

Makalenin Geliş Tarihi : 16.11.2007  
Makalenin Kabul Tarihi : 31.12.2007

## **ALKALİ AKTİVE EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN CÜRUFU HARÇLARDA DONMA ÇÖZÜLME**

İlker Bekir TOPÇU<sup>1</sup>, Mehmet CANBAZ<sup>2</sup>

**ÖZET:** Demir-çelik üretimi sırasında demir çelik fabrikalarının atığı olarak açığa çıkan yüksek fırın cürufu (YFC) 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 boyutunda ki harç numuneleri 28 gün normal kür edildikten sonra bu numuneler tekrarlı donma-çözülme etkilerinde altında bırakılmış, kontrol numunelerine göre dayanım ve diğer fiziksel kayıpları incelenmiştir. Donma-çözülme etkisinde kalan harçların çevrim sayısı arttıkça, dayanım ve fiziksel kayıpları azalmıştır. Aktive edilmiş YFC kullanılması durumunda; genel olarak bu azalma oranları düşmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Yüksek fırın cürufu, Donma çözülme, Alkali, Harç, Aktive.

## **FREEZE –THAW EFFECT ON MORTARS WITH ALKALI ACTIVATED BLAST FURNACE SLAG**

**ABSTRACT :** Slag, which is an iron-steel factories waste occurred during the production of unrefined iron, is strongly reacted with alkalis in concrete. In this study, slag replaced cement amount of 0, 25, 50, 75, 100 %. Slag activated with activator like sodium hydroxide, sodium carbonate and sodium silicate. After curing the produced mortar specimens in the dimensions of 7x7x7 cm during 28 days, the specimens were kept under the cycles of freeze-thaw effect. Besides, strength and some physical properties of these specimens were investigated compared to the control specimens. Strength and physical properties have decreased with the increase in cycles. This decrease decelerates by usage of slag.

**Keywords:** Blast furnace slag, Freeze-thaw, Alkali, Mortar.

<sup>1,2</sup> Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Batı Meşelik Kampüsü, 26480 ESKİŞEHİR

## ***I. GİRİŞ***

Türkiye 2006 yılı sonunda 23 milyon tonluk demir çelik üretimi ile dünya çelik üretiminde 11. sıradaki yerini korumuştur. 1244 milyon ton olarak hesaplanan dünya demir çelik üretiminin % 1.87'si Türkiye'de gerçekleşmektedir. Demir-çelik üretimi sırasında oldukça önemli miktarlarda YFC atığı oluşmaktadır. Amorf yapıya sahip olan YFC yüksek miktarlarda  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içermesi nedeni ile puzolanik özellik göstermektedir. YFC demir üretimi sırasında açığa çıkmaktadır. Oldukça yüksek sıcaklıkta olan YFC çok hızlı soğutulursa amorf yapıda granüle halde ince bir malzeme haline gelmektedir. Bu hali ile beton yapımında ince malzeme olarak kullanılabilmesi gibi öğütülmesi durumunda 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 ( $\text{NaOH}$ ), 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'li betonlarda donma çözülme sonrası ağırlık kayıpları normal Portland çimentolu betonun donma çözülme sonrası ağırlık kayıplarına yakın olarak bulunmuştur. Hava sürükleme sonucunda normal Portland çimentolu betonda olduğu gibi donma çözülme direnci ve işlenebilirlik artmıştır [5]. 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, geçirimsizliği azalmaktadır. YFC kullanırken, soğuk havalarda beton dökülmesi durumunda priz hızlandırıcı katkı maddesi kullanılmalıdır. 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 [6-12].

## II. DENEYSEL ÇALIŞMA

### II.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 Çizelge 1'de verilmiştir.

**YFC:** Erdemir demir-çelik fabrikasından sağlanmıştır. YFC'nin inceliği 60  $\mu$ 'dan küçük olacak 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 ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), cam suyu ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) 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'tür.

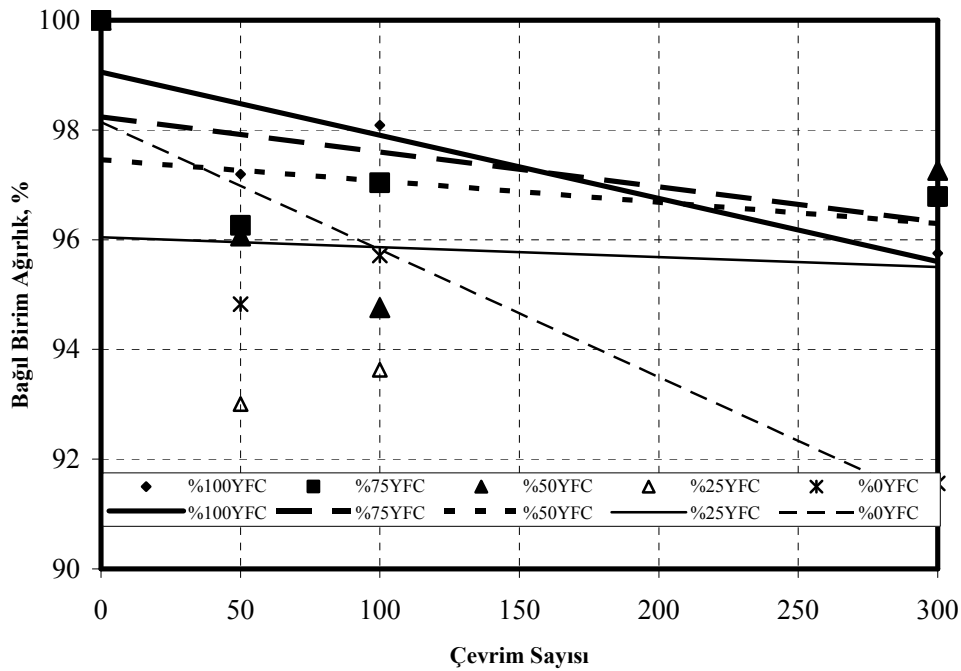
*Çizelge 1. Kullanılan çimento ve YFC'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri*

	YFC	CEM I 42.5 R
SiO <sub>2</sub>	34,09	19,23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,19	5,44
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,61	3,48
CaO	30,82	63,62
MGO	6,14	0,88
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03	0,09
K <sub>2</sub> O	0,45	0,55
Na <sub>2</sub> O	0,56	0,68
SO <sub>3</sub>	1,57	2,17
Cl	0,001	0,011
Kızdırma kaybı	0,10	3,20
İncelik (cm <sup>2</sup> /g)	2230	2860
Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2,84	3,11

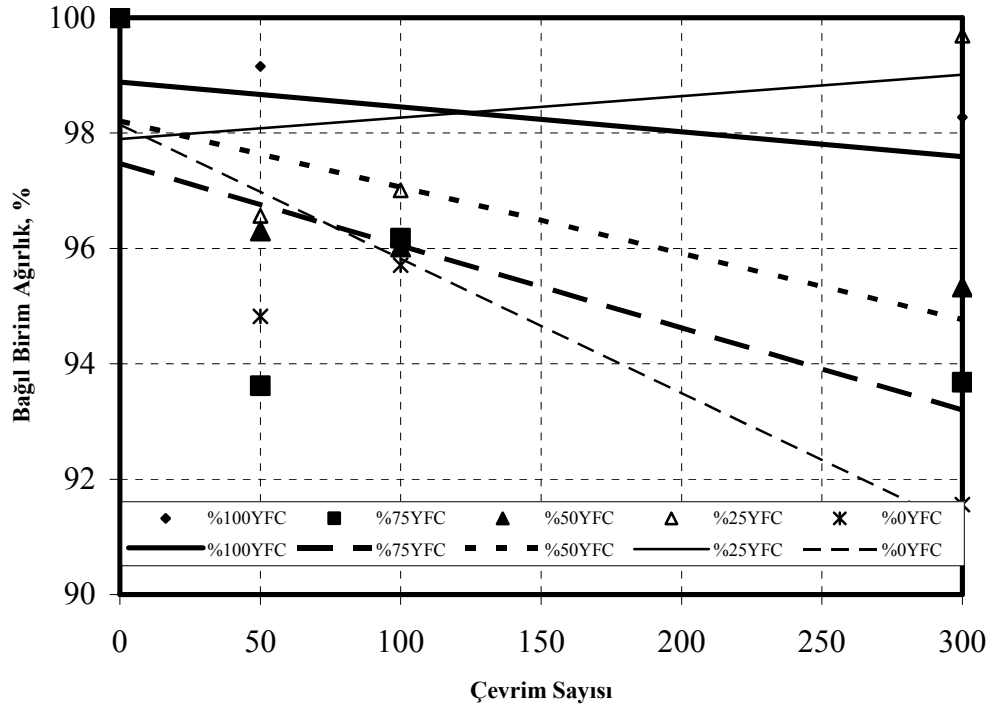
## II.2. Yapılan Deneyler

Donma çözülme etkisini incelemek için TS 3449'dan faydalanılmıştır. YFC, çimento yerine %0, %25, %50, %75, %100 oranlarında kullanılmıştır. YFC'yi aktive etmek için NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılmıştır. Ayrıca YFC'nin %1 oranında kireç katılmıştır. Karışım oranları sırasıyla bağlayıcı:su:kum (1:0.5:3) olarak alınmış, karışımlar hazırlanmış, 7x7x7 cm boyutlarında kalıplara dökülmüştür. Numuneler 28 gün standart kür koşullarında bekletilmiştir. 7x7x7 cm boyutlarında harç numuneler 28 günlük dayanımlarına ulaştıklarında, 2 saat -20 °C donma, 2 saat 20 °C çözülme şeklinde tekrarlı donma çözülme etkilerinde altında bırakılmış kontrol harçlarına göre dayanım ve fiziksel kayıplar incelenmiştir. Kodlamalar; I, NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>; II, NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>; III, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> aktivasyon için kullanılan alkali türlerini belirtmiştir. Ölçümler 50, 100 ve 300 donma çözülme çevrimi sonunda yapılmıştır. Kontrol numunelerine göre donma çözülme etkisinde kalan numunelerin dayanım, elastisite modülü, birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, rezonans frekansı değerleri bağıl olarak hesaplanmış ve çevrim sayısı dikkate alınarak grafik olarak gösterilmiştir.

## III. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE İRDELENMESİ

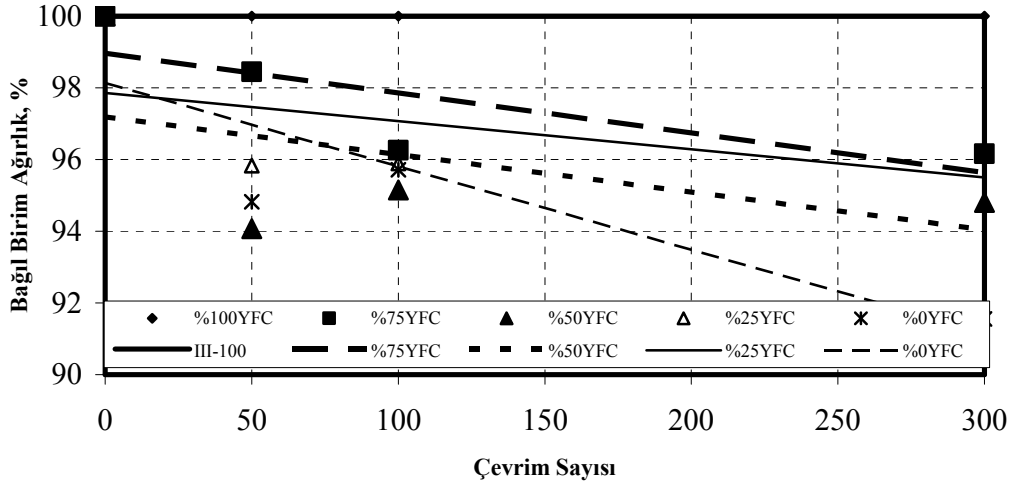


Şekil 1. NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (I) ile aktive edilen harçların birim ağırlık deney sonuçları

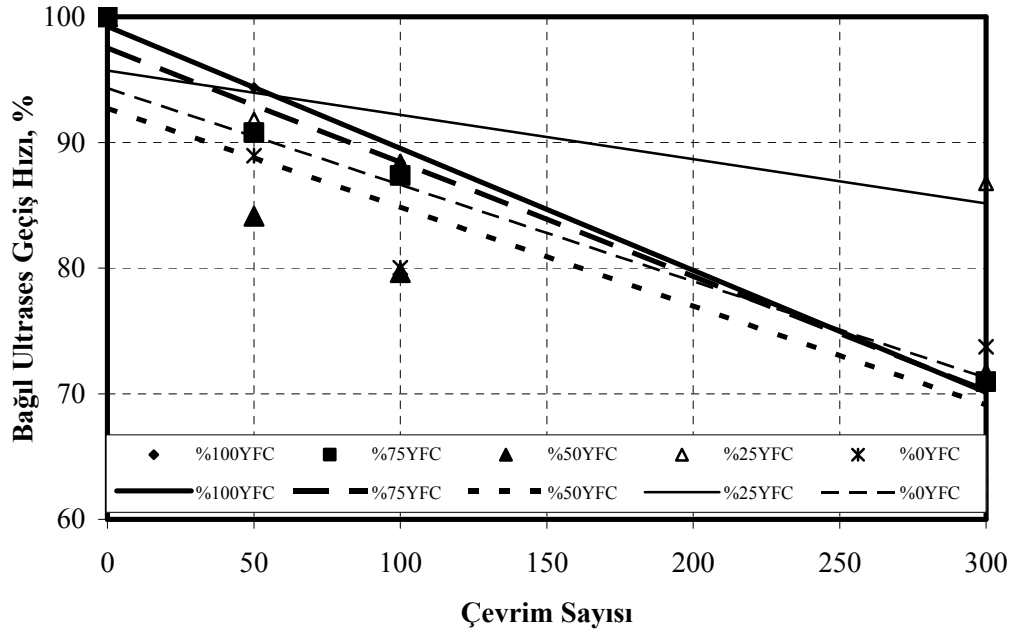


Şekil 2. NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (II) ile aktive edilen harçların birim ağırlık deney sonuçları

Donma çözülme etkisinde kalan I ile aktive edilen YFC'li harçların birim ağırlık deney sonuçları Şekil 1'de, II ile aktive edilenlerinki Şekil 2'de, III ile aktive edilenlerin ise Şekil 3'de gösterilmiştir. Çevrim sayısı arttıkça harçların bağlı birim ağırlıkları azalmıştır. En büyük azalma % 7 ile kontrol harçlarında görülmüştür. Harçların bağlı birim ağırlıklarında ki azalma oranı YFC kullanılması ile düşmüştür. Bunun nedeni aktive edilmiş YFC kullanılması ile harçlarda mikro yapıda doluluğun sağlanması, donma çözülme etkisinde parçalanmaların azalması şeklinde açıklanabilir. II ile aktive edilmiş YFC kullanılan harçlarda % 6'ya ulaşan oranlarda azalma görülmüştür. %100 III ile aktive edilmiş YFC kullanılan harçlar 50 çevrimi tamamlayamadan dağılmıştır. Aktivatör türü ile donma çözülme etkisi altındaki birim ağırlık değişimi incelendiğinde en az kayıp I ile aktive edilmiş harçlarda olmuştur. Buradan I, YFC ile kuvvetli bir bağ oluşturduğundan donma çözülme etkisi altında önemli bir parçalanma ve ufalanma olmadığı anlaşılmaktadır.

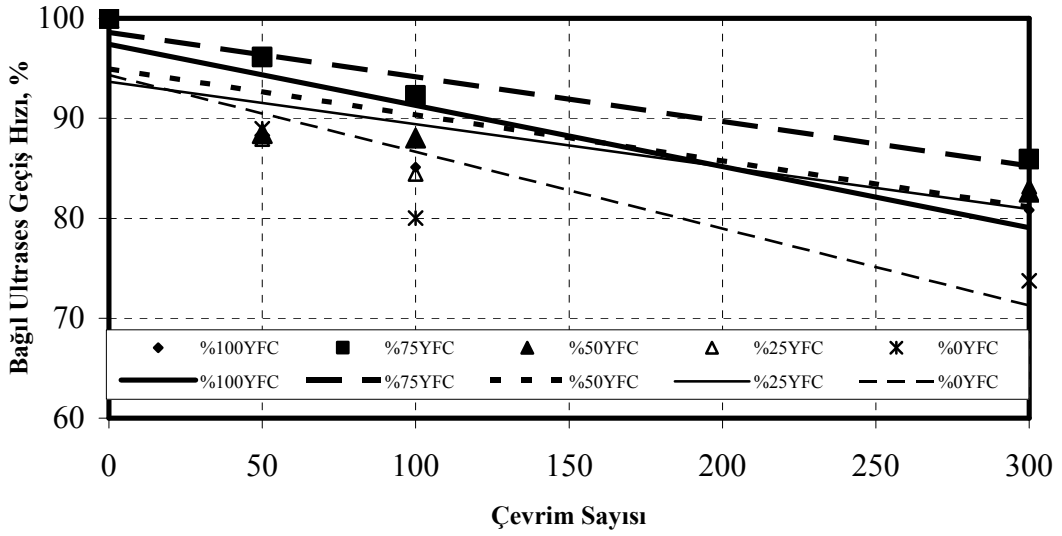


Şekil 3.  $Na_2SiO_3$  (III) ile aktive edilen harçların birim ağırlık deney sonuçları



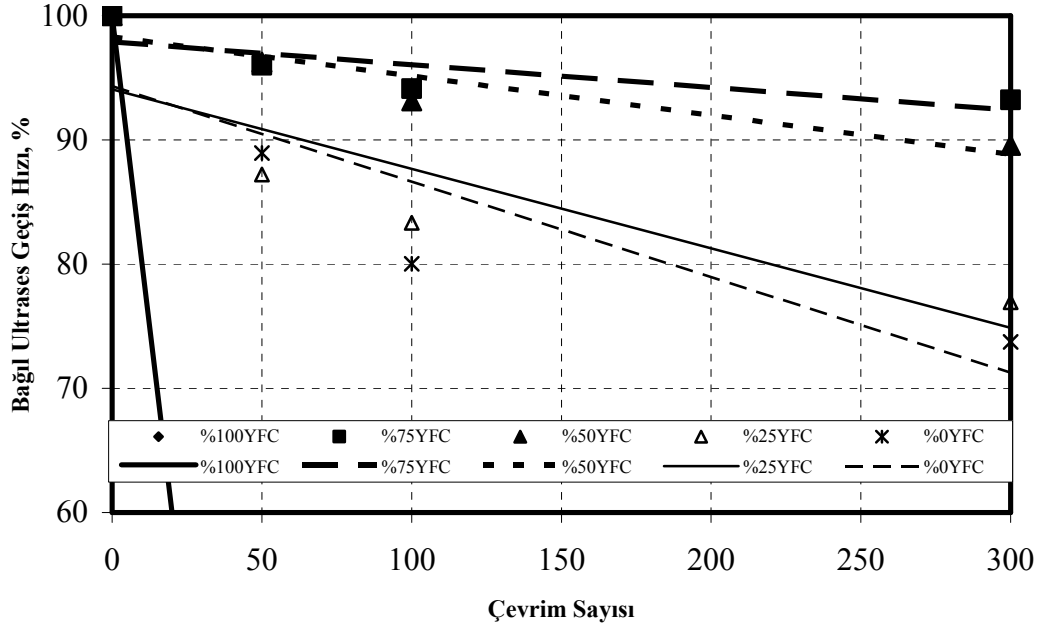
Şekil 4.  $NaOH+Na_2CO_3$  (I) ile aktive edilen harçların ultrases deney sonuçları

Donma çözülme etkisinde kalan I ile aktive edilen YFC'li harçların ultrases geçiş hızı deney sonuçları Şekil 4, II ile aktive edilenlerinki Şekil 5, III ile aktive edilenlerin ise Şekil 6'da gösterilmiştir. Çevrim sayısı arttıkça harçların bağıl ultrases geçiş hızları azalmıştır. Bunun nedeni donma çözülme etkisi ile oluşan çatlakların ultrases geçiş sürelerini arttırmasıdır. I ile aktive edilen YFC'li harçların ultrases geçiş hızları %25 YFC'li harçlar hariç kontrol harçlarına benzer davranış göstererek %30'a ulaşan oranlarda düşmüştür. II ile aktive edilen YFC'li harçlarda bu düşme oranı azalarak %20 olurken, %75 oranında III ile aktive edilen YFC'li harçlarda %10'nun altına düşmüştür.

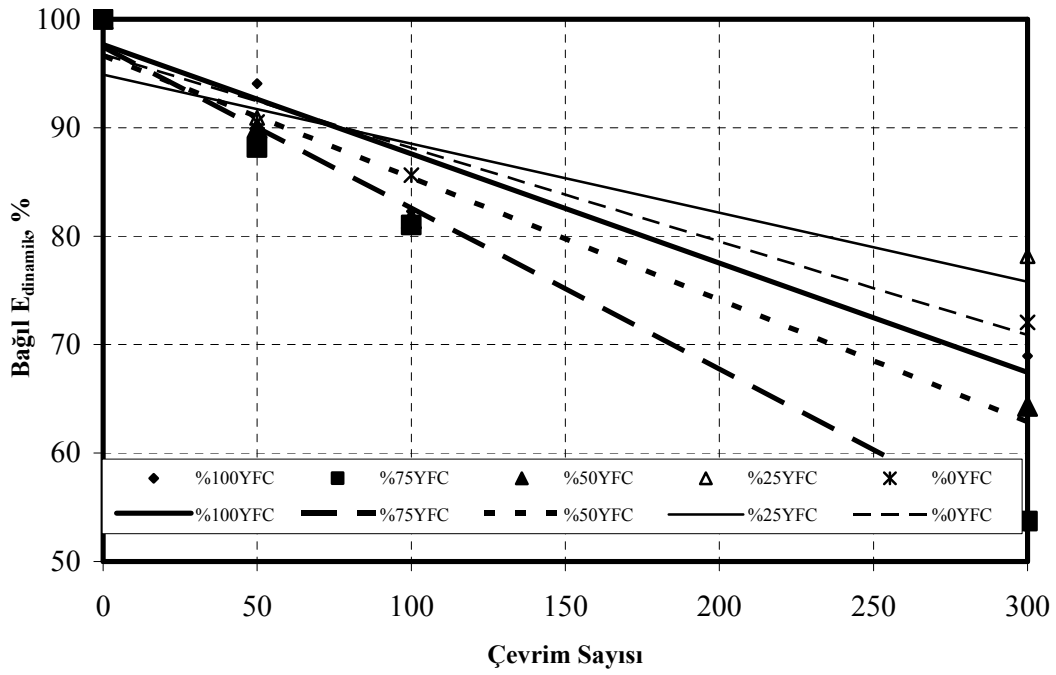


Şekil 5. NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (II) ile aktive edilen harçların ultrases deneyi sonuçları

Aktivatör olarak I kullanılması ile oluşan güçlü bağ gevrek yapısı nedeni ile donma çözülme etkisinde çatlak oluşumunu ve ilerlemesini arttırırken, III kullanılması ile oluşan zayıf bağ yapısı donma çözülme etkisi ile oluşan çatlakları sönmülendirerek ultrases geçiş sürelerinin azalmasına neden olmuştur.



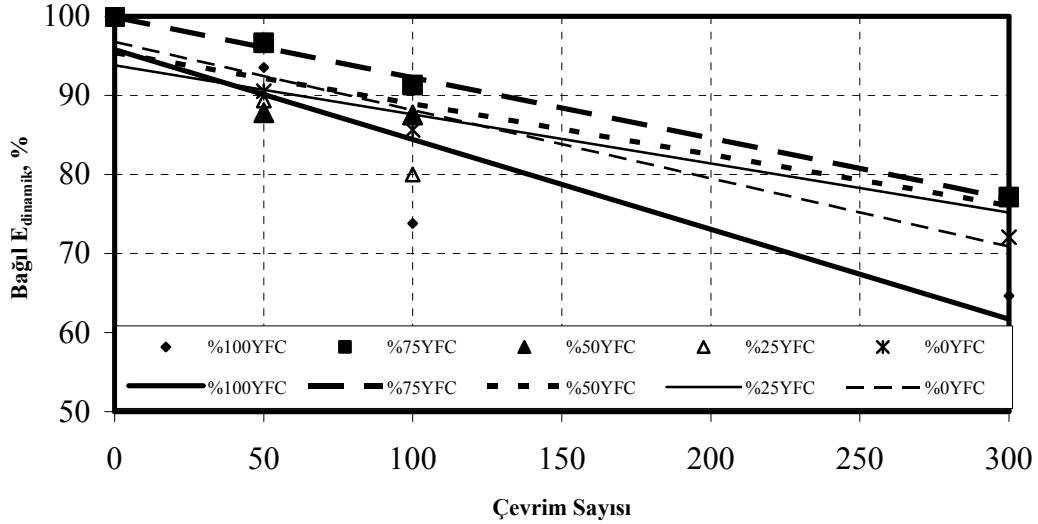
Şekil 6. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (III) ile aktive edilen harçların ultrases geçiş hızı deney sonuçları



Şekil 7. NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (I) ile aktive edilen harçların dinamik elastisite modülleri

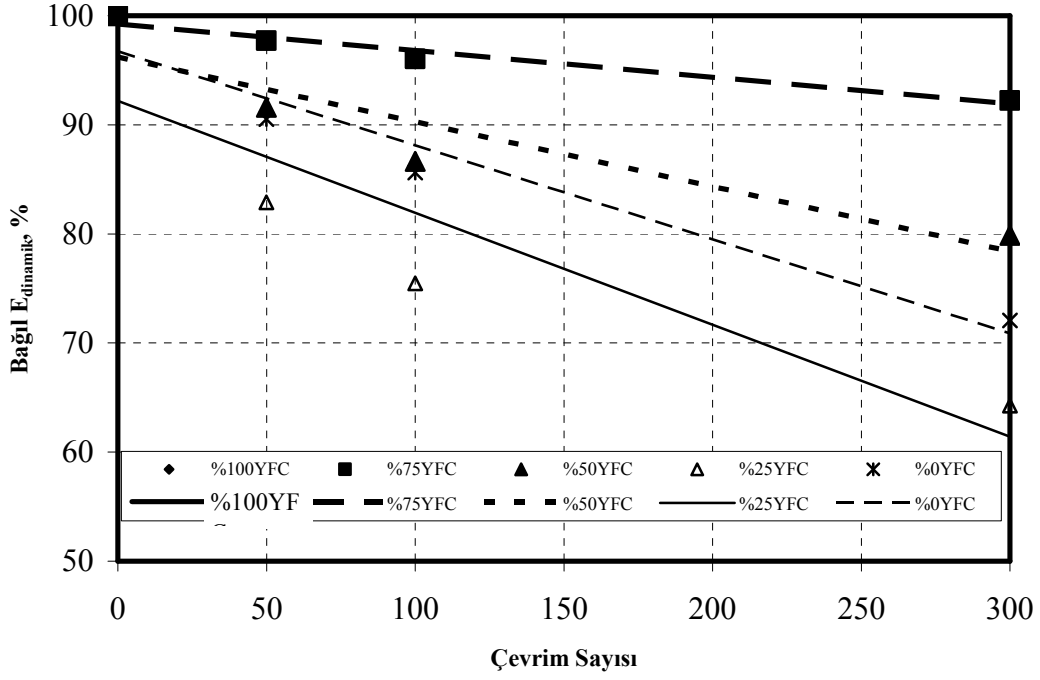


Donma çözülme etkisinde kalan I ile aktive edilen YFC'li harçların ultrases geçiş hızlarına ve birim ağırlıklara bağlı olarak bulunan dinamik elastisite modülleri Şekil 7, II ile aktive edilenlerinki Şekil 8, III ile aktive edilenlerin ise Şekil 9'da gösterilmiştir. Çevrim sayısı arttıkça harçların bağlı dinamik elastisite modülleri azalmıştır. Donma çözülme etkisinde oluşan çatlaklar nedeni ile gerilmeler düşerken şekil değiştirmeler artmış ve elastisite modülleri azalmıştır.

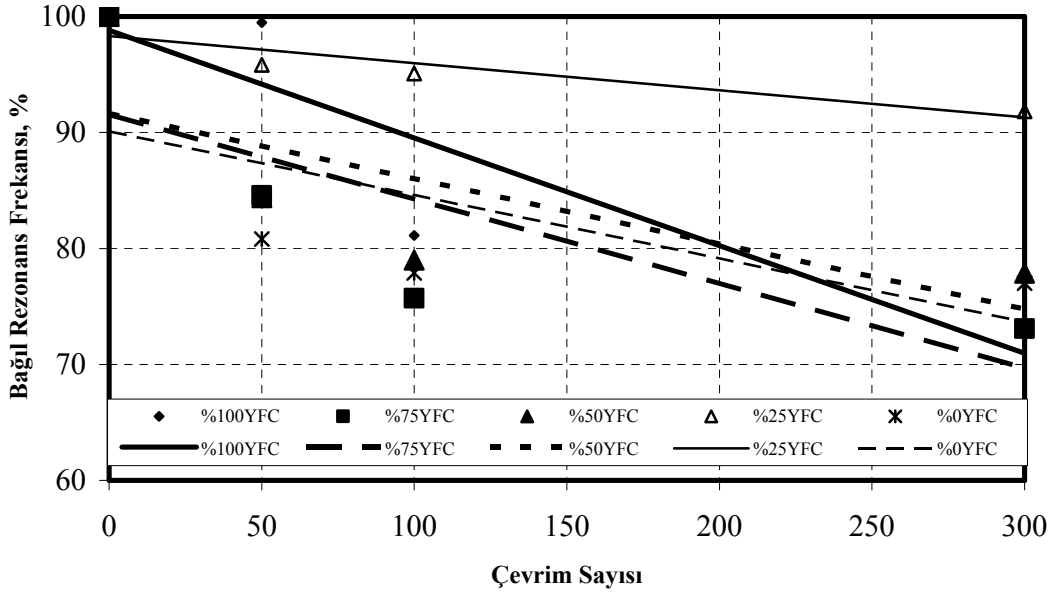


**Şekil 8.**  $NaOH+Na_2SiO_3$  (II) ile aktive edilen harçların dinamik elastisite modülleri

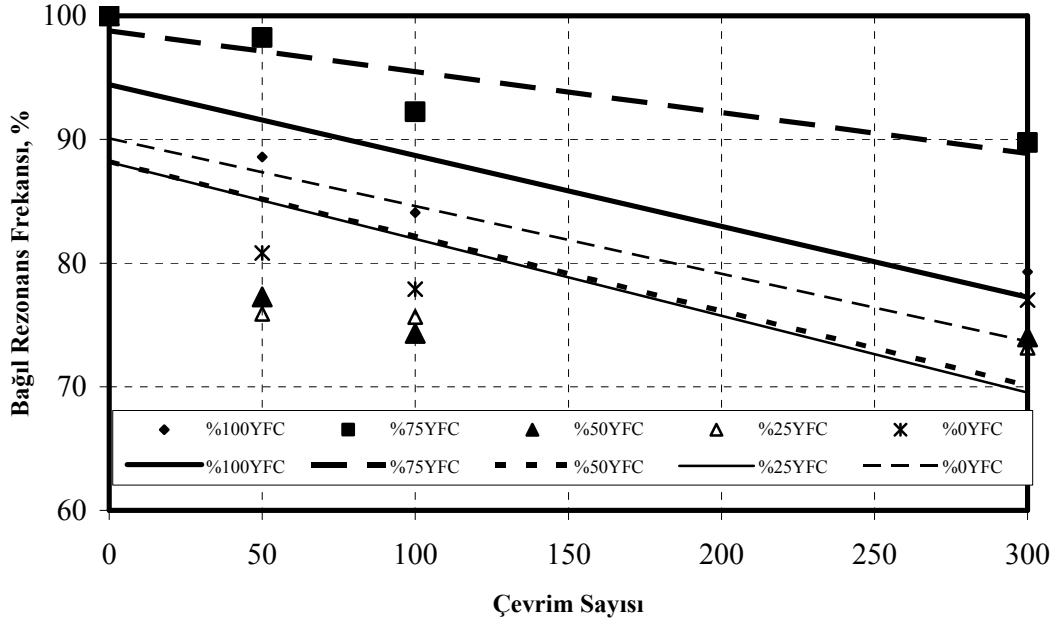
Aktivator kombinasyonu açısından incelendiğinde I ile aktive edilen YFC'lerden yüksek oranlarda kullanılması durumunda bağlı dinamik elastisite modülleri %50'lere ulaşan oranlarda düşerken, II ve III ile aktive edilen YFC'lerden %75 kullanılması durumunda bu düşme oranı sırası ile %20, %10 olmuştur. Buradan sıvı haldeki III ile YFC arasında reaksiyonlar sonucunda oluşan yapı, donma çözülme etkisinde daha az gevrekleştiği, oluşan çatlak sayısı ve genişliğinin azaldığı, şekil değiştirebilme yeteneğini tamamen yitirmediği düşünülebilir. Donma çözülme etkisinde kalan I ile aktive edilen YFC'li harçların rezonans frekansı deney sonuçları Şekil 10, II ile aktive edilenlerinki Şekil 11'de, III ile aktive edilenlerin ise Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 9. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (III) ile aktive edilen harçların dinamik elastisite modülleri

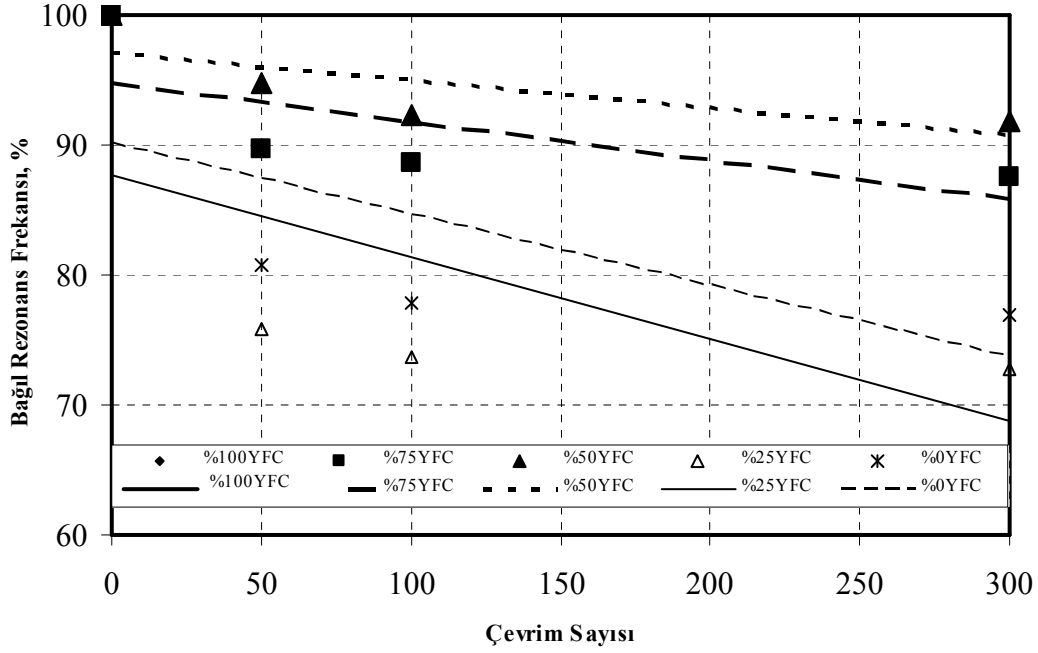


Şekil 10. NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (I) ile aktive edilen harçların rezonans frekansları sonuçları



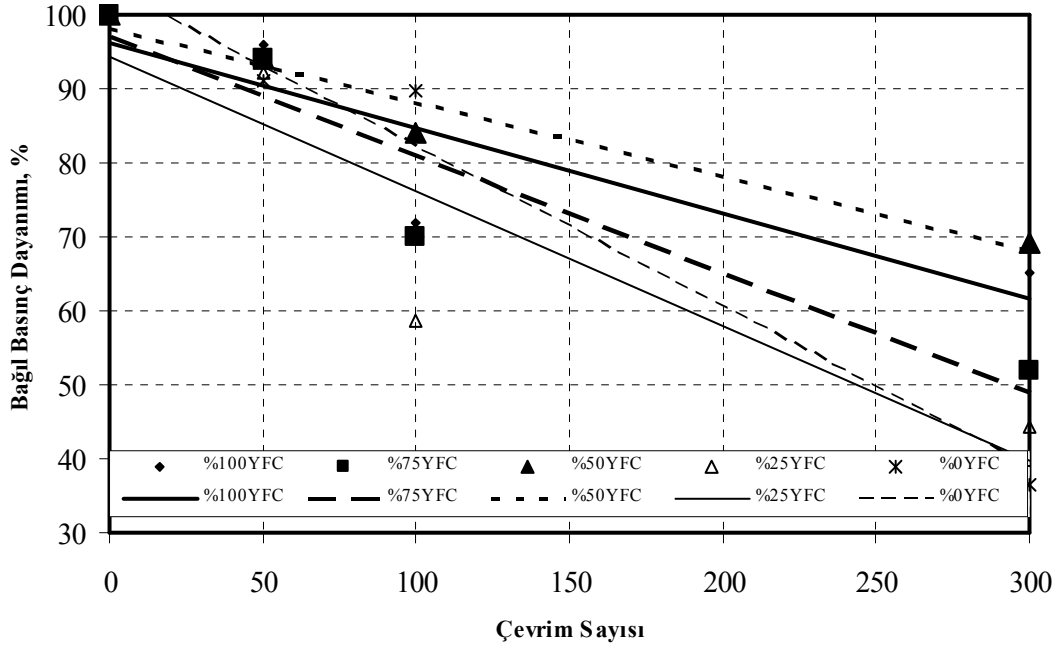
Şekil 11. NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (II) ile aktive edilen harçların rezonans frekansı sonuçları

Çevrim sayısı arttıkça harçların bağıl rezonans frekansları azalmıştır. I ile aktive edilen YFC'li harçların rezonans frekansları %30'a ulaşan oranlarda azalmıştır. %25 oranında YFC katılan harçlar hariç diğer harçların rezonans frekanslarında 100 çevrime kadar ani düşme görülürken 100 çevrimden sonra düşme hızı azalmıştır. II ile aktive edilmiş harçların bağıl rezonans frekansındaki en düşük azalma %75 oranında YFC kullanılması durumunda elde edilirken, III ile aktive edilerek %50 ve %75 oranında YFC kullanıldığında bağıl rezonans frekansındaki düşme oranı azalmıştır. Donma çözülme etkisi ile oluşan çatlak yapısı bağıl rezonans frekanslarının azalmasına neden olmuştur. Aktive edilmiş YFC kullanılması ile mikroyapıda doluluk sağlandığı ve donma çözülme ile oluşan çatlak miktarı ve genişliği azaldığı için rezonans frekanslarındaki düşmeler azalmıştır.

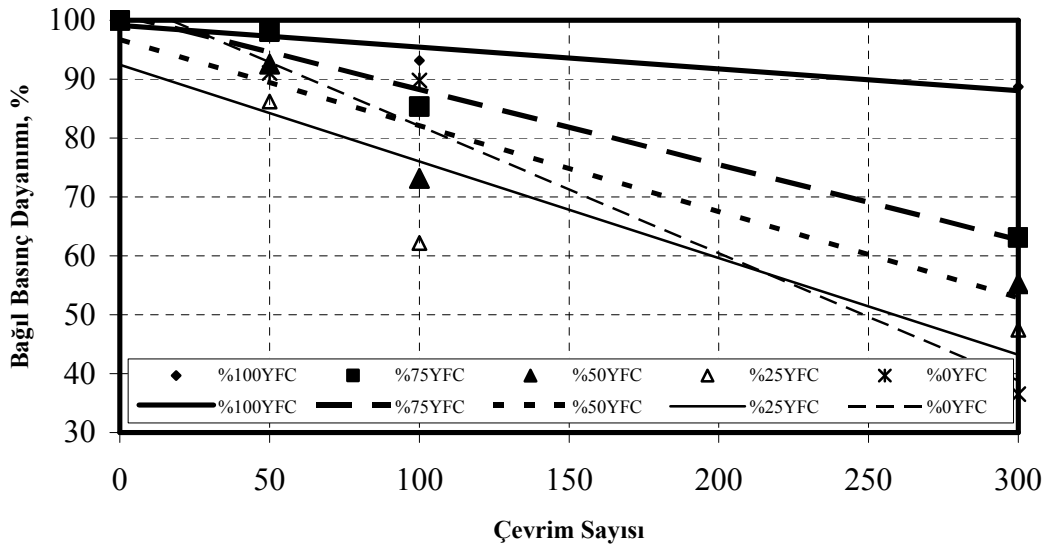


**Şekil 12.**  $Na_2SiO_3$  (III) ile aktive edilen harçların rezonans frekansı deney sonuçları

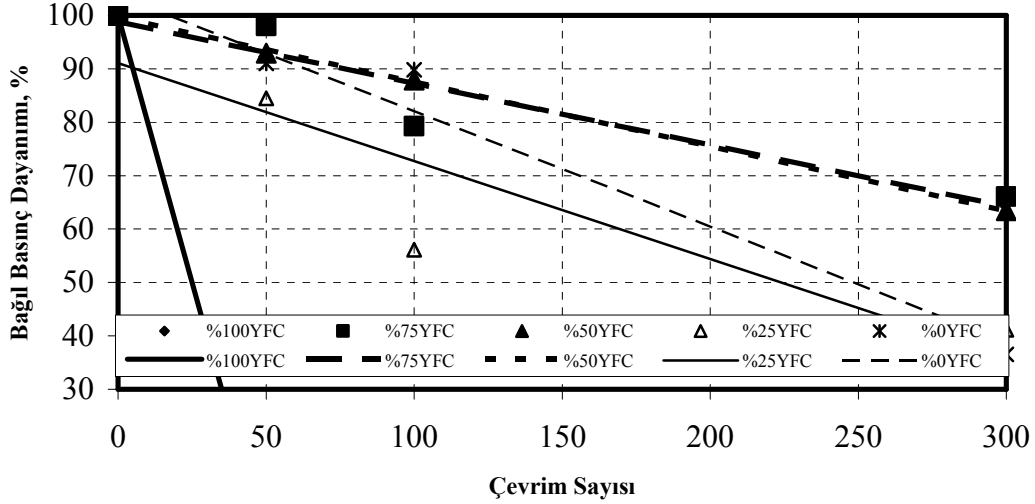
Donma çözülme etkisinde kalan I ile aktive edilen YFC'li harçların basınç dayanımı sonuçları Şekil 13, II ile aktive edilenlerinki Şekil 14, III ile aktive edilenlerin ise Şekil 15'de gösterilmiştir. Çevrim sayısı arttıkça harçların basınç dayanımları azalmıştır. Bu azalmanın nedeni donma çözülme etkisi ile oluşan fiziksel bozulma, çatlama ve ufalanmalardır. Özellikle kontrol harçlarında %60'lara ulaşan basınç dayanım kayıpları görülmüştür. Aktive edilmiş YFC kullanılması durumunda basınç dayanım kayıpları azalmıştır. I ile aktive edilen YFC'li harçların basınç dayanım kayıpları 50 çevrimden sonra artarak 300 çevrimde belirginleşmiş en düşük kayıp %30 ile %50 oranında YFC kullanılan harçlarda görülmüştür. II ile aktive edilen YFC'den %100 oranında kullanılması durumunda basınç dayanım kayıpları % 10'a ulaşmıştır. III ile aktive edilmesi durumunda %50 ve %75 oranlarında YFC kullanılan harçlar benzer davranış göstererek %35'e ulaşan oranda dayanım kaybı gerçekleşmiştir. Ayrıca III ile aktive edilen % 100 YFC'li harç numuneleri 50 çevrimden önce dağıldığı için ölçüm yapılamamıştır. Buradan yüksek oranda aktive edilmiş YFC kullanılması ile donma çözülme sonucu oluşan hasarların azaldığı söylenebilir.



Şekil 13. NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (I) ile aktive edilen harçların basınç dayanımı deney sonuçları



Şekil 14. NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (II) ile aktive edilen harçların basınç deneyi sonuçları



Şekil 15.  $Na_2SiO_3$  (III) ile aktive edilen harçların basınç dayanımı deney sonuçları

#### IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Donma çözülme etkisinde kalan harçlarda çevrim sayısı arttıkça oluşan çatlak miktarı ve genişlikleri artacağından, harçların bağıl birim ağırlıkları, ultrases geçiş hızı, dinamik elastisite modülleri, basınç dayanımları azalmıştır. Aktive edilmiş YFC kullanılması durumunda genel olarak bu azalma oranları düşmüştür. Donma çözülme etkisinde birim ağırlık açısından en avantajlı sonuçlar  $NaOH+Na_2SiO_3$  ile aktive edilen %100 oranında YFC içeren numunelerde elde edilmiştir. Bunun yanında, ultrases geçiş hızı ve elastisite modülü için optimum YFC oranı %75 olurken, en uygun aktivatör kombinasyonunun ultrases geçiş hızı için  $NaOH+Na_2SiO_3$  ve elastisite modülü için  $Na_2SiO_3$  olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Donma çözülme etkisindeki basınç dayanımına bakıldığında ise, en uygun aktivatör kombinasyonu %100 YFC oranında  $NaOH+Na_2SiO_3$  olmuştur. Sonuç olarak, donma çözülme dayanıklılığını arttırmada YFC kullanım miktarını arttırmak için aktivasyonda kullanılan alkali türünün oldukça önemli olduğu görülmüştür. Çalışmanın sonunda,  $NaOH+Na_2SiO_3$  kombinasyonunun harç yapımında kullanılması önerilebilir. Ayrıca yüksek oranlarda aktive edilmiş YFC kullanılması durumunda, harçların donma çözülme dayanıklılığını arttırmasının yanı sıra, atık değerlendirildiği için ekonomiye ve çevreye katkı sağlanmış olacaktır.

**V. KAYNAKLAR**

- [1] M. Tokyay ve K. Erdoğan, “Cürüfler ve Cürüflü Çimentolar, Araştırmaların Gözden Geçirilmesi Raporu”, TÇMB Yayını, 48 s., Ankara, Ekim 2003.
- [2] M.G. Peter and E.G. Jack, “Freeze-thaw durability of activated blast furnace slag cement concrete”, *ACI Mat. Journal*, pp. 242-245, May-June 1996.
- [3] S.D. Wang, K.L. Scrivener and P.L. Pratt “Factors affecting the strength of alkali-activated slag”, *Cem. Conc. Res.*, Vol. 24, pp. 1033-1043, 1994.
- [4] T. Hakkinen, “The Influence of slag content on the microstructure, permability and mechanical properites of concrete”, *Cem. and Conc. Res.*, Vol. 23, pp. 407-421, 1993.
- [5] C. Shi and R.L. Day, “Some factors affecting early hydration of alkali-slag cements”, *Cem. and Conc. Res.*, Vol. 26, pp. 439-447, 1996.
- [6] M. Canbaz, “Alkali Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürüflü Harçların Özellikleri”, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 244 s., 2007.
- [7] İ.B. Topçu ve M. Canbaz, “Yüksek Fırın Cürufunun Beton Üretiminde Değerlendirilmesi”, *Akdeniz İnşaat Haber*, Sayı 3, ss. 38-41, 2005.
- [8] İ.B. Topçu ve M. Canbaz, "Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürüflü Harçlara Alkali Türünün Etkisi", Yapı Mekaniği Semineri 2006, ODTÜ-ESOGÜ-ETB, Haziran 2006, Eskişehir, ss. 120-128.
- [9] İ.B. Topçu and M. Canbaz, "Effect of Chemical Composition on Alkali Activated Slag Mortars", TÇMB, 3rd Inter. Symposium Sustainability in Cement and Concrete, May 2007, İstanbul, pp. 223-232.
- [10] İ.B. Topçu ve M. Canbaz, "Sülfat Etkisinde Kalmış Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürüflü Harçların Mikroyapısı", 18. Ulusal Elektron Mikroskopi Kongresi, Ağustos 2007, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, s. 118.

- [11] İ.B. Topçu ve M. Canbaz, "Yüksek Sıcaklık Etkisinde Kalmış Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürüflu Harçların Mikroyapısı", 18. Ulusal Elektron Mikroskopi Kong., Ağustos 2007, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, s. 59.
- [12] İ.B. Topçu ve M. Canbaz, "Alkali Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürüflu Harçların Fiziksel Özellikleri", Yapı Mekaniği Semineri 2007, ODTÜ-ESOGÜ-ETB, Haziran 2007, Eskişehir, ss. 156-162.