



YÜKSEK FIRIN CURUFU KATKILI HARÇLARIN SÜLFAT DAYANIKLILIĞININ İNCELENMESİ

(*INVESTIGATION on SULFATE RESISTANCE of BLAST FURNACE
SLAG MORTARS*)

Halit YAZICI*

ÖZET/ABSTRACT

Sülfat etkisi beton veya betonarme yapıların bozulmasına yol açan önemli kimyasal etkilerden biridir. Bu çalışmada, PÇ 42.5 çimentosu kullanılarak hazırlanan, değişik oranlarda yüksek fırın cürufu (YFC) içeren harçların sodyum sülfat çözeltisinde farklı koşullarda bekletildiklerinde yaptıkları genleşmeler ve basınç dayanımlarındaki değişimler belirlenmiştir. Örnekler ASTM C 1012'ye uygun şekilde hazırlanmış, bir grup 150 g/l Na₂SO₄ çözeltisinde 6 ay süre ile bekletilmiş, diğer grup ise aynı çözeltide ıslanma-kuruma etkisine tabi tutulmuştur. Ayrıca, buhar kürü geçirmiş (60 °C'de 9 saat) karışımlar için de deney programı tekrarlanmış ve sonuçlar suda kür edilmiş kontrol karışımları ile kıyaslamalı olarak sunulmuştur. Yüksek fırın cürufu kullanımı harçların sülfat dayanıklılığını olumlu yönde etkilemiştir.

Sulfate attack is one of the important chemical deterioration processes for concrete structures. In this study, expansions and compressive strength variations of mortars produced with Portland cement and different amount of ground granulated blast furnace slag contents, were measured under sulfate attack. Test specimens were prepared according to ASTM C 1012. One group of specimens was kept continuously in sodium sulphate solution with concentration of 150 g/l. The other group was exposed to wetting and drying cycles with the same solution. Similar test program was applied to the samples which were steam cured at 60 °C for 9 hours. Test results are presented with control mixes which were kept in water, comparatively. Sulfate resistance of mortars was positively effected by ground granulated blast furnace slag replacement with cement.

ANAHTAR KELİMELER/KEYWORDS

Sülfat etkisi, Yüksek fırın cürufu, Basınç dayanımı, Genleşme, Buhar kürü
Sulfate attack, Blast furnace slag, Compressive strength, Expansion, Steam curing

* Dokuz Eylül Üniversitesi, Müh. Fak., İnşaat Müh. Bölümü, Tınaztepe Yer., Buca, İZMİR

1. GİRİŞ

Sudaki, zemindeki ve deniz suyundaki sülfat iyonları beton yapılarda bozulmaya yol açabilir. Sülfat saldırısının zararlı etkisi, sülfat iyonlarının sertleşmiş betondaki alüminli (C_3A) ve kalsiyumlu ($Ca(OH)_2$) bileşenlerle kimyasal reaksiyona girerek, hacmi çok artan etrenjit ve alçı oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Reaksiyon ürünleri, sertleşmiş betonda genleşme yaratarak agrega-çimento hamuru aderansının olumsuz yönde etkilenmesine, çatlak oluşumuna ve geçirimsizliğin artmasına yol açar. İleri derecedeki etkilenmelerde ise betonun tamamen dağılması söz konusudur. Sülfat saldırısı gibi dış kaynaklı iyon girişi sebebiyle oluşan kimyasal reaksiyonlarda çimentonun kimyasal bileşiminin kontrolü kadar, betonun geçirimsizliği de önem kazanmaktadır (ASTM C 1012, 1995; Baradan vd., 2002).

Katı, kuru tuzlar betona zarar vermezler ancak su ile birlikte bulunmaları sonucu, sertleşmiş çimento harcıyla reaksiyona girerler. Bazı killer alkali magnezyum ve kalsiyum sülfat gibi kimyasal maddeler içerir, bunlar yer altı suyuyla birleşince zararlı etki ortaya çıkar. Zemin yüzeyinde oluşan tuz birikintileri çoğunlukla sodyum sülfattır. Ancak magnezyum sülfata da bir çok bölgede rastlanır. Na_2SO_4 , $Ca(OH)_2$ ve C_3A ile, $CaSO_4$ ise yalnızca C_3A ile reaksiyona girer. Deniz suyunda da bulunabilen $MgSO_4$, $Ca(OH)_2$ ve C_3A 'nın yanı sıra kalsiyum silikat hidrate (CSH) yapıyla da reaksiyona girebilmektedir (Baradan vd., 2002; Neville, 1997).

Reaksiyonun gelişimini, sülfatlı ortamın şiddeti, betonun geçirimsizliği, betonda kullanılan çimentonun kimyasal yapısı ve suyun varlığı etkilemektedir. Sülfat dayanıklılığını arttırmak için sülfata dayanıklı çimento ile birlikte uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi puzolanik katkıları kullanılabilir. Puzolanlar, $Ca(OH)_2$ 'i bağlayarak sülfatlarla reaksiyonu önlerler ve sadece Portland çimentosu kullanımı ile kıyaslandığında bağlayıcı içindeki $Ca(OH)_2$ ve C_3A oranının azaltılmasını sağlar (Akman, 1992; Mehta ve Monteiro, 1997; Yeğinobalı, 1999).

Chindapasirt vd. tarafından yapılan çalışmada, F sınıfı uçucu kül kullanımının sülfat dayanıklılığını arttırdığı, uçucu kül inceliği arttıkça bu etkinin daha belirgin hale geldiği görülmüştür. Kaba uçucu kül (Blaine değeri $1800 \text{ cm}^2/\text{g}$) kullanımı halinde ise genleşmelerin azalmadığı aksine arttığı ifade edilmektedir (Chindapasirt vd., 2004).

Monteiro vd. diğerleri tarafından yapılan çalışmada, betonun sülfat saldırısından zarar görmemesi için kritik bir bölgenin bulunduğu, çimentonun C_3A miktarının %8'den az, su/çimento oranının 0.45'in altında olması halinde 40 yıllık maruz kalma süresinde hasar oluşmadığı, çimento yerine %25 ve %45 uçucu kül kullanımının genleşmeleri azalttığı belirtilmektedir (Monteiro ve Kurtis, 2004).

Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı betonların sülfat dayanıklılığı Li ve Zhao tarafından incelenmiştir. Söz konusu çalışmada, en iyi performansı yüksek fırın cürufu kullanılan betonların gösterdiği ifade edilmiştir (Li ve Zhao, 2003).

Benzer şekilde literatürde betonun sülfat dayanıklılığının belirlenmesi üzerine yapılmış bir çok çalışma mevcuttur (Santhanam vd, 2002; Amoudi, 2002; Hekai vd., 2002; Irassar vd., 2000; Thomas vd., 1999; Irassar vd., 1996).

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada, Portland çimentosu (PÇ 42.5) kullanılarak hazırlanan, farklı oranlarda Yüksek fırın cürufu içeren, ASTM C 1012 standardına uygun şekilde hazırlanmış harç karışımları üzerinde sülfat etkisi incelenmiştir.

PÇ 42.5 çimentosunun C_3A miktarı % 8.87, özgül yüzeyi $3520 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'dir. YFC OYSA çimento fabrikasından temin edilmiştir. YFC'nin özgül yüzeyi $4850 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'dir.

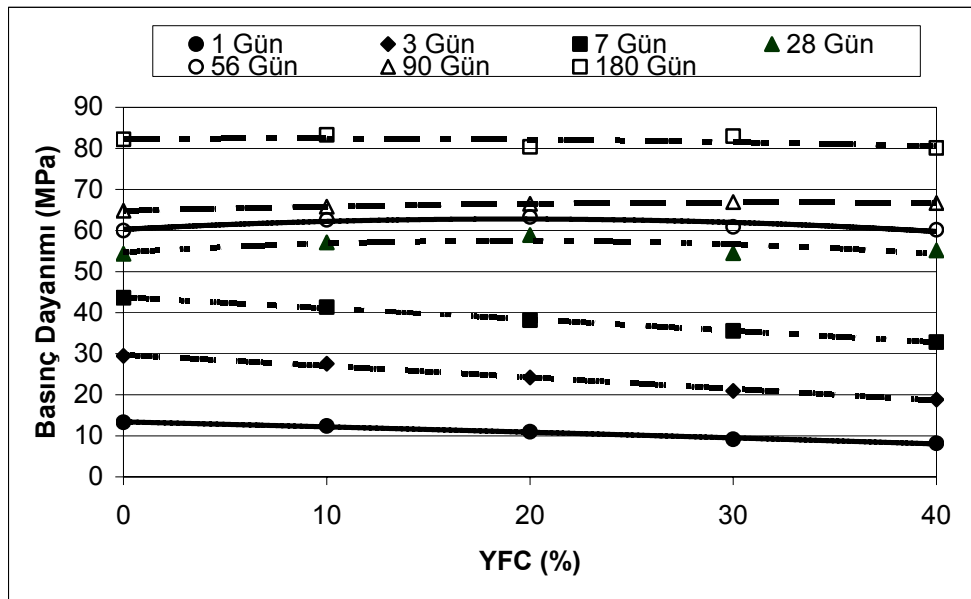
Sülfat etkisiyle oluşan genleşmelerin tespiti amacıyla 25x25x285 mm boyutlu prizmatik harç çubuğu örnekleri hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımların basınç dayanımlarının belirlenmesi için ise 50x50x50 mm boyutlu küp örnekler kullanılmıştır. Karışımlarda kum/çimento oranı 2.75, su/çimento oranı 0.485 alınmıştır. Tüm karışımların yayılma miktarları % 105-120 aralığındadır. Yüksek fırın cürufunun harçların sülfat dayanıklılığına etkisinin izlenmesi için çimento yerine değişik oranlarda (% 10, % 20, % 30, % 40) YFC kullanılmıştır.

Örnekler suda, sürekli sülfatta ve sülfatta ıslanma kuruma olmak üzere üç farklı koşulda saklanmıştır. Harç çubuğu örneklerinin genleşmeleri 26 hafta boyunca ölçülmüştür. Küp örneklerden suda kür edilenlerin dayanımları belirli yaşlarda, sülfat etkisine maruz kalanların dayanımları ise 26 hafta sonunda tespit edilmiştir.

Deneyler buhar kürü uygulanmış örnekler üzerinde de tekrar edilmiştir. Buhar kürü uygulaması şu şekildedir: Ön bekleme aşamasında örnekler dökümden sonra 5 saat süre ile laboratuvar ortamında havada bekletilmişlerdir. Isınma aşamasında sıcaklık 13.0 °C/saat sabit hızla arttırılmıştır. Buhar kürü aşamasında ise örnekler 9 saat süre ile 60 °C'de bekletilmişlerdir. Kür sürecini tamamlayan örnekler laboratuvar ortamında soğumaya bırakılmışlardır.

2.1. YFC Kullanımının Harçların Basınç Dayanımına Etkisi

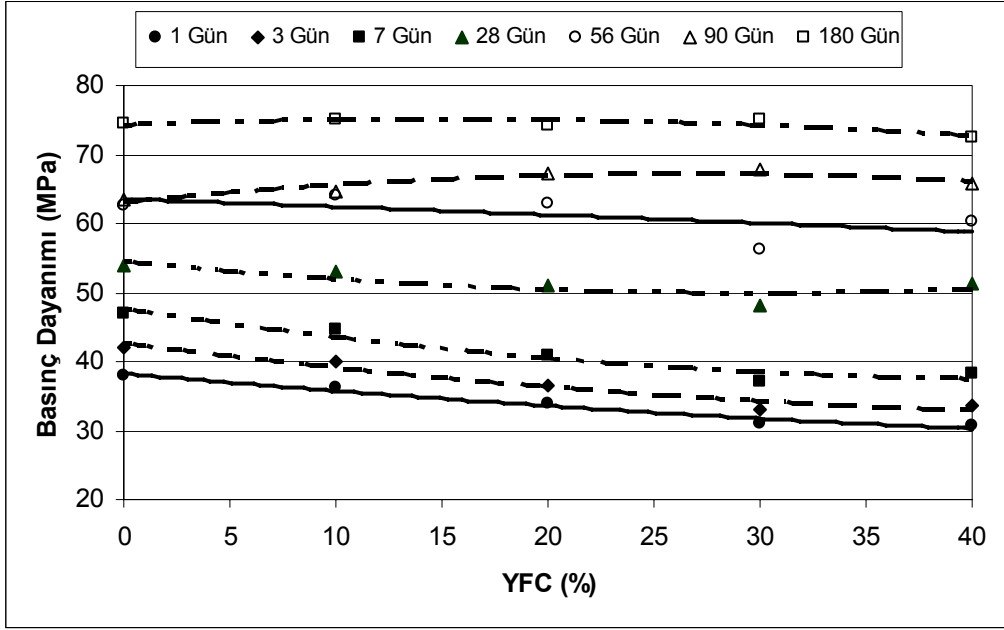
Su içinde kür edilmiş örneklerin basınç dayanımlarının YFC oranına göre zamanla değişimi Şekil 1'de grafik olarak gösterilmiştir. Şekil 1'deki dikkat çekici noktalar şu şekilde özetlenebilir; çimentonun YFC ile yüksek oranlarda (% 30 ve % 40) yer değiştirilmesi özellikle erken dayanımlarda bir miktar düşüslere yol açmıştır. Ancak, puzolanik reaksiyonun gelişmesiyle birlikte 28 günlük dayanımlarda bu farkın kapandığı görülmektedir. Daha uzun sürede ise, tüm yer değiştirme oranlarında dayanımlar, sadece çimento içeren kontrol karışımının dayanımı mertebesinde.



Şekil 1. YFC kullanımının basınç dayanımına etkisi (suda kür)

Buhar kürü uygulanmış (9 saat 60 °C) daha sonra suda bekletilmiş örneklerin basınç dayanımlarının YFC oranına göre zamanla değişimi Şekil 2'de verilmiştir. Buna göre; buhar

kürünün tüm serilerde erken dayanımları artırma etkisi belirgindir. YFC kullanımı özellikle erken dayanımlarda düşmelere yol açmıştır. Ancak, bu etkinin ilerleyen yaşlarda ortadan kaybolduğu söylenebilir. Şekil 1 ve Şekil 2 karşılaştırıldığında ise, tüm karışımlarda buhar kürü geçirmiş örneklerin dayanımları, sürekli suda kür edilmiş örneklerin dayanımlarından bir miktar düşüktür. Bu durum, buhar kürünün hidratasyonun gelişimini hızlandırması nedeniyle, normal sıcaklıklarda su içinde hidrate edilmiş çimento matrisine kıyasla daha gözenekli yapı oluşturması ile açıklanabilir.



Şekil 2. YFC kullanımının basınç dayanımına etkisi (buhar kürü)

2.2. Sülfat Etkisi

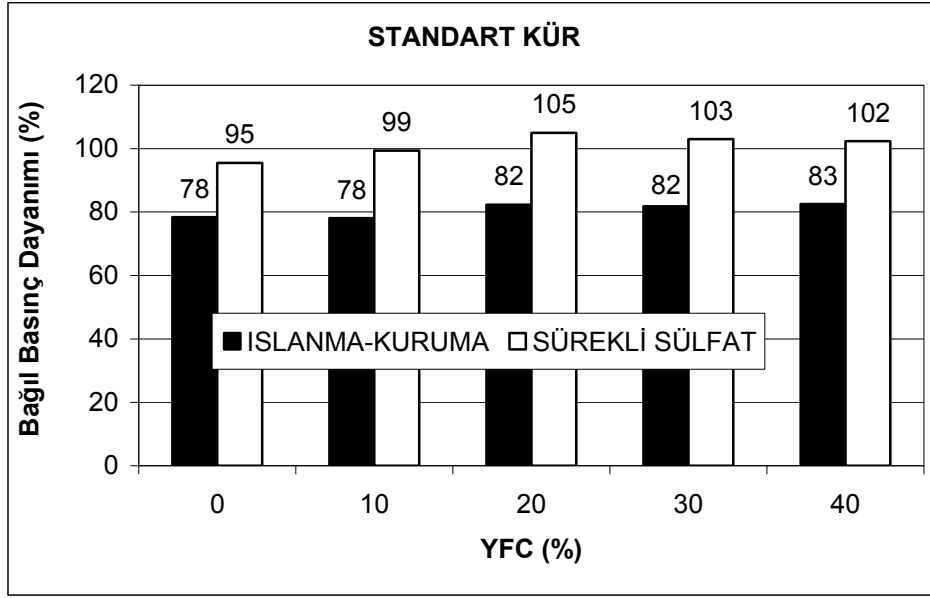
Hazırlanan karışımların dayanımlarının 20 MPa'a ulaşma süreleri 50x50x50 mm boyutlu küp örneklerle tespit edilmiş, bu dayanıma ulaşan karışımlara ait çubuk ve küp örnekler sülfat etkisine bırakılmışlardır. ASTM C1012'ye göre 50 g/l'lik sodyum sülfat çözeltisi kullanılmalıdır. Ancak, daha önce yapılan çalışmada söz konusu çözeltinin, hazırlanan karışımların sülfat dayanıklılığı açısından farklılıklarını ortaya koymada yetersiz kaldığı gözlenmiştir (Tosun vd., 2003). Bu nedenle, bu çalışmada 150 g/l'lik sodyum sülfat çözeltisi kullanılmıştır. Sülfat çözeltisi örnekler iki şekilde etki ettirilmiştir. Birinci grup örnekler sürekli bu çözeltide saklanmıştır. Diğer grup ise bir gün süreyle çözeltide ıslatılıp ertesi gün 50 °C etüvde kurumaya bırakılmıştır. Bu şekilde 90 ıslanma-kuruma devri gerçekleştirilmiştir.

Başlangıçta çözeltinin pH değeri 8,0 olarak ölçülmüştür. Zamanla harçların kirecinin çözülmesi sebebiyle pH'ı artan çözelti 4 haftada bir değiştirilmiştir.

Sülfat etkisi sebebiyle harç çubuklarının boylarında oluşan değişimler 26 hafta süreyle ölçülmüştür. Ayrıca bu süre sonunda sülfat etkisi ile değişen dayanımlar da küp örneklerle tespit edilmiştir.

Sülfat etkisine maruz kalmış örneklerin suda beklemiş kontrol örneklerine göre bağlı basınç dayanımları Şekil 3'te görülmektedir. Buna göre, sülfat çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisi tüm serilerde basınç dayanımını kaybına yol açmıştır. Sürekli sülfatta bekleyen örneklerde ise dayanım kayıpları düşük mertebededir. YFC içeren bazı serilerde dayanım

kayıbı değil aksine dayanım artışı görülmüştür. Bu durum, örneklere sızmış sülfat tuzlarının ıslanıp-kuruması nedeniyle oluşan fiziksel yıpratıcı etkinin, kimyasal etkiden daha baskın faktör olduğunu ve kimyasal bozulma sürecini hızlandığını göstermektedir. Islanma-kuruma etkisi bazı örneklerin yüzeylerinde dökülmelere yol açmıştır. Uçucu kül kullanılarak gerçekleştirilen önceki çalışma ile kıyaslandığında, sülfat çözeltisinin konsantrasyonun (50 g/l yerine 150 g/l) ve etki süresinin arttırılması (16 hafta yerine 26 hafta) bozulmanın şiddetini oldukça hızlandırmıştır (Tosun, vd., 2003). Şekil 3'te karışımların kıyaslanmasından, belirgin olmamakla birlikte, YFC kullanımı ile kalan dayanımlarda az bir artma eğilimi olduğu görülmektedir.

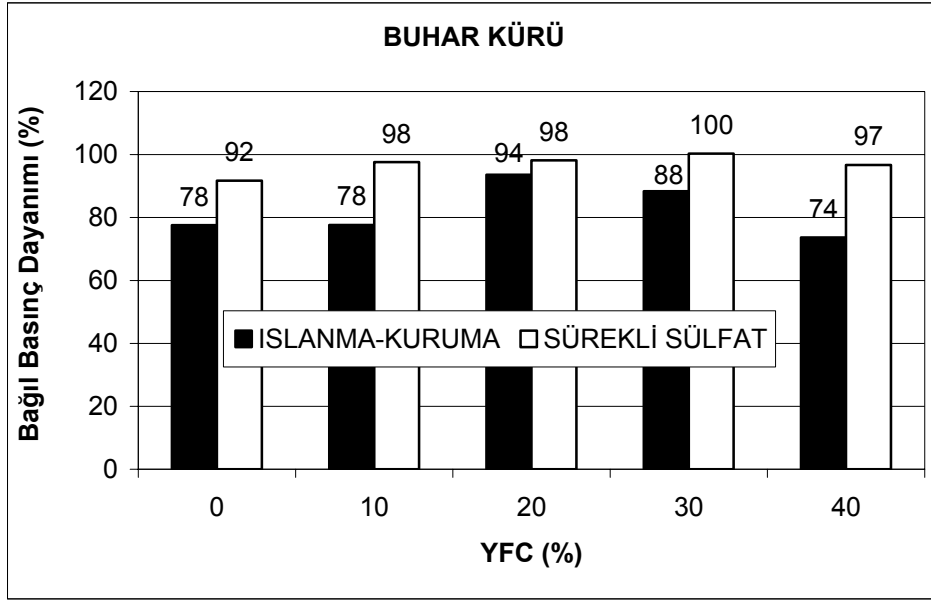


Şekil 3. Sülfat çözeltisine maruz bırakılmış örneklerin, suda beklemiş kontrol örneklerine kıyasla basınç dayanımları

Şekil 4'te buhar kürü geçirmiş, sülfata maruz kalmış örneklerin basınç dayanımları, suda bekletilmiş aynı yaştaki kontrol örneklerinin basınç dayanımlarına kıyasla gösterilmiştir. Buhar kürü geçirmiş örneklerin, sülfata ıslanma-kuruma şeklinde maruz bırakılması dayanım kayıplarına yol açmıştır. YFC kullanımı, belirgin olmamakla birlikte genellikle kalan dayanımlarda artışa yol açmıştır. Şekil 3 ve Şekil 4 kıyaslandığında, genel olarak normal kürlü ve buhar kürlü örneklerin davranışlarının benzer olduğu söylenebilir.

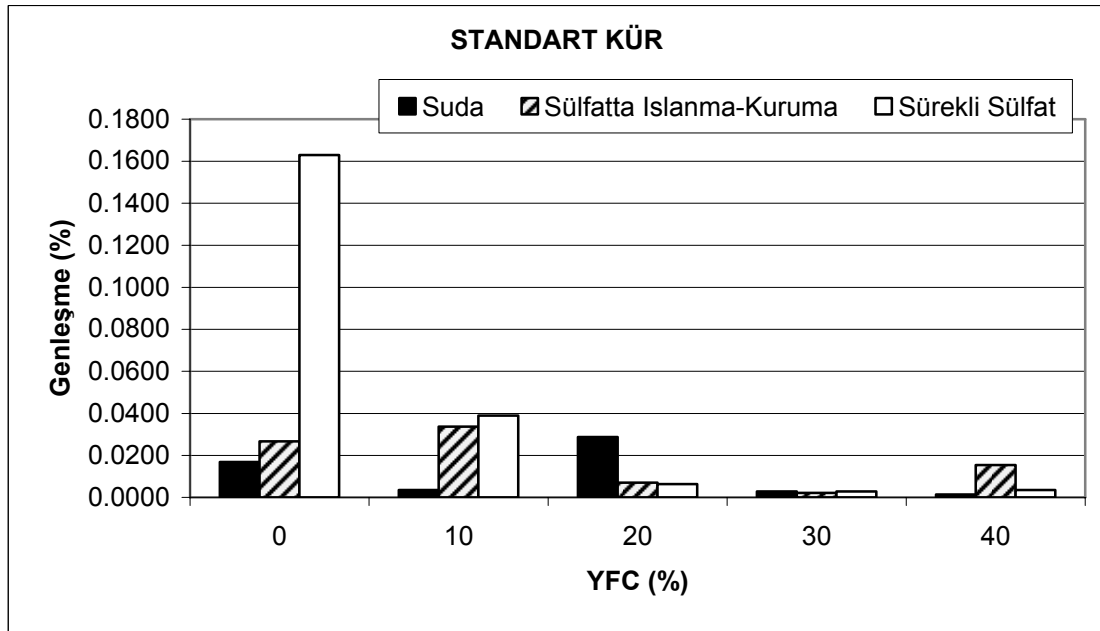
Suda kür edilmiş harç çubuklarının, suda, sülfatta bekletilmeleri veya sülfatta ıslanma-kurumaya maruz bırakılmaları halinde 26 hafta sonundaki genleşmeleri Şekil 5'te grafik olarak gösterilmiştir. Şekil 5'ten görüldüğü üzere suda bekletilen harçlarda genleşmeler çok düşük mertebededir. Islanma-kuruma etkisinde de genleşme ve büzülmenin bir arada oluşması nedeniyle elde edilen sonuç genleşme düşük seviyededir. Örneklerin sülfat çözeltisinde sürekli bekletilmeleri halinde ise bağlayıcı olarak sadece Portland çimentosu içeren karışım büyük oranda genleşmiştir. Ancak, cüruf kullanımı ile genleşmelerin azaldığı görülmektedir. ASTM C 1157 standardında 6 aylık genleşme limiti, sülfata yüksek derecede dayanıklılık için %0.05, orta derecede dayanıklılık için %0.1 olarak verilmektedir. Söz konusu genleşmeler 50 g/l Na₂SO₄ çözeltisi için tanımlanmıştır. Bu çalışmada 150 g/l sodyum sülfat çözeltisi kullanılmıştır. Bu bağlamda, cüruf içeren serilerin sülfat dayanıklılığının çok iyi olduğu söylenebilir. Sadece Portland çimentosu içeren karışımın genleşmesi ise standart

limitlerini aşmaktadır. Ancak çözelti konsantrasyonu standartta tariflenen değerin üzerinde tutulduğu için kesin bir yargıya varılması doğru olmayabilir.

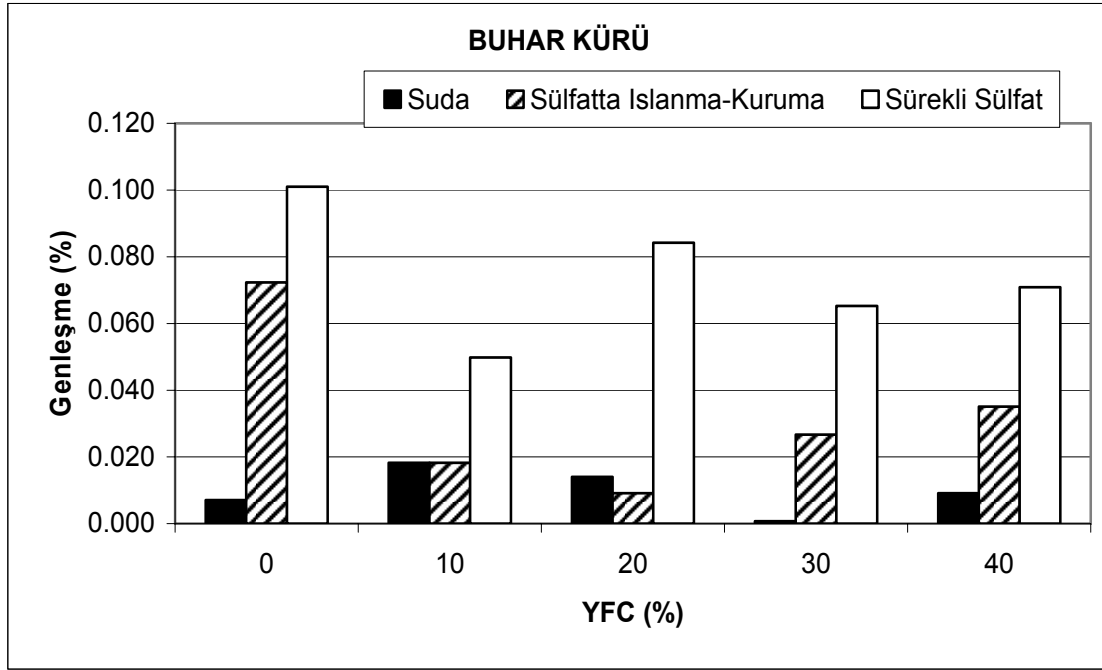


Şekil 4. Buhar kürü geçirmiş, sülfat çözeltisine maruz bırakılmış örneklerin, suda beklemiş kontrol örneklerine kıyasla basınç dayanımları

Şekil 6'da buhar kürü geçirmiş örneklerin suda ve sülfatta bekletildiğinde gösterdikleri genleşmeler görülmektedir. Cüruf kullanımının genleşme mertebesini azalttığı görülmektedir. Suda bekleyen ve sülfata ıslanma-kuruma şeklinde maruz kalan örneklerde genleşmeler oldukça düşük seviyelerdedir. Şekil 5 ve 6 kıyaslandığında ise, sadece Portland çimentosu içeren karışımların sürekli sülfatta bekletilmesi halinde elde edilen genleşme mertebesi buhar kürü ile azalırken, cürufli karışımlarda bir miktar artmıştır.



Şekil 5. Suda kür edilmiş örneklerin 26 hafta sonundaki genleşmeleri



Şekil 6. Buhar kürü geçirmiş örneklerin 26 hafta sonundaki genişmeleri

3. SONUÇLAR

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Çimento yerine YFC kullanımı erken dayanımları düşürmüştür. Ancak bu etkinin ilerleyen yaşlarda büyük oranda kaybolduğu görülmektedir. Ayrıca, buhar kürü ile erken dayanımlar artmaktadır. Ancak, bu durumda da nihai dayanımlarda bir miktar düşmeler görülmektedir.
- Sülfata maruz kalmış örneklerin basınç dayanımları kontrol örnekleri ile karşılaştırıldığında, özellikle ıslanma-kuruma etkisinde tüm karışımlarda basınç dayanımlarında azalmalar görülmüştür. Sürekli sülfat etkisinde ise yüksek fırın cürufu içeren karışımlarda bir miktar dayanım artışı söz konusudur.
- Sülfata ıslanma-kuruma şeklinde maruz bırakılan karışımlarda 26 hafta sonunda elde edilen genişme değerleri oldukça düşük mertebededir. Bu durum kuruma sırasında oluşan büzülmenin etkisi ile açıklanabilir.
- Sürekli sülfat çözeltisinde 26 hafta bekletilen, bağlayıcı olarak sadece Portland çimentosu içeren karışımın genişme mertebesinin ASTM 1157’de tariflenen sınırları aştığı, buhar kürü ile genişme mertebesinin azaldığı belirlenmiştir. Ancak bu çalışmada standartta belirtilen konsantrasyonun (50 g/l) üzerinde bir çözelti (150 g/l) kullanıldığı da dikkate alınmalıdır. Yüksek fırın cürufu kullanımı ile genişmelerin azaldığı ve standart limitlerinin sağlandığı görülmüştür. Buhar kürü durumunda YFC içeren karışımların genişmelerinin bir miktar arttığı da belirlenmiştir.
- Suda 26 hafta boyunca bekletildiğinde tüm karışımların hacim sabitliklerini korudukları, oluşan genişmelerin (genellikle < % 0.02) çok düşük seviyelerde kaldığı görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Yazar bu çalışmada kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufunu temin eden OYSA çimento A.Ş.'ye teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Akman M.S. (1992): "Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi", İ.T.Ü. Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul.
- Amoudi O.S.B. (2002): "Attack on Plain and Blended Cements Exposed to Aggressive Sulfate Environments", Cement and Concrete Composites, Vol. 24, s. 305-316.
- ASTM C 1012-95a: "Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution", USA.
- Baradan B., Yazıcı H, Ün H. (2002): "Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)", D.E.Ü. Müh. Fak. Yayın No 298, İzmir.
- Chindaprasirt P., Homwuttiwong S., Sirivivatnanon V. (2004): "Influence of Fly Ash Fineness on Strength, Drying Shrinkage and Sulfate Resistance of Blended Cement Mortar", Cement and Concrete Research, Vol. 34, s. 1087-1092.
- Hekal E.E., Kishar E., Mostafa H. (2002): "Magnesium Sulfate Attack on Hardened Blended Cement Pastes under Different Circumstances", Cement and Concrete Research, Vol. 32, s. 1421-1427.
- Irassar E.F., Gonzalez M., Rahhal V. (2000): "Sulphate Resistance of Type V Cements with Limestone Filler and Natural Pozzolana", Cement and Concrete Composites, Vol. 22, p. 361-368.
- Irassar E.F., Maio A.D., Batic O.R. (1996): "Sulfate Attack on Concrete with Mineral Admixtures", Cement and Concrete Research, Vol. 26, s. 113-123.
- Li G., Zhao X. (2003): "Properties of Concrete Incorporating Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag", Cement and Concrete Composites, Vol. 25, s. 293-299.
- Mehta P.K., Monteiro P.J.M. (1997): "Concrete Microstructure, Properties and Materials", Indian Edition, India.
- Monteiro P.J.M., Kurtis K.E. (2003): "Time to Failure for Concrete Exposed to Severe Sulfate Attack", Cement and Concrete Research, Vol. 33, p. 987-993.
- Neville A.M. (1997): "Properties of Concrete", Final Edition, Longman Ltd., England.
- Santhanam M., Cohen M.D., Olek J. (2002): "Modeling the Effects of Solution Temperature and Concentration during Sulfate Attack on Cement Mortars", Cement and Concrete Research, Vol. 32, p. 585-592.
- Thomas M.D.A., Shehata M.H., Shashiprakash S. G., Hopkins D.S., Cail K. (1999): "Use of Ternary Cementations Systems Containing Silica Fume and Fly Ash in Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 29, p. 1207-1214.
- Tosun K., Yazıcı H., Yiğiter H., Baradan B. (2003): "Uçucu Kül İçeren Çimento Harçlarının Sülfat Dayanıklılığının İncelenmesi", V. Ulusal Beton Kongresi. İstanbul.
- Yeğınobalı A. (1999): "Betonun Dayanıklılığı II, Kimyasal Etkenler", TCMB Çimento Araştırma Enstitüsü Seminer Notları, Ankara.