

ARAŞTIRMA MAKALESİ /RESEARCH ARTICLE

**SÜLFATLI ORTAMLARIN ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN
CÜRUFU HARÇLARIN MİKROYAPISINA ETKİSİ**

İlker Bekir TOPÇU¹, Mehmet CANBAZ¹

ÖZ

Ham demir üretimi sırasında demir-çelik fabrikalarının atığı olarak açığa çıkan yüksek fırın cürufu (YFC) beton üretiminde ince agrega yerine veya öğütülmesi durumunda çimento yerine kullanılmaktadır. Betonda YFC kullanılması ile yapıların önemli sorunu olan sülfata dayanıklılık artmaktadır. Sülfat etkisini belirlemek için ASTM C 1012'den yararlanılmış ve üretilen harç numunelerinde YFC, çimento yerine % 0, % 25, % 50, % 75 ve % 100 oranlarında kullanılmıştır. YFC'yi aktive etmek için NaOH, NaCO₃, Na₂SiO₃ kullanılmıştır. Üretilen 25x25x285 mm ve 5x5x5 cm boyutlarında numuneler, sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmiştir. Boy değişimleri, dayanım kayıpları incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri için numuneler kesilerek 1 cm boyutlarında küpler elde edilmiştir. Taramalı elektron mikroskopunda (SEM) yüzeylerin fotoğrafları çekilmiş ve içerdiği elementler belirlenmiştir.* Sülfat etkisi ile alkalilerle aktive edilmiş YFC'li harçlarda herhangi bir etrenjit oluşumuna rastlanmamış, yer yer kısa mikroçatlak oluşumları görülmüştür. YFC kullanılmayan harçlarında ise bağlayıcı fazda gözenekli yapı meydana gelmiş ve bu yapıda sülfat etkisi ile iğne şeklindeki etrenjit kristalleri oluşmuştur.

Anahtar Kelimeler : Sülfat etkisi, Yüksek fırın cürufu, Alkali, Mikroyapı.

**EFFECTS OF SULFATE ON THE MICROSTRUCTURE OF ALKALI ACTIVATED
SLAG MORTARS**

ABSTRACT

Blast-furnace slag (BFS), which is an iron-steel factories waste occurred during the production of unrefined iron, is used as a fine aggregate or in case of being granulated, as a replacement of cement in concrete mixtures. Durability to sulfate attack, which is an important problem of structure, increased with using BFS in concrete production. ASTM C 1012 was used to determine the effect of sulfate attack and BFS replaced cement by the amount of 0, 25, 50, 75 and 100 %. For activating BFS, NaOH, NaCO₃ and Na₂SiO₃ were used. Produced mortar cement specimens of 5x5x5 cm and 25x25x285 mm were kept in sodium sulfate solution. Length changes and strength losses were examined. For examining the microstructure, specimens were cut into the size of 1 cm cubes. SEM photos were taken from the specimen surfaces and including elements were determined. Under sulfate effect, there is no ettringite form but small microcracks were seen in alkali activated BFS mortars. Porous structure was occurred in binding phases of control mortars and in this structure, needle shape ettringite crystals were formed with sulfate attack.

Keywords: Sulfate attack, Blast furnace slag, Alkali, Microstructure.

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir.
mcanbaz@ogu.edu.tr

*Anadolu Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, SEM-EDX, XRD Laboratuvarları

1. GİRİŞ

YFC demir üretimi sırasında açığa çıkmaktadır. Oldukça yüksek sıcaklıkta olan YFC su içerisine dökülme veya basınçlı su püskürtülme gibi çeşitli yöntemlerle çok hızlı soğutulursa amorf yapıda granüle halde ince bir malzeme haline gelmektedir. Bu hali ile betonda ince malzeme olarak kullanılabilmesi gibi öğütülmesi durumunda çimento üretiminde ve beton katkı maddesi olarak kullanılabilir (Tokyay ve Erdoğan, 2003; Topçu, 2006). YFC kullanımı betonun dayanıklılığını olumlu yönde etkilemektedir (Arslan, 2001). Sülfata dayanıklılığı arttırmada YFC etkilidir. Sülfat beton içerisinde reaksiyonlar yaparak betonun zamanla bozulmasına yol açar. Sülfat zeminden gelebileceği gibi, deniz suyundan, çimento üretimi sırasında fazla katılan alçı taşından gelebilir. Sülfatlar CH ve C₃A ile yaptıkları reaksiyon sonucunda kalsiyum sülfat alüminatları oluşturur. Bu reaksiyonlar sonucunda hacim % 227 artar. Beton patlayarak parçalanır. Özellikle deniz suyundaki magnezyum sülfat CSH yapısını da çözmektedir. YFC katkılı çimentolarda C₃A miktarı az olduğu için sülfata dayanıklılığı oldukça fazladır. Sülfata dayanıklı çimentoda YFC miktarı % 65'tir (Tokyay ve Erdoğan, 2003; Baradan vd., 2006). Sülfata dayanıklılık deneylerinde sodyum sülfat kullanılması durumunda etrenjit oluşumları ve CSH'lı yapıların bozulduğu görülmüştür. Etrenjit oluşumunda serbest Al₂O₃ miktarı, sülfat etkisine dirençte ana etkenlerden biridir. Sodyum sülfat ile sağlanan sülfat etkisine karşı dirençte % 92 oranında YFC kullanılması serbest Al₂O₃ miktarını düşürmesi ile etkilidir. Magnezyum sülfat ile sülfat etkisi sağlandığında benzer reaksiyonlar oluştuğu, farklı olarak CSH jellerinin bozulması zayıf yapıda magnezyum silikat hidrat oluşumu görülmüştür. % 92 oranında YFC kullanılması sodyum sülfat çözeltisinde olumlu yönde etki yaparken, magnezyum sülfat çözeltisinde olumsuz yönde etki yaptığı görülmüştür. Erken safhada oluşan reaksiyon monosülfat şeklindedir (Gollop ve Taylor, 1996).

YFC sodyum hidroksit (NaOH), sodyum karbonat (Na₂CO₃), cam suyu (Na₂SiO₃) gibi alkalilerle aktive edilebilmektedir (Zhou vd., 1993; Jimenez ve Puertas, 1997; Peter ve Jack, 1996; Shi ve Day, 1995). Beton dayanımı ve işlenebilirliği kullanılan alkali kombinasyonuna bağlı olarak değişim göstermektedir (Wang vd., 1994). Alkalilerle aktive edilmiş YFC'li betonların sülfata karşı direnci incelendiğinde sülfat etkisinde dikkate değer bir hacim artışı meydana gelmemiştir. Alkalilerle aktive edilmiş YFC'li betonların sülfat etkisinde basma

dayanımları % 23'e ulaşan oranlarda düşmüştür (Bakharev vd., 2002). Yapılan çalışmalarda YFC'nin alkalilerle aktive edilmesi ile çimento yerine çok yüksek oranlarda kullanılabilmesi görülmüştür. YFC kullanılması ile betonun kimyasal etkiler altındaki performansı ve işlenebilirlikte artmakta, geçirimsizlik azalmaktadır. Özellikle deniz yapıları için önemli sorun olan sülfat etkisine karşı dayanıklılığı artmaktadır.

Bu çalışmada çeşitli alkali kombinasyonları kullanılarak aktive edilen YFC, harç üretiminde çimento yerine yüksek oranda kullanılması hedeflenmiş ve böylece sülfatlı ortamların harçlara verdiği zarar azaltılmaya çalışılmış, sülfat etkisi ile meydana gelen yapısal değişiklikler SEM ve EDX yardımı ile mikro düzeyde belirlenmiştir (Canbaz, 2007; Topçu ve Canbaz, 2006; Topçu ve Canbaz, 2007).

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Malzemeler

Agrega: Set Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. Trakya Çimento Fabrikası tarafından hazırlanan TSE EN 196-1'e uygun olan Rilem Cembureau Standart kumu kullanılmıştır.

Çimento: ÇİMSA Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. Eskişehir Çimento Fabrikası'nın üretimi olan CEM I 42.5 R çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentoya ait özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

YFC: Erdemir demir-çelik fabrikasından sağlanmıştır. YFC inceliği 60 µ küçük kalacak şekilde öğütülmüştür. Öğütme sırasında ani prize engel olmak için % 2 oranında alçı taşı katılmıştır. Bu YFC'ye ait özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Alkaliler: YFC'yi aktive etmek için sodyum hidroksit (NaOH), sodyum karbonat (Na₂CO₃), cam suyu (Na₂SO₃) kullanılmıştır.

Su: Eskişehir şebeke suyu kullanılmıştır.

Suyun sülfat içeriği 45 mg/Lt, kalsiyum içeriği 57 mg/Lt, magnezyum içeriği 83 mg/Lt, klorür içeriği 49 mg/Lt, buharlaşma bakiyesi 438 mg/Lt ve pH 6.75'tir.

Tablo 1. Kullanılan çimento ve YFC'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl	Kızdırma Kaybı	İncelik cm ² /g	Özgül Ağırlık
YFC	34.09	12.19	0.61	30.82	6.14	0.03	0.45	0.56	1.57	0.001	0.1	2230	2.84
CEM I	19.23	5.44	3.48	63.62	0.88	0.09	0.55	0.68	2.17	0.011	3.2	2860	3.11

2.2. Mikroyapı Çalışmaları İçin Numune Hazırlanması ve Deney Yöntemleri

Sülfat etkisini belirlemek için ASTM C 1012'den yararlanılmış ve üretilen harçlarda YFC, çimento yerine % 0, % 25, % 50, % 75 ve % 100 oranlarında kullanılmıştır. YFC'yi aktive etmek için NaOH, Na₂CO₃, Na₂SiO₃ kullanılmıştır. Ayrıca hazırlanan harç karışımlarına bağlayıcılığı arttırmak için YFC'nun % 1 oranında kireç katılmıştır. Karışım oranı bağlayıcı:su:kum sırası ile 1:0.5:3 olarak alınarak karışımlar hazırlanmış, 5x5x5 cm ve 25x25x285 mm boyutlarında kalıplara dökülmüştür. Çubuk şeklindeki harç numuneleri 28 gün standart kürede bekletildikten sonra su ve 50000 mg/l sodyum sülfat kullanılarak hazırlanan çözeltide bekletilmiştir. Numunelerin boyları komparatör yardımı ile ölçülüp değişimler incelenmiştir. Küp numuneler 28 günlük dayanımlarına ulaştıklarında 50000 mg/l sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş, kontrol harçlarına göre dayanım kayıpları incelenmiştir. Dayanım kayıplarını belirlemek için ELE marka tek eksenli basma deney aleti kullanılarak basma deneyleri yapılmış ve basma dayanımları hesaplanmıştır. Standart kür ortamında bekleyen numunelerin basma dayanımları ile sülfat ortamında bekleyen numunelerin basma dayanımları oranlanmış ve yüzde olarak bağıl basma dayanımları bulunmuştur. Mikroyapı incelemeleri için numuneler kesilerek 1 cm boyutlarında küpler elde edilmiştir. Mikroyapı fotoğraflarının çekilmesi amacı ile mikroyapı laboratuvarına götürülen numuneler iletkenliğin sağlanması için altın ile kaplanmıştır. Marka ve modeli ZEISS SUPRA 50 VP olan taramalı elektron mikroskopunda yüzeylerin fotoğrafları çekilmiş ve element içeriği belirlenmiştir.

3. SONUÇLAR VE İRDELEME

Sülfat etkisinde kalan harçların 250 günlük bağıl basma dayanımları Şekil 1'de gösterilmiştir. Bağıl basma dayanımları % 85-50 arasında değişmektedir. Alkali aktive edilmiş YFC oranı arttıkça harçların bağıl basma dayanımları genel olarak artmıştır. Tüm alkali kombinasyonları için artma oranı birbirine yakın çıkmıştır. En büyük artma oranı % 25.7 ile aktivatör olarak NaOH+Na₂SiO₃ alkali

kombinasyonu kullanılan harçlarda görülmüştür. Yapılan çalışmalarda da görüldüğü gibi zamanla sülfat etkisi ile oluşan basma dayanım kayıpları artmıştır (Gollop ve Taylor, 1996). Sülfat etkisinde kalan, NaOH+Na₂CO₃ ile aktive edilen harç çubuklarının boy değişimleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Boy değişimleri 39 hafta sonunda % 0.015 kadar ulaşmıştır. % 25 alkali aktive edilmiş YFC kullanılması durumunda en yüksek boy değişimleri görülmüş ve 26 hafta sonunda bu numunelerin dağıldığı görülmüştür. Genel olarak % 100 YFC kullanılması veya hiç kullanılmaması durumunda bağlayıcı yapı, sadece çimento veya sadece alkali aktive edilmiş YFC'den meydana geldiği için daha uyumlu olmakta, bu da genleşmeleri azaltıcı yönde etki yapmaktadır.

En az genleşme % 100-75 oranında alkali aktive edilmiş YFC kullanılan numunelerde görülmüştür. Buradan alkali aktive edilmiş YFC'li harçların sülfat saldırısı sonunda oluşan genleşmeleri azalttığı söylenebilir. Boy değişimleri ilk haftalarda tüm numunelerde hızlı bir artış gösterirken ileriki haftalarda bu artış oranı % 100-75-0 alkali aktive edilmiş YFC'li numunelerde azalmış ve sabit hale gelmiştir. Sülfat etkisinde kalan, NaOH+Na₂SiO₃ ile aktive edilen harç çubuklarının boy değişimleri Şekil 3'de gösterilmiştir. Boy değişimleri 39 hafta sonunda % 0.015 kadar ulaşmıştır. % 50 alkali aktive edilmiş YFC kullanılması durumunda en yüksek boy değişimleri görülmüştür. En az genleşme, % 100 oranında alkali aktive edilmiş YFC kullanılan numunelerde görülmüştür. 13 haftaya kadar tüm numunelerde boy değişimleri birbirine yakın olurken, 13 hafta sonrasında % 25-50 oranında alkali aktive edilmiş YFC'li numunelerde boy değişimleri oldukça fazla artmıştır.

Sülfat etkisinde kalan, Na₂SiO₃ ile aktive edilen harç çubuklarının boy değişimleri Şekil 4'de gösterilmiştir. Boy değişimleri 39 hafta sonunda % 0.02 kadar ulaşmıştır. % 25 alkali aktive edilmiş YFC kullanılması durumunda en yüksek boy değişimleri görülmüştür. % 100 oranında alkali aktive edilmiş YFC kullanılarak üretilen harç çubukları sülfat çözeltisinde daha ilk haftalarda dağılmıştır.

28 günlük dayanımlarına ulaştıklarında sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen, NaOH-Na₂CO₃, NaOH- Na₂SiO₃, Na₂SiO₃ aktivatör grupları ile aktive edilmiş YFC'li harç numunelerinden alınan kesitler üzerinde SEM ile ikincil elektronlar kullanılarak 250, 2000 ve 15000 büyütme fotoğraflar çekilmiş, 2000 ve 15000 büyütme fotoğraflarında görülen yapıların atomsal içeriği EDX kullanılarak belirlenmiştir. Sülfat etkisi ile meydana gelen genleşmeler dayanımın kayıplarına yol açmış ve numuneden oldukça güç kesit almasına neden olmuştur. Ayrıca mikro düzeyde meydana gelen bu değişimler SEM görüntü kalitesini de etkilemiştir. Şekil 5'de NaOH-Na₂CO₃ ile aktive edilmiş YFC'li harcın mikroyapısı görülmektedir. YFC'li harcın 250 büyütme mikroyapısı incelendiğinde sülfat etkisi ile herhangi bir etrenjit oluşumuna rastlanmamış, yer yer kısa mikro çatlak oluşumları görülmüştür. YFC'li harcın 2000 büyütme mikroyapısı incelendiğinde kum tanesi üzerindeki bağlayıcı faz görülmektedir. Genel olarak doluluğun sağlandığı fakat küçük çatlak oluşumları engellenemediği görülmüştür. YFC'li harcın 15000 büyütme mikroyapısı incelendiğinde bağlayıcı fazın agrega çevresini tamamen sarmadığı görülmüştür. Tablo 2'de, Şekil 5'de "1", "2" ve "3" olarak belirtilen kısımların içerdiği elementler görülmektedir. Si ve O miktarının fazlalığı "1" ile gösterilen kısım kum tanesi olduğunu göstermektedir. K miktarının fazlalığı dikkat çekmektedir.

"2" ile gösterilen kısım Ca, Si, O elementlerinden dolayı kum tanesi üzerindeki CSH jeli olduğu tahmin edilmektedir. Al ve Na elementlerinin fazlalığı dikkat çekmektedir. "3" ile belirtilen kısımda yüksek oranda Si ve O, belirgin oranda Na ve Al görülmüştür. Şekil 6'da NaOH-Na₂SiO₃ ile aktive edilmiş YFC'li harcın mikroyapısı görülmektedir. YFC'li harcın 250 büyütme mikroyapısı incelendiğinde sülfat etkisi ile yüzeyde mikro çatlaklar görülmüştür. Yer yer az miktarda gözenekli yapı oluşmuştur. Genel olarak bağlayıcı yapının dolu olduğu görülmektedir. Yine sülfat etkisi sonucu oluşan etrenjit kristallerine rastlanmamıştır. YFC'li harcın 2000 büyütme mikroyapısı incelendiğinde bağlayıcı fazda sülfat etkisi ile oluşan çatlak görülmektedir. Bağlayıcı fazda görülen mikro boşluklar burada daha belirginleşmiştir. YFC'li harcın 15000 büyütme mikroyapısı incelendiğinde bağlayıcı fazda farklı yapılar oluştuğu görülmektedir.

Tablo 3'te, Şekil 6'da "1", "2" ve "3" ile belirtilen kısmın içerdiği elementler görülmektedir. "1" ile belirtilen kısımda Ca, O, Si

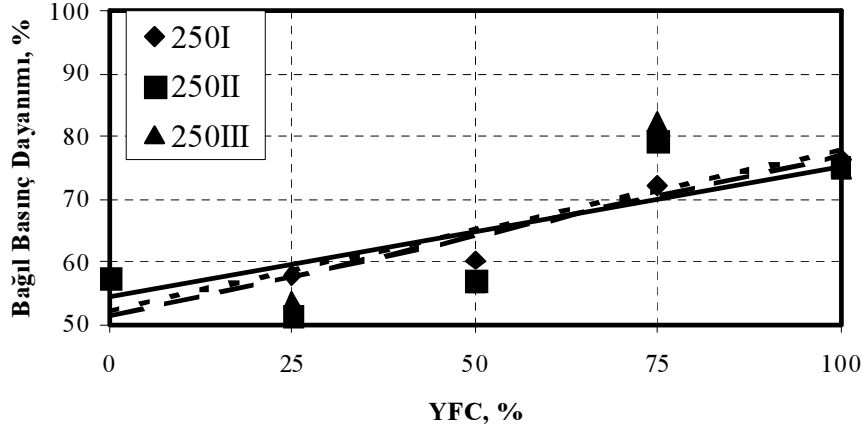
miktarının yüksek olması bu yapının CSH jeli olduğunu göstermektedir. Na, Mg, Al'nin belirgin miktarda bulunması bu elementlerin hidrasyon reaksiyonlarına katıldığını göstermektedir. "2" ile belirtilen kısım Ca, Al, Na ile bağlanmış ve "3" ile belirtilen kısımda farklı olarak K ile de bağlanmış silikatlı yapılar olduğu görülmüştür.

Şekil 7'de Na₂SiO₃ ile aktive edilmiş YFC'li harcın mikroyapısı görülmektedir. YFC'li harcın 250 büyütme mikroyapısı incelendiğinde diğer aktivatörlerle aktive edilmiş YFC'li harçlara göre sülfat etkisi altında bağlayıcı fazda daha boşluklu bir yapı oluştuğu kum taneleri ile bağlayıcı faz arasında ki aderansın da azaldığı görülmüştür. YFC'li harcın 2000 büyütme mikroyapısı incelendiğinde mikroyapıdaki boşluklar ve çatlak oluşumları daha belirgin bir şekilde görülmektedir. YFC'li harcın 15000 büyütme mikroyapısı incelendiğinde bağlayıcı fazda sülfat etkisi ile oluşan farklı yapılar görülmüş ve bu yapılar mikro doluluğu olumsuz yönde etkilemiştir. Tablo 4'te, Şekil 7'de "1", "2" ve "3" olarak belirtilen kısmın içerdiği elementler görülmektedir. "1" ile belirtilen yapıların CSH jelleri ile kaplanmış kum taneleri olduğu söylenebilir. Görülen Na elementi, aktivatörün reaksiyona katıldığını göstermektedir. "2" ile belirtilen kısım Ca, Si, O miktarının fazla olması nedeni ile CSH jeli olduğu ve belirgin olarak görülen Na, Al, S bu yapıya bağlandığı düşünülebilir. "3" ile belirtilen kısımda Ca ve Si miktarı belirgin bir oranda düşmüştür. Buna karşılık Na miktarı yüksek oranda artmıştır. Ayrıca Mg, Al, S miktarlarında da artışlar görülmüştür.

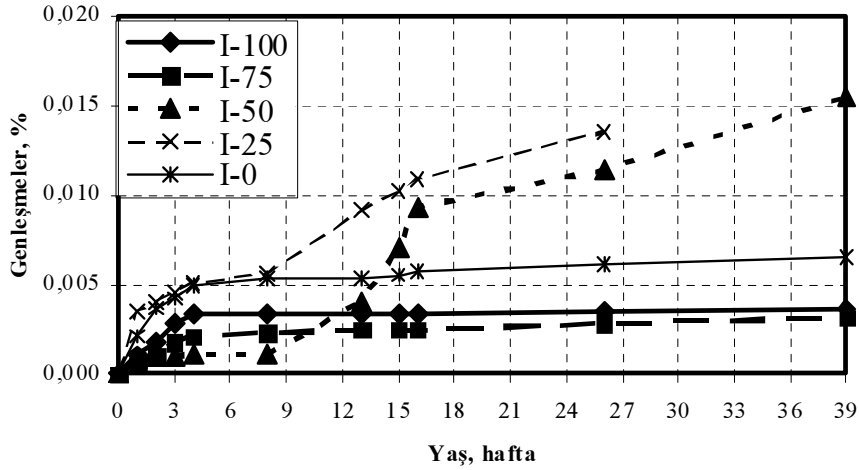
Şekil 8'de YFC'li kontrol harcın mikroyapısı görülmektedir. Kontrol harcın 250 büyütme mikroyapısı incelendiğinde bağlayıcı fazı sülfat etkisi ile doluluğunu kaybetmiş boşluklar oluşmaya başlamış ve gözenekli hale gelmiştir. Kontrol harcın 2000 büyütme mikroyapısı incelendiğinde bağlayıcı fazda meydana gelen gözenekli yapı ve bu yapıda daha önce yapılan çalışmalara benzer olarak sülfat etkisi ile meydana gelen iğne şeklindeki etrenjit kristalleri görülmüştür (Gollop ve Taylor, 1996). Ayrıca bağlayıcı fazda çatlaklar da görülmüştür. Kontrol harcın 15000 büyütme mikroyapısı incelendiğinde CSH jellerinin sülfat etkisi ile bozulması ve meydana gelen boşluklarda etrenjit oluşumları görülmektedir. Sülfat etkisi ile görülen etrenjit oluşumları çeşitli alkalilerle aktive edilmiş YFC'li harçlarda görülmemiştir. Şekil 9'da kontrol harçlarında etrenjit oluşumları detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 5’de, Şekil 8’de “1” ve “2” olarak belirtilen kısımların içerdiği elementler görülmektedir. “1” ile belirtilen kısımda Si miktarında düşüş ve Ca miktarında ki artış dikkat çekmektedir. Buradan silikatlı yapıların bozul-

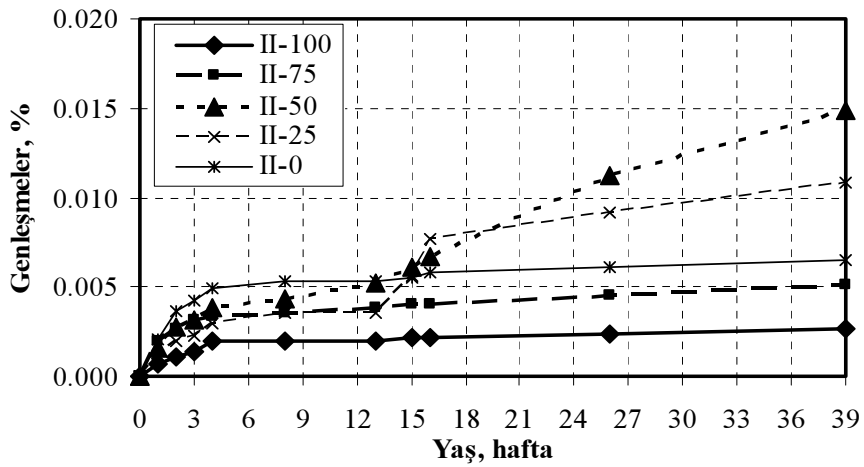
duğu tahmin edilmektedir. “2” ile belirtilen kısımda ise Si miktarı artmış, Ca miktarı azalmıştır. Burada Si, Ca, O miktarları bu yapının halen bozulmamış CSH yapısı olduğunu göstermektedir.



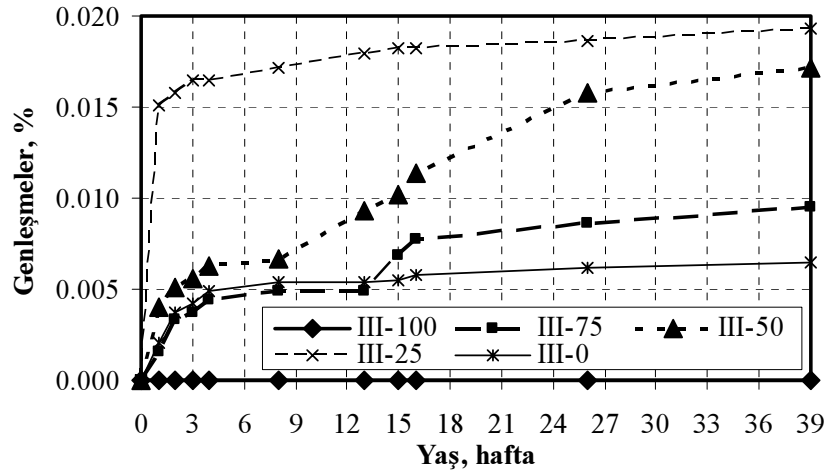
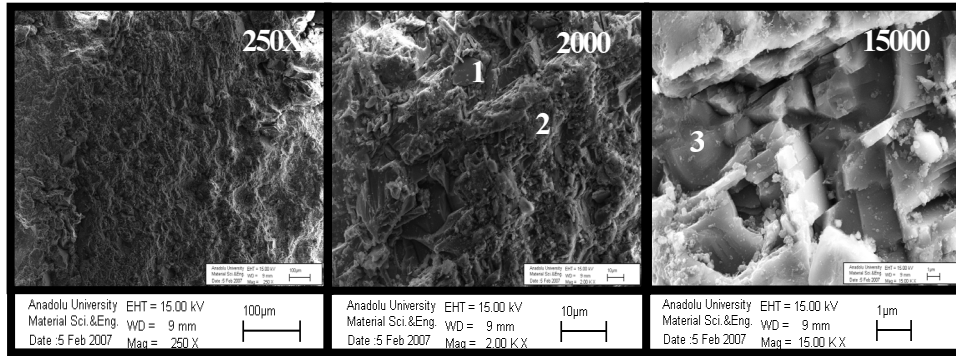
Şekil 1. 250 günlük basma dayanımı deney sonuçları



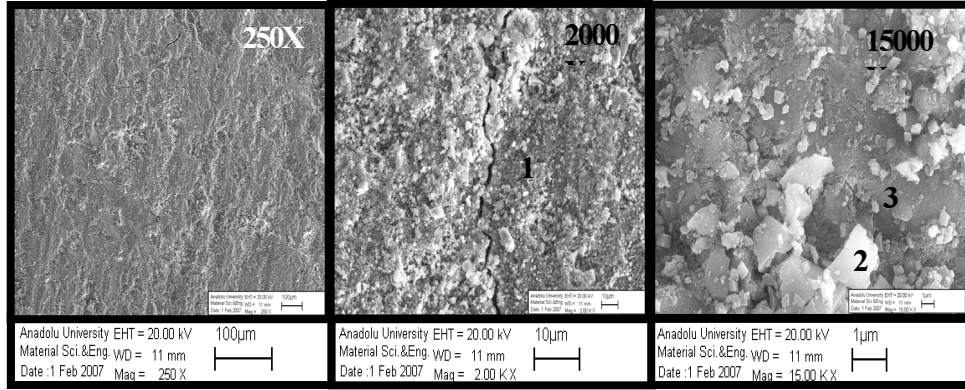
Şekil 2. NaOH+Na₂CO₃ ile aktive edilen harç çubuklarının boy değişimleri



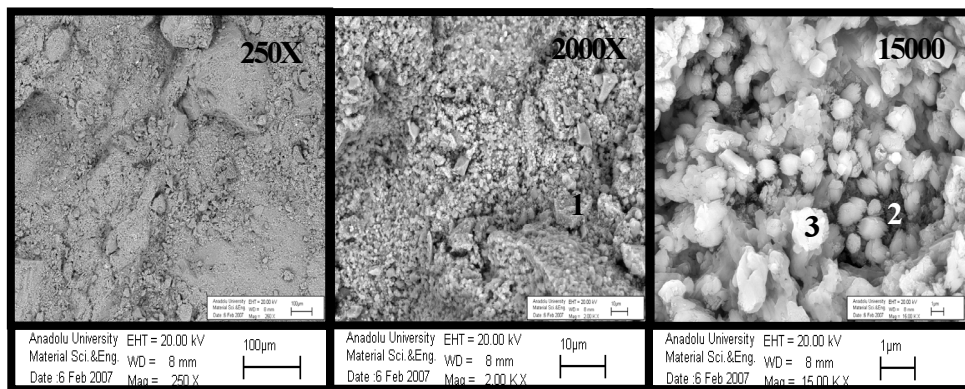
Şekil 3. NaOH+Na₂SiO₃ ile aktive edilen harç çubuklarının boy değişimleri

Şekil 4. Na₂SiO₃ ile aktive edilen harç çubuklarının boy değişimleriŞekil 5. NaOH-Na₂CO₃ ile aktivieli YFC'li harcın mikroyapısıTablo 2. NaOH-Na₂CO₃ ile aktivieli YFC'li harcın EDX analizi

Element		O	Na	Mg	Al	Si	Fe	K	Ca
1	Ağırlıkça %	56.56	0.31	1.65	12.01	20.72	1.93	6.81	--
	Atomal %	70.59	0.27	1.36	8.89	14.73	0.69	3.48	--
2	Ağırlıkça %	45.57	6.73	--	9.66	33.25	--	--	0.84
	Atomal %	56.6	5.82	--	7.11	23.52	--	--	0.42
3	Ağırlıkça %	51.45	7.93	--	8.9	29.27	--	--	--
	Atomal %	62.61	6.72	--	6.42	20.29	--	--	--

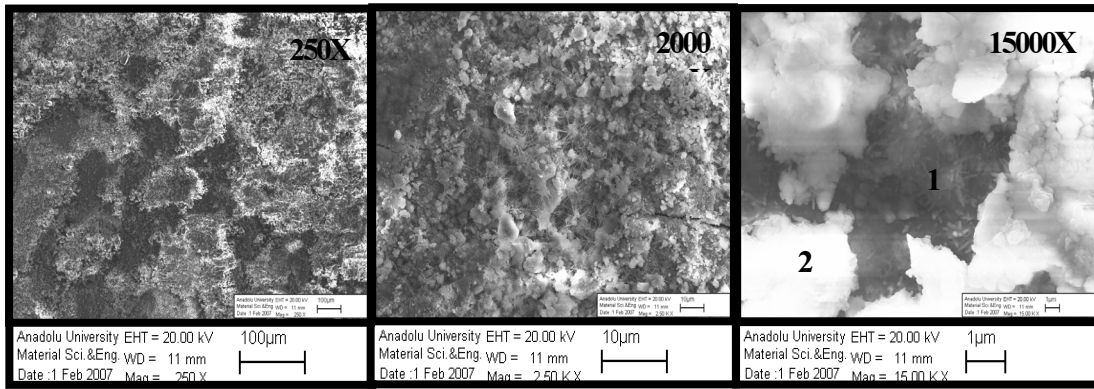
Şekil 6. NaOH-Na₂SiO₃ ile aktiveli YFC'li harcın mikroyapısıTablo 3. NaOH-Na₂SiO₃ ile aktiveli YFC'li harcın EDX analizi

Element		O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	C
1	Ağırlıkça %	55.54	4.19	2.18	3.37	12.34	0.3	0.59	21.14	--
	Atomal %	71.34	3.75	1.84	2.57	9.03	0.19	0.31	10.84	--
2	Ağırlıkça %	59.28	1.33	--	2.13	33.25	--	1.66	2.35	--
	Atomal %	72.27	1.13	--	1.54	23.09	--	0.83	1.14	--
3	Ağırlıkça %	31.41	1.12	--	8.03	30.78	--	14.83	3.45	10.37
	Atomal %	41.47	1.03	--	6.29	23.15	--	8.01	1.82	18.24

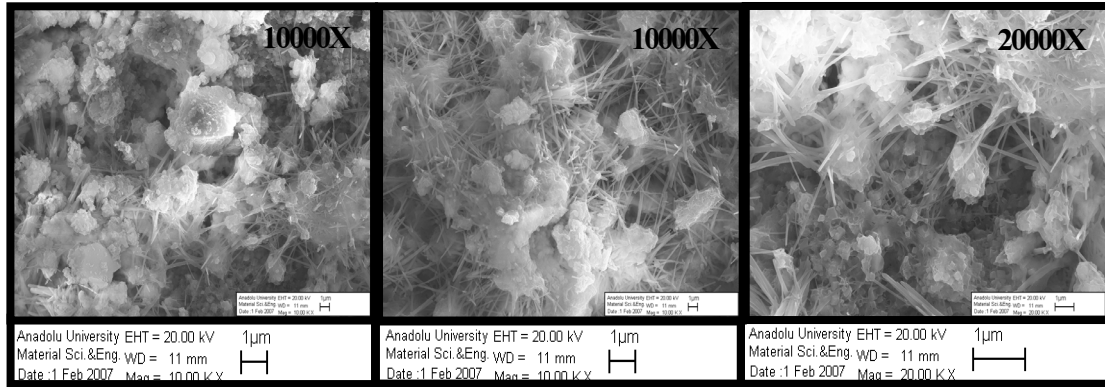
Şekil 7. Na₂SiO₃ ile aktiveli YFC'li harcın mikroyapısı

Tablo 4. Na₂SiO₃ ile aktiveli YFC'li harcın EDX analizi

Element		O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca
1	Ağırlıkça %	40.39	0.92	–	–	48.51	–	–	1.64
	Atomal %	50.05	0.79	–	–	34.24	–	–	0.81
2	Ağırlıkça %	42.42	3.78	0.76	2.45	13.46	4.55	0.97	31.61
	Atomal %	60.64	3.76	0.71	2.07	10.96	3.24	0.57	18.04
3	Ağırlıkça %	51.52	11.57	1.94	3.26	8.72	6.63	0.26	16.1
	Atomal %	66.4	10.38	1.65	2.49	6.41	4.26	0.14	8.28



Şekil 8. Kontrol harcının mikroyapısı



Şekil 9. Etrenjit oluşumları

Tablo 5. Kontrol harcın EDX analizi

Element		O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
1	Ağırlıkça %	42.89	2.56	0.72	1.75	13.95	2.11	0.77	35.25	--
	Atomal %	61.65	2.56	0.68	1.49	11.43	1.52	0.45	20.23	--
2	Ağırlıkça %	55.67	2.02	0.53	0.87	22.11	--	0.54	17.71	0.56
	Atomal %	71.39	1.8	0.44	0.66	16.15	--	0.28	9.06	0.21

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan deneysel çalışma sonucunda sodyum hidroksit-sodyum karbonatın YFC'yi cam suyuna göre daha iyi aktive ettiği görülmüştür. Bu sonuçlara göre aktivatör olarak kullanılan alkali türünün deney sonuçlarını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. YFC'nin aktive edilmesinde sodyum hidroksit-sodyum karbonat kullanılması önerilebilir. Aktive edilmiş YFC'li harçların sülfata dayanıklılık deney sonuçları, standart kürede bekletilen aktive edilmiş YFC'li harçların deney sonuçlarına bağlı olarak incelendiğinde, sülfat etkisinde kalan harçlarda alkali aktive edilmiş YFC oranı arttıkça harçların bağıl basma dayanımı genel olarak artmıştır. Sülfat etkisi ile alkalilerle aktive edilmiş YFC'li harçlarda herhangi bir etrenjit oluşumuna rastlanmamış, yer yer kısa mikro çatlak oluşumları görülmüştür. Sodyum silikat ile aktive edilmiş YFC'li harçların bağlayıcı fazında sülfat etkisi ile oluşan farklı yapılar görülmüş ve bu yapılar mikro doluluğu olumsuz yönde etkilemiştir. YFC kullanılmayan harçlarında ise bağlayıcı fazda gözenekli yapı meydana gelmiş ve bu yapıda sülfat etkisi ile iğne şeklindeki etrenjit kristalleri oluşmuştur. YFC kullanılması ile endüstriyel bir atık değerlendirildiği için hem Türkiye ekonomisine kazanç sağlanmış olacak hem de çevre kirliliği önlenmiş olacaktır.

KAYNAKLAR

- Arslan, M. (2001). *Beton (Dökümü, Kalıpları, Kusurları, Dayanıklılığı)*. Atlas Yayın Dağıtım Ltd. Şti., 237 s., İstanbul.
- ASTM C 1012 (2004). Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.
- Bakharev, T., Sanjanyan, J.G. ve Cheng, Y.B. (2002). Sulfate attack on alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research* 32, 211-216.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H. (2002). *Betonarme Yapılarda Kalıcılık*. Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları, 282 s., İzmir.
- Canbaz, M. (2007). Alkali Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürüflü Harçların Özellikleri. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İn-

şaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 244s.

- Gollop, R.S. ve Taylor, H.F.W. (1996). Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack. v. comparison of different slag blends. *Cem. and Concrete Research* 26(7), 1029-1044.
- Jimenez, A.F. ve Puertas, F. (1997). Alkali-activated slag cements: kinetic studies. *Cem. Conc. Res.* 27, 359-368.
- Peter, M.G. ve Jack E.G. (1996). Freeze-thaw durability of activated blast furnace slag cement concrete. *ACI Mat. Journal* May-June, 242-245.
- Shi, C. ve Day, R.L. (1995). A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements. *Cem. Conc. Res.* 25, 1333-1346.
- Tokyay, M. ve Erdoğan, K. (2003). *Cürüfler ve Cürüflü Çimentolar, Araştırmaların Gözden Geçirilmesi Raporu*. TÇMB Yayını, 48 s., Ankara.
- Topçu, İ.B. (2006). *Beton*. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Eskişehir Şubesi, Yayın No 2, 260 s., Eskişehir.
- Topçu, İ.B. ve Canbaz, M. (2007). Effect of chemical composition on alkali activated slag mortars. TÇMB, 3rd International Symposium Sustainability in Cement and Concrete, İstanbul, Turkey, pp. 223-232.
- Topçu, İ.B. ve Canbaz, M. (2006). Aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü harçlara alkali türünün etkisi. Yapı Mekaniği Semineri 2006 ODTÜ-ESOGÜ, Eskişehir, ss. 120-128.
- Wang, S.D., Scrivener, K.L. ve Pratt, P.L. (1994). Factors affecting the strength of alkali-activated slag. *Cem. Conc. Res.* 24, 1033-1043.
- Zhou, H., Wu, X., Xu, Z. ve Tang, M. (1993). Kinetic study on hydration of alkali-activated slag. *Cem. and Conc. Res.* 23, 1253-1258.



İlker Bekir TOPÇU, 1980'de EDMMA İnşaat Fakültesi'nden mezun oldu. Yüksek Lisansını Anadolu Üniversitesi'nde yaptı. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yaptığı doktorasını 1988'de tamamladı. 1990-92 ve 1996-97 yıllarında ABD'de araştırmalarda bulundu. 1997'de doçent 2003'de profesör oldu. Halen ESOGÜ, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır.



Mehmet CANBAZ, 1998'de YTÜ, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 1998'de ESOGÜ, İnşaat Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. ESOGÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yaptığı yüksek lisansını 2001, doktorasını 2007'de tamamladı. Halen ESOGÜ, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır.