



ÇİMENTOLU KOMPOZİTLERİN ÇATLAK – ELEKTRİKSEL DİRENÇ İLİŞKİSİNİN DENEYSEL ANALİZİ

Egemen Teomete

Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir
egemen.teomete@deu.edu.tr

ÖZET

Depremler, malzeme bozulmaları ve diğer çevresel etkiler yapıların performansını düşürmektedir. Yapıların performansının yapısal izleme ile takip edilmesi, insanların can güvenliği açısından son derece önemlidir. Yapısal izlemede kullanılan klasik sensörler (gerinim pulları, piezo-elektrik ve benzeri sensörler) düşük dayanıklılığa, düşük duyarlılığa ve yüksek maliyete sahiptirler. Klasik sensörlerin düşük dayanıklılığı, uzun dönem ölçümler alınmasına engel olurken, yüksek maliyetleri sınırlı sayıda kullanılmalarını gerektirir. Bu çalışmada değişik oranlarda karbon lif içeren beş adet çimentolu kompozit karışımı tasarlanmıştır. Her karışımdan 3'er adet 4*4*16 cm ebatlı prizma hazırlanmıştır, toplam 15 örnek hazırlanmıştır. Örneklere çentikli eğilme testi uygulanırken, eş zamanlı olarak elektriksel dirençleri ölçülmüştür. Çatlak boyu ile elektriksel direnç değişimi arasındaki korelasyonlar belirlenmiştir. Çatlak ölçümü için duyarlılık ve doğrusallık performans parametreleri tanımlanmıştır. Çatlak boyu ile elektriksel direncin ölçüldüğü çentikli eğilme testleri, çimentolu kompozitlere ilk defa bu projede uygulandı. Bu çalışma, kendi hasarını ölçen akıllı malzemelerin inşaat sektöründe kullanılmasını hedeflemektedir.

GİRİŞ

Depremler, malzeme bozulmaları ve diğer çevresel etkiler, yapıların taşıma kapasitelerini olumsuz etkiler. ABD'de köprülerin %30'u yapısal olarak güvenli değildir ve betondan yapılmış alt yapı tesisleri tasarım yaşları dolmadan bozulmalara uğramıştır [1]. Can ve mal güvenliğinin sağlanması için yapı sağlığının izlenmesi önemlidir. Yapı sağlığının izlenmesinde kullanılan gerinim pulları gibi klasik sensörler düşük dayanıklılığa sahipken, noktasal ölçüm alabilirler. Bu durum kısıtlı sayıda ve kısa süre içinde kullanılmalarını gerektirir [2]. Çimento matrisli malzemelere lif eklendiğinde elektriksel direnç düşer ve yük altında elektriksel direnç değişir [3-5].

Malzemenin elektriksel direncini ölçmek için iki ve dört elektrot metotları kullanılabilir [6,7]. İki ve dört elektrot metotları, çevresel ve batırılmış elektrot olarak uygulanabilirler. Çevresel elektrot metodunda malzemenin çevresine iletken bant yapıştırılır ya da boya sürülür [1,8,9]. Batırılmış dört elektrot metodunda ise iletken ağ ya da levhalar malzemeye batırılır [10,11,12]. Çimentolu kompozitlerin elektriksel özellikleri üzerine değişik çalışmalar yapılmıştır [13,14].

Bu çalışmada, farklı oranlarda karbon lif içeren beş farklı çimentolu kompozit karışım tasarlandı. Her karışımdan üçer adet prizma örnek hazırlandı ve çentikli eğilme testi 15 örneğe uygulandı. Testler sırasında örneğin elektriksel direnci ile çatlak boyları eş zamanlı ölçüldü. Elektriksel direnç değişimi ile çatlak boyu arasında güçlü korelasyonlar bulundu. Elde edilen sonuçlar, kendi hasarını ölçen akıllı malzemelerin geliştirilmesi için ümit vericidir.

MAZLEME VE METOT

Bu çalışmada beş değişik karbon lifli çimentolu kompozit tasarlanmıştır. Tüm karışımlarda, CEM I 42,5 R çimento; kum/çimento oranı 1; silika dumani /çimento oranı 10; su/çimento oranı 0.4; süper akışkanlaştırıcı Sika ViscoCrete High Tech 30/çimento oranı %2 kullanıldı. Karışımlar C02, C035, C05, C08 ve C1 de sırasıyla % 0.2,0.35, 0.5,0.8,1 hacimsel oranlarda 13mm uzunluğunda karbon lif bulunmaktadır. Her karışımdan üçer adet 4*4*16 cm prizma örnek hazırlanmıştır. Toplamda onbeş adet örnek hazırlanmıştır.

Polyacrylonitrile (PAN) karbon lifin uzunluğu 13 mm, çapı 7 µm dir (DowAksa A.Ş. ürünü). Elektrot olarak kare göz açıklığı 5 mm, tel çapı 600 µm olan saf bakır ağ kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan özel kalıpların yan duvarlarında, elektrot geçirmek için karşılıklı açılmış 2 mm kalınlığında kanallar vardır (Şekil 1a). Kalıba elektrotlar yerleştirilir, çimentolu karışım iki seferde kalıba dökülür; her seferde 15 kez sıkıştırmak için tokmaklanır (Şekil1b). Kalıp, sarsma tablasında sarsılır. 24 saat sonra örnek kalıptan alınır ve 28 gün 20 ° C su içinde kür edilir. Yüksek hızlı elektrikli kesme makinesi ile örneklerin orta – alt kısmında 5 mm uzunluğunda bir çentik açılır. Çentik, eğilme testi sırasında çatlak başlangıç yerini tayin etmek için açılmıştır. Örnekler 7 gün laboratuvar ortamında bekletildikten sonra yüzeylerine çatlak boyu ölçer yapıştırılmıştır ve eğilme testi yapılmıştır. Yükleme, 0.2mm/dak hızda deplasman kontrollü olarak yapılmıştır. Batırılmış dört elektrot metodu kullanılmıştır. Test sırasında, doğru akım dış iki elektrottan verilmiştir, örnek gerilimi V_s iç iki elektrottan ölçülmüştür (Şekil 2a-b). Örneğe seri bağlı bir referans direncin ($R_r=1000$ Ohm) gerilimi V_r ölçülmüştür. Test sonunda oluşan çatlak Şekil 2c de sunulmuştur. Test sırasında mekanik yük F , elektriksel gerilimler V_s ve V_r , çatlak boyu, başlık deplasmanı dijital bir dosyaya saniyede 10 defa (10 Hz hız ile) yazdırılmıştır.

Test sırasında her hangi bir anda devreden geçen akımı I_c ve örnek elektriksel direncini R_s bulmak için Ohm kanunu kullanılmıştır.

$$I_c = \frac{V_r}{R_r} \quad (1)$$

$$R_s = \frac{V_s}{I_c} \quad (2)$$

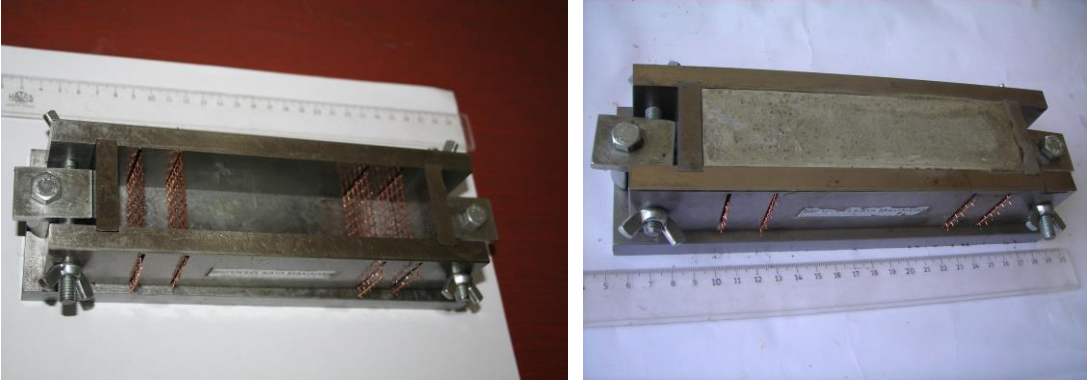
Örnek elektriksel direnç değişimi (%R) Eşitlik 3 ile belirlenmiştir. R_{so} , örnek elektriksel direncinin mekanik yük uygulanmadan ölçülmüş değeridir.

$$\%R = \left(\frac{R_s}{R_{so}} - 1 \right) \times 100 \quad (3)$$

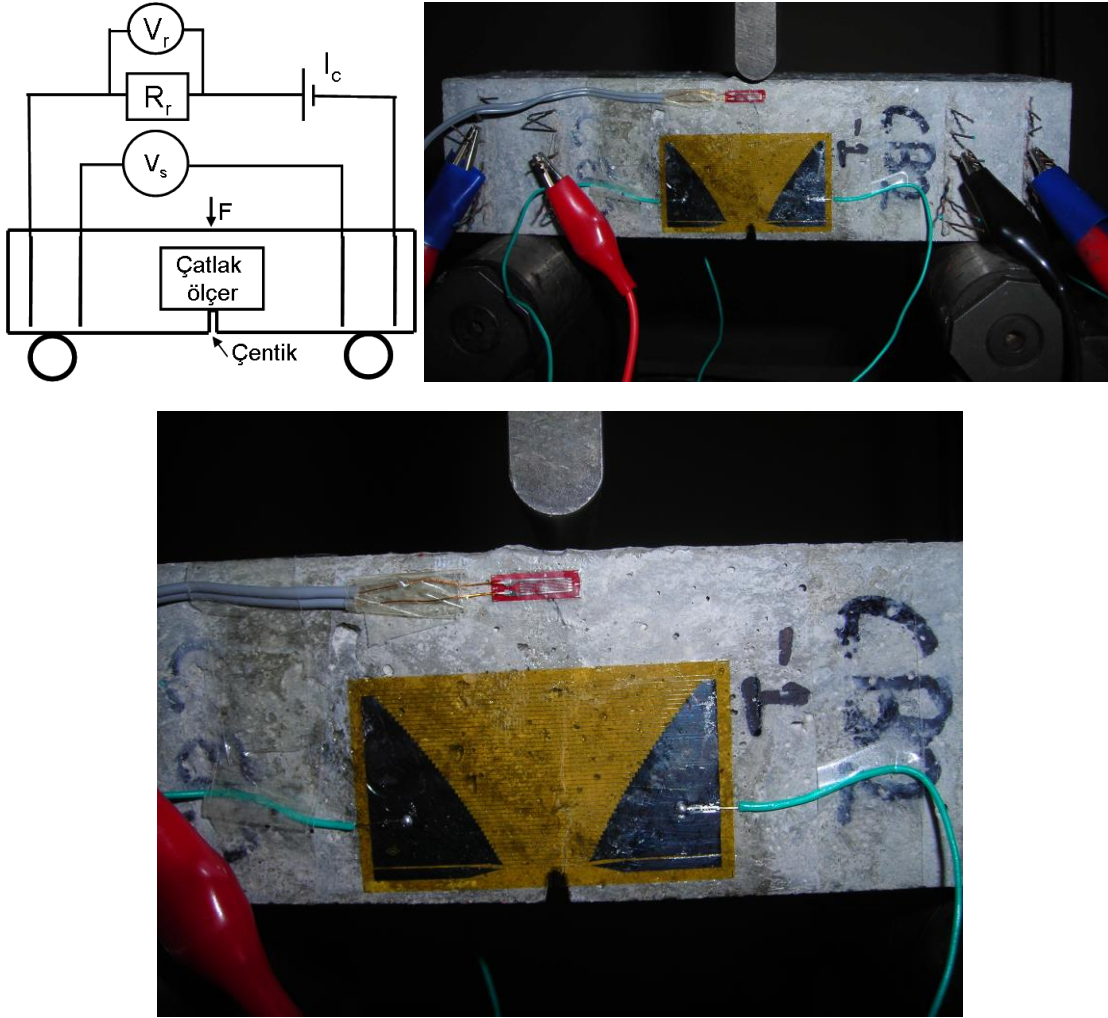
Çimentolu kompozitler için çatlak duyarlılığı ilk defa bu projede tanımlanmıştır. Çatlak duyarlılığı (ÇD), bir birim (mm) çatlak uzamasına karşılık elektriksel direncin yüzde değişimidir (Eşitlik 4). Doğrusallık hatâsı (DH%), elektriksel direncin yüzde değişimi (%R) – çatlak uzunluğu grafiği ile bu grafiğe en küçük kareler ile uydurulmuş doğru arasındaki maksimum sapmanın (Δ_{max}), elektriksel direncin toplam yüzde değişimine (% R_{fs}) yüzdesidir (Eşitlik 5). Doğrusallık hatâsı da çimentolu kompozitler için ilk defa bu projede tanımlanmıştır. Doğrusallık hatâsı azaldıkça, çatlak boyu ölçümü azalır.

$$\text{ÇD} = \frac{(R_s - R_{so}) / R_{so}}{\Delta \text{Çatlak Uzunluğu}} \quad (4)$$

$$\%DH = \left(\frac{\Delta_{max}}{\%R_{fs}} \right) \times 100 \quad (5)$$



Şekil 1: Kullanılan özel prizma kanallı kalıplar. Kalıplara karışım döküldükten sonraki görünüm.



Şekil 2. Çentikli eğilme testi a) Test şeması b) Test c) Test sonrası oluşan çatlak.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, beş değişik karbon lifli çimentolu kompozit tasarlanmıştır. Her bir karışımdan üçer adet 4*4*16 cm ebatlarında prizma örnek hazırlanmıştır. Örnekler kür edildikten sonra 5 mm çentik açılmış ve çentikli eğilme testi yapılmıştır. Örnek elektriksel direnci ile çatlak uzunluğu arasındaki korelasyon belirlenmiştir. Bu bölümde elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

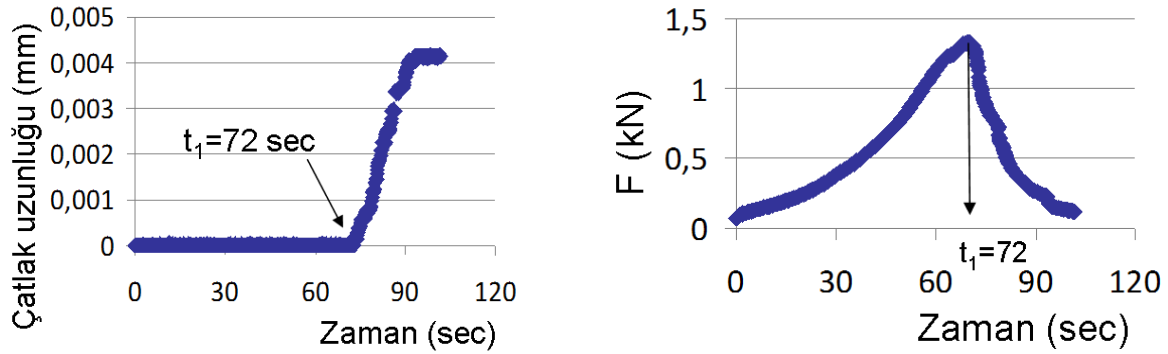
Çatlak uzunluğu-zaman ve kuvvet-zaman grafikleri Şekil 3a-b de sunulmuştur. Yetmiş ikinci saniyede çentik ucundan çatlak uzamaya başladığı zaman, örneğin rijitliği azalır ve kuvvet en büyük değerden düşmeye başlar (bakınız Şekil 3a-b). Şekil 4a da örnek elektriksel direnci - çatlak uzunluğu grafiği sunulmuştur. Grafik A, B, C alt bölgelerine ayrılmıştır.

Şekil 4a'da A bölgesi, test başlangıcından çatlağın uzamaya başladığı 72. saniyeye kadar olan süreci kapsar. A bölgesinde, çatlak henüz ilerlemiyor. Eğilme altındaki örneğin tarafsız ekseninin üstündeki basınç bölgesinde, mikro çatlaklar ve boşluklar kapanır, liflerin boyu kısalır ve elektriksel direnç düşer, negatif %R değişimi olur. Tarafsız eksenin altındaki çekme

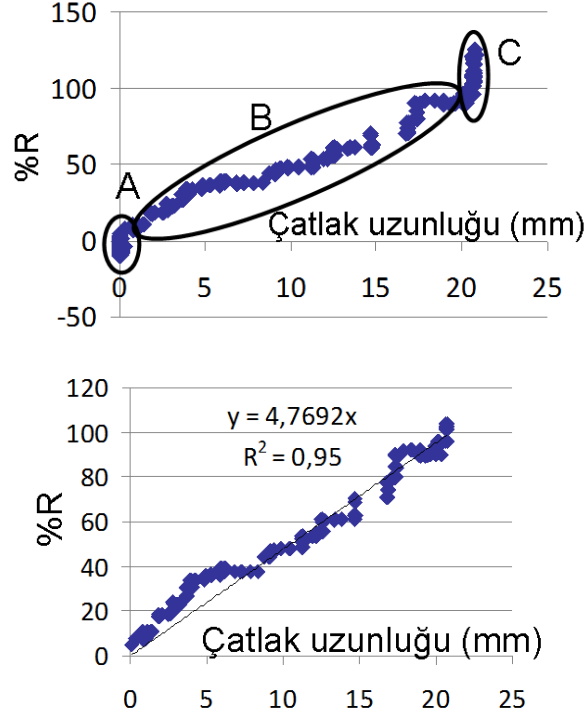
bölgesinde ise mikro çatlaklar açılır, lifler uzar, elektriksel direnç artar ve %R pozitif olur. Bu iki etkinin devinimi ile %R, A bölgesinde, pozitif ve negatif küçük değerler alır.

Şekil 4a'da B bölgesi, 72 saniyede çatlağın ilerlemeye başlaması ile başlar. Çatlak ilerledikçe, elektronların geçebileceği kesit azalır, elektriksel dirençte büyük artışlar olur. Çatlak ilerlemesinin %R üzerindeki etkisi, tarafsız eksen üzerindeki basınç bölgesinin etkisine baskın gelir. Çatlağın ilerlemesi, tarafsız eksenini yukarı kaydırırken, basınç bölgesi de daralır. Çatlak ölçerin kapasitesi 21 mm dir. 21 mm üzerinde çatlak boyu ölçemez çünkü ikiye yarılmış olur. Şekil 4a'da C bölgesinde, çatlak 21 mm ve daha uzundur, çatlak ölçer daha fazla sinyal gönderemediği için çatlak boyu ölçümü 21 mm kalmıştır. Oysaki çatlak örneğin üst yüzeyine doğru ilerlemeye devam eder ve elektriksel direnci arttırır.

B bölgesinde çatlak ile elektriksel direnç değişimi arasında doğrusal bir ilişki vardır (bakınız Şekil 4b). Bu doğrusal ilişkinin korelasyon katsayısı 0.95dir. Karışım C02 için, çatlak duyarlılığı 4.8, doğrusallık hatası %15 dir. Diğer karışımlardan elde edilen grafikler, sunulanlara benzer olduğu için burada tekrar verilmediler.

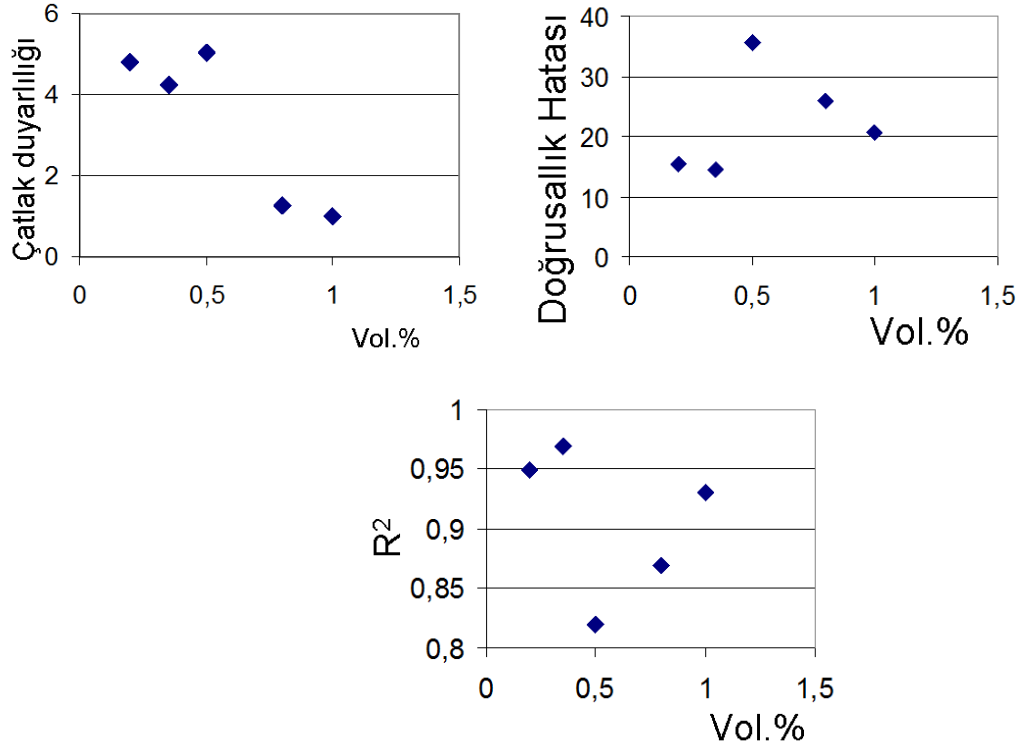


Şekil 3. Hacimsel 0.2% oranda 13 mm karbon lif içeren C02 karışımı eğilme testi a) Çatlak uzunluğu-zaman grafiği b) Kuvvet – zaman grafiği



Şekil 4. Hacimsel 0.2% oranda 13 mm karbon lif içeren C02 karışımı eğilme testi a) Elektriksel direnç değişimi- çatlak uzunluğu grafiği, tüm veri b) Elektriksel direnç değişimi- çatlak uzunluğu grafiği, doğrusal ilişki. ÇD=4.8; DH=%15.

Karışım içindeki lif oranı arttıkça, çatlak ilerlemesi ile kopan lif-lif ve lif-matris temas oranı düşer; elektriksel direnç daha az değişir dolayısıyla karışımın çatlak duyarlılığı Şekil 5a da görüldüğü gibi düşer. Karbon lifler ile birkaç direkt elektron iletim hattının oluştuğu perkolasyon oranı olan %0.5 hacimsel oranda, çatlak ilerlemesi, az sayıdaki direkt elektron iletim hatlarını keserek sistemi perkolasyon öncesi durumdan perkolasyon sonrası duruma sokar. Bu değişim, elektriksel dirençte büyük bir değişim yaratır, en büyük çatlak duyarlılığı elde edilir (Şekil 5a). Perkolasyon oranı olan %0.5 de, çatlak uzunluğu- %R grafiği doğrudan en fazla sapmayı gösterir; doğrusallık hatası en fazladır (Şekil 5b), korelasyon katsayısı R^2 en azdır (Şekil 5c). Perkolasyon oranı olan %0.5 de doğrusallıktan en büyük sapmanın olmasının nedeni, sistemin perkolasyon sonrası durumdan perkolasyon öncesi duruma girmesidir.



Şekil 5. Çentikli eğilme test sonuçları a) Çatlak duyarlılığı – lif % hacimsel oranı b) Doğrusallık hatası– lif % hacimsel oranı c) R²– lif % hacimsel oranı

Çatlak boyu ile elektriksel direnç değişimi arasındaki güçlü ilişki, kendi hasarını ölçen akıllı yapı malzemelerinin geliştirilmesi için ümit vericidir.

SONUÇLAR

Farklı karbon lif oranlarına sahip beş farklı çimento matrisli karışım tasarlanmıştır. Her karışımdan üç adet 4*4*16 cm ebatlarında prizma örnek hazırlanmıştır. Örneklere çentikli eğilme testi yapılmıştır. Test sırasında örnek elektriksel direnç değişimi ile çatlak boyu eş zamanlı ölçülmüştür. Bu ölçümler ilk defa bu projede yapılmaktadır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

1. Çimentolu kompozitler için çatlak duyarlılığı ve çatlak duyarlılığı için doğrusallık hatası tanımları ilk defa bu projede yapılmıştır.
2. Eğilme testi sırasında, çatlak ilerlemesinden önce, tarafsız eksenin üstündeki basınç bölgesinde liflerin kısalması ve mikro çatlakların ve mikro boşlukların kapanması nedeniyle elektriksel direnç düşer. Tarafsız eksenin altındaki çekme bölgesinde ise lifler uzar ve mikro çatlaklar açılır, elektriksel direnç artar. Bu iki etkinin devinimi ile çatlak ilerlemesi öncesi, elektriksel direnç pozitif ve negatif değerler alır.
3. Çatlağın ilerlemeye başlaması ile, elektronların geçebileceği alan daralır, elektriksel direnç artar.
4. Çatlak boyu ile elektriksel direnç değişimi arasında güçlü bir doğrusal ilişki bulunmuştur.

5. Lif oranının karışımda artması, çatlak ilerlemesi ile kopan lif-lif ve lif-matris temaslarında oransal azalma sağlar, elektriksel direnç daha az değişir, çatlak duyarlılığı düşer.
6. Perkolasyon oranı olan 0.5% lif oranında, çatlak ilerlemesi az sayıda olan liflerin oluşturduğu direkt elektron iletim hatlarını kopartır, sistemi perkolasyon sonrası durumdan perkolasyon öncesi duruma taşır ve en yüksek çatlak duyarlılığına neden olur.
7. Perkolasyon oranı olan %0.5 lif oranında, çatlak ilerlemesi ile sistem perkolasyon sonrası durumdan perkolasyon öncesi duruma taşındığı için, doğrusallıktan en büyük sapma gözlenir, en büyük doğrusallık hatası ve en düşük korelasyon katsayısı (R^2) elde edilir.

Kendi hasarını ölçen çimentolu kompozitlerin geliştirilmesi, yapı sağlığının ucuz, kolay ve güvenli bir şekilde gözlenmesi için önemlidir.

TEŞEKKÜRLER

Bu çalışmaya verdikleri destekten ötürü TÜBİTAK (proje no:110M221), Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. ve DowAksa A.Ş. ye teşekkür ederim. Dokuz Eylül Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümüne, Schimadzu mekanik test cihazını kullanma olanağı verdikleri için teşekkür ederim. Yrd. Doç. Dr. Tahir Kemal Erdem'e katkılarından dolayı teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- [1] Reza, F., Batson, G.B., Yamamuro, J.A., Lee, J.S., "Resistance changes during compression of carbon fiber cement composites" J. Mater. Civil. Eng. 15 (5) 476-483, 2003.
- [2] Chung, D.D.L., "Review functional properties of cement –matrix composites" J. Mater. Sci. 36 1315-1324, 2001.
- [3] Chung, D.D.L., "Self-monitoring structural materials" Mater. Sci. Eng. 57-78, 1998.
- [4] Fu, X., Chung, D.D.L., "Effect of curing age on the self-monitoring behavior of carbon fiber reinforced mortar" Cem. and Concr. Res. 27 (9) 1313-1318, 1997.
- [5] Fu, X., Ma, E., Chung, D.D.L., Anderson, W.A. " Self-monitoring in carbon fiber reinforced mortar by reactance measurement" Cem. and Concr. Res. 27 (6) 845-852, 1997.
- [6] Han, B., Guan, X., Ou, J. "Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors" Sens. and Actuators A 135 360-369, 2007.
- [7] Chiarello, M., Zinno, R. "Electrical conductivity of self-monitoring CFRC" Cem. and Concr. Comp. 27 463-469, 2005.
- [8] Chen, B. ve Liu, J. "Damage in carbon fiber –reinforced concrete, monitored by both electrical resistance measurement and acoustic emission analysis" Constr. and Build. Mater. 22 2196-2201, 2008.

- [9] Reza, F., Yamamuro, J.A., Batson, G.B. "Electrical resistance change in compact tension specimens of carbon fiber cement composites" *Cem. and Concr. Comp.* 26 873-881, 2004.
- [10] Teomete, E. ve Erdem, T.K. "Cement Based Strain Sensor: A Step to Smart Concrete" *Cement Wapno Beton* 2 78-92, March- April 2011.
- [11] Li, H., Xiao, H., Ou, J. "Electrical property of cement-based composites filled with carbon black under long-term wet and loading condition" *Comp. Sci. and Tech.* 68 2114-2119, 2008.
- [12] Li, H., Xiao, H., Ou, J. "Effect of compressive strain on electrical resistivity of carbon blackfilled cement –based composites" *Cem. and Concr. Comp.* 28 824-828, 2006.
- [13] Chung, D.D.L. "Cement –based electronics" *J Electroceramics* 6 (1) 75-88, 2001.
- [14] Chung, D.D.L. "Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material", *Composites Part B: Engineering* 31 511-526, 2000.