

## ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ HARÇLARIN ÇEKİP ÇIKARMA VE AŞINMA DİRENÇLERİNİN BELİRLENMESİ

Müzeyyen BALÇIKANLI\*, Erdoğan ÖZBAY, Hakan Tacettin TÜRKER

*İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay, Türkiye*

### ÖZET

Bu çalışmada farklı oranlarda Yüksek Fırın Cürufunun (YFC) alkalilerle aktive edilmesiyle üretilen çimentosuz harçların basınç ve eğilme dayanımları, aşınma ve çekip çıkarma dayanımları araştırılmıştır. Karışım oranı ağırlıkça 1:2.75:0.485 bağlayıcı (çimento, cüruf): ince agrega: su kullanılarak, % 50, % 100 oranlarında ve özelliklerin karşılaştırılabilmesi için % 0 oranında cüruf, çimento ile yer değiştirilmiştir. Cüruf aktivasyonu için karışımın sodyum konsantrasyonu % 5 olacak şekilde sodyum hidroksit (NaOH) ve modülü 3 olan ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ) sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) çözeltisi ilave edilmiştir. Hazırlanan her harç karışımı için kür sıcaklıkları 40, 60 ve 80°C olarak belirlenmiş ve etüvde bekleme süresi 6, 12 ve 24 saat olarak seçilmiştir. Deney sonuçlarına göre sıcaklık kürünün % 100 YFC'li alkalilerle aktive edilmiş (AAE) harçlarda dayanımı artırıcı yönde etkisi olduğu, ancak 80°C'de tüm numunelerin özelliklerinin olumsuz etkilendiği belirlenmiştir. AAE cürufu harçların eğilme dayanımlarının kontrol numunelerine göre daha düşük olduğu görülmüştür. Çekip çıkarma deney sonuçlarının da basınç dayanımında olduğu gibi, % 100 YFC içeren AAE harçlarda en yüksek, % 50 YFC içeren AAE harçlarda ise en düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca YFC içeren AAE harç numunelerin aşınma dirençlerinin daha düşük olduğu da belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alkali aktivasyonu, cüruf, aşınma direnci, çekip çıkarma direnci

## INVESTIGATION OF THE ABRASION AND PULL-OUT RESISTANCE OF ALKALI ACTIVATED SLAG MORTARS

### ABSTRACT

In this study mechanical properties, abrasion and pull out resistance of alkali activated Ground Granulated Blast Furnace Slag (GBS) mortars containing different slag replacements is investigated. The mortar mixture proportions were 1:2.75:0.485 by weight of binder, sand and water. GBS was used at 0, 50 and 100% replacement of cement by weight to compare the properties. For alkali activation of slag, liquid sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) having a module ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ) of 3 and sodium hydroxide (NaOH) were added to get a 5% Na concentration in the mixture. The mortar specimens were exposed to different curing temperatures as 40, 60, and 80°C for 6, 12, and 24 hours. The compressive strength of slag mortar containing 100% GBS increased with increasing in the curing temperatures up to 60°C, and the properties of all samples were negatively affected at 80°C. The use of the mixture of cement and GBS negatively affected the compressive strength of mortars with respect to cement mortar. Activation of GBS in mortar production alleviated the flexural strength considerably. Pull out resistance of alkali activated mortar with 100% GBS was the highest as in compressive strength; however, pull out resistance of alkali activated mortar with 50% GBS was the lowest. Abrasion resistances of mortars containing cement only were remarkably higher than those of the alkali activated GBS mortars.

**Keywords:** Alkali activation, granulated blast furnace slag, abrasion resistance, pull-out resistance

\*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 536 923 45 50; e-mail: [mbalcikanli@mku.edu.tr](mailto:mbalcikanli@mku.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Atıkların doğaya doğrudan terk edilmesinin başta çevre kirliliği olmak üzere topluma çok büyük olumsuz etkileri bulunmaktadır. Günümüzde, çeşitli ürünlerin üretimi sırasında elde edilen yan ürün veya atıkların değerlendirilmesi üzerinde bilimsel çalışmalar artarak devam etmektedir. Atıkların, yeni ürün elde edilmesi veya mevcut ürünlerde katkı maddesi olarak kullanılması mümkündür. Atık malzeme ve yan ürünlerin değerlendirilmesi, hem çok kısıtlı olan doğal malzemelerin kullanımını azaltarak doğanın tahrip edilmesini önlemekte, hem de malzemelerin atılmak üzere depolanması durumunda meydana gelebilecek çevresel problemleri en aza indirmektedir [1].

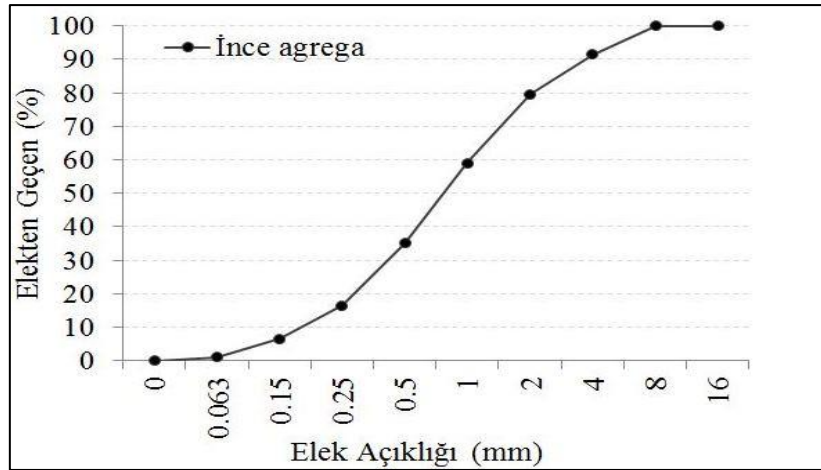
Yüksek Fırın Cürufu (YFC), demir çelik fabrikalarının beton ve çimento endüstrisinde kullanılan bir atık ürünüdür. Türkiye, yıllık ortalama 1713 milyon ton olarak hesaplanan dünya demir çelik üretiminin %2'sini gerçekleştirmektedir. Demir-çelik üretimi sırasında oldukça önemli miktarda yüksek fırın cürufu atığı oluşmaktadır. Bu atık malzemenin ülkemizde ve dünyada da kullanım alanı sınırlıdır [2]. Genellikle, Portland çimentosu ile YFC'nin yer değiştirmesi betonda erken dayanımı düşürür, fakat betonun ileri yaş dayanımını ve dayanıklılığını artırır. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi mineral malzemelerin tek başlarına kullanıldığında bağlayıcılık özelliği yeterli düzeyde değildir. Bu nedenle özellikle yüksek fırın cürufu alkalilerle aktive edilerek bağlayıcılık özelliği artırılmakta ve hiç çimento ilave edilmeden doğrudan beton yapımında kullanılabilmektedir. Alkali ile aktive edilmiş cürufuların mikro yapısal gelişiminin, büyük oranda, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufundaki anyonlar ile aktivatördeki katyonların sentezinden ileri geldiği düşünülmektedir. Cürufun silikat anyonları ile aktivatördeki katyonları arasındaki iyon değişimi sonucu ortaya çıkan kimyasal reaksiyonlar, silika jel formasyonunu meydana getirmekte ve bu silika jeli, cüruftaki kalsiyum iyonlarının ilave tepkimesiyle birlikte silikat bakımından zengin kalsiyum silikat hidrat (CSH) jeline dönüşmektedir [3]. Yalnız olarak kullanıldığında bağlayıcılık özelliğini çok yavaş ve az kazanan bir malzeme olan YFC, alkali aktivasyonu ile bu CSH yapısını oluşturmada ve YFC'nin çimentoya alternatif bağlayıcı malzeme olarak kullanılabilmesi mümkün olmaktadır. Potansiyel bir hidrolik bağlayıcı olan yüksek fırın cürufu, sürtünme, donma çözülme, sülfatlara dayanıklılık ve diğer durabilite özellikleri gibi birçok avantajları sebebiyle çimento ve beton endüstrisinde Portland çimentosuna kısmi yer değiştirme yapılarak kullanılmaktadır [4-6]. YFC'nin alkalilerle aktive edilmesiyle alakalı literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda alkalilerle aktive edilmiş (AAE) YFC içeren harç ve beton numunelerinin fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleri araştırılmıştır. Yapılan bir çalışmada, uçucu külün sodyum hidroksit ile aktive edilerek 85°C'de 24 saat kür edilmesiyle basınç dayanımının 35-40 MPa arasında olduğu gözlenmiştir. Karışıma sodyum silikat da ilave edildiğinde basınç dayanımının 90 MPa'ya kadar yükseldiği görülmüştür [7]. Bilim ve arkadaşları, alkalilerle aktive edilmiş cüruf miktarının beton karışımındaki etkisini incelemek için, cürufu ağırlıkça % 0, 20, 40, 60, 80 ve 100 olacak şekilde çimento ile yer değiştirerek, 3 farklı sodyum dozajında sıvı sodyum silikat ile aktive etmiş, üretilen numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarını ölçülmüştür. Cüruf oranı ve aktivatör konsantrasyonu arttıkça, basınç ve eğilme dayanımlarının arttığı belirlenmiştir. Portland çimentosuyla karıştırılarak kullanılan cürufu numunelerin sadece cüruf kullanılarak üretilen numunelere göre daha düşük dayanım gösterdiği belirlenmiştir [8]. Farklı alkali aktivasyon parametrelerinin etkilerinin incelendiği çalışmada, cüruf harcı ve hamurunun ısı yayılımı ve dayanım kazanma gelişiminin oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda nasıl değiştiği incelenmiştir. Sıcaklık kürrüne maruz bırakılan numunelerin çok hızlı dayanım kazandığı ancak oda sıcaklığında bekletilen numunelerin yeterli süre kür edildiğinde dayanım kazandığı ve dayanım değerlerinin hızlı kür edilen numunelere yakın olduğu gözlenmiştir. Oda sıcaklığında küre bırakılan numuneler için, sodyum hidroksit derişiminin basınç dayanımı üzerinde daha etkili olduğu belirlenmiştir [9]. AAE YFC'li betonların Portland çimentolu betonlara göre mekanik ve durabilite özelliklerinin 300, 400 ve 500 kg/m<sup>3</sup> gibi farklı bağlayıcı dozajlarından nasıl etkilendiğini incelemek için yapılan bir çalışmada, AAE cürufu betonların 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının genellikle daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca AAE cüruf betonlarının su emme kapasitesi ve toplam boşluk oranının da daha düşük olduğu ve bağlayıcı madde dozajı arttıkça bu özelliklerin daha da iyileştiği görülmüştür. YFC'li betonlarda cürufun reaksiyonlarında daha az ısı açığa çıkarmasından dolayı mikro çatlakların daha az olduğu belirlenmiştir [10]. AAE cüruf veya uçucu kül ile üretilen harçların mekanik özelliklerini ve priz süresinin değişimini incelemek için oda sıcaklığında küre maruz bırakılan numunelerin, kür şartlarını nasıl etkilendiğini belirlemek amacıyla yapılan çalışmada; basınç dayanımı, boşluk oranı ve priz süresi gibi özellikler incelenmiştir. Karışımındaki cüruf oranının ve sodyum hidroksit çözeltisi konsantrasyonunun artmasıyla, priz süresinin azaldığı belirlenmiştir. Boşluk oranının hem Portland çimentolu harçlarda hem de cürufu harçlarda neredeyse aynı olduğu ancak ortalama boşluk büyüklüğünün AAE cürufu harçlarda daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Artan boşluk sayısından ötürü cürufu harçlarda büzülme meydana gelerek mikro çatlakların

oluşmasıyla, elastisite modülü ve uzun dönemdeki basınç dayanımında azalmaların olabileceği belirlenmiştir [11].

AAE YFC harçlarının çekip çıkarma ve aşınma dirençleri ile ilgili literatürde yeterli çalışma bulunamamıştır. Bu çalışmada, İskenderun Demir Çelik Fabrikasının atık ürünü olan YFC alkalilerle aktive edilmiştir. YFC çimento ile % 50 ve % 100 oranlarında yer değiştirilerek AAE harçlar üretilmiştir. Tüm karışımlarda alkali aktivatör aynı derişimde kullanılmıştır. Üretilen harçların çekip çıkarma ve aşınma dirençleri belirlenip, kontrol harçlarıyla kıyaslanmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, Hatay İskenderun sınırları içerisinde yer alan taş ocakları tesislerinden elde edilen dolomitik kireçtaşı orijinli ince agrega (0-4 mm) kullanılmıştır. Kullanılan agreganın granülometri eğrisi Şekil 1’de verilmiştir. Kullanılan çimento, TS EN 197-1’e uygun [12] normal Portland çimentosu (PÇ 42.5R) olup, Adana Çimento Sanayi tarafından üretilmiştir. Çalışmada İskenderun Demir Çelik fabrikasının atık ürünü olan yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufunu aktive edebilmek için sodyum hidroksit (NaOH) ve modülü ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ),  $M_s = 3$  olan sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) kullanılmıştır. Alkali aktivatörlere ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 1’de verilmiştir. Çekip çıkarma deneyinde kullanılan donatılar İskenderun Demir Çelik Fabrikasında üretilen  $\phi 14$  mm çapında nervürlü inşaat çeliğidir ve 1 m boyunda kesilerek kullanılmıştır. Harç karışımı İskenderun şebeke suyu kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 1. Agrega gradasyon eğrisi

Tablo 1. Alkali malzemelerin spekt bildirimi

| Kimyasal Adı                                       | Sodyum Hidroksit         | Kimyasal Adı       | Sodyum Silikat          |
|----------------------------------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------|
| Kimyasal Formülü                                   | NaOH                     | Görünüş            | Berrak, Likit           |
| Molekül Ağırlığı                                   | 40.01 gr/mol-gr          | Bome Derecesi      | (20 °C) 40              |
| Sodyum Hidroksit NaOH (%)                          | min. 98.0                | Yoğunluk           | 1.380 g/cm <sup>3</sup> |
| Sodyum Klorür NaCl (%)                             | max. 0.02                | Na <sub>2</sub> O  | (%) 9.25                |
| Sodyum Karbonat (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ) | max. 0.4                 | SiO <sub>2</sub>   | (%) 27.97               |
| Demir (Fe) mg/ kg                                  | max. 15                  | Modül              | 3.20 – 3.50             |
| Kaynama Noktası                                    | 1390 °C                  | Katı Madde Miktarı | (%) min. 37.22          |
| Çözünürlük                                         | 1090 g/lt (Su’ da 20 °C) | Fe Miktarı         | (Ppm) Eser              |
| Görünüş                                            | Beyaz, flake şeklinde    | Ti Miktarı         | (Ppm) Eser              |

## 2.1. Deney Yöntemi

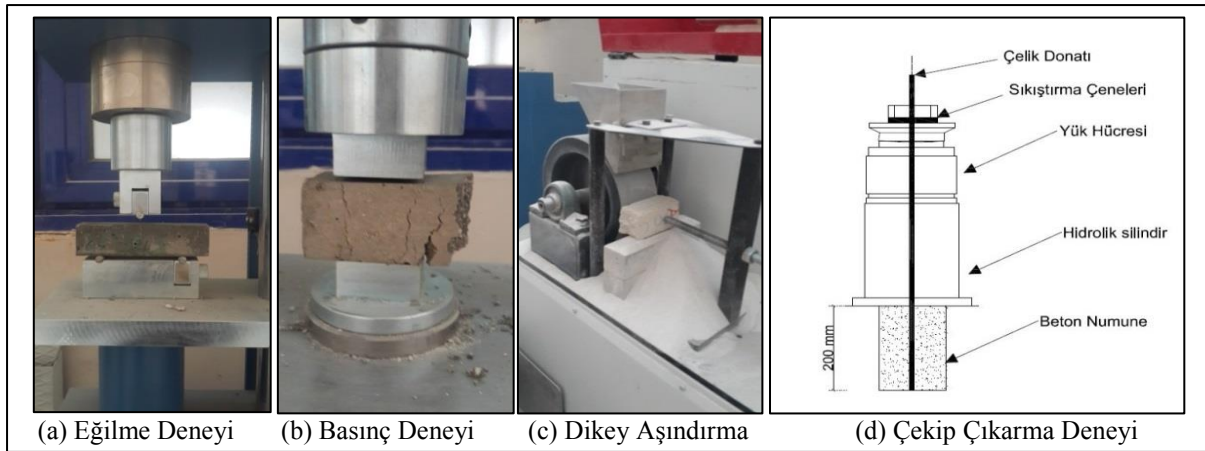
AAE YFC'nin harçlardaki kullanım oranı değiştirilerek, çimentoya göre performansının nasıl değiştiği belirlenmeye çalışılmıştır. YFC'nin harçlarda tek başına kullanıldığında, bağlayıcılık özelliği çok az olduğundan, cürufu harçların bağlayıcılığının artması için belirtilen özelliklerde sodyum silikat çözeltisi kullanılmıştır. Yarı yarıya çimento ve YFC kullanılan harçlarda kullanılan aktivatörler, sadece ilave edilen cüruf miktarını aktive edecek şekilde belirlenmiştir. Çözeltideki sodyum konsantrasyonunun % 5 olabilmesi için, dışardan katı sodyum hidroksit ilave edilip karışımdaki sodyum oranı artırılmıştır. Karışım ağırlıkça sırasıyla 1:2,75:0,485 bağlayıcı (çimento, YFC): 0-4 mm agrega: su içermektedir. Bağlayıcı olarak % 100 çimento, % 50 çimento - % 50 YFC ve % 100 YFC kullanılarak 3 ayrı harç hazırlanmıştır. Hazırlanan harçlar çekip çıkarma direncinin belirlenmesi için  $\phi 100/200$  mm, numune merkezine  $\phi 14$  mm nervürlü donatı gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Eğilme, basınç ve aşınma direncinin belirlenmesi için de hazırlanan harçlar  $40 \times 40 \times 160$  mm ölçülerindeki kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıptan çıkarılan numunelerin bir grubu suya, diğer gruplar da 40, 60, 80°C'deki etüvlere yerleştirilerek 6, 12 ve 24 saat sıcaklık kürüne maruz bırakılmıştır. Sıcaklık küründen sonra numuneler suda bekletilerek 28. günde basınç ve eğilme deneylerine tabii tutulmuştur. Eğilme deneyinde 3 farklı karışım, 4 farklı kür şartı ve 3 farklı kür süresine ait ve her bir karışım için 3'er adet  $40 \times 40 \times 160$  mm ebatlarında üretilen harç numuneleri TS EN 196-1 standardına uygun olarak deney cihazına yan yüzeylerden biri üzerine ve eksenini mesnet silindirlerinin eksenine dik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 2a'da gösterilmiştir. Basınç deneyinde, eğilme deneyinde iki parçaya bölünmüş olan yarım prizmalar kullanılmıştır. Deney düzeneği Şekil 2b'de gösterilmiştir. Aşınma deneyinde harç numunelerinin ağırlık kaybı yolu ile aşınma oranlarının bulunmasında, dikey aşındırma cihazı kullanılmış ve numunelerin, ağırlık kayıpları, yüzde ağırlık cinsinden hesaplanarak, aşınma direnci olarak değerlendirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 2c'de gösterilmiştir.  $\phi 100/200$  mm silindir numuneleri ile çekip çıkarma direnci deneyi yapılmıştır. Kullanılan deney düzeneği Şekil 2d'de şematik olarak verilmiştir.

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

AAE YFC'nin farklı oranlarda çimento ile yer değiştirilmesiyle hazırlanan harç karışımlarının mekanik özelliklerini, çekip çıkarma ve aşınma direncini belirlemeye yönelik olarak yapılan çalışmaların sonuçları aşağıda tartışılmıştır.

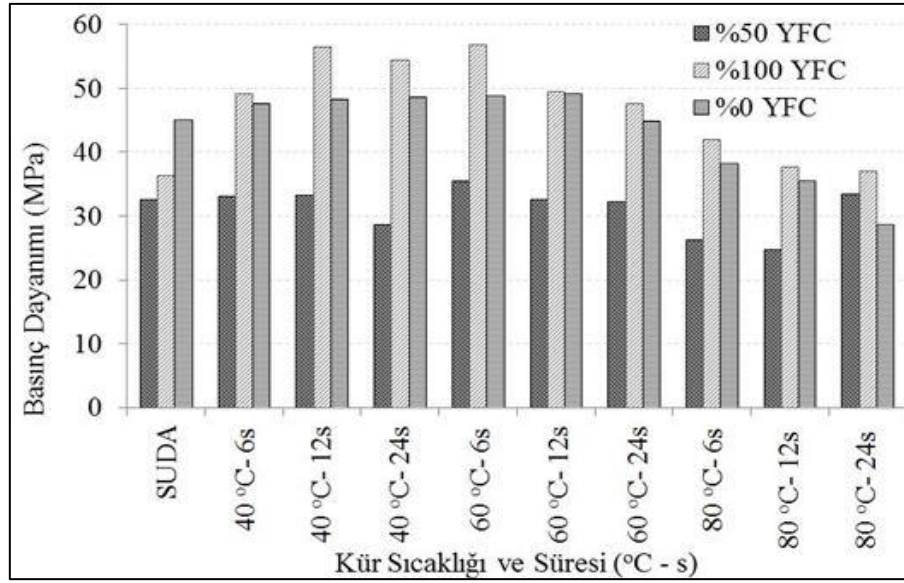
### 3.1. Basınç Dayanımı

$40 \times 40 \times 160$  mm ebatlı kiriş numunelerin eğilme deneyinde ikiye ayrılan parçaları üzerinde basınç deneyi yapılmıştır. Uygulanan yük 2400 N/s hızda olmak üzere numune kırılana kadar artırılmış ve kırılma anındaki yük ile numunelerin basınç dayanımı bulunmuştur. Deney sonuçları, farklı karışım, kür süresi ve şartları açısından Şekil 3'te verilmiştir.

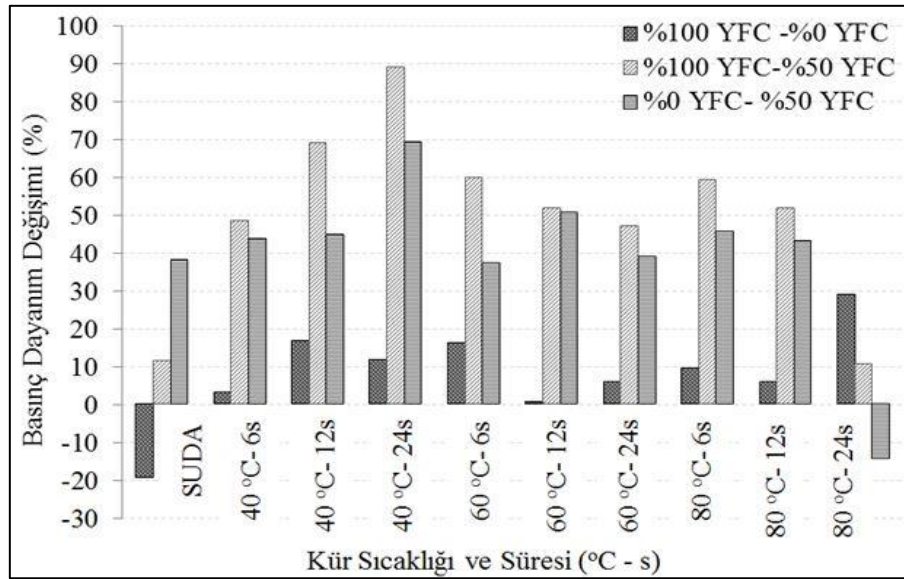


Şekil 2. Deney düzenekleri

Daha önce yapılan çalışmalarda da belirtildiği üzere, AAE % 100 oranında YFC içeren harç numunelerin basınç dayanımları, sıcaklık kürüne maruz bırakıldıklarında, % 0 YFC'li numunelere göre daha yüksek değerler almıştır. Yarı yarıya YFC ve çimento kullanılan harç numunelerinin ise tüm kür şartlarında düşük performans gösterdiği ve karıştırılarak kullanılmasının yararlı olmadığı görülmüştür. YFC gibi mineral katkıların kullanıldığı harçlar çok uzun sürede dayanım kazandığından geleneksel çimento harcı gibi suda kür edilince çimentolu harç kadar dayanım kazanamadığı görülmüştür. Her karışım için, en yüksek basınç dayanımı 60°C - 6 saat ısı kürüne maruz bırakıldığında elde edilmiştir. 60°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, kür sıcaklığı arttıkça basınç dayanımının düştüğü, su kürünün ve 80°C'ye kadar sıcaklık değişiminin, çimento harçları üzerinde fazla bir etkisinin olmadığı, tüm şartlarda hemen hemen aynı dayanıma ulaştığı belirlenmiştir. Kür sıcaklığı olarak 80°C'nin uygun olmadığı, basınç mukavemetini düşürdüğü görülmüştür. Kür sıcaklığının ve süresinin farklı harç karışımlarının basınç dayanımları üzerindeki etkisi Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Harçların basınç dayanımları değişimi

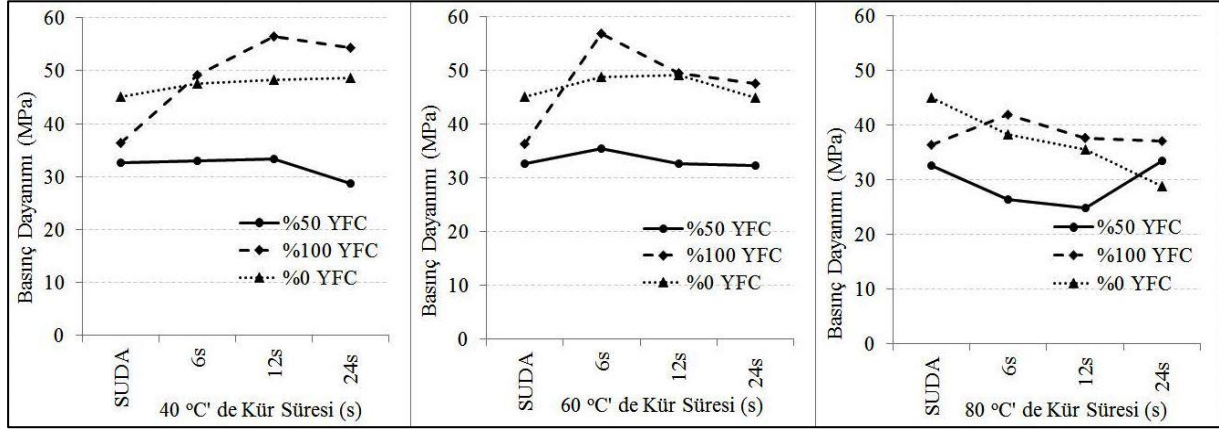


Şekil 4. Basınç dayanımının değişim oranı

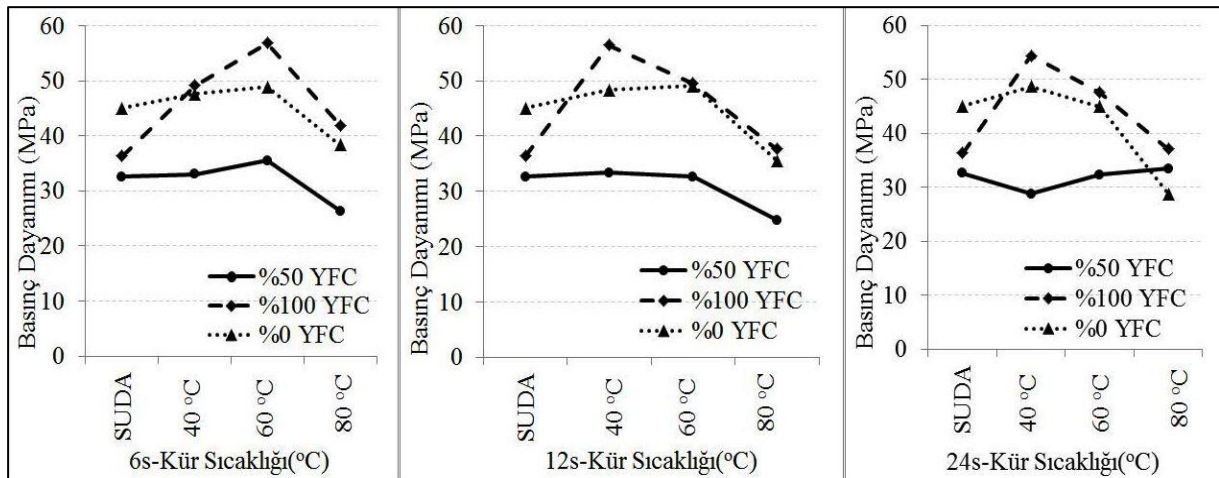
Basınç deneyi sonucunda, % 100 YFC'nin alkalilerle aktive edilerek kullanıldığı harçların suda kür edilen numunelerinde basınç dayanımı % 0 YFC kullanılarak hazırlanan numunelere göre % 20 civarında daha düşük, ancak ısı kürüne maruz bırakılan numunelerde ise 40 ve 60°C'lerde kür durumunda % 15 civarında daha yüksek değerler aldığı belirlenmiştir. % 100 YFC ve % 50 YFC'nin AAE harçları kıyaslandığında % 90'lara varan oranlarda % 100 AAE cüruf harcının daha yüksek basınç değerlerine ulaştığı, % 0 alkali aktivasyonu yapılan harcın % 70 civarında daha yüksek basınç dayanımına ulaştığı belirlenmiştir. Harç numunelerin zamana bağlı dayanım kazanma davranışları Şekil 5'te verilmiştir.

Bilim ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada belirtildiği gibi Portland çimentosuyla karıştırılarak aktive edilen cüruf lu numunelerin % 100 cüruf aktivasyonu ile üretilen numunelere göre daha düşük dayanım gösterdiği belirlenmiştir [8]. AAE cüruf lu numunelerin ve belirli bir sıcaklığa kadar da kontrol numunelerinin (% 0 YFC) kür süresi arttıkça, genel olarak basınç dayanımları da artış göstermiş ancak çimento harçlarında sıcaklık kürünün belli bir sıcaklığın üzerinde olumsuz etkilerinin olduğu 80°C'de zamanla dayanımının azaldığından da anlaşılabilmektedir. Harç numunelerin kür sıcaklığına bağlı dayanım kazanma davranışları Şekil 6'da verilmiştir.

Kür şartlarında uygulanan sıcaklık derecesinin 60°C'den sonra dayanımda azalmalar meydana getirdiği görülmüştür. Deney sonuçlarına göre sıcaklık kürünün % 100 çimento kullanılarak üretilen harçlarda basınç dayanımını artırıcı yönde etkili olduğu ancak yüksek sıcaklığın (80°C) tüm numunelerin özelliklerini olumsuz etkilediği görülmüştür. % 50 oranda YFC aktivasyonu ile harçların basınç dayanımları sade çimentolu harçlara göre sıcaklık kürüyle azalmıştır. Optimum üretim parametreleri % 100 YFC'li numuneler için 60°C'de 6 saat kür maruz bırakılarak elde edilmiştir.



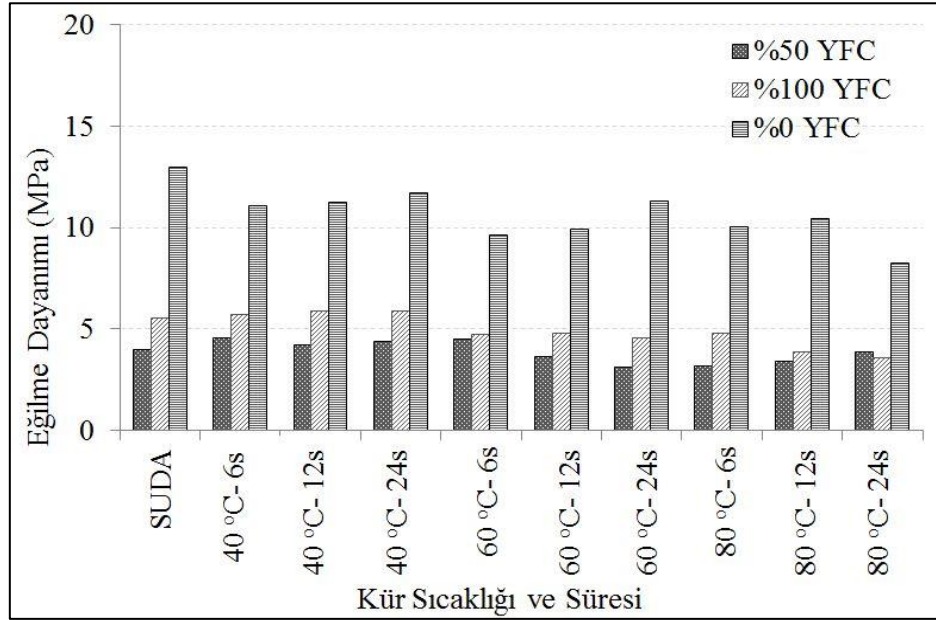
Şekil 5. Zamana göre basınç dayanımı değişimi



Şekil 6. Kür sıcaklığının harçların basınç dayanımına etkisi

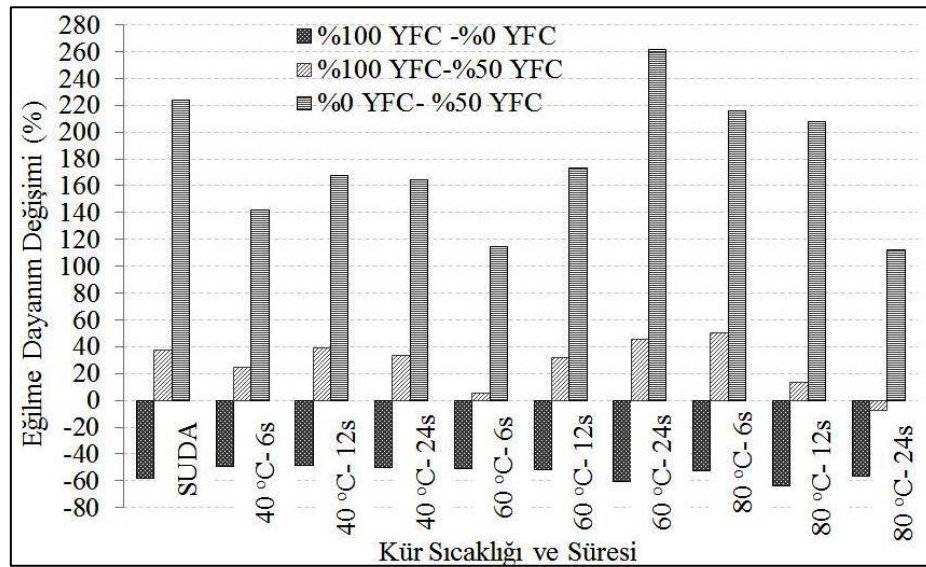
### 3.2. Eğilme Dayanımı

Yükleme hızı saniyede 50 N  $\pm$  10 N olacak şekilde ayarlanmış ve kırılma anındaki yüke bağlı olarak eğilme dayanımı hesaplanmıştır. Deney sonuçları farklı karışım, kür süresi ve şartları açısından Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Harçların eğilme dayanımları

Basınç dayanımının aksine eğilme dayanımında AAE harçların çimentolu harçlara göre daha düşük olduğu görülmüştür. % 50 oranında YFC aktive edilerek hazırlanan harç numunelerin eğilme dayanımı basınç dayanımındaki gibi yine en düşük seviyededir. Numunelerin eğilme dayanımları üzerinde kür şartlarının çok fazla etkili olmadığı görülmüştür. Deney sonuçları farklı karışım, kür süresi ve şartları açısından değerlendirildiğinde farklı oranlardaki YFC ve çimentolu kontrol numunelerinin birbirleriyle olan ilişkisi Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Harçların eğilme dayanımı değişim oranı

Eğilme deneyi sonucunda, % 100 oranında YFC'nin alkalilerle aktive edilmesiyle elde edilen harçların eğilmeye karşı dayanımı % 0 YFC'li harç numunelerinkine göre neredeyse % 50 daha az olduğu, yarı yarıya kullanıldıklarında (% 50 YFC + % 50 Çimento) ise % 70 civarlarında daha düşük eğilme dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir. Lee ve arkadaşlarının çalışmasında belirtildiği gibi YFC'nin alkali aktivasyonu ile üretilen harçlardaki boşluk oranı çimentolu harçlarla neredeyse aynı olmasına rağmen, boşluk çapı nispeten daha küçük ancak sayıca fazla olduğu için, YFC'li harçlarda büzülme meydana gelerek mikro çatlaklar oluşmakta ve elastisite modülü daha küçük olmaktadır [11]. YFC'li harçların bu yapısından dolayı eğilme dayanımının yetersiz kaldığı düşünülmektedir. Çimentolu harçların eğilme dayanımları, % 50 oranında alkali aktive edilmiş cürufu harçlara göre tüm kür sıcaklıkları ve süreleri için en az iki kat daha fazladır ve bu oran 60°C'de % 270'lere ulaşmaktadır.

### 3.3. Aşınma Direnci

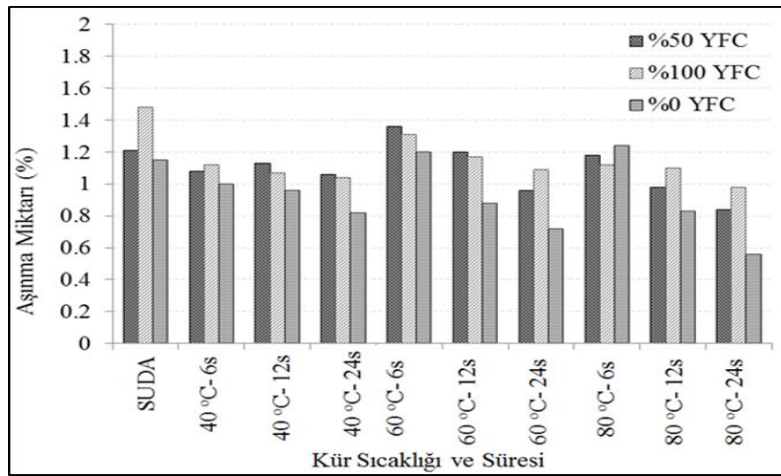
Araştırma kapsamındaki % 0 YFC içeren harç numunelerin aşınma dirençlerinin % 100 YFC içeren alkalilerle aktive edilmiş harç numunelerin direncinden genellikle daha yüksek olduğu ve harçtaki çimento miktarı arttıkça, aşınma direncinin de arttığı görülmüştür. Buna göre aşınma kayıpları yüzde ağırlık cinsinden farklı karışım, kür süresi ve şartları değerlendirilerek Şekil 9'da verilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, % 0 YFC içeren harç numunelerin aşınma dirençlerinin % 100 YFC içeren harç numunelerinin direncinden daha yüksek olduğu ve harçtaki çimento karışım miktarı arttıkça aşınma direncinin de arttığı görülmüştür. YFC'nin aşınmaya karşı çimento kadar iyi performans gösteremediği belirlenmiştir. YFC'li harç numuneleri en az aşınma direncini suda kür edildiği durumda göstermiştir. Kür sıcaklığı ve süresine bağlı olarak, % 100 YFC içeren alkalilerle aktive edilmiş harçların aşınma direnci 80°C - 24 saatte en yüksek aşınma direnci göstermiştir. Farklı oranlardaki alkali aktivasyonu ve çimentolu kontrol numunelerinin birbirleri ile olan ilişkisi Şekil 10'da verilmiştir.

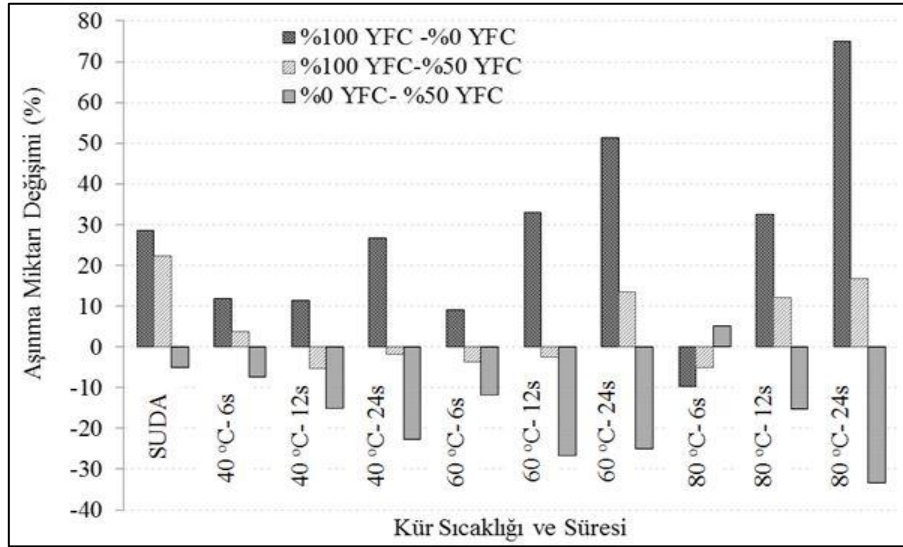
Bağlayıcı olarak % 100 YFC aktivasyonu yapılan numuneler ile % 0 YFC kullanılan numuneler karşılaştırıldığında, sıcaklık arttıkça çimentolu harçların aşınma direnci artarken, cüruf numuneleri çimento numunelerine göre % 75'lere varan oranlarda daha fazla aşınmıştır. Karşıma çimento ilavesi ile aşınma miktarında % 5 azalmalar gözlenmiştir.

### 3.4. Çekip Çıkarma Direnci

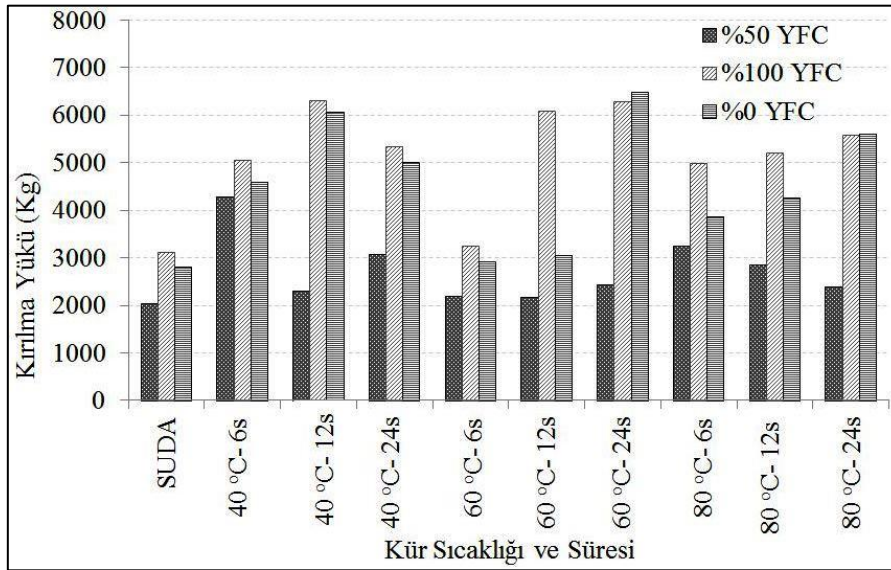
Betona gömülü demir çubukların aderans dayanımını tahmin etmek için bu deney yapılmıştır. Deney düzeneğinde, pompa, hidrolik sistem, yük hücresi, donatıyı sıkıca kavrayacak çeneler ve uygulanan yükü kayıt edebilmek için bilgisayar programı kullanılmıştır.  $\phi 100/200$  mm ebatlarındaki silindirik numunelerin orta ekseninde yerleştirilmiş, donatı çevresindeki beton örtü kalınlığı aynı ve kenetlenme boyu tüm numunelerde 200 mm olan  $\phi 14$  donatılar, Şekil 3d'deki deney düzeneği kullanılarak çekip çıkarılmıştır. Donatı harçtan ayrılırken donatıların harçtan ayrılma noktalarındaki yük değerleri grafik olarak Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 9. Harçların aşınma miktarları



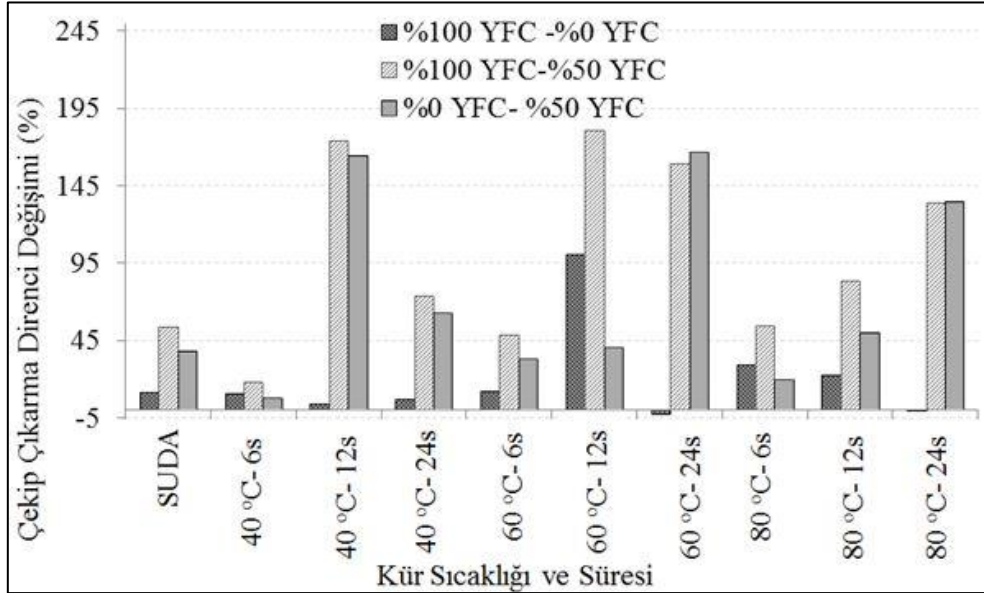
Şekil 10. Harçların kür sıcaklık ve süresine göre aşınma miktarı oranları



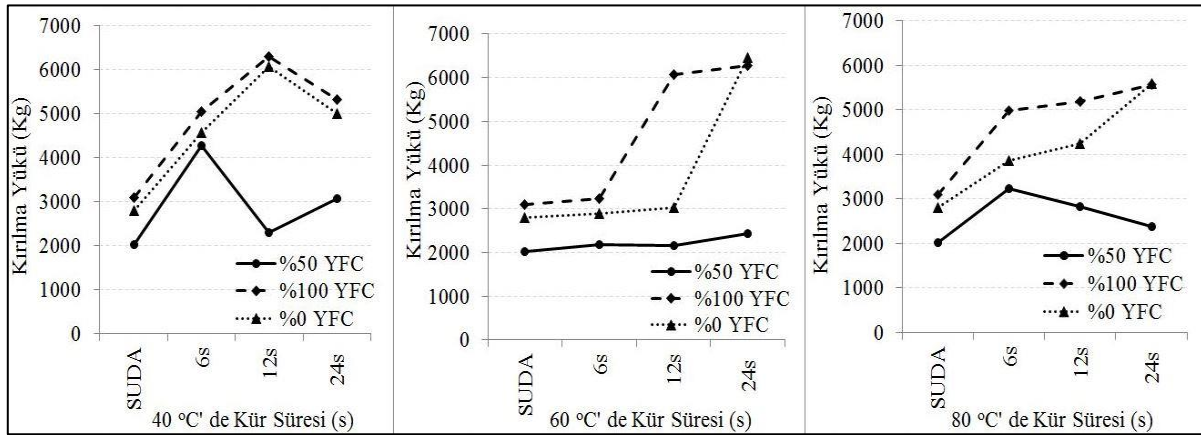
Şekil 11. Harçların çekip çıkarma deneyi kırılma yükleri

Donatıların harç içerisinde çıkarılırken göstermiş oldukları zorlanmaya karşılık gelen yük miktarına göre çekip çıkarma dirençleri belirlenmiştir. Çekip çıkarma direncinin basınç dayanımıyla doğru orantılı olduğu, %100 YFC aktivasyonu yapılan harçların aderans özelliklerinin çimentolu harçlara göre daha iyi olduğu görülmüştür. Aderans dayanımı ile ilgili optimum değerlerin tamamen çimentolu ve tamamen YFC'li deney grupları için aynı olduğu belirlenmiştir. % 100 ve % 0 alkali aktivasyonu yapılan harç numuneleri için 40°C-12 saat ve 60°C-24 saat kür şartları için en yüksek çekip çıkarma direncinin olduğu, % 50 oranında YFC'nin aktive edildiği harç numunelerinin ise diğer özelliklerde olduğu gibi en zayıf durumda kaldığı belirlenmiştir. Farklı oranlardaki alkali aktivasyonu ve çimentolu kontrol numunelerinin birbirleri ile olan ilişkisi Şekil 12'de verilmiştir. % 100 oranında YFC'nin alkalilerle aktive edilmesiyle elde edilen harçların çekip çıkarma direncinin çimentolu harçlarla neredeyse aynı olduğu ancak 60°C-12 saat sıcaklık kürüyle % 100 oranında alkali aktivasyon yapılmış harçların çekip çıkarma dirençleri için ideal kür şartı olduğu belirlenmiştir. Literatürdeki mevcut çalışmalar değerlendirildiğinde aderans kuvvetlerinin beton ve donatı özelliklerine bağlı olarak değiştiği ifade

edilmiştir. Betonun basınç mukavemetinin artmasının aderans kuvvetlerinde de artışa sebep olduğu belirtilmektedir [13]. Çekip çıkarma direncinin kür şartlarına ve zamana bağlı olarak değişimi Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 12. Harçların çekip çıkarma direnci değişimi

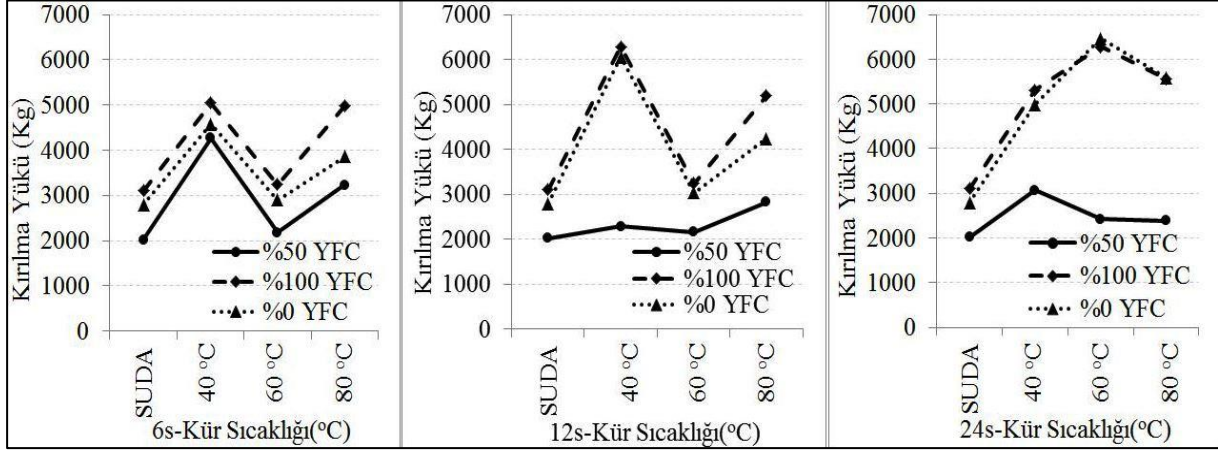


Şekil 13. Harçların kür süresine bağlı çekip çıkarma direnci değişimi

Sıcaklık kürü uygulanan numunelerin çekip çıkarma dirençlerinin suda kür edilenlere göre tüm deney gruplarında arttığı belirlenmiştir. Özellikle % 100 YFC aktivasyonu yapılan harç numunelerinde sabit sıcaklıkta zamana bağlı olarak aderansın arttığı ancak 40°C'de uzun süre kür uygulandığında kontrol numuneleriyle aynı davranışı göstererek azaldığı belirlenmiştir. Aderans özelliklerinin eşit sürede ve sıcaklığa bağlı olarak değişimi Şekil 14'te gösterilmiştir.

Aynı kür süresince % 100 alkali aktivasyonu yapılmış numunelerle % 0 oranında YFC kullanılan numunelerin benzer davranış göstererek 6 ve 12 saat kür maruz bırakılmış, AAE cüruf miktarından bağımsız davranış sergiledikleri belirlenmiştir. 24 saat 80°C'de kür edildiklerinde tüm deney grupları için aderans özelliklerinin düştüğü görülmüştür. Silindir harç numunelerden donatılar sıyrılırken, harç numunede çatlamalar ve kırılmalar meydana gelmiş ancak test edilen hiçbir numunede donatıda akma olmamıştır. Şekil 15'de silindir numunelerin kırılma şekillerine ait örnekler sunulmuştur.

Kırılma şekillerinin harç içeriğiyle ve kür şartlarıyla ilgili olduğu anlaşılmaktadır. % 100 YFC ve % 0 YFC ile üretilen harçların kırılma şekilleri genellikle 120° açı yapacak şekilde üç parçaya bölünerek oluşmuştur. % 50 YFC ile üretilen harçların kırılmaları genellikle iki parçaya bölünerek meydana gelmiştir.



Şekil 14. Sıcaklık değişimine bağlı çekip çıkarma direnci değişimi



Şekil 15. Numunelerin çekip çıkarma deneyinde kırılma şekli

#### 4. SONUÇLAR

İncelenen mekanik özellikler bakımından YFC'nin % 100 oranda alkali aktivasyonu yapılarak çimento yerine üretilecek olan beton ve harçlarda kullanılması mümkün görülmektedir. YFC gibi mineral katkıların kullanıldığı harçlar çok uzun sürede dayanım kazandığından suda kür edilerek geleneksel çimentolu harç gibi dayanım kazanamadığı ve atık malzeme olan YFC'nin üretime kazandırılması için sıcaklık kürü uygulanarak çimentolu harç ve betonlardan daha iyi bir performans alınabileceği görülmüştür. Harçların 28 günlük eğilme ve basınç mukavemetleri göz önüne alındığında, optimum cüru ikame oranının % 100 olduğu gözlenmiştir. AAE YFC'lu harçların basınç dayanımıyla doğru orantılı olarak çekip çıkarma dirençlerinin de arttığı belirtilmiştir. Çekip çıkarma direncinin basınç dayanımıyla doğru orantılı olduğu ve numune gruplarının kendi içinde sıcaklık derecesi arttıkça dirençlerinin genellikle azaldığı görülmüştür. En yüksek çekip çıkarma direnci 40°C'de 12 saat kür ortamında bırakılan numunelerde görülmüştür. Özellikle % 100 YFC aktivasyonu yapılan harç numunelerinde sabit sıcaklıkta zamana bağlı olarak aderansın arttığı ancak 40°C'de uzun süre kür uygulandığında kontrol numuneleriyle aynı davranışı göstererek azaldığı belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] ŞENTÜRK, A., GÜNDÜZ, L., TOSUN, Y. İ., SARIŞIK, A., Mermer Teknolojisi, SDÜ Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü, Isparta, 1996.
- [2] ALTUN, İ.A., YILMAZ, İ., "Study on Steel Furnace Slag with High MgO as Additive in Portland Cement", Cement and Concrete Research, 32, 1247-1249, 2002.
- [3] XIAO GUANG, Y., WEN, N., XUFANG, Z., YALI, W., "Effect of Alkali-Activation on Aluminosilicate-Based Cementitious Materials", Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material, 15, 796-801, 2008.
- [4] SAKAI, K., WATANABE, H., SUZUKI, M., HAMAZAKI, K., "Properties of Granulated Blast-Furnace Slag Cement Concrete", ACI Spec. Publ., 132, 1367-1383, 1993.
- [5] MORANVILLE-REGOURD, M., "Cements Made from Blast-Furnace Slag", Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4, 633-674, 1998.
- [6] FULTRON, F.S., "The Properties of Portland Cement Containing Milled Granulated Blast-Furnace Slag", Portland Cement Institute Memogr, 4-66, 1998.
- [7] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PALOMO, A., "Composition and Microstructure of Alkali Activated Fly Ash Binder: Effect of the Activator", Cement and Concrete Research, 35, 1984-1992, 2005.
- [8] BİLİM, C., ATİŞ, C.D., "Alkali Activation of Mortars Containing Different Replacement Levels of Ground Granulated Blast Furnace Slag", Construction and Building Materials, 28, 708-712, 2012.
- [9] ALTAN, E., ERDOĞAN, S.T., "Alkali Activation of A Slag at Ambient and Elevated Temperatures", Cement and Concrete Composites, 34, 131-139, 2012.
- [10] BERNAL, S.A., GUTIÉRREZ, R.M., PEDRAZA, A.L., PROVIS, J.L., RODRIGUEZ, E.D., DELVASTO, S., "Effect of Binder Content on the Performance of Alkali-Activated Slag Concretes", Cement and Concrete Research, 41, 1-8, 2011.
- [11] LEE, N.K., LEE, H.K., "Setting and Mechanical Properties of Alkali-Activated Fly Ash/Slag Concrete Manufactured at Room Temperature", Construction and Building Materials, 47, 1201-1209, 2013.
- [12] TS EN 197-1, "Genel Çimentolar-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri" Türk Standartları Enstitüsü, 2002.
- [13] BİNGÖL, A.F., GÜL, R., "Donatı-Beton Aderansı, Yüksek Sıcaklıkların Beton Dayanımına ve Aderansa Etkileri Konusunda Bir Derleme", Tübvav Bilim Dergisi, Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Erzurum, 2, 211-230, 2009.