

UÇUCU KÜL İÇERİSİNDEKİ CaO ve MgO'in ÇİMENTO GENLEŞMESİNE VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

¹Mustafa ÇULLU

²Serkan SUBAŞI

³Kürşat YILDIZ

¹ Hacettepe Üniversitesi Polatlı Teknik Bilimler M.Y.O., İnşaat Programı, Polatlı, Ankara

² Düzce Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü, Konuralp, Düzce

³ Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü, Teknikokullar, Ankara

¹e posta: mcullu@hacettepe.edu.tr

²e posta: subasi.serkan@gmail.com

³e posta: kursaty@gazi.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, uçucu kül ikame edilen çimento numunelerinde karışım içerisinde artan CaO ve MgO miktarına bağlı olarak meydana gelebilecek genleşme miktarı ve çimento mekanik özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir.

Bu amaçla, karışım içerisinde çimento ile %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında uçucu kül ikame edilerek. 25x25x285 mm boyutlarında genleşme numuneleri ve 40x40x160 mm boyutlarında basınç ve eğilme dayanımı numuneleri hazırlanmıştır. Çimento harç çubuklarında genleşme deneyi otoklav metodu ile gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak; çimento içerisinde ikame edilerek katılan uçucu kül miktarına bağlı olarak çimento genleşmelerinin arttığı, çimento basınç ve eğilme dayanımı değerlerinin ise uçucu kül ikame oranına bağlı olarak azaldığı görülmüştür.

1.GİRİŞ

Çimento içinde bulunabilen CaO ve MgO'un gecikmiş hidrasyonları da betonda genleşmelere ve çatlamalara yol açabilmektedir. Döner fırında yüksek sıcaklıklarda pişerek kristal yapıya sahip olan bu bileşenler diğer çimento bileşenlerinden daha geç reaksiyon gösterirler. Bu nedenle çimento içindeki miktarının sınırlı olması istenir (1). Bu oksitlerin hidrasyonu sonunda sertleşmiş çimento hamurunda genleşme olduğundan, beton yapılarda iç gerilmeler ve çatlamlar meydana gelebilmektedir. Priz aldıktan sonra büyük miktarda hacim genleşmesine yol açmayan çimentolara "dayanıklı" çimento denilmektedir (2).

Üretim sırasında ham maddelerin yanlış harmanlanması veya yetersiz öğütme ve pişirme gibi nedenlerle çimentoda serbest CaO kalabilir. Çimentoya MgO genellikle kalker hammaddesindeki dolamitten gelir. Bir bölümü çimento bileşenlerinin katı eriyikleri içine

girenken, geri kalan bölümü kristal yapıda (periklas) olarak serbest kalır (1).

Çimentolarda istenmeyen bir bileşik olan kristal yapıdaki magnezyum göz önünde bulundurulmalıdır. Çünkü, normal sıcaklıkta çok yavaş hidrate olur ve bu nedenden dolayı ileriki zamanlarda genleşmeye neden olur. Bu gecikmiş genleşme betonun yapısına, çimentonun katılması evresinde serbest kirecin hidrasyonundan dolayı olan erken genleşmeden daha çok zarar verir. Magnezyum içeren çimentoların kontrollü genleşmesi özellikle kütle betonlarında yararlıdır. ASTM C151 gibi otoklav genleşme testi MgO, CaO veya her ikisini içeren çimentoların dayanıklılığını tanımlamak için dizayn edilmiştir (3).

Betonun otoklav genleşmesi, MgO ve uçucu kül eklenmesine ayrıca otoklav ısı ve zamanına bağlıdır, ama genleşme miktarı MgO miktarının yükselmesiyle hızla yükselir (4). Otoklav şartlarında yüksek MgO'li çimento pastasının hidrasyonu hızlı oluşum ve MgO'in kristalleşmesine ve daha geniş porların oluşmasına neden olur. Bu durum çimentonun mekanik dayanıklılığının kaybına ve daha yüksek genleşme değerine sebep olur (5).

Su küründe ve otoklav'da yüksek MgO'lu Çimento pastasının hidrasyonu çimentoya uçucu kül eklendiği kadarıyla sertleşmiş çimento pastasının yapısı, boşluk boyut dağılımı ve boşluktaki büyük değişimlere yön verir. Sertleşmiş çimento pastasındaki MgO'nun hidrasyonunun Mg(OH)₂'ye dönüşmesi diğer hidrat evrelerinin oluşumu ile gelişir. Mg(OH)₂ den dolayı meydana gelen genişleme gerilmeleri net genişlemeyi etkileyen mikro yapı değişimlerini kontrol eder (5).

Ülkemizde açığa çıkan uçucu küllerin büyük bölümü yüksek kireç içeriklidir ve uçucu kül özellikleri santralden santrale, hatta aynı santralde zamana bağlı olarak büyük değişiklikler gösterebilmektedir (6). Uçucu kül puzolanik özelliği olan ve betonun birçok özelliğini

olumlu etkileyen değerli bir beton katkısıdır. Genellikle F sınıfı uçucu kül küresel yapısı nedeniyle betonun işlenebilirlik özelliğini iyileştirmekte, taze betonda su kusmayı (terleme) azaltmakta, betonun hidrasyon ısısını azaltarak sıcak havalarda kütle betonu dökümüne imkan tanımakta, puzolanik reaksiyon sayesinde betonun uzun dönemli mukavemetine katkıda bulunmakta, betonun geçirimsizliğini azaltmakta ve betonun iç ve dış kaynaklı yıpratıcı etkilere dayanıklılığını arttırmaktadır. Bu yararlı özellikleri uçucu külün beton üretiminde yaygın olarak kullanımına ve araştırmaların bu konu üzerinde yoğunlaşmasına yol açmıştır (7). Buna karşılık, uçucu kül betonun erken dayanımını düşürebilmekte ve özellikle yüksek kireç içerikli (C sınıfı) uçucu külün betonda yüksek oranda kullanımı ise betonun hacim sabitliğinin bozulmasına yol açabilmektedir (1).

Yazıcı, H.,'nin yaptığı çalışmada, beton içerisinde %40, %50, %60, %70 gibi yüksek oranda C sınıfı uçucu kül kullanımının betonların mekanik özellikleri ve asitlere karşı dayanıklılığı araştırılmıştır. Çalışmada hazırlanan beton harç çubukları üzerinde genleşme oranları tayin edilmiş ve uçucu kül oranının artması ile harç çubuklarının genleşme miktarının da arttığı görülmüştür. Çimento veya uçucu külde bulunan serbest kireç yüksek sıcaklık etkisine maruz kaldığı için beton içinde çok yavaş ve uzun sürede hidrate olabilir. Bu nedenle, hacim sabitliği deney sonuçlarının otoklav ve Le Chatelier deney sonuçları ile kıyaslanmasının faydalı olacağı sonucuna varılmıştır (6).

TS EN 197-1 standardında Portland çimentosu içerisinde MgO muhtevasının kütlece %5'ten az olması gerektiği belirtilmektedir (8). Ancak günümüz çimento ve hazır beton sektöründe yaygın olarak kullanılan uçucu kül beton içerisine %40'a varan oranlarda katılabilmektedir. Ülkemizde çıkan kalkersi uçucu külün içerisinde genleşmeye neden olabilecek olan CaO ve MgO miktarları genellikle standartlarda belirtilen sınırların üzerinde değerlere sahiptir.

Bu çalışmada, uçucu kül ikame edilen çimento numunelerinde karışım içerisinde artan CaO ve MgO miktarına bağlı olarak meydana gelebilecek genleşme miktarı ve çimento mekanik özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Materyal

2.1.1. Çimento

Araştırmada PÇ 42,5 portland çimentosu kullanılmıştır. Araştırmada kullanılan çimento ait kimyasal analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Çimento Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Kimyasal kompozisyon	
SiO ₂ (%)	20,32
Al ₂ O ₃ (%)	5,59
Fe ₂ O ₃ (%)	3,09
CaO (%)	62,50
MgO (%)	1,74
SO ₃ (%)	3,29
Na ₂ O (%)	0,34
K ₂ O (%)	0,91
Kızdırma kaybı (%)	1,18
Çözünmeyen kalıntı (%)	0,31
S.CaO (%)	0,93
Fiziksel özellikler	
Priz başlangıcı (sa/dk)	01:58
Priz sonu (sa/dk)	02:57
Hacim sabitliği (mm Toplam)	2
Özgül yüzey (cm ² /g)	3172
Mekanik özellikler	
Basınç dayanımı (MPa)	
2. Gün	30,8
7. Gün	39,5
28.Gün	56,0

2.1.2. Uçucu Kül

Araştırmada, Yatağan Termik santralinden elde edilen uçucu kül kullanılmıştır. Kullanılan uçucu küle ait kimyasal analiz sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Uçucu kül kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal kompozisyon	
SiO ₂ (%)	47,77
Al ₂ O ₃ (%)	11,95
Fe ₂ O ₃ (%)	7,84
CaO (%)	12,95
MgO (%)	7,04
SO ₃ (%)	2,59
Na ₂ O (%)	2,94
K ₂ O (%)	2,14

2.2. Metod

2.2.1. Deney numunelerinin hazırlanması

Deney numunelerinin hazırlanmasında TS EN 196-1 standardında belirtilen CEN referans kumu kullanılmıştır. Her bir grup için karışımında kullanılacak su miktarı ASTM C230, C109 ve C1437 standartlarında belirtilen akma çapına göre Akma tablası deneyi gerçekleştirilerek belirlenmiştir (9,12). Numunelerin hazırlanmasında kullanılan malzemelere ait karışım oranları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Çimento numunelerine ait karışım oranları

Uçucu kül ikame miktarı	W/C	Çimento miktarı (gr)	Su miktarı (ml)
%0	0,48	450	216
%5	0,52	450	234
%10	0,55	450	247,5
%15	0,57	450	256,5
%20	0,58	450	261

Araştırmada kullanılan uçucu kül karışım içerisine %0, %5, %10, %15 ve %20 lik oranlarda çimento ile yer değiştirilerek (ikame edilerek) konulmuştur.

2.2.2. Çimento basınç ve eğilme dayanımı tayini

Çimento basınç ve eğilme dayanımı deneyinde deneyi 2., 7. ve 28. günlerde her bir grup için 40x40x160 mm boyutlarında hazırlanan 3'er adet numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Basınç ve eğilme dayanımı deneyleri TS EN 196-1 standardında belirtilen kurallara uygun olarak yapılmıştır (9).

Basınç dayanımı R_c , aşağıdaki eşitlikten yararlanılarak hesaplanmıştır.

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Burada;

R_c : Basınç dayanımı (N/mm²),

F_c : Kırılmadaki en büyük yük (N),

1600 : Numune alanı (mm²)'dir.

Eğilme dayanımı R_f , aşağıdaki eşitlikten yararlanılarak hesaplanmıştır.

$$R_f = \frac{1,5xF_f \cdot x_l}{b^3}$$

Burada;

R_f : Eğilme dayanımı, (N/mm²)

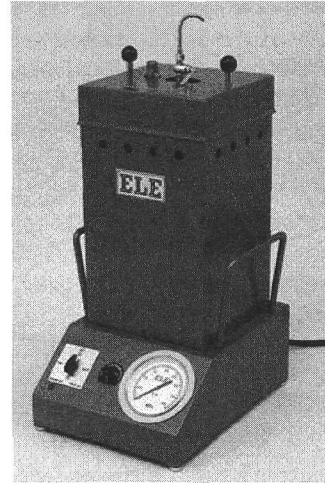
b : Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu (mm),

F_f : Prizmanın kırıldığı anda uygulanan kuvvet (N),

l : Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm)'dir.

2.2.3. Çimento hacim genişleme tayini (Otoklav Metodu ile)

Deney her bir karışım grubu için 8 adet 25x25x285 mm boyutlarında hazırlanan çimento harç çubukları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numuneler 2MPa basınçlı buhar kazanına yerleştirilerek 3 saat boyunca buhar kürüne tabi tutulmuştur (Resim 1). Numune boyları deney öncesinde ve deney sonrasında 0,001 mm hassasiyetle ölçülerek numunelerdeki boy değişimleri % olarak hesaplanmıştır. Deney ASTM C 151 ve TS 11052 standardında belirtilen kurallara uygun olarak gerçekleştirilmiştir (13, 14).



Resim 1. Deneyde kullanılan yüksek basınçlı buhar kürü kazanı

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

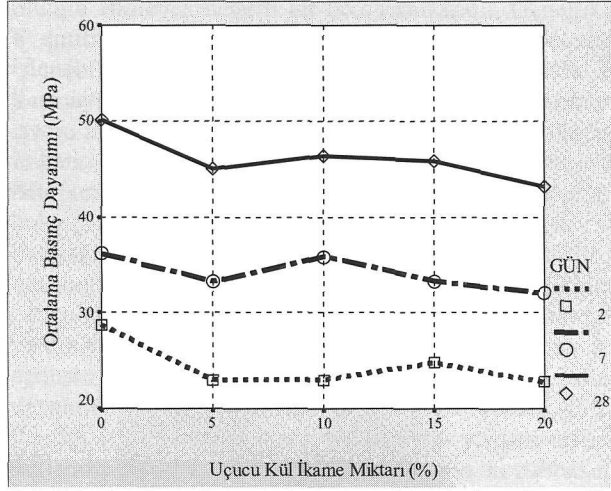
3.1. Çimento basınç ve eğilme dayanımı

Hazırlanan numuneler üzerinde 2., 7. ve 28. günlerde basınç ve eğilme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen verilere ait ortalama değerler Tablo 4'te verilmiştir.

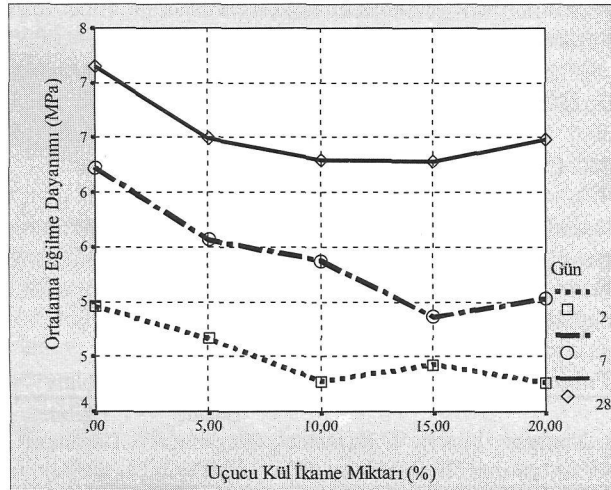
Tablo 4. Basınç ve eğilme dayanımı deney sonuçları

Numune Yaşı (gün)	N	U.K. İkame Miktarı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
2	3	0	28,67	4,95
	3	5	22,96	4,66
	3	10	22,98	4,27
	3	15	24,79	4,42
	3	20	22,74	4,26
7	3	0	36,15	6,22
	3	5	33,26	5,56
	3	10	35,84	5,37
	3	15	33,30	4,86
	3	20	32,01	5,02
28	3	0	50,06	7,14
	3	5	45,06	6,48
	3	10	46,41	6,29
	3	15	45,87	6,28
	3	20	43,19	6,48

Basınç dayanımı değerlerinin numune yaşına ve uçucu kül ikame miktarına göre değişimini gösteren grafik Şekil 1'de, eğilme dayanımı değerlerine ait grafik ise Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 1. Ortalama basınç dayanımı değerlerine ait grafik



Şekil 2. Ortalama eğilme dayanımı değerlerine ait grafik

Elde edilen veriler üzerinde varyans analizi ve Duncan çoklu karşılaştırma testi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre basınç dayanımı değerleri bakımından;

- ✓ Basınç dayanımlarının numune yaşına bağlı olarak bütün U.K. ikame oranlarında anlamlı bir şekilde arttığı,
- ✓ Her bir numune yaşında U.K. ikame oranları arasında yapılan varyans analizinde 2. ve 28. günlerde basınç dayanımı değerleri arasında anlamlı bir fark olduğu,
- ✓ Bütün numune yaşlarında U.K. ikame oranına bağlı olarak basınç dayanımı değerlerinin azaldığı,
- ✓ Bütün numune yaşlarında U.K. ikamesiz olan çimento numunelerinin en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür.

Analiz sonuçlarına göre eğilme dayanımı değerleri bakımından;

- ✓ Eğilme dayanımlarının numune yaşına bağlı olarak bütün U.K. ikame oranlarında anlamlı bir şekilde arttığı,
- ✓ Her bir numune yaşında U.K. ikame oranları arasında yapılan varyans analizinde yalnızca 7. gündeki eğilme dayanımı değerleri arasında anlamlı bir fark olduğu,
- ✓ Bütün numune yaşlarında U.K. ikame oranına bağlı olarak eğilme dayanımı değerlerinin azaldığı,
- ✓ Bütün numune yaşlarında U.K. ikamesiz olan çimento numunelerinin en yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu görülmüştür.

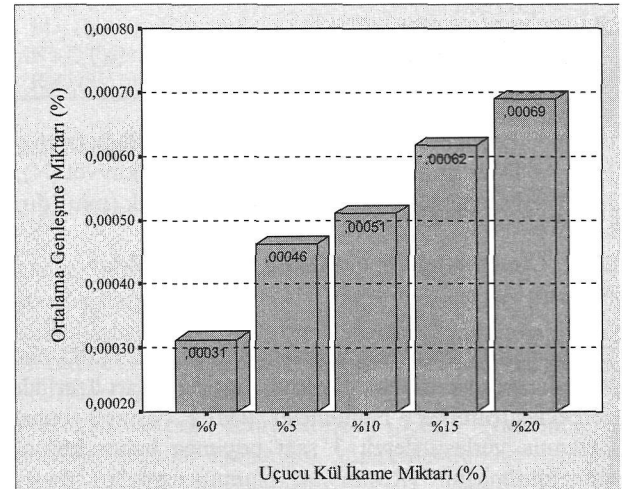
3.2. Çimento hacim genleşme miktarı

Hazırlanan çimento harç çubukları üzerinde otoklav metodu ile genleşme miktarları ölçülmüştür. Deney sonucunda elde edilen verilere ait açıklayıcı istatistikler Tablo 5.'te verilmiştir.

Tablo 5. Çimento hacim genleşme miktarına ait açıklayıcı istatistikler

Uçucu Kül İkame Miktarı (%)	N	Ortalama Genleşme (%)	Std. Hata	Minimum	Maksimum
0	8	$3,13 \cdot 10^{-4}$	$9,36 \cdot 10^{-5}$	$7,65 \cdot 10^{-5}$	$6,22 \cdot 10^{-4}$
5	8	$4,63 \cdot 10^{-4}$	$8,73 \cdot 10^{-5}$	$7,72 \cdot 10^{-5}$	$6,38 \cdot 10^{-4}$
10	8	$5,10 \cdot 10^{-4}$	$8,72 \cdot 10^{-5}$	$1,10 \cdot 10^{-4}$	$6,49 \cdot 10^{-4}$
15	8	$6,17 \cdot 10^{-4}$	$3,32 \cdot 10^{-5}$	$5,04 \cdot 10^{-4}$	$8,05 \cdot 10^{-4}$
20	8	$6,90 \cdot 10^{-4}$	$2,30 \cdot 10^{-5}$	$6,23 \cdot 10^{-4}$	$7,59 \cdot 10^{-4}$

Uçucu kül ikame miktarına bağlı olarak çimento hacim genleşme miktarlarını gösteren grafik Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3. Çimento hacim genleşme miktarlarına ait grafik

Elde edilen deney verileri üzerinde uçucu kül ikame miktarına göre genleşme değerlerinde fark olup

olmadığını anlamak amacıyla varyans analizi ve Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır.

İstatistiksel değerlendirme sonuçlarına göre;

- ✓ Genleşme miktarı değerleri arasında $\alpha = 0,05$ anlamlılık düzeyinde fark olduğu,
- ✓ Uçucu kül ikame miktarına bağlı olarak çimento numunelerinde genleşme miktarlarının arttığı,
- ✓ Uçucu kül ikameli numunelerin genleşme değerleri bakımından birbirinden farklı olmadığı,
- ✓ %0 ikameli numunelerin diğer bütün numunelerden daha az genleşme gösterdiği,
- ✓ %0 ikameli numuneler genleşme değeri bakımından %15 ve %20 ikameli numunelerden $\alpha = 0,05$ anlamlılık düzeyinde farklı olduğu,
- ✓ En fazla genleşme miktarının %20 Uçucu kül ikameli numunelerde meydana geldiği görülmüştür.

4. SONUÇ

Hazırlanan numuneler üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve otoklav yöntemi ile hacim genleşme miktarı tayini deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler üzerinde istatistiksel değerlendirmeler yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- ✓ Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı değerlerinin uçucu kül ikame oranına bağlı olarak azaldığı, %0 ikameli numunelerin en yüksek basınç ve eğilme dayanımı değerine sahip olduğu,
- ✓ %0 ikameli numuneler %20 ikameli numunelere göre ortalama %15 daha büyük basınç dayanımına, %14,6 daha büyük eğilme dayanımına sahip olduğu görülmüştür.

Hacim genleşme miktarına göre; Uçucu kül ikame miktarına bağlı olarak çimento numunelerinde genleşme miktarlarının arttığı

- ✓ En fazla genleşme miktarının %20 Uçucu kül ikameli numunelerde meydana geldiği,
- ✓ %0 ikameli numunelerin diğer bütün numunelerden daha az genleşme gösterdiği,
- ✓ %0 ikameli numunelerde %20 ikameli numunelere göre %54 oranında daha az genleşme meydana geldiği görülmüştür.

Kaynaklar

1. Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., "Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)", DEÜ. Müh. Fak. Yayın No: 298, DEÜ., 282 sayfa., İzmir. 2002.
2. Turhan, Y.E., "Beton", ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara, s:42, Mayıs 2003.
3. Liu, Z., Tang, M., Cui, X., "Expansion of Cement Containing Crystalline Magnesia With and Without Fly Ash and Slag", Cement, Concrete & Aggregates, Vol 20, Issue 1, 6 page, June, 1998.
4. Pei-wei, G, Sheng-xing, W, Xiao-lin, L, Min, D, Ping-hua, L., "Soundness evaluation of concrete with MgO", Construction and Building Materials, Volume 21, Issue 1, Pages 132-138, January 2007.
5. Ali, M.M., Mullick, A.K., "Volume Stabilisation of High MgO Cement: Effect of Curing Conditions and Fly Ash Addition", Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 11, pp. 1585-1594, 1998.
6. Yazıcı, H., "Yüksek Hacimde C Sınıfı Uçucu Kül İçeren Betonların Mekanik Özellikleri ve SülfürikAsit Dayanıklılığı", Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt: 11, Sayı: 3, Sayfa: 443-448, Denizli, 2005.
7. Malhotra, V.M., Mehta, P.K., "High Performance, High Volume Fly Ash Concrete" Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., 101 page, Ottawa, 2002.
8. TS EN 197-1, Genel çimentolar- Birleşim özellikleri ve uygunluk kriterleri, 2002.
9. TS EN 196-1 Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım, 2002.
10. C230/C230M-98e2 Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement
11. C1437-99 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar
12. C109/C109M-99 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)
13. ASTM C 151, 2000., Standart test method for autoclave expansion of portland cement.
14. TS 11052, Çimentolar-Uzama Tayini-Otoklav Metodu, 1993.