DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NANO BOYUTTA MALZEME KATKILARININ BETONUN ELEKTRİKSEL DİRENÇ BİRİM ŞEKİL DEĞİŞTİRME İLİŞKİSİNE ETKİSİ

Erman DEMİRCİLİOĞLU

Aralık, 2017
İZMİR

NANO BOYUTTA MALZEME KATKILARININ BETONUN ELEKTRİKSEL DİRENÇ BİRİM ŞEKİL DEĞİŞTİRME İLİŞKİSİNE ETKİSİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı

Erman DEMİRCİLİOĞLU

Aralık, 2017
İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ERMAN DEMİRCİLİOĞLU, tarafından **DOÇ. DR. EGEMEN TEOMETE** yönetiminde hazırlanan "**NANO BOYUTTA MALZEME KATKILARININ BETONUN ELEKTRİKSEL DİRENÇ BİRİM ŞEKİL DEĞİŞTİRME İLİŞKİSİNE ETKİSİ**" başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Egemen TEOMETE

Yönetici

Prof. Dr. Mehmet Gaffaroğlu

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Mehmet Çevik

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Kadriye ERTEKİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, benden yardımlarını esirgemeyen, beni her konuda yönlendiren, motivasyonumu yüksek tutan, değerli hocam Doç.Dr.Egemen TEOMETE'ye verdiği desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarımda, malzeme deneylerini ve analizlerini yapabilmem için Elektronik Malzeme ve Uygulama Merkezi'indeki (EMUM) cihazları kullanmama olanak sağlayan başta Prof. Dr. Erdal Çelik hocama ve EMUM çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma Dokuz Eylül Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: 2016.KB.FEN.005 (YL, 2015130). DEÜ BAP birimine desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

TÜBİTAK'a 213M452 "Akıllı Beton Üretimi" başlıklı proje kapsamında verdikleri destek için teşekkür ederim.

Tezde kullanılan malzemeleri sağladıkları için Batıbeton Sanayi A.Ş, Batıçim Batı Anadolu Sanayi A.Ş, Sika Kimyasalları A.Ş, BASF Türk Kimya San. ve Tic Ltd Şti.'ne Teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasında, bana verdikleri manevi destekten dolayı Özge KÜKREK, Mehmet ÖZLER, Cihan KARADEMİR, Adar KARAGÖZ, Emre PULAT, Mücahit SARI, Orhan DİKİCİ, ve Erkin DEMİRCİLİOĞLU'na teşekkür ederim.

Erman DEMİRCİLİOĞLU

NANO BOYUTTA MALZEME KATKILARININ BETONUN ELEKTRİKSEL DİRENÇ BİRİM ŞEKİL DEĞİŞTİRME İLİŞKİSİNE ETKİSİ

ÖZ

Ülkemizde son yirmi yılda, depremlerin, malzeme bozulmalarının ve çevresel faktörlerin sebep olduğu hasarlar yüzünden yıkılan betonarme yapılar, binlerce insanın yaralanmasına veya hayatını kaybetmesine sebep olmuştur. Yapı sağlığının izlenmesi, can ve mal kaybının oluşmasını önlemek için hayati öneme sahiptir. Yapı sağlığını izlemek için kullanılan gerinim pulları noktasal ölçüm yaparlar, duyarlılıkları düşüktür, ömürleri kısadır, yüksek maliyetlidir. Bu çalışmada, kendi birim şekil değiştirmesini ve hasarını ölçen akıllı beton üretilmiştir. Akıllı betonu belirlemek için, farklı iletken malzemeleri farklı hacimsel oranlarda içeren karışımlar tasarlandı. Her karışımdan üretilen örneklere basınç testi uygulandı. Elektriksel direnç değişimi ile basınç birim şekil değiştirmesi arasındaki ilişki belirlendi. Basınç birim şekil değiştirmesine en duyarlı makro boyutta malzeme katkılı karışımlar ve nano boyutta malzeme katkılı karışımlar belirlendi. Bu karışımlara yarmada çekme testi ve eğilme testi uygulandı. Birim şekil değiştirmeye ve çatlak uzunluğuna en duyarlı karışım akıllı beton olarak seçildi. Akıllı beton farklı yükleme hızlarında test edildi. Sıcaklık ve nemin akıllı betona etkileri araştırıldı. Çevresel elektrot metodu ve alternatif akım etkileri araştırıldı. Elektrik akımının birim şekil değiştirmeye dik olduğu çapraz yüklemenin etkileri araştırıldı. Akıllı beton, elektriksel direnç değişimi ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir doğrusal ilişki verdi. Elektriksel direnç değişimi ile birim şekil değiştirme mekanizması, basınç, yarmada çekme ve çapraz yükleme testleri için tanımlandı. Gömülü elektrot metodunun çevresel elektrot metodundan daha iyi olduğu gözlemlendi. Akıllı beton doğru akım uygulamaları, alternatif akıma daha yüksek duyarlılık verdi. Uzun dönemde, birim şekil değiştirme duyarlılığı azaldı; uzun süre bekleyen ve nemi arttırmak için suya batırılmış akıllı beton, aynı yaş numunelerine göre daha yüksek bir birim şekil değiştirme duyarlılığına sahiptir. Büyük ölçekte akıllı beton numuneleri birim şekil değiştirme ile elektriksel direnç değişimi arasında güçlü

doğrusal ilişki gösterdi. Akıllı beton yapı sağlığını izlemek için prefabrik ve önemli yapılarda kullanılabilir.

Anahtar kelimeler: Akıllı malzeme, akıllı yapı, beton, elektrik direnci, birim şekil değiştirme, çatlak, sensör, nano boyutta malzeme katkıları, yapısal izleme

THE EFFECT OF NANO SIZED ADDITIVES TO THE ELECTRICAL RESISTANCE – STRAIN RELATIONSHIP OF CONCRETE

ABSTRACT

In our country, thousands of citizens were dead, injured and thousands of structures were either collapsed or became useless due to the earthquakes in the last 20 years. Earthquakes, material deteriorations and other factors adversely affect the structural health. Structural health monitoring is important to secure the lives and assets. The strain gages which are used in structural health monitoring can take pointwise measurement, for this reason they have to be used in vast numbers and they are costly; they are not durable. In this project, smart concrete which can sense its strain and damage was produced for structural health monitoring. In order to determine smart concrete, mixtures having different conductive fillers with different volume percent were designed. For every mixtures were tested with compression test. During the compression tests, electrical resistance change and strain measurements were conducted. The most sensitive mixtures which had nano and macro scaled conductive materials to strain were determined. Split tensile and bending test were applied to the samples. The most sensitive mixture to strain and crack length was determined as Smart Concrete. Smart concrete was tested with different load rates, effects of temperature and moisture were investigated, circumferential electrode and alternative current effects were investigated. Transverse loading effect which had strain perpendicular to electrical resistance change was investigated. Smart concrete had a strong linear relationship between strain and electrical resistance change. The electrical resistance increased when temperature increased. Strain sensitivity decreased with moisture. The mechanisms governing strain and electrical resistance change relationship for compression, split tensile and their transverse loadings were determined. Embedded electrode was found to be better than circumferential electrode. Direct current gives higher sensitivity with respect to alternative current. In the long term, strain sensitivity decreased; smart concrete which waited longtime and immersed in water to increase moisture, had a higher strain sensitivity with respect to same age samples. In the high scale compression and bending tests of smart concrete, strong

linear relationship between strain and electrical resistance change was found. Smart concrete will be used for structural health monitoring of prefabricated and important structures.

Keywords: Smart material, smart structure, concrete, electrical resistance, strain, crack, sensor, nano scaled additives, structural monitoring

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....ii

TEŞEKKÜR iii

ÖZ iv

ABSTRACT vi

ŞEKİLLER LİSTESİ xi

TABLOLAR LİSTESİ xvi

BÖLÜM BİR – GİRİŞ ……..……. 1

BÖLÜM İKİ - MATERYAL VE YÖNTEM…….…….…. 4

2.1 Kullanılan Malzemeler……....……4

2.1.1 Çimento……...……..……...……4

2.1.2 Agrega……..……6

2.1.3 Silis Dumanı……..……7

2.1.4 Akışkanlaştırıcı……..……..…….8

2.1.5 Çok Duvarlı Karbon Nano Tüp (ÇDKNT)…….....……..9

2.1.6 Grafen Nano Levha (GNL)……...……...……10

2.1.7 Nano Tufal Üretimi ve Tufal……..….11

2.1.8 Saf Su İçerisinde Nano Boyutta Malzeme Süspansiyonları……12

2.1.9. Çelik Lif……...…..…….13

2.1.10 Bakır Toz……..…...……...…..14

2.1.11 Pirinç Lif……..…….……15

2.1.12 Pirinç Toz……..……..…..……16

2.1.13 Kömür……...…….17
2.1.14 Bakır Ağ Elektrot……...……..……..19
2.1.15 Saf Su…….....……..……20
2.2 Yöntem…….……...20
2.2.1 Karışımların Tasarlanması…...……...……..…….……..20
2.2.2 Karışımların Hazırlanması ve Basınç Testi……...…….…….24
2.2.3 Yarmada Çekme Testi……..……...……29
2.2.4 Eğilme Testi……..…...…..……...……31
2.2.5 Farklı Yükleme Hızlarında Akıllı Betonun Test Edilmesi…….…33
2.2.6 Sıcaklık ve Nemin Akıllı Betona Etkilerinin Araştırılması…….....…33
2.2.7 Çapraz Yüklemenin Akıllı Betona Etkilerinin Araştırılması……...……36
2.2.8 Akıllı Betonun Çevresel Elektrot Yöntemi ile Test Edilmesi…….……39
2.2.9 Akıllı Betonun Alternatif Akım ile Test Edilmesi……...……40
2.2.10 Aktif madde etkisinin araştırılması…...…….……41
2.2.11 Büyük Ölçekli Akıllı Betonun Basınç Testi……...…….……..41
2.2.12 Büyük Ölçekli Akıllı Betonun Eğilme Testi…….....……43
2.2.13 Akıllı Betonun Tekrarlı Yükler ile Test Edilmesi…….....48

BÖLÜM ÜÇ - BULGULAR VE TARTIŞMA……...…….49

3.1 Basınç Testi Sonuçları……...……...…49
3.2 Yarmada Çekme Testi Sonuçları……...……..……55
3.3 Eğilme Testi Sonuçları……..…….……58
3.4 Akıllı Betonun Seçilmesi……...……..……61
3.5 Akıllı Betonun Farklı Yükleme Hızlarında Test Edilmesi Sonuçları…….....…61
3.6 Sıcaklık ve Nemin Akıllı Betona Etkilerinin Sonuçları……..……....62
3.7 Çapraz Yüklemenin Akıllı Betona Etkilerinin Araştırılması Sonuçları…….…65

3.8 Akıllı Betonun Çevresel Elektrot ile Test Edilmesi Sonuçları……...…….69
3.9 Alternatif Akım ile Akıllı Betonun Test Edilmesi Sonuçları…….…..……70
3.10 Aktif Madde Etkisinin Araştırılması Sonuçları…..……..….……...….71
3.11Akıllı Betonun Büyük Ölçekte Basınç Testi Sonuçları…….……..…..…….73
3.12 Büyük Ölçekli Akıllı Betonun Eğilme Testi Sonuçları……...…….….74
3.13 Akıllı Betonun Tekrarlı Yükler ile Testi Sonuçları……...……...…….78

BÖLÜM DÖRT - SONUÇLAR…….....……80

KAYNAKLAR…….……..……83

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 İri ve ince agregaların granülometri grafikleri……...…….……..6

Şekil 2.2 İnce agrega içindeki ince malzemenin tayini……...…….7

Şekil 2.3 BASF MasterROC MS 610 silis dumanı optik mikroskop görüntüleri a) 50x büyütme. b) 235x büyütme……..….....…….……..8

Şekil 2.3 BASF MasterROC MS 610 silis dumanı optik mikroskop görüntüleri a) 50x büyütme. b) 235x büyütme…….…….…..9

Şekil 2.5 Grafen nano levhanın 80000 kez büyütülmüş SEM fotoğrafı…….……11

Şekil 2.6 a) Tufal b) Öğütülmüş tufal……...…….…11

Şekil 2.7 XPS analiz tayfı……...……12

Şekil 2.8 Çelik lifin SEM görüntüleri a) Çelik lif b) kaplama c) kaplama ve lif kesiti d) lif kesiti……...……...…….…….13

Şekil 2.9 Çelik life ait EDS sonuçları a) yan yüzey b) kesit yüzeyi……..…….…….14

Şekil 2.10 Pirinç kaplı 6mm çelik lif a) 50 kat büyütme b) 235 kat büyütme…….…….14

Şekil 2.11 Bakır tozun optik mikroskop fotoğrafı 235 kat büyütülerek çekildi……...…15

Şekil 2.12 Pirinç lifin optik mikroskop fotoğrafları a)50 kat büyütme b)235 kat büyütme……...16

Şekil 2.13 Pirinç life ait optik mikroskop görüntüleri a) 50 kat büyütme b) 235 kat büyütme……..…….…….…….16

Şekil 2.14 Bakır ağ elektrot a) elektrot olarak kullanılmak üzere kesilmiş b) Çin'den gelen rulo hali…….…….……..19

Şekil 2.15 Bakır tele ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri a) kesit yüzeyi b) yan yüzeyi……...….…….……19

Şekil 2.16 Bakır ağ telinin EDS analiz sonucu……..…….……..20

Şekil 2.17 döküm yapılmak üzere hazırlanmış çelik kalıp……...……24

Şekil 2.18 Kullanılan mikser……...…….....…25

Şekil 2.19 Dispersiyon işlemi a) Saf su + Akışkanlaştırıcı 1500 rpm ile karıştırılırken b) Hassas tartı ile tartılmış nano malzeme (ÇDKNT ya da GNL). İki malzemede aynı renktedir. c) Saf su + Akışkanlaştırıcı karışımına yavaşça nano malzeme eklenirken d) Saf su + Akışkanlaştırıcı + nano malzeme karışımı ultrasonik banyoda bekletilirken…….…….….26

Şekil 2.20 a) Döküm sonrası yaş karışım b) kalıptan alınmış örnekler su içerisinde kür olurken…….....……...……..….26

Şekil 2.21 a) Örnek basınç testine hazır b) Devre şeması c) Ekipmanlar (1-doğru akım kaynağı, 2- National Instruments veri toplama cihazı, 3-PC, 4-National Instruments yüksek hassasiyetli dijital multimetre, arkada Shimadzu mekanik test cihazı)…….……..…….……27

Şekil 2.22 Yarmada çekme testi a) Devre şeması b) Örnek test anında c) Test sonrası, örnek gevrek bir şekilde ikiye ayrıldı……..…….…..……30

Şekil 2.23 Eğilme testi a) Devre şeması b) Ölçülen çatlak c) Örnek test edilirken…….32

Şekil 2.24 Örneklerdeki nemin kaybını önlemek için alüminyum bant ile kaplanmış.....33

Şekil 2.25 a) Örnek ısıtma tablası üzerinde test edilirken b) Ölçümde kullanılan devre şeması c) Deney sırasında kullanılan ekipmanlar (ön kısımda ısıtma tablası, arka solda DC güç kaynağı, arka ortada veri toplama sistemi, arka sağda PC kontrollü dijital multimetre(beyaz))…….…….. ……...……..34

Şekil 2.26 fırından çıkartılıp tartılan ve nemin sabit kalması için alüminyum folyo ile sarılan örneklerin soğutulması……..…….……..35

Şekil 2.27 a) Çift yönlü gerinim pulu b) Örnek çapraz basınç testinde c) Devre Şeması……..……..….37

Şekil 2.28 a) Örnek çapraz yarma testinde b) Devre şeması c) Test sonunda ikiye ayrılmış örnek……..…….……...…….…….38

Şekil 2.29 Çevresel elektrot metodu ile basınç testi a) 7,5cm boyutunda küp örnek b) 4*4*16cm^3 lük prizma örnek c) Devre şeması…….…….....39

Şekil 2.30 Alternatif akım ile basınç testi…….…….....…….40

Şekil 2.31 Akıllı beton karışımı ile 15*15*30cm^3 örnek dökümü a) Kalığ ve elektrotlar b) Döküm sonrası ……..……..……...….42

Şekil 2.32 15*15*30cm^3 akıllı beton basınç testi devre şeması……...……..42

Şekil 2.33 15*15*30 cm^3 akıllı beton basınç testi a) Gerinim pulu yapıştırılmış örnek b) Örnek pres içinde teste hazır c) Deney ekipmanları (soldan sağa, bilgisayar, veri toplama cihazı, DC güç kaynağı, önde sağda dijital multimetre(Beyaz), arka sağda Ele pres)……... ……..……..…..43

Şekil 2.34 Akıllı beton karışımı ile 15*15*75 cm^3 kiriş dökümü a) kalıp ve yerleştirilen elektrotlar b) akıllı beton kalıp içinde…….……..44

Şekil 2.35 15*15*75 kiriş eğilme deneyi a) Devre şeması b) Ölçüler…….……44

Şekil 2.37 15*30*150cm^3 akıllı beton kiriş dökümü a) Kalıp, yerleştirilen elektrotlar donatılar b) Kalıptan alınmış kiriş……..……...…….46

Şekil 2.38 15*30*150cm^3 akıllı beton kiriş deneyi a) Devre şeması b) Ölçüler……46

Şekil 2.39 15*30*150 cm^3 akıllı beton eğilme deneyi a) Kiriş testte b) Ekipmanlar…….47

Şekil 3.1 Hacimsel olarak %0,8 pirinç lif katkılı Br3 karışımının tipik bir birim şekil değiştirme – %R grafiği……....….54

Şekil 3.2 Hacimsel olarak %0,046 ÇDKNT katkılı Cn2 karışımının tipik birim şekil değiştirme – %R grafiği……...……...54

Şekil 3.3 En iyi beş karışımın % hacimsel nano malzeme katkı oranı – duyarlılık (K) grafiği……...……...55

Şekil 3.4 Yarmada Çekme testi %R – birim şekil değiştirme ilişkisi. BrY3 karışımı, %0,8 oranında pirinç lif içerir……..……..58

Şekil 3.5 %0,046 hacimsel olarak GNL katkılı karışımın tipik %R – birim şekil değiştirme grafiği……..…58

Şekil 3.6 %0,046 hacimsel grafen nano levha katkılı örneğin (Gne2) tipik bir çatlak uzunluğu - %R grafiği…….….60

Şekil 3.7 %0,8 hacimsel pirinç lif katkı oranına sahip tipik bir Bre3 örneğinin çatlak uzunluğu - %R grafiği……..…60

Şekil 3.8 Akıllı betonun farklı yükleme hızlarındaki sonuçları a) Yükleme hızı – K grafiği b) Yükleme hızı – LE grafiği c) Yükleme hızı – R^2 grafiği d) Yükleme hızı – Maksimum birim şekil değiştirme grafiği……...62

Şekil 3.9 Akıllı betonun elektriksel direncinin sıcaklık ile değişim grafiği…...……..….63

Şekil 3.10 Nemin akıllı betona etkisinin araştırılması, 90^{o}C etüv zamanı ile a) Nem kaybı b) Duyarlılık (K) c) Doğrusallık (LE) d) Korelasyon (R^2) değişimleri…….64

Şekil 3.11 a) Elektriksel direnç – etüvde bekleme süresi grafiği b) Elektriksel direnç – %nem içeriği grafiği……...…….65

Şekil 3.12 Çapraz yükleme basınç deneyi a) Zaman - birim şekil değiştirme grafiği b) Zaman – elektrik direnç grafiği……66

Şekil 3.13 Çapraz yükleme basınç deneyi düşey ve yatay birim şekil değiştirme - %R grafiği……...……...66

Şekil 3.14 Çapraz yükleme basınç düşey birim şekil değiştirme – %R grafiği.…….67

Şekil 3.15 Çapraz yarmada çekme deneyinde, zaman – birim şekil değiştirme grafiği……...……..….68

Şekil 3.16 Çapraz yarmada çekme deneyinde, zaman – elektriksel direnç grafiği……...……..…68

Şekil 3.17 Çapraz yarmada çekme deneyinde yatay ve düşey birim şekil değiştirme - %R grafiği……..……..….69

Şekil 3.18 Çapraz yarmada çekme deneyinde yatay birim şekil değiştirme - %R grafiği……..……...69

Şekil 3.19 Alternatif akım ile tipik bir akıllı beton örneğinin Basınç birim şekil değiştirme – Yüzde elektriksel direnç değişimi %R grafiği……..…….……71

Şekil 3.20 15*15*30cm^3 kolonun basınç testi birim şekil değiştirme – elektriksel direnç değişimi grafiği a) Birinci örnek c) İkinci Örnek c) Deney sonucunda kırılan örnek……..…….74

Şekil 3.21 15*15*75cm^3 boyutlarındaki kirişin eğilme deneylerinden elde edilen elektriksel direnç değişimi – zaman grafiği a) %R1 b) %R2…….……..75

Şekil 3.22 15*15*75cm^3 boyutundaki kirişin eğilme deneyinden elde edilen elektriksel direnç değişimi – birim şekil değiştirme grafiği a) %R1 – kiriş üstünden (basınç bölgesinden) ölçülen birim şekil değiştirme grafiği b) %R2 – kiriş altından (çekme bölgesinden) ölçülen birim şekil değiştirme grafiği……..…….....76

Şekil 3.23 Deney sonrası kırılan 15*15*75cm3 kiriş örnek…….……76

Şekil 3.24 15*30*150cm^3 kiriş örneğin eğilme testi grafikleri a) Zaman - %R b) Kiriş üstünde ölçülen basınç birim şekil değiştirme - %R1 grafiği c) Kiriş altından ölçülen çekme birim şekil değiştirme - %R2 grafiği……..……...…..77

Şekil 3.25 15*30*150cm^3 örneğinde eğilme deneyi sonunda oluşan çatlak……...….78

Şekil 3.26 Birim şekil değiştirme – elektriksel direnç değişimi – zaman grafiği…….…79

Şekil 3.27 birim şekil değiştirme - %R ilişkisi……....79

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Batıçim Cem II 42,5R çimentosu özellikleri..... 5

Tablo 2.2 Agrega özellikleri.....7

Tablo 2.3 BASF MasterROC MS 610 silis dumanı teknik özellikleri (üreticiden alındı)....8

Tablo 2.4 Çok duvarlı karbon nano tüp karakteristik özellikleri (Üreticiden alındı.).....10

Tablo 2.5 Grafen nano levhanın karakteristik özellikleri (Üreticiden alındı).....10

Tablo 2.6 Nanotufal'in XPS analiz verileri. (ThermoFisher K-alpha cihazı ile yapıldı.)..12

Tablo 2.7 Pirinç lifin kimyasal analiz sonucu.....15

Tablo 2.8 Kömürün fiziksel özellikleri.....18

Tablo 2.9 karışımlardaki iletken malzemeler ve % katkı miktarları.....23

Tablo 3.1 Basınç testi ile en iyi 20 karışım. Gri renk ile boyalı karışımlar makro malzeme katkılı, italik ve kalın yazılmış karışımlar nano malzeme katkılı en iyi karışımlardır.....51

Tablo 3.2 Yarmada çekme testi sonuçları.....57

Tablo 3.3 Eğilme testi sonuçları.....59

Tablo 3.4 Batırılmış ve çevresel elektrot karşılaştırılması.....70

Tablo 3.5 doğru akım ve alternatif akım basınç deneyi sonuçları.....71

Tablo 3.6 Genç ve yaşlı örneklerden elde edilen sonuçlar.....73

BÖLÜM BİR
GİRİŞ

Dünyadaki yapıların büyük bir bölümü beton kullanılarak inşa edilmiştir. Bu beton yapılar, depremler, malzeme bozulmaları ve diğer çevresel faktörler sebebiyle hasar görmekte hatta yıkılmaktadır. Ülkemizde, son yirmi yılda, bu sebeplerden dolayı binlerce insan ölmüş ya da yaralanmış, büyük maddi kayıplar oluşmuştur. Amerika Birleşim Devletlerinde yapılan araştırmalar sonucu beton yapıların ömürleri dolmadan yıpranmıştır. Ayrıca betonarme alt yapıların ve köprülerin %30'u güvenilirliğini kaybetmiştir (Reza ve diğer., 2003). Yapı sağlığının izlenmesi can kayıplarının ve maddi kayıpların oluşmasını önlemek için hayati önem taşımaktadır. Yapı sağlığını izlemede kullanılan birim şekil değiştirme ölçen gerinim pulları noktasal ölçüm yapar, dayanıklılıkları düşüktür, yüksek sayıda kullanılmak zorunda olduklarında maliyetlidir, yüzeyden ölçüm alırlar, dayanıksız oldukları için uzun süreli kullanılamazlar (Chung DDL., 2001). Akıllı beton yapı sağlığının izlenmesini kolaylaştıracak ve yaygınlaştıracak, can ve mal güvenliğini arttıracaktır.

Çimentolu kompozitlere karbon lif katkılanması elektriksel direncin düşmesine sebep olur, yük altında elektriksel direnç etkilenir (Chung 1998; Fu ve diğ. 1997; Fu ve Chung 1997; Teomete ve Erdem 2011; Teomete ve Kocyigit 2013). Çimentolu kompozitlerde elektriksel ölçümler için çift elektrot metodu ve dört elektrot metodu kullanılmaktadır. Çift elektrot metodunda uygulanan elektriksel gerilim ve ölçümler aynı elektrotlardan yapılır. Dört elektrot metodundan dış iki elektrottan elektriksel gerilim uygulanırken, iç iki elektrottan elektriksel ölçümler yapılır. Örnek kesit alanı ve elektrotlar arasındaki mesafe dört elektrot metodunda ölçümleri etkilemez (Chiarello ve Zinno 2005; Han ve diğ. 2007). Bu çalışmada, dört elektrot metodu kullanıldı.

Akıllı betonun testlerinde batırılmış elektrot metodu ve çevresel elektrot metodu kullanıldı. Batırılmış elektrot metodunda, iletken bir levha ya da iletken ağ döküm sırasında karışıma batırılarak kullanılır. Çevresel elektrot metodunda ise iletken bir bant, iletken boya ya da iletken bir malzeme betonun çevresine sarılarak uygulanır.

(Reza ve diğ. 2003; Reza ve diğ. 2004; Chen ve Liu 2008; Li ve diğ. 2006; Li ve diğ. 2008). Bu çalışmada çevresel elektrot metodunda iletken bakır bant, batırılmış elektrot metodunda ise saf bakır örgü elektrot olarak kullanılmıştır.

Karbon lifli çimentolu kompozitlerin elektriksel direnci, hasar ile değiştiği bildirilse de (Chung 2000), nano katkılı beton için elektriksel direnç ile çatlak boyunun eş zamanlı ölçümü ilk defa bu çalışmada yapılmıştır.

Piezorezistif etki ile çalışan çimento esaslı kompozitler, yol kaplaması altına yerleştirilerek üzerinden geçen araçları hissetmiştir (Han ve diğ. 2011). Baryum titanitli çimentolu kompozitlerin dielektrik, ferroelektrik ve piezoelektrik özellikleri araştırılmıştır (Rianyoi 2011). Çimento matrisli piezoelektrik kompozitlerin, düşük frekanslı mekanik yükler altındaki davranışı incelenmiştir (Li ve diğ. 2001).

Çimento matrisi içerisinde katkı malzemesi olarak kullanılan lifin, dağılımı, konumu, topaklanması ve ayrışması kompozit matrisin elektriksel empedansına etkileri araştırılmıştır (Woo ve diğ. 2007). Tek bir lifin çimento matrisinden sıyrılmasının kompozit matrisinin elektriksel empedansına etkisi araştırılmıştır (Torrents ve diğ. 2001b). Beton içerisindeki nemin elektriksel dirence etkisi sonlu elemanlar yöntemi ile çalışılmış ve nemin sınırı, bir elektriksel ölçümü ve suya doymuş ve doymamış beton özellikleri ile tahmin edilebilir bir yöntem geliştirilmiştir (Rajabipour ve diğ. 2005).

Bu çalışmada, kendi birim şekil değiştirmesini ve hasarını ölçebilen akıllı beton üretilmiştir. Gerinim pullarının gösterdiği zayıflıkların aşılmasında akıllı beton önemli bir mühendislik ürünüdür. Farklı hacimsel oranlarda nano ve makro boyutta farklı iletken malzemeler katkılanmış beton örneklere basınç, yarmada çekme ve eğilme testleri yaparak, birim şekil değiştirme ve çatlak uzunluğu ile elektriksel direnç değişimi ilişkilendirildi. Bu şekilde, birim şekil değiştirmeye ve çatlak uzunluğuna en duyarlı beton karışımı akıllı beton olarak belirlendi. Akıllı beton farklı yükleme hızlarında test edildi; sıcaklık ve nem etkileri araştırıldı; elektrik akımının birim şekil değiştirmeye dik olması durumunda duyarlılık araştırıldı; çevresel elektrot ve alternatif

akım ile test edildi; aktif maddelerin uzun dönem etkisi araştırıldı. Akıllı beton büyük ölçekte test edildi. Ayrıca bu çalışmada ilk defa nano malzeme katkılı betona basınç, yarmada çekme, ve eğilme testleri yapılmıştır.

BÖLÜM İKİ
MATERYAL VE YÖNTEM

Projede kullanılan malzemeler, analizler ve testlerde uygulanılan yöntemler bu bölümde anlatıldı.

2.1 Kullanılan Malzemeler

Projede kullanılan malzemeler ve özellikleri bu bölümde sunuldu.

2.1.1 Çimento

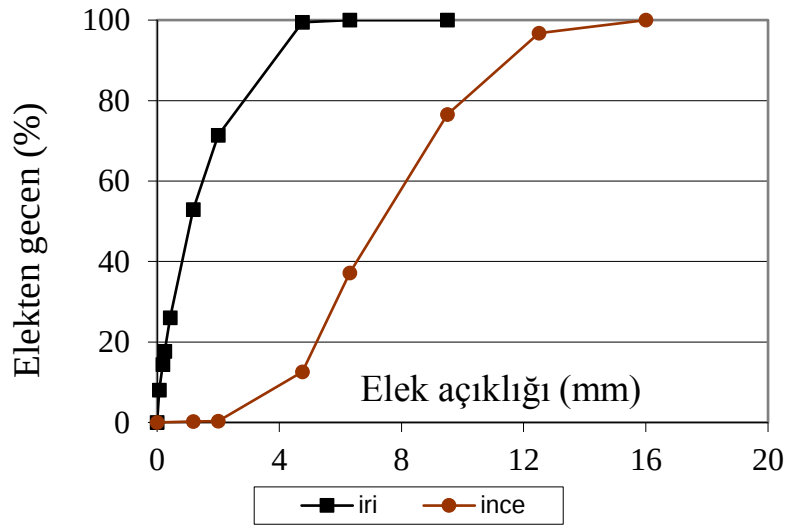
Batı Anadolu Çimento Sanayi A.Ş Cem II B-M (L-W) 42,5R çimentosu proje için hibe edilmiştir. Üretici tarafından elde edilen bilgilere göre bu tip çimentonun prefabrik yapı imalatında sık kullanıldığı bildirilmiştir. Tablo 2.1'de çimentonun özellikleri sunuldu. Çimentonun birim hacim ağırlığı 2970kg/m^3 tür.

Tablo 2.1 Batıçim Cem II 42,5R çimentosu özellikleri

KİMYASAL ÖZELLİKLERİ											
ÖZELLİK	**DENEY**	**Ts En 197-1**	**SONUÇ**	**BR**	**ÖB**	**ÖZELLİK**	**DENEY**	**Ts En 197-1**	**SONUÇ**	**BR**	**ÖB**
Kızdırma Kaybı	TS EN 196-2	-	4,62	%	-	CaO	XRF	-	53,68	%	-
Klörür (Cl)	TS EN 196-2	≤0,1	0,0091	%	-	SiO_2	XRF	-	23,69	%	-
SO_3	TS EN 196-2	≤4,0	3,37	%	-	Al_2O_3	XRF	-	8,81	%	-
F.CaO	K.K.T.53	-	1,55	%	-	Fe_2O_3	XRF	-	3,02	%	-
Toplam Katkı/L	TS EN 196-4	21≥ B≤35	33,53	%	-	MgO	XRF	-	1,35	%	-
Toplam Alkali	XRF	-	0,93	%	-	Na_2O	XRF	-	0,27	%	-
						K_2O	XRF	-	1,01	%	-
FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ											
90µ incelik	TS EN 196-6	-	0,2	%	-	Yoğunluk	TS EN 196-6	-	2,97	cm^3	-
32µ incelik	TSEN 196-6	-	12,2	%	-	Özzgül Yüzey	TS EN 196-6	-	4607	cm2	-
DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİ											
Priz Başlangıcı	TS EN 196-3	>60	175	dk	-	Erken Gün (2gün	TS EN 196-1	20	25,2	Mpa	-
Priz Biriş	TS EN 196-3		225	dk	-	STD. Gün (28)	TS EN 196-1	≥42,5 ≤62,5	52,1	MPa	-
Hacim Gen.	TS EN 196-3	<10	1,5	mm	-						-

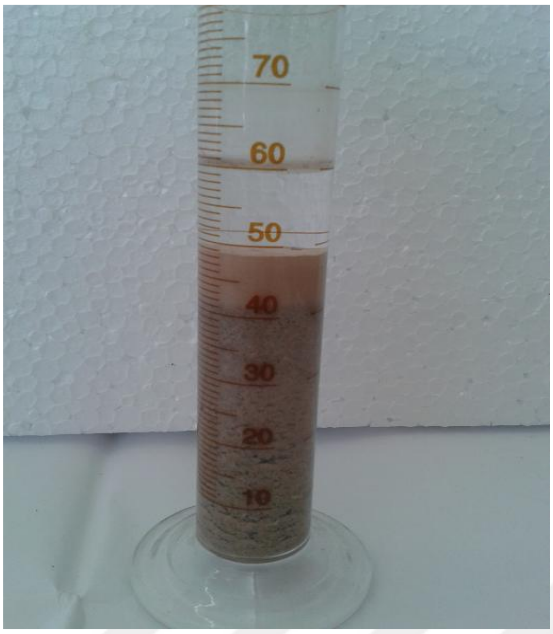
2.1.2 Agrega

Kırma taş ince ve iri agregalar Batı Beton tarafından hibe edilmiştir. Agregaların granülometri grafikleri elek analizlerinden elde edilen veriler ile oluşturuldu ve Şekil 2.1'de sunuldu. Beton karışımında %40 ince agrega, %60 iri agrega kullanıldı. İncelik ve kalınlık sınırları TS 802 Beton karışım tasarımı standartlarına göre yapıldı.



Şekil 2.1 İri ve ince agregaların granülometri grafikleri

İnce agrega içindeki ince malzemenin oranını belirlemek için, ölçekli cam kaba ince agrega konup, su eklendikten sonra karıştırıldı. İki gün dinlendirilen agrega Şekil 2.2'de sunuldu. 49 ml ince agreganın, 8 ml'si, %16'sı ince tozdan oluşmaktadır.



Şekil 2.2 İnce agrega içindeki ince malzemenin tayini (Kişisel arşiv, 2017)

İnce ve iri agreganın kuru yüzey doygun (KYD) özgül ağırlık, su içeriği ve su emme değerleri standart testler ile belirlendi (Tablo 2.2).

Tablo 2.2 Agrega özellikleri

Agrega	**Özgül ağırlık (Kuru yüzey doygun)**	**Su içeriği%**	**Su emme%**
İri (5-15 mm)	2,69	0,18	0,46
İnce (0-5 mm)	2,63	0,55	1,67

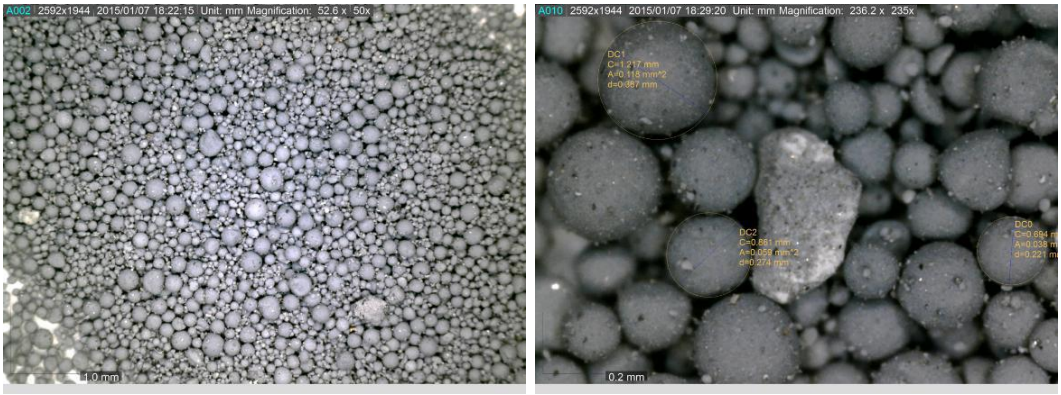
2.1.3 Silis Dumanı

MasterROC MS 610 silis dumanı Basf Türk Kimya Sanayi ve Ticaret Ltd. Sti. tarafından hibe edilmiştir. Silis dumanının yoğunluğu 650kg/m^3'tür. Klor içeriği %0,1'den düşüktür. Üreticiden alınan silis dumanının teknik özellikleri Tablo 2.3'te sunuldu.

Tablo 2.3 BASF MasterROC MS 610 silis dumanı teknik özellikleri (üreticiden alındı)

Malzemenin Yapısı	**Yoğunlaştırılmış Mikro-silika**
Renk	Gri
Yoğunluk	0,55-0,70 kg/lt
Klor miktarı (EN 480-10)	<0,1%
Blain (İncelik)	>15000 m2/kg
SiO_2 oranı	>%85
CaO oranı	<%1
SO_3 oranı	<%2
0,045 mm'den <Partikül oranı	<%40
Aktivite Endeksi	>%95
Özgül ağırlık	2300 kg/m^3

Silis dumanının optik mikroskop fotoğrafı Şekil 2.3'de farklı büyütme oranlarında sunuldu. Silis dumanı ortalama çapı 0.25 mm olan küresel danelerden oluşmaktadır.



Şekil 2.3 BASF MasterROC MS 610 silis dumanı optik mikroskop görüntüleri a) 50x büyütme. b) 235x büyütme (Kişisel arşiv, 2017)

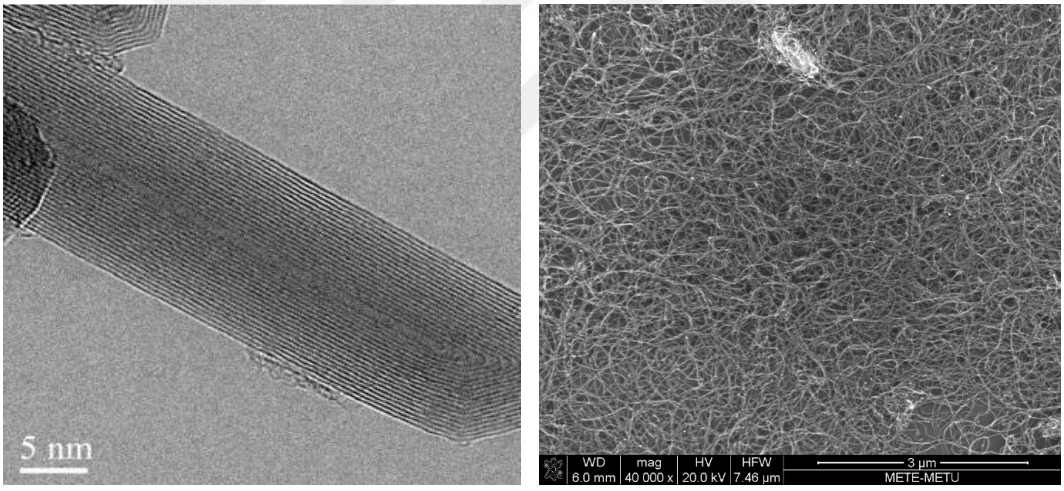
2.1.4 Akışkanlaştırıcı

Akışkanlaştırıcıyı, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş projemize hibe etmiştir. Karışımlarda modifiye palikarboksilat bazlı Sika Visco Crete Hightech 30 akışkanlaştırıcı

kullanıldı. Birim hacim ağırlığı 1,090 kg/lt, Ph değeri 3-5 arasında, donma noktası -9°C, suda çözünebilen, klor iyonu oranı maksimum %0,1'dir. TS-En 934-2'ye göre sodyum oksit maksimum %4'tür.

2.1.5 Çok Duvarlı Karbon Nano Tüp (ÇDKNT)

Çok duvarlı karbon nano tüp (ÇDKNT) Nanografi Nanoteknoloji Bilişim İmalat ve Danışmanlık Ltd. Şti.'den satın alınmıştır. Üretici firmadan alınan bilgilere göre, ÇDKNT katalitik karbon buharı birikimi metodu ile üretilmiştir. ÇDKNT'nin üretici firmadan alınan karakteristik özellikleri Tablo 2.4'te sunuldu. Üretici firmadan temin edilen ÇDKNT'nin taramalı tünellemeli elektron mikroskop (TEM) fotoğrafı Şekil 2.4a'da sunuldu. ÇDKNT'nin SEM (taramalı elektron mikroskobu) fotoğrafı Şekil 2.4b'de sunuldu.



Şekil 2.3. BASF MasterROC MS 610 silis dumanı optik mikroskop görüntüleri a) 50x büyütme. b) 235x büyütme (Kişisel arşiv, 2017)

Tablo 2.4 Çok duvarlı karbon nano tüp karakteristik özellikleri (Üreticiden alındı)

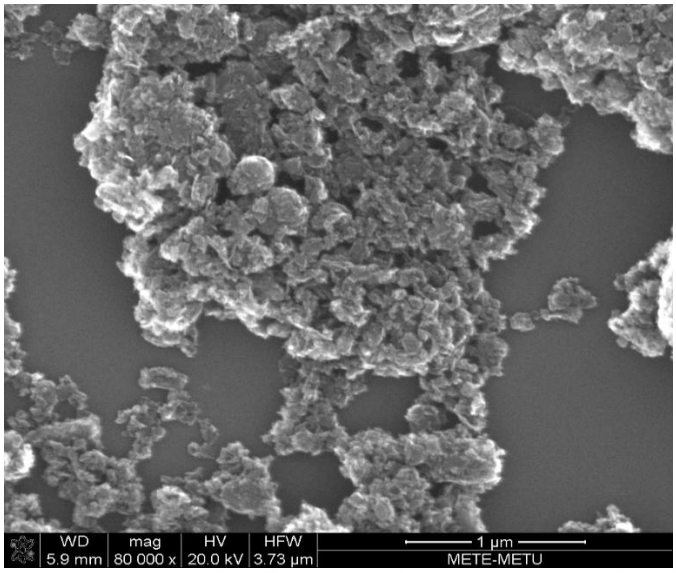
Özellikler	**Birimler**	**Değerler**	**Ölçüm metodu**
Ortalama çap	Nanometre	9,5	TEM
Ortalama uzunluk	Mikron	1,5	TEM
Karbon saflığı	%	90	TGA
Metal oksit	%	10	TGA
Birim hacim ağırlığı	g/cm^3	0,2-0,35	HRTEM
Yüzey alanı	m^2/g	250-300	BET

2.1.6 Grafen Nano Levha (GNL)

Grafen Nanografi Nanoteknoloji Bilişim İmalat ve Danışmanlık Ltd. Şti.'den satın alındı. Üreticiden alınan bilgilere göre, grafen, yüksek en-boy oranı ile çok tabakalı grafen levhalar yığınlarından oluşur. GNL, kompozitlerin çekme dayanımını, sertliğini, korozyon direncini, aşınmaya direncini arttırmak için kullanılabilir. GNL'nin karakteristik özellikleri Tablo 2.5'te sunuldu. GNL'nin SEM ile çekilmiş fotoğrafı Şekil 2.5'te sunuldu.

Tablo 2.5 Grafen nano levhanın karakteristik özellikleri (Üreticiden alındı)

Özellikler	Birimler	Değerler
Birim hacim ağırlığı	g/cm^3	0,2-0,4
Göreli yoğunluğu	g/cm^3	2-2,25
Ortalama levha çapı	mikron	<2
Levha kalınlığı	nm	5-8
Yüzey alanı	m^2/g	750
Saflığı	-	>99%



Şekil 2.5 Grafen nano levhanın 80000 kez büyütülmüş SEM fotoğrafı (Kişisel arşiv, 2017)

2.1.7 Nano Tufal Üretimi ve Tufal

Çelik üretimi sırasında tufal atığı ortaya çıkar. Tufal büyük oranda demir oksitten oluşur. İzmir Demir Çelik Sanayi tarafından hibe edilen tufal, çelik üretimi sırasında ortaya çıkan haddehane tufaldir. Tufal, pul – levha şeklindedir (Bkz. Şekil 2.6a). Nano tufal, 19 adet tungsten karbür bilye bulunan öğütücü makinanın 2 adet Tungsten karbür potalarına 52'şer gr tufal konularak 10 dk. sağa, 10 dk. sola ve tekrar 10 dk. sağa doğru 400 rpm ile çevrilerek öğütülüp, üretilmiştir (Bkz. Şekil 2.6b).



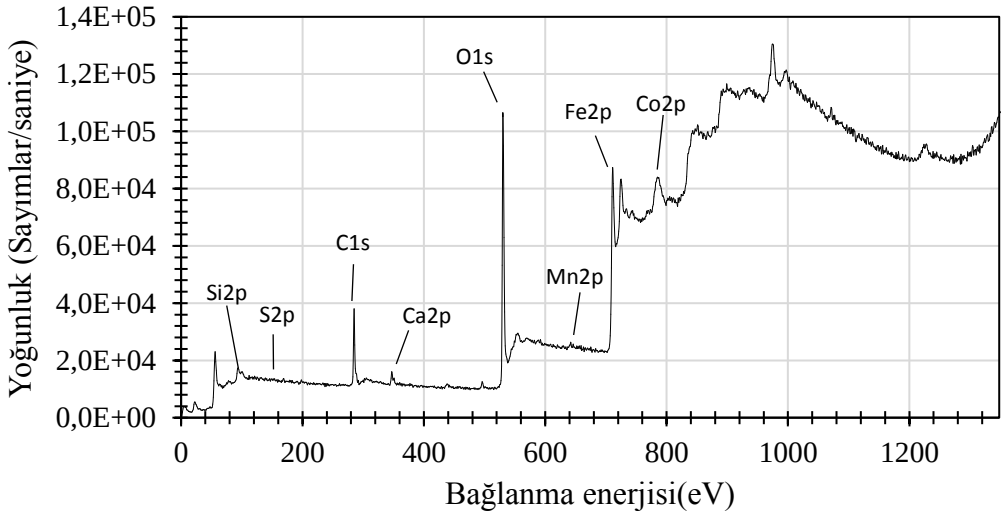
Şekil 2.6 a) Tufal b) Öğütülmüş tufal (Kişisel arşiv, 2017)

Nano tufal tozun parçacık boyut analizi Zetasizer nanoseries (Nano-ZS) cihazı ile yapıldı ve ortalama parçacık boyutu 637 nm ölçüldü. Nano tufal tozun yoğunluğu

2,42g/cm^3 ölçüldü. Nano tufal tozun element analiz (XPS) sonuçları Tablo 2.6 ve Şekil 2.7'de sunuldu.

Tablo 2.6 Nanotufal'in XPS analiz verileri (ThermoFisher K-alpha cihazı ile yapıldı)

Element İsimleri	Bağlanma Enerjisi eV	Yarı-Doruk Genişliği (FWHM) eV	Cihazın Bulunduğu eV	Atomik %
O 1s	530,48	1,995	296600,92	47,75
Fe 2p	711,05	4,276	353190,70	11,50
C 1s	285,12	2,690	78939,49	32,47
Ca 2p	347,26	3,085	21121,55	1,77
S 2p	168,82	2,715	6815,98	1,59
Si 2p	100,72	2,368	1367,64	0,63
Mn 2p	642,08	1,420	12540,86	0,46
Co 2p	785,00	11,333	129479,58	3,84



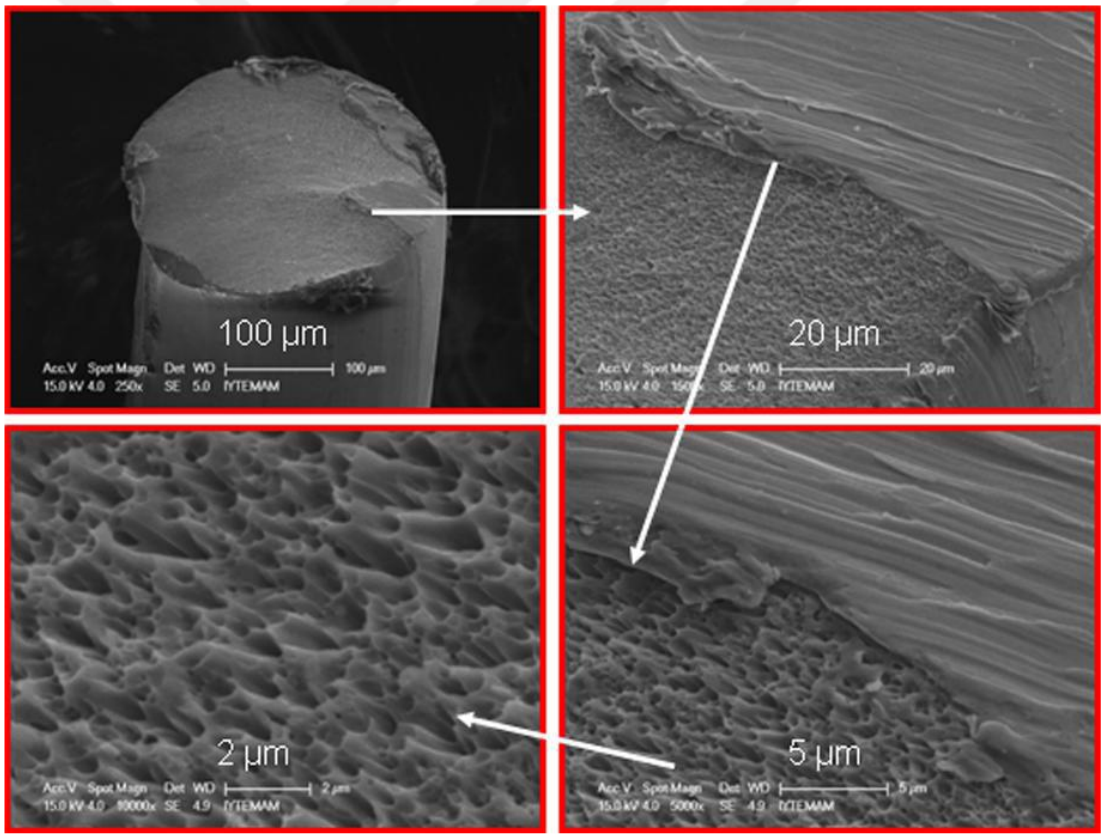
Şekil 2.7 XPS analiz tayfı

2.1.8 Saf Su İçerisinde Nano Boyutta Malzeme Süspansiyonları

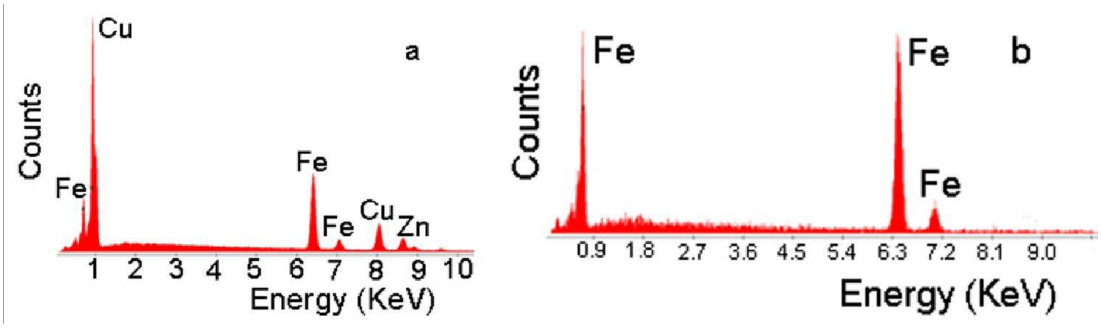
Tez çalışmalarında dört adet nano süspansiyon malzeme kullanıldı. Bunlar nano bakır süspansiyon, nano demir süspansiyon, nano çinko süspansiyon ve nano kompozit süspansiyon. Her süspansiyonda 6g/lt nano malzeme bulunmaktadır. Nano kompozit süspansiyonda nano demir, nano gümüş, nano bakır ve nano çinko malzemelerinin her birinden 1,5g/lt toplamda kompozit olarak 6g/lt bulunmaktadır.

2.1.9 Çelik Lif

Karışımlarda katkı malzemesi olarak kullanılan çelik teller Bekaert İzmir Çelik Kord Sanayi A.Ş. tarafından projemize hibe edilmiştir. Çelik lifleriz uzunluğu 13mm ve 6mm olmak üzere iki farklı boyda kullanıldı. Bu teller üretim artığı olduğu için düşük maliyete sahiptir. Beton içerisinde kullanılmaya uygundur. Çelik liflere ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 2.8'de verildi. Çelik lifin enerji dağılım spektrometre (EDS) sonuçları Şekil 2.9'da verildi. Çelik lifin ortalama çapı 0,25mm'dir. EDS sonuçlarına göre çelik lifin bakır alaşımı olan pirinç kaplı olduğu görülmektedir. Böylece, çelik lif korozyona karşı dirençlidir. Çelik lif birim hacim ağırlığı 7850kg/m^3'tür.



Şekil 2.8 Çelik lifin SEM görüntüleri a) Çelik lif b) kaplama c) kaplama ve lif kesiti d) lif kesiti (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 2.9 Çelik life ait EDS sonuçları a) yan yüzey b) kesit yüzeyi

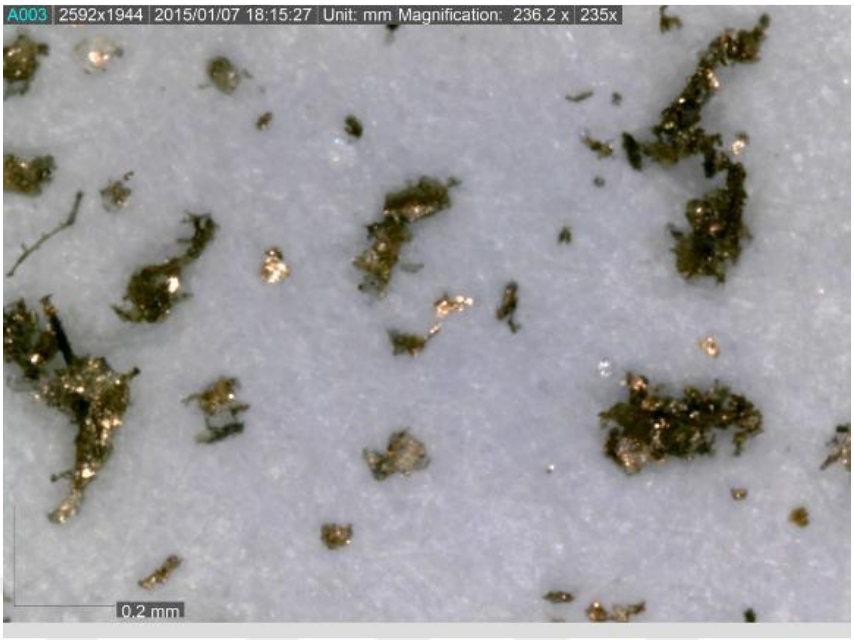
Çelik file ait optik mikroskop görüntüleri şekil 2.10'da sunuldu.



Şekil 2.10 Pirinç kaplı 6mm çelik lif a) 50 kat büyütme b) 235 kat büyütme (Kişisel arşiv, 2017)

2.1.10 Bakır Toz

Bakır toz malzeme BMS Metal Madencilik İmalat Geri Dönüşüm San. Ve Tıc. A.Ş'den temin edildi. Bakır toz optik mikroskop altında incelendi. Fotoğrafı Şekil 2.11'de sunuldu. Firma ürünü "bakır pudra" adı altında satmaktadır. Görüntüler incelendiğinde bakır pudranın levha-pul şeklindeki parçalardan oluştuğu ve bu parçaların 0,3mm den küçük olduğu görülmektedir.



Şekil 2.11 Bakır tozun optik mikroskop fotoğrafı 235 kat büyütülerek çekildi (Kişisel arşiv, 2017)

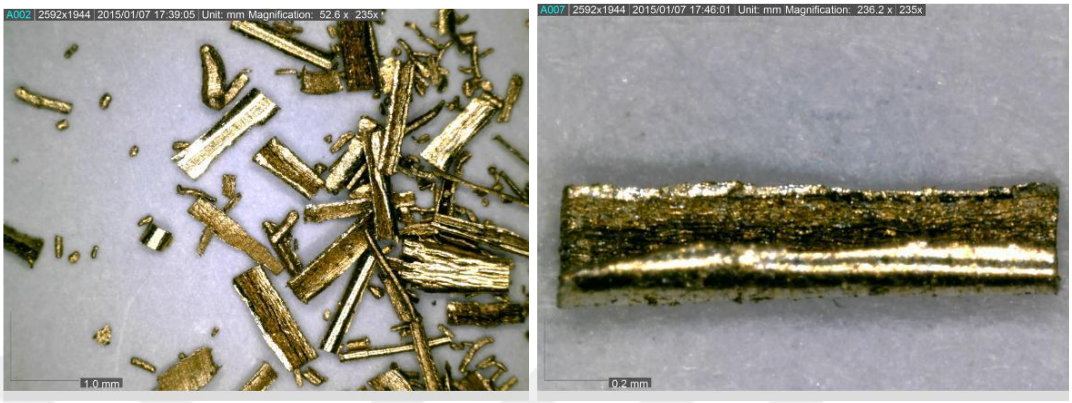
2.1.11 Pirinç Lif

Pirinç lif malzeme, BMS Metal Madencilik İmalat Geri Dönüşüm San. Ve Tıc. A.Ş'den temin edildi. Üreticiden alınan pirinç lifin kimyasal analizi Tablo 2.7'de sunuldu. Pirinç tozunun birim hacim ağırlığı 8730 kg/m^3'tür

Tablo 2.7 Pirinç lifin kimyasal analiz sonucu

Element	**%**
Kalay (Sn)	0,836
Fosfor (P)	0,0108
Nikel (Ni)	0,239
Bizmut (Bi)	0,00659
Bakır (Cu)	95,61
Kurşun (Pb)	2,45
Mangan (Mn)	0,0005
Silisyum (Si)	0,001
Sülfür (S)	0,00336
Çinko (Zn)	0,8236
Demir (Fe)	0,015
Aluminyum (Al)	0,0014
Antimon (Sb)	0,002

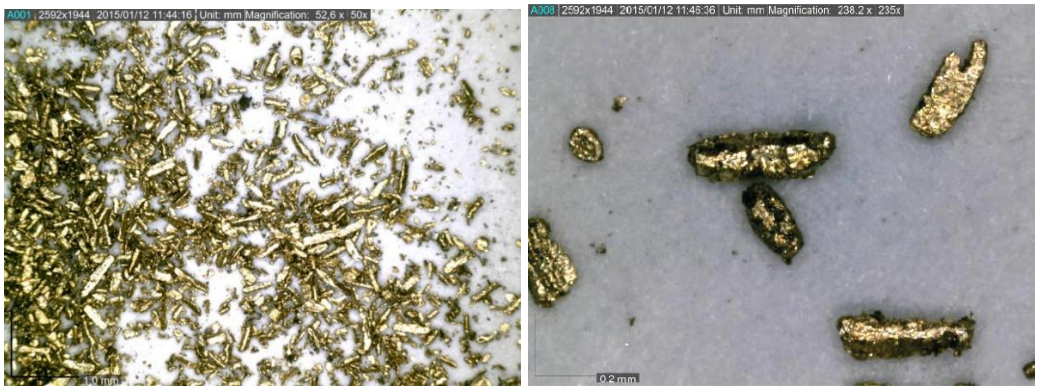
Pirinç lif optik mikroskop altında incelendi ve fotoğraflar Şekil 2.12'de sunuldu. Görüntüler incelendiğinde pirinç lifin silindirik levhalardan oluştuğu gözlemlendi. Ortalama tane boyutu 1,5mm ve ortalama çapı 0,5mm'dir.



Şekil 2.12 Pirinç lifin optik mikroskop fotoğrafları a)50 kat büyütme b)235 kat büyütme (Kişisel arşiv, 2017)

2.1.12 Pirinç Toz

Pirinç toz malzeme, BMS Metal Madencilik İmalat Geri Dönüşüm San. Ve Tıc. A.Ş'den temin edildi. Pirinç toz iletken optik mikroskop altında incelendi ve görüntüleri Şekil 2.13'te sunuldu. Ortalama uzunluklar 0,38mm, genişlikleri ise ortalama 0,11mm olarak tespit edildi. Pirinç tozunun birim hacim ağırlığı 8730 kg/m^3'tür



Şekil 2.13 Pirinç life ait optik mikroskop görüntüleri a) 50 kat büyütme b) 235 kat büyütme (Kişisel arşiv, 2017)

2.1.13 Kömür

Armutçuk üretimi 0-10 kömürü Türkiye Taş Kömürü Kurumu tarafından hibe edilmiştir. Kömürün dane çapı 0-10mm arasındadır (Şekil 3.16). Üreticiden alınan kömürün fiziksel özellikleri Tablo 2.8'de sunuldu.

Tablo 2.8 Kömürün fiziksel özellikleri

Rutubet	(orj.k.)		%	12±2
Kül	(orj.k.)		%	10±2
Uçucu Madde	(orj.k.)		%	29±1
Sabit Karbon	(orj.k.)		%	49±2
Üst Isı	(orj.k.)		Kcal/kg	6330±150
Alt Isı	(orj.k.)		Kcal/kg	6045±150
Kül	(k.k.)		%	11±2
Uçucu Madde	(k.k.)		%	34±1
Sabit Karbon	(k.k.)		%	55±2
Üst Isı	(k.k.)		Kcal/kg	7190±150
Alt Isı	(k.k.)		Kcal/kg	6950±150
Uçucu Madde	(k.k.k.)		%	38±1
Sabit Karbon	(k.k.k.)		%	62±1
Üst Isı	(k.k.k.)		Kcal/kg	8150
Karbon	(k.k.)	(C)	%	74-77
Hidrojen	(k.k.)	(H)	%	3,5-5,3
Toplam Kükürt	(k.k.)	(S)	%	max.0,9
Azot	(k.k.)	(N)	%	0,8-1,4
Oksijen	(k.k.)	(O)	%	7-9
Kül Erime		Min.	ºC	1270
Dilatasyon			%	-15
				-40
Gray-King				F-G
FSİ				2-4
ULUSLARARASI SINIFLANDIRMA (ISO)				
Kod No				622
Sınıf				VIA
Koklaşma				Orta
ASTM RANK SINIFLANDIRMASI				
Rank Skalası				63-145
Sınıf				II Bitümlü
Grup				hvAb

Kısaltmalar

(orj.k.) : Orijinal kömürde

(k.k) : Kuru kömürde

(k.k.k) : Kuru-külsüz kömürde

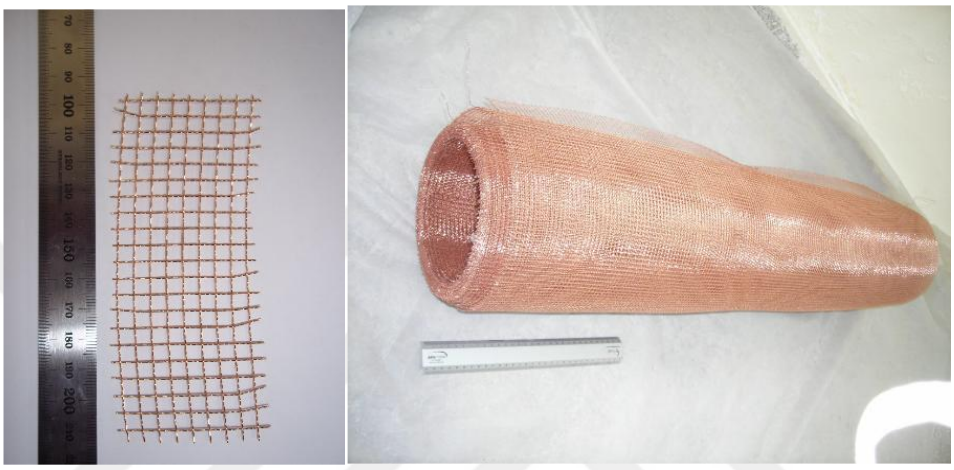
hvAb : Yüksek Uçuculu A Bitümlü kömür

hvBb : Yüksek Uçuculu B Bitümlü kömür

FSİ : Serbest Şişme İndeksi

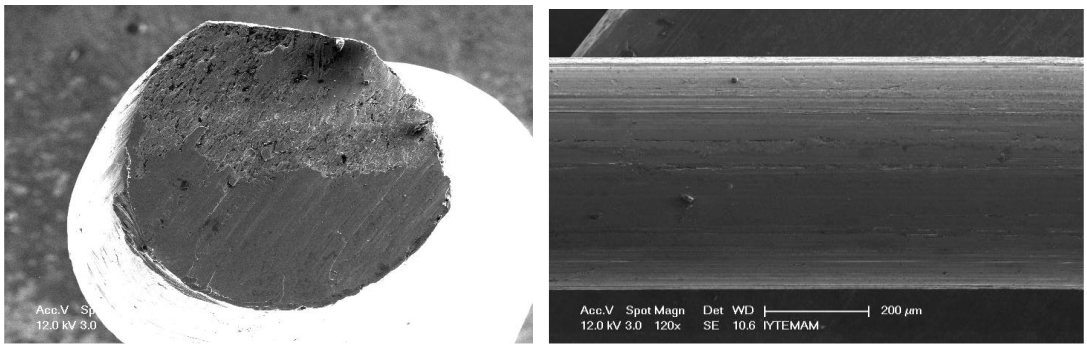
2.1.14 Bakır Ağ Elektrot

Saf bakır elektrot yüksek iletkenliği sebebiyle tasarlanan örneklerde elektrot olarak kullanılması için seçilmiştir. Türkiye'de imal edilmediği için Çin Halk Cumhuriyetinde özel sipariş üzerine imal ettirilmiştir. Kare göz açıklığı 5mm, tel çapı 0,6mm'dir (Şekil 2.14).

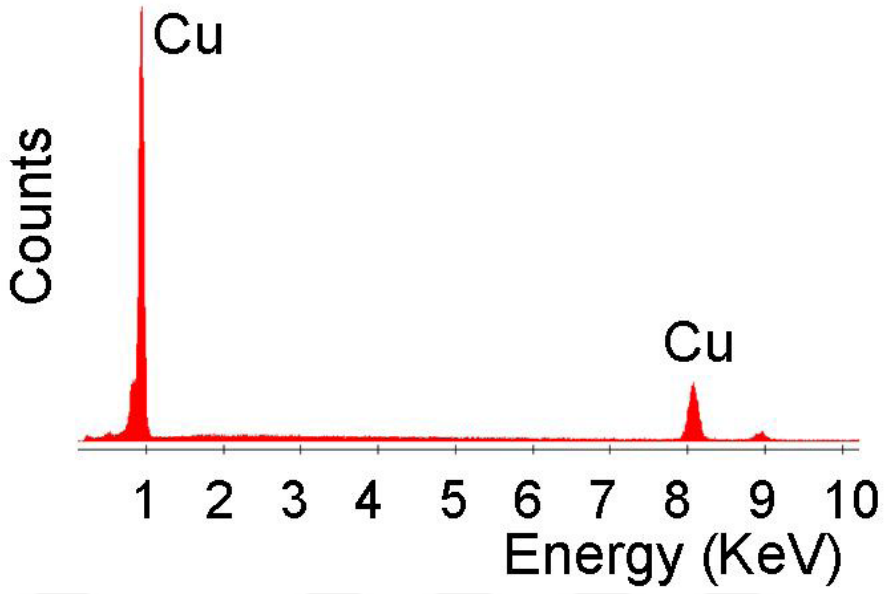


Şekil 2.14 Bakır ağ elektrot a) elektrot olarak kullanılmak üzere kesilmiş b) Çin'den gelen rulo hali (Kişisel arşiv, 2015)

Bakır ağ tel, taramalı elektron mikroskobunda incelendi ve görüntüleri Şekil 2.15'de sunuldu. Görüntülerde bakır telin çapının 600 μm olduğu tespit edilmiştir. Bakır ağ telinin enerji dağılım spektrometre (EDS) analizi yapılıp Şekil 2.16'da sunuldu.



Şekil 2.15 Bakır tele ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri a) kesit yüzeyi b) yan yüzeyi (Kişisel arşiv, 2015)



Şekil 2.16 Bakır ağ telinin EDS analiz sonucu

2.1.15 Saf Su

DEÜ Elektronik Malzemeler Üretim ve Uygulama merkezinde (EMUM), TKA marka saf su üretim cihazından temin edilmiştir.

2.2 Yöntem

Nano malzeme ve makro malzeme katkılı betonun elektriksel direnç – birim şekil değiştirme ilişkisini tespit etmek için aşağıdaki yöntemler sırasıyla uygulanmıştır.

2.2.1 Karışımların Tasarlanması

Betonun elektriksel direnç değişimi ile birim şekil değiştirme arasındaki ilişkinin belirlenmesi için farklı iletken malzemeler katkılanarak beton karışımları TS802 Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları Standardına göre tasarlandı. Nano malzeme katkılı betonlar ve makro malzeme katkılı betonlar için iki farklı tasarım kullanıldı.

TS802 Standardına göre makro malzeme katkılı betonlar ve nano tufal katkılı betonlar için aşağıdaki adımlar izlendi;

- TS802 Çizelge 6'dan hava sürüklenmemiş beton basınç dayanımı 45 MPa için su/bağlayıcı oranı 0,37 alınmıştır.
- TS802 Şekil 11'den çökme miktarı 8-10 cm alınarak su içeriği 228 kg/m3 bulunmuştur.
- TS802 Şekil 13'den hava içeriği %2,2 alınmıştır.
- Akışkanlaştırıcı/bağlayıcı oranı (%1), (Sika Yapı Kimyasalları verdi, test edildi)
- Akışkanlaştırıcı su kesme (%10) (Sika Yapı Kimyasalları verdi, test edildi)
- Silika dumanı / bağlayıcı %10 alınmıştır (Üreticisi verdi, test edildi.
- Toplam agreganın %40'ı iri, %60'ı ince agrega alınmıştır.

TS802 Standardına göre diğer nano malzeme katkılı betonlar (nano tufal katkılı betonlar hariç) içinse aşağıdaki adımlar izlendi;

- TS802 Çizelge 6'dan hava sürüklenmemiş beton basınç dayanımı 35 MPa için su /bağlayıcı oranı 0,47 alınmıştır.
- TS802 Şekil 11'den çökme miktarı 8-10 cm alınarak su içeriği 236 kg/m3 bulunmuştur.
- TS802 Şekil 13'den hava içeriği %2,2 alınmıştır.
- Akışkanlaştırıcı/bağlayıcı oranı; nano süspansiyonlu karışımlar, nano tufalli karışımlar ve grafen nano levhalı karışımlar için hacimsel olarak %1, karbon nano tüplü karışımlar için hacimsel olarak %2 kullanıldı. (Sika Yapı Kimyasalları verdi, test edildi)
- Akışkanlaştırıcı su kesme; nano süspansiyonlu, grafen nano levhalı ve nano tufalli karışımlar için %10, Karbon nano tüplü karışımlar için %5 kullanıldı. (Sika Yapı Kimyasalları verdi, test edildi)

Yukarıdaki karışım tasarımları ışığında, malzeme özelliklerini kullanarak öncelikle katkısız (iletken malzeme olmadan) M0 karışımı tasarlandı ve üretildi. Daha sonra

Tablo 2.9'daki karışımlar farklı iletken malzemeler eklenerek tasarlandı. Tablo 2.9'da gri renk ile taralı karışımlara, Kolatar O. (2016) tarafından, basınç testi yapılmıştır (Kolatar O., 2016). Koyu yazılmış karışımlar ise, (Br1-Br6; S1-S18; Co4-Co6) Teomete E. (2017) tarafından basınç testi ile test edilmiştir. Tablodaki diğer karışımların (Cn1-5, Gn1-5, NT1-5 ve NDS, NBS, NÇS NKS) tasarımları, üretimleri ve testleri bu tezde yapıldı. Tablo 2.9'da verilen tüm karışımların basınç testi sonuçları birlikte değerlendirildi ve aşağıdaki bölümlerde anlatıldığı gibi seçilen karışımlara yarma ve eğilme deneyleri de yapıldı. Tüm deney sonuçları değerlendirilerek akıllı beton belirlendi. Akıllı beton olarak seçilen karışıma, sonraki bölümlerde anlatılan ek deneyler yapıldı.

Tablo 2.9 karışımlardaki iletken malzemeler ve % katkı miktarları.

	Nano Tufal	Nano Demir süspan-siyon	Nano Çinko Süspan-siyon	Nano Bakır Süspan-siyon	Nano kompozit süspan-siyon	Grafen Nano Levha	Karbon Nano Tüp	Çelik lif		Pirinç		Kömür	Tufal	Bakır		Karbon lif			Alüminyum	
								13mm	6mm	Lif	Toz			Lif	Toz	6mm	11mm	3mm	lif	toz
Hacimsel Katkı oranı %																				
0,023						Gn1	Cn1													
0,046						Gn2	Cn2													
0,069						Gn3	Cn3													
0,092						Gn4	Cn4													
0,115						Gn5	Cn5													
0,2	NT1							**S1**	**S5**				T1	Co7	Cop4					
0,35								**S2**	**S6**	**Br1**	Brp1	K1	T2	Co8	Cop5	C1	C6	C11	A1	Ap1
0,5	NT2							**S3**	**S7**	**Br2**	Brp2	K2	T3	Co1	Cop1	C2	C7	C12	A2	Ap2
0,8	NT3							**S4**	**S8**	**Br3**	Brp3	K3	T4	Co9	Cop6	C3	C8	C13	A3	Ap3
1	NT4								**S9**	**Br4**	Brp4	K4	T5	Co2	Cop2	C4	C9	C14	A4	Ap4
1,5	NT5								**S10**	**Br5**	Brp5	K5	T6	Co10		C5	C10	C15	A5	Ap5
1,8									**S11**											
2									**S12**	**Br6**	Brp6	K6		Co3	Cop3				A6	Ap6
2,5									**S13**											
3									**S14**											
3,5									**S15**											
4									**S16**					**Co4**						
4,5									**S17**											
5									**S18**											
6														**Co5**						
8														**Co6**						
6g/lt		NDS	NÇS	NBS	NKS															

*Gri renk ile boyalı karışımlara Kolatar O. (2016)'ın tezinde basınç testi uygulanmıştır (Kolatar.O, 2016).

**Koyu yazılı karışımlar Teomete E. (2017) tarafından test edildi.

2.2.2 Karışımların Hazırlanması ve Basınç Testi

Basınç testleri için M0 katkısız karışımı (Referans karışımı) dahil olmak üzere 25 farklı karışım tasarlandı. Her karışım için üçer adet 7,5cm boyutunda küp örnekler hazırlandı. Bu tez çalışmasında toplamda 72 örneğe basınç testi uygulandı (Nano bakır süspansiyonlu karışım dökümden sonra priz almadığı için test edilemedi). Özel olarak imal edilmiş 7,5 cm küp çelik kalıplarda 2mm kalınlığında karşılıklı kalıp duvarlarında birbirine tam olarak hizalanmış bakır elektrot yuvaları bulunmaktadır. Böylece bakır elektrotlar birbirine paralel olarak yerleştirilebilirler (Bkz. Şekil 2.17). Bakır elektrotlar kalıbın bir tarafından geçirilip diğer tarafından çıkartılabilirler. Böylece dökülen örneklerin dışında ölçüm yapılabilmesi için uygun elektrotlar bulunur.



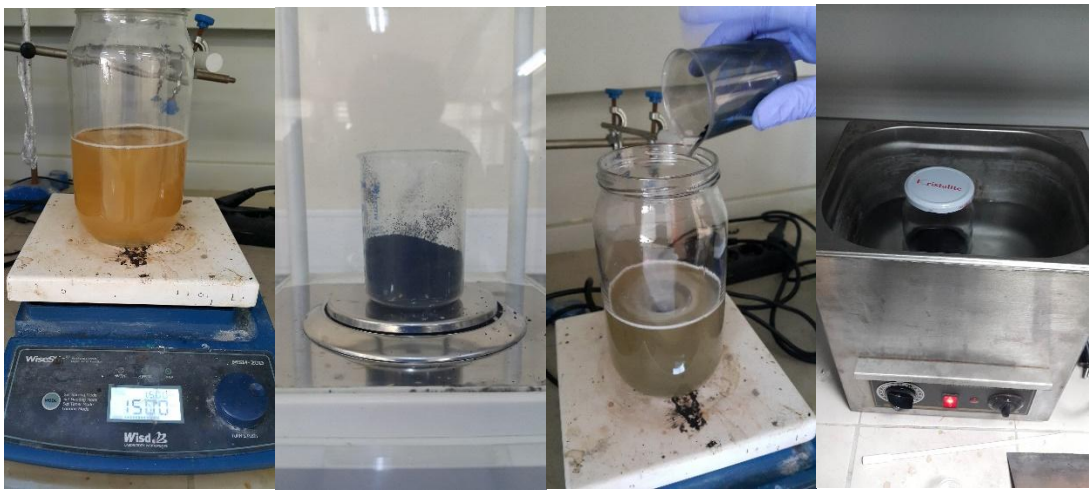
Şekil 2.17 döküm yapılmak üzere hazırlanmış çelik kalıp (Kişisel arşiv, 2016)

Elektrot olarak kullanılan saf bakır ağlar uygun boyutlarda rulodan kesilerek kalıba yerleştirildi. Agregalar, çimento, silika dumanı her biri 3 seferde miksere konulup, her seferde karıştırıldı. Makro malzemeler ve nano tufal katkılanırken; akışkanlaştırıcı ve su ayrı bir kapta karıştırılarak kuru karışıma 3 seferde eklendi, her seferde karıştırıldı. Sonra, makro malzeme katkıları hazırlanan beton karışımına serpilerek 4-5 seferde eklendi ve her seferde karıştırıldı. Nano süspansiyon karışımları hazırlanırken; hazırlanmış kuru karışıma, ayrı bir kapta karıştırılmış akışkanlaştırıcı + nano

süspansiyon karışımı 3 seferde karışıma eklendi ve her seferde mikser ile karıştırıldı (Şekil 2.18). ÇDKNT ve GNL katkılı karışımlar hazırlanırken; katkı malzemesi saf su içerisinde disperse edilmiştir. Saf su ve akışkanlaştırıcı cam kavanoz içinde WiseStir MSH-20D markalı manyetik karıştırıcı ile 1500 rpm ile 5dk. karıştırıldıktan sonra RADWAG AS 220/C/2 markalı hassas tartı ile tartılmış olan ÇDKNT ya da GNL karıştırılmakta olan saf su + akışkanlaştırıcıya olabildiğince yavaş bir şekilde eklendi ve buharlaşma ile kayıp oluşmaması için kapağı kapatılarak 30dk. daha karıştırılmaya devam edildi. Ardından Mercury ultrasonic cleaner marka ultrasonik banyoda 30dk. bekletildi. Bu işlem sırasında ÇDKNT - ÇDKNT ve GNL - GNL parçacıkları arasındaki Van der Waals bağları koparılarak aglomerasyon oluşmamasına yardımcı olunmuştur. Bu işlemden hemen sonra tekrar manyetik karıştırıcıda 30dk 1500 rpm ile karıştırıldı. Böylece ÇDKNT ve GNL, su + akışkanlaştırıcı sıvısı içerisinde disperse edilmiş oldu. Dispersiyon işlemi Şekil 2.19'da sunuldu. Hazırlanan disperse edilmiş karışım, kuru karışıma 3 seferde eklendi ve her seferde mikser yardımı ile karıştırıldı.

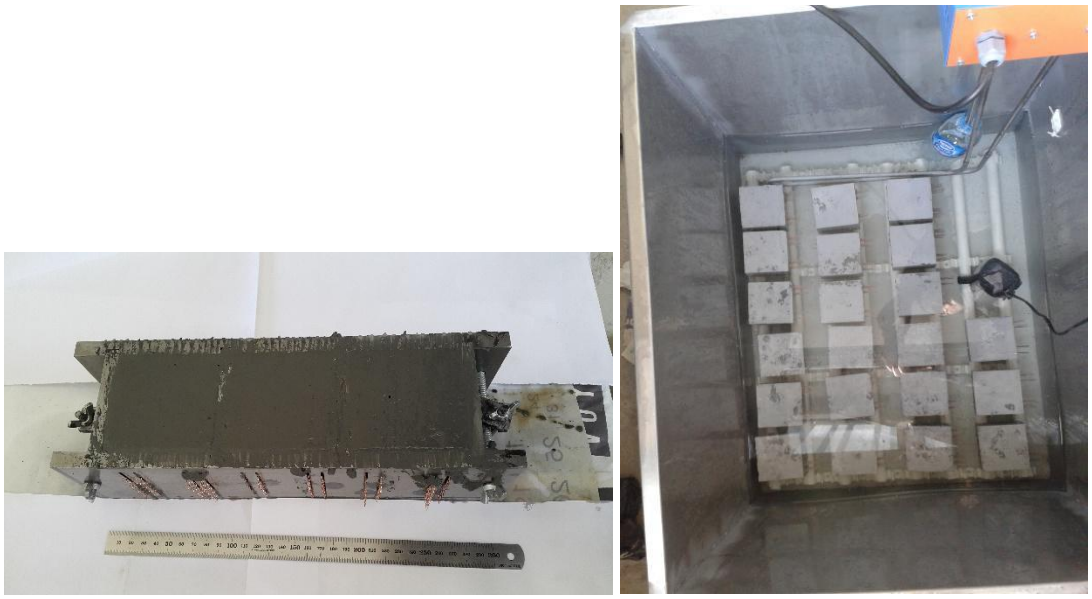


Şekil 2.18 Kullanılan mikser (Kişisel arşiv, 2016)



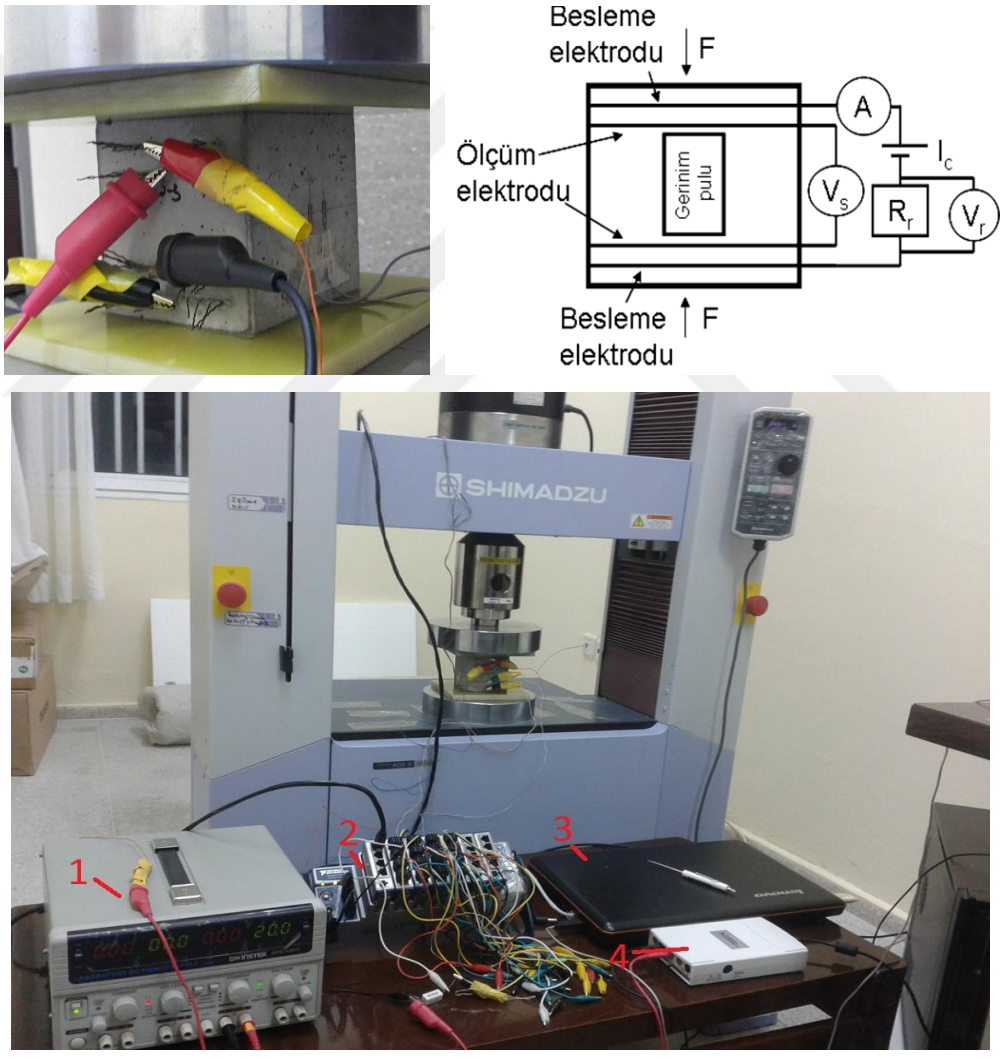
Şekil 2.19 Dispersiyon işlemi a) Saf su + Akışkanlaştırıcı 1500 rpm ile karıştırılırken b) Hassas tartı ile tartılmış nano malzeme (ÇDKNT ya da GNL). İki malzemede aynı renktedir. c) Saf su + Akışkanlaştırıcı karışımına yavaşça nano malzeme eklenirken d) Saf su + Akışkanlaştırıcı + nano malzeme karışımı ultrasonik banyoda bekletilirken (Kişisel arşiv, 2017)

Hazırlanan karışımlar kalıplara 2 seferde konuldu. Döküm sırasında oluşabilecek hava boşluğu sayısını minimize edebilmek için elektrotlar arasındaki bölgeler 10 kez şişlendi. Kalıplar karışım ile doluyken sarsma tablasında sarsıldı. Örnekler kalıptan 24 saat sonra alınıp su içerisinde 28 gün 20°C'de kür edildi (Şekil 2.20).



Şekil 2.20 a) Döküm sonrası yaş karışım b) kalıptan alınmış örnekler su içerisinde kür olurken (Kişisel arşiv, 2017)

Basınç birim şekil değiştirme - yüzde elektriksel direnç değişimi (%R) arasındaki ilişkiyi bulmak için örneklere basınç testi yapıldı. Her karışım için 3 adet 7,5cm boyutunda küp örnekler tek seferde döküldü. 28 gün kür edilmiş örnekler 7 gün laboratuvar ortamında bekletildikten sonra basınç testi uygulandı. Örnekler, yükleme başlığı ile örnekler arasına cam elyaf epoksi plakalar yerleştirilerek elektriksel olarak izole edildi. Basınç testi örneklerine ikişer adet gerinim pulu (birim şekil değiştirme ölçer) yapıştırıldı (Şekil 2.21a). Basınç deneylerinde 300kN kapasiteli Shimadzu AGSX mekanik test cihazı kullanıldı. ASTM C39 ASTM C39 standardına göre basınç yüklemesi deplasman kontrolü ile 0.5 mm/dk. hızla yapıldı.



Şekil 2.21 a) Örnek basınç testine hazır b) Devre şeması c) Ekipmanlar (1-doğru akım kaynağı, 2-National Instruments veri toplama cihazı, 3-PC, 4-National Instruments yüksek hassasiyetli dijital multimetre, arkada Shimadzu mekanik test cihazı) (Kişisel arşiv, 2016)

Basınç deneylerinde, birim şekil değiştirme ve elektriksel ölçümler eş zamanlı olarak Şekil 2.21b'deki gibi yapıldı. Devre Gw Instek GPS 4303 doğru akım kaynağı ile 20V DC ile beslendi. Deney süresince 100ms zaman aralığıyla (saniyede 10 defa yani 10Hz ile veri kaydedecek şekilde) örnek üzerindeki gerilim (V_s) iç iki elektrottan, devreye seri bağlı referans direnç üzerindeki gerilim (V_r), ve basınç birim şekil değiştirmesi National Instruments marka veri toplama sistemi ile kaydedildi. Devreden geçen akım miktarı (I_c), PC kontrollü National Instruments 4065 Usb yüksek hassasiyetli Dijital multimetre (DMM) ile 10Hz ile kaydedildi. Uygulanan mekanik yük başlık yer değiştirmesi TrapeziumX (Shimadzu kontrol programı) programı ile 10Hz ile kaydedildi. Tüm elektriksel ve mekanik ölçümler dijital dosyaya eş zamanlı olarak 10Hz ile kaydedildi. Her örnek, mekanik test öncesi 15 dakika 20V DC ile polarize edildi.

Deney sırasında herhangi bir anda örneğin direnci (R_s) Ohm kanunu kullanılarak eşitlik 2.1 ile hesaplandı. V_s örnek üzerindeki ölçülen elektriksel potansiyel fark, I_c ise örnek üzerinden geçen ölçülen akım şiddetidir. Örnek direncindeki yüzde değişim (%R) eşitlik 2'den bulundu. Eşitlik 2.2'de ki R_{so} örneğin yük uygulanmadan önceki elektriksel direncidir.

$$R_s = \frac{V_s}{I_c} \tag{2.1}$$

$$\%R = \left(\frac{R_s}{R_{so}} - 1 \right) \times 100 \tag{2.2}$$

Klasik metal gerinim pullarının performansı genel olarak iki parametre ile ölçülür. Bunlar, duyarlılık (K) ve doğrusallık (LE)'dir. Duyarlılık (K), bir birim şekil değiştirme ile elektriksel dirençteki değişimdir ve Eşitlik 3 ile hesaplanır. Eşitlik 2.3'te R_s herhangi bir andaki örnek direnci, R_{so} deneyin başında yük uygulanmamış örnek direnci, $\Delta\varepsilon$ herhangi bir andaki örnek birim şekil değiştirmesidir. Algılayıcının hassaslığı yükseldikçe, duyarlılık (K) yükselir. Metal gerinim pullarının duyarlılığı genelde 2'dir.

$$K = \frac{\left(R_s - R_{so}\right) / R_{so}}{\Delta\varepsilon} \quad (2.3)$$

$$\%LE = \left(\frac{\Delta_{max}}{\%R_{fs}}\right) \times 100 \quad (2.4)$$

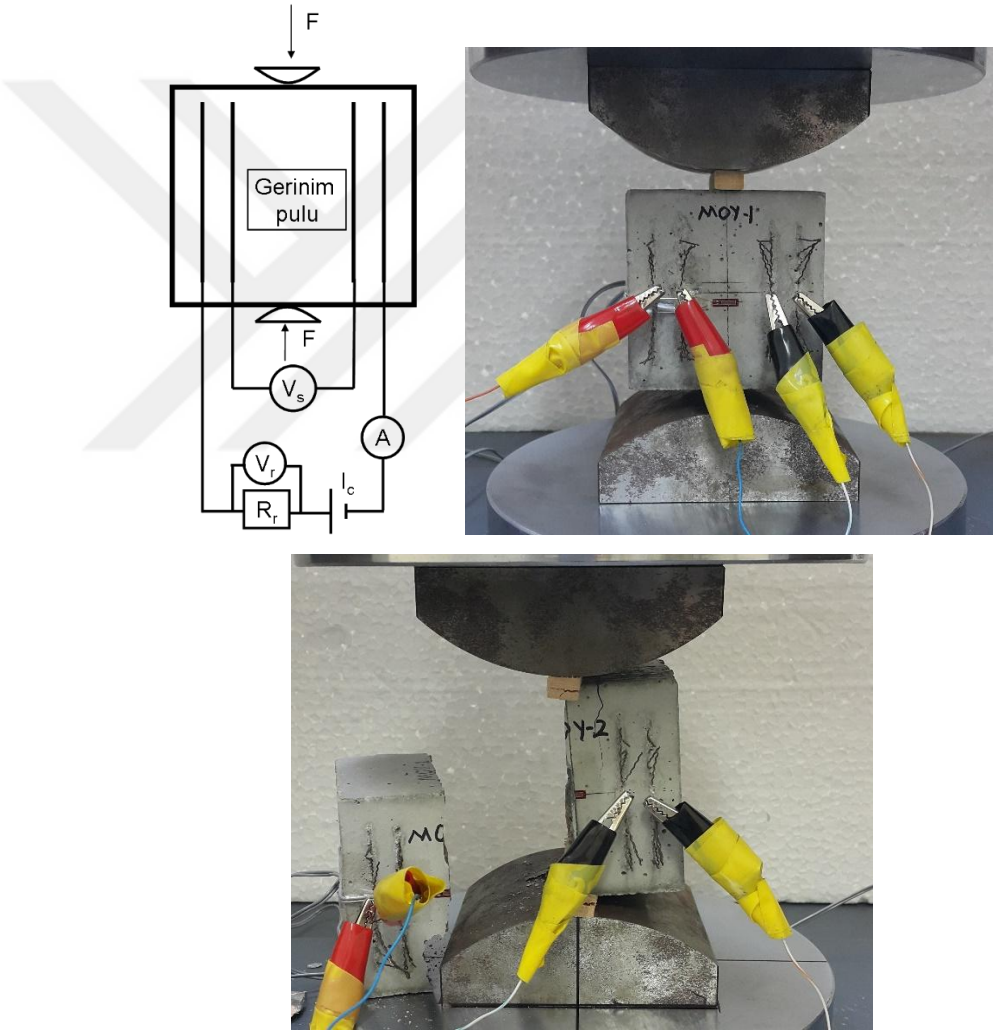
Doğrusallık (LE), elektriksel direnç değişimi - birim şekil değiştirme eğrisinin kendisine en küçük kareler metodu ile uydurulmuş doğrudan sapma miktarını temsil eder ve Eşitlik 2.4 ile hesaplanır. Eşitlik 2.4'de (Δ_{max}) deneysel veri ile en küçük kareler ile oluşturulan doğru arasındaki en büyük sapma miktarı, ($\%R_{fs}$) %R'ın en büyük değeridir. Doğrusallığın büyük olması, algılayıcı ile belirlenen birim şekil değiştirme hatasının büyük olduğunu gösterir.

2.2.3 Yarmada Çekme Testi

Bu tez çalışmasında, 21 farklı karışıma yarmada çekme testi yapıldı. Her bir karışım için üçer adet 7,5cm boyutunda küp örnekler hazırlandı. Örnekler basınç testinde anlatıldığı gibi döküldü. Toplamda 63 adet örneğe yarmada çekme testi yapıldı.

Çekme birim şekil değiştirmesi – yüzde elektriksel direnç değişimi (%R) arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla yarmada çekme testleri yapıldı. Yarma testlerinde basınç testlerinde kullanılan donanımlar kullanıldı. TS –EN 12390-6 "Beton- Sertleşmiş beton deneyleri, -Bölüm6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini" standardına göre, 2.5mm/dk. yükleme hızı ile 300kN kapasiteli Shimadzu mekanik test cihazı kullanılarak yapıldı. Yüklemede kullanılan plakalar TS –EN 12390-6 "Beton-Sertleşmiş beton deneyleri, -Bölüm6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini" standardına uygundur. Her örnek, mekanik test öncesi 20V DC gerilimi ile 15 dakika polarize edildi. Mekanik test sırasında devre 20V DC gerilimi ile beslendi. Devreye verilen 20V DC gerilimi örneği dış iki elektrottan beslemektedir. Örnek elektriksel potansiyel farkı (V_s) iç iki elektrottan, örneğe seri bağlanmış referans direnci (R_r) üzerindeki elektriksel potansiyel farkı (V_r) ölçüldü. Devreden geçen akım (I_c) yüksek hassasiyetli DMM ile ölçüldü. Yarmada çekme testi sırasında yatay yönde oluşan çekme birim şekil değiştirmesi, yatay olarak yapıştırılmış gerinim pulu

aracılığıyla ölçüldü. Test sırasında tüm elektriksel ve mekanik ölçümler (Vs, Vr, Ic, çekme birim şekil değiştirmesi, mekanik yük, yükleme başlık yer değiştirmesi) eş zamanlı olarak 10Hz ile dijital dosyaya kaydedildi. Örnekler yatay yönde gerçekleşen çekme birim şekil değiştirmesi nedeniyle oluşan çatlaklar sebebiyle ikiye ayrıldı. Yükleme başlığı ile örnek arasına yerleştirilen ahşap çubuklar ile uygulanan mekanik yükün örnek üzerinde etkili bir şekilde yayılması amaçlandı (Şekil 2.22). Sonuçların değerlendirilmesi basınç testi için sunulan denklem ve parametreler ile aynı şekilde yapıldı.



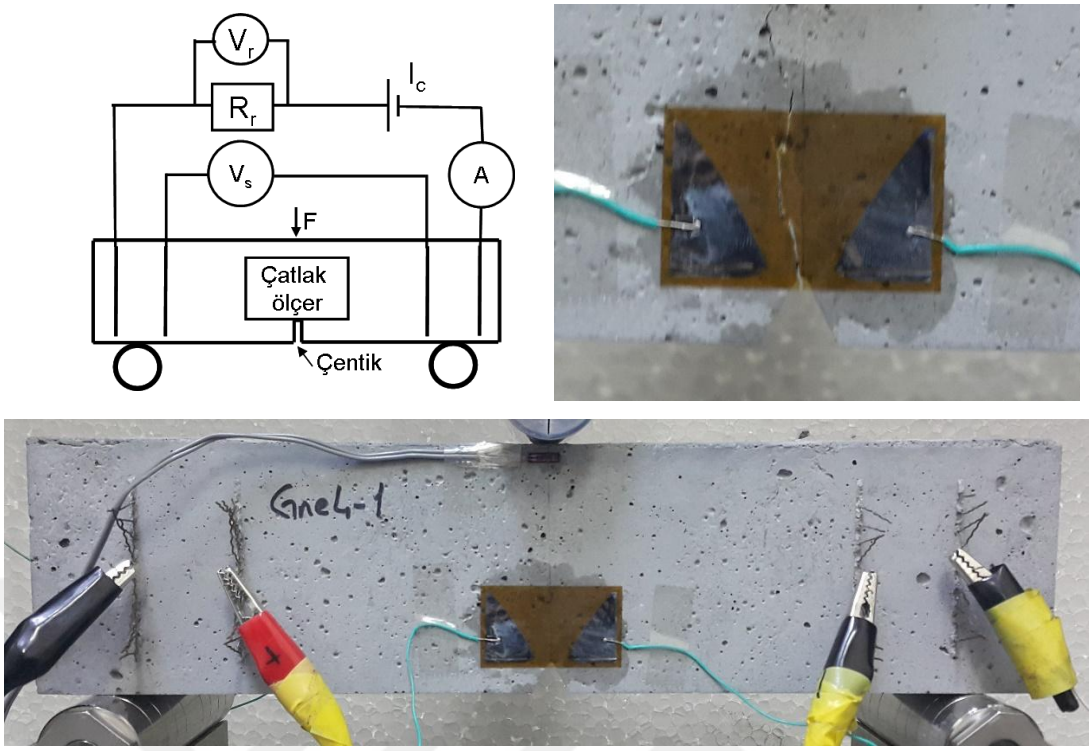
Şekil 2.22 Yarmada çekme testi a) Devre şeması b) Örnek test anında c) Test sonrası, örnek gevrek bir şekilde ikiye ayrıldı (Kişisel arşiv, 2016)

2.2.4 Eğilme Testi

Betonun çatlak duyarlılığını tespit edebilmek için, çatlak uzunluğu - elektriksel direnç değişimi (%R) ilişkisi, çentikli eğilme testleri yapıldı. Eğilme tersleri basınç testlerinde en iyi sonuç veren 16 karışıma yapıldı. Her bir karışımdan 3'er adet 7,5*7,5*30,5 cm^3'lük çentikli örnekler dökülüp, toplamda 48 örneğe eğilme testi uygulandı. 7,5*7,5*30,5 cm^3'lük çentikli örneklerin karışımları basınç testinde anlatıldığı gibi döküldü, basınç testinden tek farkı 7,5*7,5*30,5 cm^3'lük çentikli çelik kalıplara dökülmesidir.

Çentik ağız açıklığı 11,5 mm, yüksekliği 10 mm'dir (Şekil 2.23b). Çentik beton kalıp tabanına konan üçgen kesitli prizma ile sağlandı, böylece sertleşmiş beton sonradan kesilmedi ve kesime bağlı hasarlar oluşmadı. Çentiğin amacı, çatlağın istenilen yerden başlaması ve çatlak boyutunun ölçülebilmesidir. Basınç ve yarmada çekme örneklerinde olduğu gibi örnekler 28 gün 20°C'de kür edilip, 7 gün laboratuvar ortamında bekletildi ve sonra testler uygulandı.

3 nokta eğilme testi, 0,1mm/dk. yükleme hızıyla ASTM C78'e uygun olarak yapıldı. Test sırasında devreye dış iki elektrottan 20V DC besleme gerilimi verilirken iç iki elektrottan örnek elektriksel potansiyel farkı (V_s), devreye seri bağlanmış 1000 Ohm'luk referans direnç üzerindeki elektriksel potansiyel farkı (V_r), devreden geçen akım (I_c), çatlak boyu, mekanik yük ve yükleme silindiri yer değiştirmesi saniyede 10 defa ölçülerek dijital ortama kaydedildi. Elektriksel ölçümlerin tamamı yüksek hassasiyetli cihazlarla yapıldı. Tüm ölçümler eş zamanlı olarak 10Hz ile dijital ortama kaydedildi. Her örnek mekanik test öncesi 15 dakika 20V DC ile polarize edildi.



Şekil 2.23 Eğilme testi a) Devre şeması b) Ölçülen çatlak c) Örnek test edilirken (Kişisel arşiv, 2016)

Çatlak duyarlılığı haricinde analiz için kullanılan hesaplama teknikleri basınç ve yarmada çekme deneylerinde yapıldığı gibi yapıldı. Çentik başından ilerleyen çatlağın boyunu ölçmek için örneğin ön ve arkasında iki adet TML marka çatlak boyu ölçer kullanıldı (Şekil 2.23). Örnek direnci Eşitlik 1' den hesaplandı. Örnek direncindeki yüzde değişim Eşitlik 2'den hesaplandı. Çatlak ölçümünde doğrusallık (LE), %R – çatlak uzunluğu eğrisinin, eğriye uydurulmuş en iyi doğrudan maksimum sapması ile %R'ın toplam değişimine yüzdesi olarak Eşitlik 4 ile hesaplandı

Çimentolu kompozitlerin çatlak duyarlılığı (CK), elektriksel direncin yüzde değişiminin (%R), çatlak uzunluğuna oranı olarak tanımlanmıştır. %R'ın 1mm çatlak boyu ilerlemesiyle değişimidir, Eşitlik 5 ile verilmiştir. Çatlak duyarlılığı arttıkça, betonun çatlağa olan duyarlılığı artar. Eşitlik 5'te Rs, örneğin herhangi bir andaki direnci, Rso, örneğin çatlaksız durumdaki direnci, ΔL, çatlak uzunluğudur.

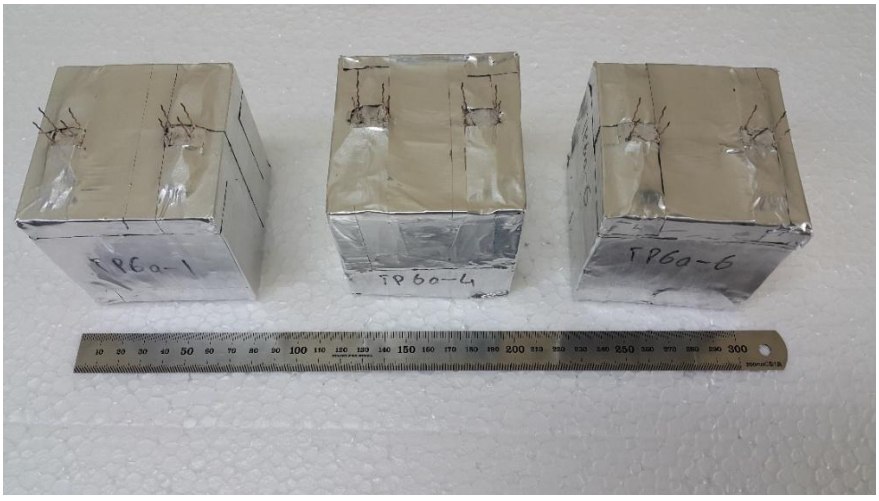
$$CK = \frac{\left(R_s - R_{so}\right) \times 100 \Big/ R_{so}}{\Delta L} \tag{2.5}$$

2.2.5 Farklı Yükleme Hızlarında Akıllı Betonun Test Edilmesi

Önceki bölümlerde anlatılan deneyler ile akıllı beton seçildi. Akıllı betonun farklı yükleme hızları altındaki Basınç birim şekil değiştirme – yüzde elektriksel direnç değişimi ilişkisini belirlemek için 15 adet 7,5cm ebatlı küp örnek hazırlandı. Örnekler basınç testlerinde olduğu gibi 28 gün 20°C'de kür edildi. Yükleme hızları 0,5-1-2-4-5 mm/dk olacak şekilde, her yükleme hızında üç adet akıllı betona basınç testi yapıldı. Basınç testi bölüm "2.2.2 Basınç Testi" anlatıldığı gibi yapıldı.

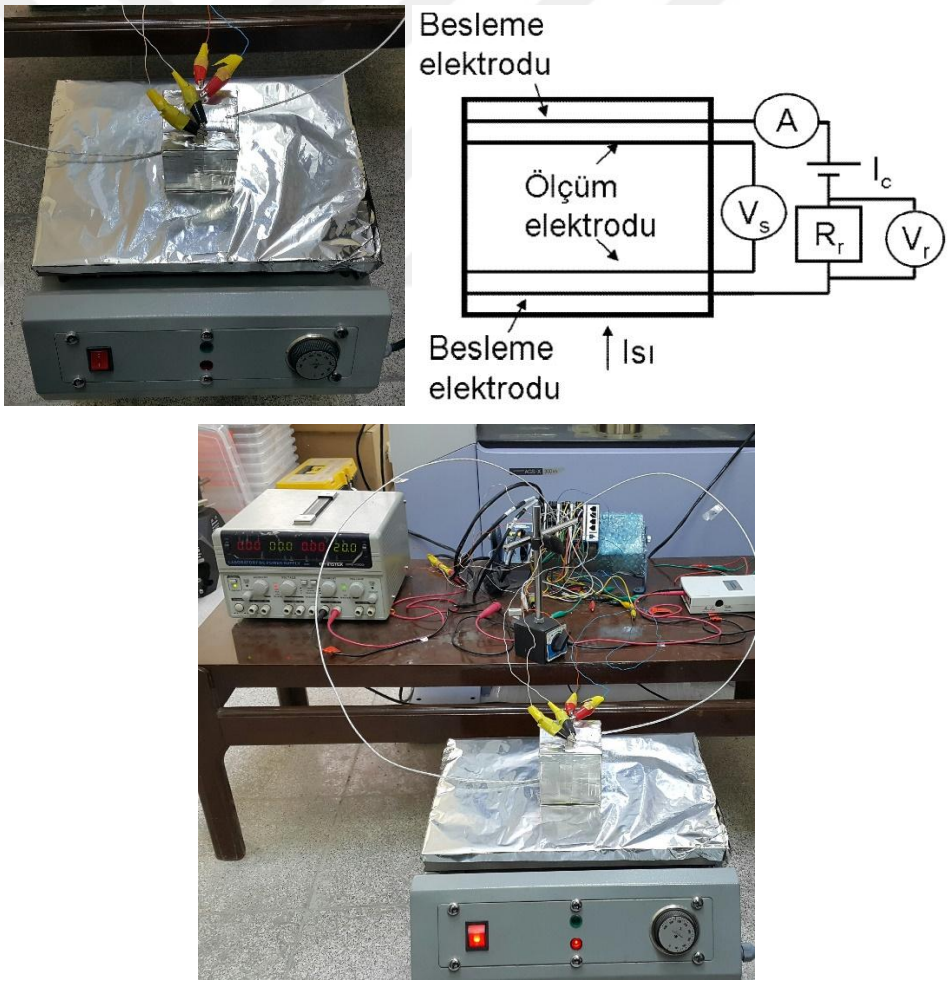
2.2.6 Sıcaklık ve Nemin Akıllı Betona Etkilerinin Araştırılması

Akıllı betonun elektriksel direncinin sıcaklık ile değişimini tespit etmek için 7.5cm boyutunda 3 adet küp örnek basınç testinde anlatıldığı gibi hazırlandı. Örnekler 28 gün 20°C'de kür edildi. Örnekler 7 gün laboratuvar ortamında bekledikten sonra nem kaybını önlemek amacıyla alüminyum bant ile izole edildi. Örnek üzerindeki elektrotlar ile alüminyum bant üzerinde kısa devre oluşmaması için elektrotların çıktığı bölgeler seramik kil ile izole edildi (Şekil 2.24).



Şekil 2.24 Örneklerdeki nemin kaybını önlemek için alüminyum bant ile kaplanmış (Kişisel arşiv, 2016)

Deneyler başlamadan önce örnekler 20V DC ile 15 dakika polarize edildi. Test sırasında kullanılan ısıtma tablası Şekil 2.25a-c'de sunuldu. Örnek ısıtılırken örneğin altından ve üstünden termokapl ile sıcaklıklar sürekli olarak ölçüldü. Örnek sıcaklığı her 10°C arttığında 25 saniye boyunca saniyede 10 defa olmak üzere veri alınıp dijital dosyaya kaydedildi. Örnek sıcaklığı 187°C'ye kadar arttırıldı. Örneğe dış iki elektrottan DC gerilimi uygulandı ve iç iki elektrottan örnek gerilimi (V_s) ölçüldü. Devreden geçen akıl (I_c) yüksek hassasiyetli DMM ile ölçüldü (Şekil 2.26b-c). Örnek referans direnci üzerindeki elektriksel potansiyel (V_r) ölçüldü. Tüm ölçümler eş zamanlı olarak her 10°C artışta 25 saniye boyunca 10Hz ile dijital dosyaya kaydedildi. Örneklerin testi kesintisiz 16 saat sürdü.



Şekil 2.25 a) Örnek ısıtma tablası üzerinde test edilirken b) Ölçümde kullanılan devre şeması c) Deney sırasında kullanılan ekipmanlar (ön kısımda ısıtma tablası, arka solda DC güç kaynağı, arka ortada veri toplama sistemi, arka sağda PC kontrollü dijital multimetre(beyaz)) (Kişisel arşiv, 2016)

Nemin, elektriksel direnç değişimi (%R) – birim şekil değiştirme arasındaki ilişkisini belirlemek için, akıllı beton karışımı ile 12 adet 7,5cm'lik küp örnek, basınç testinde anlatıldığı gibi hazırlandı. Örnekler 28 gün 20°C su içerisinde kür edildikten sonra, yüzeyleri kurulanıp, tartıldı ve 90°C fırına konuldu. 30-60-120-180. dakikalarda üçer örnek fırından çıkartıldı ve tartıldı. Nem kaybı hesaplandı. Fırından çıkartılıp tartılan örneklerin nem içeriğinin değişmemesi için alüminyum folyo ile sarılıp soğutuldu (Şekil 2.26). Soğuyan örneklere basınç deneyi, Bölüm "2.2.2 Basınç testi" 'nde anlatıldığı gibi yapıldı. Basınç testi sırasında elektriksel ve mekanik ölçümler eş zamanlı olarak yapıldı.



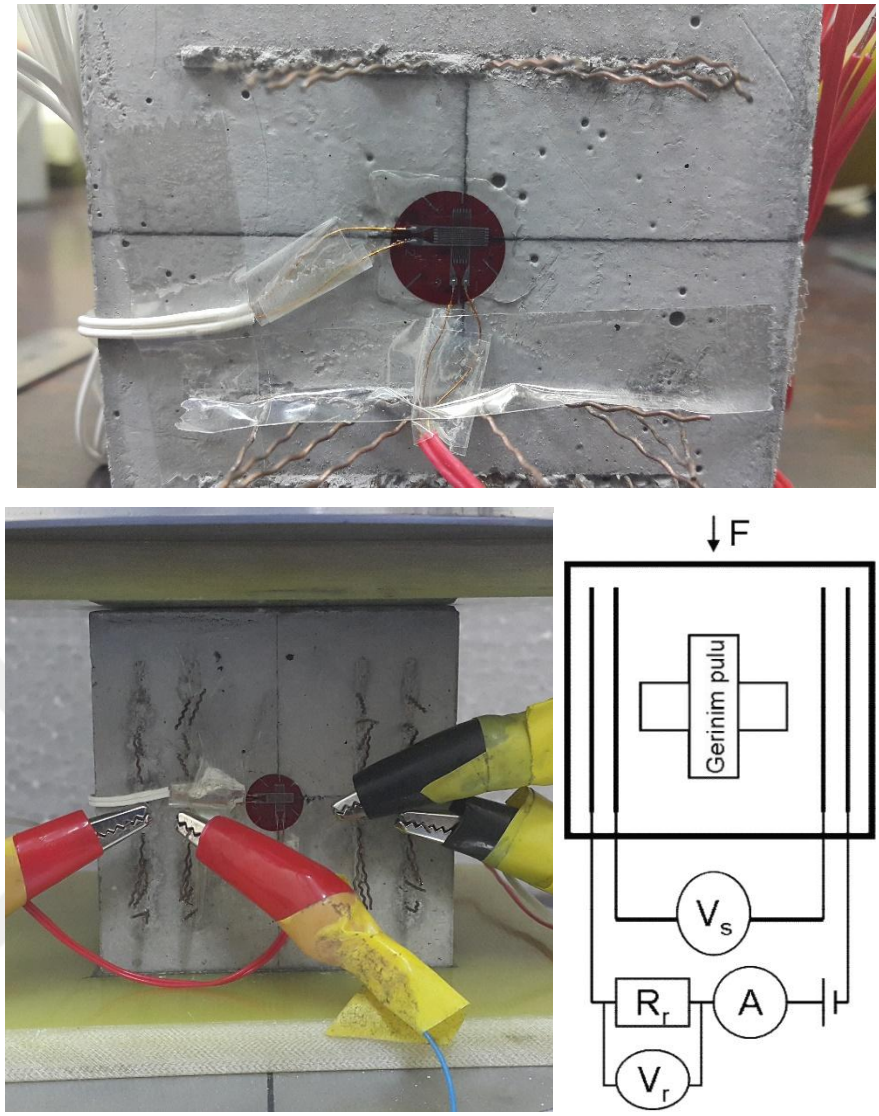
Şekil 2.26 fırından çıkartılıp tartılan ve nemin sabit kalması için alüminyum folyo ile sarılan örneklerin soğutulması (Kişisel arşiv, 2016)

Nemin elektriksel dirence etkisinin araştırılması için, 3 adet 7,5cm boyutunda küp örnekler akıllı beton karışımı ile döküldü. 28 gün 20^{o}C su içerisinde kür edildi. Örnekler sudan alınır alınmaz yüzeyleri kurulandı, tartıldı ve elektriksel dirençleri ölçüldü. Örnekler 90^{o}C etüve konulup, 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 1112, 1232, 1352, 1472, 2459, 2579, 2669, 2819, 3819, 3936, 4059, 4179, 5186, 5306, 5426, 5546. dakikalarda etüvden çıkartılıp, tartılıp, elektriksel direnci ölçülüp tekrar etüve

konuldu. 20V DC ile beslenen devrede, örneğin elektriksel direncini (R_s) ölçmek için; örneğe seri bağlı bir referans direncin (R=1000ohm) potansiyer farkı (V_r), örnek potansiyel farkı (V_s), devreden geçen akım (I_c) ölçüldü. Elektriksel direnç Ohm kanunundan ($R_s=V_s/I$) faydalanılarak hesaplandı.

2.2.7 Çapraz Yüklemenin Akıllı Betona Etkilerinin Araştırılması

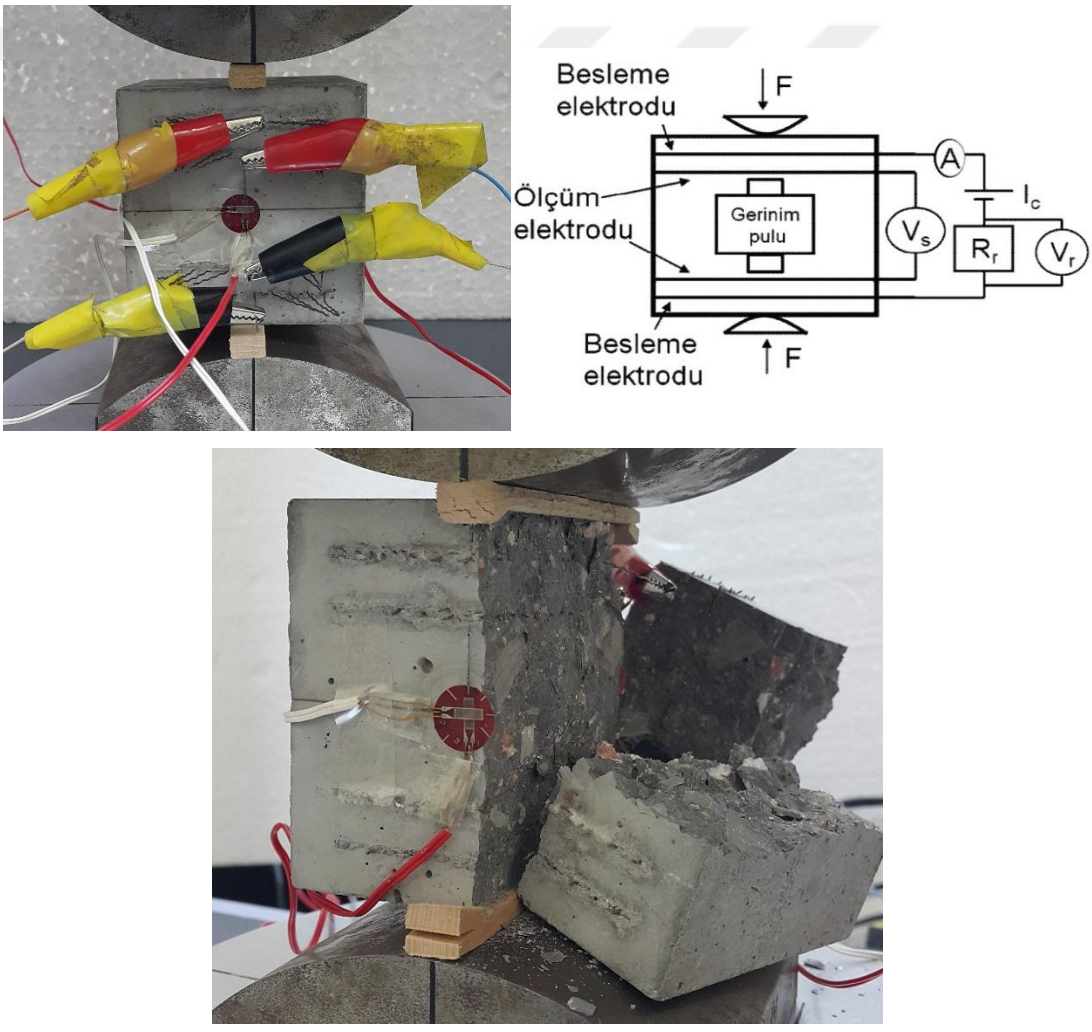
Akıllı beton içerisinden geçen elektrik akımına dik yönde uygulanan basınç birim şekil değiştirmesinin ve çekme birim şekil değiştirmesinin, örneğin elektriksel direncine etkisini araştırmak için akıllı beton karışımı ile 6 adet 7,5cm boyutunda küp örnekler basınç testinde anlatıldığı gibi hazırlanmıştır. Örnekler 28 gün 20°C su içerisinde kür edilip, 7 gün laboratuvar ortamında bekletildi. 6 örneğin 3 tanesine çapraz basınç testi, diğer 3 tanesine de çapraz yarma testi yapıldı. Her örnek çapraz basınç ve yarma testi uygulanmadan önce 20V DC ile 15 dakika polarize edildi.



Şekil 2.27 a) Çift yönlü gerinim pulu b) Örnek çapraz basınç testinde c) Devre Şeması (Kişisel arşiv, 2016)

Çapraz basınç testinde, örneklerin karşılıklı ön ve arka yüzüne 90° açı yapan çift yönlü gerinim pulları Şekil 2.27a'daki gibi yapıştırıldı. Çapraz basınç testi, basınç testlerinde olduğu gibi devre 20V DC gerilimi ile beslendi. Deney sırasında eş zamanlı olarak elektriksel potansiyel farklar (V_s, V_r), devreden geçen akım miktarı (I_c), gerinim pulu sinyalleri, mekanik yük, başlık yer değiştirmesi saniyede 10 kez dijital dosyaya kaydedildi. Basınç testinden farklı olarak mekanik yük örnek içinden geçen akımın yönüne dik uygulandı ve birim şekil değiştirme ölçümleri çift yönlü gerinim pulları ile yapıldı.

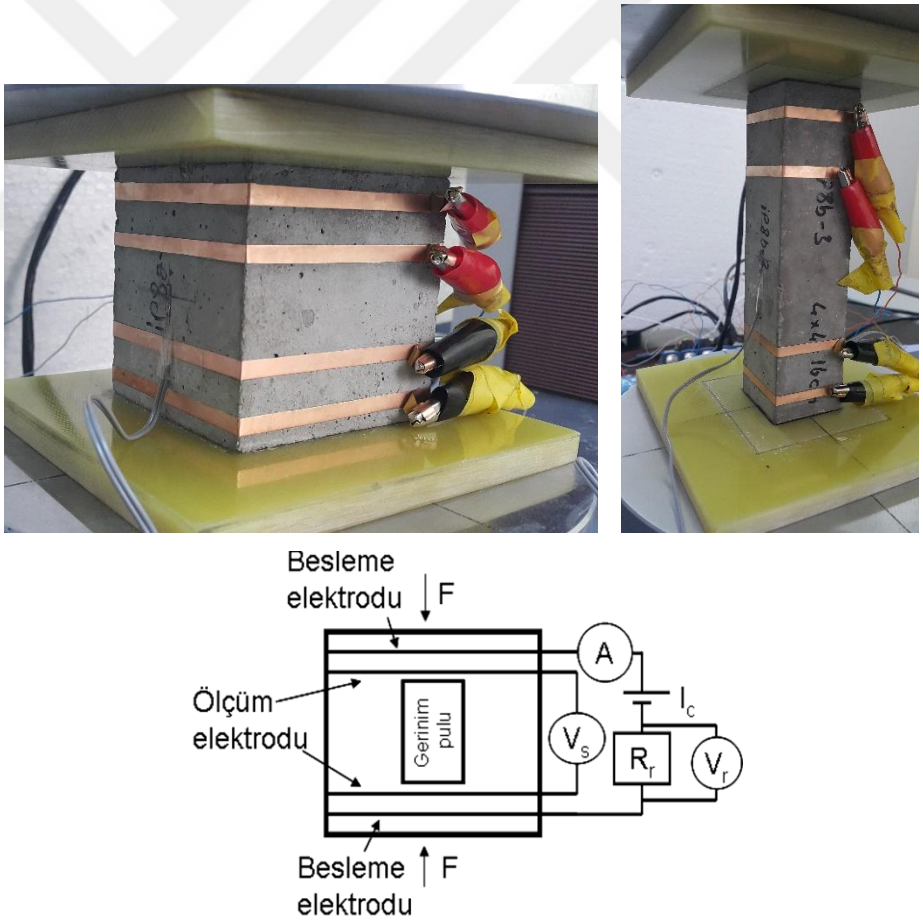
Çapraz yarma testi, bölüm "2.2.3 Yarmada Çekme Testi" 'nde anlatılan parametreler ile yapıldı. Devre 20V DC gerilimi ile beslendi. Yarmada çekme testinden farklı olarak mekanik yük örnek içinden geçen akımın yönüne dik çekme birim şekil değiştirmesi oluşturacak şekilde uygulandı ve birim şekil değiştirme ölçümleri çift yönlü gerinim pulları ile yapıldı (Şekil 2.28a). Test sırasında eş zamanlı olarak elektriksel potansiyeller (V_s, V_r), devreden geçen akım (I_c), mekanik yük, başlık yer değiştirmesi, gerinim pulu sinyalleri 10Hz ile dijital ortama kaydedildi (Şekil 2.28b). Örnekler çekme geriliminin oluşturduğu çatlaklar sebebiyle yenildi ve örnekler ikiye ayrıldı (Şekil 2.28c).



Şekil 2.28 a) Örnek çapraz yarma testinde b) Devre şeması c) Test sonunda ikiye ayrılmış örnek (Kişisel arşiv, 2016)

2.2.8 Akıllı Betonun Çevresel Elektrot Yöntemi ile Test Edilmesi

Önceki deneylerde batırılmış dört elektrot metodu kullanıldı. Bu bölümde çevresel elektrot metodunun akıllı betona uygulanması araştırıldı. Akıllı beton karışımı ile 7,5cm küp örneklerden üçer adet ve elektrotlar arasındaki mesafeyi arttırmak amacı ile 4*4*16cm^3'lük prizma örneklerden 3 adet hazırlandı (döküm yöntemi önceki bölümlerde anlatıldığı gibidir). Böylece dış elektrotlara uygulanan potansiyel farkın örnek yüzeyinde olduğu kadar içinde de elektron ve iyon hareketi sağlaması hedeflendi. Döküm sırasında örneklerin içine elektrot ağ konulmamıştır. Hazırlanan örnekler 28 gün 20°C su içinde kür edildi ve 7 gün laboratuvar ortamında bekletildi. İletken yapışkanlı bakır bantlar küp ve prizma örneklerin çevresine, 4 farklı kapalı çerçeve oluşturacak şekilde birbirine paralel yapıştırıldı (Şekil 2.29a-b).

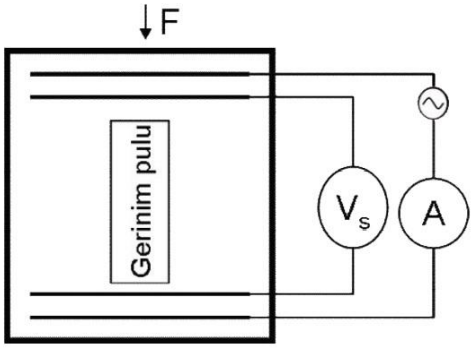


Şekil 2.29 Çevresel elektrot metodu ile basınç testi a) 7,5cm boyutunda küp örnek b) 4*4*16cm^3 lük prizma örnek c) Devre şeması (Kişisel arşiv, 2016)

Küp örnekler 20V DC, prizma örnekler 30V DC ile 15 dakika polarize edilip, aynı besleme voltajları ile deneyleri yapıldı. Basınç deneyi Bölüm "2.2.2 Basınç Testi" 'nde anlatıldığı gibi yapıldı. Örneklere dış iki çevresel elektrottan doğru akım verildi, iç iki çevresel elektrottan örnek potansiyel farkları (V_s) ve referans direnç potansiyel farkları (V_r) ölçüldü. Devreden geçen akım (I_c) ampermetre ile ölçüldü (Şekil 2.29c). İki adet gerinim pulu ile örnek birim şekil değiştirmesi ölçüldü. Deney sırasında yük, başlık yer değiştirmesi, birim şekil değiştirmeler, potansiyel farklar ve akım eş zamanlı olarak saniyede 10 defa kaydedildi.

2.2.9 Akıllı Betonun Alternatif Akım ile Test Edilmesi

Şimdiye kadar akıllı beton DC (Doğru akım) ile test edildi. Alternatif akım (AC) altında akıllı betonun yüzde elektriksel direnç değişimi – basınç birim şekil değiştirmesi arasındaki ilişkiyi tespit edebilmek için üç adet 7,5cm boyutunda küp akıllı beton karışımı ile hazırlandı. Döküm Bölüm "2.2.2 Basınç testi" 'nde anlatıldığı gibi yapıldı. Hazırlanan örnekler 28 gün 20^{o}C sıcaklıkta kür edildi ve 7 gün laboratuvar ortamında bekletildi. Basınç testi Bölüm "2.2.2 Basınç testi" 'nde anlatıldığı gibi yapıldı tek farkı devreye verilen voltajın maksimum genliği 20V olacak şekilde 14Vrms 50 Hz AC (RMS: root mean square) ile beslendi. Örnek elektriksel potansiyel farkı (V_s)'nin, ve devreden geçen akım (I_c)'nin etkin değerleri (rms) veri toplama sistemi ile dijital ortama kaydedildi. Örnek basınç birim şekil değiştirmesi, mekanik yük, başlık yer değiştirmesi dijital ortama kaydedildi. Deney sırasında tüm elektriksel ve mekanik ölçümler eş zamanlı olarak 10Hz ile dijital ortama kaydedildi.



Şekil 2.30 Alternatif akım ile basınç testi

2.2.10 Aktif madde etkisinin araştırılması

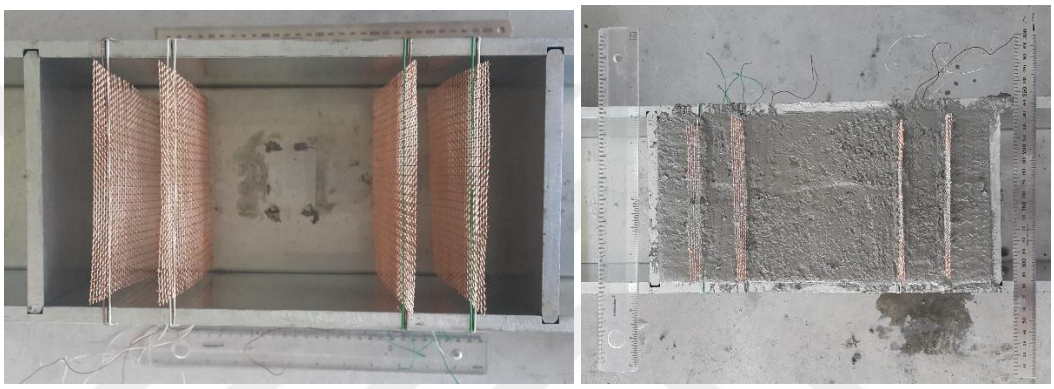
Akıllı beton içerisinde çimento gibi kimyasal reaksiyonları uzun süre devam eden aktif maddeler vardır. Aktif maddelerin neden olduğu kimyasal reaksiyonların uzun dönemde yüzde elektriksel direnç değişimi – basınç birim şekil değiştirmesi ilişkisine etkisi tespit edilmek üzere akıllı beton karışımı ile 6 adet 7,5cm boyutunda küp örnekler bölüm "2.2.2 Basınç Testi" 'nde anlatıldığı gibi hazırlandı. Örnekler 28 gün 20^{o}C su içerisinde kür edilip, dökümden sonraki 13. ayda 3 örnek basınç deneyi bölüm "2.2.2 Basınç Testi" 'ndeki gibi test edildi. Örneklere basınç testi uygulamadan önce, yüzey bağıl nemleri, James Instruments marka nemölçer cihaz ile ölçüldü. Cihaz, örneğe hasar vermeyecek şekilde temas ettirilerek, örnekteki nem nedeniyle oluşan elektrik alan değişikliğinden bağıl nemi vermektedir. Bu ölçüm her ne kadar kesin nem ölçümü yapmasa da, aynı yöntem ile ölçülen örnekler arasında karşılaştırılabilir bir veri sunmaktadır. Devre 20V DC gerilimi ile beslendi. Elektriksel potansiyel farklar (V_s, V_r), devreden geçen akım (I_c), basınç birim şekil değiştirmesi, mekanik yük, başlık yer değiştirmesi eş zamanlı olarak 10Hz ile kaydedildi. Kalan 3 örnek, bağıl nemleri ölçüldükten sonra 7 gün suda bekletilip, basınç deneyi ile test edildi.

2.2.11 Büyük Ölçekli Akıllı Betonun Basınç Testi

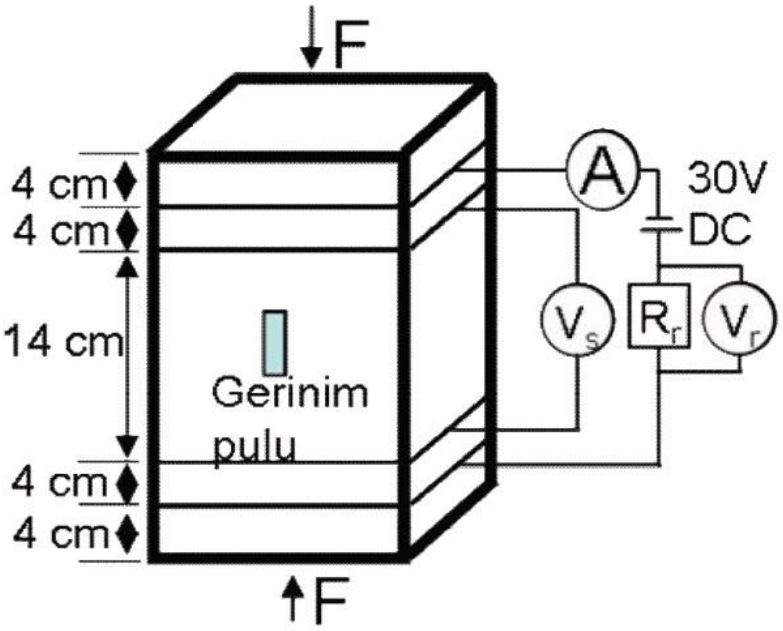
Akıllı betonun büyük ölçekte test edilmesi için iki adat 15*15*30cm^3'lük prizma örnekler döküldü. Bunun için beton kalıbının içerisine uygun boyutlarda bakır ağ elektrotlar kesilip yerleştirildi (Şekil 2.31a). Karışımın hazırlanması bölüm "2.2.2 Basınç Testi" 'ndeki gibidir. Döküm sırasında agrega, çimento, silika dumanı her seferde miksere konulup, her seferde karıştırıldı. Su + Akışkanlaştırıcı karışımı kuru karışıma 3 seferde eklendi ve her seferde karıştırıldı. Pirinç lif yaş karışımın üzerinde 5 seferde serpilerek eklendi ve karıştırıldı.

Kalıba döküm 2 seferde yapıldı. Her seferde şişlenerek hava boşluklarının oluşması engellendi (Şekil 2.31b). Örnekler 28 gün 20^{o}C su içerisinde kür edildi, 7 gün laboratuvar ortamında bekletildi. Örnekler üzerine gerinim pulları yapıştırıldı (Şekil 2.33a). Devre dış iki elektrottan 30V DC gerilimi ile 30 dakika polarize edildikten

sonra basınç testi sırasında aynı gerilim ile beslendi. Basınç testi sırasında örnek elektriksel potansiyel farkı (V_s), örneğe seri bağlı referans direncinin (R=1000Ohm) elektriksel potansiyel farkı (V_r), devreden geçen akım (I_c), gerinim pulu sinyalleri 10 Hz ile eş zamanlı olarak kaydedildi (Şekil 2.32). Örneklere mekanik test 300 ton kapasiteli Ele marka pres ile yapıldı(Şekil 2.33b). Yükleme hızı Ele pres hafızasındaki 15*30 silindir için 1080kg/saniye kullanıldı (Şekil 2.33c). Örnek elektriksel olarak izole edilmek için örnek ile Ele pres basınç başlıkları arasına cam elyaf epoksi kompozit plakalar (yeşil) yerleştirildi (şekil 2.33b).



Şekil 2.31 Akıllı beton karışımı ile 15*15*30cm^3 örnek dökümü a) Kalığ ve elektrotlar b) Döküm sonrası (Kişisel arşiv, 2017)



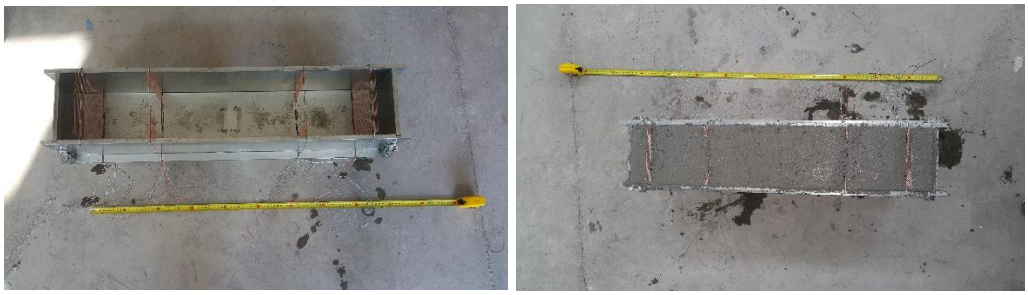
Şekil 2.32 15*15*30cm^3 akıllı beton basınç testi devre şeması



Şekil 2.33 15*15*30 cm^3 akıllı beton basınç testi a) Gerinim pulu yapıştırılmış örnek b) Örnek pres içinde teste hazır c) Deney ekipmanları (soldan sağa, bilgisayar, veri toplama cihazı, DC güç kaynağı, önde sağda dijital multimetre(Beyaz), arka sağda Ele pres) (Kişisel arşiv, 2017)

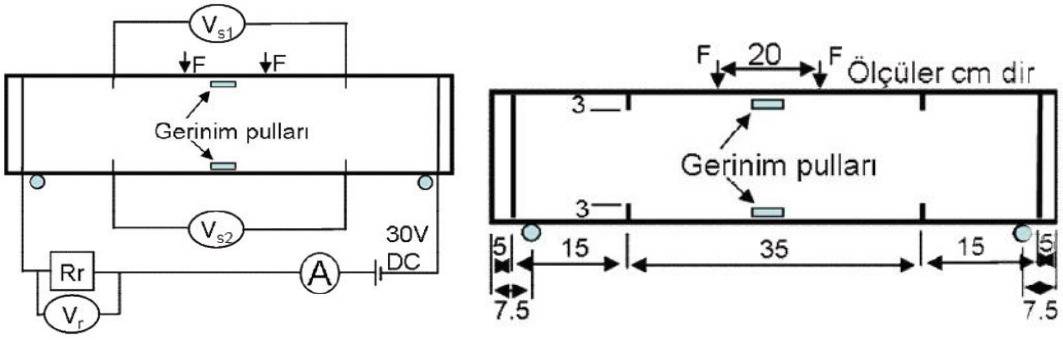
2.2.12 Büyük Ölçekli Akıllı Betonun Eğilme Testi

Akıllı betonu büyük ölçekte kiriş için test etmek için önce 15*15*75cm^3'lük kiriş kalıbı içerisinde elektrotlar yerleştirildi (Şekil 2.34a). Akıllı beton karışımı "2.2.11 Büyük Ölçekli akıllı betonun Basınç Testi" 'nde anlatıldığı gibi hazırlanıp, döküldü (Şekil 2.34). Örnekler 28 gün 20^oC su içerisinde kür edildi, 7 gün laboratuvar ortamında bekletildi. Örneklerin üst ve al yüzeylerine denk gelen yüzeylere (basınç ve çekme yüzeyleri) gerinim pulu yapıştırıldı.



Şekil 2.34 Akıllı beton karışımı ile 15*15*75 cm^3 kiriş dökümü a) kalıp ve yerleştirilen elektrotlar b) akıllı beton kalıp içinde (Kişisel arşiv, 2017)

Üretilen akıllı beton kiriş 30V DC ile 30 dakika polarize edildi. Test sırasında aynı gerilim 30V DC uygulandı. Kirişe dört nokta eğilme testi Ele marka eğilme cihazı ile yapıldı. İç üst elektrotlar arasındaki elektriksel potansiyel farkı (V_{s1}), alt elektrotlar arasındaki elektriksel potansiyel farkı (V_{s2}), referans direnci (R=1000Ohm) üzerindeki elektriksel potansiyel farkı (V_r), devreden geçen akım (I_c) ve gerinim pulu sinyalleri saniyede 10 defa eş zamanlı olarak ölçüldü (Şekil 2.35a). Elektrot konumları ve ölçüler Şekil 2.35b'de sunuldu. Dört noktadan eğilme deneyi yükleme hızı Ele presin 15*15*75 cm kiriş boyutu için hafıza menüsünde olan 45,9 kgf/san hız ile yapıldı (Şekil 3.36).



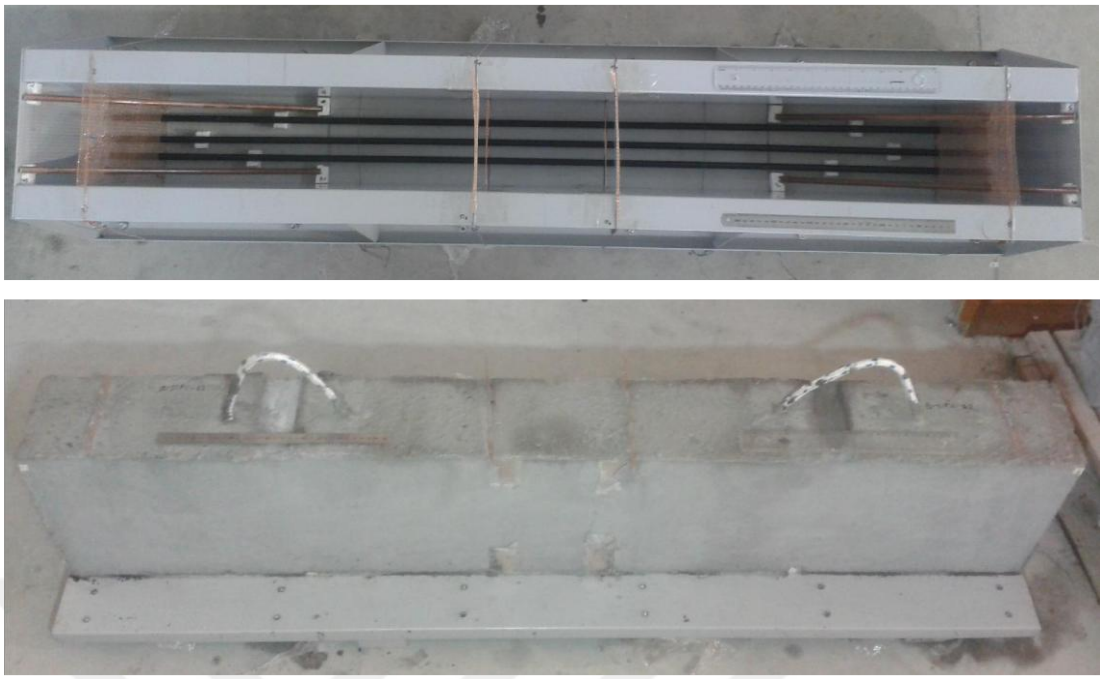
Şekil 2.35 15*15*75 kiriş eğilme deneyi a) Devre şeması b) Ölçüler



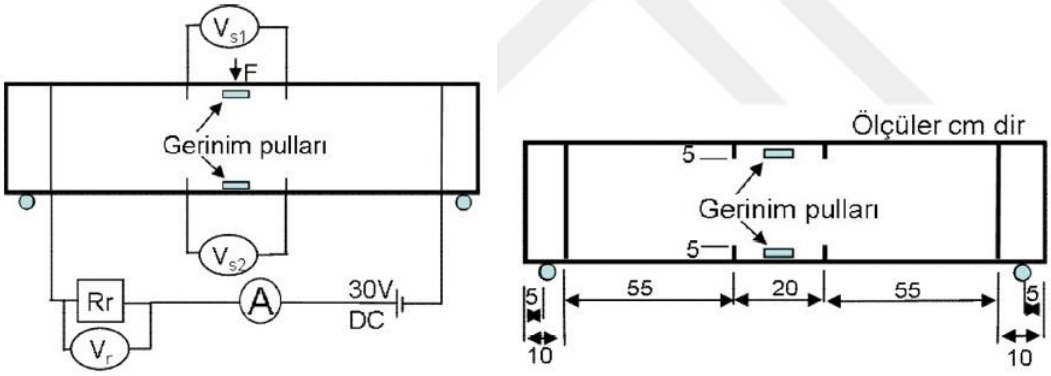
Şekil 2.36 15*15*75cm^3 kiriş eğilme deneyi a) kiriş testte b) Ekipmanlar (Kişisel arşiv, 2017)

15*30*150cm^3 lük kiriş akıllı beton karışımı ile hazırlandı. Kirişin gevrek bir şekilde kırılmaması için 3 adet 12mm çaplı cam elyaf kompozit çubuk çekme donatısı olarak kalıbın altına 1,5cm pas payı ile yerleştirildi (Şekil 2.37a). Kesme kırılmasını önlemek için 4 adet 10 mm çaplı cam elyaf kompozit pilye, yaklaşık 45^o açı yapacak şekilde ve pas payı 1,5cm olacak şekilde kalıba yerleştirildi (Şekil 2.37a). Polimer matris kompozit donatıların ve pilyelerin, kullanılmasının nedeni yalıtkan malzeme olmasıdır. Dirençleri MegaOhm seviyelerinde ölçüldü. Böylece uygulanan gerilimi sadece akıllı beton iletti.

Akıllı beton karışımı önceki bölümde anlatıldığı gibi mikser yardımı ile hazırlandı. Kalıba iki seviyede yerleştirilip, her seviyede hava boşluklarını en aza indirmek için beton şişlendi (Şekil 2.37b). 28 gün kür edilip, 7 gün laboratuvarda bekletilen kirişin orta üst (basınç) ve altına (çekme) gerinim pulları yapıştırıldı (Şekil 2.39a). Kiriş 30 V doğru akım ile 30 dakika polarize edildi. Kiriş kapalı çerçeve içine alınarak eğilme deneyi yapıldı. Kapalı çerçeve hidrolik ünitesinin yükleme hızı 26 kgf/saniye'dir. Eğilme deneyi yapılırken dış iki elektrottan 30 V DC verilip, üst iç elektrotlardan (V_{s1}) , alt iç elektrotlardan (V_{s2}) elektriksel potansiyel farkları saniyede 10 defa eş zamanlı olarak ölçüldü (Şekil 3.38a). Kirişe seri bağlı bir referans direncin (R_r=1000 Ohm) elektriksel potansiyel farkı V_r, devreden geçen akım (I_c), gerinim pulu sinyalleri, yük ve orta nokta deplasmanı saniyede 10 defa eş zamanlı olarak kaydedildi. Elektrot yerleri ve ölçüler Şekil 2.38b'de sunuldu.

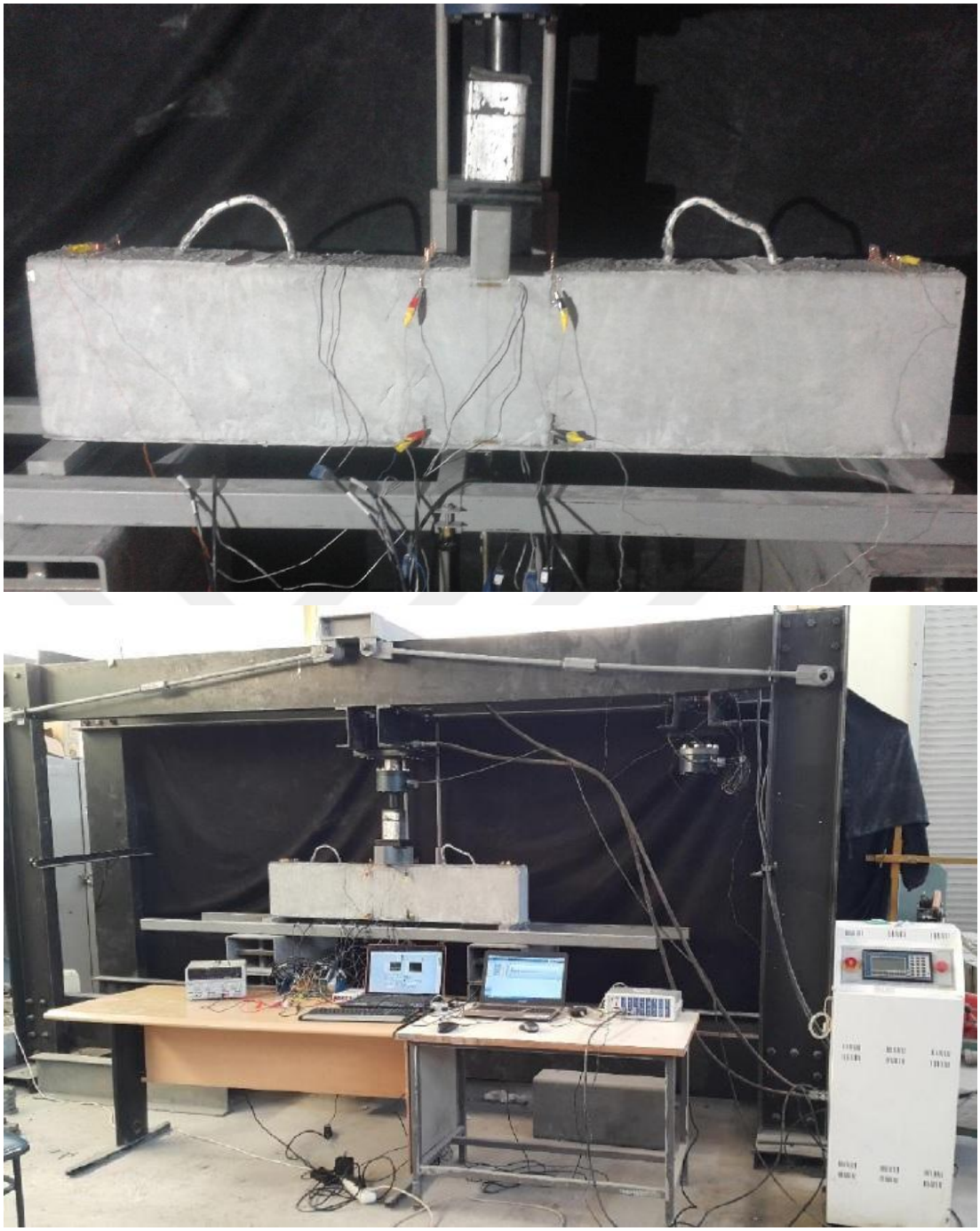


Şekil 2.37 15*30*150cm^3 akıllı beton kiriş dökümü a) Kalıp, yerleştirilen elektrotlar donatılar b) Kalıptan alınmış kiriş (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 2.38 15*30*150cm^3 akıllı beton kiriş deneyi a) Devre şeması b) Ölçüler

Kiriş kapalı çerçeve içinde çatlak oluşana kadar eğilme deneyi sürdürüldü (Şekil 2.39).



Şekil 2.39 15*30*150 cm^3 akıllı beton eğilme deneyi a) Kiriş testte b) Ekipmanlar (Kişisel arşiv, 2017)

2.2.13 Akıllı Betonun Tekrarlı Yükler ile Test Edilmesi

Akıllı betonun tekrarlı yükler ile test edilmesi için 7,5cm boyutunda küp örnek hazırlanıp, 28 gün 20^{o}C su içerisinde kür edildi, 7 gün laboratuvar ortamında bekletildi. Örnek bölüm "2.2.2 Basınç Testi" 'nde anlatıldığı gibi döküldü. Örnek testten önce 15 dakika 20V DC ile polarize edildi. Basınç testi 2mm/dk. ile Shimadzu mekanik test cihazı ile yapıldı. Beş tekrarlı yüklemede, yük minimum 300N, maksimum yük 280 kN'dur. Deney sırasında elektriksel potansiyel farklar (V_s, V_r), devreden geçen akım (I_c), basınç birim şekil değiştirmeler, başlık yer değiştirmesi ve mekanik yük 10Hz ile eş zamanlı olarak dijital dosyaya kaydedildi.

BÖLÜM ÜÇ
BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, tez çalışmasında elde edilen bulgular sunulacak ve tartışılacaktır.

3.1 Basınç Testi Sonuçları

Basınç testi uygulamak amacı ile M0 katkısız karışımı (referans karışımı) dahil toplam 25 karışım hazırlandı. 24 karışıma basınç testi uygulandı (NBS karışımı dökümden sonra priz almadığı için test edilemedi). Her karışım için hazırlanmış 7,5cm ebatında üç adet küp örneğe basınç testi yapılarak toplam 72 tane basınç testi yapılmış oldu. Kullanılan malzemeler ve yöntemler ikinci bölümde anlatıldı.

Basınç birim şekil değiştirmesine en duyarlı örneklerin tespiti için, önemli parametreler kullanılarak puanlama sistemi geliştirildi (Eşitlik 3.1).

$$Puan = (\varepsilon_{max} \times 10^3) + K - LE - (1 - R^2) \times 200 \quad (3.1)$$

Puanlama sistemi oluşturulurken aşağıdaki şartlar dikkate alındı:

- Karışımın, birim şekil değiştirme – % elektriksel direnç değişimi grafiğinin doğrusal davrandığı en büyük birim şekil değiştirmenin (ε_{max}) büyük olması avantajdır. Bu nedenle 1000 katı alınmıştır. Böylece, puana 1-2 puan birim şekil değiştirmeden gelmiştir.
- Birim şekil değiştirmeye duyarlılık (K), çok önemlidir. Bu sebeple direk toplanmıştır.
- Doğrusallık (LE), elektriksel direnç değişimi- birim şekil değiştirme eğrisinin kendisine en küçük kareler metodu ile uydurulmuş doğrudan sapma miktarını temsil eder. Büyük olması, dezavantajdır. Bu nedenle negatiftir.
- Regresyon katsayısı, (R^2), elektriksel direnç değişimi- birim şekil değiştirme eğrisinin kendisine en küçük kareler metodu ile uydurulmuş doğruya uygunluğunu (yakınlığını) belirler.

En iyi karışımlar seçilirken aşağıdaki kıstaslar temel alındı:

- En yüksek puanlı karışımlar
- Puanın standart sapmasının, ortalamasına yüzdesi (son kolonda) düşük olmalıdır. Böylece test edilen üç örnek arasında tutarlılığın yüksek olduğu anlaşılır.
- Seçilen karışımların R^2 yüksek olmalıdır, R^2 değeri 0.95 ve üzeri karışımlar iyi korelasyon değerine sahiptir.
- Tez kapsamında en iyi beş nano malzeme katkılı karışımların yarma ve eğilme deneylerinin de yapılabilmesi hedeflendi. Bu nedenle, Cn2, Gn1, Gn5, Gn4 karışımları nano malzeme katkılı karışımlar içinde en yüksek puana sahip olduğu için seçilmiştir. En yüksek puana sahip 4 karışımın üç tanesi grafen nano levha (GNL) katkılı olduğu için, Gn2 de seçilerek bu gruba eklenmiştir; böylece grafen nano levhalı 4 karışım yarma ve eğilme testleri ile test edilmiştir.

Tablo 3.1'de basınç testi yapılan tüm karşımlar ortalama puana göre büyükten küçüğe doğru sıralandı. Hesaplanan ortalama değerler, her karışıma ait üçer örneğin testi ile bulundu. Bir karışıma sahip üç örnekteki puan değişiminin ölçütü olarak puanın standart sapmasının, ortalamasına yüzdesi (son kolonda) sunuldu. Tablo 3.1'de sunulmuş basınç testi sonuçlarına göre en iyi 20 adet karışım yarmada çekme testi uygulanmak üzere seçildi. Tablo 3.1'de griye boyanmış karışımlar seçilen en iyi sonuç veren makro malzeme katkılı karışımlar, koyu ve italik yazılı karışımlar ise seçilen en iyi nano malzeme katkılı karışımlardır.

Tablo 3.1 Basınç testi ile en iyi 20 karışım. Gri renk ile boyalı karışımlar makro malzeme katkılı, italik ve kalın yazılmış karışımlar nano malzeme katkılı en iyi karışımlardır

Karışım Adı	İletkenin Hacimsel Oranı %	Ort. LE	Std Sap LE	Ort. R2	Std Sap R2	Ort. K	Std Sap K	Ort. Puan	Std Sap Puan	STD/ort. Puan*100
S4**	0,8	21	4,3	0,94	0,04	126,7	78,2	93,8	80,7	86,1
Br3	0,8	6,6	2,2	0,99	0,01	54,2	9,5	46,2	7,6	16,4
Br4	1	8,8	3,5	0,98	0,02	52,1	12	40,5	10,7	26,5
K3*	0,8	6,9	4,2	0,99	0	44,3	9,6	36,6	5,3	14,4
T5*	1	5,2	2,6	0,99	0	42,1	9,7	36,1	8,8	24,4
Cop5*	0,35	6,8	3,5	0,98	0,01	44,5	20,3	36,1	16	44,4
Br2	0,5	7,8	1,9	0,99	0	43,7	10,5	35,4	11,8	33,2
Brp4*	1	9	2,1	0,97	0,02	48,6	16	34,1	17,7	51,9
Cop4*	0,2	6,9	3,3	0,98	0,02	43,6	5,4	34,1	1,7	5
Brp6*	2	7,2	5,8	0,98	0,02	43,2	4	32,6	13,9	42,8
Br6	2	4,5	1,8	0,99	0	36,9	4,4	31,8	4,3	13,5
Cn2	***0,046***	***5,3***	***3,3***	***0,99***	***0,01***	***37,72***	***12,27***	***31,28***	***13,96***	***44,62***
T4*	0,8	5	1,7	0,99	0	36,5	7,6	31,1	9	29
Br1	0,35	7,3	1	0,99	0	38,9	6,6	31	7,4	23,9
Co7*	0,2	7,6	2,4	0,98	0,01	39,7	8,5	30,3	5,3	17,4
Brp3*	0,8	6,2	1,1	0,98	0,02	37,5	10,7	30,1	8,4	27,9
K2*	0,5	6,6	1,1	0,99	0	37	5,8	29,7	5,6	18,7
Co8*	0,35	6,6	2,3	0,98	0,02	38,1	13,1	28,7	6,9	24,1
S3**	0,5	12,3	8,2	0,97	0,02	44,8	10,1	27,5	21,4	78
Br5	1,5	7,3	3,8	0,98	0,02	37,6	6,1	26,8	3,1	11,7
Brp2*	0,5	8,5	2,1	0,99	0,01	35,9	5,6	26	6,4	24,7
Gn1	***0,023***	***7,3***	***5,6***	***0,98***	***0,02***	***35,05***	***8,41***	***25,05***	***4,27***	***17,06***
K4*	1	10,6	2,5	0,98	0,02	37,7	7,9	24,3	3,1	12,6
Co9*	0,8	7,8	3,3	0,99	0,01	32,2	3,8	23,2	7,3	31,3
C12*	0,5	13,7	6,4	0,98	0,02	39,2	3,9	22,3	8,7	39,1
C11*	0,35	8	1,3	0,99	0,01	30,7	10,8	22	12,1	55
Gn5	***0,115***	***14,5***	***8,5***	***0,96***	***0,02***	***43,94***	***9,99***	***21,86***	***20,2***	***92,43***
T1*	0,2	6,6	1,5	0,99	0	28,2	2,3	21,3	1,8	8,3
Gn4	***0,092***	***12,4***	***3,2***	***0,97***	***0,02***	***38,41***	***5,63***	***20,64***	***6,09***	***29,5***
T3*	0,5	7,8	3,7	0,97	0,03	31,2	4,6	19,7	13,4	67,8
K6*	2	9,4	1	0,98	0,01	30,8	7	19,7	8,3	42,4
Cop1*	0,5	9,9	4,4	0,98	0,01	30,4	5,5	19,6	2,2	11,3
A2*	0,5	9,7	3	0,99	0,01	29,4	1,5	18,6	4,8	25,7
Co10*	1,5	10,6	3,1	0,96	0,03	33,6	6,5	16,5	8,4	51,1
Brp1*	0,35	10,2	6,3	0,97	0,03	31,1	6,2	15,9	15	94,1
S7**	0,5	11	0,7	0,99	0,01	27,8	1,9	15,7	3,5	22,6
C4*	1	8,1	2	0,99	0,01	23,9	5,5	15,2	8,7	57,2

Tablo 3.1'in devamı.

Karışım Adı	İletkenin Hacimsel Oranı %	Ort. LE	Std Sap LE	Ort. R2	Std Sap R2	Ort. K	Std Sap K	Ort. Puan	Std Sap Puan	STD/ort. Puan*100
C1*	0,35	8,8	4,4	0,98	0,01	24,8	0,4	14,6	6,8	46,3
T6*	1,5	9,8	0,6	0,98	0,01	26,4	2,8	14,1	1,1	7,5
Brp5*	1,5	15,3	8,5	0,92	0,08	43,2	1,4	13,3	24,9	187,8
C6*	0,35	12,1	9,2	0,97	0,03	29,6	7,6	13,2	15	113,2
S14**	3	9,3	1,7	0,99	0	22,9	4,6	12,9	5,8	44,8
Cn4	*0,092*	*9,2*	*4,6*	*0,98*	*0,01*	*23,3*	*2,72*	*12,05*	*7,93*	*65,83*
S5**	0,2	10,6	5,5	0,96	0,04	29,6	2,3	12	14	116,6
C14*	1	13,3	3,5	0,97	0,01	28,7	3,4	11,8	3,8	32,7
A1*	0,35	16,2	8	0,97	0,01	30,8	8,7	11,3	5,2	45,8
C8*	0,8	15,2	3,4	0,96	0,03	31,9	7,5	10,4	15,8	152,7
K1*	0,35	9,7	5,2	0,97	0,03	23,5	6,2	10,2	10,3	100,9
S2**	0,35	12,4	2,9	0,96	0,02	29,3	7,1	10,1	12,4	122,7
NKS	*6g/lt*	*12,5*	*2,8*	*0,96*	*0,01*	*28,38*	*0,36*	*9,67*	*4,67*	*48,27*
Gn2	***0,046***	***10,2***	***6,1***	***0,95***	***0,08***	***28,28***	***11,7***	***9,52***	***10,22***	***107,28***
T2*	0,35	12,4	9,7	0,91	0,09	38,2	10,9	9,2	17	184,3
nT1	*0,2*	*8*	*0,9*	*0,98*	*0,01*	*19,12*	*2,01*	*9,11*	*3,44*	*37,74*
K5*	1,5	14,4	4,9	0,97	0,03	26,4	4,2	6,7	13,7	203,7
Gn3	*0,069*	*13,7*	*4*	*0,97*	*0,01*	*25,15*	*5,82*	*6,56*	*10,43*	*158,92*
A3*	0,8	19,7	4,3	0,96	0,04	33,6	10,8	6,4	15	235,2
S6**	0,35	15,7	4,9	0,96	0,01	28,5	2,4	6,3	8,3	131,8
C9*	1	15,3	5,3	0,97	0,03	26,3	10,2	6,2	18,8	301,5
Co1*	0,5	16,2	3	0,97	0,02	25,2	5,3	5,3	10,3	193,2
S18**	5	17,6	8	0,95	0,03	31,1	15,3	4,8	18,4	380,5
Ap1*	0,35	18,3	9,4	0,94	0,04	33,4	9,5	4,7	21,3	452,6
nT3	*0,8*	*9,7*	*2,6*	*0,99*	*0*	*14,28*	*4,28*	*4,49*	*4,68*	*104,18*
Cop6*	0,8	15,2	7	0,96	0,02	24,8	7,7	4,4	4,4	99,6
Cop3*	2	9,1	0,8	0,98	0,01	14,9	4,2	4,2	5,5	131,4
S8**	0,8	16,6	3,8	0,96	0,03	27	2,3	3,9	8,2	208,9
nT2	*0,5*	*10,9*	*4,2*	*0,98*	*0,02*	*17,35*	*0,56*	*3,83*	*7,82*	*204,42*
NDS	*6g/lt*	*3*	*0*	*0,86*	*0,06*	*33,06*	*8,93*	*3,75*	*2,75*	*73,18*
Ap2*	0,5	17	5,3	0,96	0,03	27,3	13,3	3,5	1,9	54
Cn5	*0,115*	*6,2*	*1,3*	*0,99*	*0,01*	*8,79*	*2,2*	*3,05*	*2,2*	*72,26*
NÇS	*6g/lt*	*3,8*	*1,5*	*0,75*	*0,16*	*56,05*	*45,49*	*3,01*	*24,61*	*817,07*
nT5	*1,5*	*12,4*	*4*	*0,97*	*0,01*	*18,15*	*2,48*	*1,78*	*7,21*	*405,26*
C7*	0,5	15	2,5	0,96	0,01	22,8	13,1	1,6	11,5	718,2
Co4**	4	14,1	3,3	0,97	0,02	20,4	5,7	1,4	11,6	846,3
A6*	2	32	4,1	0,86	0	59,1	61,8	0,8	56,9	7063,6
Cn1	*0,023*	*11,3*	*6,3*	*0,95*	*0,03*	*18,54*	*2,97*	*0,73*	*8,8*	*1206,47*
S1**	0,2	17,6	4,3	0,96	0,02	24,1	4,7	0,2	12,2	7353,9
nT4	*1*	*15,3*	*5,9*	*0,97*	*0,02*	*17,83*	*1,54*	*-1,37*	*8,56*	*-626,68*
Co2*	1	14,2	6,2	0,96	0,03	18,7	1,7	-1,6	12,5	-785,3
Ap3*	0,8	14,9	8,3	0,96	0,05	20,4	14,6	-2,5	3,8	-148,9
Cop2*	1	18,9	16,8	0,92	0,1	28,8	8,9	-3,7	38,5	-1028,3
S16**	4	30	11,7	0,95	0,03	24,4	8,3	-5,2	25,6	-491

Tablo 3.1'in devamı.

Karışım Adı	İletkenin Hacimsel Oranı %	Ort. LE	Std Sap LE	Ort. R2	Std Sap R2	Ort. K	Std Sap K	Ort. Puan	Std Sap Puan	STD/ort. Puan*100
C3*	0,8	20,5	3,9	0,95	0,02	23,7	2,9	-5,7	8,3	-144,9
C13*	0,8	22,4	4,8	0,93	0,04	28,1	3,6	-5,8	10	-172,2
C5*	1,5	22,1	0,1	0,94	0,02	26,5	1,9	-6,8	6,3	-93,6
C2*	0,5	17,6	6,8	0,95	0,04	17,8	2,5	-7,5	12,8	-171,1
S9**	1	17,8	7,2	0,94	0,04	20,4	5,9	-7,5	21,5	-286,5
C15*	1,5	24,5	5,5	0,93	0,05	24,8	5	-11,4	20,6	-180,3
S17**	4,5	30,1	18,4	0,94	0,03	27	14,4	-12,7	37,1	-292,1
Cn3	*0,069*	*17,4*	*2,3*	*0,93*	*0,02*	*13,51*	*1,97*	*-14,9*	*3,01*	*-20,18*
M0	0	20,8	5,6	0,92	0,03	18,9	2,7	-16,2	13,8	-85,2
Co3*	2	22,1	3,6	0,9	0,04	16,2	3,1	-24	14,2	-59,2
A5*	1,5	42,2	8	0,76	0,08	60,8	28,5	-27,2	6,8	-25
Co6**	8	29,2	6,9	0,92	0,02	15,6	2,7	-28,3	9,3	-32,9
S12**	2	29,5	8,9	0,88	0,07	17,8	1	-34,2	21,9	-63,9
S10**	1,5	26,7	8,5	0,85	0,06	18,5	5,9	-36,6	18,4	-50,4
S15**	3,5	29,8	10,9	0,86	0,19	20,9	0,8	-36,7	48,2	-131,4
Ap4*	1	19,4	9,8	0,88	0,11	4	2,4	-37,6	35	-93,1
Ap6*	2	46,3	28,6	0,96	0,02	15,5	6,3	-38	32	-84,2
Co5*	6	32,8	20,2	0,84	0,11	21	6,8	-41,3	48,2	-116,7
A4*	1	35,2	22,8	0,74	0,29	22	6,9	-62,6	74,1	-118,4
C10*	1,5	44,7	22,4	0,75	0,16	30	14,8	-63,9	64,7	-101,2
S11**	1,8	45,3	18,6	0,8	0,13	16,7	1,5	-66,5	45,1	-67,7
S13**	2,5	43,4	12,1	0,77	0,07	14	3,2	-73	27,3	-37,4
Ap5*	1,5	67	49	0,69	0,22	16,7	8,8	-111,7	101,1	-90,5

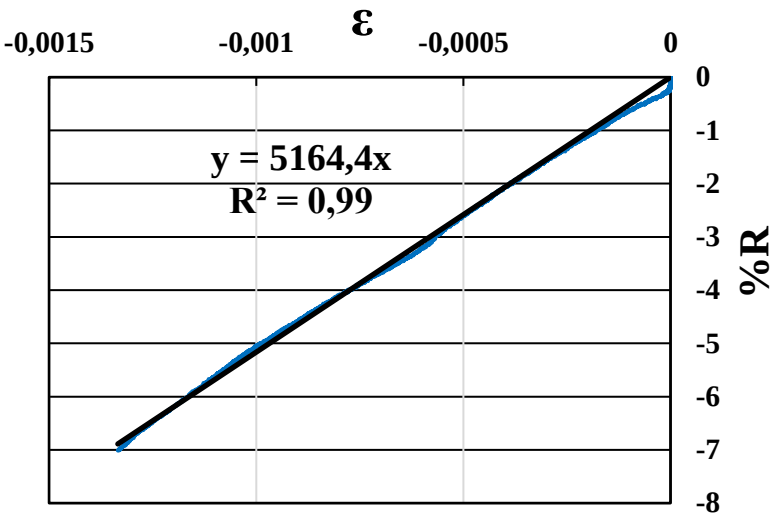
(*) İşaretli karışımlar Kolatar O. (2016) tezinde basınç testi yapılan karışımların sonuçlarıdır (Kolatar Ö. ,2016) .

(**) İşaretli karışımlar (Teomete E. ,2017) tarafından yapılan karışımların basınç testi sonuçlarıdır.

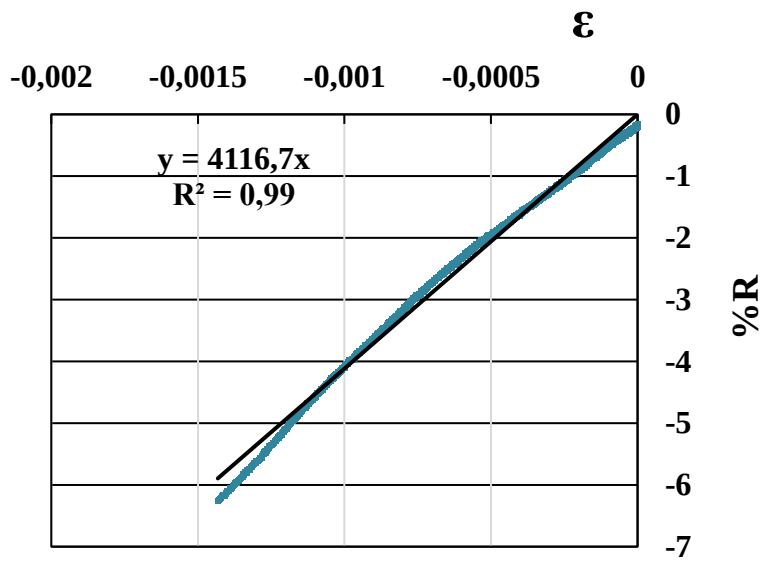
S4 karışımı en yüksek puanı almasına rağmen; standart sapmasının, ortalama puana oranı çok yüksektir. Basınç testlerinde, Br3 hacimsel olarak %0,8 pirinç lif katkılı en iyi karışımdır. Tipik bir Br3 örneğinin basınç birim şekil değiştirme – yüzde elektriksel direnç değişim grafiği Şekil 3.1'de sunuldu. Br3 karışımının duyarlılığı (K) 54'tür. Birim şekil değiştirmeye ticari metal gerinim pullarına göre 27 kat daha fazla duyarlıdır. Doğrusallık hatası %6,6 düşüktür. Korelasyon katsayısı 0,99'dur. Basınç birim şekil değiştirme ile elektriksel direnç arasında güçlü doğrusal ilişki vardır.

Basınç testlerinde nano malzeme katkılı karışımlar içinden en iyi karışım Cn2'dir. Hacimce %0,046 oranında ÇDKNT (Çok duvarlı karbon nano tüp) içeren Cn2 karışımının duyarlılığı 44, doğrusallığı %5,3, bağlılık katsayısı 0,99'dur. Cn2'nin tipik

birim şekil değiştirme - % elektriksel direnç değişimi grafiği şekil 3.2'de sunuldu. Cn2 metal gerinim pullarından 22 kat daha duyarlıdır. Basınç deneyleri sırasında genelde elektriksel direncin azaldığı gözlemlendi. Bunun sebebi, basınç altında, lif – lif, lif – matris temasının artması, mikro boşlukların kapanması ile elektron ve iyon iletiminin kolaylaşmasıdır.

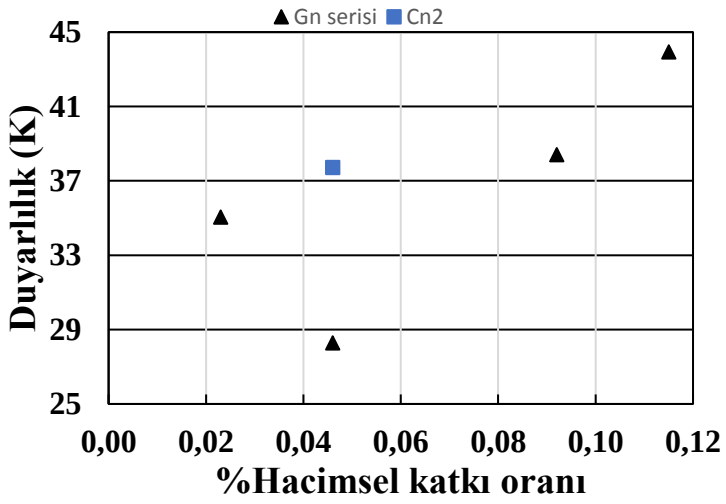


Şekil 3.1 Hacimsel olarak %0,8 pirinç lif katkılı Br3 karışımının tipik bir birim şekil değiştirme – %R grafiği



Şekil 3.2 Hacimsel olarak %0,046 ÇDKNT katkılı Cn2 karışımının tipik birim şekil değiştirme – %R grafiği

Nano malzeme katkılı seçilen en iyi beş karışımın dört tanesi GNL katkılıdır. Basınç deneylerinde grafen nano levha katkılı örneklerin % hacimsel nano malzeme katkı oranı - duyarlılık (K) grafiği Şekil 3.3'te verilmiştir. Şekil 3.3'e bakıldığında hacimsel olarak %0,046'dan itibaren katkı oranı arttıkça duyarlılıkta artış görülmektedir.



Şekil 3.3 En iyi beş karışımın % hacimsel nano malzeme katkı oranı – duyarlılık (K) grafiği

3.2 Yarmada Çekme Testi Sonuçları

Bu bölümde, basınç testi sonuçlarına göre seçilen, M0 referans karışımı dahil 21 karışıma yarmada çekme testi yapıldı. 21 karışımdan 5 tanesi nano malzeme katkılı karışım, 15 tanesi makro malzeme katkılı karışım, 1 tanesi ise katkısız M0 karışımıdır. Her karışımdan üçer adet 7,5cm boyutunda küp örnekler hazırlandı. Toplamda 63 örneğe yarmada çekme testi yapıldı.

Her testte ortama 8 kolon, 2500 satır veri dosyası elde edildi. Hesaplamalar için 7 kolon daha eklenip, verilerin analizini yapabilmek için yük – deplasman, yük – zaman, birim şekil değiştirme – zaman, %R – birim birim şekil değiştirme grafikleri her örnek için ayrı ayrı çizildi ve analiz edildi. 63 örneğe ait analiz grafiklerini tek tek vermek yerine, özet sonuçlar bir tablo halinde sunuldu. Basınç testinde kullanılan duyarlılık, doğrusallık ve korelasyon katsayısı parametreleri, yarmada çekme testi analizi için de kullanıldı.

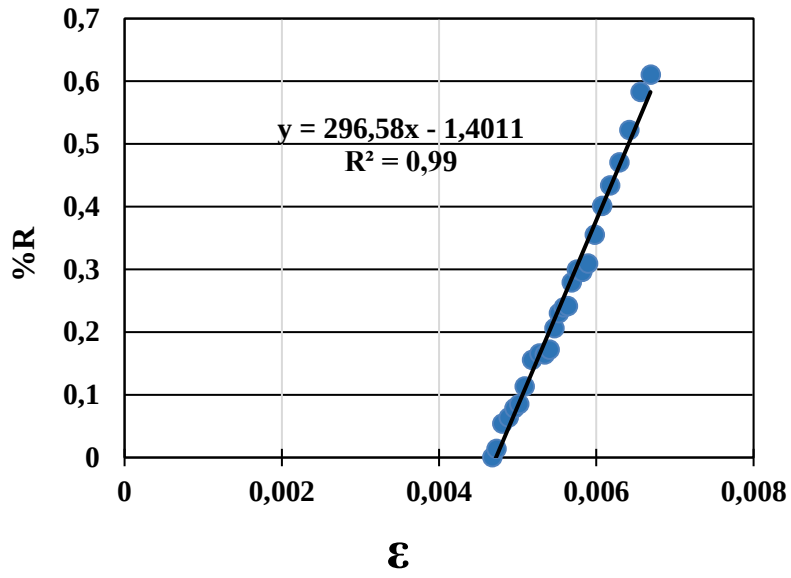
Her karışımın performansını ölçmek için basınç testleri için kullanılan Eşitlik 3.1'de verilen puanlama sistemi kullanıldı. Sonuçlar tablo 3.2'de puana göre sıralı bir şekilde sunuldu. Tablo 3.2'de, karışımların üçer yarmada çekme testinden aldıkları ortalama ve standart sapma doğrusallık (LE), korelasyon katsayısı (R^2), duyarlılık ve puanları sunuldu. Ayrıca, bir karışıma sahip üç örnekteki puan değişiminin ölçütü olarak puanın standart sapmasının, ortalamasına yüzdesi son kolonda sunuldu. Tablo 3.1 ve 3.2'de %0,8 hacimsel pirinç lif katkılı BrY3 karışımı, basınç ve yarmada çekme testlerinde en yüksek puanı alan ikinci karışımdır (gri renge boyalıdır). Tablo 3.2'de koyu ve italik yazılı olan karışımlar nano malzeme katkılı karışımlardır. Basınç testi uygulanan karışımların isimlerinin yanına "Y" harfi getirilerek yarma testi örnekleri tanımlanmıştır. BrY3 karışımının, puanının standart sapmasının, puan ortalamasına oranı %91'dir; Tablo 3.2'de en yüksek puana sahip ilk üç karışım içinde en düşük orandır.

Tablo 3.2 Yarmada çekme testi sonuçları

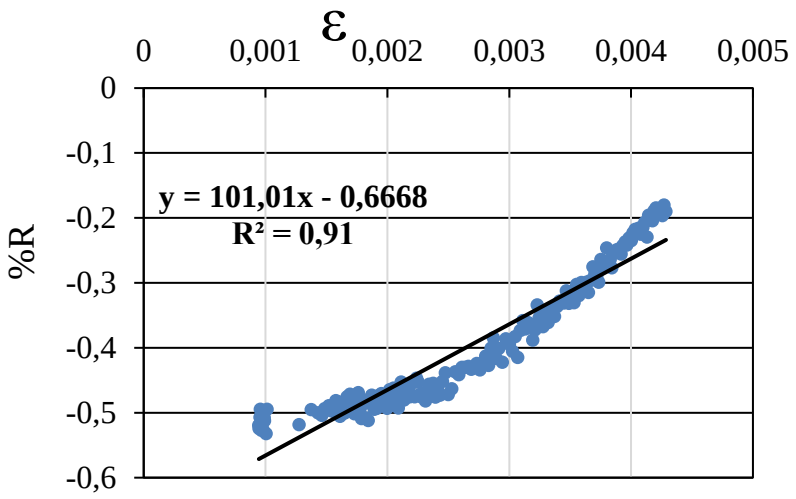
Karışım Adı	İletken Hacimsel Oranı %	Ort. LE	Std Sap LE	Ort. R2	Std Sap R2	Ort. K	Std Sap K	Ort. Puan	Std Sap Puan	STD/Ort. Puan*100
TY5	1	12,0	10,7	0,97	0,03	552	949	536	931	174
BrY3	0,8	37,2	42,4	0,83	0,24	246	424	397	363	91
GnY2	***0,046***	***117,5***	***134,3***	***0,8***	***0,1***	***503,7***	***725,4***	***354,7***	***599,0***	***168,9***
KY2	0,5	12,0	5,8	1,0	0,0	260,0	441,0	244,4	432,6	177,0
BrY4	1	27,3	18,0	0,8	0,1	253,3	419,0	196,6	400,2	203,5
BrY5	1,5	15,1	5,3	0,9	0,0	219,2	371,0	190,7	370,4	194,2
TY4	0,8	48,7	46,9	0,8	0,1	259,9	432,3	181,9	470,5	258,6
KY4	1	28,0	35,7	0,8	0,3	183,2	304,6	119,8	213,0	177,8
BrY2	0,5	37,1	40,6	0,8	0,3	186,1	142,0	107,8	136,9	127,0
M0Y	0	56,1	47,4	0,7	0,3	196,5	143,1	76,5	113,1	147,9
BrpY3	0,8	11,4	4,5	1,0	0,0	71,1	67,5	53,9	63,1	117,0
GnY4	***0,092***	***25,1***	***6,7***	***0,9***	***0,1***	***94,0***	***159,3***	***52,0***	***139,0***	***267,5***
BrY1	0,35	14,6	12,4	0,9	0,1	73,1	97,9	49,3	70,3	142,6
CopY4	0,2	9,6	3,9	1,0	0,0	15,6	7,0	3,4	1,5	46,0
CoY8	0,35	9,8	4,0	1,0	0,0	11,7	15,2	-2,6	1,7	-66,9
KY3	0,8	10,0	2,4	1,0	0,0	4,4	0,5	-8,1	7,8	-95,3
GnY1	***0,023***	***18,4***	***2,0***	***0,9***	***0,0***	***3,4***	***1,9***	***-27,2***	***5,6***	***-20,7***
CoY7	0,2	21,8	18,5	0,9	0,1	2,7	1,3	-37,3	46,2	-123,7
CnY2	***0,046***	***53,2***	***42,0***	***0,7***	***0,2***	***69,4***	***118,5***	***-39,2***	***79,8***	***-203,7***
BrY6	2	31,9	42,3	0,8	0,3	7,1	7,6	-55,5	89,6	-161,4
GnY5	***0,115***	***974,7***	***1496,7***	***0,9***	***0,0***	***54,1***	***72,3***	***-934,1***	***1423,5***	***-152,4***

Şekil 3.4'te BrY3 karışımının yarmada çekme testi, tipik %R - birim şekil değiştirme ilişkisi sunuldu. Birim şekil değiştirme- %R arasında güçlü bir doğrusal ilişki vardır.

Tablo 3.2'de nano malzeme katkılı örnekler içerisinde en yüksek puana sahip örnek %0,046 hacimsel oranda grafen nano levha (GNL) katkılı GnY2 karışımıdır. Şekil 3.5'te GnY2 karışımının yarma testi, %R - birim şekil değiştirme ilişkisi sunuldu. Birim şekil değiştirme ve elektriksel direnç değişimi arasında güçlü doğrusal ilişki vardır.



Şekil 3.4 Yarmada Çekme testi %R – birim şekil değiştirme ilişkisi. BrY3 karışımı, %0,8 oranında pirinç lif içerir



Şekil 3.5 %0,046 hacimsel olarak GNL katkılı karışımın tipik %R – birim şekil değiştirme grafiği

3.3 Eğilme Testi Sonuçları

Bu bölümde, katkısız referans karışımı dahil toplam 16 karışıma eğilme testi uygulandı. Bu 16 karışımdan 5 tanesi nano malzeme katkılı, 10 tanesi makro malzeme katkılı ve 1 tanesi katkısız referans karışımıdır. 16 karışımdan her biri için üçer adet

7,5*7,5*30,5cm^3'lük kiriş örnekler hazırlandı ve toplam 48 adet eğilme testi uygulandı. Eğilme testlerinde, elektriksel direnç ile çatlak uzunluğu arasında doğrusal ilişki tespit edildi. Eğilme testi sonuçları Tablo 3.3'te puana göre sıralı bir şekilde sunuldu. Tablo 3.3'te kalın ve italik olarak yazılı örnekler nano malzeme katkılı örneklerdir. Eğilme testi sonuçlarını değerlendirmek için kullanılan puanlama sistemi Eşitlik 3.2'de sunuldu. Örnek isimlerine "e" harfi eklenerek eğilme örnekleri tanımlandı.

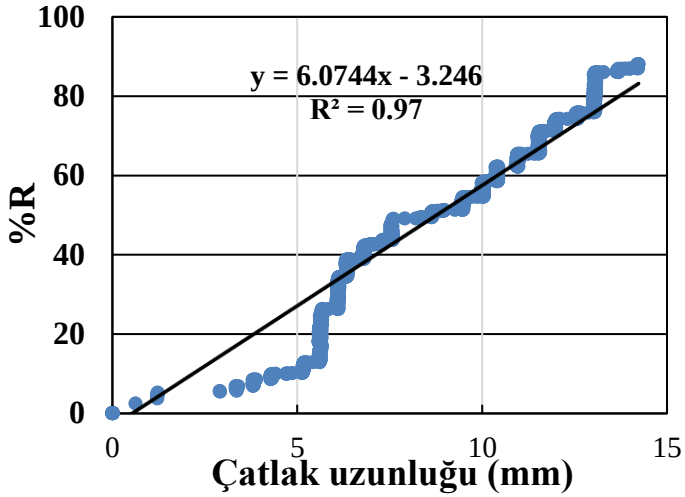
$$PuanEgilme = 100 \times CK - CLE - (1 - R^2) \times 50 \qquad (3.2)$$

Eşitlik 3.2'de, çatlak duyarlılığı (CK), önemi oranında puana etkimesi için 100 ile çarpılmıştır (CK, çatlak ölçümünde doğrusallığa (CLE) göre genelde daha küçüktür). CLE , %R – çatlak uzunluğu grafiğinin doğrudan sapma miktarını gösterir bu nedenle puanı düşürür. %R-çatlak uzunluğu grafiğinin korelasyon katsayısı R^2, doğrusal ilişkinin gücünü gösterir.

Tablo 3.3 Eğilme testi sonuçları

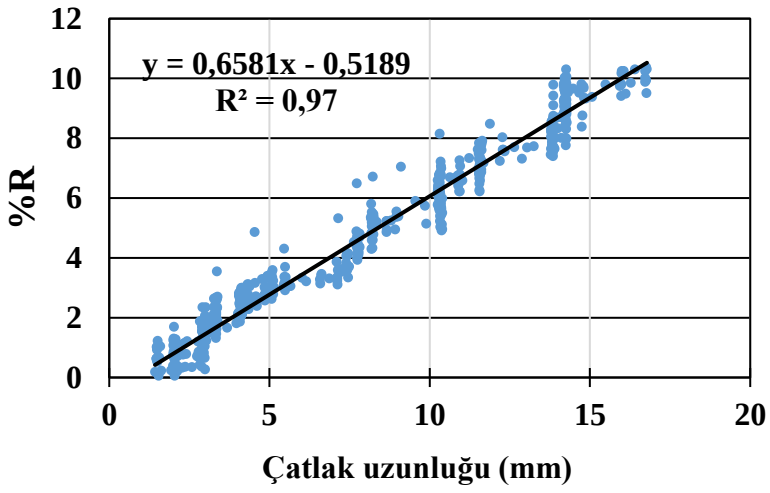
Karışım Adı	İletken Hacimsel Oranı %	Ort. CLE	Std. CLE	Ort. R2	Std. R2	Ort. CK	Std. CK	Ort. Puan	Std. Puan	STD/Ort. Puan*100
Gne2	***0,046***	***23,60***	***3,45***	***0,88***	***0,086***	***10,12***	***8,86***	***982,22***	***883,49***	***89,95***
Ke4	1	12,3	3,6	0,96	3,63	8,84	12,0	869,4	1205,1	138,6
Te5	0,8	39,9	21,0	0,95	0,03	4,9	4,1	444,6	420,9	94,7
M0e	0	136,2	155,7	0,95	0,04	5,6	2,1	424,6	62,5	14,7
Cne2	***0,046***	***20,71***	***9,94***	***0,93***	***0,051***	***3,76***	***0,89***	***351,43***	***99,57***	***28,33***
Gne4	***0,092***	***13,27***	***6,70***	***0,97***	***0,025***	***3,08***	***1,39***	***293,55***	***131,10***	***44,66***
Ke2	0,5	16,7	2,6	0,97	0,02	2,90	1,3	272,0	125,4	46,1
Ke3	0,8	10,6	4,8	0,98	0,02	2,19	1,5	207,4	147,8	71,3
Gne1	***0,023***	***17,65***	***2,56***	***0,95***	***0,015***	***2,18***	***0,65***	***197,31***	***67,18***	***34,05***
Gne5	***0,115***	***20,95***	***9,38***	***0,97***	***0,007***	***1,81***	***0,41***	***158,53***	***30,88***	***19,48***
Bre3	0,8	21,2	2,57	0,96	0,0058	0,8	0,19	55,82	21,61	38,7
Bre5	1,5	19,3	4,7	0,94	0,03	0,65	0,2	42,7	28,6	67,1
Bre4	1	28,9	5,2	0,89	0,05	0,64	0,3	29,4	40,7	138,3
Bre1	0,35	33,8	16,8	0,73	0,23	0,66	0,6	18,4	69,4	377,7
Bre6	2	31,7	15,9	0,82	0,13	0,40	0,1	-0,1	24,0	-22782,3
Bre2	0,5	39,3	13,5	0,82	0,12	0,24	0,1	-24,5	26,8	-109,8

Şekil 3.6'da en yüksek puana sahip Gne2 (%0.046 hacimsel grafen nano levha içeren beton) karışımının tipik bir çatlak uzunluğu - % elektriksel direnç değişimi grafiği sunuldu. %R ile çatlak uzunluğu arasında güçlü doğrusal ilişki bulunmaktadır.



Şekil 3.6 %0,046 hacimsel grafen nano levha katkılı örneğin (Gne2) tipik bir çatlak uzunluğu - %R grafiği

Yarmada çekme ve basınç testlerinde güvenilir en yüksen puana sahip %0,8 hacimsel pirinç lif katkılı karışım olan Br3 karışımının, eğilme testi sonucu elde edilen Bre3 örneğinin tipik çatlak uzunluğu - %R grafiği Şekil 3.7'de sunuldu.



Şekil 3.7 %0,8 hacimsel pirinç lif katkı oranına sahip tipik bir Bre3 örneğinin çatlak uzunluğu - %R grafiği

3.4 Akıllı Betonun Seçilmesi

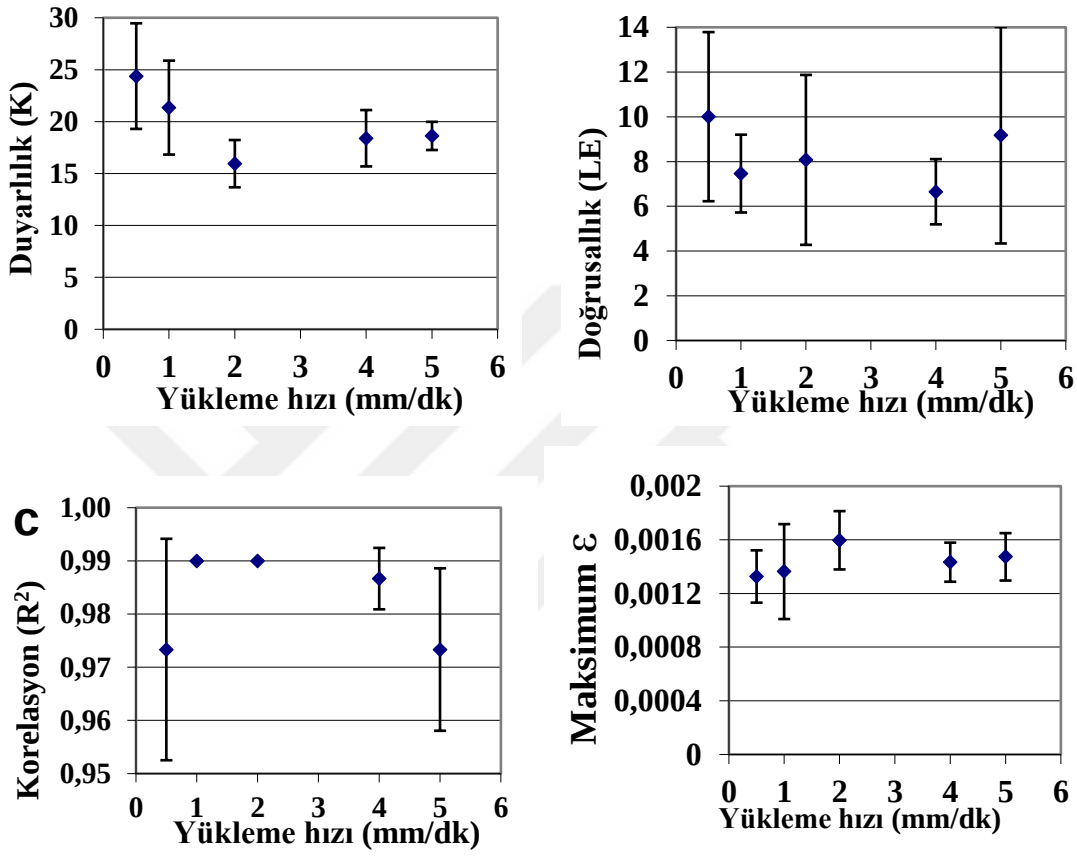
Akıllı beton (AB) karışımı belirlenirken, önceki bölümlerde anlatılan basınç, yarmada çekme ve eğilme testlerinden elde edilen Tablo 3.1-3.2-3.3 ten yararlanıldı. Tablo 3.1'e bakıldığında hacimsel %0,8 oranında 13mm çelik lif katkılı S4 karışımı birinci sıradadır. Ancak STD/ort.Puan yüzdesi, ikinci sırada olan hacimsel %0,8 pirinç lif katkılı Br3 karışımına göre oldukça yüksektir. Bu durum Br3 karışımının kararlılığının S4 karışımına göre daha iyi olduğunu göstermektedir. Basınç testi sonuçlarına göre Br3 karışımı aldığı puan ve kararlılıkla öne çıkmaktadır. Tablo 3.2'de hacimsel %1 tufal katkılı TY5 karışımı birinci sıradadır. Ancak, bu sonuçlarda da STD/ort.Puan yüzdesi Br3 karışımına göre oldukça yüksektir. Buradan, Br3 karışımının TY5 karışımına göre daha kararlı bir davranış sergilediğini görebiliriz. Br3 karışımı Tablo 3.3'te 11. sırada yer almasına karşın, ortalama korelasyonu (R^2=0,96) diğer karışımlara göre iyi bir değer almıştır. Br3 karışımının eğilme testi sonuçlarında kendisinden yüksek puana sahip çoğu karışıma göre düşük STD/ort.Puan yüzdesine ve ortalama çatlak doğrusallığına (CLE) sahip olması dikkat çekmektedir. Akıllı betonun birim şekil değiştirme duyarlılığı daha önemli olduğundan%0,8 hacimsel pirinç lif içeren Br3 karışımı akıllı beton olarak seçilmiştir.

Nano malzemeler içeren karışımlar içerisinde ise Tablo 3.1'de görüleceği gibi, hacimsel %0,046 ÇDKNT (Çok duvarlı karbon nano tüp) katkılı Cn2 karışımı en üst sıradadır. Tablo 3.3'te ise çatlak duyarlılığında ikinci sıradadır. Betonun basınca çalıştığı buna bağlı olarak basınç birim şekil değiştirmesine duyarlılığının çok daha önemli olduğu düşünülürse, nano malzeme katkılı karışımlar içerisinde hacimsel %0,046 ÇDKNT katkılı Cn2 karışımı en iyi karışımdır.

3.5 Akıllı Betonun Farklı Yükleme Hızlarında Test Edilmesi Sonuçları

15 adet 7,5cm boyutunda küp örnek, akıllı beton karışımı kullanılarak hazırlandı. Her üçer örneğe, yükleme hızları 0,5-1-2-3-4-5 mm/dk. olacak şekilde 15 adet basınç testi yapıldı. Yükleme hızı arttıkça örneklerin birim birim şekil değiştirmeye duyarlılığı azaldığı görüldü. Yüksek yükleme hızlarında, akıllı beton örneklerinin

duyarlılıkları 16-18 civarında dalgalandığı tespit edildi (Şekil 3.9a). Doğrusallık ve korelasyon – yükleme hızı grafiklerinde herhangi bir eğilim gözlemlenmemiştir (Şekil 3.9b-c). Farklı yükleme hızlarında akıllı beton benzer büyüklükte maksimum birim şekil değiştirme göstermiştir (Şekil 3.9d).



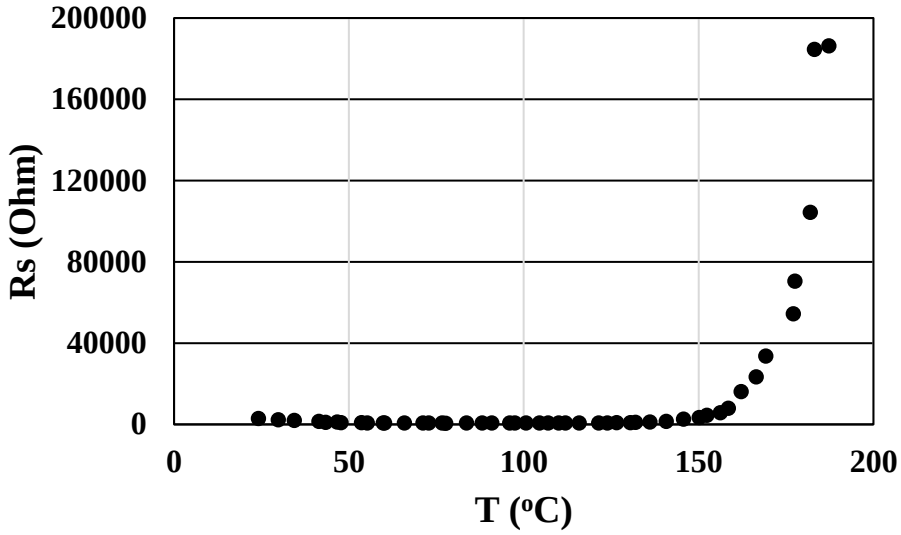
Şekil 3.8 Akıllı betonun farklı yükleme hızlarındaki sonuçları a) Yükleme hızı – K grafiği b) Yükleme hızı – LE grafiği c) Yükleme hızı – R^2 grafiği d) Yükleme hızı – Maksimum birim şekil değiştirme grafiği

3.6 Sıcaklık ve Nemin Akıllı Betona Etkilerinin Sonuçları

Akıllı betonun elektriksel direncinin sıcaklık ile değişimini incelemek için 3 adet 7,5cm ebatlarıda küp örnekler hazırlandı. İkinci bölümde kullanılan yöntem detaylı bir şekilde anlatıldı.

Deneyden elde edilen verilere göre tipik bir örneğin elektriksel direncinin sıcaklık ile değişimi grafiği Şekil 3.9'da sunuldu. Grafiğe göre sıcaklık ile direncin yaklaşık

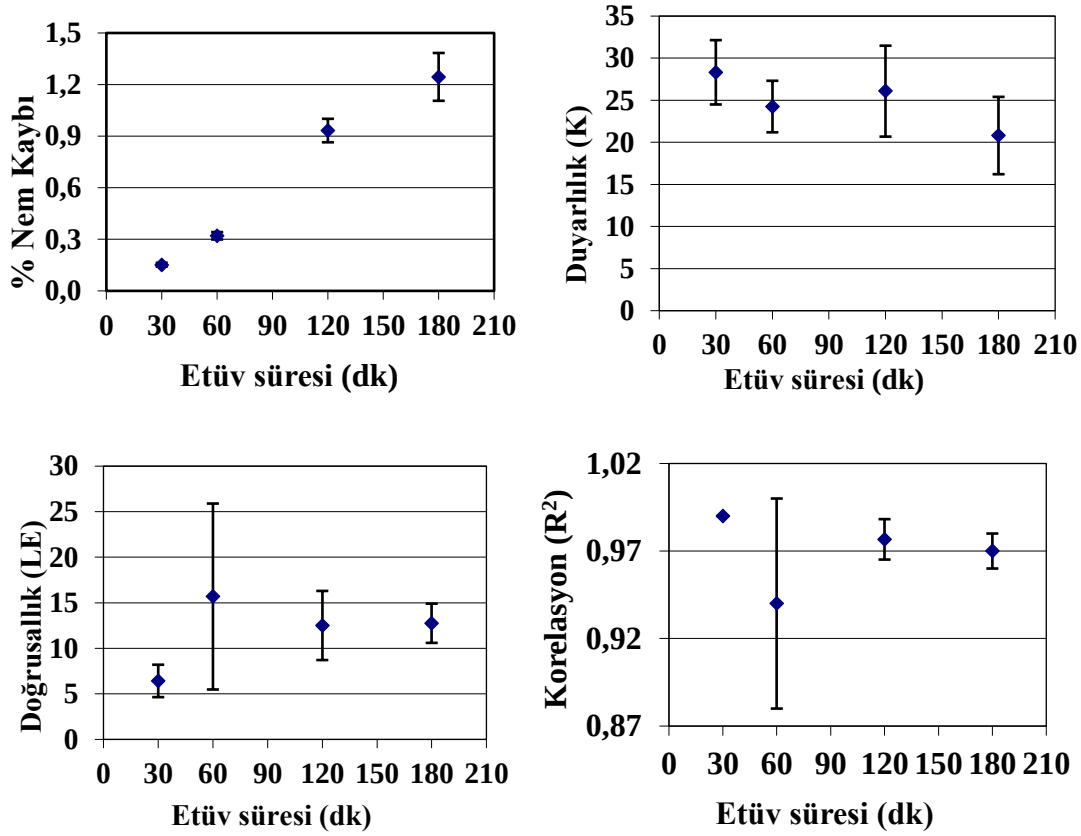
150ºC'den sonra arttığı gözlendi. Bunun sebebi, yüksek sıcaklıklarda akıllı betonun çimento hamuru büzüşürken, pirinç liflerin genleşerek beton içerisinde çatlaklara sebep olmasıdır. Oluşan çatlaklar lif – matris temasını engelleyerek elektriksel direncin artmasına sebep olur.



Şekil 3.9 Akıllı betonun elektriksel direncinin sıcaklık ile değişim grafiği

Nemin birim şekil değiştirme - %R ilişkisine etkisini tespit etmek için, 12 adet 7,5cm boyutunda akıllı beton küp örnekleri hazırlandı. Her üç örnek 90ºC sıcaklıktaki etüvde, 30-60-90-180 dakika bekletildi. Nem içeriğinin değişmesini önlemek amacıyla alüminyum folyoya sarılarak oda sıcaklığında soğutuldu ve basınç testi uygulandı.

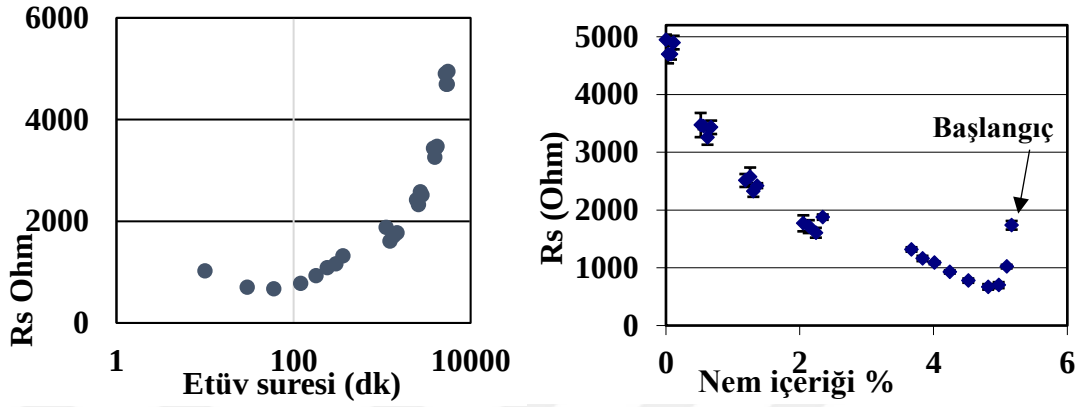
Aynı süre etüvde bekletilen her üç örneğin ortalama değerleri hata miktarları ile birlikte Şekil 3.10'da sunuldu. Örneklerin %nem kaybı etüv içerisinde kalma süreleri ile doğrusal ilişki içerisindedir (Şekil 3.10a). Örneklerin birim şekil değiştirmeye duyarlılıkları nemin azalmasıyla birlikte bir miktar azalmıştır. Ancak hata çubukları göz önünde bulundurulduğunda, duyarlılıktaki azalma oldukça küçüktür(Şekil 3.10b). Nem kaybının artışı, doğrusallıkta bir miktar artışa sebep olmuştur (Şekil 3.10c). Korelasyonda bir miktar azalma görülmüştür (Şekil 3.10d).



Şekil 3.10 Nemin akıllı betona etkisinin araştırılması, 90ºC etüv zamanı ile a) Nem kaybı b) Duyarlılık (K) c) Doğrusallık (LE) d) Korelasyon (R^2) değişimleri

Nemin elektriksel dirence etkisini tespit etmek için 7,5cm boyutunda 3 adet küp akıllı beton 90ºC etüvde 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 1112, 1232, 1352, 1472, 2459, 2579, 2669, 2819, 3819, 3936, 4059, 4179, 5186, 5306, 5426, 5546 dakika bekletilerek test edildi. Deney detaylı bir şekilde ikinci bölümde anlatıldı. Deneylerden elde edilen elektrik direnci – etüv süresi grafiği ve elektrik direnci - % nem içeriği grafikleri Şekil 3.11'de sunuldu. Nem yüzdesi, kuru durum esas alınarak bulunmuştur. Elektrik direnci 90ºC etüvde 60 dakika ısıtılıncaya kadar düşer (Şekil 3.11a; Bu şekilde, verilerin görülebilmesi için yatay eksen logaritmik çizildi.). Bu düşüşün nedeni, pirinç liflerin etrafındaki su filminin buharlaşması, birbirine temas eden pirinç liflerin elektrotları daha iyi iletebilmesidir. Elektriksel direncin en düşük olduğu 60. dakikada elde edilen nem içeriği optimum nem içeriğidir. Bu optimum nem içeriği beton içerisindeki mikro boşlukların su ile dolu olup iyon transferi ile elektriğin iletilebildiği ve lif – lif, lif – matris ara yüzeylerinin kuru olduğu ve direkt temas ile elektriğin iletilebildiği nem içeriğidir (Şekil 3.11b). Akıllı betonun optimum nem

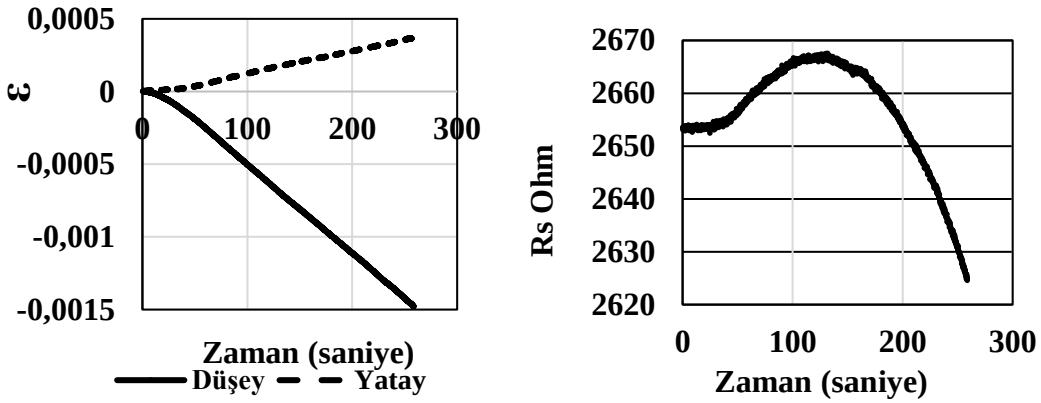
içeriği %4,8'dir. 90ºC etüv içerisinde 60 dakikanın üzerine çıktıkça, mikro boşluklardaki su kaybolmaya başlar. İyonik elektrik iletimi azalır. Nem oranı optimum değerinin altına düşer. Elektrik direnci artar (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 a) Elektriksel direnç – etüvde bekleme süresi grafiği b) Elektriksel direnç – %nem içeriği grafiği

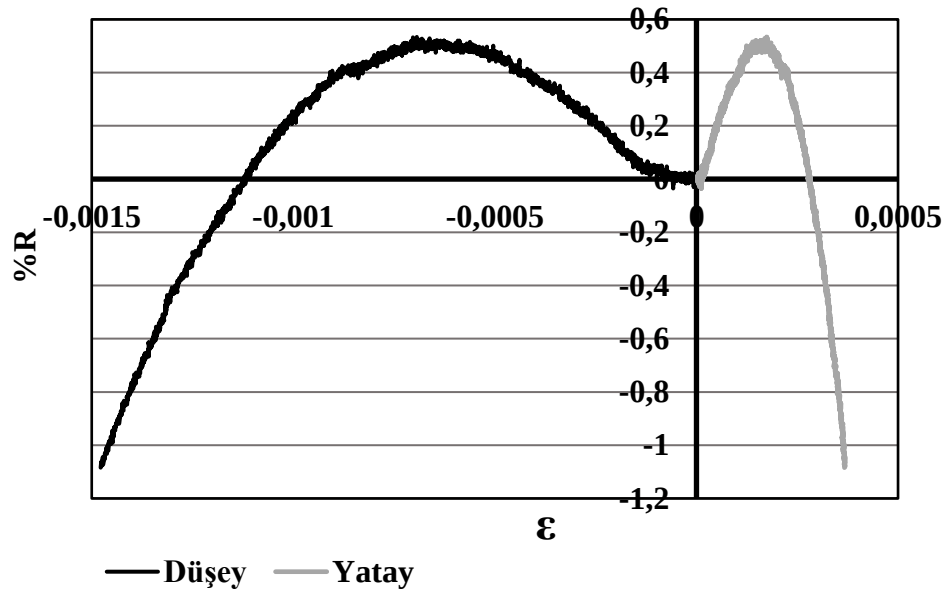
3.7 Çapraz Yüklemenin Akıllı Betona Etkilerinin Araştırılması Sonuçları

Elektrik akımının, basınç birim şekil değiştirmesine dik olduğu durumda, düşey ve yatay birim şekil değiştirmeler ölçüldü. Düşey birim şekil değiştirme, deney süresince negatif yönde (Basınç etkisi) artarken, yatay birim şekil değiştirme Poisson etkisi nedeniyle pozitif yönde (Çekme etkisi) artar (Şekil 3.12). Deneyin başlarında elektriksel direnç artar (Şekil 3.12b). Bunun nedeni, Poisson etkisi nedeniyle yatay yönde artan birim şekil değiştirme, mikro boşlukları açar, lif - lif, lif - matris temasını azaltır. Deney sırasında örneğin direnci 127. saniyede en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Bu noktadan sonra örnek direnci azalmaya başlar. Bunun nedeni, düşey yöndeki basınç birim şekil değiştirmesi, yatay yöndeki birim şekil değiştirmeye baskın gelerek, mikro boşlukları küçültür, lif – lif, lif – matris temasını arttır, direnç azalır (Şekil 3.12b).

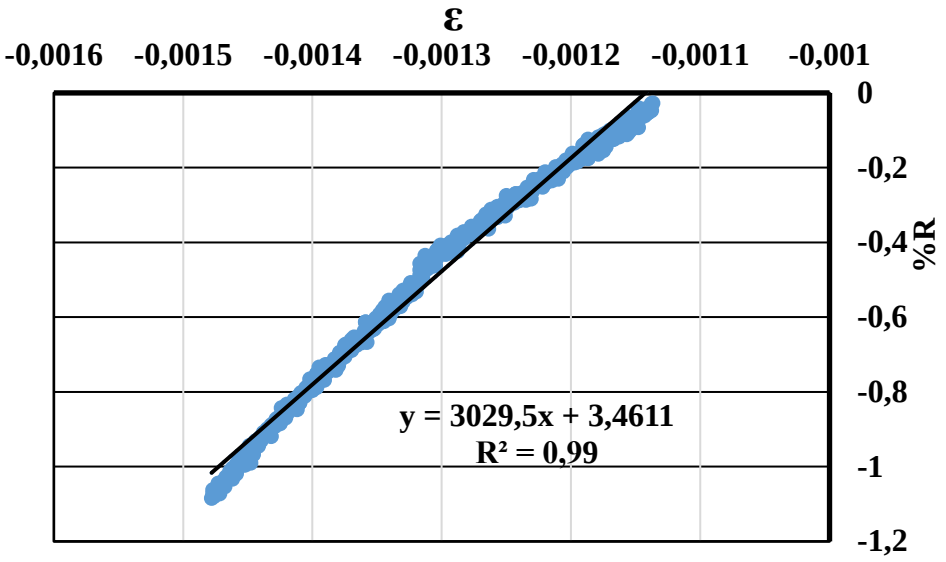


Şekil 3.12 Çapraz yükleme basınç deneyi a) Zaman - birim şekil değiştirme grafiği b) Zaman – elektrik direnç grafiği

Elektrik direnç değişimi (%R) – birim şekil değiştirme ilişkisi Şekil 3.13'de sunuldu. Şekil 3.14'te elektriksel direnç değişimi (%R) negatif olduktan sonra düşey birim şekil değiştirme ile aralarında güçlü bir doğrusal ilişki oluşur (R^2=0,99).

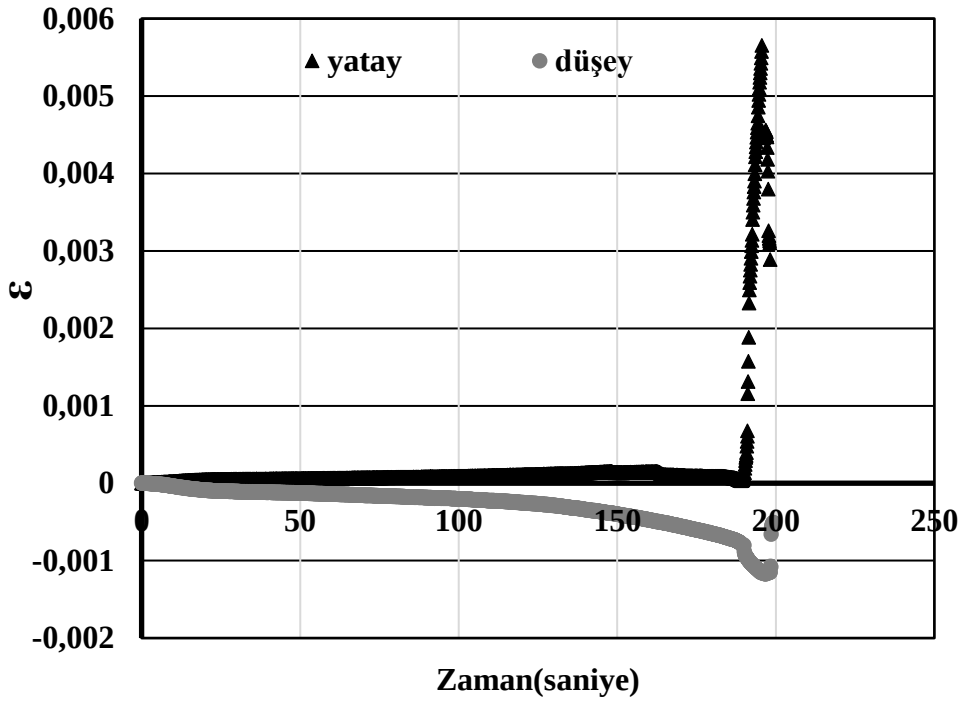


Şekil 3.13 Çapraz yükleme basınç deneyi düşey ve yatay birim şekil değiştirme - %R grafiği

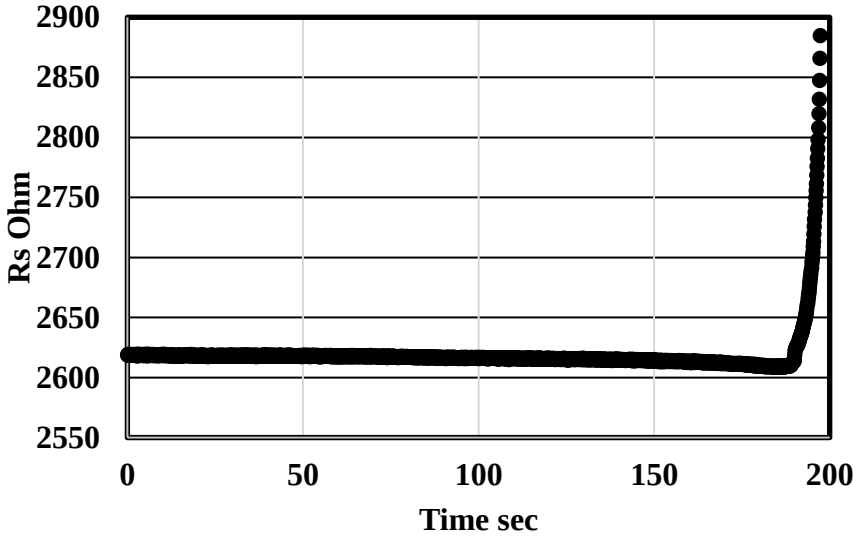


Şekil 3.14 Çapraz yükleme basınç düşey birim şekil değiştirme – %R grafiği

Elektrik akımının çekme birim şekil değiştirmesine dik olduğu durumda, çekme birim şekil değiştirmesinin elektrik direncine etkisini araştırmak için, çapraz yarmada çekme testi yapıldı. Deneylerde düşey ve yatay birim şekil değiştirmeler ölçüldü (Şekil 3.15). Elektrik direnci, deney sırasında artmıştır (Şekil 3.16). Bu artışın nedeni, çekme birim şekil değiştirmesi nedeniyle, mikro boşlukların açılıp, lif – lif, lif – matris temasının azalmasıdır.

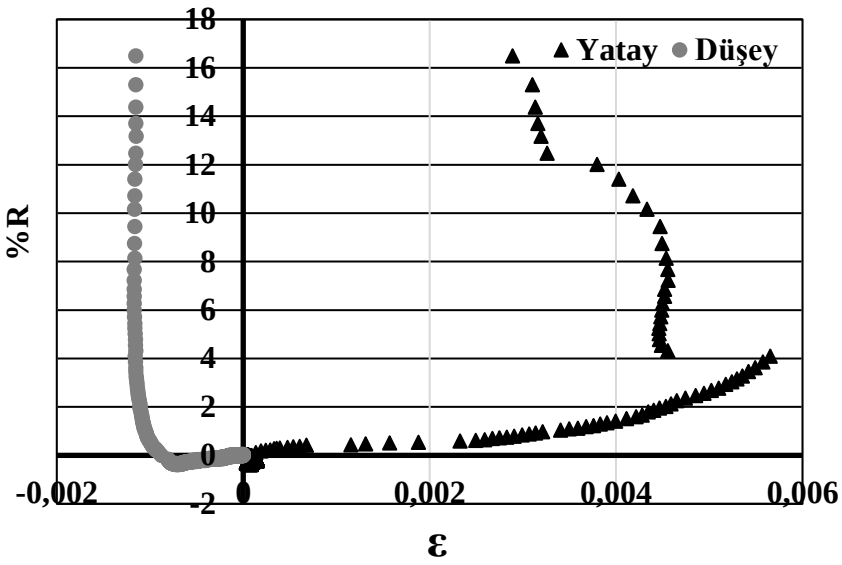


Şekil 3.15 Çapraz yarmada çekme deneyinde, zaman – birim şekil değiştirme grafiği

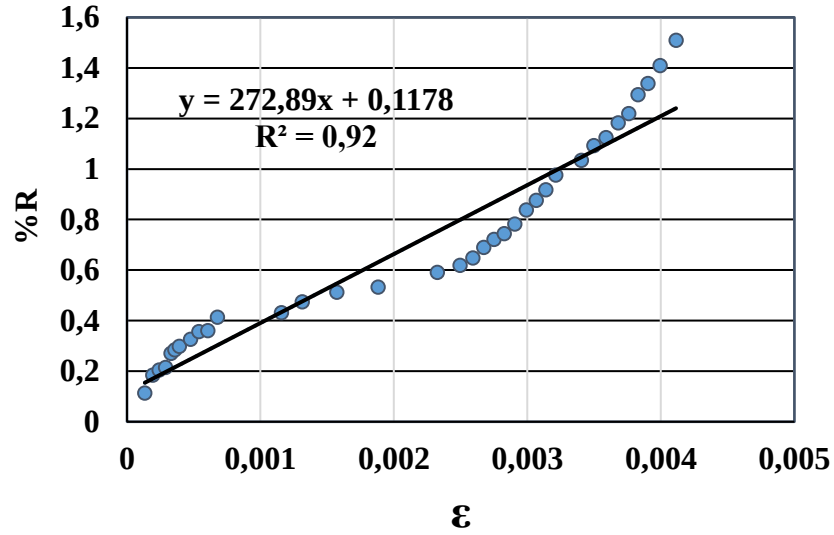


Şekil 3.16 Çapraz yarmada çekme deneyinde, zaman – elektriksel direnç grafiği

Şekil 3.17'de yüzde elektriksel direnç değişimi (%R), yatay ve düşey birim şekil değiştirmeler sunuldu. Yatay birim şekil değiştirme ile yüzde elektriksel direnç değişim grafiği Şekil 3.18'de sunuldu. Yatay birim şekil değiştirme ile elektriksel direnç değişimi ile güçlü bir doğrusal ilişki vardır.



Şekil 3.17 Çapraz yarmada çekme deneyinde yatay ve düşey birim şekil değiştirme - %R grafiği



Şekil 3.18 Çapraz yarmada çekme deneyinde yatay birim şekil değiştirme - %R grafiği

Çapraz basınç ve yarmada çekme deneylerinden elde edilen güçlü doğrusal ilişkilere göre; akıllı beton iki yönde yüklemelere maruz kalması durumunda, çapraz yükleme etkilerini çıkartmak için kullanılabilir.

3.8 Akıllı Betonun Çevresel Elektrot ile Test Edilmesi Sonuçları

Üçer adet 7,5 cm boyutunda küp ve 4*4*16cm^3 prizma akıllı beton karışımı ile hazırlandı ve basınç testi uygulandı. Ölçümlerde çevresel elektrot metodu kullanıldı.

Devreden geçen akım ve voltaj değerleri gürültü seviyesinde ölçüldü (Tablo 3.4). Çevresel elektrot metodu ile ölçülen akım ve voltaj değeri batırılmış elektrot metodunda ölçülen değerlerden daha küçüktür. Bunun sebebi, kullanılan bakır bantların ve yapıştırıcının iletken olmasına rağmen büyük kontak dirençleri oluşmasıdır. Elektriksel direnç değişimi ile birim şekil değiştirme arasında herhangi bir doğrusal ilişki tespit edilemedi. Elektriksel direnç değişimi ile birim şekil değiştirme arasındaki ortalama korelasyon 0,28'dir.

Tablo 3.4 Batırılmış ve çevresel elektrot karşılaştırılması

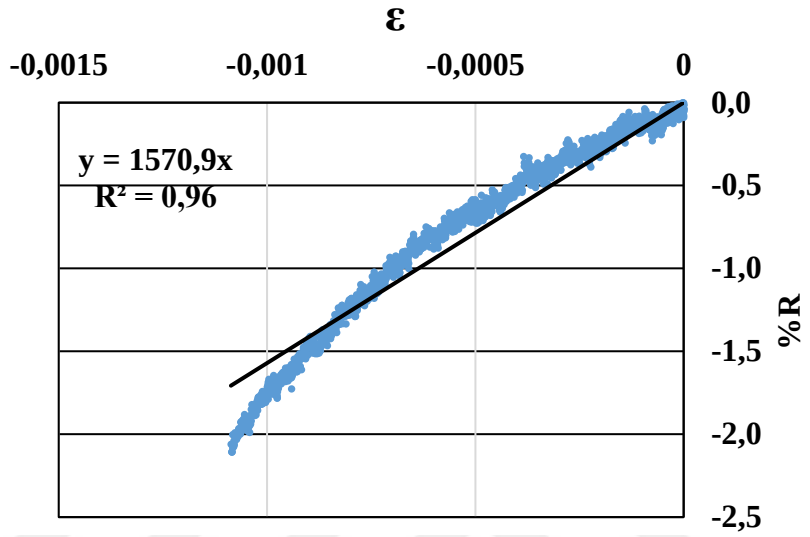
Akıllı beton Örneği	**Akım (A)**	**V_s (V)**
Küp Batırılmış Elektrot (20V DC Besleme)	4,5E-03	10,05
Çevresel Elektrot Küp Örnek (20V DC Besleme)	7,4E-04	0,081
Çevresel Elektrot Prizma Örnek (20V DC Besleme)	6,7E-06	0,008

3.9 Alternatif Akım ile Akıllı Betonun Test Edilmesi Sonuçları

Basınç testinde, alternatif akımın (AC) akıllı betona etkilerini araştırmak için üç adet 7,5cm boyutunda küp örnekler akıllı beton karışımı kullanılarak hazırlandı. Şekil 3.19'da tipik bir akıllı beton örneğinin basınç birim şekil değiştirme – elektriksel direnç değişimi (%R) grafiği sunuldu. Elektriksel direnç değişimi ile basınç birim şekil değiştirme arasında güçlü doğrusal ilişki tespit edildi.

Alternatif akım (AC) ile doğru akım (DC) basınç testlerinden elde edilen ortalama performans parametreleri (Her 3 örneğin ortalama verileri) Tablo 3.5'te sunuldu. Doğru akım ile yapılan basınç testinden elde edilen duyarlılık (K=54) alternatif akım ile yapılan testten elde edilen duyarlılıktan (K=18) daha büyüktür. Akıllı beton

karışımı doğru akım altında basınç birim şekil değiştirmesine daha duyarlıdır. Birim şekil değiştirme – elektriksel direnç değişimi grafiğinin doğrusallığı (en iyi doğrudan sapmasının ölçütü, LE), alternatif akım için daha fazladır. Benzer biçimde korelasyon katsayısı, alternatif akım ile yapılan teste göre daha büyüktür.



Şekil 3.19 Alternatif akım ile tipik bir akıllı beton örneğinin Basınç birim şekil değiştirme – Yüzde elektriksel direnç değişimi %R grafiği

Tablo 3.5 doğru akım ve alternatif akım basınç deneyi sonuçları

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

3.10 Aktif Madde Etkisinin Araştırılması Sonuçları

Akıllı beton içindeki aktif maddelerin, birim şekil değiştirme – elektriksel direnç değişimi arasındaki ilişkisine etkisini tespit etmek için, altı adet 7,5cm boyutunda küp örnek hazırlandı. Örneklerin dökümlerinden 13 ay sonra basınç testi ikinci bölümde

anlatıldığı gibi yapıldı. Genç örneklerden (28 gün kür sonrası 7 gün laboratuvarda bekletilen) ve yaşlı örneklerden (28 gün kür sonrası 12 ay laboratuvar ortamında bekletilen) basınç testi ile elde edilen sonuçlar Tablo 3.6'da sunuldu. Yaşlı örneklerden 3 tanesi 13 ay laboratuvar ortamında bekletilirken, kalan 3 adet örnek 13 ay laboratuvar ortamında bekletilip, 1 hafta suda bekletildi. Tüm yaşlı örneklere basınç testi uygulandı.

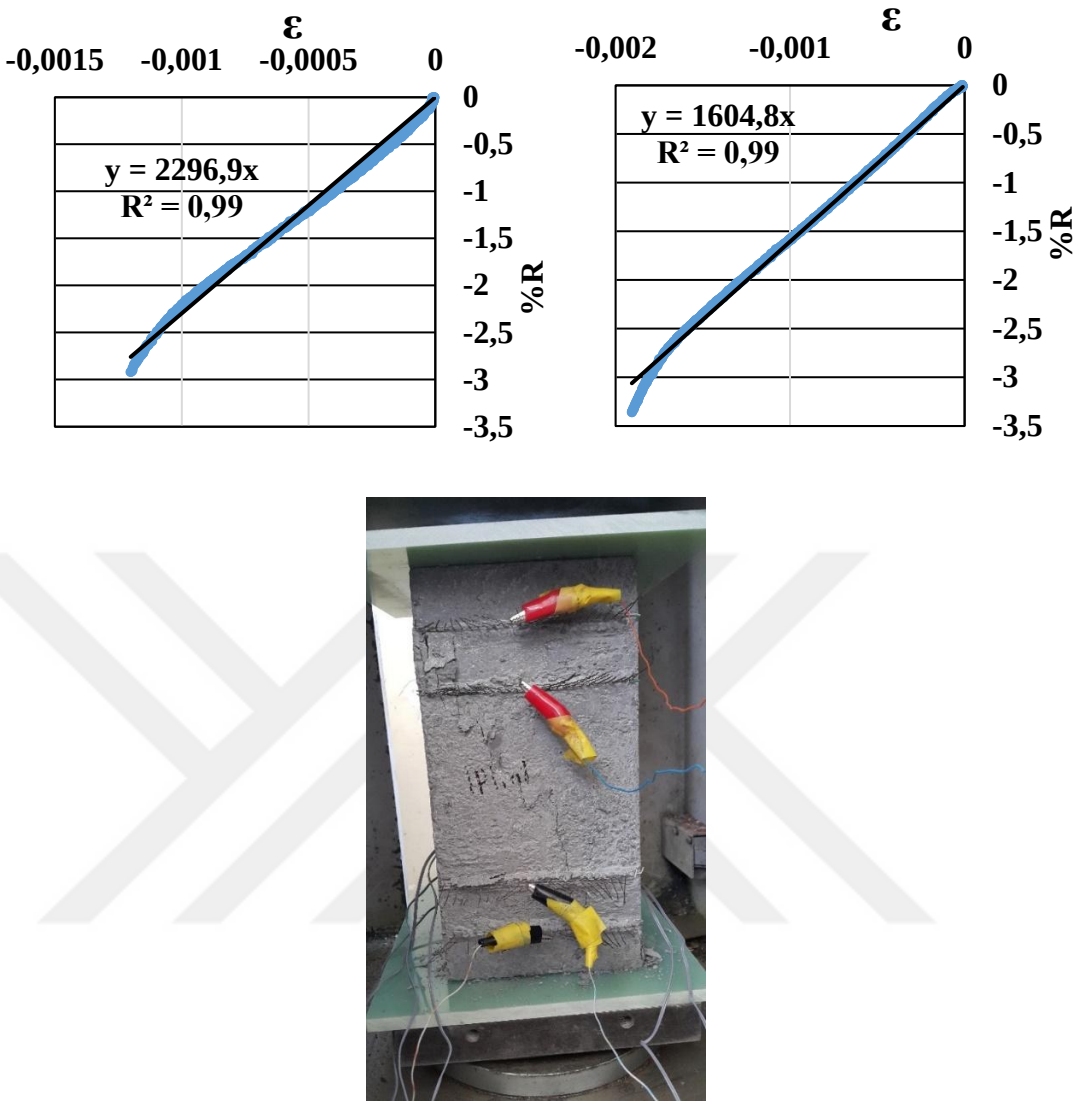
Genç örneklerin duyarlılığı, yaşlı örneklerin duyarlılığından oldukça yüksektir. 13 ay bekleme süresi ile duyarlılık düşmüştür. Genç örneklerin doğrusallığı %6 iken, yaşlı örneklerin doğrusallığı %20'dir. 13 ay bekleme süresi doğrusallığı arttırmıştır. Birim şekil değiştirme – elektriksel direnç değişimi grafiğinin en uygun doğrudan sapması artmıştır. Bu nedenle, korelasyon katsayısı yaşlı örneklerde azalmıştır (Tablo 3.6). Bu farklılığın sebebi, yaşlı örneklerin nem içeriğinin, genç örneklerin nem içeriğinden düşük olması ile açıklanabilir. Genç örneklerin elektriksel direnci 2259 Ohm iken yaşlı örneklerin elektriksel direnci 26745 Ohm'dur. Yaşlı örneklerin direncinin çok yüksek olması basınç birim şekil değiştirmesi altında oluşan yüzde elektriksel direnç değişiminin azalmasına, buna bağlı olarak duyarlılığın azalmasına sebep olmuştur. Bu duruma nemin etkisini araştırmak için, kalan üç yaşlı örnek 1 hafta suda bekletilip basınç testi uygulandı. Nemli yaşlı örneklerin bağıl nemi %12,5 olarak ölçüldü. Elektriksel direnci ise 5620 Ohm olarak ölçüldü. Nemli yaşlı örneklerin duyarlılığının (K=15) yaşlı örneklerden daha büyük olduğu, genç örneklerden ise daha az olduğu gözlemlendi. Bu durum, duyarlılığın azalmasında nemin etkili olduğunu göstermektedir. Beton içerisinde zamanla gelişen kimyasal reaksiyonların da etkisi vardır. Bu sonuçlar, uygulamada akıllı betonun ölçüm alınmadan önce ıslatılarak nem oranının arttırılmasının uygun olacağı tespit edildi.

Tablo 3.6 Genç ve yaşlı örneklerden elde edilen sonuçlar

	Ortalama Duyarlılık (K)	Ortalama Doğrusallık (LE)	Ortalama Korelasyon (R^2)	Ortalama Rs (Ohm)	Ortalama Bağıl nem %
Genç Örnekler	54	6	0.99	2259	12.9
Yaşlı örnekler	10	20	0.94	26745	6.2
Nemli Yaşlı örnekler	15	9	0.99	5620	12.5

3.11 Akıllı Betonun Büyük Ölçekte Basınç Testi Sonuçları

İki adet 15*15*30cm^3'lük akıllı beton karışımı ile hazırlanmış kolona ikinci bölümde anlatıldığı gibi basınç testi uygulandı. Birinci kolonun birim şekil değiştirme – elektriksel direnç değişimi grafiği Şekil 3.20a'da sunuldu. Birinci kolonun duyarlılığı 22, doğrusallığı %7, korelasyon katsayısı 0,99 olarak hesaplandı. İkinci kolonun birim birim şekil değiştirme – elektriksel direnç değişimi grafiği ise Şekil 3.20b'de sunuldu. İkinci kolonun duyarlılığı 19, doğrusallığı %6, korelasyon katsayısı 0,99 olarak hesaplandı. İki kolon için de birim şekil değiştirme ile elektriksel direnç değişimi arasında güçlü doğrusal ilişki tespit edildi. Deneyler örnekler kırılana kadar yapıldı ve basınç dayanımı 59MPa olarak belirlendi. Deney sonunda oluşan çatlak Şekil 3.20c'de sunuldu.

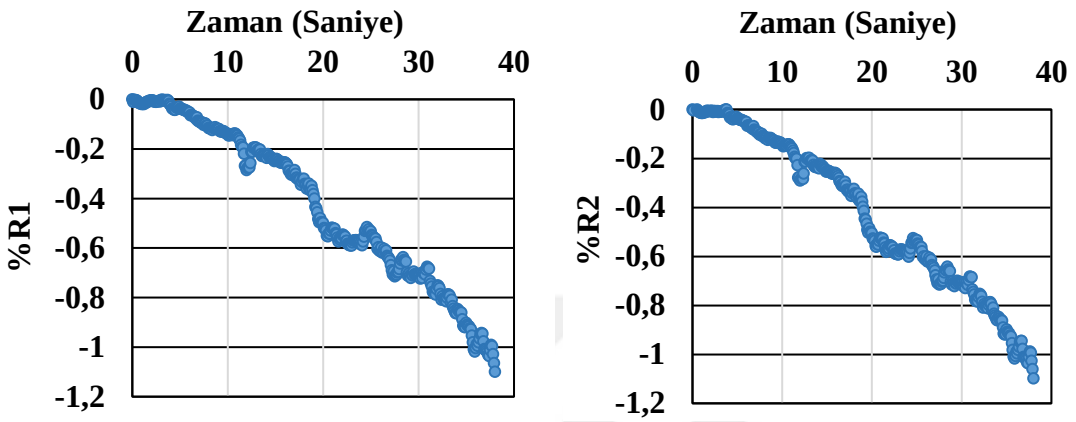


Şekil 3.20 15*15*30cm^3 kolonun basınç testi birim şekil değiştirme – elektriksel direnç değişimi grafiği a) Birinci örnek c) İkinci Örnek c) Deney sonucunda kırılan örnek

3.12 Büyük Ölçekli Akıllı Betonun Eğilme Testi Sonuçları

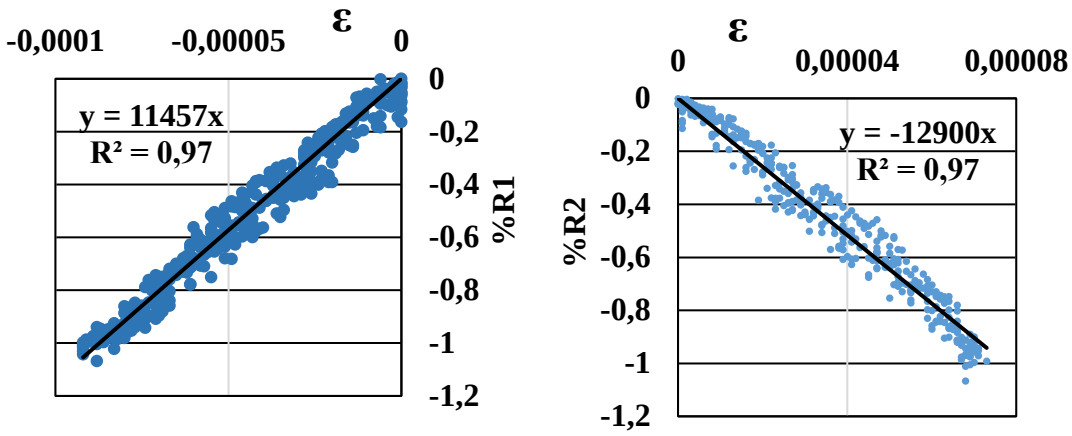
Akıllı beton karışımını kiriş ile test etmek için önce 15*15*75cm^3 boyutunda kirişe ikinci bölümde anlatıldığı gibi eğilme deneyi yapıldı. Eğilme testinde basınç bölgesinde olan iç üst elektrotlardan ölçülen (V_{s1}) potansiyel farkından hesaplanan %R1'nin (üst elektrtot verisi) zamana karşı değişimi şekil Şekil 3.21a'da; eğilmede çekme bölgesinde olan iç alt elektrotlardan ölçülen (V_{s2}) potansiyel farkından hesaplanan %R2'nin (alt elektrot verisi) zamana karşı değişimi Şekil 3.21b'de sunuldu. Deney sırasında basınç bölgesinde %R1'in azalması, çekme bölgesinde ise

%R2'nin artması beklenmiştir. Ancak üst ve alt elektrotlardan aynı miktarda elektriksel potansiyel ölçüldü. Bunun sebebi akıllı beton karışımının iletkenliğinin yüksek olmasıdır. Çünkü alt ve üst elektrotlar arasındaki mesafe akıllı beton karışımı elektrik akımını iletmiştir. %R1 ve %R2 değerleri birbirine çok yakın ve negatiftir.



Şekil 3.21 15*15*75cm^3 boyutlarındaki kirişin eğilme deneylerinden elde edilen elektriksel direnç değişimi – zaman grafiği a) %R1 b) %R2

Kirişin basınç bölgesinden (Üst kısımdan) ölçülen birim şekil değiştirme ile %R1 arasında güçlü doğrusal ilişki tespit edildi (Şekil 3.22a). Duyarlılık (K=108), doğrusallık (LE=8), korelasyon (R=0,97) elde edildi. Kirişin çekme bölgesinde de birim şekil değiştirme (alt kısımdan ölçülen birim şekil değiştirme) ile %R2 arasında güçlü doğrusal ilişki tespit edildi (Şekil 3.22b).



Şekil 3.22 15*15*75cm^3 boyutundaki kirişin eğilme deneyinden elde edilen elektriksel direnç değişimi – birim şekil değiştirme grafiği a) %R1 – kiriş üstünden (basınç bölgesinden) ölçülen birim şekil değiştirme grafiği b) %R2 – kiriş altından (çekme bölgesinden) ölçülen birim şekil değiştirme grafiği

Deney sonunda kırılan kiriş Şekil 3.23'de sunuldu. Kiriş ani ve gevrek bir şekilde kırıldı. Bu sebeple 15*30*150cm^3 kirişte polimer kompozit çubuklar donatı olarak kullanıldı.

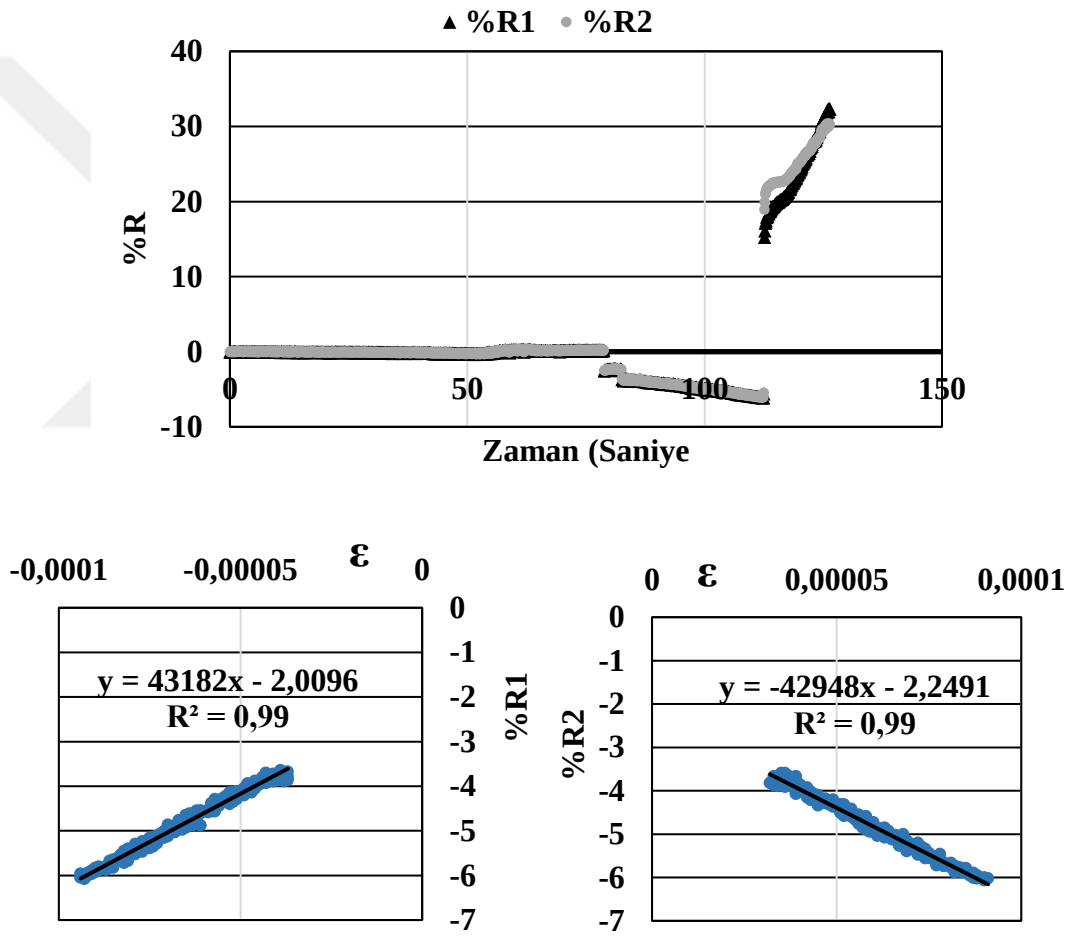


Şekil 3.23 Deney sonrası kırılan 15*15*75cm^3 kiriş örnek

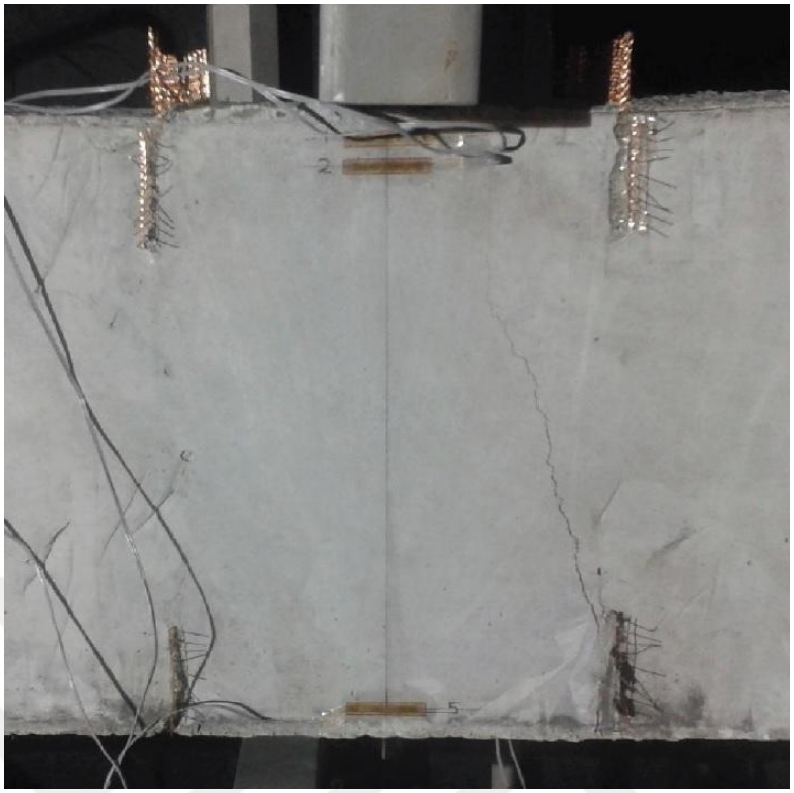
Akıllı beton karışımı ile hazırlanmış 15*30*150cm^3'lük kirişin eğilme deneyinde, iç üst elektrotlar ile elektrik direnç değişimi %R1; iç alt elektrotlar ile elektriksel direnç değişimi %R2 belirlendi. %R1 ve %R2'nin zamanla değişimi Şekil 3.24a'da sunuldu.%R1 ile %R2 büyük ölçüde aynı değerleri almaktadır (Şekil 3,24a). Bunun

sebebi, daha önce açıklandığı gibi ölçülen potansiyel farkların aynı olmasıdır. %R2 çekme bölgesinde pozitif olması beklenirken, negatiftir.

%R1'in negatif değerler aldığı kısım ile kiriş üst bölgesinden ölçülen basınç birim şekil değiştirmesi arasında güçlü bir doğrusal ilişki tespit edildi (Şekil 3.24b). Kiriş alt bölgesinden ölçülen çekme birim şekil değiştirmesi ile %R2 arasında da güçlü doğrusal ilişki görüldü (Şekil 3.24c). Kiriş içerisine yerleştirilen polimer kompozit çubuklar sayesinde kiriş sadece çatlamıştır (Şekil 3.25)



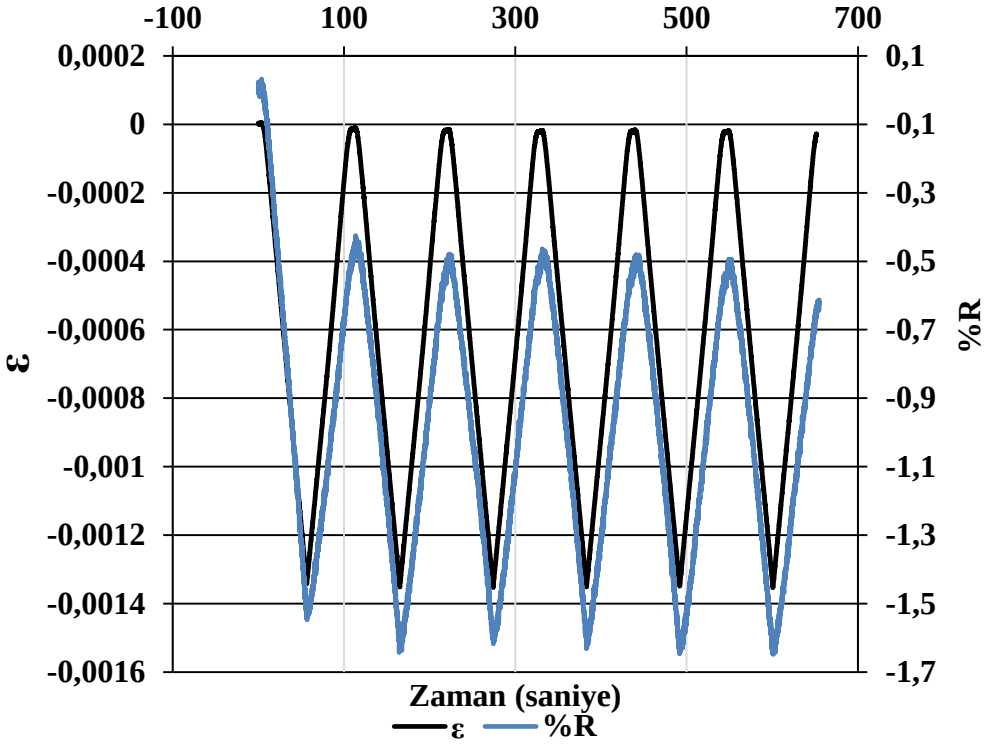
Şekil 3.24 15*30*150cm^3 kiriş örneğin eğilme testi grafikleri a) Zaman - %R b) Kiriş üstünde ölçülen basınç birim şekil değiştirme - %R1 grafiği c) Kiriş altından ölçülen çekme birim şekil değiştirme - %R2 grafiği



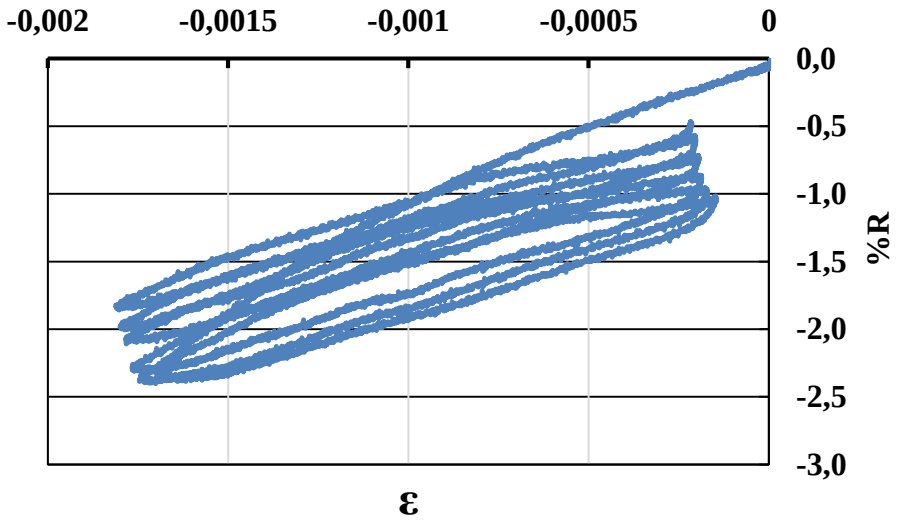
Şekil 3.25 15*30*150cm^3 örneğinde eğilme deneyi sonunda oluşan çatlak

3.13 Akıllı Betonun Tekrarlı Yükler ile Testi Sonuçları

Akıllı beton karışımı ile hazırlanan 7,5cm boyutunda küp örneklere tekrarlı yükler altında basınç testi yapıldı. Testten elde edilen veriler ile elde edilen basın birim şekil değiştirmesi - %R - zaman grafiği Şekil 3.25'te sunuldu. Şekil 3.25'te görüldüğü gibi ilk yükleme tekrarında, birim şekil değiştirme sıfıra dönünce, %R sıfıra dönmemiş %-0,5 seviyelerinde kalmıştır. Birim şekil değiştirme %R'ın maksimum ve minimum olduğu zamanlarda aynı değerdedir ve aralarında bir zaman farkı yoktur. Yüklemenin 2mm/dk. hızla yapıldığı düşünülürse, akıllı beton zaman farkı olmadan birim şekil değiştirmeleri takip edebilmektedir. Birim şekil değiştirme ile elektriksel direnç değişimi arasında doğrusal bir ilişki tespit edilmiştir (Şekil 3.26).



Şekil 3.26 Birim şekil değiştirme – elektriksel direnç değişimi – zaman grafiği



Şekil 3.27 birim şekil değiştirme - %R ilişkisi

BÖLÜM DÖRT
SONUÇLAR

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Bu çalışmada içinde farklı boy ve oranlarda iletken malzemeler olarak pirinç, tufal, kömür, bakır çok duvarlı karbon nano tüp (ÇDKNT), grafen nano levha (GNL), nano tufal (NT) ve nano süspansiyonların bulunduğu beton karışımlarının birim şekil değiştirme ve çatlak duyarlılığı belirlendi. Akıllı beton olarak hacimce %0,8 pirinç lif katkılı Br3 karışımı seçilmiştir. Beton, uygulamada daha çok basınca çalışır. % 0,046 çok duvarlı karbon nano tüp katkılı Cn2 karışımı birim şekil değiştirmeye en duyarlı nano malzeme katkılı karışım seçilmiştir.
- Literatürde, içinde maksimum agrega boyutu 15mm olan betona, eş zamanlı elektriksel direnç – birim şekil değiştirme ölçümlerinin yapıldığı basınç ve yarmada çekme testleri ilk defa bu çalışmalarda uygulanmıştır. Ayrıca betonda çatlak boyu, elektriksel direnç değişimi ile ilk defa bu çalışmada ilişkilendirilmiştir.
- Gerinim pulları yapı elemanlarının yüzeyinden ölçüm alırken, akıllı beton hacimsel olarak tüm yapı elemanını izlemek için kullanılır. Gerinim pulları dayanıklı değillerdir, kısa süreliğine kullanılabilirler. Akıllı Beton dayanıklıdır ve uzun süre kullanılabilir. Akıllı beton hassas, güvenilir, uzun süre kullanılabilen çok fonksiyonlu akıllı yapı malzemesidir.
- Literatürde, içinde maksimum agrega boyutu 15 mm olan nano malzeme katkılı betona, eş zamanlı elektriksel direnç – birim şekil değiştirme ölçümlerinin yapıldığı basınç ve yarma testi ilk defa bu projede yapılmıştır. Ayrıca nano malzeme katkılı betona çatlak boyu - elektriksel direnç değişimi ölçümlerinin yapıldığı eğilme deneyi de ilk defa bu çalışamada yapılmıştır.
- Akıllı betonun, duyarlılığı 54'tür. Metal gerinim pullarına göre yaklaşık 27 kat daha duyarlıdır. Doğrusallığı %6,6 ve %R – birim şekil değiştirme grafiğine en uygun doğrunun korelasyon katsayısı 0,99'dur. Bu değerler Akıllı betonun güvenilir olduğunu ispatlamaktadır. Birim şekil değiştirme - elektriksel direnç

değişimi arasında güçlü doğrusal ilişki vardır. Basınç deneyi sırasında elektriksel direncin azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, basınç altında, mikro boşluklar kapanır, matris – matris, lif – lif, lif – matris teması artar, elektron ve iyon iletimi kolaylaşır, elektriksel direnç düşer. Buna Piezorezistif etki denir.

- Yarma deneylerinde çekme birim şekil değiştirmesi nedeniyle mikro çatlaklar açılır, lif – matris, lif – lif teması azalır, elektriksel direnç artar.
- Eğilme deneylerinde, çatlak ilerledikçe, elektron ve iyonların geçebileceği iletken yollar kırılır, elektron ve iyonların geçebileceği alan daralır, elektriksel direnç artar.
- Literatür taraması yapılıp katkı malzemesi kullanılmaksızın en iyi nano malzeme dispersiyon yöntemi belirlenmiştir.
- Akıllı betonun basınç testlerinde yükleme hızının artması ile, duyarlılıkta biraz azalma görülmüştür. Yükleme hızının artması, doğrusallıkta ve birim şekil değiştirme - %R arasındaki korelasyon katsayısını etkilememiştir. Yükleme hızının artması ölçülen maksimum birim şekil değiştirmeleri etkilemez.
- Akıllı betonun elektriksel direncinde 150^{o}C'den sonra ani bir artış gözlemlenmiştir. Bu artışın nedeni, yüksek sıcaklıkta pirinç lifler genleşirken çimento hamurunun büzülmesi sonucu oluşan çatlaklardır. Çatlaklar elektrik akımının iletilmesini zorlaştırır elektriksel direnç ani bir artış gösterir.
- Akıllı betonun neminin azalması duyarlılıkta biraz azalmaya sebep olur. Nem kaybı ile doğrusallıkta da artış gözlemlenmiştir. Korelasyon katsayısı nem kaybı ile biraz azalmıştır.
- 7,5cm küp akıllı beton örnekleri için 90^{o}C etüvde 60 dakikada ulaşılan optimum nem içeriği en düşük elektriksel direncini sağlar. Optimum nem oranı %4,8dir. Optimum nem içeriği beton içerisindeki mikro boşlukların su ile dolu olup iyon transferi ile elektriği iletebildiği ve lif – lif, lif – matris ara yüzeylerinin kuru olduğu ve direkt temasın sağlandığı nem içeriğidir. Akıllı beton 90^{o}C etüvde 60 dakikadan uzun süre tutulduğunda mikro boşluklar içindeki su kaybolmaya başlar, iyonik elektrik iletimi azalır, elektrik direnci artar.

- Çapraz basınç deneyinde, Poisson etkisi nedeniyle oluşan yatay çekme birim şekil değiştirmesi ile düşey basınç birim şekil değiştirmesi, deney boyunca "yarış" halindedir. Çapraz basınç ve yarma deneylerinde elde edilen güçlü doğrusal ilişkiler, akıllı betonun iki yönde yüklemelere maruz kalması durumunda, çapraz yükleme etkilerini çıkartmak için kullanılabilir.
- Batırılmış elektrot metodu ile aynı koşullarda yapılan çevresel elektrot metodu deneylerinde elde edilen elektriksel değerler gürültü seviyesindedir. Çevresel elektrot metodu batırılmış elektrot metoduna göre 100 kat daha küçük değerler sunmuştur. Çevresel elektrot metodu akıllı beton uygulamalarında kullanılmamalıdır.
- Akıllı betonun alternatif akım altında test edilmesi ile elektriksel direnç değişimi ile birim şekil değiştirme arasında doğrusal ilişki tespit edilmiştir. Fakat doğru akım ile elde edilen duyarlılık daha büyüktür. Akıllı betonun doğru akım ile kullanılması elde edilen performansı arttıracaktır.
- Aktif madde etkisinin araştırılması sonucunda, genç örnekleri (28 gün kür + 7 gün laboratuvarda beklemiş) duyarlılığı, yaşlı (Kür sonrası 13 ay laboratuvarda beklemiş) örneklerden ve nemli yaşlı (13 ay laboratuvarda beklemiş, sonrasında 1 hafta suda beklemiş) örneklerden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Nemli yaşlı örneklerin duyarlılığı ise, yaşlı örneklerden yüksektir. Yaşlı örneklerde nem duyarlılığı bir miktar arttırır. Bunun nedeni, yaşlı örneklerin elektriksel direnci 26745 Ohm iken, nemli yaşlı örneklerin 5620 Ohm'dur. Elektriksel direnç yüksek iken, birim şekil değiştirmenin etkisi az olur.
- Akıllı betonun büyük ölçekte basınç ve eğilme deneylerinde birim şekil değiştirme ile elektriksel direnç değişimi arasında güçlü doğrusal ilişki elde edilmiştir.
- Tekrarlı yükler altında, akıllı betonun %R ile birim şekil değiştirmesi arasında faz farkı yoktur. Akıllı beton tekrarlı yükleri de ölçebilir.
- Akıllı beton, yapı malzemesi olarak kullanılabilir. Böylece hasarlı yapıların tespiti oldukça kolay olacak, depremlerde can ve mal kayıpları azalacaktır.

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 DDL. (2001). Review functional properties of cement –matrix composites, J *Mater Sci , 36,*(6), 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 WA. (1997). Self-monitoring in carbon fiber reinforced mortar by reactance measurement, *Cem and Concr Res, 27,* (6), 845-852.

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 paticle based self-sensing pavement for vehicle detection, *Measurement, 44,* 1645- 1650.

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.

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.

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., 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.

Reza, F., Yamamuro, J.A., Batson, 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.

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

Teomete E., 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.

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

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.