



## ALKALİ AKTİVE EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN CÜRUFU HARÇLARDA ASİT ETKİSİ

İlker Bekir TOPÇU & Mehmet CANBAZ\*

\*Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26480, Eskişehir, TÜRKİYE, [mcanbaz@ogu.edu.tr](mailto:mcanbaz@ogu.edu.tr)

Geliş tarihi: 29.11.2007

Kabul tarihi: 21.05.2008

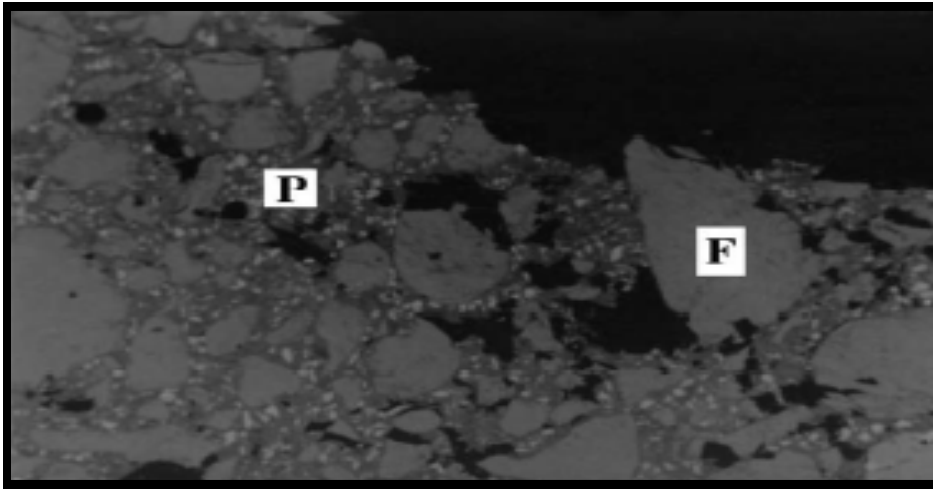
### ÖZET

Demir-çelik üretimi sırasında demir çelik fabrikalarının atığı olarak açığa çıkan yüksek fırın cürufu diğer mineral katkılardan farklı olarak alkalilerle kuvvetli reaksiyonlar yapabilmektedir. Bu çalışmada yüksek fırın cürufu, çimento yerine % 0, 25, 50, 75, 100 oranlarında kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufunu aktive etmek için sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum silikat kullanılmıştır. Hazırlanan 7x7x7 cm harç numuneleri 28 gün kür edildikten sonra bu numuneler asit etkisinde bırakılmış kontrol harçlarına göre dayanım ve diğer fiziksel kayıpları incelenmiştir. Asit etkisinde kalan harçlarda yüksek fırın cürufu kullanım oranı arttıkça, harçların dayanım ve fiziksel kayıplar azalmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yüksek fırın cürufu, Asit, Alkali, Harç, Aktive.

### 1. GİRİŞ

Türkiye 2006 yılı sonunda, 1244 milyon ton olarak hesaplanan dünya demir çelik üretiminin % 1.87'sini gerçekleştirmektedir. Demir-çelik üretimi sırasında oldukça önemli miktarlarda yüksek fırın cürufu (YFC) atığı oluşmaktadır. Oldukça yüksek sıcaklıkta olan YFC çok hızlı soğutulursa amorf yapıda granüle halde ince bir malzeme haline gelmektedir. Bu hali ile betonda kum yerine kullanılabilir. Öğütülmesi durumunda, amorf yapıya sahip olduğundan, yüksek miktarlarda  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içerdiğinden bağlayıcı özellik gösterir ve bu nedenle çimento üretiminde ve beton katkı maddesi olarak kullanılabilir. YFC kullanımı betonun dayanıklılığını olumlu yönde etkilemektedir. YFC kullanılan betonlarda donma-çözülme etkisine karşı kullanılan hava sürükleyici katkı miktarını arttırmak gerekmektedir. Sülfata dayanıklılığı arttırmada YFC etkilidir [1]. YFC sodyum hidroksit (NaOH), sodyum karbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), cam suyu ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) gibi alkalilerle aktive edilebilmektedir [2]. Beton dayanımı ve işlenebilirliği kullanılan alkali kombinasyonuna bağlı olarak değişim göstermektedir [3]. Alkalilerle aktive edilmiş YFC'li betonlarda sürekli olmayan mikro çatlaklar görülmekte ve bu çatlaklar geçirimsizlikte etkili olmaktadır [4]. Alkalilerle aktive edilmiş YFC'nin asit saldırısına karşı direnci de daha fazladır. Şekil 1'de alkalilerle aktive edilmiş YFC kullanılan betonda asit etkisinde oluşan mikroyapıdaki bozulmalar gösterilmiştir. Burada F harfi ince agregayı, P harfi ise alkalilerle aktive edilmiş YFC pastasını göstermektedir [5]. Fosforik asitin, sodyum silikat ile aktive edilmiş YFC'li hamurun özelliklerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, alkali aktive edilmiş YFC'lerin iyi bir bağlayıcı olmasına rağmen, hızlı priz ve kuruma rötesi gibi olumsuz etkileri olduğu belirtilmiştir. Fosforik asit ilavesi ile priz süreleri artmış, basınç dayanımları azalmış ve kuruma rötreleri artmıştır [6]. Yapılan çalışmalarda YFC'nin alkalilerle aktive edilmesi ile çimento yerine çok yüksek oranlarda kullanılabilmesi görülmüştür. YFC kullanılması ile betonun kimyasal etkiler altındaki performansı ve işlenebilirliği artmakta, geçirimsizlik azalmaktadır. YFC kullanırken betonda karbonatlaşmaya karşı önlem alınmalı, soğuk havalarda beton dökülmesi durumunda priz hızlandırıcı kullanılmaktadır. Erken yaşlarda dayanım beklenen yerlerde YFC kullanılmamalı, kullanılması gerekiyorsa özel önlemler alınmalıdır. Türkiye'de YFC kullanımı yaygınlaştırılmalıdır. YFC kullanılması ile endüstriyel bir atık değerlendirildiği için hem Türkiye ekonomisine kazanç sağlanmış olacak hem de çevre kirliliği önlenmiş olacaktır [7-13].



Şekil 1. Alkali aktive edilmiş YFC'li betonun asit etkisi sonucunda bozulması

## 2. KULLANILAN MALZEMELER VE YÖNTEMLER

### 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. Özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

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

**Alkaliler:** YFC'yi aktive etmek için sodyum hidroksit (NaOH), sodyum karbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), cam suyu (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) 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 ve pH 6.75'tür.

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

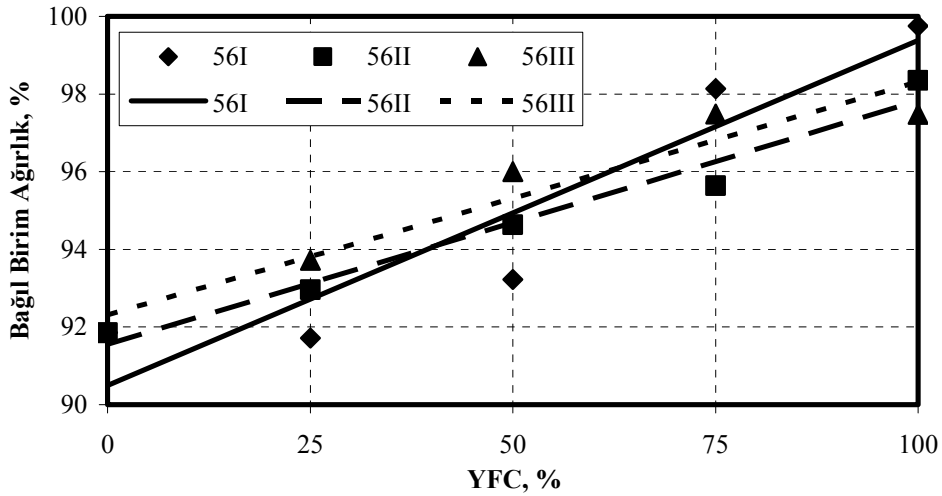
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl	Kızdırma Kaybı	İncelik cm <sup>2</sup> /g	Özgül Ağırlık
YFC	34.09	12.19	0.61	30.82	6.14	0.03	0.45	0.56	1.57	0.001	0.1	2230	2.84
CEM 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. Yöntemler

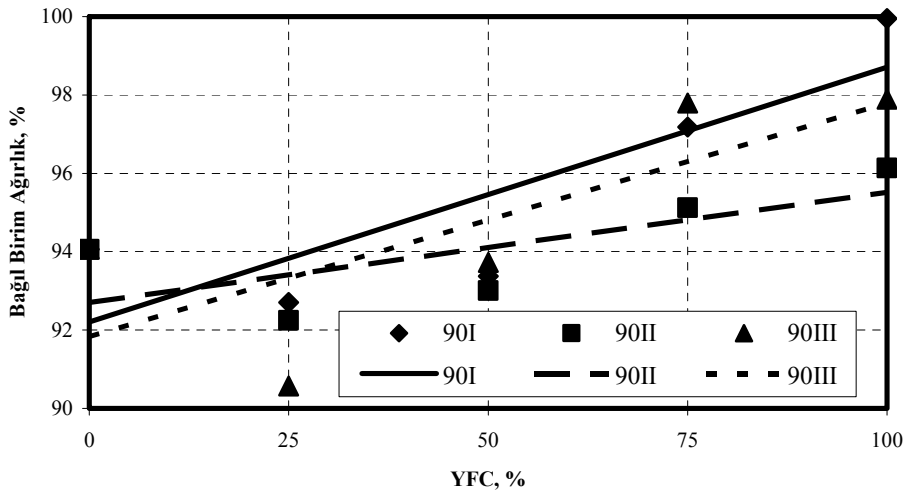
Asit etkisini belirlemek için YFC, çimento yerine % 0, % 25, % 50, % 75, % 100 oranlarında kullanılmıştır. YFC'yi aktive etmek için NaOH, NaCO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılmıştır. Ayrıca YFC'nin % 1 oranında kireç katılmıştır. Karışım oranı bağlayıcı:su:kum sırası ile 1:0.5:3 olarak alınarak karışımlar hazırlanmış, 7x7x7 cm boyutlarında kalıplara dökülmüştür. Numuneler 28 gün standart kür koşullarında bekletilmiştir. 28 günlük dayanımlarına ulaştıklarında, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde bekletilmiş, kontrol harçlarına göre dayanım ve diğer fiziksel kayıpları incelenmiştir. Kodlamalar I, NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>; II, NaOH+Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>; III, Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> aktivasyon için kullanılan alkali türlerini belirtmiştir. Deneyler 56., 90. ve 250. günün sonunda yapılmıştır. Kontrol numunelerine göre asit etkisinde kalan numunelerin dayanım, elastisite modülü, birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, rezonans frekansı değerleri bağıl olarak hesaplanmış ve kullanılan YFC miktarları dikkate alınarak gösterilmiştir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmada asit etkisinde bekletilen aktive edilmiş YFC'li harçların deney sonuçları, standart kürede bekletilen aktive edilmiş YFC'li harçların deney sonuçlarına bağlı olarak incelenmiştir. Asit etkisinde kalan YFC'li harçların 56 günlük birim ağırlık deney sonuçları Şekil 2'de, 90 günlük birim ağırlık deney sonuçları Şekil 3'de, 250 günlükleri ise Şekil 4'te gösterilmiştir. Alkali aktive edilmiş YFC oranı arttıkça harçların bağıl birim ağırlıkları genel olarak artmıştır. Buradan asit çözeltisinin alkali aktive edilmiş YFC'li harçların kimyasal yapısını bozmadığı ve belirgin oranda ağırlık kaybına yol açmadığı düşünülebilir. 56 günlük deney sonuçları incelendiğinde en büyük artma oranı % 8.9 ile aktivatör olarak NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> alkali kombinasyonu kullanılan harçlarda görülmüştür. 90 günlük deney sonuçlarına göre en büyük artma oranı % 6.5 ile aktivatör olarak NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> alkali kombinasyonu kullanılan harçlarda görülmüştür.



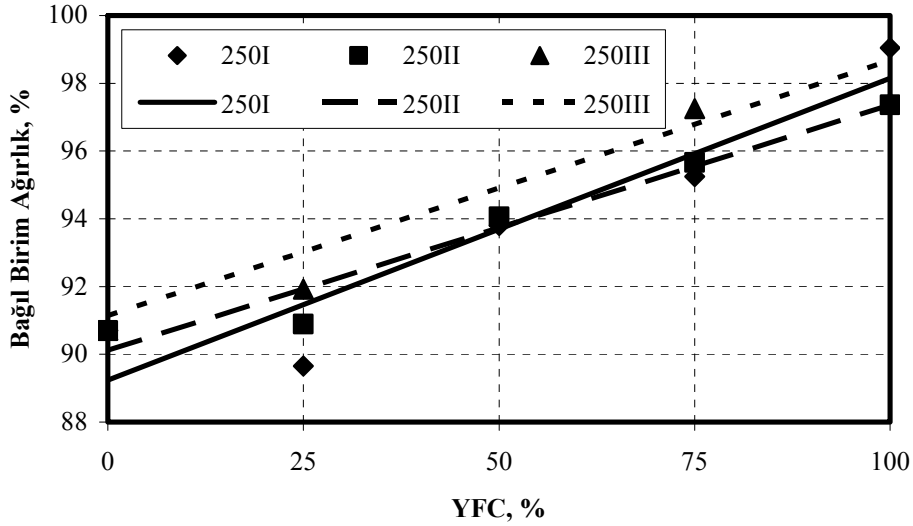
Şekil 2. 56 günlük birim ağırlık deney sonuçları



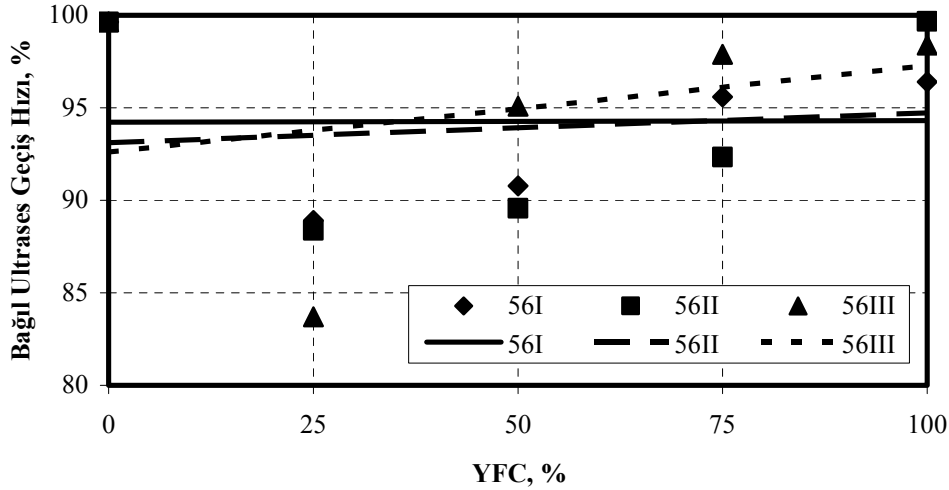
Şekil 3. 90 günlük birim ağırlık deney sonuçları

250 günlük numunelerde ise en büyük artma oranı % 8.9 ile aktivatör olarak NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> alkali kombinasyonu kullanılan harçlarda görülmüştür. Alkali kombinasyonu türü gözetmeksizin 90. ve 250. günlerde özellikle % 25 YFC içeren tüm harç karışımlarında birim ağırlık kayıplarının daha fazla olduğu görülmüştür. Buradan düşük miktarda aktive edilmiş YFC kullanımının asit etkisine olumsuz etkisi olduğu, yüksek

miktarlarda YFC kullanımının bağlayıcı hamurda daha homojen bir dağılım sergilediği için asit çözeltisinden daha az etkilendiği görülmüştür.

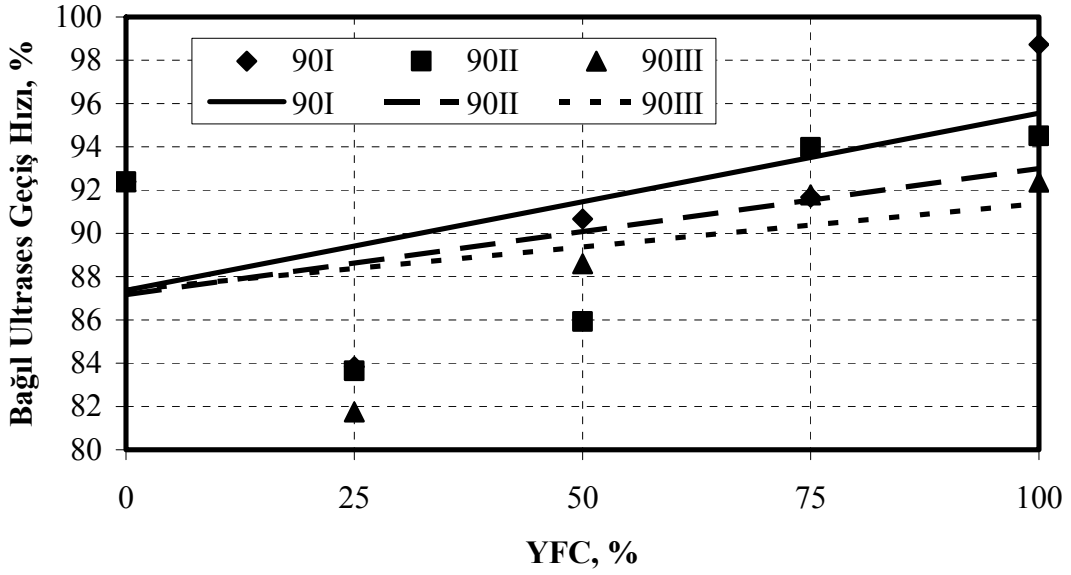


Şekil 4. 250 günlük birim ağırlık deney sonuçları

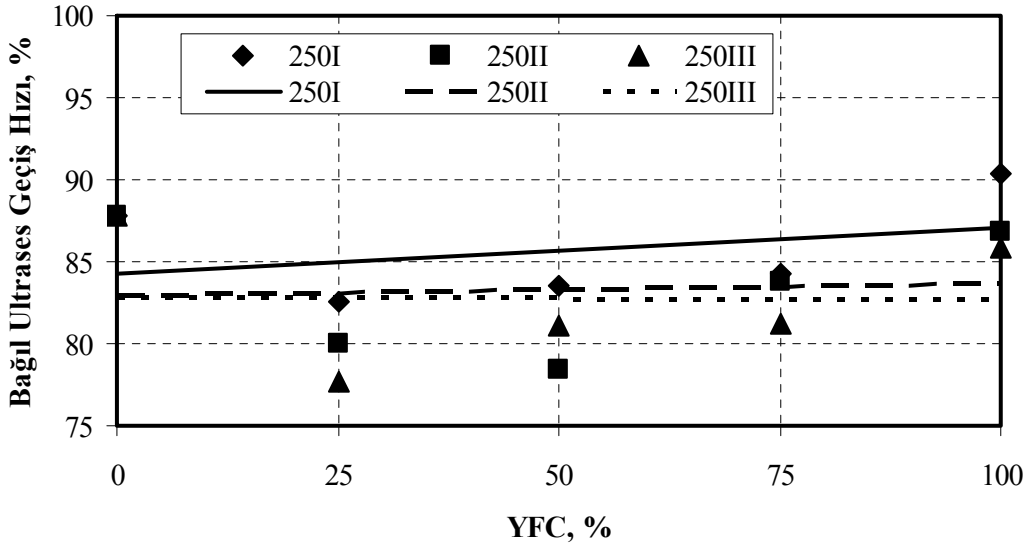


Şekil 5. 56 günlük ultrases geçiş hızı deney sonuçları

Asit etkisinde kalan YFC'li harçların 56 günlük ultrases geçiş hızı deney sonuçları Şekil 5'te, 90 günlük ultrases geçiş hızı deney sonuçları Şekil 6'da, 250 günlükleri ise Şekil 7'de gösterilmiştir. Alkali aktive edilmiş YFC oranı arttıkça harçların bağlı ultrases geçiş hızları artmıştır. Alkali aktive edilmiş YFC'li harçların asit saldırısına karşı etkili olduğu, bozulmaların azaldığı ve oluşan boşluk miktarının azalması ile ultrases geçiş hızındaki kayıpların azaldığı görülmüştür. Asit etkisinde kalan harçların 56 günlük bağlı ultrases geçiş hızları incelendiğinde bağlı ultrases geçiş hızları % 100-82 arasında değişmektedir. En büyük artma oranı % 4.7 ile aktivatör olarak  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  alkali kombinasyonu kullanılan harçlarda görülmüştür.

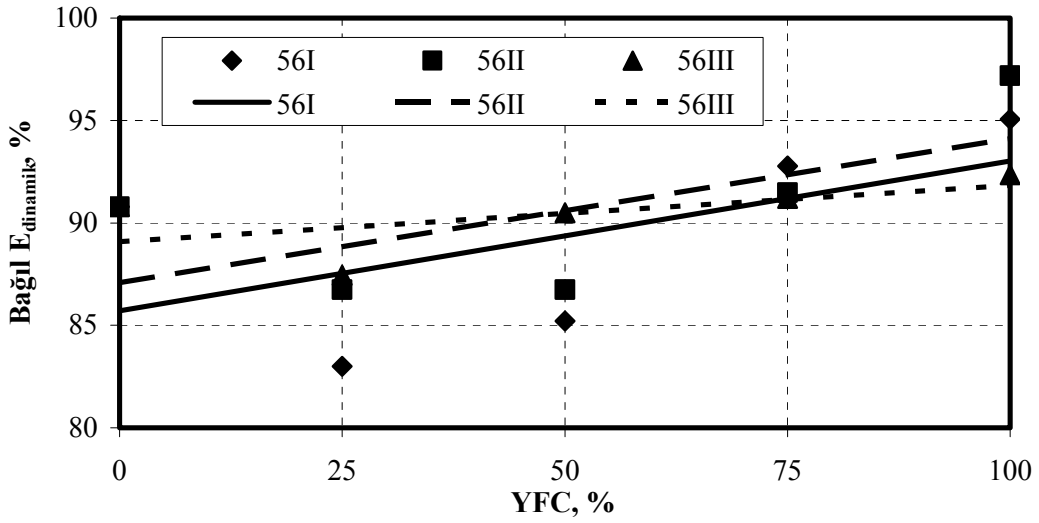


Şekil 6. 90 günlük ultrases geçiş hızı deney sonuçları

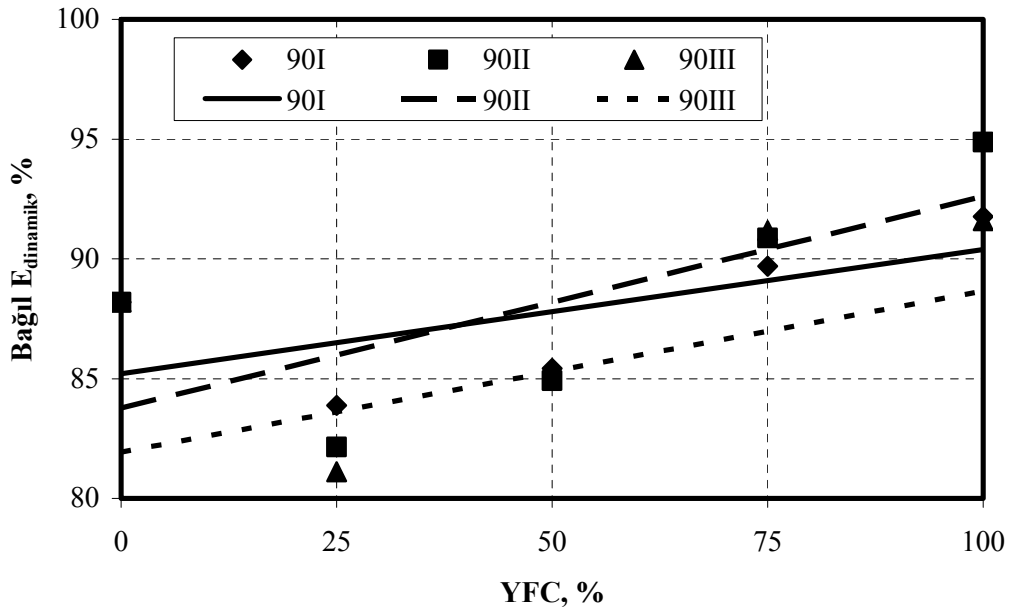


Şekil 7. 250 günlük ultrases geçiş hızı deney sonuçları

NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> alkali kombinasyonu kullanılan harçlarda YFC miktarı arttıkça asit saldırısı sonucu ultrases geçiş hızı kayıplarında önemli bir değişiklik görülmemiştir. Asit etkisinde kalan harçların 90 günlük bağlı ultrases geçiş hızlarındaki en büyük artış oranı % 8.2 ile aktivatör olarak NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> alkali kombinasyonu kullanılan harçlarda görülmüştür. Asit etkisinde kalan harçların 250 günlük bağlı ultrases geçiş hızları % 100-75 arasında değişmektedir. Alkali aktive edilmiş YFC oranı arttıkça harçların 250 günlük bağlı ultrases geçiş hızları artmıştır. En büyük artma oranı % 2.8 ile aktivatör olarak NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> alkali kombinasyonu kullanılan harçlarda görülmüştür. Diğer alkali kombinasyonlarında YFC artması ile bağlı ultrases geçiş hızlarında önemli bir değişiklik görülmemiştir.

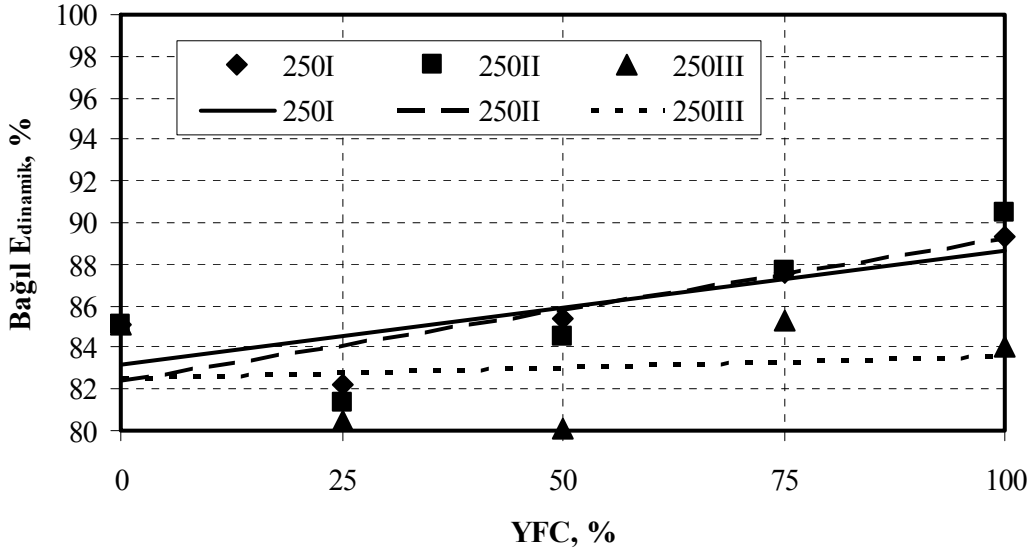


Şekil 8. 56 günlük dinamik elastisite modülleri

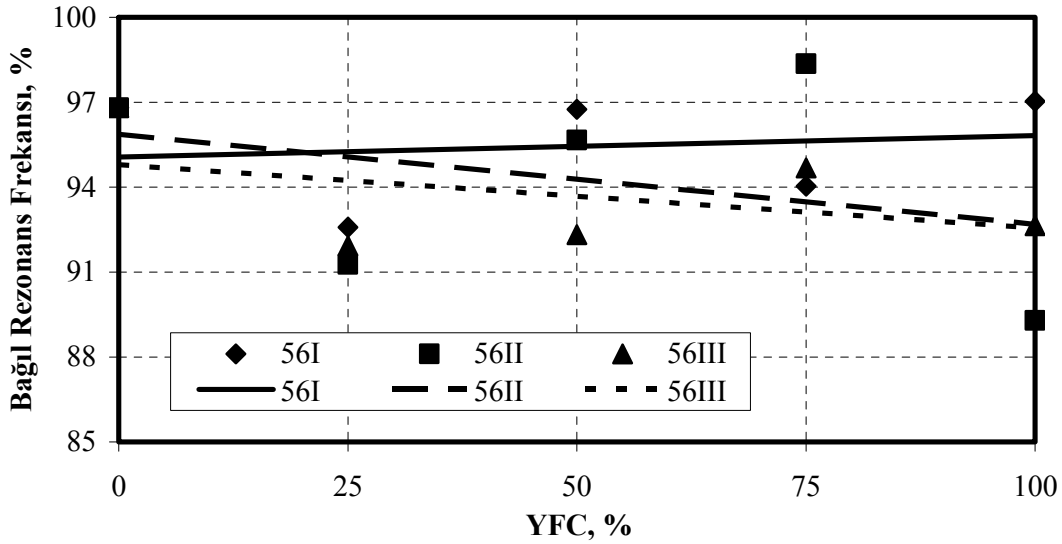


Şekil 9. 90 günlük dinamik elastisite modülleri

Asit etkisinde kalan YFC'li harçların 56 günlük dinamik elastisite modülleri Şekil 8'de, 90 günlük dinamik elastisite modülleri Şekil 9'da, 250 günlük dinamik elastisite modülleri ise Şekil 10'da gösterilmiştir. Asit etkisinde kalan harçların 56 günlük bağıl dinamik elastisite modülleri % 100-82 arasında değişmektedir. Alkali aktive edilmiş YFC oranı arttıkça harçların bağıl dinamik elastisite modülleri artmıştır. Buradan alkali aktive edilmiş YFC'li harçların asit etkisine karşı dirençlerinin fazla olduğu görülmüştür.

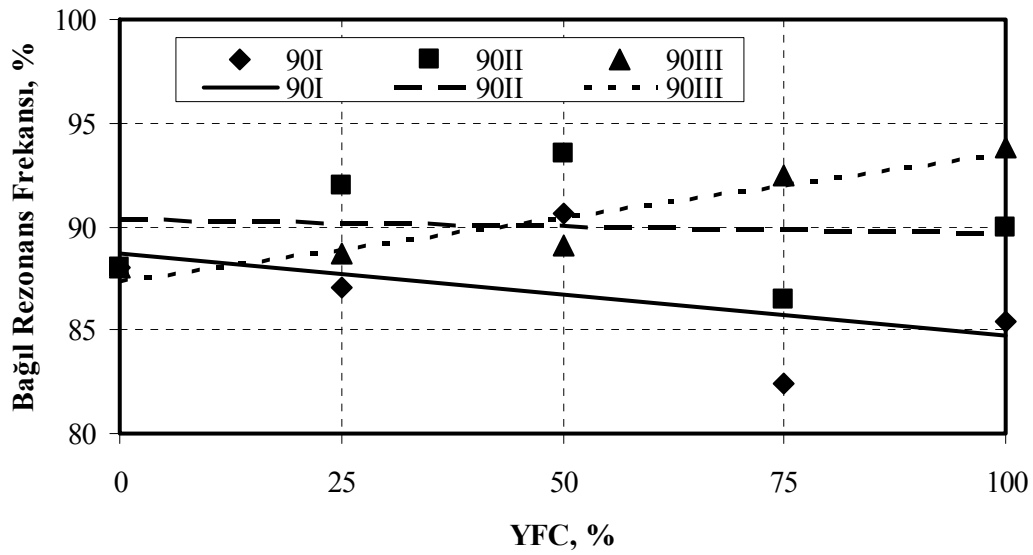


Şekil 10. 250 günlük dinamik elastisite modülleri

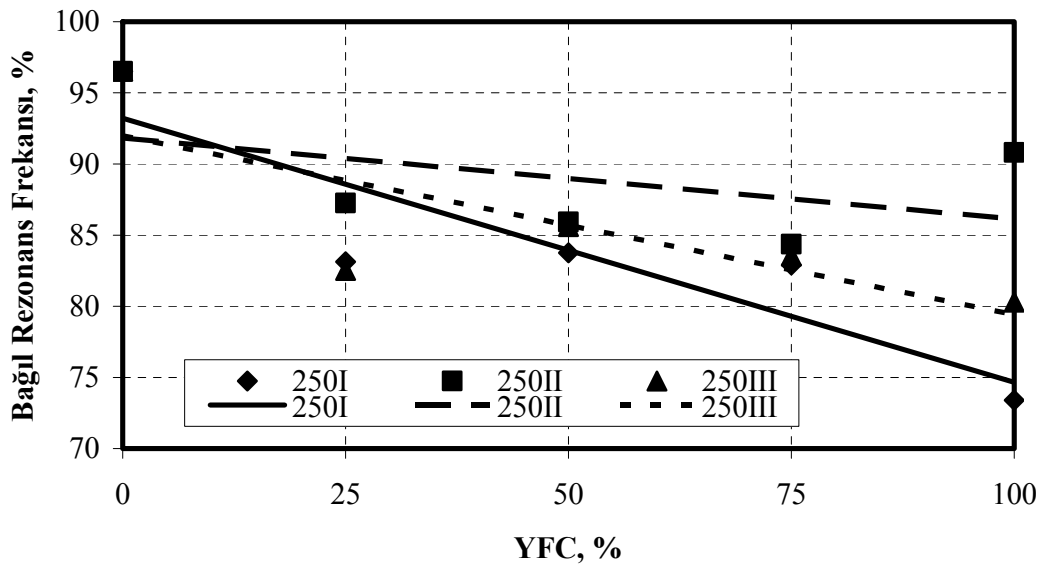


Şekil 11. 56 günlük rezonans frekansı deney sonuçları

En büyük artma oranı % 7.3 ile aktivatör olarak NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> alkali kombinasyonu kullanılan harçlarda görülmüştür. Asit etkisinde kalan harçların 90 günlük bağlı dinamik elastisite modüllerinde en büyük artma, % 8.8 ile aktivatör olarak NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> alkali kombinasyonu kullanılan harçlarda görülmüştür. Asit etkisinde kalan harçların 250 günlük bağlı dinamik elastisite modüllerinde ise en büyük artma, % 6.8 ile aktivatör olarak NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> alkali kombinasyonu kullanılan harçlarda görülmüştür. Asit etkisinde kalan YFC'li harçların 56 günlük rezonans frekansı deney sonuçları Şekil 11'de, 90 günlük rezonans frekansı deney sonuçları Şekil 12'de, 250 günlükleri ise Şekil 13'te gösterilmiştir. Asit etkisinde kalan harçların 56 günlük bağlı rezonans frekansları % 100-88 arasındadır.



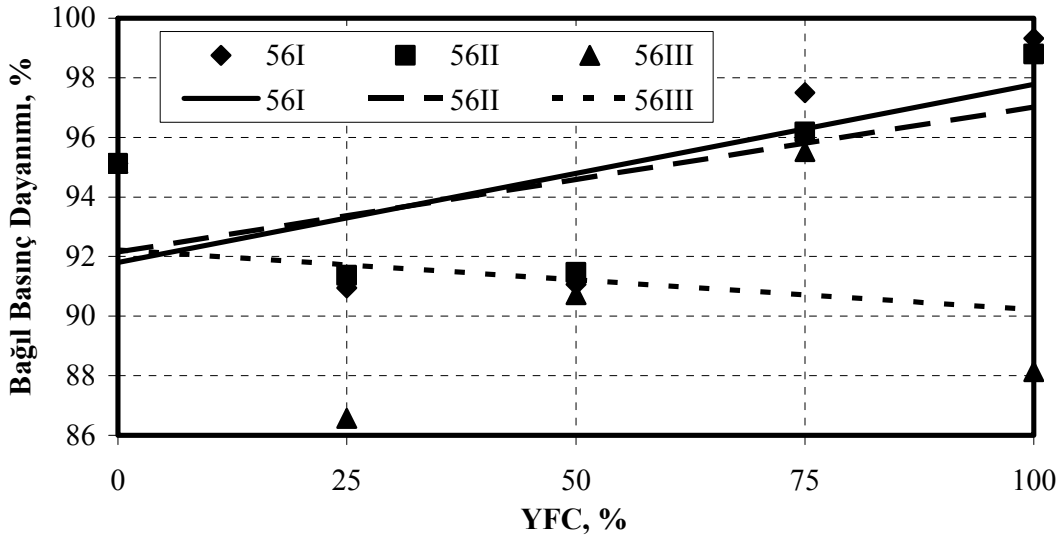
Şekil 12. 90 günlük rezonans frekansı deney sonuçları



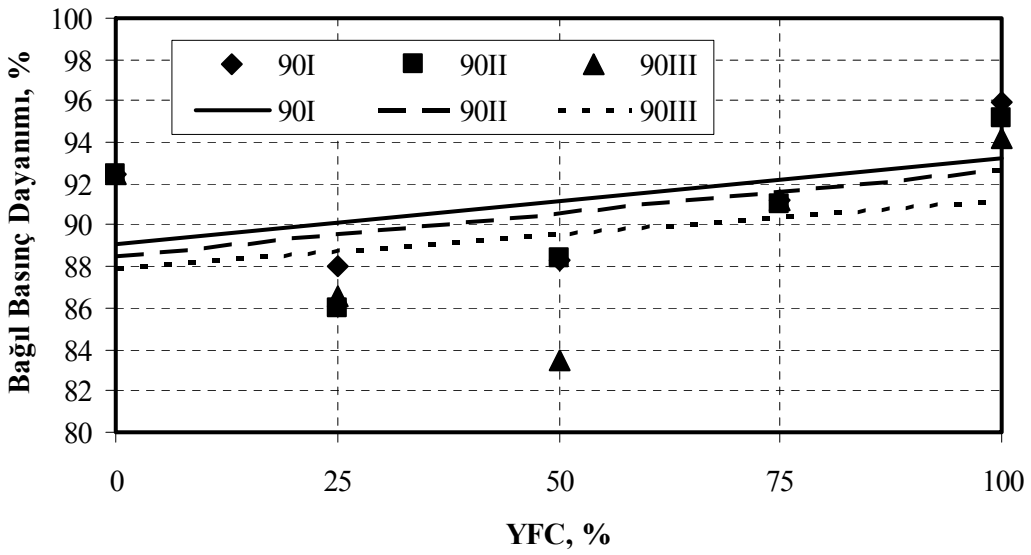
Şekil 13. 250 günlük rezonans frekansı deney sonuçları

Alkali aktive edilmiş YFC oranı arttıkça harçların bağlı rezonans frekansları azalmıştır. En büyük azalma oranı % 3.2 ile aktivatör olarak NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> alkali kombinasyonu kullanılan harçlarda görülmüştür. Asit etkisinde kalan harçların 90 günlük bağlı rezonans frekansları % 95-80 arasında değişmektedir. Alkali aktive edilmiş YFC oranı arttıkça, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> alkali kombinasyonu kullanılan harçların bağlı rezonans frekansları % 6.2 artmış, NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> alkali kombinasyonu kullanılan harçların bağlı rezonans frekansları % 3.9 azalmıştır. Asit etkisinde kalan harçların 250 günlük bağlı rezonans frekanslarında en büyük azalma oranı % 18.6 ile aktivatör olarak NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> alkali kombinasyonu kullanılan harçlarda görülmüştür.



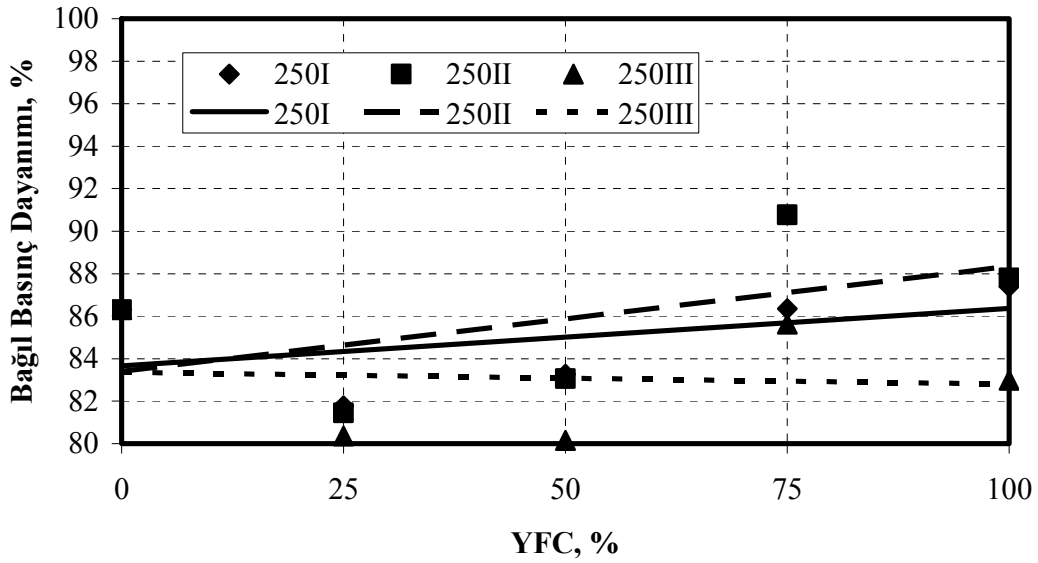


Şekil 14. 56 günlük basınç dayanımı deney sonuçları



Şekil 15. 90 günlük basınç dayanımı deney sonuçları

Asit etkisinde kalan YFC'li harçların 56 günlük basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 14'de, 90 günlük basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 15'de, 250 günlükleri ise Şekil 16'da gösterilmiştir. Asit etkisinde kalan harçların 56 günlük basınç dayanımları % 100-86 arasında değişmektedir. Alkali aktive edilmiş YFC oranı arttıkça harçların basınç dayanımları genel olarak artmıştır. Buradan alkali aktive edilmiş YFC'li harçların asit saldırısı sonunda oluşan basınç dayanım kayıplarını azalttığı görülmüştür. En büyük artma oranı % 4.2 ile aktivatör olarak NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> alkali kombinasyonu kullanılan harçlarda görülmüştür. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> alkali kombinasyonu kullanılan harçlarda % 2'lik bir azalma görülmüştür.



Şekil 16. 250 günlük basınç dayanımı deney sonuçları

Asit etkisinde kalan harçların 90 günlük bağlı basınç dayanımları en büyük artma oranı % 4.2 ile aktivatör olarak NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> alkali kombinasyonu kullanılan harçlarda görülmüştür. Asit etkisinde kalan harçların 250 günlük bağlı basınç dayanımlarında en büyük artma oranı % 4.9 ile aktivatör olarak NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> alkali kombinasyonu kullanılan harçlarda görülmüştür.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Asit etkisinde kalan harçlarda, çimentonun hidrasyon reaksiyonu sonucunda oluşan kalsiyum hidroksitin neden olduğu bazik yapı asit ile reaksiyona girerek tuzları oluşturmakta, oluşan tuzlar yapısında yüksek oranda su içerdiği için yapıda bozulmalara ve çatlak oluşumlarına neden olmaktadır. Bu nedenle asit etkisinde kalan harçların bağlı birim ağırlıkları, ultrases geçiş hızı, dinamik elastisite modülleri, basınç dayanımları azalmıştır. YFC kullanılması ile bağlayıcı yapıda bulunan kalsiyum oksitler bağlanacağı için oluşan tuz miktarı azaldığından genel olarak mekanik ve fiziksel özelliklerdeki azalma oranları düşmüştür. Asit etkisinde birim ağırlık ve ultrases geçiş hızı açısından en avantajlı sonuçlar NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ile aktive edilen % 100 oranında YFC içeren numunelerde elde edilmiştir. Bunun yanında basınç dayanımı için optimum YFC oranı % 100 olurken, en uygun aktivatör kombinasyonunun NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Asit etkisindeki elastisite modülüne bakıldığında ise, en uygun aktivatör kombinasyonu % 75 YFC oranında NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> olmuştur. Sonuç olarak, asit etkisine karşı dayanıklılığını arttırmada YFC kullanım miktarını arttırmak için aktivasyonda kullanılan alkali türünün oldukça önemli olduğu görülmüştür. Çalışmanın sonunda, NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> kombinasyonu kullanılması önerilebilir. Ayrıca yüksek oranlarda aktive edilmiş YFC kullanılması durumunda asite karşı dayanıklılığı arttırması yanı sıra atık değerlendirildiği için ekonomiye ve çevreye katkı sağlanmış olacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] Tokyay M. ve Erdoğan K., "Cürüfler ve Cürüflü Çimentolar, Araştırmaların Gözden Geçirilmesi Raporu", TÇMB Yayını, Ankara, 48 (2003).
- [2] Peter M.G. and Jack E.G., "Freeze-Thaw durability of activated blast furnace slag cement concrete", *ACI Mat. Journal*, 242-245 (1996).
- [3] Wang S.D., Scrivener K.L. and Pratt P.L., "Factors affecting the strength of alkali-activated slag", *Cem. Conc. Res.*, 24: 1033-1043 (1994).
- [4] Hakkinen T., "The Influence of slag content on the microstructure, permeability and mechanical properties of concrete", *Cem. Conc. Res.*, 23: 407-421 (1993).
- [5] Bakharev, T., Sanjanyan, J.G. and Cheng, Y.B., "Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack", *Cem. Conc. Res.*, 33: 1607-1611 (2003).
- [6] Chang, J.J., Yeih, W. and Hung, C.C., "Effects of gypsum and phosphoric acid on the properties of sodium silicate-based alkali-activated slag pastes", *Cement and Concrete Composites*, 27: 85-91 (2005).
- [7] Canbaz, M., Alkali Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürüflü Harçların Özellikleri, Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 244 (2007).
- [8] Topçu İ.B. ve Canbaz M., "Yüksek Fırın Cürufunun Beton Üretiminde Değerlendirilmesi", *Akdeniz İnşaat Haber*, 3: 38-41 (2005).
- [9] Topçu, İ.B. ve Canbaz, M., "Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürüflü Harçlara Alkali Türünün Etkisi", *Yapı Mekaniği Semineri 2006*, ODTÜ-ESOGÜ-ETB, Eskişehir, 120-128 (2006).
- [10] Topçu, İ.B. ve Canbaz, M., "Effect of Chemical Composition on Alkali Activated Slag Mortars", TÇMB, *3rd Inter. Symposium Sustainability in Cement and Concrete*, İstanbul, 223-232 (2007).
- [11] Topçu, İ.B. ve Canbaz, M., "Sülfat Etkisinde Kalmış Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürüflü Harçların Mikroyapısı", *18. Ulusal Elektronik Mikroskopi Kongresi*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir (2007).
- [12] Topçu, İ.B. ve Canbaz, M., "Yüksek Sıcaklık Etkisinde Kalmış Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürüflü Harçların Mikroyapısı", *18. Ulusal Elektronik Mikroskopi Kongresi*, Anadolu Üniv., Eskişehir (2007).
- [13] Topçu, İ.B. ve Canbaz, M., "Alkali Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürüflü Harçların Fiziksel Özellikleri", *Yapı Mekaniği Semineri 2007*, ODTÜ-ESOGÜ, Eskişehir, 156-162 (2007).

