

## Harçların Mekanik ve Elektriksel İletkenlik Özelliklerine Karbon Lifi ve Çelikhane Cürufu Kullanımının Etkisi

Ahmet Raif Boğa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.  
e-posta: ararif@aku.edu.tr

Geliş Tarihi: 17.08.2017 ; Kabul Tarihi: 20.12.2017

### Özet

Bu çalışmada, çelikhane cürufu ve karbon lifinin beraber ve ayrı ayrı kullanılması durumunda harçların mekanik ve elektriksel iletkenlik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Çelikhane cürufu Rilem kumunun yerine hacimce % 0, 25, 50, 75 ve 100 oranlarında, karbon lifleri ise çimento ağırlığının % 0, 0.3 ve 0.5'i oranlarında kullanılmıştır. Çelikhane cürufunun kullanıldığı her seriye ayrıca karbon lifi de eklenerek her iki katkının kullanılması durumundaki mekanik ve iletkenlik özelliklerindeki değişimler de incelenmiştir. Toplamda 15 farklı harç karışımı hazırlanmıştır. Üretilen çelikhane cürufu ve karbon lifi katkılı harçların mekanik ve elektriksel özelliklerini belirlemek için sertleşmiş harç numuneleri üzerinde birim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, elektriksel özdirenç ve elektriksel iletkenlik deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan çelikhane cürufunun ve karbon lifinin harç numunelerinde birlikte kullanılması durumunda elektriksel iletkenlik özelliklerinin geliştiği görülmüştür. Ayrıca çelikhane cürufunun yüksek oranlarda kullanılması ile harçların mekanik özellikleri de iyileşmiştir.

### Anahtar kelimeler

İletken harç; Çelikhane cürufu; Karbon lifi; Elektriksel iletkenlik.

## Effect of Using Carbon Fiber and Steel Slag on Mechanical and Electrical Conductivity Properties of Mortars

### Abstract

In this study, the effects of steel slag and carbon fiber on the mechanical and electrical conductivity properties of mortars were investigated in the case of using them separately and jointly. Instead of Rilem sand, steel slag was used at 0, 25, 50, 75 and 100% by volume and carbon fibers was used at 0, 0.3 and 0.5% of cement weight. In addition, carbon fiber is added to each series where steel slag was used, and changes in the mechanical and conductivity properties of both additives were investigated. Totally 15 different mortar mixtures were prepared. In order to determine mechanical and electrical properties of mortars with carbon fiber and steel slag additives, unit weight, compressive strength, flexural strength, electrical resistivity and conductivity test were performed on hardened mortar specimens. It was concluded that, electrically conductivity properties was developed when steel slag and carbon fiber used together in mortar specimens. In addition, the mechanical properties of mortars had improved with the use of steel slag at high ratios.

### Keywords

Conductive mortar;  
Steel slag; Carbon  
fiber; Electrical  
conductivity.

### 1. Giriş

Elektrik enerjisi ve ısı enerjisini geçiren cisimler iletken madde olarak adlandırılır. Elektriksel

iletkenlik, malzeme içerisinde atomik boyutlarda yük taşıyan elemanlar tarafından gerçekleştirilir. Bunlar elektron veya elektron boşluklarıdır. Bir

malzemenin iletkenliğinin yüksek olması için elektriksel öz direncinin düşük olması gerekmektedir (Huang *et al.* 2009, Pan *et al.* 2015). Yüksek fiziksel ve mekanik özelliklere sahip beton, günümüzde en sık kullanılan yapı malzemelerinden birisidir. Çimento bazlı malzeme olan beton yalıtkan özelliklere sahiptir ve elektriksel iletkenliği çok düşük seviyelerdedir. Yürüme yolları, karayolları, havaalanı pistleri gibi alanlarda soğuk kış mevsimlerinde oluşan kar birikimleri ve buzlanma insan yaşamını olumsuz etkilemektedir. İletken beton teknolojisi bu soruna çözüm olması için geliştirilmiş bir teknolojidir. Normalde yalıtkan olan beton iletken hale getirilerek beton içerisinden elektrik akımı geçirilmekte ve beton ısıtılmaktadır. Betonun ısınması ile buzlanma engellenmekte veya mevcut buzlanma eritilmektedir (Tuan 2004). İletken beton teknolojisi sadece buz çözmek için kullanılmayıp daha birçok alanda da kullanılmaktadır. Bu kullanım alanları; elektriksel sistem ve elektronik bileşenleri koruma amaçlı yapılar, elektronik endüstrisinde anti statik döşemeler, betonarme yapılarda katodik koruma olarak sıralanabilir (Tuan 2004, Tumidajski 1997, Chung 2004, Bertolini *et al.* 2004, Boğa *et al.* 2017).

Yalıtkan olan betonu iletken hale getirmek için beton içerisine toz malzemeler, lifler ve agregalar katılmaktadır. Grafit tozu, karbon tozu, alüminyum tozu, karbon lifi, çelik talaşı, çelik lif ve demir içeriği yüksek agregalar, çelikhane cürufu gibi malzemelerin kullanılması ile betonun iletkenlik özellikleri arttırılmaktadır (Gopalakrishnan *et al.* 2015, García *et al.* 2009). Bu maddeler belli oranlarda beton karışımına ilave edilip istenilen iletkenliğin sağlanması, aynı zamanda betonun mevcut mekanik özelliklerini de kaybetmemesi ve ekonomik olması istenmektedir (Pan *et al.* 2015).

İletkenliği arttırıcı katkı maddelerinin kullanımı ile ilgili oldukça farklı çalışmalar yapılmıştır. Chung (2004) farklı elektriksel iletken katkıların (süresiz formdaki çelik ve karbon esaslı malzemeler) çimento esaslı harçların öz dirençlerinde meydana getirdiği düşme ile ilgili karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Xin ve Mengqiu (2015), karbon lifi ve grafit katkılı iletken betonun özelliklerini

incelemiştir. Karbon lifi ve grafit katkılı iletken betonlar yalnızca yüksek dayanım ve iletkenlik özelliğine sahip olmayıp aynı zamanda döşemelerin ısıtılmasıyla ilgili problemlerin çözümünde kullanılabilir mükemmel malzemeler olduğu sonucuna varmışlardır. Gopalakrishnan vd. (2015), nano karbon esaslı iletken malzemelerin (karbon tozları ve lifleri), karıştırma yöntemleri, iletken harç özellikleri, ısınma performanslarını araştırmışlardır.

Literatür incelendiğinde genel olarak çelikhane cürufunun beton agregası yerine kullanıldığı ve bu agregalar ile üretilen betonların mekanik özelliklerindeki gelişmeler ile ilgili çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Tran vd. (2014) yaptıkları çalışmada çelikhane cürufunun kaba agrega olarak kullanımının yüksek dayanımlı betonların özelliklerine etkisi üzerine çalışmışlardır. Panda vd. (2013) ferrokrom cürufunun beton agregası olabilirliğini üzerine, Yu vd. (2016) çelikhane cürufu ve atık cam ile yapılmış betonların performansı üzerine araştırma yapmışlardır. Devi ve Gnanavel (2014) çelikhane cürufu kullanılarak üretilen betonların özellikleri ile ilgili çalışmışlardır.

Günümüzde atıkların hammadde gibi kullanılarak yeni bir maddeye dönüştürülmesi sürdürülebilirlik açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada literatürden farklı olarak atık malzeme olan çelikhane cürufu kullanılarak elektriksel iletkenliği yüksek harçların üretilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca iletkenlik özelliklerini daha da yükseltmek için karbon lifi katkısı da kullanılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Yapılan çalışma ile çelikhane cürufu ve karbon lifi katkılı harçların mekanik ve iletkenlik özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Harç üretiminde çelikhane cürufu Rilem kumu ile hacimce yer değiştirilerek kullanılmıştır. Karbon lifleri ise çimento ağırlığının belli oranlarında kullanılmıştır. Yapılan çalışma sadece çelikhane cürufu, sadece karbon lifi ve her iki katkı maddesinin kullanımı ile üretilen harç serilerinden oluşmaktadır.

### 2.1. Kullanılan Malzemeler

#### 2.1.1. Çimento

Deneysel çalışmalarda Afyon Çimento Fabrikası'nın (ÇİMSA) üretmiş olduğu TS EN 197-1 (2012) standartlı CEM I 42.5 R Portland Çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun XRF analizi ve fiziksel özellik deney sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Çimentonun XRF analizi, fiziksel ve mekanik özellik deney sonuçları.

	Kimyasal Bileşim, %	CEM I 42.5 R
Kimyasal Özellikler (XRF analizi)	SiO <sub>2</sub>	16.80
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.81
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.55
	CaO	63.90
	MgO	1.94
	Na <sub>2</sub> O	0.74
	K <sub>2</sub> O	1.24
	SO <sub>3</sub>	3.02
	MnO	0.12
	Kükürt (S)	-
	Cl <sup>-</sup>	0.01
	Kızdırma kaybı	1.24
	Çözünmeyen Kalıntı	0.44
	Serbest Kireç	1.90
Fiziksel Özellikler	Özgül ağırlık	3.15
	Özgül yüzey, cm <sup>2</sup> /gr	3320

### 2.1.2. Rilem Cembureau standart kumu

Harç karışımlarının hazırlanmasında TS EN 196-1 (2016)'e uygun Rilem Cembureau Standart Kumu kullanılmıştır. Standart kum Limak Batı Çimento'nun Trakya Çimento Fabrikası tarafından üretilmiştir. Rilem kumunun granülometrisi Çizelge 2'de verilmiştir. Rilem kumunun özgül ağırlık ve su emme yüzdesi değerleri sırasıyla 2.6 ve 1.276 olarak bulunmuştur.

**Çizelge 2.** Rilem Cembureau standart kumunun granülometrisi.

Elek boyutları (mm)	2.00	1.60	1.00	0.50	0.16	0.08
Kümülatif Elekte Kalan (%)	0	7±2	33±2	67±2	87±2	99±1

### 2.1.3. Çelikhane Cürufu

Çelikhane cürufu İzmir demir çelik fabrikasından temin edilmiştir. Çelikhane cürufunun XRF analizi, özgül ağırlık ve su emme deneyi sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir. Elde edilen XRF sonuçlarından atık olan çelikhane cürufunun % 33.6 oranında demir içeriğine sahip olduğu görülmüştür. Çelikhane cürufu kaba parçalar halinde temin edilmiştir. Bu

parçalar harç üretiminden önce kırılarak ve elenerek Çizelge 2'de verilen Rilem kumunun granülometrisi ile aynı boyutlara getirilmiştir. Çelikhane cürufunun kaba parçalı ve elenmiş haline ait görüntüler Şekil 1'de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.** Çelikhane cürufunun XRF analizi ve fiziksel özellik deney sonuçları.

	Kimyasal Bileşim, %	Çelikhane Cürufu
Kimyasal Özellikler (XRF analizi)	SiO <sub>2</sub>	18.7
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.72
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33.6
	CaO	25.7
	MgO	2.42
	Na <sub>2</sub> O	1.44
	K <sub>2</sub> O	0.109
	SO <sub>3</sub>	0.311
	MnO	4.04
	Cl <sup>-</sup>	0.573
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.413
	TiO <sub>2</sub>	0.572
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.105
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.90
BaO	0.164	
Fiziksel Özellikler	Özgül ağırlık	3.204
	Su emme, %	3.821



Şekil 1. Çelikhane cürufuna ait görüntüler.

### 2.1.4. Karbon Lifi

Harç numunelerinin iletkenliğinin arttırmak için harç numunelerinin üretiminde karbon lifleri kullanılmıştır. Karbon lifleri AKSACA firmasından temin edilmiştir. Rulo şeklinde temin edilen karbon lifleri iletken harç numunelerinin üretiminde 5 mm'lik boylarda kesilerek kullanılmıştır. Karbon lifinin özgül ağırlığı firma tarafından 1.78 olarak belirtilmiştir. Karbon liflerinin özellikleri Çizelge 4'te verilmiştir.

**Çizelge 4.** Karbon liflerinin özellikleri.

Lif Özellikleri	Değer	Test Metodu
-----------------	-------	-------------

Çekme Dayanımı (MPa)	4900	ISO 10618
Çekme Modülü (GPa)	250	ISO 10618
Birim Şekil Değiştirme (%)	2.0	ISO 10618
Yoğunluk	1.78	ISO 10119
Akma (g/1000 m)	1600	ISO 1889

## 2.2. Harç karışım oranları

Harç karışım oranları Çizelge 5'te verilmiştir. Harç karışım oranları, sadece çelikhane cürufunun, sadece karbon lifinin ve hem çelikhane cürufunun hem de karbon lifinin beraber kullanıldığı serilerden oluşmaktadır. TS EN 196-1 (2016)'de verilen 225 gr su, 450 gr çimento ve 1350 gr standart Rilem kumu değerleri kullanılarak 1 m<sup>3</sup>'te kullanılacak su, çimento ve kum değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 5'te verilen çelikhane cürufu ve karbon lifinin kullanılmadığı ilk serideki karışım oranları incelendiğinde, karışım oranlarının TS EN 196-1 (2016)'de belirtilen 1 kısım su, 2 kısım çimento ve 6 kısım rilem kumundan oluştuğu görülmektedir. Çelikhane cürufu ile rilem kumunun özgül ağırlıklarının birbirinden oldukça farklı olmasından dolayı çelikhane cürufu rilem kumu ile hacimce yer değiştirilmiştir. Harç numuneleri üretilirken çelikhane cürufu rilem kumunun yerine hacimce % 25, 50, 75 ve 100 oranlarında kullanılmıştır. Karbon liflerinin kullanıldığı harç numunelerinde ise karbon lifleri çimento ağırlığının % 0, 0.3 ve 0.5'i oranlarında kullanılmıştır. Çizelge 5'te örneğin ÇC75KL0.5 olarak verilen karışım kodu çelikhane cürufunun rilem kumu yerine hacimce %75 oranında ve karbon lifinin

ise çimento ağırlığının %0.5 oranında kullanıldığını göstermektedir.

**Çizelge 5.** Harç karışım oranları, kg/m<sup>3</sup>.

Harç numuneleri 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik harç kalıplarına dökülerek masa tipi vibratör yardımı ile yerleştirilerek üretilmiştir. Üretilen harç numuneleri 24 saat boyunca laboratuvar ortamında kalıplarında bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda üretilen numuneler kalıplarından çıkartılıp ilgili deneylerin yapılacağı zamana kadar 20 ± 2 °C sıcaklığa sahip kirece doymun su havuzlarında kalmıştır.

## 2.3. Yapılan Deneyler

### 2.3.1. Birim ağırlık, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri

Birim ağırlık ve eğilme dayanımı deneyleri 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler üzerinde her bir seri için üçer numune üretilerek TS EN 196-1 (2016)'e uygun olarak yapılmıştır. Üçer numunenin ortalaması alınarak birim ağırlık ve eğilme dayanımı sonuçları elde edilmiştir. Basınç dayanımı deneyleri eğilme deneyleri sonucunda elde edilen altı numune üzerinde TS EN 196-1 (2016)'e uygun olarak yapılmıştır. Basınç dayanımı sonuçları altı numuneden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak bulunmuştur. Birim ağırlık, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmadan önce harç numunelerine kirece doymun su

Karışım Kodu	ÇC, %	KL, %	Çimento	Su	Rilem Kumu	Çelikhane Cürufu	Karbon Lifi
ÇC0KL0	% 0 ÇC	% 0	507.28	253.64	1521.83	-	-
ÇC0KL0.3		% 0.3	507.28	253.64	1519.61	-	1.52
ÇC0KL0.5		% 0.5	507.28	253.64	1518.13	-	2.54
ÇC25KL0	% 25 ÇC	% 0	507.28	253.64	1141.38	468.84	-
ÇC25KL0.3		% 0.3	507.28	253.64	1139.71	468.16	1.52
ÇC25KL0.5		% 0.5	507.28	253.64	1138.60	467.70	2.54
ÇC50KL0	% 50 ÇC	% 0	507.28	253.64	760.92	937.68	-
ÇC50KL0.3		% 0.3	507.28	253.64	759.81	936.31	1.52
ÇC50KL0.5		% 0.5	507.28	253.64	759.06	935.40	2.54
ÇC75KL0	% 75 ÇC	% 0	507.28	253.64	380.46	1406.53	-
ÇC75KL0.3		% 0.3	507.28	253.64	379.90	1404.47	1.52
ÇC75KL0.5		% 0.5	507.28	253.64	379.53	1403.10	2.54
ÇC100KL0	% 100 ÇC	% 0	507.28	253.64	-	1875.37	-
ÇC100KL0.3		% 0.3	507.28	253.64	-	1872.63	1.52
ÇC100KL0.5		% 0.5	507.28	253.64	-	1870.80	2.54

havuzlarında 28 gün boyunca standart kür uygulanmıştır.

### 2.3.2. Elektriksel özdirenç ölçümü deneyi

Elektriksel özdirenç ölçümünde kullanılan deney düzeneği Şekil 2'de gösterilmiştir. Deney düzeneği elektrot görevi gören iki adet bakır levha, mekanik kelepçe, iletkenliği arttırmak için kullanılan iletken jel, akımı ve voltajı gösteren bir güç kaynağından oluşmaktadır. Harç numunelerinin karşılıklı iki yüzeyine iletken jel sürüldükten sonra bu yüzeylere yerleştirilen bakır levhalar mekanik kelepçe vasıtasıyla sabitlenmiştir. Güç kaynağının artı kutbu bir bakır elektroda eksi kutbu da diğer bakır elektroda bağlanarak devre tamamlanmıştır. Bu işlemlerden sonra güç kaynağından sabit 30 V verilerek her bir harç numunesinin çektiği akım değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 2. Elektriksel özdirenç ölçümünde kullanılan deney düzeneği.

Denklem 1 ve 2 yardımı ile harç numunesinin sırasıyla özdirenç ( $\rho$ ) ve iletkenlik (C) değerleri hesaplanmıştır.

$$\rho = R \times \frac{S}{L} \quad (1)$$

$$C = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

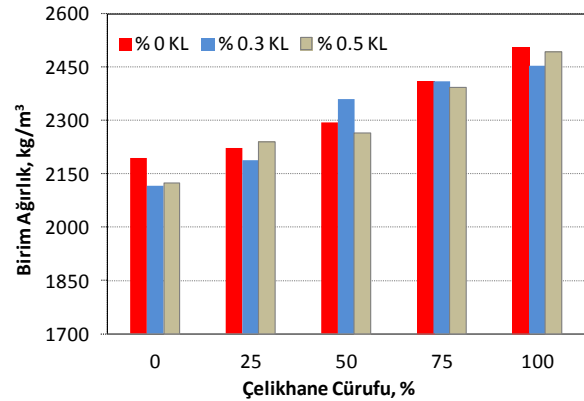
Denklemlerde  $\rho$  = elektriksel özdirenci ( $\Omega\text{cm}$ ); L, bakır elektrotlar arası mesafe (cm); R ölçülen direnç ( $\Omega$ ); ve S, elektrot iletken alanı ( $\text{cm}^2$ )'dir (Boğa and Gürer 2017). Elektrot mesafesi için örnek yüksekliği üç farklı nokta ölçülmüş ve ortalama yükseklikleri L değeri olarak kullanılmıştır. Elektriksel özdirenç deneyleri 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik

numuneler üzerinde yapılmıştır. Elektriksel özdirenç deneylerinden önce numunelere 28 gün boyunca kirece doygun su havuzlarında standart kür uygulanmıştır.

## 3. Bulgular ve Tartışma

### 3.1. Birim ağırlık sonuçları ve değerlendirilmesi

Birim ağırlık deney sonuçlarının çelikhane cürufu ve karbon lifi oranına göre değişimi Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3 genel olarak incelendiğinde, Rilem kumu yerine çelikhane cürufu kullanım oranlarının artması ile birim ağırlık değerlerinin de arttığı sonucuna varılmıştır. Sadece çelikhane cürufunun % 25, 50, 75 ve 100 oranlarında kullanılması ile ÇCOKLO (kontrol) karışımına göre birim ağırlıklardaki artış oranları sırasıyla % 1.33, 4.63, 9.88 ve 14.25 olarak bulunmuştur. Çelikhane cürufu ve karbon lifinin beraber kullanıldığı serilerde de benzer artış oranları elde edilmiştir. Çelikhane cürufunun kullanılması ile birim ağırlıklardaki artışların sebebi çelikhane cürufunun özgül ağırlığının Rilem kumunun özgül



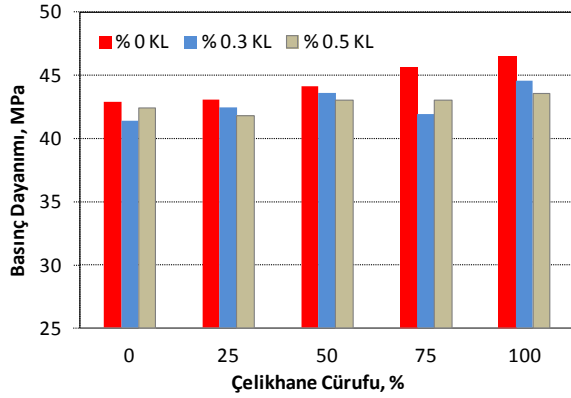
ağırlığından daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Karbon lifi kullanım oranlarının artması ile bazı serilerde birim ağırlık değerleri azalırken bazı serilerde de artışların olduğu görülmüştür. Ancak birim ağırlıktaki bu artışlar ve azalışlar oldukça düşük oranlarda kalmıştır. Karbon lifi kullanımının birim ağırlık üzerine etkisi oldukça düşük seviyelerdedir.

Şekil 3. Birim ağırlık sonuçlarının çelikhane cürufu ve karbon lifi oranına göre değişimi.

### 3.2. Basınç dayanımı sonuçları ve değerlendirilmesi

Basınç dayanımı deney sonuçlarının çelikhane cürufu ve karbon lifi oranına göre değişimi Şekil 4'te

verilmiştir. Şekil 4 genel olarak incelendiğinde çelikhane cürufu kullanım oranlarının artışı ile birlikte basınç dayanımlarında artışların olduğu görülmüştür. Karbon lifi kullanılmayan sadece



çelikhane cürufunun kullanıldığı serilerde çelikhane cürufunun artışı ile birlikte ÇCOKLO (kontrol) serisine göre basınç dayanımlarındaki artış oranları sırasıyla % 0.44, 2.84, 6.42 ve 8.45 olarak bulunmuştur.

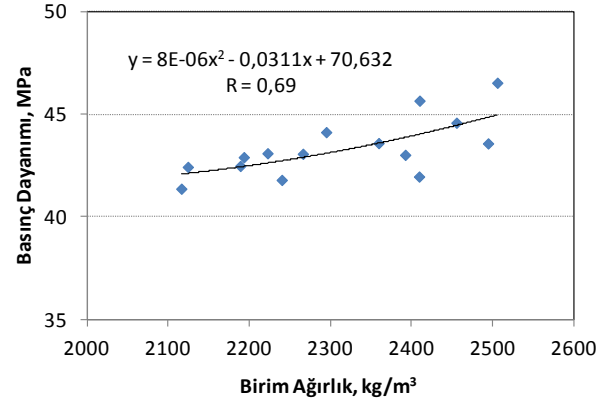
**Şekil 4.** Basınç dayanımı sonuçlarının çelikhane cürufu ve karbon lifi oranına göre değişimi.

Çelikhane cürufu katkılı serilere ilave olarak karbon lifi eklenmesi durumunda ise basınç dayanımlarında genel olarak azalışların olduğu sonucuna varılmıştır. Çelikhane cürufunun % 50 oranında kullanıldığı serilerde karbon lifinin artması ile birlikte karbon lifi kullanılmayan ÇC50KLO serisine göre basınç dayanımları sırasıyla % 1.21 ve 2.39 oranlarında azalmıştır. Çelikhane cürufunun % 100 oranında kullanıldığı serilerde ise azalış oranları sırasıyla % 4.19 ve 6.35 olarak bulunmuştur.

Karbon liflerin çapının çok düşük olması sonucu özgül yüzey alanları çelik lif gibi diğer liflere göre daha yüksektir. Bu durum matris içinde karbon liflerin topaklanmasına ve zayıf bölgelerin oluşmasına neden olmaktadır (Kızılılgın 2009). Karbon lifi kullanılması ile basınç dayanımlarındaki azalışların sebebinin bu topaklanmalardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çelikhane cürufu ve karbon lifi katkılı harçların basınç dayanımı değerleri yaklaşık olarak 42 ile 46 MPa aralığında değiştiği sonucuna varılmıştır. Buradan çimentonun norm dayanımı 42.5 MPa değerini genel olarak tüm serilerin sağladığı sonucuna varılmıştır.

Basınç dayanımı ve birim ağırlık arasındaki ilişki Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'ten görüldüğü üzere birim



ağırlık değerlerinin artması ile basınç dayanımı değerleri de artmaktadır.

**Şekil 5.** Basınç dayanımı ve birim ağırlık arasındaki ilişki.

Çelikhane cürufu yavaş soğuma nedeniyle düşük oranda amorf silika, az miktarda serbest kireç ve yüksek oranda demir oksit içermektedir. Bu özellikler nedeniyle çelikhane cürufu çok düşük veya puzolanik olmayan özellikler göstermektedir (Tran *et al.* 2014). Çimento yerine çelikhane cürufu kullanıldığında, priz süreleri uzamakta ve erken dayanım değerleri azalmaktadır. Bu sebeplerden dolayı, çelikhane cürufu betonda çimento yerine veya çimento katkı maddesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmamaktadır (Sezer and Gülderen 2015). Muhmood vd. (2009) yaptıkları çalışmada % 95 klinker ve % 5 oranında alçıtaşının kullanıldığı çimentolar üretmişler ve bu serilerin 28 günlük basınç dayanımını 66.5 MPa olarak bulmuşlardır. Bu kontrol serilerinde klinker oranı azaltılarak % 15 ve 30 oranlarında çelikhane cürufu kullanılması durumunda 28 günlük basınç dayanımlarını sırasıyla 63.3 MPa ve 53.4 MPa değerlerini almıştır. Çelikhane cürufunun puzolanik aktivitesinin düşük olmasından dolayı çelikhane cürufu ile üretilen çimentoların basınç dayanımlarında düşüşler yaşanmıştır.

Çelikhane cürufunun su ile hızlı soğutulması ve ince öğütülmesi halinde amorf yapılı ve puzolanik aktivitesi olan bir yapı kazanma olasılığı da bulunmaktadır. Muhmood vd. (2009) yaptıkları çalışmada çelikhane cürufunun amorf içeriğini

arttırmak için cürufları bir su havuzunda hızlıca soğutmuşlar ve sonrasında eritme işlemine tabi tutmuşlardır. Sonuç olarak çelikhane cürufunun puzolanik özelliklerinin arttığını rapor etmişlerdir.

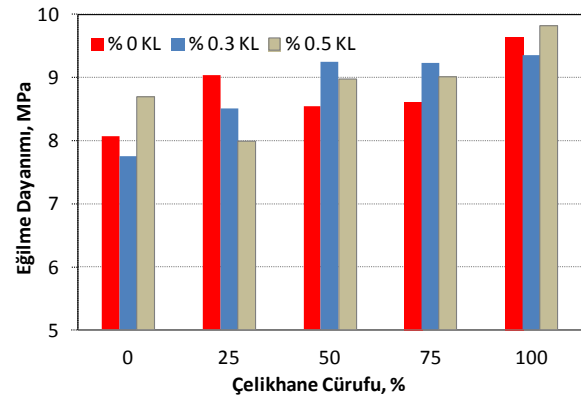
Yapılan çalışmada çelikhane cürufu kum yerine kullanılmış ve kullanılan çelikhane cürufunun tane boyutları çimento inceliğinde değildir. Çok az miktarda küçük boyutlu taneler kum gradasyonunda bulunabilir. Ancak literatürde de belirtildiği üzere amorf içeriğin artırılması için herhangi bir işlem uygulanmayan çelikhane cüruflarının puzolanik özellikleri oldukça düşük seviyelerdedir. Bu sebeple kum yerine kullanılan çelikhane cüruflarının basınç dayanımı değerlerini arttırmada rol oynamadığı düşünülmektedir.

Basınç dayanımlarındaki esas artışın sebebi özgül ağırlığı daha yüksek olan çelikhane cürufunun hacimce Rilem kumunun yerine kullanılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüksek özgül ağırlıklı çelikhane cürufunun kullanılması ile birim ağırlıklar artmış ve sonuç olarak basınç dayanımları da artmıştır. Yapılan çalışmalarda da çelikhane cürufu agregasının yüksek yoğunluğu nedeniyle temel, istinat duvarları, dalgakıran blokları, gürültü engelleri, radyasyon izolatörleri gibi bazı yapılarda kullanımı oldukça avantajlı olduğu belirtilmektedir (Sezer and Gülderen 2015). Maslehuddin vd. (2003) tarafından yapılan bir çalışmada da çelikhane cürufu agregası ve kireç taşı agregası içeren betonların mekanik ve dayanıklılık özellikleri karşılaştırılmış ve çelikhane cürufu agregalı betonların daha iyi performans gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

### 3.3. Eğilme dayanımı sonuçları ve değerlendirilmesi

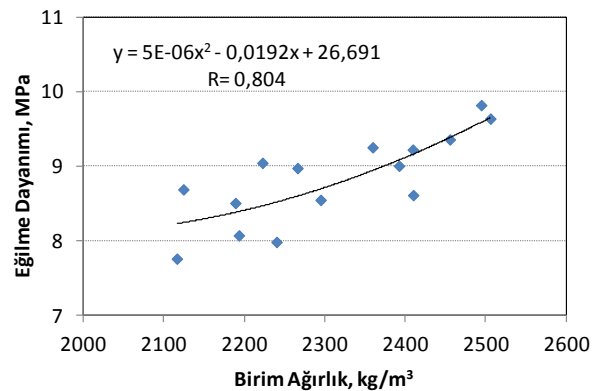
Eğilme dayanımı deney sonuçlarının çelikhane cürufu ve karbon lifi oranına göre değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'dan görüldüğü üzere basınç dayanımı sonuçlarında olduğu gibi çelikhane cürufunun artışı ile birlikte eğilme dayanımı sonuçlarında da genel olarak artışların olduğu sonucuna varılmıştır. Çelikhane cürufunun % 25 oranında kullanıldığı serilerde karbon lifi ilavesi ile eğilme dayanımlarında azalışların olduğu görülmüştür. Diğer serilerde ise karbon lifi

miktarının artışına bağlı olarak eğilme dayanımlarında azalışların ve artışların olduğu sonucuna varılmıştır. Çelikhane cürufunun % 50 ve 75 oranında kullanıldığı serilerde % 0.3 oranında karbon lifi kullanılması durumunda diğer karbon lifi kullanılan serilere göre daha iyi eğilme dayanımı değerleri elde edilirken, çelikhane cürufunun % 0 ve 100 oranında kullanıldığı serilerde ise % 0.5 oranında karbon lifi kullanılması ile daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 6. Eğilme dayanımı sonuçlarının çelikhane cürufu ve karbon lifi oranına göre değişimi.

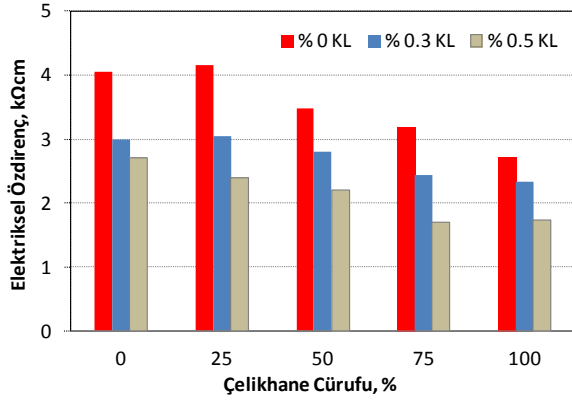
Eğilme dayanımı ve birim ağırlık değerleri arasındaki ilişki Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7'den görüldüğü üzere birim ağırlık değerlerinin artması ile basınç dayanımı değerlerinde olduğu gibi eğilme dayanımı değerleri de artmaktadır. Elde edilen korelasyon katsayısı değerinden de görüldüğü üzere eğilme dayanımı ile birim ağırlık arasında iyi bir ilişkinin olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 7. Eğilme dayanımı ve birim ağırlık arasındaki ilişki.

### 3.4. Elektriksel özdirenç sonuçları ve değerlendirilmesi

Elektriksel özdirenç sonuçlarının çelikhane cürufu ve karbon lifi oranına göre değişimi Şekil 8’de verilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde genel olarak çelikhane cürufu ve karbon liflerinin kullanım oranlarının artması ile elektriksel özdirenç değerlerinin düştüğü sonucuna varılmıştır.

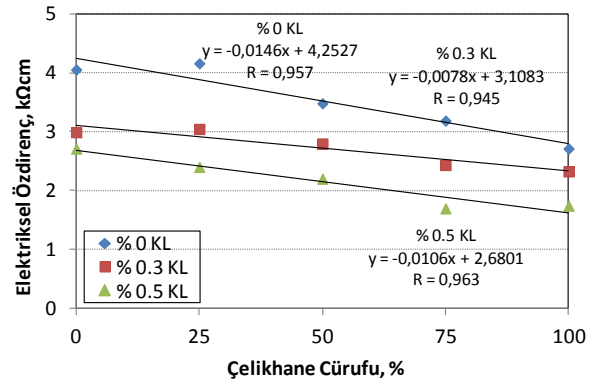


Şekil 8. Elektriksel özdirenç sonuçlarının çelikhane cürufu ve karbon lifi oranına göre değişimi.

Karbon lifinin kullanılmadığı serilerde, çelikhane cürufunun % 100 oranında kullanılması ile hiç çelikhane cürufunun kullanılmadığı serilere göre elektriksel özdirenç değerleri % 33.11 oranında azalmıştır. Karbon lifinin % 0.3 oranında kullanıldığı serilerdeki, çelikhane cürufunun kullanımı ile elde edilen azalış oranı % 22.27 bulunurken karbon lifinin % 0.5 oranında kullanıldığı serilerdeki azalış oranı ise % 35.79 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlardan görüldüğü üzere çelikhane cürufunun yüksek oranlarda kullanılması durumunda üretilen harç numunelerinin elektriksel özdirenç değerleri azalmaktadır. Çelikhane cürufunun % 0 oranında kullanıldığı serilerde, karbon lifinin % 0.5 oranında kullanılması ile karbon lifinin kullanılmadığı serilere göre elektriksel özdirenç değeri % 33.10 oranında azalmıştır. Çelikhane cürufunun % 25, 50, 75 ve 100 oranında kullanıldığı serilerde ise, karbon lifinin % 0.5 oranında kullanılması ile % 0 oranında kullanılan serilere göre elektriksel özdirenç değerlerindeki azalış oranları sırasıyla % 42.33, 36.80, 46.80 ve 35.78 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere karbon lifi kullanımı elektriksel özdirenç değerlerini oldukça yüksek oranlarda düşürmektedir. Çelikhane cürufunun ve karbon lifinin kullanılmadığı (ÇCOKLO) serilerden elde edilen

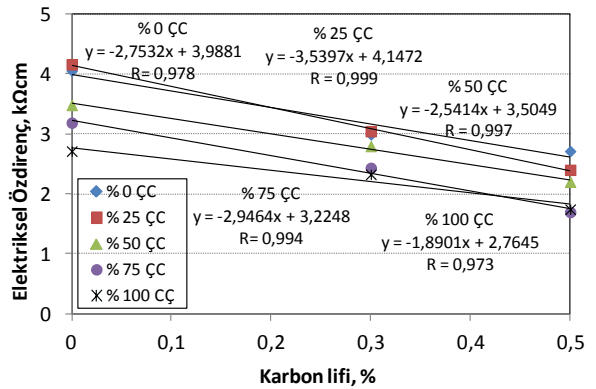
elektriksel özdirenç değeri 4.06 kΩcm iken, çelikhane cürufunun %100 ve karbon lifinin % 0.5 oranında kullanıldığı (ÇC100KL0.5) serilerden elde edilen elektriksel özdirenç değeri 1.74 kΩcm olarak elde edilmiştir. Görüldüğü üzere çelikhane cürufunun ve karbon lifinin beraber kullanılması ile elektriksel özdirenç değeri % 57.06 oranında azalmıştır.

Çelikhane cürufu kullanım oranı ile elektriksel özdirenç arasındaki ilişki Şekil 9’da verilmiştir. Şekil 9’dan görüldüğü gibi % 0, 0.3, 0.5 oranlarında karbon lifi kullanılan tüm serilerde çelikhane cürufu kullanım oranlarının artması ile elektriksel özdirenç değerleri düşmektedir. Elde edilen korelasyon katsayısı değerlerinden de görüldüğü üzere çelikhane cürufu kullanım oranları ile elektriksel özdirenç değerleri arasında kuvvetli bir ilişki vardır.



Şekil 9. Çelikhane cürufu kullanım oranı ile elektriksel özdirenç arasındaki ilişki.

Karbon lifi kullanım oranı ile elektriksel özdirenç arasındaki ilişki Şekil 10’da verilmiştir.



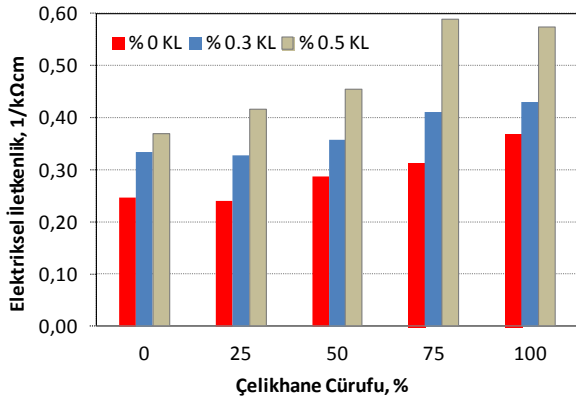
Şekil 10. Karbon lifi kullanım oranı ile elektriksel özdirenç arasındaki ilişki.



Çelikhane cürufunun kullanıldığı tüm serilerde karbon lifi kullanım oranlarının artması ile birlikte elektriksel özdirenç değerleri azalmaktadır. Elde edilen korelasyon katsayısı değerlerinin tümü 1'e oldukça yakındır. Sonuç olarak, korelasyon katsayısı değerlerinden de görüldüğü üzere karbon lifi kullanım oranı ile elektriksel özdirenç değerleri arasında oldukça kuvvetli bir ilişki vardır.

### 3.5. Elektriksel iletkenlik sonuçları ve değerlendirilmesi

Elektriksel iletkenlik sonuçlarının çelikhane cürufu ve karbon lifi oranına göre değişimi Şekil 11'de verilmiştir. Elektriksel iletkenlik değeri elektriksel özdirenç değerinin tersidir. Şekil 11'den de görüldüğü üzere çelikhane cürufu ve karbon lifi kullanım oranlarının artması ile elektriksel iletkenlik değerlerinde artışlar olmuştur. Karbon lifi katkısız seriler incelendiğinde en yüksek elektriksel iletkenlik değerleri çelikhane cürufunun % 100 oranında kullanıldığı serilerden elde edilmiştir. Karbon lifinin % 0.3 oranında kullanıldığı serilerde de aynı durum söz konusudur. Ancak karbon lifinin % 0.5 oranında kullanıldığı serilerde ise en yüksek elektriksel iletkenlik değerleri çelikhane cürufunun % 75 oranında kullanıldığı serilerden elde edilmiştir.



Şekil 11. Elektriksel iletkenlik sonuçlarının çelikhane cürufu ve karbon lifi oranına göre değişimi.

Atık bir malzeme olan çelikhane cürufunun elektriksel iletkenlik değerlerini arttırmada büyük katkısının olduğu elde edilen sonuçlardan anlaşılmıştır. Ayrıca atık bir malzeme olan çelikhane cürufu Çizelge 3'ten de görüldüğü üzere % 33.6 oranında demir içerdiğinden dolayı, üretilen harçların elektriksel iletkenliklerine büyük katkı sağlamaktadır.

## 4. Sonuçlar

Çelikhane cürufu ve karbon lifi katkılı harçlar ile yapılan çalışmanın sonucunda aşağıda maddeler halinde verilen sonuçlar elde edilmiştir.

- Rilem kumu yerine çelikhane cürufu kullanım oranlarının artması ile birim ağırlık değerlerinin arttığı sonucuna varılmıştır. Çelikhane cürufunun özgül ağırlığının Rilem kumunun özgül ağırlığından daha fazla olmasından dolayı bu artışlar gerçekleşmiştir.
  - Çelikhane cürufu kullanım oranlarının artışı ile basınç ve eğilme dayanımlarında artışların olduğu görülmüştür. Çelikhane cürufu katkılı serilere ilave olarak karbon lifi eklenmesi durumunda ise basınç dayanımlarında genel olarak azalışların olduğu sonucuna varılmıştır. Eğilme dayanımları ise karbon lifi miktarının artışına bağlı olarak bazı serilerde azalmış bazı serilerde ise artmıştır.
  - Çelikhane cürufu ve karbon lifi katkılı harçların basınç dayanımı değerleri 42 ile 46 MPa aralığında değiştiği görülmüştür. Atık bir malzeme olan çelikhane cürufunun harç üretiminde kum yerine kullanılması durumunda mekanik özellikler açısından herhangi bir sakıncanın olmadığı hatta mekanik özelliklerde iyileşmelerin olduğu sonucuna varılmıştır.
  - Elektriksel özdirenç değerlerinin, çelikhane cürufu ve karbon liflerinin kullanım oranlarının artması ile düştüğü sonucuna varılmıştır. Elektriksel özdirençin tersi olarak elektriksel iletkenlik değerleri de çelikhane cürufu ve karbon liflerinin kullanımı ile artmıştır.
  - Elektriksel özdirenç değerlerini düşürmek ve iletkenliği arttırmak için tek malzeme kullanmak yerine iletkenliği yüksek olan birçok malzeme ile karışımların yapılması gerekmektedir.
- Sonuç olarak kar yağışı, buzlanma, katodik koruma vb. birçok yerde kullanılan iletken beton ve harçların çelikhane cürufu ve karbon lifi karışımları ile üretilebileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca iletkenlik özelliklerinin yanında üretilen harçların mekanik özelliklerinde de gelişmelerin olduğu sonucuna varılmıştır. Atık bir malzeme olan çelikhane cürufunun kullanılması ile de ekonomiye katkılar sağlanacaktır.

## Teşekkür

Bu çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonunca desteklenmiştir. Proje No: 16.KARİYER.165. Ayrıca karbon lifini sağlayan AKSACA firmasına ve çelikhane cürufunu sağlayan İzmir demir çelik fabrikasına yazar teşekkürlerini sunar.

## Kaynaklar

- Bertolini, L., Bolzoni, F., Pastore, T. and Pedefferri, P., 2004. Effectiveness of a conductive cementitious mortar anode for cathodic protection of steel in concrete. *Cement and Concrete Research*, **34**, 681-694.
- Boğa, A.R. and Gürer, C., 2017. Investigation of using carbon fiber in production of conductive mortar. Academic Conference on Engineering, IT and Artificial Intelligence (AC-EITAI 2017), Prague.
- Boğa, A.R., Gürer, C. and Topçu, İ.B., 2017. Production, usages areas and properties of conductive concrete. ICOCEE-CAPPADOCIA2017, Nevşehir.
- Chung, D.D.L., 2004. Electrically conductive cement-based materials. *Advanced in Cement Research*, **26(4)**, 167-176.
- Devia, V.S. and Gnanavelb, B.K., 2014. Properties of concrete manufactured using steel slag. *Procedia Engineering*, **97**, 95 – 104.
- García A., Schlangen E., Ven M. and Liu Q., 2009. Electrical conductivity of asphalt mortar containing conductive fibers and fillers. *Construction and Building Materials*, **23**, 3175–3181.
- Gopalakrishnan, K., Ceylan, H., Kim, S., Yang, S. and Abdulla, H., 2015. Electrically Conductive Mortar Characterization for Self Heating Airfield Concrete Pavement Mix Design. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **8(5)**, 315-324.
- Huang, B.S., Chen, X.W. and Shu, X., 2009. Effects of electrically conductive additives laboratory-measured properties of asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **21(10)**, 612–617.
- Kızıllığın, B., 2009. Çelik ve karbon lifli harçların sülfat etkilerine dayanıklılığının incelenmesi, Yüksek lisans, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, 196.
- Maslehuddin, M., Sharif, A.M., Shameem, M., Ibrahim, M. and Barry, M.S., 2003. Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, **17**, 105–112.
- Muhmood, L., Vitta, S., Venkateswaran, D., 2009. Cementitious and pozzolanic behavior of electric arc furnace steel slags. *Cement and Concrete Research*, **39**, 102–109.
- Pan, P., Wu, S., Xiao, F., Pang, L. and Xiao, Y., 2015. Conductive asphalt concrete: A review on structure design, performance, and practical applications. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **26(7)**, 755-769.
- Panda, C.R., Mishra, K.K., Panda, K.C., Nayak, B.D. and Nayak B.B., 2013. Environmental and technical assessment of ferrochrome slag as concrete aggregate material. *Construction and Building Materials*, **49**, 262- 271.
- Sezer, G.İ. and Gülderen, M., 2015. Usage of steel slag in concrete as fine and/or coarse aggregate. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, **22**, 339-344.
- TS EN 196-1, 2016. Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1, 2012. Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tran, M.V., Nguyen, C.V., Nawa, T. and Stitmannathum, B., 2014. Properties of high strength concrete using steel slag coarse aggregate. *ASEAN Engineering Journal Part C*, **4(2)**, 22-32.
- Tuan, C.Y., 2004. Conductive Concrete for Bridge Deck Deicing and Anti-icing, Project No. SPR-PL-1(037) P512, Nebraska Department of Roads, July.
- Tumudajski, P.J., 1997. Electrical conductivity of Portland cement mortars. *Cement and Concrete Research*, **26(4)**, 529-534.
- Xin X. and Mengqiu, Z., 2015. Literature Review of the Application of Conductive Carbon Fiber-graphite Concrete in floor heating. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, **5(7)**, 161-163.
- Yu, X., Tao, Z., Song, T.Y. and Pan, Z., 2016. Performance of concrete made with steel slag and waste glass. *Construction and Building Materials*, **114**, 737-746.