DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPI SAĞLIĞININ İZLENMESİ İÇİN ÇİMENTO ESASLI BİRİM ŞEKİL DEĞİŞTİRME ÖLÇERİN GELİŞTİRİLMESİ

Özgün İlkim KOÇYİĞİT

Mart, 2015

İZMİR

YAPI SAĞLIĞININ İZLENMESİ İÇİN ÇİMENTO ESASLI BİRİM ŞEKİL DEĞİŞTİRME ÖLÇERİN GELİŞTİRİLMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı

Özgün İlkim KOÇYİĞİT

Mart, 2015
İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ÖZGÜN İLKİM KOÇYİĞİT, tarafından **YRD.DOÇ.DR. EGEMEN TEOMETE** yönetiminde hazırlanan **"YAPI SAĞLIĞININ İZLENMESİ İÇİN ÇİMENTO ESASLI BİRİM ŞEKİL DEĞİŞTİRME ÖLÇERİN GELİŞTİRİLMESİ"** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Egemen TEOMETE

Yönetici

Prof. Dr. Erdal ÇELİK

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Serap KAHRAMAN

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada bana vermiş olduğu desteklerden ötürü değerli danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Egemen Teomete'ye teşekkürlerimi sunarım. Kendisine mekanik testlerin bir kısmında yardımcı oldum. Mekanik test verilerini sağladığı için kendisine ayrıca teşekkür ederim.

Ders sürecim boyunca aldığım dersler sayesinde birçok bilgi öğrenmeme fayda sağlayan tüm hocalarıma içten teşekkürlerimi sunarım.

Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarının tüm imkanlarını kullanmama izin ve destek verdiği için değerli hocam Sayın Prof. Dr. Serap Kahraman'a teşekkürler ederim.

TÜBİTAK'a 110M221 numaralı 'Çimento Esaslı Sensör Üretimi' projesi kapsamında verdiği desteğe teşekkür ederim.

Özgün İlkim KOÇYİĞİT

YAPI SAĞLIĞININ İZLENMESİ İÇİN ÇİMENTO ESASLI BİRİM ŞEKİL DEĞİŞTİRME ÖLÇERİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZ

Depremler, malzeme bozulmaları, çevresel etkiler ve kullanım hataları yapıların güvenliğini olumsuz yönde etkiler. Yapı sağlığının izlenmesi insan hayatı için çok önemlidir. Bu amaçla kullanılan tipik metal birim şekil değiştirme ölçerler (gerinim pulu) yapı elemanlarının yüzeyinden ölçüm almaktadır. Gerinim pulları ile yapı elemanının içinden ölçüm yapmak çok zor ve yüksek hata olasılığı içermektedir. Narin yapıları gereği gerinim pullarının kullanım ömürleri kısadır. Bu yüzden fazla miktarda kullanılmaları gerekir bu da yapı güvenliğinin gözlenmesi için ciddi maliyetler oluşturur.

Bu çalışmada 1 lifsiz, 10 çelik lifli ve 20 karbon lifli olmak üzere toplamda 31 farklı karışım tasarlanmıştır. Her karışım farklı lif boyları ve hacimsel içerik oranlarına sahiptir. Çalışmada her karışıma basınç ve yarmada çekme testleri uygulanmıştır. Her karışımdan iki deney için de 3'er adet 5 cm ebatlarında küp numuneler hazırlanmıştır. Toplamda 186 adet numune dökülüp mekanik test yapılmıştır.

Yapılan testler ile elektriksel direncin birim şekil değiştirme etkisiyle oluşan değişimi incelenmiştir. Birim şekil değiştirmeye en duyarlı karışım çimento esaslı sensör (ÇES) olarak önerilmiştir. ÇES'in duyarlılık, doğrusallık, limit birim şekil değiştirme gibi sensör özellikleri belirlenmiştir. Basınç ve yarmada çekme testlerinde numune içinde oluşan mekanizmalar aydınlatılmıştır.

ÇES metal gerinim pullarına göre birim şekil değiştirmeye 22 kat daha duyarlıdır. ÇES beton içine kolayca yerleştirilebilme özelliği ve kendisinin de çimento esaslı oluşu sayesinde yapı elemanının içinden de anlık ya da sürekli olarak yüksek hassasiyet ve düşük hata ile ölçüm alabilmektedir. Betonun içinde oluşu sebebiyle çevresel olumsuz etkilerden metal gerinim pullarına göre daha az etkilenmektedir.

Bu da uzun süre kullanım ömrü ve maliyet avantajları oluşturmaktadır. Uzun kullanım ömrü ve düşük maliyeti sayesinde ÇES yapı sağlığının izlenmesini yaygınlaştıracak ve depremlerde can ve mal kayıpları azalacaktır.

Anahtar kelimeler : Sensör, çelik lif, karbon lif, çimento, elektriksel direnç, birim şekil değiştirme, mekanik testler

DEVELOPMENT OF CEMENT BASED STRAIN SENSOR FOR STRUCTURAL HEALTH MONITORING

ABSTRACT

Earthquaqes, material degradations, environmental effects and user blames affect structural safety negatively. Health monitoring is crucial for human life safety. Typical metal strain gages used for this purpose, measure from the surface of structure. Measurement inside of the structural member with metal straingages is challenging and might contains error probability. Standart strain gages have short life time because of delicacy. Therefore big amounts are needed to monitor the structure which brings high costs.

In this study 31 different mixes designed, 10 contain steel fibers, 20 contain carbon fibers and 1 mix contains no fiber. Every mixture has different fiber lenght and volumetric ingredient ratios. All mixes were tested with compression and split tensile tests. Tree 5 cm cubic samples were molded from every mix design for both mechanical tests. In totaly 186 samples were molded and tested.

Through mechanical tests, change in electrical resistivity of cement based strain sensor (CBS) due to strain was investigated. Mixture that the most sensitive to strain is offered as CBS. Sensor properties of CBS which sensitivity, linearity, limit strain as characteristic values were determined. Mechanisms inside the sample matrix were enlightened under compression and split tensile test.

CBS is 22 times more sensitive to strain than typical metal strain gages. As a cement based material CBS can be position easly in concrete structural member. By means of this advantage CBS can measure from inside of structural member by high precision and low error. Due to being in conrete CBS is less affected than metal strain gages from environmental negative influences. This property makes CBS advantageous about life time and cost issues. With long life time and low costs CBS will generalize structural health monitoring and decrease loss of life and property.

Keywords : Sensor, steel fiber, carbon fiber, cement, electrical resistivity, strain, mechanical tests.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZ iv
ABSTRACT vi
ŞEKİLLER LİSTESİ x
TABLOLAR LİSTESİ xiv

BÖLÜM BİR – GİRİŞ 1

BÖLÜM İKİ – KULLANILAN MALZEMELER VE DENEYLER 4

2.1 Kullanılan Malzemeler 4
2.1.1 Çimento 4
2.1.2 Kum 5
2.1.3 Su 6
2.1.4 Çelik Lifler 6
2.1.5 Karbon Lifler 7
2.1.6 Silis Dumanı 8
2.1.7 Süper Akışkanlaştırıcı 9
2.1.8 Bakır Elektrot 9
2.1.9 Kalıp 11
2.1.10 Karışım Tasarımları 12
2.2 Deneyler 13
2.2.1 Basınç Testi 13
2.2.2 Yarmada Çekme Testi 15
2.3 ÇES Performans Parametreleri ve ÇES'in Belirlenmesi 17
2.3.1 Duyarlılık 17
2.3.2 Doğrusallık 17
2.3.3 Korelasyon Katsayısı 18

2.4 ÇES Sensor Özelliklerinin Belirlenmesi 18
2.5 ÇES'in Model Kolon İçinde Testi 18

BÖLÜM ÜÇ – BULGULAR VE TARTIŞMA 22

3.1 Karbon Lif Basınç Testi Sonuçları 22
3.2 Karbon Lif Yarmada Çekme Testi Sonuçları 26
3.3 Çelik Lif Basınç Testi Sonuçları 31
3.4 Çelik Lif Yarmada Çekme Testi Sonuçları 36
3.5 En İyi Karışımın ÇES Olarak Belirlenmesi 40
3.6 ÇES'in Sensor Özellikleri 44
3.7 Basınç Testlerinde Mekanizmalar 44
3.8 Yarmada Çekme Testlerinde Mekanizmalar 46
3.9 ÇES'in Model Kolon İçinde Test Edilmesi 50

BÖLÜM DÖRT – SONUÇLAR VE YORUMLAR 53

KAYNAKLAR 55

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Çimento X ışını kırınımı testi sonucu 4
Şekil 2.2 Kum içindeki ince malzeme miktarının belirlenmesi 5
Şekil 2.3 Elek analizi sonucu 6
Şekil 2.4 Kuma ait X ışını difraksiyon sonucu 6
Şekil 2.5 Çelik lifin kesitine ait taramalı elektron mikroskopu görüntüsü 7
Şekil 2.6 Karbon life ait taramalı elektron mikroskopu görüntüsü 8
Şekil 2.7 Silis dumanı SEM görüntüsü 9
Şekil.2.8 Bakır tel kesiti taramalı elektron mikroskopu görüntüsü 10
Şekil 2.9 Bakır tel enerji dağılımlı spektrometre analizi 10
Şekil 2.10 Özel kalıplar ve bakır ağ elektrot yerleşimi 11
Şekil 2.11 Karışımın kalıba yerleştirilmesi 11
Şekil 2.12 Basınç testine hazırlanmış numune 13
Şekil 2.13 Deney elektrik devresi ve numune şematik gösterimi 14
Şekil 2.14 Deney sırasında ölçüm alınması 14
Şekil 2.15 Deney elektrik devresi ve numune şematik gösterimi 16
Şekil 2.16 Deney esnasında ölçüm alınması ve numune 16
Şekil 2.17 Numune çatlamış hali 17
Şekil 2.18 Model kolon içine yerleştirilen ÇES 19
Şekil 2.19 ÇES'in kolon içine yerleşimi 19
Şekil 2.20 Model kolon beton dökülmesi 20
Şekil 2.21 Model kolon kalıptan aldıktan sonra 20
Şekil 3.1 M1 Basınç testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 22
Şekil 3.2 C1 Basınç testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 23
Şekil 3.3 C4 Basınç testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı 23
Şekil 3.4 C7 Basınç testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 24

Şekil 3.5 C10 Basınç testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 24
Şekil 3.6 C13 Basınç testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 25
Şekil 3.7 C19 Basınç testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 25
Şekil 3.8 C20 Basınç testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 26
Şekil 3.9 MY1 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 27
Şekil 3.10 CY1 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 27
Şekil 3.11 CY5 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 28
Şekil 3.12 CY7 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 28
Şekil 3.13 CY9 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 29
Şekil 3.14 CY11 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 29
Şekil 3.15 CY14 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 30
Şekil 3.16 CY17 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 30
Şekil 3.17 CY20 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 31
Şekil 3.18 S1 Basınç testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 32
Şekil 3.19 S2 Basınç testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 33
Şekil 3.20 S3 Basınç testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 33

Şekil 3.21 S4 Basınç testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 34
Şekil 3.22 S5 Basınç testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 34
Şekil 3.23 S6 Basınç testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 35
Şekil 3.24 S7 Basınç testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 35
Şekil 3.25 S8 Basınç testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 36
Şekil 3.26 S9 Basınç testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 36
Şekil 3.27 SY1 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 37
Şekil 3.28 SY2 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 38
Şekil 3.29 SY3 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 38
Şekil 3.30 SY4 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 39
Şekil 3.31 SY5 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 39
Şekil 3.32 SY6 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 40
Şekil 3.33 SY7 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 40
Şekil 3.34 S4 Basınç testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 44
Şekil 3.35 SY4 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme - %R grafiği ve korelasyon katsayısı 44
Şekil 3.36 C14 Basınç testi (a) %R-zaman grafiği (b) kuvvet-zaman grafiği(c) %R-birim şekil değiştirme grafiği 46

Şekil 3.37 Basınç testleri duyarlılık-karbon lif hacimsel oranları grafiği 47
Şekil 3.38 MY1 Yarmada çekme testi (a) kuvvet-zaman grafiği (b) birim şekil değiştirme-zaman grafiği (c) %R-zaman grafiği (d) %R-birim şekil değiştirme grafiği 48
Şekil 3.39 SY1 Yarmada çekme testi (a) kuvvet-zaman grafiği (b) Birim şekil değiştirme-zaman grafiği (c) %R-zaman grafiği (d) %R-birim şekil değiştirme grafiği 49
Şekil 3.40 Duyarlılık - Lif yüzdece hacim oranı grafiği 50
Şekil 3.41 (a) Doğrusallık %-Lif yüzdece hacim oranı (b) R^2 - Lif yüzdece hacim oranı 51
Şekil 3.42 Gerinim pulu ve ÇES ölçümleri basınç birim şekil değiştirme grafiği.... 52

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Karbon life ait fiziki ve mekanik özellikler (Üretici Bilgileri 8
Tablo 3.1 Lifsiz ve çelik lifli karışım gruplarının puan ve standart sapmaları 42
Tablo 3.2 Karbon lifli karışım gruplarının puan ve standart sapmaları 43
Tablo 3.3 Lifsiz referans karışımı ve S4 karışımı malzeme oranları 44

BÖLÜM BİR
GİRİŞ

Amerika Birleşik Devletlerinde köprülerin %30'u yapısal olarak güvenli değildir ve betondan yapılmış alt yapı tesisleri, tasarım ömürleri dolmadan malzeme bozulmalarına uğramıştır (Reza, Batson, Yamamuro ve Lee, 2003). Depremler, malzeme bozulmaları ve diğer çevresel etkiler, yapıların performansını düşürmektedir. Bu yüzden, yapı sağlığının izlenmesi, insanların hayatı için önemlidir. Yapısal izlemede kullanılan tipik metal birim şekil değiştirme ölçerler düşük dayanıklılığa, düşük duyarlılığa ve yüksek maliyete sahiptir.

Klasik sensörlerin düşük dayanıklılığı uzun dönem kullanılmalarına engel olurken, maliyetlerinin yüksek olması, kısıtlı sayıda kullanılmalarına neden olur (Chung, 2001). Çimentolu malzemelere karbon lif eklenmesi, elektriksel direnci düşürür. Yük altında, malzemenin elektriksel direnci değişir (Chung, 1998; Fu, Ma, Chung ve Anderson, 1997; Fu ve Chung, 1997).

Malzemenin yük uygulanırken elektriksel direncini ölçmek için iki ve dört elektrotlu konfigürasyonlar geliştirilmiştir (Chiarello ve Zinno, 2005; Han, Guan ve Ou, 2007). İki ve dört elektrotlu konfigürasyonlar iki şekilde uygulanabilmektedir; çevresel elektrot ve batırılmış elektrot konfigürasyonları. Çevresel elektrot konfigürasyonunda, iletken bantlar, birbirine değmeyecek şekilde malzemeye sarılır. Batırılmış elektrot konfigürasyonunda iletken ağ veya plaka, malzemeye batırılır (Li, Xiao ve Ou, 2006, 2008).

Elektrot tasarımı, ölçüm yöntemi ve veri toplama sistemlerinin çeşitliliği üzerine çalışmalar yapılmıştır. Çevresel elektrot yöntemi yerine batırılmış elektrot yöntemi, elektrot olarak bakır plaka yerine bakır ağ, 2 elektrot yerine 4 elektrot konfigürasyonu, alternatif akım yerine doğru akım ve voltaj tabanlı bir ölçüm sistemi kullanılması karbon lif içerikli çimento esaslı sensorlerin daha verimli olmasını sağlamaktadır (Han ve diğer., 2007).

İletken lif katkılı çimento esaslı malzemelerin piezorezistif davranışları üzerine lif tipi, lif çap ve uzunluğu, kür süresi, alternatif yada doğrum akım beslemesi gibi parametrelerin etkisi çalışılmıştır (Chung, 2002).

Karbon lifli çimento esaslı birim şekil değiştirme ölçerlerin piezorezistif davranışları teorik olarak modellenmiş ve teorik (analitik) sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Hem çekme hem de basınç birim şekil değiştirmesi altında teorik ve deneysel sonuçlar kıyaslanırsa çekme birim şekil değiştirmesinde basınca göre birbirine daha yakın sonuçların alındığı görülmüştür (Zhu ve Chung, 2007).

Sıcaklık değişiminin çimento esaslı kompozitlerin elektriksel özellikleri üzerine etkisi hakkında araştırmalar yapılmıştır (Li, Xiao ve Ou, 2007; Xiao, Li ve Ou, 2010).

Çimentolu malzemeye karbon lif eklenmesi, çekme dayanımını, sünekliğini, eğilme kapasitesini arttırırken, rötre çatlağını azaltır. Karbon lifin karışım oranının artması, elektriksel direnci azaltır. Lifin karışım oranı, perkolasyon değerine ulaşırsa, lifler birbirine değerek iletken bir ağ oluşturur ve elektriksel iletkenlik, perkolasyon karışım oranının üstünde artış göstermez (Teomete ve Kocyigit, 2013).

Basınç yükü alında elektriksel direnç azalır. Yükün boşalmasıyla, lifler ilk boylarına dönerler ve elektriksel direnç artar (Teomete ve Kocyigit, 2015).

Malzemede oluşan hasar da elektriksel direnci değiştirir (Chung, 2000a, 2001; Teomete ve Erdem, 2011a).

(Teomete ve Erdem, 2011b; Teomete, 2011), çimento esaslı sensörlerin basınç birim şekil değiştirmesi altında elektriksel direnç değişimini incelemişlerdir.

Araştırmacılar elektriksel direncin malzemedeki hasardan kaynaklanan değişimini belirlemek için üç noktalı çentikli eğilme testleri yapmışlardır. Çimento esaslı

sensörlerin (ÇES) akıllı malzeme olabilme potansiyeli sayesinde yapı elemanı içinde kullanımı ile yapıların kendi hasarlarını ölçme imkanı doğacaktır (Teomete, 2013a).

Çimento esaslı kompozitlerin geliştirilmesi halinde birim şekil değiştirme ölçümü, hasar ölçümü, sıcaklık ölçümü, yangın takibi, ısı yönetimi, elektro manyetik dalga yalıtımı ve yansıtımı gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaları mümkün olabilecektir (Chung, 2000b)

Kendi hasarını ölçen çimentolu kompozitlerin geliştirilmesi, yapı sağlığının ucuz, kolay ve güvenli bir şekilde gözlenmesi için önemlidir (Teomete, 2013b).

Çimento esaslı sensörlerin çatlağa duyarlılığı ve doğrusallığı ilk kez bu çalışmada tanımlanmıştır (Teomete ve Erdem, 2013).

Teomete (2015a, 2015b), çatlak boyunun artmasıyla oluşan elektriksel dirençteki artışın sebebini elektron akışı için azalan geçiş alanı olarak açıklıyor.

Yapı elemanı içinde çimento esaslı sensörlerin göstereceği performansı incelemek amacıyla Teomete, Kahraman ve Çelik (2014, 2015), model bir kolon içine ÇES'i gömerek çalışmışlardır.

ÇES'e uygulanan yükün ÇES içindeki elektron akışının yönüne paralel ya da dik doğrultuda olması ÇES'in performansını etkiler (Teomete, 2014).

Çimento esaslı kompozitler çok farklı kullanım alanlarına sahip olabilirler. Nikel parçacıkları katılmış çimento esaslı kompozitler araç yoğunluğunun tespiti için araç dedektörü olarak kullanılmıştır (Han, Zhang, Yu, Kwon ve Ou, 2011).

Bu çalışmada çelik ve karbon lifli kompozitler için elektriksel direnç değişimi ve birim şekil değiştirme arasındaki korelasyonlar belirlendi. Birim şekil değiştirmeye duyarlılık, doğrusallık ve birim şekil değiştirme limitleri kullanılarak çimento esaslı sensör (ÇES) belirlendi.

BÖLÜM İKİ
KULLANILAN MALZEMELER VE DENEYLER

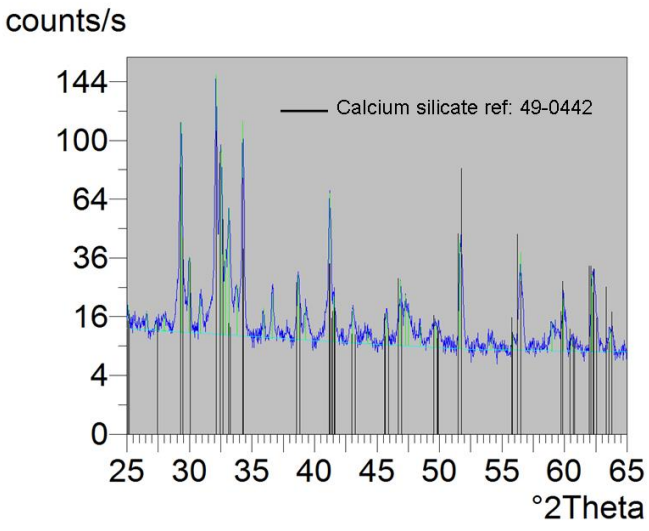
Numune karışımlarında kullanılan malzemelerin detaylı özellikleri, deneylerde takip edilen yöntemler ve deney cihazları hakkında bilgiler bu bölümde verilmiştir.

2.1 Kullanılan Malzemeler

Test numunelerinin oluşturulmasında kullanılan malzemeler ve özellikleri bu bölümde anlatılmıştır.

2.1.1 Çimento

Tüm karışımlarda kullanılan çimento aynı olup BATIÇİM marka CEM I 42,5 R tipi çimentodur. Nem nedeniyle priz almasını önlemek için ağzı kapaklı büyük plastik bidonlarda saklanmıştır. Kullanılan çimentonun X ışını kırınımı testine ait sonuç Şekil 2.1'de verilmiştir (Teomete ve Erdem, 2013).



Şekil 2.1 Çimento X ışını kırınımı testi sonucu

2.1.2 Kum

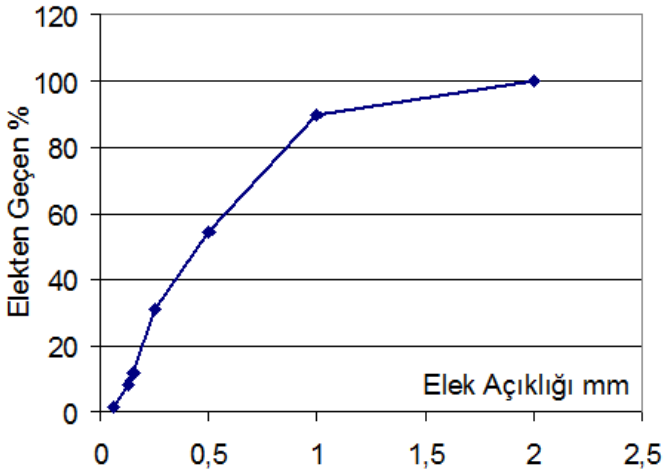
Numune karışımlarında kullanılan kumun (agrega) içindeki ince malzeme miktarı, elek analizi sonucu ve X ışını kırınımı analizi sonucu ile içinde bulunan maddeler aşağıda sunulmuştur.



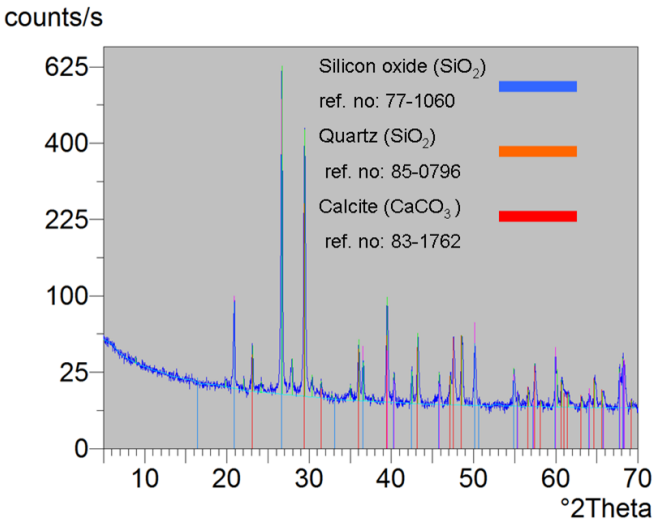
Şekil 2.2 Kum içindeki ince malzeme miktarının belirlenmesi

Kumdaki ince malzemenin miktarını belirlemek için ölçülü kaba su ile birlikte koyulan kum sallanıp 24 saat bekletilmiştir. Sonuç olarak 45 ml kumun %4,4'ü (2ml) ince kum olarak belirlenmiştir (Teomete ve Erdem, 2013).

Kumun elek analizi sonucu ve X ışını kırınımı analiz sonucu sırasıyla Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.3 Elek analizi sonucu



Şekil 2.4 Kuma ait X ışını difraksiyon sonucu

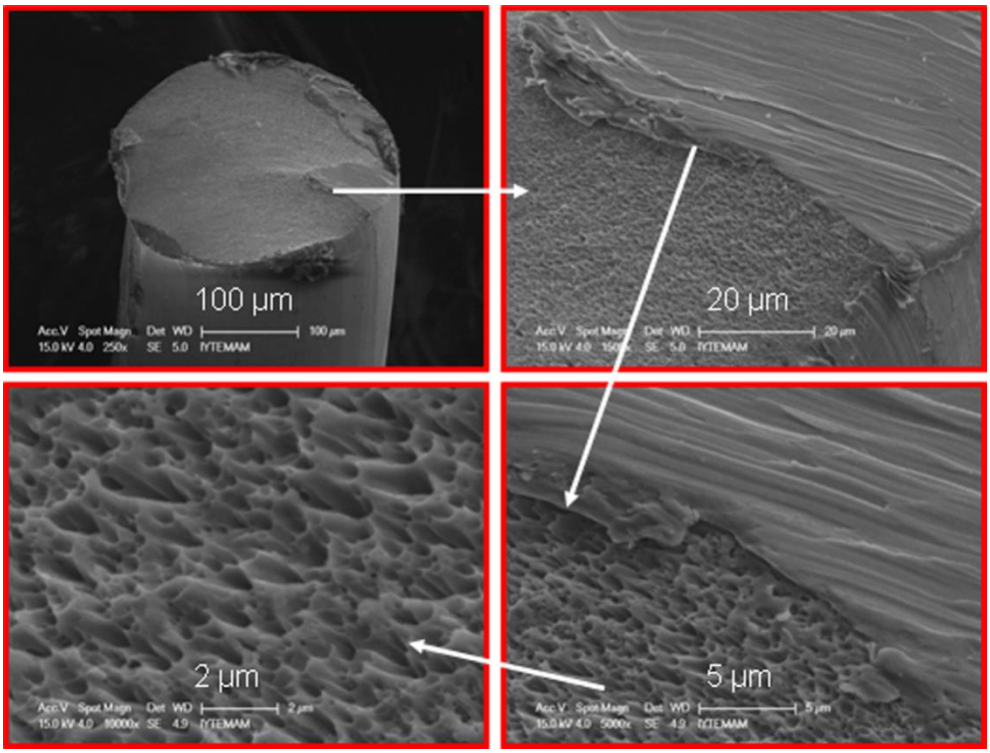
2.1.3 Su

Şebeke suyundaki klor elektrotları paslandırdığı için karışım ve kür işlemlerinde hazır paketlenmiş su kullanılmıştır.

2.1.4 Çelik Lifler

Çelik lif içeren karışımlarda 2 farklı boy çelik lif kullanılmıştır. Bunlar 6 mm ve 13 mm boylarında çelik liflerdir. Çaplar ise iki grupta da aynı ve 290 µm'dir. Şekil

2.5’te çelik lifin kesitine ait taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüleri vardır (Teomete ve Erdem, 2013).

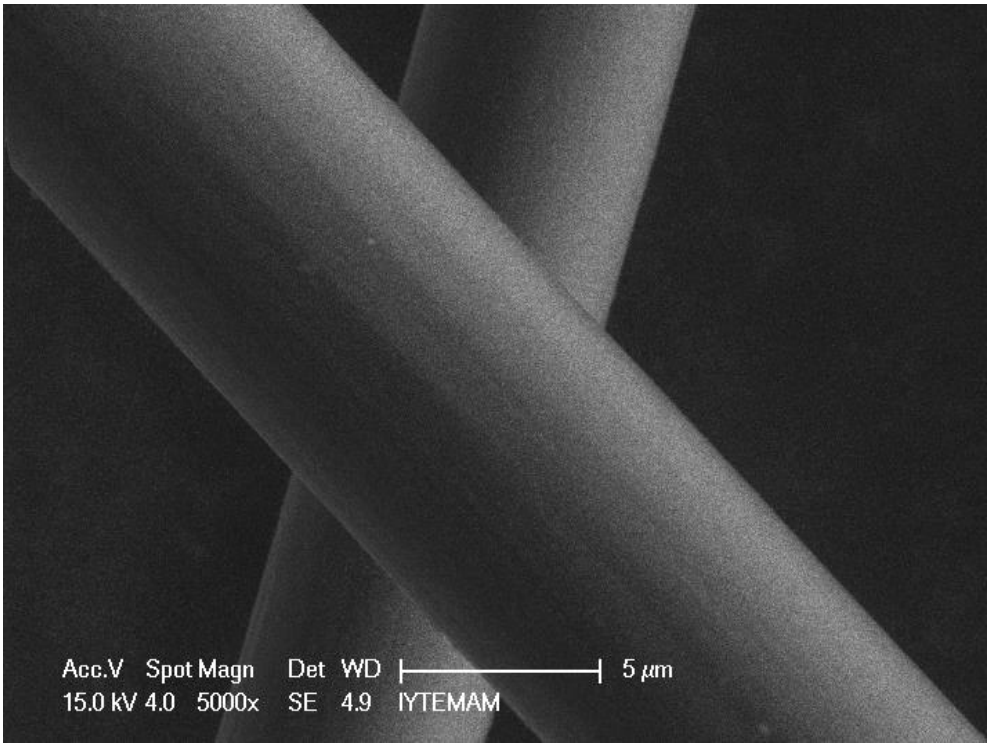


Şekil 2.5 Çelik lifin kesitine ait taramalı elektron mikroskopu görüntüsü

Çelik liflerin çekirdek yüzeyi daha sünek olan pirinç ile kaplıdır. Şekilden anlaşılacağı üzere yüzey ile çekirdeğin kopma şekilleri farklıdır. Çekirdek yüzey kaplamasına nazaran daha gevrek davranış göstermiştir.

2.1.5 Karbon Lifler

Kullanılan karbon lifler 4 farklı boyda ve çapları 7 µm olup polyacrylonitrile (PAN) bazlıdır. Liflerin uzunlukları 3, 6, 13 ve 16 mm’dir. Karbon life ait taramalı elektron mikroskopu görüntüsü Şekil 2.6’daki gibidir (Teomete ve Erdem, 2013). Karbon liflerin mukavemet değerlerini ve fiziki özelliklerini içeren bilgiler Tablo 2.1’de sunulmuştur.



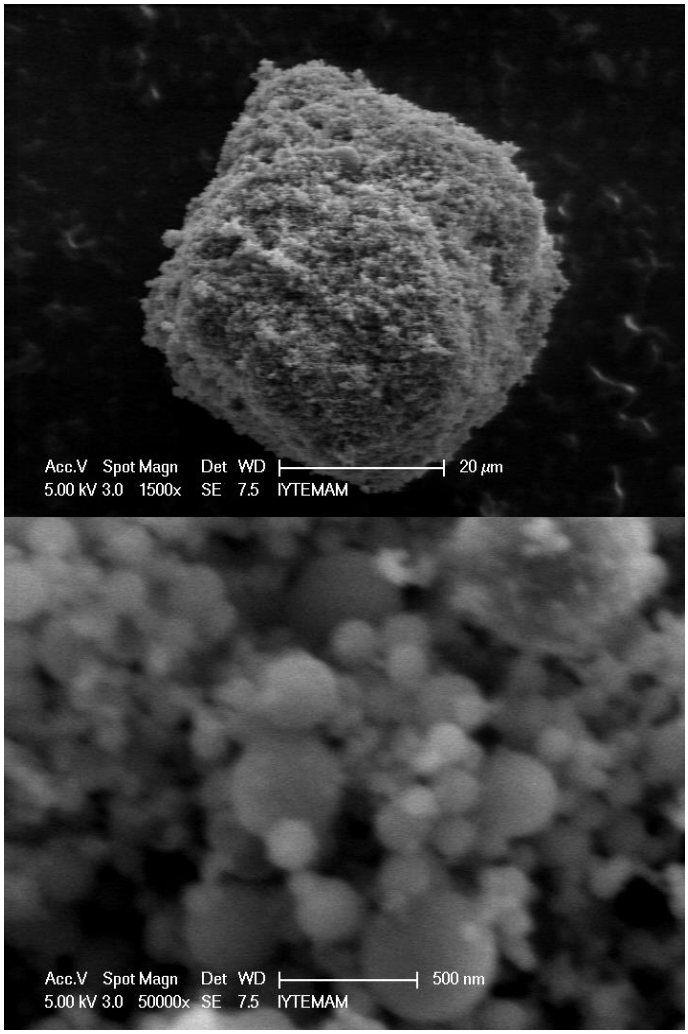
Şekil 2.6 Karbon life ait taramalı elektron mikroskopu görüntüsü

Tablo 2.1 Karbon life ait fiziki ve mekanik özellikler (Üretici Bilgileri)

Çap (μm)	Yoğunluk (g/cm^3)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Kopma Birim Şekil Değiştirmesi (%)
7	1,75	3500	235	1,5

2.1.6 Silis Dumanı

Sika Yapı Kimyasalları firmasından temin edilen silis dumanının tane boyutu 100 nm'dir. Daha büyük boyutlu tanelerin oluşumu bu nanometrik tanelerin topaklaşarak öbeklenmesi ile meydana gelir. Şekil 2.7'de silis dumanına ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.7 Silis dumanı SEM görüntüsü

2.1.7 Süper Akışkanlaştırıcı

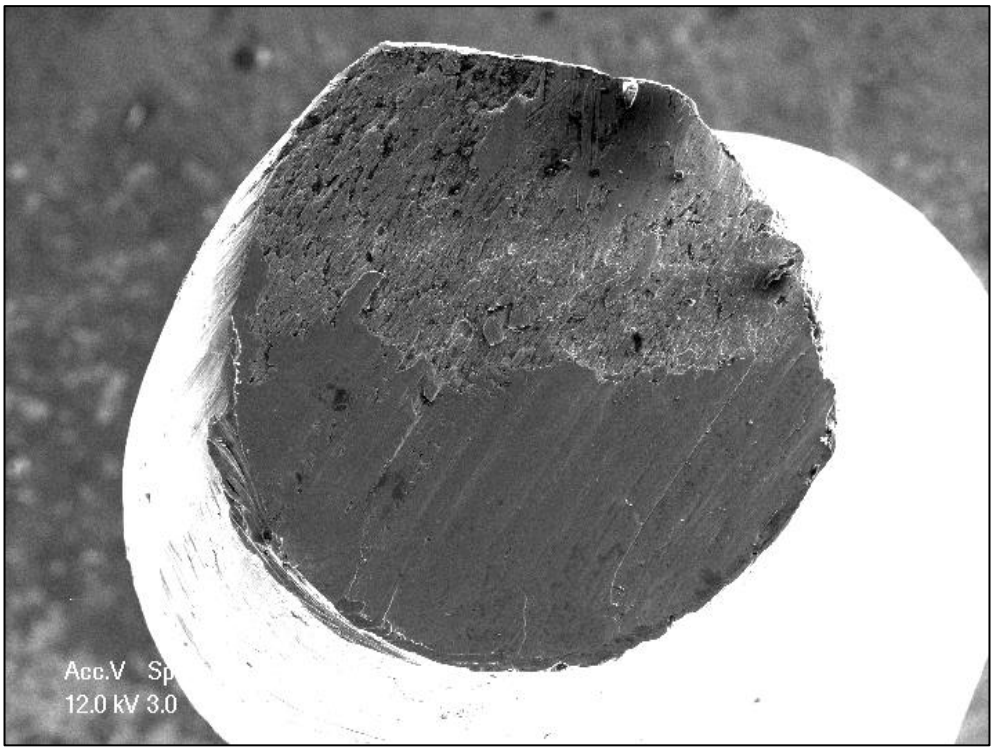
Numune karışımlarını hazırlarken kullanılan kıvam artırıcı madde Sika Viscocrete Hi-Tech30 süper akışkanlaştırıcıdır. Üreticiden temin edilen bilgilere göre yoğunluğu 1,07-1,11 kg/lt'dir ve klor iyonu içermez.

Tasarlanan karışımlardan çelik lif içerenlerde hacimce %1, karbon lif içerenlerde ise hacimce %2 oranında süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

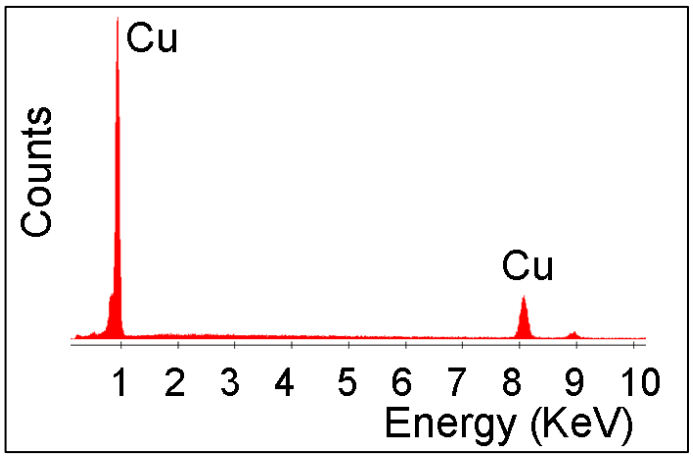
2.1.8 Bakır Elektrot

Numunelerin içinden geçecek elektrik akımını daha iyi iletmesi bakımından elektrot amacıyla saf bakır malzemeden üretilen kare göz örgülü ağlar kullanılmıştır. Bu bakır ağın göz açıklığı 5 mm'dir ve ağdaki bakır tellerin çapları 0,6 mm'dir.

Bakır telin kesitine ait SEM görüntüsü ve malzemenin saflığının analizi için enerji dağılımlı spektrometre analizi (EDS) sırasıyla Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da verilmiştir. Şekil 2.9'dan da anlaşılacağı üzere teller saf bakırdan mamuldür.



Şekil 2.8 Bakır tel kesiti taramalı elektron mikroskopu görüntüsü

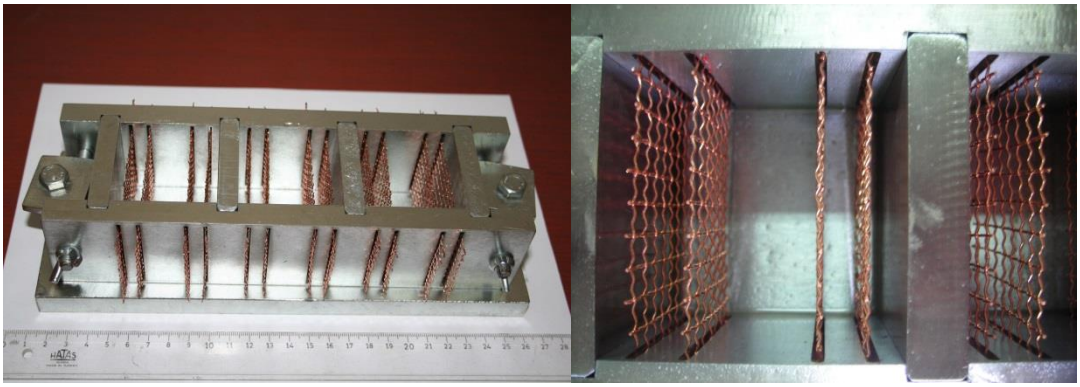


Şekil 2.9 Bakır tel enerji dağılımlı spektrometre analizi

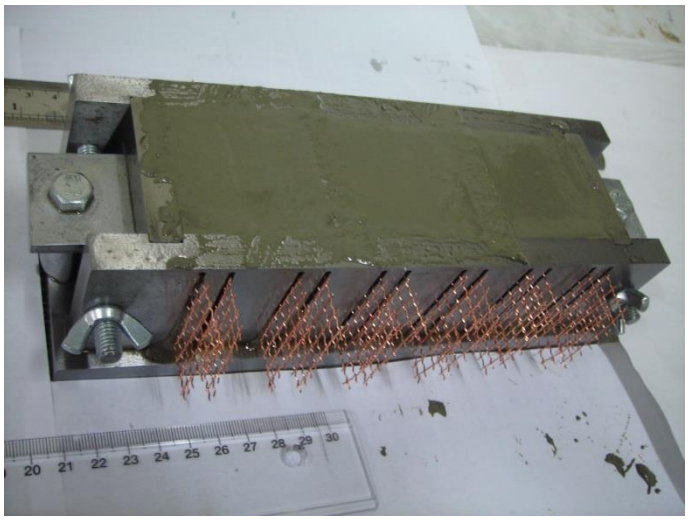
2.1.9 Kalıp

Karışım harcını kalıplara yerleştirdikten sonra bağır ağ elektrotları numunelerin içine dikine yerleştirmek harçta segregasyona yol açacağı için bakır ağları yatayda kalıba yerleştirme ihtiyacı doğmuştur. Ayrıca hazırlanan harcı kalıba dökmeden önce ağ telleri kalıba yerleştirmek yine harçtaki malzemelerin ayrışmasını azaltıcı yönde bir fayda sağlamaktadır. Bu yüzden de özel olarak tasarlanıp imal ettirilen 5 cm ebatlarında küp numune kalıpları kullanılmıştır.

Karışımlar kalıplara yerleştirildikten 24 saat sonra kalıptan alınıp 28 gün boyunca 20°C su da kür işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 2.10 ve Şekil 2.11'de kalıp ve numune dökülmüş örnekler sunulmuştur.



Şekil 2.10 Özel kalıplar ve bakır ağ elektrot yerleşimi



Şekil 2.11 Karışımın kalıba yerleştirilmesi

2.1.10 Karışım Tasarımları

Basınç ve yarmada çekme testi uygulayıp en iyi karışımı çimento esaslı sensor (ÇES) olarak tayin edebilmek için çelik ve karbon lif içerikli iki grup oluşturulmuştur. Bu gruplarda farklı lif boyları ve hacim oranlarına sahip karışım tasarımları bulunur.

Çelik lifli 10 adet karışım bulunmaktadır. Karışım adları S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9 ve S10'dur. İlk 5 karışımda 6 mm uzunluğunda çelik lifler sırasıyla hacimce %0,2, %0,5, %0,8, %1, %1,5 oranlarında kullanılmıştır. S6, S7, S8, S9 ve S10 karışımlarında 13 mm uzunluğunda çelik lifler sırasıyla hacimce %0,2, %0,35, %0,5, %0,8, %1 oranlarında kullanılmıştır. Çelik lifli tüm (S1-S10) karışımlarda çimento ağırlığınca, %100 kum, %10 silis dumanı, %40 su ve %1 süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Karbon lifli 20 adet karışım bulunmaktadır. Karışım adları C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10, C11, C12, C13, C14, C15, C16, C17, C18, C19 ve C20'dir. C1, C2, C3, C4, C5 karışımlarında 6 mm uzunluğunda karbon lifler sırasıyla hacimce %0,2, %0,5, %0,8, %1, %1,5 oranlarında kullanılmıştır. C6, C7, C8, C9, C10 karışımlarında 3 mm uzunluğunda karbon lifler sırasıyla hacimce %0,2, %0,5, %0,8, %1, %1,5 oranlarında kullanılmıştır.C11, C12, C13, C14, C15 karışımlarında 13 mm uzunluğunda karbon lifler sırasıyla hacimce %0,2, %0,35, %0,5, %0,8, %1 oranlarında kullanılmıştır. C16, C17, C18, C19, C20 karışımlarında 16 mm uzunluğunda karbon lifler sırasıyla hacimce %0,2, %0,35, %0,5, %0,8, %1 oranlarında kullanılmıştır. Karbon lifli tüm (C1-C20) karışımlarda ağırlığınca, %100 kum, %10 silis dumanı, %40 su ve %2 süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

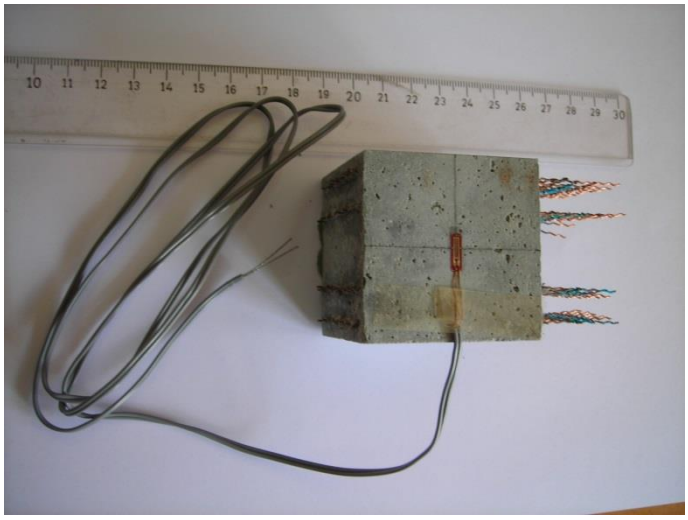
Tasarlanan karışımlar hem basınç hem de yarmada çekme testlerinde kullanılmıştır. Yukarıda isimlendirilen ve içeriği belirtilen karışımların ilk harflerinin yanına sadece 'Y' harfi konularak yarmada çekme testinde kullanılacak numune olduğu anlaşılmaktadır. Örneğin S6 isimli örnek basınç testi için dökülmüş iken aynı karışım tasarımının SY6 olarak adlandırılması bu örneğin yarmada çekme testine tabi tutulacağı anlamına gelir.

2.2 Deneyler

Yapılan deneylerde izlenilen adımlar, test yöntemleri, numune hazırlıkları ve deney cihazları hakkında bilgiler bu bölümde paylaşılmıştır.

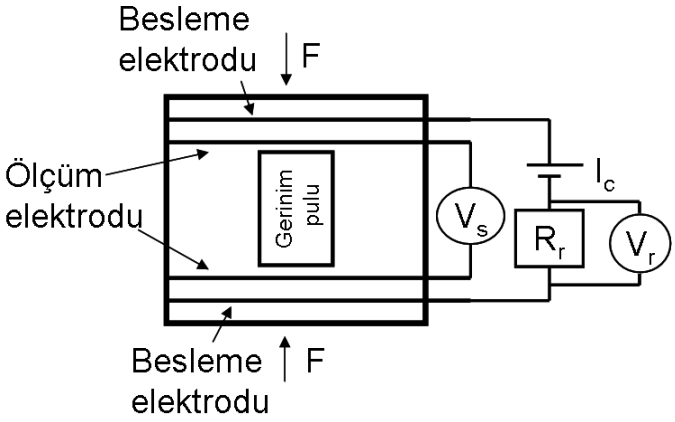
2.2.1 Basınç Testi

Numune basınç yükleri altındayken elektriksel direncindeki değişim ile basınç birim şekil değiştirmesi arasındaki birlikteliği incelemek amacıyla basınç testleri yapılmıştır. Bu deneylerde Shimadzu marka mekanik test cihazı kullanılmıştır. Test cihazının başlıkları ve numune yüzeyi arasında, basınç yükleri uygulanırken oluşacak sürtünme kaynaklı ekstra kayma gerilmelerini minimize etmek amacıyla cihaz başlıklarına test başlamadan hemen önce makine yağı sürülmüştür. Numunelere deneylerden önce yük doğrultusuna paralel ölçüm alacak şekilde birim şekil değiştirme ölçer pullar (gerinim pulu) Şekil 2.12'de görüldüğü gibi yapıştırılmıştır.



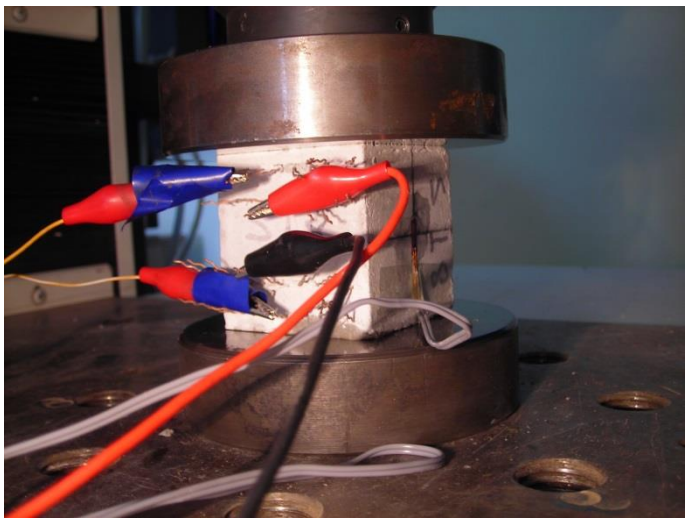
Şekil 2.12 Basınç testine hazırlanmış numune

Deney deplasman kontrollü, sabit, 0,5 mm/dak. test hızı ile yapılmıştır. Numunenin dış elektrotları besleme elektrotlarıdır ve sabit 15V doğru akım uygulanmıştır. İç elektrotlardan ise numune içinden doğru akım geçtikten sonra numune gerilimi (V_s) okunarak kaydedilmiştir. Örnek içinden geçen akım değerini belirleyebilmek için devreye bir adet 1000 ohm değerinde taş direnç (R_r) referans direnci olarak seri bağlanmıştır. Şekil 2.13'de şematik deney düzeneği sunulmuştur.



Şekil 2.13 Deney elektrik devresi ve numune şematik gösterimi

Numune gerilimi V_s, referans direnç gerilimi V_r, gerinim pulu birim şekil değiştirme değeri, uygulanan basınç yükü, yük cihazı başlığının yer değiştirmesi gibi değerler veri toplama cihazı (datalogger) ile dijital bir dosyaya saniyede 10 veri hızıyla (10Hz) kaydedilmiştir. Şekil 2.14'te örnek bir deneyden ölçüm alma anı sunulmuştur.



Şekil 2.14 Deney sırasında ölçüm alınması

Herhangi bir andaki devre içi akım (I_c) değerini bulabilmek için Ohm Kanunu kullanılarak Denklem 2.1'den faydalanılmıştır.

$$I_c = \frac{V_r}{R_r} \tag{2.1}$$

Anlık örnek direnci (R_s) Denklem 2.2 ile hesaplanmıştır.

$$R_s = \frac{V_s}{I_c} \tag{2.2}$$

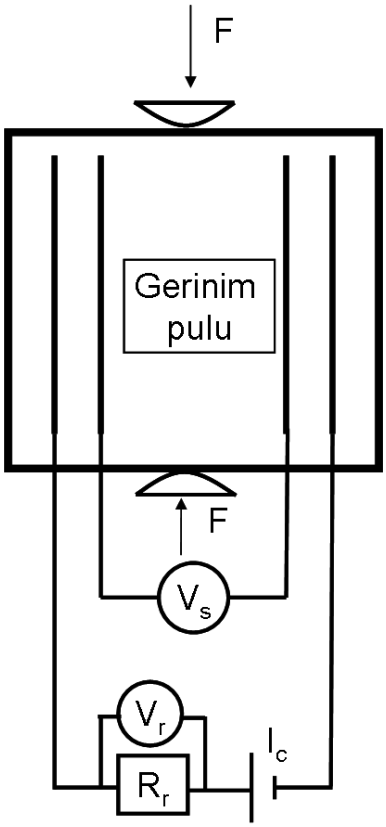
Test süresince numunenin direncindeki yüzdece değişim (%R) Denklem 2.3 ile hesaplanmıştır. R_{so} yük uygulanmadan önceki dirençtir.

$$\%R = \left(\frac{R_s}{R_{s0}} - 1 \right) \times 100 \tag{2.3}$$

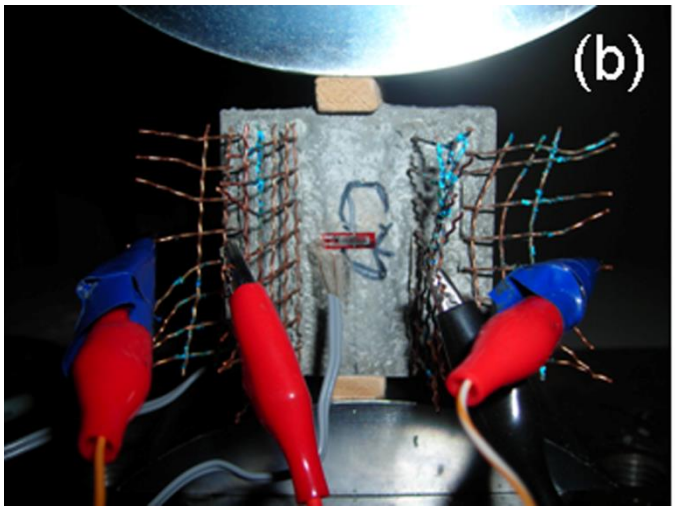
2.2.2 Yarmada Çekme Testi

Yarmada çekme deneyleri çekme birim şekil değiştirmesi ile elektriksel direnç değişimi arasındaki ilişkiyi araştırmak için yapılmıştır. Basınç testlerinden farklı olarak yarmada çekme testinde numune yükleme hızı 2,5 mm/dak. olarak uygulanmıştır. Gerinim pulları yarmada çekme testlerinde uygulanan yük doğrultusuna dik, çekme birim şekil değiştirmesi doğrultusuna paralel ölçüm alacak şekilde yapıştırılmıştır.

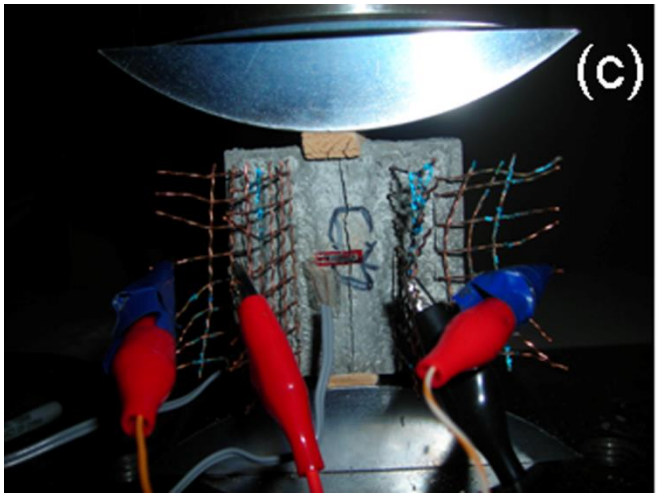
Yarmada çekme deneylerinde de basınç testlerinde kullanılan düzenekler, makine ve cihazlar kullanılmıştır, deney verilerini kaydetme ve formülasyon yöntemleri de aynıdır. Şekil 2.15, Şekil 2.16 ve Şekil 2.17'de yarmada çekme testine ait sırasıyla; elektrik devre ve deney düzeneği şematik gösterimi, deney sırasında numune ve numunenin çatlama paterni sunulmuştur.



Şekil 2.15 Deney elektrik devresi ve numune şematik gösterimi



Şekil 2.16 Deney esnasında ölçüm alınması ve numune



Şekil 2.17 Numune çatlamış hali

2.3 ÇES Performans Parametreleri ve ÇES'in Belirlenmesi

ÇES'in performans parametrelerinin neler olduğu bu bölümde anlatılmıştır. Birim şekil değiştirme ölçerlerin performansını etkileyen dört önemli parametre bulunmaktadır. Bunlar duyarlılık (K), doğrusallık (LE), limit değer (SL) ve korelasyon katsayısı (R^2)'dır.

2.3.1 Duyarlılık

Duyarlılık bir birim şekil değiştirmenin uygulanması ile elektriksel dirençteki değişim olarak tanımlanır, Denklem 3.1 ile hesaplanır. Birim şekil değiştirme ölçer ne kadar yüksek duyarlılığa sahip ise o kadar hassastır. Standart metal birim şekil değiştirme ölçerlerin (straingage) duyarlılığı genellikle 2'dir.

$$K = \frac{\left(R_s - R_{so}\right) / R_{so}}{\Delta\varepsilon} \tag{3.1}$$

Denklem 3.1'de ki R_s anlık örnek direnci, R_{so} yük uygulanmadan önceki örnek direnci, $\Delta\varepsilon$ ise birim şekil değiştirmedeki değişimdir.

2.3.2 Doğrusallık

Doğrusallık %R-birim şekil değiştirme grafiğinin ideal doğrudan sapmasını ifade eder. Birim şekil değiştirme ölçerin performansı açısından düşük olması istenir.

Doğrusallık elektriksel direncin yüzdece değişimi (%R)-birim şekil değiştirme grafiğine en küçük kareler yöntemi ile idealize edilmiş doğrunun bu grafiğin kendisiyle arasındaki en büyük sapmanın (Δ_{maks}) elektriksel direncin toplam yüzde değişimine ($\%R_t$) oranının yüzdesi olarak ifade edilebilir ve Denklem 3.2 ile hesaplanır.

$$\%LE = \left(\frac{\Delta_{mak}}{\%Rt} \right) \times 100 \tag{3.2}$$

Doğrusallığın azalması, sensor ile bulunan birim şekil değiştirme değerindeki hatanın azalması demektir. Kabul edilir hata toleransı içinde birim şekil değiştirme ölçerlerin ölçebileceği maksimum deformasyona o ölçerin limit değeri (SL) denir. Standart metal birim şekil değiştirme ölçerlerin (straingage) limit değerleri %0,5 ile %3 arasında değişmektedir.

2.3.3 Korelasyon Katsayısı

%R-birim şekil değiştirme grafiklerinden grafiğe en küçük kareler yöntemine göre uyan ideal doğrunun denklemi ve korelasyon katsayısı (R^2) elde edilmiştir. Korelasyon katsayısı gerçek grafiğin ideal doğruya ne kadar yaklaşık olduğunu temsil eden 0 ile 1 arasında mantıksal bir sayıdır. Korelasyon katsayısı 1'e ne kadar yakınsa deney verisi olan gerçek grafik, idealize doğruya o kadar yakınsak demektir.

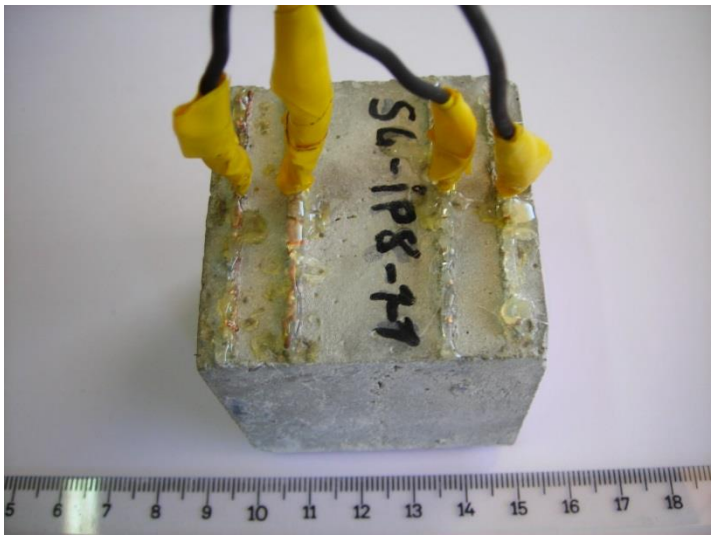
2.4 ÇES Sensor Özelliklerinin Belirlenmesi

Çimento esaslı sensorun (ÇES) sensor özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ÇES olarak seçilen en iyi karışımdan 6 adet 5 cm ebatlarında küp numuneler önceki bölümlerde belirtilen gereç ve yöntemlerle hazırlanıp test edilmiştir. Yapılan basınç ve yarmada çekme testleri ile performans parametre değerleri ölçülüp kaydedilmiştir.

2.5 ÇES'in Model Kolon İçinde Testi

Basınç ve yarmada çekme testleri sonucunda çimento esaslı sensor (ÇES) olarak seçilen karışım 15x15x30 cm ebatlarında model kolon içine yerleştirilerek basınç testine tabi tutulmuştur (Teomete, Kahraman ve Çelik, 2014). Şekil 2.18 ve Şekil

2.19’da sırasıyla model kolon içine yerleştirilen ÇES ve ÇES’in kolon kalıbı içine yerleşimi görülmektedir.



Şekil 2.18 Model kolon içine yerleştirilen ÇES

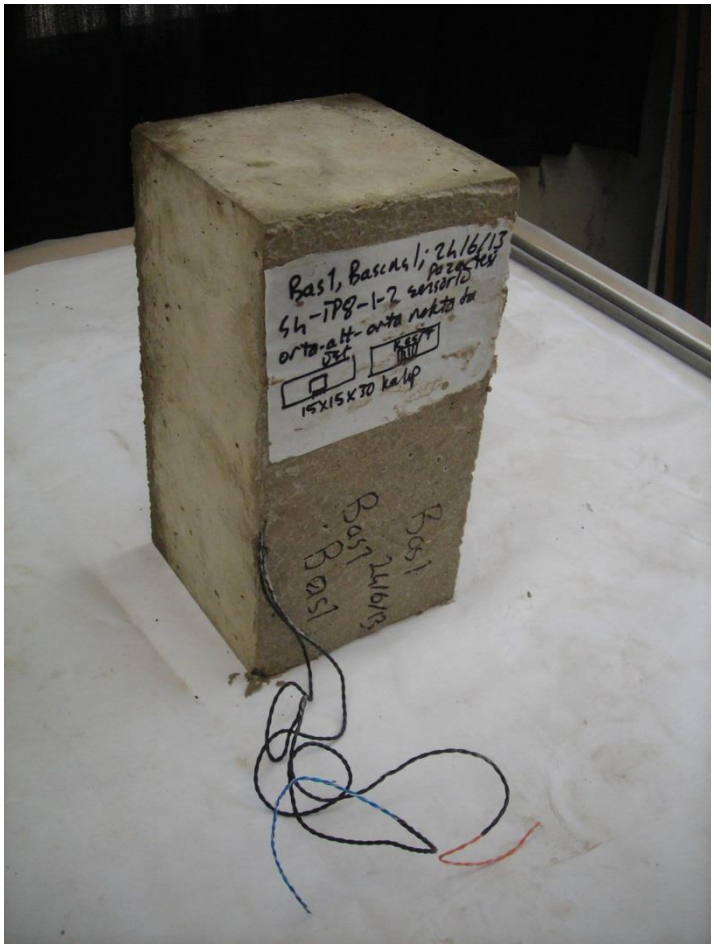


Şekil 2.19 ÇES’in kolon içine yerleşimi

Model kolon beton karışımı C30 sınıfı dayanıma sahip beton olacak şekilde tasarlanmıştır. Bunu denetleyebilmek amacıyla beton dökümü sırasında 3 adet 15 cm ebatlı küp numuneler beton dayanım testi için alınmıştır. Şekil 2.20 ve Şekil 2.21’de betonun model kolon kalıbına dökümü ve kalıptan aldıktan sonraki hali sunulmuştur.



Şekil 2.20 Model kolon beton dökülmesi



Şekil 2.21 Model kolon kalıptan aldıktan sonra

Model kolon testi 300 ton kapasiteli pres ile yük kontrollü 50 kg/sn. yükleme hızı ile yapılmıştır (Teomete ve diğer., 2014).

ÇES devresinde kullanılan bakır kablolar ısınınca büzülen izolasyon malzemesiyle kaplanıp ÇES elektrotlarına lehim ile sabitlenmiştir. ÇES elektrot uçları ise sıcak silikon ve elektrik bandıyla izole edilmiştir.

Test boyunca ÇES 15V doğru akım ile beslenmiş ve basınç testinde alınan tüm ölçümler alınmıştır. ÇES anlık devre akımı ve anlık direnci sırasıyla Denklem 2.1 ve Denklem 2.2'den elde edilmiştir. Deney sırasında herhangi bir andaki elektriksel direncin yüzdece değişimi Denklem 2.3 ile hesaplanmıştır.

ÇES model kolon kalıbına kolon basınç altındayken ÇES içinden geçen elektrik akımı basınç birim şekil değiştirmesine paralel olacak şekilde ve kolonun tam ortasına yerleştirilmiştir (Teomete ve Erdem, 2013). ÇES'i kolon yüzeyinden pas payı kadar uzaklaştırmak için 2 adet 5x10x60 mm ebatlarında ahşap çıta kullanılmıştır.

ÇES ölçümleriyle kıyaslamak için model kolonun yan yüzlerine 4 adet tipik metal birim şekil değiştirme ölçer (gerinim pulu) yapıştırılmıştır. ÇES verileri ve gerinim pulu sinyalleri eş zamanlı olarak ve deney boyunca saniyede 10 veri alacak şekilde ölçülüp dijital bir dosyaya kaydedilmiştir (Teomete ve diğer., 2014).

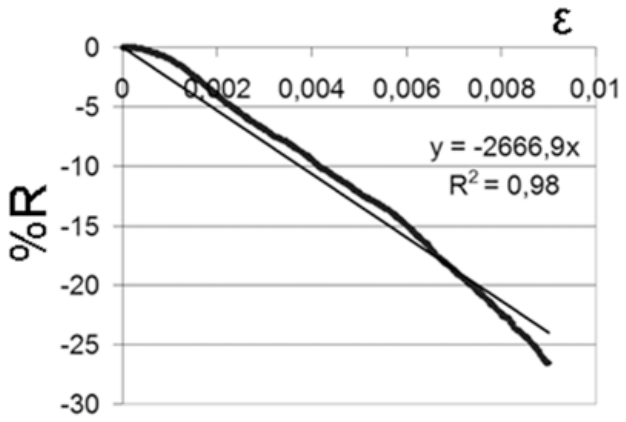
BÖLÜM ÜÇ
BULGULAR VE TARTIŞMA

Deney sonuçları, en iyi karışımın ÇES olarak seçilmesi ve sensör olarak ÇES'in özellikleri bu bölümde açıklanmıştır.

3.1 Karbon Lif Basınç Testi Sonuçları

Bir lifsiz, 20 karbon lifli olmak üzere toplamda 21 farklı içeriğe sahip karışımların her birinden 3'er adet numune olmak üzere toplamda 63 basınç testi yapılmıştır. Bu test sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

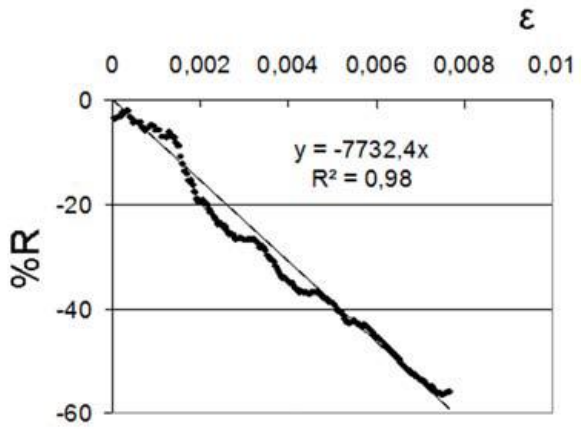
Lifsiz olarak dökülen referans karışım grubu M1'in duyarlılık değeri K=30 olarak ölçülmüştür. Tipik ticari metal birim şekil değiştirme ölçerlerden 15 kat fazla duyarlıdır. Doğrusallık değeri %10, limit birim şekil değiştirmesi (SL) %0,9 ve korelasyon katsayısı R^2=0,98 olarak bulunmuştur. Şekil 3.1'de M1 karışımına ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur.



Şekil 3.1 M1 Basınç testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

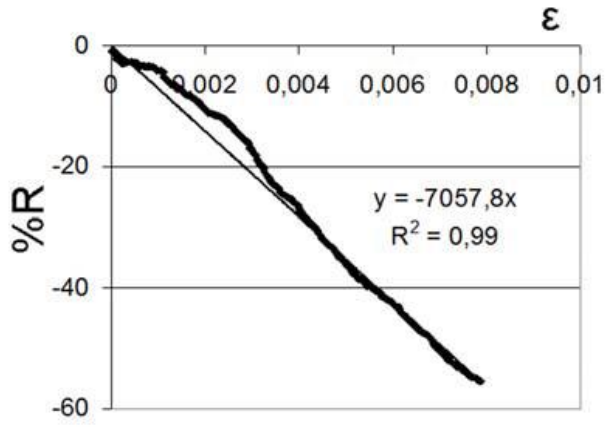
Hacimce %0,2 oranda ve 6 mm boyunda karbon lifler içeren C1'e ait duyarlılık değeri K=73 olarak ölçülmüştür. C1'in tipik metal birim şekil değiştirme ölçerlerden yaklaşık 35 kat daha fazla duyarlı olduğu anlaşılmaktadır. Doğrusallık değeri %10, limit birim şekil değiştirmesi (SL) %0,76 ve korelasyonkatsayısı R^2=0,98 olarak

bulunmuştur. Şekil 3.2'de C1'e ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı görülmektedir.



Şekil 3.2 C1 Basınç testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

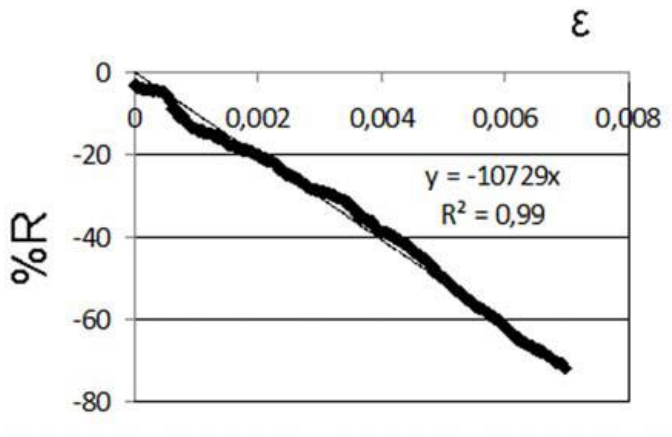
Hacimce %1 oranda ve 6 mm boyunda karbon lifler içeren C4'e ait duyarlılık değeri K=70 olarak ölçülmüştür. C4'ün doğrusallık değeri %9, limit birim şekil değiştirmesi (SL) %0,79 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R-birim şekil değiştirme grafiği ile bu grafik üzerinde en küçük kareler yöntemi ile idealize edilmiş doğrugüçlü bir doğrusal ilişki göstermiştir. Şekil 3.3'de C4'e ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı görülmektedir.



Şekil 3.3 C4 Basınç testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

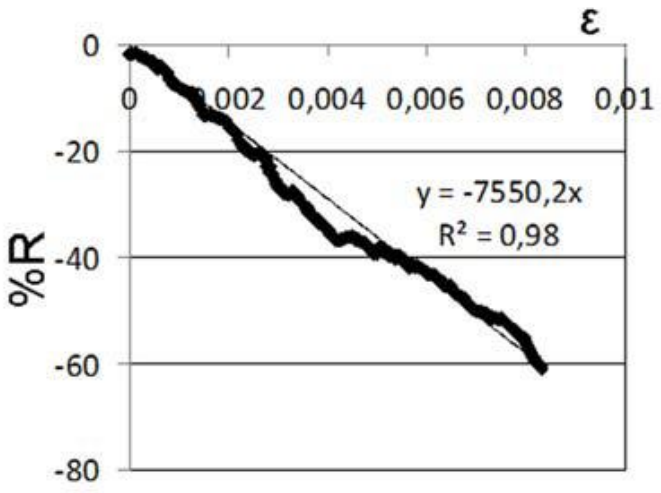
Hacimce %0,5 oranda ve 3 mm boyunda karbon lifler içeren C7'ye ait duyarlılık değeri K=102 olarak ölçülmüştür. C7 tipik metal birim şekil değiştirme ölçerlerden yaklaşık 50 kat daha fazla duyarlıdır. Doğrusallık değeri %8, limit birim şekil

değiştirmesi (SL) %0,7 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. Şekil 3.4'de C7'ye ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur.



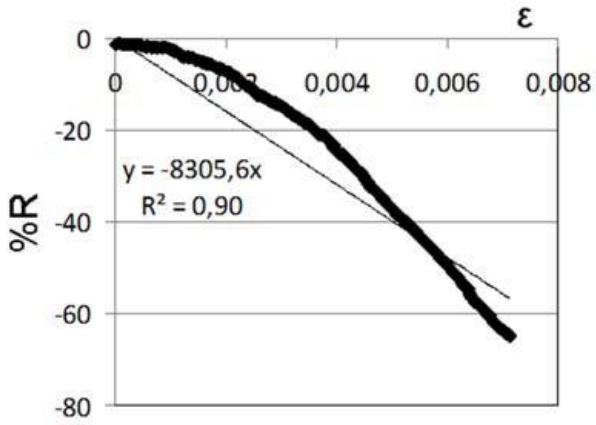
Şekil 3.4 C7 Basınç testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %1,5 oranda ve 3 mm boyunda karbon lifler içeren C10'a ait duyarlılık değeri K=72 olarak elde edilmiştir. Doğrusallık değeri %9, limit birim şekil değiştirmesi (SL) %0,83 ve korelasyon katsayısı R^2=0,98 olarak bulunmuştur. Şekil 3.5'de C10'a ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur.



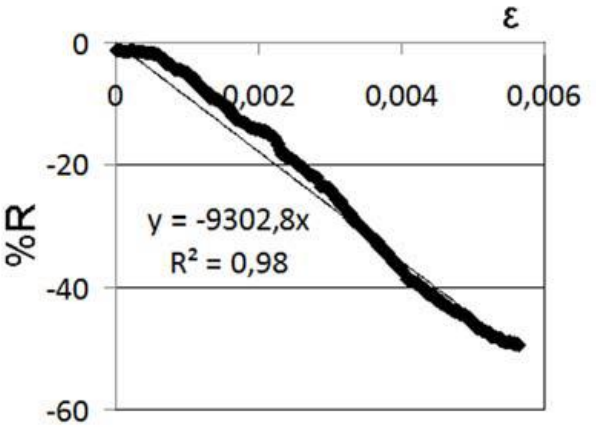
Şekil 3.5 C10 Basınç testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %0,5 oranda ve 13 mm boyunda karbon lifler içeren C13'e ait duyarlılık değeri K=90 olarak ölçülmüştür. Doğrusallık değeri %16, limit birim şekil değiştirmesi (SL) %0,71 ve korelasyon katsayısı R^2=0,90 olarak bulunmuştur. Şekil 3.6'da C13'e ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur.



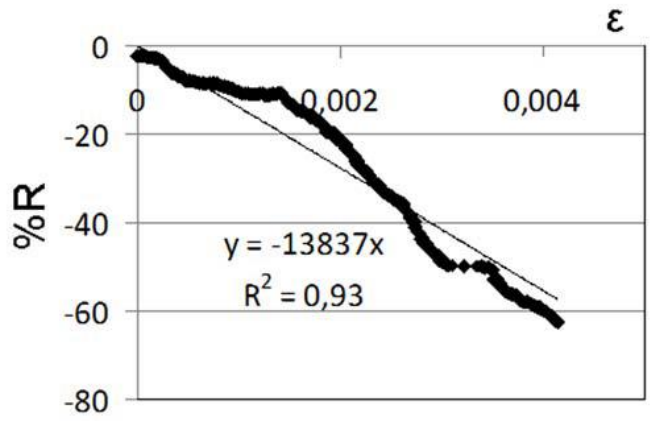
Şekil 3.6 C13 Basınç testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %0,8 oranda ve 16 mm boyunda karbon lifler içeren C19'a ait duyarlılık değeri K=87 olarak ölçülmüştür. C19'un tipik metal birim şekil değiştirme ölçerlerden yaklaşık 44 kat daha duyarlı olduğu anlamına gelir. Doğrusallık değeri %11, limit birim şekil değiştirmesi (SL) %0,57 ve korelasyon katsayısı R^2=0,98 olarak bulunmuştur. Şekil 3.7'de C19'a ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur.



Şekil 3.7 C19 Basınç testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %1 oranda ve 16 mm boyunda karbon lifler içeren C20'ye ait duyarlılık değeri K=149 olarak ölçülmüştür. C20 tipik metal birim şekil değiştirme ölçerlerden yaklaşık 75 kat daha duyarlı ölçüm vermiştir. Doğrusallık değeri %14, limit birim şekil değiştirmesi (SL) %0,4 ve korelasyon katsayısı R^2=0,93 olarak bulunmuştur. Şekil 3.8'de C20'ye ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur.



Şekil 3.8 C20 Basınç testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

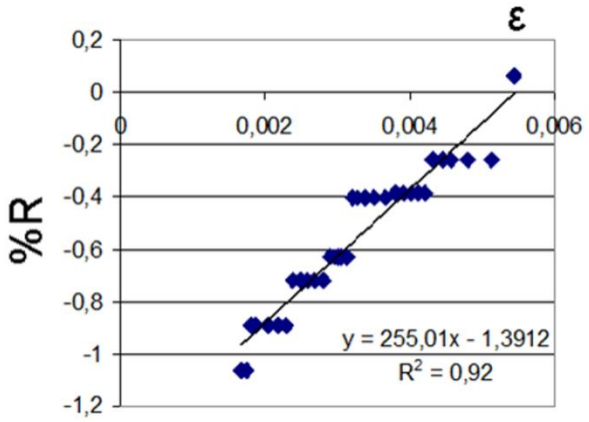
Özetle karbon lifli numunelerin basınç testleri sonuçlarından anlaşılacağı üzere çimento esaslı sensörler (ÇES) tipik metal birim şekil değiştirme ölçerlere göre çok daha duyarlı olabilme potansiyeline sahiptir. Ayrıca deneylerden elde edilen sonuçlar göstermiştir ki hesaplanan korelasyon katsayıları (R^2) hep 1'e yakınsaktır (Teomete ve Kocyigit, 2015). Bu ÇES'in sensör olarak güvenilir bir şekilde kullanılabileceği anlamına gelir.

3.2 Karbon Lif Yarmada Çekme Testi Sonuçları

Bir lifsiz, 20 karbon lifli olmak üzere toplamda 21 farklı içeriğe sahip karışımların her birinden 3'er adet numune olmak üzere toplamda 63 yarmada çekme testi yapılmıştır. Bu test sonuçlarından bazıları aşağıda özetlenmiştir.

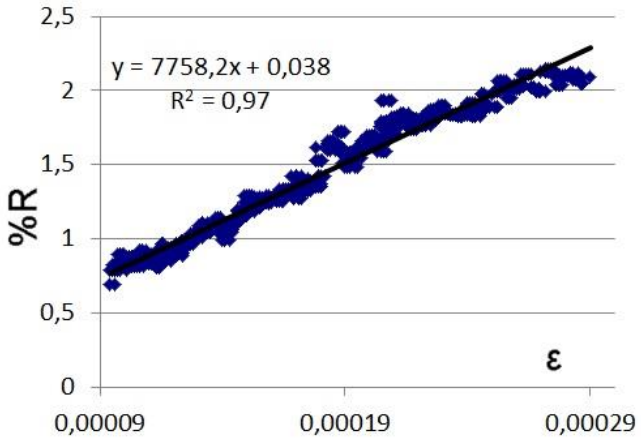
Lifsiz olarak dökülen referans karışım grubu MY1'in duyarlılık değeri K=3 olarak ölçülmüştür. Doğrusallık değeri %15 ve korelasyon katsayısı R^2=0,92 olarak

bulunmuştur. Şekil 3.9'da MY1 karışımına ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur.



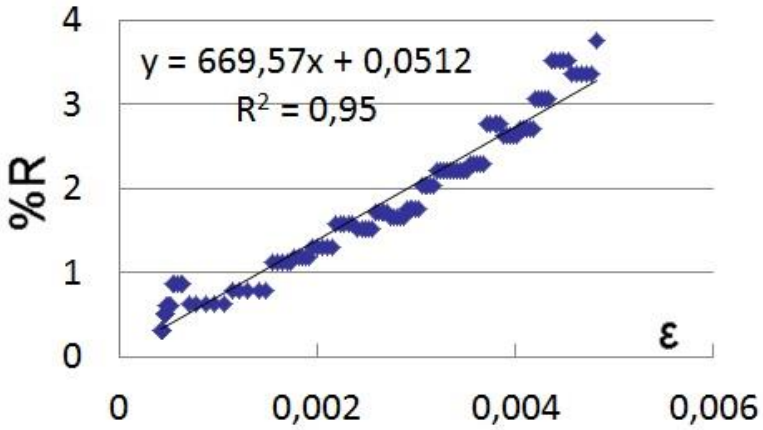
Şekil 3.9 MY1 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %0,2 oranda ve 6 mm boyunda karbon lifler içeren CY1'e ait duyarlılık değeri K=71 olarak ölçülmüştür. Doğrusallık değeri %21 ve korelasyon katsayısı R^2=0,97 olarak bulunmuştur. Şekil 3.10'da CY1'e ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur.



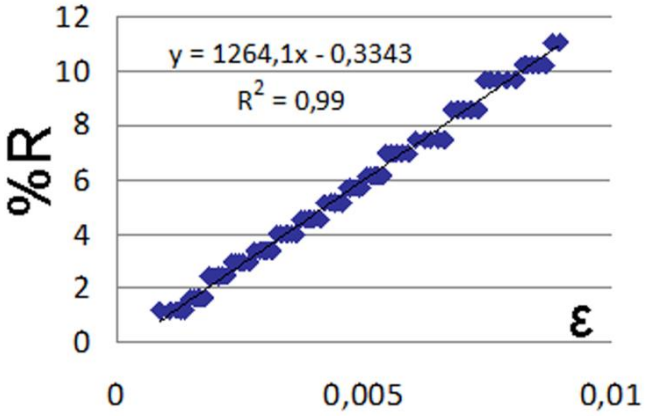
Şekil 3.10 CY1 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %1,5 oranda ve 6 mm boyunda karbon lifler içeren CY5'e ait duyarlılık değeri K=8 olarak ölçülmüştür. Doğrusallık değeri %16 ve korelasyon katsayısı R^2=0,95 olarak bulunmuştur. Şekil 3.11'de CY5'e ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur.



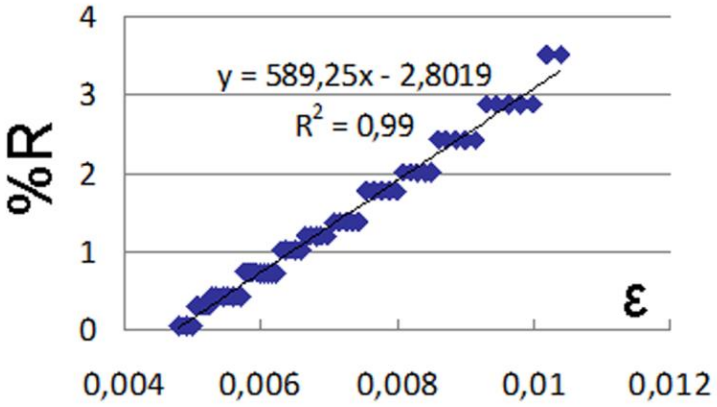
Şekil 3.11 CY5 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %0,5 oranda ve 3 mm boyunda karbon lifler içeren CY7'ye ait duyarlılık değeri K=12 olarak ölçülmüştür. Doğrusallık değeri %6 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. Şekil 3.12'de CY7'ye ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur (Teomete, 2015b).



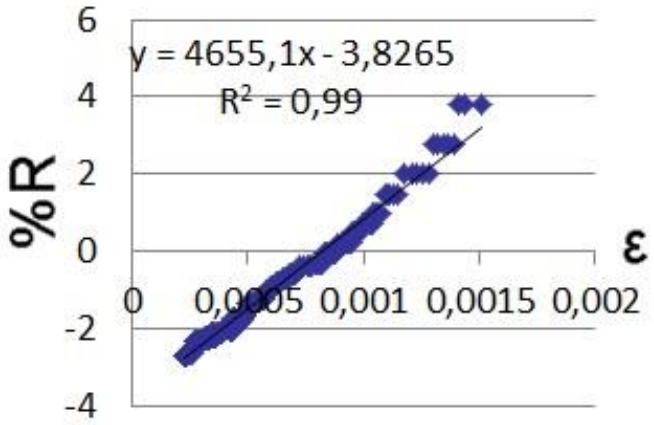
Şekil 3.12 CY7 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %1 oranda ve 3 mm boyunda karbon lifler içeren CY9'a ait duyarlılık değeri K=6 olarak ölçülmüştür. Doğrusallık değeri %9 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. Şekil 3.13'de CY9'a ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur (Teomete, 2015b).



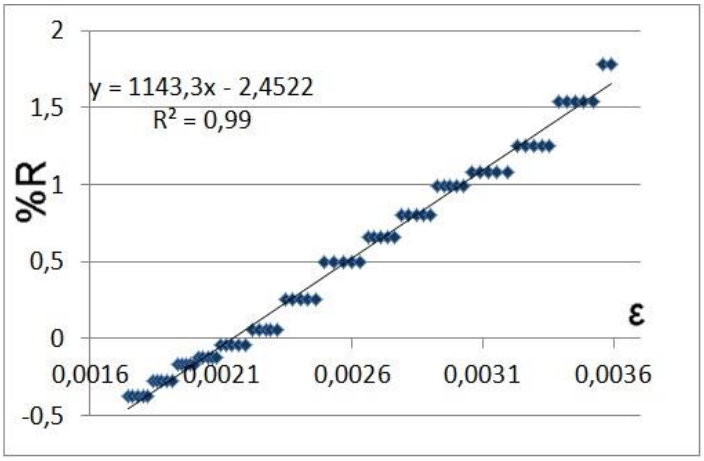
Şekil 3.13 CY9 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %0,2 oranda ve 13 mm boyunda karbon lifler içeren CY11'e ait duyarlılık değeri K=50 olarak ölçülmüştür. Doğrusallık değeri %16 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. Şekil 3.14'te CY11'e ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur (Teomete, 2015a).



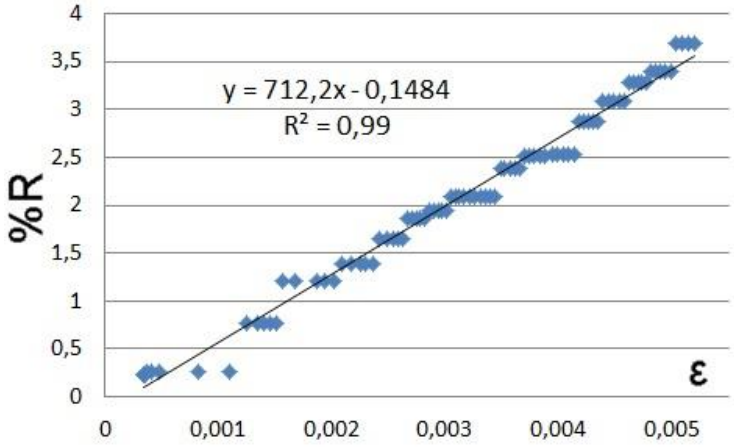
Şekil 3.14 CY11 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %0,8 oranda ve 13 mm boyunda karbon lifler içeren CY14'e ait duyarlılık değeri K=12 olarak ölçülmüştür. Doğrusallık değeri %8 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. Şekil 3.15'te CY14'e ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur (Teomete, 2015a).



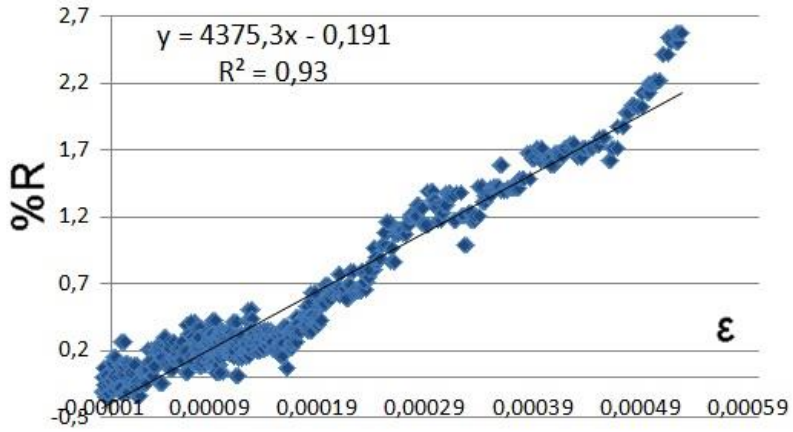
Şekil 3.15 CY14 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %0,35 oranda ve 16 mm boyunda karbon lifler içeren CY17'ye ait duyarlılık değeri K=7 olarak ölçülmüştür. Doğrusallık değeri %11 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. Şekil 3.16'da CY17'ye ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur.



Şekil 3.16 CY17 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %1 oranda ve 16 mm boyunda karbon lifler içeren CY20'ye ait duyarlılık değeri K=48 olarak ölçülmüştür. Doğrusallık değeri %19 ve korelasyon katsayısı R^2=0,93 olarak bulunmuştur. Şekil 3.17'de CY20'ye ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur.



Şekil 3.17 CY20 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Elektriksel direnç ile çekme birim şekil değiştirmesi arasındaki ilişkiyi belirlemek için yarmada çekme testi ilk kez bu çalışmada kullanılmıştır.

Özet olarak karbon lifli karışımların yarmada çekme testlerinin sonuçlarına göre elektriksel direnç lif içeriği ile doğrudan ilişkilidir. Karışımdaki karbon lif miktarı arttıkça numune matrisindeki iletken fazlar da artmakta ve elektriksel direnci düşürmektedir (Teomete, 2015a; 2015b).

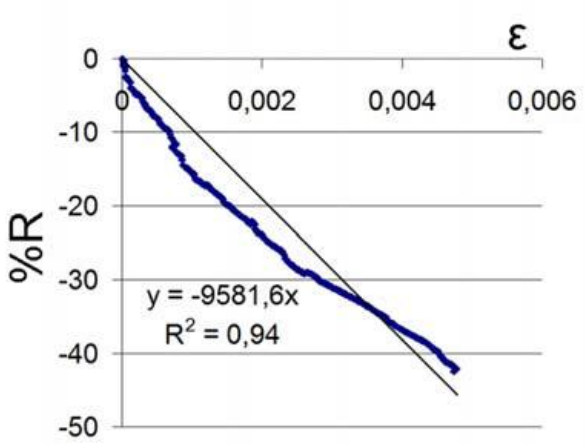
Duyarlılık değeri (K), karbon liflerin yüzdece hacim oranının artmasıyla düşme eğilimi sergilemiştir. Karbon lif miktarının artması lif-lif etkileşimini de arttırır. Çekme birim şekil değiştirmesinin sebep olduğu lif kopmalarının oranı azalır ve iletken fazlar numune ara yüzünde iletkenlik göstermeye devam eder. Böylece çekme birim şekil değiştirmesinin elektriksel direnç üzerindeki etkisi azalır ve duyarlılık düşer (Teomete ve Erdem, 2013).

3.3 Çelik Lif Basınç Testi Sonuçları

Bir lifsiz, 10 çelik lifli olmak üzere toplamda 11 farklı içeriğe sahip karışımların her birinden 3'er adet numune olmak üzere toplamda 33 basınç testi yapıldı. Bu test sonuçlarından bazıları aşağıda sunulmuştur (Teomete, 2011, 2012).

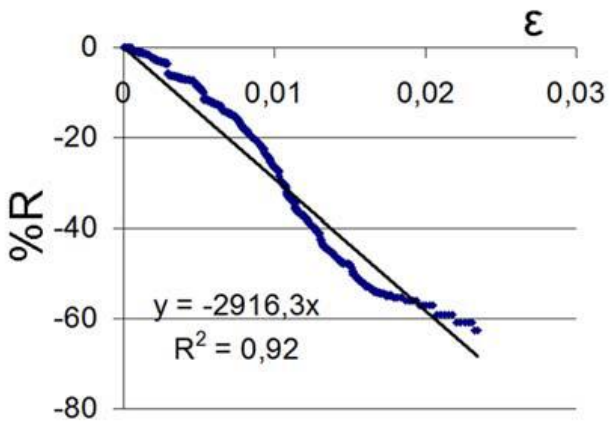
Lifsiz olarak dökülen referans karışımı M1'e ait deney sonuçları %R-birim şekil değiştirme grafiği alt başlık 3.1'de sunulmuştur. M1 karışımına ait %R-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 3.1'de ki gibidir.

Hacimce %0,2 oranda ve 6 mm boyunda çelik lifler içeren S1'e ait duyarlılık değeri K=90 olarak ölçülmüştür. S1 tipik metal birim şekil değiştirme ölçerlerden 45 kat daha fazla duyarlıdır. Doğrusallık değeri %15, limit birim şekil değiştirmesi (SL) %0,47 ve korelasyon katsayısı R^2=0,94 olarak bulunmuştur. Şekil 3.18'de S1'e ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı görülmektedir.



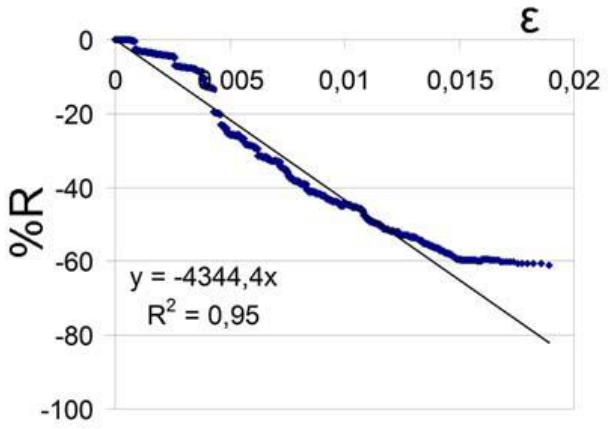
Şekil 3.18 S1 Basınç testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %0,5 oranda ve 6 mm boyunda çelik lifler içeren S2'ye ait duyarlılık değeri K=27 olarak ölçülmüştür. Doğrusallık değeri %10, limit birim şekil değiştirmesi (SL) %2,3 ve korelasyon katsayısı R^2=0,92 olarak bulunmuştur. Şekil 3.19'da S2'ye ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı görülmektedir.



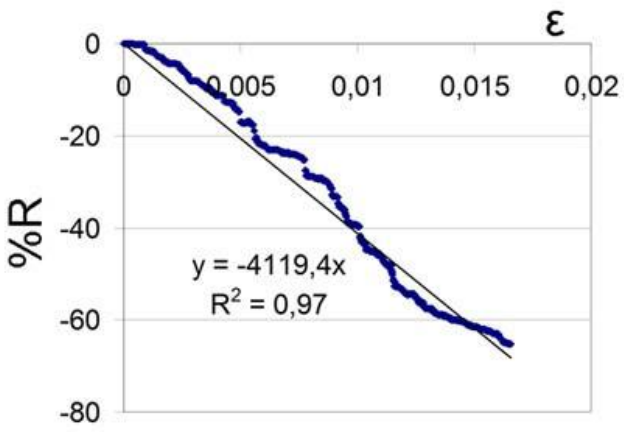
Şekil 3.19 S2 Basınç testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %0,8 oranda ve 6 mm boyunda çelik lifler içeren S3'e ait duyarlılık değeri K=32 olarak ölçülmüştür. Doğrusallık değeri %34, limit birim şekil değiştirmesi (SL) %1,89 ve korelasyon katsayısı R^2=0,95 olarak bulunmuştur. Şekil 3.20'de S3'e ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı görülmektedir.



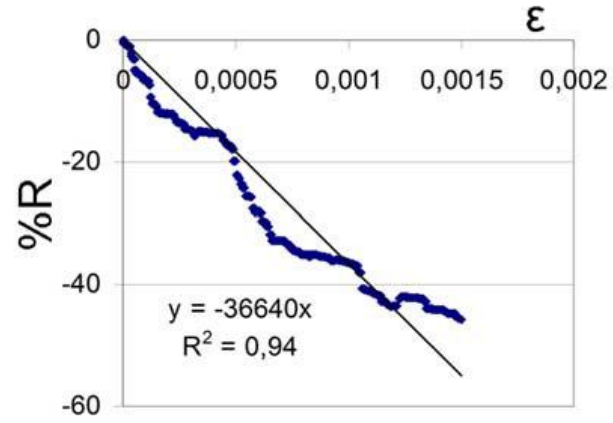
Şekil 3.20 S3 Basınç testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %1 oranda ve 6 mm boyunda çelik lifler içeren S4'e ait duyarlılık değeri K=44 olarak ölçülmüştür. Doğrusallık değeri %14, limit birim şekil değiştirmesi (SL) %1,66 ve korelasyon katsayısı R^2=0,97 olarak bulunmuştur. Şekil 3.21'de S4'e ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı görülmektedir.



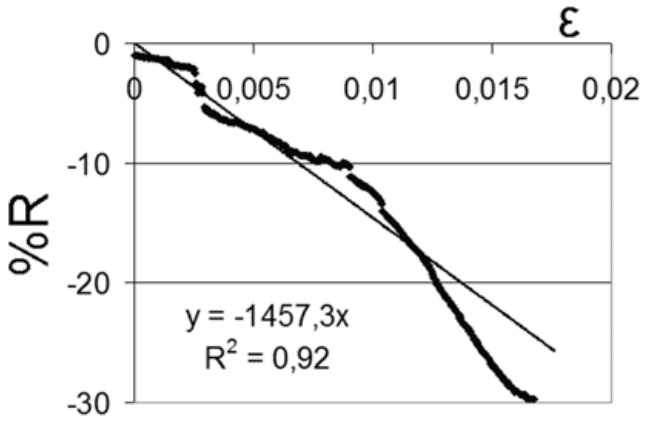
Şekil 3.21 S4 Basınç testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %1,5 oranda ve 6 mm boyunda çelik lifler içeren S5'e ait duyarlılık değeri K=304 olarak ölçülmüştür. S5 basınç birim şekil değiştirmesine metal gerinim pullarından 152 kat daha duyarlıdır (Teomete, 2011). Doğrusallık değeri %20, limit birim şekil değiştirmesi (SL) %0,15 ve korelasyon katsayısı R^2=0,94 olarak bulunmuştur. Şekil 3.22'de S5'e ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı görülmektedir.



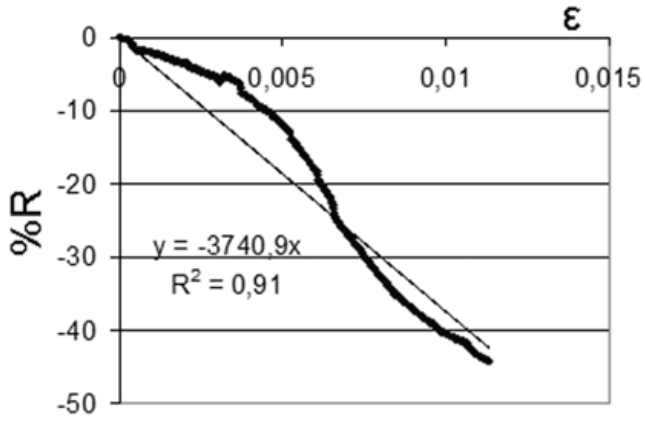
Şekil 3.22 S5 Basınç testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %0,2 oranda ve 13 mm boyunda çelik lifler içeren S6'ya ait duyarlılık değeri K=17 olarak ölçülmüştür. Doğrusallık değeri %19, limit birim şekil değiştirmesi (SL) %1,76 ve korelasyon katsayısı R^2=0,92 olarak bulunmuştur. Şekil 3.23'de S6'ya ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı görülmektedir.



Şekil 3.23 S6 Basınç testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

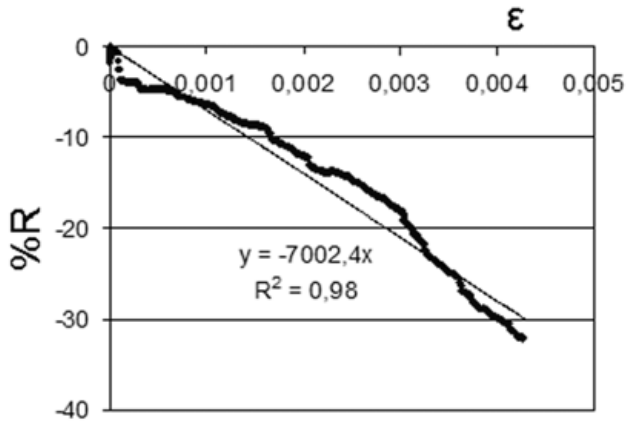
Hacimce %0,35 oranda ve 13 mm boyunda çelik lifler içeren S7'ye ait duyarlılık değeri K=40 olarak ölçülmüştür. S7 tipik metal gerinim pullarından basınç birim şekil değiştirmesine 20 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %19, limit birim şekil değiştirmesi (SL) %1,1 ve korelasyon katsayısı R^2=0,91 olarak bulunmuştur. Şekil 3.24'de S7'ye ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı görülmektedir.



Şekil 3.24 S7 Basınç testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

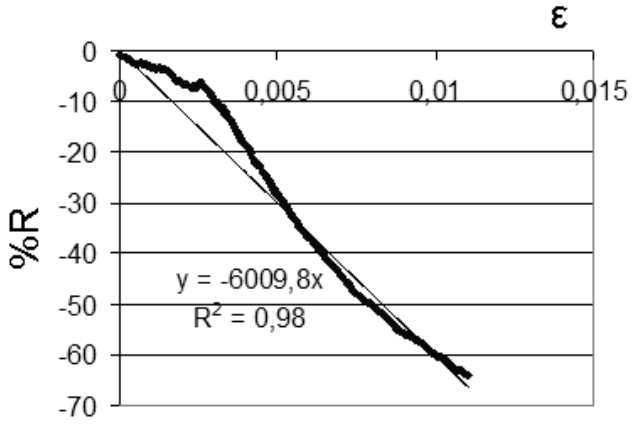
Hacimce %0,5 oranda ve 13 mm boyunda çelik lifler içeren S8'e ait duyarlılık değeri K=75 olarak ölçülmüştür. S8 tipik metal gerinim pullarından basınç birim şekil değiştirmesine 35 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %10, limit birim şekil değiştirmesi (SL) %0,43 ve korelasyon katsayısı R^2=0,98 olarak bulunmuştur. Şekil

3.25’de S8'e ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı görülmektedir.



Şekil 3.25 S8 Basınç testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %0,8 oranda ve 13 mm boyunda çelik lifler içeren S9'a ait duyarlılık değeri K=58 olarak ölçülmüştür. Doğrusallık değeri %15, limit birim şekil değiştirmesi (SL) %1,1 ve korelasyon katsayısı R^2=0,98 olarak bulunmuştur. Şekil 3.26’da S9'a ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı görülmektedir.



Şekil 3.26 S9 Basınç testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Çelik lifli karışımların basınç testi sonuçlarından ölçülen en yüksek duyarlılık tipik metal gerinim pullarına göre 150 kat daha fazladır. Çelik lif boyu ve karışım içindeki miktarı karışımın iletkenliğini doğrudan etkiler. Basınç birim şekil

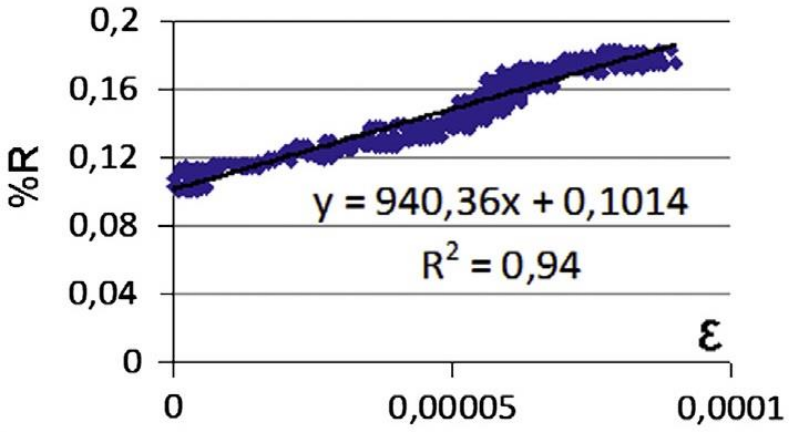
değiştirmesi ile matris içinde lif kısalmaları ve mikro çatlak kapanmaları yaşanır elektriksel direnç düşer (Teomete, 2012).

3.4 Çelik Lif Yarmada Çekme Testi Sonuçları

Bir lifsiz, 10 çelik lifli olmak üzere toplamda 11 farklı içeriğe sahip karışımların her birinden 3'er adet numune olmak üzere toplamda 33 yarmada çekme testi yapılmıştır. Bu test sonuçlarından bazıları aşağıda özetlenmiştir.

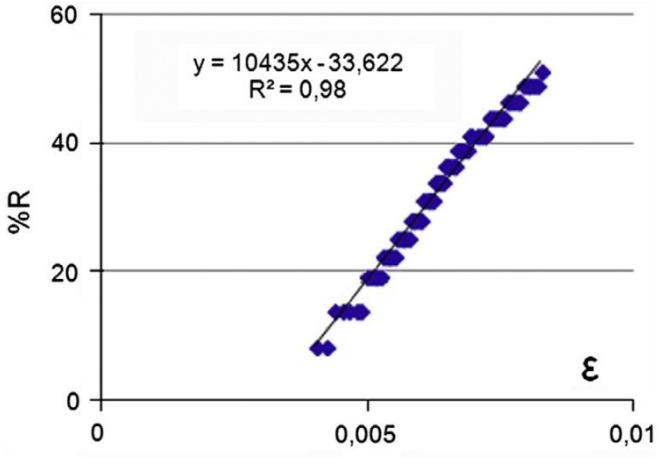
Lifsiz olarak dökülen referans karışımı MY1'e ait deney sonuçları %R-birim şekil değiştirme grafiği alt başlık 3.2'de sunulmuştur. MY1 karışımına ait %R-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 3.9'daki gibidir.

Hacimce %0,2 oranda ve 6 mm boyunda çelik lifler içeren SY1'e ait duyarlılık değeri K=9 olarak ölçülmüştür. Doğrusallık değeri %6 ve korelasyon katsayısı R^2=0,94 olarak bulunmuştur. Şekil 3.27'de SY1'e ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur (Teomete ve Kocyigit, 2013).



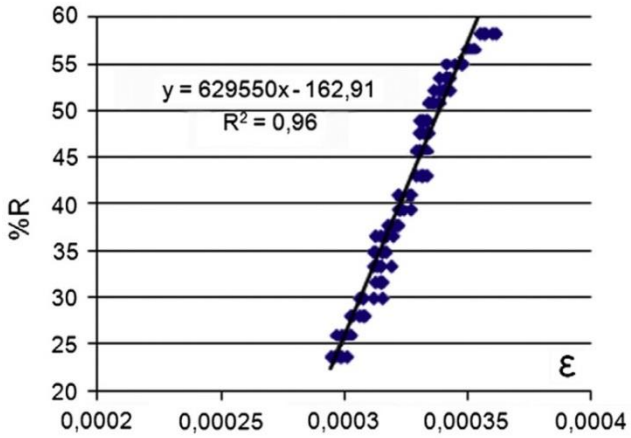
Şekil 3.27 SY1 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %0,5 oranda ve 6 mm boyunda çelik lifler içeren SY2'ye ait duyarlılık değeri K=100 olarak ölçülmüştür. SY2 tipik metal gerinim pullarına göre çekme birim şekil değiştirmesine 50 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %8 ve korelasyon katsayısı R^2=0,98 olarak bulunmuştur. Şekil 3.28'de SY2'ye ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur (Teomete ve Kocyigit, 2013).



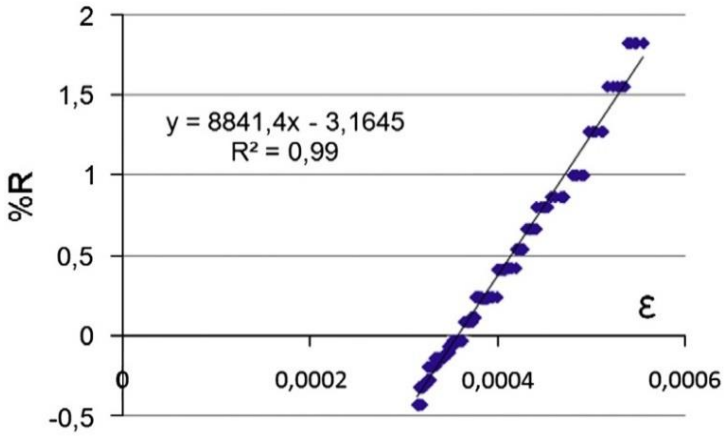
Şekil 3.28 SY2 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %0,8 oranda ve 6 mm boyunda çelik lifler içeren SY3'e ait duyarlılık değeri K=5195 olarak ölçülmüştür. SY3 tipik metal gerinim pullarına göre çekme birim şekil değiştirmesine 2600 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %17 ve korelasyon katsayısı R^2=0,96 olarak bulunmuştur. Şekil 3.29'da SY3'e ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur (Teomete ve Kocyigit, 2013).



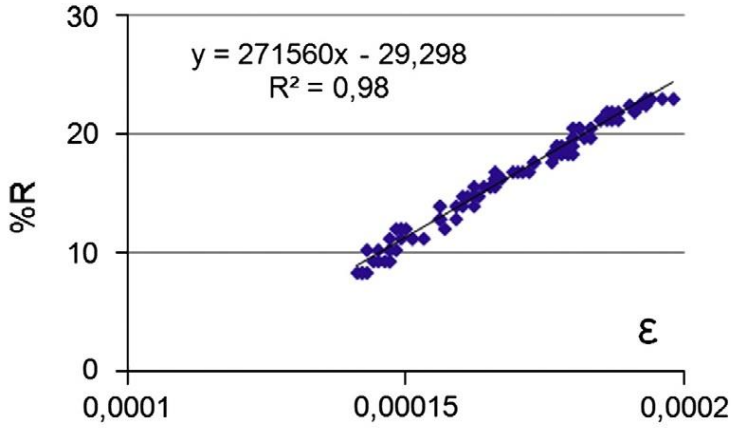
Şekil 3.29 SY3 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %1 oranda ve 6 mm boyunda çelik lifler içeren SY4'e ait duyarlılık değeri K=42 olarak ölçülmüştür. Doğrusallık değeri %16 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. Şekil 3.30'de SY4'e ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur (Teomete ve Kocyigit, 2013).



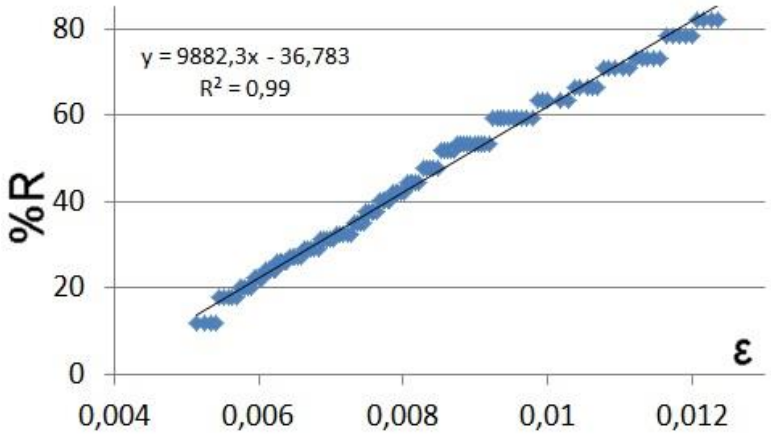
Şekil 3.30 SY4 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %1,5 oranda ve 6 mm boyunda çelik lifler içeren SY5'e ait duyarlılık değeri K=2589 olarak ölçülmüştür. Doğrusallık değeri %9 ve korelasyon katsayısı R^2=0,98 olarak bulunmuştur. Şekil 3.31'de SY5'e ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur (Teomete ve Kocyigit, 2013).



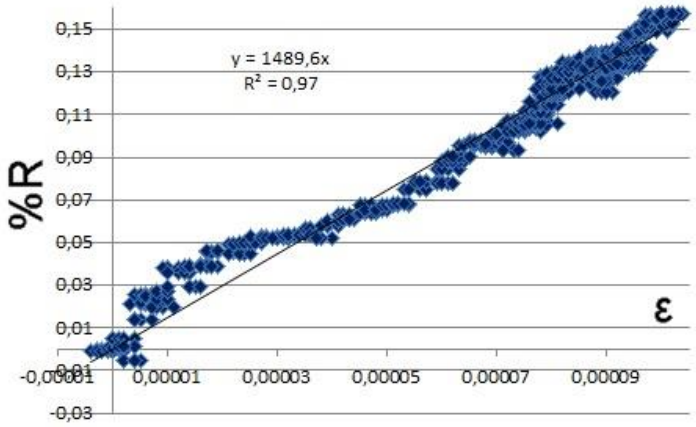
Şekil 3.31 SY5 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %0,2 oranda ve 13 mm boyunda çelik lifler içeren SY6'ya ait duyarlılık değeri K=97 olarak ölçülmüştür. Doğrusallık değeri %7 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. Şekil 3.32'de SY6'ya ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur.



Şekil 3.32 SY6 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Hacimce %0,35 oranda ve 13 mm boyunda çelik lifler içeren SY7'ye ait duyarlılık değeri K=15 olarak ölçülmüştür. Doğrusallık değeri %16 ve korelasyon katsayısı R^2=0,97 olarak bulunmuştur. Şekil 3.33'de SY7'ye ait %R-birim şekil değiştirme grafiği ve korelasyon katsayısı sunulmuştur.



Şekil 3.33 SY7 Yarmada çekme testi birim şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

Çelik lifli karışımların yarmada çekme testleri göstermiştir ki çimento esaslı sensörler çekme birim şekil değiştirmesine tipik metal gerinim pullarına göre 2600 kat duyarlı olabilmektedir. Yarmada çekme testi gibi çekme gerilmesinin doğrudan uygulanmadığı, karmaşık gerilme dağılımlarının oluşabileceği yüklemelerde bile elektriksel direnç ile çekme birim şekil değiştirmesi güçlü ve doğrusal ilişki sergilemiştir (Teomete ve Kocyigit, 2013).

3.5 En İyi Karışımın ÇES Olarak Belirlenmesi

Bu çalışmada değerlendirilen çelik lifli 10, karbon lifli 20 ve lifsiz 1 toplamda 31 karışım grubunda her bir karışım için 3'er adet 5 cm ebatlı küp numuneler hazırlanıp basınç testi uygulanmıştır. Ayrıca yine bütün karışımlardan 3'er adet 5cm ebatlı küp numunelere yarmada çekme testi uygulanmıştır. Toplamda 186 mekanik test yapılmıştır. Bu testler sırasında ölçülen ve saniyede 10 defa dijital bir dosyaya yazdırılan zaman, yük, referans direnç potansiyel farkı (V_r), numune potansiyel farkı (V_s), birim şekil değiştirme gibi veriler ile hesaplanan devre akımı (I_c)ve elektriksel direncin yüzdece değişimi (%R) detaylı olarak analiz edildi. Elde edilen verilerden %R-birim şekil değiştirme, %R-Yük, Yük-zaman gibi çeşitli grafikler çizilip bu grafikler detaylı olarak incelenmiştir.

Performans parametreleri olan duyarlılık (K), doğrusallık (LE), korelasyon katsayısı (R^2) ve limit birim şekil değiştirme (SL) her numune için hesaplanmıştır. Grafiklerin birbirleriyle tutarlılıkları gözlemlenmiştir.

En iyi performansı gösteren karışımı ÇES olarak seçmek için sensör özellikleri değerlendirildi. Toplamda 186 test sonucundan gelen duyarlılık, doğrusallık, limit değer ve korelasyon katsayısı gibi verilerin hepsini tek tek değerlendirmek imkansız olacağından bir puan sistemi oluşturulmuştur. Performans parametrelerini önemleri oranında dikkate alan puanlama formülü denklem 3.3'de verilmiştir. Basınç ve yarmada çekme testlerinin her ikisi içinde bu puanlama sistemi kullanılmıştır (Teomete ve Erdem, 2013).

$$Puan(basma, yarma) = 1000 \times SL + K - LE + 25 \times R^2 \tag{3.3}$$

Denklem 3.3'teki SL değerinin '1000' katsayısı ve R^2 değerinin '25' katsayısı bu iki parametreyi önem dereceleri kapsamında K ve LE parametreleri düzeyine taşıyabilmek için kullanılmıştır.

Her karışım grubunda bulunan 3 adet küp numunenin deney sonuçlarına göre elde edilen puanlarının ortalamaları ve standart sapmaları hesaplanmış ve o karışıma ait nihai puan ve standart sapma elde edilmiştir.

En iyi karışımı seçebilmek için her karışım grubuna basınç ve yarmada çekme testleri uygulandı ve sonuçları analiz edilerek puanları ile standart sapmaları hesaplandı. Ancak en iyi karışımı ÇES olarak seçebilmek için puan ve standart sapma kadar korelasyon katsayısının 1'e yakınlığı, sinyal yapısının güçlü ve düzgün oluşu, karışım grubu içindeki 3 numunenin de birbiriyle tutarlı yakın sonuçlar vermesi gibi faktörler de göz önünde bulundurulmuştur.

ÇES'in birim şekil değiştirme ölçer olarak öncelikle basınç zorlamalarını ölçeceği düşünülürse basınç puanına yarmada çekme puanına göre bir nebze daha fazla önem verilmiştir. Puan ve standart sapma değerleri Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'de sunulmuştur.

Tablo 3.1 Lifsiz ve çelik lifli karışım gruplarının puan ve standart sapmaları

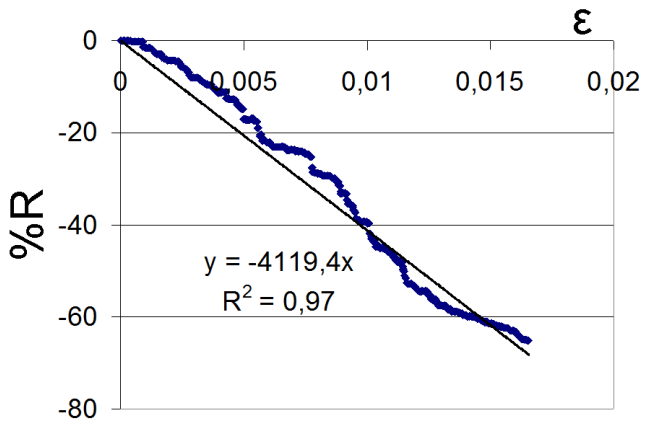
Test	Basınç Testi		Yarmada Çekme Testi	
Karışım	Puanı	Standart Sapma	Puanı	Standart Sapma
M1	802	1295	15	10
S1	105	86	15	3
S2	50	12	87	48
S3	44	36	2139	2716
S4	**67**	**5**	**93**	**8**
S5	85	14	890	1485
S6	39	8	4550	1165
S7	55	6	44	26
S8	57	17	30	20
S9	68	11	109	12
S10	35	11	42	13

Tablo 3.2 Karbon lifli karışım gruplarının puan ve standart sapmaları

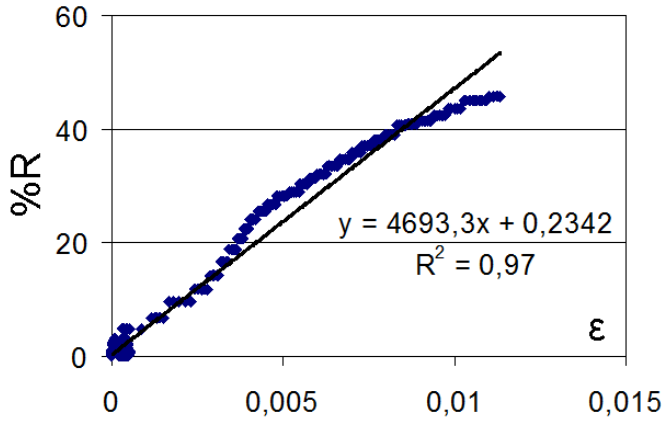
Test	Basınç Testi		Yarmada Çekme Testi	
Karışım	Puanı	Standart Sapma	Puanı	Standart Sapma
C1	**94**	**12**	**36**	**15**
C2	58	14	20	10
C3	77	14	22	6
C4	71	21	20	16
C5	88	14	18	5
C6	59	27	371	438
C7	**105**	**11**	**36**	**13**
C8	84	14	499	820
C9	76	12	63	67
C10	109	33	27	19
C11	53	14	166	214
C12	31	27	158	221
C13	106	18	43	32
C14	90	15	17	23
C15	79	25	233	90
C16	59	12	49	28
C17	95	14	37	18
C18	82	22	1073	1820
C19	89	20	30	6
C20	125	40	30	21

Elde edilen puan tablolarından en iyi karışım adayları olarak; çelik lifli grupların hepsinden S4, karbon lifli grupların hepsinden C1 ve C7 öne çıkmaktadır. Kendi lif grupları arasında bu karışımlar puanı en yüksek olmasa da puanı yüksek ve standart sapması düşük en optimal karışımlardır.

ÇES karışımı maksimum puan ve minimum standart sapmayı verecek şekilde belirlenmiştir. Aynı performansın alınabilmesi için standart sapma düşük olmalıdır. Bu kriterler doğrultusunda ÇES karışımı olarak S4 seçilmiştir. S4'e ait %R-birim şekil değiştirme grafikleri sırasıyla basınç ve yarmada çekme testi sonuçları olarak Şekil 3.34 ve Şekil 3.35'de sunulmuştur.



Şekil 3.34 S4 Basınç testi şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı



Şekil 3.35 SY4 Yarmada çekme testi şekil değiştirme-%R grafiği ve korelasyon katsayısı

S4 karışımına ait malzeme oranları Tablo 3.3'te sunulmuştur.

Tablo 3.3 Lifsiz referans karışımı ve S4 karışımı malzeme oranları

Bileşenler	**M1**	**S4**
L=6 mm Çelik Lif Hacimsel Yüzdesi	0,00	1,00
Çelik Lif (kg/m^3)	0,0	78,5
Çimento (kg/m^3)	651	645
Kum (kg/m^3)	651	645
Silis Dumanı (kg/m^3)	65	65
Su (kg/m^3)	261	258
Süper Akışkanlaştırıcı(kg/m^3)	6,5	6,5

Şekil 3.34 ve Şekil 3.35'ten görüleceği üzere her iki test için de S4 birim şekil değiştirme-%R ilişkisi güçlü doğrusal ilişki göstermiştir. Korelasyon katsayıları yüksektir.

3.6 ÇES'in Sensör Özellikleri

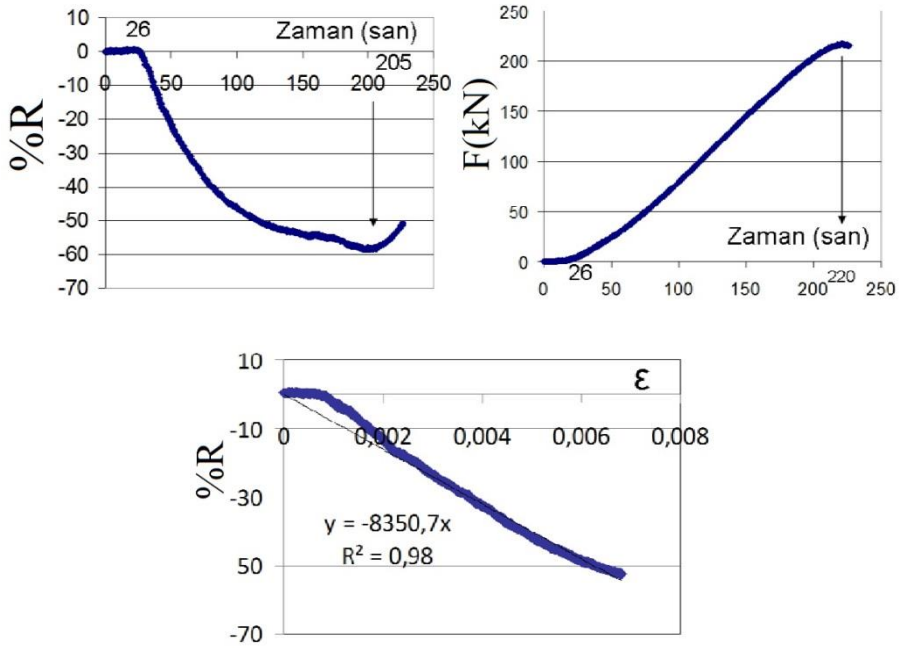
ÇES olarak belirlenen S4 karışımının sensör özelliklerinin belirlenmesi için bu karışımdan 6 adet 5 cm ebatlarında küp numuneler dökülmüştür. Bu numunelere 3 adet basınç ve 3 adet yarmada çekme testi uygulanmıştır. Basınç deneylerinden elde edilen basınç birim şekil değiştirme duyarlılığı 44, doğrusallığı ise %14 olarak kaydedilmiştir. Yarmada çekme testlerinden elde edilen sonuçlarda ise çekme birim şekil değiştirme duyarlılığı 42, doğrusallığı %16 hesaplanmıştır.

Bu değerlerden ÇES'in birim şekil değiştirmeye duyarlılığının metal birim şekil değiştirme ölçerlerin duyarlılığına göre 22 kat daha yüksek olduğu görülmektedir.

3.7 Basınç Testlerinde Mekanizmalar

Yük cihazının başlıkları ve numune yüzeyi arasında, basınç yükleri uygulanırken oluşacak sürtünme kaynaklı kayma gerilmelerini minimize etmek amacıyla cihaz başlıklarına test başlamadan önce makine yağı sürülmüştür. Numunelere deneylerden önce yük doğrultusuna paralel ölçüm alacak şekilde birim şekil değiştirme ölçer pullar yapıştırılmıştır.

Şekil 3.36'da hacimce %0,8 oranda ve 13 mm boyunda karbon lifler içeren C14 karışımına ait basınç testi sonuçları sunulmuştur (Teomete, 2015a).



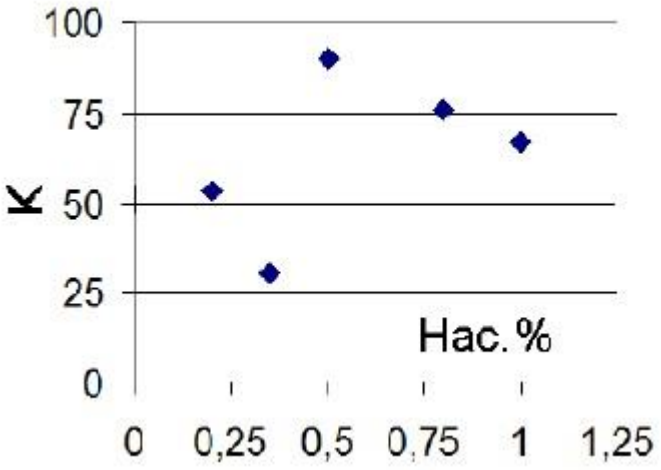
Şekil 3.36 C14 Basınç testi (a) %R-zaman grafiği (b) kuvvet-zaman grafiği(c) %R-birim şekil değiştirme grafiği (Teomete, 2015a).

26. saniyeye kadar elektriksel direnç değişiminde (%R) ya da uygulanan yükte herhangi bir değişiklik olmamıştır. Şekil 3.36(a)'da görüleceği üzere uygulanan yük sıfıra yakındır. Bunun sebebi numune yüzeyindeki pürüzlerin ilk etapta kırılmaya başlamalarıdır. 26. saniyeden sonra 205. saniyeye kadar artan basınç yükü etkisiyle numune matrisinde sıkışmalar başlamış, matris-lif ve lif-lif ara yüzeylerindeki etkileşimler artmıştır (Teomete ve Erdem, 2013).

Artan basınç birim şekil değiştirme etkisiyle numune içindeki mikro boşluklar ve mikro çatlaklar kapanır, lifler kısalır. Bu nedenlerle elektriksel direnç düşer, %R azalır (Şekil 3.36(c)).

205. saniyeden sonra çatlaklar oluşmaya başlamış, elektriksel direnç yükselmeye başlamıştır. Ancak numunenin taşıma gücü henüz bitmemiştir. 205. saniyede kuvvet artışı henüz durmamıştır ve 220. saniyeye kadar numune yük almaya devam etmiştir (Şekil 3.36(b)). Bunun nedeni liflerin oluşan çatlakları köprüleme özelliğidir (Teomete, 2015a).

Şekil 3.37'de basınç testleri duyarlılık-karbon lif hacimsel oranları grafiği sunulmuştur.



Şekil 3.37 Basınç testleri duyarlılık-karbon lif hacimsel oranları grafiği (Teomete ve Erdem, 2013).

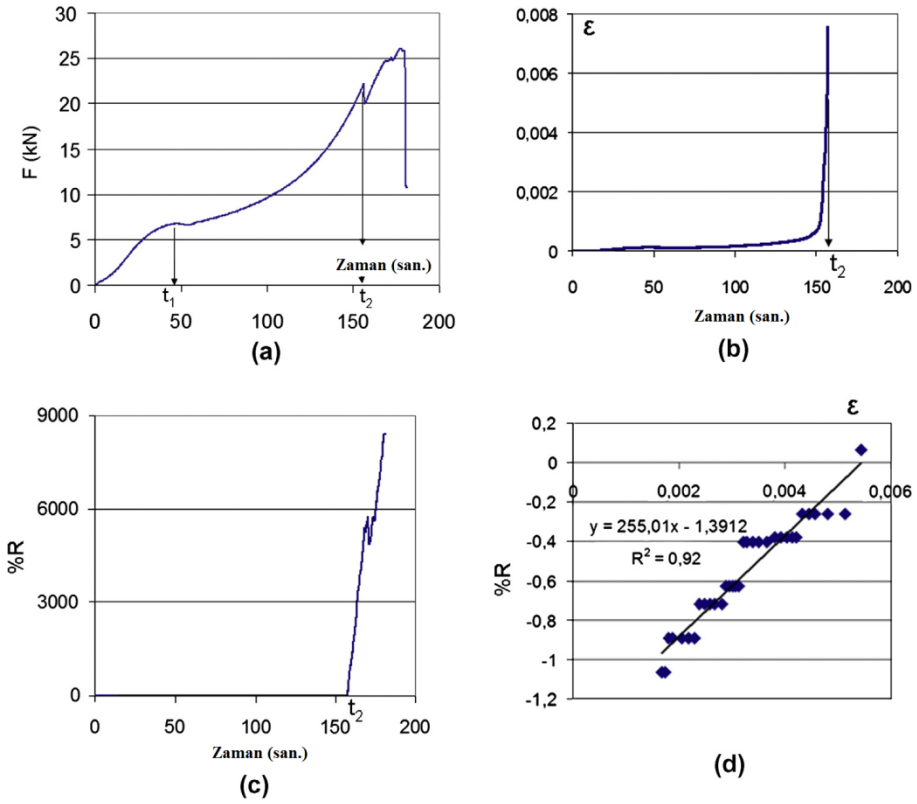
Karışım içindeki karbon lif hacimsel oranı arttıkça elektron akışını sağlayan lif-lif ve lif-matris iletim hatları miktarı da artar. Birim şekil değiştirme daha az lif-lif ve lif-matris bağlantısı koparabilir, böylece birim şekil değiştirmenin elektriksel direnç üzerindeki etkisi azalır. %R'daki değişim daha az olur ve duyarlılık düşer.

Perkolasyon oranı, liflerin malzeme içinde direkt temas ile iletim hattı oluşturmaya başladığı en düşük hacimsel orandır.

Hacimce %0,5 lif oranı perkolasyon sınırıdır.%0,5 hacimsel oranda elektron akışı az sayıda iletim hattı üzerinden gerçekleşir. Birim şekil değiştirme az sayıdaki iletim hatlarını koparır ve sistem perkolasyon öncesi duruma geçer. %R'da büyük değişmeler olur ve duyarlılık maksimum olur (Teomete, 2015a).

3.8 Yarmada Çekme Testlerinde Mekanizmalar

Lifsiz olarak dökülen referans karışım grubu MY1'e ait yarmada çekme testi sonuçları Şekil 3.38(a), (b), (c) ve (d)'de sunulmuştur (Teomete ve Kocyigit, 2013).



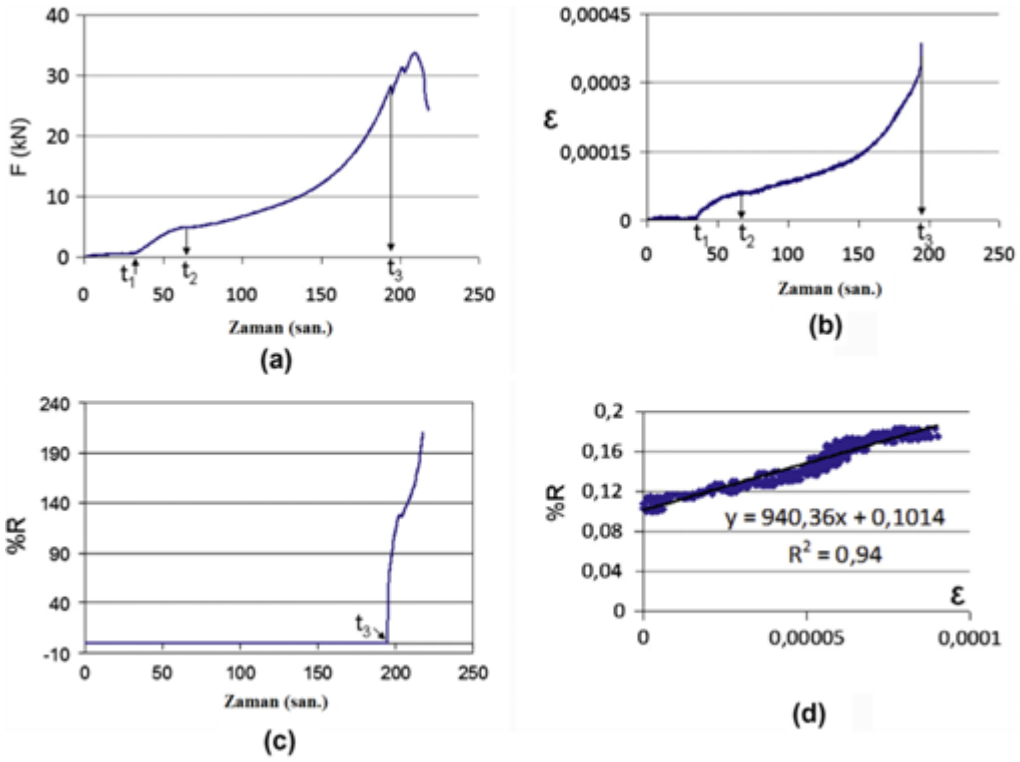
Şekil 3.38 MY1 Yarmada çekme testi (a) kuvvet-zaman grafiği (b) birim şekil değiştirme-zaman grafiği (c) %R-zaman grafiği (d) %R-birim şekil değiştirme grafiği (Teomete ve Kocyigit, 2013).

Şekil 3.38(a)'da görüldüğü gibi t_1 anına kadar kuvvet artar. t_1 anına kadar geçen sürede silindirik yükleme başlığı ve numune arasındaki ahşap çıtalar ezilir. Bu andan (t_1) sonra ahşap çıtalar pekleşir ve numune deforme olmaya başlar. Yük-zaman grafiğinin eğimi artar. t_2 anına kadar, gerinim pulundan ölçülen, yatay yöndeki çekme birim şekil değiştirmesi yükselir (Şekil 3.38(b)). t_2 anında, yükte ani bir düşüşe sebep olan çatlak numune kesiti boyunca ilerlemeye başlar (Şekil 3.38(a)). t_2. saniyeden sonra çatlak metal gerinim pulunu yırtar ve gerinim pulu sinyali kesilir (Şekil 3.38(b)). t_2 anında elektriksel direncin yüzdece değişiminde (%R) büyük bir sıçrama olur (Teomete ve Kocyigit, 2013).

Birim şekil değiştirme etkisiyle t_2 anına kadar da %R'da değişmeler olur ancak Şekil 3.38(c)'nin ordinat skalası nedeniyle grafikte görülemez (Şekil 3.38(c)). Lifsiz referans karışımı MY1'e ait %R-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 3.38(d)'de görüldüğü gibi elde edilir. Çatlak başlamadan önce çekme birim şekil değiştirmesi ve %R güçlü bir doğrusal ilişki göstermiştir (Teomete ve Kocyigit, 2013).

Lifsiz karışım MY1'in duyarlılık değeri (K) 3, doğrusallığı (LE) %15 olarak ölçülmüştür. Deney verisine uydurulmuş en ideal doğrunun korelasyon katsayısı (R^2) 0,92'dir (Şekil 3.38(d)).

Hacimce %0,2 oranda ve 6 mm boyunda çelik lifler içeren SY1'e ait yarmada çekme testi sonuçları Şekil 3.39 (a), (b), (c) ve (d)'de verilmiştir (Teomete ve Kocyigit, 2013).



Şekil 3.39 SY1 Yarmada çekme testi (a) kuvvet-zaman grafiği (b) Birim şekil değiştirme-zaman grafiği (c) %R-zaman grafiği (d) %R-birim şekil değiştirme grafiği (Teomete ve Kocyigit, 2013).

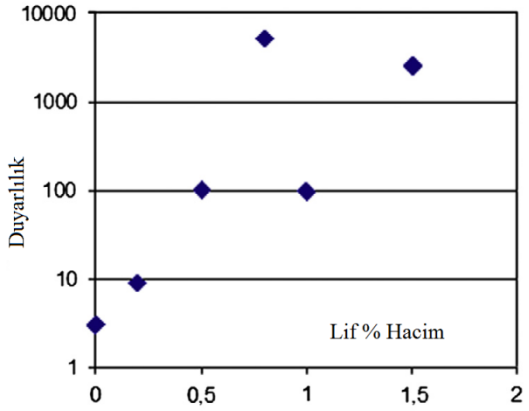
t_1 anına kadar ahşap çıtalar ezilerek pekleşmeye başlar (Şekil 3.39(a)). t_1 ve t_2. saniyeler arasında numuneye kıyasla daha yumuşak olan ahşap çıtalar daha fazla deforme olur. t_2. saniyeden sonra çıtalar pekleşir ve numune deforme olmaya başlar. Yük-zaman grafiğinin eğimi artar (Şekil 3.39(a)) (Teomete ve Kocyigit, 2013).

Numune kesiti boyunca düşey bir çatlak oluşur, t_3 anında yükte ani bir düşüş olur. Şekil 3.39(b)'den görüleceği üzere t_3 anından sonra metal birim şekil değiştirme ölçer (gerinim pulu) sinyal vermez. Düşey çatlak ilerleyerek gerinim pulunu yırtmıştır.

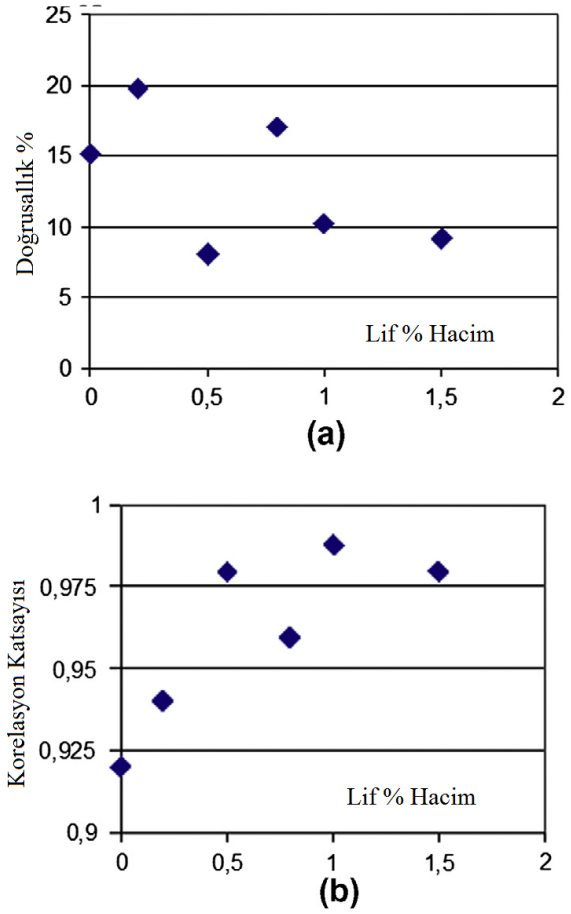
Çekme birim şekil değiştirmesi etkisiyle %R'da t_3 anına kadar değişmeler ölçülmüştür. Şekil 3.39(c)'nin ordinat ölçeğinin büyük olması sebebiyle t_3 anına kadar %R'daki değişim görülemez. Şekil 3.39(d)'de %R-çekme birim şekil değiştirmesi güçlü bir doğrusal ilişki vermiştir (Teomete ve Kocyigit, 2013).

Hacimce %0,2 oranda ve 6 mm boyunda çelik lifler içeren SY1'e ait duyarlılık değeri (K) 9, doğrusallığı (LE) %20 olarak ölçülmüştür. Deney verisine uydurulmuş en ideal doğrunun korelasyon katsayısı (R^2) 0,94'dür (Şekil 3.39(d)).

Perkolasyon oranı (%1), liflerin malzeme içinde direkt temas ile iletim hattı oluşturmaya başladığı en düşük hacimsel orandır. Perkolasyon sınırından sonra hacim olarak yüzdece lif miktarı arttıkça çekme birim şekil değiştirmesi ile kırılan elektron iletim hattı oranı azalır (Teomete ve Kocyigit, 2013). %R'daki değişim azalır, duyarlılık fazla değişmez ve yakınsar (Şekil 3.40). Aynı nedenle doğrusallık (LE) düşer ve yakınsar (Şekil 3.41(a)), korelasyon katsayısı (R^2) artar ve yakınsar (Şekil 3.41(b)). %R-birim şekil değiştirme ilişkisi daha güçlü bir doğrusal ilişki olur.



Şekil 3.40 Duyarlılık-Lif yüzdece hacim oranı (Teomete ve Kocyigit, 2013).



Şekil 3.41(a) Doğrusallık %-Lif yüzdece hacim oranı (b) R^2 - Lif yüzdece hacim oranı (Teomete ve Kocyigit, 2013).

3.9 ÇES'in Model Kolon İçinde Test Edilmesi

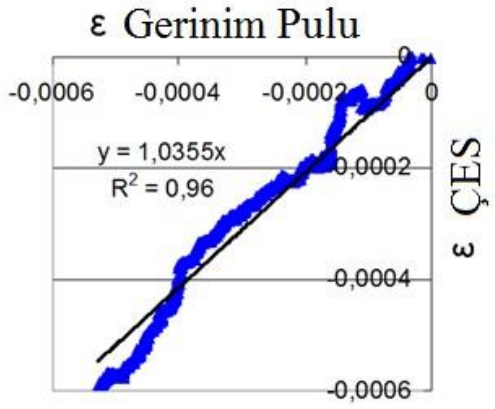
ÇES'in sensör parametrelerini belirlemek için yapılan basınç testleri sonuçlarına göre ÇES elektriksel direncinin yüzdece değişimi ile ÇES birim şekil değiştirmesi arasındaki Denklem 3.4 ile ifade edilir (Teomete ve Erdem, 2013).

$$\varepsilon = A \times \%R \tag{3.4}$$

Denklem 3.4'de ε ÇES ile ölçülen basınç birim şekil değiştirmesini, %R ÇES'in elektriksel direncindeki yüzdece değişimi, A ise ampirik bir sabiti temsil etmektedir. ÇES basınç testlerinde ortalama A=0,0003 değerini almaktadır (Teomete ve Erdem, 2013). Model kolon testlerinde ise bu değer 0,0005 iken gerinim pulları ile ÇES en yakın sonuçları vermişlerdir (Teomete ve diğer., 2014).

Bunun sebepleri; model kolon boyutlarının küçük olması, ÇES ile gerinim pullarının ölçüm noktası farklılıkları, ÇES'in basınç testleri ile model kolon testleri arasındaki farklılıklar ve birim şekil değiştirmenin ÇES'in kolon içinde bulunduğu bölge ile gerinim pullarının bulunduğu bölgelere göre farklılık göstermesi olarak sıralanabilir.

Şekil 3.42'de görüleceği üzere 50 kg/sn. yükleme hızında gerinim pulu sinyalleri ile ÇES birim şekil değiştirme değerleri uyumludur.



Şekil 3.42 Gerinim pulu ve ÇES ölçümleri basınç birim şekil değiştirme grafiği (Teomete ve diğer., 2014).

BÖLÜM DÖRT
SONUÇLAR VE YORUMLAR

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmuştur.

Bu çalışmada değerlendirilen çelik lifli 10, karbon lifli 20 ve lifsiz 1 toplamda 31 karışım grubunda her bir karışım için 3 adet 5 cm ebatlı küp numune döküldü. Basınç ile yarmada çekme testleri olmak üzere toplamda 186 adet mekanik test yapıldı.

Test sonuçlarının analizinden elde edilen duyarlılık, doğrusallık, limit birim şekil değiştirme ve korelasyon katsayısı gibi numunelerin karakteristik özelliklerinden her bir numuneye basınç ve yarmada çekme puanı tayin edildi.

Elektriksel direncin çekme birim şekil değiştirmesi ile ilişkisini anlamak üzere yarmada çekme testi ilk kez bu çalışma kapsamında yapıldı.

Ayrıca deney verilerinin stabilitesi, sinyal yapısının kalitesi, numunelerin kendi içlerinde tutarlılığı ve grafiklerin idealize duruma benzerlikleri incelendi.

Bu mekanik testlerde numunelerin elektriksel dirençlerindeki değişim ile basınç ve çekme birim şekil değiştirmeleri eş zamanlı olarak ölçüldü. Aralarındaki ilişkiler ve mekanizmalar aydınlatıldı.

Basınç birim şekil değiştirmesi ile oluşan lif kısalması, lif-lif, matris-lif ara yüzeylerinin temas alanının artması ve mikro boşlukların kapanması nedenleriyle elektriksel direncin düştüğü gözlemlendi.

Yarmada çekme testinde çekme birim şekil değiştirmesi kılcal boşluklar oluşturup lif-lif ve lif-matris temasını azaltarak elektriksel direnci arttırır. Elektron akışı için gereken temasın giderek azalması ve numunenin kırılması ile elektron transferinin tamamen durması elektriksel direncin değişiminde büyük sıçramalar meydana getirmiştir.

Yarmada çekme testlerinden elde edilen kuvvet-zaman, birim şekil değiştirme-zaman ve %R-zaman grafiklerinde test boyunca oluşan mekanizmalar açıklanmıştır. ÇES olarak belirlenen S4 karışımının basınç deneylerinden elde edilen basınç birim şekil değiştirme duyarlılığı 44, doğrusallığı ise %14 olarak kaydedilmiştir. Yarmada çekme testlerinden elde edilen sonuçlarda ise çekme birim şekil değiştirme duyarlılığı 42, doğrusallığı %16 ölçülmüştür.

Bu değerlerden ÇES'in birim şekil değiştirmeye duyarlılığının metal birim şekil değiştirme ölçerlerin duyarlılığına göre 22 kat daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

Bir sensor olarak ÇES ilk çalışmalarda bile tipik metal birim şekil değiştirme ölçerlerden daha hassas ve güvenilir sonuçlar verebileceğini göstermiştir.

Metal birim şekil değiştirme ölçerler yapının ya da elemanın yüzeyinden ölçüm alırlar. ÇES ise yapı elemanının içinden ve o elemana ait bir parça gibi ölçüm alabilmektedir.

Metal birim şekil değiştirme ölçerlerin dayanıklılığı düşüktür. Bu nedenle kullanım ömürleri kısadır. Yüksek maliyet gerektirirler. ÇES ise beton içinde agrega gibi davranması ve yine çimento esaslı oluşu sebebiyle daha uzun ömürlüdür.

Model kolon testlerinde ÇES ve gerinim pullarından alınan birim şekil değiştirme sinyalleri uyumludur. Model kolon testleri ÇES'in yapı elemanının içinden daha hassas ve güvenilir ölçüm yapabileceği konusunda yeni yapılacak çalışmalara ışık tutmaktadır.

KAYNAKLAR

Chiarello, M. ve Zinno, R. (2005). Electrical conductivity of self-monitoring CFRC. *Cement and Concrete Composites, 27,* 463-469.

Chung, D.D.L. (1998). Self-monitoring structural materials. *Materials Science and Engineering,* 57-78.

Chung, D.D.L. (2000a). Cement reinforced with short carbon fibers a multi functional material. *Composites Part B: Engineering, 31,* 511-526.

Chung, D.D.L. (2000b). Cement-matrix composites for smart structures. *Smart Materials and Structures,* 9-389

Chung, D.D.L. (2001). Cement-based electronics. *Journal of Electroceramics, 6* (1) 75-88.

Chung, D.D.L. (2001). Review functional properties of cement–matrix composites. *Journal of Materials Science, 36,* 1315-1324.

Chung, D.D.L. (2002). Piezoresistive cement-based materials for strain sensing. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 13,* 599-609

Fu, X. ve Chung, D.D.L. (1997). Effect of curing age on the self-monitoring behavior of carbon fiber reinforced mortar. *Cement and Concrete Research, 27* (9), 1313-1318.

Fu, X., Ma, E., Chung, D.D.L. ve Anderson, W.A. (1997). Self-monitoring in carbon fiber reinforced mortar by reactance measurement. *Cement and Concrete Research, 27* (6), 845-852.

Han, B., Guan, X. ve Ou, J. (2007). Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors. *Sensors and Actuators A, 135*, 360-369.

Han, B., Zhang, K., Yu, X., Kwon, E. ve Ou, J. (2011). Nickel particle based self-sensing pavement for vehicle detection. *Measurement, 44*, 1645-1650.

Li, H., Xiao, H. ve Ou, J. (2006). Effect of compressive strain on electrical resistivity of carbon black filled cement–based composites. *Cement and Concrete Composites,28*, 824-828.

Li, H., Xiao, H. ve Ou, J. (2007). Effect of temperature on electrical property of carbon black-filled cement-based composites. *3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure,* Vancouver, Canada.

Li, H., Xiao, H. ve Ou, J. (2008). Electrical property of cement-based composites filled with carbon black under long-term wet and loading condition. *Composites Science and Technology, 68*, 2114-2119.

Reza, F., Batson, G.B., Yamamuro, J.A. ve Lee, J.S. (2003). Resistance changes during compression of carbon fiber cement composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *15* (5), 476-483.

Teomete, E. (2011). Lif katkılı çimentolu kompozitlerin birim deformasyon – elektriksel direnç ilişkisinin deneysel analizi. *17. Ulusal Mekanik Kongresi, Fırat Üniversitesi,* Elazığ.

Teomete, E. (2012). The effect of compressive strain on electrical resistivity of steel fiber reinforced cement based composites. *10th International Congress on Advances in Civil Engineering,* METU, Ankara, Turkey.

Teomete, E. (2013a). Relations of crack length and electrical resistance for smart cement based composites. *Cement Wapno Beton, 6,* 329-334.

Teomete, E. (2013b). Lif katkılı çimentolu kompozitlerin çatlak–elektriksel direnç ilişkisinin deneysel analizi. *18. Ulusal Mekanik Kongresi, Celal Bayar Üniversitesi,* Manisa.

Teomete, E. (2014). Transverse strain sensitivity of steel fiber reinforced cement composites tested by compression and split tensile tests. *Construction and Building Materials, 55,* 136–145.

Teomete, E. (2015a). Measurement of crack length sensitivity and strain sensitivity of carbon fiber reinforced cement matrix composites. *Measurement.* (Hakem değerlendirmesinde)

Teomete, E. (2015b). Crack length and tensile strain sensitivity of carbon fiber reinforced cement matrix composites determined by notched bending test and split tensile test, *Sensors and Actuators.* (Hakem değerlendirmesinde)

Teomete, E. ve Erdem, T.K. (2013). *Çimento esaslı sensör üretimi*. TUBITAK 110M221 Nolu Proje Raporu. İzmir.

Teomete, E. ve Erdem, T.K. (2011a). Cement based strain sensor: A step to smart concrete. *Cement Wapno Beton, 2,* 78-91.

Teomete, E. ve Erdem, T.K. (2011b). Metal lif katkılı çimentolu kompozitlerde basınç birim şekil değiştirme–elektriksel direnç ilişkisinin deneysel olarak araştırılması. *8. Ulusal Beton Kongresi,* İzmir.

Teomete, E. ve Kocyigit, O.I. (2015). Correlations between compressive strain and electrical resistance change for carbon fiber reinforced cement composites. *Cement Wapno Beton, 1,* 1-10.

Teomete, E. ve Kocyigit, O.I. (2013). Tensile strain sensitivity of steel fiber reinforced cement matrix composites tested by split tensile test. *Construction and Building Materials, 47,* 962–968.

Teomete, E., Kahraman, S. ve Celik, E. (2014). A new era in structural health monitoring: cement based sensors. *11th International Congress on Advances in Civil Engineering, ITU,* Istanbul, Turkey.

Teomete, E., Kahraman, S. ve Celik, E. (2015). Cement based strain sensor for structural health monitoring tested in model column. *Structural Engineering and Mechanics*. (Hakem değerlendirmesinde)

Xiao, H., Li, H. ve Ou, J. (2010). Modeling of piezoresistivity of carbon black filled cement-based composites under multi-axial strain. *Sensors and Actuators A: Physical, 160,* 87-93.

Zhu, S. ve Chung, D.D.L. (2007). Theory of piezoresistivity for strain sensing in carbon fiber reinforced cement under flexure. *Journal of Materials Science, 42,* 6222-6233.