

AKILLI BETONUN GELİŞTİRİLMESİ

Egemen Teomete¹, Erman Demircilioğlu²

Özet

Yapı sağlığını çok fonksiyonlu akıllı malzemelerle yapılması, daha güvenilir ve ekonomik çözümler sunar. Bu çalışmada, iri agrega içeren pirinç lif takviyeli beton üzerinde kapsamlı deneyler sunuldu. Geliştirilen akıllı betonun gerinim hassasiyetini değerlendirmek için ilk olarak basınç ve yarma çekme deneyleri yapıldı. Ayrıca çatlak/hasar algılama yeteneğini değerlendirmek amacıyla çentikli eğilme deneyleri yapılmıştır. Elektrot tipi, akım tipi gibi farklı parametrelerin akıllı betonun basınç gerinim duyarlılığı üzerindeki etkisi sunuldu. Yarmada çekme deneyi ve çentikli eğilme deneyleri sırasında kendini algılamayı yöneten mekanizmalar açıklanmıştır. Sonuçlar, düşük maliyetli pirinç lifleri içeren akıllı betonun yüksek gerinim duyarlılığı sergilediğini göstermektedir. Bulgular, geliştirilen akıllı betonun, kendi hasarını ve gerilmesini algılayabilen, yük taşıyan çok işlevli bir malzeme olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

1. GİRİŞ

Yapı sağlığının izlenmesi için kullanılan gerinim ölçerler noktasal ölçüm alırlar, tüm yapıyı izlemek için çok sayıda kullanılmaları gerekir; duyarlılık ve dayanıklılıkları düşüktür, kısa süreli kullanılabilirler [1]. Literatürde farklı iletken malzemeler kullanarak gerinime ve/veya hasara duyarlı çimentolu kompozitler geliştirilmiştir [2-20].

Bu bildiride yazar tarafından daha önce yayımlanan çalışması [17], davetli bildiri sunumu olarak dergi ve kongre editörlerinin izniyle sunulmuştur.

Development of Smart Concrete

Structural health monitoring with multifunctional smart materials provides more reliable and economical solutions. In this study, extensive experiments on brass fiber reinforced concrete containing coarse aggregate were presented. Compressive and split tensile tests were performed to evaluate the strain sensitivity of the developed smart concrete. In addition, notched bending tests were carried out to evaluate the crack/damage detection ability. The effects of different parameters such as electrode type, current type on the compressive strain sensitivity of smart concrete were presented. Mechanisms governing self-sensing during split tensile and notched bending tests were described. The results showed that smart concrete containing low-cost brass fibers exhibits high strain sensitivity. The developed smart concrete can be used as a load-bearing multifunctional material that can sense its own strain and damage.

2. Malzeme ve Metod

Bu çalışmada akıllı beton geliştirmek için kullanılan malzemeler arasında CEMII 42.5R Portland çimentosu, kırılmış kireç taşı agregaları, polikarboksilat bazlı süper akışkanlaştırıcı, silis dumanı, su ve pirinç lifleri vardır. Toplam agregaların %60'ının tane boyutu 0 - 5 mm arasında, geri kalan agregaların tane boyutu ise 5 - 15 mm arasındadır. Su/bağlayıcı oranı 0.37 iken silis dumanı/bağlayıcı oranı 0.10'dur. Süper akışkanlaştırıcı, bağlayıcının ağırlığına göre %1 oranında kullanıldı. Ön incelemelerden elde edilen sonuçlara göre ticari olarak temin edilebilen atık pirinç lif %0.8 hacim oranında kullanılmıştır. Liflerin ortalama çapı ve uzunluğu sırasıyla 0.5 mm ve 1.5 mm idi. Akıllı betonun

içeriği Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Akıllı betonun içeriği (kg/m³)

Pirinç lif	Çimento	Kaba agrega	İnce agrega	Silis dumanı	Su	Akışkanlaştırıcı
70	499	539	808	55	205	6

Geliştirilen akıllı betonun elektriksel tepkisini ölçmek için dört elektrotlu bir yöntem benimsendi. Dört elektrotlu ölçüm yönteminde, akım beslemesi ve gerilimi ölçmek için iki farklı elektrot çifti kullanılır. Hem akım kaynağı hem de gerilim ölçümlerinin aynı elektrot çifti kullanılarak gerçekleştirildiği iki elektrotlu yöntem ile karşılaştırıldığında, dört elektrotlu yöntem daha doğru ölçümler sağlar.

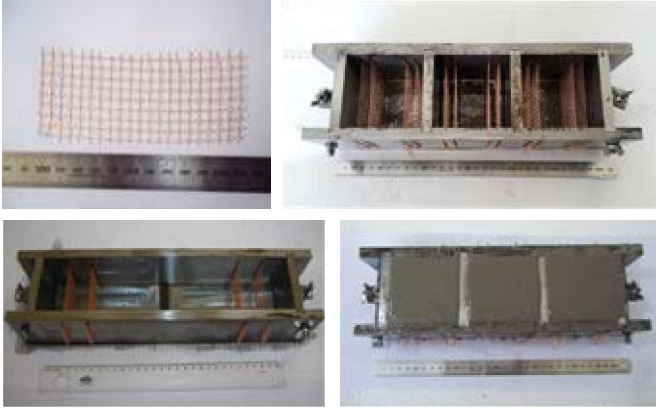
Bakır tel ağlar elektrot olarak kullanıldı ve dört elektrotlu ölçümler için kalıplara gömüldü. Şekil 1(a)'da gösterilen saf bakır

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

2) Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir

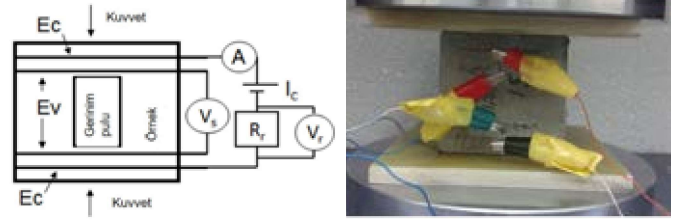
(*) Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen BETON 2023 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

tel örgünün çapı 0.6 mm'dir ve kare delik boyutu 5 mm'dir. Ölçümler için numune hazırlamak amacıyla Şekil 1(b)-(c)'de gösterildiği gibi 75 mm'lik kübik kalıplar ve 75x75x305 mm'lik prizmatik kalıplar kullanıldı. Kalıpların, elektrotların yerleştirilmesi için dış duvarların her iki yanında 55 mm uzunluğunda ve 2 mm genişliğinde dört adet yuvası vardı. Elektrotlar kalıba yerleştirildi ve ardından beton, Şekil 1(d)'de gösterildiği gibi döküldü. Numuneler dökümden 24 saat sonra kalıptan çıkarıldı. 20°C sıcaklıktaki suda 28 gün kürlendiler.



Şekil 1. (a) Bakır tel örgü elektrot; (b) elektrotlu küp kalıbı; (c) elektrotlu prizmatik kalıp; (d) betonun küp kalıba dökülmesinden sonra.

Akıllı betonun basınç birim şekil değiştirme hassasiyetini belirlemek amacıyla yukarıda açıklandığı gibi üç adet 75 mm küp numune döküldü ve kürlendi. 28 günlük kürlenmenin ardından numuneler kararlı durum nem içeriğine ulaşması için 7 gün süreyle laboratuvar ortamında bırakılmıştır. Basınç testlerinden önce, polarizasyon etkilerini ortadan kaldırmak ve kararlı durum elektriksel direnç ölçümleri elde etmek için numunelere 15 dakika boyunca 20 V DC uygulanmıştır. Birim şekil değiştirme ölçmek için metal folyo gerinim ölçerler kullanıldı. Testleri 0.5 mm/dakika yükleme hızıyla gerçekleştirmek için mekanik bir test makinesi kullanıldı. Basınç testi sırasında, dıştaki iki elektrot 20 V DC ile beslenirken içteki iki voltaj elektrotu (Ev), Şekil 2(a)'daki devre şemasında görüldüğü gibi numunenin elektrik potansiyelini ölçmek için kullanıldı. Numune ile seri olarak R=1000 Ohm değerinde bir referans direnç kullanılmış ve bunun elektriksel potansiyeli (Vr) ölçülmüştür. Devredeki akım (Ic), numuneye seri bağlı bir ampermetre (A) ile ölçülmüştür. Ölçülen akım, gerilimler, birim şekil değiştirme ve yük, test sırasında saniyede 10 defa kaydedildi. Şekil 2(b)'de görüldüğü gibi numuneyi çelik plakalardan izole etmek için cam elyaf takviyeli polimer kompozit plakalar kullanıldı. Akıllı betonun basınç dayanımı EN 12390-3 standardına göre 150 mm boyutunda küp numuneler üzerinde 3000 kN kapasiteli hidrolik beton presi kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 2. (a) Devre şeması ve (b) basınç birim şekil değiştirme hassasiyeti deneyi

Ohm kanunu, testin herhangi bir anında devredeki akımı (I_c) ve numunenin direncini (R_s) belirlemek için kullanıldı. Her numunenin elektrik direncindeki %R olarak gösterilen yüzde değişimi belirlemek için aşağıdaki denklem kullanıldı:

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

burada R_{so} , testin başlangıcında ölçülen numunenin direncidir. Gerinim duyarlılığı performansını değerlendirmek için iki parametre, duyarlılık (K) ve doğrusallık (LE) hesaplandı. Duyarlılık, elektrik direncindeki değişimin gerinimdeki ölçülen değişime ($\Delta\epsilon$) oranıdır ve şu şekilde hesaplanır:

$$K = \frac{(R_s - R_{so}) / R_{so}}{\Delta\epsilon} \quad (2)$$

Duyarlılık arttıkça gerinim duyarlılığı da artar. Metal folyo gerinim ölçerlerin ölçüm faktörü 2'dir.

Doğrusallık hatası, %R-gerinim eğrisi ve ona en uygun doğrusal regresyon çizgisi arasındaki en büyük farkın (ϵ_{max}), en büyük %R oranı olarak ölçülür ve aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$\%LE = \left(\frac{\Delta_{max}}{\%R_{fs}} \right) \times 100 \quad (3)$$

Akıllı betonun çekme gerinim duyarlılığını belirlemek için yukarıda tanımlandığı gibi 7.5 cm'lik üç küp numune hazırlandı. 28 günlük kürlenmenin ardından numuneler 7 gün boyunca sabit nem içeriğine sahip olacak şekilde laboratuvar ortamında bırakılmış ve dökümden 35 gün sonra test edilmiştir. Numuneler, yarmada çekme testinden hemen önce 15 dakika boyunca 20 V DC ile polarize edildi. Test sırasında yatay gerinim, gerinim ölçerler kullanılarak ölçüldü. Yarmada çekme testi 2.5 mm/dk. yükleme hızıyla gerçekleştirildi. Testte EN 12390-6 standardına uygun küresel yükleme plakaları kullanıldı. Deneydeki elektrik devresi basınç deneyindeki ile aynıdır, Şekil 3a'da sunuldu. Deneyde yatay çekme gerinim nedeniyle düşey çatlakla örnek yenildi (Şekil 3b-c).

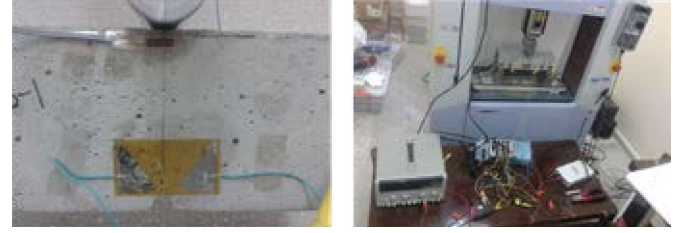
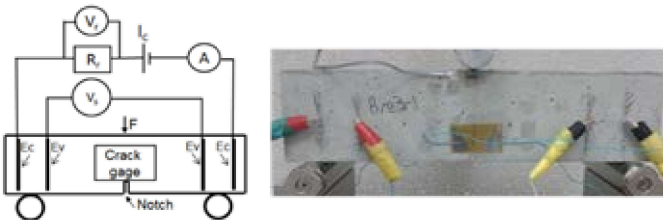
Elektrik direncindeki yüzde değişim (%R), çekme gerinim duyarlılığı (TK) ve çekme doğrusallık hatası (TLE) sırayla denklemler 1,2,3 kullanılarak belirlendi.



Şekil 3. Yarmada çekme deneyi: (a) devre şeması, (b) testteki numune, (c) test sonrası numune

Akıllı betonun çatlak uzunluğu hassasiyetini belirlemek için çentikli eğilme deneyleri yapılmıştır. 75×75×305 mm boyutlarında üç adet prizmatik numune dökülerek 28 gün kür işlemine tabi tutulmuş, 7 gün süreyle laboratuvar ortamında kararlı hal nemine sahip olacak şekilde bırakılmış ve dökümden 35 gün sonra test edilmiştir. Kalıpta üçgen prizma kullanılarak orta açıklıkta çatlak başlangıç noktasını belirleyen bir çentik oluşturuldu. Numuneler testlerden önce 15 dakika boyunca 20 V DC ile polarize edildi. Yükleme hızı 0.1 mm/dk. alındı. Eğilme mukavemeti EN 12390-5 standardına göre 10 mm çentik derinliği dikkate alınarak kesit derinliği 65 mm'ye düşürülerek belirlenmiştir.

Test sırasında, dıştaki iki akım elektrotu (Ec) 20 V DC ile beslenirken, içteki iki elektrot (Ev), Şekil 4a'da görüldüğü gibi numune (Vs) üzerindeki potansiyel farkını ölçmek için kullanıldı. Referans direncinin potansiyel farkı $R_r=1000 \text{ Ohm}$ V_r olarak ölçüldü. Akım numuneyle seri hâlinde ampermetre ile ölçülmüştür. Çatlak uzunluğu Şekil 4b-c'de gösterildiği gibi TML marka çatlak masterları ile ölçülmüştür. Çatlak ölçerin 0.5 mm aralıklı iletken telleri var. Çatlak ilerledikçe teller kesildi, bu da çatlak ölçerin direnç değişimini ölçerek çatlak uzunluğunun ölçülmesine olanak sağladı. Yükleme plakasının yükü, potansiyel farkları (V_s ve V_r), akımı (I_c), çatlak uzunluğu ve plaka hareketi saniyede 10 defa kaydedildi. Numunenin elektriksel direnci Ohm kanunu ile bulunmuş ve direncin yüzde değişimi Denklem (1) ile hesaplanmıştır.



Şekil 4. Eğilme deneyi: (a) devre şeması, (b) testteki numune, (c) testin sonunda çatlak ve (d) testler için kullanılan ekipman.

Bu çalışmada performans ölçüleri olarak yazar tarafından önceki çalışmalarında tanımlanan çatlak duyarlılığı (CS) ve çatlak duyarlılığı için doğrusallık (LEC) kullanılmıştır. Çatlak hassasiyeti, birim çatlak uzunluğu başına elektrik direncindeki değişiklik olarak tanımlanır ve şu şekilde verilir:

$$CS = \frac{(R_s - R_{so}) \times 100}{R_{so} \times CL} \quad (4)$$

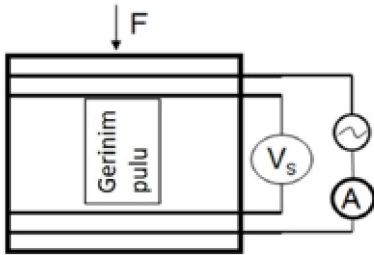
burada R_s , numunenin, deneyin herhangi bir anındaki elektrik direncidir, R_{so} , numunenin deneyin başlangıcında herhangi bir çatlak olmaksızın elektrik direncidir ve CL , deneyin herhangi bir zamanındaki çatlak uzunluğudur. Çatlak duyarlılığı için doğrusallık hatası (LEC), %R-çatlak uzunluğu eğrisine ona en küçük kareler ile uyan çizginin maksimum farkının, %R'nin en büyük değerinin oranı olarak tanımlanır. Çatlak uzunluğunun ölçümündeki hata arttıkça LEC artar.

Elektriksel ölçümler için gömülü elektrotların kullanımına alternatif bir yaklaşım, numunenin çevresine bakır bantların, tellerin veya gümüş boyanın sarıldığı çevresel elektrotların kullanılmasıdır. Çevresel elektrot konfigürasyonunun etkisini araştırmak için akıllı beton kullanılarak üç adet 75 mm'lik kübik numune ve üç adet 40x40x160 mm boyutunda prizmatik numune döküldü. Numuneler 28 gün süreyle kürlendi. Şekil 5'te gösterildiği gibi dört elektrotlu ölçümler için elektrotlar oluşturmak amacıyla numunelerin üzerine iletken epoksi içeren bakır bant yapııştırıldı. Malzemelerin kesiti boyunca homojen bir elektron dağılımı sağlamak amacıyla test için prizmatik numuneler de kullanıldı; elektrotlar arasında daha büyük mesafeler vardı ve elektrot mesafesinin kesit alanına oranı daha büyüktü, bu da kübik numune geometrisine kıyasla malzemeye daha fazla elektronun nüfuz etmesini sağladı. Küpler polarize edildi ve 20 V DC ile test edilirken prizmatik numunelere 30 V DC uygulandı. Basınç deneyi ve sonuçların analizi daha önce açıklandığı gibi uygulandı.



Şekil 5. Çevresel elektrotlarla basınç deneyi: (a) kübik numune ve (b) prizmatik numune

AC akımla gerinim hassasiyetini belirlemek için 75 mm'lik üç kübik numune hazırlandı ve basınç altında test edildi. Basınç testi sırasında, dıştaki iki elektrota ortalama karekökü (RMS) 14 V (genlik yaklaşık 20 V) ve 50 Hz frekansı olan bir AC akımı sağlanırken, içteki iki elektrot potansiyel farkın RMS'sini ölçmek için kullanıldı. Şekil 6'da gösterildiği gibi numunenin (Vs), devredeki akımın RMS'si, gerinim ölçer verileri ve kuvvet de ölçüldü.

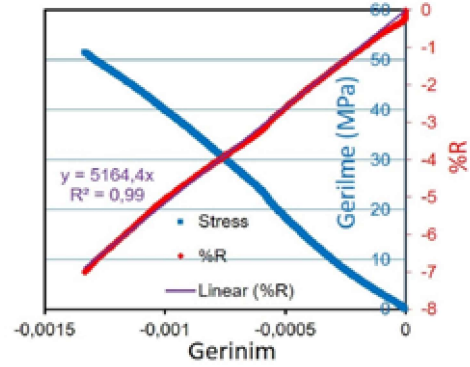


Şekil 6. Alternatif akımla basınç deneyi için elektrik devresi.

3. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Tüm deneysel çalışmaların sonuçları ve çeşitli parametrelerin akıllı betonun gerinim algılama davranışı üzerindeki etkisi bu bölümde sunulmuştur.

Şekil 7, monotonik basınç yükü altında küp akıllı beton numunesinin gerinim-gerilme-elektrik direnci değişimi (%R) grafiğini göstermektedir. Geliştirilen betonun elektriksel direnci artan basınç yükleriyle birlikte azalmıştır. Bunun nedeni, basınç yüklerinin mikro boşlukları kapatması, pirinç lifler ile matris arasındaki teması arttırması ve elektron ve iyon transferini arttırmasıdır. Uygulanan gerinim ile elektriksel dirençteki değişim arasında $R^2=0.99$ korelasyon katsayısı ile güçlü bir doğrusal ilişki gözlemlendi. Akıllı betonun basınç yükleri altındaki duyarlılığı, ticari metal gerinim ölçerlerin yaklaşık 27 katı olan 54 olarak bulunmuştur. Doğrusallık hatası, çok işlevli bir akıllı malzeme için kabul edilebilir olan %6.6 olarak bulundu.



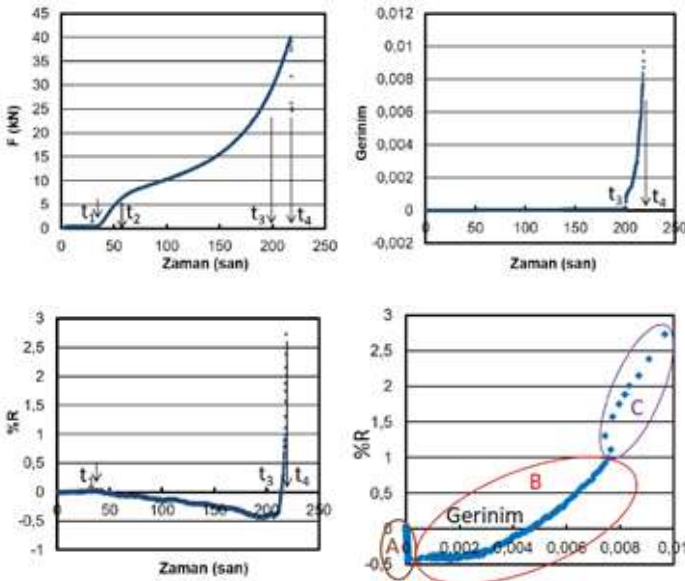
Şekil 7. Basınç altındaki akıllı beton için gerilim-gerinim-%R grafiği.

Çekme gerinim hassasiyetini belirlemek için akıllı beton üzerinde yarmada çekme testi yapılmıştır. Testin başlangıcından Şekil 8a'daki kuvvet-zaman grafiğinde gösterilen t_1 zamanına kadar ahşap prizma üzerindeki pürüzlülük ezilmiştir. t_1 zamanında ahşap prizmaların yüzey pürüzlülüğü ortadan kalktığı için ahşap prizma ile numune arasındaki temas sertliği artmış, bu da kuvvet-zaman grafiğinin eğiminin artmasına neden olmuştur. Bu etki Şekil 8c'de t_1 zamanında %R eğiminin artmasında da gözlemlenebilir.

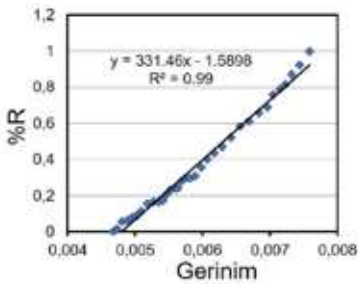
Ahşap prizmanın sertliği akıllı betona göre çok daha düşük olduğundan uygulanan basıncın büyük bir kısmı ahşap prizmalarda t_1 ile t_2 zamanları arasında deformasyonlara neden olmuştur. t_2 anında, prizma ezildikçe ahşap prizmaların sertliği artmaya başladı. Dolayısıyla, Şekil 8a'daki kuvvet-zaman grafiğinin eğimindeki artıştan da görülebileceği gibi, t_2 süresinden sonra akıllı betonun aldığı yük payı daha hızlı arttı. t_3 anında tamamen ezilen ahşap çubuklar, yükün tamamen akıllı beton tarafından taşınmasına neden oldu, Şekil 8a'daki kuvvet-zaman eğrisinin eğimini ve Şekil 8b'deki şekil değiştirme-zaman grafiğinin eğimini artırmıştır. t_3 zamanına kadar, testin basınç etkisi numunenin davranışına hâkim oldu ve Şekil 8c'de görüldüğü gibi %R'de bir düşüşe yol açtı. t_3 zamanında, %R-zaman grafiğinde, hızla artan çekme gerilimi altında %R'nin artmaya başladığı bir bükülme noktası gözlemlendi. t_4 zamanında akıllı beton, Şekil 3c'de görüldüğü gibi gevrek çatlak yayılmasıyla yenildi.

Testin tamamı boyunca %R'nin gerinimle değişimi Şekil 8d'de gösterilmektedir. A Bölgesi, ahşap prizmalar etrafındaki yerel basınç şekil değiştirmelerinin negatif %R geliştirdiği t_1 - t_3 arasındaki zamanlara karşılık gelir. Bu yerel basınç gerinimleri ahşap prizmalarla numunenin ara yüzeyindeydi ve numunenin ortasında bulunan gerinim ölçer ile ölçülmedi. B bölgesi, çekme geriniminin hızlı bir şekilde arttığı ve %R'de bir artışa yol açtığı t_3 zamanında başladı. B bölgesi, B ve C bölgeleri arasındaki %R-gerinim grafiğinin eğiminde ani bir değişikliğin olduğu çatlak ilerlemesinin başlamasıyla

sona ermektedir. C bölgesi, gevrek çatlak yayılımının meydana geldiği 1 saniyeden daha kısa bir zaman aralığını temsil etmektedir. B bölgesindeki %R-gerinim grafiğindeki %R'nin pozitif kısmı, akıllı betonun çekme gerinimini algılama yeteneğini temsil eder. Pozitif %R değerleri için B bölgesindeki %R ve gerinimin değişimi Şekil 9'da sunulmuştur. Çekme gerinimi ve %R, güçlü doğrusal ilişkiyi kanıtlayan $R^2=0.99$ 'luk bir korelasyon katsayısına sahipti. Çekme gerinim duyarlılığı 3 ve doğrusallık hatası %6.6 idi. Çekme gerilimi altında mikro boşluklar açılmış, lif-lif ve matris-lif arasındaki temas azalmış, bu da elektrik direncinin artmasına neden olmuştur. Bu nedenle akıllı betonda çekme gerilimi altında piezodirenç etkisi tespit edilmiştir. Yarmada çekme testinin karmaşık gerilme durumu altında bile akıllı betonun, çekme gerinimi ile %R arasında doğrusal bir ilişki sergileyebildiğini görmek ilginçtir. 15 mm iri agregalı kendi gerinimini algılayan betonun yarmada çekme testi altında %R-gerinim ilişkisinin değerlendirilmesi literatürde ilk kez yazarlar tarafından sunulmuştur.

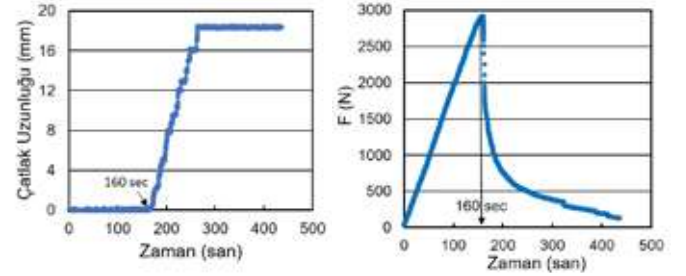


Şekil 8. Akıllı betonun yarmada çekme testi: (a) Kuvvet- zaman; (b) Gerinim-zaman; (c) %R - zaman; ve (d) %R-gerinim grafikleri.



Şekil 9. Akıllı betonun yarmada çekme testi için %R-gerinim grafiği.

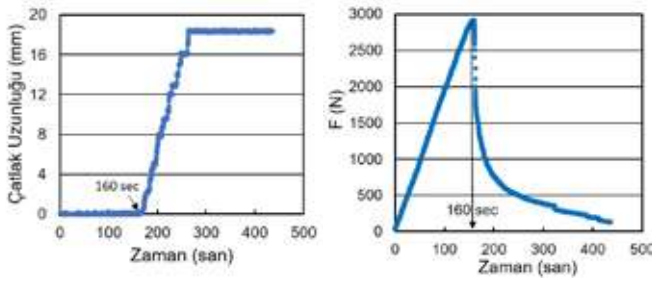
Çatlak uzunluğu hassasiyetini belirlemek amacıyla elektriksel direnç ve çatlak uzunluğunun eş zamanlı ölçümüyle çentikli bükme testi uygulandı. Şekil 10a-b'de gösterildiği gibi çatlağın testin 160. saniyesinde başlaması, kiriş numunesinin rijitliğinin azalması nedeniyle kuvvetin maksimum değerine ulaştıktan sonra hızla azalmasına neden olmuştur.



Şekil 10. Çentikli eğilme deneyi sırasında (a) çatlak uzunluğunun ve (b) uygulanan kuvvetin zamanla değişimi

Testin tüm süresi boyunca %R ve çatlak uzunluğunun değişimi Şekil 11a'da sunulmuştur. Şekil üç bölgeye ayrılmıştır: A, B ve C bölgeleri. A bölgesi, testin başlangıcından 160. saniyedeki çatlağın başlangıcına kadar olan süreyi kapsamaktadır. A bölgesinde elektrik direnci küçük pozitif ve negatif değerler arasında salınıyordu. Kirişin tarafsız eksenindeki mikro boşlukları kapatan ve lif-lif ve matris-lif temasını artıran basınç bölgesi nedeniyle negatif %R gözlemlendi. Tarafsız eksenin altındaki mikro çatlaklar ve boşluklar geliştiren çekme bölgesi pozitif %R değerlerine yol açtı. Bu mikro çatlaklar ve boşluklar, elektron ve iyon transferini engelleyerek elektrik direncini arttırdı. Bu basınç ve çekme mekanizmalarının rekabeti, çatlak başlangıcına kadar elektriksel direncin pozitif ve negatif değerler arasında salınmasına yol açtı. Çatlak, B bölgesinin başlangıcında yayılmaya başlamıştır. Çatlağın yayılması, Şekil 11a'da görüldüğü gibi elektron ve iyonların geçebileceği kesit alanını azaltmış ve elektrik direncinin artmasına neden olmuştur. Tarafsız eksen üzerindeki basınç şekil değiştirmeleri kesitteki azalmayla aşılmıştır. Çatlak ölçer maksimuma ulaştığında daha fazla çatlak uzunluğu ölçümü raporlayamadı. Bu, Şekil 11a'daki C bölgesinin başlangıcını işaret etmektedir. C bölgesinde, çatlak ölçer daha fazla okuma kaydedemedi ancak çatlaklar yayılmaya devam etti ve Şekil 11a'da gözlemlendiği gibi elektrik direncini arttırdı.

B bölgesindeki veriler Şekil 11b'de yeniden çizilmiştir. %R ile çatlak uzunluğu arasındaki değişim, güçlü doğrusal ilişkiyi gösteren $R^2=0.95$ korelasyon katsayısına sahiptir. Çatlak duyarlılığı (CS) 1 olarak hesaplandı ve çatlak duyarlılığının (LEC) doğrusallık hatası %15.4 oldu. CS ve LEC değerleri literatürde ilk kez agrega büyüklüğü 15 mm ve daha büyük olan betonlar için rapor edilmiştir.



Şekil 11. Deneyin tüm süresi boyunca (a) ve B bölgesi için (b) çatlak uzunluğu ile %R'nin değişimi

Akıllı betonun basınç, çekme, eğilme mukavemetleri, iletkenlik, basınç gerinim duyarlılığı ve doğrusallık hatası ortalamaları ve standart sapmaları Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Akıllı betonun basınç, çekme, eğilme mukavemetleri, iletkenlik, basınç gerinim duyarlılığı ve doğrusallığı.

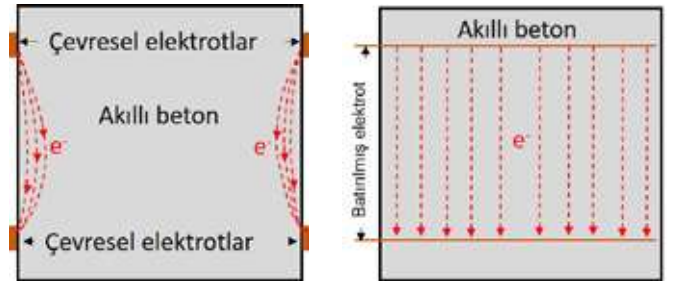
	Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	İletkenlik (1/(Ohm.m))	Duyarlılık	LE %
Ortalama	59	4.4	4.3	0.0028	54	6.6
Standart Sapma	3.1	0.13	0.58	7.3E-05	9.5	2.2

Üç adet kübik ve üç adet prizmatik akıllı beton numunesi basınç altında çevresel elektrot yöntemi ile test edilmiştir. Elektrotlar iletken yapıştırıcılara sahip bakır bantlardı. Gömülü ve çevresel elektrot durumları için 20V DC ile test edilen akıllı küp beton numunelerin ve 30 V DC ile test edilen prizmatik numunelerin akım ve gerilimleri Tablo 3'te sunulmuştur. Çevresel elektrot ile test edilen kübik ve prizmatik numunelerin akım ve gerilim değerleri oldukça düşük çıkmıştır. Bu değerler, gömülü elektrotlu numune için, çevresel elektrotlu numunelere kıyasla önemli ölçüde daha yüksektir. Çevresel elektrotlar kullanıldığında, bakır bandın temas direnci nedeniyle elektronlar malzemeye neredeyse hiç nüfuz edemez. Elektronların çoğu numunenin yüzeyinden akar ve numunenin tam kesiti, Şekil 12a'da gösterildiği gibi elektron iletmez. Öte yandan, ölçüm için gömülü elektrotlar kullanıldığında, Şekil 12b'de gösterildiği gibi elektronlar numunenin kesitine nüfuz etmiş ve numunenin tüm kesiti elektron ve iyon taşınmasında etkili olmuştur.

Çevresel elektrotlara sahip akıllı beton numuneleri için, basma testleri sırasında uygulanan gerinim ile %R arasında doğrusal bir ilişki yoktu. Bu nedenle akıllı beton uygulamaları için test sonuçları, gömülü elektrot yönteminin elektriksel ölçümler için daha uygun bir yöntem olabileceğini düşündürmektedir.

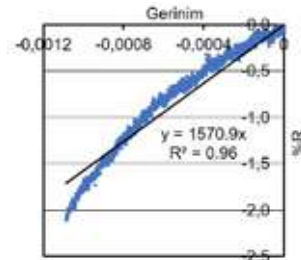
Tablo 3. Gömülü ve çevresel tip elektrotların karşılaştırılması.

Örnek	Akım (A)	Elektrik Gerilimi (V)
Küp batık elektrot (20 V DC Input)	4.5×10^{-3}	10.05
Küp çevresel elektrot (20 V DC Input)	7.4×10^{-5}	0.081
Prizma çevresel elektrot (30 V DC Input)	6.7×10^{-6}	0.008



Şekil 12. Akıllı beton içinden elektron ve iyon akışı: a) Çevresel elektrot yöntemi b. Batırılmış elektrot yöntemi

Monotonik basınç altında AC akımıyla üç akıllı beton örneği test edildi. Şekil 13, uygulanan gerinim ile %R arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Ayrıca AC ve DC akımla test edilen numuneler için elde edilen ortalama duyarlılık ve doğrusallık hatası değerleri Tablo 4'te sunulmuştur. DC akımla yapılan testlerden elde edilen duyarlılık ($K=54$), AC akımıyla testler ($K=18$) verdi. Akıllı beton, DC akımı kullanıldığında gerilime karşı daha duyarlıydı. AC testleri için doğrusallık hatası (%LE) DC testlerinden daha yüksek olup, gerinim ve %R grafiği ile en iyi uyum çizgisi arasındaki korelasyon katsayısı (R^2) DC testleri için 0.99 iken AC testleri için 0.96 olarak bulunmuştur. Böylece, DC akım ölçümleri daha iyi gerinim duyarlılığı ve daha düşük doğrusallık hatası vermiştir.



Şekil 13. AC akım ile basınç deneyi sonucu.

Tablo 4. AC ve DC akım basınç deneyi sonuçları.

	Duyarlılık (K)	Doğrusallık hatası (LE%)	R^2
DC	54	6	0.99
AC	18	19	0.95

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 15 mm boyutuna kadar iri agrega içeren akıllı beton geliştirilmiş ve farklı yükleme koşullarında karakterize edilmiştir. Geliştirilen akıllı betonun özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

1. Akıllı beton, basınç ve çekme yüklemeleri sırasında piezodirenç özelliği vardır. Basınç yüklemesi mikro boşlukları ve çatlakları kapatmış, piring lifleri ile lif-matriks arasındaki teması arttırmış, elektron ve iyon transferini arttırmıştır, elektrik direncinin azaltmıştır. Öte yandan çekme gerinimi mikro çatlak ve boşlukların açılmasına - genişlemesine neden olmuş, lif - lif ve matris arasındaki teması azaltmış, elektron ve iyon transferini engellemiş; elektriksel direncin artmasına neden olur. Akıllı betonun duyarlılığı basınç yüklemesi için 54, çekme yüklemesi için 3 iken doğrusallık hatası her iki yükleme durumunda da %6.6 dır. Her iki yükleme durumu için de gerinim ile elektrik direncindeki değişiklik arasında 0.99 korelasyon katsayısıyla güçlü bir doğrusal ilişki vardı. Piring lifli betona yarmada çekme testi ile gerinim duyarlılık deneyi ilk defa bu çalışmada yapıldı ve ilgili mekanizmalar açıklandı.

2. Akıllı betonun çatlak uzunluğu hassasiyeti 1'dir ve akıllı betonun çatlak uzunluğu ile elektrik direncindeki değişimi güçlü bir doğrusal ilişkiye sahiptir. Sonuçlar, akıllı betonun, gerinimle birlikte hasarını da, yani çatlak uzunluğunu da algılayabildiğini ortaya koyuyor. Akıllı betonun çatlak algılamasına yönelik çentikli eğilme testini yöneten mekanizmalar ilk kez açıklandı.

3. Batırılmış elektrot, çevresel elektrotla göre daha iyi sonuçlar verdi.

4. DC akıma göre, AC akımıyla ölçüm sırasında daha düşük bir duyarlılık ve daha yüksek doğrusallık hatası gözlemlendi. Genel olarak, bu çalışmada geliştirilen akıllı beton, hızlı, sağlam ve ekonomik bir yapısal sağlık izleme tekniğini mümkün kılabilir, yapısal güvenliği artırır.

Teşekkürler

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), bu çalışmayı "Akıllı Beton Üretimi" başlıklı 213M452 numaralı proje ile desteklemiştir. Yazarlar, malzeme tedariki için Batıçim ve Batıbeton AŞ'ye, Sika Yapı Kimyasalları AŞ'ye, BASF AŞ'ye ve BMS Metal AŞ'ye teşekkür eder.

Kaynaklar

[1] Chung, D. D. L., "Review functional properties of cement -matrix composites," *J Mater Sci*, vol. 36, no. 6, pp. 1315-1324, 2001, doi: 10.1023/A:1017522616006.

[2] Dong, W., Li, W., Tao, Z., Wang, K., "Piezoresistive properties of cement-based sensors: Review and perspective," *Construction and Building Materials*, vol. 203, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.081.

[3] Monteiro, A. O., Cachim, P. B., Costa, P. M. F. J., "Self-sensing piezoresistive cement composite loaded with carbon black particles," *Cem Concr Compos*, vol. 81, 2017, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.04.009.

[4] Wang, H., Gao, X., Wang, R., "The influence of rheological parameters of cement paste on the dispersion of carbon nanofibers and self-sensing performance," *Constr Build Mater*, vol. 134, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.176.

[5] Liu, Q., Wu, W., Xiao, J., Tian, Y., Chen, J. and Singh, A., "Correlation between damage evolution and resistivity reaction of concrete in-filled with graphene nanoplatelets," *Constr Build Mater*, vol. 208, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.036.

[6] Ozbulut, O. E., Jiang, Z., and Harris, D. K., "Exploring scalable fabrication of self-sensing cementitious composites with graphene nanoplatelets," *Smart Mater Struct*, vol. 27, no. 11, 2018, doi: 10.1088/1361-665X/aae623.

[7] Al-Dahawi, A., Yıldırım, G., Öztürk, O., and Şahmaran, M., "Assessment of self-sensing capability of Engineered Cementitious Composites within the elastic and plastic ranges of cyclic flexural loading," *Constr Build Mater*, vol. 145, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.236.

[8] G. Yıldırım, M. H. Sarwary, A. Al-Dahawi, O. Öztürk, Ö. Anıl, and M. Şahmaran, "Piezoresistive behavior of CF- and CNT-based reinforced concrete beams subjected to static flexural loading: Shear failure investigation," *Constr Build Mater*, vol. 168, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.124.

[9] Ding, S., Ruan, Y., Yu, X., Han, B., and Ni, Y. Q., "Self-monitoring of smart concrete column incorporating CNT/NCB composite fillers modified cementitious sensors," *Constr Build Mater*, vol. 201, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.203.

[10] D'Alessandro, A., Rallini, M., Ubertini, F., Materazzi, A. L., and Kenny, J. M., "Investigations on scalable fabrication procedures for self-sensing carbon nanotube cement-matrix composites for SHM applications," *Cem Concr Compos*, vol. 65, 2016, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.11.001.

[11] Teomete, E., "Transverse strain sensitivity of steel fiber reinforced cement composites tested by compression and split tensile tests," *Constr Build Mater*, vol. 55, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.016.

- [12] Teomete, E., and Kocyigit, O. I., "Tensile strain sensitivity of steel fiber reinforced cement matrix composites tested by split tensile test," **Constr Build Mater**, vol. 47, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.095.
- [13] Teomete, E., "Measurement of crack length sensitivity and strain gage factor of carbon fiber reinforced cement matrix composites," **Measurement (Lond)**, vol. 74, 2015, doi: 10.1016/j.measurement.2015.07.021.
- [14] Teomete, E., "The effect of temperature and moisture on electrical resistance, strain sensitivity and crack sensitivity of steel fiber reinforced smart cement composite," **Smart Mater Struct**, vol. 25, no. 7, 2016, doi: 10.1088/0964-1726/25/7/075024.
- [15] Mugisha, A., and Teomete, E., "Theoretical and experimental investigation of piezoresistivity of brass fiber reinforced concrete," **Computers and Concrete**, vol. 23, no. 6, 2019, doi: 10.12989/cac.2019.23.6.399.
- [16] Demircilioğlu, E., Teomete, E., and Ozbulut, O. E., "Strain sensitivity of steel-fiber-reinforced industrial smart concrete," **J Intell Mater Syst Struct**, vol. 31, no. 1, 2020, doi: 10.1177/1045389X19888722.
- [17] Demircilioğlu, E., Teomete, E., and Ozbulut, O. E., "Characterization of smart brass fiber reinforced concrete under various loading conditions," **Constr Build Mater**, vol. 265, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120411.
- [18] Kolatar, Ö. A., Teomete, E., and Kahraman, S., "The Strain Sensitivity of Coal Reinforced Smart Concrete by Piezoresistive Effect," **Teknik Dergi/Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers**, vol. 33, no. 1, 2022, doi: 10.18400/tekderg.634659.
- [19] Demircilioğlu, E., Teomete, E., Schlangen, E., and Baeza, F. J., "Temperature and moisture effects on electrical resistance and strain sensitivity of smart concrete," **Constr Build Mater**, vol. 224, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.091.
- [20] Demircilioğlu, E., Teomete, E., Ozbulut, O. E. and Kahraman, S. "Cross tension and compression loading and large-scale testing of strain and damage sensing smart concrete," **Constr Build Mater**, vol. 316, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125784.