



Çimento Esaslı Sensör Üretimi

Proje No: 110M221

Yrd. Doç. Dr. Egemen TEOMETE
Yrd. Doç. Dr. Tahir Kemal ERDEM

ARALIK 2013
İZMİR

ÖNSÖZ

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından, "Çimento Esaslı Sensör Üretimi" başlığıyla 110M221 numaralı proje olarak desteklenmiştir. Proje ekibi, TÜBİTAK'a verdiği destekten dolayı teşekkür eder.

Proje ekibi, projede kullanılan, akışkanlaştırıcıyı, silika dumanını, uçucu külü, lateksi sağladığı için Sayın Furkan Bircan'a ve Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.'ye; karbon lifleri sağladığı için Sayın Fulya Aktaş'a ve DowAksa İleri Kompozit Malzemeler Sanayi Ltd. Şti.; çelik lifleri sağladığı için Sayın Mehmet Yerlikaya'ya ve Beksa Çelik Kord San. Tic. Firmasına teşekkür eder. Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliğine, Makina Mühendisliğine ve İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Araştırma Merkezine, mekanik test cihazlarını kullanmamıza izin verdikleri için teşekkür ederiz.

Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği laboratuvar olanaklarını kullanmamızı sağlayan Sayın Prof. Dr. Serap Kahraman'a teşekkür ederiz.

Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi laboratuvar olanaklarını kullanmamıza izin verdiği için Sayın Doç. Dr. Halit Yazıcı'ya; laboratuvar ekipmanlarını kullanmamıza yardımcı olan Sayın Araş. Gör. Çağlar Yalçinkaya'ya teşekkür ederiz.

Proje süresince Dokuz Eylül Üniversitesi Rektörlüğünün ve Mühendislik Fakültesinin, projenin yürütülmesi için sağladıkları olanaklar için teşekkür ederiz.

Proje Ekibi,
İzmir, 2013

İÇİNDEKİLER

| | |
|--------------------------------------------------------------|------|
| ÖNSÖZ..... | i |
| İÇİNDEKİLER..... | ii |
| TABLolar LİSTESİ..... | iv |
| ŞEKİLLER LİSTESİ..... | v |
| ÖZET..... | viii |
| ABSTRACT..... | ix |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. LİTERATÜR ÖZETİ..... | 2 |
| 3. GEREÇ VE YÖNTEM..... | 5 |
| 3.1 Kullanılan Malzemeler..... | 5 |
| 3.1.1 Çimento..... | 5 |
| 3.1.2 Silika Dumanı..... | 5 |
| 3.1.3 Uçucu Kül..... | 6 |
| 3.1.4 Lateks..... | 7 |
| 3.1.5 Agregası..... | 7 |
| 3.1.6 Çelik Lif..... | 8 |
| 3.1.7 Karbon Lif..... | 9 |
| 3.1.8 Süper Akışkanlaştırıcı..... | 9 |
| 3.1.9 Bakır Ağ Elektrot..... | 10 |
| 3.1.10 Tasarlanan Karışımlar..... | 10 |
| 3.1.11 Özel Kalıplar ve Örneklerin Hazırlanışı..... | 12 |
| 3.2 Basınç Testi..... | 14 |
| 3.3 Yarmada Çekme Testi..... | 15 |
| 3.4 Çentikli Eğilme Testi..... | 16 |
| 3.5 ÇES Performans Parametreleri ve ÇES'in Belirlenmesi..... | 18 |
| 3.6 Yükleme Hız Etkisinin Araştırılması..... | 19 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.7 Birim Şekil Değişirme ve Çatlak Boyu ile %R Arasındaki Etkin Mekanizmaların Belirlenmesi..... | 19 |
| 3.8 Sıcaklığın Elektriksel Direnç Değişimine Etkisini Araştırmak için Yapılan Deney..... | 19 |
| 3.9 Nemin Elektriksel Direnç Değişimine Etkisini Araştırmak için Yapılan Deneyler..... | 21 |
| 3.10 ÇES'in Sensör Özelliklerinin Belirlenmesi..... | 22 |
| 3.11 Çapraz Yükleme Testleri..... | 22 |
| 3.12 Model Kolon içinde ÇES'in Test Edilmesi..... | 24 |
| 3.13 Model Kiriş içinde ÇES'in Test Edilmesi..... | 27 |
| 3.14 Aktif Madde Etkisinin Araştırılması..... | 29 |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA..... | 31 |
| 4.1 En İyi Karışımın ÇES Olarak Belirlenmesi..... | 31 |
| 4.2 Yükleme Hızının ÇES Üzerindeki Etkisi..... | 35 |
| 4.3 Birim Şekil Değişirme ve Çatlak Boyu ile %R Arasındaki Etkin Mekanizmalar..... | 37 |
| 4.3.1 Basınç Testinde Mekanizmalar..... | 37 |
| 4.3.2 Yarmada Çekme Testinde Mekanizmalar..... | 39 |
| 4.3.3 Çentikli Eğilme Testinde Mekanizmalar..... | 41 |
| 4.4 Sıcaklığın Elektriksel Direnç Değişimi Üzerindeki Etkisi..... | 43 |
| 4.5 Nemin Elektriksel Direnç Değişimi Üzerindeki Etkisi..... | 44 |
| 4.6 ÇES'in Sensör Özellikleri..... | 46 |
| 4.7 Çapraz Yüklemenin ÇES Üzerindeki Etkisi..... | 47 |
| 4.7.1 Çapraz Basınç Yüklemesi..... | 47 |
| 4.7.2 Çapraz Yarmada Çekme Yüklemesi..... | 49 |
| 4.8 ÇES'in Model Kolon İçinde Testi..... | 51 |
| 4.9 ÇES'in Model Kiriş İçinde Testi..... | 53 |
| 4.10 ÇES Bünyesindeki Aktif Maddelerin Etkisi..... | 54 |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 56 |
| KAYNAKLAR..... | 59 |
| EK 1: TASARLANAN KARIŞIMLAR..... | 62 |

TABLULAR LİSTESİ

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Tablo 3.1. Karbon lifin fiziksel ve mekanik özellikleri (üretici AKSA A.Ş. den alınan bilgiler)..9 | |
| Tablo 4.1 Lifsiz ve çelik lifli karışımların puanları ve standart sapmaları.....34 | |
| Tablo 4.2 Karbon lifli karışımların puanları ve standart sapmaları.....35 | |
| Tablo Ek 1.1. Çelik lif birinci grup karışımları (lif uzunluğu 6 mm).....62 | |
| Tablo Ek 1.2. Çelik lif birinci grup karışımları (lif uzunluğu 13 mm).....62 | |
| Tablo Ek 1.3. Çelik lif ikinci grup karışımları.....63 | |
| Tablo Ek 1.4. Karbon lif birinci grup karışımları (lif uzunluğu 6 mm).....63 | |
| Tablo Ek 1.5. Karbon lif birinci grup karışımları (lif uzunluğu 3 mm).....64 | |
| Tablo Ek 1.6. Karbon lif birinci grup karışımları (lif uzunluğu 13 mm).....64 | |
| Tablo Ek1.7. Karbon lif birinci grup karışımları (lif uzunluğu 16 mm).....65 | |
| Tablo Ek 1.8. Karbon lif ikinci grup karışımları.....65 | |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.1. CEM I 42,5 R çimentoya ait X ışını kırınımı analiz sonucu..... | 5 |
| Şekil 3.2. Silis dumanının taramalı elektron mikroskobu analizi..... | 6 |
| Şekil 3.3. Silis dumanına ait enerji dağılımlı spektrometre (EDS) analizi sonucu..... | 6 |
| Şekil 3.4. Uçucu küle ait X ışını kırınımı sonucu..... | 6 |
| Şekil 3.5. a) Projede kullanılan kumun elek analizi sonucu. b) Kumda ince malzeme miktarı..... | 7 |
| Şekil 3.6. Kuma ait X ışını kırınımı sonucu..... | 7 |
| Şekil 3.7. Çelik lif kesitinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri..... | 8 |
| Şekil 3.8. Çelik life ait enerji dağılımlı spektrometre (EDS) sonuçları a) yan yüzey ve b) kesit..... | 8 |
| Şekil 3.9 a) Karbon lifin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü b) Karbon life ait enerji dağılımlı spektrometre (EDS) analizi sonucu..... | 9 |
| Şekil 3.10. Bakır ağ teline ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri a) kesit, b) yan yüzey..... | 10 |
| Şekil 3.11. Bakır ağ teline ait enerji dağılımlı spektrometre (EDS) analizi sonucu..... | 10 |
| Şekil 3.12. 5 cm ebatlı küp kalıp. a-b-c) Bakır elektrotlar ve özel kalıp. b) Karışım döküldükten sonra..... | 13 |
| Şekil 3.13. 4*4*16 cm ebatlı küp kalıp. a-b-c) Bakır elektrotlar ve özel kalıp. b) Karışım döküldükten sonra d) Örnekler kür olurken..... | 13 |
| Şekil 3.14. Basınç testi a) Örnek üzerindeki gerinim pulu b) Test elektrik devresi c) Test yapılırken d) Testte kullanılan ekipmanlar..... | 14 |
| Şekil 3.15. Yarmada çekme testi a) Devre şeması b) Örnek test edilirken c) Test sonrası (Örnek ortasında çatlak görülmekte)..... | 16 |
| Şekil 3.16. Eğilme testi a) Devre şeması b) Örnek test edilirken c) Ölçülen çatlak d) Testte kullanılan ekipmanlar..... | 17 |
| Şekil 3.17. Sıcaklık etkisi testi a) ÇES testte b) Açık tablalı özel ısıtıcı c) Elektrik devresi d) Deneyde kullanılan cihazlar (soldan sağa veri toplama cihazı- doğru akım kaynağı- açık tablalı ısıtıcı)..... | 20 |
| Şekil 3.18. Nem düzeltmelerinin belirlenmesi için a) Elektrik devresi b) Voltaj ölçümü c) Deney ekipmanı (fırın-tartı-doğru akım güç kaynağı- voltmetreler)..... | 21 |
| Şekil 3.19. Farklı nem içeriklerine sahip ÇES örnekleri a) Küp b) 4*4*16 cm prizma..... | 22 |
| Şekil 3.20. Elektrik akımına dik yönde yükleme ile basınç testi a) Test şeması b) Test..... | 23 |
| Şekil 3.21. Çekme birim şekil değiştirmesinin, elektrik akımına dik uygulandığı yarma testi a) Test şeması b) Test..... | 23 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.22. a) ÇES elektrotları izole edildi b) ÇES model kolon kalıbı içinde c) Model kolon kalıbına beton döküldü d) İçinde ÇES olan model kolon e) 15 cm ebatlı küp örnekler..... | 24 |
| Şekil 3.23. Model kolon testi a) Kullanılan cihazlar b) Model kolon testte..... | 25 |
| Şekil 3.24. a) Pürüzlü 2 mm kalınlığında levha b) Kalıba girecek şekilde şekillendirilmiş levha c) Kalıba yerleştirilmiş levhalar d) Taban ve yan iki yüzeyi pürüzlü kalıp..... | 26 |
| Şekil 3.25. a) İçe pürüzlü ÇES b) Dışa pürüzlü ÇES c) İçe pürüzlü ÇES, kolon kalıbı içinde..... | 27 |
| Şekil 3.26. Kiriş kalıpları a) Düz ÇESli b) Dışa pürüzlü ÇESli c) İçe pürüzlü ÇESli..... | 28 |
| Şekil 3.27. Kiriş eğilme testi a) Kiriş ve gerinim pulları b) Kullanılan ekipmanlar..... | 29 |
| Şekil 4.1. Birim şekil değiştirme- %R grafiği a) S4 basınç testi b) SY4 yarmada çekme testi..... | 31 |
| Şekil 4.2. Çatlak uzunluğu - %R grafiği, SB4 çentikli eğilme testi..... | 32 |
| Şekil 4.3. Farklı yükleme hızlarında %R- birim şekil değiştirme ilişkisi, yükleme hızları: a) 0,5 mm/dak b) 1 mm/dak c) 2,5 mm/dak d) 5 mm/dak e) 10 mm/dak..... | 36 |
| Şekil 4.4. Elektriksel direncin karbon lif oranı ile değişimi (lif uzunluğu L= 3mm)..... | 37 |
| Şekil 4.5. Basınç testi, %0.8 hacimsel oranında 13 mm uzunluğunda karbon lifli karışım için a) %R- zaman grafiği b) Kuvvet – zaman grafiği, c) %R – birim şekil değiştirme grafiği..... | 38 |
| Şekil 4.6. Basınç testi a) Duyarlılık – karbon lif hacimsel oranı b) Doğrusallık - karbon lif hacimsel oranı c) Korelasyon katsayısı - karbon lif hacimsel oranı..... | 39 |
| Şekil 4.7. Yarmada çekme testi 13 mm uzunluğunda karbon lif %0.2 hacimsel oranında a) Kuvvet – zaman grafiği b) Çekme birim şekil değiştirmesi – zaman grafiği c) %R- zaman grafiği d) %R- çekme birim şekil değiştirmesi grafiği..... | 40 |
| Şekil 4.8. Yarmada çekme testi a) Duyarlılık – karbon lif hacimsel oranı b) Doğrusallık - karbon lif hacimsel oranı c) Korelasyon katsayısı - karbon lif hacimsel oranı..... | 41 |
| Şekil 4.9 Çentikli eğilme testi, karbon lif uzunluğu 13 mm, %0.2 hacimsel oran a) Çatlak uzunluğu – zaman grafiği b) Kuvvet – zaman grafiği..... | 42 |
| Şekil 4.10 Çentikli eğilme testi, karbon lif uzunluğu 13 mm, %0.2 hacimsel oran a) %R- çatlak uzunluğu grafiği (tüm veri) b) %R- çatlak uzunluğu grafiği, doğrusal ilişki..... | 42 |
| Şekil 4.11. Eğilme testi a) Çatlak duyarlılığı – karbon lif hacimsel oranı b) Çatlak doğrusallığı - karbon lif hacimsel oranı c) Korelasyon katsayısı - karbon lif hacimsel oranı..... | 43 |
| Şekil 4.12 a) Sıcaklık- elektriksel direnç grafiği b) Sıcaklık %R grafiği..... | 44 |
| Şekil 4.13 a) Rs – nem ilişkisi b) %R – nem ilişkisi..... | 45 |
| Şekil 4.14 a) Basınç testi, duyarlılık – etüv süresi b) Yarmada çekme testi, duyarlılık – etüv süresi c) Eğilme testi, çatlak duyarlılığı – etüv süresi..... | 46 |
| Şekil 4.15 Basınç testi, basınç birim şekil değiştirmesi elektrik akımına dik a) Birim şekil değiştirme – zaman grafiği b) %R – birim şekil değiştirme grafiği..... | 48 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.16 Elektronların geçtiği kesit a) Mekanik yük yok (b-a) b) Basınç yükü elektrik akımına paralel (b-a) c) Basınç yükü elektrik akımına dik (b-c), (a>c)..... | 49 |
| Şekil 4.17 Yarmada çekme testi, çekme birim şekil değiştirmesi elektrik akımına dik, a) Birim şekil değiştirme – zaman grafiği, b) %R - Birim şekil değiştirme grafiği (cK=59; cLE=%15). | 50 |
| Şekil 4.18 Elektronların geçtiği kesit a) Mekanik yük yok (b-a) b) Çekme birim şekil değiştirmesi elektrik akımına paralel (b-a) c) Çekme birim şekil değiştirmesi elektrik akımına dik (b-c) , (c>a), (b-a>b-c)..... | 51 |
| Şekil 4.19 Kolon içinde ÇES testleri, ÇES – gerinim pulu birim şekil değiştirme grafiği, yükleme hızı a) v= 50 kg/san b) v= 100 kg/san c) v= 200 kg/san d) v= 680 kg/san..... | 52 |
| Şekil 4.20 Kiriş içinde ÇES testleri, ÇES kirişin ortasında, ÇES – gerinim pulu birim şekil değiştirme grafiği a) ÇES üstte basınç bölgesinde b) ÇES altta çekme bölgesinde..... | 53 |
| Şekil 4.21 Kiriş eğilme testinde ÇES üstte basınç bölgesinde a) Kiriş kırılmış b) ÇES içindeki çelik lifler..... | 54 |
| Şekil 4.22 Örnek yaşı ile elektriksel direnci arasındaki ilişki..... | 55 |

ÖZET

Depremler, malzeme bozulmaları ve diğer çevresel etkiler, yapıların performansını olumsuz etkiler. Yapı sağlığının izlenmesi can ve mal güvenliğini sağlamak için önemlidir. Gerinim pulları, yapı elemanlarının yüzeylerinden ölçüm alabilmekte, içinden ölçüm almak zor olmaktadır. Gerinim pullarının dayanıklılığı düşüktür, bu nedenle kısa süreler için kullanılabilir. Gerinim pullarının pahalı olmaları çok sayıda kullanılmalarının önünde engeldir.

Bu çalışmada, karbon ve çelik lifli, farklı lif uzunluğu ve lif hacimsel oranlarına sahip 46 farklı çimento matrisli karışım tasarlanmıştır. Basınç, yarmada çekme ve çentikli eğilme testleri ile, birim şekil değiştirmeye ve çatlak uzunluğuna en duyarlı karışım Çimento Esaslı Sensör (ÇES) olarak belirlenmiştir. Sıcaklığın ve nemin ÇES elektriksel direnci üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Yükleme hızının ve nemin elektriksel direnç değişimi – birim şekil değiştirme ilişkisine etkileri araştırılmıştır. ÇES'in sensör özellikleri olan duyarlılık ve doğrusallık değerleri tespit edilmiştir. Elektrik akımının birim şekil değiştirmeye dik olduğu çapraz yükleme durumunun elektriksel direnç değişimine etkisi belirlenmiştir. Birim şekil değiştirme ve çatlak uzunluğu ile elektriksel direnç değişimi arasındaki mekanizmalar aydınlatılmıştır. ÇES içindeki aktif maddelerin zaman içinde birim şekil değiştirme -elektriksel direnç değişimi arasındaki ilişkiye ve elektriksel dirence etkisi belirlenmiştir.

ÇES, model kolon ve kirişlerin içinde birim şekil değiştirme sensörü olarak test edilmiştir. Kolon testlerinde, gerinim pulları ile ÇES birim şekil değiştirme ölçümleri çok yakın sonuçlar vermiştir. Kiriş testlerinde, ÇES tarafsız eksenin üst tarafında basınç bölgesindeyken gerinim pulu ölçümleri ile ÇES ölçümleri uyumluyken, ÇES tarafsız eksenin altında çekme bölgesindeyken aralarındaki ilişki zayıflamıştır. Bunun nedeni, kiriş boyutunun 15*15*75 cm olması, ÇES'in 5 cm ebatlı küp olması, kiriş eğilme altındayken oluşan birim şekil değiştirmenin yükseklikle değişiminin fazla olmasıdır. ÇES'in, boyutları daha büyük olan kirişler içinde test edilmesi olumlu olacaktır.

ÇES, birim şekil değiştirmeye gerinim pullarına göre 22 kat daha fazla duyarlıdır. ÇES, beton dökülmeden önce kalıp içine ölçüm alınmak istenen noktaya yerleştirilip, beton prizini aldıktan sonra sürekli veya istenen zamanda birim şekil değiştirme ölçülebilecektir. ÇES ile yapı elemanının içinden veya yüzeyinden ölçüm almak mümkün olacaktır. Dayanıklı ve hassas bir sensör olarak ÇES, uzun süre ölçüm almayı sağlayacaktır.

Anahtar kelimeler: Akıllı malzeme, çelik lif, karbon lif, çimento, elektriksel direnç, sensör

ABSTRACT

Earthquakes, material degradations and other environmental factors affect the performance of the structures adversely. Structural health monitoring is important to protect the lives and commodities. Strain gages which are used for structural health monitoring, can get measurements from the surface of the structural element while it is hard to get measurements inside the structural member. The durability of the strain gages are low, for this reason they can be used for a short term. Strain gages are expensive which limits their use in large numbers.

In this study, 46 cement based mixtures having carbon and steel fibers with different length and volume fractions were designed. The mixture having the highest strain and crack length sensitivity was determined to be the Cement Based Sensor (CBS) by applying compression, split tensile and notched bending tests. The affects of moisture and temperature on CBS electrical resistance was determined. The affects of load rate and moisture on the relation of CBS strain- electrical resistance change were investigated. The sensor properties of CBS which are gage factor and linearity were determined. The affect of cross talk (strain is perpendicular to electric current passing through the CBS) on the electrical resistance change was determined. The mechanisms between the strain – electrical resistance change, crack length- electrical resistance change were determined. The affects of the active materials in CBS by time on electrical resistance and strain- electrical resistance change relations were determined.

CBS was tested in model columns and beams as strain sensor. In column tests, the CBS and strain gage measurements were almost same. In beam tests, the CBS and strain gage measurements were in good correlation when the CBS was above the neutral axis of the beam (under compression) while the correlation was weak when the CBS was below the neutral axis (under tension). The weak correlation was due to the small dimensions of the beam with respect to the CBS dimension which has geometry of 5 cm cube.

CBS is 22 time more sensitive than strain gages. CBS can be put in the mold and after the concrete sets, continuous or discrete strain measurements can be obtained. Strain can be measured with CBS from the surface or inside the structural element. CBS can be used for a long time with its high durability.

Keywords: Smart materials, steel fiber, carbon fiber, cement, electrical resistance, sensor

1. GİRİŞ

Depremler, malzeme bozulmaları ve diğer çevresel etkiler yapı sağlığını olumsuz etkiler. Ülkemizde son yirmi yılda yaşanan depremlerde on binlerce vatandaşımız hayatını kaybetmiş, binlerce yapı yıkılmış ya da kullanılamayacak derecede hasar görmüştür. Yaşanan maddi- manevi kayıplar rakamlarla ifade edilemeyecek kadar büyüktür. Amerika Birleşik Devletlerinde (ABD), betonarme yapılar tasarım yaşları dolmadan malzeme bozulmalarına uğrarken, köprülerin %30'u yapısal olarak güvenli bulunmamıştır (Reza vd., 2003). Can ve mal güvenliğini saptamak için yapı sağlığının izlenmesi önemlidir. Yapı sağlığının izlenmesinde sık kullanılan sensörlerden biri gerinim pulludur. Gerinim pulları, noktasal ölçüm alırlar, yapının tamamının izlenmesi için çok sayıda kullanılmaları gerekir, bu durum maliyeti arttırır. Gerinim pulları betonarme yapı elemanlarının yüzeyinden ölçüm alabilirler; yapı elemanının içinden ölçüm almaları çok zor ve hata olasılığı çok yüksektir. Gerinim pullarının dayanıklılığı düşüktür, çevresel etkiler nedeniyle korozyona uğrayabilir, yapıştıkları yerden çıkabilir ve zarar görebilirler, bu nedenlerle kısa süreler için kullanılabilirler (Chung, 2001).

Bu çalışmanın amacı, birim şekil değiştirme sensörü olarak Çimento Esaslı Sensör (ÇES) üretmektir. ÇES, betonarme yapı elemanlarının içinde istenilen noktaya yerleştirilip, bulunduğu yerdeki birim şekil değiştirmeyi ölçmek için kullanılacaktır. ÇES yapı elemanının hem yüzeyinde, hem de içinde, ölçüm alınmak istenen noktaya, beton dökülmeden önce kalıp içine yerleştirilip, kabloları kalıp dışına çekilecektir. Beton döküldükten ve prizini aldıktan sonra sürekli olarak veya istenilen zamanda, ÇES veri toplama sistemine bağlanarak bulunduğu noktadaki birim şekil değiştirmeyi verecektir. ÇES, gerinim pullarına göre birim şekil değiştirmeye çok daha duyarlıdır.

ÇES, çimento esaslı bir sensör olduğu için, beton içinde uyum- korozyon sorunları olmayacaktır. Beton içinde olacağı için ve çimentolu malzemedan üretildiği için, dış etkilere karşı gerinim pullarına göre daha dayanıklı olacaktır, uzun süre kullanımı mümkün olacaktır. ÇES ile yapı sağlığının izlenmesi daha kolay, ucuz ve güvenilir olacaktır. İnşaat sektöründe yeni bir ürün olacak olan ÇES, üretimi ve kullanımı ile yeni istihdamlar yaratacaktır. Yapı sağlığının izlenmesi yaygınlaşacak, yeterli performansı gösteremeyen yapıların tespiti kolaylaşacak, depremlerde can ve mal kayıplarının önüne geçilecektir. ÇES'in patenti alınacaktır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Çimentolu kompozite karbon lif eklenmesi, elektriksel direnci düşürür; mekanik yük altında elektriksel direnç değişir (Chung, 1998; Fu vd., 1997; Fu ve Chung, 1997). Elektriksel direncin, basınç birim şekil değiştirmesi ile ilişkili olduğu belirlenmiştir (Teomete ve Erdem, 2011). Bu çalışmada elektriksel direncin hem basınç hem de çekme birim şekil değiştirmeleri ile ilişkisi araştırılmıştır. Yarmada çekme testi, çimentolu kompozitlerin elektriksel direnç değişimi- birim şekli değiştirme ilişkisini araştırmak için ilk defa bu projede uygulanmıştır.

Çimentolu kompozitlerin elektriksel direncini ölçmek için iki veya dört elektrot metodu uygulanmıştır. İki elektrot metodunda, akımın verilmesi ve voltajın ölçülmesi için aynı elektrotlar kullanılmıştır. Dört elektrot metodunda, dış iki elektrottan akım verilip, içteki iki elektrottan voltaj ölçülmüştür. İki elektrot metodunda örnek kesit alanı ve elektrotlar arası mesafe ölçümü etkilerken, dört elektrot metodunda etkilemez (Chiarello ve Zinno, 2005; Han vd., 2007). Bu çalışmada yapılan basınç, yarmada çekme ve çentikli eğilme testlerinde dört elektrot metodu kullanılmıştır.

Elektriksel direnç ölçümlerinde çevresel veya batırılmış elektrot konfigürasyonları kullanılmıştır. Batırılmış elektrot metodunda, iletken bir plaka, tel veya ağ, malzemenin içine sokulur. Çevresel elektrot metodunda, iletken bir boya, bant veya tel malzemenin çevresine yapıştırılır, sarılır (Reza vd., 2004; Chen ve Liu, 2008; Li vd. 2006; Li vd., 2008). Bu çalışmada saf bakır ağlar, malzemenin içine sokularak elektrot olarak kullanıldı.

Hasarın, karbon lifli çimentolu kompozitlerin elektriksel direncini değiştirdiği rapor edilse de (Chung, 2000), çatlak boyu ile elektriksel direnç değişiminin eş zamanlı ölçümü ve aralarındaki ilişkinin incelenmesi yapılmamıştır. Bu çalışmada, çentikli eğilme testi sırasında çatlak boyu ve elektriksel direnç değişimi eş zamanlı ölçülmüş, aralarındaki ilişki literatürde ilk defa sunulmuştur.

Akıllı çimentolu malzemeler ile ilgili değişik çalışmalar mevcuttur. Nikel tozu katılmış çimento matrisli kompozitlerin otomobil sayım sensörü olarak yol kaplamasının altında test edilmesi ve olumlu sonuçlar alınması rapor edilmiştir (Han vd., 2011). Karbon lifli çimentolu kompozitlerin tünelleme etki teorisi ve Ohm kanunu kullanılarak doğrusal olmayan akım – voltaj davranışı belirlenmiştir (Jing vd., 2011). Çimentolu malzemeye karbon nano-tüp

eklenmesinin piezoelektrik özelliklerine etkisi araştırılmıştır (Gong vd., 2011). 0-3 barium titanate – portland çimentosunun dielektrik, ferroelektrik ve piezoelektrik özellikleri araştırılmıştır (Rianyoi vd., 2011). Karbon lifli geopolimer betonun birim şekil değiştirme hassasiyetini ölçmek için, basınç ve üç noktadan eğilme testleri yapılmıştır (Vaidya ve Allouche, 2011). Çimento matrisli 2-2 piezoelektrik kompozit, düşük frekanslı mekanik yük altında test edilmiştir. Piezoelektrik katsayılar ile frekans arasında doğrusal bir ilişki tespit edilmiştir, uygulanan yükün büyüklüğü ile piezoelektrik katsayılar arasında bir ilişki yoktur (Li vd., 2001).

Kısa iletken lifli kompozitlerin elektriksel empedans spektrum analizi yapılmış, sayısal modelleme ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır (Torrents vd., 2001). Çimentolu kompozitlerde kısa iletken liflerin iletkenlikleri, doğrum akım testleri ve empedans spektroskopisi ile ölçülmüştür. Rastgele dağılmış lifli kompozitlerde iletkenlik- lif boyut oranı ilişkisi ile liflerin boyut oranı tahmin edilebilir (Hixson vd., 2001). Çentikli direkt çekme testi ile doğru akım ve alternatif akım özellikleri mekanik özellikler ile ilişkilendirilmiştir (Peled vd., 2001). Elektriksel empedans spektrumu ile tek bir çelik lifin çimento matrinden sıyrılması incelenmiştir; elektriksel empedans spektrumunun çatlama duyarlı olduğu bulunmuştur (Torrents vd., 2001). Lif boyut oranı, lif hacimsel oranı lif yönelimi ve lif şeklinin elektriksel empedans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Mikro yapı özellikleri- empedans spektrumu ilişkisi rapor edilmiştir (Mason vd., 2002). Çimento matrisli kompozitlerde alternatif akım (AC) empedans spektrumu kullanılarak lif yönelimi, lif ayrışması ve lif topaklanması incelenmiştir (Woo vd., 2007). Agregalı çimento matrisi ara yüzeyinin çimento harcının elektriksel iletkenliğine etkisi incelenmiştir. Ara yüzey, harcın iletkenliğini etkilemese de, ara yüzey ve matris iletkenlikleri farklıdır. Hidratasyon seviyesi elektriksel iletkenlik üzerinde etkilidir (Shane vd., 2000).

Betondaki nem ve elektriksel direnç, sonlu elemanlar metodu ile modellenmiştir. Betonun suya doygun ve doymamış özellikleri ve tek bir elektriksel direnç ölçümü kullanılarak beton içindeki nemin sınırını belirleyecek bir metot geliştirilmiştir (Rajabipour vd., 2005). Tumidajski vd. (2003), üzerindeki karı eritmek için iletken beton üzerinde çalışmıştır; iletken betondan geçmesi gereken akım değeri modellenmiş ve deneysel verilerle kalibre edilmiştir.

Yapı sağlığının izlenmesinde kullanılan gerinim pulları, düşük duyarlılığa, düşük dayanıklılığa sahipler. Gerinim pulları beton yapı elemanının yüzeyinden ölçüm alabilmekte, yapı elemanının içine yerleştirilmesi çok zor olmakta ve hatalı ölçümler vermesi söz konusu olmaktadır. Bu çalışmada, çelik lifli ve karbon lifli, farklı lif uzunluklarına ve lif hacimsel

oranlarına sahip 46 karışım tasarlanmıştır. Her bir karışımdan üçer adet 5 cm ebatlı küp örneğe basınç ve yarmada çekme testleri, üç adet prizma örneğe de çentikli eğilme testi uygulanıp, birim şekil değiştirmeye ve çatlak uzunluğuna en çok duyarlı karışım Çimento Esaslı Sensör (ÇES) olarak belirlenmiştir. Farklı yükleme hızlarının ÇES üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Farklı sıcaklık ve nem oranlarının ÇES üzerindeki etkileri belirlenmiştir. ÇES'in sensör özellikleri belirlenmiştir. Çapraz yüklemenin (ÇES içinden geçen elektrik akımına dik birim şekil değiştirme uygulanması) ÇES üzerindeki etkisi tespit edilmiştir. ÇES, sensör olarak model kolon ve kirişler içinde test edilmiştir. ÇES bünyesindeki aktif maddelerin uzun zamanda etkileri araştırılmıştır. Proje kapsamında yapılan bir çok test ile, dünya literatürüne katkıda bulunan yayınlar yapılmıştır, hakem değerlendirmesinde olan yayınlar vardır, yeni yayınlar yapılacaktır. ÇES'in patenti alınacaktır.

ÇES, yüksek dayanıklılığa sahip, beton ile uyumlu, hassas bir sensör olarak üretilmiştir. ÇES'in kullanımı ile depremlerde ve diğer doğal afetlerde can ve mal kayıplarının önüne geçilecektir.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

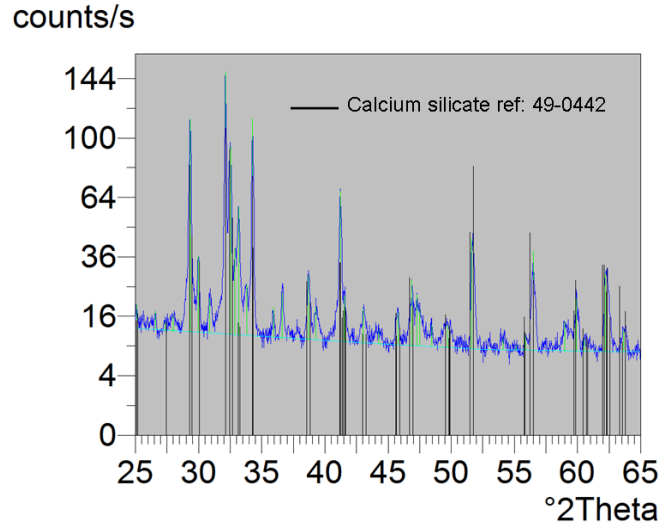
Deneysel olarak kullanılan malzemelerin özellikleri ile test metodları bu bölümde sunulmuştur.

3.1 Kullanılan Malzemeler

Projede kullanılan malzemeler ve özellikleri bu bölümde sunulmuştur.

3.1.1 Çimento

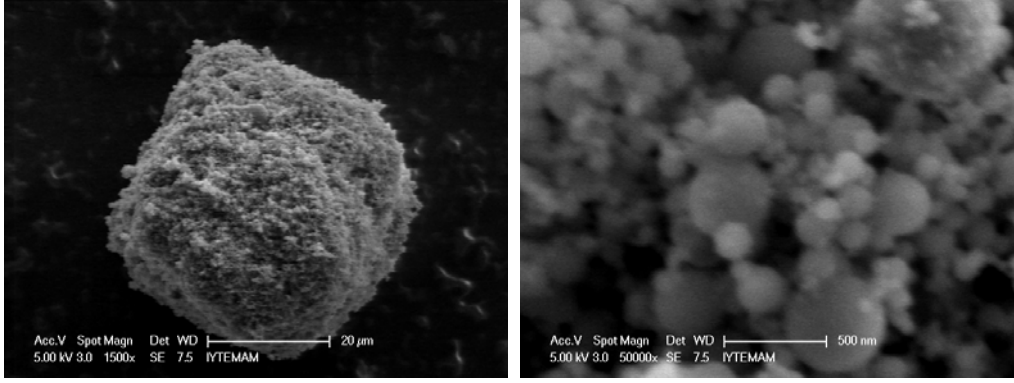
Karışımında kullanılan çimento Batıçim CEM I 42.5 R olup, 10 torba satın alınmıştır. Çimentoya ait X ışını kırınımı analiz sonucu Şekil 3.1’ de verilmiştir. Çimentonun proje süresince nem almaması için, 60 litrelik plastik bidonlardan 7 adet alınıp çimento bu bidonlarda saklanmıştır.



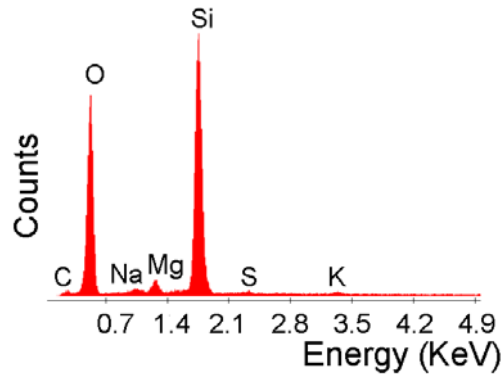
Şekil 3.1. CEM I 42,5 R çimentoya ait X ışını kırınımı analiz sonucu.

3.1.2 Silis Dumanı

Sika Yapı Kimyasallarından proje desteği dahilinde alınan silis dumanına ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 3.2’de verilmiştir. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi tane boyutu 100 nanometre ölçeğindedir ve nanometrik tanelerin topaklanması ile daha büyük taneler oluşmuştur. Silis dumanına ait enerji dağılımlı spektrometre (EDS) sonucu, içerdiği elementler, Şekil 3.3’de verilmiştir.



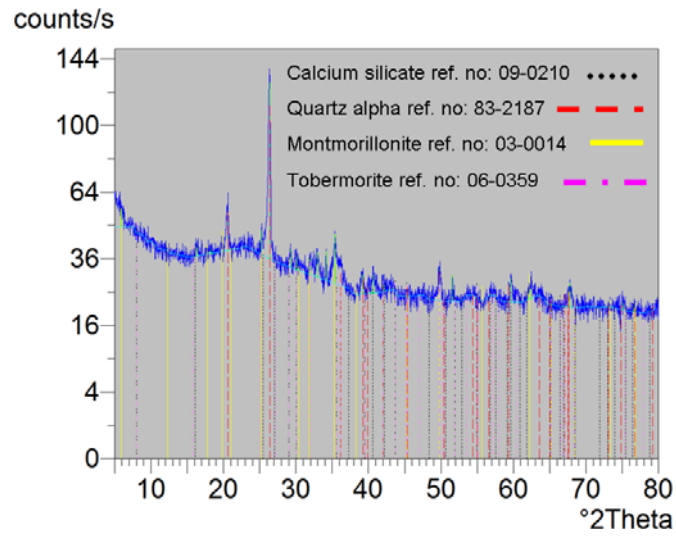
Şekil 3.2. Silis dumanının taramalı elektron mikroskobu analizi.



Şekil 3.3. Silis dumanına ait enerji dağılımlı spektrometre (EDS) analizi sonucu.

3.1.3 Uçucu Kül

Projede kullanılacak uçucu kül, Sika Yapı Kimyasalları tarafından proje desteği dahilinde hibe edilmiştir. Uçucu küle ait X ışını kırınımı sonucu Şekil 3.4'de sunulmuştur.



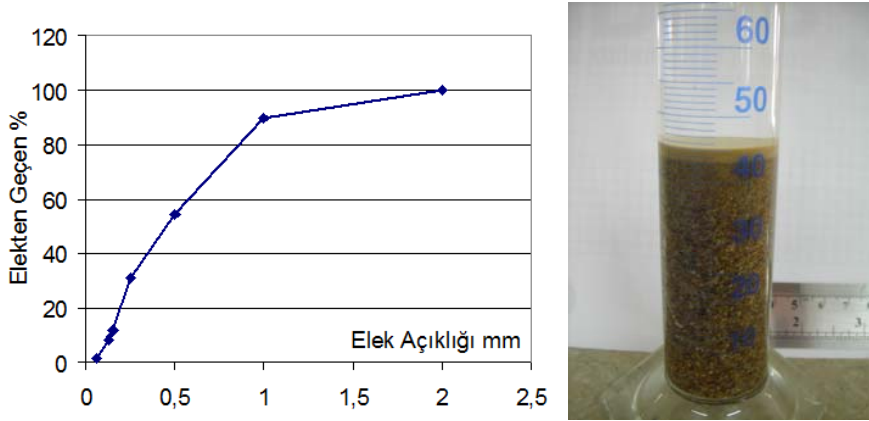
Şekil 3.4. Uçucu küle ait X ışını kırınımı sonucu.

3.1.4 Lateks

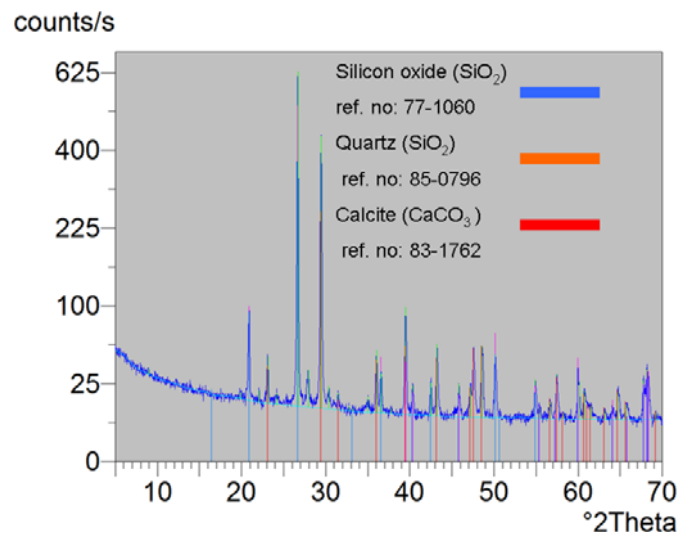
Literatürde, karbon lifin çimento harcı içinde daha iyi dağılılabilmesi için lateks kullanıldığı belirtilmiştir. Sika Yapı Kimyasalları tarafından hibe edilen lateksin kimyasal yapısı stiren butadien emülsiyonudur. Yoğunluğu 1,015 kg/lt,

3.1.5 Agregata

Projede kullanılacak kumun elek analizi sonucu Şekil 3.5a'de sunulmuştur. Ayrıca, kum içindeki ince malzeme miktarı, kum ölçülü cam bir kap içine konup, üzerine su eklendikten sonra sallanıp, 24 saat dinlendirildikten sonra Şekil 3.5b'deki gibi belirlenmiştir. Toplam 45 ml kumun, 2ml'si, %4.4'ü ince malzemedir. Kuma ait X ışını kırınımı sonucuna göre silikon oksit, quartz, kalsit bulunmuştur, (bakınız Şekil 3.6).



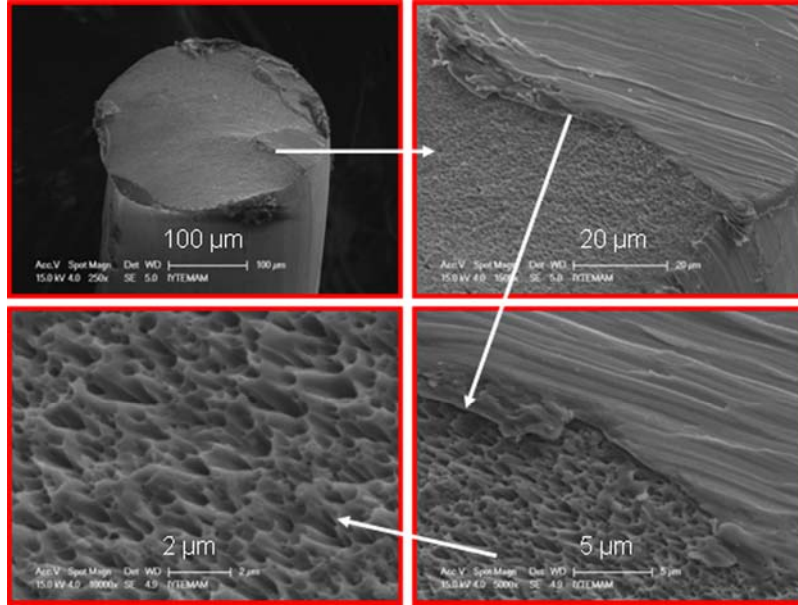
Şekil 3.5. a) Projede kullanılan kumun elek analizi sonucu. b) Kumda ince malzeme miktarı.



Şekil 3.6. Kuma ait X ışını kırınımı sonucu.

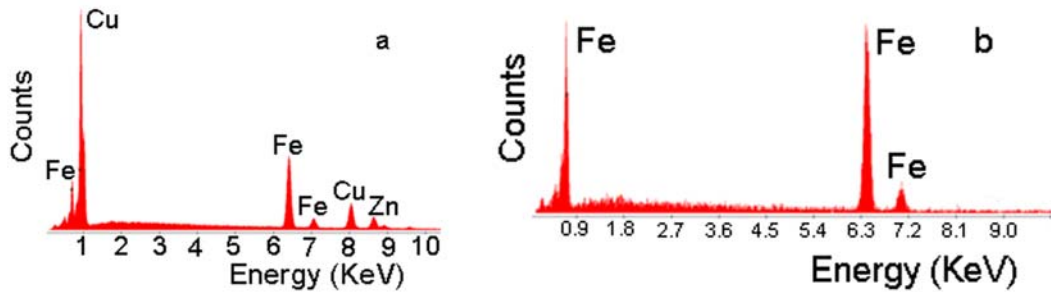
3.1.6 Çelik Lif

Projede kullanılacak çelik lifleri Bekaert Çelik Kord Sanayi A.Ş. tarafından hibe edilmiştir. Çelik liflere ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 3.7'de verilmiştir. Çelik lif boyları L=6 mm ve 13 mm dir. Çapı 290 µm dir. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi çelik lifler kaplamalıdır. Kaplama, çekirdekten daha sünek bir malzemedir.



Şekil 3.7. Çelik lif kesitinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

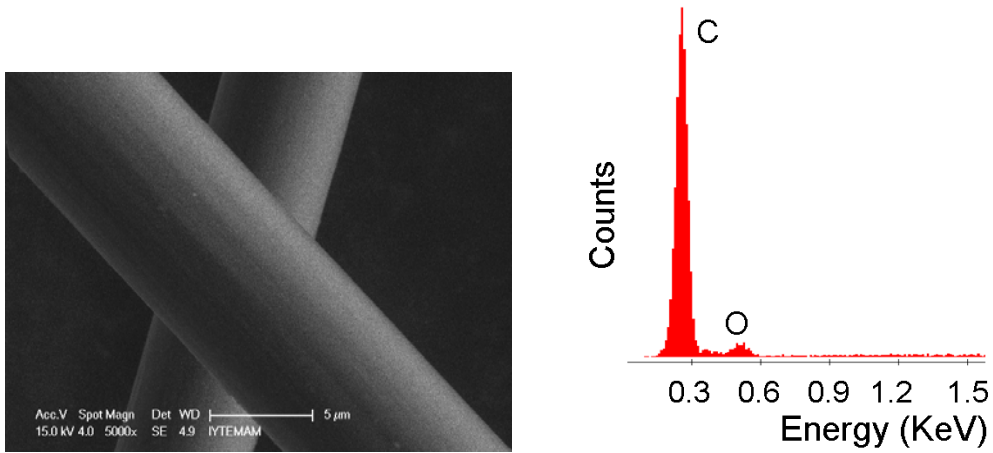
Çelik lif yan yüzey ve kesitine ait enerji dağılımlı spektrometre (EDS) sonuçları Şekil 3.8'de verilmiştir. Şekil 3.8'de görüldüğü gibi çelik lif bakır alaşımı olan pirinç kaplıdır ve merkezi çeliktir.



Şekil 3.8. Çelik life ait enerji dağılımlı spektrometre (EDS) sonuçları a) yan yüzey ve b) kesit.

3.1.7 Karbon Lif

Projede kullanılacak karbon lifler, AKSA Akirlik Kimya Sanayi tarafından destek mektubuna uygun olarak hibe edilmiştir. Karbon lifin çapı, SEM görüntüsü Şekil 3.9a'da görüldüğü gibi 7 µm dir. Karbon lif polyacrylonitrile (PAN) bazlıdır. Karbon life ait enerji dağılımlı spektrometre (EDS) analizi sonucu Şekil 3.9b'de sunulmuştur. Karbon lifin mekanik özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.9 a) Karbon lifin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü. b) Karbon life ait enerji dağılımlı spektrometre (EDS) analizi sonucu.

Tablo 3.1. Karbon lifin fiziksel ve mekanik özellikleri (üretici AKSA A.Ş. den alınan bilgiler)

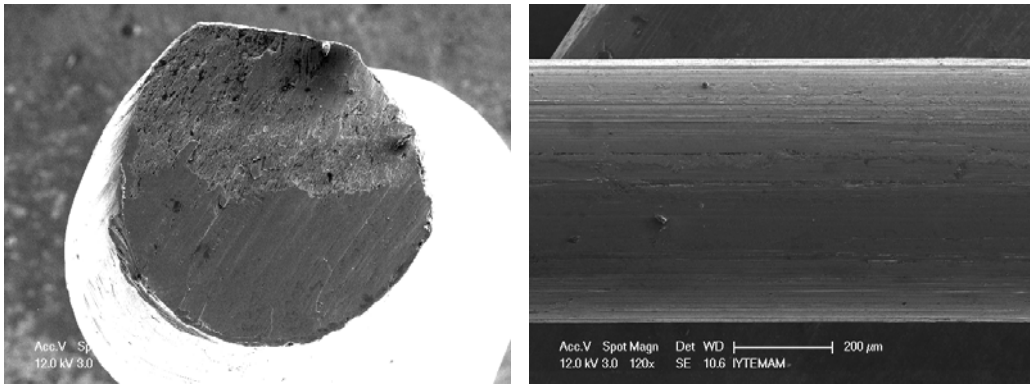
| Çap (µm) | Yoğunluk (g/cm ³) | Çekme Dayanımı (MPa) | Elastisite Modülü (GPa) | Kopma Birim Şekil Değişirmesi (%) |
|----------|-------------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 7 | 1.75 | 3500 | 235 | 1.5 |

3.1.8 Süper Akışkanlaştırıcı

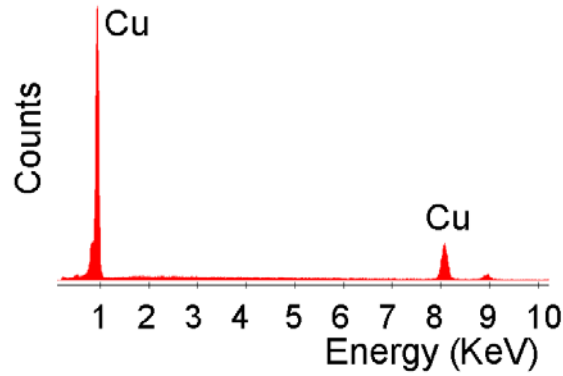
Projede kullanılan Sika Viscocrete Hi-Tech 30 süper akışkanlaştırıcı, modifiye polikarboksilat bazlı polimerdir. Yoğunluğu 1,07-1,11 kg/lit ve klor iyonu içermez. Plastik kıvamda beton elde etmek için bağlayıcı maddenin %0,4-%1; kendiliğinden yerleşen beton elde etmek için bağlayıcı maddenin %1-%2 oranında kullanılır.

3.1.9 Bakır Ağ Elektrot

Elektriksel iletkenliği daha yüksek olduğu için saf bakır ağ, elektrot olarak kullanılmıştır. apı 0.6 mm olan telden yapılmış, kare göz açıklığı 5 mm olan saf bakır ağ, Türkiye’de imal edilmediği için in Halk Cumhuriyetinde zel olarak imal ettirilip ithal edilmiştir. Bakır ağ örgü teline ait taramalı elektron mikroskobu kesit ve yan yüzey görüntüleri Şekil 3.10’da verilmiştir. Bakır ağ telinin çapı 600 µm dir. Bakır ağ teline ait enerji dağılımlı spektrometre (EDS) analizi sonuçları, telin saf bakır olduğunu gösterir, bakınız Şekil 3.11.



Şekil 3.10. Bakır ağ teline ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri a) kesit, b) yan yüzey.



Şekil 3.11. Bakır ağ teline ait enerji dağılımlı spektrometre (EDS) analizi sonucu.

3.1.10 Tasarlanan Karışımlar

Birim Şekil değiştirmeye ve çatlak uzunluğuna en duyarlı karışımı tespit edebilmek için farklı içeriklere sahip karışımlar oluşturulmuştur. Karışım test grupları aşağıda sunulmuştur, karışım oranları Ek 1’de verilmiştir.

- Lifsiz bir karışım, M1, imento ağırlığınca, kum %100, silis dumanı %10, su %40, süper akışkanlaştırıcı %1 kullanılarak tasarlanmıştır.

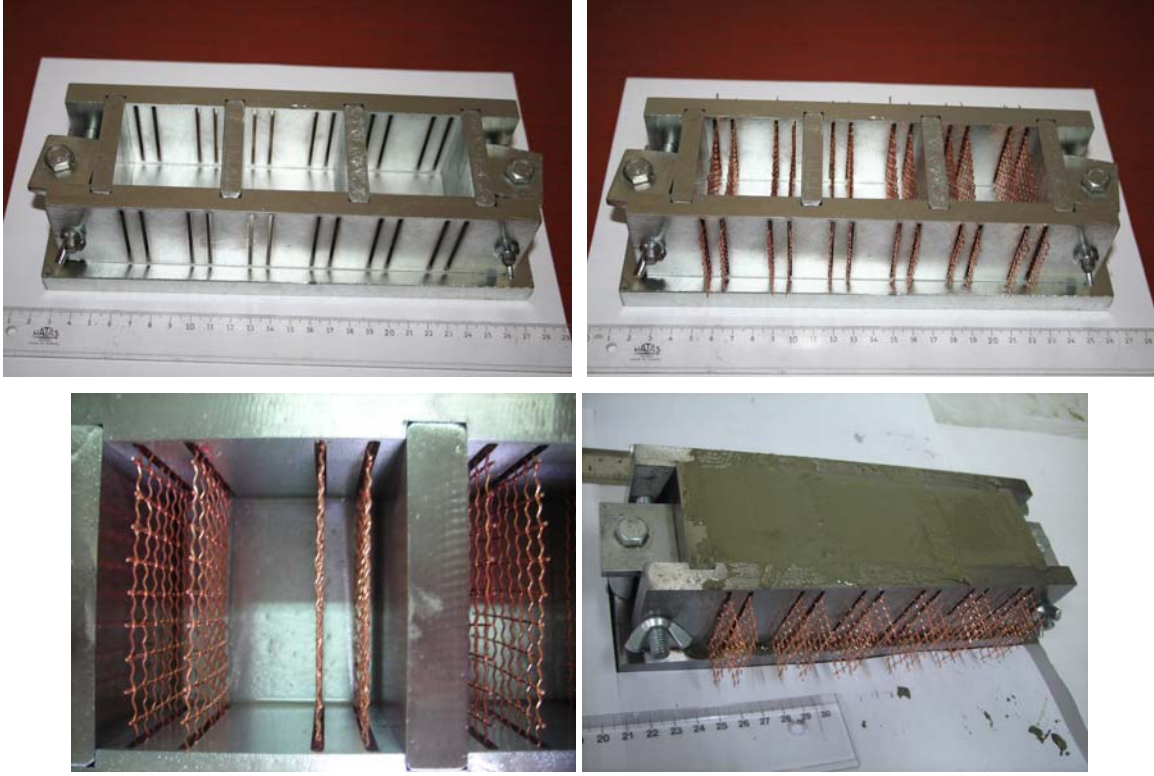
- Çelik lif birinci grupta 10 karışım vardır (karışım isimleri S1-S2... şeklinde parantez içinde yazılmıştır) : 6 mm uzunluğunda çelik liflerden hacimce % 0.2 (S1) - % 0.5 (S2)- % 0.8 (S3)- %1 (S4)- %1.5 (S5); 13 mm uzunluğunda çelik liflerden hacimce % 0.2 (S6)- % 0.35 (S7)- % 0.5 (S8)- % 0.8 (S9)- %1 (S10) oranlarında olmak üzere her karışımda çimento ağırlığına, %10 silis dumanı, % 100 kum, %40 su, %1 süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Uzunluğu 6 mm ve 13 mm olan çelik lifli karışımlar Tablo Ek 1.1 ve Tablo Ek 1.2'de verilmektedir.
- Çelik lif 2. grupta 8 karışım vardır: Çelik lif 1. grupta en yüksek duyarlılık (K) ve en düşük doğrusallık (LE) veren 2 karışım, S4 ve S9 seçilmiştir. Bu seçimin hangi testler ile nasıl yapıldığı sonraki bölümlerde detaylı anlatılmıştır. S4 ve S9 modifiye edilerek, çimento ağırlığına % 15-30-50 olarak 3'er ayrı karışım uçucu kül konacak şekilde tasarlanmıştır. S4'ün uçucu kül ile çimento ağırlığına % 15-30-50 modifiye edilmesi ile S11-12-13, S9'ün uçucu kül ile çimento ağırlığına % 15-30-50 modifiye edilmesi ile S14-15-16 olarak 6 yeni karışım oluşturulmuştur. Onaltı karışımdan en yüksek duyarlılık (K) ve en düşük doğrusallığı (LE) veren karışım S4 olarak belirlenmiş ve modifiye edilerek su / çimento oranı 0,3 için S17, su / çimento oranı 0,5 için S18 tasarlanmıştır. Bu grupta toplam 8 karışım test edilmiştir. Karışımlar Tablo Ek 1.3'de verilmiştir.
- Karbon lif birinci grupta yirmi karışım tasarlandı. 6 mm uzunluğundaki karbon liflerden hacimce % 0.2 (C1) - %0.5 (C2) - %0.8 (C3)- %1 (C4)- %1.5 (C5); 3 mm uzunluğundaki karbon liflerden hacimce % 0.2 (C6) - %0.5 (C7) - %0.8 (C8)- %1 (C9)- %1.5 (C10); 13 mm uzunluğundaki karbon liflerden hacimce % 0.2 (C11) - %0.35 (C12) - %0.5 (C13)- %0.8 (C14)- %1 (C15); 16 mm uzunluğundaki karbon liflerden hacimce % 0.2 (C16) - %0.35 (C17) - %0.5 (C18)- %0.8 (C19)- %1 (C20) oranlarında olmak üzere her karışımda çimento ağırlığına, %10 silis dumanı, % 100 kum, %40 su, %2 süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Karışımlar Tablolar Ek 1.4- Ek 1.5- Ek 1.6- Ek 1.7'de verilmiştir.
- Karbon lif 2. grupta 7 karışım var: Karbon lif 1. grupta en yüksek duyarlılık ve en düşük doğrusallığı veren 2 karışım, C1 ve C7 seçildi. Çimento ağırlığına %15 lateks eklenerek C21 ve C22 oluşturuldu. C1-C22 karışımları arasından en yüksek duyarlılık ve en düşük doğrusallığı veren C22 karışımı seçildi ve uçucu kül / çimento oranı 0,15-0,30-0,50 ikamesi ile C23-C24-C25 tasarlandı. C1-C25 karışımları arasından en yüksek duyarlılık ve en düşük doğrusallığı veren C22 karışımı seçildi, su/çimento = 0,3 ve 0,5 için C26-C27 karışımları tasarlandı, test edildi. Bu grupta toplam 7 karışım test edildi. Karışımlar Tablo Ek 1.8'de sunulmuştur.

Tüm çelik lif gruplarında 18 karışım, tüm karbon lif gruplarında 27 karışım tasarlanmıştır. Toplamda 1 lifsiz+18 çelik lifli +27 karbon lifli= 46 karışım tasarlanmıştır. Karışım içerikleri Ek 1'de verilmiştir.

3.1.11 Özel Kalıplar ve Örneklerin Hazırlanışı

Yüksek lif oranlarında, kalıba önce karışımı döküp sonra metal ağ sokmak, liflerin aşağıya doğru itilmesine neden olmaktadır. Bu duruma engel olmak için, Şekil 3.12'deki 5 cm ebatlı kanallı küp kalıplar ve Şekil 3.13'deki 4*4*16 cm ebatlı kanallı dikdörtgen prizma kalıplar tasarlanıp, özel olarak imal edilmiştir.

Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'de görülen kalıplara, karışım dökülmeden önce, bakır ağ kesilip, kanallara sokuldu. Bakır ağın her iki ucu, kalıbın her iki tarafından çıkacak şekilde yerleştirildi. Agregası, çimento, silis dumanı, varsa uçucu kül sırasıyla her biri üç seferde mikser kabına eklenip kuru olarak elle karıştırıldı. Süper akışkanlaştırıcı, su, karışımda varsa lateks ayrı bir kaptaki karıştırıldı ve karışıma üç seferde eklenip her seferde elle karıştırıldı. Çelik veya karbon lif, ıslak karışıma, topaklanmayacak şekilde az miktarlarda eklenip elle karıştırıldı. Karışıma girmesi gereken tüm malzemeler girdikten sonra, mikserde otuz saniye 140 dev/dak hızda karıştırıldı, sonra 280 dev/dak hızda 90 saniye karıştırıldı. Kap mikserden çıkartılıp 15 saniye kabın çeperi sıyrıldı, kap 280 dev/dak ile 60 saniye karıştırıldı. Daha sonra karışım kalıba döküldü. Karışımın hava boşluğu bırakmadan kalıba yerleşebilmesi için, her göze iki seferde döküldü. Her seferde, her gözün içinde ağlar ile ayrılan bölümler, ince metal plakalar ile 10 defa tokmaklandı. Kalıplar sarsma tablasında sarsıldı. Örnekler kalıptan 24 saat sonra alınıp, 20 °C su içinde 28 gün kür edildi.



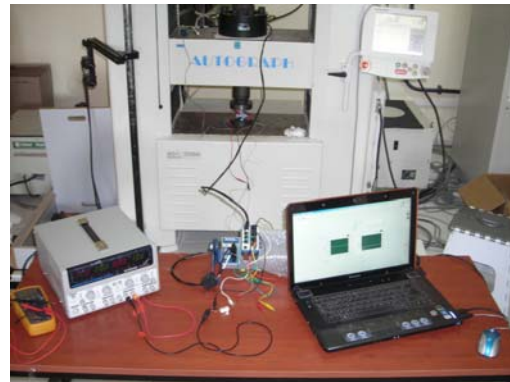
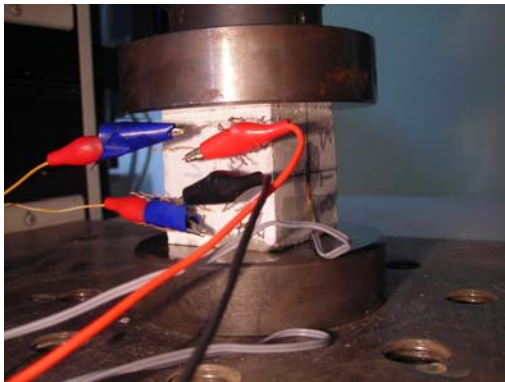
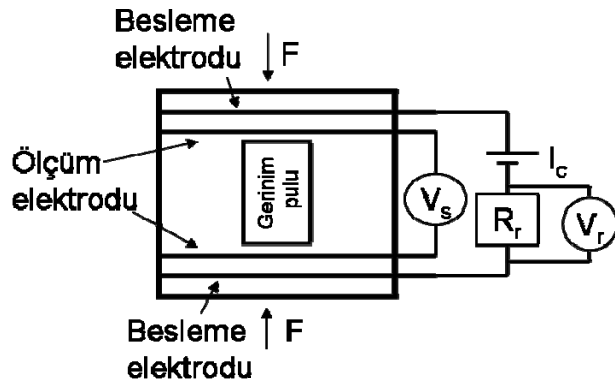
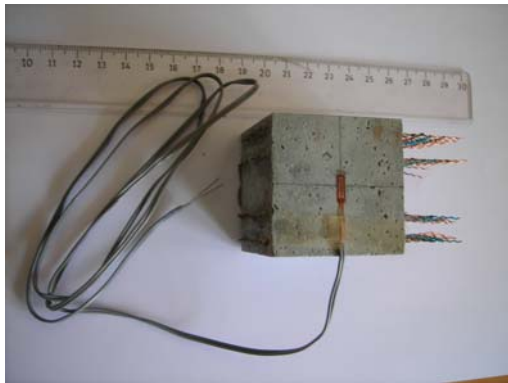
Şekil 3.12. 5 cm ebatlı küp kalıp. a-b-c) Bakır elektrotlar ve özel kalıp. b) Karışım döküldükten sonra.



Şekil 3.13. 4*4*16 cm ebatlı küp kalıp. a-b-c) Bakır elektrotlar ve özel kalıp. b) Karışım döküldükten sonra d) Örnekler kür olurken.

3.2 Basınç Testi

Basınç birim şekil değiştirmesi ile elektriksel direnç değişimi arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla basınç testleri yapıldı. Basınç deneyinde Shimadzu mekanik test cihazı kullanıldı. Basınç deneyinde deplasman kontrollü yükleme hızı 0.5 mm/dak alındı. Yükleme başlıkları ile örnek arasında sürtünmeyi azaltmak için her deney öncesi yükleme başlıklarına makine yağı sürüldü. Basınç deneyine eş zamanlı olarak birim şekil değiştirme ve elektriksel direnç lmleri Şekil 3.14'deki gibi yapıldı. 15 V doğru akım Gw Instek GPS 4303 doğru akım kaynağı ile, dış iki besleme elektrotuna verildi; örneğin gerilimi (V_s), içteki iki ölçüm elektrotu (E_v) ile 10 Hz hız ile (100 msec zaman aralığıyla) deney süresince ölçüldü. Devreden geçen akımı bulmak için (I_c), devreye seri olarak büyüklüğü bilinen bir referans direnç (taş direnç $R_r=1000$ Ohm) bağlandı. Deney süresince 100ms zaman aralığıyla (saniyede 10 defa veri kaydedecek Şekilde), referans direnç gerilimi (V_r), örnek gerilimi (V_s), birim şekil değiştirme ölçen gerinim pulu sinyali, uygulanan mekanik yük, başlık yer değiştirmesi dijital dosyaya National Instruments marka veri toplama sistemi ile kaydedildi.



Şekil 3.14. Basınç testi a) rnek üzerindeki gerinim pulu b) Test elektrik devresi c) Test yapılırken d) Testte kullanılan ekipmanlar.

Ohm kanunu kullanarak her hangi bir anda devreden geçen akım (I_c) Eşitlik 3.1'den hesaplandı. Devreden geçen akım (I_c) ve örneğin gerilimi (V_s) kullanılarak örneğin direnci

(Rs) Eşitlik 3.2 'den hesaplanır. Mekanik deney sırasında örneğin direncindeki % değişim, Eşitlik 3.3 ile bulunur.

$$I_c = \frac{V_r}{R_r} \quad (3.1)$$

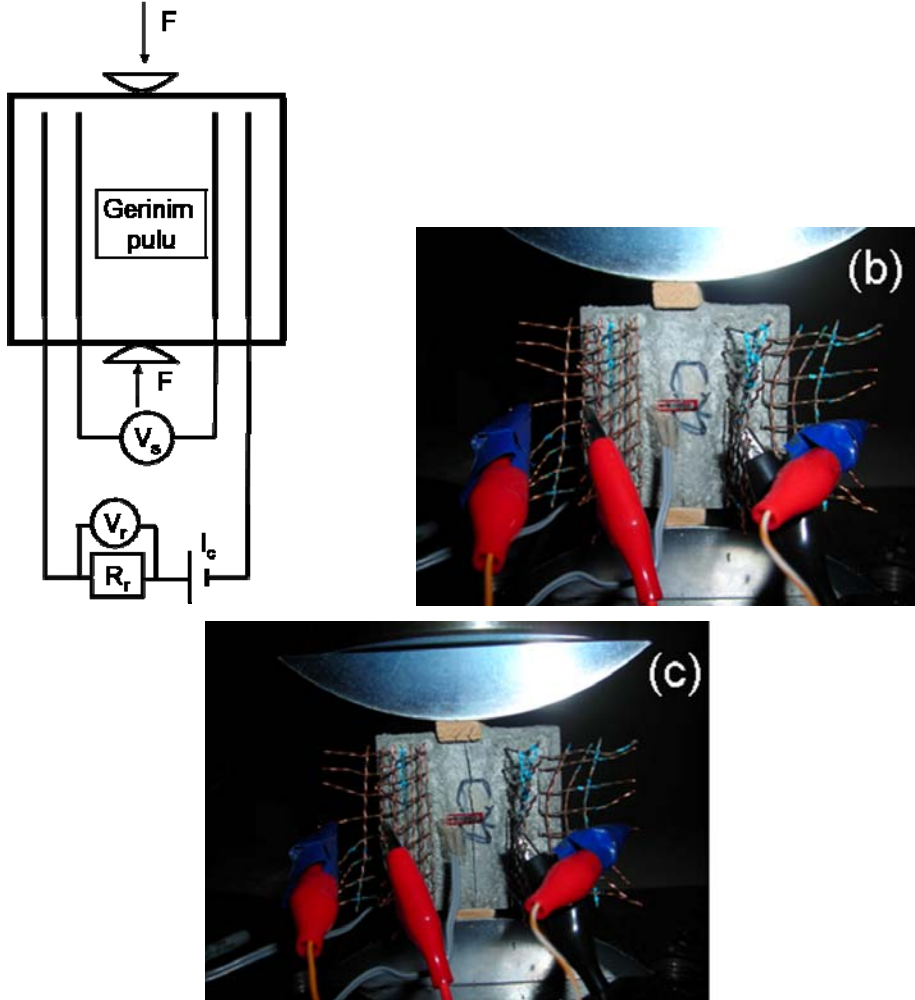
$$R_s = \frac{V_s}{I_c} \quad (3.2)$$

$$\%R = \left(\frac{R_s}{R_{s0}} - 1 \right) \times 100 \quad (3.3)$$

3.3 Yarmada Çekme Testi

Çekme birim şekil değiştirmesi ile elektriksel direnç değişimi arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla yarmada çekme testleri yapıldı. Basınç testinde kullanılan donanımlar kullanılmıştır. Yarmada çekme testi 2.5mm/dak yükleme hızı ile Shimadzu mekanik test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Yüklemede kullanılan plakalar TS –EN 12390-6 “Beton- Sertleşmiş beton deneyleri, -Bölüm6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini” standardına uygundur. Yükleme sırasında Şekil 3.15’de görüldüğü gibi, doğru akım örneğe dış iki elektrottan verilmiş, örnek potansiyel farkı (Vs) iç iki elektrottan ölçülmüştür. Örneğe seri olarak bir referans direnç bağlanmıştır (Rr=1000 Ohm) ve potansiyel farkı Vr olarak ölçülmüştür. Test sırasında yatay yöndeki çekme birim şekil değiştirme, yatay yöndeki gerinim pulları ile ölçüldü (Şekil 3.15). Çekme birim şekil değiştirmesi, potansiyel farklar (voltajlar) Vs ve Vr, mekanik yük, yükleme başlığı yer değiştirmesi aynı dijital dosyaya saniyede 10 defa kaydedildi. Örnek, test sırasında yatay yönde gelişen çekme birim şekil değiştirmesi nedeniyle oluşan düşey çatlak nedeniyle yenildi (Şekil 3.15c). Tüm örneklerde benzer düşey çatlak ile yenilme gerçekleşti. Sonuçların değerlendirilmesi, yukarıda basınç testi için sunulan denklem ve parametreler ile aynı şekilde yapıldı. Özetle, Eşitlikler 3.1 ve 3.2’den devreden geçen akım ve örnek dirençleri hesaplandı; Eşitlik 3.3 ile örnek elektriksel direncinin değişimi hesaplandı.

Basınç testinde test edilen karışımlar, yarmada çekme testi ile de test edilmiştir. Daha önce tanımlanan karbon ve çelik lifli karışımların isimlerinin yanına “Y” harfi eklenmesi ile aynı karışım ile hazırlanmış “Y”armada çekme testi örneği isimlenmiştir. Örnek olarak C1 basınç örneği ile CY1 yarmada çekme örneği aynı karışım ve aynı geometridedir. Her ikisi de 5cm küp numunedir. Diğer örnekler içinde bu durum geçerlidir. Örnekler daha önce anlatıldığı şekilde dökülmüş ve kür edilmiştir. Örnek testleri 28 gün kür sonrası 7 gün laboratuvar ortamında bekledikten sonra yapılmıştır.



Şekil 3.15. Yarmada çekme testi a) Devre şeması b) Örnek test edilirken c) Test sonrası (Örnek ortasında çatlak görülmekte).

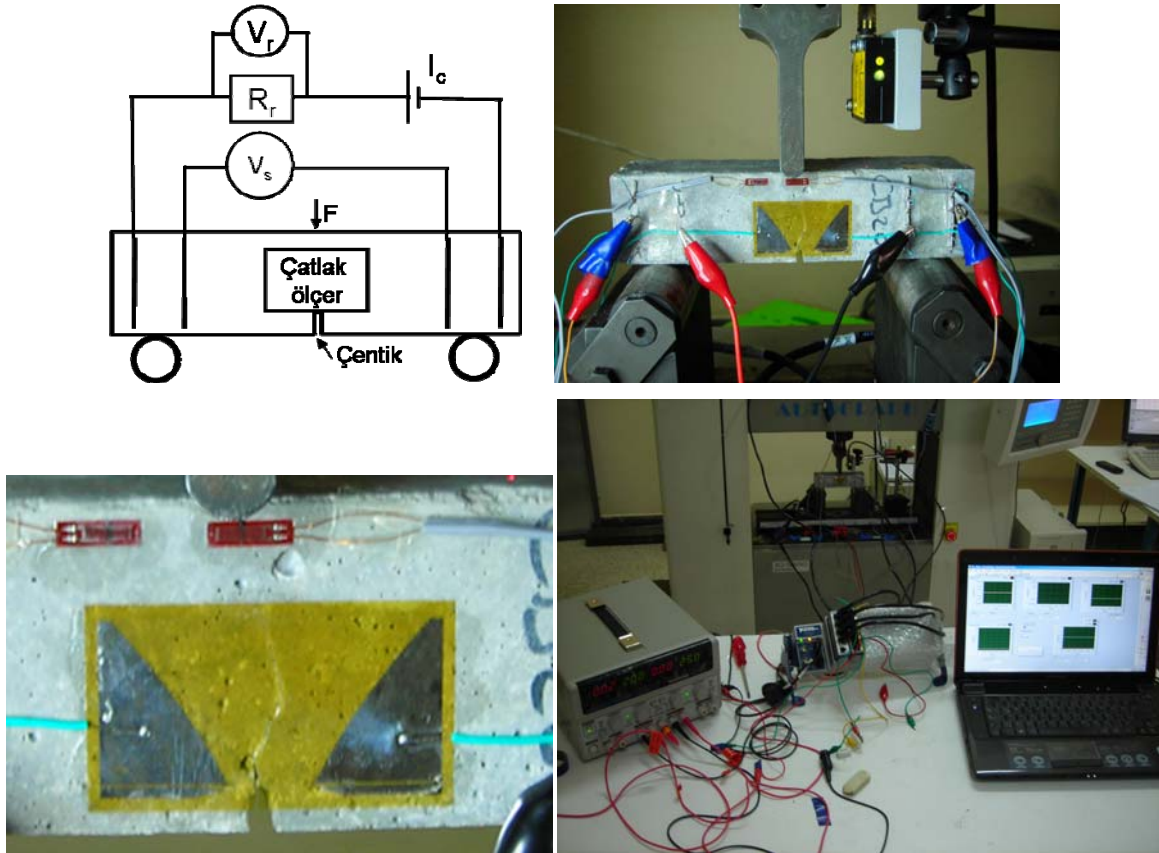
3.4 Çentikli Eğilme Testi

Çimentolu kompozitlerin, çatlak duyarlılığını tespit edebilmek amacıyla, çatlak uzunluğu ile elektriksel direnç arasındaki ilişki çentikli eğilme testleri ile belirlenmiştir. Eğilme testleri, yukarıda tanımlanan her karışımdan hazırlanan 3'er adet 4*4*16 cm lik çentikli örneğe uygulandı. Örnek isimleri, basınç testi karışımlarının isimlerinin yanına "B" eklenerek verildi. Örnek olarak basınç testinde S4 karışımı, eğilme testinde SB4 olarak isimlendirildi. 4*4*16 cm ebatlı prizmalar, kalıptan alındıktan sonra orta noktasında 5 mm derinliğinde çentik, elektrikli kesme makinesi ile açıldı. Açılan çentiğin görevi, çatlağın istenen yerden başlaması ve ilerleyen çatlağın boyunun ölçülmesidir.

Basınç ve yarmada çekme örneklerinde olduğu gibi, eğilme testlerinde de örnekler 28 gün kür edilip, 7 gün laboratuvar ortamında bekletildi ve sonra testler uygulandı.

Basınç testinde kullanılan cihazlar kullanılmıştır. Üç noktadan eğilme testi, 0,2mm/dak yükleme hızıyla yapılmıştır. Test sırasında, örneğe dış iki elektrottan elektrik verilmiş ve iç iki elektrottan örnek potansiyel farkı (voltajı, V_s) ölçülmüştür (Şekil 3.16a-b). Örneğe seri olarak referans bir direnç ($R_r=1000$ Ohm) bulunmaktadır. Bu referans direncin potansiyel farkı V_r olarak ölçülmüştür.

Çentik başından ilerleyen çatlakın boyunu ölçmek için örneğin ön ve arkasında iki adet TML marka çatlak boyu ölçer kullanılmıştır (Şekil 3.16b-c). Voltajlar V_s ve V_r , çatlak boyu, mekanik yük ve yükleme silindiri yer değiştirmesi saniyede on defa dijital bir dosyaya yazdırılmıştır. Testte kullanılan donanım Şekil 3.16d'de sunulmuştur. Devreden geçen akım ve örnek direnci Eşitlikler 3.1 ve 3.2 den bulunmuştur. Örnek direncindeki yüzde değişim Eşitlik 3.3'den bulunmuştur.



Şekil 3.16. Eğilme testi a) Devre şeması b) Örnek test edilirken c) Ölçülen çatlak d) Testte kullanılan ekipmanlar.

3.5 ÇES Performans Parametreleri ve ÇES'in Belirlenmesi

Birim şekil değiştirme ölçerin performansı genelde iki parametre ile ölçülür; duyarlılık (K) ve doğrusallık (LE). Duyarlılık (K), elektriksel direncin bir birim şekil değiştirmeye karşılık değişimidir ve Eşitlik 3.4 ile hesaplanır. Duyarlılığın yüksek olması, algılayıcının duyarlı olduğunu gösterir. Metal gerinim pullarının duyarlılığı genelde 2 dir. Doğrusallık, elektriksel direncin yüzde değişimi (%R) - birim deformasyon grafiği ile bu grafiğe en küçük kareler ile uydurulmuş doğru arasındaki maksimum sapmanın (Δ_{max}), elektriksel direncin toplam yüzde değişimine (% R_{fs}) yüzdesi olarak, Eşitlik 3.5'deki gibi hesaplanır. Doğrusallık azaldıkça, algılayıcı ile belirlenen birim şekil değiştirme hatası azalır. % R_{fs} , %R en büyük değeridir. Algılayıcının, kabul edilebilir bir hata ile ölçüm yapabileceği en büyük birim şekil değiştirme değerine, limit değer (SL) denir. Tipik metal gerinim pullarının limit değerleri %0.5-%3 arasındadır.

$$K = \frac{(R_s - R_{so}) / R_{so}}{\Delta \varepsilon} \quad (3.4)$$

$$\%LE = \left(\frac{\Delta_{max}}{\%R_{fs}} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

Çimentolu kompozitlerin çatlak duyarlılığı (SC) ilk defa bu çalışmada tanımlanmıştır. Çatlak duyarlılığı, elektriksel direncin yüzde değişiminin (%R), çatlak uzunluğuna oranı olarak tanımlanmıştır. %R'ın 1 mm çatlak boyu ilerlemesiyle değişimidir. Çatlak duyarlılığı arttıkça, çimentolu kompozitin çatlağa olan duyarlılığı artar.

Çatlak ölçümünde doğrusallık (LEC), %R – çatlak uzunluğu eğrisinin, eğriye uydurulmuş en iyi doğrudan maksimum sapması ile, %R'ın toplam değişimine yüzdesi olarak ilk defa bu çalışmada tanımlanmıştır. LEC azaldıkça, çimentolu kompozit ile çatlak ölçüm hatası azalır.

İP2 kapsamında Çimento Esaslı Sensör (ÇES) için en iyi karışımın belirlenmesi için çelik lifli 18, karbon lifli 27, lifsiz 1 karışım, toplam 46 karışım oluşturulmuştur, bu karışımların içerikleri Ek 1' de sunulmuştur. Her karışımdan 3 adet basınç, 3 adet yarma testi için 5 cm küplerden

276 adet dökülmüş ve test edilmiştir. Her karışımdan 3 adet 4*4*16 cm prizma örnek dökülmüş, 138 prizma, çentikli eğilme testi ile test edilmiştir. Toplam 414 mekanik test yapılmıştır. Her mekanik testte, saniyede 10 defa, zaman, yük, birim şekil değiştirmeler, iki adet voltaj ölçümü, eğilme testlerinde ek olarak çatlak uzunluğu, kaydedilmiştir. Her testte ortalama olarak 6 kolon, 3000 satırlık veri dosyaları işlenmiş, her dosyaya ortalama olarak 14 kolon daha eklenerek veriler analiz edilmiştir. Birim şekil değiştirmeye ve çatlak uzunluğuna en duyarlı karışım belirlenmiştir. Testler sırasında ve analizlerde önemli sonuçlar elde edilmiştir. Bu gözlemler uluslar arası dergilerde yayınlanmıştır; halen hakem değerlendirmesinde ve yazım aşamasında olan yayınlar vardır.

3.6 Yükleme Hız Etkisinin Araştırılması

Çimento Esaslı Sensör (ÇES) olarak seçilen karışım ile, ÇES yükleme hız limitleri belirlenmesi (İP3) için 15 adet 5 cm küp örnek dökülmüştür. Beş farklı yükleme hızında, her hızda 3 basınç testi yapılmıştır. Testler önceki bölümlerde detayı verilmiş olan basınç testi ile yapılmış ve aynı şekilde analiz edilmiştir. S4-IP3-1, 0,5mm/dak; S4-IP3-2, 1mm/dak; S4-IP3-3, 2.5mm/dak; S4-IP4-1, 5mm/dak; S4-IP5-1, 10mm/dak hızla test edilmiştir.

3.7 Birim Şekil Değiştirme ve Çatlak Boyu ile %R Arasındaki Etkin Mekanizmaların Belirlenmesi

Birim şekil değiştirmeye ve çatlak boyuna en duyarlı karışımın ÇES olarak belirlenmesi için yapılan toplam 414 mekanik testin veri dosyaları, karışım içerikleri dikkate alınarak incelenmiştir. Hızlı kesme makinesi ile kesilen test örneklerinin kesitleri incelenmiştir. Birim şekil değiştirme ve çatlak uzunluğu ile elektriksel direnç değişimi arasındaki etkin mekanizmalar aydınlatılmıştır.

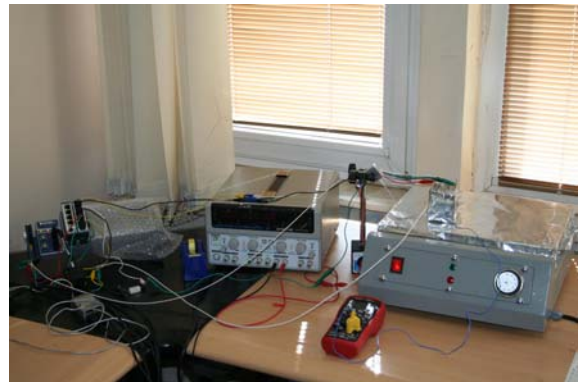
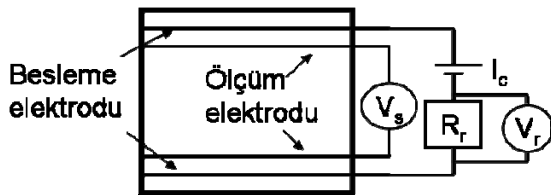
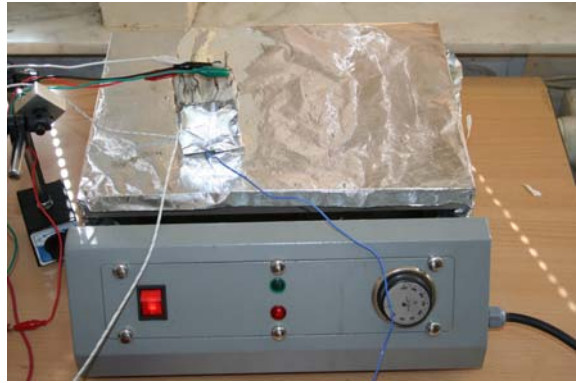
3.8 Sıcaklığın Elektriksel Direnç Değişimine Etkisini Araştırmak için Yapılan Deney

ÇES olarak belirlenen karışımdan 5 cm ebatlı küp, önceki bölümlerde anlatıldığı gibi hazırlanıp 28 gün kür edilmiştir. Yedi gün laboratuvar ortamında bekletildikten sonra, sabit nemde farklı sıcaklıklarda test edebilmek amacıyla, elektrotlar kısa devre yapmayacak şekilde ÇES alüminyum bant ile kaplanmıştır (Şekil 3.17a). Elektrotların kısa devre yapmaması için elektrotların olduğu yüzey özel seramik kili ile kaplanmıştır. ÇES'in altına ve üstüne sıcaklık ölçmek için birer termokapl bağlanmıştır (Şekil 3.17a mavi çizgili beyaz kablolar). Açık tablalı ısıtıcının tabla sıcaklığı da termokapl ile takip edilmiştir (Şekil 3.17a ÇES altındaki mavi kablo ile). Ölçümler, ÇES alt-üst sıcaklık okumalarının aynı olduğu

zamanlarda alındı. Bu test için özel olarak Şekil 3. 17b de görülen, 25-400 derece arasında sıcaklık veren termostatlı açık tablalı ısıtıcı imal edilmiştir.

Daha önce basınç testinde sunulan elektrik devresi oluşturulmuştur. Özetle, örneğe seri bağlı $R_r=1000$ Ohm bir referans direnç vardır (Şekil 3.17c). Doğru akım kaynağından devreye 15 V gerilim uygulanmıştır. ÇES'in alt ve üst sıcaklıkları, ÇES potansiyel farkı V_s ve referans direnç potansiyel farkı V_r , saniyede 10 defa dijital bir dosyaya, ÇES sıcaklığında ortalama her 7 derece artışta, yaklaşık 25 saniye kaydedilmiştir. Deneyde kullanılan cihazlar Şekil 3.17d'de sunulmaktadır.

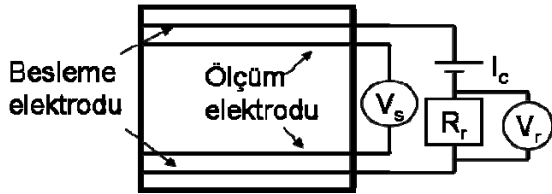
Ohm kanununu kullanarak Eşitlikler 3.1 ve 3.2'den herhangi bir anda devreden geçen akım I_c ve ÇES elektriksel direnci R_s bulundu. Eşitlik 3.3 ile elektriksel direnç değişimi (%R) bulundu. %R hesaplarırken R_{s0} , oda sıcaklığındaki ÇES direnci (ısıtma öncesi sıcaklık) alındı.



Şekil 3.17. Sıcaklık etkisi testi a) ÇES testte b) Açık tablalı özel ısıtıcı c) Elektrik devresi d) Deneyde kullanılan cihazlar (soldan sağa veri toplama cihazı- doğru akım kaynağı- açık tablalı ısıtıcı).

3.9 Nemin Elektriksel Direnç Değişimine Etkisini Araştırmak için Yapılan Deneyler

Nemin elektriksel direnç üzerindeki etkisini tespit etmek için, 3 adet 5 cm ebatlı küp ÇES hazırlanmıştır. ÇES'ler 28 gün kür edildikten sonra tartılıp, elektriksel ölçümleri Şekil 3.18a' da verilen şemadaki gibi (daha önceki V_s ve V_r ölçümleri ile aynı devre) V_s ve V_r voltmetre kullanarak ölçülmüştür (Şekil 3.18b). Devrede örneğe seri bağlı $R_r=1000$ Ohm direnç kullanılmıştır. Devreye 25 V doğru akım verilmiştir. Etüve konmadan önce; etüvde 10, 30, 60, 120, 210, 330 dakika, 20, 22.5, 28, 96.5, 145 saat tutulduktan sonra ağırlıkları, V_s ve V_r potansiyel farkları ölçülmüştür (Şekil 3.18c). Her etüv zamanı için, Eşitlikler 3.1-3.2-3.3'den örnek direnci R_s ve elektriksel direnç değişimi $\%R$ hesaplanmıştır. Örneklerin etüv kurusu ağırlıkları saptanmış, buna göre başlangıç ve ölçüm alınan zamanlardaki nem yüzdeleri belirlenmiştir.



Şekil 3.18. Nem düzeltmelerinin belirlenmesi için a) Elektrik devresi b) Voltaj ölçümü c) Deney ekipmanı (fırın-tartı-doğru akım güç kaynağı- voltmetreler).

Nem oranının, birim şekil değiştirme - elektriksel direnç değişimi ve çatlak boyu- elektriksel direnç değişimi arasındaki ilişkilere etkisini belirlemek için 5 farklı nem oranında üçer adet basınç, yarmada çekme ve çentikli eğilme testi yapmak için örnekler döküldü. ÇES karışımını kullanarak otuz adet 5 cm ebatlı küp, onbeş adet 4*4*16 cm prizma örnek döküldü. Bu örnekler 28 gün su içinde kür edildikten sonra, havlu ile silinip tartıldı ve 90 derecede fırına kondu. 30.-60.-120.-210.-330. dakikalarda basınç, yarma ve eğilme testleri için 3'er örnek fırından çıkartılıp tartıldı. Tartım sonrası nemin değişmemesi için örnekler Şekil 3.19'da görüldüğü gibi alüminyum folyoya sarıldı ve cam kapların içinde soğumaya bırakıldı. Soğuyan örnekler kilitli poşetlere konarak sabit nemde test zamanına kadar saklandı ve testleri yapıldı.



Şekil 3.19. Farklı nem içeriklerine sahip ÇES örnekleri a) Küp b) 4*4*16 cm prizma.

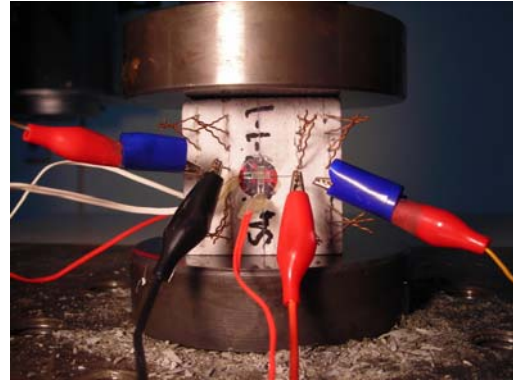
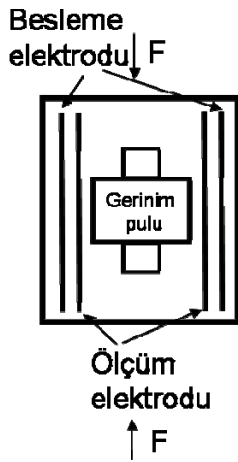
3.10 ÇES'in Sensör Özelliklerinin Belirlenmesi

ÇES'in sensör özelliklerinin belirlenmesi için 6 adet 5 cm ebatlı küp örnek ve 3 adet 4*4*16 cm ebatlı prizma örnek ÇES olarak belirlenen karışım ile dökülmüştür. Basınç, yarmada çekme ve çentikli eğilme testleri üçer adet örneğe uygulanmıştır. Basınç ve çekme birim şekil değiştirmeleri ve çatlak boyu için duyarlılık ve doğrusallık belirlenmiştir. Testlerin yapılışı ve performans parametreleri önceki bölümlerde detaylı anlatılmıştır.

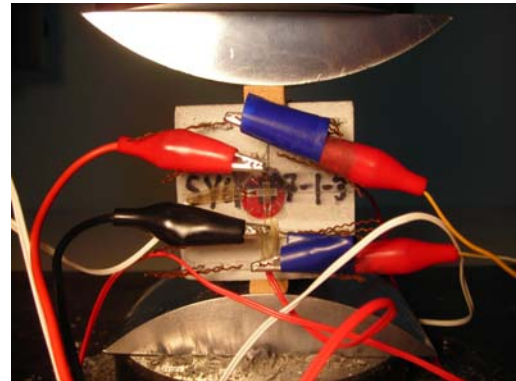
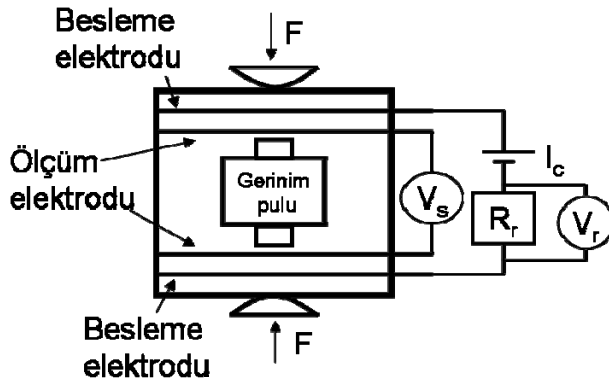
3.11 Çapraz Yükleme Testleri

Çapraz yüklemenin ÇES üzerindeki etkisini test etmek için, 6 adet 5 cm ebatlı küp örnek dökülmüş ve 28 gün kür edilmiştir. Üç örneğe, Şekil 3.20'de görüldüğü gibi, yük uygulama yönü, elektrik akımına dik olacak şekilde basınç testi uygulanmıştır. Deplasman kontrollü basınç testinde yükleme hızı 0.5 mm/dak dır. Farklı üç adet örneğe, Şekil 3.21'de görüldüğü gibi, elektrik akımına dik yönde çekme birim şekil değiştirmesine maruz kalacak şekilde yarma testi uygulanmıştır. Deplasman kontrollü yarmada çekme testinde yükleme hızı 2.5

mm/dak dır. Testlerde kullanılan elektrik devrelerinde, ÇES'e seri bağlı $R_r=1000$ Ohm referans direnç vardır. ÇES ve referans direncin olduğu devreye 15 V doğru akım verilmiştir. Bu testlerde çift yönlü (0-90 derece) özel gerinim pulları ile hem düşey hem yatay birim şekil değiştirmeler, ÇES potansiyel farkı V_s , referans direnç potansiyel farkı V_r , mekanik yük, başlık deplasmanı dijital dosyaya saniyede 10 defa kaydedildi. Testlerde birim şekil değiştirmeler 1: düşey, 2 : yatay dır. Basınç testinde düşey basınç birim şekil değiştirmesi 1 numaralı gerinim pulu ile, yatay çekme birim şekil değiştirmesi (Poisson etkisi ile oluşur), 2 numaralı gerinim pulu ile ölçüldü. Yarmada çekme testinde 1 numaralı gerinim pulu düşey, 2 numaralı gerinim pulu yatay çekme birim şekil değiştirmelerini ölçtüler.



Şekil 3.20. Elektrik akımına dik yönde yükleme ile basınç testi a) Test şeması b) Test.



Şekil 3.21. Çekme birim şekil değiştirmesinin, elektrik akımına dik uygulandığı yarma testi a) Test şeması b) Test.

Devreden geçen akım, ÇES elektriksel direnci ve elektriksel direnç değişimi Eşitlikler 3.1-3.2-3.3'den bulunmuştur.

Bu testler ile elektrik akımına dik yönde basınç ve çekme birim şekil değiştirmelerinin, elektriksel direnç değişimine etkisi tespit edilmiştir.

3.12 Model Kolon içinde ÇES'in Test Edilmesi

ÇES'in yapı elemanı içinde uyumlu çalışmasını test etmek amacıyla yedi adet 15*15*30 cm model kolon hazırlandı. Her model kolon testinde yapılanlar bu bölümde açıklandı.

ÇES bakır elektrotlarına, izoleli bakır kablolar lehimle bağlandı. Şekil 3.22a'da görüldüğü gibi, ÇES elektrotları sıcak silikon, ısınınca büzülen plastik izolasyon kablosu ve izolasyon bandı ile izole edildi. ÇES'ler model kolon kalıplarının içine, orta noktaya Şekil 3.22b'deki gibi yerleştirildi. Pas payı olarak ve ÇES'in hareket etmemesi için, kalıp tabanına iki adet 5*10*60 mm ahşap çita birbirine paralel yapıştırılıp, üstlerine ÇES yapıştırıldı. ÇES kalıba, model kolon basınç altındayken ÇES içinden geçen elektrik akımı, basınç birim şekil değiştirmesine paralel olacak şekilde yerleştirildi. C30 sınıfında beton karışımı tasarlandı ve laboratuarda hazırlanıp kalıba Şekil 3.22c-d'de görüldüğü gibi döküldü. Betonun kalite kontrolünü yapmak amacıyla üç adet 15 cm ebatlı küp örnek döküldü (Şekil 3.22e).



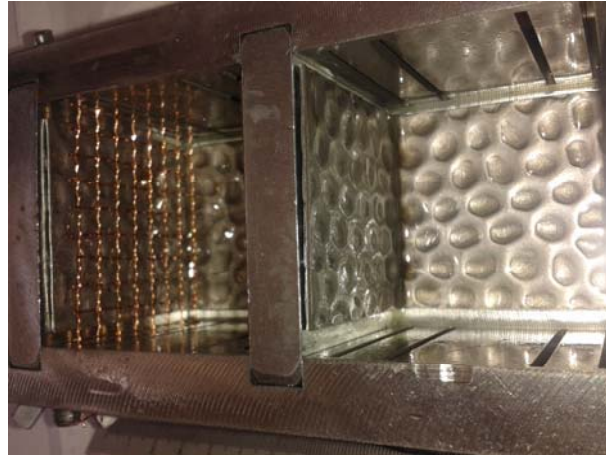
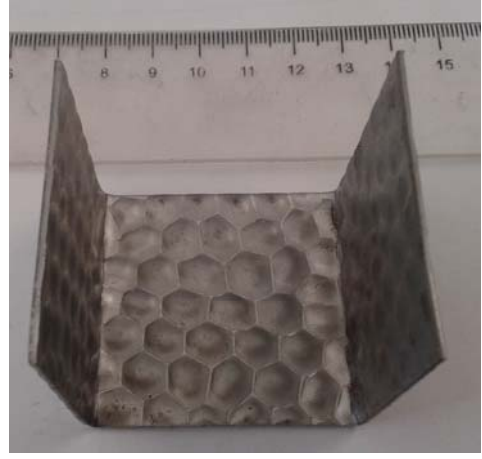
Şekil 3.22. a) ÇES elektrotları izole edildi b) ÇES model kolon kalıbı içinde c) Model kolon kalıbına beton döküldü d) İçinde ÇES olan model kolon e) 15 cm ebatlı küp örnekler.

Döküm iki seviyede yapıldı, her seviyede beton 15 kere şişlendi. Model kolon ve küp örnekler, 24 saat sonra kalıptan alınıp, 28 gün 20 derecede kür tankı içinde kür edildi. 28. gün örnekler kür tankından çıkartılıp, bir hafta dışarıda bekletildi. Model kolonun dört yüzeyine, dört gerinim pulu yapıştırıldı (Şekil 3.23a-b). Basınç testi sırasında, daha önceki bölümlerde sunulan elektrik devresi oluşturulmuştur. Özetle, ÇES'e seri bağlı $R_r=1000$ Ohm direnç vardır ve devreye 15 V doğru akım verilmiştir. ÇES'in dış iki elektrotundan doğru akım verilip, iç iki elektrotundan ÇES potansiyel farkı ölçülmüştür. Lazer deplasman ölçer ile başlık yer değiştirmesi ölçülmüştür (Şekil 3.23b). ÇES ve referans direnç potansiyel farkları V_s ve V_r , gerinim pulu sinyalleri, lazer deplasman ölçer sinyali saniyede 10 defa, veri toplama cihazı ile test süresince kaydedilmiştir. Yükleme hızları 50-100-200-680 kg/saniye için testler yapılmıştır. Ele marka 300 ton kapasiteli hidrolik pres kullanılmıştır. Küp örnekler, model kolonun test edildiği tarihte kırılmıştır. Herhangi bir anda devreden geçen akım I_c , ÇES elektrik direnci R_s ve elektriksel direnç değişimi %R Eşitlikler 3.1-3.2-3.3 ile bulunmuştur.

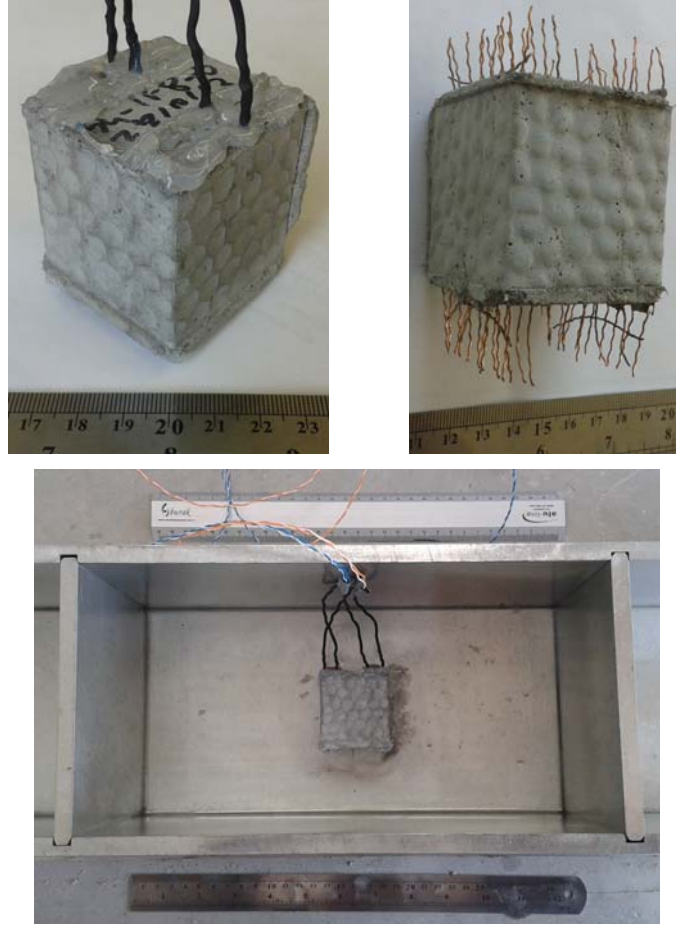


Şekil 3.23. Model kolon testi a) Kullanılan cihazlar b) Model kolon testte.

Projeye dahil olmamasına rağmen, ÇES ile içinde bulunduğu betonun aderansını arttırmak için, Şekil 3.24a'da sunulan pürüzlü levhalar, 1 m*1 m tabaka olarak satın alınıp, uygun ölçülerde kesilip, kalıbın içine girecek şekilde şekillendirilmiştir (Şekil 3.24a-b). ÇES kalıbının içine, taban ve iki yan yüzeye pürüz verecek şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.24c-d). Aynı işlem hem içe hem dışa pürüzlü ÇESler elde edecek şekilde tekrar edilmiştir ve Şekil 3.25'de sunulan ÇESler elde edilmiştir ve farklı model kolonlar içine yerleştirilmiştir. İçe pürüzlü ÇES'in kolon kalıbı içindeki hali Şekil 3.25c'de verilmiştir. İçe ve dışa pürüzlü ÇESlerin olduğu model kolonlar da yukarıda anlatıldığı gibi basınç testi ile test edilmiştir.



Şekil 3.24. a) Pürüzlü 2 mm kalınlığında levha b) Kalıba girecek şekilde şekillendirilmiş levha c) Kalıba yerleştirilmiş levhalar d) Taban ve yan iki yüzeyi pürüzlü kalıp.



Şekil 3.25. a) İçe pürüzlü ÇES b) Dışa pürüzlü ÇES c) İçe pürüzlü ÇES, kolon kalıbı içinde.

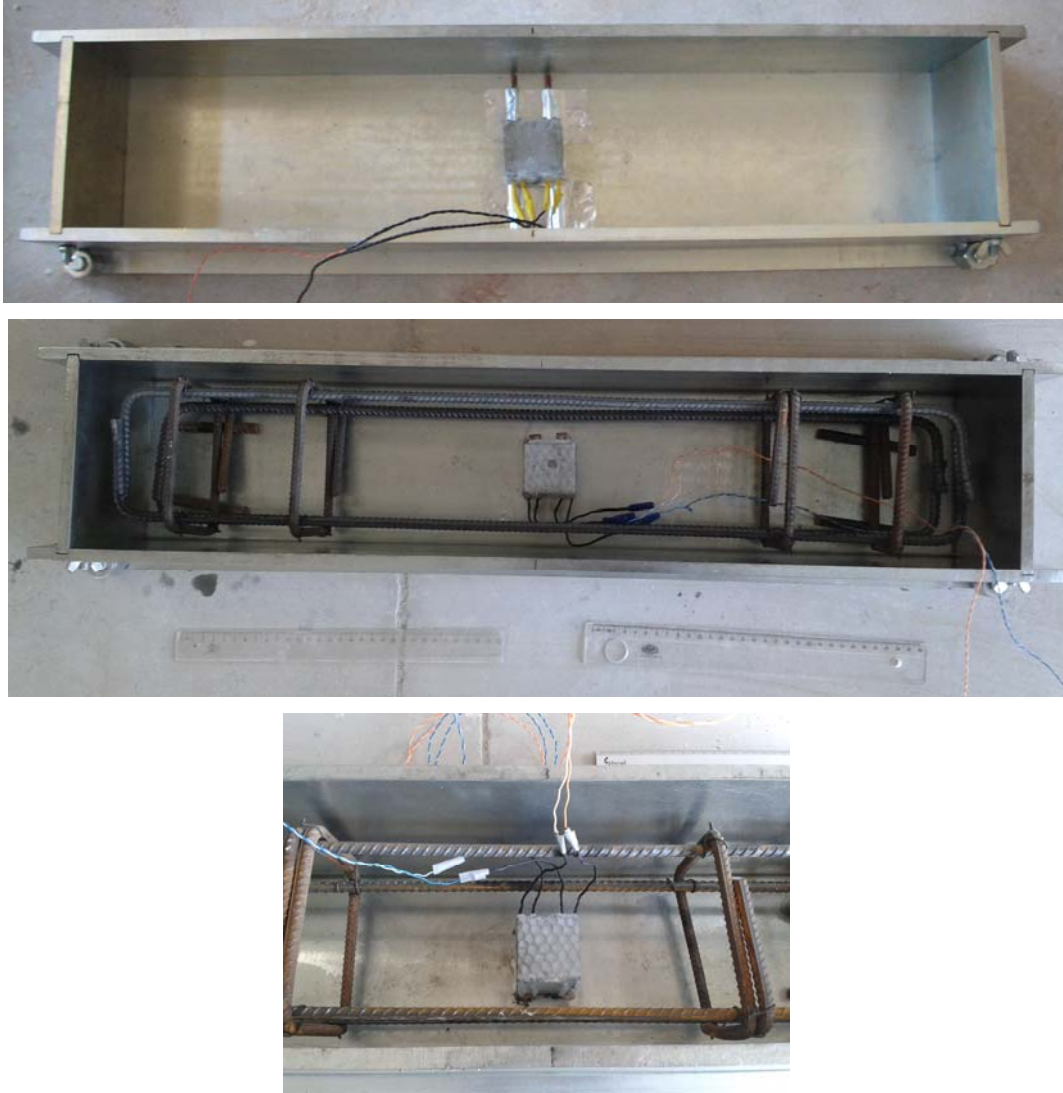
3.13 Model Kiriş İçinde ÇES'in Test Edilmesi

ÇES'in yapı elemanı içinde uyumunu test etmek amacıyla, 6 adet 15*15*75 cm ebatında kiriş dökülmüştür. Kirişlerin dökümü ve test edilmesi bu bölümde açıklandı.

Önceki bölümde anlatıldığı gibi, yüzeyi düz, içe ve dışa pürüzlü olmak üzere ÇESlerden ikişer adet hazırlanıp, sıcak silikon, özel kablolar ve bantlarla izole edildi. Pürüzlü ÇESler projeye dahil olmamasına rağmen, aderansı arttırmak için kullanıldı.

İki adet düz ÇESli kiriş donatısız döküldü (Şekil 3.26a). Kalan dört adet donatılı kirişin ikisine içe pürüzlü, diğer ikisine dışa pürüzlü ÇES yerleştirildi (Şekil 3.26b-c). Kirişlere donatı koyulması, eğilme kapasitelerini arttırdı, ayrıca ÇES'in donatılı kirişlerde performansını test etmemizi sağladı. Her gruptan birer kiriş, ÇES, eğilmede çekme veya basınç bölgesine gelecek şekilde test edildi. Kirişlerde boyuna donatı olarak dört adet 8 mm çaplı çelik donatı, dört adet de 8 mm çaplı etriye vardır. Paspayı 8 mm'dir.

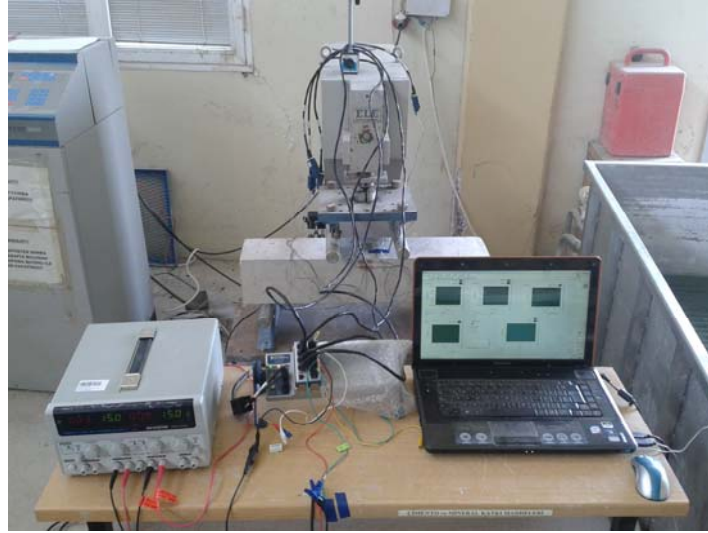
ÇES kalıba, kiriş eğilme altındayken ÇES içinden geçen elektrik akımı, basınç veya çekme birim şekil değiştirmesine paralel olacak şekilde yerleştirildi. C30 sınıfında beton karışımı tasarlandı ve laboratuarda hazırlanıp kalıba döküldü. Betonun kalite kontrolünü yapmak amacıyla üç adet 15 cm ebatlı küp örnek döküldü. Dökümler iki seviyede yapıldı, her seviyede beton 15 kere şişlendi. Model kiriş ve küp örnekler, 24 saat sonra kalıptan alınıp, 28 gün 20 derecede kür tankı içinde kür edildi. 28. gün örnekler kür tankından çıkartılıp, bir hafta dışarıda bekletildi.



Şekil 3.26. Kiriş kalıpları a) Düz ÇESli b) Dışa pürüzlü ÇESli c) İçe pürüzlü ÇESli

Kirişlerin, ÇES'in olduğu bölgenin yüzeyine dört adet gerinim pulu yapıştırıldı (Şekil 3.27a'da dördüncü gerinim pulu arkada kalıyor). Kolon basınç testinde anlatılan elektrik devresi oluşturuldu. Özetle, ÇES'e seri bağlı $R_r=1000$ Ohm direnç vardır ve devreye 15 V doğru akım verilmiştir. ÇES'in dış iki elektrotundan doğru akım verilip, iç iki elektrotundan ÇES

potansiyel farkı ölçülmüştür. Dört noktadan eğilme testi yapılmıştır (Şekil 3.27a-b). Lazer deplasman ölçer ile üst silindir başlık yer değiştirmesi ölçülmüştür. ÇES ve referans direnç potansiyel farkları V_s ve V_r , gerinim pulu sinyalleri, lazer deplasman ölçer sinyali saniyede 10 defa, veri toplama cihazı ile test süresince kaydedilmiştir. Yükleme hızı 4 kg/saniye alınmıştır. Ele marka 300 ton kapasiteli hidrolik presin eğilme aparatı kullanılmıştır. Küp örnekler, kirişlerin test edildiği tarihlerde kırılmıştır. Eğilme deneylerinde kullanılan ekipmanlar Şekil 3.27b'de verilmektedir. Herhangi bir anda devreden geçen akım I_c , ÇES elektrik direnci R_s ve elektriksel direnç değişimi %R Eşitlikler 3.1-3.2-3.3 ile bulunmuştur.



Şekil 3.27. Kiriş eğilme testi a) Kiriş ve gerinim pulları b) Kullanılan ekipmanlar.

3.14 Aktif Madde Etkisinin Araştırılması

ÇES bünyesindeki aktif maddelerin zaman içinde bünyesel dirence etkisini araştırmak için, ÇES karışımının belirlendiği 20. ayda, basınç, yarmada çekme ve çentikli eğilme deneyleri için altışar adet örnek (12 adet 5 cm ebatlı küp ÇES; 6 adet 4*4*16 cm prizma)

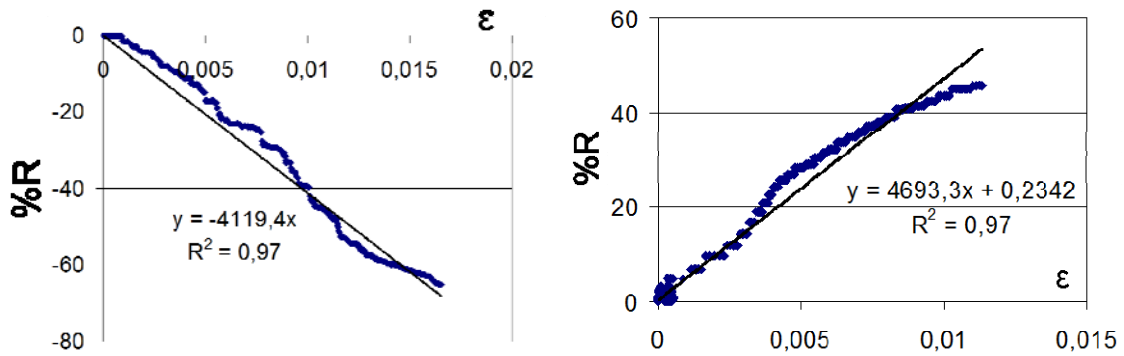
hazırlanmıştır. 28 gün 20 derecede su içinde kür edildikten sonra, oda koşullarında bekletildiler. Basınç, yarmada çekme ve çentikli eğilme deneyleri üçer örneğe 90. (23. ay) ve 480. (36. ay) günlerinde uygulandı. Deneyler, önceki bölümlerde anlatıldığı şekilde yapıldı. Birim şekil değiştirme ve çatlak boyu ile elektriksel direnç değişimi arasındaki korelasyonlar bulundu. Bu korelasyonlar, 20. ayda bulunan korelasyonlar karşılaştırıldı. ÇES bünyesindeki aktif maddelerin bu korelasyonlara ve elektriksel dirence etkisi belirlendi.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular bu bölümde sunulmaktadır.

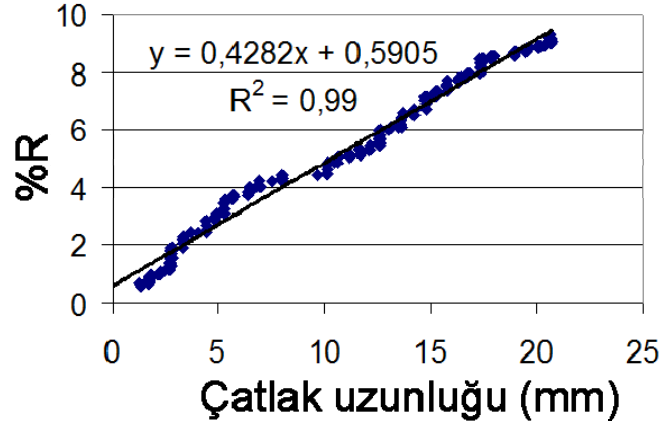
4.1 En İyi Karışımın ÇES Olarak Belirlenmesi

Çimento Esaslı Sensör için en iyi karışımın belirlenmesi için çelik lifli 18, karbon lifli 27, lifsiz 1 karışım, toplam 46 karışım oluşturulmuştur. Her karışımın 3 adet basınç, 3 adet yarma testi için 5 cm küplerden 276 adet dökülmüş ve test edilmiştir. Her karışımın 3 adet 4*4*16 cm prizma örnek dökülmüş, 138 prizma çentikli eğilme testi ile test edilmiştir. Toplam 414 mekanik test yapılmıştır. Her mekanik testte, saniyede 10 defa, zaman, mekanik yük, birim şekil değiştirmeler, iki adet voltaj ölçümü (örnek potansiyel farkı V_s ve referans direnç potansiyel farkı V_r), eğilme testlerinde ek olarak çatlak uzunluğu, kaydedilmiştir. Her testte ortalama olarak 6 kolon, 3000 satırlık veri dosyaları işlenmiş, her dosyaya ortalama olarak 14 kolon daha eklenerek veriler detaylı analiz edilmiştir. Her hangi bir anda devreden geçen akım (I_c), örnek elektriksel direnci (R_s) ve elektriksel direnç değişimi (%R) Eşitlikler 3.1-3.2-3.3 ile bulunmuştur. Her basınç ve yarmada çekme testi için Şekil 4.1'de görülen birim şekil değiştirme – elektriksel direnç değişimi (%R) grafikleri oluşturulmuştur. Grafiklere en küçük kareler ile uyan doğru denklemi ve korelasyon katsayısı tespit edilmiştir. Örneğin birim şekil değiştirme ile %R arasındaki ilişkinin doğrusal olduğu maksimum birim şekil değiştirme (SL) bulunmuştur. Her test için duyarlılık (K) ve doğrusallık (LE) bulunmuştur.



Şekil 4.1. Birim şekil değiştirme- %R grafiği a) S4 basınç testi b) SY4 yarmada çekme testi.

Çentikli eğilme testleri analiz edilmiş, her test için çatlak uzunluğu - %R grafiği oluşturulmuştur; örnek bir grafik Şekil 4.2'de verilmiştir. Her test için çatlak duyarlılığı (SC) ve çatlak ölçümünde doğrusallık (LEC) bulunmuştur.



Şekil 4.2. Çatlak uzunluğu - %R grafiği, SB4 çentikli eğilme testi.

ÇES için en uygun karışımı tespit ederken toplam 414 mekanik testin her birinden elde edilen duyarlılık, doğrusallık, R^2 , limit birim şekil değiştirme değeri parametrelerini tek tek değerlendirilerek bir sonuca varmak imkansız olduğu için, bunlar kullanılarak hesaplanan puanlar dikkate alınmıştır.

ÇES için en uygun karışımı tespit ederken toplam 276 basınç ve yarmada çekme testi için duyarlılık (K), doğrusallık (LE), korelasyon katsayısı (R^2) ve limit birim şekil değiştirme değeri (SL: örneğin birim şekil değiştirme - %R ilişkisinin doğrusal olduğu maksimum birim şekil değiştirme değeri) parametre olarak kullanılarak her test için Eşitlik 4.1 kullanılarak puan hesaplandı.

$$Puan(basma, yarma) = 1000 \times SL + K - LE + 25 \times R^2 \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1'de SL değerinin 1000 ile, R^2 'nin 25 ile çarpılmasının nedeni, bu sayıları önemleri oranında K ve LE mertebesine ölçeklendirmektir.

Eşitlik 4.2 eğilme testlerine puan vermek için kullanılmıştır.

$$Puan(egilme) = SC - LEC + 25 \times R^2 \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.2'de SC çatlak duyarlılığı, LEC çatlak ölçümünde doğrusallık, R^2 çatlak uzunluğu - %R ilişkisinin korelasyon katsayısıdır. R^2 , önemi oranında 25 ile çarpılarak SC ve LEC mertebesine ölçeklendirilmiştir.

Her karışımdan üçer adet basınç, yarmada çekme ve eğilme testi yapılmıştır. Bir karışımın üç basınç testinden elde edilen puanın ortalaması ve standart sapması alınarak, o karışımın ortalama basınç puanı ve standart sapması bulunmuştur. Benzer şekilde yarmada çekme ve çentikli eğilme testleri için de, her karışım için yapılan üçer testin puanlarının ortalaması ve standart sapması bulunarak, o karışımın yarmada çekme ve çentikli eğilme ortalama puanları ve bu puanların standart sapmaları bulunmuştur. Çelik lifli karışımların puanları Tablo 4.1'de, sunulmuştur.

Benzer şekilde karbon lifli karışımların puanları hesaplanmış ve Tablo 4.2'de sunulmuştur.

Karışımları tasarlamak için seçim yapılırken, ÇES'in en başta basınç birim şekil değiştirmesini ölçmek için kullanılacağı düşünülerek basınç testi puanına öncelik verilmiştir. Ayrıca, aynı karışımın farklı örnekleri arasındaki sonuçlarının birbirinden farklılığını veren standart sapmanın yüksek olmaması istenir, böylece karışımın farklı örneklerinden alınan sonuçlar daha güvenilir olur. Birbirine yakın sonuçları olan karışımlarda duyarlılık, doğrusallık, R^2 ve sinyal yapısı (%R- birim şekil değiştirme grafiği yapısı) dikkate alınmıştır. Yapılan tüm testler için tüm verileri ve grafikleri sunmak zor olacağından, puan tabloları sunulmuştur.

Buna göre:

- Çelik lifli birinci grup ilk on karışım arasından S4 ve S9 en iyi karışım olarak seçilmiştir. S4 ve S9'dan puanları yüksek karışımlar olsa da, bunların standart sapmaları da yüksektir. Ayrıca, çelik lifli ilk on karışımdan bir adet 6 mm lif uzunluğunda ve bir adet 13 mm lif uzunluğunda karışımın seçilmiş olması, farklı lif uzunluklarının ikinci gruba taşınması için önemlidir.
- Çelik lifli, ikinci grup karışımlar oluşturulurken, daha önce anlatıldığı gibi S4 modifiye edilerek S11-12-13; S9 modifiye edilerek S14-15-16 oluşturulmuştur. S1-S16 arasından puan ve standart sapmaya göre en uygun karışım S4 seçilmiştir. S4, farklı su/çimento oranları için modifiye edilmiş, S17-S8 elde edilmiştir. S1-S18 arasından aynı kriterler ile seçilen en iyi karışım S4 olmuştur.
- Karbon lifli birinci gruptaki yirmi karışımdan C1 ve C7 seçildi. C1 ve C7, ilk yirmi karışımda puanı yüksek ve standart sapması düşük karışımlardır. C1 ve C7 modifiye edilerek C21 ve C22 oluşturuldu. C1 ve C22 arasından en iyi karışım C22 seçilmiştir. C22'nin basınç puanı yüksek, R^2 değeri 0.99 ve sinyal yapısı güçlüdür. C22 modifiye

edilerek C23-24-25-26-27 tasarlandı ve test edildi. C1-C27 arası karışımlardan en iyisi C22 olarak belirlendi.

- Her ne kadar C22'nin basınç puanı, S4'ün basınç puanından büyükse de (bakınız Tablo 4.1 ve Tablo 4.2), S4'ün basınç puanı standart sapması daha küçük, yarmada çekme ve eğilme puanları daha büyüktür. Bu nedenlerle, ÇES karışımı olarak S4 belirlenmiştir. S4 karışımı Ek 1'de sunulmuştur.

Tablo 4.1 Lifsiz ve çelik lifli karışımların puanları ve standart sapmaları.

| Test Karışım | Basınç Testi | | Yarmada Çekme Testi | | Eğilme Testi | |
|--------------|--------------|----------------|---------------------|----------------|--------------|----------------|
| | Puanı | Standart Sapma | Puanı | Standart Sapma | Puanı | Standart Sapma |
| M1 | 802 | 1295 | 15 | 10 | 36 | 11 |
| S1 | 105 | 86 | 15 | 3 | 3 | 4 |
| S2 | 50 | 12 | 87 | 48 | 6 | 5 |
| S3 | 44 | 36 | 2139 | 2716 | 13 | 5 |
| S4 | 67 | 5 | 93 | 8 | 14 | 4 |
| S5 | 85 | 14 | 890 | 1485 | 14 | 7 |
| S6 | 39 | 8 | 4550 | 1165 | 13 | 6 |
| S7 | 55 | 6 | 44 | 26 | 10 | 4 |
| S8 | 57 | 17 | 30 | 20 | 4 | 3 |
| S9 | 68 | 11 | 109 | 12 | 13 | 5 |
| S10 | 35 | 11 | 42 | 13 | 13 | 4 |
| S11 | 53 | 18 | 40 | 7 | 10 | 6 |
| S12 | 56 | 19 | 17 | 9 | 8 | 4 |
| S13 | 72 | 16 | 28 | 3 | 11 | 5 |
| S14 | 77 | 15 | 34 | 21 | 6 | 3 |
| S15 | 441 | 32 | 191 | 196 | 9 | 5 |
| S16 | 61 | 33 | 23 | 12 | 12 | 7 |
| S17 | 90 | 17 | 196 | 238 | 7 | 4 |
| S18 | 227 | 99 | 103 | 137 | 8 | 5 |

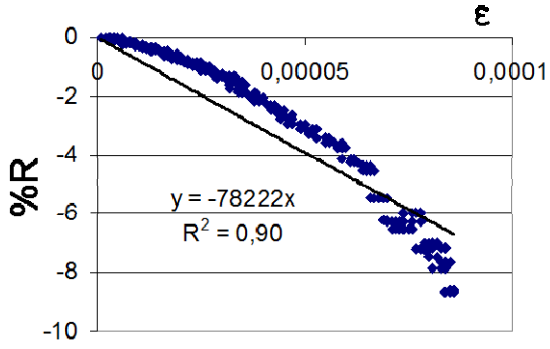
Literatürde, eş zamanlı olarak elektriksel direnç değişimi- birim şekil değiştirme ölçümlerinin yapıldığı yarmada çekme testi ilk defa bu projede uygulanmıştır. Ayrıca, çatlak boyu ile elektriksel direncin eş zamanlı ölçülmesi ve Şekil 4.2'deki gibi korelasyonlarının tanımlanması, literatürde, ilk defa bu projede sunulmuştur.

Tablo 4.2 Karbon lifli karışımların puanları ve standart sapmaları.

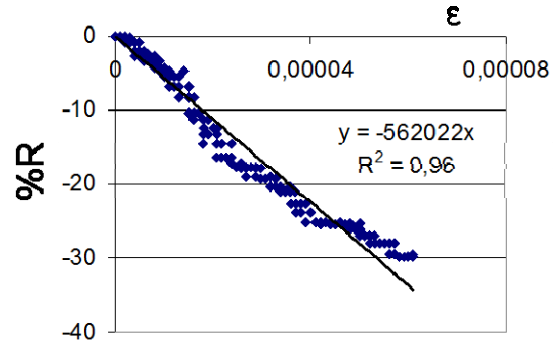
| Test Karışım | Basınç Testi | | Yarmada Çekme Testi | | Eğilme Testi | |
|--------------|--------------|----------------|---------------------|----------------|--------------|----------------|
| | Puanı | Standart Sapma | Puanı | Standart Sapma | Puanı | Standart Sapma |
| C1 | 94 | 12 | 36 | 15 | 8 | 4 |
| C2 | 58 | 14 | 20 | 10 | 7 | 8 |
| C3 | 77 | 14 | 22 | 6 | 5 | 7 |
| C4 | 71 | 21 | 20 | 16 | 6 | 5 |
| C5 | 88 | 14 | 18 | 5 | 3 | 2 |
| C6 | 59 | 27 | 371 | 438 | 1 | 1 |
| C7 | 105 | 11 | 36 | 13 | 13 | 2 |
| C8 | 84 | 14 | 499 | 820 | 9 | 7 |
| C9 | 76 | 12 | 63 | 67 | 4 | 1 |
| C10 | 109 | 33 | 27 | 19 | 2 | 1 |
| C11 | 53 | 14 | 166 | 214 | 11 | 9 |
| C12 | 31 | 27 | 158 | 221 | 11 | 6 |
| C13 | 106 | 18 | 43 | 32 | 2 | 2 |
| C14 | 90 | 15 | 17 | 23 | 9 | 6 |
| C15 | 79 | 25 | 233 | 90 | 5 | 2 |
| C16 | 59 | 12 | 49 | 28 | 9 | 5 |
| C17 | 95 | 14 | 37 | 18 | 23 | 14 |
| C18 | 82 | 22 | 1073 | 1820 | 10 | 10 |
| C19 | 89 | 20 | 30 | 6 | 10 | 7 |
| C20 | 125 | 40 | 30 | 21 | 9 | 6 |
| C21 | 287 | 69 | 109 | 144 | 12 | 8 |
| C22 | 1489 | 136 | 19 | 8 | 11 | 2 |
| C23 | 72 | 5 | 28 | 14 | 8 | 5 |
| C24 | 192 | 44 | 74 | 66 | 10 | 7 |
| C25 | 118 | 15 | 197 | 255 | 9 | 5 |
| C26 | 72 | 35 | 41 | 122 | 11 | 6 |
| C27 | 57 | 8 | 108 | 220 | 5 | 4 |

4.2 Yükleme Hızının ÇES Üzerindeki Etkisi

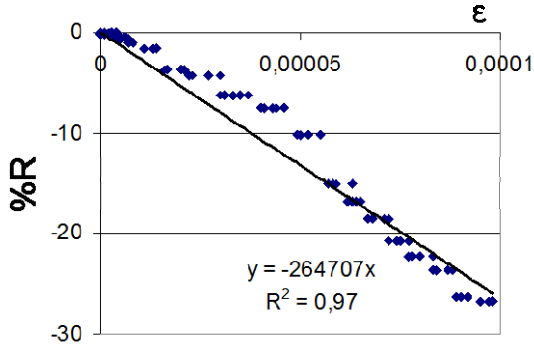
Yükleme hızının ÇES üzerindeki etkisini belirlemek için, ÇES ile beş farklı yükleme hızında basınç testi yapılmıştır. Basınç testi yapılan hızlar S4-IP3-1, 0.5 mm/dak; S4-IP3-2, 1 mm/dak; S4-IP3-3, 2.5 mm/dak; S4-IP4-1, 5 mm/dak; S4-IP5-1, 10 mm/dak'dır. Testlerden elde edilen %R- birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.3'de verilmiştir. Şekil 4.3'de görüldüğü gibi, yükleme hızı 0.5 mm/dak - 5 mm/dak arasında iken doğrusal ilişki çok fazla etkilenmemiştir. Yükleme hızı 10 mm/dak'da doğrusal ilişkinin gücü azalmıştır.



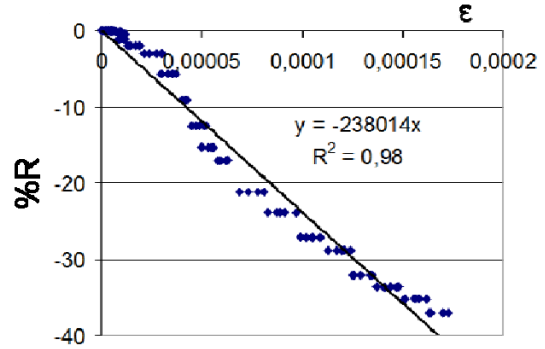
(a)



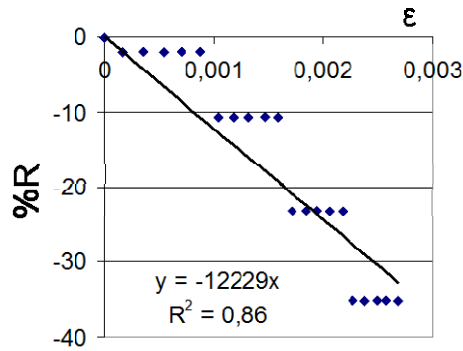
(b)



(c)



(d)

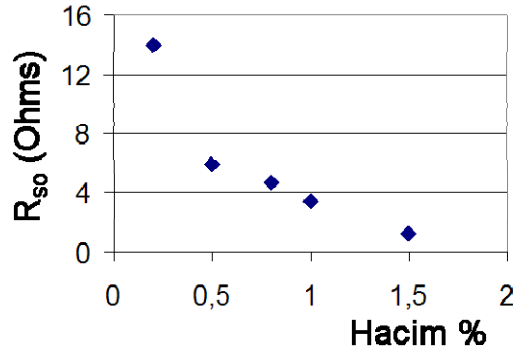


(e)

Şekil 4.3. Farklı yükleme hızlarında %R- birim şekil değiştirme ilişkisi, yükleme hızları: a) 0,5 mm/dak b) 1 mm/dak c) 2,5 mm/dak d) 5 mm/dak e) 10 mm/dak.

4.3 Birim Şekil Değişirme ve Çatlak Boyu ile %R Arasındaki Etkin Mekanizmalar

ÇES karışımını belirlemek için yapılan testlerin verileri detaylı olarak incelenmiştir. Aynı lif boyu için, lif hacimsel oranı arttıkça, elektriksel direnç azalmıştır (Şekil 4.4). Malzemenin içindeki iletken bileşenin artması, elektronların daha iyi iletilmesini sağlamıştır, elektriksel direnç düşmüştür. Basınç, yarmada çekme ve eğilme testlerinde benzer gözlemler elde edildiği için, bu testlere ait tipik birer örneğin davranışı açıklanacaktır.

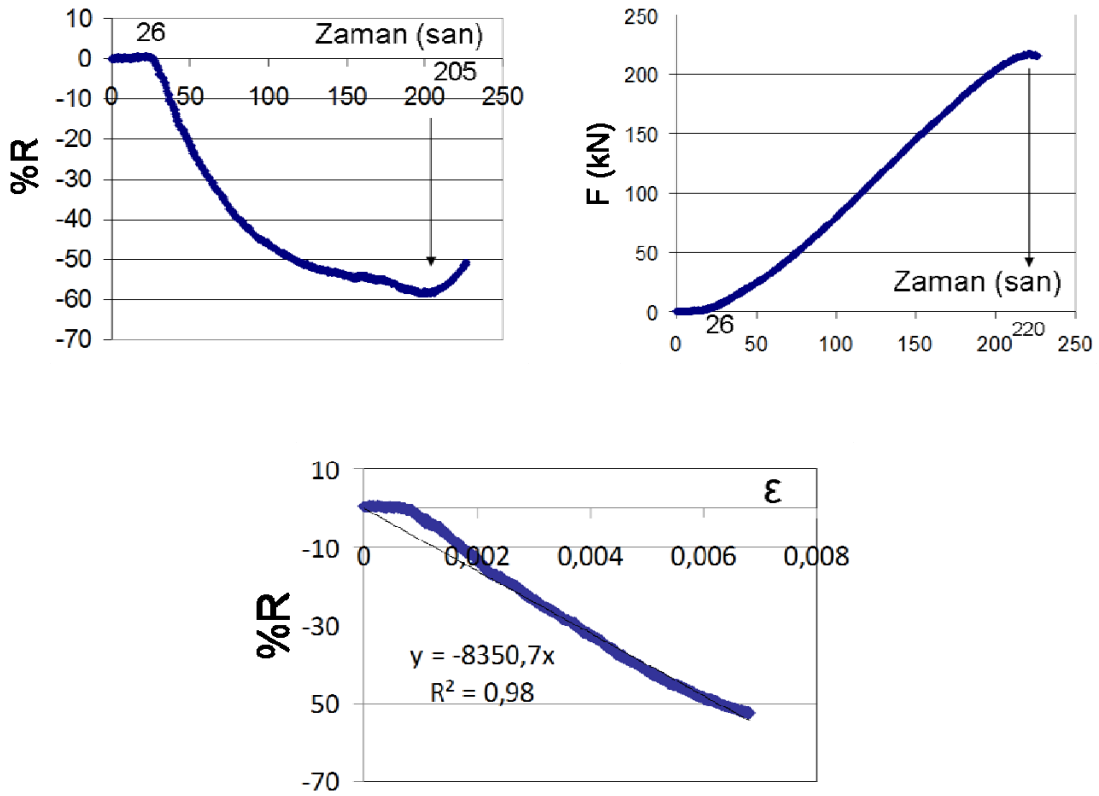


Şekil 4.4. Elektriksel direncin karbon lif oranı ile değişimi (lif uzunluğu L = 3mm).

4.3.1 Basınç Testinde Mekanizmalar

Basınç testinde elde edilen elektriksel direnç değişimi – zaman ve kuvvet – zaman grafikleri Şekil 4.5a-b’de verilmiştir. Deney başlangıcından 26. saniyeye kadar, örnek yüzeyindeki mikro pürüzlülüğün göçmesi nedeniyle, örnek deforme olmamıştır; elektriksel direnç değişimi (%R) ve kuvvet yaklaşık olarak sıfır değerini almışlardır (Şekil 4.5a-b). 26. saniyede, örnek deforme olmaya başlamış, %R negatif değerler almaya başlar, kuvvet artar. Basınç birim şekil değiştirmesi altında, lifler kısalır, mikro boşluklar ve çatlaklar kapanır, lif- lif, lif- matris teması artar, elektriksel direnç düşer.

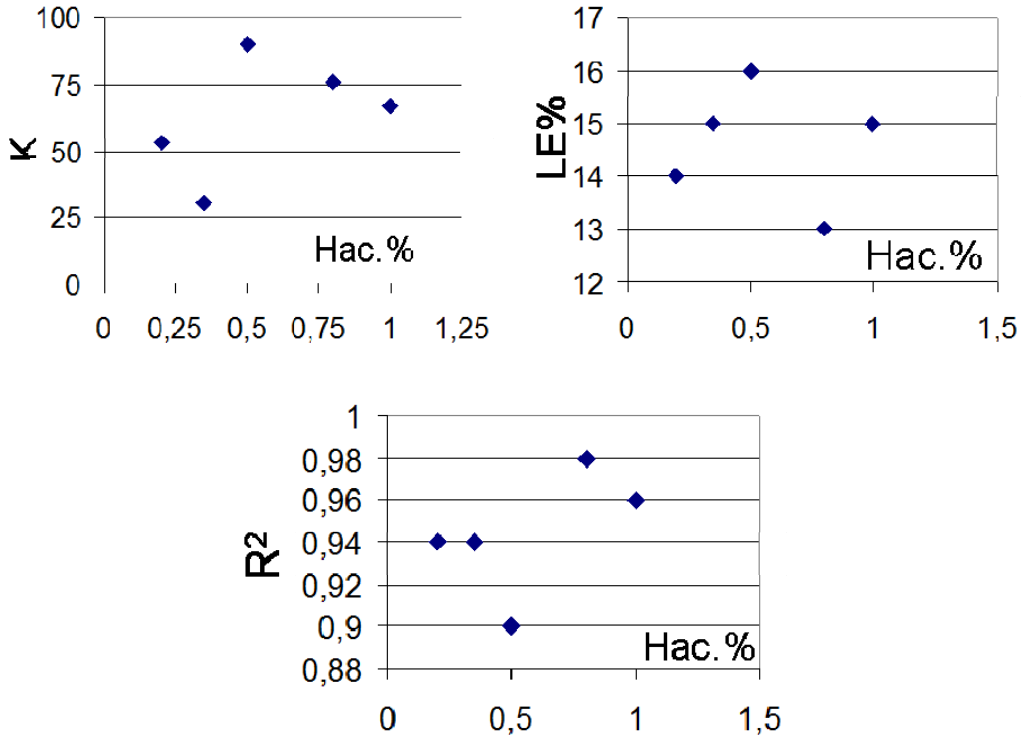
Çatlaklar oluşmaya başlayınca, elektron transfer eden alan azalır, elektriksel direnç (Rs) artar, %R 205. saniyeden sonra artar (Şekil 4.5a). 205. saniyede çatlakların oluşması, kuvvet-zaman grafiğini o anda etkilemez çünkü lifler çatlakları köprüler. Çatlakların ilerlemesi örnek dayanımını düşürür, 220. saniyede yük düşmeye başlar (Şekil 4.5b). %R – birim şekil değiştirme grafiği Şekil 4.5c’de sunulmuştur. Elde edilen duyarlılık K=76; metal gerinim pullarından ortalama 40 kat fazladır. Doğrusallığı (LE), %13, düşüktür. %R – birim şekil değiştirme arasındaki korelasyon katsayısı 0.98’dir; bu da aralarındaki güçlü doğrusal ilişkiyi gösterir.



Şekil 4.5. Basınç testi, %0.8 hacimsel oranında 13 mm uzunluğunda karbon lifli karışım için a) %R- zaman grafiği b) Kuvvet – zaman grafiği, c) %R – birim şekil değiştirme grafiği.

Karışım içindeki karbon lif oranı %0.2'den %0.35'e ve %0.5'den %1'e arttıkça, birim şekil değiştirme, daha az lif-lif, lif-matris temasını etkileyebilir; birim şekil değiştirmenin elektriksel direnç üzerindeki etkisi azalır; %R daha az değişir; duyarlılık azalır (Şekil 4.6a). Hacimsel % 0.5 lif oranında, sistem perkolasyon sınırındadır; liflerin direkt temas ile kurdukları az sayıda iletim hattı ile elektronlar iletilir. Birim şekil değiştirme az sayıdaki iletim hattını kopartır, sistem perkolasyon sonrası durumdan, perkolasyon öncesi duruma gelir; %R büyük ölçüde değişir; duyarlılık maksimum olur (Şekil 4.6a). Perkolasyon hacimsel lif oranında, çimentolu malzeme en büyük duyarlılığa sahiptir.

%R- birim şekil değiştirme grafiği, en küçük kareler ile belirlenen doğrudan en çok perkolasyon hacimsel oranı olan % 0,5'de sapar çünkü, sistem perkolasyon sonrası durumdan, perkolasyon öncesi duruma geçer. Bu durum, perkolasyon hacimsel oranı olan %0,5'de en büyük doğrusallık (LE) ve en küçük R^2 değerlerinin alınmasına neden olur (Şekil 4.6b-c). Doğrusallıktan sapma, genel olarak LE ve R^2 değerlerinden görüleceği gibi çok büyük değildir (Şekil 4.6b-c).

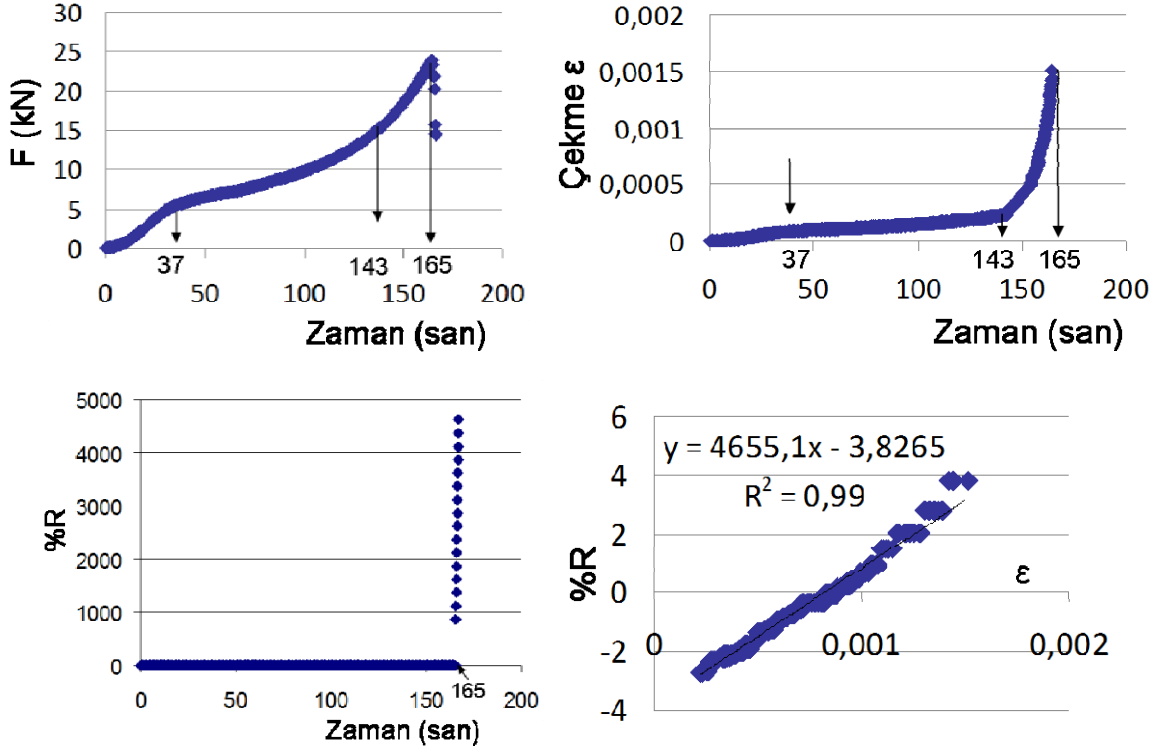


Şekil 4.6. Basınç testi a) Duyarlılık – karbon lif hacimsel oranı b) Doğrusallık - karbon lif hacimsel oranı c) Korelasyon katsayısı - karbon lif hacimsel oranı.

4.3.2 Yarmada Çekme Testinde Mekanizmalar

Tipik bir yarmada çekme testi sonuçları Şekil 4.7’de verilmiştir. Deplasman kontrollü test 2.5 mm/dak yükleme hızı ile yapılmıştır. Örnek ile yükleme plakaları arasındaki ahşap çıtaların dayanımı, örnek dayanımından çok daha düşük olduğu için, deneyin başlangıcında, ahşap çıtalar çok daha fazla şekil değiştirir (bakınız Şekil 3.15b-c). 37. saniyede, ahşap çıtalar kırılır; kuvvet – zaman ve birim şekil değiştirme – zaman grafiklerinde birer plato oluşur (Şekil 4.7a-b). Ahşap çıtalar kırıldıkça pekleşirler; kuvvet- zaman ve birim şekil değiştirme- zaman grafiklerinin eğimi artmaya başlar. 143. saniyede, ahşap çıtalar ezilir, kuvvet – zaman ve birim şekil değiştirme – zaman grafiklerinin eğimi artar, bu artış özellikle daha fazla şekil değiştirmeye başlayan örneğin birim şekil değiştirme – zaman grafiğine yansır (Şekil 4.7a-b). 165. saniyede, düşey bir çatlak oluşur (Şekil 3.15c), örneğin rijitliği düşer, yük – zaman grafiğinde ani düşüş oluşur (Şekil 4.7a). Çatlak oluşumu, elektronların aktığı kesiti daraltır, 165. saniyede %R- zaman grafiğinde ani bir sıçrama oluşur (Şekil 4.7c). Şekil 4.7c’deki %R- zaman grafiğinin ordinatının büyük ölçekli olması nedeniyle, 165. saniye öncesi %R’ın birim

şekil değiştirme ile değişimi görülememektedir. %R'ın birim şekil değiştirme ile değişimi, Şekil 4.7d'de sunulmuştur. Aralarındaki güçlü doğrusal ilişkinin korelasyon katsayısı 0.99'dur.

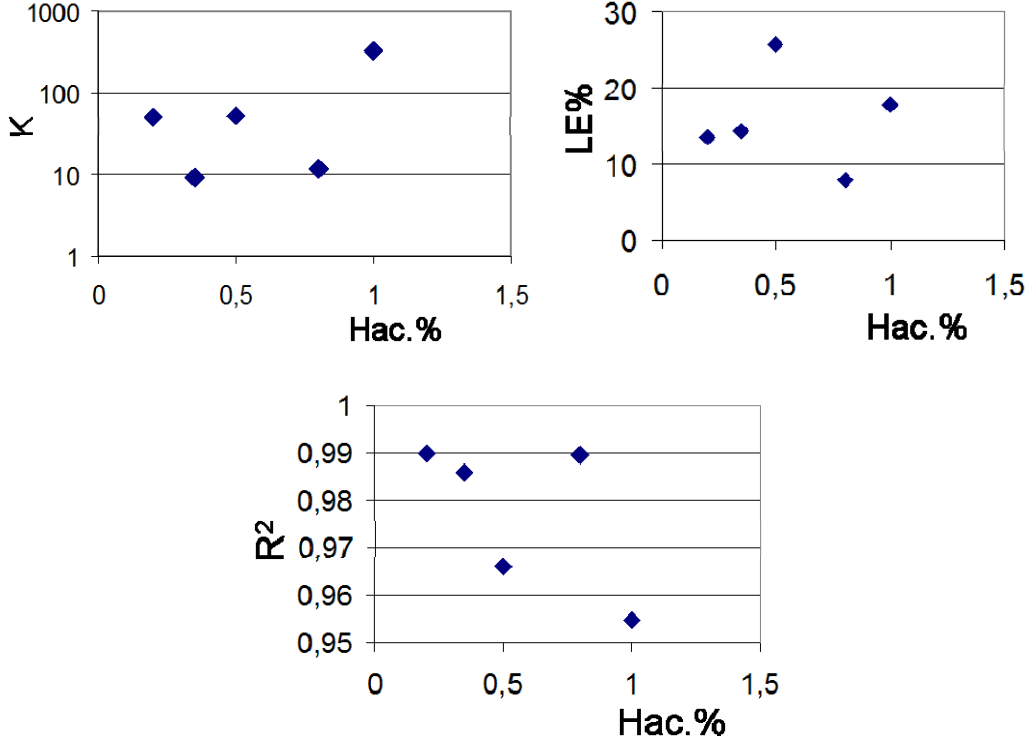


Şekil 4.7. Yarmada çekme testi 13 mm uzunluğunda karbon lif %0.2 hacimsel oranında a) Kuvvet – zaman grafiği b) Çekme birim şekil değiştirmesi – zaman grafiği c) %R- zaman grafiği d) %R- çekme birim şekil değiştirmesi grafiği.

Karbon lif hacimsel oranı %0.2'den %0.35'e çıkınca, çekme birim şekil değiştirmesi daha az oranda lif-lif ve lif-matris temasını keser, sistemin duyarlılığı azalır (Şekil 4.8a). Perkolasyon sınır değeri olan hacimsel %0.5 lif içeriğinde, çekme birim şekil değiştirmesi, az sayıdaki direkt elektron iletim hatlarını kopartır, sistemi perkolasyon sonrası durumundan perkolasyon öncesi duruma taşır, çekme duyarlılığı lokalde maksimum olur (Şekli 4.8a). Lif oranı %0.5'den %0.8'e artınca, çekme birim şekil değiştirmesi daha az oranda lif-lif ve lif-matris temasını keser, sistemin duyarlılığı azalır.

%R – birim şekil değiştirme grafiği güçlü bir doğrusal ilişkiye sahiptir; Şekil 4.8b-c'de görüldüğü gibi genelde doğrusallığı düşük, R^2 yüksektir. En yüksek $R^2 = 0.99$ bulunmuştur. Perkolasyon sınır değeri olan %0.5 hacimsel lif oranında, sistem perkolasyon sonrası

durumdan perkolasyon öncesi duruma taşındığı için, doğrusallık en yüksek değeri, R^2 'de en düşük değerlerden birini alır (Şekil 4.8b-c).



Şekil 4.8. Yarmada çekme testi a) Duyarlılık – karbon lif hacimsel oranı b) Doğrusallık - karbon lif hacimsel oranı c) Korelasyon katsayısı - karbon lif hacimsel oranı.

Yarmada çekme testi için tanımlanan mekanizmalar, literatürde ilk defa bu projede tanımlanmıştır.

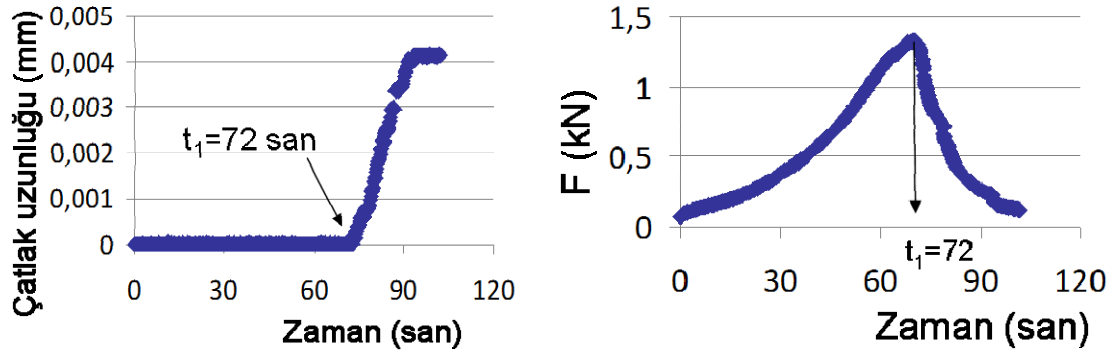
4.3.3 Çentikli Eğilme Testinde Mekanizmalar

Çentikli eğilme testi uygulanan 13 mm uzunluğunda %0.2 hacimsel oranda karbon lif içeren karışımın çatlak uzunluğu – zaman ve kuvvet – zaman grafikleri Şekil 4.9a-b'de dir. 72. saniyede çatlak çentik ucundan ilerlemeye başlayınca (Şekil 4.9a), kirişin rijitliği düşer ve uygulanan yük maksimum değerden düşmeye başlar (Şekil 4.9b). Şekil 4.10a'da, %R-çatlak uzunluğu grafiği, A-B-C olarak alt bölgelere ayrılmıştır.

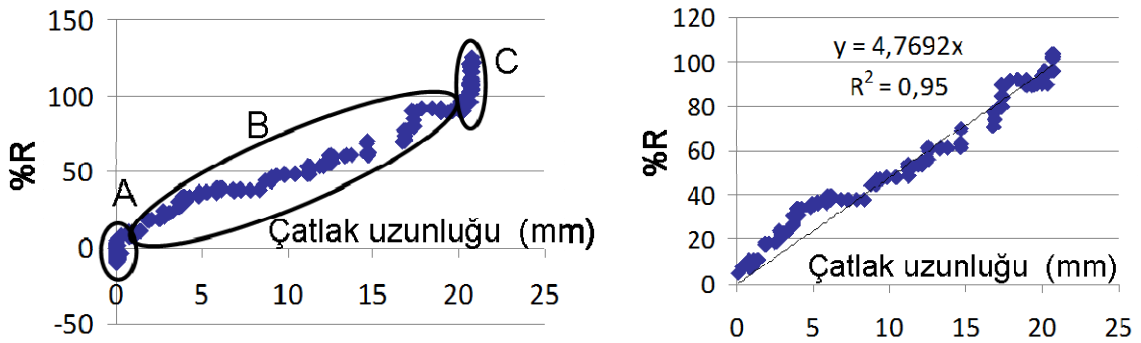
Test başlangıcından, çatlağın uzamaya başladığı 72. saniyeye kadar olan bölge A bölgesidir (Şekil 4.10a). A bölgesinde, %R küçük pozitif ve negatif değerler arasında değişir. Eğilme altındaki kirişin tarafsız ekseninin üst bölgesindeki basınç bölgesinde, lifler kısalır, mikro

boşluklar ve çatlaklar kapanır, elektriksel direnç düşer, %R küçük negatif değerler alır. Tarafsız eksenin alt tarafındaki çekme bölgesinde, lifler uzar, mikro çatlaklar oluşur, elektriksel direnç artar, %R artar. A bölgesinde basınç ve çekme bölgelerinin bu “yarışı”, %R’ın küçük negatif ve pozitif değerler almasına neden olur (Şekil 4.10a).

Şekil 4.10a’da B bölgesi, 72. saniyede çatlağın çentik ucundan ilerlemeye başlaması ile başlar. Çatlağın ilerlemesi, elektronların geçtiği kesit alanı küçültür, %R artar. Çatlak ilerlemesi ve kesitin azalması, tarafsız eksen üstündeki basınç bölgesinin %R üzerindeki etkisini bastırır. Çatlak boyu ölçerin kapasitesi 21 mm dir. 21 mm den sonra çatlak boyu ölçer ikiye yarılr ve sinyal göndermez. Şekil 4.10a C bölgesinde, çatlak 21 mm üzerindedir, çatlak boyu ölçer daha fazla sinyal göndermez, fakat çatlak kırışın üstüne doğru ilerlemeye devam ettiği için, %R artar. B bölgesinde, çatlak boyu ile %R arasında doğrusal bir ilişki vardır (Şekil 4.10a-b). Doğrusal ilişkinin korelasyon katsayısı 0.95 dir (Şekil 4.10b).

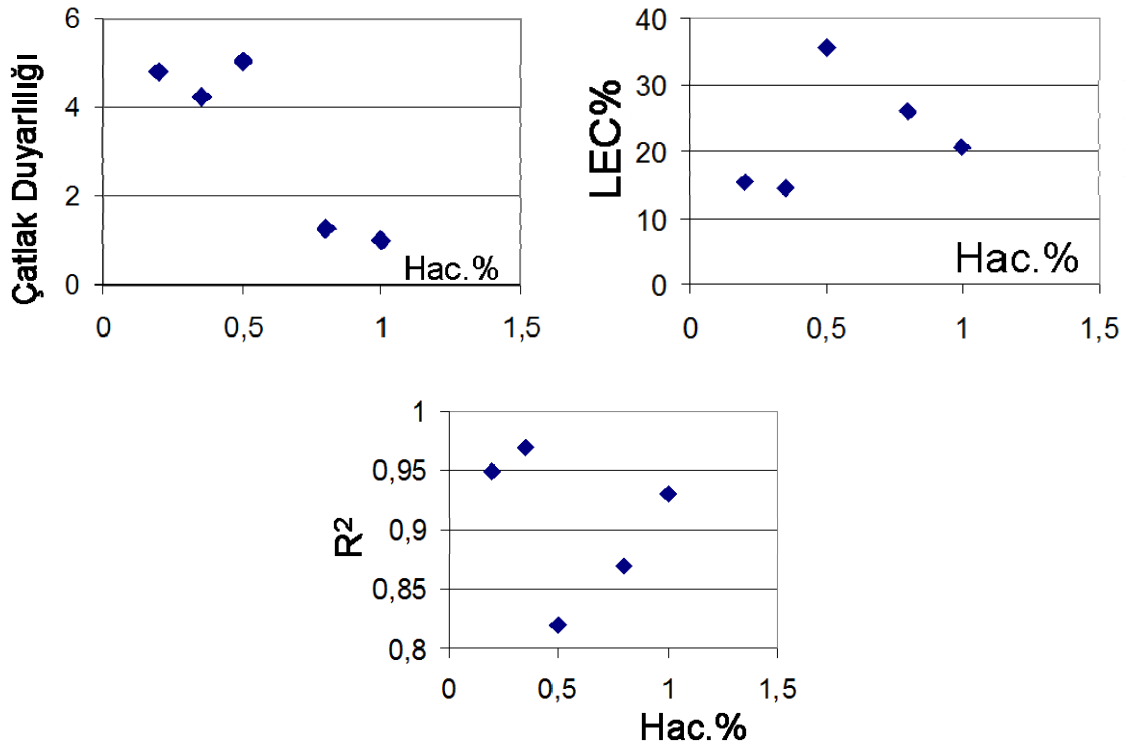


Şekil 4.9 Çentikli eğilme testi, karbon lif uzunluğu 13 mm, %0.2 hacimsel oran a) Çatlak uzunluğu – zaman grafiği b) Kuvvet – zaman grafiği.



Şekil 4.10 Çentikli eğilme testi, karbon lif uzunluğu 13 mm, %0.2 hacimsel oran a) %R- çatlak uzunluğu grafiği (tüm veri) b) %R- çatlak uzunluğu grafiği, doğrusal ilişki.

Karışımdaki lif oranı arttıkça, çatlak ilerlemesi ile kırılan lif- lif ve lif- matris temas oranı azalır, çatlak duyarlılığı azalır (Şekil 4.11a). Perkolasyon lif hacimsel oranı % 0.5'de, elektronlar liflerin direkt temas ile oluşturduğu az sayıdaki iletim hatları ile iletilir. Perkolasyon lif hacimsel oranı %0.5'de, çatlak, az sayıdaki direkt iletim hattını kopartarak, sistemi perkolasyon sonrası durumdan perkolasyon öncesi duruma taşır, en büyük çatlak duyarlılığı elde edilir (Şekil 4.11a). Aynı nedenle, perkolasyon lif hacimsel oranında (%0.5), %R- çatlak uzunluğu grafiği doğrudan en büyük sapmayı gösterir, çatlak ölçümünde en yüksek doğrusallık (LEC) ve en düşük R^2 elde edilir (Şekil 4.11b-c).



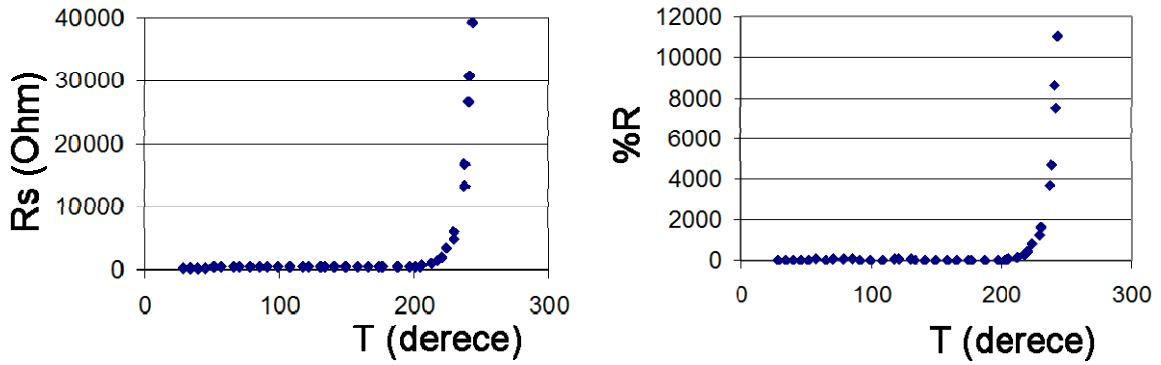
Şekil 4.11. Eğilme testi a) Çatlak duyarlılığı – karbon lif hacimsel oranı b) Çatlak doğrusallığı - karbon lif hacimsel oranı c) Korelasyon katsayısı - karbon lif hacimsel oranı.

Çentikli eğilme testi için tespit edilen mekanizmalar literatürde ilk defa bu projede sunulmuştur.

4.4 Sıcaklığın Elektriksel Direnç Değişimi Üzerindeki Etkisi

Sıcaklığın elektriksel direnç değişimi üzerindeki etkisini belirlemek için, daha önce anlatıldığı şekilde, ÇES alüminyum bant ve özel seramik kili ile nem kaybetmemesi için izole edilerek, açık tablalı ısıtıcı ile ısıtılmıştır. Termokapl kullanarak ÇES alt ve üst sıcaklığının aynı olduğu

değerlerde voltaj ölçümleri yapılmıştır ve elektriksel direnç değişimi bulunmuştur. ÇES elektriksel direnci oda sıcaklığında 351 Ohm iken, Şekil 4.12a'da görüldüğü gibi 200 derecede ani bir artış ile 243 derecede 39166 Ohm'a çıkmıştır. Benzer şekilde, %R, oda sıcaklığında sıfırdan başlar, 200 derecede ani bir artış göstererek % 11038'e çıkar (Şekil 4.12b). 200 derece üstü yüksek sıcaklıklarda, elektriksel direncin ani artışının nedeni, ÇES'in nem kaybına karşı izole edilmesine rağmen bünyesinde bulunan suyun sıvı fazdan buhar fazına geçip, elektrolit olma özelliğini yitirmesidir. Bu durumda elektronların iletilmesinde katkısı olan elektrolit suyun eksilmesi, elektriksel direnci artırır.

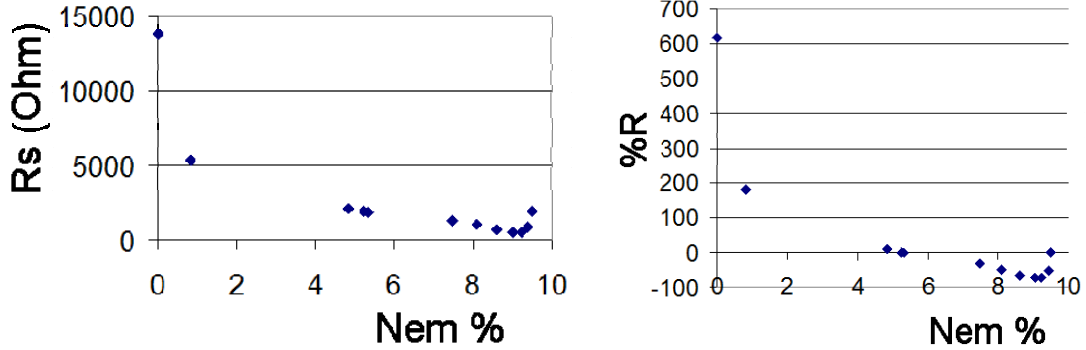


Şekil 4.12 a) Sıcaklık- elektriksel direnç grafiği b) Sıcaklık %R grafiği.

4.5 Nemin Elektriksel Direnç Değişimi Üzerindeki Etkisi

Nemin elektriksel direnç değişimi üzerindeki etkisini tespit etmek için üç adet 5 cm küp ÇES hazırlanmıştır. ÇES'lerin, etüve konmadan önce; etüvde 10, 30, 60, 120, 210, 330 dakika, 20, 22.5, 28, 96.5, 145 saat tutulduktan sonra ağırlıkları, V_s ve V_r potansiyel farkları ölçülmüştür. Elektriksel dirençleri ve elektriksel direnç değişimleri (%R) hesaplanmıştır. Şekil 4.13a'da elektriksel direncin (R_s) nem yüzdesi ile değişimi görülmektedir. Şekil 4.13b'de ise %R – % nem ilişkisi sunulmuştur. Şekil 4.13a'da görüldüğü gibi, kür tankından yeni çıkmış örneğin nemi %9.49 dur. Nem %9.49'dan % 9'a düşüldükçe, elektriksel direnç azalır. Bunun nedeni, kür tankından yeni çıkmış örnek suya doygundur ve iletken liflerinin etrafı su filmi ile kaplıdır. Bu su filmi, liflerin birbirine direkt temasını engeller. Nem azaldıkça su filmi azalır, lifler birbirine temas etmeye başlar, elektriksel direnç düşer. Optimum nem oranı %9'deyken, liflerin teması ve boşluklar içindeki suyun elektrolit olarak davranması ile en düşük elektriksel direnç elde edilir. Nem oranı %9'dan aşağıya düşüldükçe, boşluklar içinde elektrolit olarak davranan su kaybolmaya başlar ve elektriksel direnç yükselir. %R – nem grafiği ilişkisi de

aynı nedenlerle önce azalmış, sonra artmıştır (Şekil 4.13b). ÇES, 90 derece etüvde optimum nem olan %9'a 60 dakikada ulaşır.



Şekil 4.13 a) Rs – nem ilişkisi b) %R – nem ilişkisi.

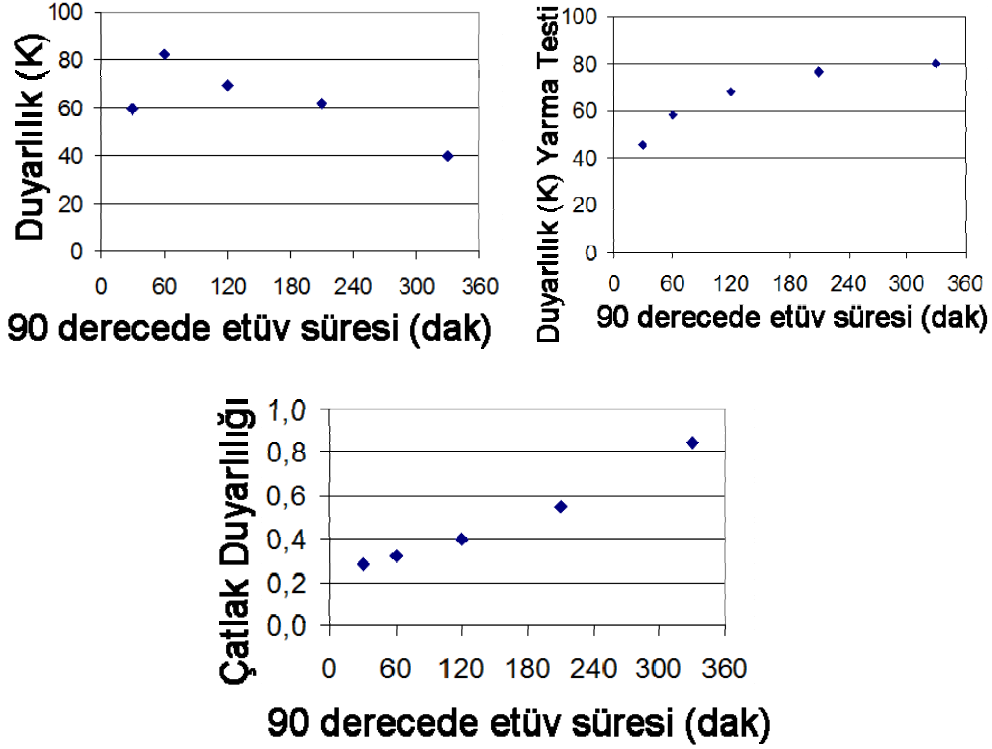
Nemin, birim şekil değiştirme – elektriksel direnç ilişkisine etkisini incelemek için, 30 adet 5 cm küp ÇES hazırlanmıştır. Nemin, çatlak uzunluğu - elektriksel direnç ilişkisine etkisini incelemek için 15 adet 4*4*16 cm prizma örnek ÇES karışımı ile döküldü. Örnekler 28 gün su içinde kür edildikten sonra 90 derecede etüve kondu ve basınç, yarmada çekme ve çentikli eğilme testleri için 30-60-120-210-330. dakikalarda her test için üçer örnek etüvden çıkartılıp tartıldı. Örnekler nem değerleri değişmeyecek şekilde soğutuldu ve test edildi.

Farklı nem içeriklerinde yapılan basınç testlerinde, duyarlılığın 60 dakika etüvde kalan örneklerde maksimum, 60 dakikadan fazla etüv süreleri içinse giderek düştüğü gözlenmiştir (Şekil 4.14a). Daha önce belirtildiği gibi, 90 derecede, 60 dakika etüvde kalan ÇESlerin elektriksel direnci minimum olur. Bu nem içeriği, lif-lif, lif-matris ve elektrolit iletkenliklerinin bileşkesi olan ÇES iletkenliğinin maksimum (direncin minimum) olduğu optimum nem içeriğidir. Minimum elektriksel direnç, basınç birim şekil değiştirmesi ile daha da azaldığı zaman en yüksek duyarlılık elde edilir (Şekil 4.14a).

Yarmada çekme testinde, 90 derecede etüvde en çok kalan, nem oranı en düşük örneğin duyarlılığı en fazladır (Şekil 4.14b). Nem oranı optimum değerinin altına düştükçe, elektron iletiminde lif- lif ve lif-matris temasının rolü artar. Çekme birim şekil değiştirmesi, bu temasları birbirinden ayırdığında, elektriksel direncin değişimi daha fazla olur, duyarlılık daha büyük olur.

Benzer durum çentikli eğilme testlerinde de gözlenmiştir (Şekil 4.14c). Nem oranı optimum değerinin altına düştükçe, elektron iletiminde lif- lif ve lif-matris temasının rolü artar. Çatlak

uzaması bu temasları birbirinden ayırdığında, elektriksel direncin değişimi daha fazla olur, çatlak duyarlılığı daha büyük olur (Şekil 4.14c).



Şekil 4.14 a) Basınç testi, duyarlılık – etüv süresi b) Yarmada çekme testi, duyarlılık – etüv süresi c) Eğilme testi, çatlak duyarlılığı – etüv süresi.

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de sunulan sonuçlar literatürde ilk defa rapor edilmişlerdir.

4.6 ÇES’in Sensör Özellikleri

ÇES’in sensör özelliklerinin belirlenmesi için 6 adet 5 cm ebatlı küp örnek ve 3 adet 4*4*16 cm ebatlı prizma örnek ÇES olarak belirlenen karışım ile dökülmüştür. Basınç, yarmada çekme ve çentikli eğilme testleri üçer adet örneğe uygulanmıştır. ÇES’in basınç testlerinde elde edilen basınç birim şekil değiştirmesi duyarlılığı 44; doğrusallığı %14 ölçülmüştür. Yarmada çekme testlerinde çekme birim şekil değiştirmesi duyarlılığı 42; doğrusallığı %16 ölçülmüştür. Çentikli eğilme testlerinde çatlak duyarlılığı 0.5; çatlak doğrusallığı % 8.4 ölçülmüştür. ÇES; birim şekil değiştirme duyarlılığı, metal gerinim pullarının 22 katıdır. Yapılan ölçümlerde sinyal işleme teknikleri kullanılmamış, kaydedilen sinyallere filtreleme uygulanmamıştır. Sinyallere filtreleme uygulanması durumunda gürültü yok edilecek,

doğrusallık değerleri düşecektir. Çatlak duyarlılığı ve çatlak doğrusallığı ilk defa bu çalışmada tanımlanmıştır.

4.7 Çapraz Yüklemenin ÇES Üzerindeki Etkisi

Bu bölümde, basınç ve çekme birim şekil değiştirmelerinin ÇES içinden geçen elektrik akımına dik uygulandığı çapraz yüklemelerin sonuçları sunulmaktadır.

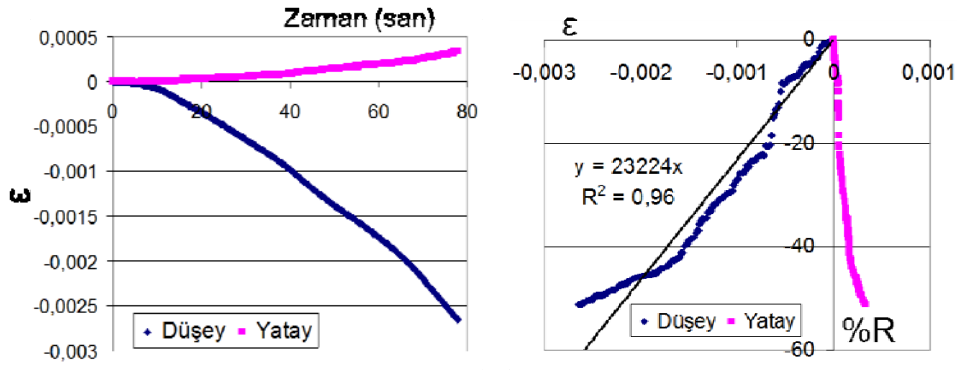
4.7.1 Çapraz Basınç Yükleme

Çapraz basınç yüklemeinde, basınç yükü, ÇES içinden geçen elektrik akımına dik uygulanmıştır ve ÇES yatay ve düşey birim şekil değiştirmeleri birbirine 90 derece açıda bulunan çift elemanlı gerinim pulu ile ölçülmüştür. Yatay ve düşey birim şekil değiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 4.15a'da sunulmuştur. Düşey birim şekil değiştirme basınçken (negatif), Poisson etkisi nedeniyle yatayda çekme (pozitif) birim şekil değiştirme ölçülmüştür (Şekil 4.15a).

Elektriksel direnç değişimi (%R)'ın yatay ve düşey birim şekil değiştirmeler ile değişimi Şekil 4.15b'de sunulmuştur. Elektriksel direnç düştüğü için %R negatif değerler almıştır (Şekil 4.15b). Elektriksel direncin düşmesinin nedeni, mikro çatlakların ve boşlukların kapanıp, lif-matris ve lif-lif temasının artmasıdır. %R'ın değişiminde, düşey basınç birim şekil değiştirmesi, yatay çekme birim şekil değiştirmesine baskın gelmiştir (Şekil 4.15b).

Düşey basınç birim şekil değiştirmesi ile %R arasında güçlü bir doğrusal ilişki saptanmıştır. Bu ilişkinin çapraz duyarlılığı 193; çapraz doğrusallığı %20, korelasyon katsayısı 0.96'dir. Bu değerler, ÇES'in çapraz yükler altında doğrusal davrandığını gösterir.

Birim şekil değiştirmenin elektrik akımına paralel olduğu testlerde duyarlılık 44, dik olduğu testlerde çapraz duyarlılık 193 elde edilmiştir. Basınç testlerinde çapraz, duyarlılık, duyarlılıktan daha büyüktür; nedeni aşağıda açıklanmıştır.



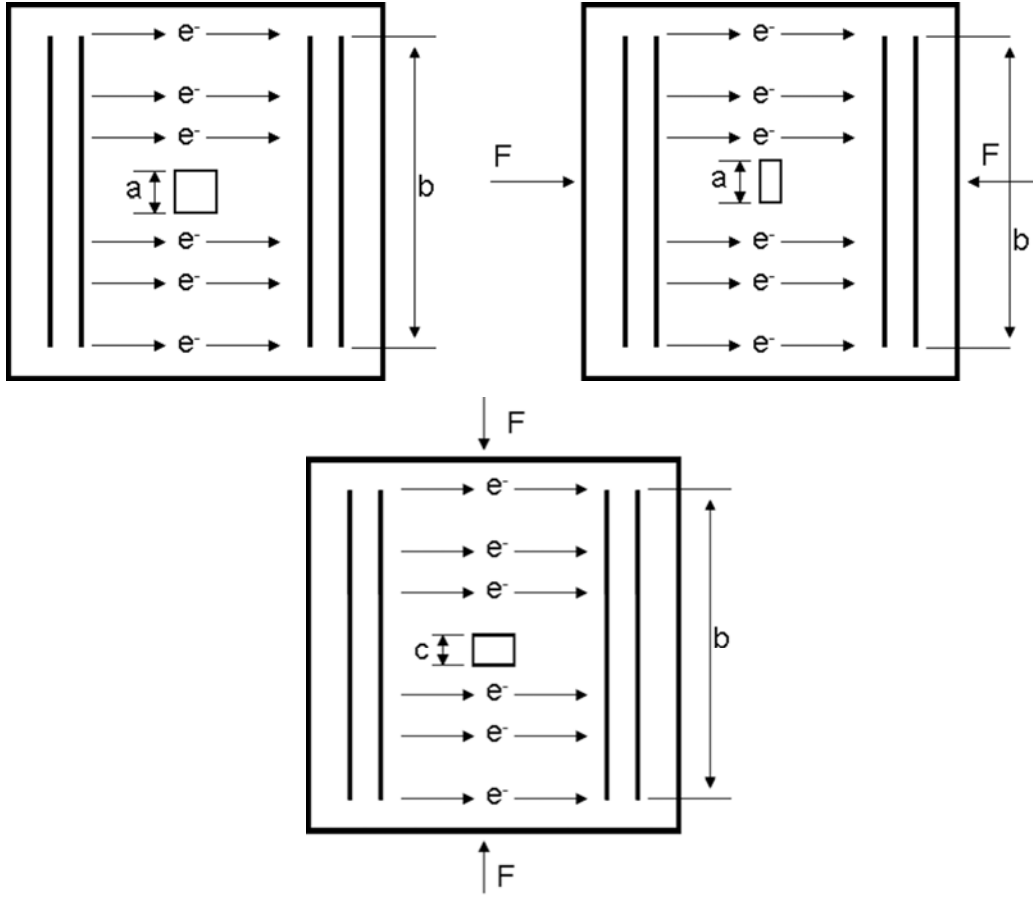
Şekil 4.15 Basınç testi, basınç birim şekil değiştirmesi elektrik akımına dik a) Birim şekil değiştirme – zaman grafiği b) %R – birim şekil değiştirme grafiği.

ÇES' e yük uygulamadan önce, ÇES içinde kare şeklinde bir boşluk olduğunu varsayalım (boşluk şeklinin daire ya da küre olması sonuçları etkilemez) (Şekil 4.16a). Bu boşluk mikro yada makro boyutlarda olabilir; etkileşimi anlatabilmek açısından Şekil 4.16a ölçeksiz çizilmiştir. Anlatımı basitleştirmek için sadece bir boşluk gösterilmiştir; birden fazla boşluk alınması sonuçları etkilemez. İki boyutlu bir sistem tasarlanmıştır; üç boyutlu bir sistemde alınsaydı (birim derinlik kabulü gibi) sonuçlar değişmezdi. ÇES içindeki elektron akımı yönü de gösterilmiştir (Şekil 4.16 soldan sağa).

Mekanik yük uygulamadan önce, boşluk, elektronların geçtiği kesiti "a" kadar azaltır (Şekil 4.16a). Elektronlar boşluğun etrafından, "b-a" kadar bir kesitten geçebilirler.

Basınç yükü, elektrik akımına paralel uygulandığında (Şekil 4.16b), boşluk genişliği azalırken, boşluk yüksekliği değişmez; elektronların geçtiği kesit değişmez, "b-a" olarak kalır (Şekil 4.16b).

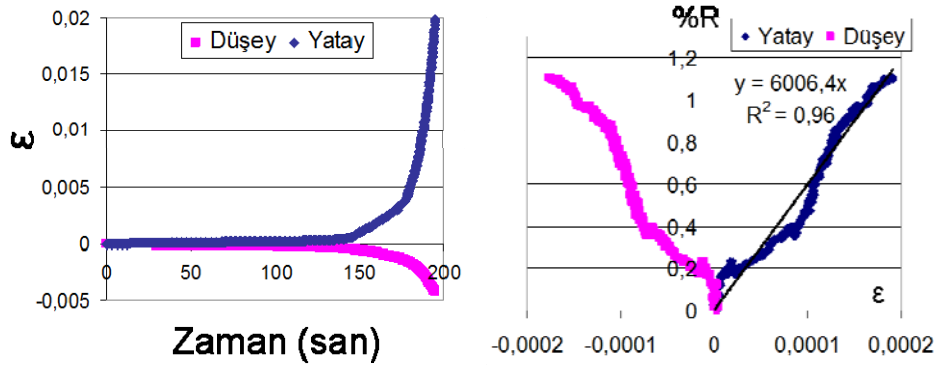
Basınç yükü elektrik akımına dik uygulanırsa (Şekil 4.16c), boşluk yüksekliği "a" dan "c" ye düşer ($a > c$). Elektronların geçtiği kesit, "b-a" dan "b-c" ye yükselir ($b-c > b-a$) (Şekil 4.16c). Basınç yükünün, elektrik akımına dik olması durumunda, elektronların geçtiği kesitin değişmesi, duyarlılığı arttırır. Bu nedenle, basınç yükünün elektrik akımına dik olduğu çapraz duyarlılık, paralel olduğu duyarlılıktan büyüktür.



Şekil 4.16 Elektronların geçtiği kesit a) Mekanik yük yok (b-a) b) Basınç yükü elektrik akımına paralel (b-a) c) Basınç yükü elektrik akımına dik (b-c), ($a > c$).

4.7.2 Çapraz Yarmada Çekme Yüklemesi

Çekme birim şekil değiştirmesinin elektrik akımına dik olduğu testte ölçülen yatay ve düşey birim şekil değiştirmelerin zamana göre değişimi Şekil 4.17a'da sunulmuştur. Yatay çekme birim şekil değiştirmesi, düşey basınç birim şekil değiştirmesinin dört katıdır (Şekil 4.17a). Şekil 4.17b'de %R- birim şekil değiştirme grafiğinde görüldüğü gibi %R pozitifdir. %R'ın pozitif olmasının nedeni, yatay çekme birim şekil değiştirmesinin mikro çatlak ve boşlukları açıp, matris- matris, lif- matris ve lif-lif temasını azaltıp, elektriksel direnci arttırmasıdır. Eğer düşey basınç birim şekil değiştirmesi baskın olsaydı, %R negatif olurdu. Yatay çekme birim şekil değiştirmesi ile %R arasında korelasyon katsayısı 0.96 olan güçlü bir doğrusal ilişki var (Şekil 4.17b). Çapraz duyarlılık 59 ve çapraz doğrusallık %15'dir. Güçlü doğrusal korelasyon, yapısal ölçüm uygulamalarında çapraz yükleme etkisinin çıkartılmasını sağlar.

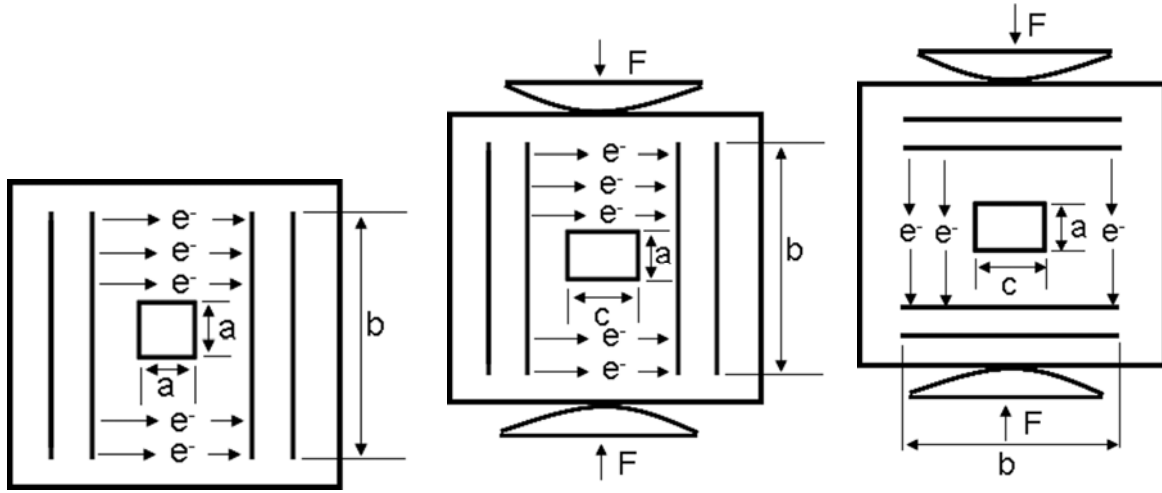


Şekil 4.17 Yarmada çekme testi, çekme birim şekil değiştirmesi elektrik akımına dik, a) Birim şekil değiştirme – zaman grafiği, b) %R - Birim şekil değiştirme grafiği (cK=59; cLE=%15).

Yarmada çekme testlerinde, birim şekil değiştirmenin elektrik akımına dik olduğu testte elde edilen çapraz duyarlılık (cK=59), birim şekil değiştirmenin elektrik akımına paralel olduğu testte elde edilen duyarlılık değerinden büyüktür (K=42). Bu durumu açıklamak için, şekli kare olan bir boşluğun ÇES içinde olduğunu kabul edelim (Şekil 4.18a). Çapraz basınç testinde olduğu gibi, boşluğun şeklinin daire veya küre olması veya birden çok boşluğun olması sonuçları etkilemez. Yatay çekme birim şekil değiştirmesinin elektrik akımına paralel olduğu yarmada çekme testinde, yatay çekme birim şekil değiştirmesi, düşey basınç birim şekil değiştirmesinden fazla olacağından (bakınız Şekil 4.17a), boşluğun genişliği “a”dan “c”ye artarken, yüksekliği yaklaşık olarak aynı kalır (Şekil 4.18b); bu durumda elektronların geçtiği kesit yüksüz duruma göre değişmez (b-a).

Yatay çekme birim şekil değiştirmesinin, elektrik akımına dik olduğu yarmada çekme testinde (Şekil 4.18c), yatay çekme birim şekil değiştirmesi, boşluğun boyutunu “a”dan “c”ye artırır; elektronların geçtiği kesit (b-a)’dan (b-c)’ye azalır. Elektronların geçtiği kesitin azalması, elektriksel direnci artırır; yatay birim şekil değiştirmenin elektrik akımına paralel olduğu duruma göre duyarlılığı artırır. Yatay birim şekil değiştirmenin elektrik akımına paralel olduğu durumda duyarlılık 42; dik olduğu durumda çapraz duyarlılık 59’dur.

Basınç ve çekme birim şekil değiştirmelerinin elektrik akımına dik olduğu durumda, birim şekil değiştirmeleri ile %R arasında güçlü doğrusal ilişkiler bulunmuştur. Bu ilişkiler, ÇES’in yapısal sensör uygulamalarında çapraz yükleme etkilerini çıkartmak için kullanılabilir.



Şekil 4.18 Elektronların geçtiği kesit a) Mekanik yük yok (b-a) b) Çekme birim şekil değiştirmesi elektrik akımına paralel (b-a) c) Çekme birim şekil değiştirmesi elektrik akımına dik (b-c) , (c>a), (b-a>b-c).

4.8 ÇES'in Model Kolon İçinde Testi

ÇES'in yapı elemanı içinde uyumlu çalışmasını test etmek amacıyla model kolonlar içinde daha önce anlatıldığı şekilde deneyler yapılmıştır. Bu deneylerin sonuçları bu bölümde sunulmuştur.

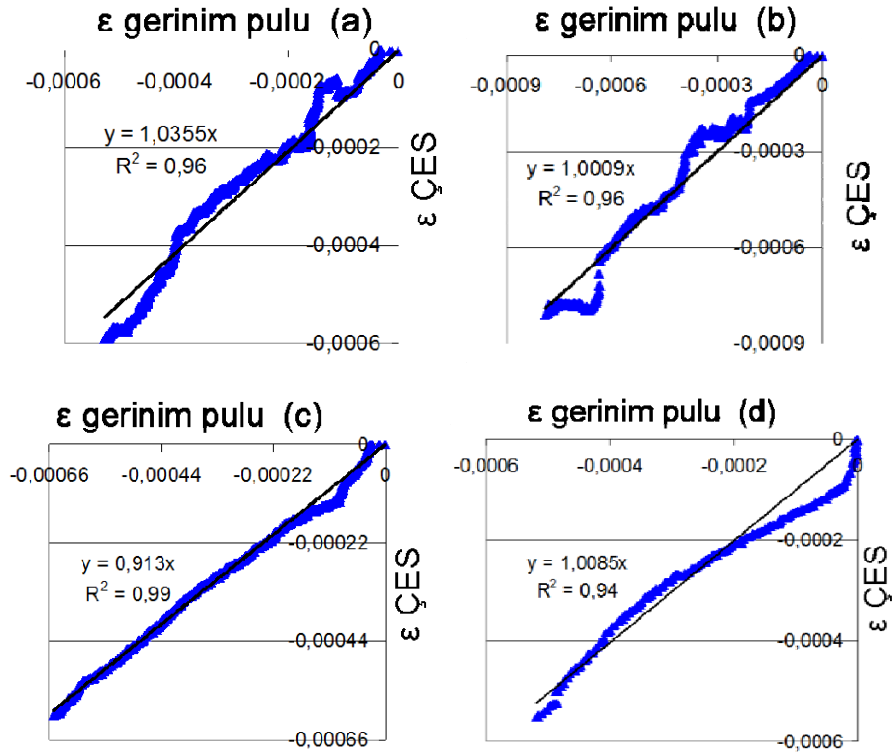
Farklı yükleme hızlarında ve farklı yük düzeylerinde ÇES'in model kolon içinde davranışını test etmek amacıyla, model kolon yükleme hızları 50-100-200-680 kg/san ve maksimum yük düzeyleri 5000-10000-20000-30000-40000-50000 kg olacak şekilde yüklenmiştir.

ÇES'in sensör parametrelerinin belirlendiği basınç testlerinde, ÇES elektriksel direnç değişimi ile ÇES birim şekil değiştirmesi arasında Eşitlik 4.3 bulunmuştur.

$$\varepsilon = A \times \%R \quad (4.3)$$

Eşitlik 4.3'de ε , ÇES tarafından ölçülen birim şekil değiştirme, $\%R$, ÇES'in elektriksel direnç değişimidir. "A" değeri, ÇES basınç testlerinde 0.0002; 0.0003; 0.0004 değerlerini almaktadır. Model kolon testlerinde ise, gerinim pulları ile ÇES sinyali arasında en iyi uyum, $A=0.0005$ olduğunda alınmıştır. Bunun nedeni, ÇES'in basınç testi ile test edilmesi ile model kolon içinde test edilmesi arasında sınır koşullar ve yükleme şekli arasındaki farklardır. Aşağıdaki sonuçlarda $A=0.0005$ alınmıştır. Uygulamada da, prefabrike yapı elemanının, ÇES içindeyken test edilip ilgili bağıntının çıkarılması uygun olacaktır.

Model kolon testlerinde, ÇES'den elde edilen %R ile Eşitlik 4.3 kullanılarak ÇES ile ölçülen birim şekil değiştirme hesaplanmış, metal gerinim pulları ile ölçülen değerler ile karşılaştırılmıştır. Maksimum yük seviyesi 30000 kg altındayken ÇES sinyalinin zayıf olması nedeniyle gerinim pulları ile ölçülen ve ÇES ile hesaplanan birim şekil değiştirmeler arasındaki korelasyonlar zayıftır. 30000kg ve üstü yük değerleri için, ÇES ile gerinim pulu ölçümleri arasında güçlü doğrusal ilişki tespit edilmiştir. Kolonun kırılma yükü 83280 kg olduğuna göre kırılma yükünün %36'sının üstünde ÇES doğru ölçümler vermiştir. ÇES ile ölçülen birim şekil değiştirme ile gerinim pulu ölçümleri, farklı yükleme hızları için Şekil 4.19'da sunulmuştur.



Şekil 4.19 Kolon içinde ÇES testleri, ÇES – gerinim pulu birim şekil değiştirme grafiği, yükleme hızı a) v= 50 kg/san b) v= 100 kg/san c) v= 200 kg/san d) v= 680 kg/san.

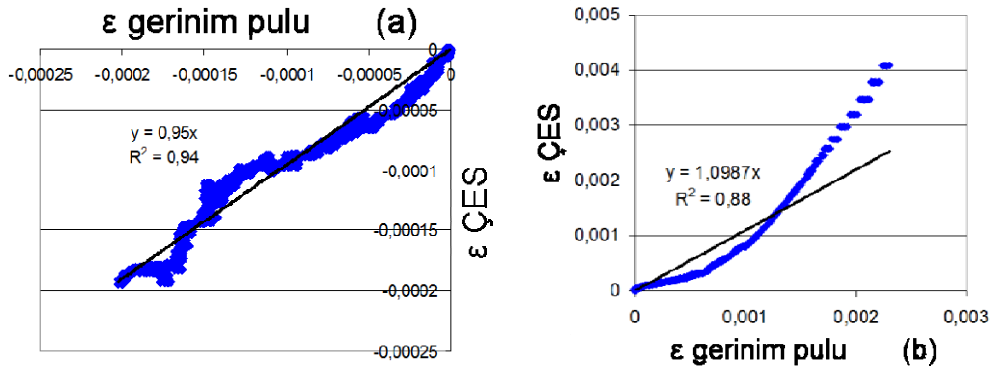
Şekil 4.19'dan da görüldüğü gibi, farklı verilen yükleme hızlarında ÇES, gerinim pulları ile uyumlu sinyaller vermiştir. ÇES'in kolonun içinde, gerinim pullarının ise yüzeyde oldukları ve böylesine küçük boyutlar için birim şekil değiştirmenin ÇES'in bulunduğu bölge ile gerinim pulunun yapıştırıldığı bölgede az da olsa farklı olabileceği düşünülürse, ÇES ile gerinim pulu sinyallerinin bu kadar iyi örtüşmesi büyük bir başarıdır. Yapısal uygulamalarda, ÇES'in içine konacağı yapı elemanlarının boyutlarının çok daha büyük olacağı ve birim şekil değiştirme

değerlerinin daha az değişim göstereceği düşünülürse, ÇES'in gerçek yapı elemanları içindeki performansı çok daha iyi olacaktır.

Model kolonlar ile birlikte dökülen 3 adet 15 cm küp beton numunenin ortalama basınç dayanımı 365 kg/ cm² ölçülmüştür. C30 beton basınç dayanımı 350 kg/ cm².

4.9 ÇES'in Model Kiriş İçinde Testi

ÇES, model kirişler içinde, orta noktada çekme ve basınç bölgelerine yerleştirilerek test edilmiştir. ÇES'den elde edilen %R ile eşitlik 4.3 kullanılarak birim şekil değiştirme hesaplanmıştır. ÇES ve gerinim pullarından ölçülen birim şekil değiştirmeler Şekil 4.20'de sunulmuştur.



Şekil 4.20 Kiriş içinde ÇES testleri, ÇES kirişin ortasında, ÇES – gerinim pulu birim şekil değiştirme grafiği a) ÇES üstte basınç bölgesinde b) ÇES altta çekme bölgesinde.

Şekil 4.20a'da görüldüğü gibi, ÇES basınç bölgesindeyken, ÇES ile gerinim pulu ölçümü arasında doğrusal bir ilişki vardır. Doğrusal ilişkinin korelasyon katsayısı 0.94'dür.

ÇES, kirişin çekme bölgesindeyken (Şekil 4.20b), ÇES - gerinim pulu birim şekil değiştirme grafiği eğriseldir. ÇES'in her iki konumunda güçlü bire-bir ilişki yakalanamamasının nedeni, kiriş yüksekliğinin 15 cm olmasıdır. Elastik teoriye göre, eğilme altındaki kirişin tarafsız eksenini, alt-üst yüzeyden 7.5 cm uzaktadır. ÇES'in kiriş yüzeyinden 5 mm uzakta başlayıp, 5 cm yüksekliğinde olduğunu düşünürsek, ÇES üst yüzeyi tarafsız ekseninden 2 cm uzakta kalır. ÇES tarafsız eksene hem çok yakın, hem de ÇES'in içinde bulunduğu kiriş birim şekil değiştirmesindeki değişim çok fazladır. Bu nedenlerle, ÇES'in, boyutlarına göre, birim şekil değiştirme değişiminin daha az olacağı, daha yüksek ve daha uzun kirişlerde test edilmesi ve kullanılması uygun olacaktır. Projede boyutu 15*30*150 cm lik kirişleri test etmek için bütçe

yoktur, bu testler proje iş paketlerinde de yoktur. ÇES'in bir sensör olarak patentinin alınıp teknolojik bir ürüne dönüşebilmesi için, boyutu daha büyük kirişlerde test edilmesi önemlidir.

ÇES bulunduğu bölgede sadece sensör olarak davranmaz, ilerleyen çatlakları da kilitleyerek elemanın yenilmesini önler. Şekil 4.21a'de görüldüğü gibi ÇES, kirişin kırılması sonrası çatlakları kilitlemiştir ve kırışın iki parçaya ayrılıp düşmesine engel olmuştur.

Son bir yükleme ile kiriş kırıldığında, çatlak ÇES'i de yarmıştır. ÇES'in içindeki çatlakları kilitleyen çelik teller Şekil 4.22b'de görülmektedir.

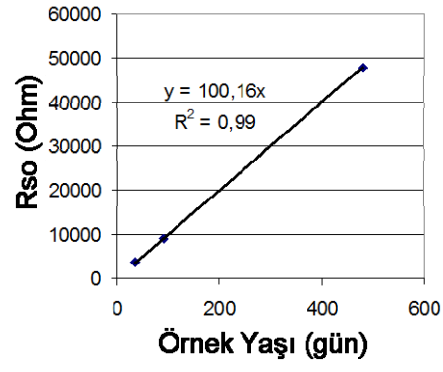


Şekil 4.21 Kiriş eğilme testinde ÇES üstte basınç bölgesinde a) Kiriş kırılmış b) ÇES içindeki çelik lifler.

Yapılan diğer kolon ve kiriş testlerinden de benzer sonuçlar elde edilmiştir.

4.10 ÇES Bünyesindeki Aktif Maddelerin Etkisi

ÇES bünyesindeki aktif maddelerin zaman içinde bünyesel dirence ve elektriksel direnç değişimi- birim şekil değiştirme ilişkisine etkisini araştırmak için, ÇES karışımının belirlendiği zamanda basınç ve yarmada çekme testleri için 6 şar adet 5 cm ebatlı küp, eğilme testi içinde 6 adet 4*4*16 cm prizma örnek hazırlandı. Örnekler 90. gün ve 480. günlerde her testten üçer adet olmak üzere test edildi. Daha önce rapor edilen ve Eşitlik 4.3 ile verilen birim şekil değiştirme – elektriksel direnç değişimi ilişkisi aynı şekilde geçerlidir, A katsayısı aynıdır. Örnek elektriksel direnci, örnek yaşı ile artar. Örnek elektriksel direnci ile örnek yaşı arasında çok güçlü bir doğrusal ilişki bulunmuştur (Şekil 4.22). Doğrusal ilişkinin korelasyon katsayısı 0.99'dur.



Şekil 4.22 Örnek yaşı ile elektriksel direnci arasındaki ilişki.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Çelik lifli ve karbon lifli, farklı lif uzunluğu ve hacimsel oranlarına sahip 46 farklı karışım tasarlanmıştır. Karışımlara basınç, yarmada çekme ve çentikli eğilme testleri uygulanarak birim şekil değiştirme ve çatlak uzunluğunun elektriksel direnç değişimi ile ilişkisi belirlenmiştir. Birim şekil değiştirmeye ve çatlak uzunluğuna en duyarlı karışım Çimento Esaslı Sensör (ÇES) olarak belirlenmiştir.
- Literatürde, eş zamanlı olarak elektriksel direnç değişimi- birim şekil değiştirme ölçümlerinin yapıldığı yarmada çekme testi ilk defa bu projede uygulanmıştır. Ayrıca, çatlak boyu ile elektriksel direncin eş zamanlı ölçülmesi ve korelasyonlarının tanımlanması, literatürde, ilk defa bu projede sunulmuştur.
- Yükleme hızının ÇES üzerindeki etkisini belirlemek için, ÇES ile beş farklı yükleme hızında basınç testi yapılmıştır. Yükleme hızı 0.5 mm/dak - 5 mm/dak arasında iken, birim şekil değiştirme ile elektriksel direnç değişimi (%R) arasındaki doğrusal ilişki çok fazla etkilenmemiştir. Yükleme hızı 10 mm/dak'da doğrusal ilişkinin gücü azalmıştır.
- Elektriksel direnç değişimi ile birim şekil değiştirme ve çatlak boyu arasındaki mekanizmalar basınç, yarmada çekme ve çentikli eğilme testlerinde belirlenmiştir.
- Basınç birim şekil değiştirmesi ile lifler kısalır, mikro boşluklar ve çatlaklar kapanır, lif-lif, lif- matris teması artar, elektriksel direnç düşer.
- Çekme birim şekil değiştirmesi ile lifler uzar, mikro boşluklar ve çatlaklar açılır, lif-lif, lif-matris teması azalır, elektriksel direnç artar.
- Çatlağın ilerlemesi, elektronların geçeceği kesit alanı daraltır, elektriksel direnç artar.
- Perkolasyon lif hacimsel oranında, elektron iletiminin büyük kısmı, liflerin direkt teması ile oluşturmaya başladıkları az sayıda iletim hattı ile olur. Birim şekil değiştirme veya çatlak uzaması, az sayıdaki direkt iletim hattını kopartarak sistemi perkolasyon sonrası durumdan, perkolasyon öncesi duruma iter, birim şekil değiştirme duyarlılığı ve çatlak duyarlılığı maksimum olur.
- Basınç- çekme birim şekil değiştirmeleri ve çatlak uzunluğu ile, elektriksel direnç değişimi arasında güçlü doğrusal ilişkiler bulunmuştur. Bu ilişkiler, çimento matrisli lif katkılı malzemenin, birim şekil değiştirme ölçer ve hasar ölçer olarak kullanılması için en büyük motivasyondur.
- Sıcaklığın elektriksel direnç üzerindeki etkisini tespit etmek için yapılan testte, nem kaybına karşı izole edilmiş örneğin elektriksel direnci 200 dereceye kadar küçük miktarda değişmiştir. 200 dereceden sonra ÇES'in nem kaybına karşı izole edilmesine rağmen bünyesinde bulunan suyun sıvı fazdan buhar fazına geçip, elektrolit olma özelliğini yitirmesi

nedeniyle, elektriksel direnç değişiminde büyük artışlar olmuştur. Bu durumda elektronların iletilmesinde katkısı olan elektrolit suyun eksilmesi, elektriksel direnci artırır.

- Nemin elektriksel direnç üzerindeki etkisini tespit etmek için yapılan testte, kür tankından çıkan ÇES'in nemi %9.49 dur. Nem %9.49'dan %9'a düşerken, elektriksel direnç azalır. Bu azalmanın nedeni, kür tankından yeni çıkmış örnek suya doygundur ve iletken liflerinin etrafı su filmi ile kaplıdır; su filmi liflerin birbirine direkt temasını engeller. Nem azaldıkça, su filmi azalır, lifler birbirine temas etmeye başlar, elektriksel direnç düşer. Optimum nem oranı %9'deyken, liflerin teması ve boşluklar içindeki suyun elektrolit olarak davranması ile en düşük elektriksel direnç elde edilir. Nem oranı %9'dan aşağıya düşünce, boşluklar içinde elektrolit olarak davranan su kaybolmaya başlar ve elektriksel direnç yükselir.
- Nemin basınç, yarmada çekme ve çentikli eğilme testlerinde duyarlılığa etkileri belirlenmiştir.
- Elektriksel direncin minimum olduğu optimum nem içeriğinde, basınç testinde elektriksel direnç daha fazla düşeceğinden, duyarlılık maksimum elde edildi.
- En düşük nem oranında, elektronlar lif-lif ve lif-matris teması ile iletilir, elektrolit sıvı iletimi yok denecek kadar azalır. Yarmada çekme testinde, çekme birim şekil değiştirmesi, lif-lif ve lif-matris temaslarını kırar, duyarlılık maksimum olur.
- Benzer durum çentikli eğilme testlerinde de gözlenmiştir. Nem oranı optimum değerin altına düştükçe, elektron iletiminde lif- lif ve lif-matris temasının rolü artar. Çatlak uzaması bu temasları birbirinden ayırdığında, elektriksel direncin değişimi daha fazla olur, çatlak duyarlılığı daha büyük olur.
- ÇES'in basınç testlerinde elde edilen birim şekil değiştirme duyarlılığı 44 dür. ÇES, gerinim pullarından 22 kat daha fazla duyarlıdır.
- Yarmada çekme testlerinde çekme birim şekil değiştirmesi duyarlılığı 42 elde edilmiştir.
- Çentikli eğilme testlerinde çatlak duyarlılığı 0.5'dir. Çimentolu malzemeler için çatlak duyarlılığı ilk defa bu projede tanımlanmıştır.
- Elektrik akımı ile basınç birim şekil değiştirmesinin birbirine dik olduğu çapraz basınç yükleme testleri yapılmıştır. Düşey basınç birim şekil değiştirmesi ile %R arasında güçlü bir doğrusal ilişki saptanmıştır. Bu ilişkinin çapraz duyarlılığı 193; çapraz doğrusallığı %20, korelasyon katsayısı 0.96'dir. Bu değerler, ÇES'in çapraz yükler altında doğrusal davrandığını gösterir.
- Elektrik akımı ile çekme birim şekil değiştirmesinin birbirine dik olduğu çapraz yarmada çekme testleri yapılmıştır. Çapraz çekme birim şekil değiştirmesi ile %R arasında güçlü bir doğrusal ilişki bulunmuştur. Bu test, literatürde ilk defa yapılmıştır.

- Elektrik akımının birim şekil değiştirmeye dik olduğu basınç ve yarmada çekme testlerinde elde edilen çapraz duyarlılıklar, paralel olduğu testlerde elde edilen duyarlılıklardan daha yüksektir. Bu duruma neden olan mekanizmalar detaylı olarak aydınlatılmıştır.
- Basınç ve çekme birim şekil değiştirmelerinin elektrik akımına dik olduğu durumda, birim şekil değiştirmeleri ile %R arasında güçlü doğrusal ilişkiler bulunmuştur. Bu ilişkiler, ÇES'in yapısal sensör uygulamalarında çapraz yükleme etkilerini çıkartmak için kullanılabilir.
- ÇES, model kolonlar içinde farklı yükleme hızları ve yük düzeyleri ile test edilmiştir. Kolon yük düzeyi kırılma yükünün %36'sından fazlayken, kullanılan her yükleme hızında gerinim pulu ölçümleri ile ÇES ölçümleri çok yakın sonuçlar vermişlerdir.
- ÇES, 15*15*75 cm ebatlarında eğilme altındaki kirişlerin çekme ve basınç bölgelerinde test edilmiştir. ÇES basınç bölgesindeyken, aynı bölgede yer alan gerinim pulu ile uyumlu ölçüm vermiştir, sinyalleri arasındaki doğrusal korelasyonun katsayısı 0.94'dür. ÇES çekme bölgesindeyken, gerinim pulu sinyali ile aralarındaki doğrusal ilişkinin korelasyon katsayısı 0.88 dir. ÇES in 5 cm ebatlı ve kiriş içinde tarafsız eksene çok yakın olduğunu ve yüksek birim şekil değiştirme değişimi içinde olduğu düşünülürse, daha iyi sonuçlar alabilmek için ÇES in yüksekliği ve açıklığı daha büyük kirişler içinde test edilmesi, pratikte kullanımının test edilmesi adına daha önemlidir ve daha iyi sonuçlar alınması beklenmektedir.
- ÇES içindeki aktif maddeler, zaman içinde elektriksel direnç değişimi – birim şekil değiştirme ilişkisini etkilemez. Elektriksel direnç – zaman arasında çok güçlü bir doğrusal ilişki bulunmuştur.
- ÇES, yüksek duyarlılığı, yüksek dayanımı ve kolay kullanımı ile betonarme yapıların sağlığının izlenmesinde kullanılabilir. Yapı elemanının hem içine hem de yüzeyine yerleştirilerek hem içinden hem de yüzeyden ölçüm alınmasını sağlayabilir. Uzun dönem kullanılabilir. Çimentolu malzemeden üretildiği için korozyon ve benzeri etkiler göstermez.
- ÇES'in kullanımı ile yapı sağlığının izlenmesi kolaylaşacak, hasarlı ve kapasitesi yetersiz yapılar erken teşhis edilip, depremlerde can ve mal kayıpları önlenecektir.

Gelecekte yapılabilecek çalışmalar ile ilgili öneriler aşağıda sunulmuştur.

- ÇES'in 15*30*150 cm ebatlarında veya daha büyük ebatlarda kiriş içinde test edilmesi, kiriş içinde kullanılmaya uygun olduğunun belirlenmesi açısından önemlidir.
- ÇES, boyutları küçültülerek döşeme, yüksekliği düşük kirişler gibi ebatları küçük yapısal elemanlarda da kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Chen, B., Liu, J. 2008. "Damage in carbon fiber –reinforced concrete, monitored by both electrical resistance measurement and acoustic emission analysis", *Constr and Build Mater*, 22, 2196-2201.
- Chiarello, M., Zinno, R. 2005. "Electrical conductivity of self-monitoring CFRC", *Cem and Concr Comp*, 27, 463-469.
- Chung, D.D.L. 1998. "Self-monitoring structural materials", *Mater Sci Eng*, 22(2), 57-78.
- Chung, D.D.L. 2000. "Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material", *Composites Part B: Engineering*, 31, 511-526.
- Chung, D.D.L. 2001. "Review functional properties of cement –matrix composites", *J Mater Sci*, 36, 1315-1324.
- Fu, X., Chung, D.D.L. 1997. "Effect of curing age on the self-monitoring behavior of carbon fiber reinforced mortar", *Cem and Concr Res*, 27(9), 1313-1318.
- Fu, X., Ma, E., Chung, D.D.L., Anderson, W.A. 1997. "Self-monitoring in carbon fiber reinforced mortar by reactance measurement", *Cem and Concr Res*, 27(6), 845-852.
- Gong, H., Zhang, Y., Quan, J., Songwei, C. 2011. "Preparation and properties of cement based piezoelectric composites modified by CNTs", *Current Applied Physics*, 11, 653-656.
- Han, B., Guan, X., Ou, J. 2007. "Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors", *Sens and Actuators A*, 135, 360-369.
- Han, B., Zhang, K., Yu, X., Kwon, E., Ou, J. 2011. "Nickel particle based self-sensing pavement for vehicle detection", *Measurement*, 44, 1645- 1650.
- Hixson, A.D., Woo, L.Y., Campo, M.A, Mason, T.O., Garboczi, E.J. 2001. "Intrinsic conductivity of short conductive fibers in composites by impedance spectroscopy", *Journal of Electroceramics*, 7, 189–195.

Jing, X., Wu, Y., Ruiqing, W. 2011. "Nonlinear conduction in carbon fiber reinforced cement mortar", *Cement and Concrete Composites*, 33, 444-448.

Li, H., Xiao, H., Ou, J. 2006. "Effect of compressive strain on electrical resistivity of carbon black-filled cement –based composites", *Cem and Concr Comp*, 28, 824-828.

Li, H., Xiao, H., Ou, J. 2008. "Electrical property of cement-based composites filled with carbon black under long-term wet and loading condition", *Comp Sci and Tech*, 68, 2114-2119.

Li, Z.J., Zhang, D., Wu, K. R. 2001. "Cement matrix 2-2 piezoelectric composite Part 1. Sensory effect", *Materials and Structures*, 34, 506-512.

Mason, T.O., Campo, M.A., Hixson, A.D., Woo, L.Y. 2002. "Impedance spectroscopy of fiber-reinforced cement composites", *Cement & Concrete Composites*, 24, 457–465.

Rajabipour, F., Weiss, J., Shane, J. D., Mason, T.O., Surendra, P.S. 2005. "Procedure to interpret electrical conductivity measurements in cover concrete during rewetting", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(5), 586-594.

Reza, F., Baston, G.B., Yamamuro, J.A., Lee, J.S. 2003. "Resistance changes during compression of carbon fiber cement composites", *J Mater Civil Eng*, 15(5), 476-483.

Reza, F., Yamamuro, J.A., Baston, G.B. 2004. "Electrical resistance change in compact tension specimens of carbon fiber cement composites", *Cem and Concr Comp*, 26, 873-881.

Rianyoi, R., Potong, R., Jaitonong, N., Yimnirun, R., Chaipanich, A. 2011. "Dielectric , ferroelectric and piezo electric properties of 0-3 barium titanate -portland cement composite", *Applied Physics A*, 104, 661- 666.

Shane, J.D., Mason,T.O., Jennings, H.M. 2000. "Effect of the interfacial transition zone on the conductivity of portland cement mortars", *J. Am. Ceram. Soc.*, 83(5), 1137–1144.

Teomete, E., Erdem, T.K. 2011. "Cement Based Strain Sensor: A Step to Smart Concrete", *Cement Wapno Beton*, 2, 78-91.

Torrents, J.M., Easley, T.C., Faber, K.T., Mason, T.O (2001) Evolution of impedance spectra during debonding and pullout of single steel fibers from cement. *J. Am. Ceram. Soc.* 84(4): 740–746.

Torrents, J.M., Mason, T.O., Peled, A., Shah, S.P., Garboczi, E.J. 2001. “Analysis of the impedance spectra of short conductive fiber-reinforced composites”, *Journal of Materials Science*, 36, 4003-4012.

Tumidajski, P.J., Xie, P., Arnott, M., Beaudoin, J.J. 2003. “Overlay current in a conductive concrete snow melting system”, *Cement and Concrete Research*, 33, 1807–1809.

Vaidya, S., Allouche, E.N. 2011. “Strain sensing of carbon fiber reinforced geopolymer concrete”, *Materials and Structures*, 44, 1467–1475.

Woo, L. Y., Kidner, N. J., Wansom, S., Mason, T.O. 2007. “Combined time domain reflectometry and AC-impedance spectroscopy of fiber-reinforced fresh-cement composites”, *Cement and Concrete Research*, 37, 89–95.

EK 1: TASARLANAN KARIŞIMLAR

Birim şekil değiştirmeye ve çatlak uzunluğuna en duyarlı karışımı tespit edebilmek için 46 farklı içerikte karışım oluşturulmuştur. Karışım içerikleri aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo Ek 1.1. Çelik lif birinci grup karışımları (lif uzunluğu 6 mm).

| Bileşenler | M1 | SY1 | S2 | S3 | S4 | S5 |
|---------------------------------------------|------|------|------|------|------|-------|
| L=6 mm Çelik Lif Hacimsel Yüzdesi | 0,00 | 0,20 | 0,50 | 0,80 | 1,00 | 1,50 |
| Çelik Lif (kg/m ³) | 0,0 | 15,7 | 39,2 | 62,8 | 78,5 | 117,7 |
| Çimento (kg/m ³) | 651 | 650 | 648 | 646 | 645 | 642 |
| Kum (kg/m ³) | 651 | 650 | 648 | 646 | 645 | 642 |
| Silis Dumanı (kg/m ³) | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 64 |
| Su (kg/m ³) | 261 | 260 | 259 | 259 | 258 | 257 |
| Süper Akışkanlaştırıcı (kg/m ³) | 6,5 | 6,5 | 6,5 | 6,5 | 6,5 | 6,4 |

Tablo Ek 1.2. Çelik lif birinci grup karışımları (lif uzunluğu 13 mm).

| Bileşenler | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 |
|---------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| L=13 mm Çelik Lif Hacimsel Yüzdesi | 0,20 | 0,35 | 0,50 | 0,80 | 1,00 |
| Çelik Lif (kg/m ³) | 15,7 | 27,5 | 39,2 | 62,8 | 78,5 |
| Çimento (kg/m ³) | 650 | 649 | 648 | 646 | 645 |
| Kum (kg/m ³) | 650 | 649 | 648 | 646 | 645 |
| Silis Dumanı (kg/m ³) | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 |
| Su (kg/m ³) | 260 | 260 | 259 | 259 | 258 |
| Süper Akışkanlaştırıcı (kg/m ³) | 6,5 | 6,5 | 6,5 | 6,5 | 6,5 |

Tablo Ek 1.3. Çelik lif ikinci grup karışımları.

| Bileşenler | Çelik Lif Uzunluğu | | | | | | | |
|---------------------------------------------|--------------------|------|------|----------|------|------|---------|------|
| | L= 6 mm | | | L= 13 mm | | | L= 6 mm | |
| | S11 | S12 | S13 | S14 | S15 | S16 | S17 | S18 |
| Çelik Lif Hacimsel Yüzdesi | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 1,00 | 1,00 |
| Çelik Lif (kg/m ³) | 78,5 | 78,5 | 78,5 | 62,8 | 62,8 | 62,8 | 78,5 | 78,5 |
| Çimento (kg/m ³) | 620 | 596 | 568 | 621 | 598 | 569 | 690 | 606 |
| Kum (kg/m ³) | 620 | 596 | 568 | 621 | 598 | 569 | 690 | 606 |
| Silis Dumanı (kg/m ³) | 62 | 60 | 57 | 62 | 60 | 57 | 69 | 61 |
| Uçucu Kül (kg/m ³) | 93 | 179 | 284 | 93 | 179 | 285 | 0 | 0 |
| Su (kg/m ³) | 248 | 253 | 261 | 248 | 246 | 254 | 207 | 303 |
| Süper Akışkanlaştırıcı (kg/m ³) | 6,2 | 6,0 | 8,4 | 6,2 | 6,0 | 5,7 | 6,9 | 6,1 |

Tablo Ek 1.4. Karbon lif birinci grup karışımları (lif uzunluğu 6 mm).

| Bileşenler | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 |
|---------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Karbon Lif Hacimsel Yüzdesi (L= 6 mm) | 0,20 | 0,50 | 0,80 | 1,00 | 1,50 |
| Karbon Lif (kg/m ³) | 3,5 | 8,8 | 14,0 | 17,5 | 26,3 |
| Çimento (kg/m ³) | 646 | 644 | 642 | 641 | 638 |
| Kum (kg/m ³) | 646 | 644 | 642 | 641 | 638 |
| Silis Dumanı (kg/m ³) | 65 | 64 | 64 | 64 | 64 |
| Su (kg/m ³) | 259 | 258 | 257 | 256 | 255 |
| Süper Akışkanlaştırıcı (kg/m ³) | 12,9 | 12,9 | 12,8 | 12,8 | 12,8 |

Tablo Ek 1.5. Karbon lif birinci grup karışımları (lif uzunluğu 3 mm).

| Bileşenler | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 |
|---------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Karbon Lif Hacimsel Yüzdesi (L= 3 mm) | 0,20 | 0,50 | 0,80 | 1,00 | 1,50 |
| Karbon Lif (kg/m ³) | 3,5 | 8,8 | 14,0 | 17,5 | 26,3 |
| Çimento (kg/m ³) | 646 | 644 | 642 | 641 | 638 |
| Kum (kg/m ³) | 646 | 644 | 642 | 641 | 638 |
| Silis Dumanı (kg/m ³) | 65 | 64 | 64 | 64 | 64 |
| Su (kg/m ³) | 259 | 258 | 257 | 256 | 255 |
| Süper Akışkanlaştırıcı (kg/m ³) | 12,9 | 12,9 | 12,8 | 12,8 | 12,8 |

Tablo Ek 1.6. Karbon lif birinci grup karışımları (lif uzunluğu 13 mm).

| Bileşenler | C11 | C12 | C13 | C14 | C15 |
|---------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Karbon Lif Hacimsel Yüzdesi (L= 3 mm) | 0,20 | 0,35 | 0,50 | 0,80 | 1,00 |
| Karbon Lif (kg/m ³) | 3,5 | 6,1 | 8,8 | 14,0 | 17,5 |
| Çimento (kg/m ³) | 646 | 645 | 644 | 642 | 641 |
| Kum (kg/m ³) | 646 | 645 | 644 | 642 | 641 |
| Silis Dumanı (kg/m ³) | 65 | 65 | 64 | 64 | 64 |
| Su (kg/m ³) | 259 | 258 | 258 | 257 | 256 |
| Süper Akışkanlaştırıcı (kg/m ³) | 12,9 | 12,9 | 12,9 | 12,8 | 12,8 |

Tablo Ek1.7. Karbon lif birinci grup karışımları (lif uzunluğu 16 mm).

| Bileşenler | C16 | C17 | C18 | C19 | C20 |
|---------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Karbon Lif Hacimsel Yüzdesi (L= 3 mm) | 0,20 | 0,35 | 0,50 | 0,80 | 1,00 |
| Karbon Lif (kg/m ³) | 3,5 | 6,1 | 8,8 | 14,0 | 17,5 |
| Çimento (kg/m ³) | 646 | 645 | 644 | 642 | 641 |
| Kum (kg/m ³) | 646 | 645 | 644 | 642 | 641 |
| Silis Dumanı (kg/m ³) | 65 | 65 | 64 | 64 | 64 |
| Su (kg/m ³) | 259 | 258 | 258 | 257 | 256 |
| Süper Akışkanlaştırıcı (kg/m ³) | 12,9 | 12,9 | 12,9 | 12,8 | 12,8 |

Tablo Ek 1.8. Karbon lif ikinci grup karışımları.

| Bileşenler | C21 | C22 | C23 | C24 | C25 | C26 | C27 |
|---------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Karbon lif uzunluğu (mm) | 6 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Karbon Lif Hacimsel Yüzdesi | 0,20 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 |
| Karbon Lif (kg/m ³) | 3,5 | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,8 |
| Çimento (kg/m ³) | 590 | 588 | 567 | 548 | 524 | 625 | 555 |
| Kum (kg/m ³) | 590 | 588 | 567 | 548 | 524 | 625 | 555 |
| Silis Dumanı (kg/m ³) | 59 | 59 | 57 | 55 | 52 | 63 | 56 |
| Lateks (kg/m ³) | 88 | 88 | 85 | 82 | 79 | 94 | 83 |
| Uçucu Kül (kg/m ³) | 0 | 0 | 85 | 164 | 262 | 0 | 0 |
| Su (kg/m ³) | 236 | 235 | 227 | 219 | 209 | 188 | 278 |
| Süper Akışkanlaştırıcı (kg/m ³) | 11,8 | 11,8 | 11,3 | 11,0 | 10,5 | 12,5 | 11,1 |

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

| | |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Proje Yürütücüsü: | Yrd. Doç. Dr. EGEMEN TEOMETE |
| Proje No: | 110M221 |
| Proje Başlığı: | Çimento Esaslı Sensör Üretimi |
| Proje Türü: | Araştırma |
| Proje Süresi: | 36 |
| Araştırmacılar: | TAHİR KEMAL ERDEM |
| Danışmanlar: | |
| Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: | DOKUZ EYLÜL Ü. MÜHENDİSLİK F. İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ B. |
| Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: | 15/11/2010 - 15/11/2013 |
| Onaylanan Bütçe: | 133846.0 |
| Harcanan Bütçe: | 113592.12 |
| Öz: | <p>Depremler, malzeme bozulmaları ve diğer çevresel etkiler, yapıların performansını olumsuz etkiler. Yapı sağlığının izlenmesi can ve mal güvenliğini sağlamak için önemlidir. Gerinim pulları, yapı elemanlarının yüzeylerinden ölçüm alabilmekte, içinden ölçüm almak zor olmaktadır. Gerinim pullarının dayanıklılığı düşüktür, bu nedenle kısa süreler için kullanılabilir. Gerinim pullarının pahalı olmaları çok sayıda kullanılmalarının önünde engeldir.</p> <p>Bu çalışmada, karbon ve çelik lifli, farklı lif uzunluğu ve lif hacimsel oranlarına sahip 46 farklı çimento matrisli karışım tasarlanmıştır. Basınç, yarmada çekme ve çentikli eğilme testleri ile, birim şekil değiştirmeye ve çatlak uzunluğuna en duyarlı karışım Çimento Esaslı Sensör (ÇES) olarak belirlenmiştir. Sıcaklığın ve nemin ÇES elektriksel direnci üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Yükleme hızının ve nemin elektriksel direnç değişimi ? birim şekil değiştirme ilişkisine etkileri araştırılmıştır. ÇES'in sensör özellikleri olan duyarlılık ve doğrusallık değerleri tespit edilmiştir. Elektrik akımının birim şekil değiştirmeye dik olduğu çapraz yükleme durumunun elektriksel direnç değişimine etkisi belirlenmiştir. Birim şekil değiştirme ve çatlak uzunluğu ile elektriksel direnç değişimi arasındaki mekanizmalar aydınlatılmıştır. ÇES içindeki aktif maddelerin zaman içinde birim şekil değiştirme -elektriksel direnç değişimi arasındaki ilişkiye ve elektriksel dirence etkisi belirlenmiştir.</p> <p>ÇES, model kolon ve kirişlerin içinde birim şekil değiştirme sensörü olarak test edilmiştir. Kolon testlerinde, gerinim pulları ile ÇES birim şekil değiştirme ölçümleri çok yakın sonuçlar vermiştir. Kiriş testlerinde, ÇES tarafsız eksenin üst tarafında basınç bölgesindeyken gerinim pulu ölçümleri ile ÇES ölçümleri uyumluyken, ÇES tarafsız eksenin altında çekme bölgesindeyken aralarındaki ilişki zayıflamıştır. Bunun nedeni, kiriş boyutunun 15*15*75 cm olması, ÇES'in 5 cm ebatlı küp olması, kiriş eğilme altındayken oluşan birim şekil değiştirmenin yükseklikle değişiminin fazla olmasıdır. ÇES'in, boyutları daha büyük olan kirişler içinde test edilmesi olumlu olacaktır.</p> <p>ÇES, birim şekil değiştirmeye gerinim pullarına göre 22 kat daha fazla duyarlıdır. ÇES, beton dökülmeden önce kalıp içine ölçüm alınmak istenen noktaya yerleştirilip, beton prizini aldıktan sonra sürekli veya istenen zamanda birim şekil değiştirme ölçülebilecektir. ÇES ile yapı elemanının içinden veya yüzeyinden ölçüm almak mümkün olacaktır. Dayanıklı ve hassas bir sensör olarak ÇES, uzun süre ölçüm almayı sağlayacaktır.</p> |
| Anahtar Kelimeler: | Akıllı malzeme, çelik lif, karbon lif, çimento, elektriksel direnç, sensör |
| Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?: | Hayır |

| | |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Proje Yapılan Yayınlar: | <p>1- LİF KATKILI ÇİMENTOLU KOMPOZİTLERİN BİRİM DEFORMASYON ?ELEKTRİKSEL DİRENÇ İLİŞKİSİNİN DENEYSEL ANALİZİ (Bildiri),</p> <p>2- Metal Lif Katkılı Çimentolu Kompozitlerde Basınç Birim Şekil Değişirme? Elektriksel Direnç İlişkisinin Deneysel Olarak Araştırılması (Bildiri),</p> <p>3- The Effect of Compressive Strain on Electrical Resistivity of Steel Fiber Reinforced Cement Based Composites (Bildiri),</p> <p>1- Cement Based Strain Sensor: A Step to Smart Concrete (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm)2- Cement Based Strain Sensor: A Step to Smart Concrete (Makale - Diğer Hakemli Makale),</p> <p>3- Tensile strain sensitivity of steel fiber reinforced cement matrix composites tested by split tensile test (Makale - Diğer Hakemli Makale),</p> <p>4- Metal Lif Katkılı Çimentolu Kompozitlerde Basınç Birim Şekil Değişirme? Elektriksel Direnç İlişkisinin Deneysel Olarak Araştırılması (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>5- Relations of Crack Length and Electrical Resistance for Smart Cement Based Composites (Makale - Diğer Hakemli Makale),</p> <p>6- LİF KATKILI ÇİMENTOLU KOMPOZİTLERİN BİRİM DEFORMASYON ? ELEKTRİKSEL DİRENÇ İLİŞKİSİNİN DENEYSEL ANALİZİ (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>7- LİF KATKILI ÇİMENTOLU KOMPOZİTLERİN ÇATLAK ? ELEKTRİKSEL DİRENÇ İLİŞKİSİNİN DENEYSEL ANALİZİ (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>8- The Effect of Compressive Strain on Electrical Resistivity of Steel Fiber Reinforced Cement Based Composites (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p> |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

TÜBİTAK