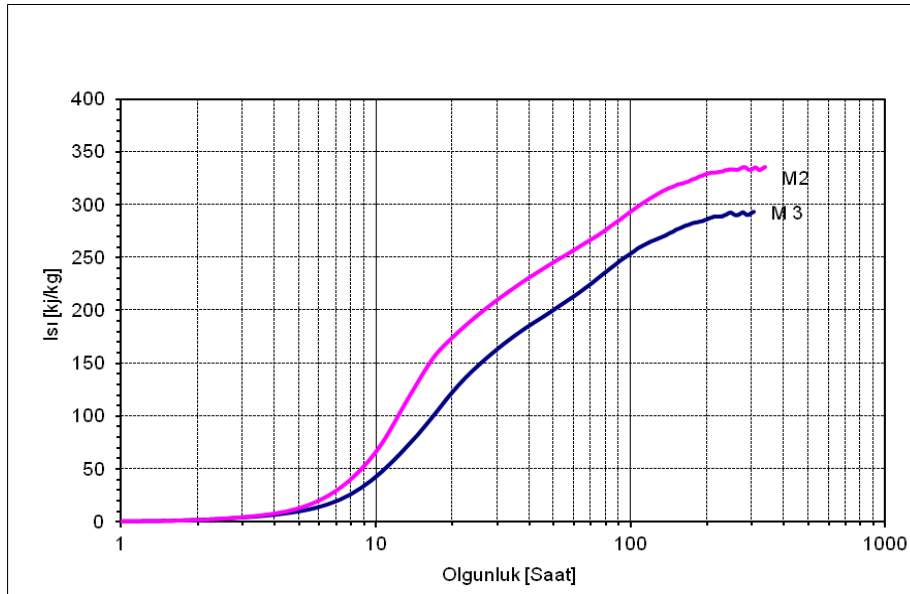
Çizelge 6: Geçirimsizlik deneyleri

		M1	M2
Basınç altında su işleme derinliği (mm)	Ortalama	5,25	5,62
	Maks	8	15
Yüzey başlangıç absorpsiyonu değeri (ml/m ² /s)	ISAT,10 Dk	0,00343	0,00258
	ISAT,30 Dk	0,00229	0,00172
	ISAT,60 Dk	0,00114	0,00143
Hızlı klorür geçirimsizliği (Coulombs)	20 C°	588	879
	50 C°	-	396
	70 C°	-	389
CDF (Kg /m ²)	14 çevrim	-	0,15
	28 çevrim	-	0,28
Kılcal su emme (mm/√sn)	-	-	0,0002

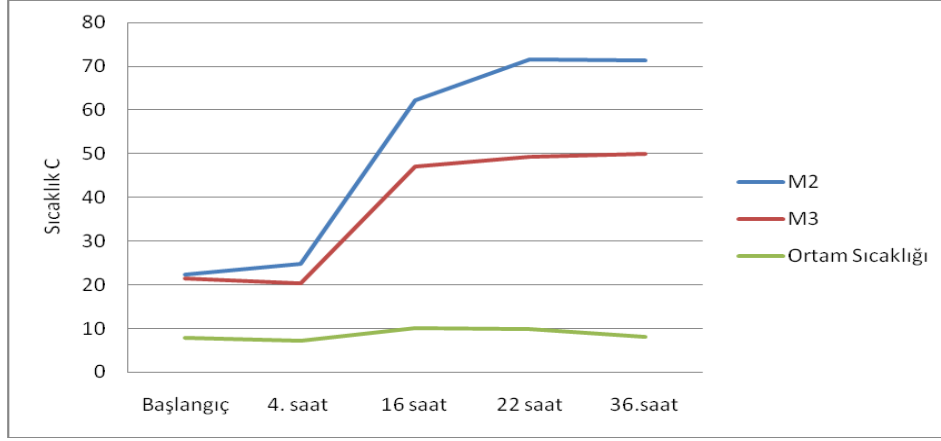
Hızlı klorür geçirimsizliği sonuçlarına göre, üretilen betonlar geçirimsiz sınıfında kalmaktadır ve maruz kalınan yüksek sıcaklıklar beton iç yapısında çatlak oluşturarak geçirimsizliği artırmamaktadır. Basınç altında su işleme derinliği öngörülen 9 mm ve ISAT deney sonuçları öngörülen limit 0,3 mm değerlerinin altında kalmaktadır.

3.4 Isı Gelişimi Ölçümleri

M2 ve M3 tasarımlarında laboratuvar ortamında NT Build 388'e göre adiabatik ısı gelişimi deneyleri yapılmış ve sonuçlar Şekil 1'de gösterilmiştir. Sahada 1 m ye 3 metre boyutlarındaki elemanlarda kalıplara yerleştirilen sıcaklık ölçerler yardımıyla M2 ve M3 karışımlarının sıcaklık gelişimleri takip edilmiş ve Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Beton karışımlarının yarı adiabatik ısı gelişimleri



Şekil 2: Beton karışımlarının saha sıcaklık okumaları

4. GENEL DEĞERLENDİRME

Öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılarak erken ve ileri yaş dayanımları (7 günde 50 MPa ve 28 günde 80 MPa) yüksek betonlar üretmek mümkündür. Bu betonlar, sadece yüksek dayanımlı olmayıp, aynı zamanda yüksek işlenebilirliğe ve kendiliğinden sıkışma özelliğine de sahip olabilmektedirler. Yüksek fırın cürufu kullanımı ve uygun çimento tipi seçimi ile bu betonların erken yaşta ısıl çatlak oluşturma riskini azaltmak mümkündür.

Öğütülmüş yüksek fırın cürufu, yüksek performans kriterleri arasında sayılabilecek geçirimsizlik ve donma-çözülme dayanımı açısından da betona olumlu katkıda bulunmuştur. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilmiş betonun klorür geçirimsizliği, basınçlı su ve kılcal su geçirimsizliği düşüktür. Buz çözücü tuzlar etkisinde, donma-çözülme kaynaklı yüzeysel soyulmalara karşı dayanımı istenilen kriterleri sağlamıştır.

KAYNAKLAR

1. ACI 233.R-95, Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete Reported by ACI Committee 233, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
2. Neville, A.M., (1990), Properties of Concrete Third Edition , Longman Scientific and Technical, New York.
3. Arıoğlu, E., (1989), Prefabrikasyon Endüstrisinde Beton Kalitesinin ve Denetiminin Mevcut Durumu , 1. Ulusal Beton Kongresi , 24-25-26 Mayıs 1989, İstanbul, 215-226.
4. Neville, A.M ve Brooks, J.J., (2001) Concrete Technology , Revised Edition, Pearson Education Limited.
5. Erdoğan, T.Y., (2003), Beton , Metu Press, Ankara.