



## Farklı Katkı Malzemeler Kullanılarak Üretilen Yüksek Performanslı Betonların Elektrik Direnç Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi

### Experimental Investigation of Electrical Resistance Properties of High Performance Concretes Produced With Different Types of Additives

Çağatay Mehmet Belgin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara, Türkiye

Başyuru/Received: 08/03/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

#### Öz

Standart beton doğası gereği elektrik iletkenliği olmayan, yalıtkan olarak kabul edilebilecek kadar elektrik direnci yüksek olan bir yapı malzemesidir. Ancak betonun elektrik direncinin düşürülmesi ve elektrik iletken hale getirilmesinin farklı uygulama alanlarında çok büyük olanaklar sağlayacağı ve bu özellik değişiminin beton malzemesinin kullanıldığı farklı uygulama alanlarında önemli avantajlar sağlayabilecek bir değişim olduğu son 30 yılda bu konuda yapılan araştırmalar ile ortaya konulmuştur. Literatür incelendiğinde betonun elektrik direncinin azaltılarak elektriği iletmesinin sağlanmasının uygulama alanları arasında don çözülmesine karşı kullanılacak beton yol kaplamaları, elektromanyetik dalga yayılımını engellemek amacıyla üretilen sağır oda uygulamaları, yapısal sağlık takibi uygulamalarında kullanılacak kendi üzerindeki deformasyon değişimini elektriksel direnç değişimine göre tespit edilebilecek kendiliğinden deformasyon değişimi ifade edilebilen özel betonlar olarak sayılabilir. Bu tür uygulamaların hepsinin gerçekleştirilebilmesi için yapılması gereken temel şey betonun elektrik direnç özelliklerini değiştirerek betonun elektrik iletken bir malzeme haline getirilmesidir. Bu çalışma kapsamında betonun elektriksel direnç özelliklerinin değiştirilmesi için kullanılacak bir karışım kompozisyonunun oluşturulması ile ilgili bir çalışma yapılmıştır. Çalışma kapsamında 3 farklı katkı kullanılarak hazırlanan 250×250×30 mm boyutlarında beton plak deney elemanlarının üretilmesinden sonra elektriksel direnç özellikleri ölçülerek hangi türde karışımın ve lif katkısının betonun elektriksel direnç özelliklerini en iyi şekilde düşürdüğü ve betonun elektrik iletkenliğini artırdığı deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında test edilen üç farklı katkı malzemesi içerisinde elektriksel direnç değerini en fazla azaltan malzemenin grafit olduğu, ancak beton basınç dayanımı ile birlikte değerlendirildiğinde aktif karbon malzemesinin uygulamalarda kullanılmasının daha iyi seçenek olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

#### Anahtar Kelimeler

“Yüksek Performanslı Beton, Elektrik İleten Beton, Grafit, Çelik Lif, Aktif Karbon”

#### Abstract

Standard concrete is a building material that is not electrically conductive by its nature and has a high electrical resistance to be accepted as an insulator. However, in the last 30 years, researches carried out in this subject has revealed that, reducing the electrical resistance of concrete and making it electrically conductive will provide great opportunities in different application areas and that this property change is a change that can provide significant advantages in different application areas where concrete is used. In literature, the application areas of reducing the electrical resistance of the concrete and enabling it to conduct electricity include concrete road pavements used against frost and thaw, field room applications produced to prevent electromagnetic wave propagation, and self-deformation change that can be determined according to the electrical resistance change, which can be used in structural health monitoring applications can be counted as special concretes. The basic idea is to change the electrical resistance properties of the concrete and make the concrete a material that can conduct electricity in order to realize all such applications. Within the scope of this research a mixture composition that can be used to change the electrical resistivity properties of concrete was studied. Within the scope of the study, after the production of 250×250×30 mm concrete slab test elements prepared using 3 different fiber types, electrical resistance properties were measured and which type of mixture and fiber additive reduced the electrical resistance properties of the concrete in the best way and increased the electrical conductivity of the concrete was experimentally investigated. Among the three different additives tested within the scope of the study, it was concluded that the material that reduces the electrical resistance value the most is graphite, but when evaluated together with the concrete compressive strength, the use of activated carbon material in applications may be a better option.

#### Key Words

“High Performance Concrete, Electric Conducting Concrete, Graphite, Steel Fiber, Activated Carbon”

## 1. Giriş

Çevremizde gördüğümüz ve her gün kullanılan yapısal sistemler olan binalar, otoyollar, hava ve deniz limanları, altyapı sistemleri, köprüler, su arıtma tesisleri, boru hatları, kanallar, enerji üreten tesisler ve barajlar üzerlerine etki eden statik ve dinamik yüklemeler ve çevresel nedenlerden dolayı sürekli gerilme, şekil değiştirme, yer değiştirme ve hasarlara maruz kalmaktadırlar. Bu yapılarda meydana gelen yer değiştirmelerin miktarlarının veya hasarların mümkün olan en erken zamanda tespit edilmesi güvenlik açısından çok önemlidir. Özellikle kamuya ait yapıların durumunu tespit edebilmek için bir takım yöntemler kullanılmaktadır. Yapıların mevcut haldeki durumlarını tespit etmek amacıyla yapıların muhtelif yerlerine şekil değiştirme ölçen cihazlar, fiber optik, akustik, piezo elektrik, seramik sensörler gibi cihazlar yerleştirilmektedir. Ancak bu yöntemlerin çoğunun en büyük dezavantajı büyük yapılara uygulanabilecek yerleştirilmesi kolay, ucuz, güvenilir, zamanla gelişebilecek çevresel etkilere dayanıklı sensörlerin var olmamasıdır. Ayrıca yapılara yerleştirilen bu sistemler ölçülmesi istenilen verileri düzenli, sürekli ve tutarlı bir şekilde aktarmamaktadır. Bu tür sensörler sadece buldukları kesiten veri aktarmakta, yapının diğer bölgeleri, kesitleri hakkında bilgi verememektedirler. Bu tür cihazların ömürleri yapı ömrüne göre daha kısa olmakta, hassasiyetleri beklenen hassasiyet değerlerini karşılayamamaktadır. Ayrıca, sensörlerin yerleştirildikleri kesitte mekanik kayıplar oluşmaktadır. Bütün yapıdan aynı anda bilgi alınabilecek, ekonomik, yapının ömrü kadar uzun ömürlü, dayanıklı, yapıda zafiyet oluşturmayacak, hassas veri verebilen, güvenilir bir sensör ağına ihtiyaç duyulmaktadır. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda çimento esaslı yapı elemanlarının yapısal olmayan bazı özellikleri de içerebilmesi için araştırmalar yapılmaktadır. Bilgi edinilmek istenilen özelliklerden bazıları hasar görme, sıcaklık, birim boy değişimi, titreşim kontrolü gibi malzemelerin başına gelebilecek değişimleri kendi kendilerine algılayabilmesidir. Kendiliğinden algılama kabiliyeti üretim aşamasında malzemeye katılan bazı ek malzemeler sayesinde verilmiş ve konvansiyonel anlamda istenilen yapısal özelliklere aynı anda sahip olan malzemelere “çok fonksiyonlu malzemeler” denmektedir. Yapının imalatından sonra yapıya monte edilen sensörler gibi bir cihazlar içermediği halde yapısal malzemenin kendisinin algılayıcı amacıyla kullanılmasına “kendiliğinden algılama” denmektedir. Bu sayede yapının içerisine ayrıca bir cihaz yerleştirmeden betonun kendisi yapısal veya malzeme odaklı istediğimiz bilgileri izlememizi sağlanması mümkün olabilmektedir. Bu çalışmanın yapılmasındaki ana hedef, yer değiştirme, gerilme ve hasarları gerçek zamanlı olarak güvenilir ve hassas bir şekilde algılayabilen çimento içerikli kompozitlerin geliştirilebilmesi için yapılması gereken temel dönüşüm olan betonun elektriksel direncinin azaltılarak betonun elektrik iletebilen bir malzeme haline getirilmesi için farklı katkıların etkinliğinin araştırılmasıdır.

Hızlı gelişmekte olan ekonomilere sahip ülkelerde kamusal yapılar, otoyollar, hava ve deniz limanları, altyapı sistemleri, köprüler, su arıtma tesisleri, boru hatları, kanallar, enerji üreten tesisler ve barajlar ticaretin ve ekonominin canlı kalmasını sağlayan yapılardır. Bu yapıların pek çoğu veya en azından bir kısmı beton ve/veya betonarmedir. Bu nedenle beton ve betonarme ekonomik gelişmenin temel taşıdır. Beton dünyada kişi başına en çok tüketilen yapı malzemesidir. Betona ait dayanım, tokluk, darbeye karşı dayanım, çevresel etkilere karşı dayanım, dayanıklılık, süneklik gibi özellikler detaylı olarak birçok araştırmacı tarafından çalışılmış ve halende betonun bu özelliklerini arttırmak amacıyla pek çok araştırmacı çalışma yapmaktadır. Beton yapılar maruz kaldıkları gerilme, şekil değiştirme ve çevresel etkenler gibi nedenlerden dolayı kullanım ömürleri boyunca hasar almaktadırlar. Her türlü yapıda oluşacak hasarların mümkün olan en erken zamanda tespit edilmesi güvenlik açısından önem taşımaktadır. Yapıların mevcut durumlarını tespit edebilmek amacıyla bir takım algılama yöntemleri kullanılmaktadır. Tanım olarak, “yapısal/malzeme sağlık izlemesi”, sürekli veya düzenli olarak yapıların/malzemenin durumunu yerinde (çoğunlukla hasarsız test yöntemleri ile) veya yapılara entegre edilmiş sensörler kullanılarak gerçek zamanlı olarak güvenli bir şekilde izlenmesi ve böylelikle insan hayatlarının kurtarılması, yüksek kaliteli yapılara imkan vermesi ve yapıların onarım ve tamir maliyetlerinin azaltılması anlamında inşaat mühendisliği için çok önemli yararlar sağlamaktadır (Chang vd., 2002). Yapısal/malzeme sağlık izlemeleri sonucunda elde edilen ölçümler (gerilme ve şekil değiştirme büyüklüğü ve artık mekanik dayanımlar gibi) mühendisler tarafından yapıların problemlerinin teşhisinde ve yeni başlamakta olan hasarların değerlendirilmesi için kullanılıp yapılması gereken tamir ve onarım faaliyetlerinin zamanlamasında ve yaşam döngü tahmin modelleri kullanarak yapıların kalan ömürlerinin belirlenmesinde son yıllarda yaygın bir biçimde kullanılmaktadır (Shi ve Chung, 1999; Ehlen, 1999; Hoerner ve Darter, 2000; Ishida ve Maekawa, 2000; Marchand, 2001; Thomas ve Bentz, 2001). Ayrıca bu tür izleme faaliyetleri sonucunda elde edilen kazanımlar ile olası gelecek bakımların minimize edilmesi için ne tür önleyici tedbirlerin alınması gerektiğine de karar verilmektedir. “Malzeme sağlık izleme” yapıların yapımında kullanılan malzemelerin özelliklerini etkileyen parametrelerin değerlendirilmesi anlamında da kullanılmaktadır. Ayrıca “yapısal sağlık izleme” yöntemleri ile inşa edilen yapının tasarımıyla uyumu kontrol edilip bir tür kalite güvence ve kalite kontrol mekanizması sağlanmış olmaktadır (Graveen vd., 2004; Ferragut vd., 2005). Yapıların sağlık durumlarının sürekli olarak izlenmesi ayrıca gelecekte inşa edilecek yeni tasarımlarda daha eğitilmiş yaklaşımlara olanak sağlamaktadır. Özet olarak mekanik yükler, deprem, rüzgâr, okyanus dalgası, canlı yükler ve çevresel yüklerden meydana gelecek hasarlar durumunda olası tehlikeleri azaltmak amacı ile beton yapılarıdaki hasarları sürekli olarak izlemek çok büyük bir önem teşkil etmektedir. Yapısal/malzeme sağlık izleme kapsamında değerlendirilen yapı/malzeme özelliklerine örnek olarak dayanım, elastik modülü, birim şekil değiştirme, geçirimsizlik ve donatı korozyonunun durumu verilebilir (Rajabipour ve Weiss, 2006; Weiss, 2001; Koh vd., 2003).

Beton yapılarda hasarların ve performanslarının izlenmesi için farklı yöntemlerin geliştirilmesine rağmen, yapının/malzemenin sağlık durumunu sürekli ve mevcut kullanılan yöntemlere göre daha ekonomik bir şekilde izleyecek bir yöntem bulunmamaktadır. Mevcut durumda beton yapıların yapısal/malzeme sağlığını izleme amacı ile birim boy değişimini ölçen, fiber-optik algılayıcı, akustik algılayıcı, piezo elektrik seramik algılayıcılar gibi cihazlar yapıların ölçmek istediğimiz kesitlerin iç kısımlarına üretim aşamasında konulmaktadır (Wen ve Chung, 2001; Chong vd., 2003; Chong ve Garboczi, 2003; Auweraer ve Peeters, 2003). Algılayıcı (sensör) ile bir yapıyı takip edebilmek için yapıya kolay yerleştirilebilecek, ucuz, uzun ömürlü, güvenilir algılayıcılar bulunmamaktadır. Aynı zamanda yerleştirilmiş olan algılayıcıları eş zamanlı, sürekli ve sağlıklı bir şekilde takip etmek de çok zordur. Yine bu algılayıcılar sadece yerleştirildikleri noktalarda veri vermekte, dayanıklılık sorunu yüzünden zamanla verim düşmekte, yapının ömrü boyunca hizmet verememektedirler. Ayrıca yerleştirilen algılayıcılar yapının o kesitinde zafiyete neden

olmaktadırlar. Bu ve benzeri nedenlerden dolayı yapının her yerinden bilgi aktarabilecek güvenilir, dayanıklı, yapıya zafiyet vermeyecek ve düşük maliyetli algılayıcı şebekesine ihtiyaç vardır. (Chang, 1999).

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda çimento içerikli elemanların yapısal olmayan özellikleri de içerebilmesi için araştırmalar yapılmaktadır. Yapısal olmayan özelliklerinden bazıları hasar görme, sıcaklık, birim boy değişimi, titreşim kontrolü gibi malzemelerin başına gelebilecek değişimleri kendi kendilerine algılama kabiliyetidir. Kendiliğinden algılama kabiliyeti verilmiş ve istenilen yapısal özelliklere aynı anda sahip olan malzemelere “çok fonksiyonlu malzemeler” denmektedir. Yapısı içinde herhangi bir sensör olmadığı halde kendisi sensör görevi görebilen yapısal malzemelere kendiliğinden algılama yeteneği olan malzemeler denir. Bu uygulama yapının içerisinde sadece belirli bazı noktalara yerleştirilerek ölçüm yapabilen ve aslında çoğu zaman yapının kendisinden daha az dayanıklı dolayısı ile daha az hizmet edebilen sensörlerden tamamen farklıdır. Bu nedenle yapıların içine gömülü halde yapıyla birlikte üretilen veya sonradan monte edilen sensörlerden çok daha ucuz, çok daha uzun ömürlüdürler. Bu malzemelerin kullanılması ile birlikte entegre veya monta sensör kullanımına gerek kalmayacaktır. Bu nedenle de yapının durabilitesi artmakta, tasarımlar kolaylaşmakta ve bun nedeniyle kullanımları çok cazip olmaktadır. Bahsedilen çok fonksiyonlu malzemelerin üretiminde son dönemlerde karbon bazlı tanecikler, bazı filamentler, bazı lifler tercih edilmektedir. Karbon Nano Tüpler (KNT) ve Karbon Nano Lifler (KNL) elektriksel, mekanik, manyetik özellikleri bakımından mükemmel oldukları için polimer, metalik veya seramik matrisli kompozit elemanların üretimi aşamasında nano malzeme olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler kompozitin özelliklerini kayda değer miktarda iyileştirmektedir (Jacobsen vd., 1995; Sobolev ve Gutiérrez, 2005; Li, G, vd., 2005; Gao vd., 2009; Sanchez ve Sobolev, 2010; Raki vd., 2010; Mukhopadhyay, 2011; Han vd., 2011; Hunashyal vd., 2011a; 2011b; Parveen, vd., 2013; Han vd., 2013a). Karbon içeren nano boyutta malzemeler piezo direnç özellikleri sayesinde şekil değiştirme (veya gerilme değişimi) ile birlikte elektriksel iletkenliklerinde değişimlerin olması nedeniyle algılama becerisi olan ölçmelerde kullanılmaktadırlar (Chung, 2002a; 2002b; 2003). Son yıllarda bu tür malzemeler kapsamlı bir şekilde polimer, seramik ve metal matrislerin içerisine dahil edilip yeni nesil kompozitler tasarlanmıştır. Ancak bu tür karbon esaslı nano malzemelerin çimento bağlayıcılı matrislerle birlikte kullanımı polimer, metalik ve seramik matrisli kompozitlere oranla oldukça sınırlı kalmıştır. Daha önceleri yapılan çalışmalar, karbon esaslı nano malzemeler içeren kompozitlerin gerilme ve/veya şekil değiştirmeye maruz bırakıldıkları durumlarda, kompozitin elektriksel özelliklerinin uygulanan gerilme ve/veya şekil değiştirme ile yüklemenin şekline göre lineer ve bazı durumlarda tersinir piezo-dirençli tepki şeklinde değişmekte olduğunu göstermiştir (Chen vd., 1995; Chen vd., 1996; Tomblor vd., 2000; Cao vd., 2003; Dharap vd., 2004; Grow vd., 2005; Dang vd., 2008; Li ve Chou, 2008; Saafi, 2009; Han vd., 2009; Yu ve Kwon, 2009; Park vd., 2011; Howser vd., 2011; Mo ve Roberts, 2013; Han vd., 2013b; Chen vd., 2005; Bontea vd., 2000; Fu vd., 1997; Peled vd., 2001; Chaipanich vd., 2010; Galao vd., 2014; Yu vd., 2007; Yazdanbakhsh, 2009;2011; Mendoza vd., 2013).

Yukarıda özetlenen literatür özetinden de görüldüğü üzere betonun yapısal dayanım özellikleri haricinde çok fonksiyonlu bir malzeme olması ve üzerindeki dformasyon miktarını kendiliğinden belirleyebilecek (Self-Sensing) özelliklerin kazandırılabilmesinin sağlanması için yapılması gereken çalışma betonun elektriksel direncinin azaltılarak elektrik iletken hale getirilmesi olduğu belirlenmiştir. Bu konudaki karbon nano tüpler ve karbon nano lifler gibi çok daha pahalı ve özellikle beton içerisinde homojen olarak dağıtılabilmesi için özel karıştırma işlemleri gerektiren katkı malzemelerinin kullanılmasının yerine betonun elektrik iletkenliğinin artırılması için daha ucuz ve beton içerisinde karıştırılması nano malzemelere göre nispeten daha kolay olan katkı malzemelerinin kullanılmasının mümkün olup olmadığının araştırılması için deneysel bir çalışma planlanmıştır. Bu çalışma kapsamında grafit, çelik lif ve aktif karbon tanecikler katkı malzemesi olarak betona katılarak bu malzemelerin betonun elektriksel direnç özelliğinin nasıl değiştirdiği konusunda ölçümler yapılmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

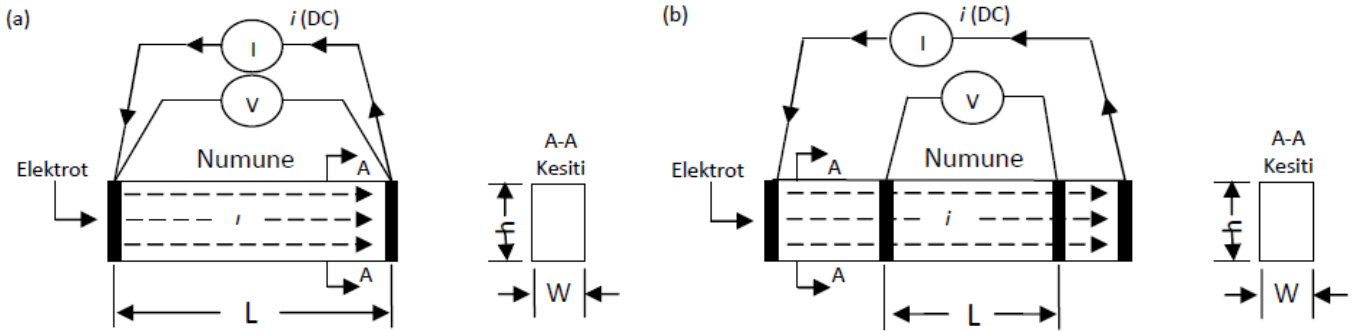
## 2. Deneysel Çalışma

Çalışma kapsamında elektriksel direnç özelliği çok yüksek olan, yani teorik olarak yalıtkan kabul edilen standart betonun karışım özellikleri üzerinde değişiklik yapılarak elektriksel direnç değerinin düşürülerek, elektrik iletken bir malzemeye dönüştürülmesi amaçlanmıştır. Bu hedefe ulaşabilmek için beton karışımı içerisine katılması düşünülen malzemelerin mümkün oldukça düşük maliyetli ve beton karışım prosesini zorlaştırmayarak karışıma kolay dâhil edilebilecek malzemeler olmasına çalışılmıştır. Çalışma kapsamında seçilen üç farklı katkı malzemesinin betonun elektriksel direnç değerini nasıl değiştirdiği deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla tasarlanan beton karışımlarından 250×250×30 mm boyutlarında plaklar üretilmiştir. Deneysel programda karşılaştırılmak amacıyla referans olarak katkı malzemesiz standart beton karışımı, grafit, çelik lif ve aktif karbon katkılı olmak üzere 3 farklı tür katkı malzemeli beton karışımları ve grafit ile birlikte çelik lifli hibrit malzemeli olmak üzere toplamda 5 farklı beton karışımı oluşturulmuş ve her karışımdan 3 adet olmak üzere toplamda 15 adet plak deney elemanı üretilmiştir. Deneysel programda kullanılan beş farklı beton karışımının basınç dayanımının belirlenmesi için her karışımdan 100×100×100 mm boyutlarında küp numuneler alınarak her karışımının basınç dayanımı belirlenmiştir. Betonun elektriksel direnç özelliğinin değiştirilmesi için düzenlenen karışım detaylarının bu özelliği değiştirirken betonun mekanik basınç dayanımı üzerindeki etkilerinin de belirlenmesi amaçlanmıştır. Her karışım türünden 3 adet alınan beton basınç test örnekleri test edilerek deney elemanlarının basınç dayanımları belirlenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında tasarlanan 5 farklı beton karışımında her karışıma ait 3 adet beton plak deney elemanının üretilmesi için kullanılan malzeme miktarları Tablo 1’de sunulmuştur.

**Tablo 1.** Deneysel Çalışma Kapsamında Tasarlanan 5 Beton Karışımında Kullanılan Malzemeler

Numune	Çimento (kg/m <sup>3</sup> )	Silis Dumanı (kg/m <sup>3</sup> )	Silis Kumu (kg/m <sup>3</sup> )	Çelik lif (kg/m <sup>3</sup> )	Grafit (kg/m <sup>3</sup> )	Aktif Karbon (kg/m <sup>3</sup> )	Su (kg/m <sup>3</sup> )	Akışkanlaştırıcı (kg/m <sup>3</sup> )
Referans	788.5	100	1225	----	----	----	178.5	39
Grafit Karışımı	788.5	100	1225	----	118.3	----	252.7	39
Çelik Lif Karışımı	788.5	100	1225	47	----	----	178.5	39
Grafit+Çelik Lif Karışımı	788.5	100	1225	47	118.3	----	252.7	39
Aktif Karbon Karışımı	788.5	100	1225	----	----	94.6	178.5	39

Deneysel çalışma kapsamında üretilen 5 farklı beton karışımının elektriksel direnç özelliklerinin ölçülebilmesi için deney elemanlarının üretimi esnasında elektriksel direnç ölçümlerinin alınabilmesi için beton plak deney elemanları içerisine bakır plakalar yerleştirilmiştir. Bu bakır plakalar elektriksel direnç ölçümlerinin alınması için deneysel çalışmada kullanılacak olan özel ölçüm sisteminin bağlanabilmesi için bağlantı prob noktası olarak kullanılmıştır. Literatür incelendiğinde iki ve dört problu ölçüm yapmanın çimento ile üretilmiş kompozit malzemelerin elektrik dirençlerinin ölçülmesinden kullanıldığı görülmüştür. Dört problu ölçüm yöntemlerinde numunenin üzerinde 4 farklı elektriksel temas noktası bulunup iki temas noktası elektriksel akımın geçmesi için diğer iki temas noktası ise iki nokta arasındaki voltajı belirlemek için kullanılmaktadır (Şekil 1-b). İki problu yöntemlerde ise sadece iki temas noktası bulunup, bu noktalar arasında çimento bağlayıcılı kompozit boyunca akım geçmekte olup voltaj ölçümü aynı yerlerden yapılmaktadır (Şekil 1-a). Literatürde yapılmış çalışmalarda her iki yöntemin de yaygın olarak kullanıldığı gözlemlenmiştir (Al-Dahawi ve ark., 2016; Al-Dahawi ve ark., 2017; Sarwary ve ark., 2019; Sahmaran, 2017, Siad ve ark., 2018; Yıldırım ve ark., 2018; Yıldırım ve ark., 2020). Dört problu metodun iki problu metoda göre temas direncini kapsamadığından dolayı bazı çalışmalarda daha doğru sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada 2 noktalı prob yönteminin kullanılması tercih edilmiştir. Her iki yöntemde de dalgalı akım (AC) ve doğru akım (DC) test yöntemleri uygulanabilmektedir (Wen ve Chung, 2007). Bu çalışmada dalgalı akım (AC) test yöntemi ile elektriksel direnç ölçümleri yapılmıştır.

**Şekil 1.** İletkenlik ölçümü; (a) 2 problu, (b) 4 problu ölçüm yöntemi (Sahmaran, 2017)

Makale çalışması kapsamında GIATEC Scientific© firması tarafından üretilen RCON marka elektriksel ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu araç alternatif akım uygulayarak karşılığında empedans sonuçları ölçen, 1 Hz - 30 Hz arasında değişen frekans aralığında çalışan, ölçüm süresi 5 saniye veya daha az olan, 0-180° arasında değişen faz açısına ayarlanabilen bir cihazdır. Literatürde yapılan araştırmalar sonucunda alternatif akım kullanılarak yapılan çalışmalarda ölçüm frekansının 1.0 kHz olarak seçilmesinin polarizasyon etkisini ortadan kaldıracığı sonucuna ulaşıldığı için bu çalışmada da ölçüm frekansı değeri 1.0 kHz olarak sabit seçilmiştir (Al-Dahawi ve ark., 2016; Al-Dahawi ve ark., 2017; Sarwary ve ark., 2019; Sahmaran, 2017, Siad ve ark., 2018; Yıldırım ve ark., 2018; Yıldırım ve ark., 2020). Çalışma kapsamında tercih edilen RCON marka elektriksel direnç ölçüm aracı, iki probdan alınan ölçüm sonrasında deney elemanının elektriksel empedans ve faz açısı değerlerini vermektedir. Aşağıda verilen denklem kullanılarak ölçüm sisteminin verdiği elektriksel empedans ve faz açısı değerleri ile deney elemanının elektriksel direnç değerinin hesaplanması mümkündür.

$$\rho = Z \times \cos(\theta) \times \frac{A}{L} \quad (1)$$

Denklem 1'de verilen eşitlik kullanılarak elektriksel direnç değeri ölçüm cihazından alınan elektriksel empedans ve faz açısı değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Eşitlikte  $\rho$  elektriksel direnç ( $\Omega.m$ ),  $Z$ , elektrik empedansı ( $\Omega$ ),  $\theta$ , faz açısı ( $^\circ$ ),  $A$  deney elemanının kesit alanı ( $m^2$ ),  $L$  sembolü ise deney elemanının ölçüm boyunu ( $m$ ) ifade etmektedir. Deney elemanlarından ölçüm sistemi kullanılarak alınan elektriksel direnç ölçümleri esnasında alınmış bir fotoğraf Şekil 2'de sunulmuştur.



**Şekil 2.** RCON Elektriksel Direnç Ölçüm Aletinden Ölçüm Sırasında Bir Görünüş

Deneyel çalışma kapsamında üretilmesi hedeflenen beton karışımları için kullanılan malzemeler Tablo 1’de verilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen beton karışımlarında ÇİMSA® Süper Beyaz CEM I 52.5 beyaz Portland çimentosu kullanılmıştır. Çalışma kapsamında yapılan literatür taraması sonucunda bu tür özel betonlarda agrega olarak silis kumunun tercih edildiği ve kalın agrega olarak düşük çapta silis kumunun kullanıldığı görülmüştür. Bu nedenle çalışmada ERGEN® TK4966 silis kumu tercih edilmiş olup, karışımlarda en büyük 7 mm çapında ince agrega kullanılmıştır. Beton karışımlarının hepsinde silis dumanı için mikro silika silis dumanı 920u malzemesi tercih edilmiştir. Süper akışkanlaştırıcı olarak POLYCAR® 300 kullanılmıştır. Betonun elektriksel iletkenliği üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla çalışmada beton karışımlarına değişken olarak katılan katkı malzemesi olarak çelik tel, grafit ve aktif karbon malzemeleri seçilmiştir. Çalışmada kullanılmak üzere seçilen aktif karbon malzemesinin boyutunun büyük olması nedeniyle öncelikle öğütülmüş ve daha sonra çapı 0.074 mm olan 200 numaralı elek yardımı ile elendikten sonra beton karışımında kullanılmıştır.

Yukarıda özellikleri verilen malzemeler detayları Tablo 1’de verilen miktarlarda beş farklı beton karışımının oluşturulması için karıştırılmış ve elektriksel direnç farklılıklarının deneysel olarak incelenebilmesi için 250×250×30 mm boyutların plak deney elemanları dökülerek üretilmiştir. Deney elemanlarının beton dökümü öncesinde ve sonrasında alınmış fotoğrafları Şekil 3’de verilmiştir.



**Şekil 3.** Deney Elemanlarının Beton Döküm Öncesi ve Sonrası Görünüşleri

Deney elemanlarının dökümü esnasında elektriksel direnç ölçümlerinin alınabilmesi için her deney elemanı içerisine ikişer adet bakır levha şeklinde prob yerleştirilmiştir. Bu probalar kullanılarak deney elemanlarından elektriksel direnç ölçümleri alınmıştır. Deney elemanlarından beton basınç dayanımının belirlenmesi için alınan küp numunelerinin aksenal basınç testi esnasında alınan bir fotoğraf örnek olarak Şekil 4’de sunulmuştur. Deneyel çalışma kapsamında kullanılan ve detayları makalenin 2. bölümünde

sunulan RCON elektriksel direnç ölçüm test düzeneği ile plak deney elemanlarına yerleştirilen 2 bakır prob üzerinden elektriksel empedans ve faz açısı değerleri ölçülmüştür. Bu değerler kullanılarak Denklem 1'den faydalanılarak elektriksel direnç değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 4. Deneysel Çalışma Kapsamında Üretilen Beton Karışımlarının Eksenel Basınç Dayanımının Belirlenmesi

### 3. Deneysel Sonuçlar ve Yorumlar

Deneysel çalışma kapsamında toplamda 5 farklı beton karışımının elektriksel direnç değerlerindeki değişimler ve bu özelliği değiştirmek için karışımlara eklenen katkı malzemelerinin beton basınç dayanımları üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Deney elemanlarının 7 günlük eksenel basınç dayanımı değerleri Tablo 2'de, elektriksel direnç ölçüm aletinden alınan ölçüm sonuçları ise Tablo 3'de sunulmuştur.

Tablo 2. Basınç Dayanımı Değerleri (7 Günlük Küp Dayanım)

Deney Elemanı	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Dayanım (MPa)
Referans	75.32	72.7
	70.31	
	72.50	
Grafit	45.55	45.3
	45.27	
	45.00	
Çelik Lif	77.40	72.0
	68.11	
	70.50	
Grafit+Çelik Lif	34.88	36.3
	38.60	
	35.40	
Aktif Karbon	67.31	63.6
	57.98	
	65.50	

Deneysel çalışma kapsamında elde edilen ve Tablo 2'de verilen sonuçlar beton karışımlarının elektriksel direnç özelliklerinin değiştirilmesi için karışımlara katılan katkı malzemelerinin betonun eksenel basınç dayanımı üzerindeki etkileri açısından değerlendirildiğinde en başarılı sonucu çelik lif katkılı betonun gösterdiği, en başarısız sonucu ise grafit katkı malzemesinin eklendiği beton karışımının gösterdiği görülmüştür. Elektriksel direnç özelliğinin değiştirilmesi için katkı malzemesinin eklenmediği standart beton referans karışımının basınç dayanımına göre kıyaslandığında sırasıyla grafit, çelik lif, grafit ile çelik lifin birlikte kullanıldığı ve aktif karbon katkılı karışımların beton basınç dayanımlarının sırasıyla ortalama %38, %1, %50 ve %13 oranlarında daha düşük dayanım değerleri sergilediği hesaplanmıştır. Basınç dayanımında elektriksel direnç değerinin düşürülmesi için beton karışımına eklenen grafit malzemesi %38 oranında, çelik lif ile birlikte grafit malzemesinin kullanıldığı beton karışımında ise %50 oranında bir azalma meydana gelmesi bu katkı malzemelerinin basınç dayanımını yüksek oranlarda olumsuz

olarak etkilediğini göstermiştir. Aktif karbon katkılı beton ve çelik lif katkılı beton karışımlarında basınç dayanımındaki azalım oranları %13 ve %1 oranlarında kalarak oldukça sınırlı düzeyde kalmıştır. Grafit malzemesinin basınç dayanımı üzerindeki olumsuz etkisi su/çimento oranının artırılmasına neden olması ve betonun hidratasyonu sırasında gerekli olan suyun büyük bir bölümünü kendi bünyesine çekerek hidratasyon işlemini olumsuz etkilemesinden kaynakladığı düşünülmektedir. Tablo 1’de verilen beton karışımına katılan malzemeler incelendiğinde 1 m<sup>3</sup> beton için %41.6 oranında daha fazla su betona eklenmesi gerekli olmuş ancak buna rağmen hidratasyon işlemi sırasında grafit malzemesi bünyesine çektiği su nedeniyle betonun hidratasyon işlemi sırasında gerek duyduğu su miktarını kullanmasına engel olmuştur. Aynı durum aktif karbon malzemesinde de görülmesine rağmen grafit katkı malzemesine göre çok daha düşük oranda bir su çekme özelliğine sahip olması nedeniyle beton basınç dayanım üzerindeki olumsuz etkisi grafit malzemesine göre çok daha az oranda meydana gelmiştir.

**Tablo 3.** Elektriksel Direnç Ölçüm Sonuçları

Deney Elemanı	Z ( $\Omega m$ )	$\theta$ (derece)	A (m <sup>2</sup> )	L (m)	$\rho$ ( $\Omega$ )	Ortlama $\rho$ ( $\Omega$ )
Referans	830000	11	0.0075	0.25	24442.52	24829.56
	844000	9	0.0075	0.25	25008.27	
	845000	9	0.0075	0.25	25037.90	
Grafit	5740	12	0.0075	0.25	168.44	177.00
	6150	8	0.0075	0.25	182.70	
	6070	9	0.0075	0.25	179.86	
Çelik Lif	451000	11	0.0075	0.25	13281.42	13014.66
	467000	10	0.0075	0.25	13797.16	
	405000	10	0.0075	0.25	11965.41	
Grafit+Çelik Lif	16900	7	0.0075	0.25	503.22	503.82
	17100	8	0.0075	0.25	508.01	
	16800	7	0.0075	0.25	500.24	
Aktif Karbon	13300	15	0.0075	0.25	385.40	391.01
	13200	14	0.0075	0.25	384.24	
	13800	13	0.0075	0.25	403.39	

Bu makale çalışması kapsamında incelenen temel araştırma konusu olan betonun elektriksel direnç özelliğinin azaltılarak elektrik iletkenliğinin artırılması açısından elde edilen ve Tablo 3’de sunulan sonuçlar incelendiğinde en başarılı sonucu grafit katkılı beton karışımının verdiği, en başarısız sonucu ise çelik lif katkılı betonun gösterdiği gözlemlenmiştir. Deney elemanlarından ölçülen tüm değerler ve hesaplanan elektriksel direnç değerleri Tablo 3’de verilmiştir. Elektriksel direnç değerinin yüksek olması söz konusu beton karışımının kullanıldığı plak deney elemanının elektrik iletkenliğinin düşük olduğu ve elektriği iletmediğini göstermektedir. Özetle hesaplanan elektriksel direnç değerleri ne kadar düşükse söz konusu beton karışımı elektriği o kadar rahat ve başarılı bir şekilde iletebilmektedir. Bu bakış açısı ile deneysel sonuçlar yorumlandığında hiçbir katkı malzemesi katılmayan standart referans beton karışımının ortalama elektriksel direnç değeri grafit katkılı, çelik lifli, grafit ile çelik lifli ve aktif karbon katkılı beton karışımlarının ortalama elektriksel direnç değerinden sırasıyla 140, 2, 49 ve 64 kat daha büyük olduğu hesaplanmıştır. Standart referans beton karışımının elektriksel direnç değerini 140 kat azaltarak çok büyük oranda azalım sağlayan ve dolayısı ile elektriksel iletkenliği artıran en başarılı katkı malzemesi grafit olmuştur. Aktif karbon katkı malzemesi ise katkısız standart referans betonun elektriksel direnç değerini 64 kat azaltarak elektrik iletkenliğini artırmada ikinci sırayı alarak oldukça iyi bir performans sergilemiştir. Elektriksel direnci azaltmada ve elektriksel iletkenliği artırmada en başarısız katkı malzemesi ise standart betona göre elektriksel direnç değerini sadece 2 kat azaltabilen çelik lif katkı malzemesi olmuştur.

#### 4. Sonuçlar

Bu makale çalışması kapsamında elektriksel direnci çok yüksek, yani teorik olarak elektrik iletkenliği olmayan standart bir betonun elektriksel direnç değerinin azaltılarak elektriği iletebilen bir malzeme haline dönüştürülmesi için 4 farklı katkı malzemesi kullanılarak beton karışımları oluşturulmuş ve deneysel olarak elektriksel direnç ve mekanik eksenel basınç dayanımı değerlerinin nasıl değişim gösterdiği incelenmiştir. Betonun elektriksel direnç özelliğinin azaltılarak elektriği iletebilen bir beton geliştirilmesi bu türdeki özel bir betonun farklı uygulamalarda kullanılabilmesi düşünüldüğü için araştırılmıştır. Bu türde elektriği iletebilen özel betonlar elektriksel direnç özelliklerindeki değişimin izlenmesi ile kendi üzerlerindeki deformasyon hakkında bilgi verebilen yapısal sağlık takibi uygulamalarında kullanılacak özel bir malzemeye dönüşebilmektedir. Bu çalışma kapsamında maliyet olarak düşük ve beton karışımına kolayca eklenebilen katkı malzemeleri ile betonun elektriksel direnç değerinin azaltılarak elektriği iletebilen bir malzemeye dönüştürülmesi için 4 farklı katkı malzemesi deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda elektriksel direnç değerini azaltarak betonu elektrik iletebilen bir malzemeye dönüştürmede en başarılı olan katkı malzemesinin grafit olduğu belirlenmiştir. Ancak mekanik basınç dayanımı açısından da değerlendirildiğinde grafit katkı malzemesinin betonun basınç dayanımı olumsuz etkilediği ve oldukça büyük oranda düşürdüğü de görülmüştür. Mekanik basınç dayanımı büyük oranda düşürmeden ve elektriksel direnç değerini azaltarak elektrik iletkenliğini artırmada en optimum başarılı sonucu ise çalışma kapsamında test edilen aktif karbon katkı malzemesi sergilemiştir. Aktif karbon katkı malzemesi betonun basınç dayanımında sadece %13 oranında bir azalım yapmasına rağmen, elektriksel direnç değerini 64 kat azaltarak elektrik iletkenliğini çok büyük oranda artırmıştır. Betonun basınç dayanımının önemli olduğu uygulamalarda aktif karbon katkı malzemesinin kullanılmasının, basınç dayanımının önemli olmadığı uygulamalarda ise grafit katkı malzemesinin kullanılmasının daha uygun olabileceği bu çalışmadan elde edilen önemli bir sonuçtur.

## Referanslar

- Al-Dahawi A., Sarwary, M., Öztürk, O., Yıldırım, G., Akın, A., Şahmaran, M., Lachemi, M. (2016). Electrical Percolation Threshold of Cementitious Composites Possessing Self-Sensing Functionality Incorporating Different Carbon-Based Materials, *Smart Materials and Structures*, 25(10).
- Al-Dahawi A., Yıldırım, G., Öztürk, O., Şahmaran, M. (2017). Assessment of Self-sensing Capability of Engineered Cementitious Composites within the Elastic and Plastic Ranges of Cyclic Flexural Loading, *Construction and Building Materials*, 145, 1-10. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.236
- Auwaer, H. V. D., Peeters, B. (2003). Sensors and Systems for Structural Health Monitoring, *Journal of Structural Control*, 10, 117-125. doi: 10.1002/stc.21
- Bontea, D.M., Chung, D.D.L., Lee, G.C. (2000). Damage in carbon fiber reinforced concrete, monitored by electrical resistance measurement, *Cement and Concrete Research*, 30(4), 651–659. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.08.004
- Cao, J., Wang, Q., Dai, H. (2003). Electromechanical properties of metallic, quasimetallic, and semiconducting carbon nanotubes under stretching, *Physical Review Letters*, 90, 157601-157604. doi: 10.1103/PhysRevLett.90.157601
- Chaipanich, A., Nochaiya, T., Wongkeo, W., Torkittikul, P. (2010). Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes-fly ash cement composites, *Materials Science and Engineering A*, 527(4-5) 1063-1067. doi: 10.1016/j.msea.2009.09.039
- Chang, F. K. (1999). Structural Health Monitoring: A Summary Report, Proceedings of the Second International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, Stanford, California, 19-29.
- Chang, F-K., Prosser, W. H., Schulz, M. J. (2002). Letter of Introduction from the Editorsof Structural Health Monitoring, *Structural Health Monitoring*, 1 (1), 1-2. doi: 10.1177/147592170200100101
- Chen, B., Liu, J., Wu, K. (2005). Electrical responses of carbon fiber reinforced cementitious composites to monotonic and cyclic loading, *Cement and Concrete Research*, 35(11), 2183–2191. doi: 10.1016/j.cemconres.2005.02.004
- Chen, P.W., Chung, D.D.L., (1995). Improving the electrical conductivity of composites comprised of short conducting fibers in a non-conducting matrix: the addition of a non-conducting particulate filler, *MRS Proceedings*. 390, 141. doi:10.1557/PROC-390-141
- Chen, P.W., Chung, D.D.L. (1996). Concrete as a new strain/stress sensor, *Composites Part B:Engineering*, 27, 11–23. doi: 10.1016/1359-8368(95)00002-X
- Chong, K. P., Garboczi, E. J.,(2003). Smart and designer structural materials systems, *Computational Materials Science*, 4(4), 417-430. doi:10.1002/pse.134
- Chong, K. P., Garboczi, E. J., Washer, G. (2003). Health monitoring of civil infrastructures, *Smart Materialsand Structures*, 12 (3), 483-493.
- Chung, D.D.L., (2002). Piezoresistive cement-based materials for strain sensing, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 13(9), 599–609. doi:10.1106%2F104538902031861
- Chung, D.D.L., (2002). Electrical conduction behavior of cement–matrix composites, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 11(2), 194–204. doi: 10.1361/105994902770344268
- Chung, D.D.L. (2003). Damage in cement-based materials, studied by electrical resistance measurement, *Materials Science Engineering Review*, 42(1), 1–40. doi: 10.1023/A:1017901929264
- Dang, Z. M., Jian, M. J., Xie, D., Yao, S. H., Zhang, L. Q., Bai, J. B. (2008). Supersensitive linear piezoresistive property in carbon nanotubes/silicone rubber nanocomposites, *Journal of Applied Physics*, 104, 24114. doi: 10.1063/1.2956605
- Dharap, P., Li, Z., Nagarajaiah, S., Barrera, E. V. (2004). Nanotube film based on single-wall carbon nanotubes for strain sensing, *Nanotechnology*, 15, 379-382.
- Ehlen, M. A., (1999). BridgeLCC 1.0 Users Manual: Life-cycle Costing Software for Preliminary Bridge Design, Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology.
- Ferragut, T. R., Rasmussen, R., Darter, M. I., Harrington, D., Anderson-Wilk, M. (2005). Long-term Plan for Concrete Pavement Research and Technology – The Concrete Pavement Roadmap; Volume II: Tracks. Washington, DC: Federal Highway Administration Publication No. HRT-05-053.
- Fu, X, Ma, E, Chung, D.D.L., Anderson, W.A. (1997). Self-monitoring in carbon fiber reinforced mortar by reactance measurement, *Cement Concrete Research*, 27(6), 845–852. doi: 10.1016/S0008-8846(97)83277-2
- Galao O., Baeza, F.J., Zornoza, E., Garcés, P. (2014). Strain and damage sensing properties on multifunctional cement composites with CNF admixture, *Cement and Concrete Composites*, 46, 90-98. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.11.009
- Gao, W., Alemany, Lijie, Ci, Ajayan, P.M. (2009). New insights into the structure and reduction of graphite oxide, *Nature Chemistry* 1(5), 403–408. doi:10.1038/nchem.281



- Graveen, C., Weiss, W.J., Olek, J., Nantung, T., Gallivan, V.L. (2004). The Implementation of a Performance Related Specification (PRS) for a Concrete Pavement in Indiana, Technical Report, Transportation Research Board (TRB) Annual Conference, Washington, DC.
- Grow, R. J., Wang, Q., Cao, J., Wang, D., Dai, H. (2005). Piezoresistance of carbon nanotubes on deformable thin-film membranes, *Applied Physics Letters*, 86, 93104- 93107. doi: 10.1063/1.1872221
- Han, B., Yu, X., Kwon, E. (2011). A self-sensing carbon nanotube/cement for traffic monitoring, *Nanotechnology* 20, 5.
- Han, B., Yu, X., Ou, J. (2011). Multifunctional and smart carbon nanotube reinforced cement-based materials, *Nanotechnology in Civil Infrastructure*, Springer, Berlin, Heidelberg, 1-47. doi: 10.1007/978-3-642-16657-0\_1
- Han, B., Yang, Z., Shi, X., Yu, X. (2013). Transport properties of carbon-nanotube/cement composites. *Journal of Materials Engineering and Performance* 22, 184-189. doi: 10.1007/s11665-012-0228-x
- Han, B., Zhang, K., Burnham, T., Kwon, E., Yu, X. (2013). Integration and road tests of a self-sensing CNT concrete pavement system for traffic detection, *Smart Materials and Structures* 22(1), 015020. doi: 10.1088/0964-1726/22/1/015020
- Hoerner, T. E., Darter, M. I. (2000). Improved Prediction Models for PCC Pavement Performance-related Specifications Volume II: *PaveSpec 3.0 User's Guide*. Washington, DC: Federal Highway Administration Publication No. FHWA-RD-00-131.
- Howser, R.N., Dhonde, H.B., Mo, Y.L. (2011). Self-sensing of carbon nanofiber concrete columns subjected to reversed cyclic loading, *Smart Materials Structures* 20, 085031.
- Hunashyal, A.M., Lohitha, S.J., Quadri, S.S., Banapurmath, N.R. (2011). Experimental investigation of the effect of carbon nanotubes and carbon fibres on the behaviour of plain cement composite beams, *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 4(1), 29-36. doi: 10.1080/19373260.2011.548160
- Hunashyal, A. M., Tippa, S.V., Quadri, S.S., Banapurmath, N.R. (2011). Experimental Investigation on Effect of Carbon Nanotubes and Carbon Fibres on the Behavior of Plain Cement Mortar Composite Round Bars under Direct Tension, *International Scholarly Research Network*. doi: 10.5402/2011/856849
- Ishida, T., Maekawa, K. (2000). An Integrated Computational System for Mass/Energy Generation, Transport, and Mechanics of Materials and Structures, *Concrete Library of Japan Society of Civil Engineers*, 36, 129-144. doi: 10.2208/jscej.1999.627\_13
- Jacobsen, R. L., Tritt, T. M., Guth, J. R., Ehrlich, A. C., Gillespie, D.J. (1995). Mechanical properties of vapor-grown carbon fiber, *Carbon*, 33, 1217-1221. doi: 10.1016/0008-6223(95)00057-K
- Koh, H. M., Choo, J. F., Kim, S. K., Kim, C. Y. (2003). Recent application and development of structural health monitoring systems and intelligent structures in Korea, *Proceedings of the 1st international conference on structural health monitoring and intelligent infrastructure*, Nov., Tokyo, Japan, 99-112. doi: 10.1007/1-4020-3661-2\_4
- Li, C., Chou, T. (2008). Modeling of damage sensing in fiber composites using carbon nanotube networks, *Composites Science and Technology*, 68 (15-16), 3373-3379. doi: 10.1016/j.compscitech.2008.09.025
- Li, G.Y., Wang, P.M., Zhao, X. (2005). Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes, *Carbon*, 43(6), 1239-1245. doi:10.1016/j.carbon.2004.12.017
- Marchand, J. (2001). Modeling the behavior of unsaturated cement systems Exposed to aggressive chemical environments, *Materials and Structures*, 34 (238), 195-200.
- Mendoza, O., Sierra, G., Tobon, J.I. (2013). Influence of superplasticizer and Ca(OH)<sub>2</sub> on the stability of functionalized multi-walled carbon nanotubes dispersions for cement composites applications, *Construction and Building Materials*, 47, 771-778. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.100
- Mo, Y.L., Roberts, R.H. (2013). Carbon nano fibre concrete for damage detection of Infrastructure, *Advances in Nano Fibers*, Chapter 5, 125-14. doi: 10.5772/57096
- Mukhopadhyay, S. C. (2011). *New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring*, Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer.
- Park, K., Paulino, G.H. (2011). Cohesive Zone Models: A Critical Review of Traction-Separation Relationships Across Fracture Surfaces, *Applied Mechanics Reviews*, 64(6), 060802-060822. doi: 10.1115/1.4023110
- Parveen, S., Rana S., Fanguero, R. (2013). A review on nanomaterial dispersion, microstructure, and mechanical properties of carbon nanotube and nanofiber reinforced cementitious composites, *Journal of Nanomaterials*, 80. doi: 10.1155/2013/710175
- Peled, A., Torrents, J. M., Mason, T.O., Shah, S.P., Garboczi, E.J. (2001). Electrical impedance spectra to monitor damage during tensile loading of cement composites, *ACI Materials Journal*, 98(4), 313-322.
- Rajabipour, F., Weiss, W. J. (2006). Linking Health Monitoring in Concrete Structures with Durability Performance Simulations, *Proceedings of the ASCE Structures Congress*, St. Louis, Missouri. doi: 10.1061/40889(201)97

- Raki, L., Beaudoin, J.J., Alizadeh, R., Makar, J.M, Sato, T. (2010). Cement and Concrete Nanoscience and Nanotechnology, *Materials*, 3(2), 918-942. doi: 10.3390/ma3020918
- Saafi, M. (2009). Wireless and embedded carbon nanotube networks for damage detection in concrete structures, *Nanotechnology*, 20, 395502-395509.
- Sanchez, F., Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete – A review, *Construction and Building Materials*, 24(11), 2060-2071. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014
- Sarwary, M.H., Yıldırım, G., Al-Dahawi, A., Anıl, Ö., Khiavi, K.A., Toklu, K., Şahmaran, M. (2019). Self-Sensing of Flexural Damage in Large-Scale Steel-Reinforced Mortar Beams, *ACI Materials Journal*, 116(4), 209-221.
- Şahmaran, M. (2017). Multifunctional Cementitious Composites for Real-time Structural/Materials Health Monitoring Application, The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK), 114R043.
- Shi, Z.Q., Chung, D.D.L. (1999). Carbon fiber reinforced concrete for traffic monitoring and weighing in motion, *Cement Concrete Research*, 29(3), 435–439. doi: 10.1016/S0008-8846(98)00204-X
- Siad, H., Lachemi, M., Şahmaran, M., Mesbah, H A., Hossain, K. M. A. (2018). Advanced engineered cementitious composites with combined self-sensing and self-healing functionalities, *Construction and Building Materials*, 176, 313-322. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.026
- Sobolev, K., Gutierrez, M.F.i (2005). How nanotechnology Can Change the Concrete World, *American Ceramic Society Bulletin*, 84(10), 14-17. doi:10.1002/9780470588260.ch16
- Thomas, M. D. A., Bentz, E. C. (2001). LIFE-365 Service Life Prediction Model; Users Manual. Lovettsville, Virginia: Silica Fume Association.
- Tombler, T. W., Zhou, C., Alexseyev, L., Kong, J., Dai, H., Liu, L., Jayanthi, C. S., Tang, M., Wu., S. Y. (2000). Reversible electromechanical characteristics of carbon nanotubes under local probe manipulation, *Nature*, 405, 769-772.
- Weiss, W. J. (2001). Linking Insitu Monitoring with Damage Modeling for Life-Cycle Performance Simulations of the Concrete Infrastructure, NSF Career Development Plan, National Science Foundation.
- Wen, S. H., Chung, D. D. L. (2001). Electric polarization in carbon fiber reinforced cement, *Cement and Concrete Research*, 31(1), 141-147. doi: 10.1016/S0008-8846(00)00382-3
- Wen, S. H., Chung, D. D. L. (2007). Electrical-resistance-based damage selfsensing in carbon fiber reinforced cement, *Carbon* 45(4), 710-716. doi:10.1016/j.carbon.2006.11.029
- Yazdanbakhsh, A., Grasley, Z., Tyson, B., Abu Al-Rub, R. (2009). Carbon nanofibers and nanotubes in cementitious materials: Some issues on dispersion and interfacial bond, *ACI Special Publication*, 267, 21-34.
- Yazdanbakhsh, A., Grasley, Z., Tyson, B., Abu Al-Rub, R.K. (2011). Dispersion quantification of inclusions in composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(1), 75-83. doi:10.1016/j.compositesa.2010.10.005
- Yıldırım G., Sarwary, M.H., Al-Dahawi, A., Öztürk, O., Anıl, Ö., Şahmaran, M. (2018). Piezoresistive behavior of CF- and CNT-based reinforced concrete beams subjected to static flexural loading: Shear failure investigation, *Construction and Building Materials*, 168, 266-279. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.124
- Yıldırım G., Öztürk, O., Al-Dahawi, A., Ulu, A.A., Şahmaran, M. (2020). Self-Sensing Capability of Engineered Cementitious Composites: Effects of Aging and Loading Condition, *Construction and Building Materials*, 231, 1-16. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117132
- Yu, J., Grossiord, N., Koning, C.E., Loos, J. (2007). Controlling the dispersion of multi-wall carbon nanotubes in aqueous surfactant solution, *Carbon* 45, 618-623. doi:10.1016/j.carbon.2006.10.010
- Yu, X., Kwon, E. (2009). A carbon nanotube/cement composite with piezoresistive properties, *Smart Materilas and Structures*, 18(5), 055010-055015.