



KARMA ÇELİK LİFLİ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN ELEKTRİKSEL DİRENCİ

Kazım TÜRK*, Nazlı ÇİÇEK, Metin KATLAV, Peki TURGUT

İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Makro ve Mikro Çelik Lif,
Karma Lifli KYB,
Elektriksel Özdirenç,
İletkenlik,
Sıcaklık Artışı.*

Öz

Beton yüksek basınç dayanımı yanı sıra çok düşük elektriksel iletkenliği sahiptir. Bu çalışmada kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) elektriksel özdirenci, iletkenliği ve sıcaklık artışı üzerinde uzun ve kısa çelik liflerin etkisini, lif kombinasyonu (tek ve karma) ve kısa çelik liflerin boyuna (6 ve 13 mm) bağlı olarak belirlemek için dört adet karışım tasarlanmıştır. Bu karışımlar, lifsiz referans, sadece uzun tek lif takviyeli ve uzun lif ile iki farklı boya sahip kısa çelik lif içeren iki adet karma çelik lif takviyeli karışım olmak üzere dört farklı karışım tasarlanmıştır. Tüm çelik lif takviyeli KYB karışımları hacimce toplam %1 lif içermektedir. Karışımların belirlenmesinde EFNARC tarafından önerilen işlenebilirlik testleri (Çökme-yayıma, t_{500} ve J-halkası yükseklik farkı) dikkate alınmıştır. Karışımlara ait mekanik özellikler (basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımı) ile elektriksel özdirencin belirlenmesi için numuneler üretilmiş ve toplam 90 gün boyunca 23 ± 2 °C'de su içerisinde kür edilmiştir. Sonuçta çelik lif takviyesinin betonun elektriksel özdirencini düşürdüğü ve dolayısıyla iletkenliğini artırdığı tespit edilmiştir. Bunun yanında karma lifli KYB numunelerinin en düşük elektriksel özdirenç ve en yüksek iletkenlik ile sıcaklık artışına sahip olduğu görülürken, narınlığı yüksek olan 13 mm boyunda mikro çelik lifin betonun elektriksel özellikleri üzerinde 6 mm boyunda mikro çelik life göre daha olumlu etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

ELECTRICAL RESISTANCE OF HYBRID STEEL FIBER REINFORCED SELF-COMPACTING CONCRETE

Keywords

*Macro and Micro Steel Fiber,
Hybrid Fiber Reinforced SCC,
Electrical Resistivity,
Conductivity,
Temperature Rise.*

Abstract

Concrete has high compressive strength as well as very low conductivity. In this study, the effect of long and short steel fibers on electrical resistivity, conductivity and temperature rise of self-compacting concrete (SCC) was investigated depending on fiber combinations (single and binary hybrid) and length of the short steel fibers (6 and 13 mm). For this purpose, four mixtures were designed: non-fiber reference, a single fiber-reinforced mixture with only long fibers and two hybrid steel fiber-reinforced mixtures with long and 6mm or 13 mm short steel fiber. Also, all steel fiber-reinforced mixtures contain a total of 1% steel fiber by volume. The workability tests of slump-flow, t_{500} and J-ring height difference were performed by the EFNARC. The samples were cured for 90 days and then, mechanical properties and electrical resistivity of samples were determined. Finally, the inclusion of steel fiber into SCC dropped the electrical resistivity and thus, increased its conductivity. In addition, hybrid fiber-reinforced SCC samples had the lowest electrical resistivity and highest conductivity and temperature rise. Also, 13 mm long micro steel fiber having high slenderness had a more positive effect on the electrical properties of concrete than 6 mm micro steel fiber.

Alıntı / Cite

Türk, K., Çiçek, N., Katlav, M., Turgut, P., (2022). Karma Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonun Elektriksel Direnci, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 482-494.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

K. Türk, 0000-0002-6314-9465
N. Çiçek, 0000-0002-1605-5212
M. Katlav, 0000-0001-9093-7195
P.Turgut, 0000-0002-3711-4605

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	01.07.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	31.10.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	10.01.2022
Yayın Tarihi / Published Date	30.06.2022

* İlgili yazar / Corresponding author: kazim.turk@inonu.edu.tr, +90-422-377-3000

1. Giriş (Introduction)

Dünyada ilk defa 1980'lerde Japonya'da geliştirilen kendiliğinden yerleşen beton (KYB), herhangi bir dahili sıkıştırma işlemi gerektirmeden kendi ağırlığı altında akabilen, dar kesitler ve engeller arasından geçebilme yeteneğine sahip olan ve bu esnada ayrışmaya uğramadan kalıp içerisindeki tüm boşlukları doldurulabilen yüksek performanslı inovatif bir beton türüdür (Okamura ve Quchi, 1999). KYB'nin yeterli kohezyon ve segregasyon direncine sahip olması için hamur hacminin geleneksel betona göre daha fazla olması gerekir. Bu sebeple, karışımda daha fazla toz malzeme miktarına (<125µm) ve dolayısıyla yüksek oranda su azaltıcı özelliğe sahip hiper akışkanlaştırıcıya gereksinim duyulmaktadır. Bu amaçla, betonun kendiliğinden yerleşebilirliği için büyük öneme sahip olan toz malzeme, çimento ile yer değiştirilerek karışıma dahil edilen ve genellikle puzolanik özelliğe sahip atık yapay mineral katkıları (uçucu kül, yüksek fırın cürufu vs.) kullanılmaktadır.

Gevrek bir malzeme olan betonun özellikle çekme dayanımının geliştirilmesi amacıyla, ilk çalışmalar 20 yy. ortalarında çelik lif takviyeli betonun mekanik davranışı üzerine yapılmıştır (Bentur ve Mindess 1992). Betona lif takviye edilmesi, çatlak başlangıcını, oluşumunu ve yayılmasını geciktirerek betonun çekme dayanımı ve enerji yutma kapasitesini artırarak betonu daha sünek bir hale getirir (Bunsell, 1988; Sulthan vd. 2019). Beton veya çimento esaslı kompozitlerle yapılan çalışmalarda kullanılan lifler, tek tip veya birden fazla lif türünün birlikte kullanılmasıyla karma olarak tasarlanabilir. Betona tek tip lif takviye edildiğinde, betondaki göçme aşamalı ve çok ölçekli bir süreç olduğundan, tek lif sadece belirli bir bölgede etkili olabilecek ve böylece en uygun performansa ulaşamayacaktır. Bu sebeple, betonun özelliklerinden en iyi şekilde faydalanmak ve betonarme elemanların mekanik performanslarını geliştirmek için farklı boy, narinlik ve elastisite modülüne sahip lifler karma olarak bir arada kullanılmaya başlanmıştır. Karma çelik lif takviyesiyle ilgili ilk çalışmalar Rossi vd. (1987) tarafından başlatılmış ve ortaya çıkan malzeme çok-ölçekli lif-takviyeli beton diye adlandırılmıştır. Bu hipoteze göre, çelik lifler hem malzeme hem de yapısal seviyede rol oynar. Öncelikle, mikro çelik lifler mikro seviyedeki çatlakların başlamasını, oluşumunu ve yayılmasını kontrol ederek betonda yüksek çekme dayanımına neden olurken, büyük makro lifler makro çatlakları kontrol ederek yapı elemanlarının hem sünekliğini hem de enerji yutma kapasitesini geliştirirler. Böyle bir karma lif takviyeli kompozitte, farklı liflerin varlığı en uygun performansa ulaşmakta ilgi uyandıran mühendislik özellikler de sunar (Mobasher B. vd,1996; Akçay B., 2012; Kwon vd., 2014; Teng vd., 2018). Ayrıca literatürde bazı araştırmacılar (Hannant, 1987; Bentur ve Mindess, 1990; Balaguru vd., 1992) tarafından da belirtildiği gibi, betonun istenen düzeyde mekanik özellikleri ile çatlak başlangıcını, oluşumunu ve yayılmasını kontrol eden ve engelleyen rastgele dağılmış ve süreksiz makro ve mikro liflerin birlikte karma olarak kullanılmasıyla geliştirilebileceğini belirtmişlerdir.

Günümüzde en sık kullanılan yapı malzemelerinden beton, yüksek fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptir. Betonun elektriksel özdirenci, elektriği geçirme yeteneği olan iletkenlik teorisine bağlıdır. Elektriksel iletkenlik, malzeme içerisindeki elektron veya elektron boşlukları tarafından gerçekleştirilir. Elektrik iletkenliği çimento esaslı kompozitlerde, iyonların boşluk solüsyonlarında hareket etmeleriyle meydana gelir. Bu hareket boşluk solüsyonlarındaki iyon transferi sebebiyle meydana gelmekte ve frekansın artışıyla birlikte iyon transferi hızlanmaktadır. Kısacası, betonda elektrik akımı, gözeneklerdeki sıvıda çözülmüş iyonlar tarafından taşınır. Bunun bir sonucu olarak iletkenlik; porozite ve boşluk solüsyonu iletkenliğine bağlıdır. Betonun elektriksel özdirenci; gözenek büyüklüğü dağılımı, doyumluk derecesi, gözenek sıvısı iletkenliği ve sıcaklıktan etkilenir (Cleven vd., 2021; Sabbağ ve Uyanık, 2020; Uygunoğlu vd., 2018; Chen vd., 2014). Doyumluk oranı yüksek ve geniş çaplı gözeneklere sahip betonlar (su/çimento oranı yüksek) düşük bir elektriksel özdirence sahiptir (Pandey, 2011). Diğer bir ifadeyle, betonun sabit bir nem durumu için, su/çimento oranının azaltılması ile elektriksel özdirenci değeri daha yüksek değerler alır (Polder, 2001). Bir malzemenin iletkenliğinin yüksek olması için elektriksel özdirencinin düşük olması gerekmektedir (Huang 2009; Pan 2015). Çimento esaslı kompozitlerden olan beton yalıtıcıdır ve elektriksel iletkenliği çok düşük seviyelerdedir. Yalıtıcı olan betonu iletken hale getirmek için beton içerisine toz malzemeler, lifler ve agregalar katılmaktadır. Grafit, karbon ve alüminyum tozu, karbon ve çelik lif, çelik talaşı ve demir içeriği yüksek agregalar, çelikhane cürufu gibi malzemelerin kullanılması ile betonun iletkenlik özellikleri arttırılmaktadır (Gopalakrishnan vd., 2015; García vd., 2009). Bu malzemeler belli oranlarda beton karışımına ilave edilip istenilen iletkenliğin sağlanması, aynı zamanda betonun mevcut mekanik özelliklerini de kaybetmemesi ve ekonomik olması istenmektedir (Pan, 2015). Yürüyüş yolları, karayolları, havaalanı pistleri gibi alanlarda soğuk kış mevsimlerinde oluşan kar birikimleri ve buzlanma insan yaşamını olumsuz etkilemektedir. İletken beton teknolojisi bu sorunlara çözümler sunmak için geliştirilmiştir. Normalde yalıtıcı 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 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 vd., 2004). Bununla beraber, Tian ve Hu (2012) betonda elektriksel iletkenlik için herhangi özel bir yönetmelik ya da standart olmamasına karşın, iletken betonun inşaat sektörü ve diğer alanlarda uygulanabilirlik açısından önem arz ettiğini

belirtmişlerdir. Bu çalışmada da lifsiz referans ile farklı boyut ve narinlikteki çelik liflerin tek ve karma kombinasyonlarıyla elde edilen KYB karışımlarının elektriksel öz direnci, iletkenliği ve sıcaklık artışının araştırılması hedeflenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1.1. Çimento ve Uçucu kül (Cement and Fly ash)

Bu çalışmada tasarlanan ve üretilen kendiliğinden yerleşen beton karışımlarında Çimsa Çimento Fabrikası tarafından üretilen CEM I 42.5 R tipi Portland Çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Bu çimentoya ait kimyasal bileşimler Tablo 1’de verilmiştir. Çimentonun özgül ağırlığı 3.15 ve özgül yüzey alanı ise 4891 cm²/g’dır. Çalışmada, mineral katkı olarak, ağırlıkça çimentonun yerine İsen Sugözü Termik Santralinden alınan Uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Uçucu küle ait kimyasal bileşimler Tablo 1’de verilmektedir. Uçucu külün özgül ağırlığı 2.35 olup, inceliği ise 45µm elekte kalan miktarı %21’dir.

Tablo 1. Çimento ve Uçucu Kül Kimyasal Kompozisyonları (The Chemical Composition of Cement and Fly Ash)

(%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Kızdırma Kaybı
PÇ	18.90	5.15	3.36	63.59	1.57	2.65	0.77	0.40	3.59
UK	63.09	21.63	6.77	1.07	-	0.10	-	2.79	2.68

2.1.2. Agrega (Aggregate)

Kendiliğinden yerleşen lif takviyeli beton karışımların üretiminde 0-4, 0-8, 4-16 mm olmak üzere üç farklı tip agrega grubu kullanılmış olup, su emmeleri ve özgül ağırlıkları sırasıyla, %2.20, %2.26, %1 ve 2.41, 2.58 ve 2.67’dir. Ayrıca beton karışımlarda tam doluluk ve uygun işlenebilirlik elde etmek için, %45 oranında 0-4 mm, %30 oranında 0-8 mm ve %25 oranında ise 4-16 mm agrega kullanılmıştır.

2.1.3. Lifler (Fibers)

Bu çalışma kapsamında, bir tip makro çelik lif, iki farklı tip mikro çelik lif olmak üzere toplamda üç farklı tip lif tercih edilmiştir. Makro ve mikro çelik lifler Bekaert İzmit Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş.’den temin edilmiştir. Makro çelik liflerin her iki ucuda kancalıdır ve firma tarafından 3D 65/60 olarak adlandırılmıştır. Mikro lifler ise 13 mm ve 6 mm boylarında düz olup, firma tarafından sırasıyla OL 13/.16 ve OL 6/.16 olarak adlandırılmıştır. Makro ve mikro çelik liflerin özellikleri ise Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada Kullanılacak Liflerin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri (Mechanical and Physical Properties of the Fibers Used in the Study)

Lif Tipi	Boy (mm)	Narinlik	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Yoğunluk (kg/m ³)
3D 65/60	60	65	1345	200	7850
OL 13/.16	13	87	3000	200	7200
OL 6/.16	6	40	3000	200	7200

2.1.4. Kimyasal Katkı (The Chemical Admixture)

Tüm karışımlarda kendiliğinden yerleşebilirlik ölçütlerini sağlamak, kullanılan liflerin işlenebilirlik özelliği üzerindeki olumsuz etkisini azaltmak ve su/bağlayıcı oranını düşürmek amacıyla, SİKA Yapı Kimyasalları A.Ş.’den temin edilen ve özgül ağırlığı 1.06 olan yüksek oranda su azaltıcı polikarboksilik polimer esaslı ViscoCrete Hi-Tech 51 hiperakışkanlaştırıcı (HA) kimyasal katkı kullanılmıştır.

2.2 Karışım Oranları (Mix Proportions)

Tasarlanan tüm KYB karışımları için, liflerin işlenebilirlik üzerindeki olumsuz etkisini ortadan kaldırmak ve liflerin matris tarafından sürüklenebilmesini mümkün kılacak viskoziteyi elde etmek için toplam bağlayıcı miktarı 900 kg/m³ ve su/bağlayıcı (S/B) oranı 0.26 olarak sabit tutulmuştur. Agregalar doymuş yüzey kuru (DYK) alınarak nem düzeltmesi yapıldığı beton karışım oranları Tablo 3’de verilmiştir. Bu karışımlara ait isimlendirmede kullanılan ifadeler-şu şekildedir; REFERANS: Kendiliğinden yerleşen lif içermeyen beton, MAK: Makro çelik lif (3D 65/60), MİK13: 13 mm uzunluğundaki mikro çelik lif (OL 13/.16) ve MİK6: 6 mm uzunluğundaki mikro çelik lif (OL 6/.16). MAK ve MİK’in sol tarafına yazılan rakamlar ise karışıma ilave edilen liflerin hacimce yüzde miktarlarını ifade etmektedir. Örneğin; 0.8MAK_0.2MİK13 şeklinde isimlendirilen karışım, %0.80 oranında makro çelik lif, %0.20 oranında 13 mm uzunluğundaki mikro çelik lifi içeren lifli KYB’yi ifade etmektedir.

Tablo 3. Karışım Oranları (Mix Proportions) (kg/m³)

KARIŞIM ADI	PÇ	UK	SU	S/B	HA	AGREGA (DYK)			ÇELİK LİF		
						(0-4) mm	(0-8) mm	(4-16) mm	3D 65/60	OL 13/.16	OL 6/.16
REFERANS	540	360	230	0.26	10.25	472	314	262	-	-	-
1MAK	540	360	230	0.26	10.25	460	307	256	78.5	-	-
0.8MAK_0.2MİK13	540	360	230	0.26	10.50	460	307	257	62.8	14.5	-
0.8MAK_0.2MİK6	540	360	230	0.26	9.75	461	307	256	62.8	-	14.5

2.3 Yöntem (Method)

2.3.1 Karışımların Hazırlanması (Preparation of Mixtures)

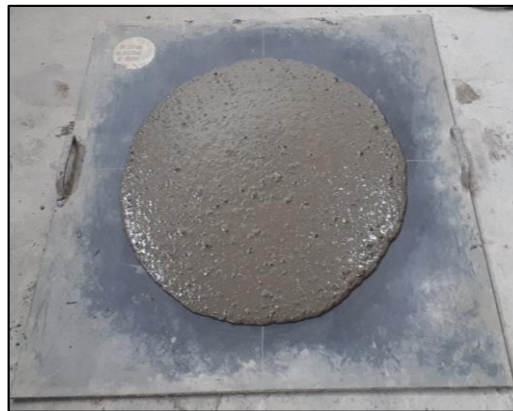
Karışımların tasarlanması, EFNARC (2005) komitesi tarafından KYB için önerilen işlenebilirlik testleri çökme-yayılma ve t_{500} esas alınarak yapılmıştır. Tüm karışımlara ait çökme-yayılma değerleri, EFNARC (2005) komitesinin önerdiği yayılma sınıfı SF2 (660mm-750mm) hedef alınarak karışımlarda değişken olarak sadece hiperakışkanlaştırıcı alınmıştır. Karışımların hazırlanmasında izlenen yol aşağıdaki gibidir:

- Agregalar ve makro çelik lifler karışım suyunun 2/3 ile beraber miksera eklenerek 3 dakika boyunca karıştırılmıştır.
- Daha sonra çimento, uçucu kül, hiperakışkanlaştırıcı ve karışım suyunun kalan 1/3'ü miksera eklenerek 10 dakika karıştırılmıştır. Mikro lifler ise, topaklanmayı önlemek amacıyla 7. dakikada azar azar ilave edilmiştir. Tüm karışımlarda homojenliği sağlamak için toplamda 13 dakika karıştırma süresi uygulanmıştır.

2.3.2 Taze Beton Deneyleri (Fresh Concrete Tests)

İşlenebilirlik deneyleri EFNARC (2002) Komitesi'nin önerilerine göre her bir karışım için çökme-yayılma, t_{500} ve J-halkası deneyleri yapılmıştır.

KYB'nin doldurma yeteneği ve stabilitesinin ölçüldüğü çökme-yayılma testinde, deney işlemi başlamadan test aparatları nemli bir bezle silindi. KYB karışımının homojen bir şekilde çökme konisine doldurulduktan sonra, koni 30 saniye içerisinde dikey olarak kaldırılmıştır. Çökme konisinin kaldırıldığı an ile betonun tabla üzerindeki 500 mm yayılma çapına ulaştığı an arasında geçen t_{500} süresi olarak kaydedilmiştir. Daha sonra tabla üzerindeki yayılma tamamlandığında birbirine dik doğrultudaki çaplar ölçülüp aritmetik ortalaması alınmıştır. Böylelikle karışımın çökme-yayılma değeri belirlendi (Şekil 1). Lifli KYB'nin engeller arasından geçiş kabiliyetini belirlemek için yapılan J-halkası deneyinde, çökme-yayılma deneyinde yapılan adımlar takip edilmiştir. Daha sonra betonun yayılması tamamlandığında halkanın merkezindeki ile halkanın hemen dışındaki 4 nokta arasındaki yükseklik farklarının ortalaması alınarak J-halkası geçiş yeterliliği (ΔH) ölçülmüştür (Şekil 2).



Şekil 1. Çökme-Yayılma Deneyi (Slump-Flow Test)



Şekil 2. J-Halkası Deneyi (J-Ring Test)

2.3.3 Sertleşmiş Beton Özellikleri (Hardened Concrete Properties)

Bu çalışma kapsamında tüm KYB karışımların 90 günlük mekanik özelliklerini (Basınç, yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımı) belirlemek için her seriden 3 adet numune hazırlanmıştır. Basınç dayanımı belirlemek için 100mm × 100mm × 100mm boyutundaki küp numuneler üretilmiştir. Basınç dayanımı deneyleri 3000 kN kapasiteli, yük kontrollü pres makinasında ASTM C39 (2018) standardına uygun olarak yapılmış olup, test numunelerinin yükleme hızı 6 kN/s olarak belirlenmiştir. Ayrıca karışımların yarmada çekme dayanımlarını tespit etmek amacıyla $\phi 100 \times 200$ mm silindir numuneler üretilmiştir. Numunelerin yarmada çekme dayanımlarının belirlemek için, basınç dayanımı deneyinde kullanılan 3000 kN kapasiteli pres cihazı kullanılmıştır ve deneyde ASTM C496 / C496M-17 (2017) standardı esas alınarak numune yükleme hızı 1.6 kN/sn olacak biçimde ayarlanmıştır. Bunlara ilaveten, her bir seri için 2 adet 100mm × 75mm × 400mm boyutlarında prizmatik numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelere, ASTM C1609 standardına göre dört noktalı eğilme altında sehim kontrollü olarak test edilmiştir (Şekil 3).

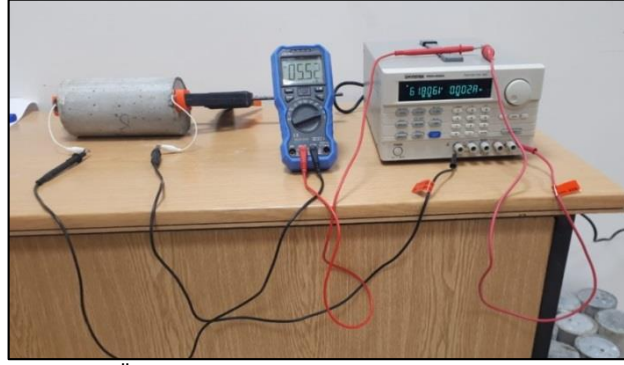


Şekil 3. Dört Noktalı Eğilme Deneyi (The Four-Point Flexural Test)

2.3.4 Elektriksel Özdirenç ve Sıcaklık Artışı Deneyi (Electrical Resistivity and Temperature Rise Test)

2.3.4.1 Elektriksel Özdirenç (Electrical Resistivity)

Tasarlanan lifsiz ve lifli KYB karışımlarından $\phi 100 \times 200$ mm boyutlarında her bir seri için 2 adet silindir numune üretilmiştir. 90 gün boyunca uygun şartlarda su kürü uygulanan numuneler test gününde çıkartılıp için 24 saat etüvde 105 ± 5 °C kurutulmuştur. Etüvden çıkartılan numunelerden üniform akım geçmesini sağlamak amacıyla numunenin her iki ucuna kurşun metal plakalar eklenmiştir. Daha sonra metal plakalar ile beton arasına tuzlu su çözeltisi enjekte edilerek numunelerin iletkenliği artırılmıştır. Daha sonra elektriksel özdirencini ölçmek amacıyla deney esnasında numunelerin her iki ucuna yerleştirilen bakır plakalar mengene ile sıkıştırıldıktan sonra, güç kaynağının artı kutbu bir bakır elektroda eksi kutbu da diğer bakır elektroda bağlanarak devre tamamlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Elektriksel Özdirenç Deney Düzeneği (Electrical Resistivity Test Setup)

Tüm numunelere sabit 60 voltluk gerilim verilerek geçen akım değerleri multimetre ile ölçülmüştür. İletkenlik ve elektriksel özdirenç değerleri aşağıda verilen denklemler yardımıyla hesaplanmıştır.

$$P = R \times \frac{A}{L} \quad (2.1)$$

$$C = \frac{1}{P} \quad (2.2)$$

Burada:

P: Elektriksel özdirenci ($k\Omega \times m$)

L: Bakır elektrotlar arası mesafeyi (m)

R: Hesaplanan direnci (Ω)

A: Numunenin alanını (m^2)

C: İletkenlik ($\frac{1}{k\Omega \times m}$)

2.3.4.2 Sıcaklık Artışı Deneyi (Temperature Rise Test)

Elektriksel özdirenç deneyindeki numuneler ile deney düzeneği kullanılarak numunelere varyak ile sabit 220 volt gerilim verilmiştir. Numuneler 5 cm'lik dört bölge şeklinde işaretlendikten sonra, bu bölgeler üzerinde sıcaklık değişimindeki belirlemek için 30 dakika boyunca 5 dakika aralıklarla dijital lazer sıcaklık ölçer yardımıyla sıcaklık ölçümleri yapılmıştır (Şekil 5). Daha sonra her bölge için sıcaklık değişimini belirlemek amacıyla 30. ve 0. dakikadaki ortalama sıcaklık değerleri farkından faydalanılmıştır. Elde edilen bu sıcaklık farkları kullanılarak her bir numune için sıcaklık artışı grafiği çizilmiştir.



Şekil 5. Isıtma Deney Düzeneği (Heating Test Setup)

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

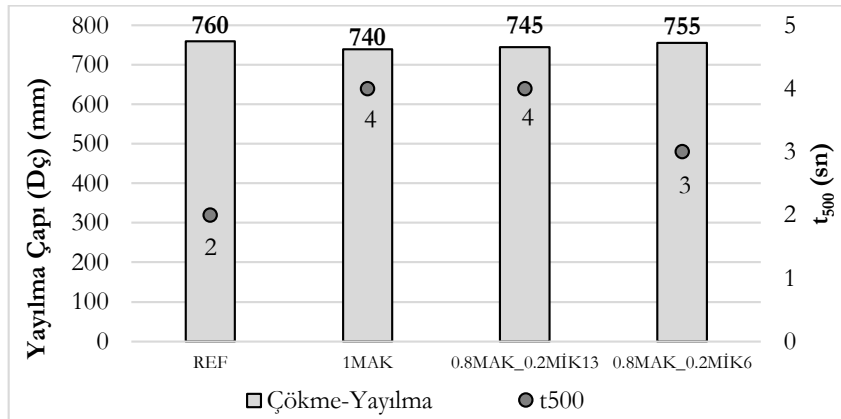
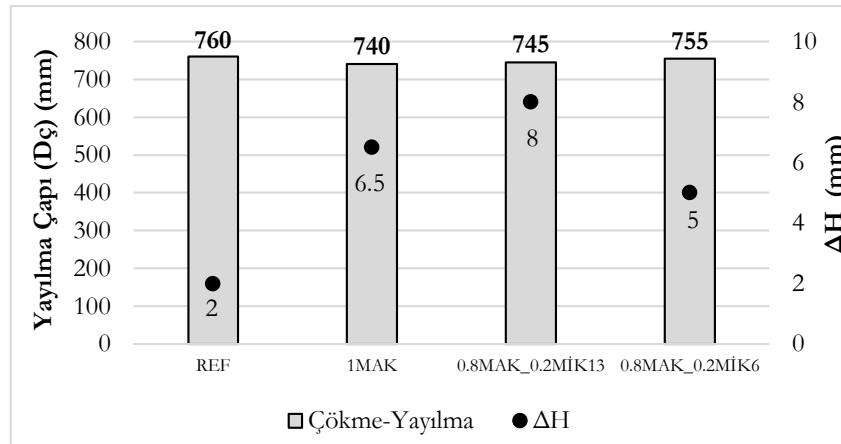
3.1. Taze Beton Özellikleri (Fresh Concrete Properties)

Lifsiz, tek ve karma lif takviyeli KYB karışımlarının taze beton özelliklerine ait bulgular Tablo 4, Şekil 5 ve 6'da verilmiştir.

Tablo 4. Karışımlara Ait İşlenebilirlik Test Sonuçları (Workability Test Results of Mixtures)

Karışım Kodu	Çökme-Yayılma		J-Halkası Yükseklik Farkı (ΔH)
	D _ç	t ₅₀₀	
	(mm)	(sn)	(mm)
REFERANS	760 (SF3)	2	2
1MAK	740 (SF2)	4	6.5
0.8MAK_0.2MİK13	745 (SF2)	4	8
0.8MAK_0.2MİK6	755 (SF2)	3	5
EFNARC (2002) Sınır Değerleri	650-800	2-5	0-10

Şekil 6'dan görülebileceği gibi tüm KYB karışımlarının çökme-yayılma çapı değerleri, 750±10 mm aralığında olup EFNARC (2005)'de tavsiye edilen yayılma sınıfı SF2 (660-750) genelde sağlanmıştır. KYB karışımlarına lif takviye edilmesiyle, yayılma çaplarında azalma, yayılma sürelerinde ise artış görülmüştür. Lif kombinasyonları dikkate alındığında, lifsiz karışıma kıyasla çökme-yayılma değerlerindeki en fazla azalma sadece makro çelik lif içeren karışımda görülmüştür. Ayrıca, mikro çelik lif içeren karma lif takviyeli karışımlara bakıldığında, 13 mm boyundaki mikro çelik lifin, 6 mm boyundaki mikro çelik life kıyasla işlenebilirlik özellikleri üzerinde daha olumsuz bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Literatürde yer alan bazı çalışmalarda (Türk vd., 2021; Türk vd., 2019; Liu vd., 2019; Nehme vd., 2017) da benzer şekilde, karışıma daha yüksek narinliğe sahip mikro çelik lifler ilave edildiğinde, liflerin topaklanmasından dolayı karma lifli KYB karışımların işlenebilirlik özelliklerinde azalma olduğu bulunmuştur.

**Şekil 6.** Karışımlara ait Çökme-Yayılma ve t₅₀₀ Değerleri (The Values of Slump - Flow and t₅₀₀ of Mixtures)**Şekil 7.** Karışımlara ait J-Halkası Yükseklik Farkı ve Çökme-Yayılma (J-Ring Height Difference and Slump-Flow of Mixtures)

Şekil 7'de J-halkası yükseklik farkı (ΔH) deney sonuçları gösterilmiştir. Tüm KYB karışımlarına ait yükseklik farkı değerleri, EFNARC (2002)'de önerilen sınır değerler (0-10mm) arasında kalmıştır. Ayrıca, KYB karışımlarına lif ilave edilmesiyle birlikte J-halkası yükseklik farkı değerleri, referans karışıma kıyasla artmıştır. Karma lifli KYB karışımları J-halkası yükseklik farkı değerleri mikro lifin narinliğine bağlı olarak değişkenlik göstermiş olup

narinliği daha fazla 13 mm boyundaki mikro lifin karışıma katılması karma lifli karışımın engeller arasında geçiş yeteneğini olumsuz etkilemiştir. Literatürde yer alan bazı çalışmalarda (Türk vd., 2021; Türk vd., 2020; Akcay B., 2012) liflerin özellikle mikro liflerin topaklanmaya olan eğiliminin fazla olması karışımların geçiş kabiliyeti ve aynı zamanda akıcılığını azaltacağını belirtmişlerdir.

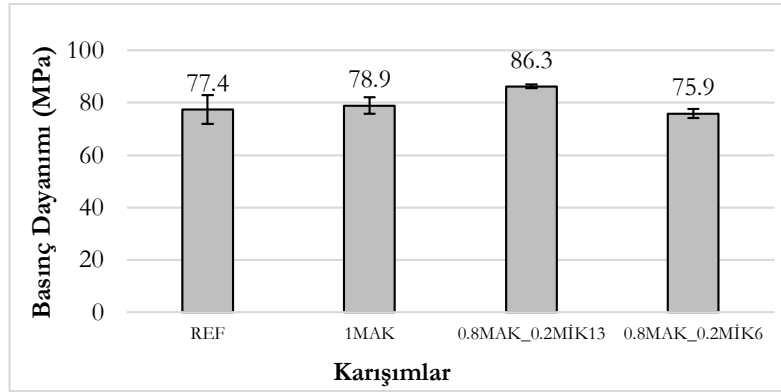
3.2. Sertleşmiş Beton Özellikleri (Hardened Concrete Properties)

Tüm KYB karışımlarına ait sertleşmiş beton test bulguları Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5: Karışımlara ait 90 Günlük Sertleşmiş Beton Bulguları (90-Day Hardened Concrete Results of Mixtures)

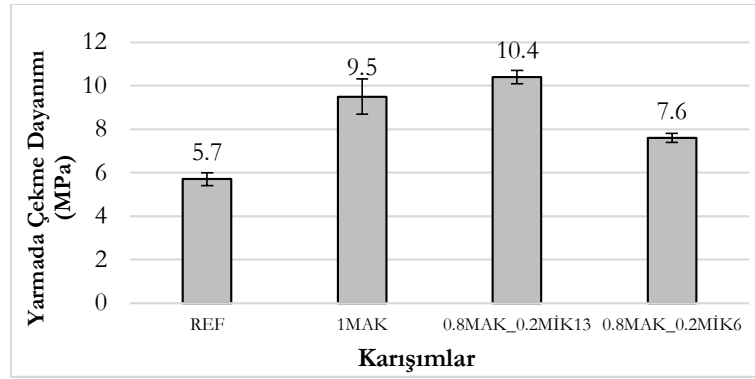
Karışım Kodu	Basınç Dayanımları (MPa)	Yarmada Çekme Dayanımları (MPa)	Eğilme Dayanımları (MPa)	Sehim (mm)
REFERANS	77.4	5.7	12.4	----
1MAK	78.9	9.5	18.4	1.2
0.8MAK_0.2MİK13	86.3	10.4	17.3	0.6
0.8MAK_0.2MİK6	75.9	7.6	14.3	1.1

Hazırlanan KYB karışımlarından üretilen numunelerin 90 günlük basınç dayanımları Şekil 8’de verilmiştir. Tüm lif takviyeli KYB karışımlarından elde edilen bulgular dikkate alındığında, 6 mm boyunda mikro çelik lif içeren karışım hariç, tüm lifli karışımların, lifsiz referans karışımına kıyasla daha yüksek basınç dayanımına sahip oldukları görülmüştür. Ayrıca, lif takviyeli karışımlarda makro lif ile farklı narinliğe sahip mikro liflerin kullanılması basınç dayanımı değerlerini belirgin bir şekilde etkilemiştir. Çünkü narinliği düşük olan 6 mm boyunda mikro çelik lif içeren karışım, tek tip makro çelik lif takviyeli karışıma kıyasla basınç dayanımını düşürdüğü, narinliği yüksek olan 13 mm boyundaki mikro çelik lifin ise artırdığı görülmüştür. Shong ve Hwang (2004) tarafından yapılan çalışmada, karışıma ilave edilen lifin narinlik oranının artmasıyla, basınç dayanımının arttığı tespit edilmiştir.



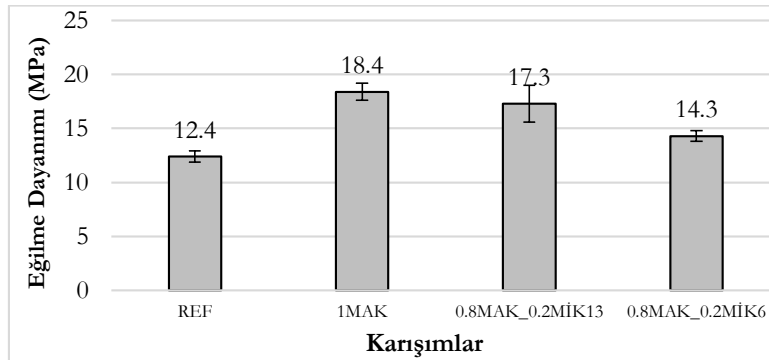
Şekil 8. Karışımlara ait Basınç Dayanımı Değerleri (Compressive Strength Values of Mixtures)

Lifsiz, tekli ve ikili lif içeren KYB karışımlardan üretilen numunelerin 90 günlük yarmada çekme dayanım değerleri Şekil 9’da verilmiştir. Liflerin çatlakları köprülemesi ve geciktirmesi özelliklerinden dolayı, tüm lifli karışımların yarmada çekme dayanım değerlerinin, lifsiz referans karışımından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, sadece makro çelik lif takviyeli karışım ile karma lif takviyeli karışımlar kıyaslandığında, karışıma 13 mm boyunda mikro çelik lif ilave edilmesinin, yarmada çekme dayanımı üzerinde daha olumlu bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Literatürde yer alan yer alan çalışmalarda (Türk vd., 2021; Türk vd., 2020; Aslani vd., 2020; Tabatabaeian vd., 2017) da, benzer şekilde karışıma daha uzun ve düz çelik lif dâhil edilmesinin, betondaki iç mikro çatlakları yeterli düzeyde köprüleyebilmesi sebebiyle yarmada çekme dayanımını olumlu etkilediği sonucuna varılmışlardır.



Şekil 9. Karışımlara ait Yarmada Çekme Dayanımı Değerleri (Splitting Tensile Strength Values of Mixtures)

Tüm KYB numunelerinin 90 günlük eğilmede çekme dayanımını belirlemek amacıyla, yapılan dört noktalı eğilme deney sonuçları Şekil 10'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, karışıma ilave edilen makro çelik lif oranının azalmasıyla eğilmede çekme dayanımının azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi, karışıma makro çelik lif yerine ilave edilen mikro çelik liflerin yalnızca mikro çatlakları köprüleyebilmesidir. Ayrıca, mikro çelik lif içeren ikili lif kombinasyonunun olduğu karışımlar birbirleriyle kıyaslandığında, narinliği daha yüksek olan 13 mm boyunda mikro çelik lifin narinliği düşük olan 6 mm boyunda mikro çelik life göre, karışımların eğilmede çekme dayanımı değerlerine daha olumlu katkı sağladığı tespit edilmiştir. Bu durum, daha uzun olan düz çelik liflerin, iç çatlakları köprülemede daha etkili rol oynamasına ve böylelikle çatlak gelişimini geciktirmesi ve engellemesine dayandırılabilir. Literatürde, kısa ve uzun çelik lif kullanılarak yapılan bazı çalışmalarda da (Sulthan vd., 2019; Kına, 2019; Yu vd., 2014; Rambo vd., 2014) benzer sonuç bulunmuştur.



Şekil 10. Karışımlara ait Eğilmede Çekme Dayanımı Değerleri (Flexural Tensile Strength Values of Mixtures)

3.3 Elektriksel Özdirenç ve Sıcaklık Artışı (Electrical Resistivity and Temperature Rise)

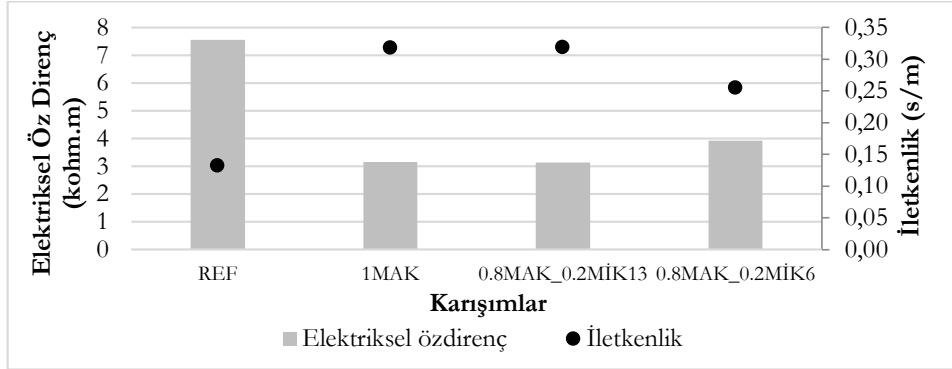
Tüm KYB karışımlarına ait numunelerin 60 volt sabit gerilim altındaki ölçülen akım değerleri esas alınarak hesaplanan elektriksel özdirenç ve iletkenlik ile sabit 220 volt gerilim altındaki numunelerin sıcaklık artışı değerlerine ait bulgular Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. 90 Günlük Tüm KYB Numunelerine ait Elektriksel Özdirenç, İletkenlik ve Sıcaklık Artışı Değerleri (Electrical Resistivity, Conductivity and Temperature Rise Values of all 90-Day SCC Samples)

Karışım Kodu	I (amper)	R (ohm)	P (kohm.m)	C (s/m)	Sıcaklık Artışı Δt (°C)
REFERANS	0.003115	19261.6	7.564	0.132	1.33
1MAK	0.00748	8021.4	3.150	0.317	4.30
0.8MAK_0.2MİK13	0.007505	7994.7	3.139	0.319	5.12
0.8MAK_0.2MİK6	0.005995	10008.3	3.930	0.254	1.89

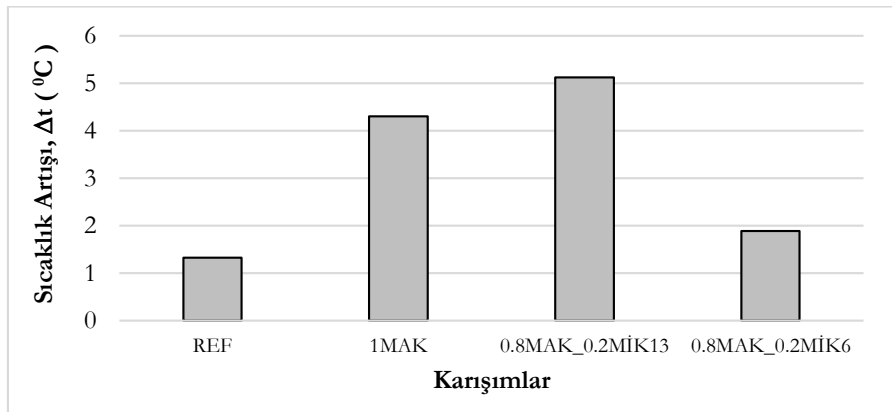
Tüm KYB numunelerine ait elektriksel özdirenç ve iletkenlik sonuçları Şekil 11'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, betona lif takviyesiyle beraber numunelerin iletkenlik değerleri, liffsiz referans numunesine kıyasla %92 ile %140 arasında değişen oranlarda artışı görülmüş ve bunun bir sonucu olarak numunelerin elektriksel özdirenç değerlerinde ise %48 ile %59 arasında değişen oranlarda azalma olduğu tespit edilmiştir. Lifli KYB numuneler göz önünde bulundurulduğunda, 13 mm boyunda mikro çelik lif içeren karma lif takviyeli numuneler

ile sadece makro çelik lif içeren tek lif takviyeli numunelerin sırasıyla, 0.319 ve 0.317 s/m ile en yüksek iletkenlik ve dolayısıyla 3.139 ve 3.150 kohm.m en az elektriksel özdirenç değerlerine sahip olduğu görülürken, 6 mm boyundaki mikro çelik lif içeren karma lif takviyeli numunenin 0.254 s/m en düşük iletkenliğe ve 3.930 kohm.m ile en yüksek elektriksel özdirence sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, toplamda hacimce %1 oranında çelik lif içeren KYB karışıma narinliği daha yüksek olan 13 mm boyunda mikro çelik lif ilave edilmesinin, narinliği daha düşük olan 6 mm boyunda mikro çelik life kıyasla, betonun iletkenliği üzerinde oldukça önemli bir katkıya sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni, karma lifli KYB numunelerin içerdiği daha uzun olan düz mikro çelik liflerin, Denklem 2.1'den de anlaşılacağı üzere, elektriksel özdirençlerinin daha düşük ve dolayısıyla iletkenlik ve ısınma gibi fiziksel özelliklerinin kısa düz mikro çelik liflere kıyasla, daha yüksek olmalarının yanında, makro çelik lifler ile etkileşiminin daha mümkün olduğu düşünülmektedir. Literatürde de bazı çalışmalarda (Cleven vd., 2021; Boğa, 2017) matrise takviye edilen liflerin elektriksel özdirençini düşürdüğü ve dolayısıyla iletkenliği arttırdığı tespit edilmiştir.



Şekil 11. Numunelere ait İletkenlik Değerleri (Conductivity Values of Samples)

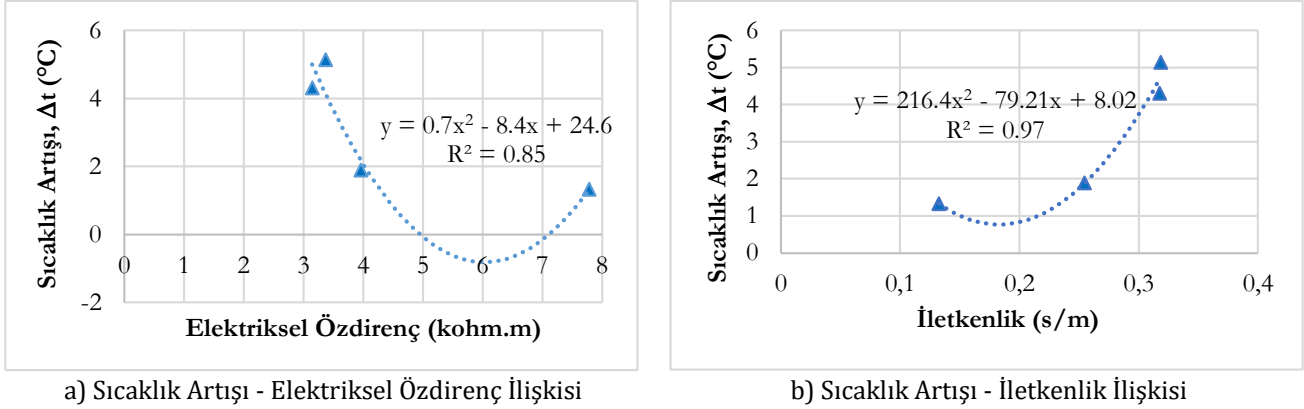
Tüm KYB numunelerinin sıcaklık artışını belirlemek amacıyla yapılan ısıtma deneyinden elde edilen sonuçlar Şekil 12'de gösterilmiştir. Referans numunesine kıyasla, tüm lif takviyeli numunelerin %42 ile %288 arasında değişen oranlarda sıcaklık artışı sağladığı tespit edilmiştir. Tüm numunelere ait sonuçlar incelendiğinde, en yüksek sıcaklık artışının, narinliği en yüksek olan 13 mm boyundaki mikro çelik lifin yer aldığı karma lif takviyeli numunelerde olduğu belirlenirken, narinliği en düşük olan 6 mm boyunda mikro çelik lif içeren KYB numunelerinde en düşük sıcaklık artışı tespit edilmiştir. Bunun yanında, narinliği 65 olan sadece makro çelik lif içeren KYB numunelerinin sıcaklık artışı, narinliği 40 olan 6 mm boyunda mikro çelik lif içeren KYB numunelerinkinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Çünkü 6 mm boyunda mikro çelik lif içeren karışımlara ait numunelerin basınç dayanımının diğer karışımlara kıyasla daha düşük olmasının, matris içerisine sürüklenen hava içeriğinin daha fazla olmasından kaynaklanabileceği ve dolayısıyla bu karışımlara ait numunelerin sıcaklık artışının da olumsuz etkilendiği düşünülmektedir. Sonuç olarak, lif takviyeli KYB karışımların sıcaklık artışında çelik lif narinliğinin çok önemli bir faktör olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca daha uzun ve düz olan mikro çelik liflerin diğer lifler ile olan etkileşiminin daha iyi olması da sıcaklık artışında diğer bir önemli etken olduğu düşünülmektedir. Yehia ve Tuan, (2014) tarafından yapılan çalışmada, çelik lif takviyeli betonun mekanik ve elektriksel özdirenç özellikleri incelenmiştir. 305mm × 305mm × 50 mm boyutlarındaki döşeme numuneleri üzerinde 30 dakika boyunca 48 volt DC voltaj uygulanmış ve döşemelerin sıcaklığının -1.1 °C' den 15.6 °C' ye yükseldiği tespit edilmiştir.



Şekil 12. Numunelere ait Sıcaklık Artışı Değerleri (Temperature Increase Values of the Samples)

3.3.1 Numunelerin Elektriksel Özdirençlerinin İletkenlik ve Sıcaklık Artışı Arasındaki İlişki Analizi (Relationship Analysis of Electrical Resistivity of Samples Between Conductivity and Temperature Increase)

Tüm KYB numunelerine ait sıcaklık artışı - elektriksel özdirenç ve sıcaklık artışı - iletkenlik arasındaki ilişki analizi Şekil 13'te gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, KYB numunelerinin sıcaklık artışı - elektriksel özdirenç ve sıcaklık artışı - iletkenlik ilişkisi arasındaki korelasyon katsayıları sırasıyla, $R^2=0.85$ ve $R^2=0.97$ olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, elde edilen R^2 korelasyon değerleri, KYB numunelerinin sıcaklık artışı ile hem elektriksel özdirenç hem de iletkenlik arasında iyi bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Ayrıca çelik lif takviyeli numunelere ait sıcaklık artışı değerinin, iletkenlik değerleri kullanılarak oldukça yüksek bir doğrulukla tahmin edilebileceği görülmektedir.



Şekil 13. Tüm KYB numunelerinin; a) Sıcaklık Artışı - Elektriksel Özdirenç İlişkisi b) Sıcaklık Artışı - İletkenlik İlişkisi (All KYB samples; a) Temperature Increase - Electrical Resistivity Relation b) Temperature Increase - Conductivity Relation)

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Lifsiz referans ile iki ucu kancalı uzun makro ve düz kısa mikro çelik liflerin tekli veya karma lifli olarak tasarlandığı KYB karışımlarına ait taze ve sertleşmiş özelliklerin belirlenmesi ile ilgili deneylerden elde edilen bulgular esas alındığından aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir;

- Lifsiz referans karışımına kıyasla, karışıma lif ilave edilmesi hem tekli hem de karma lif kombinasyonuna sahip karışımların çökme-yayılma çapında azalmaya, J-halkası yükseklik farkı (ΔH) ve yayılma süresi (t_{500}) değerlerinde ise artışa neden olmuştur. Ayrıca karma lif takviyeli tasarlanan karışımlara bakıldığında, narinliği düşük olan 6 mm boyundaki mikro çelik lif içeren karışımların akıcılığı ile engeller arasından geçme kabiliyetinin, narinliği yüksek olan 13 mm boyundaki mikro çelik lif içeren karışımlara kıyasla daha iyi olduğu tespit edilmiştir.
- Karışıma farklı boyut ve narinlikteki çelik liflerin ilave edilmesi genelde basınç, yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımlarında artış sağladığı tespit edilmiştir. Tüm lifli karışımlar içerisinde basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımlarında en fazla artış, narinliği yüksek olan 13 mm boyundaki mikro lif içeren karma lifli KYB numunelerinde görülürken, eğilmede çekme dayanımında ise en fazla artışın sadece makro çelik lif içeren karışımda olduğu tespit edilmiştir.
- Sadece makro çelik lif içeren tek lifli KYB numunelerinin elektriksel özdirenci, narinliği düşük olan 6 mm boyunda mikro çelik lif içeren karma lifli KYB numunelerine kıyasla daha düşük iken iletkenlik ve sıcaklık artışının daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Yüksek narinliğe sahip 13 mm boyunda mikro çelik lif içeren karma lifli KYB numunelerinden en düşük elektriksel özdirenç ve en yüksek iletkenlik ile sıcaklık artışı elde edilebildiği tespit edilmiştir.
- Narinliği en yüksek olan 13 mm boyundaki mikro çelik lif içeren karma lif takviyeli numunelerin en yüksek ve narinliği en düşük olan 6 mm boyunda mikro çelik lif içeren KYB numunelerinin ise en düşük sıcaklık artışına sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, narinliği 65 olan makro çelik lif içeren tek lifli KYB numunelerinin sıcaklık artışı, narinliği 40 olan 6 mm boyunda mikro çelik lif içeren KYB numunelerinkinden daha yüksek olduğu bulunmuştur.
- Sıcaklık artışı ile elektriksel özdirenç ve iletkenlik arasında sırasıyla, $R^2=0,85$ ve $R^2=0,97$ değerleri bulunmuştur. Dolayısıyla, çelik lif takviyeli numunelere ait sıcaklık artışı değerinin, iletkenlik değerleri kullanılarak oldukça yüksek bir doğrulukla tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Tüm bu sonuçlar dikkate alındığında, KYB içerisine takviye edilen farklı boyut ve narinlikteki çelik liflerin betonun elektriksel özdirencinde azalma, iletkenlik ve sıcaklık artışında ise artış sağlamıştır. Çimento esaslı kompozite lif

takviye edilmesiyle birlikte betona kazandırılan bu özellikler sayesinde yürüyüş yolları, karayolları, havaalanı pistleri gibi alanlarda soğuk kış mevsimlerinde oluşan kar birikimleri ve buzlanmanın insan yaşamını olumsuz etkileyen sorunlarına çözüm sunabileceği düşünülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmada, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Birimine verdiği finansal destekten dolayı minnettarız. (Proje numarası: FYL-2020-2148)

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Akçay B., 2012. Experimental investigation on uniaxial tensile strength of hybrid fibre concrete. *Composites: Part B*, 43, 766-78.
- Aslani, F., Hamidi, F., Valizadeh, A., & Dang, A. T. N., 2020. High-performance fibre-reinforced heavyweight self-compacting concrete: Analysis of fresh and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 232, 117230.
- ASTM C1609. 2012. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C39. 2018. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C496/C496M-17. 2017. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Balaguru, P., Narahar, R., Patel, M., 1992. Flexural toughness of steel fibre reinforced concrete. *ACI Mater J*, 89(6), 541-6
- Bentur, A., Mindess, S., 1990. *Fiber Reinforced Cementitious Composites*, Elsevier Applied Science, London.
- Bertolini, L. Bolzoni, F. Pastore, T. and Pedferri, 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, 2017. Harçların mekanik ve elektriksel iletkenlik özelliklerine karbon lifi ve çelikhane cürufu kullanımının etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(3), 1066-1075.
- Bunsell, A.R., 1988. *Fiber Reinforcement for Composite Materials*. Vol:2 Composite Materials Series, Elseiver Science, The Netherlands.
- Chen, C.T., J.-J. Chang, W.C. Yeh, 2014. The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete. *Construction and Building Materials*, 2014. 71: p. 35-4.
- Chung, D.D.L., 2004. Electrically conductive cement-based materials. *Advanced in Cement Research*, 26(4), 167-176.
- Das, B, Pandey S., 2011. Influence of fineness of fly ash on the carbonation and electrical conductivity of concrete. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 23(9), 1365-1368.
- EFNARC., 2005. *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*, Eur. Guidel. Self Compact. Concr.
- F. Sulthan, Saloma, 2019. Influence of hooked-end steel fibers on fresh and hardened properties of steel fiber reinforcement self-compacting concrete (SFRSCC). *J. Phys.: Conf. Ser.* 1198(3) 032005.
- 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.
- Hannant, D. J., 1987. *Fiber cements and fiber concrete*. Chichester, UK, Wiley.
- 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.
- Kına, C., 2019. Yüksek Performanslı Kendiliğinden Yerleşen Karma Lifli Beton Geliştirilmesi, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Liu, X., Wu, T., Yang, X., & Wei, H., 2019. Properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 226, 388-398.
- Mobasher B, Li Cheng Y., 1996. Mechanical properties of hybrid cement based composites. *American Concrete Institute Materials Journal*, 93(3), 284-92, 1996.
- Nanni, A., 1988. Splitting-tension test for fiber reinforced concrete. *ACI Mater J*. 85(4), 229-33.
- Okamura & Quchi, 1999. *Self-Compacting Concrete* (pp 3-14). Development Present Use and Future. Proceedings of the First International RILEM Symposium. Edited by A. Skarendahland.
- 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.
- Polder, R.B., 2001. Test Methods For On Site Measurement Of Resistivity Of Concrete. A RILEM TC - 154 Technical Recommendation, *Construction And Building Materials*, 15, 125-131.
- Rambo, D. A. S., Silva, F. D. A., Filho, R. D. T., 2014. Mechanical behavior of hybrid steel-fiber self-consolidating concrete: materials and structural aspects. *Materials & Design*, 54, 32-42.
- Rossi P., 1997. High performance multimodal fiber reinforced cement composites (HPMFRCC): the LCPC experience. *Materials Journal*, 94:6, 478- 783.

- Rossi P., Acker P. & Malier Y., 1987. Effect of steel fibres at two different stages: the material and the structure. *Mater Struct.*, 20, 436-9.
- S. Cleven , M. Raupach, T. Matschei, 2021. Electrical Resistivity of Steel Fibre-Reinforced Concrete Influencing Parameter. *Materials* 2021, 14, 3408.
- S. Kwon, T. Nishiwaki, T. Kikuta, H. Mihashi, 2014. Development of ultra-high performance hybrid fiber-reinforced cement-based composites. *ACI Mater. J.* 111 (3) 309-318.
- S. Teng, V. Afroughsabet, C.P. Ostertag, 2018. Flexural behavior and durability properties of high performance hybrid-fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 182 504-515.
- S.G. Nehme, R. László, A.E. Mir., 2017. Mechanical performance of steel fiber reinforced self-compacting concrete in panels, *Procedia Eng.* 196 90-96.
- Sabbağ, N. & Uyanık, O., 2020. Özdirenç yöntemi kullanılarak donatılı betonların anizotropisinin belirlenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* , 26 (3) , 572-580.
- Song, P. S., & Hwang, S., 2004. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 18(9), 669-673.
- Tabatabaeian, M., Khaloo A., Joshaghani A., Hajibandeh, E., 2017. Experimental investigation on effects of hybrid fibers on rheological, mechanical, and durability properties of high-strength SCC. *Construction and Building Materials*, 147, 497-509
- Tian, X. & Hu, H., 2012. Test and Study on Electrical Property of Conductive Concrete. *Procedia Earth and Planetary Science*, 5(2011), 83-87.
- 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.
- Tumidajski P.J., 1997. Electrical conductivity of Portland cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 26(4), 529-534.
- Turk K., Bassurucu M. and Bitkin RE., 2021. Workability, strength and flexural toughness properties of hybrid steel fiber reinforced SCC with high-volume fiber. *Construction and Building Materials*, 266, Part A, (10 January 2020), 120944, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120944>.
- Turk K., Kina C. and Oztekin E., 2020. Effect of macro and micro fiber volume on the flexural performance of hybrid fiber reinforced SCC. *Advances in Concrete Construction*, 10(3), pp. 257-269. DOI: 10.12989/acc.2020.10.3.257
- Turk, K., Oztekin, E., & Kina, C., 2019. Self-compacting concrete with blended short and long fibres: experimental investigation on the role of fibre blend proportion. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 0(0), 1-14.
- Uygunoğlu, T., topçu, İ.B., şimşek, B., çinar, E., 2018. Kendiliğinden Yerleşen Harçların Elektriksel Özdirenç Üzerine Mineral Katkılarının Etkisi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Cilt 22, Sayı 2*, 986-992.
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual review of energy and the environment*, 26:1, (2001) 303-329.
- Yehia, S. and C.Y. Tuan, 1999. Conductive concrete overlay for bridge deck deicing. *Materials Journal*, 1999. 96(3): p. 382-390.