

# Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu İçeren Harçların Aşınma ve Mukavemet Özellikleri

Cahit BİLİM<sup>1</sup>, Cengiz Duran ATİŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, MERSİN

<sup>2</sup> Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, KAYSERİ

## ÖZET

Bu çalışmada, ıslak ve kuru olmak üzere iki ayrı ortamda kür edilmiş farklı su/bağlayıcı oranlarına sahip harçların, aşınma dirençleri ile birlikte eğilme ve basınç mukavemetleri üzerinde cüruf yer değişiminin etkileri araştırılmıştır. Gerçekleştirilen çalışma kapsamında, İskenderun Demir Çelik Fabrikası'ndan elde edilen ve 4250 cm<sup>2</sup>/gr Blaine incelik değerine sahip olacak şekilde öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. CEM I 42.5 R Portland çimentosunun kullandığı karışımların kum/bağlayıcı oranı 2.75 olup, su/bağlayıcı oranları ise sırasıyla 0.30, 0.40 ve 0.50 olarak seçilmiştir. Cürufun çimento ile ağırlıkça yer değişim oranları ise her su/bağlayıcı oranı için %0, 20, 40, 60 ve 80 olarak belirlenmiştir. Öte yandan, düşük su/bağlayıcı oranlarındaki harçlarda işlenebilirliği kolaylaştırmak amacıyla, yapılan yayılma tablası deneylerine göre yayılmanın %100±5 cm arasında olmasını sağlayacak şekilde değişen dozajlarda hiperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Hazırlanan karışımlardan 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik harç numuneleri üretilmiş ve elde edilen numunelerin bir kısmı, %65±5 bağıl neme sahip, sıcaklığı 22±2°C olan kür odasında, bir kısmı ise aynı sıcaklıktaki su içerisinde deney gününe kadar bekletilmiştir. Üretilen harç numunelerinin, belirtilen kür koşulları altındaki 7, 28, 90 ve 180 günlük Los Angeles aşınma dirençleri ile birlikte eğilme ve basınç dayanımları bulunmuştur. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, kür şartlarının cüruf içeren numuneleri, şahit numunelere göre daha fazla etkilediğini ve ıslak kür edilmiş harç numunelerinin, kuru kür edilmiş harç numunelerine göre daha yüksek dayanım ve aşınma direnci sergilediklerini göstermiştir. Ayrıca, aşınma ve dayanımlar arasında kurulan ilişkiler neticesinde, Los Angeles aşınma deney aletinin, harçların aşınma oranlarının bulunmasında kullanılabileceği gözlenmiştir.

**Anahtar kelimeler :** Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, basınç mukavemeti, eğilme mukavemeti, aşınma direnci, kür

## The Abrasion and Strength Properties of Mortars Containing Ground Granulated Blast Furnace Slag

### ABSTRACT

In this study, the effects of slag replacement on abrasion resistance, flexural and compressive strengths of wet and dry cured mortars having different water/binder ratios were investigated. In the research carried out, CEM I 42.5 R normal Portland cement was used. The slag was obtained from Iskenderun Steel Plant (ISDEMİR) and ground to have a Blaine specific surface area about 4250 cm<sup>2</sup>/g. In the mortar mixes, sand/cement ratio was 2.75 and water/binder ratios were 0.30, 0.40 and 0.50. In mortar mixtures, cement was replaced with 0, 20, 40, 60 and 80% slag by weight. According to flow table tests performed, hyper plasticizer chemical admixture in different proportions was used in mortar mixes to facilitate the workability. Prismatic mortar samples with 40x40x160 mm dimensions were produced from the mixtures and a half of samples were stored in a room having 65% RH and 22±2°C while the other half of samples were stored in water bath which had same temperature until test days. After 7, 28, 90 and 180 days of curing, the compressive strengths, flexural strengths and Los Angeles abrasion resistances of the samples were measured. The results obtained from this research showed that curing conditions on the mortars containing slag had an important effect. Furthermore the abrasion resistances and strengths of dry cured mortar samples were less than those of wet cured mortar samples. The relations between strength and abrasion resistance results showed that Los Angeles abrasion machine could be used for wear tests of mortar samples.

**Keywords :** Ground granulated blast furnace slag, compressive strength, flexural strength, abrasion resistance, curing

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Beton yüzeylerin bozularak tahrip olmasında erozyon, oyulma, çarpma ve sürtünme gibi aşındırıcı mekanizmalar önemli bir rol oynamakta ve bu tarz yapılar genel olarak yol, hava alanı pisti, döşeme, köprü ve baraj gibi dış etkilere maruz kalan beton yapı-

ların yüzeylerinde ortaya çıkmaktadır. Diğer taraftan, betonda aşınma direnci, basınç dayanımı ile yakından ilgili olduğundan, basınç dayanımına doğrudan tesir eden su/çimento oranı, agrega-hamur ara yüzeyi, agrega ve bağlayıcı madde hamuru kalitesi gibi faktörler de aşınma direnci üzerinde oldukça etkili olmaktadır [1].

Bilindiği üzere yapay ya da doğal puzolanlar, dahil edildikleri çimento ve beton sistemlerinde hidrasyon sonucunda ortaya çıkan Ca(OH)<sub>2</sub> ile reaksi-

\* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: cbilim@mersin.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2011.14.2, 101-107

yona girerek bağlayıcı özelliğe sahip ilave bileşenler meydana getirmekte ve betonu, hiç puzolan içermeyen normal Portland çimentolu bir betona kıyasla, yıpratıcı dış etkilere karşı daha dayanıklı kılmaktadırlar. Beton içerisinde mineral katkı malzemesi olarak kullanılan yapay puzolanlardan birisi de, demir-çelik fabrikalarında pik demirin üretimi sırasında meydana gelen endüstriyel atık konumundaki granüle yüksek fırın cürüflarıdır. Yüksek fırından eriyik bir durumda, atık malzeme olarak dışarı alınan cüruf yaklaşık 1500°C sıcaklıkta olduğundan, cürufun herhangi bir amaçla kullanımı, ancak soğutulmasından sonra mümkün olmaktadır. Yüksek oranda silis ve alümin içeren ve amorf yapıya sahip olan yüksek fırın cürüfları, uygulanan soğutma tekniğine göre değişik yapısal karakteristikler göstermektedirler. Genellikle bol miktarda suda, çok hızlı soğutulma işlemine tabi tutulan cürüflar, kum taneleri gibi (en büyük boyutu yaklaşık 4 mm) parçacıklar oluşturduklarından, “granüle yüksek fırın cürufu” olarak anılmaktadır. Eriyik cürufun çok hızlı soğutulması işlemi, cürufa hem granüle hem de amorf (camsı) yapı kazandırmaktadır [2]. Yüksek fırın cürüfları, öğütülerek çok ince taneli duruma getirildiklerinde puzolanik özellik gösterdiğinden, beton içerisine öğütülmüş formda granüle yüksek fırın cürufu katılması, taze veya sertleşmiş betonun özelliklerini iyileştirmekte, betonu hiç cüruf içermeyen normal bir betona kıyasla agresif çevre koşullarına karşı daha dayanıklı kılmaktadır. Bugüne kadarki yapılan çalışmalar, cüruf katkısının, korozyon dayanıklılığı, durabilite, geçirgenlik, işlenebilirlik ve mukavemet gibi beton karakteristiklerini geliştirdiğini göstermektedir [3]. Bununla birlikte, cürufun hidrasyon hızı, Portland çimentosunun kine oranla daha yavaş seyrettiğinden, cürufun beton içerisine girmesi, dayanım gelişimini geciktirmektedir. Bu geciktirme derecesi, cürufun ve Portland çimentosunun kimyasal kompozisyonlarına, cürufun katılma yüzdesine, ortamın nem ve sıcaklığına bağlı olmaktadır. Bu yüzden cüruf içeren betonların, normal Portland çimentolu betonlara göre, daha uzun süreli küre tabi tutulması gerekmekte, aksi takdirde, geçirgenliği yüksek ve dayanımı daha düşük bir beton elde edilmektedir [4]. Nitekim yürütülen çalışmalarda, cüruf katkılı betonların erken yaş mukavemetinin, normal Portland çimentolu betona kıyasla daha düşük değerler aldığı, buna karşılık son dönem mukavemetlerinin ise, iyi kür edilmek şartıyla, normal Portland çimentolu betonun mukavemetine eşit ya da daha fazla olduğu bildirilmektedir [5-7].

Cüruf katkılı betonların çeşitli özellikleri çok sayıda araştırmaya konu olmasına rağmen, aşınmaya karşı dayanımları üzerinde nispeten daha az çalışma yer almaktadır. Yüksek fırın cürufu içeren betonların aşınma direnci ve mekanik özellikleri üzerine yürütülen çalışmalarda elde edilen sonuçlar, mukavemet gelişimleri göz önüne alındığında, granüle yüksek fırın cürüflarının beton içerisinde kısmen çimento yerine kullanılabilmesi, buna karşılık, cürufu betonların aşınmaya karşı dirençlerinin kontrol betonların kine oranla daha düşük olduğu rapor edilmiş [8], uygun ve yeterli kür uygulan-

ması şartıyla, betonda yüksek fırın cürufu kullanılmasının aşınma direncinin artırılmasında bir miktar avantaj sağlayabileceği, ancak yeterli kürün yapılmadığı durumlarda, aşınma direncinde önemli azalmaların meydana gelebileceği belirtilmiştir [9].

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürüflarının aşınma direncine olan etkilerinin araştırıldığı yeterli sayıda çalışmanın mevcut olmaması nedeniyle, literatüre katkı sağlamak amacıyla yürütülen bu çalışmada, ıslak ve kuru olmak üzere iki ayrı ortamda kür edilmiş farklı su/bağlayıcı oranlarına sahip harçların, aşınma dirençleri ile eğilme ve basınç mukavemetleri üzerinde cüruf yer değişiminin etkileri araştırılmıştır. Bildiride, çalışmadan elde edilen sonuçlar, çizelgeler ve şekiller yardımıyla sunulmuş, gerekli açıklamalar yapılarak tartışılmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

### 2.1. Kullanılan Malzemeler (Materials)

Deneysel çalışmada, 3250 cm<sup>2</sup>/gr özgül yüzey alanına sahip CEM I 42.5 R normal Portland çimentosu ile İskenderun Demir Çelik Fabrikası'nın atığı olan ve OYSA İskenderun Çimento Fabrikası'nda 4250 cm<sup>2</sup>/gr incelik değerine kadar öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılmıştır. Kullanılan cürufun, ASTM C 989 [10] Standardı'na göre, 28 günlük aktivite indeksi %85'tir. Kullanılan bağlayıcı malzemelerin kimyasal kompozisyonları Çizelge 1'de verilmektedir. Harç numunelerinin hazırlanmasında maksimum tane çapı 4 mm olan yıkanmış ve kurutulmuş temiz kum ile karışım suyu olarak içilebilir şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

Çizelge 1. Çimento ve yüksek fırın cürufu için kimyasal analiz sonuçları (%).

Oksit	CEM I 42.5 R	YFC
SiO <sub>2</sub>	19.71	36.70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.20	14.21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.73	0.98
CaO	62.91	32.61
MgO	2.54	10.12
SO <sub>3</sub>	2.72	0.99
K <sub>2</sub> O	0.90	0.76
Na <sub>2</sub> O	0.25	0.42
K.K.	0.96	-

### 2.2. Karışım Oranları (Mixture Proportions)

Hazırlanan harç karışımlarının kum/bağlayıcı oranı 2.75 olup, su/bağlayıcı oranları ise sırasıyla 0.30, 0.40 ve 0.50'dir. Yüksek fırın cürufunun, ağırlıkça çimento ile yer değişim oranları da, her bir su/bağlayıcı oranı için %0, 20, 40, 60 ve 80 olarak seçilmiştir. Düşük su/bağlayıcı oranlarındaki harçlarda işlenebilirliği kolaylaştırmak amacıyla, TS EN 1015-3 [11]'e uygun olarak yapılan yayılma tablası deneylerine göre yayılmanın 20±1 cm arasında olmasını sağlayacak şekilde değişen dozajlarda hiperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Seçilen cüruf yer değişim yüzdeleri ve kullanılan su/bağlayıcı oranları dikkate alındığında, sarf edilen

akışkanın % miktarları ve cm olarak harç karışımlarına ait yayılma değerleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Harçların yayılma değerleri (cm) ve kullanılan akışkanlaştırıcı miktarları (%).

İkame Oranı	Su/bağlayıcı oranları		
	0.30	0.40	0.50
%0	20 (%6)	19 (%0.3)	20 (%0)
%20	19 (%3.5)	20 (%0.1)	21 (%0)
%40	20 (%1)	20 (%0.1)	22 (%0)
%60	20 (%0.7)	19 (%0.1)	21 (%0)
%80	19 (%0.3)	20 (%0.13)	20 (%0)

Çizelgeden de görüldüğü üzere, artan su/bağlayıcı oranı, karışıma giren su miktarına bağlı olarak, kullanılan akışkan miktarlarını azaltmaktadır. En çok akışkan, 0.30 su/bağlayıcı oranındaki şahit grupta kullanılmış olup 0.50 su/bağlayıcı oranındaki harçlarda ise hiç akışkan kullanılmamıştır. Karışımlarda kullanılan su miktarının her bir su/bağlayıcı oranında sabit kalması ve cüruf ikame oranının değişmesinden dolayı yayılma miktarlarının sabit bir değer etrafında toplanması ancak kullanılan akışkan miktarlarında değişim yapmakla mümkün olmuştur. Çizelgeden görüldüğü gibi, sabit bir su/bağlayıcı oranında artan cüruf ikame oranı, kullanılacak akışkan dozajlarında da bir düşüş meydana getirmektedir. 0.30 gibi düşük su/bağlayıcı oranındaki harçlarda %80’e kadar artan cüruf ilavesi, yayılmayı olumlu yönde etkilerken, 0.40 su/bağlayıcı oranında %80 cüruf ilavesi sabit bir yayılma değeri için akışkan ihtiyacını önemsiz miktarda arttırmıştır. Öte yandan hiç akışkan katkısının kullanılmadığı 0.50 su/bağlayıcı oranındaki harçlarda yapılan %20 ve %40 cüruf ilaveleri, yayılma miktarına artış yönünde olumlu bir katkı sağlarken, %60 ve %80 cüruf ilaveleri ile bu olumlu etki giderek azalma eğilimi göstermiştir. Görüldüğü üzere, artan cüruf katkısı özellikle düşük su/bağlayıcı oranındaki harçlarda işlenebilirliği arttırmakta ve ihtiyaç duyulan katkı dozajında bir miktar azalma sağlamaktadır. Cürufun işlenebilirliğe olan etkisi literatürde de belirtilmiş olup, granüle yüksek fırın cüruflarının klinkere göre daha az yüzey pürüzlülüğüne ve daha düşük özgül ağırlığa sahip olmasının, hacimce daha fazla çimento hamuru elde edilmesine olanak sağladığı ve böylelikle karışıma ilave edilen cürufun işlenebilirliği artırdığı ifade edilmiştir [12].

Deneysel çalışma için hazırlanan karışımlardan 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik harç numuneleri üretilmiştir. Numunelerin bir kısmı %65 bağıl neme sahip ve sıcaklığı  $22\pm 2^{\circ}\text{C}$  olan kür odasında, bir kısmı ise aynı sıcaklıktaki su içerisinde kür edilmiş ve 7, 28, 90 ve 180 gün sonunda küre son verilerek numunelerin, aşınma dirençleri ile birlikte TS EN 1015-11 [13] doğrultusunda eğilme ve basınç mukavemetleri bulunmuştur. Üretilen prizmatik harç numuneler için yapılmış olan mukavemet ölçümlerinde, tek noktadan yükleme deneyi altında harç numunenin kırıldığı gerilme değeri,

eğilme mukavemeti olarak kabul edilmiş, eğilme deneyinden çıkan kırılmış numunelerin 4x4 cm başlık altındaki kırılma değeri ise basınç mukavemeti olarak değerlendirilmiştir. Eğilme deneyi için 3 adet kırış numune kullanılmış olup, basınç deneyinde ise eğilme deneyinde kırılan 4 adet yarım parça teste tabi tutulmuştur. Diğer taraftan, harç numunelerin çarpma etkisi ile aşınma dirençlerinin belirlenmesinde, genelde agregalar için kullanılan TS EN 1097-2 [14]’deki Los Angeles aşındırma yönteminden yararlanılmış ve eğilme deneyi sonucunda kırılmış 2 adet yarım parçadan her birinin 500 tur sonundaki aşınma kaybı miktarı, ortalaması alınmak suretiyle aşınma direnci olarak değerlendirilmiştir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

#### 3.1. Harç Numunelerin Basınç Dayanımları (Compressive Strengths of Mortar Specimens)

Yürütülen çalışma kapsamında, harç numunelerden elde edilen basınç dayanımları, Çizelge 3’te verilmiştir. Bilindiği gibi, çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonların sağlıklı bir şekilde devam edebilmesi, kapiler boşluklardaki suyun buharlaşma ya da sıcaklık gibi nedenlerle kaybolmaması ile mümkündür. Çizelge 3’ten, ıslak kür edilen numunelerin kuru kür edilen numunelere göre daha fazla dayanım gelişimi gösterdiği görülmektedir. Bu durumun, kuru küre maruz bırakılan harçların kapiler boşluklarındaki suyu kaybetmeleri sonucu tam hidrate olamamalarıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Diğer taraftan, devam eden hidrasyon olayları neticesinde, bağlayıcı madde hamurunun yapısındaki hidrate elemanların miktarı da artmakta ve harç numuneler zaman içerisinde mukavemet kazanmaya devam etmektedir. Aynı zamanda, harçların basınç mukavemeti artan su/bağlayıcı oranından olumsuz etkilenmekte ve dayanımlarda düşüşler meydana gelmektedir.

Çizelgeden, her iki kür durumu için 0.30 su/bağlayıcı oranına sahip %20 ve %40 cüruf katkılı harçların 7. gün için şahitlerinden daha yüksek dayanım geliştirdiği, 28. gün ve daha sonrasında ise %60 cüruf katkı karışımların da iyi bir performans göstererek şahitlerine göre daha yüksek dayanımlara ulaştığı görülmektedir. Ayrıca, 0.30 gibi düşük su/bağlayıcı oranına sahip, ıslak kür edilmiş ve oldukça yüksek ikame oranına sahip %80 cüruf katkılı karışımların da, 90 ve daha sonraki günler için şahitlerine yakın dayanımlar geliştirdiği gözlenmektedir. Çizelgeden de anlaşıldığı üzere, 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranları için kuru kür edilmiş cüruf katkılı harçların dayanımları, 0.30 su/bağlayıcı oranındakilerden farklı olarak, bütün yaşlar için şahitlerinden daha düşük olmuş ve kuru kür ortamı, cüruf içeren harçları normal Portland çimentosuyla üretilen şahitlerine göre daha fazla etkilemiştir. Islak kür edilmiş 0.40 su/bağlayıcı oranına sahip cüruf katkılı harçlar, 28. günde şahitlerine eşdeğer veya daha yüksek dayanım geliştirirken, 0.50 su/bağlayıcı oranına sahip cüruf katkılı harçlar ise 28. günde şahitlerine yaklaşmış ancak 90. gün gibi daha uzun bir sürede şahitlerinden daha yüksek dayanım geliştirebilmişlerdir. Görüldüğü gibi, su/

bağlayıcı oranı yüksek olan cürüflü karışımların ilk zamanlardaki mukavemet gelişimleri yavaş olmakta, normal bakım koşullarında cürufun basınç dayanımına olumlu etkisi, düşük su/bağlayıcı oranındaki cürüflü karışımlara göre, ancak ilerleyen yaşlarda ortaya çıkabilmektedir.

### 3.3. Harç Numunelerin Aşınma Dirençleri (Abrasion Resistances of Mortar Specimens)

Araştırma kapsamındaki harç numunelerinin çarpma yolu ile aşınma oranlarının bulunmasında, Los Angeles Cihazı kullanılmış ve numunelerin, bilye kullanılmadan 500 tur sonundaki bulunan ağırlık kayıpları,

Çizelge 3. Harç numunelerin basınç mukavemetleri (MPa).

	7.Gün		28.Gün		90.Gün		180.Gün	
	Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru
H0.30-00	71.8	54.4	81.6	62.5	84.4	67.4	97.8	66.1
H0.30-20	78.3	58.3	86.9	69.8	96.5	72.1	102.1	73.7
H0.30-40	77.8	60.0	97.8	71.4	113.3	75.0	121.0	76.8
H0.30-60	68.1	53.4	100.8	64.9	120.2	68.3	122.8	76.6
H0.30-80	50.5	38.1	64.5	50.3	79.7	51.8	89.1	55.0
H0.40-00	60.4	51.5	69.3	53.2	77.1	55.0	74.9	58.9
H0.40-20	54.1	38.4	72.7	44.5	78.6	45.2	78.4	47.5
H0.40-40	45.3	31.6	66.8	36.2	77.9	37.6	84.5	42.8
H0.40-60	35.2	24.5	60.4	29.0	68.9	30.8	76.9	33.4
H0.40-80	29.4	18.7	41.3	20.3	49.2	20.6	50.5	23.8
H0.50-00	46.6	36.4	62.1	40.8	67.0	40.4	67.6	41.9
H0.50-20	37.1	28.7	53.8	31.1	70.8	33.6	71.2	35.5
H0.50-40	27.8	21.7	53.0	29.9	65.3	28.4	68.8	30.2
H0.50-60	19.6	15.6	39.4	20.6	53.9	22.0	39.4	24.8
H0.50-80	15.6	10.3	27.2	12.6	30.1	13.8	31.5	10.9

### 3.2. Harç Numunelerin Eğilme Dayanımları (Flexural Strengths of Mortar Specimens)

Su/bağlayıcı oranları 0.30, 0.40 ve 0.50 olan cüruf katkılı harç numunelerinin 7, 28, 90 ve 180 günlük zaman dilimlerinde elde edilen eğilme dayanımları, ıslak ve kuru kür için Çizelge 4'te verilmiştir. Çizelgeden, geçen zamanla birlikte cüruf içeren ya da içermeyen bütün harçların eğilmede çekme dayanımlarında bir artış olduğu, her bir yaş ve ikame oranı için kuru kür edilen numunelerin ıslak kür edilen numunelere göre daha düşük eğilme dayanımları sergiledikleri görülmektedir. Ayrıca, artan su/bağlayıcı oranıyla birlikte eğilme dayanımlarında da azalmalar meydana gelmektedir.

Çizelge dikkatlice incelendiğinde, her iki kür durumu için, 0.30 su/bağlayıcı oranındaki %20 ve %40 cüruf katkılı harçların tüm zaman dilimlerindeki eğilme dayanımlarının, şahit numuneye göre, daha yüksek olduğu görülmektedir. Buna karşılık su/bağlayıcı oranı 0.40 ve 0.50 olan kuru kür edilmiş cüruf katkılı harçlar, kür şartlarından olumsuz etkilenecek şahitlerine kıyasla daha düşük eğilme dayanımları sergilemişlerdir. Islak kür edilmiş 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranına sahip %20 ve %40 cürüflü harçlar ise sahip oldukları yüksek su/bağlayıcı oranı nedeniyle ancak 180. gün sonunda şahitlerinden yüksek eğilme dayanımı geliştirebilmişlerdir.

yüzde ağırlık cinsinden hesaplanarak, aşınma direnci olarak değerlendirilmiştir. Buna göre, su/bağlayıcı oranları 0.30, 0.40 ve 0.50 olan ve %20, 40, 60 ve 80 oranlarında cüruf katkısı içeren harç numunelerinin 7, 28, 90 ve 180 günlük zaman dilimlerinde elde edilen aşınma değerleri, ıslak ve kuru kür için Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelgeden, bağlayıcı madde hamurunun, git-tikçe daha yoğun bir yapı kazanmasının bir sonucu olarak, harçların aşınma oranlarında da zamana bağlı bir azalmanın meydana geldiği görülmektedir. Diğer taraftan, kuru kür edilmiş harçların aşınma oranlarının, ıslak kür edilenlere kıyasla daha fazla olduğu ve bu harçların, kuru kür şartlarından daha çok etkilendikleri anlaşılmaktadır. Ayrıca, her iki kür durumu için harç numunelerinin aşınma oranlarına bakıldığında, yükselen su/bağlayıcı oranı ile beraber bir artışın meydana geldiği görülmektedir.

Islak kür edilen harç numunelerinin aşınma oranlarına bakıldığında, 7. günden itibaren 0.30 su/bağlayıcı oranındaki %20 ve %40 cüruf katkılı harçların, şahitlerine kıyasla daha yüksek aşınma direnci gösterdiği, 0.40 su/bağlayıcı oranına sahip %20 cüruf katkılı harçların da genel olarak tatminkâr sonuçlar verdiği gözlenmektedir. Ancak, su/bağlayıcı oranı 0.50 olan cüruf katkılı harç karışımlarına ait aşınma

Çizelge 4. Harç numunelerin eğilme mukavemetleri (MPa).

	7.Gün		28.Gün		90.Gün		180.Gün	
	Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru
H0.30-00	6.2	6.1	7.3	7.2	8.1	8.0	9.1	7.3
H0.30-20	7.5	7.1	7.9	7.8	8.5	8.5	9.3	7.5
H0.30-40	6.4	6.2	8.6	8.1	9.2	9.0	9.3	9.1
H0.30-60	5.5	5.1	7.4	7.1	8.5	6.4	9.7	6.6
H0.30-80	5.2	4.9	6.5	5.7	7.2	6.7	7.6	7.5
H0.40-00	5.6	5.3	7.0	5.7	7.5	6.3	8.3	7.2
H0.40-20	5.5	4.9	5.9	5.6	6.7	5.4	8.4	5.6
H0.40-40	5.2	4.0	5.5	5.4	6.7	4.3	7.5	4.6
H0.40-60	4.3	3.2	4.5	3.6	6.1	4.1	6.8	4.5
H0.40-80	3.5	2.5	4.3	2.8	5.4	3.2	6.3	4.2
H0.50-00	5.4	5.1	5.5	4.8	5.5	5.5	6.2	6.0
H0.50-20	5.3	4.0	5.4	4.4	5.6	5.3	6.7	5.9
H0.50-40	3.9	3.3	4.3	3.7	5.4	3.7	6.4	4.2
H0.50-60	3.2	2.4	3.7	2.9	5.3	3.5	5.9	3.6
H0.50-80	2.6	1.9	4.0	2.7	4.1	2.7	5.0	2.4

Çizelge 5. Harç numunelerin çarpma yolu ile aşınma oranları (%).

	7.Gün		28.Gün		90.Gün		180.Gün	
	Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru
H0.30-00	9.6	11.7	8.3	10.7	8.3	10.8	8.4	9.4
H0.30-20	9.5	10.4	7.9	9.8	7.6	9.5	7.3	8.7
H0.30-40	10.4	13.8	7.4	8.2	6.9	7.6	6.5	8.3
H0.30-60	10.6	14.6	9.1	8.5	8.2	8.5	8.1	7.9
H0.30-80	14.3	16.4	12.8	13.5	11.4	13.1	11.2	12.1
H0.40-00	10.0	13.0	9.8	11.4	9.6	10.5	8.8	9.6
H0.40-20	10.1	16.0	9.6	14.4	8.5	11.9	8.4	9.3
H0.40-40	11.7	22.4	11.7	19.0	11.1	15.5	11.0	12.6
H0.40-60	18.8	27.4	15.0	25.4	13.2	17.8	12.1	17.4
H0.40-80	22.6	43.6	21.5	37.8	18.1	36.8	18.9	35.6
H0.50-00	11.3	17.0	11.2	15.7	10.1	12.3	9.8	10.9
H0.50-20	17.1	21.0	12.2	18.7	11.1	14.5	10.6	12.6
H0.50-40	18.3	23.1	14.6	22.3	13.5	15.2	13.2	14.2
H0.50-60	20.1	33.7	16.1	31.5	15.4	30.0	14.9	23.4
H0.50-80	45.0	69.1	30.0	63.9	28.2	63.1	26.0	56.4

miktarlarının ise, şahitlerine göre tüm zaman dilimleri için daha fazla olduğu görülmektedir.

Kuru küre maruz bırakılan harçların aşınma oranları incelendiğinde, 0.30 gibi düşük su/bağlayıcı

oranındaki %20, %40 ve %60 cüruf katkılı harçların özellikle 28. günden sonra şahitlerine göre daha düşük aşınma oranları gösterdikleri, buna karşılık 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranına sahip cüruf katkılı harçların ise kuru kür şartlarından olumsuz etkilenecek bütün zaman dilimleri için şahitlerine kıyasla daha büyük aşınma miktarları sergiledikleri görülmektedir.

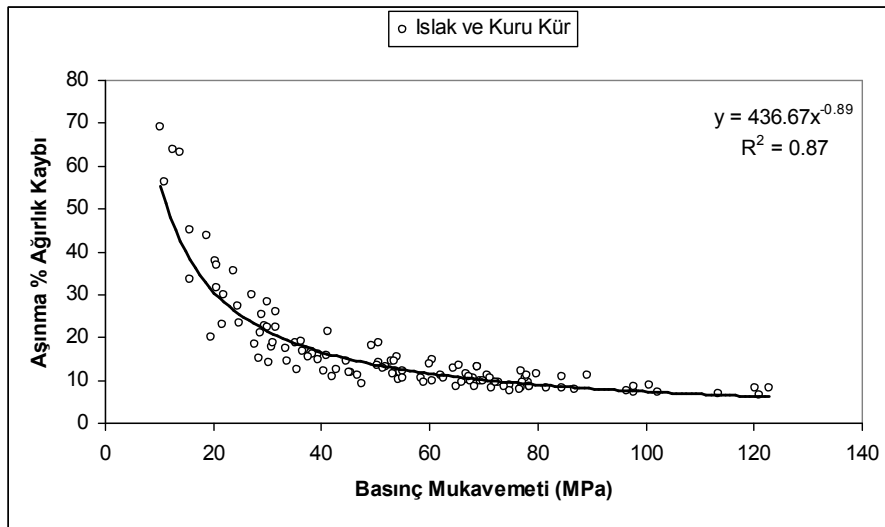
#### 3.4. Aşınma Direnci ile Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki (Relation between Abrasion Resistance and Compressive Strength)

Basınç dayanımı, aşınma dayanıklılığını etkileyen en önemli faktör olup, daha az kapiler boşluğa sahip

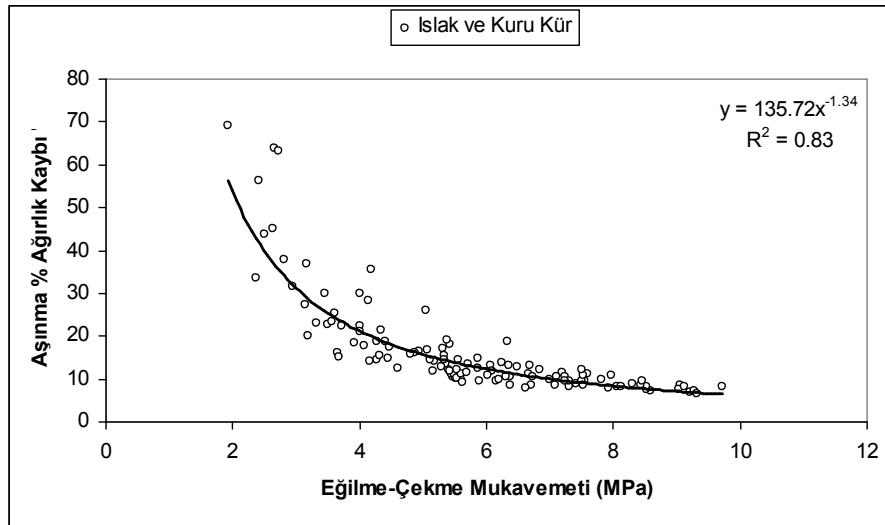
edilen regresyon katsayısı 0.87'dir. Şekilden de görüldüğü üzere, basınç dayanımının yükselmesi, ağırlık kaybının azalmasına ve dolayısıyla, aşınma direncinde de bir artışın meydana gelmesine yol açmıştır.

#### 3.5. Aşınma Direnci ile Eğilme Dayanımı Arasındaki İlişki (Relation between Abrasion Resistance and Flexural Strength)

Literatürde harç numunelerinin aşınma direnci ile eğilme dayanımları arasındaki ilişkiyi gösteren çalışmalara fazla rastlanılmamış olsa da, yapılan bir araştırmada [15], uçucu kül katkılı harç numunelerinin aşınma direnci ile eğilme mukavemeti arasında kuvvetli



Şekil 1. % ağırlık kaybı-basınç dayanımı ilişkisi.



Şekil 2. % ağırlık kaybı-eğilme dayanımı ilişkisi.

olmaları nedeniyle, dayanımı yüksek olan betonların aşınma dayanıklılığı da yüksek olmaktadır. Her iki kür durumu için, harç numunelerden elde edilen aşınma oranı-basınç dayanımı ilişkisinin verildiği Şekil 1, basınç dayanımı ile aşınma oranı arasında kuvvetli bir ilişkinin olduğunu göstermektedir. Yürütülen bu çalışmada ortaya çıkan ve doğrusal olmayan bu ilişki için elde

bir ilişki olduğu belirtilmiştir. Yürütülen bu çalışma kapsamında, her iki kür durumu için, harç numunelerden elde edilen aşınma oranı-eğilme dayanımı ilişkisi, Şekil 2'de verilmiştir. Ortaya çıkan ve regresyon katsayısı 0.83 olan bu eğrisel ilişki, basınç dayanımındaki benzer bir şekilde, eğilme dayanımı ile aşınma direnci arasında da güçlü bir ilişkinin varlığına işaret etmekte,

artan eğilme dayanımı ile birlikte numunelerin aşınma oranlarında da bir azalma meydana gelmektedir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yürütülen bu deneysel çalışmanın neticesinde elde edilen bulgular, artan cüruf katkısının özellikle düşük su/bağlayıcı oranındaki harçlarda işlenebilirliği artırarak ihtiyaç duyulan katkı dozajında bir miktar azaltma sağladığını göstermiştir. Bu durumun muhtemel nedeninin, granüle yüksek fırın cüruflarının klinkere kıyasla daha az yüzey pürüzlülüğüne ve daha düşük özgül ağırlığa sahip olması ve dolayısıyla da, ilave edilen cürufun hacimce daha fazla çimento hamuru elde edilmesine imkân sağlayarak işlenebilirliği olumlu yönde etkilemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Diğer taraftan, kür şartlarının cüruf içeren numuneleri, şahit numunelere göre daha fazla etkilediği ve ıslak kür edilmiş harç numunelerinin, kuru kür edilmiş harç numunelerine göre daha yüksek dayanım ve aşınma direnci sergiledikleri gözlenmiştir. Ayrıca, karışım içerisinde yer alan yüksek fırın cürufu miktarının artmasıyla birlikte kuru kür şartlarının etkisi daha da belirgin olmakta, bunun yanı sıra kuru kür şartları, yüksek oranda su/bağlayıcı miktarına sahip harçların dayanım ve aşınma değerlerinde ıslak küre oranla daha fazla düşüşler meydana getirmektedir. Buna göre ulaşılan tüm bu sonuçlar, karışım içerisinde, Portland çimentosu yerine kısmen öğütülmüş formda granüle yüksek fırın cürufu kullanılmasının, uygun ve yeterli kür uygulanması şartıyla, dayanım ve aşınma direncinde avantaj sağladığını göstermektedir. Bu nedenle, etkili bir kür uygulanması şartıyla, uygun kimyasal katkı dozajı ile birlikte 0.30 gibi düşük su/bağlayıcı oranlarında yapılacak %40 yüksek fırın cürufu ikamesinin dayanım ve aşınma direnci sonuçları göz önüne alındığında tatminkâr sonuçlar verebileceği, bunun yanı sıra, Los Angeles aşınma deney aletinin, aşınma ve dayanımlar arasında kurulan ilişkilere bağlı olarak, harçların aşınma oranlarının bulunmasında kullanılabileceği düşünülmektedir.

#### 5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- 1) Oymael, S. ve Yeğınobalı, A., "Bitümlü Şist Külü Katkısının Betonda Aşınma Dayanımına Etkisi", 4. Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, Türkiye, 359-367 (1996).
- 2) Erdoğan, T. Y., "Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu ve Kullanımı", Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, Türkiye, 1-11 (1995).
- 3) Babu, K. D. and Kumar, V. S. R., "Efficiency of GGBS in Concrete", *Cement and Concrete Research*, 30: 1031-1036 (2000).
- 4) Roy, D. M. and Idorn, G. M., "Hydration, Structure and Blast Furnace Slag Cements, Mortars and Concrete", *ACI Journal*, Proceedings, Vol. 79, No. 6, pp. 445-457, 1982.
- 5) Soroka, I., "Concrete in Hot Environments", National Building Research Institute, Faculty of Civil Engineering, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, (1993).
- 6) Brooks, J. J., Wainwright, P. J. and Boukendakji, M., "Influence of Slag Type and Replacement Level on Strength, Elasticity, Shrinkage and Creep of Concrete", Proceedings, *CANMET/ACI Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI SP-132, Vol. 2, Editor V. M. Malhotra, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., Istanbul, Turkey, 1325-1341 (1992).
- 7) Yeau, K. Y. and Kim, E. K., "An Experimental Study on Corrosion Resistance of Concrete with Ground Granulated Blast-Furnace Slag", *Cement and Concrete Research*, 35: 1391-1399 (2005).
- 8) Fernandez, L. and Malhotra, V. M., "Mechanical Properties, Abrasion Resistance and Chloride Permeability of Concrete Incorporating Granulated Blast-Furnace Slag", *Cement, Concrete and Aggregates*, 12: 87-100 (1990).
- 9) Newman, J. and Choo, B. S., "Advanced Concrete Technology, Constituent Materials", ISBN: 0 7506 5103 2, Butterworth-Heinemann, Oxford (2003).
- 10) Annual Book of ASTM Standards, "Specification for Ground Granulated Blast Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars", **ASTM C 989-89 Standard**, Vol. 04.02, 499-503, USA, (1993).
- 11) Türk Standartları Enstitüsü (TSE), "Kagir Harcı Deney Metotları-Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayıma Tablası ile)", **TS EN 1015-3**, Ankara, Türkiye, 1-8 (2000).
- 12) Tokyay, M., "Cüruflar ve Cürufu Çimentolar", Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu, 47s, TÇMB, Ankara, (2003).
- 13) Türk Standartları Enstitüsü (TSE), "Kagir Harcı Deney Metotları-Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Basınç ve Eğilme Dayanımının Tayini", **TS EN 1015-11**, Ankara, Türkiye, 1-11 (2000).
- 14) Türk Standartları Enstitüsü (TSE), "Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 2 : Parçalanma Direncinin Tayini İçin Metotlar", **TS EN 1097-2**, Ankara, Türkiye, 1-29 (2000).
- 15) Atiş, C. D. and Çelik, Ö. N., "Relation between Abrasion Resistance and Flexural Strength of High Volume Fly Ash Concrete", *Materials and Structures-RILEM*, 35: 257-260 (2002).