



**BETON ELEMANLARIN YAPISAL SAĞLIK  
İZLEMESİ İÇİN GELİŞTİRİLEN ÇİMENTO  
ESASLI SENSÖRLERİN KENDİLİĞİNDEN  
ALGILAMA KAPASİTELERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Salam ARMOOSH**

**Danışman: Doç. Dr. Meral OLTULU**

**Doktora Tezi**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**2021**

(Her hakkı saklıdır)

**T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİK ANA BİLİM DALI  
YAPI MALZEMELERİ BİLİM DALI**

**BETON ELEMANLARIN YAPISAL SAĞLIK İZLEMESİ İÇİN GELİŞTİRİLEN  
ÇİMENTO ESASLI SENSÖRLERİN KENDİLİĞİNDEN ALGILAMA  
KAPASİTELERİNİN ARAŞTIRILMASI**

(Investigation of Self-Sensing Capacities of Cement-Based Sensors Developed for Structural  
Health Monitoring of Concrete Elements)

DOKTORA TEZİ

Salam ARMOOSH

Danışman: Doç. Dr. Meral OLTULU

Erzurum  
Ocak, 2021

## KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Salam ARMOOSH tarafından hazırlanan “**Beton Elemanların Yapısal Sağlık İzlemesi için Geliştirilen Çimento Esaslı Sensörlerin Kendiliğinden Algılama Kapasitelerinin Araştırılması**” başlıklı çalışması 08/01/2021 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Malzemeleri Bilim Dalında doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

|               |                                                             |       |
|---------------|-------------------------------------------------------------|-------|
| Jüri Başkanı: | Prof. Dr. Özgür ANIL<br><i>Gazi Üniversitesi</i>            | ..... |
| Danışman:     | Doç. Dr. Meral OLTULU<br><i>Atatürk Üniversitesi</i>        | ..... |
| Jüri Üyesi:   | Prof. Dr. Remzi ŞAHİN<br><i>Atatürk Üniversitesi</i>        | ..... |
| Jüri Üyesi:   | Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN<br><i>Hacettepe Üniversitesi</i> | ..... |
| Jüri Üyesi:   | Prof. Dr. Tevhit KARACALI<br><i>Atatürk Üniversitesi</i>    | ..... |

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

**Prof. Dr. Mehmet KARAKAN**  
**Enstitü Müdürü**

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.  
Proje Kodu: FBA-2019-7102

## ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Doç. Dr. Meral OLTULU danışmanlığında sunulan “**Beton Elemanların Yapısal Sağlık İzlemesi için Geliştirilen Çimento Esaslı Sensörlerin Kendiliğinden Algılama Kapasitelerinin Araştırılması**” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

| Tez Bölümleri      | Tezin Oranı (%) | Benzerlik (%) | Maksimum Oran |
|--------------------|-----------------|---------------|---------------|
| Giriş              | 0               |               | 30            |
| Kuramsal Temeller  | 3               |               | 30            |
| Materyal ve Yöntem | 5               |               | 35            |
| Bulgular           | 1               |               | 20            |
| Tartışma           | 0               |               | 20            |
| Tezin Geneli       | 2               |               | 25            |

**Not:** Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5’den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

|                      |                       |
|----------------------|-----------------------|
| Tez Yazarı (Öğrenci) | Tez Danışmanı         |
| Salam ARMOOSH        | Doç. Dr. Meral OLTULU |
| 25.1.2021            | 25.1.2021             |
| İmza:                | İmza:                 |

\* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun ....../....../.... tarih ve ..... sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun ....../....../.... tarih ve ..... sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında göstermiş olduğu ilgi, destek, öneri ve yardımlarından dolayı danışmanım Sn Doç. Dr. Meral OLTULU'ya ve çalışmaya katkıda bulunan tez komitesi üyeleri Sn Prof. Dr. Remzi ŞAHİN ve Sn Prof. Dr. Tevhit KARACALI'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmamın gerçekleşmesi için sağladığı tüm kolaylıklar için değerli hocalarım Gazi Üniversitesi'nden Sn Prof. Dr. Özgür ANIL'a, Hacettepe Üniversitesi'nden Sn Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN'a,

Malzeme temininde sağladıkları kolaylıklar için Nanografi Teknoloji ve Sanayi Şirketi'ne, BASF yapı kimyasalları firmasına,

XRD ve BET analizlerinde göstermiş olduğu yardım ve destekleri için Atatürk Üniversitesi DAYTAM merkezinden Sn Öğr. Gör. Hasan FEYZİ BUDAK'a, Dr. Öğr. Üyesi Mehmet SEMİH BİNGÖL'e, MIP analizlerindeki ODTÜ Malzeme ve Metalurji Bölümü ve Merkez Laboratuvarı'ndan Sn. Necmi AVCI'ya, SEM analizlerinde göstermiş olduğu yardım ve destekleri için Erzurum Teknik Üniversitesi YUTAM merkezinden Sn Öğr. Gör. Mustafa YAZICI'ya,

Deney aşamasında bana destek veren Irak Teknik Üniversitesinden Sn. Dr. Öğr. Üyesi Ali MAJEED'e, XRD analizleri yazım aşamasındaki katkılarından dolayı Atatürk Üniversitesi'nden Sn. Doç. Dr. Esra KAVAZ'a,

Deney çalışmaları boyunca bana destek veren değerli arkadaşlarım Hacettepe Üniversitesi'nden Muhammed HATEM'e, Semet BAY'a, Anıl KUL'a, Gazi Üniversitesi'nden Muhammet GÜMÜŞ'e, Ömer MERCİMEK'e, Rehim GHOROUBI'ya, Atatürk Üniversitesi'nden İbrahim ALAMERİ'ye, Hasan POLAT'a,

BAP FBA-2019-7102 no'lu projeye desteğinden dolayı Atatürk Üniversitesi'ne,

Çalışmamın her aşamasında desteklerini esirgemeyen aileme, özellikle annem Shareefa KHALAF'a içtenlikle teşekkür ederim.

Salam ARMOOSH

## ÖZET

### DOKTORA TEZİ

#### BETON ELEMANLARIN YAPISAL SAĞLIK İZLEMESİ İÇİN GELİŞTİRİLEN ÇİMENTO ESASLI SENSÖRLERİN KENDİLİĞİNDEN ALGILAMA KAPASİTELERİNİN ARAŞTIRILMASI

Salam ARMOOSH

Danışman: Doç. Dr. Meral OLTULU

**Amaç:** Bu çalışmada karbon fiber, nano nikel tozu ve çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) içeren çimentolu kompozitlerin sensör olarak Yapısal Sağlık İzlemesinde kullanımı incelenmiştir.

**Yöntem:** Bu çalışma başlıca dört kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım, literatüre dayalı olarak iletken malzemelerin homojen dağılımını sağlamak için çeşitli karıştırma ve üretim yöntemlerini, ikinci kısım; çimento kompozitlerinin farklı kürlenme yaşlarındaki elektriksel özelliklerini, monotonik ve periyodik basınç yüklemesi altında piezorezistif (kendiliğinden algılama) davranışı ve gerilme-deformasyonu ölçümelerini, üçüncü kısım; XRD, BET, MIP testleri yapılarak çimento kompozitlerin mikroyapısının incelenmesini, dördüncü kısım, yapının gerilme-deformasyon davranışını incelemek için yapı elemanına piezorezistif sensörlerin gömülerek kullanımını içermektedir. Elektriksel ve piezorezistif özelliklerin belirlenmesinde hacimce %0.1, 0.25, 0.5, 0.75 ve 1 oranlarında toplam 50 grup kompozit üretilmiştir. Gömülü sensörler çalışmasında toplam 4 grup beton eleman üretilmiştir.

**Bulgular:** Deney sonuçları, karıştırma yöntemlerinin, iletken malzemelerin çimento hamurunda homojen dağılımını sağlamak için çok önemli olduğunu göstermektedir. Kullanılan malzeme oranı, karıştırma metodu, kürlenme metodu ve elektriksel direnç ölçüm metotları gibi birçok faktör, çimento kompozitlerinin elektriksel özellikleri üzerinde etkili olmuştur. kullanılan gruplar arasında KNT ve KFKNT0.75 grupları, uygulanan basınç yükleri altında iletken malzemeli kompozitler en iyi kendiliğinden algılama özelliği göstermiştir. İletken malzemelerin kullanımı, kompozitlerin XRD, BET ve MIP analiz sonuçlarını etkilemiştir.

**Sonuç:** KNT ve KFKNT'li kompozitlerin piezorezistif özelliklerinin KF ve NNT'li kompozitlerden daha etkili olduğu belirlenmiştir. Gömülü sensörler, monotonik ve periyodik basınç yükleri altında yapının gerilme-deformasyon algılama kapasitesini geliştirdiği bulunmuştur. KNT0.75, KNT1, KF0.1KNT0.5 ve KFKNT0.75 grupları gömülü sensörlerde en iyi kendiliğinden algılama kapasitesi göstermişlerdir.

**Anahtar Kelimeler:** Yapısal sağlık izleme (YSİ), iletken malzemeler, elektriksel direnç, kendiliğinden algılama özellikleri, gerilme-deformasyon, çimento esaslı sensörler.

Ocak 2021, 215 sayfa

## ABSTRACT

### DOCTORAL DISSERTATION

#### INVESTIGATION OF SELF-SENSING CAPACITIES OF CEMENT-BASED SENSORS DEVELOPED FOR STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF CONCRETE ELEMENTS

**Salam ARMOOSH**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Meral OLTULU**

**Purpose:** This study examined the feasibility of using carbon fibers, nano nickel powders and multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) in cement paste as sensors in Structural Health Monitoring.

**Method:** This study was divided into four parts. The first part, based on the literature a number of mixing methods were performed to ensure well-dispersing for the conductive materials. The second part, investigating the electrical properties of cement composites at different curing ages, piezoresistive (self-sensing) behaviour and stress/strain measurements under monotonic and cyclic compression loading. The third part, studying the microstructure of the composites by conducting XRD, BET, MIP tests. The fourth part, involves the use of embedded piezoresistive sensors in the structural element to examine the stress/strain behaviour of the structure. A total of 50 groups of composites were produced by 0.1, 0.25, 0.5, 0.75 and 1%vol. to determine the electrical and piezoresistive properties of the composites. In the study of embedded sensors, a total of 4 groups of concrete elements were produced.

**Findings:** The experimental results indicate that the mixing methods are very important to ensure well-dispersing of the conductive materials into the cement paste. The conductive materials developed the electrical properties and showed various sensing sensitivity under applied compression loads. Many factors such as fraction volume, mixing method, curing method and the electrical resistivity measurement methods have been influenced the electrical properties of the cement composites. Among the conductive materials used, KNT and KFKNT0.75 composites showed the best self-sensing properties under the applied pressure loads. The use of conductive materials into cement paste has affected the results of XRD, BET and MIP analysis of the composites.

**Results:** The results indicate that the MWCNTs and the CFCNT more effectively improved the piezoresistive properties of the cement paste than CF and NNTi. The embedded sensors have been found to improve the stress/strain sensing capacity of the structure under both monotonic and cyclic compression loads. The CNT0.75, CNT1, CF0.1CNT0.5 and CFCNT0.75 groups showed the best self-sensing capacity in the embedded sensors.

**Keywords:** Structural health monitoring (SHM), conductive materials, electrical resistance, self-sensing properties, stress/strain, cement-based sensors.

**January 2021, 215 pages**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                   |       |
|-------------------------------------------------------------------|-------|
| KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....                                       | i     |
| ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU .....                        | ii    |
| TEŞEKKÜR .....                                                    | iii   |
| ÖZET .....                                                        | iv    |
| ABSTRACT .....                                                    | v     |
| İÇİNDEKİLER.....                                                  | vi    |
| TABLolar DİZİNİ.....                                              | x     |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                             | xi    |
| KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ .....                              | xviii |
| GİRİŞ.....                                                        | 1     |
| Yapısal Sağlık İzleme (YSİ) .....                                 | 2     |
| YSİ'nin uygulama alanları .....                                   | 3     |
| YSİ'nin faydaları.....                                            | 4     |
| Sensörler.....                                                    | 4     |
| Çalışmanın Amacı ve Özgün Değeri.....                             | 5     |
| KURAMSAL TEMELLER.....                                            | 7     |
| Akıllı Beton.....                                                 | 7     |
| Elektriksel Kavramlar .....                                       | 9     |
| Elektrik direnci ve ohm yasası .....                              | 10    |
| Öz direnç .....                                                   | 10    |
| Polarizasyon .....                                                | 11    |
| Empedans .....                                                    | 11    |
| Omik direnç.....                                                  | 12    |
| Reaktans .....                                                    | 12    |
| Frekans .....                                                     | 14    |
| Betonun Elektriksel Direnci .....                                 | 14    |
| Piezorezistivite ve Algılama .....                                | 15    |
| İletken Malzemelerin Çimento Matrisine Dağılımı .....             | 17    |
| Mikro malzemelerin dispersiyon yöntemleri .....                   | 18    |
| Nano malzemelerin dispersiyon yöntemleri.....                     | 20    |
| Perkolasyon Eşiğı.....                                            | 25    |
| Çimentolu Kompozitlerde Elektriksel Direnç Ölçüm Teknikleri ..... | 28    |

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Alternatif Akım (AC) ve Doğru Akım (DC) tekniklerinin kullanımı.....                                                      | 29 |
| İki ve dört problu yöntemler .....                                                                                        | 31 |
| Elektrot üretim yöntemi .....                                                                                             | 33 |
| Çimentolu Kompozitlerin Yük Altında Kendiliğinden Algılama Davranışı .....                                                | 36 |
| Yapısal Beton Elemanlara Yerleştirilmiş Çimento Esaslı Deformasyon Sensörleri ve Kendiliğinden Algılama Özellikleri ..... | 51 |
| Kendiliğinden Algılayan Çimento Esaslı Kompozit Uygulamaları.....                                                         | 55 |
| MATERYAL ve YÖNTEM .....                                                                                                  | 58 |
| Materyal .....                                                                                                            | 58 |
| Çimento .....                                                                                                             | 58 |
| Silis dumanı.....                                                                                                         | 59 |
| Uçucu kül .....                                                                                                           | 60 |
| Su .....                                                                                                                  | 61 |
| Köpük kesici .....                                                                                                        | 61 |
| Süpfaktan, Sodyum Dodesil Sülfat (SDS).....                                                                               | 62 |
| Yüksek oranda su azaltıcı katkı (Süper akışkanlaştırıcı) .....                                                            | 63 |
| Karbon fiber (KF) .....                                                                                                   | 63 |
| Çok duvarlı karbon nanotüpler (ÇDKNT) .....                                                                               | 64 |
| Nano Nikel Parçacıkları .....                                                                                             | 64 |
| Elektrotlar.....                                                                                                          | 65 |
| Deneylerde Kullanılan Aletler .....                                                                                       | 66 |
| Numuneleri Kalıplara Yerleştirme ve Elektrotların Numunelere Yerleştirilmesi .....                                        | 74 |
| Kürleme.....                                                                                                              | 75 |
| Karışım Tasarımı.....                                                                                                     | 76 |
| Karışım Yöntem Tesbiti ve Dispersiyon Teknolojisi .....                                                                   | 76 |
| Numune Hazırlama .....                                                                                                    | 81 |
| Mekanik ve elektriksel iletkenlik ölçümleri için ön karıştırma .....                                                      | 81 |
| Elektriksel direnç ve kendiliğinden algılama ölçümleri için numune hazırlama .....                                        | 82 |
| Sensör üretimi için numune hazırlama.....                                                                                 | 84 |
| Ölçüm Yöntemleri.....                                                                                                     | 87 |
| Ön çalışmalarda elektriksel direnç ve basınç dayanım ölçümü .....                                                         | 87 |
| Elektriksel direnç ve kendiliğinden algılama ölçümleri.....                                                               | 87 |
| Beton Elemanda Sensör Ölçümleri .....                                                                                     | 91 |

|                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| BULGULAR VE TARTIŞMA.....                                                                                      | 93  |
| Ön Çalışmaların Karışım / Dispersiyon Verimliliğinin Değerlendirilmesi .....                                   | 93  |
| İletken çimento esaslı kompozitlerin elektriksel direnci.....                                                  | 93  |
| Çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımı ölçümleri .....                                                   | 97  |
| Kompozitlerin Elektriksel Özellik Ölçümleri .....                                                              | 99  |
| Elektriksel özellikleri belirlemede kullanılan parametrelerin seçimi.....                                      | 99  |
| Elektriksel perkolasyon eşiği .....                                                                            | 106 |
| Kompozitlerin Kendiliğinden Algılama Özellikleri.....                                                          | 110 |
| Monotonik Yükleme Altında Kompozitlerin Kendiliğinden Algılama Davranışı.....                                  | 110 |
| Monotonik basınç yüklemesi altında KF’li kompozitler .....                                                     | 111 |
| Monotonik basınç yüklemesi altında NNT’li kompozitler.....                                                     | 115 |
| Monotonik basınç yüklemesi altında KNT’li kompozitler .....                                                    | 118 |
| Monotonik basınç yüklemesi altındaki KFNT’li kompozitler .....                                                 | 121 |
| Monotonik basınç yüklemesi altındaki KFKNT’li kompozitler .....                                                | 123 |
| Periyodik Basınç Yükleme Altında Kompozitlerin Kendiliğinden Algılama Davranışları .....                       | 125 |
| Periyodik basınç yüklemesi altındaki KF’li kompozitler.....                                                    | 126 |
| Periyodik basınç yüklemesi altındaki NNT’li kompozitler.....                                                   | 132 |
| Periyodik basınç yüklemesi altındaki KNT’li kompozitler .....                                                  | 135 |
| Periyodik basınç yüklemesi altındaki KFNT’li kompozitler.....                                                  | 140 |
| Periyodik basınç yüklemesi altındaki KFKNT’li kompozitler .....                                                | 142 |
| Tekrarlanan ve Simetrik Periyodik Yükleme Altında Kompozitlerin Kendiliğinden Algılaması .....                 | 145 |
| KNT kompozitlerinin kendiliğinden algılama davranışları .....                                                  | 146 |
| KFKNT kompozitlerinin kendiliğinden algılama davranışı .....                                                   | 151 |
| Kompozitlerin Basınç Dayanımı .....                                                                            | 153 |
| XRD Analizleri .....                                                                                           | 155 |
| Piezorezistif Çimento Bazlı Sensörler Kullanarak Beton Elemanın Deformasyon İzlemesi .....                     | 162 |
| Elastik Aralıkta Periyodik Yükleme Altında Sensörlerin ve Akıllı Beton Elemanın Piezorezistif Algılaması ..... | 162 |
| Monotonik Yükleme Altında Sensörlerin ve Akıllı Beton Elemanın Piezorezistif Algılaması .....                  | 165 |
| Sensörlerin Beton Elemanların Basınç Dayanımına Etkisi.....                                                    | 170 |

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....             | 171 |
| Gelecek Çalışmalar için Öneriler ..... | 173 |
| KAYNAKLAR.....                         | 174 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                          | 194 |



## TABLÖLAR DİZİNİ

|                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tablo 1.</b> Portland Çimentosu, Uçucu Kül (Sınıf-F) ve Silis Dumanının Kimyasal Bileşimi ve Fiziksel Özellikleri..... | 58  |
| <b>Tablo 2.</b> Triisobutyl Fosfat TIBP'nin Teknik Özellikleri.....                                                       | 62  |
| <b>Tablo 3.</b> Sodyum Dodesil Sülfatın (SDS)'nin Özellikleri .....                                                       | 62  |
| <b>Tablo 4.</b> Masterglenium® 51'in Teknik Özellikleri .....                                                             | 63  |
| <b>Tablo 5.</b> 12 mm Uzunluğunda Doğranmış Karbon Fiberin Tipik Özellikleri .....                                        | 63  |
| <b>Tablo 6.</b> ÇDKNT'lerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....                                                         | 64  |
| <b>Tablo 7.</b> Nano Nikel'in Teknik Özellikleri.....                                                                     | 65  |
| <b>Tablo 8.</b> Kontrol ve KF'li Kompozitlerde Kullanılan Karıştırma Yöntemleri .....                                     | 78  |
| <b>Tablo 9.</b> Çok Duvarlı Karbon Nano Tüplü (ÇDKNT) Kompozitlerde Kullanılan Karıştırma Yöntemleri.....                 | 79  |
| <b>Tablo 10.</b> NNi'li Kompozitlerde Kullanılan Karıştırma Yöntemleri.....                                               | 80  |
| <b>Tablo 11.</b> Farklı Karışım Yöntemlerinde Numunelerin Yayılma Tablası Test Sonuçları.....                             | 82  |
| <b>Tablo 12.</b> Kompozitlerin Karışım Oranı.....                                                                         | 83  |
| <b>Tablo 13.</b> Beton Elemanının Karışım Oranları (kg/m <sup>3</sup> ).....                                              | 86  |
| <b>Tablo 14.</b> <i>Deformasyon Ölçerin (Strain Gauge) Teknik Özellikleri</i> .....                                       | 90  |
| <b>Tablo 15.</b> Kompozitlerin Karıştırma Yöntemlerine Göre Elektriksel Empedans Ölçüm değerleri ( $\Omega$ ) .....       | 94  |
| <b>Tablo 16.</b> 28 Günlük Kompozitlerin İki ve Dört Probu AC/DC Elektrik Özdirenç Ölçümleri .....                        | 101 |
| <b>Tablo 17.</b> Farklı Kırılma Yaşlarında Numunelerin İki Probu AC Elektrik Empedans Ölçümleri ( $\Omega$ ) .....        | 103 |
| <b>Tablo 18.</b> 28 Günlük Numunelerin Farklı Frekanslarda Elektriksel Empedans Ölçümleri...                              | 105 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1. Kendiliğinden algılayan beton köprünün YSİ sistemi .....                                                                                                                                                                   | 9  |
| Şekil 2. Öz direncin grafiksel gösterimi .....                                                                                                                                                                                      | 12 |
| Şekil 3. Kendiliğinden algılayan betonun yapısı .....                                                                                                                                                                               | 16 |
| Şekil 4. Perkolasyon eşiğinin altında lif dağılımı (a) zayıf dağılım (b) homojen dağılım .....                                                                                                                                      | 20 |
| Şekil 5. ÇDKNT'nın farklı yüzey aktif madde/ÇDKNT ağırlık oranı kullanılarak hazırlanan çimentolu kompozitler içindeki dağılımı: (a) 0, (b) 1.5, (c) 4.0 ve (d) 6.25 .....                                                          | 21 |
| Şekil 6. Hidratasyon sonrasında KNT'li çimento hamurunun SEM görüntüsü .....                                                                                                                                                        | 23 |
| Şekil 7. (a) Bilyalı öğütme aparatı; (b) malzemeler ve paslanmaz bilyaları (çap=5 mm) ile bilyalı değirmen haznesi; (c) gaz giriş ve çıkışı ile monte edilmiş bilyalı değirmen kabı .....                                           | 24 |
| Şekil 8. Çözeltideki KNF'lerin TEM görüntüleri (a) elle karıştırma yöntemi sonrası (b) 15 dakika sonikasyon yöntemi sonrası .....                                                                                                   | 24 |
| Şekil 9. İletken malzeme konsantrasyonuna bağlı perkolasyon eşiği eğrisi ve bölgeleri .....                                                                                                                                         | 26 |
| Şekil 10. Farklı KF boy/çap oranları için KF'li kompozitlerin elektriksel direnç ölçümleri ...                                                                                                                                      | 27 |
| Şekil 11. Farklı ÇDKNT oranlarına sahip çimento hamur, harç ve betonunun elektriksel direnci. ....                                                                                                                                  | 28 |
| Şekil 12. Direnç ölçümü (a) yüzey öz direnç (b) hacimsel direnci (c) temas direnç .....                                                                                                                                             | 29 |
| Şekil 13. Çimentolu malzemelerin (a) DC, (b) AC ölçümlerinde polarizasyon etkisi .....                                                                                                                                              | 31 |
| Şekil 14. Elektriksel direnç ölçüm teknikleri ve devre şemaları: (a) iki noktalı tek eksenli yöntem; ve (b) dört noktalı (Wenner probu) yöntemi. ....                                                                               | 31 |
| Şekil 15. Dört noktalı prob yöntemi ile elektriksel direnç ölçümü .....                                                                                                                                                             | 33 |
| Şekil 16. Kendiliğinden algılayan betonda elektrot yerleştirme stili ve düzeni .....                                                                                                                                                | 34 |
| Şekil 17. Direnci ölçülen numune için tipik gerilme-deformasyon ve direnç davranışı (a) paralel (b) yükleme yönüne dik .....                                                                                                        | 35 |
| Şekil 18. Yük altında kendiliğinden algılayan betonun tipik algılama davranışı .....                                                                                                                                                | 37 |
| Şekil 19. Farklı partikül boyutlarına sahip nikel çimento esaslı kompozitlerin piezorezistif duyarlılığı (# 3: boyut 3-7 µm, # 4: boyut 2.6-3.3 µm, # 5: boyut 2.2-2.8 µm). (a) piezorezistivite (b) piezorezistif hassasiyet ..... | 39 |
| Şekil 20. SSSW ile güçlendirilmiş RPC'nin monotonik basınç deformasyonu, gerilme ve elektrik direncindeki değişimi (a) %0.5 hacim. (b) %1 hacim. (c) %1.5 hacim. ....                                                               | 39 |
| Şekil 21. Karbon fiber/karbon siyahı kompoziti için elektrik direncinin fraksiyonel değişimi. (a) Kesirli elektriksel öz direnç (b) basınç gerilme-deformasyon davranışı .....                                                      | 40 |

|                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 22.</b> Basınç altında farklı oranlarda karbon fiberli kompozitlerin direncinin değişimi:<br>(a)%0.5, (b)%0.75 ve (c) %1.25 .....                                                                                                    | 40 |
| <b>Şekil 23.</b> Periyodik yüklemde piezorezistif algılama özelliği (a) gerilme-zaman (b)<br>deformasyon-zaman (c) direnç-zaman değişimi.....                                                                                                 | 41 |
| <b>Şekil 24.</b> Çelik lifli kompozitlerin basınç altında FCR'yı (düz) eğri) ve deformasyon<br>davranışı (kesikli eğri). .....                                                                                                                | 42 |
| <b>Şekil 25.</b> KF ve KNT içeren çimentolu kompozitlerin periyodik yüklemde<br>davranışları .....                                                                                                                                            | 42 |
| <b>Şekil 26.</b> Nano grafit kompozitlerinin periyodik yük altında zamana bağlı elektriksel<br>direncindeki oransal değişim (a) farklı periyodik yüklem oranı (b) periyodik<br>yükün değişken genliği .....                                   | 43 |
| <b>Şekil 27.</b> %1 oranlı KNT'li kompozitlerin zamana bağlı basınç gerilme-elektrik direnç<br>değişimi .....                                                                                                                                 | 44 |
| <b>Şekil 28.</b> YSI için kendiliğinden algılayan kompozitlerin tipik uygulama formları .....                                                                                                                                                 | 45 |
| <b>Şekil 29.</b> Üstünde veya altında karbon fiber tabaka içeren kiriş davranışı (a) numune<br>konfigürasyonu (b) gerilim tarafında direnç ve sapmada değişim (c) basınç<br>tarafında direnç ve sapmada değişim.....                          | 46 |
| <b>Şekil 30.</b> Deney düzeneği (Azhari 2008) (a) test düzeneği, (b) numune. ....                                                                                                                                                             | 48 |
| <b>Şekil 31.</b> 10 kN genlikle periyodik eğilme altında karbon fiber sensörünün tepkisi .....                                                                                                                                                | 48 |
| <b>Şekil 32.</b> Deney düzenekleri (a) karbon siyahlı kompozit gömülü sensör ve beton kolon, (b)<br>tek eksenli basınç testi düzeneğinin şeması .....                                                                                         | 49 |
| <b>Şekil 33.</b> (a) monotonik ve (b) periyodik yüklemde kolondaki sensörün elektriksel<br>direncinin değişimi .....                                                                                                                          | 49 |
| <b>Şekil 34.</b> Kendiliğinden algılayan betonun uygulama formu: (a) bağlı, (b) kaplama .....                                                                                                                                                 | 50 |
| <b>Şekil 35.</b> (a) Sensör boyutları (cm cinsinden) ve elektrik temas dağılımı (b) silindire<br>sarılmadan önceki düzenek (cm cinsinden), 1: sensörler; 2: beton deformasyon<br>ölçer; 3: sensör deformasyon ölçer; (c) beton numunesi ..... | 50 |
| <b>Şekil 36.</b> Basınç altında deformasyon algılama test sonuçları, direnç değişimi ve boyuna<br>deformasyon eğrileri (7. ve 8. Döngünün büyütülmüş hali) (a) 22 kN (1.25 MPa)<br>and (b) 88 kN (5 MPa).....                                 | 51 |
| <b>Şekil 37.</b> Yerleştirilmiş sensör içeren kiriş ve kolon için deneysel test düzeneği.....                                                                                                                                                 | 52 |
| <b>Şekil 38.</b> Beton bileşenlere yerleştirilmiş PCSS ile oluşturulan izleme ve kalibrasyon<br>eğrileri.....                                                                                                                                 | 53 |

|                                                                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 39.</b> 120 MPa’lık maksimum gerilme ile periyodik test sırasında UHSC kolonu için zamana karşı deformasyon (mavi eğrisi), $\Delta R/R_0$ (kesikli eğrisi) ve gerilme (düz eğrisi) davranışları ..... | 53 |
| <b>Şekil 40.</b> Kendiliğinden algılama özellikli kolon test düzeneği. ....                                                                                                                                    | 55 |
| <b>Şekil 41.</b> Trafik tespiti için kendiliğinden algılayan beton kaplama yapısı .....                                                                                                                        | 56 |
| <b>Şekil 42.</b> Karbon fiberlerle kendiliğinden algılayan betonun gerilim altında direnç değişimi (i) 0,21 MPa, (ii) 0,42 MPa, (iii) 0,52 MPa.....                                                            | 56 |
| <b>Şekil 43.</b> Trafik sensörlerinin kendiliğinden algılama tepkisi (a) 6 MPa genlikte tekrarlanan basınç yüklemesi altında (b) ani yükleme altında .....                                                     | 57 |
| <b>Şekil 44.</b> Portland çimentosu, uçucu kül ve silis dumanının tipik parçacık boyut dağılımları.....                                                                                                        | 58 |
| <b>Şekil 45.</b> Portland çimento SEM <sub>EDX</sub> görüntüsü.....                                                                                                                                            | 59 |
| <b>Şekil 46.</b> Silis dumanı SEM <sub>EDX</sub> görüntüsü. ....                                                                                                                                               | 60 |
| <b>Şekil 47.</b> Uçucu Kül SEM <sub>EDX</sub> görüntüsü.....                                                                                                                                                   | 61 |
| <b>Şekil 48.</b> Çimento kompozitlerinin üretimi sırasında kullanılan SDS sürfaktan malzeme. ....                                                                                                              | 62 |
| <b>Şekil 49.</b> Karbon fiber (a) dijital görüntüsü, (b) SEM görüntüsü. ....                                                                                                                                   | 63 |
| <b>Şekil 50.</b> (a) ÇDKNT’lerin dijital görüntüsü (b) SEM görüntüsü.....                                                                                                                                      | 64 |
| <b>Şekil 51.</b> (a) NNi dijital görüntüsü (b) NNi SEM görüntüsü. ....                                                                                                                                         | 65 |
| <b>Şekil 52.</b> NNi’nin XRD analizi. ....                                                                                                                                                                     | 65 |
| <b>Şekil 53.</b> 2 x 6,5 cm bakır elektrotlar. ....                                                                                                                                                            | 66 |
| <b>Şekil 54.</b> Deneylerde kullanılan harç mikseri. ....                                                                                                                                                      | 66 |
| <b>Şekil 55.</b> Yayılma tablası. ....                                                                                                                                                                         | 67 |
| <b>Şekil 56.</b> Numune kalıpları.....                                                                                                                                                                         | 67 |
| <b>Şekil 57.</b> Vibrasyon masası. ....                                                                                                                                                                        | 67 |
| <b>Şekil 58.</b> Ultrasonik Sonikatör (Vibra-Cell™, VCX750). ....                                                                                                                                              | 68 |
| <b>Şekil 59.</b> Monotonik yükleme testi için pres aleti.....                                                                                                                                                  | 69 |
| <b>Şekil 60.</b> Periyodik yükleme testi için test presi. ....                                                                                                                                                 | 69 |
| <b>Şekil 61.</b> Periyodik yükleme testi için 300 kN test presi.....                                                                                                                                           | 70 |
| <b>Şekil 62.</b> Monotonik ve periyodik yükleme testi için 3000 kN kapasiteli pres aleti.....                                                                                                                  | 70 |
| <b>Şekil 63.</b> Deneylerde kullanılan elektrik direnç ölçer (a) Giatec RCON2 (b) Keithley 2410 (c) GW LCR-6200 dijital multimetre. ....                                                                       | 71 |
| <b>Şekil 64.</b> Taramalı Elektron Mikroskobu. ....                                                                                                                                                            | 72 |
| <b>Şekil 65.</b> X-Ray Cihazı.....                                                                                                                                                                             | 72 |
| <b>Şekil 66.</b> Civalı Porozimetre Aleti. ....                                                                                                                                                                | 73 |

|                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 67.</b> BET cihazı.....                                                                                                                      | 73  |
| <b>Şekil 68.</b> Elektrotların numunelere gömülmesi. ....                                                                                             | 74  |
| <b>Şekil 69.</b> Numunelerin kürlenmesi. ....                                                                                                         | 75  |
| <b>Şekil 70.</b> Yayılma tablası testleri (a) çimento hamuru (b) KF (c) NNi (d) KNT. ....                                                             | 81  |
| <b>Şekil 71.</b> Kendiliğinden algılayan küp numune (a) kamera fotoğrafı (b) çizim.....                                                               | 84  |
| <b>Şekil 72.</b> Akıllı sensör hazırlaması.....                                                                                                       | 85  |
| <b>Şekil 73.</b> Akıllı beton elemanın döküm işlemi (a) sensörlerin elemana gömülmesi,<br>(b) eleman üst yüzeyinin epoksi reçine ile kaplanması. .... | 86  |
| <b>Şekil 74.</b> Beton elemanın tek eksenli basınç altında gerilme-deformasyon dağılım düzeni....                                                     | 86  |
| <b>Şekil 75.</b> Kompozitlerin elektrik direnç ölçümleri.....                                                                                         | 87  |
| <b>Şekil 76.</b> Kendiliğinden algılayan basınç testi için deneysel şematik diyagram.....                                                             | 88  |
| <b>Şekil 77.</b> Periyodik yükleme altında kendiliğinden algılama testi deneysel sistemi.....                                                         | 89  |
| <b>Şekil 78.</b> Periyodik yükleme testi için yük-zaman ilişkisi. ....                                                                                | 89  |
| <b>Şekil 79.</b> Numunenin yan yüzeyine yapıştırılan deformasyon ölçerler.....                                                                        | 90  |
| <b>Şekil 80.</b> Tekrarlanan ve simetrik periyodik yüklemenin deneysel düzeneği.....                                                                  | 91  |
| <b>Şekil 81.</b> Tekrarlanan ve simetrik periyodik basınç testi için yükleme şartları. ....                                                           | 91  |
| <b>Şekil 82.</b> Akıllı beton elemanın periyodik ve monotonik basınç yüklemesi altında deneysel<br>testi. ....                                        | 92  |
| <b>Şekil 83.</b> Akıllı beton elemanın yan yüzeyine deformasyon ölçerin yerleştirilmesi.....                                                          | 92  |
| <b>Şekil 84.</b> Farklı karıştırma yöntemlerine dayanan çimento örneklerinin elektrik empedans<br>ölçümleri (a) KNT (b) NNi (c) KF. ....              | 95  |
| <b>Şekil 85.</b> Farklı karışım yöntemleri ile üretilen kompozitlerin basınç dayanımları, (a) KNT<br>(b) NNi (c) KF. ....                             | 98  |
| <b>Şekil 86.</b> Kompozitlerin DC elektrik direnci (a) KF (b) KNT (28. gün). ....                                                                     | 100 |
| <b>Şekil 87.</b> Kompozitlerin AC elektrik direnci (a) KF (b) KNT (28 gün ve 1kHz). ....                                                              | 100 |
| <b>Şekil 88.</b> 28 günlük kompozitlerin iki problu elektriksel direnci (a) KF, 2 problu AC/DC<br>(b) KNT, 2 problu AC/DC.....                        | 102 |
| <b>Şekil 89.</b> 28 günlük kompozitlerin iki ve dört prob yöntemi ile DC elektrik direnci<br>sonuçları (a) KF (b) KNT. ....                           | 102 |
| <b>Şekil 90.</b> Farklı kütleme yaşlarında (AC frekansı 30 kHz) % 0.5 iletken malzemeli<br>çimento kompozitlerinin elektrik empedans ölçümleri. ....  | 104 |
| <b>Şekil 91.</b> 28 günlük KF0.5 ve KNT0.5 numunelerinde akım frekansının elektrik<br>empedans değerleri üzerindeki etkisi. ....                      | 105 |
| <b>Şekil 92.</b> KF'li kompozitlerin AC elektrik empedans değerleri (30 kHz, 28. gün). ....                                                           | 106 |

|                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 93.</b> KNT’li kompozitlerin AC elektrik empedansı (30 kHz, 28. gün). ....                             | 107 |
| <b>Şekil 94.</b> NNi’li kompozitlerin AC elektrik empedansı (30 kHz, 28. gün).....                              | 108 |
| <b>Şekil 95.</b> KFKNT’li kompozitlerin AC elektrik empedansı (30 kHz, 28. gün). ....                           | 109 |
| <b>Şekil 96.</b> KFNNi’li kompozitlerin AC elektrik empedansı (30 kHz, 28. gün).....                            | 109 |
| <b>Şekil 97.</b> Monotonik yükleme altında kontrol grubunun kendiliğinden algılama davranışı. .                 | 111 |
| <b>Şekil 98.</b> Kontrol numunesinin basınç deformasyonu- FCI arasındaki ilişkisi. ....                         | 111 |
| <b>Şekil 99.</b> KF grubunun monotonik yükleme altında deformasyon-FCI arasındaki ilişki. ....                  | 113 |
| <b>Şekil 100.</b> KF kompozitlerinin monotonik basınç altında deformasyon-FCI arasındaki korelasyon.....        | 114 |
| <b>Şekil 101.</b> NNi kompozitlerinin monotonik yükleme altında deformasyon-FCI arasındaki ilişki. ....         | 116 |
| <b>Şekil 102.</b> NNi kompozitlerinin monotonik basınç altında deformasyon-FCI arasındaki korelasyon.....       | 117 |
| <b>Şekil 103.</b> KNT kompozitlerinin monotonik yükleme altında deformasyon-FCI arasındaki ilişki. ....         | 119 |
| <b>Şekil 104.</b> KNT kompozitlerinin monotonik basınç altında deformasyon-FCI arasındaki korelasyon.....       | 120 |
| <b>Şekil 105.</b> KFNNi kompozitlerinin monotonik yükleme altında deformasyon-FCI arasındaki ilişki.....        | 122 |
| <b>Şekil 106.</b> KFNNi kompozitlerinin monotonik basınç altında deformasyon-FCI arasındaki korelasyon.....     | 123 |
| <b>Şekil 107.</b> KFKNT kompozitlerinin monotonik yükleme altında deformasyon-FCI arasındaki ilişki.....        | 124 |
| <b>Şekil 108.</b> KFKNT kompozitlerinin monotonik basınç altında deformasyon-FCI arasındaki korelasyon. ....    | 125 |
| <b>Şekil 109.</b> Kontrol numunelerinin periyodik basınç yüklemesi altında algılama davranışı...                | 126 |
| <b>Şekil 110.</b> KF numunelerinin periyodik basınç yüklemesi altında algılama davranışı. ....                  | 127 |
| <b>Şekil 111.</b> KF0.5 ve KF1 numunelerinin MIP sonuçları.....                                                 | 129 |
| <b>Şekil 112.</b> KF1’li kompozitin SEM görüntüsü.....                                                          | 129 |
| <b>Şekil 113.</b> KF kompozitlerinin BET sonuçları.....                                                         | 130 |
| <b>Şekil 114.</b> KF kompozitlerin periyodik basınç yüklemesi altında deformasyon-FCI arasında korelasyon. .... | 131 |
| <b>Şekil 115.</b> NNi’li kompozitlerin periyodik basınç altında algılama davranışları.....                      | 133 |

|                                                                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 116.</b> NNT’li kompozitlerin periyodik basınç altında deformasyon-FCI arasında korelasyon.....                                                           | 134 |
| <b>Şekil 117.</b> KNT’li kompozitlerin periyodik basınç altındaki algılama davranışları. ....                                                                      | 135 |
| <b>Şekil 118.</b> KNT’li kompozitlerin periyodik basınç altında deformasyon-FCI arasındaki korelasyon.....                                                         | 137 |
| <b>Şekil 119.</b> KNT’li kompozitlerin MIP sonuçları.....                                                                                                          | 138 |
| <b>Şekil 120.</b> KNT1’li kompozitlerin SEM görüntüsü. ....                                                                                                        | 138 |
| <b>Şekil 121.</b> KNT’li kompozitlerin BET sonuçları. ....                                                                                                         | 139 |
| <b>Şekil 122.</b> KFNNi’li kompozitlerin periyodik basınç altında algılama davranışları.....                                                                       | 140 |
| <b>Şekil 123.</b> KFNNi’li kompozitlerin Periyodik basınç altında deformasyon-FCI arasındaki korelasyon.....                                                       | 141 |
| <b>Şekil 124.</b> KFNNi0.75’li kompozitlerin MIP sonuçları. ....                                                                                                   | 142 |
| <b>Şekil 125.</b> KFKNT’li kompozitlerin periyodik basınç altındaki algılama davranışları. ....                                                                    | 143 |
| <b>Şekil 126.</b> KFKNT’li kompozitlerin periyodik basınç altında deformasyon-FCI arasındaki korelasyonu.....                                                      | 144 |
| <b>Şekil 127.</b> KFKNT0.75’li kompozitlerin MIP sonuçları.....                                                                                                    | 145 |
| <b>Şekil 128.</b> Kontrol grubunun tekrarlanan ve simetrik periyodik basınç altındaki davranışı. .                                                                 | 146 |
| <b>Şekil 129.</b> KNT’li kompozitlerin tekrarlanan ve simetrik periyodik basınç altında davranışları (a) KNT0.1 (b) KNT0.25 (c) KNT0.5 (d) KNT0.75 (e) KNT1.....   | 147 |
| <b>Şekil 130.</b> KNT’li kompozitlerin tekrarlanan ve simetrik periyodik basınç altında deformasyon-FCI arasındaki korelasyon.....                                 | 150 |
| <b>Şekil 131.</b> KFKNT’li kompozitlerin tekrarlanan ve simetrik periyodik basınç altında algılama davranışı (a) KF0.1KNT0.5 (b) KFKNT0.75.....                    | 152 |
| <b>Şekil 132.</b> KFKNT’li kompozitlerin tekrarlanan ve simetrik periyodik basınç altında deformasyon-FCI arasındaki korelasyon (a) KF0.1KNT0.5 (b) KFKNT0.75..... | 153 |
| <b>Şekil 133.</b> Çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanım değerleri (a) KF (b) NNT (c) KNT (d) KFNNi (e) KFKNT. ....                                           | 154 |
| <b>Şekil 134.</b> MATCH programı ile XRD datalarının değerlendirilmesi. ....                                                                                       | 156 |
| <b>Şekil 135.</b> Katkı oranına göre parçacık büyüklüğü D’nin değişimi. ....                                                                                       | 157 |
| <b>Şekil 136.</b> KF katkılı çimento numuneleri için elde edilen XRD desenleri. ....                                                                               | 158 |
| <b>Şekil 137.</b> KNT katkılı çimento numuneleri için elde edilen XRD desenleri. ....                                                                              | 159 |
| <b>Şekil 138.</b> NNT katkılı çimento numuneleri için elde edilen XRD desenleri. ....                                                                              | 160 |
| <b>Şekil 139.</b> KFNNi katkılı çimento numuneleri için elde edilen XRD desenleri. ....                                                                            | 161 |
| <b>Şekil 140.</b> KFKNT katkılı çimento numuneleri için elde edilen XRD desenleri.....                                                                             | 161 |

|                                                                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 141.</b> KNT sensörlerin periyodik yükleme altında kendiliğinden algılama davranışı<br>(a) KNT0.75 (b) KNT1.....                                                      | 163 |
| <b>Şekil 142.</b> Kontrol numunesi gömülü elemanların periyodik yükleme altında kendiliğinden<br>algılama davranışı.....                                                       | 164 |
| <b>Şekil 143.</b> Gömülü KFKNT sensörlerinin periyodik yükleme altında kendiliğinden<br>algılama davranışı (a) KFKNT0.75 (b) KF0.1KNT0.5.....                                  | 165 |
| <b>Şekil 144.</b> Gömülü KNT sensörlerinin monotonik yükleme altında kendiliğinden algılama<br>davranışı (a) KNT0.75 (b) KNT1.....                                             | 166 |
| <b>Şekil 145.</b> Gömülü kontrol numunesinin monotonik yükleme altında kendiliğinden<br>algılama davranışı.....                                                                | 166 |
| <b>Şekil 146.</b> Monotonik yükleme altında deformasyon ölçer ile beton elemanın üst kenarının<br>ayrılması. ....                                                              | 167 |
| <b>Şekil 147.</b> Beton elemanın hasar şekli. ....                                                                                                                             | 167 |
| <b>Şekil 148.</b> Gömülü KNT sensörlerinin monotonik yükleme altında eleman basınç<br>deformasyonu ile FCI değerleri arasındaki ilişki (a) KNT0.75 (b) KNT1.....               | 168 |
| <b>Şekil 149.</b> Gömülü KFKNT sensörlerinin monotonik yükleme kendiliğinden algılama<br>davranışı (a) KFKNT0.75 (b) KF0.1KNT0.5.....                                          | 169 |
| <b>Şekil 150.</b> Gömülü KFKNT sensörlerinin monotonik yükleme altında eleman basınç<br>deformasyonu ile FCI değerleri arasındaki ilişki (a) KFKNT0.75 (b)<br>KF0.1KNT0.5..... | 169 |
| <b>Şekil 151.</b> Normal ve akıllı beton elemanların basınç dayanımı.....                                                                                                      | 170 |

## KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

|                                |                                                                      |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| A                              | : Alan                                                               |
| AASHTO                         | : American Association of State Highway and Transportation Officials |
| AC                             | : Alternatif Akım (Alternating Current)                              |
| ASCE                           | : American Society of Civil Engineers                                |
| ASTM                           | : American Society for Testing and Materials Programı                |
| BET                            | : Brunauer-Emmett-Teller                                             |
| C <sub>3</sub> A               | : Tri kalsiyum aluminat                                              |
| CBDS                           | : Çimento Bazlı Deformasyon Sensörleri (Cement-Based Strain Sensors) |
| CH                             | : Ca(OH) <sub>2</sub>                                                |
| C-S-H                          | : Kalsiyum Silika Hidrat                                             |
| CTAB                           | : Setil Trimetil Amonyum Bromür                                      |
| DC                             | : Doğru Akım (Direct Current)                                        |
| $\epsilon$                     | : Deformasyon                                                        |
| $f$                            | : Frekans                                                            |
| FCI                            | : Elektriksel Empedans Değişimi ( Fractional Change of Impedance)    |
| FCR                            | : Elektriksel Direnç Değişimi ( Fractional Change of Resistance)     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | : Demir oksit                                                        |
| FTP                            | : Fiber Takviyeli Polimer                                            |
| GF                             | : Gösterge Faktörü (Gauge Factor)                                    |
| GPa                            | : Giga Paskal                                                        |
| HRWRA                          | : Yüksek Oranda Su Azaltıcı Karışım                                  |
| Hz                             | : Hertz                                                              |
| I                              | : Elektrik Akım (Amper)                                              |
| KF                             | : Karbon Fiber                                                       |
| KFKNT                          | : Karbon Fiber- Karbon Nano Tüp                                      |
| KFNi                           | : Karbon Fiber- Nano Nikel                                           |
| KN                             | : Kilo Niton                                                         |
| KNF                            | : Karbon Nano Fiber                                                  |
| KNT                            | : Karbon Nano Tüp                                                    |
| L                              | : Elektrot Arasındaki Mesafedir                                      |

|               |                                                                          |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------|
| LVDT          | : Linear Variable Displacement Transducer                                |
| MEMS          | : Mikroeletromekanik Sistemler                                           |
| MIP           | : Mercury Intrusion Porosimetry                                          |
| MPa           | : Mega Paskal                                                            |
| MWCNT         | : Çok Duvarlı Karbon Nano Tüp (Multi-walled carbon nanotubes)            |
| NaDC          | : Sodyum Deoksikolat                                                     |
| nm            | : Nanometre                                                              |
| NNi           | : Nano Nikel                                                             |
| PÇ            | : Portland Çimento                                                       |
| R             | : Elektriksel Direnç (Resistance)                                        |
| RCPT          | : Hızlı Klorür Geçirimsilik Testi (Rapid Chloride Ion Permeability Test) |
| S             | : Elektrotun İletken Alanı                                               |
| SD            | : Silis Dumanı                                                           |
| SDBS          | : Sodyum Dodesil Benzensülfonat                                          |
| SDS           | : Sodyum Dodesil Sülfatın                                                |
| SEM           | : Taramalı Elektron Mikroskop                                            |
| TEM           | : Transmission Mikroskop                                                 |
| TIBP          | : Triizobütil Fosfat                                                     |
| TS            | : Türk Standartları                                                      |
| UK            | : Uçucu Kül                                                              |
| V             | : Gerilim (Volt)                                                         |
| X             | : Reaktans                                                               |
| XRD           | : X ray kırınımı                                                         |
| YSİ           | : Yapısal Sağlık İzleme (Structural Health Monitoring)                   |
| Z             | : Empedans                                                               |
| $\theta$      | : Faz Açısı                                                              |
| $\lambda$     | : X-ışınlarının dalga boyu                                               |
| $\mu\text{m}$ | : Mikrometre                                                             |
| $\rho$        | : Elektriksel Özdirenç (Resistivity)                                     |
| $\Omega$      | : Ohm                                                                    |

## GİRİŞ

Beton, inşaat projeleri için yaygın olarak kullanılan insan yapımı bir malzemedir. Dünyadaki altyapıların çoğunluğu betonla yapılmaktadır (Ding *et al.* 2015; Al-Dahawi *et al.* 2017). Betonun popülaritesi; nispeten düşük maliyeti, yüksek basınç dayanımı, dayanıklılığı ve nispeten kolay inşaat teknolojisinden kaynaklanmaktadır (Xie *et al.* 1996). Ancak, beton birbirinden bağımsız birçok malzemenin (çimento, su, kum, çakıl ve katkı maddeleri) kompleks bir karışımıdır ve bu malzemeler onun özelliklerini oldukça değiştirmektedir (Kim *et al.* 2017). Ayrıca, diğer inşaat malzemeleriyle karşılaştırıldığında, betonun korozyona ve yangına direnci daha yüksektir.

Çimento; beton, çimento harcı ve çimento hamuru üretmek için kullanılan temel malzemedir (Aİtcin 2000; Mather 2004; Mehta and Monteiro 2017). Beton bağlayıcı üretimi için önemli enerjiye ihtiyaç olmasına rağmen, diğer inşaat malzemeleri (metal, cam ve polimerler gibi) ile karşılaştırıldığında çevreye daha az zarar vermektedir (Bharj *et al.* 2014). Beton üretimi yapı malzemelerinin diğer tipleri ile karşılaştırıldığında daha ekonomik olarak düşünülmekte olup inşaatların geliştirilmesi için en çok tercih edilen ekonomik bir seçim olmaktadır (Bharj *et al.* 2014).

Yüksek ve büyük binalar, köprüler ve kaldırımlar gibi beton yapılar, hizmet ömrü boyunca mekanik ve durabilite etkilerine maruz kalmaktadır (Horszczaruk *et al.* 2016). Yapıda oluşan hasarlar; ortam şartları, dış mekanik etkiler ve zayıf işçilik nedenleriyle oluşmaktadır (Al-Dahawi *et al.* 2017). Ancak hasara yol açan etkenlerin erken tespiti bozulmanın ilerlemesini önleyebildiği gibi bakım ve onarım maliyetini de düşürebilmektedir (Horszczaruk *et al.* 2016). Oluşabilecek hasarları erkenden tespit etme gerekliliği birçok araştırmacıyı yapısal unsurları onarmak ve izlemek için yeni teknikler bulmaya yönlendirmiştir (Li *et al.* 2008b). Geliştirilen yeni tekniklerle beton elemanlar sürekli ve otomatik olarak izlenebilmektedir (Horszczaruk *et al.* 2016).

Son yıllarda, birçok araştırmacı kendiliğinden algılayan beton adı verilen yeni akıllı malzemeler üzerinde çalışmaktadırlar. Bu akıllı malzemeler, yüksek algılama ve yapısal sağlık izleme (YSİ) yeteneklerine sahip akıllı yapı elemanlarını geliştirmemize yardımcı olabilmektedir (Bharj *et al.* 2014). Kendiliğinden algılayan beton, konvansiyonel betona elektriksel olarak iletken malzemeler ekleyerek üretilen akıllı betondur. Bu beton, kendi kendini

denetleyen beton ve piezorezistif veya basınca duyarlı beton olarak bilinmektedir (Bharj *et al.* 2014).

Karbon fiberler, çelik fiberler, karbon nanotüpler, vb. gibi iletken malzemelerin eklenmesi ile betonun mekanik enerji altında uygulanan yükler ile bu yükler etkisiyle oluşan çatlakları ve hasarları algılama yeteneği artmaktadır. İletken malzemeler, beton içinde geniş bir iletken ağ oluşturmak için beton matrisine iyi dağılmalı, böylece betonun algılama kapasitesini geliştirmelidirler (Ding *et al.* 2015). Beton malzeme, uygulanan yükler altında deforme olduğunda, beton matrisin içindeki iletken ağ ve beraberinde elektrik direnci de değişmektedir. Bu nedenle, monotonik ve döngüsel gerilmeler altındaki gerilme-deformasyon, çatlaklar ve hasarlar, akıllı betonun elektriksel direnci ölçülerek tespit edilebilmektedir (Bharj *et al.* 2014). Kendiliğinden algılayan betonların içerisinde bağlı ve gömülü sensörler kullanmak suretiyle yüksek dayanıklılık, hassasiyet ve yapısal kapasite, aynı zamanda uzun vadede düşük maliyet sağlanmaktadır (Dong *et al.* 2020a; Sanli and Kanoun 2020).

1990'ların başında, kendiliğinden algılayan beton üzerine araştırma çalışmaları çimento kompozitlerine kısa karbon fiber eklenerek başlamıştır. Daha sonra, karbon fiber, grafit parçacıkları, çelik fiberler, karbon kaplı naylon fiber, çelik cürufu, karbon siyahı, grafen tozları, grafit trombositleri, Nano TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, karbon nanotüp ve hibrit karbon fiber gibi birçok iletken malzeme kullanarak kendiliğinden algılayan kompozitler geliştirilmiştir. Günümüzde de özellikle iletken mikro ve nanomalzemelerin ayrı ayrı ve beraber (hibrit) kullanımı araştırmaları devam etmektedir.

Kendiliğinden algılayan beton; yapısal sağlık izleme, trafik algılama, korozyon izleme, askeri sınır güvenliği, yapısal titreşim kontrolü gibi alanlarda kullanılmıştır (Ding *et al.* 2015). Dayanıklılık, yüksek bina, barajlar ve köprü gibi sivil altyapıların sürdürülebilirliği gibi alanlar kendini algılama özelliğinin etkili olduğu alanlardır. Bu nedenle, bu alanlarda kendiliğinden algılama özelliğini geliştirmek ve farklı alanlarda da kullanmak üzere yapılacak çalışmalar hız kesmeden devam edecektir.

### **Yapısal Sağlık İzleme (YSİ)**

Yapısal Sağlık İzleme (YSİ), hizmet ömrü boyunca inşaat yapılarının sağlık değerlendirmesidir ve bakım için uygun maliyetli stratejilerin anahtar ögesidir (Chen 2018). Temel amacı, yapının sağlık durumunu izlemek ve hizmet ömrü boyunca maruz kaldığı yükler etkisinde genel performansını değerlendirmektedir. İnşaat mühendisi YSİ kavramına dayanarak yapıların bazı parametrelerini (nem içeriği, korozyon oranı, alkali reaksiyonu, pH, gerilme ve çatlaklar gibi) izleyebilmektedir (Azhari 2008). YSİ teknikleri, yapının gerekli verilerini

kaydetmek için sadece bir kereye mahsus değil, aynı zamanda periyodik olarak yapılmış ölçümler kullanarak bir yapının zaman içinde değerlendirilmesini de sağlayan basit yöntemler içermektedir. Yapıdan kaydedilen veriler gelecekteki çalışmalar ve tasarım özellikleri için faydalı olabilmektedir.

YSİ, yapıdaki hasar durumunu; duyuşal sistemler, veri işleme sistemi, veri toplama sistemi (DAQ), hasar tespit sistemi, iletişim sistemi ve modelleme sistemi gibi birçok alet kullanılarak belirleyebilmektedir (Azhari 2008; Daum 2013). Amerikan İnşaat Mühendisleri Derneğı (ASCE) 1980'lerin başından beri köprü yapılarının hasar tespitine dayalı titreşimi tespit etmek için YSİ tekniğini kullanmıştır. YSİ'nin geliştirilmesi ve büyük yapılarda uygulanması, inşaat mühendisliğindeki gereksinimlerini karşılamak için her geçen gün daha popüler hale gelmektedir. (Farrar and Worden 2007).

Bir YSİ metodu; algılama ağı, veri işleme ve analizi, hasar değerlendirmesi ve karar verme safhalarını içermektedir. YSİ teknolojisinde ekonomi ve can güvenliği önemli kavramlardır. Bununla birlikte, YSİ'nin inşaat mühendisliğinde uygulanması, çok disiplinli yapısı nedeniyle hala gelişmeye ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle, inşaat mühendisliğinde YSİ'nin avantajlarını kullanmak için kapsamlı çalışmalar yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

### **YSİ'nin uygulama alanları**

Yapıların gelişmesi ile YSİ gereksinimleri artmakta yapıların güvenliğini sağlamak için daha fazla izleme ve değerlendirme sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Onarım ve rehabilitasyon tekniğinin düşük maliyetli ve kısa sürede olması yeterli YSİ sistemlerinin geliştirilmesine bağlıdır. YSİ'den elde edilen verilerle, gerekli onarım ve bakımı zamanında gerçekleştirmek için çeşitli çözümler elde edilmektedir.

YSİ sismik olayların risklerini yönetmek için bilgi sağlamak amacıyla köprülerin izlenmesinde kullanılmıştır (Galchev *et al.* 2011; Ye *et al.* 2014). Mufti (2001), çelik içermeyen köprü güvertelerinin performansını değerlendirmek için çelik takviyenin yerini alan fiber takviyeli polimer (FRP) kullanmıştır. Başka bir çalışmada, köprünün güçlendirilmesi için kullanılan püskürtülmüş FRP'lerin genel performansı ve dayanıklılığı değerlendirilmiştir (Banthia and Boyd 2000).

Son zamanlarda, birçok araştırmacı akıllı malzemeleri veya akıllı çimento kompozitlerini beton yapıların YSİ'sine uygulamak için kullanmıştır. Akıllı malzemelerin yapılara uygulanması kaplama, yapıştırma, gömme ve sandviç biçiminde olmaktadır. Son dönemlerde inşaat mühendisliğinin gelişimi ile çeşitli YSİ tekniklerinde veri işleme

algoritmaları ve sensör geliştirme gibi yardımcı tekniklerindeki gelişmeler artış göstermiştir (Song *et al.* 2017).

### **YSİ'nin faydaları**

YSİ teknolojileri, inşaat mühendisliği tasarımını ve yönetimini geliştirmektedir (Ko and Ni 2005; Frangopol and Messervey 2009). YSİ'nin birçok alanda faydası vardır. Bu faydalar arasında ilk ve en belirgin avantajı gelişmiş insan güvenliğidir (Chen 2018). İnşaat mühendisliğinde YSİ'nin en çok tanınan faydaları şöyle özetlenebilir;

- Rüzgar, nem, yük veya sıcaklık gibi ortamın karakteristik çevresel koşullarının kaydedilmesi,
- Gelecekteki yapılar için tasarım özelliklerini ve yönergelerinin geliştirilebilmesi,
- Gereken durumlarda kullanılacak izleme verilerinin toplanması,
- Yükleme ve gerilmeler altında uyarı limitleri oluşturulabilmesi,
- Genel operasyonlar boyunca veya afetlerden ve aşırı olaylardan hemen sonra gerçek zamanlı güvenlik değerlendirmesi yapılabilmesi,
- Kayıtlı yapısal tepki verilerinin analizinin yapılması,
- Mali tasarrufların temelini oluşturan bakım ve onarım faaliyetlerinin planlanması sayılabilir.

YSİ uygulamalarında yapının durumunu anlayabilmek için kullanılan ekipmanlar özellikle de sensörler ve bunların mantığı üzerinde durulması gerekmektedir.

### **Sensörler**

Sensörler, sistemin durumunu algılayabilen ve inşaat mühendisliği yapılarının sağlık değerlendirmesi için geniş veri ve bilgi sağlayabilen araçlardır (Chen 2018). Sensör kullanımının temel amaçları; yapının emniyetli izlenmesi, tasarım gereksinimleri için gerilme ve yük verilerinin elde edilmesi, yapının sürekli sağlık izlenmesinin gerçekleştirilmesi ve yapının gelecekteki performans ve bakım çalışmaları için hasar mekanizmalarının izlenmesi olarak sıralanmaktadır.

YSİ'de inşaat mühendisliği yapıları için kullanılan birçok sensör türü vardır; bunlar piezoelektrik sensörler, mikroeletromekanik sistemler (MEMS), fiber optik sensörler, doğrusal değişken diferansiyel transdüserler (LVDT), folyo gerilim ölçerler, titreşimli tel gerilim ölçerler ve ferromanyetik sensörler olarak sayılabilir (Azhari 2008; Chen 2018). Sensör seçimi esas olarak yapının türüne, yapı malzemelerine, çevresel koşullara, gerekli veriye ve uzmanın kararına bağlıdır.

İnşaat mühendisliği yapıları için YSİ’de en sık yapılan ölçümler mekanik (örn. gerilme, deformasyon, deplasman ve çatlak açıklığı), çevresel (örn. sıcaklık, nem ve gözenek basıncı) ve kimyasaldır (örn. korozyon, karbonatlaşma, pH ve oksidasyon). Çeşitli sensör tipleri aracılığıyla düzenli olarak yapılan ölçümlerde başarılı bir YSİ yaklaşımı için sensörlerin uygun şekilde belirlenmesi ve uygulanması gereklidir. Daha geniş ölçüm hassasiyeti nedeniyle fiber optik sensörler birçok yapı ölçümünde kullanılmıştır (López-Higuera *et al.* 2011). Geleneksel sensörlerin (örn. fiber optik veya gerinim ölçerler), yüksek maliyet, kısa vadeli ölçümler ve bazı beton yapılarda yetersizlik gibi dezavantajları vardır.

Son zamanlarda, birçok araştırmacı tarafından yeni nesil sensörler önerilmiştir. Bu sensörler, çimento esaslı sensörler veya kendiliğinden algılayan yapısal sensörler olarak adlandırılır ve yapısal malzemelerden üretilmiştir. Çimento esaslı sensörler, sensörün elektrik direncindeki değişimine bağlı olarak gerilme, deformasyon, çatlaklar ve hasarlar tespit edebilmektedir. Çimento esaslı sensörlerin düşük maliyeti, yüksek dayanıklılığı, uzun süre servis kolaylığı, kolay yalıtımı ve yüksek hassasiyeti, beton yapıda tercih edilen algılama sistemini sağlayabilmektedir. Bu Sensörlerle ilgili detaylı açıklamalar Bölüm 2’de verilmiştir.

### **Çalışmanın Amacı ve Özgün Değeri**

Bu çalışmanın temel hipotezi; beton elemanların YSİ’lerinin belirlenmesinde sensör olarak çimento esaslı kompozitler geliştirmektir. Çalışmanın temel amaçları aşağıda sıralanmıştır.

- Kendiliğinden algılayan çimento esaslı kompozitlerin üretiminde kullanılacak en iyi mikro ve nano iletken malzemeler için etkili karıştırma yönteminin elde edilmesi,
- Çimento esaslı kompozitler için kürlenme yaşının ve farklı frekansların elektriksel direnç veya özdirenç üzerindeki etkisinin incelenmesi,
- Akıllı çimento kompozitlerinin piezorezistif algılama kapasitelerinin, monotonik ve periyodik yükleme altında elektriksel direnç FCR ile gerilme-deformasyon arasındaki ilişkiye göre incelenmesi,
- İletken malzeme içeren Çimento Bazlı Deformasyon Sensörlerin beton elemanlarda monotonik ve periyodik basınç altında gerilme-deformasyon özelliklerinin izlenmesi ve deformasyon ölçer sonuçları ile karşılaştırılmasıdır.

Çalışmanın özgün değeri;

Sensör olarak geliştirilmeye çalışılan çimento esaslı akıllı kompozitlerde NNi ve (-OH) ÇDKNT'lerin kullanıldığı ve KF, NNi ile KNT'lerle beraber ikili üçlü kombinasyonlarının kullanıldığı bir çalışma literatürde bulunmamakla birlikte bu kompozitlerin monotonik ve periyodik basınç yükleri altında YSİ için beton eleman içinde gömülü sensör olarak kullanımı çalışmanın özgün değerini oluşturmaktadır.

Bu amaçla tez beş bölüm halinde düzenlenmiştir. Tez bölümleri ve içerikleri aşağıda verilmiştir:

- **Giriş bölümü:** Tez konusu ile ilgili genel kuramsal bilginin ve bu çalışmanın amaçlarının tanıtılması.
- **Kuramsal temeller bölümü:** Kendiliğinden algılayan, elektriksel ve piezorezistif özelliklerinin incelendiği çalışmalar ve konu hakkında tarihsel gelişim süreci anlatımı.
- **Materyal ve yöntemler bölümü:** Kullanılan malzemeler, fiziksel ve kimyasal özellikleri, deney yöntemleri, analiz yöntemleri tanıtımı ve kullanılan malzemeleri homojen karıştırmak için yapılan ön çalışmaların verilmesi.
- **Bulgular ve tartışma bölümü:** İletken çimento esaslı kompozitlerin elektriksel özelliklerinin araştırılması, iletken çimentolu kompozitlerin monotonik ve periyodik basınç altında kendiliğinden algılama özellikleri bulgularının verilmesi ve analiz yöntemleri ile sonuçların açıklanması ve üretilen kompozitlerin yapı elemanlarında sensör olarak kullanımının belirlenmesi.
- **Sonuçlar ve öneriler bölümü:** Sonuçlara ilişkin açıklamalar ve gelecekteki çalışmalar için bazı öneriler açıklanmıştır.

## KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde, akıllı beton, elektriksel direnç önemi, piezorezistif algılama ve iletken malzemelerin dağılım yöntemleri ile ilgili bilgilere yer verilmektedir. İletken kompozitlerin elektrik ve algılama özelliklerinin üzerinde durulmalı ve farklı iletken malzemelere sahip çimento kompozitlerin perkolasyon eşiği konusu ile ilgili ayrıntılı bilgi verilmesi gerekmektedir.

Çimentolu kompozitlerde elektriksel direnç ölçüm teknikleri, elektrotların yerleştirilmesi de göz önünde bulundurularak, beton teknolojisinde ayrı bir başlık altında değerlendirilir. İletken malzemeler kullanılarak çimento kompozitlerinin kendiliğinden algılama özelliklerinin belirlenmesi ile monotonik ve periyodik yükleme altında iletken çimento kompozitleri üzerinde yapılan araştırmalar da bu kısımda yer almaktadır. Ayrıca, kendiliğinden algılama özellikli akıllı çimentolu kompozitlerin yapısal sağlık izleme (YSİ) sistemindeki uygulamaları hakkında bilgiler de literatürden yararlanılarak verilmektedir.

### Akıllı Beton

İnşaat yapıları, uzun süreli yaşam boyunca deprem, büyük yükler ve kuvvetli rüzgarlar gibi dış etkilere hasar görebilmektedirler. Bu durum, yapının hizmet ömrü boyunca güvenliğini ve dayanıklılığını değerlendirmek için bazı gereklilikleri daha önemli hale getirmektedir (Han *et al.* 2014). YSİ teknolojisi, uzun süreli hizmet ömrü boyunca yapının durumunu izlemek için önemli bir işlem olarak kabul edilmektedir. Yapının yükler altında gerilme deformasyon, hasar ve çatlak durumu gibi değişen performans özelliklerini doğru bir şekilde belirleyebilmek çok önemlidir. Bu amaçla geleneksel yapı sistemleri ve geleneksel yapı malzemelerinden daha farklı sistem ve malzemeler kullanılmalıdır.

Akıllı beton, normal veya geleneksel betondan farklı özelliklere sahip bir sistemdir. Bu özellikler arasında kendiliğinden algılayan, kendiliğinden ısınan, kendiliğinden iyileşen, elektriksel olarak iletken, farklı termal ve elektromanyetik özelliklere sahip türleri bulunmaktadır.

Normalde, güvenliğini artırmak, yaşam döngüsü maliyetini, uzun ömürlülüğü, altyapı işlevlerini, kaynak tüketimini ve çevre kirliliğini azaltmak için belirli bir yapı elemanı gereksinimini karşılamak üzere akıllı beton üretilmektedir. Akıllı betonun temel prensibi çok özel tasarım, ve bileşenlere sahip olmasıdır (Gandhi and Thompson 1992; Schwartz 2008; Han

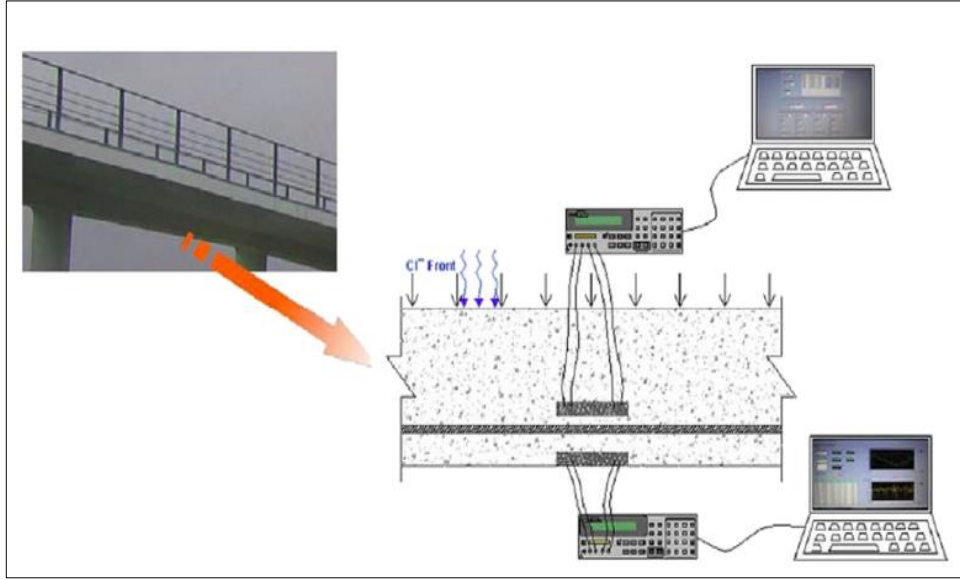
*et al.* 2015b). Akıllı beton kompozit bir sistem olduğundan kompleks bir yapıya sahiptir ve dikkatli bir şekilde ele alınmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Akıllı betonun ilk konsepti 1980'lerin sonunda Japon araştırmacılar tarafından oluşturulmuştur. Elektrik iletkenliği yüksek beton, kendiliğinden genişleyen beton, akıllı beton gibi birçok beton türünün ilk araştırmaları başlamıştır. Yanagida 1992 yılında beton içinde karbon lifleri ve cam kullanarak "kendi kendini test edebilen beton" türünü geliştirmiştir (Muto *et al.* 1992). Daha sonra araştırmacılar, tasarım, numune hazırlama, test etme, performans ve betondaki akıllı özelliklerin mekanizması gibi akıllı beton gereksinimlerine daha fazla odaklanmışlar ve birçok uygulamada akıllı beton türlerini kullanmaya çalışmışlardır (Han *et al.* 2015b).

Akıllı beton türlerinden kendiliğinden algılayan beton kavramının temel olarak elektrik direncinin ölçülmesine bağlı olduğunu belirtmek önemlidir. Örneğin, betonun elektrik direncini ölçerek deformasyonu algılamak mümkündür. Betonun, elastik fazdaki deformasyon veya gerilme altında elektrik direncinde tersinir bir değişiklik oluşmaktadır (Zhang *et al.* 2006; Liu *et al.* 2016).

Gerilme-deformasyon ölçümleri için günümüzde beton yapılarda strain gaugeler ve fiber optik sensörler gibi geleneksel ölçüm elemanları kullanılmaktadır. Ancak, bu sensörlerin yüksek maliyet, kurulum zorluğu, düşük hassasiyet, zayıf dayanıklılık ve kullanım sınırlılığı gibi birçok dezavantajı da vardır. Ek olarak, bu sensörler, bazı durumlarda beton ile yapısal bir sistem olarak uyumlu olmayan malzemelerden yapılmıştır (Wen and Chung 2003; Kang *et al.* 2006; Azhari and Banthia 2012). İletkenliği yüksek akıllı beton, ekonomik maliyet, yüksek hassasiyet ve çok işlevlilik de dahil olmak üzere birçok avantaja sahip bir yapı malzemesidir, kullanıldığında deformasyon ölçerler veya fiber optik sensörlerden daha iyi performans göstermektedir (Chen and Chung 1996a; Han and Yu 2010; Wang *et al.* 2014a; Zhang *et al.* 2015).

Normalde, tüm beton yapıyı imal etmek için kendiliğinden algılayan malzemeyi kullanmak gereksizdir, ancak küçük boyutlu bir çimento sensörünün yapının yüzeyine gömülü veya kaplama olarak kullanılması daha ekonomik olabilmektedir. Bu sensörler, ana yapı elemanını etkilemeden doğru gerilme-deformasyon bilgisi sağlayacaktır (Şekil 1) (Azhari 2008). Çimento esaslı sensörlerin imalatı kolaydır ve gömülü olduğu yapının mekanik veya dayanıklılık özelliklerini etkilemeyen gerçek yapısal malzemelerden üretilmektedir.



**Şekil 1.** Kendiliğinden algılayan beton köprünün YSI sistemi (Azhari 2008).

Gösterge faktörü olarak adlandırılan strain gauge factor (GF) değeri elektrik direncindeki değişim oranı ile birim uzamanın ilişkisini temsil eden bir kavramdır. Tipik bir ticari strain ölçer 2'lik bir gösterge faktörüne sahipken çimento esaslı sensörlerde bu faktör 700'e kadar çıkabilmekte buda bu sensörlerin strain gaugelere kıyasla son derece hassas olduğunu göstermektedir (Azhari and Banthia 2012).

Kendiliğinden algılayan kompozitlerin gelişiminde içerisinde kullanılan malzemeler çok önemlidir. Çimento hamuru veya harcı, genellikle çimento bazlı sensörler için matris olarak kullanılmaktadır. İletken bir malzeme (lifler veya tozlar) çimentoya eklenerek bu tür akıllı çimento kompozitleri üretilebilmektedir. Liflerle ilgili çalışmalarda örnek olarak, çelik veya karbon fiberlerin çeşitli oranlarda çimento hamurlarına eklenmesi elektriksel direncini azaltmıştır. Hibrid lifli kompozitler, tek başına ya çelik ya da karbon lifleri içeren çimento hamurlarından daha iyi sonuçlar vermiştir. Bunun sebebi, büyük ölçekli çelik fiberler ile küçük ölçekli karbon fiberler arasında iletken bağın oluşmasıdır (Banthia *et al.* 1992). Karbon fiberler çelik fiberlerden daha iyi hassasiyet göstermesine rağmen, çelik-karbon hibrid kompozitler, lif-lif temas mekanizması nedeniyle periyodik yükleme altında en iyi algılama tepkisini sergilemiştir (Wen and Chung 2003).

Yukarıda anlatıldığı gibi akıllı beton konseptinde kendiliğinden algılayan betonu anlayabilmek için elektriksel bazı kavramların iyi bilmek gerekmektedir.

### **Elektriksel Kavramlar**

Kendiliğinden algılama özellikleri akıllı betonun elektriksel ve mekanik özelliklerinin birleşimidir. Akıllı betonun mekanik özellikleri (kuvvet, gerilme, deformasyon ve deplasman

gibi) geleneksel mevcut ölçüm yöntemleri kullanılarak ölçülebilirken, kendiliğinden algılama özelliklerinin ölçümü daha karmaşık ve zordur. Açıklanmasında elektriksel kavramlara (elektrik direnci, elektrik kapasitansı ve dielektrik özellikleri vb. gibi) ihtiyaç duyulmaktadır.

### **Elektrik direnci ve ohm yasası**

Ohm Yasası, 1827’de Alman bilim adamı (Georg Simon Ohm) tarafından bulunmuştur. Ohm elektrik direncini, malzemenin veya bölümün içinden geçen elektrik akımının akışına karşı direnci olduğunu tanımlamıştır (Consoliver and Mitchell 1920). Ohm yasasına göre, belirli veya sabit bir sıcaklıkta, bir elemanın direnci, uygulanan voltajın içinden akan akıma bölünmesine eşittir. Elektrik direncinin matematiksel formülasyonu aşağıdaki gibi açıklanmıştır:

$$R = \frac{V}{I} \quad (1)$$

$R$ : ohm ( $\Omega$ ) cinsinden ölçülen elektriksel direnç,  $V$ : volt cinsinden gerilim (V),  $I$ : amper (A) cinsinden ölçülen elektrik akımı (Millikan and Bishop 1917). Bu denklem doğru akım (DC) ölçümlerinde geçerlidir, alternatif akım (AC) ölçümlerinde Ohm yasası hem direnç hem de reaktanstan oluşmaktadır;

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2)$$

Burada  $Z$ , empedans olarak bilinen direnç ve reaktansın kombinasyonudur. Empedans ( $Z$ ) ayrıca ohm ( $\Omega$ ) cinsinden ölçülmektedir.

Ohm yasası, çeşitli büyüklükteki elektrik akımına sahip elektriksel olarak iletken elemanların iletkenliğini temsil etmektedir. Ancak, bazı malzemeler Ohm yasasına uymaz, bunlar diyotlar, termistörler ve transistörler gibi ohmik olmayan olarak adlandırılır (Heaviside 2011).

### **Öz direnç**

Betonun kendiliğinden algılama kapasitesi, yükleme altında beton matris içindeki iletken ağ yolunu değiştirebilen iletken malzemelerin varlığına bağlıdır. Akıllı betonun hacimsel elektrik direnci, algılama davranışını araştırmak için önemli bir anahtardır (Chen and Chung 1993b; Pinhua 1997). Elektriksel öz direnç, numunenin geometri şekillerine bağlı olan elektrik akışına karşı direncidir. Ohm yasasına dayanarak, kendiliğinden algılayan betonun elektrik direnci  $\rho$ , aşağıdaki denkleme göre belirlenebilmektedir:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{L} \quad (3)$$

Burada  $\rho$  elektriksel özdirenç,  $R$  direnç,  $S$  elektrotun iletken alanı ve  $L$  iki elektrot arasındaki mesafedir (Singh 2013).

Farklı malzemelerin 20°C sıcaklıkta elektrik özdirenç değerlerine bakacak olursak; Gümüş:  $1.59 \times 10^{-8} \Omega.m$ , Bakır:  $1.7 \times 10^{-8} \Omega.m$ , Karbon:  $3.5 \times 10^{-5} \Omega.m$ , Beton: 5 ila 15  $\Omega.m$ , Cam: 1010 ila 1014  $\Omega.m$ , olarak sıralanabilmektedir.

### **Polarizasyon**

Polarizasyon olayı, beton numunenin iki elektrodu arasında uygulanan gerilime potansiyel zıtlık olarak tanımlanabilmektedir (Wen and Chung 2001b). Normal olarak, çeşitli karbon fiber esaslı çimento kompozitleri gibi malzeme iyonları ( $Na^+$ ,  $Ca^+$ ,  $OH^-$ , vb.) pozitif ve negatif olarak yüklenmektedir. Elektrotlar arasında elektrik direnç ölçerden harici potansiyel uygulanarak pozitif iyonlar negatif elektroda doğru hareket etmeye zorlanır ve bunun tersi de, uygulanan potansiyele karşı ve elektrik direncini artıran ince bir film oluşturmaktadır (Wen and Chung 2001a). Bu potansiyel karşıtlık, polarizasyon potansiyelini ifade etmektedir. Polarizasyon, direnç kaydının zamanla artacağı direnç ölçümü sırasında gerçek elektrik direncinin sonuçlarını etkilemektedir (Azhari 2008).

Polarizasyon etkisi istenmeyen bir konudur ve elektrik direncinin daha doğru okunması için en aza indirilmeli veya ortadan kaldırılmalıdır. Ancak, aşağıdaki gibi özetlenen polarizasyonu en aza indirgeyebilen veya ortadan kaldırabilen birçok yöntem vardır;

- Bir AC akımı kullanarak polarizasyon etkisini ortadan kaldıracak, AC yönteminde iyonlar bir tarafta birikmeyecek, ancak eşit olarak dağıtılacaktır (Wen and Chung 2001a).
- AC akım frekansı polarizasyon etkisini ortadan kaldırabilir, akım frekansını arttırarak polarizasyonu en aza indirmektedir (Hou and Lynch 2005).
- Elektrotları iletken jöle veya boya ile kaplamak, elektrodun elektrokimyasal yüzey alanını azaltabilir, böylece polarizasyon etkisi de azalacaktır (Wen and Chung 2001a).
- İki prob yönteminden çok daha fazla azaltan dört prob yöntemini kullanmak polarizasyon etkisini de azalacaktır (Marken *et al.* 2010).

### **Empedans**

Empedans, belirli bir frekansta alternatif bir akımın (AC) akışına karşı toplam dirençtir. Empedans  $Z$  iki (gerçek ve hayali) parçanın birleşimidir,  $Z$ 'nin gerçek kısmı elektriksel direnci  $R$  temsil ederken, sanal kısım elektriksel reaktans  $X$ 'tir:

$$Z = R + jX \quad (4)$$

Burada  $Z$ : ohm ( $\Omega$ ) cinsinden ölçülen empedans,  $R$ : ohm ( $\Omega$ ) olarak ölçülen empedansın gerçek kısmı olarak bilinen ohm direnci,  $j$ : sanal birim,  $X$ : sanal kısım olarak bilinen reaktans, ohm ( $\Omega$ ) cinsindendir.

Empedans ayrıca polar forma dayalı olarak hesaplanabilir ve ohm ( $\Omega$ ) birimi ile ifade edilir;

$$Z = |Z| \angle \theta \quad (5)$$

$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$ ,  $\theta = \tan^{-1} \left( \frac{X}{R} \right)$ ,  $|Z|$  ve  $\theta$  sırasıyla ohm ( $\Omega$ ) ve derece ( $^\circ$ ) cinsinden empedansın büyüklüğü ve faz açısıdır.

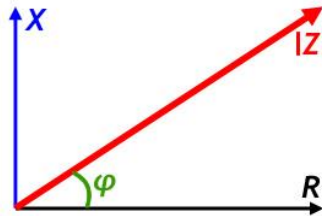
Birçok araştırmacı empedans ve elektriksel reaktansın gerilime elektrik direncinden daha duyarlı olduğunu bulmuştur (Fu *et al.* 1997b; Zheng *et al.* 2005; Saafi *et al.* 2013).

### Omik direnç

Doğru akım DC devresinde, voltaj ve akım arasındaki değişimi direnç olarak temsil etmektedir. AC devresinde, direncin karakterizasyonu empedans olarak adlandırılan daha karmaşık bir forma genişletilir. Empedans ohm direnci ( $R$ ) ve reaktansın ( $X$ ) birleşimidir (Şekil 2). AC devresinde, Direnç (veya omik direnç), denkleme dayalı olarak hesaplayabilen empedansın gerçek kısmı olarak bilinir;

$$R = |Z| \cos \theta \quad (6)$$

Burada,  $R$ : ohm ( $\Omega$ ) cinsinden ölçülen direnç,  $Z$ : ohm birimindeki ( $\Omega$ ) empedansın büyüklüğü,  $\theta$ : derece ( $^\circ$ ) cinsinden faz açısıdır (voltaj ve akım arasındaki faz farkı) (Azhari 2008).



**Şekil 2.** Öz direncin grafiksel gösterimi

### Reaktans

Matematiksel analizde türev ifadesi içeren kondansatör ve endüktans gibi elemanların AC gerilime karşı gösterdikleri dirençtir. Reaktans, saf omik direncin akım akışına karşı

gösterdiği tepkiden daha farklıdır ve empedansın sanal kısmını oluşturur. Reaktans elektrik direncine benzer, ancak birçok açıdan farklılık göstermektedir. Alternatif akım (AC) devresinde, reaktans (X) empedansın sanal kısmı ile temsil edilmektedir. Ancak, reaktans; endüktif reaktans ( $X_L$ ) veya kapasitif reaktans ( $X_C$ ) veya ikisinin bir kombinasyonu şeklinde olabilmektedir. Reaktans denklem 7'den hareketle empedansa göre hesaplanabilir;

$$X = |Z| \sin \theta \quad (7)$$

Burada, X: ohm ( $\Omega$ ) cinsinden ölçülen reaktans, Z: ohm ( $\Omega$ ) cinsinden ölçülen empedans büyüklüğü,  $\theta$ : derece ( $^\circ$ ) cinsinden ölçülen faz açısıdır.

Reaktans pozitif olduğunda ( $X > 0$ ) malzeme endüktif anlamına gelir, reaktif negatifse malzeme kapasitiftir ( $X < 0$ ). Sıfır reaktans ( $X = 0$ ), basitçe reaktans etkisi yoktur ve sadece empedanstan oluşmaktadır.  $X_C$ 'nin AC ölçüm frekansı (f) ve kapasitans (C) ile ters orantılı olduğu kabul edilir:

$$X_C = -\frac{1}{\omega C} = -\frac{1}{2\pi f C} \quad (8)$$

$X_C$ : ohm ( $\Omega$ ) cinsinden ölçülen kapasitif reaktans,  $\omega$ : saniyede radyan cinsinden ölçülen açısal frekans (rad/s), C: farads cinsinden ölçülen kapasitörün kapasitansı, f: hertz (Hz) cinsinden ölçülen sinyal frekansı.

Endüktif reaktans ( $X_L$ ), reaktansın devre içinde bir indüktörün varlığından kaynaklanan kısmıdır.  $X_L$ 'nin AC sinyal frekansı (f) ve endüktans (L) ile doğru orantılı olduğu bilinmektedir:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (9)$$

$X_L$ : ohm ( $\Omega$ ) cinsinden ölçülen endüktif reaktans,  $\omega$ : saniyede radyan cinsinden ölçülen açısal frekans (rad/s), L: henrys (H) cinsinden ölçülen indüktörün endüktansı, f: hertz (Hz) cinsinden ölçülen sinyal frekansıdır.

### ***Faz Açısı***

Faz açısı, AC devresindeki kapasitans ve endüktanstan kaynaklanan voltaj ve akım arasındaki faz farkıdır. Gerilim ve akım birbiriyle faz dışında olduğundan, empedans elde etmek için direnç ve reaktans temelde dahil edilemez. Direnç ve reaktans, faz açısına göre birlikte eklenir. Faz açısı ( $\theta$ ) ve derece ( $^\circ$ ) ( $\theta \leq 90^\circ$ ) olarak birleştirilir. Faz açısı pozitifse, voltaj akımı tahrik eder ve reaktans giderek endüktiftir. Voltaj  $90^\circ$  ( $\pi/2$ ) sürüyorsa, cihaz saf endüktif reaktansa sahiptir. Öte yandan, faz açısı negatifse, voltaj akımı azaltır ve reaktans giderek kapasitiftir. Faz açısı aşağıdaki denkleme göre hesaplanabilmektedir:

$$\tan \theta = \frac{X_L - X_C}{R} \quad (10)$$

Burada,  $\theta$ : derece ( $^\circ$ ) cinsinden faz açısı,  $X_L$ : ohm cinsinden endüktif reaktans ( $\Omega$ ),  $X_C$ : ohm cinsinden kapasitif reaktans ( $\Omega$ ),  $R$ : ohm cinsinden direnç ( $\Omega$ ).

### Frekans

AC devresinde frekans, kapasitans ve endüktans etkisini değiştirmek için önemli bir faktördür. Bu, reaktansı ve empedansı kademeli olarak etkileyecektir. 8 ve 9 denklemlerine göre, bir kapasitif mekanizma için yüksek frekans daha düşük kapasitif reaktansa yol açarken, endüktif bir mekanizma için yüksek frekans yüksek endüktif reaktansa yol açmaktadır. AC devresinde, frekansın yükseltilmesi beton numunesinde polarizasyon etkisini en aza indirebilmektedir. Birçok araştırmacı, farklı frekans aralıklarında beton empedansını ölçmek için AC yöntemlerini kullanmıştır. Frekansın artırılmasının akıllı beton empedansının azaltılmasında yeterli bir etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır (Yoo *et al.* 2018b; Yoo *et al.* 2019; Mo *et al.* 2020; Sanli and Kanoun 2020).

### Betonun Elektriksel Direnci

Betonun elektriksel direnci, akıllı beton uygulamalarında ve teknik özelliklerinde dikkate alınması gereken en önemli konudur. Elektriksel direnç, beton yapı içindeki elektrik akımının akış büyüklüğü ile belirtilmektedir (Layssi *et al.* 2015). Elektrikle çalışan hızlı geçiş hatları gibi yüksek direnç gerektiren bazı beton yapıları olmasına rağmen, katodik koruma sistemleri, çalışma odası zeminleri gibi düşük direnç gerektirmektedirler (Whiting and Nagi 2003). Çelik donatıların korozyona uğramaması için yüksek elektriksel dirençli beton gerekmektedir (Julio-Betancourt and Hooton 2004).

Elektrik iletkenliğinin, elektrik direncinin tersi olduğu bilinmektedir, en düşük dirençli beton, yüksek iletken beton anlamına gelmektedir. Genel olarak, çimentolu kompozitler yüksek elektrik direnci (yaklaşık  $10^6$ - $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ ) nedeniyle bir yalıtım malzemesi olarak kabul edilmektedir (Chen and Chung 1996a; Tang *et al.* 2005).

Araştırmacı Whiting, betonun elektrik direncini etkileyen birçok faktör olduğunu belirtmektedir. Bu faktörler; su/çimento oranı, çimento içeriği, nem içeriği, kürlenme koşulu, çimentonun kimyasal özellikleri, kimyasal katkı maddeleri ve çevresel koşullardır (Whiting and Nagi 2003). Örnek olarak, çimentodaki yüksek  $C_3A$  içeriği, diğer çimento tiplerine kıyasla betonun elektrik direncini arttırmaktadır. Normal olarak, elektrik akımı agregalardan ziyade çimento matrisi tarafından taşınır. Bu nedenle, betondaki agrega içeriğinin artmasıyla betonun elektriksel direnci de artmaktadır (Shi 2004). Betonun elektriksel direnci su/çimento oranının

azalmasıyla artmaktadır (Monfore 1968). Doygunluk koşulu, betonun gözenek ağındaki suyun değişmesine bağlı olarak elektrik direncini azaltacaktır (Layssi *et al.* 2015). Kalsiyum klorür gibi klorür tuzlarının varlığı, klorür çözeltisinin yüksek iletkenliği nedeniyle betonun direncini azaltmaktadır (Monfore 1968; Whiting and Nagi 2003). Gözenek yapısının ve betondaki nem içeriğinin değişmesi nedeniyle ve kürlenme süresinin artmasıyla, betonun elektriksel direnci artmaktadır (Whiting and Nagi 2003; Spragg *et al.* 2013). Çelik lif (Wen and Chung 2003; Teomete 2016), karbon siyahı (Li *et al.* 2008a; Ou and Han 2009; Lin *et al.* 2011) veya karbon lif (Sun *et al.* 2000; Baeza *et al.* 2013a) gibi iletken bir malzeme ile çimento kompozitlerinin elektrik direnci azaltılabilmektedir.

Çimentolu kompozitlerin elektriksel öz direnci, özellikle de son yüzyılda büyük ilgi görmüştür (Shimizu 1928; Calleja 1952; Whittington *et al.* 1981). Hızlı klorür geçirimsizlik (RCPT) testi, elektriksel özelliklere bağlı olan ilk testtir. RCPT testi, sabit bir voltaj uygularken, zaman içinde doymuş bir numune içinden geçen voltaj miktarıdır (ASTM 2012). RCPT'nin sonuçlarını etkileyebilecek birkaç husus vardır; numune hazırlama zorluğu, eklenen malzemelerin yüzeyde tabaka oluşturması ve numune ısıtma süreci gibi ek işlemlere ihtiyaç duyulması bunlara örnektir (Snyder *et al.* 2000; Julio-Betancourt and Hooton 2004; Rupnow and Icenogle 2011). Bu sınırlamalar göz önüne alındığında, RCPT'nin yerini alabilecek tahribatsız öz direnç ölçümleri geliştirilmektedir. Elektriksel direnç testleri düşük maliyetli, kolay uygulanabilir ve tekrarlanabilir olabilmektedir (Paredes *et al.* 2012; Spragg *et al.* 2012). Elektrik direncini ölçmek için standart test yöntemleri geliştirmek üzere AASHTO ve ASTM tarafından raporlar hazırlanmaktadır (AASHTO-95 2011; ASTM 2012).

Son zamanlarda birçok çalışma, çimento kompozitlerindeki elektriksel özelliklerin tahribatsız öz dirençlerinin incelenmesine ve uygulamadaki avantajlarını araştırmaya odaklanmıştır. Bu araştırmalar arasında, kendiliğinden algılama özellikleri (Han *et al.* 2009c; Ou and Han 2009; Gupta *et al.* 2017), kendiliğinden ısınan (Chang *et al.* 2009; Gopalakrishnan *et al.* 2015b) ve elektromanyetik koruma (Guan *et al.* 2006; Guan *et al.* 2007) çalışmaları bulunmaktadır.

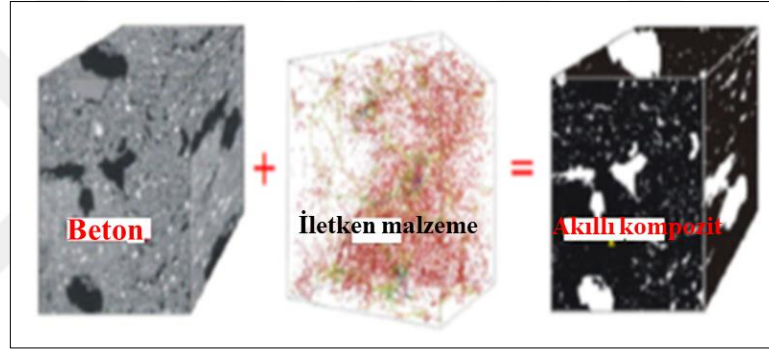
Kompozitlerin elektriksel direnç özellikleri bilindiği zaman kendiliğinden algılama özellikleri bilhassa piezorezistivite özellikleri belirlenebilmektedir.

### **Piezorezistivite ve Algılama**

Piezo'nun kökeni Yunanca "sıkmak" veya "biraz baskı uygulamak" anlamına gelen "piezein" kelimesinden gelmektedir. Piezorezistivite, uygulanan gerilme veya deformasyon altında elektrik direncinin değişmesi olarak tanımlanabilmektedir. Malzemelerin elektrik

direncinin basınç altında değişebileceği piezo dirençli malzemeler olarak adlandırılmıştır. Piezo-dirençli malzemelerin elektriksel direnci doğrudan iyonların pozisyonu ve hareketleri ile ilgilidir. Gerilme altındaki elektrik direncinin değişmesi, düzenin değişmesi ve iyonların pozisyonundan kaynaklanmaktadır (Senturia 2007).

Kendiliğinden algılama genelleştirilmiş bir piezorezistivite kavramıdır (Rana *et al.* 2016). İletken malzemelerin varlığı, kendiliğinden algılama özelliğini sağlamaktadır. Normalde, kendiliğinden algılayan beton, Şekil 3'te gösterildiği gibi, bir beton matriste dağılmış iletken malzemeler içeren iki fazlı bir malzeme olarak kabul edilmektedir. İletken malzemeler; lifler, partiküller veya hibrit (lif+partiküller) malzemeler olabilir ve bu malzemeler beton matrisi içinde iletken bir ağ oluşturmak üzere homojen olarak dağıtılmaktadır (Han *et al.* 2014). Beton yapı deforme olduğunda veya gerildikçe, beton matrisi içindeki iletken ağı değişmesine bağlı olarak elektriksel direnç etkilenecektir.



**Şekil 3.** Kendiliğinden algılayan betonun yapısı (Han *et al.* 2014).

Piezorezistivite ile piezoelektrik kavramları farklı kavramlar olmakla birlikte birbirine karıştırılmamalıdır. Her iki durumda da, basınç altında piezo özellikleri etkilenmektedir. Piezorezistivite, uygulanan mekanik stres nedeniyle elektrik direncinde değişiklik olarak tanımlanabilmektedir (Barlian *et al.* 2009). Piezoelektriklik kavramı ise mekanik stres nedeniyle yük (voltaj) oluşumu veya bunun tam tersi olabilmektedir (Cullinan *et al.* 2012). Mekanik enerji piezorezistif malzemelerin elektrik direncinde değişiklikler gösterebilir, ama yükün veya voltajın değişimi olmaz (Dirjish 2012).

Normalde, ses üretimi ve algılama uygulamalarında, voltaj ve frekans üretiminde ve çok sayıda ölçüm sisteminde piezoelektrik bileşenler kullanılmaktadır. Piezorezistif bileşenler yarı iletken malzemelerden yapılır ve en yaygın olarak basınç altında ölçüm yapılırken kullanılmaktadır (Dirjish 2012). Piezoelektrik sensörler, piezoelektrik etkiye bağlı olmakla birlikte voltajda değişim oluşturan basınç gerilme, deformasyon gibi birçok parametreyi ölçebilmektedir. Piezorezistif sensörü, basınç ölçüm uygulamaları için kullanılmaktadır (Kon *et al.* 2007).

İrlandalı Fizikçi Lord Kelvin 1856 yılında ilk olarak piezorezistif etkisini tanımlamıştır. Lord Kelvin, piezorezistif etkinin temel kavramına uyan metal cihazlarda farklı bir durum keşfetmiştir. Ancak, daha sonra piezorezistive etkisi resmen C.S. Smith tarafından, 1954 yılında tanımlanmıştır. Smith, piezorezistive durumunu germanyum ve silikon örneklerinde daha detaylı bir şekilde açıklamıştır (Barlian *et al.* 2009). Fransız fizikçiler Pierre ve Jacques Curie ilk kez 1880’de piezoelektrik etkiyi keşfetmişler fakat iletim şeklini açıklayamamışlardır. Ancak 12 ay sonra, Gabriel Lippmann piezoelektrik etkiyi matematiksel olarak doğrulamış ve Nobel fizik ödülünü kazanmıştır (Manbachi and Cobbold 2011; Dirjish 2012).

Piezorezistif özellikli mono-kristal silikon basınç sensörleri son zamanlarda geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Mono-kristalin sensörlerin duyarlılığı diğer birçok türün duyarlılığından daha yüksek olduğundan yarı iletken teknolojisi üzerine inşa edilen direnç değişimi (piezorezistif etki), standart gerilim ölçerlerden (strain gaugeler gibi) daha etkilidir (Kon *et al.* 2007).

Amaca uygun piezorezistif tabanlı birçok malzeme sensör olarak kullanılabilir. Bunlardan birisi de çimento esaslı olarak üretilen piezorezistif sensörlerdir.

Çimento esaslı sensörlerin ana amacı, daha dayanıklı, düşük maliyetli, yüksek hassasiyetli ve yapısal uyumlu bir sistem sağlamaktır. Çimento bazlı sensörlerin yapı elemanına gömülmesi, yüksek bir inşaat maliyetine veya ana yapının yapım tekniklerinde herhangi bir değişikliğe neden olmaz (Li and Ou 2009). Gerilme altındaki gömülü sensörlerin elektrik direncindeki değişimlerinin kaydedilmesiyle, ana yapının davranışı izlenmektedir. Yükleme türü, monotonik ve periyodik yükleme şeklinde olabilmektedir.

Deformasyonda herhangi bir değişiklik olunca bu tip sensörlerin elektrik direnci değişmektedir. Bu sensörlerin verimliliği iletken malzemelerin tipine, dispersiyon yöntemlerine ve kurlenme durumuna bağlıdır. Ayrıca, sensörlerin geometrisi algılama kapasitesinin verimliliğini de etkilemektedir (Morris *et al.* 1996; Castro *et al.* 2012; Spragg *et al.* 2012). Bu kavramlardan homojen dağılım faktörü özellikle üzerinde durulması gereken bir faktördür.

### **İletken Malzemelerin Çimento Matrisine Dağılımı**

Kendiliğinden algılayan çimento kompozitleri, çimento matrisine iletken malzemeler ilave edilerek elde edilebilmektedir. Bu iletken malzemeler elektrik akımının geçirilmesi yoluyla kompozitlerin elektrik direncini değerlendirmek için önemli iletken bir ağ oluşturacaktır. Çimento kompozitlerinin elektriksel özelliklerini iyileştirmek için içerisine mikro ve nano ölçekli malzemeler gibi çeşitli iletken malzemelerinin homojen dağılımına ihtiyaç duyulmaktadır. Kendiliğinden algılama özelliği esas olarak dağılım tekniklerinin

verimliliğine bağlıdır. Beton numunelerine uygulanan gerilmeler altındaki elektriksel dirençteki değişim oranı, kendiliğinden algılama özelliklerini temsil edebilmektedir (Chen and Chung 1996a; Han *et al.* 2009c; Han *et al.* 2014).

İletken malzemeler mikro ve nano ölçekte olduğundan, bu malzemelerin yüzey alanları çok büyüktür, bu da karıştırma işlemi sırasında kolayca topaklaşma oluşturmaktadır. Bu nedenle, bu malzemelerin eklenmesinde homojen dağıtma yöntemi zordur ve bunu yaparken bazı özel tekniklere ihtiyaç duyulmaktadır (Tyson *et al.* 2011b; Yazdanbakhsh *et al.* 2011; Sobolkina *et al.* 2012). Bu hususta araştırmacıların mikro ve nano iletken malzemelerin dağılım yöntemleri üzerindeki çalışmaları aşağıda incelenmiştir.

### **Mikro malzemelerin dispersiyon yöntemleri**

Mikro ölçekli malzemelerin dağılımı, çimento kompozitlerinin mekanik ve elektriksel özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür (Balaguru and Shah 1992). Bu özelliklerin iyileştirilmesi, çimento matrisindeki mikro malzemelerin yönlendirilmesine ve düzenlenmesine bağlıdır (Mobasher *et al.* 1990; Banthia *et al.* 2003). Çimento kompozitlerinde, karbon fiberler mikro ölçekli iletken malzemeler olarak daha ağırlıklı kullanılmıştır (Banthia *et al.* 2003; Woo *et al.* 2005; Azhari and Banthia 2012). Liflerin çimento matrisine yerleştirilmesi, kompozitlere yönelik çatlak oluşumunu da azaltabilmektedir (Shah 1992; Akkaya *et al.* 2000).

Bazı araştırmacılar, liflerin dağılımını araştırmak için görüntü analizini kullanmakta olup (Akkaya *et al.* 2000; Chermant *et al.* 2001) bu teknik hasarlı bir yöntemdir ve zaman kaybına yol açmaktadır (Woo *et al.* 2005). Bu sıkıntıları ortadan kaldırmak için elektriksel ölçüm tekniği kullanılmıştır. Karbon fiber içeren çimentolu kompozitlerin yapısal sağlık izlemesini gerçekleştirmek için elektriksel özellikleri ölçülerek kapsamlı çalışmalar yapılmıştır (Chung 2000; Chung 2001). Bu amaçla iki çalışmada DC yöntemini kullanmıştır. Diğer çalışmalar elektriksel özellikleri araştırmak ve uygulanan elektrik akımının frekansını değiştirerek polarizasyon etkilerini azaltmak için AC yöntemini kullanmışlardır (Gu *et al.* 1993; Ford *et al.* 1998; Torrents *et al.* 2000; Torrents *et al.* 2001; Mason *et al.* 2002).

Genel olarak, karbon fiberler kuru veya ıslak karışım yöntemleriyle dağıtılabilmektedir. Kuru karışım yönteminde, KF'ler ince agregalarla karıştırılır ve sonra diğer bağlayıcılar ilave edilir. Islak karışım yönteminde, KF'ler homojen dağılımı sağlayacak olan bazı özel sıvılarla beraber karışıma eklenmektedir. Chung (2012) çalışmasında hem kuru hem de ıslak karışım yöntemleri kullanmıştır. Bazı araştırmacılar, dağıtıcı görevi gören ince parçacık büyüklüğü ve betonun gözenekliliğini azaltma kabiliyeti nedeniyle KF'li kompozitlerde silis dumanını (SD) dağıtıcı olarak kullanmışlardır (Wu 2006; Chung 2010; Giner *et al.* 2011; Zuo *et al.* 2012).

Kimyasal işlemler de (Ozon ve silan yöntemleri) KF içeren çimento kompozitlerinin mekanik özelliklerini iyileştirmek için karışım yöntemlerinden birisi olarak kullanılmıştır (Xu and Chung 1999a; Xu and Chung 1999b). Jang, oksijen plazması ve nitrik asiti yüzey işleminde kullanmıştır, hem oksijen plazması hem de nitrik asit, karbon fiber/polibenzoksazin kompozitlerinin mekanik özelliklerini iyileştirmede etkili olduğunu göstermiştir. Nitrik asit yüksek yüzey sertliği nedeniyle oksijen plazmasından daha çok etki göstermiştir (Jang and Yang 2000). KF'lerin çimentoya homojen dağılımını sağlamak için suya eklenen bir dispersan ( $0.001\text{g/cm}^3$ ) olan karboksi metilselüloz da kullanılmıştır (Reza *et al.* 2003). KF içeren beton için silis dumanı ve yüksek oranda su azaltıcı katkı maddesi dağılımı kolaylaştıran malzemeler olarak önerilmiştir (Banthia and Nemkumar 1994).

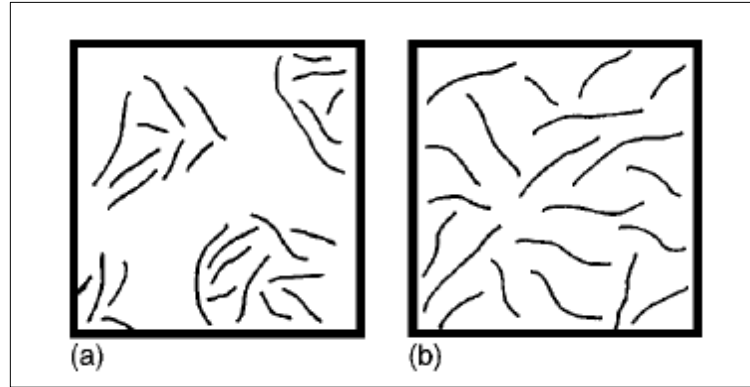
Wang ve arkadaşları (Wang *et al.* 2014b)  $60^\circ\text{C}$ 'de ısıtılmış suyun içerisinde kolayca çözülen dispersiyon ajanı (sodyum karboksimetil selüloz) kullanmışlardır. Daha sonra çözeltiye KF ilave ederek 60 saniye karıştırılmış ve 120 saniye boyunca ultrasonik titreşim gerçekleştirilmiş ve kabarcık önleyici için tributil fosfat eklenmiştir. Sonrasında çimento 120 s'den fazla bir süre boyunca mikserde çözelti ile karıştırılmıştır (Wang *et al.* 2014b).

Çelik liflerin dağıtımı açısından Wen ve Chung, hacimce %0.72 oranında kullandıkları çelik lifleri, harç mikserinde 5 dakika boyunca silis dumanı, çimento ve su ile karıştırmışlardır (Wen and Chung 2003). Benzer karışım yöntemi 2014 yılında Ming-qing Sun tarafından %0.5 hacim oranında kullandıkları pirinç kaplı çelik lifleri, çimento ağırlığının %8'i oranında silis dumanı ve çimento içeren çimento kompozitlerini hazırlamak için kullanmışlardır. Bu yöntemde, kuru malzemeler (çelik lifler, silis dumanı ve çimento) %70 su ile 1.5 dakika karıştırılmış, daha sonra %30 su ve %50 süperplastikleştirici karışıma ilave edilip 4.5 dakika karıştırılmıştır. Son olarak, kalan %50 süperakışkanlaştırıcı ilave edilip 2 dakikadan fazla karıştırılmıştır (Sun *et al.* 2014). Başka bir çalışmada da, %2 hacimli çelik liflerin eklenmesinde, bu karışım yöntemi kullanılmıştır (Yoo *et al.* 2018a).

Şekil 4'te görüldüğü gibi lifin dağılımı çok önemli olmakla beraber perkolasyon eşiğinin altında homojen dağılımlı kompozitler zayıf dağılımlılara göre daha yüksek elektrik iletkenliği sağlamaktadır (Cao and Chung 2001). Düşük lif içeriği daha ekonomiktir ve lif oranı arttığında, betonun işlenebilirliği ve basınç dayanımı azalacaktır. Ayrıca, lif içeriğinin artmasıyla istenmeyen hava içeriği de artacaktır (Chen and Chung 1996b; Chung 2005).

Silis dumanı, akrilik partikül dispersiyonu, metilselüloz çözeltisi kullanımı ve silan yöntemi lif dağılımını geliştirmiştir (Cao and Chung 2001). Ozon kullanım yöntemi gibi fiber yüzey işleminin kullanılması, çimento kompozitlerinde lif dağılımını da geliştirmiştir (Cao and Chung 2001).

Literatürden hareketle yapılan bu tez çalışması için lifli çimento kompozitlerinde düşük maliyet ve kolay üretim sağlanması için silis dumanı kullanılmasına karar verilmiştir.



**Şekil 4.** Perkolasyon eşiğinin altında lif dağılımı (a) zayıf dağılım (b) homojen dağılım (Cao and Chung 2001).

#### **Nano malzemelerin dispersiyon yöntemleri**

Nano partiküllerin çimento kompozitlerine eklenmesiyle kompozitlerin mekanik, kimyasal, termal ve elektriksel özellikleri geliştirdiği bulunmuştur (Cassar 2005; Oltulu 2011a; Parveen *et al.* 2013).  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  gibi birçok nano parçacık, mekanik özelliklerini geliştirmek için çimento kompozitlerine ilave edilmiştir (Han *et al.* 2004; Li *et al.* 2004; Qing *et al.* 2007; Lin *et al.* 2008; Oltulu and Şahin 2013). Normalde, nano malzemeler yüksek seviyedeki Van der Waals etkileşimleri nedeniyle topaklaşma (aglomerasyon) eğilimindedir (Kim *et al.* 2007; Cwirzen *et al.* 2008; Aravand *et al.* 2014). Bu nedenle, nanoparçacıkların homojen dağılımının sağlanması zordur ve en homojen dağılım için etkili bir dispersiyon yöntemi bulunması gerekmektedir (Bharj *et al.* 2014).

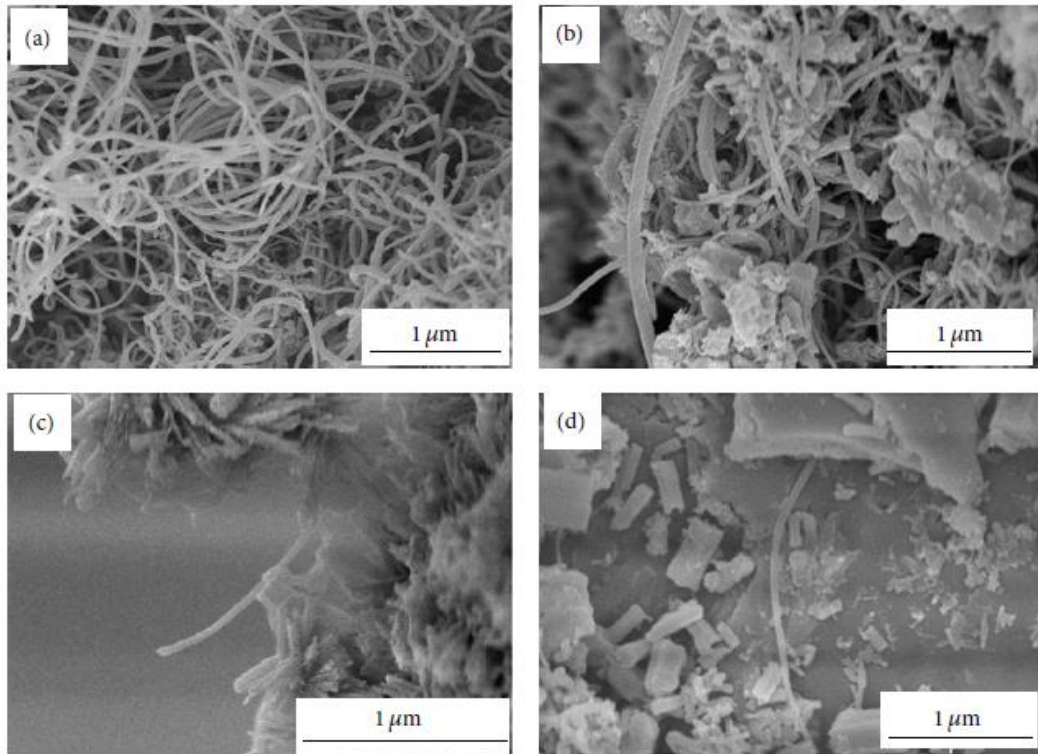
Nanomalzemelerin topaklanma problemini ortadan kaldırmak için yüzey işleme, ultrasonik ve santrifüj işlem gibi birçok yöntem kullanılmıştır. Son dönemde, fiziksel ve kimyasal dispersiyon teknikleri araştırılmaktadır (Ebbesen *et al.* 1996; Moore *et al.* 2003; Chirila *et al.* 2005; He *et al.* 2006; Wang *et al.* 2006a; Li *et al.* 2008b).

#### **Nano malzemelerin kimyasal dispersiyon teknikleri**

Kimyasal dağılım yöntemleri arasında, yüzey aktif maddelerin kullanımı, çimento katkı maddeleri, kovalent fonksiyonallizasyon ve bu yöntemlerin kombinasyonları bulunmaktadır (Parveen *et al.* 2013). Sürfaktan kullanılması, nanomalzemelerin homojen dağılımını sağlamak için birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır (Sabba and Thomas 2004; Li *et al.* 2005; Ramezani *et al.* 2016; Bahari *et al.* 2019; Miller 2019; Ramezani *et al.* 2019; Rao *et al.* 2020; Yang *et al.* 2020; Zhu *et al.* 2020). Sürfaktanlar, suyun yüzey gerilimini azaltarak

nanomalzemelerin dispersiyonunu geliştirebilmekte ve nanomalzemelerin yzeyleri dızleştirilebilmektedir. Srfaktanın konsantrasyonu, dispersiyonun etkinliğini doğrudan etkileyebilmektedir (Parveen *et al.* 2013). Düşük srfaktan/KNT oranı, KNT'nin topaklaşmasına yol açmaktadır (Şekil 5).

Srfaktan konsantrasyonunun yanı sıra srfaktanın tipi ve yapısı dispersiyonun etkinliğinde önemli bir rol oynayabilmektedir. Sodyum dodesil benzensülfonat (SDBS), sodyum deoksikolat (NaDC), Triton X-100 (TX10), Gum Arabic (GA) ve setil trimetil amonyum bromür (CTAB) gibi birçok srfaktan türü vardır (Parveen *et al.* 2013). Sodyum dodesil benzensülfonat (SDBS) yöntemi ile hazırlanan KNT dispersiyonunun (ağırlıkça % 2 yzey aktif madde konsantrasyonu ve 10 dakika boyunca manyetik karışım kullanılması) sağlandığı ve 70 dakika boyunca uygulanan sonikasyon yönteminden daha iyi bir KNT dispersiyonu oluşturduğu göstermiştir (Luo *et al.* 2009). Ayrıca, sodyum dodesil sülfatın (SDS) KNT'li çimento nanokompozitlerinin üretilmesi için etkili bir anyonik yzey aktif malzeme olduğu bildirilmiştir (Yu and Kwon 2009). Yukarıda belirtilen srfaktanların dispersiyon kabiliyeti sırasıyla (SDBS ve TX10) > SDBS > NaDC ve TX10 > NaDC > AG > TX10 > CTAB gibi şeklindedir (Parveen *et al.* 2013). Metilselüloz da başka bir polimer türü olarak çimento nanokompozitlerini hazırlamak için KNT dispersiyonunda kullanılmıştır (Azhari 2008; Azhari and Banthia 2010; Veedu 2010).



**Şekil 5.** ÇDKNT'nin farklı yzey aktif madde/ÇDKNT ağırlık oranı kullanılarak hazırlanan çimentolu kompozitler içindeki dağılımı: (a) 0, (b) 1.5, (c) 4.0 ve (d) 6.25 (Parveen *et al.* 2013).

Sülfaktan kullanmanın tek dezavantajı, nanomalzemelerin sülfaktan molekülleri tarafından bloke edilen çimento matrisi ile zayıf bağlantısıdır. Bu sorun, Yu ve Kwon (2009) çalışmasında belirtildiği gibi nanokompozitlerin elektriksel ve piezorezistif özelliklerini etkileyebilmektedir.

Çimento nanokompozitlerinin üretiminde nanomalzemelerin dağıtılması için birçok çimento katkı maddesi bulunmaktadır. Bu katkılardan bazıları; alkil benzen sülfonik asit (hava sürükleyici ajan), stiren-bütadien kauçuk kopolimer lateks, etoksillenmiş alkil fenol içeren alifatik propilen glikol eter, polikarboksilat, kalsiyum naftalin sülfonat, naftalin sülfonik asit türevleri ve lignosülfonat olarak sayılabilir (Parveen *et al.* 2013). Ancak, bu katkıların bazılarının kullanımı Portland çimentosunun priz süresinde gecikmeye sebep olmasından dolayı tavsiye edilmez (Collins *et al.* 2012). Polikarboksilat, KNT'lerin su ve sertleşmiş çimentodaki dağılımını iyileştirmektedir (Ramachandran 1996).

Silis dumanı da özellikle karbon nanofiberlerin dağılımı için iyi bir dağıtıcı olarak belirlenmiştir (Sanchez 2009; Sanchez and Ince 2009). Silis dumanını iyi dağıtıcı yapan nedenler; silikon dioksit içeriği, yüksek küresel partikül formu ve amorf yapısıdır (Parveen *et al.* 2013).

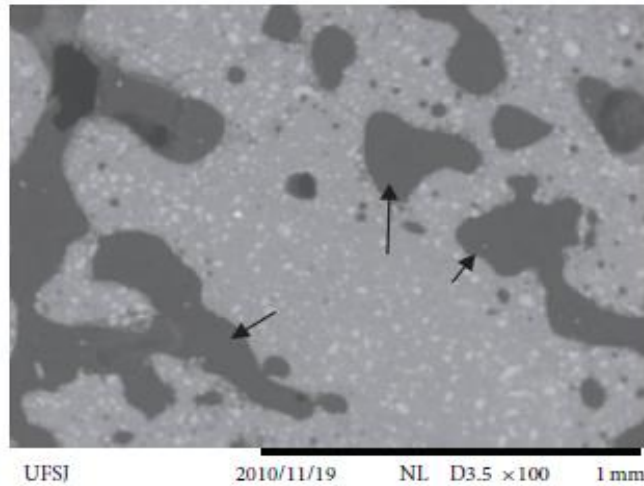
Kovalent fonksiyonelleştirme nanomalzemeler için, özellikle de KNT için yaygın bir dağılım yöntemidir (Rao and Govindaraj 2011). Kovalent fonksiyonelleştirme KNT'lerin tiyonil klorür ile asit işlemi ve ardından uzun zincirli bir amin ile reaksiyonu olarak tanımlanabilmektedir (Panchakarla and Govindaraj 2008). Normal olarak, kovalent işlevselleştirme, KNT'nin nitrik asit veya sülfürik ve nitrik asit karışımı gibi güçlü bir asitle işlenmesi suretiyle KNT'leri çimentolu matris içinde ayrı ayrı dağıtmak için kullanmışlardır (Li *et al.* 2007). Ancak, kovalent fonksiyonelleştirme yönteminin KNT'nin elektronik yapısal durumunu değiştirebilmesi bu yöntemin kullanımını sınırlandırmaktadır (Panchakarla and Govindaraj 2008).

Bazı araştırmacılarda nanomalzemelerin iyi dağılmasını sağlamak için bu yöntemleri birleştirmeyi tercih etmişlerdir. Örnek olarak, polimer kullanılması ve yüzey fonksiyonelleştirmesi işlemlerinin beraber yapılması, KNT dispersiyonunu sadece polimerler veya sadece fonksiyonel KNT kullanımından daha iyi dispersiyon sağlamıştır (Cwirzen *et al.* 2008). KNT'nin akrilik asit polimeri veya Arap sakızı (gum Arabic) ile fonksiyonelleştirilmemiş hali daha zayıf dispersiyon gösterirken aynı tip polimerlerle işlenen fonksiyonelleştirilmiş KNT, 2 aydan daha fazla sürede dispersiyon kararlılığı göstermiştir (Cwirzen *et al.* 2008). Benzer bir şekilde, yüzeyde aktif madde (sodyum dodesilbenzen

sülfonat) kullanımı, karboksille işlevselleştirilmiş KNT'lerin çimentolu matris içinde homojen dağılımını geliştirmiştir (Han *et al.* 2012d).

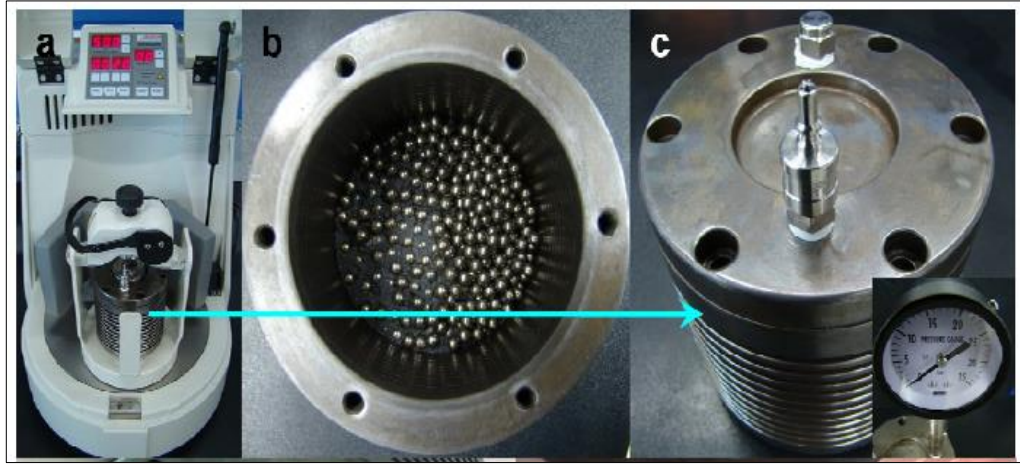
### ***Nanomalzemelerin fiziksel dispersiyon yöntemleri***

Çimento hamurunu üretmek için geleneksel karışım yöntemi olarak harç mikseri kullanılmaktadır, ama bu yöntem Şekil 6'da gösterildiği gibi nano malzemelerin çimento matrisine homojen dağılımını sağlayamaz, topaklaşmaya sebep olabilmektedir (Cota *et al.* 2012). Bu problemi önlemek için, nano malzemeler önce suda dağılmalı ve daha sonra bu çözelti, geleneksel karıştırma mikseri kullanılarak çimentolu malzemelerle karıştırılmalıdır. Nano malzemelerin çimentoya dağılması polimer matrise dağılımına göre daha zordur. Bunun nedeni, çimento taneciklerinin nanomalzemelerine göre büyük boyutunun olması ve bazı alanlarda nano malzemelerin homojen dağılımına engel olmasıdır (Yazdanbakhsh *et al.* 2010). Buna karşılık, tane boyutunun küçültülmesi nano malzemelerin dağılımını iyileştirebilmekte fakat su ihtiyacını, termal, kimyasal ve otojen büzülme olumsuz etkileyebilmektedir.



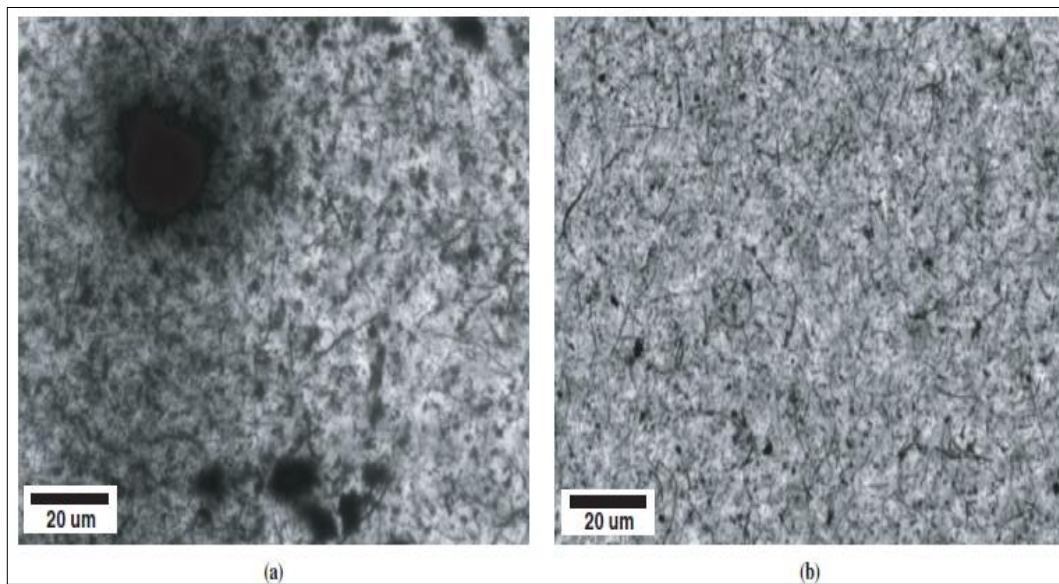
**Şekil 6.** Hidratasyon sonrasında KNT'li çimento hamurunun SEM görüntüsü (Yazdanbakhsh *et al.* 2010).

Yüksek enerjili bilyalı öğütme, ultrasonikasyon ve yüksek hızlı mekanik karışım gibi nanomalzemelerin dağılımında fiziksel yöntemler de vardır. Bunlardan temel olarak, bilyalı freze makinesi, 5 mm çapında paslanmaz çelik bilyalara sahip paslanmaz çelik kaptan oluşur. Bu kap, bilyalı değirmen makinesine sabitlenip bir basınçla dönerek kontrol edilebilmektedir (Jeon *et al.* 2012) (Şekil 7). Bilyalı öğütme, malzemeleri iyi dağıtabilir fakat nanomalzemeleri kırabilir ve böylece boy/çap oranında azalma göstermektedir (Siddiqui 2010; Hoheneder 2012; Han *et al.* 2015c).



**Şekil 7.** (a) Bilyalı öğütme aparatı; (b) malzemeler ve paslanmaz bilyaları (çap=5 mm) ile bilyalı değirmen haznesi; (c) gaz giriş ve çıkışı ile monte edilmiş bilyalı değirmen kabı (Jeon *et al.* 2012).

Ultrasonikasyon işlemi, sıvı ortamda (su veya solvent) yüksek enerjili milyonlarca dalga oluşturma işlemidir. Bu yöntemde, elektrik voltajı, sıvıdaki nanomalzemelerin dağılmasına yol açan yüksek mekanik titreşime dönüşmektedir (Gopalakrishnan *et al.* 2011). Yazdanbakhsh ve arkadaşları, bir titanium probu kullanarak kısa bir ultrasonik işlem (20 kHz frekansta 15 dakika ve % 50 genlik ayarı) ile ağırlıkça %1.14 oranında karbon nano lif (KNF)'lerin homojen karışım hazırlamışlardır (Yazdanbakhsh *et al.* 2010). Yüksek oranlı polikarboksilat esaslı su azaltıcı süperplastikleştiricinin su ile kullanılması malzemelerin dağılımını iyileştirmektedir. Şekil 8'de, malzemelerin sadece elle karıştırıldığında KNF'lerin topaklanmasını ve sonikasyon yöntemindeki dağılım farkını gösteren TEM görüntüleri bulunmaktadır. Koyu alanlar topaklanmış karbon nanofiberlerdir; bu alanlar sonikasyon yöntemiyle parçalanabilmektedir.



**Şekil 8.** Çözeltideki KNF'lerin TEM görüntüleri (a) elle karıştırma yöntemi sonrası (b) 15 dakika sonikasyon yöntemi sonrası (Yazdanbakhsh *et al.* 2010).

Birçok çalışma, su veya çözücü ve sürfaktanları kullanarak sonikasyon yönteminin etkinliğinin artabileceğini bildirmiştir. Cwirzen *et al.* (2008) çalışmasında poliakrilik asit polimerlerini KNT'leri sonikasyon yoluyla suda dağıtmak için bir sürfaktan maddesi olarak kullanmışlardır. Diğer araştırmacılar, KNT'li kompozit üretmek için polikarboksilat bazlı süperplastikleştiricileri sürfaktan malzemesi olarak kullanmışlardır (Trettin and Kowald 2005). Ancak, sonikasyon yönteminin dezavantajı, bazı durumlarda dağılmış nanomalzemelerin çimento malzemeleriyle karıştırılmadan hemen önce yeniden topaklaşma yapabilmesidir (Ashour 2011; Han *et al.* 2011b). Bu topaklaşma sorunu nanomalzemelerin tipine, su veya çözücü tipine, yüzey aktif madde kalitesi ve miktarına, sonikasyon enerjisine, sıcaklığa ve genlik ayarına bağlıdır.

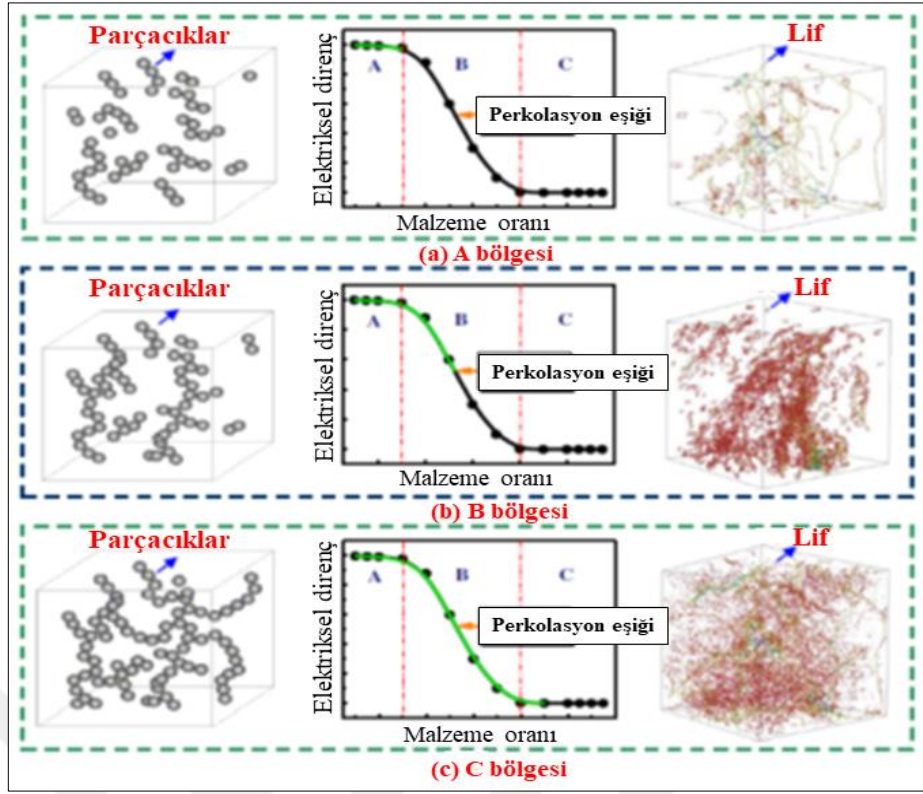
Sürfaktan ilavesinin yardımıyla, Van der Waals kuvvetleri azaltılıp nanomalzemeleri dağıtmak için yüksek hızlı mekanik karışım yöntemi kullanılmıştır. Önceki çalışmalarda, nanomalzemelerin kompozitlerde dağılmasını sağlamak için mekanik karışım kullanılmıştır (Xie *et al.* 2005; Nikje *et al.* 2009; Zhao 2010). Yüksek hızlı mikserler nanomalzemelerin dağılımında daha verimli olabilmektedir aynı zamanda daha da düşük maliyeti nedeniyle uygun bir yöntemdir (Paul *et al.* 2004).

Çoğu araştırmacının ultrasonik dispersiyon kullanmaya odaklandığı dönemde, mekanik karışım da çimento hamuru karıştırıcı kullanarak nanomalzemelerin iletken çimento kompozitlerine dağılımı sağlanmıştır (Li *et al.* 2011; Oltulu and Şahin 2011b; Salemi and Behfarnia 2013). Homojen karışımın sağlanması, düşük maliyeti olması ve daha kısa alması nedeniyle mutfak blenderi KNT'leri dağıtmak için bir mekanik karışım yöntemi olarak Al-Dahawi *et al.* (2017) tarafından kullanılmıştır.

### **Perkolasyon Eşiği**

Perkolasyon eşiği, yalıtım malzemesinin iletken bir malzemeye dönüştüğü en düşük iletken malzeme konsantrasyonudur. Yani numune boyunca bir elektrik ağının oluştuğu en düşük iletken malzeme konsantrasyonu anlamına gelmektedir. Perkolasyon eşiği iletken malzemelerin varlığı ile ilgilidir. Parçacıkların şekli, boyutu, agregaların varlığı, boy/çap oranı ve dolgu maddesinin dağılımı gibi birçok faktöre bağlıdır (Wypych 2016).

Çimento kompozitlerinin perkolasyon eşiğini açıklayan iletkenlik eğrisi Han *et al.* (2015a) tarafından sunulmuştur. Bu eğri, kompozitlerin yalıtım fazından önce yarı iletken, sonra iletken faza dönüştürülmesi için iletkenlik özelliklerinin artırılması kavramına dayanmaktadır (Şekil 9). Perkolasyon eşiği eğrisi üç bölge içerir; A bölgesi (yalıtım bölgesi) B bölgesi (perkolasyon) ve C bölgesi (iletken bölge) olarak adlandırılan bölgelerdir.

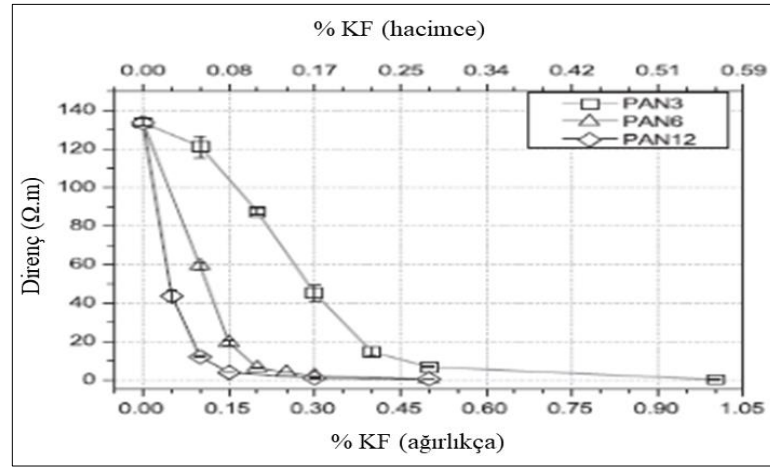


**Şekil 9.** İletken malzeme konsantrasyonuna bağlı perkolasyon eşiği eğrisi ve bölgeleri (Han *et al.* 2015a).

A bölgesinde, iletken malzemelerin konsantrasyonu düşük olduğundan ve aralarında geniş mesafe olması nedeniyle iletken ağın oluşturulması zordur. Bu bölgedeki elektronların iletken malzemesi arasında hareket etmesi zordur, bu da matrisin direncini yükseltmektedir. B bölgesinde, iletken malzemelerinin konsantrasyonunun artırılmasıyla matristeki iletken malzemeleri arasındaki mesafe azaltılacak ve iletken ağ kolaylıkla oluşacaktır. Bu bölgedeki elektronların geçişi, A bölgesinin geçişinden daha kolay olup elektriksel iletkenlik artmaktadır. B bölgesinde, temas eden elektronlarla iletim, tünel iletim ve iyonik iletim gibi birçok faktör iletkenliği artıracaktır. C bölgesinde, iletken malzemeleri perkolasyon eşiğinden daha yüksek olacaktır. İletken malzeme daha da arttıkça, malzemelerin birbirleriyle hali hazırda var olan temasından dolayı iletkenlik ya aynı kalacaktır ya da az bir artış gösterecektir (Xie *et al.* 1996; Wang *et al.* 2002; Chen *et al.* 2005; Wang and Zhao 2005; Huang *et al.* 2008; Al-Saleh and Sundararaj 2009; Han and Yu 2010).

Farklı malzemeler için perkolasyon eşiği değerleri incelendiğinde karbon fiberler (ortalama 10  $\mu\text{m}$  çap ve 5 mm uzunluk) için perkolasyon eşiği hacimce % 0.5 ila 1.0 arasındadır (Chen and Chung 1995). Baeza *et al.* (2013a) çalışmalarında karbon fiberlerin (7.2  $\mu\text{m}$  çap ve üç farklı uzunluk, 3, 6 ve 12.5 mm) perkolasyon eşiğini 3 mm'lik KF (PAN3) için kütle olarak %0.1 ila %0.5 arasında (hacimsel olarak %0.057 ve %0.282 arasında) bulmuşlardır (Şekil 10).

PAN6 ve PAN12 için sırasıyla perkolasyon bölgesi son değeri %0.2 ve % 0.10 kütle oranlarında (PAN6 için %0.115 ve PAN12 için %0.058 hacimsel oranlarda) olduğu görülmektedir.

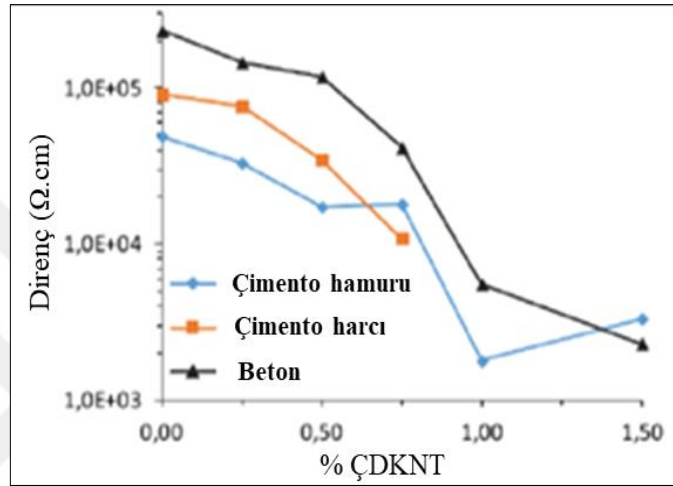


**Şekil 10.** Farklı KF boy/çap oranları için KF'li kompozitlerin elektriksel direnç ölçümleri (Baeza *et al.* 2013a).

Nam *et al.* (2016) çalışmasında CDKNT'lerin (çap  $12.29 \pm 2.18$  nm ve saflık %96.2) perkolasyon eşliğini ağırlıkça %0.25 (hacimce %0.26)'de olduğunu belirtmişlerdir. Çimento kompozitlerinde kütlece %0 ila 2.5 arasında değişen farklı grafen konsantrasyonu (Çap 2-10µm, Spesifik yüzey alanı 250-400 m<sup>2</sup>/g) kullanılmıştır (Bai *et al.* 2020). Bu çalışmadaki perkolasyon eşliği, son değeri %1 oranında görülmüştür. Üç farklı fiber tipinin etkileri: saf karbon fiberler (VCF'ler), geri dönüştürülmüş karbon fiberler (RCF'ler) ve pirinç kaplı çelik fiberlerin (BSF'ler) araştırıldığı çalışmada; VCF ve RCF'nin perkolasyon bölgesi hacimce %0.1 ila 0.2 arasında iken, BSF'nin hacimce %0.4 ila 0.8 arasında yer almaktadır (Belli *et al.* 2020).

Önceki çalışmalar doğrultusunda Demircilioğlu, farklı hacim oranlarına (%0, 0.2, 0.35, 0.5 ve %0.8) sahip çelik lifleri (13 mm uzunluk ve 0.25 mm çap) çimento kompozitlerinde kullanmıştır (Demircilioğlu *et al.* 2020). Perkolasyon bölgesi, çelik fiber %0.5 oranında tespit edilip bu oran iyi deformasyon algılama hassasiyeti ve yüksek elektriksel direnç değişimi göstermiştir (Demircilioğlu *et al.* 2020). Çapı 20 µm olan ve uzunluğu 10 mm olan süper ince paslanmaz tel (SSW), hacimce %1.5'lik perkolasyon eşliği ile iyi elektriksel özellikler göstermiştir (Dong *et al.* 2020a). Aynı perkolasyon eşliği (hacimce % 1.5), dört farklı tipte çelik lifi olan çimento kompozitlerinde de kendiliğinden algılama özelliklerinin etkili olduğu gösterilmiştir (Nguyen *et al.* 2020). Çelik cüruf agregaları (0.39 mm çapında) içeren çimento kompozitleri, ağırlıkça %0.5 (hacimce %2) çelik lif kullanımında direnç değişimine yüksek hassasiyet göstermiştir (Viet *et al.* 2020).

İnce ve iri agregalar da kompozitlerin perkolasyon bölgesini etkileyebilmektedir. Çimento hamuru için perkolasyon bölgesi harç ve betondakinden daha azdır. Çünkü agrega eklenmesi ile gereken perkolasyon bölgesine ulaşmak için daha fazla iletken malzemelerine ihtiyaç duyulmaktadır (Şekil 11). Bunun nedeni, agregaların elektrik direnç testi işlemi sırasında elektrik akımı yolunun geçişini kesmesi veya engellemesidir (D'Alessandro *et al.* 2016b). Kısaca malzeme tipi, malzeme özellikleri ve matris tipi (hamur, harç veya beton) gibi birçok faktörün çimento kompozitlerinin perkolasyon eşiğini etkileyebileceği sonucuna varılabilmektedir.

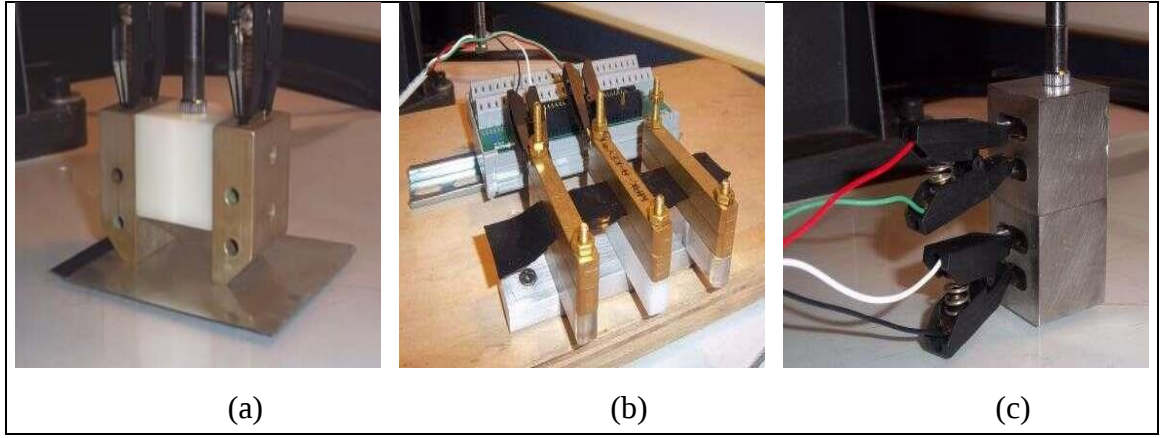


**Şekil 11.** Farklı ÇDKNT oranlarına sahip çimento hamur, harç ve betonun elektriksel direnci (D'Alessandro *et al.* 2016b).

Literatür incelemesinde, akıllı çimento kompozitlerinin imalatında nano nikel tozu veya (-OH) ÇDKNT'ler üzerinde hiçbir çalışma bulunmamaktadır. Ayrıca, çimento matrisindeki karbon fiberleri ekleyerek nano nikelin veya ÇDKNT'lerin etkisini birlikte inceleyen hiçbir çalışma yoktur. Bu nedenle, çimento esaslı kompozitlerin piezo-direncini araştırmak için nanomalzemeler ((-OH) ÇDKNT'ler ve nano nikel) ve mikro malzeme (karbon fiber) kullanılması gerekmektedir.

### Çimentolu Kompozitlerde Elektriksel Direnç Ölçüm Teknikleri

Elektrik öz direnci, uygulanan voltajın ortaya çıkan elektrik akımına oranıdır (Polder 2001). Beton numunenin ölçülen direnci, boyutuna ve kalınlığına, sıcaklığa, neme ve elektrifikasyon süresine bağlıdır (Rowe 2012). En yaygın üç direnç ölçümü, yüzey direnci, hacim veya yığın direnci ve temas direncidir (Şekil 12). Yüzey direnci, elektrotlarla temas eden malzemenin yüzeyi boyunca direnç ölçümlerini temsil etmektedir. Yüzey direnci ölçüm birimleri elektrotun boyutuna bakılmaksızın alan başına ohm ( $\Omega/\text{alan}^2$ ) olarak verilmektedir.



**Şekil 12.** Direnç ölçümü (a) yüzey öz direnç (b) hacimsel direnci (c) temas direnç (Rowe 2012).

Hacimsel direnç, bir numunenin enine kesiti (Genişlik x Kalınlık) ile elektrotlar arasındaki malzemenin uzunluğuna bölünen direnç ( $R$ ) ölçümüdür. Hacimsel direnç birimleri tipik olarak Ohm-santimetre ( $\Omega\text{-cm}$ ) cinsinden verilmektedir. Temas direnci, bir malzeme veya kompozit yoluyla direncin ölçüsüdür. Aslında malzemenin kendisinin bir ölçümü değil, elektrik bağlantısının kalitesinin bir ölçüsüdür. Devre içindeki direnç nispeten az olduğu için temas direnç birimleri miliohm ( $m\Omega$ ) cinsinden verilmiştir.

Ancak, yüzey direnç testi kolaydır, korozyon oranını ve hızlı klorür geçirimsiliği [RCP] ölçümlerini test ve tahmin etmek için kullanılmaktadır. Priz süresi ve beton dayanıklılığı arasındaki korelasyonda, betondaki çatlakların yayılması, piezorezistif özellikler, betonun kendiliğinden iyileşme ve kendiliğinden algılama özelliği testleri gibi hacim ve temas öz direnç ölçümleri kullanılmaktadır.

Son zamanlarda, çok sayıda araştırmacı elektriksel direnç ölçüm tekniklerine daha fazla dikkat etmektedir (Claisse 2014; Nadelman and Kurtis 2014; Sengul 2014). Bu tekniklerin standartlarda ve yönergelerde yer alması çok yavaş gerçekleşmektedir (Layssi *et al.* 2015). Sadece yüzey direnç test yöntemi, Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği AASHTO standartlarına eklenmiştir (AASHTO-95 2014). Hacimsel elektrik direnç testi ASTM C1760'ta verilmiştir (ASTM 2012). Bu nedenle, en son teknoloji bilgisi ile mevcut kılavuz ilkeler arasında bir eksiklik vardır (Layssi *et al.* 2015). Araştırmanın geliştirilmesi ve gereksinimlerin artırılması üzerine, elektrik direncini ölçmek için çeşitli modeller ve yöntemler önerilmiştir. Burada açıklanacak bu yöntemler arasında alternatif akım AC ve doğru akım DC yöntemleri, iki veya dört problu yöntemler bulunmaktadır.

#### **Alternatif Akım (AC) ve Doğru Akım (DC) tekniklerinin kullanımı**

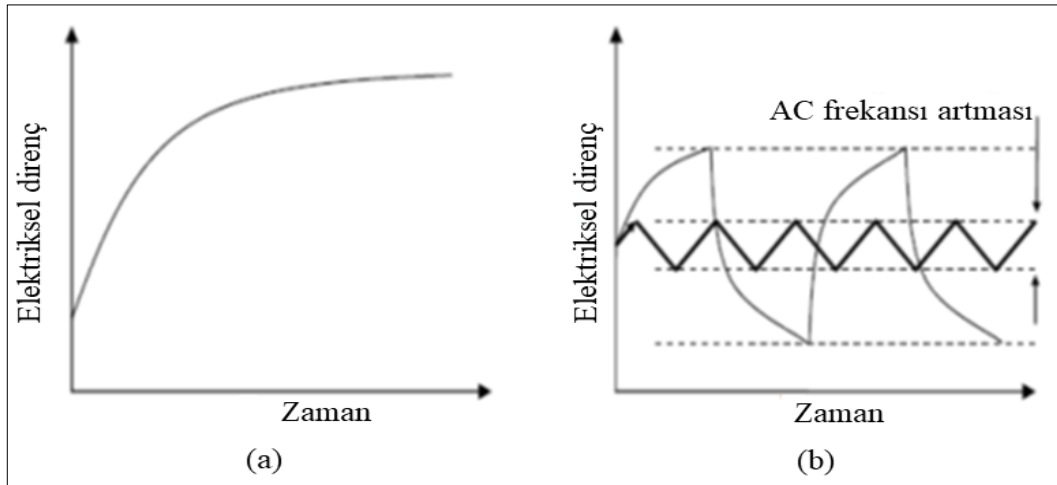
Kompozitin elektriksel öz direnci, bir numunedeki elektrotlar arasındaki elektrik direncinin ölçülmesine bağlıdır. Elektriksel öz direnç, numunenin geometrisi ve elektrotlar

arasındaki mesafe ile ilgili olarak belirlenebilir. Çimento kompozitlerinin elektrik direncini ölçmek için iki teknik vardır; Alternatif Akım (AC) ve Doğru Akım (DC) test teknikleridir. Normalde, elektrik direncinin ölçüm tekniği basittir, ancak betonun karmaşık mikro yapısı doğru ölçüm yönteminin belirlenmesini zorlaştırmaktadır (Layssi *et al.* 2015).

Betonun mikro yapısı, gözeneklilik, nem içeriği gibi birçok faktör betonun elektrik direncini etkileyebilmektedir. Çok sayıda araştırmacı Doğru Akım (DC) tekniğini kullanırken (Han *et al.* 2011c; Yu and Kwon 2012; Konsta-Gdoutos and Aza 2014; Han *et al.* 2015c; Sun *et al.* 2017), diğer araştırmacılar Alternatif Akım (AC) yöntemini kullanmışlardır (Han and Yu 2010; Lin *et al.* 2011; Azhari and Banthia 2012; Ding *et al.* 2015; Han *et al.* 2017a; Yoo *et al.* 2018a). Başka araştırmacılar, betonun elektrik direncini araştırmak için AC ve DC tekniklerini beraber kullanmışlardır (Hou and Lynch 2005; Baeza *et al.* 2013b; Vilaplana *et al.* 2013).

Beton, kapasitif özellikleri nedeniyle elektrik yükünü tutabilmektedir. Alternatif Akım (AC) doğru akıma (DC) tercih edilmektedir. Bunun nedeni, DC ölçümlerindeki katı faz arayüzüne gözenek çözeltisindeki numunenin yanı sıra elektrot-beton arayüzü üzerindeki yüksek polarizasyon etkilerinin olmasıdır (Banthia *et al.* 1992; Chen *et al.* 2004; Yoo *et al.* 2018a). Ayrıca, betonun istenmeyen kapasitans özelliklerini ölçümden kaldırmak için DC ölçümü uygun değildir (Layssi *et al.* 2015). Bu nedenle, AC tekniği betondaki elektrik direncini ölçmek için kullanılmalıdır. AC yöntemi, uygulanan akımın frekansını yükselterek veya AC voltajını azaltarak kapasitans özelliklerini azaltabilir veya ortadan kaldırabilmektedir (Fu *et al.* 1997b; Hou and Lynch 2005; Zheng *et al.* 2005; Li *et al.* 2007; Han *et al.* 2012d).

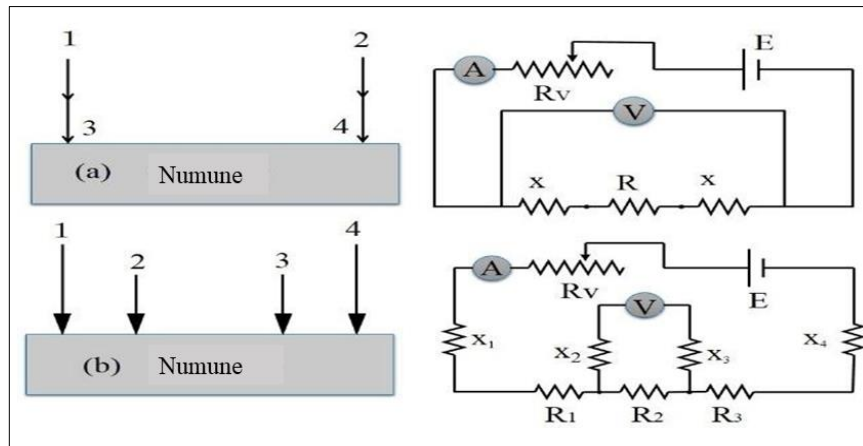
Polarizasyon etkisine dayanarak, DC ölçümünde, ölçülen direncin zamanla üstel artışı nedeniyle elektrik direncinin ölçülmesi zordur (Hou and Lynch 2005) (Şekil 13a). Ancak, pozitif ve negatif piklerin eşit büyüklüklerine sahip alternatif akım (AC) sinyallerinin uygulanması ve akım frekansının artırılması, polarizasyon etkisinin neredeyse doğrusal ve geri dönüşümlü olmasını sağlamaktadır (Şekil 13b). AC yöntemi direkt direnç ölçüm değeri vermez; reaktans bir AC devresinde üretilecektir. Bu nedenle, “empedans” kavramı dikkate alınmalıdır. Çalışmamızda yukarıda belirtilen nedenlere atıfla AC ve DC yöntemleri arasındaki elektrik direncindeki farkı araştırılacaktır.



**Şekil 13.** Çimentolu malzemelerin (a) DC, (b) AC ölçümlerinde polarizasyon etkisi (Hou and Lynch 2005).

### İki ve dört probu yöntemler

Birçok çalışmada, beton kompozitinin, bir elektrik devresinde, direncini/empedansını ölçmeyi amaçlayan bir dizi konfigürasyon önerilmiştir (Layssi *et al.* 2015). Normalde beton, metal elektrotlar ile devreye bağlanabilmektedir. Betonun elektrik direncini ölçmek için iki prob ve dört prob (wenner prob) dahil olmak üzere farklı ölçüm yöntemleri önerilmiştir. Şekil 14'te, iki ve dört probu yöntemlerin kurulumun ve devre şemaları gösterilmiştir (Conrad and Boris 2015). Beton elektrik direnci, beton numunesine yapışık veya gömülmüş iki elektrot arasına akım uygulanarak ölçülebilir, daha sonra elektrotlar arasındaki potansiyel düşüşü ölçülmektedir (McCarter *et al.* 2009).



**Şekil 14.** Elektriksel direnç ölçüm teknikleri ve devre şemaları: (a) iki noktalı tek eksenli yöntem; ve (b) dört noktalı (Wenner probu) yöntemi (Conrad and Boris 2015).

İki prob yöntemi, direncin ölçülmesi için en yaygın ve en basit yöntem olarak kabul edilmektedir. Bu yöntemin tek dezavantajı, temas direncinin ölçülen direnci etkileyerek yanlış bir direnç değerine yol açmasıdır. Elektrotlar ve beton numuneleri arasındaki teması

iyileştirmek için iletken jel kullanılarak istenmeyen temas direnci azaltılabilmektedir (Lataste *et al.* 2001). Bazı araştırmacılar numunenin direncine kıyasla çok küçük olduğu için temas direncini ihmal etmiştir (Hou *et al.* 2017; Armoosh 2019).

Bilindiği gibi, elektriksel öz direnç daha önce belirtilen denklemden ( $\rho = R \cdot K$ ) hesaplanabilir, burada  $\rho$  elektriksel öz dirençtir,  $R$  dirençtir ve  $K$  geometrik faktördür. Denklem 11, iki prob yönteminde kullanılan geometrik faktörü ( $K$ ) açıklar;

$$K = \frac{A}{L} \quad (11)$$

Burada  $A$ , elektrotun iletken bölgesidir ve  $L$ , iki elektrot arasındaki mesafedir (Singh 2013).

Bilinen dört problu yöntem, Wenner prob tekniği ilk olarak Wenner (1916) tarafından 1910'larda Ulusal Standartlar Bürosunda tanıtılıp daha sonra somut bir uygulama için zamanla değiştirilmiştir. Dört prob yöntemi, betonun direncini, özellikle küçük direnç değerlerini ölçmenin en doğru yoludur. Elektrotlardan dış elektrotlar betona bir AC elektrik akımı uygularken, oluşturulan elektrik potansiyeli  $V$ , iki iç elektrot arasında ölçülecektir (Şekil 14b). Dış ve iç elektrotlar sırasıyla kaynak ve algılama devreleri olarak da adlandırılmaktadır (Rowe 2012). Dört problu yöntemde kullanılan geometrik faktör ( $K$ ) aşağıdaki denklemde gibi hesaplanmaktadır;

$$k = \gamma a \quad (12)$$

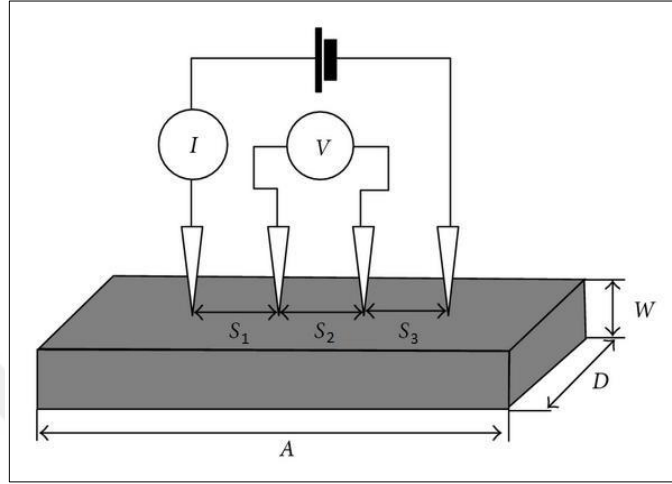
$a$ , elektrotlar arasındaki mesafedir (eşit aralıklarla); ve  $\gamma$  boyutsuz geometri düzeltme faktörüdür. Yarı sonsuz beton elemanlar için (örneğin, beton plakalar)  $\gamma$ ;  $2\pi$ 'ye eşittir (Layssi *et al.* 2015). Valdes, ( $k$ ) elektrotlar arasındaki mesafenin eşit olup olmadığını ve sırasıyla  $S_1$ ,  $S_2$  ve  $S_3$  olarak verildiğini belirlemek için bir formül geliştirmiştir (Valdes 1954), ona göre geometrik faktör şu şekilde hesaplanır;

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_3} - \frac{1}{S_1+S_2} - \frac{1}{S_2+S_3}\right)} \quad (13)$$

$S_1$ ,  $S_2$  ve  $S_3$ , Şekil 15'te sunulan elektrotlar (cm) arasındaki mesafelerdir.

Dört-problu ölçüm yöntemi iki-problu yöntemine tercih edilir, çünkü dört problu yöntem, elektrotlar ve beton numunesi arasındaki temas direncini ve polarizasyon etkisini azaltabilmekte yada kaldırabilmektedir. Bu durumlar, kendiliğinden algılayan beton üretimi ile ilgili birçok deneyle doğrulanmıştır (Chiarello and Zinno 2005; Han *et al.* 2007; Quan *et al.*

2008; Han *et al.* 2009b; Jia 2009). Ancak, iki-problu yönteminin kullanımı dört-problu yöntemine kıyasla daha kolay ve daha uygun olduğu için, hala birçok araştırmacı tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır (Xie *et al.* 1996; Jang and Yang 2000; Hou and Lynch 2005; Armoosh 2019; Cholker and Tantray 2019; Dong *et al.* 2019a; Liu *et al.* 2019; Rovnaník *et al.* 2019; Xi and Chung 2020).



**Şekil 15.** Dört noktalı prob yöntemi ile elektriksel direnç ölçümü (Valdes 1954).

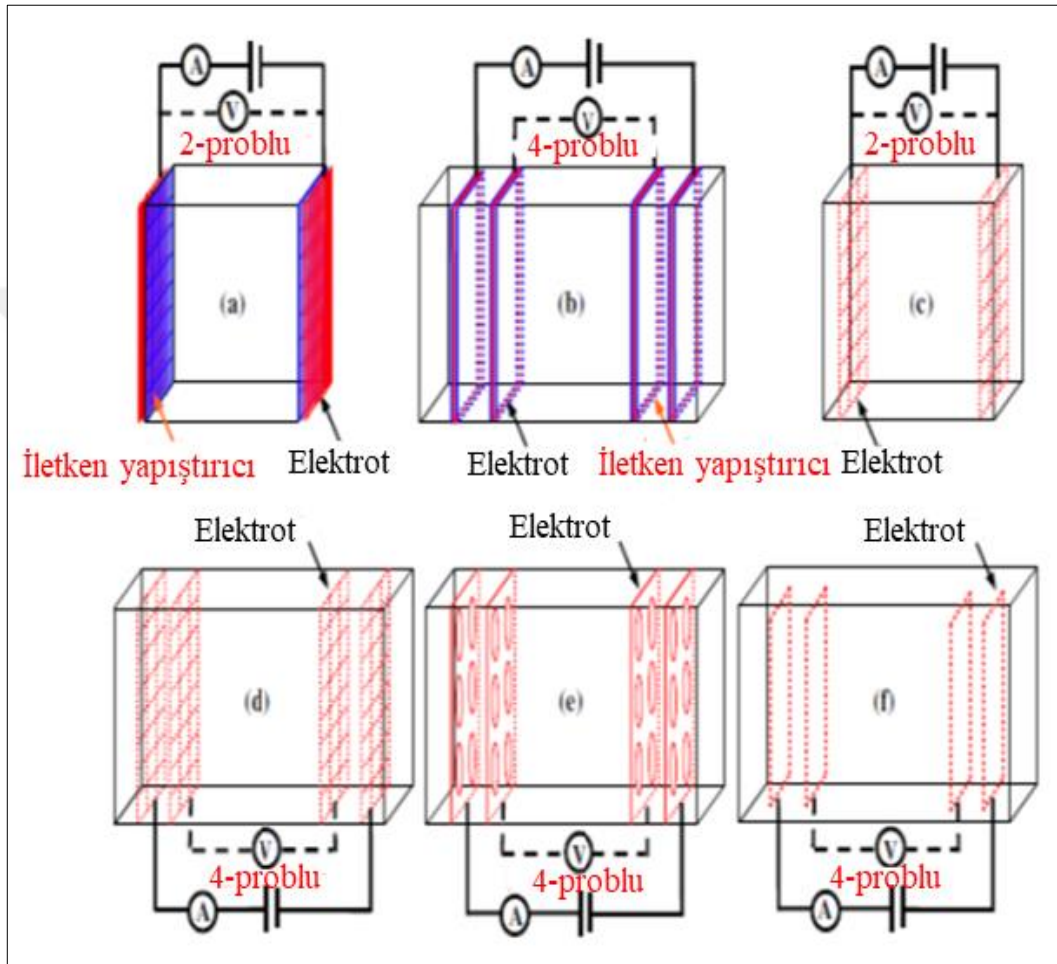
### **Elektrot üretim yöntemi**

Elektrik direncinin ölçülmesinde kullanılan elektrotlar çok önemlidir. Elektrotların üretimleri, kendiliğinden algılayan sinyal ölçümünün doğruluğunu anlamak ve değerlendirmek için önemli bir anahtardır (Han *et al.* 2015a). Kendiliğinden algılayan kompozitlerde elektrotların üretimi üç parametre içerir; elektrot malzemesinin tipi, yerleştirme yöntemleri ve elektrot düzeni (Han *et al.* 2007).

Elektrotların malzemesi, elektrot direncini ve temas direncini mümkün olduğunca ortadan kaldırmak için yüksek derecede iletken olmalıdır. Elektrot malzemesi, kendiliğinden algılayan numunelerin mekanik ve elektriksel özelliklerini etkilememelidir. Ek olarak, elektrot malzemesi, uzun süreli izleme sırasında numunenin dayanıklılığını sağlamak için korozyona dayanmalıdır (Han *et al.* 2007). Elektrotlarda yüksek iletkenliği ve ekonomik maliyeti nedeniyle en çok kullanılan malzemeler; bakır, paslanmaz çelik ve kurşundur (Han *et al.* 2015b).

Elektrotlar, Şekil 16'da gösterildiği gibi folyo, ağ veya halka olabilmektedir (Han *et al.* 2015a). Elektrotların yerleştirme yöntemi; numunelere ve üretim yöntemine bağlıdır. Yerleştirme yöntemi, elektrik akımını ve elektrik öz direnç ölçümlerini etkileyebilmektedir (Han *et al.* 2007). Şekil 16, elektrot yerleştirme stilleri ve düzeni göstermektedir. Buradaki elektrotlar dış yüzeylere yapıştırılarak (Şekil 16a, yada gömülerek (Şekil 16b, c, d, e, f

yerleştirmektedir. Elektrotlar şekil 16’da gsterildiği gibi plaka, delikli plaka, halka yada hasır şeklinde yapılmaktadır. Bazı araştırmacılar, kompozitlerin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilememek için elektrotları kompozitin dış yüzeylere yapıştırmışlardır (Wen and Chung 2006a). Diğer araştırmacılar, elektrot ekleme etkisini en aza indirmek ve elektrotun bütünlüğünü sağlamak için elektrotları yerleştirme yöntemine karşı gömme yöntemini daha çok tercih etmişler (Han *et al.* 2007; Han *et al.* 2009c).



**şekil 16.** Kendiliğinden algılayan betonda elektrot yerleştirme stili ve düzeni (Han *et al.* 2015a).

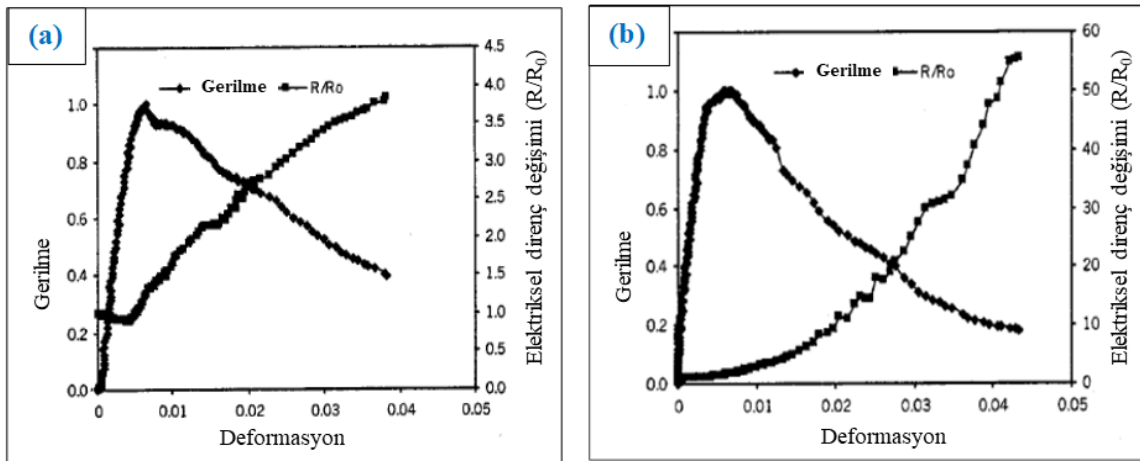
Gömme yöntemi elektrotları harici çevresel etkilerden koruyabilmektedir (Dong *et al.* 2019a) ve sensörlerin imalatında da daha yararlıdır. Gömülü elektrotlar, gömüldüğü elemanın yapısını engellemeden sensörler içindeki elektrik direncinin gerçek değerlerini verecektir (Li and Ou 2009; Ou and Han 2009; Dong *et al.* 2020b; Rao *et al.* 2020; Roopa *et al.* 2020).

Prob aralığı betonun elektrik direncini etkileyebilmektedir. Normalde, agregalar yüksek elektrik dirence sahiptir, aynı iletken malzeme konsantrasyonu için betonun elektrik özdirenci, çimento harcı veya hamurundan daha yüksektir (D'Alessandro *et al.* 2016b). Bu nedenle, araştırmacılar, agreganın varlığından kaynaklanan elektrik akımı geçiş kesilmesini etkisini azaltmak için elektrotlar arasında (genellikle 20 mm ila 70 mm arasında) yeterli geniş alan

bırakılmasını önermişlerdir (Millard and Wenner 1991; Morris *et al.* 1996; Sengul and Gjörv 2009). Araştırmacılar, bu elektrot aralığını maksimum agrega boyutundan yaklaşık 1.5 katı olarak kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir (Millard and Wenner 1991). Bununla birlikte, betonun sonlu geometrisi nedeniyle elektrik akımını elektrotların büyük aralığından geçirme zorluğu nedeniyle elektrot aralığı gerekenden daha büyük olmamalıdır (Polder 2001; Sengul and Gjörv 2008).

Elektrotlar ve beton yüzey arasındaki temas alanı, elektriksel direnç ölçümlerini etkileyebilmektedir. Elektrotlar ve beton yüzey arasındaki temasın numunelerin elektrik direncinde bir artışa yol açtığı gözlenmiştir (Millard and Wenner 1991). Bazı araştırmacılar temas direncinin etkisini en aza indirmek için iletken jel kullanmışlardır (Ivorra *et al.* 2008; Henkensiefken *et al.* 2009). Diğer alternatif çözüm yöntemleri arasında yumuşak bir iletken ortam, doymuş süngerler, deri bez ve kağıt havlu kullanımı sayılabilmektedir (Shane 2001; Newlands *et al.* 2008).

Yükleme altında numunenin elektrotları paralel ya da dikey yönünde yerleştirilmektedir. Paralel yönü kullanmanın yanı sıra, dikey yönde, hacimce % 0.4 karbon fiberlere sahip çimento kompoziti için elektriksel duyarlılığın değişimini araştırmak için de kullanılmıştır (Reza *et al.* 2003). Dikey doğrultuda ölçülen elektriksel direnç değişimi, çatlakların hızla gelişmesi nedeniyle paralel doğrultuda ölçülenden daha yüksek bulunmuştur (Şekil 17).



**Şekil 17.** Direnci ölçülen numune için tipik gerilme-deformasyon ve direnç davranışı (a) paralel (b) yüklemeye yönüne dik (Reza *et al.* 2003).

Önceki çalışmalardan çıkan sonuçlara göre, gömülü stildeki bakır elektrotlar akıllı çimento kompozitlerinde kullanım için idealdir. Gömme tarzındaki bakır plakanın bakır ağdan daha iyi elektrik direnci gösterdiği Azhari (2008) tarafından bulunmuştur. Gömme yöntemleri, çimento matrisi ile uyumluluk, yüksek dayanıklılık, düşük polarizasyon ve küçük temas direnci

gibi birçok avantaja sahiptir (Han *et al.* 2007). Literatürden hareketle bakır plakaların gömülü halde kullanımı en çok tercih edilen yöntemdir.

### **Çimento Kompozitlerin Yük Altında Kendiliğinden Algılama Davranışı**

Direnç ölçüm yöntemleri, elektrot üretim yöntemleri, yerleştirme ve düzeni ile ilgili bilgilerin ışığı altında betonun kendiliğinden algılama davranışını açıklamak gerekmektedir. Kendiliğinden algılayan kompozitlerde elektrik öz direncindeki değişiklik ( $\Delta\rho/\Delta\rho_0$ ) veya direnç ( $\Delta R/\Delta R_0$ ) ile dış kuvvet  $F$  (veya gerilme  $\sigma$  ve deformasyon  $\epsilon$ ) arasındaki ilişki araştırılmaktadır (Han *et al.* 2015a). Kendiliğinden algılama özelliği için araştırılacak önemli husus piezoresistivite kavramıdır (Tian *et al.* 2019). Piezoresistivite, aşağıdaki denklemle hesaplanan FCR (direnç değişim oranı) ile karakterize edilebilir:

$$FCR = \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R_x - R_0}{R_0} \quad (14)$$

$R_0$  ilk direnç,  $R_x$  yükleme sırasındaki dirençtir.

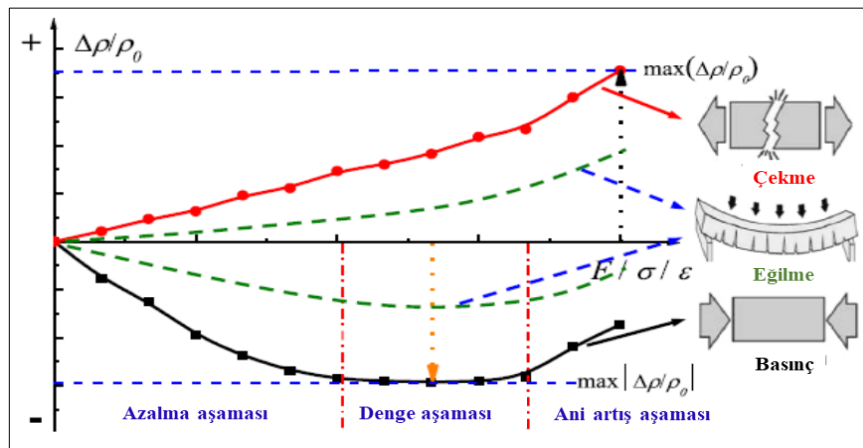
Kendiliğinden algılama hassasiyeti iletken çimento kompozitlerinin kendiliğinden algılama özelliğini değerlendirmek için önemli bir faktör olarak kabul edilmektedir. Bu kendiliğinden algılama hassasiyeti aşağıdaki gibi birçok parametre ile temsil edilebilir. Bu parametreler; elektrik direncindeki maksimum değişim oranı (yani maks ( $|\Delta\rho/\Delta\rho_0|$ )), kuvvet duyarlılığı katsayısı (yani ( $\Delta\rho/\Delta\rho_0$ )/ $F$ ), gerilme duyarlılığı katsayısı (yani ( $\Delta\rho/\Delta\rho_0$ )/ $\sigma$ ) veya deformasyon duyarlılık katsayısıdır (yani ( $\rho/\Delta\rho_0$ )/ $\epsilon$ , ayrıca strain faktörü olarak da adlandırılır) (Han *et al.* 2015a). İletken kompozitlerin algılama özelliğini araştırmak için literatürde kullanılan üç tip yükleme (basınç, çekme ve eğilme) vardır. Yükleme tipine bağlı olarak, çimento matrisindeki iletken ağ ve dolayısıyla elektriksel direnç, deformasyon ile değişecektir (Tian *et al.* 2019).

#### **➤ Monotonik yükleme altında kendiliğinden algılama davranışı**

Yükleme esnasında elektrik direnci değişimi; iletken malzemelerin elektrik direncini değiştirmesi (Tomblar *et al.* 2000; Jiang *et al.* 2008; Pushparaj *et al.* 2011), fonksiyonel iletken malzemeleri arasındaki temas direncini değiştirmesi (Hou and Lynch 2005), iletken malzemeler ve çimento matrisi arasındaki bağı değiştirmesi (Fu and Chung 1995; Fu and Chung 1998; Chung 2002) ve iletken malzemeler arasındaki tünel mesafesini değiştirmesi (Mpler and Reichenbach 1999; Wang and Zhao 2005; Han *et al.* 2011a) gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörler, elektriksel direnç değişiminin verimliliğini ayrı ayrı veya birlikte etkilemektedirler.

Aslında, daha önce belirtilen faktörlerden etkilenen en önemli karakter elektrik iletimidir. Elektrik iletimi temel olarak elektronik ve iyonik iletimi içermektedir. Elektronik iletimi iletken malzemelerden gelirken, iyonlar çimento beton matrisinden gelmektedir (Han *et al.* 2015a; Tian *et al.* 2019). İletken malzemelerin doğrudan temasıyla iletken bir ağ oluşur, buna temaslı iletim denir (Wang and Zhao 2005; Han *et al.* 2012d). Tünel iletimi, iletken malzemelerin bağlantısı kesildiğinde kesilen iletken malzemeler arasında elektronların zıplayarak iletken ağ oluşturmasıdır (Mplier and Reichenbach 1999; Peng *et al.* 2008; Chen *et al.* 2009). Gözenek çözeltisindeki su içeriği, elektrik akımını iyonik türler (esas olarak  $\text{Ca}^{2+}$  ve  $\text{OH}^-$ ) boyunca taşıyarak iyonik iletimi oluşturabilmektedir (Wang and Zhao 2005; Wen and Chung 2006a).

Genel olarak iletken malzemesi konsantrasyonu, çimento kompozitlerinin kendiliğinden algılama özelliğinde önemli bir rol oynamaktadır. İletken malzemenin yüksek konsantrasyonu, kendiliğinden algılayan deneyler için arzu edilen düşük elektriksel direnç sağlamaktadır. Yüksek algılama hassasiyetine sahip düşük iletken içeren malzemenin oluşturulması zordur; bu nedenle, ideal konsantrasyon perkolasyon bölgesine göre belirlenmelidir. Perkolasyon eşiğinin üzerindeki iletken malzemesi konsantrasyonu, çekme altındaki hassasiyeti artırabilirken, basınç altındaki hassasiyet, perkolasyon eşiğinin altındaki değerlerde de artabilmektedir (Wang *et al.* 2002; Li *et al.* 2006b; Saafi 2009; Han and Yu 2010). Yükleme başladığında, elektrik direnci değişimi de başlayacaktır. Uygulanan yük ve akım yönü paralel olduğunda, elektriksel direnç basınç yükü ile kademeli olarak azalacaktır. Çekme yükü altındayken, iletken parçacıkların ve çimento matrisinin ayrılması nedeniyle elektriksel direnç artacaktır (Şekil 18, (Han *et al.* 2015b)). Çimento kompozitlerinde oluşan en yaygın gerilim türü basınç gerilmeleridir. Monotonik ve periyodik basınç yüklemeleri altında kendiliğinden algılama davranışının belirlenmesi önemlidir.



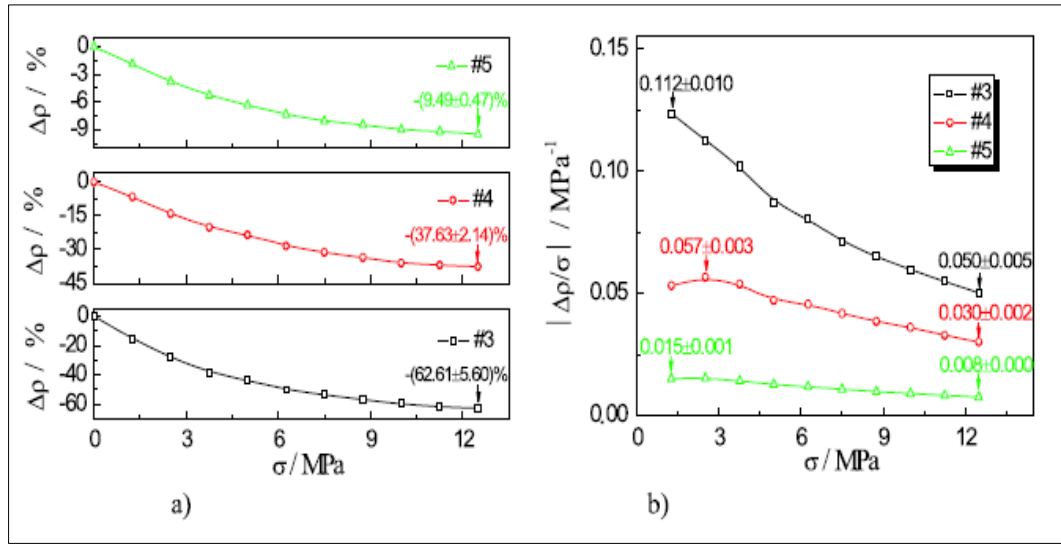
**Şekil 18.** Yük altında kendiliğinden algılayan betonun tipik algılama davranışı (Han *et al.* 2015b).

Uygulanan basıncın artmasıyla çimento numunesinin elektriksel direnç veya öz direnci azalmaktadır. Bu azalma uygulanan monotonik tek eksenli basınca karşılık gelen üç aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar; azalma, denge ve ani artış olmak üzere değişimdir (Han *et al.* 2015b). Şekil 18’de aşamalar gösterilmektedir. Uygulanan basınç altında, iletken malzemeler arasındaki mesafe azalmakta ve matris içindeki iletken ağ gelişmektedir (azaltma aşaması). Taze çatlaklar büyüdükçe, iletken ağ değişecek ve denge aşamasına gelecektir. Çatlaklar arttıkça iletken ağ parçalanacak ve dirençte artışa neden olacaktır (Han *et al.* 2015b). Çok sayıda araştırmacı, bu durumu monotonik tek eksenli basınç altında farklı iletken malzemeleri içeren kendiliğinden algılanan kompozitler üzerinde doğrulamışlardır (Wu *et al.* 2005; Li *et al.* 2006b; Han *et al.* 2009c; Jia 2009; Han *et al.* 2011a; Azhari and Banthia 2012).

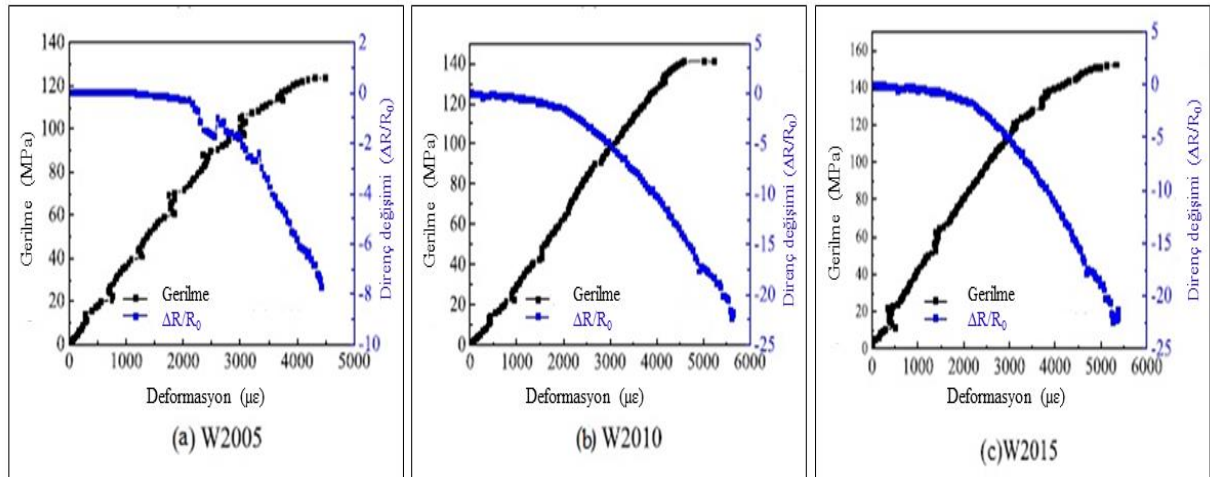
Chen ve Chung, karbon fiber kompozitlerin yükleme altında piezorezistif davranışını araştıran ilk kişilerdir (Chen and Chung 1993a). Yaptıkları çalışmada, metilselüloz veya lateks ile dağılmış karbon fiber kompozitlerin, hacim öz direnç değişimi ve basınç gerilimi arasında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermişlerdir. Fakat karbon fiber içeren harç, hem metilselüloz hem de silis dumanı ile birlikte zayıf bir doğrusal ilişki göstermiştir (Chen and Chung 1993a). Han ve ark., 2010 nikel çimento kompozitlerinin elektrik iletkenliğini ve piezorezistivitesini araştırmak için farklı partikül boyutlarına (3-7  $\mu\text{m}$ , 2,6-3,3  $\mu\text{m}$  ve 2,2-2,8  $\mu\text{m}$ ) sahip üç farklı nikel tozu kullanmışlardır (Han and Yu 2010). Deneysel sonuçlarda, yüksek nikel içeriğinin ve düşük parçacık boyutunun elektrik iletkenliğini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Şekil 19’da gösterildiği gibi nikel tozlarının içeriği ve partikül boyutu arttırılarak piezorezistif duyarlılıklar artmaktadır. İçerik seviyesi ve parçacık boyutu, iletken ağın biçimine bağlı olan piezorezistif hassasiyeti etkilemektedir.

Piezorezistif duyarlılık çalışmaları için hacimce % 5,10, 15, 17, 18, 19, 20 ve 23’te nikel tozu kullanarak Lan *et al.* (2018) tarafından başka bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada çimento matrisindeki nikel tozlarını hizalamak için bir dizi Helmholtz bobini kullanılmıştır. Kompozitin piezorezistivitesi, nikel tozlarının özellikle hacimce %17,18 ve 19’da hizalanmasıyla geliştirilebilmektedir. Literatürde mikro nikel kullanımı ile ilgili çalışmalar olmasına rağmen nano boyutta nikelin göstereceği davranışı belirlemek gerekmektedir.

Kısa kesilmiş süper ince paslanmaz teller (SSSW) hacimce %0.5, 1 ve 1.5 oranlarında kullanılarak üretilen reaktif pudra betonunda (RPC) ile kendiliğinden algılama özelliği değişimi incelenmiştir (Dong *et al.* 2016). 20  $\mu\text{m}$  çapında ve farklı hacim fraksiyonlarındaki SSSW, periyodik, sürekli yükleme ve eğilme altında mükemmel etkinlik göstermiştir. Şekil 20’de yükleme arttıkça doğrusal olarak elektriksel direnç azalması gösterilmektedir.



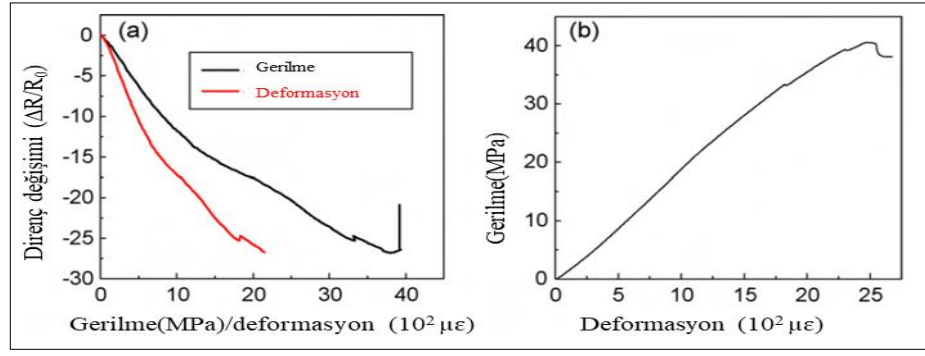
**Şekil 19.** Farklı partikül boyutlarına sahip nikel çimento esaslı kompozitlerin piezorezistif duyarlılığı (# 3: boyut 3-7  $\mu\text{m}$ , # 4: boyut 2.6-3.3  $\mu\text{m}$ , # 5: boyut 2.2-2.8  $\mu\text{m}$ ). (a) piezorezistivite (b) piezorezistif hassasiyet (Han and Yu 2010).



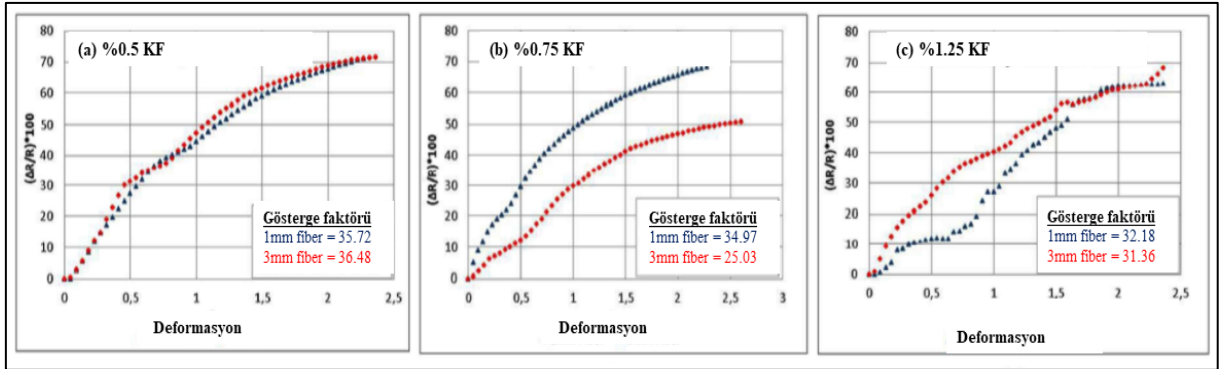
**Şekil 20.** SSSW ile güçlendirilmiş RPC'nin monotonik basınç deformasyonu, gerilme ve elektrik direncindeki değişimi (a) %0.5 hacim. (b) %1 hacim. (c) %1.5 hacim (Dong *et al.* 2016).

Kendiliğinden algılayan çimento kompozitlerini üretmek için karbon fiberler ve karbon siyahı hibrit şeklinde iletken malzemesi olarak kullanılmıştır (Han and Ou 2007). Çimento kompozitleri, Şekil 21'de, basınç gerilmesi ve deformasyon altında mükemmel hassasiyet göstermiştir.

Yüklemeye altındaki kompozitlerin piezorezistif duyarlılığını araştırmak için beton yerine polimer matris kullanımından da bahsedilebilir. Polyester matrise (ağırlıkça %0.5, 0.75 ve 1.25) kısa karbon fiberlerin (1 mm ve 3 mm uzunluklar) eklenmesi yüklemeye altında algılama hassasiyetini arttırmıştır (Rosado Mérida *et al.* 2013). Ancak, lif konsantrasyonunun %0.5 oranı ideal bir konsantrasyon oranı olarak görülmüştür (Şekil 22).



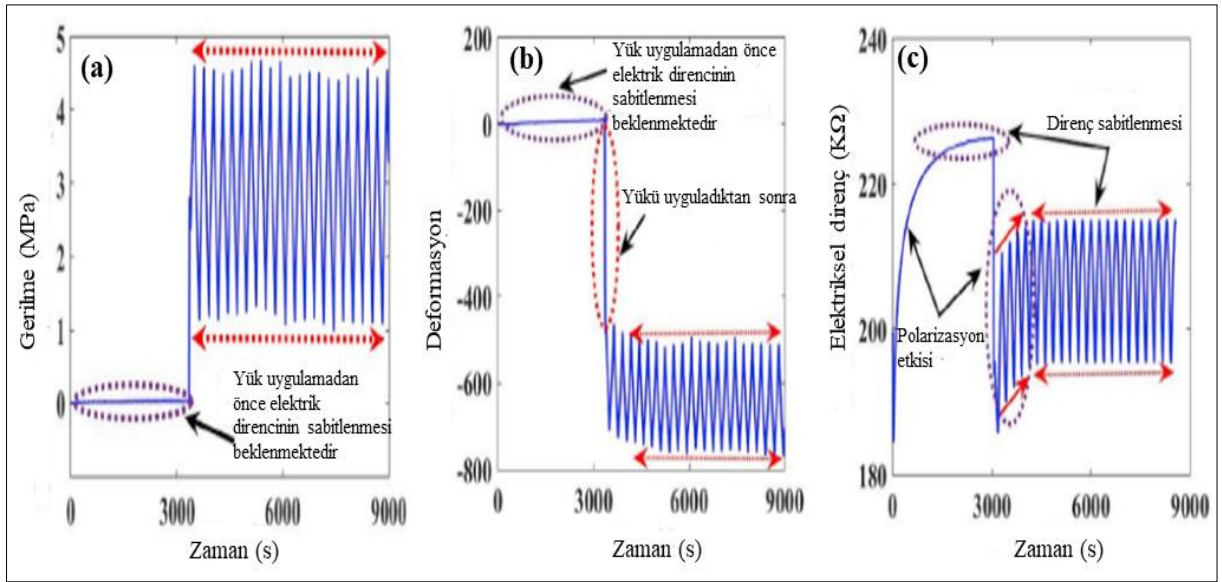
**Şekil 21.** Karbon fiber/karbon siyahı kompoziti için elektrik direncinin fraksiyonel değişimi. (a) Kesirli elektriksel öz direnç (b) basınç gerilme-deformasyon davranışı (Han and Ou 2007).



**Şekil 22.** Basınç altında farklı oranlarda karbon fiberli kompozitlerin direncinin değişimi: (a)%0.5, (b)%0.75 ve (c) %1.25 (Rosado Mérida *et al.* 2013).

#### ➤ Periyodik yükleme altında kendiliğinden algılama davranışı

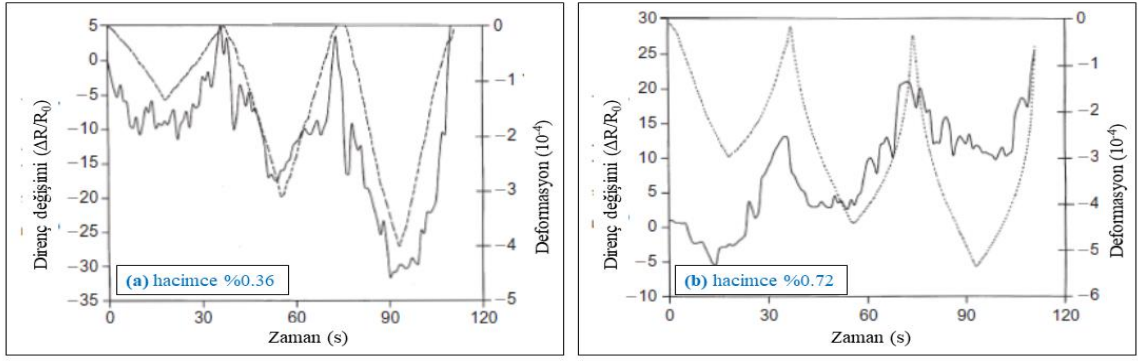
Periyodik yüklemeye tabi tutulan numunelerin elektriksel direnci veya öz direnci, yükleme esnasında azalıp boşaltılması üzerine artmaktadır. Ancak, farklı basınç gerilmesi altında temel elektriksel öz direnç ile elektriksel öz direnç değişimi arasında bir fark vardır. Temel elektriksel öz direnci, periyodik yükleme altında uygulanan basınç gerilmesi sıfıra döndüğünde öz direnci temsil etmektedir. Başlangıç öz direnci, dış basınç gerilmelerine maruz kalmadığı durumda numunelerin öz direncidir. Başlangıç ve temel öz direnç arasında fark olması mantıklıdır, çünkü doğal çatlaklar, delikler ve gözenek yapısı gibi bazı iç sorunlar, numuneye uygulanan periyodik yükleme altında yavaş yavaş azalacaktır (Han *et al.* 2015a). Polarizasyon süresi, malzeme konsantrasyonu ve elektrik direnci ölçüm yöntemi gibi diğer nedenler, çimento kompozitlerinin temel ile başlangıç öz direnci arasındaki farkı etkileyebilmektedir. Rao, örneklerin piezorezistif davranışını araştırırken polarizasyon etkisinin stabilizasyonunun dikkate alınması gerektiğini belirtmiştir (Rao *et al.* 2020). Polarizasyon etkisi, Şekil 23c'de gösterildiği gibi ilk 3-5 döngüde gözlenmiş, bu döngülerden sonra stabilizasyon başlamıştır. Bu nedenle, numunelerin sıfırlama noktasındaki algılama hassasiyetini hesaplamak için elektriksel yanıtın sabitlendiği durum dikkate alınmalıdır.



**Şekil 23.** Periyodik yüklemde piezorezistif algılama özelliği (a) gerilme-zaman (b) deformasyon-zaman (c) direnç-zaman değişimi (Rao *et al.* 2020).

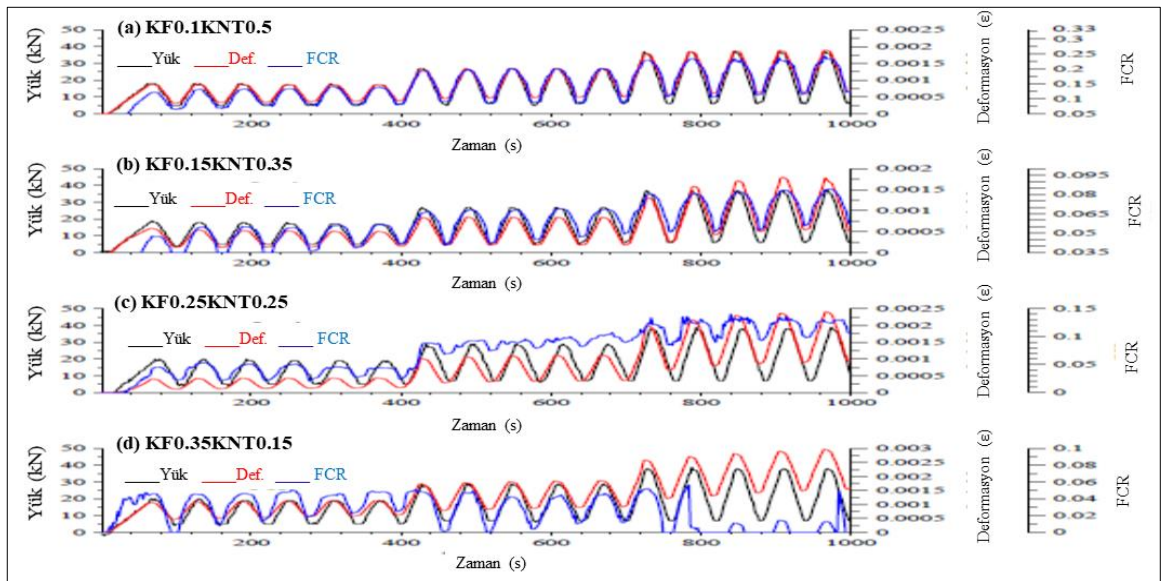
Çimento kompozitlerinin piezorezistif davranışını gözlemlemek için periyodik yükleme altında birçok çalışma yapılmıştır (Han and Ou 2007; Li *et al.* 2007; Han *et al.* 2008; Azhari and Banthia 2012; Rosado Mérida *et al.* 2013; Vilaplana *et al.* 2013; Gupta *et al.* 2017; Rovnaník *et al.* 2019; Dong *et al.* 2020b; Yang *et al.* 2020). Basınç gerilme değerinin, numunelerin nihai mukavemetinin yaklaşık %30'unun altına düşmesiyle, temel ve başlangıç elektriksel dirençteki değişiklik tersine çevrilebilmektedir. Bunun nedeni, kendiliğinden algılayan kompozitlerin geri dönüşümlü elastik deformasyonudur. Nihai mukavemet aralığında (%30-75), elektrik direncindeki değişiklik tersine çevrilebilirken, temel direncindeki değişiklik geri döndürülemez. Bu, matriste oluşan küçük hasarlar ve numune içindeki iletken ağın yeniden yapılandırılması nedeniyle olabilmektedir. Ancak, uygulanan basınç gerilimi nihai gücün %75'inin üzerinde olduğunda, hem baseline hem de elektriksel direnç değişimleri geri döndürülemez. Bu aşamada, matris hasar gördüğünde iletken ağ bozulmuştur (Han *et al.* 2015b).

2003 yılında Wen ve Chung, karbon ve çelik lif kompozitleri arasındaki piezorezistivite mekanizmasındaki farkı incelemişlerdir (Wen and Chung 2003). Çalışmada piezorezistif algılamanın, basınç gerilmesi altında geri döndürülebildiği görülmüştür. Ancak, hacimsel olarak %0.36 çelik fiberlere sahip çimento kompozitleri, hacimce %0.72'den daha iyi piezorezistif gerilme hassasiyeti göstermiştir (Şekil 24). Karbon fiberlere (15  $\mu\text{m}$  çap) sahip olan kompozitler, benzer fiber oranlarında (hacimce %0.36 ve 0.72) paslanmaz çelik fiberli (8  $\mu\text{m}$  çap) kompozitten daha iyi hassasiyet göstermiştir.



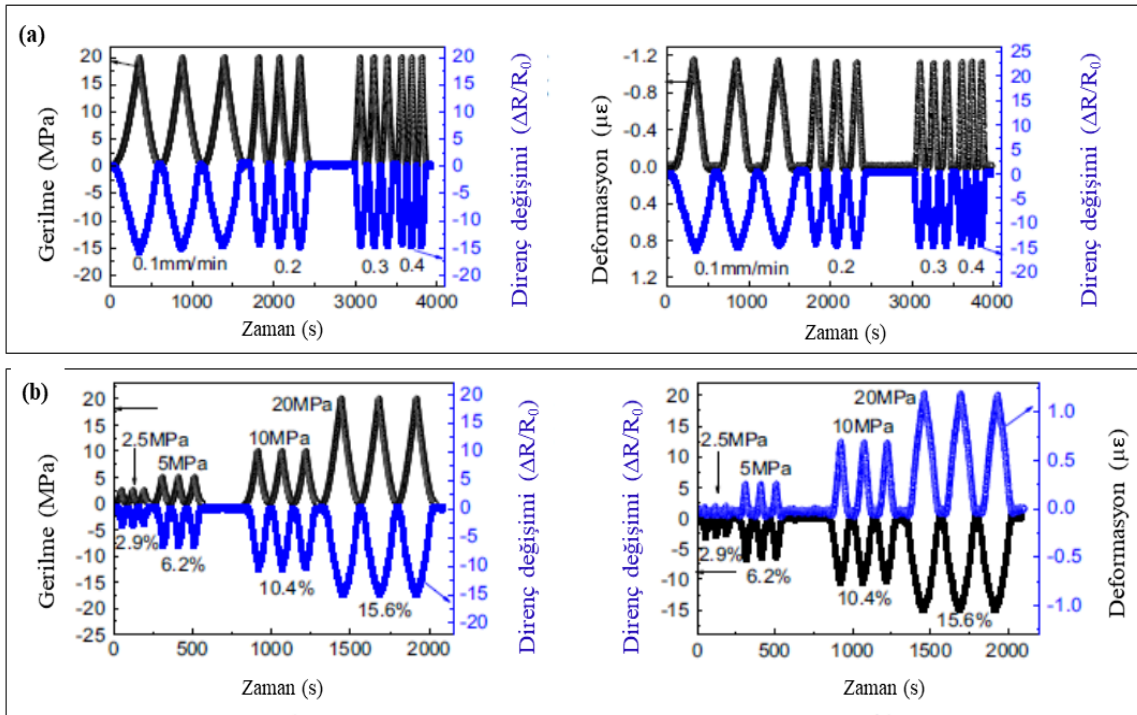
**Şekil 24.** Çelik lifli kompozitlerin basınç altında FCR'yı (düz) eğri ve deformasyon davranışı (kesikli eğri) (Wen and Chung 2003).

Periyodik yükleme altında çimento kompozitlerinde 30 mm uzunluğunda çelik lif kullanılarak iyi hassasiyet elde edilmiştir (Ferdiansyah *et al.* 2018). Periyodik basınç gerilmelerine karşı piezorezistif özellikler ağırlıkça %0.5 KNT kullanılarak geliştirilmiştir. Piezorezistivite incelenirken polarizasyon etkisi de Han *et al.* (2012a) tarafından incelenip tartışılmıştır. Çalışmada iletken KNT ve mikro nikel tozu malzemeler kullanılmış, karbon fiberler ve ÇDKNT'ler, periyodik yükleme altında kendiliğinden algılama özelliklerini araştırmak için ayrı ayrı ve birlikte kullanılmışlardır (Lee *et al.* 2017). Karbon fiberler, periyodik yükleme sırasında algılamada kararsız bir değişim gösterirken, KNT'li kompozitlerde kararlı bir algılama özelliği göstermiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, Şekil 25'te gösterildiği gibi %0.1 oranlı KF'ler ve %0.5 oranlı ÇDKNT'lerin ikisini içeren kompozitler incelendiğinde, daha ekonomik bir kendini algılama performansı elde etmek için ekonomik açıdan %1.0 oranlı ÇDKNT içeren kompozitlere bir alternatif olabileceğini göstermiştir.



**Şekil 25.** KF ve KNT içeren çimentolu kompozitlerin periyodik yükleme altında davranışları (Lee *et al.* 2017).

Çimentolu kompozitlerin elektriksel tepkilerini periyodik yükleme altında araştırmak için nano grafit (NGP'ler) iletken bir malzeme olarak kullanılmıştır (Sun *et al.* 2017). Çalışmada hacim olarak %0-10 arasında değişen farklı NGP oranları kullanılmıştır. Hacimce %4-%10 NGP ile üretilmiş kompozitler duyarlı piezorezistif etki gösterirken, %5 hacimli NGP kompozitleri tüm kompozitler arasında en hassas etkiyi göstermiştir. Bu nedenle, farklı periyodik yükleme koşulları altında test edilen hacimce %5 NGP'ye sahip çimentolu kompozitlerin hassasiyeti ve doğruluğu yüksektir. Şekil 26, bu kompozitlerin farklı koşullar altında ve periyodik yükleme hızında piezorezistif tepkisini göstermektedir. NGP kompozitlerinin duyarlılığı, D'Alessandro *et al.* (2016a) çalışmasında araştırılan KNT'den (%0.225/MPa) yaklaşık %0.78/MPa'dan daha yüksek algılama hassasiyeti elde etmektedir.



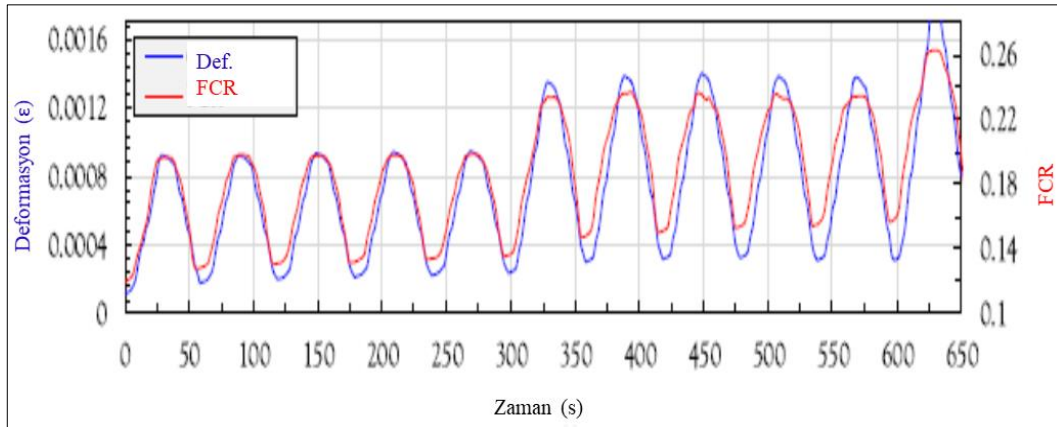
**Şekil 26.** Nano grafit kompozitlerinin periyodik yük altında zamana bağlı elektriksel direncindeki oransal değişim (a) farklı periyodik yükleme oranı (b) periyodik yükün değişken genliği (Sun *et al.* 2017).

Çimento hamuru içindeki piezorezistif algılama kapasitelerini araştırmak için ağırlıklıça %1 oranında farklı karbon muhtevasına sahip iki tip ÇDKNT (>% 90 ve >% 99) kullanılarak kompozitler üretilmiştir (Yoo *et al.* 2018b). (>% 99 Karbon içerikli) ÇDKNT'ler, (>% 90) karbon içeriğindekiinden daha yüksek hassasiyet göstermiştir. Yine, çimento bazlı kompozitlerin basınca duyarlı davranışlarını incelemek için nano nikel teli kullanılmıştır (Xu *et al.* 2018). Hacim fraksiyonları %0.25, 0.5, 0.75, 1.0 ve 1.25 olan Ni nanotelleri ilave edilmiştir. En yüksek %1.25 hacim fraksiyonu, tekrarlanan periyodik yükleme altında en hassas yanıtı göstermiştir (Xu *et al.* 2018).

Ayrıca, elektrik öz direnç değişimine göre mikro karbon fiberlerin gerilme algılamasını araştırmak için çimento kütlesiyle farklı oranlarda (%0, 0,5,1,1,5 ve 2) ikame edilen karbon fiberli kompozitler üretilerek 150 mm boyutlu küp beton numuneleri üretilmiştir (Cholker and Tantray 2019). %1.5 mikro karbon fiberlerin kullanıldığı numunelerde elektriksel direnç ve periyodik yükleme altındaki gerilme arasında daha iyi bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Numuneler, monotonik yükler altında da mükemmel sonuçlar vermiştir.

Başka bir çalışmada farklı karbon esaslı nanomalzemeler kullanarak kendiliğinden algılama kapasitesi yüksek çimento kompozitleri üretilmiştir (Yoo *et al.* 2019). Beş farklı karbon esaslı nanomalzeme; karbon nanotüp (KNT), karbon fiber (KF), grafit nanofiber (GNF), grafen (G) ve grafen oksit (GO) %0.5 ve %1'lik iki farklı hacim oranında kullanılmıştır. KNT'ler seçilen hacimsel oranlardan ( $V_f$ ) bağımsız olarak en iyi kendini algılama kapasitesini göstermiştir (Şekil 27). Hacimce %1 karbon malzeme kullanılan diğer grupların hassasiyet açısından kıyaslanması ise  $KNT > GO \approx GNF > G$  şeklindedir. KF'li kompozitler, periyodik yükleme sırasında basınç davranışlarını ölçen bir sensör için uygun olmayan kararsız bir davranış sergilemiştir. Aynı bulgu, grafit nanofiberlerden ve grafen oksitten daha iyi algılama direnci gösteren ağırlıkça %1 ÇDKNT kullanılarak da elde edilmiştir (Yoo *et al.* 2019).

Üretilen bu malzemeler farklı formlarda olabilmektedir. YSİ için kullanılan bu formlar; hacimsel form, kaplama formu, sandviç formu, gömülü formu yada yapışık formudur.



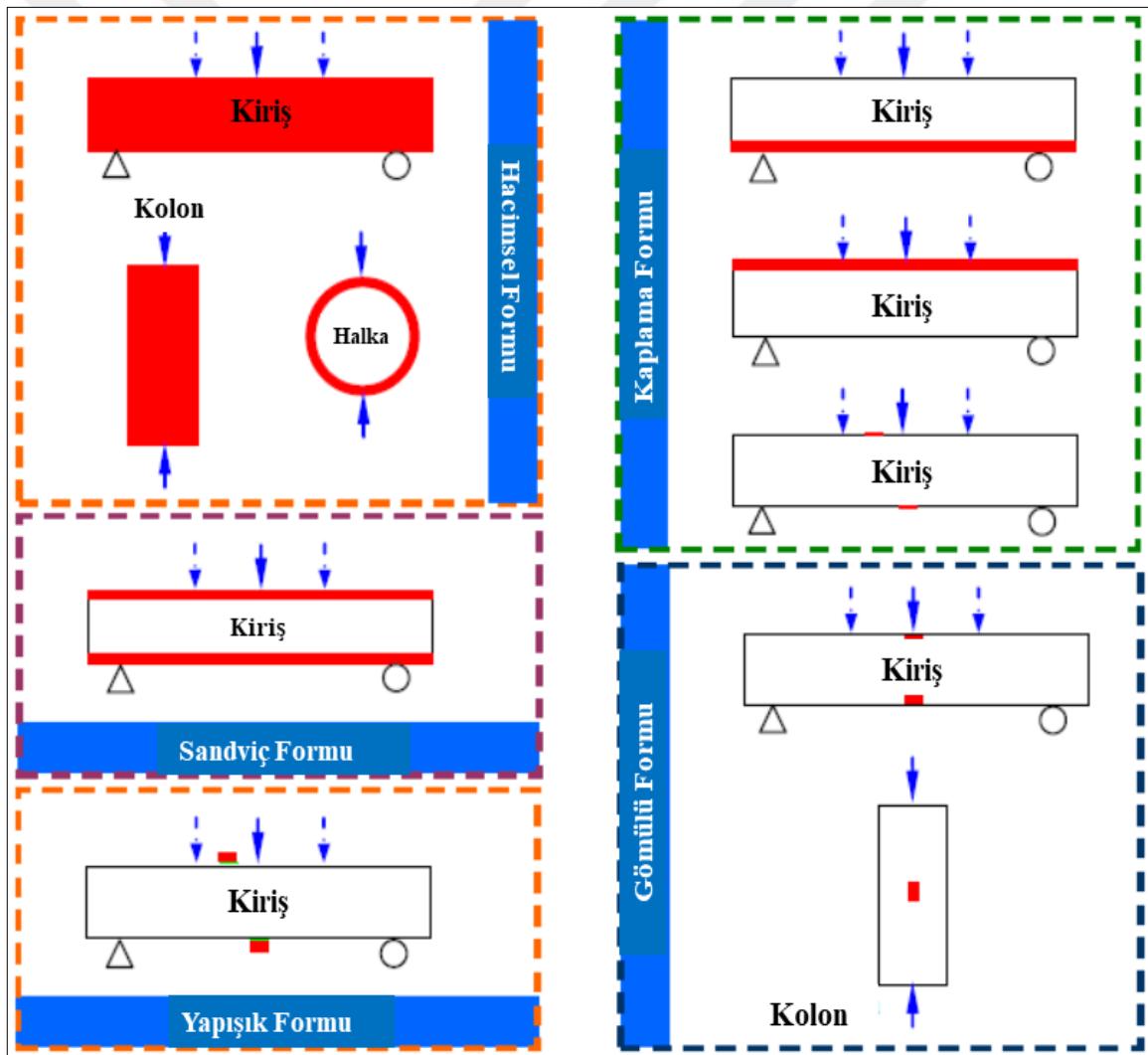
**Şekil 27.** %1 oranlı KNT'li kompozitlerin zamana bağlı basınç gerilme-elektrik direnç değişimi (Yoo *et al.* 2019).

- **Hacimsel formu**

Şekil 28'de yapısal sağlık izlemesi için kullanılan kendiliğinden algılayan bileşenlerin türü gösterilmektedir. Burada, hacimsel form tüm bileşenin kendiliğinden algılayan kompozitten yapıldığı anlamına gelmektedir. Karbon fiber polimer beton kullanılarak kendiliğinden algılayan kiriş ve halka ilk olarak araştırmacı Sett (2003) tarafından imal edilmiştir. Sett, elektriksel direnç değişimi ile hem kiriş hem de halka için uygulanan yük

arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Diğer araştırmacılar, basınç gerilme ve çekme bölgelerindeki yük ve hasar ilişkisini izlemek için kiriş numuneler kullanmışlardır (Wei *et al.* 2004; Zhang *et al.* 2004a; Zhang *et al.* 2004b; Wang *et al.* 2006b; Zhang and Xu 2008; Saafi *et al.* 2013). Bunun yanında köprü iskelesine uygulanan gerilme ve yanal yükler arasındaki ilişki de incelenmiştir (Hou and Lynch 2005). Tek eksenli basınç altında deformasyon ile elektriksel direncin değişimini izlemek için kolonlar hacimsel form da incelenmiştir (Howser *et al.* 2011).

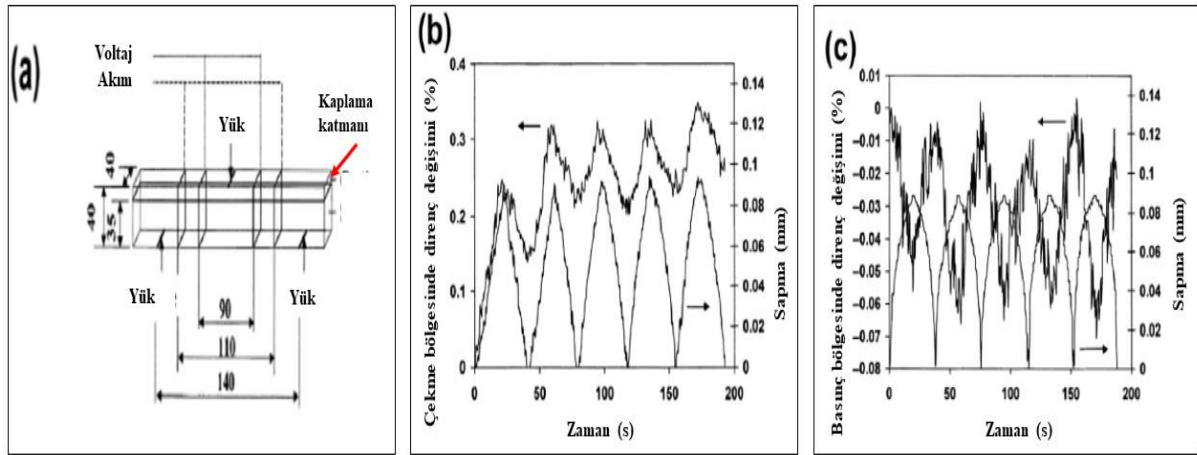
Örnek olarak, ağırlıkça %0.5 ÇDKNT'lı kirişin monotonik basınç altındaki dört noktalı eğilme testi yapılmıştır. Yükleme altındaki elektrik empedansındaki değişiklik, kirişin çatlaklarını ve hasar durumlarını tespit etmek için iyi bir uyumluluk göstermiştir (Saafi *et al.* 2013). Hacimsel formun avantajı basit olmasıdır ancak maliyeti diğer formlarla karşılaştırıldığında daha yüksektir (Han *et al.* 2015b).



**Şekil 28.** YSİ için kendiliğinden algılayan kompozitlerin tipik uygulama formları (Han *et al.* 2015a).

- **Kaplama formu**

Kaplama formu, Şekil 28’de gösterildiği gibi kendiliğinden algılayan kompozitler ile gömüldüğü yapının üst veya alt yüzeyinin kaplanması anlamına gelmektedir. Gerilme veya çekme bölgesinde beton kirişi kaplamak için karbon fiber kompozit ilk olarak Wen and Chung (2001a) tarafından kullanılmıştır. Beton kirişin karbon fiber kompozitlerle kaplanmasının, uygulanan yükler altında basınç veya çekme gerilmesinin hassasiyetini arttırdığını bulmuşlardır. Numune kurulumunun detayları ve elde edilen sonuçlar Şekil 29’da gösterilmektedir. Şekilden görülebildiği gibi, elektrik direncindeki fraksiyonel değişiklik, basınç tarafında yükler ile tersine çevrilebilirken, çekme tarafında geri döndürülemezdir. Bu bulgular ile, uygulanan gerilmeler, basınç ve çekme taraflarındaki dirençlerin fraksiyonel değişikliklerine dayanılarak saptanabilecektir.



**Şekil 29.** Üstünde veya altında karbon fiber tabaka içeren kiriş davranışı (a) numune konfigürasyonu (b) gerilim tarafında direnç ve sapmada değişim (c) basınç tarafında direnç ve sapmada değişim (Wen and Chung 2001a).

Önceki araştırmacılar, kiriş yüzeyinin basınç veya çekme deformasyonunu ölçmek için üst veya alt taraflarındaki beton kirişleri kaplamada karbon fiber kompozitler kullanmışlardır (Wen and Chung 2001a; Zhang *et al.* 2005; Baeza *et al.* 2013b). Hong, kirişin üst veya alt taraflarını kaplamak için çelik lifleri kullanmıştır (Hong 2006). Karbon fiber kompozitlerin hasar durumunu ve yorgunluk hasar derecesini tespit etmek için alt tarafı da kaplamak gibi diğer birkaç çalışmada bulunmaktadır (Huang *et al.* 2005; Wang *et al.* 2008). Ancak, kaplama, hacimsel formdan daha ekonomiktir, ama her zaman ana yapının gerçek davranışını algılayamaz. Bunun nedeni, kaplama tabakası ile yapıldığı yüzey yapısı arasındaki bağlanma zayıflığı veya sürtünme katsayısının değişiminden kaynaklanabilmektedir.

- ***Sandviç formu***

Sandviç form, yapı elemanının hem üst hem de alt taraflarının ikisinin birden, kendini algılayan kompozitler ile kaplandığı anlamına gelmektedir (Şekil 28). Lixia *et al.* (2004) ve Wu *et al.* (2007) çalışmalarında beton kirişin üst ve alt taraflarının karbon fiber kompozitlerle kaplanmasının, basınç ve çekme bölgelerindeki kirişin gerilme-deformasyon davranışının tespit edilebildiğini bulmuşlardır. Kirişin üst ve alt kaplaması olarak grafit bulamaç emdirilmiş çelik lif kullanılarak gösterilen elektriksel direnç, yükleme, deplasman ve şekil değiştirme arasında ilişkiler elde etmektedir (Hong and Wang 2010). Chen ve Liu, kirişin üst ve alt taraflarını karbon fiber kompozitlerle kaplamışlardır. Çekme tarafında ilişki geri döndürülemezken, basınç yüzündeki elektriksel direnç için tersinir ilişki bulmuşlardır (Chen and Liu 2008). Ancak, yine bu formda da kaplama tabakası ile uygulanan eleman yapısı arasındaki temas sorunu meydana gelebilmektedir.

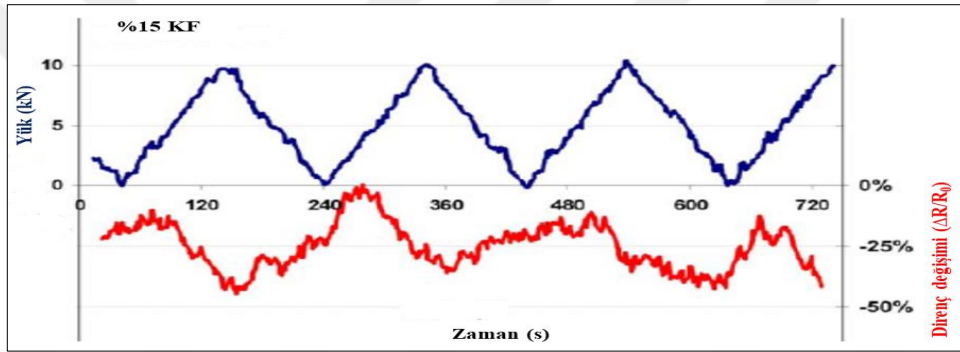
- ***Gömülü formu***

Gömülü form, kendiliğinden algılayan kompozitin küçük ve üniform boyutta üretildiği ve daha sonra daha büyük bir yapı elemanı içine gömüldüğü anlamına gelmektedir. Beton kirişine veya kolonuna gömülü hibrit karbon fiber ve karbon siyahı algılama sensörleri ilk olarak Han (2005) tarafından yapılmıştır. Bu sensörler, dört noktalı eğilme yükleri altında kirişin gerilme-deformasyon davranışını araştırmak için kirişin basınç bölgesine gömülmüştür. Sensör, tek eksenli sıkıştırma altında piezorezistif davranış kontrolü için kolonun ortasına gömülmüştür. Bu sensörler basınç gerilimi algılama yeteneğine sahiptir (Han 2005).

Karbon fiber gömülü sensörlerin basınç ve eğilme yüklemesi altında algılama tepkisi Chacko *et al.* (2007) tarafından incelenmiştir. Bu sensörler, yükleme altındaki elektrik direncinin değişimi sırasında uygulanan gerilimi ve hasarları algılayabilmiştir. Şekil 30'da gösterildiği gibi beton kirişin alt tarafına %15 karbon fiber içeren sensörler gömülerek Azhari (2008) tarafından kullanılmıştır. Kirişin alt tarafı gerilime maruz kaldıkça, sensör (FCR) tepkisinin pozitif olması beklenmektedir. Ancak, periyodik yükleme altında negatif tepki göstermiştir, bu durum sensör ve kirişin arasındaki bağlantının zayıflığına bağlı olabilmektedir (Şekil 31).



Şekil 30. Deney düzeneği (Azhari 2008) (a) test düzeneği, (b) numune.

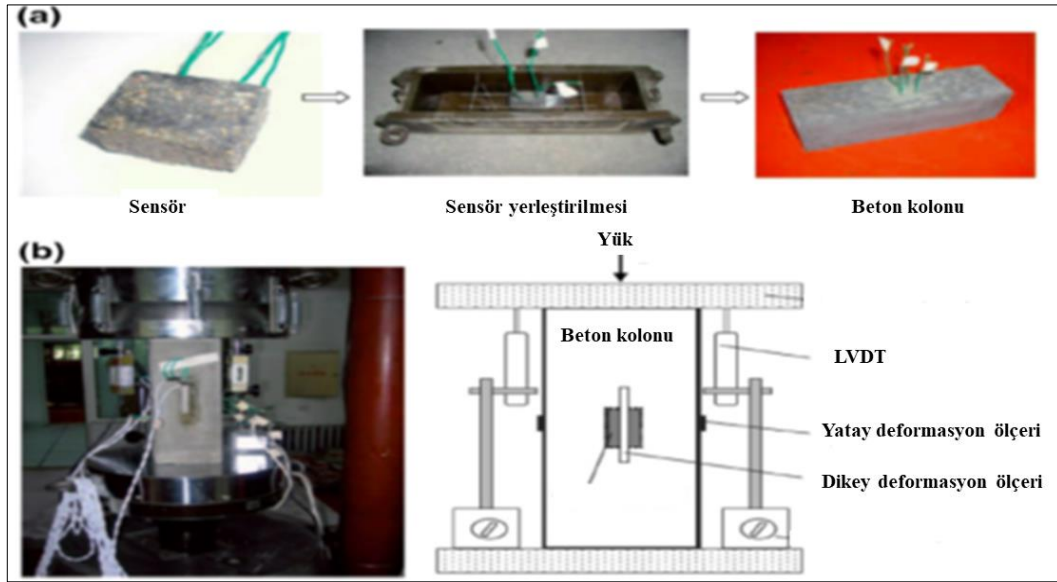


Şekil 31. 10 kN genlikle periyodik eğilme altında karbon fiber sensörünün tepkisi (Azhari 2008).

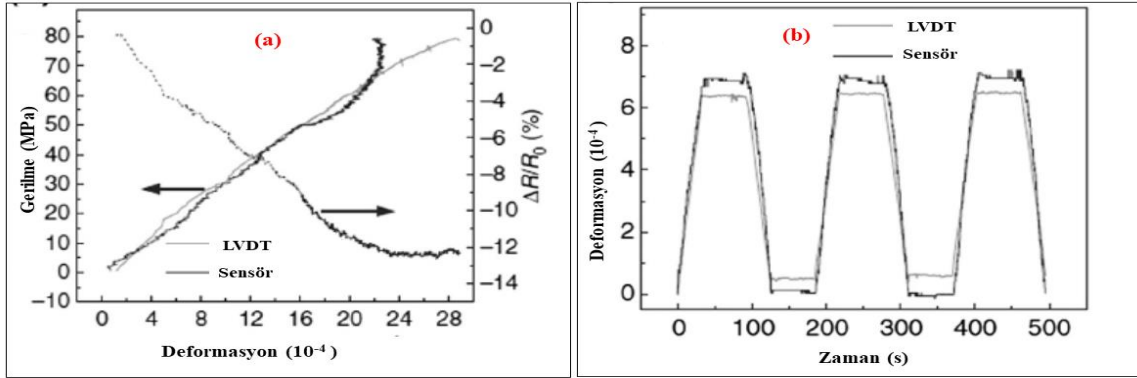
Gömülü karbon karası sensörleri ile monotonik ve periyodik yükleme altında kolonun gerilimi başarıyla tespit edilmiştir (Xiao *et al.* 2011a). Deney düzeneği ve sonuçları sırasıyla Şekil 32 ve 33'te gösterilmiştir. Aynı araştırmacı, sensörün dört noktalı eğilme altında uygulanan gerilimini algılamak için kirişte de kullanabileceğini bulmuştur (Xiao *et al.* 2011b).

Sensörleri imal etmek ve beton kolonlara gömmek için karbon fiber ve grafit kullanılmıştır (Fan *et al.* 2011). Monotonik ve periyodik yükleme altında kendini algılama araştırması için beton kirişin çekme bölgesine tek duvarlı karbon nanotüp çimento hamuru sensörleri gömülmüştür (Saafi 2009). Betonarme kirişin araştırılması için karbon fiber ve fiber olmayan sensörler kullanılmıştır.

Gömme formunun montajı kolaydır ve diğer formlara kıyasla düşük maliyetli olabilmektedir. Sensör yüzeyi ile yapı elemanının beton matrisi arasındaki bağ, gömülü formun imalatında dikkate alınması gereken önemli bir faktördür.



**Şekil 32.** Deney düzenekleri (a) karbon siyahlı kompozit gömülü sensör ve beton kolon, (b) tek eksenli basınç testi düzeneğinin şeması (Xiao *et al.* 2011a).



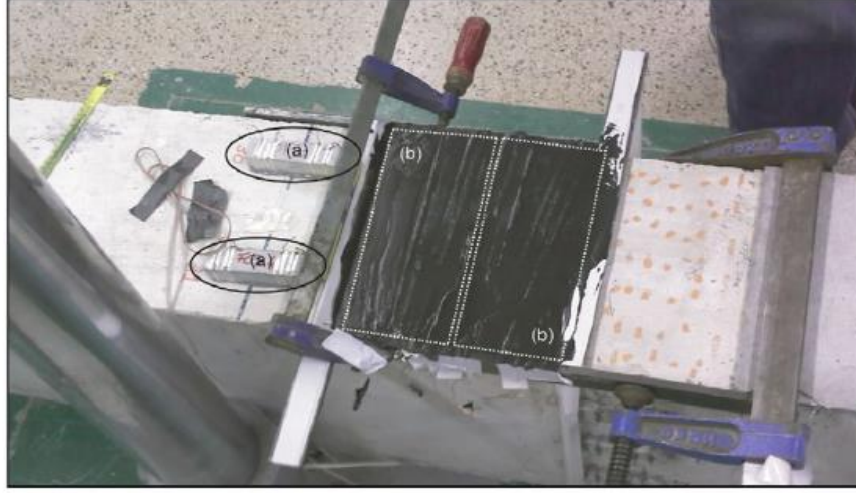
**Şekil 33.** (a) monotonik ve (b) periyodik yükleme altında kolondaki sensörün elektriksel direncinin değişimi (Xiao *et al.* 2011a).

- **Yapışık form**

Bu form, yapının gerilme-deformasyon davranışını algılamak için küçük boyutlu kendiliğinden algılayan sensörlerin yapı elemanına yapışkan malzemelerle bağlanması anlamına gelmektedir. Baeza ve diğ. kaplama formunun yanı sıra beton kirişe bağlı form üzerinde çalışmışlardır (Baeza *et al.* 2013b). Karbon fiberler veya nanokarbon fiber sensörleri, kirişin üst, alt ve yan yüzlerine yapıştırarak, beton kirişin gerilme-deformasyon ve hasar davranışını tespit etmek için yapılan düzenekte iyi bir algılama özelliği elde edilmiştir (Şekil 34). Nanofiber sensörün gösterge faktörü (gauge factor) yaklaşık 190 değerinde olup bir deformasyon sensörü olarak oldukça hassas olduğu düşünülmektedir.

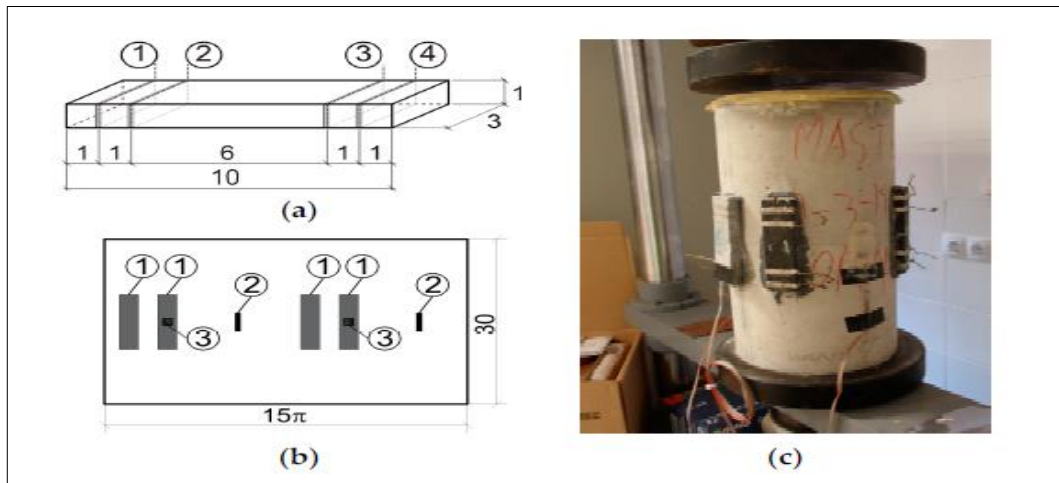
2017 yılında, beton numunelerinin basınç altında gerilimini ve hasarını tespit etmek için %5 (çimento ağırlığının) karbon nanofiber (KNF) çimento sensörleri kullanılmıştır (Galao *et*

al. 2017). Boyutları  $2,5 \times 10 \times 1 \text{ cm}^3$  olan sensörler, epoksi reçine (NURAL27) kullanılarak silindir kolonuna (15 ve 30 cm yüksekliğe eşit çap) bağlanılmıştır.

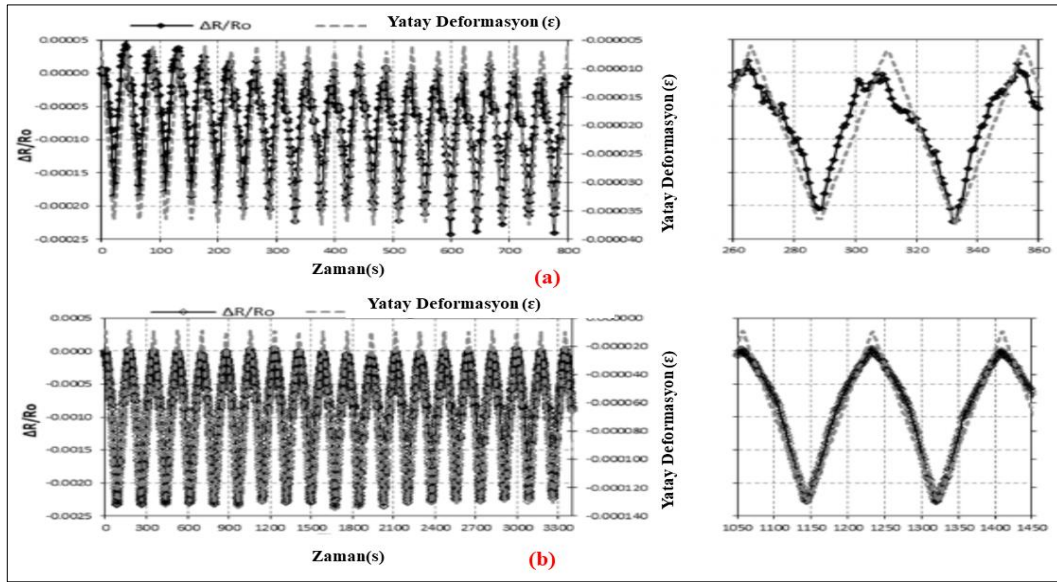


**Şekil 34.** Kendiliğinden algılayan betonun uygulama formu: (a) bağlı, (b) kaplama (Baeza *et al.* 2013b).

Şekil 35, sensör imalatını ve beton silindir kolonundaki yerleşmesini göstermektedir. Sensörler, farklı periyodik yükleme modlarında silindir kolonunun gerilme-deformasyon seviyelerini ölçmek için mükemmel bir davranış göstermişlerdir. Şekil 36’da, uygulanan periyodik gerilmeler altındaki sensörlerin tepkisini göstermektedir. Farklı yükleme modlarında sensörün verimliliğini araştırmak için başka bir periyodik yükleme yönü gerçekleştirilmiştir. Ancak, sensör ile beton numunesi arasındaki gerilimin iletilmesinde bazı sorunlar olabileceğinden yapıya bağlı her sensör için özel kalibrasyon gerekmektedir (Galao *et al.* 2017). Kalibrasyon ve sensörün yapıya yapışması, bağlı sensördeki algılama doğruluğunu artırmak için gerekmektedir.



**Şekil 35.** (a) Sensör boyutları (cm cinsinden) ve elektrik temas dağılımı (b) silindire sarılmadan önceki düzenek (cm cinsinden), 1: sensörler; 2: beton deformasyon ölçer; 3: sensör deformasyon ölçer; (c) beton numunesi (Galao *et al.* 2017).



**Şekil 36.** Basınç altında deformasyon algılama test sonuçları, direnç değişimi ve boyuna deformasyon eğrileri (7. ve 8. Döngünün büyütülmüş hali) (a) 22 kN (1.25 MPa) and (b) 88 kN (5 MPa) (Galao *et al.* 2017).

Yapısal eleman olarak kullanılan bu iletken kompozitlerin maliyet ve uygulama açısından kolaylık sağlaması için yapı elemanlarında gömülü sensör olarak kullanımı da oldukça ilgi çekmektedir.

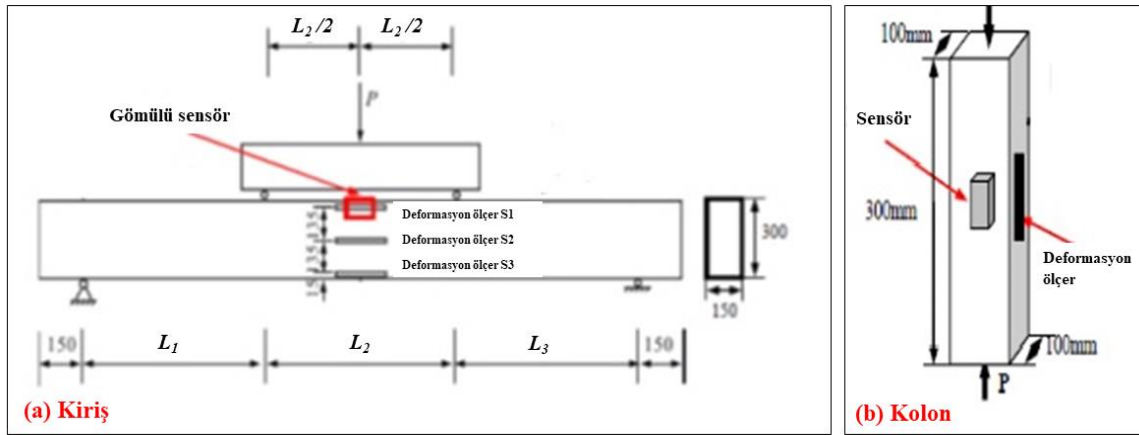
### Yapısal Beton Elemanlara Yerleştirilmiş Çimento Esaslı Deformasyon Sensörleri ve Kendiliğinden Algılama Özellikleri

Yapılar yorulma, aşırı yüklenme, çevresel sorunlar, mekanik ve durabilite etkileri gibi etkilerden zarar görmektedir. Bu nedenle, yapısal sağlık izleme sistemleri (YSİ) ile bu yapıların durumunu izlemek önemlidir. Bu açıdan sensörler kullanarak yapıdaki kritik bölgelerin gerilme-deformasyonun ölçülmesi önemli bir gerekliliktir (Doebeling *et al.* 1996). Normalde, optik fiber sensörler, elektriksel direnç deformasyon ölçerler ve piezoelektrik seramikler gibi geleneksel sensörler sorunu tespit etmek için YSİ’de kullanılmıştır (Austin *et al.* 1999; Li *et al.* 2006a; Song *et al.* 2008). Son zamanlarda ise yüksek dayanıklılık, uzun süre dayanma, düşük maliyet ve beton matrisi ile daha fazla uyumluluk açısından, piezorezistivite kavramına dayanan yeni deformasyona duyarlı çimentolu sensörler YSİ’de kullanılmaktadır (Fu and Chung 1996; Wang *et al.* 1998; Sarwary *et al.* 2019; Banyhussan *et al.* 2019).

Birçok araştırmacı, elektriksel dirençteki değişimi ölçmeye yarayan sensör olarak kullanılabilecek küçük kompozitlerin gerilme hassasiyetini tespit etmeyi başarmıştır. Bu başarı, kompozitlerin büyük yapılarda sensör olarak kullanımı konusunda araştırmacıları teşvik etmiştir. Akıllı çimento kompozitlerinin YSİ’de; bir yüzey kaplaması (Wen and Chung 2001a), inşaat demirinin korozyonunun izlenmesi (Huang *et al.* 2005) veya yapısal malzemeler (Bing

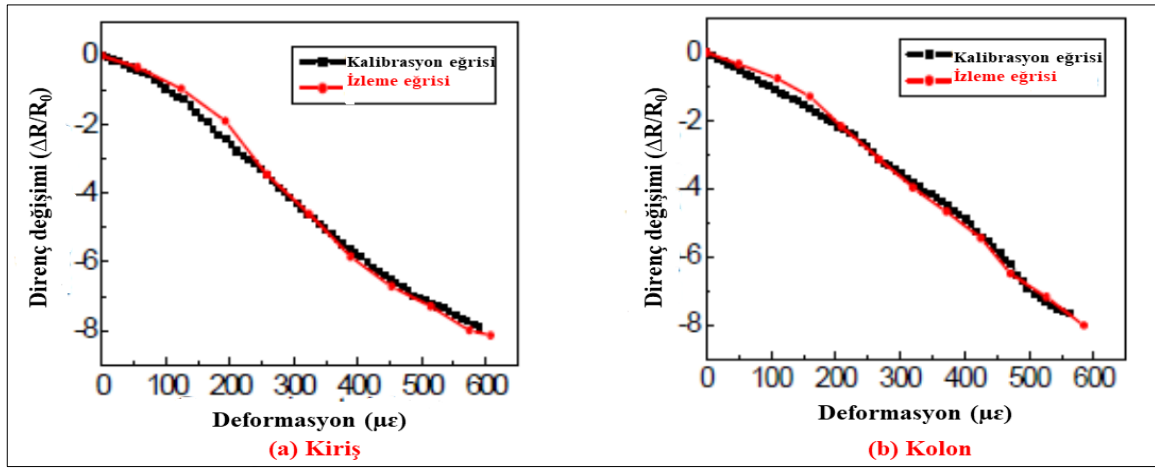
et al. 2005; Song et al. 2006) gibi çeşitli aşamalar için kullanılması önerilmiştir. Ayrıca son zamanlarda akıllı çimento kompozitlerinin, bir deformasyon sensörü olarak yapı elemanına yerleştirilerek kullanımı da önerilmiştir. Bu sensör, yüksek dayanıklılık, düşük maliyet, elemana uyum sağlaması ve kurulum kolaylığı göstermesi gibi avantajlara sahiptir (Han and Ou 2007). Sensörlerin yapı elemanına gömülmesi ilk olarak Han ve Ou (2007) tarafından önerilmiştir. Beton yapının gerilme-deformasyon davranışını izlemek maksadıyla piezorezistif çimento bazlı gerilme-deformasyon sensörleri (PCSS) üretmek için karbon fiber ve karbon siyahı kullanılmıştır. Bu sensörler, uygulanan monotonik ve periyodik gerilme-deformasyon ile yüksek elektrik direnci hassasiyeti göstermişlerdir (Han and Ou 2007).

Son zamanlarda, bu tarz sensörlerin, beton yapıların sağlık izleme ve hasar değerlendirmesi için kullanılmasında dikkat çeken çalışmalar mevcuttur. Li and Ou (2009) çalışmasında karbon fiber ve karbon siyahından yapılan sensörleri, farklı koşullar altında yapısal basınç gerilimini izlemek için beton kirişlere ve sütunlara gömerek ölçümler almışlardır. Beton kirişin, kolonun ve gömülü sensörlerin yerleşimi Şekil 37’de gösterilmiştir. Deneysel testlerde, Şekil 38’de gösterildiği gibi gömülü sensörünün direncindeki değişiklikler ile beton bileşenlerindeki PCSS’nin eksenli boyunca betondaki basınç gerilmesi arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Bu, yapı elemanının basınç gerilme-deformasyonun, gömülü sensörün elektrik direncindeki kesirli değişiklikler yardımıyla kaydedilerek izlenebileceği anlamına gelmektedir.



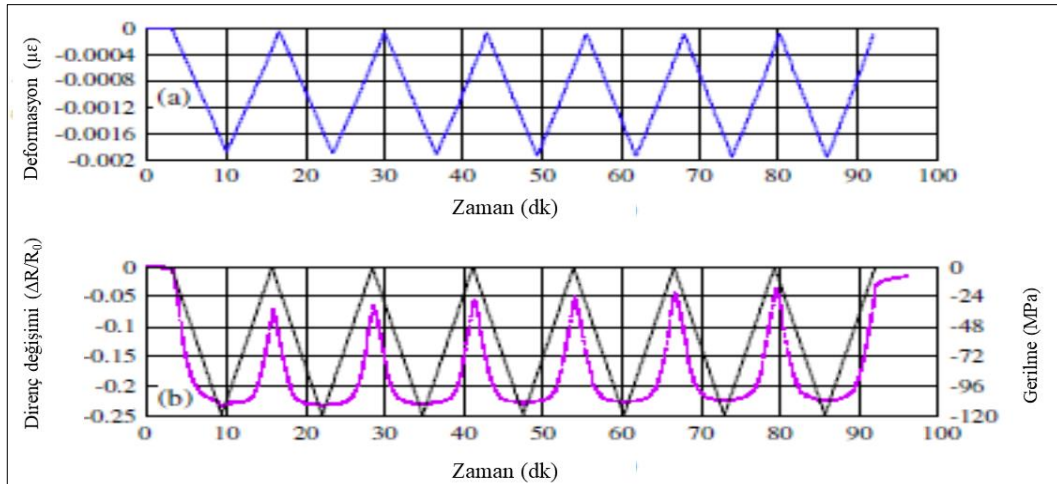
**Şekil 37.** Yerleştirilmiş sensör içeren kiriş ve kolon için deneysel test düzeneği (Li and Ou 2009).

Karbon siyahı içeren çimento esaslı kompozit sensörler de yükleme altındaki kirişin gerilme-deformasyon davranışını araştırmak için beton kiriş elemanı içine gömülmüştür (Xiao et al. 2011b). Üç sensör, kirişin basınç, çekme ve kesme bölgesine yerleştirilmiştir. Tüm sensörler, tek eksenli periyodik ve monotonik yükleme altında basınç gerilmesinin ölçülmesinde iyi bir performans göstermiştir.



**Şekil 38.** Beton bileşenlere yerleştirilmiş PCSS ile oluşturulan izleme ve kalibrasyon eğrileri (Li and Ou 2009).

2014 yılında Sun ve grubu, çimento bazlı deformasyon ölçer (CBSS) başlığını ultra yüksek mukavemetli beton (UHSC) kolona gömmek için hacimce % 0.5 pirinç kaplı çelik lifler (çap 60  $\mu\text{m}$ , uzunluk 13 mm) kullanmışlardır (Sun *et al.* 2014). CBSS'nin boyutları 40 mm x 40 mm x 160 mm prizma olarak, kolon ise  $\varnothing 200$  mm x 800 mm boyutlu silindir olarak seçilmiştir. CBSS, monotonik ve periyodik yükleme sırasında kolonun deformasyon izlenmesi için silindirik kolonun kolon yüksekliğine göre ortasına gömülmüştür. Sonuçta, gömülü CBSS'nin direncinde geri dönüşü olmayan değişimi artırıldığında gömülü CBSS ile kolonun hasarını izleyebildiğini göstermiştir. Şekil 39'da, gömülü CBSS'nin UHSC kolonlarının periyodik yükleme altındaki davranışı gösterilmiştir.



**Şekil 39.** 120 MPa'lık maksimum gerilme ile periyodik test sırasında UHSC kolonu için zamana karşı deformasyon (mavi eğrisi),  $\Delta R/R_0$  (kesikli eğrisi) ve gerilme (düz eğrisi) davranışları (Sun *et al.* 2014).

Sun *et al.* (2014) ile benzer çalışma grafit nanoplakalar iletken bir malzeme olarak piezorezistif çimento bazlı deformasyon sensörleri (PCSS) hazırlamak için kullanılmıştır. Bu sensörler basınç, çekme ve kesme bölgelerinde kirişe gömülmüştür. Deformasyon sonuçlarını

karşılaştırmak için geleneksel deformasyon ölçerler ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılmıştır. PCSS sensörleri 50x50x50mm boyutlarında çimento harcı ile yapısal eleman ise 600x200x50 mm boyutunda kiriş olarak çimento harcı şeklinde üretilmiştir. Deneysel sonuçlara bakıldığında, kompozite uygulanan periyodik yükleme altında gömülü PCSS'ler iyi hassasiyet göstermişlerdir. Sensörler tarafından ölçülebilen elektriksel direnç ile geleneksel deformasyon ölçerler tarafından ölçülen değişim karşılaştırıldığında iyi bir uyumluluk göstermiştir. Sonlu elemanlar yönteminin (FEM) sonuçlarının da deneysel bulgular ile iyi bir uyumluluk içerisinde olduğu belirtilmiştir (Sun *et al.* 2014).

2019'da araştırmacı Ding ve grubu, karbon nanotüp (KNT) ve nano karbon siyahı (NKS) sensörlerinin beton kolonunun izlenmesinde kullanılabileceğini bulmuşlardır (Ding *et al.* 2019). Gömülü sensör boyutları 20 mm x 20 mm x 40 mm ve kolonun boyutları 150 mm x 150 mm x 300 mm olarak seçilmiştir. Kolonun orta yüksekliğine çimento kompozit sensörü gömülmüş ve deformasyon ölçer ise karşılaştırma için kolonun dış yüzeyine merkezi olarak tutturulmuştur. Şekil 40, gömülü sensörlü kolonun deneysel piezo-direnç testini göstermektedir. C30 ve C50 kolonları monotonik yükleme altında test edilmiştir. Betonun sınıfı C30 veya C50 olmasına rağmen, gömülü sensörlerin piezorezistif davranışı beton kolonun gerilme-deformasyon davranışını izlemek için mükemmel bir hassasiyet göstermektedir. Bu nedenle, geliştirilen sensörler, yapısal izleme uygulamaları amacıyla akıllı bir bina yapmak için yapı elemanlarına gömülmeye uygun görülmüştür (Ding *et al.* 2019).

Akıllı sensörler yerleştirilerek somut bir yapının YSİ'sini araştırmak için yukarıda belirtilen sınırlı sayıda çalışmanın yapıldığını belirtmek önemlidir. Beton yapıların YSİ'sini belirlemek için iletken lif ve toz içeren sensör ile yapılmış çok az çalışma vardır (D'Alessandro *et al.* 2017; Nam *et al.* 2017). Ayrıca literatürden hareketle sensörün gömme yönteminin ve yeri gibi konularında önemle üzerinde durulması gerekmektedir.



**Şekil 40.** Kendiliğinden algılama özellikli kolon test düzeneği (Ding *et al.* 2019).

### **Kendiliğinden Algılayan Çimento Esaslı Kompozit Uygulamaları**

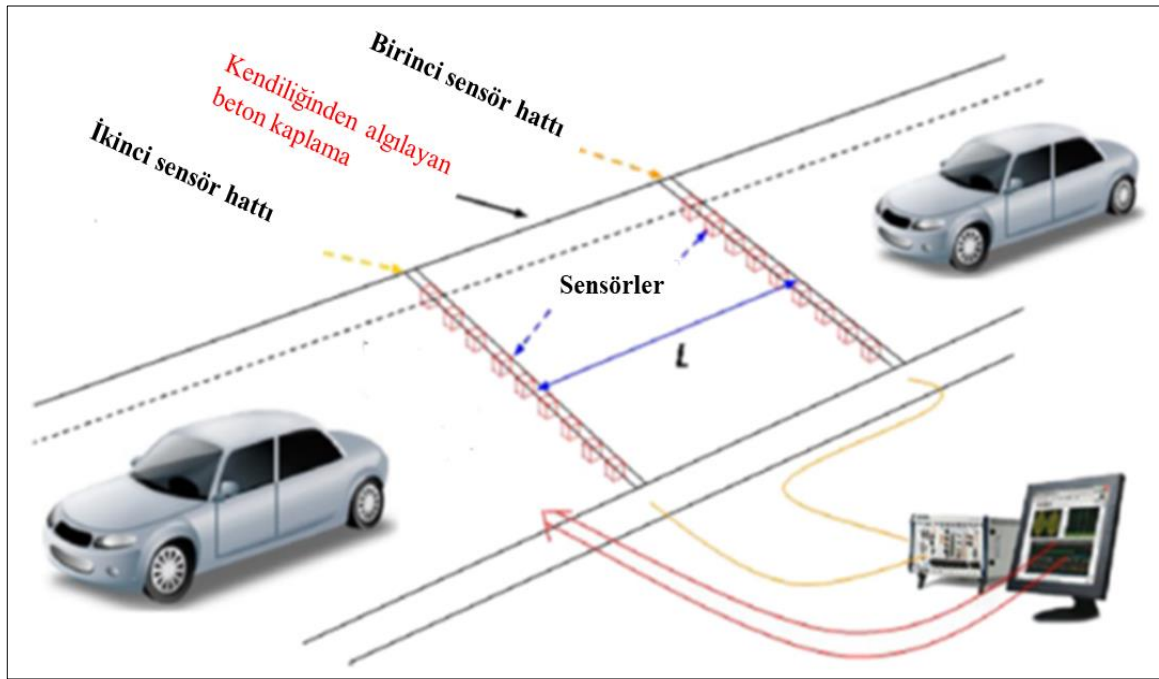
Kendiliğinden algılayan beton veya çimento kompozitlerini geliştirmenin en önemli amacı, onu inşaat yapılarına uygulamaktır. Bu kompozitler, gerilmeye, deformasyona, çatlak ve hasarlara karşı algıları tespit etmek için geliştirilmiştir. Bu özellikleri nedeniyle kompozitler, düşük maliyeti ve yüksek dayanıklılıkları ile geleneksel sensörler için alternatif bir çözüm olarak küçük boyutta kullanılabileceklerdir (Han *et al.* 2014). Son on yılda, çok sayıda araştırmacılar iletken çimento kompozitlerinin akıllı özellikleri üzerinde çalışmalara odaklanmışlardır. Kendiliğinden algılayan kompozitler, yapısal sağlık izlemesi, trafik tespiti ve sınırların/ordunun güvenliği amacı ile kullanılabilir. Bunlardan yapısal sağlık izlemesi ve trafik tespiti daha fazla ilgi görmüş, bunun sonucunda da bu konularda birçok yayın yapılmıştır (Klein *et al.* 2006; Han *et al.* 2009c; Han *et al.* 2012c).

Trafik yoğunluğunu algılamak için; piezoelektrik, endüktif döngü ve fiber optik dedektörlerin yol kaplamasının altına gömülmesi gibi birçok teknik vardır. Bu sensörlerin yol kaplamasının altına gömülmesi, sensörlerin yol kaplamasına uyumsuz olabilmesi nedeniyle yol kaplamasının hizmet ömrünü kısaltabilmektedir (Klein *et al.* 2006). Kendiliğinden algılayan sensörler kullanılarak trafik algılama için yeni bir yol önerilmiştir. Bu sensörler, geleneksel dedektörlere göre; kolay kurulum ve bakım, düşük maliyet, yüksek hassasiyet, geniş algılama alanı, uzun servis ömrü ve beton yapı olarak yol kaplaması ile iyi uyum gibi birçok avantaja sahiptir (Han *et al.* 2014).

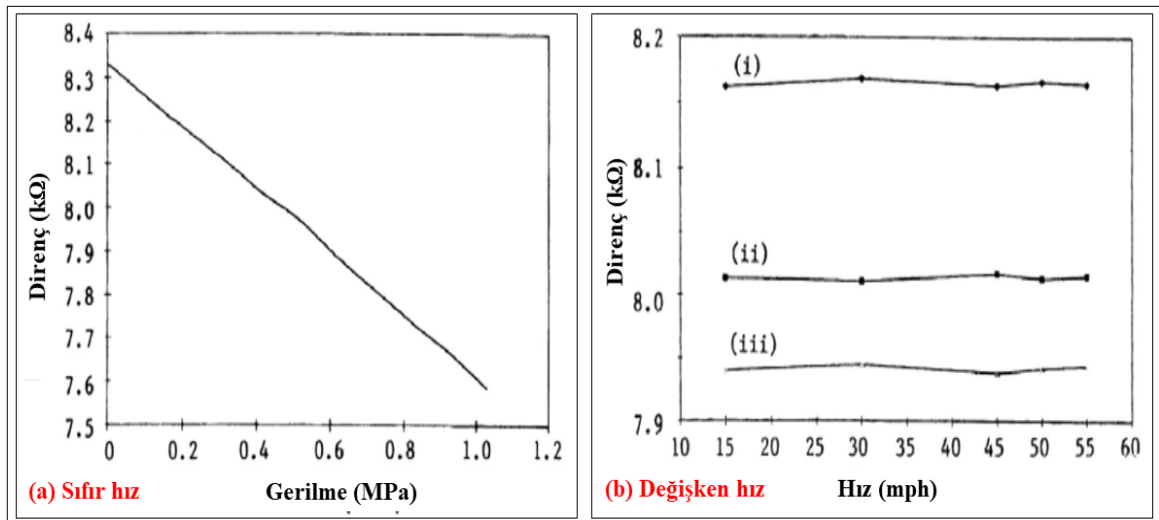
Şekil 41’de, kendiliğinden algılanan sensörler ile trafik yoğunluğu hesaplamak için geliştirilen sistem gösterilmektedir. Birçok önemli trafik verisi, kendini algılayan sensörleri kaplama katmanına yerleştirilerek tespit edebilmektedir. Bu veriler, trafik yoğunluğu, trafik akış

hızları, araç hızı ve hareket halinde ağırlık belirlenmesini içerir. Yine de tam tespit için çok sayıda çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, trafik algılamada kendini algılayan sensörleri kullanma konusunda çok sayıda çalışma yapılmaktadır.

Kendiliğinden algılayan sensörlerin kısa karbon fiberler içerdiğini (ağırlıkça çimentonun %0.5 veya %1'i oranında) trafik ağırlığını ve araç hızını tespit etmede etkili olduğu Shi ve Chung (1999) tarafından bulunmuştur. Şekil 42a, trafik yüklerinin, sensörlerin elektriksel direnci üzerindeki etkisini gösterirken, Şekil 42b, farklı hızlarda sabit gerilim için direncin değişimini göstermektedir.

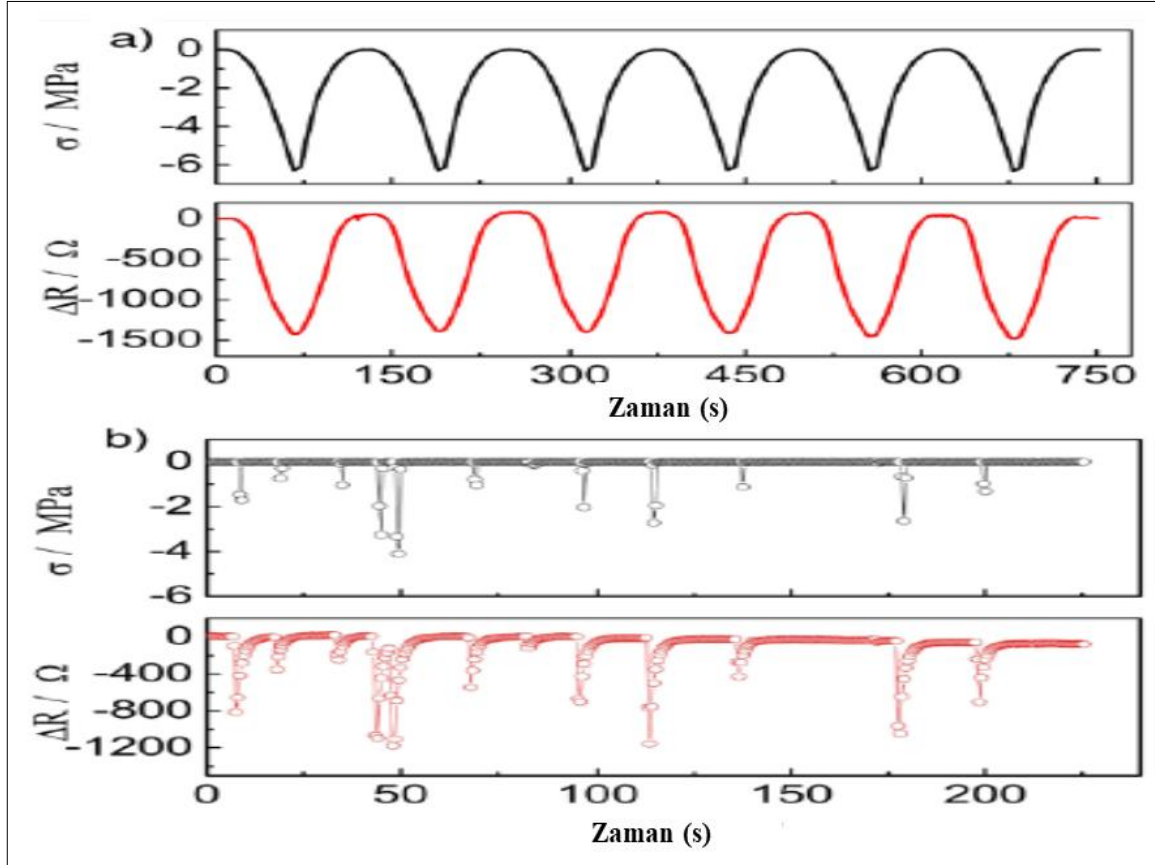


Şekil 41. Trafik tespiti için kendiliğinden algılayan beton kaplama yapısı (Han *et al.* 2014).



Şekil 42. Karbon fiberlerle kendiliğinden algılayan betonun gerilim altında direnç değişimi (i) 0,21 MPa, (ii) 0,42 MPa, (iii) 0,52 MPa (Shi and Chung 1999).

Başka araştırmacılar da trafik ve araç hızını tespit etmek için karbon fiberleri kullanmışlardır. Örneğin Han ve grubu, araç hızı, araç ağırlığı, trafik akışı tespiti ve araç tipi değerlendirmesi için hibrit karbon fiber ve karbon siyahı kullanmışlardır (Han *et al.* 2009c; Han *et al.* 2012c). Deney sonuçları, ÇDKNT'nin tekrarlanan basınç yüklerini ve ani yükleri algılamaya duyarlı olduğunu göstermiştir (Şekil 43) (Han *et al.* 2009c). Aynı araştırmacı, trafik algılama ve izleme için nikel parçacık sensörlerinin büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir (Han *et al.* 2011e).



**Şekil 43.** Trafik sensörlerinin kendiliğinden algılama tepkisi (a) 6 MPa genlikte tekrarlanan basınç yükleme altında (b) ani yükleme altında (Han *et al.* 2009c).

## MATERYAL ve YÖNTEM

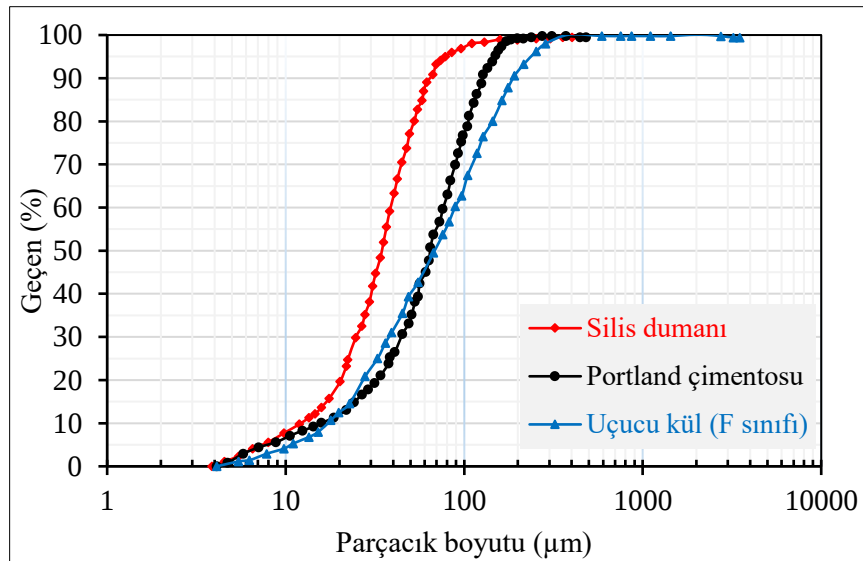
### Materyal

#### Çimento

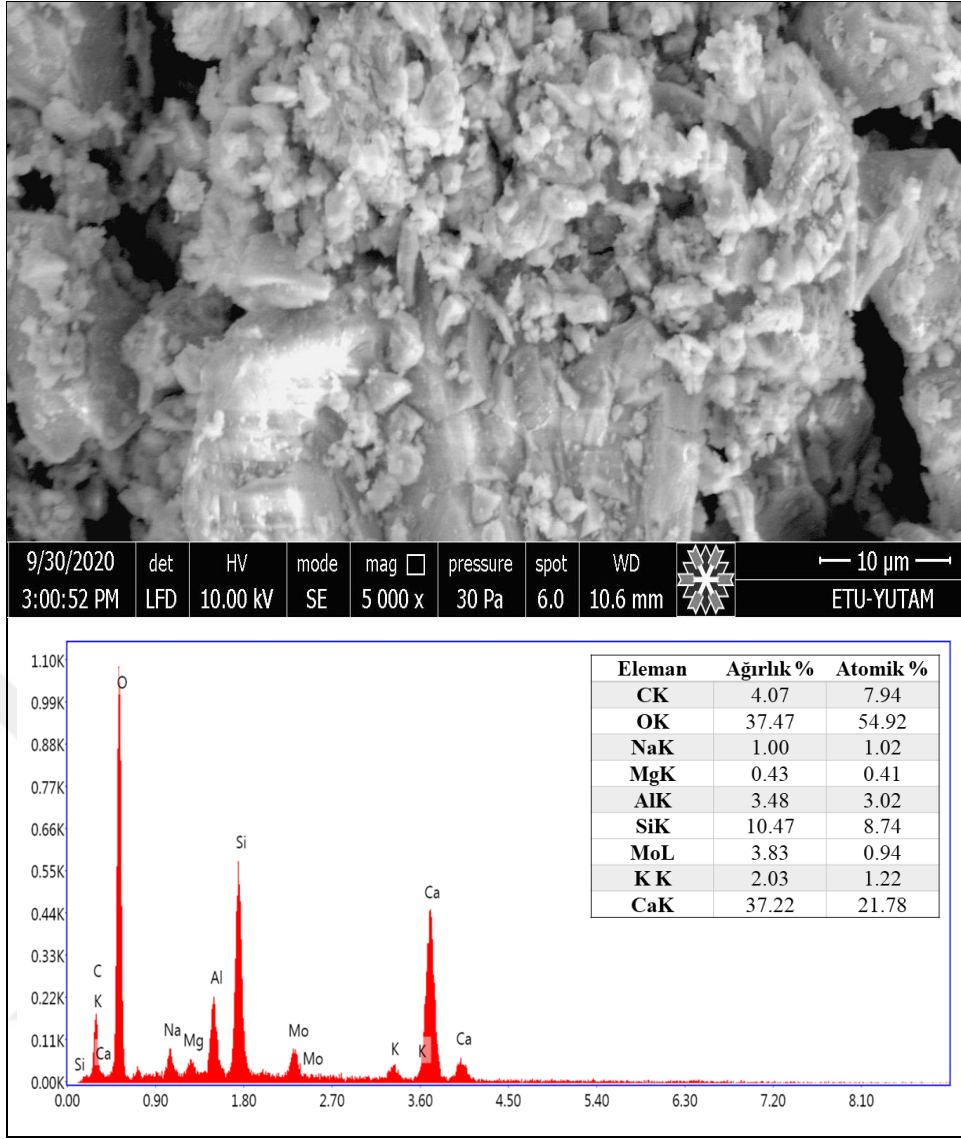
Çimento malzemesi olarak Normal Portland Çimentosu CEM I 42.5R kullanılmıştır. Çimento özellikleri (TS-EN-197-1 2012) ve (ASTM-C150/C150M 2017) Tip I çimento gereklilikleri ile uyumludur. Çimentonun özgül ağırlığı 3.14, yüzey alanı 4502 cm<sup>2</sup>/g'dır. Portland çimentosunun kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de, parçacık boyutu dağılımı ise Şekil 44'te görülebilmektedir. Ayrıca, çalışmada kullanılan çimentonun SEM görüntüsü Şekil 45'te gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Portland Çimentosu, Uçucu Kül (Sınıf-F) ve Silis Dumanının Kimyasal Bileşimi ve Fiziksel Özellikleri

| Kimyasal bileşimi, %             | PÇ    | UK    | SD     |
|----------------------------------|-------|-------|--------|
| SiO <sub>2</sub>                 | 20,77 | 52,22 | 91,96  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 5,55  | 16,58 | 1,2    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 3,35  | 6,6   | 0,84   |
| MgO                              | 2,49  | 2,1   | 1,02   |
| SO <sub>3</sub>                  | 2,49  | 0,02  | 0,00   |
| CaO                              | 61,43 | 7,98  | 0,62   |
| Na <sub>2</sub> O                | 0,19  | 0,86  | 0,67   |
| K <sub>2</sub> O                 | 0,77  | 1,53  | 1,16   |
| Kızdırma Kaybı                   | 2,20  | 10,36 | 1,86   |
| <b>Fiziksel özellikler</b>       |       |       |        |
| Özgül ağırlık                    | 3,14  | 2,02  | 2,2    |
| Yüzey alanı (cm <sup>2</sup> /g) | 4502  | 2900  | 190800 |



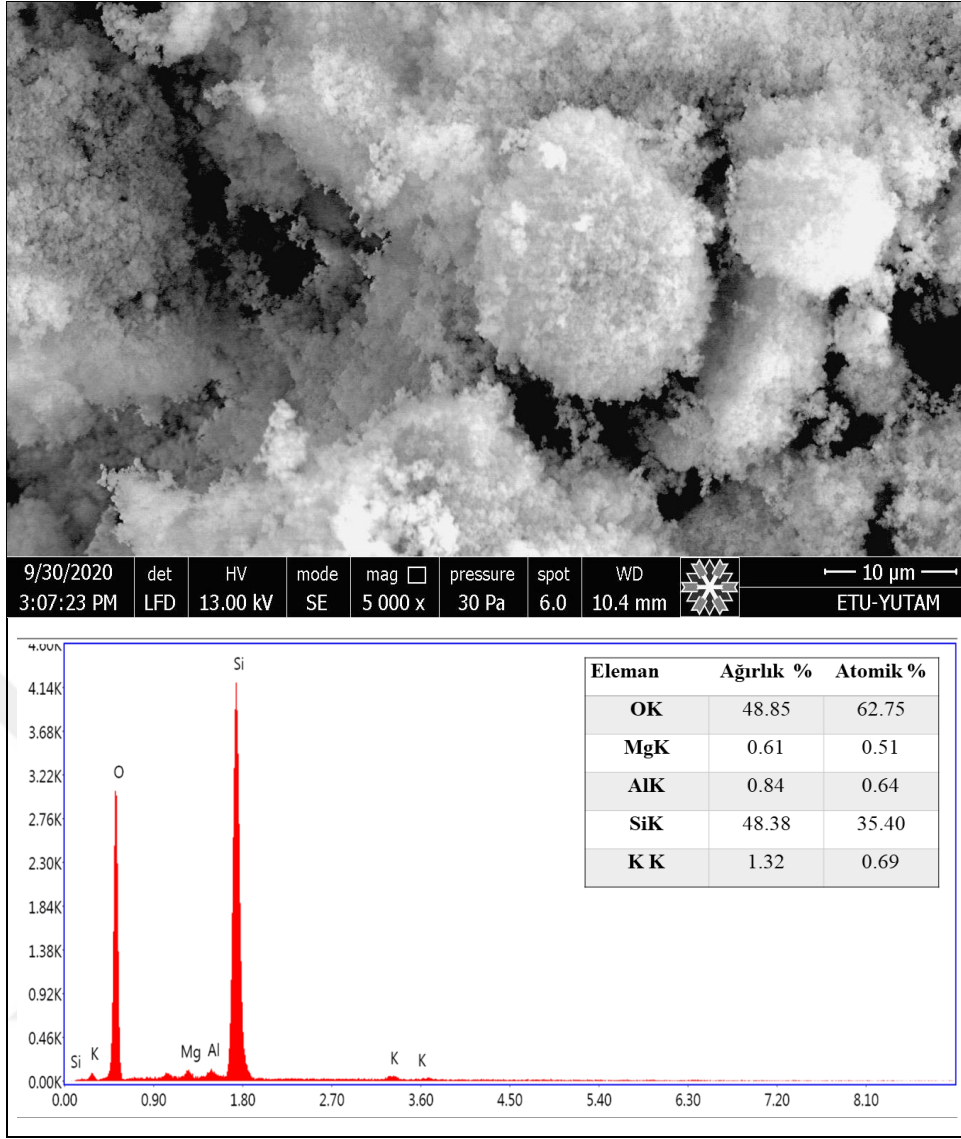
**Şekil 44.** Portland çimentosu, uçucu kül ve silis dumanının tipik parçacık boyut dağılımları.



Şekil 45. Portland çimento SEM<sub>EDX</sub> görüntüsü.

### Silis dumanı

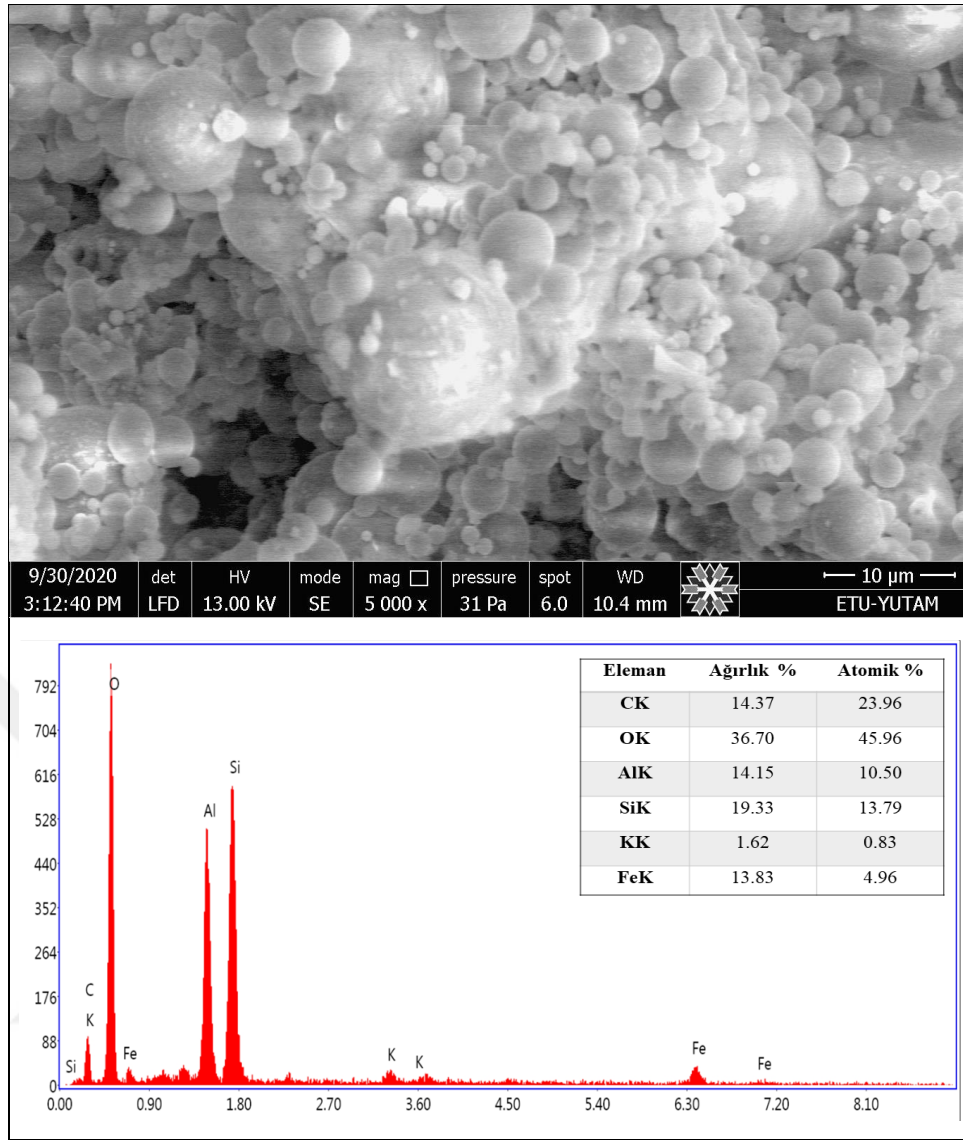
Silis dumanı (SD), katkı maddesi olarak kullanılmıştır. SD, iç boşlukları dolduran çimento parçacıkları ile puzolanik reaksiyon gerçekleştirmekte ve mükemmel mekanik özellikler sağlamaktadır. Kullanılan SD'nin özgül ağırlığı ve yüzey alanı sırasıyla 2,2 ve 190800 cm<sup>2</sup>/g'dir. SD'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de sunulmaktadır. SD, (ASTM-C618-13 2013) gereklilikleri ile uyumludur. SD'nin tipik parçacık boyutu dağılımı ve morfolojisi sırasıyla Şekil 44 ve Şekil 46'da sunulmaktadır.



Şekil 46. Silis dumani SEM<sub>EDX</sub> görüntüsü.

### Uçucu kül

F tipi uçucu kül (UK) de katkı maddesi olarak kullanılmıştır. UK'nın özgül ağırlığı ve yüzey alanı sırasıyla 2.02 ve 2900 cm<sup>2</sup>/g'dır. UK'nın kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de sunulmaktadır. Ek olarak, UK'nın parçacık boyutu ve dağılımı Şekil 44'de gösterilmiştir. Bu tip UK, (ASTM-C618-13 2013) gereklilikleriyle uyumludur. Şekil 47, uçucu kül morfolojisi ve SEM görüntüsü örneğini göstermektedir.



Şekil 47. Uçucu Kül SEM<sub>EDX</sub> görüntüsü.

## Su

Karışımlarda; (TS-EN-1008 2003)'e uygun, asit reaksiyonu göstermeyen, sülfat, yağ, fazla tuz, endüstri atıkları ve organik madde gibi betonun dayanımını ve dayanıklılığını etkileyecek madde içermeyen içilebilir nitelikteki şebeke suyu kullanılmıştır.

## Köpük kesici

Köpük kesici, taze betonda hava kabarcığının oluşmamasına, oluşanların ıslak betonun yüzeyine yükselmesine ve böylelikle boşluksuz bir dağılım için kullanılabilir. Bu çalışmada, Triizobütil fosfat kimyasal formülü  $((CH_3)_2CHCH_2)_3PO$  köpük giderici malzeme kullanılmıştır. Triizobütil fosfat (TIBP) çok güçlü, polar bir çözücüdür. Esas olarak, köpüğü tahrip etme ve bir köpük inhibitörü olarak hareket etme yeteneğine sahip olduğu çeşitli sulu sistemlerde köpük önleyici bir madde olarak kullanılmaktadır. TIBP'nin teknik özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

**Tablo 2.** Triisobutyl Fosfat TIBP'nin Teknik Özellikleri

| Analiz Maddeleri | Sonuç  | Şartname      |
|------------------|--------|---------------|
| Görünüm          | Sıvı   | Sıvı          |
| Özgül ağırlık    | 0,963  | 0,960-0,970   |
| Nem              | 0,049  | ≤ 0,1         |
| Asit             | 0,036  | ≤ 0,1         |
| İçerik           | 99,12  | ≥ 99,0        |
| Renk             | 10     | ≤ 20          |
| Kırılma          | 1,4193 | 1,4190-1,4200 |

**Sürfaktan, Sodyum Dodesil Sülfat (SDS)**

İletken malzemelerin dağılımını arttırmak için bazı ön karıştırma yöntemlerinde silis dumanı (SD) ve sodyum dodesil sülfat (SDS) bazlı dispersiyon ajanı kullanılmıştır (Yu and Kwon 2009; Parveen *et al.* 2013). SDS'nin partikül boyutu 325 mesh (44 mikron) ve saflık % 95.5'tir. Sodyum dodesil sülfat (SDS), anyonik yüzey aktif madde türüdür, suda kolayca çözünür, anyonik ve iyonik olmayan ile uyumludur, emülsifiye etme konusunda iyi performans gösterir. SDS'nin özellikleri Tablo 3'te gösterilmiştir. Ürünün numunesi Şekil 48'de görülebilmektedir.

**Tablo 3.** Sodyum Dodesil Sülfatın (SDS)'nin Özellikleri

| Madde               | Sonuçlar                                           |
|---------------------|----------------------------------------------------|
| Görünüm             | Beyaz toz                                          |
| 20 ° C'de görünüm   | Hafif sarımsı                                      |
| Bileşik formül      | C <sub>12</sub> H <sub>26</sub> O <sub>4</sub> SNa |
| Moleküler ağırlık   | 288,38                                             |
| Erime noktası       | 203-208 °C                                         |
| Saflık (%)          | 99,5+                                              |
| CAS numarası        | 151-21-3                                           |
| Sınıf               | ACS reaktifi                                       |
| 20 °C'de çözünürlük | Suda çözünebilir                                   |
| Kütle yoğunluğu     | Yaklaşık 300 kg/m <sup>3</sup>                     |

**Şekil 48.** Çimento kompozitlerinin üretimi sırasında kullanılan SDS sürfaktan malzeme.

### **Yüksek oranda su azaltıcı katkı (Süper akışkanlaştırıcı)**

Tüm karışımlarda kullanılan yüksek oranda su azaltıcı karışım (HRWRA), BASF kimyasal firmasından alınan **MasterGlenium® 51** kullanılmıştır. **MasterGlenium® 51**, polikarboksilik eter esaslı, yüksek oranda su azaltan, erken ve nihai yüksek dayanım ve dayanıklılığa gereksinim duyulan hazır beton ve prekast endüstrisi için geliştirilmiş, yeni nesil süperakışkanlaştırıcı beton katkı malzemesidir. Bu ürün (ASTM-C494/C494M 2011) Tip F ile uyumludur. Sarı renge sahiptir, yoğunluğu 1,082 -1,142 kg / litredir. **MasterGlenium® 51**'nin teknik özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 4.** Masterglenium® 51'in Teknik Özellikleri

| Madde                        | Sonuçlar                    |
|------------------------------|-----------------------------|
| Malzemenin yapısı            | Polikarboksilik eter esaslı |
| Renk                         | Kahverengi                  |
| Yoğunluk                     | 1,082-1,142 kg/litre        |
| Klor içeriği % (EN 480-10)   | < 0,1                       |
| Alkali içeriği % (EN 480-12) | < 3                         |

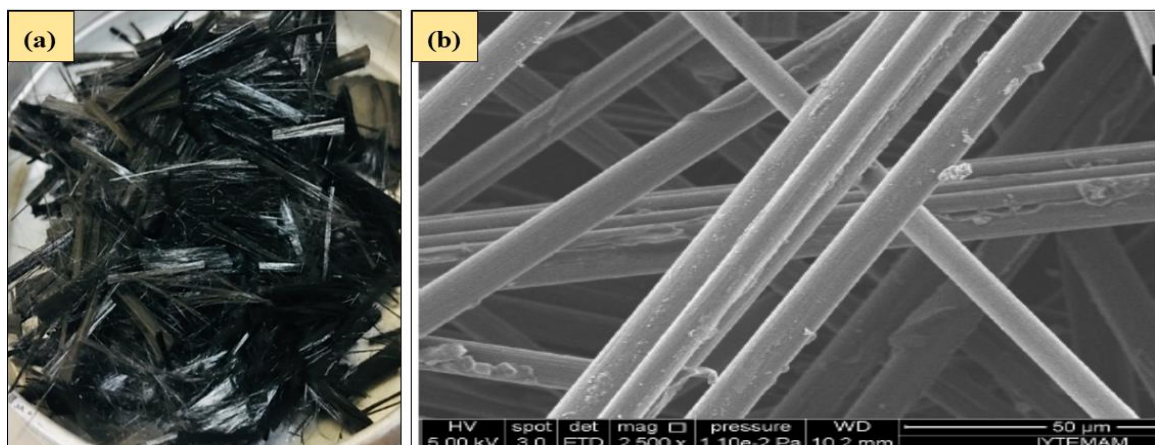
+20°C'de,%50 koşullarında elde edilmiştir.

### Karbon fiber (KF)

Bu çalışmada, KF ile güçlendirilmiş çimento esaslı kompozitlerin imalatında 12 mm uzunluğunda ve 1600 boy/çap oranına sahip elektriksel iletken karbon fiberler kullanılmıştır. KF'ler, ELG Carbon Fiber Ltd./İngiltere'den satın alınmıştır. Liflerin özellikleri Tablo 5'te görülebilmektedir. KF numunesi dijital kamera ve SEM görüntüleri Şekil 49'da verilmiştir.

**Tablo 5. 12 mm Uzunluğunda Doğranmış Karbon Fiberin Tipik Özellikleri**

| Lif çapı<br>( $\mu\text{m}$ ) | Lif birim ağırlığı<br>(Kg/m3) | Lif uzunluğu<br>(mm) | Metal kirliliği<br>(g) | Çekme dayanımı<br>(MPa) | Çekme modülü<br>(GPa) |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 7                             | 1700                          | 12                   | < 0.1/1000             | 4150                    | 252                   |



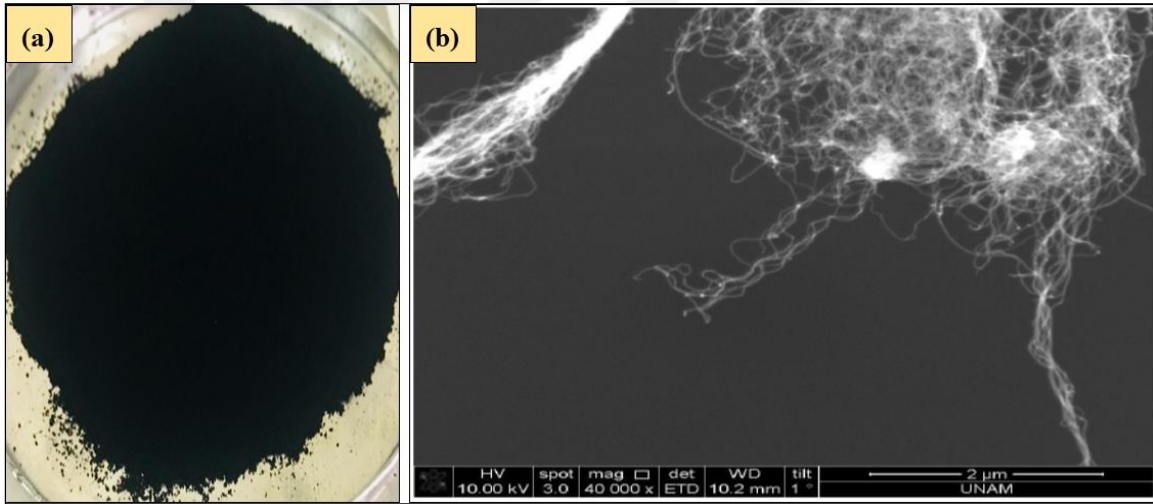
**Şekil 49.** Karbon fiber (a) dijital görüntüsü, (b) SEM görüntüsü.

### Çok duvarlı karbon nanotüpler (ÇDKNT)

Bu çalışmada, diğer iletken malzemeler olarak (-OH MWCNT) çok duvarlı karbon nanotüpler kullanılmıştır. Bu ürünün fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 6’da verilmiştir. Şekil 50’de, bu ÇDKNT’lerin SEM görüntülerine ek olarak bir dijital kamera ile çekilen görüntüleri gösterilmektedir.

**Tablo 6.** ÇDKNT’lerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

| Özellikler             | Değer                 |
|------------------------|-----------------------|
| Safılık                | > 96 wt%              |
| Renk                   | Siyah                 |
| Dış çap                | <8 nm                 |
| İç çap                 | 2-6 nm                |
| Uzunluk                | 10-35 µm              |
| Sıkıştırılmış yoğunluk | 0,3 g/cm <sup>3</sup> |
| Gerçek yoğunluk        | 2,4 g/cm <sup>3</sup> |
| Spesifik yüzey alanı   | 510 m <sup>2</sup> /g |



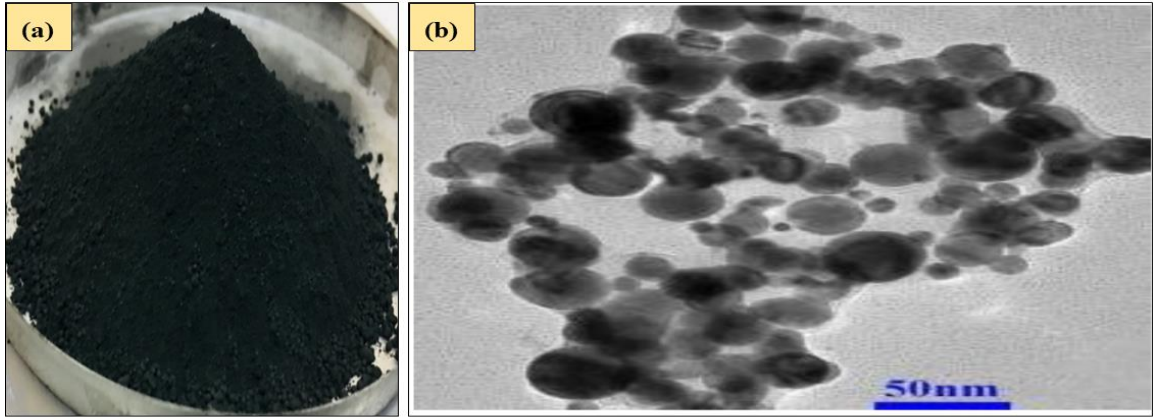
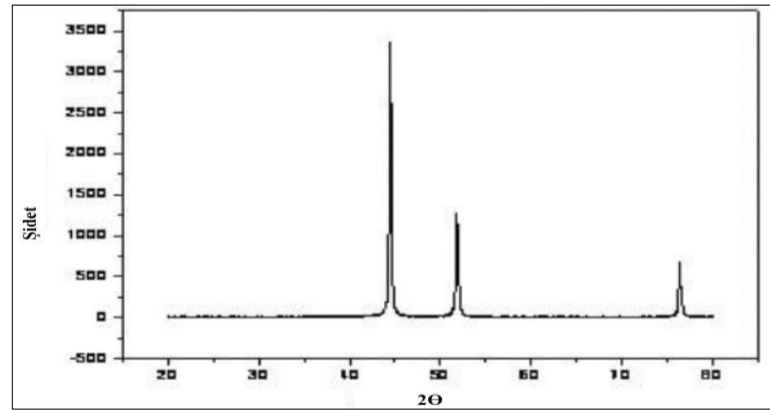
**Şekil 50.** (a) ÇDKNT’lerin dijital görüntüsü (b) SEM görüntüsü.

### Nano Nikel Parçacıkları

Bu çalışmada, diğer iletken malzemeler olarak Nano nikel tozu (%99.95 saflıkta, 65 nm, metal esaslı) kullanılmıştır. Nano nikelin dijital ve SEM ile elde edilen görüntüleri Şekil 51’de gösterilirken özellikleri Tablo 7’de verilmiştir. NNi’nin XRD’si Şekil 52’de gösterilmiştir.

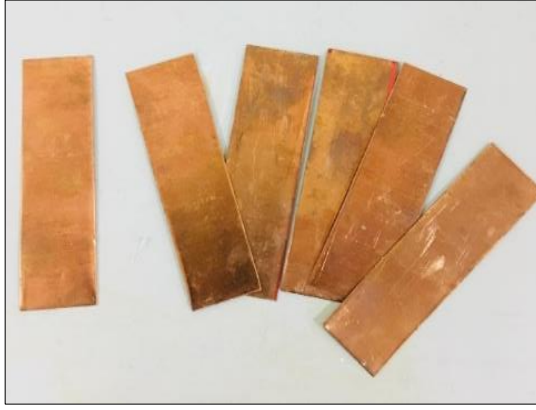
**Tablo 7.** Nano Nikel'in Teknik Özellikleri

| Fiziksel özellikleri                    |      |      | Değer   |       |
|-----------------------------------------|------|------|---------|-------|
| Şekil                                   |      |      | Küresel |       |
| Renk                                    |      |      | Siyah   |       |
| Ortalama partikül boyutu (nm)           |      |      | 65      |       |
| Gerçek yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )    |      |      | 8,9     |       |
| Belirli yüzey alanı (m <sup>2</sup> /g) |      |      | 10-16   |       |
| Element analizi                         |      |      |         |       |
| Ni                                      | Si   | Mg   | Fe      | Diğer |
| ≥99,95                                  | ≤0,1 | ≤0,1 | ≤0,1    | ≤0,05 |

**Şekil 51.** (a) NNi dijital görüntüsü (b) NNi SEM görüntüsü.**Şekil 52.** NNi'nin XRD analizi.

### Elektrotlar

Önceki çalışmalarda alüminyum folyo, bakır örgü, çelik hasır ve pirinç levha gibi metalik esaslı malzeme elektrotlar olarak kullanılmıştır. Bu çalışmaların çoğu, bakır plakanın, yüksek elektrik iletkenliği nedeniyle sensörlerin elektrik direnç testlerinde daha iyi sonuçlar verebileceğini göstermiştir. Bu nedenle, tüm deneyler için elektrotlar olarak 0,3 mm kalınlığında bakır plaka seçilmiştir. Elektrotların boyutları, Şekil 53'te gösterildiği gibi (2 x 6,5 cm) dir.



**Şekil 53.** 2 x 6,5 cm bakır elektrotlar.

### **Deneylerde Kullanılan Aletler**

**Karıştırma Mikseri:** Deneylerde (TS-EN-196-1 2016)'da belirtilen özelliklere sahip bir harç mikseri kullanılmıştır (Şekil 54). Bu mikser 7 lt hacimli olup 3000 rpm'e kadar çıkabilen dönüş hızına sahip mikserdir.

**Yayılma Tablası:** Harcın işlenebilirliğini ölçmede (ASTM-C230/C230M-14 2014)'e uygun yayılma tablası kullanılmıştır (Şekil 55). 254 mm pirinç tablası ve pirinç kalıptan oluşan düzenek, taze betonun 15 saniyede 25 defa düşürülmesi sonucu çapında meydana gelen yayılmanın ölçülmesi esasına dayanır. Pirinçten yapılmış konik kalıp 100 mm'lik taban çapı boyutu, 70 mm üst çapı, 50 mm yüksekliğe sahiptir.



**Şekil 54.** Deneylerde kullanılan harç mikseri.



**Şekil 55.** Yayılma tablası.

**Numune Kalıpları:** Çalışmada, (TS-EN-12390-1 2012)'e uygun 50x50x50 mm boyutunda 3 küpten oluşan çelik kalıplar kullanılmıştır (Şekil 56).



**Şekil 56.** Numune kalıpları.

**Vibrasyon Masası:** Üretilen harçlar, (TS-EN-12390-2 2010) standartlarına uygun, en düşük frekansı 40 Hz (dakikada 2400 devir) olan vibrasyon masasında yerleştirilmiştir (Şekil 57).



**Şekil 57.** Vibrasyon masası.

**Ultrasonik Sonikatör:** Nanotoz-su karışımının homojen bir şekilde karışması ve kararlı olabilmesi için uygulanan ön yöntemlerden biri karışımı bir süre ultrasonik titreşime maruz bırakmaktır. Bu çalışmada Hacettepe Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Ultrasonik sonikatör (Vibra-Cell™, VCX750) kullanılmıştır (Şekil 58). Ultrasonik sonikatörün; ultrasonik gücü 750 Watt, ısıtıcı gücü 100°C'e kadar çıkabilmekte ve ultrasonic frekansı ise 28 kHz'dir.



**Şekil 58.** Ultrasonik Sonikatör (Vibra-Cell™, VCX750).

**Basınç Dayanımı Test Presi:** Numunelerin basınç dayanımının bulunmasında (TS-EN-12390-3 2010)'a göre dört pres makinası kullanılmıştır (Şekil 59-62). Monotonik yükleme testi için Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde bulunan 1000 kN kapasiteli, yükleme hızı otomatik olarak ayarlanabilen hidrolik pres kullanılmıştır (Şekil 59). Yükleme hızı basınç dayanımı üzerinde etkili olduğundan tüm numuneler sabit bir yükleme hızı ile ( $0.7 \text{ kN/s} \approx 0.28 \text{ MPa/s}$ ) yüklenmiştir. Bu yükleme hızı TS-EN-12390-3 2010'da belirtilen aralık ( $0.2\text{-}1 \text{ MPa/s}$ ) içinde kalmaktadır.

Periyodik yükleme testi için Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Shimadzu 100 kN (AG-X 100 kN) kapasiteli, yükleme hızı otomatik olarak ayarlanabilen hidrolik pres kullanılmıştır (Şekil 60). Numunenin farklı basınç yükleri altında elastik ve plastik bölge dahilinde yükleme hızı değiştirilerek test edilmiştir. Bu farklı yükleme tarzı pres makinasına bağlayan bilgisayarı kullanarak ayarlanmıştır. Simetrik tekrarlayan periyodik yükleme yapabilmek için Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde bulunan BESMAK marka 300 kN kapasiteli pres kullanılmıştır (Şekil 61). Beton elemanın monotonik ve periyodik basınç testlerini yapabilmek için Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde bulunan 3000 kN kapasiteli, yükleme hızı otomatik olarak ayarlanabilen hidrolik pres kullanılmıştır (Şekil 62).



**Şekil 59.** Monotonik yükleme testi için pres aleti.



**Şekil 60.** Periyodik yükleme testi için test presi.



Şekil 61. Periyodik yükleme testi için 300 kN test presi.



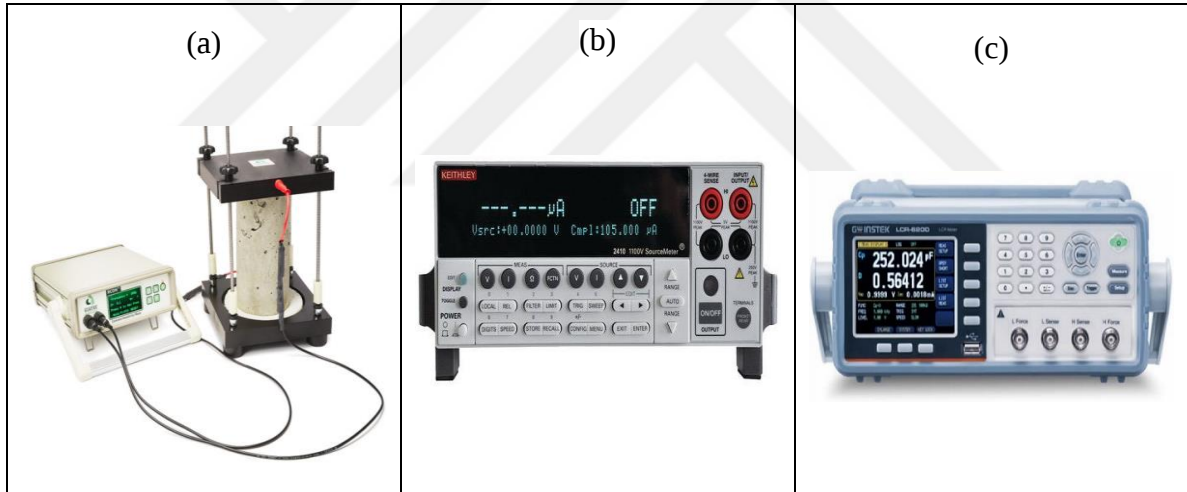
Şekil 62. Monotonik ve periyodik yükleme testi için 3000 kN kapasiteli pres aleti.

**Beton Elektrik Direnç Ölçer:** Deneylerde çimento kompozitlerin elektrik direnci ölçmek için üç ölçer kullanılmıştır (Şekil 63). Şekil 63a'da gösterildiği gibi RCON™ beton özdirenç ölçer-GIATEC betonun elektrik direncini ölçmek için kullanılmaktadır. Beton direnç

ölçer, beş saniyeden daha kısa sürede sonuç vermektedir ve  $0^\circ$  ile  $180^\circ$  arasındaki faz açısını tespit etmek için 1 Hz ile 30 kHz arasında geniş bir frekans aralığında çalışan alternatif akım (AC) empedans tekniği kullanılmaktadır. AC RCON™ beton direnç ölçer-GIATEC sadece iki prob konfigürasyonuna sahiptir.

Doğru akım (DC) elektrik direnci ölçmek için Keithley 2410 dijital multimetre (Keithley Instruments Inc., ABD) kullanılmıştır (Şekil 63b). Keithley 2400- 2410, 2400 serisi 1100V, 1A, 20W olan SourceMeter® birimli, (SMU) cihazıdır. Multimetre özellikleri arasında yüksek tekrarlanabilirlik ve düşük gürültü bulunmaktadır. Doğru akım (DC) direnci, Keithley 2410 dijital multimetre (Keithley Instruments Inc., ABD) ile iki ve dört elektrot yöntemi ile ölçülmüştür.

Tez çalışmasını destekleyen BAP projesi ile alınan GWINSTEK LCR-6200 Metre cihazı DC ve AC resistans ölçüm özelliğine sahiptir. Cihazın test frekansı en az 10 Hz ile 200 kHz arasında olmaktadır. GW-LCR-6200 cihazı iki ve dört elektrot yöntemi ile çalışmaktadır (Şekil 63c).



**Şekil 63.** Deneylerde kullanılan elektrik direnç ölçer (a) Giatec RCON2 (b) Keithley 2410 (c) GW LCR-6200 dijital multimetre.

**Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM):** Çalışmada seçilen numunelerden basınç dayanımında kırılan parçalardan SEM ile görüntü alınmıştır. Quanta FEG 250 Taramalı Elektron Mikroskobu (Şekil 64) cihazının kullanıldığı çalışmalarda numune tutucu (holder) ile numune arasındaki elektron deşarjını sağlamak için kontakt malzemesi olarak sıvı karbon kullanılmıştır. Analizler, Erzurum Teknik Üniversitesindeki Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (YÜTAM) yapılmıştır.



**Şekil 64.** Taramalı Elektron Mikroskobu.

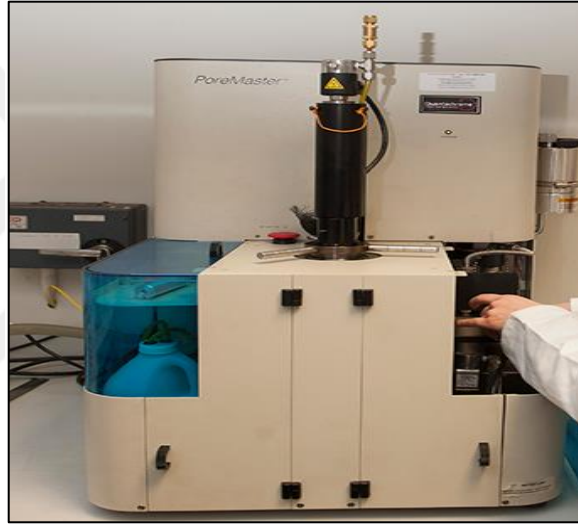
**X-ray Cihazı (XRD):** Numunelerin kristalografik analizlerinin belirlenmesinde Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (DAYTAM) bulunan EMPYREAN, Malvern Panalytical marka X-Ray cihazı kullanılmıştır (Şekil 65). Cihaz,  $\text{CuK}\alpha$  radyasyonlu ve Cu Xray tüplü olup numuneler 40kV/40mA akım arasında veri toplama aralığı  $2\theta=5-90^\circ$  olacak şekilde  $2^\circ/\text{dakika}$  hızında taranmıştır. Bu deney için mekanik deneylerden elde edilen parçalar öğütülerek 75  $\mu\text{m}$  no.'lu elekten geçecek şekilde eilenmiş ve geçen kısımları alınarak numune hazırlanmıştır.



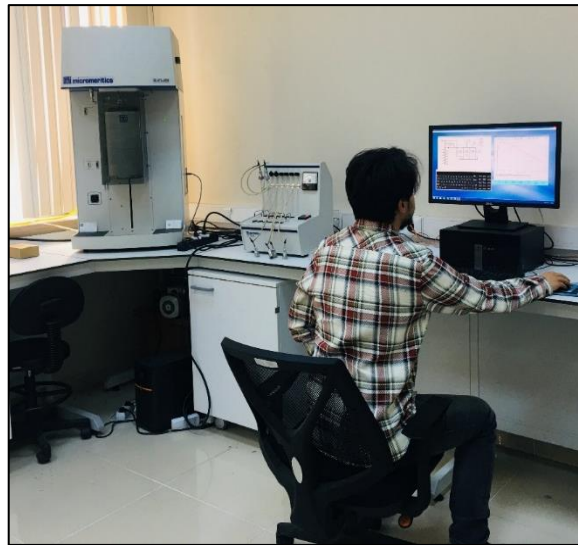
**Şekil 65.** X-Ray Cihazı.

**Cıvalı Porozimetre Aleti (MIP):** Numunelerin boşluk yapısı ODTÜ Merkez Laboratuvarı'nda bulunan Poremaster 60 marka Cıvalı Porozimetre Cihazı (Şekil 66) ile analiz edilmiştir. Temas açısı  $130^\circ$ , cıva yüzey gerilimi 0.485 N/m ve maksimum cıva basıncı 40 000 psi'dır. Porozite tayini 56 günlük yüksek hızda kırılan numunenin orta kısmından  $\varnothing 15 \times 10$  mm'lik parçalar alınarak analiz yapılmıştır. Analiz öncesi numuneler  $100 \pm 5^\circ\text{C}$  sıcaklıkta kurutulmuştur (Chan *et al.* 2000; Kalliopi 2005).

**BET Analiz Cihazı:** Numunelerin yüzey alanını belirlemek amacıyla Şekil 67'de görülen Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (DAYTAM) bulunan BET cihazı (micromeritics 3 flex) kullanılmıştır. Numunenin orta kısmından  $\varnothing 10 \times 5$  mm'lik parçalar alınarak analiz yapılmıştır. Analiz öncesi numuneler  $100 \pm 5^\circ\text{C}$  sıcaklıkta kurutulmuştur.



**Şekil 66.** Cıvalı Porozimetre Aleti.

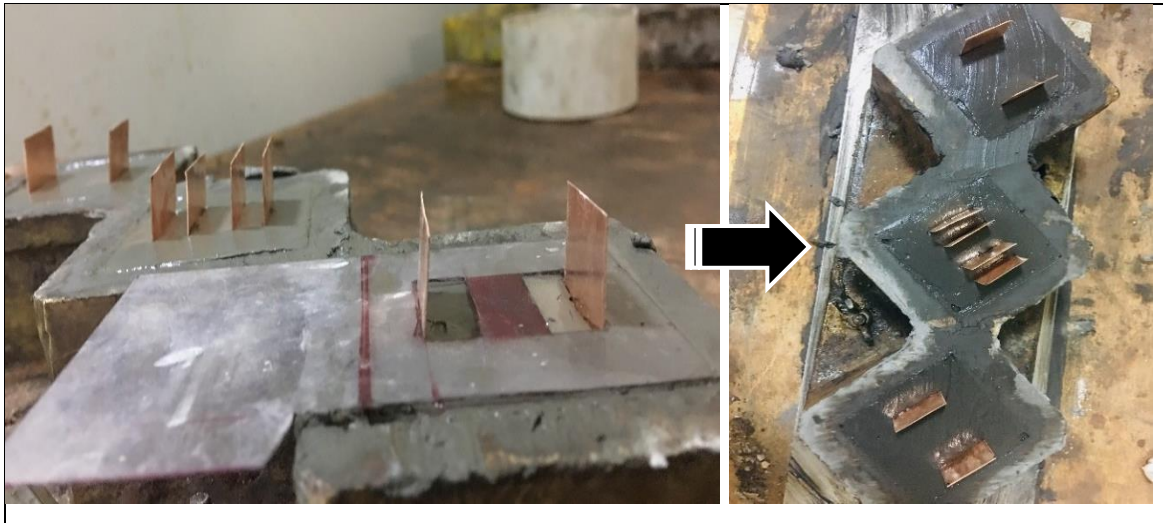


**Şekil 67.** BET cihazı.

## Numuneleri Kalıplara Yerleştirme ve Elektrotların Numunelere Yerleştirilmesi

Kendiliğinden algılayan çimento kompozitleri reolojik davranış göstermektedir. Karışımı yerleştirmek için etkili bir kalıplama teknolojisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada dikkate alınan kalıp teknolojisi döküm ve titreşimi içermektedir. Çalışmamız, kompozitlerin basınç yükü altında kendiliğinden algılama özelliklerine odaklandığından, tüm örnekler küp (50x50x50mm) boyutlarda kalıplara dökülmüştür. Kalıplar Şekil 56’da gösterilmektedir. Ek olarak, beton eleman içine yerleştirilmiş bir sonraki deneylerde kullanılacak sensörler aynı küp boyutlarda olacaktır. Masa titreşimi, Şekil 57’de gösterildiği gibi numunenin içindeki hava kabarcıklarını ortadan kaldırmak için kullanılmıştır.

Numunelere vibrasyon tablasında yerleştirdikten sonra bakır elektrotlar gömülmüştür. Önceki bölüm’de belirtildiği gibi, bakır elektrotların boyutları (2x6,5cm) 0,3 mm kalınlığında kullanılmıştır. Bakır levhalar, önceki çalışmalarda önerildiği gibi yüksek elektrik iletkenliği nedeniyle elektrot olarak seçilmiştir (Chen *et al.* 2004; Wang *et al.* 2004; Liu *et al.* 2010; Zhang and Li 2011; Kim *et al.* 2014; Gopalakrishnan *et al.* 2015a; Kim *et al.* 2016; Sassani *et al.* 2018; Yoo *et al.* 2018b; Dong *et al.* 2019a). Bakır levhanın kalınlığı (0.3mm), testler sırasında kırılabilen veya gömme sırasında bükülebilen daha ince levhadan daha ideal bir levha seçilmiştir. Daha kalın bakır levha kullanılması gereksizdir, çünkü ekonomik değildir ve kompozitlerin basınç dayanımını etkileyebilmektedir. Ancak, elektrotların gömülmesi, düz tutulmaları açısından önemlidir ve elektrotlar arasındaki mesafe eşit olmalıdır. Bu amaçla, gömülmeyi sağlamak için belirli bir boyutta kesilmiş bir şeffaf plastik plaka kullanılmıştır. Gömme işlemi Şekil 68’de gösterilmektedir. Elektrotların gömülmesinden sonra, numunenin üst yüzeyi düzeltilmiştir.



Şekil 68. Elektrotların numunelere gömülmesi.

## Kürlenme

Kendiliğinden algılayan çimento kompozitlerinin kürlenmesi çok önemlidir çünkü hidratasyon sürecini ve kompozitler içindeki gözenek yapılarını etkilemektedir. Ek olarak, farklı kürlenme teknikleri, mekanik özelliklerin farkı, iletken maddeleri ve matris arasındaki arayüz bağları ve kompozitlerin su içeriğinde gibi önemli bir rol oynayabilmektedir. Bu nedenle, elektrik veya kendiliğinden algılama özellikleri çimento kompozitlerinin kürlenme teknolojisi ile yakından ilişkilidir (Fu *et al.* 1997a; Chen *et al.* 2004; Azhari 2008).

Bu çalışmada, numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra buharlaşmayı engelleyen plastik poşetlerde tutularak ideal bir kürlenme yöntemi kullanılmıştır (Şekil 69). Bu işlem numunenin içerisindeki nemin kaybolmasını engellemek, ortam koşullarından izole etmek ve hepsinin nem durumunu eşitlemek için yapılmıştır. Bu çalışmada, bütün numuneler aynı koşullarda tutulmuştur. Numunelerin içindeki su içeriği çimento kompozitlerinin elektriksel özelliklerine olumsuz bir şekilde etkileyebilmektedir. Suda bırakılan numuneler ıslak olduğundan düşük elektriksel özellikler gösterirken, dışarıda bırakılan numuneler çok kuru olduğundan yüksek elektriksel özellikler gösterecek ve mekanik özellikler olumsuz etkilenecektir. Bu yöntemin, elektrik dirençlerinde daha gerçek ve doğru değerler vereceği düşünülmektedir. Çünkü kompozitler, hidratasyon işlemi sırasında azalmakta olan kendi karışım suyuna sahiptir. Ayrıca, mekanik özelliklerin ısıtma veya kurutma yöntemlerinde olumsuz etkilenmeyeceği düşünülmektedir.



**Şekil 69.** Numunelerin kürlenmesi.

## Karışım Tasarımı

Kendiliğinden algılayan çimento kompozitleri için karışım oranları esas olarak geleneksel kompozitlerde kullanılan karışım oranlarına ve iletken katkı malzemesine dayanmaktadır. Ancak, bu malzemelerin varlığı, boy/çap oranı ve yüksek spesifik yüzey alanı nedeniyle taze çimento-kompozit matrisinin işlenebilirliğini etkileyecektir. Örneğin, çimentoya karbon fiber eklenmesi çimento harcının reolojik özelliklerini etkilemektedir (Banfill *et al.* 2006). Artan lif içeriği ve uzunluğunun, taze çimento harcının karbon fiber ile akma gerilmesi ve plastik viskozitesini arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, kompozitlerin lif içeriğinin artması taze betonun karışımını zorlaştırmakta ve işlenebilirliği azalmaktadır (Baeza *et al.* 2013a).

Ek olarak, dispersiyon malzemesinin kullanılması çimento kompozitlerinin işlenebilirliğini etkileyebilmektedir. Sanchez ve Ince (2009) silis dumanı ve karboksietil selüloz kullanımının karbon fiber beton karışımlarının kıvamında bir artışa yol açtığını bulmuşlardır. Bu nedenle kendiliğinden algılayan çimento kompozitleri üretiminde uygun bir karıştırma oranı, deneme karışım yöntemleriyle denenerek bulunmalıdır (Han *et al.* 2006).

### Karışım Yöntem Tesbiti ve Dispersiyon Teknolojisi

İletken malzemelerin çimento matrisi içinde homojen karıştırılması zor ve karmaşık bir işlemdir. Bu nedenle, ön çalışmalarda birçok karışım yöntemi denenmiştir. Ön çalışmalarda, KF, CDKNT ve NNi içeren malzeme miktarı tüm karışımlar için bağlayıcı malzemelerin toplam ağırlığının %0.5'i olarak seçilmesine karar verilmiştir. Farklı iletken malzemelerin bu oranları, önceki çalışmalara dayanarak belirlenmiştir (Bontea *et al.* 2000; Wen and Chung 2001a; Chen *et al.* 2005; Wen and Chung 2006b; Li *et al.* 2007; Han *et al.* 2009a; Han *et al.* 2009b; Meehan *et al.* 2010; Liu and Wu 2011; Azhari and Banthia 2012; Yu and Kwon 2012; Ding *et al.* 2013; Konsta-Gdoutos and Aza 2014; Ding *et al.* 2015; Han *et al.* 2015c; Zhang *et al.* 2016; Al-Dahawi *et al.* 2017; Chen *et al.* 2017; Jiang *et al.* 2018).

İletken malzemeler karışıma eklendiklerinde homojen dağılımı daha zor hale getiren karmaşık bir morfolojiye ve yüksek yüzey enerjisine sahiplerdir. Bu nedenle de malzeme tipine ve boyutuna bağlı olarak ideal kompozitleri elde etmek için etkili bir karıştırma tekniği uygulanmalıdır. Genel olarak, kendiliğinden algılayan çimento betonunun işlenmesi üç aşama içerir: karıştırma/dağıtma, kalıplama ve kürlenmedir. İlk adım, iletken malzemelerin çimentoya farklı karıştırma teknikleri ile karıştırılması, daha sonra numunelerin kalıplanması ve kürlenmesi ile temsil edilen diğer aşamalarla başlamaktadır.

Karıştırma teknikleri kompozitin mekanik ve elektriksel özelliklerini doğrudan etkileyebilmektedir. Nano iletken malzemelerin karışımı iyi sağlamak için çimento matrisinde

eşit olarak dağıtılması gerekmektedir (Han *et al.* 2017a). Bu aşamada da işlem, yöntem, ekipman ve enerji gibi birçok önemli faktör vardır.

Karıştırma/dispersiyon yöntemleri, fiziksel veya kimyasal yöntemler olabilmektedir. Fiziksel yöntemler ya mekanik karıştırma (yüksek kesmeli karıştırma ve bilyalı öğütme gibi) ya da ultrasonikasyon içermektedir. Kimyasal teknikler (yüzey modifikasyon yöntemleri vb.) ise malzeme bileşimi maddelerinin yüzey yapılarını değiştirmek için tasarlanmıştır. Bununla birlikte, kimyasal yöntemler, çimento yapılarının mekanik ve elektriksel özelliklerini etkileyebilecek yüksek sıcaklık veya nem gibi özel işlemlere ihtiyaç duyabilmektedir (Han *et al.* 2019). Malzemeleri dağıtmak için sadece fiziksel veya kimyasal bir yöntem kullanmak zordur. Bu nedenle, bazı karıştırma işlemlerinde, fiziksel ve kimyasal yöntemler genellikle iletken malzemeleri dağıtmak için birlikte kullanılmaktadır (Sun *et al.* 2013; Gupta *et al.* 2017; Zhang *et al.* 2018).

Birçok araştırmacı, kendiliğinden algılayan çimento kompozitlerinin karıştırılması/dağıtılması yoluyla iki çelişkili etkinin kontrol ve denge de olması gerektiğini gözlemlemişler. İlki, iletken malzemelerini, varsayılan enerji ve zamandan bağımsız olarak çimento matrisinde homojen bir dispersiyon sağlayacak şekilde karıştırılmalıdır. İkincisi, yüksek karıştırma/dağıtma enerjisi kullanılması nedeniyle oluşabilecek iletken malzemelerini istenmeyen kırılması durumudur (Vaisman *et al.* 2006; Shah *et al.* 2016).

Bu çalışmada, çimento kompozitlerinin elektriksel özelliklerine dayalı olarak homojen karışımları sağlamak için birçok araştırmacı tarafından önerilen birçok karıştırma yöntemi kullanılarak en iyi yöntemin bulunması sağlanmıştır. Nano ölçekli malzemelerin (KNT ve NNi) dispersiyonu için farklı altı karışım yöntemi kullanılırken, mikro ölçekli (KF) malzemeler için aşağıda açıklandığı ve gösterildiği gibi üç yöntem kullanılmıştır.

- ***Mikro Ölçekte İletken Malzemelerin Dağılımı (KF)***

Literatür çalışmalarından hareketle, karbon-çimento kompozitlerinin elektriksel ve kendiliğinden algılama özelliklerine göre dispersiyon verimliliğini araştırmak için üç dispersiyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemler ve kontrol numunenin karışım yöntemi Tablo 8’de gösterilmiştir.

- ***Nano Ölçekteki İletken Malzemelerin Dağılımı***

Nanomalzemelerin dağılımı mikro malzemelerinkinden daha karmaşıktır. Önceki çalışmalardan hareketle, ÇDKNT’leri karıştırmak için altı yöntem ve ayrıca Nano nikel parçacıkları (NNi) için altı yöntem kullanılmıştır. Bu ön çalışmada KNT ve NNi kullılan karışım yöntemleri Tablo 9 ve 10’da gösterilmiştir.

**Tablo 8.** Kontrol ve KF’li Kompozitlerde Kullanılan Karıştırma Yöntemleri

| Karışım yöntemi        | Kuru malzemeler Karışımı (1)                                                                | Mikro malzemeler Karışımı (2)                                                                                                                                                                                                           | Harç üretimi (1)+(2)                                                                                                                                                                                                                                                      | Kaynaklar                    |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| <b>Kontrol numune</b>  | Kuru malzemeler (PC+SD) bir harç karıştırıcısında 100 rpm’de <b>10 dk</b> karıştırılmıştır. | -                                                                                                                                                                                                                                       | Gereken suyun %70’ini çimentolu malzemelere ilave edilerek harç karıştırıcısında <b>2 dk</b> boyunca karıştırılmıştır. Sonra, gerekli suyun geri kalanıyla HRWR karıştırılmış, bu karışım çimentolu kompozit karışımına ilave edilerek <b>2 dk</b> daha karıştırılmıştır. | Al-Dahawi <i>et al.</i> 2017 |
| <b>1.yöntem (KF-1)</b> | Kuru malzemeler (PC+SD) bir harç karıştırıcısında <b>5 dk</b> karıştırılmıştır.             | KF, su, dispersan (çimentonun ağırlıkça %0.25) ve köpük kesici (çimentonun ağırlıkça %0.25)) ilave edilerek mutfak blenderi ile <b>3 dk</b> boyunca karıştırılmıştır.                                                                   | KF çözeltisi çimentolu malzemelere ilave edilerek harç karıştırıcısında 100 rpm’de <b>5 dk</b> karıştırılmıştır.                                                                                                                                                          | Chen <i>et al.</i> 2017      |
| <b>2.yöntem (KF-2)</b> | Kuru malzemeler (PC+SD) bir harç karıştırıcısında <b>5 dk</b> karıştırılmıştır.             | KF kuru karışıma ilave edilerek <b>5 dk</b> 300 rpm’de harç karıştırıcısında karıştırılmıştır.                                                                                                                                          | Gerekli su ve HRWR KF’li çimentolu malzemelere ilave edilerek harç karıştırıcısında <b>5 dk</b> boyunca karıştırılmıştır.                                                                                                                                                 | Lee <i>et al.</i> 2017       |
| <b>3.yöntem (KF-3)</b> | Kuru malzemeler (PC+SD) bir harç karıştırıcısında <b>5 dk</b> karıştırılmıştır.             | KF, sürfaktan (SDS) ve gerekli suyun % 30’u ile <b>20 dk</b> 300 rpm’de harç karıştırıcısında karıştırılmıştır. Sonra, geri kalan su, HRWR ve silis dumanı KF çözeltisine ilave edilerek düşük hızda <b>10 saniye</b> karıştırılmıştır. | Çimentolu malzemeler (PC+SD) KF çözeltisine ilave edilerek bir harç karıştırıcısında <b>3 dk</b> orta hızda karıştırılmıştır.                                                                                                                                             | Chen <i>et al.</i> 2005      |

**Tablo 9.** Çok Duvarlı Karbon Nano Tüplü (ÇDKNT) Kompozitlerde Kullanılan Karıştırma Yöntemleri

| Karışım yöntemi         | Kuru malzemeler Karışımı (1)                                                     | Nano malzemeler Karışımı (2)                                                                                                                                                             | Harç üretimi (1)+(2)                                                                                                                                                                                                         | Kaynaklar                                                                                   |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1.yöntem (KNT-1)</b> | Kuru malzemeler (PC+SD) bir harç karıştırıcısında <b>5 dk</b> karıştırılmıştır.  | KNT, su, HRWR ve köpük kesici, ultrasonik ( <b>Vibra-Cell™, VCX750</b> ) sonikatörde <b>10 dk</b> boyunca karıştırılmıştır.                                                              | Sonikasyon çözeltisi çimentolu malzemelere ilave edilerek harç karıştırıcısında <b>5 dk</b> karıştırılmıştır.                                                                                                                | Sun <i>et al.</i> 2017; Jiang <i>et al.</i> 2018; Yoo <i>et al.</i> 2018b                   |
| <b>2.yöntem (KNT-2)</b> | Kuru malzemeler (PC+SD) bir harç karıştırıcısında <b>5 dk</b> karıştırılmıştır.  | Su ve HRWR <b>1dk</b> boyunca birlikte karıştırılmıştır. Sonra, KNT çözeltiye ilave edilerek bir <b>ultrasonik sonikatör</b> kullanılarak <b>30 dk</b> sonike edilmiştir.                | Sonikasyon çözeltisi çimentolu malzemelere ilave edilerek harç karıştırıcısında <b>5 dk</b> karıştırılmıştır.                                                                                                                | Han <i>et al.</i> 2011b                                                                     |
| <b>3.yöntem (KNT-3)</b> | Kuru malzemeler (PC+SD) bir harç karıştırıcısında <b>5 dk</b> karıştırılmıştır.  | Süfaktan (SDS) su içinde <b>2dk</b> karıştırılarak çözülmüştür. SDS çözeltisine KNT ilave edilerek <b>1 saat</b> boyunca sonike edilmiştir.                                              | Sonikasyon çözeltisi çimentolu malzemelere ilave edilerek harç karıştırıcısında <b>15 dk</b> karıştırılmıştır. Sonra, karışıma köpük giderici (hacimce% 0.25) ilave edilerek <b>5 dk</b> daha karıştırılmıştır.              | Han <i>et al.</i> 2012b                                                                     |
| <b>4.yöntem (KNT-4)</b> | Kuru malzemeler (PC+SD) bir harç karıştırıcısında <b>5 dk</b> karıştırılmıştır.  | KNT, gerekli su ile <b>sonikatörü</b> kullanılarak <b>12 dk</b> süreyle sonike edilmiştir.                                                                                               | Sonikasyon çözeltisi ve (HRWR) çimentolu malzemelere ilave edilerek bir harç karıştırıcısında <b>3 dk</b> karıştırılmıştır. Sonra, karışıma köpük giderici (hacimce% 0.13) ilave edilerek <b>5 dk</b> daha karıştırılmıştır. | Li <i>et al.</i> 2007                                                                       |
| <b>5.yöntem (KNT-5)</b> | Kuru malzemeler (PC+SD) bir harç karıştırıcısında <b>5 dk</b> karıştırılmıştır.  | Süfaktan SDS ve su <b>3 dk</b> boyunca mutfak blenderi kullanılarak karıştırılmıştır. Sonra, SDS çözeltisine KNT ilave edilerek <b>12 dk</b> boyunca ultrasonikatörde sonike edilmiştir. | Sonikasyon çözeltisi çimentolu malzemelere ilave edilerek harç karıştırıcısında <b>3 dk</b> karıştırılmıştır. Sonra, karışıma köpük giderici (hacimce%0.25) ilave edilerek <b>3 dk</b> daha karıştırılmıştır.                | Han <i>et al.</i> 2009c; Han <i>et al.</i> 2012b; Han <i>et al.</i> 2012d; Yu and Kwon 2012 |
| <b>6.yöntem (KNT-6)</b> | Kuru malzemeler (PC+SD) bir harç karıştırıcısında <b>10 dk</b> karıştırılmıştır. | KNT, su, ve HRWR mutfak blenderi ile <b>15 dk</b> boyunca 3000 rpm'de karıştırılmıştır.                                                                                                  | KNT çözeltisi çimentolu malzemelere ilave edilerek harç karıştırıcısında 300 rpm'de <b>10 dk</b> karıştırılmıştır.                                                                                                           | Al-Dahawi <i>et al.</i> 2017                                                                |

**Tablo 10.** NNi’li Kompozitlerde Kullanılan Karıştırma Yöntemleri

| Karışım yöntemi         | Kuru malzemeler Karışımı (1)                                                     | Nano malzemeler Karışımı (2)                                                                                                                                                                                                                      | Harç üretimi (1)+(2)                                                                                                                                                                                                     | Kaynaklar                                                                 |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| <b>1.yöntem (NNi-1)</b> | Kuru malzemeler (PC+SD) bir harç karıştırıcısında <b>5 dk</b> karıştırılmıştır.  | NNi, su, HRWR ve köpük kesici, ultrasonik ( <b>Vibra-Cell™, VCX750</b> ) sonikatörde <b>10 dk</b> boyunca karıştırılarak malzemelerin çözeltisi hazırlanmıştır.                                                                                   | Sonikasyon çözeltisi çimentolu malzemelere ilave edilerek harç karıştırıcısında <b>5 dk</b> karıştırılmıştır.                                                                                                            | Sun <i>et al.</i> 2017; Jiang <i>et al.</i> 2018; Yoo <i>et al.</i> 2018b |
| <b>2.yöntem (NNi-2)</b> | Kuru malzemeler (PC+SD) bir harç karıştırıcısında <b>10 dk</b> karıştırılmıştır. | NNi, su, ve HRWR <b>30 saniye</b> boyunca düşük hızda mutfak blenderi ile karıştırılmıştır.                                                                                                                                                       | NNi çözeltisi, <b>100 rpm’de</b> kuru çimentolu malzemelere yavaşça ilave edilerek hızı <b>500 rpm’ye</b> yükseltilmiş ve bir çimento harcı karıştırıcısında <b>5dk</b> karıştırılmıştır.                                | Jiang <i>et al.</i> 2018                                                  |
| <b>3.yöntem (NNi-3)</b> | Kuru malzemeler (PC+SD) bir harç karıştırıcısında <b>10 dk</b> karıştırılmıştır. | NNi ve su bir mutfak blenderinde yüksek hızda ( <b>1600 rpm</b> ) yaklaşık <b>10 dk</b> karıştırılmıştır. Sonra, nano çözelti, ultrasonik sonikatörde (frekans 20 kHz, Enerji 2200 j, Sıcaklık 20 ° C, Genlik% 50) <b>10dk</b> sonike edilmiştir. | NNi çözeltisi çimentolu malzemelere yavaşça ilave edilerek yüksek hızda bir çimento harcı karıştırıcısında <b>5 dk</b> karıştırılmıştır.                                                                                 | Liu <i>et al.</i> 2018a                                                   |
| <b>4.yöntem (NNi-4)</b> | Kuru malzemeler (PC+SD) bir harç karıştırıcısında <b>10 dk</b> karıştırılmıştır. | NNi ve su ultrasonik sonikatörde (frekans 20 kHz, Enerji 2200 j, Sıcaklık 10 ° C, Genlik% 50) <b>1 saat</b> boyunca sonike edilmiştir.                                                                                                            | NNi çözeltisi çimentolu malzemelere ilave edilerek çimento harcı karıştırıcısında <b>300 rpm’de 3 dk</b> karıştırılmıştır.                                                                                               | Feng <i>et al.</i> 2013; Yang <i>et al.</i> 2015                          |
| <b>5.yöntem (NNi-5)</b> | Kuru malzemeler (PC+SD) bir harç karıştırıcısında <b>10 dk</b> karıştırılmıştır. | NNi kuru hali ile harç üretimi için en son eklenmiştir.                                                                                                                                                                                           | Gerekli su ve HRWR çimentolu malzemelere ilave edilerek çimento harcı karıştırıcısında <b>300 rpm’de 3 dk</b> karıştırılmıştır. Sonra NNi karışıma ilave edilerek <b>6 dk</b> boyunca <b>300rpm’de</b> karıştırılmıştır. | He and Shi 2008; Han <i>et al.</i> 2012a                                  |
| <b>6.yöntem (NNi-6)</b> | Kuru malzemeler (PC+SD) bir harç karıştırıcısında <b>10 dk</b> karıştırılmıştır. | NNi, su, ve HRWR <b>15 dk</b> boyunca <b>3000 rpm’de</b> mutfak blenderi ile karıştırılmıştır.                                                                                                                                                    | Sonikasyon çözeltisi çimentolu malzemelere ilave edilerek harç karıştırıcısında <b>300 rpm’de 10 dk</b> karıştırılmıştır.                                                                                                | Al-Dahawi <i>et al.</i> 2017                                              |

## Numune Hazırlama

### Mekanik ve elektriksel iletkenlik ölçümleri için ön karıştırma

Ön çalışmalarda, çimento kompozitlerinin elektriksel ve mekanik özelliklerini incelemek için boyutları 50x50x50 mm olan numuneler hazırlanmıştır. Önceki çalışmalarda önerildiği gibi tüm karışım yönteminde silis dumanı çimentonun ağırlıkça %5'i olarak kullanılmıştır (Al-Dahawi *et al.* 2017; Jiang *et al.* 2018). Ön denemelerden hareketle su/(bağlayıcı oranı (PÇ+SD) tüm karışımlarda 0.35 sabit oran olarak alınmıştır. Üretici firma tarafından önerilen ve istenmeyen hava kabarcıklarını gidermek için bağlayıcı malzemenin ağırlıkça %0.25'i oranında köpük kesici kullanılmıştır (Li Ping *et al.* 2010; Han *et al.* 2012d). Yüksek oranda su azaltıcı katkı maddesi, işlenebilirliği arttırmak için bağlayıcı malzemelerin (PC+SD) ağırlıkça %0.25'i oranında kullanılmıştır.

İletken malzemelerin partikül boyutları ve yüzey alanı değiştiğinden karışım sırasında akışkanlaştırıcı oranını sabit tutmak imkansızdır. Bu nedenle, HRWRA oranı istenilen işlenebilirlik elde edilinceye kadar ASTM C1437'e uygun çimento yayılma tablası testlerine dayanarak ayarlanmıştır (Şekil 70). Tüm iletken malzemeler farklı karışım yöntemlerinde yayılma testlerinin sonuçları Tablo 11'de gösterilmektedir. Tablo 11'de gösterildiği gibi çimento hamurunun işlenebilirliğini geliştirmek için bazı karıştırma yöntemlerinde % HRWR içeriği % 0.25'ten fazla artırılmıştır. Sonra, karışımı 50x50x50 mm boyutlarında yağlanmış küp kalıplara yerleştirilip bir masa vibratörü kullanılarak (30 saniye) sıkıştırılmıştır. Daha sonra, numunenin içine belli mesafe aralığında bakır elektrotlar yerleştirilmiştir. Küp çimento hamuru numunelerine iki veya dört elektrot yerleştirilmiştir. Her grup için üç numune üretilmiştir. Küp numuneler yağlanmış kalıplarda  $\pm 5\%$  RH,  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de 24 saat bırakılmıştır, daha sonra çıkarılmış ve önceden belirlenmiş olan  $95 \pm 5\%$  RH,  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de plastik poşetlerde daha önce açıklandığı gibi muhafaza edilmiştir. Bu numuneler, belirlenen deney günlerinde test edilmek için kürlenme ortamına bırakılmıştır.



Şekil 70. Yayılma tablası testleri (a) çimento hamuru (b) KF (c) NNi (d) KNT.

**Tablo 11.** Farklı Karışım Yöntemlerinde Numunelerin Yayılma Tablası Test Sonuçları

| Karışım yöntemleri             | HRWR* (%) | Ortalama yayılma test çapı (mm) |
|--------------------------------|-----------|---------------------------------|
| Kontrol                        | 0,25      | 203                             |
| <b>Karbon nanotüpler (KNT)</b> |           |                                 |
| 1. yöntem                      | 0,50      | 192                             |
| 2. yöntem                      | 0,25      | 190                             |
| 3. yöntem                      | 0,50      | 190                             |
| 4. yöntem                      | 0,25      | 180                             |
| 5. yöntem                      | 0,25      | 190                             |
| 6. yöntem                      | 0,25      | 170                             |
| <b>Nano nikel tozu (NNi)</b>   |           |                                 |
| 1. yöntem                      | 0,25      | 202                             |
| 2. yöntem                      | 0,25      | 210                             |
| 3. yöntem                      | 0,25      | 210                             |
| 4. yöntem                      | 0,50      | 198                             |
| 5. yöntem                      | 0,25      | 230                             |
| 6. yöntem                      | 0,25      | 213                             |
| <b>Karbon fiberler (KF)</b>    |           |                                 |
| 1. yöntem                      | 0,25      | 195                             |
| 2. yöntem                      | 0,25      | 198                             |
| 3. yöntem                      | 0,25      | 193                             |

\*HRWR: Yüksek oranda su azaltıcı katkı.

#### **Elektriksel direnç ve kendiliğinden algılama ölçümleri için numune hazırlama**

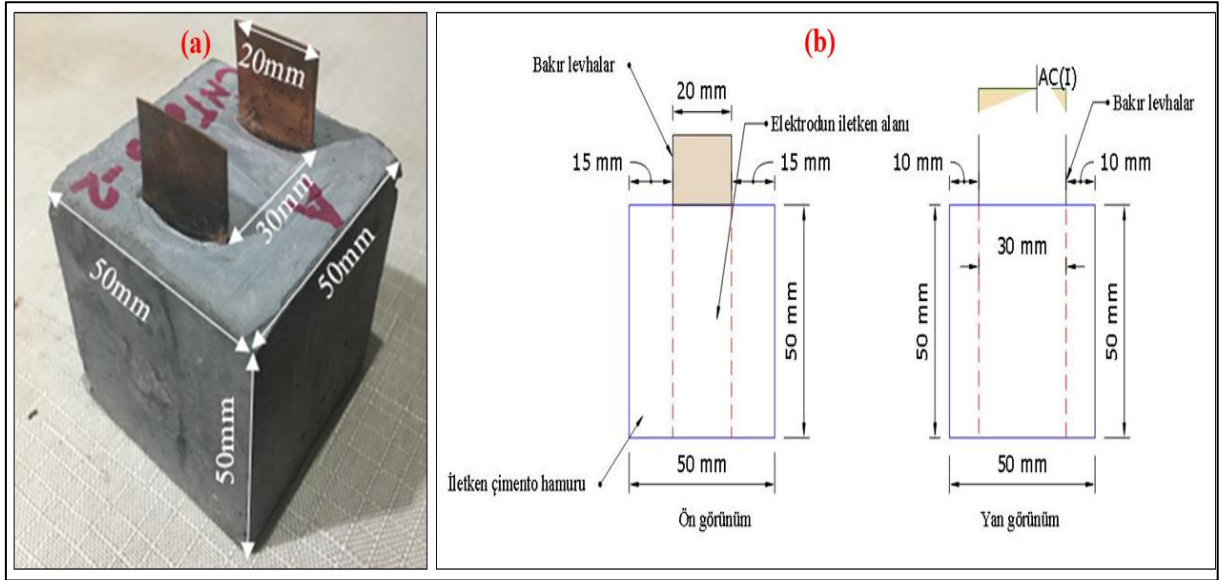
Kullanılan iletken malzemeler(KF, NNi ve KNT) farklı yoğunluklara sahip olduğundan, karışım oranları verilirken hacimsel oran tercih edilmiştir. İletken malzemelerin hacim içerikleri; %0, 0.1, 0.25, 0.50, 0.75 ve 1 olarak seçilmiştir. Çimento ve silis dumanı bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Tüm karışımlarda silis dumanı, çimento ağırlığının %5'i olarak alınmıştır. Su kütlesi ve su azaltıcı, bağlayıcının kütlesine göre alınmıştır. Su/bağlayıcı oranı kullanılan iletken malzemenin türü ve karışım oranlarına göre 0.35-0.45 aralığında değişmektedir. Bazı kompozitler karışım esnasında iletken malzemelerin oranı artıkça gerekli işlenebilirliği sağlamak için süper akışkanlaştırıcının miktarı artmaktadır. Deneylerde kullanılan kodlama ve karışım oranları Tablo 12’de gösterilmiştir.

KNT0.5 olarak kodlanmış numuneler hacimce %0.5 KNT’ye sahip olan grubu, NNi0.25 ise hacimce %0.25’lik nikel kompozit içeren grubu temsil etmektedir. Hibrit kompozitler, örneğin, KFKNT0.5, hacimce %0.25 KF ve %0.25 KNT içeren grup anlamına gelmektedir. Tüm grup kodları aynı şekilde düşünülerek Tablo 12’de gösterilmiştir.

**Tablo 12.** Kompozitlerin Karışım Oranı

| Numune kodu                                                      | İletken Malzemeler hacimce % (ağırlıkça %) | S/B  | HRWR (%) |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------|----------|
| Kontrol                                                          | -                                          | 0,35 | 0,25     |
| <b>Karbon nanotüpler (KNT) numuneleri</b>                        |                                            |      |          |
| KNT0.1                                                           | 0,1 (0,13)                                 | 0,35 | 0,25     |
| KNT0.25                                                          | 0,25 (0,326)                               | 0,35 | 0,375    |
| KNT0.5                                                           | 0,5 (0,562)                                | 0,35 | 0,75     |
| KNT0.75                                                          | 0,75 (0,987)                               | 0,40 | 0,85     |
| KNT1                                                             | 1 (1,3)                                    | 0,45 | 1        |
| <b>Nano nikel tozu (NNi) numuneleri</b>                          |                                            |      |          |
| NNi0.1                                                           | 0,1 (0,483)                                | 0,35 | 0,25     |
| NNi0.25                                                          | 0,25 (1,209)                               | 0,35 | 0,0125   |
| NNi0.5                                                           | 0,5 (2,418)                                | 0,35 | 0        |
| NNi0.75                                                          | 0,75 (3,627)                               | 0,35 | 0        |
| NNi1                                                             | 1 (4,837)                                  | 0,35 | 0        |
| <b>Karbon fiber (KF) numuneleri</b>                              |                                            |      |          |
| KF0.1                                                            | 0,1 (0,092)                                | 0,35 | 0,25     |
| KF0.25                                                           | 0,25 (0,230)                               | 0,35 | 0,25     |
| KF0.5                                                            | 0,5 (0,462)                                | 0,35 | 0,25     |
| KF0.75                                                           | 0,75 (0,692)                               | 0,35 | 0,25     |
| KF1                                                              | 1 (0,924)                                  | 0,35 | 0,25     |
| <b>Karbon fiberler (KF) + Karbon nanotüpler (KNT) numuneleri</b> |                                            |      |          |
| KFKNT0.1                                                         | KF0,05 (0,046) + KNT0,05 (0,65)            | 0,35 | 0,25     |
| KFKNT0.25                                                        | KF0,0125 (0,115) + KNT0,0125 (0,163)       | 0,35 | 0,35     |
| KFKNT0.5                                                         | KF0,25 (0,230) + KNT0,25 (0,326)           | 0,40 | 0,55     |
| KFKNT0.75                                                        | KF0,375 (0,346) + KNT0,375 (0,489)         | 0,4  | 0,85     |
| <b>Karbon fiber (KF) + Nano nikel tozu (NNi) numuneleri</b>      |                                            |      |          |
| KFNNi0.1                                                         | KF0,05 (0,046) + NNi0,05 (0,242)           | 0,35 | 0,25     |
| KFNNi0.25                                                        | KF0,125 (0,115) + NNi0,125 (0,604)         | 0,35 | 0,25     |
| KFNNi0.5                                                         | KF0,25 (0,230) + NNi0,25 (1,209)           | 0,35 | 0,30     |
| KFNNi0.75                                                        | KF0,375 (0,346) + NNi0,375 (1,813)         | 0,35 | 0,35     |

Çimento hamurunun veya harcının akışkanlığından etkilenen iletken malzemelerin dağılımı önemlidir (Abrishambaf *et al.* 2013). Bu nedenle, ASTM C1437 uyarınca tüm test serileri için benzer yayılma değerleri ( $180 \pm 10$  mm) olarak benimsenmiştir (ASTM-C1437 2007). Bu akış değerleri, su/bağlayıcı oranının (W/B) artırılması ve Tablo 12’de gösterildiği gibi süper akışkanlaştırıcı kullanılarak düzeltilmiştir. Elektriksel özellikleri araştırılan çimento kompozitlerinin tek eksenli monotonik ve periyodik yükleme altında piezorezistif davranışını tespit etmek için Şekil 71’de gösterildiği gibi 50 mm-küp boyutlarında numunelere 20 mm genişliğinde ve 65 mm yüksekliğinde iki bakır levha yerleştirilmiştir. Gömme yüksekliği 50 mm ve bakır levhalar arasındaki aralıkların tümü 30 mm olarak seçilmiştir. Numune dışına çıkan elektrotların 15 mm’lik kısmı elektrotları direnç ölçere bağlamak için kullanılmıştır (Şekil 71). Tüm numunelerin kalıplama ve kurlenme işlemleri daha önce açıklandığı gibi yapılmıştır.



**Şekil 71.** Kendiliğinden algılayan küp numune (a) kamera fotoğrafı (b) çizim.

### Sensör üretimi için numune hazırlama

Numunelerin imalatı, piezo-dirençli sensörler ve beton elemanların hazırlanmasını içermektedir.  $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$  boyutlarındaki sensörler, daha önce açıklanan karışım yöntemlerine göre hazırlanmıştır. Şekil 71’de gösterildiği gibi her numuneye 30 mm aralıklı bakır levha elektrotları yerleştirilmiştir. Bakır elektrotlar  $20 \times 50 \text{ mm}$  boyutlarında hazırlanmış, elektrotların elektrik iletkenliği yüksek bir bakır tel ile (1.5mm çap) kaynaklanmıştır. Bakır elektrotun yüksekliği, numune yüksekliği boyunca devam etmesi için 50 mm olarak seçilmiştir. Sensörün dışından çıkan ve elektrotla bağlayan bakır tel dışarıdan yalıtımlı malzeme ile kaplanmıştır. Bu yöntem, elektriksel empedans değişim (FCI) okumalarının yalnızca gömülü sensörden alınması ve eleman betonundan etkilenmemesi için uygulanmıştır. Elektrot ve sensör hazırlama yöntemi Şekil 72’de gösterilmiştir.

Numuneler yağlanmış kalıplarda laboratuvar ortamında  $50 \pm 5$  bağıl nem,  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ’de 36 saat boyunca bekletilmiştir. Sonra, numuneler kalıptan çıkarılmıştır ve  $95 \pm 5$  bağıl nem,  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ’de laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Numuneler içerisine, nemin tekrar girmesini önlemek için Liu *et al.* (2018b) çalışmasında önerildiği gibi polyester reçineyle kaplanmıştır. Polyesterle kaplanan numuneler, su geçirmez boya ile boyanmış ve Şekil 72(e)’de gösterildiği gibi sensörlerin pürüzlülüğünü iyileştirmek ve aderansı geliştirmek için boya katılaşmadan önce yüzeylerine kum püskürtülmüştür. Numuneler beton elemana gömülmeye hazırlanarak  $95 \pm 5$  bağıl nem,  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ’deki laboratuvar ortamında 24 saat süreyle bekletilmiştir.



**Şekil 72.** Akıllı sensör hazırlaması.

Beton elemanın imal edilmesi için Banyhussan *et al.* (2016) çalışmasında kullanılan yöntemeye dayalı olarak sırasıyla aşağıdaki aşamalar gerçekleştirilmiştir;

1. İlk olarak, tüm bileşenler Tablo 13'te gösterildiği gibi karışım oranlarına göre tartılmıştır.
2. İnce ve iri agregalar (maksimum agreg boyutu 12,5 mm) yatay bir beton karıştırıcıda 3 dakika karıştırılmıştır.
3. PÇ ve UK daha sonra agreg karışımına ekleyerek 5 dakika daha karıştırılmıştır.
4. SD ve HRWRA (ağırlıkça %0.25 bağlayıcı) gerekli su miktarında ayrı ayrı karıştırıldıktan sonra 5 dakika daha karıştırılmak üzere önceden hazırlanmış agregalar karışımına eklenmiştir.

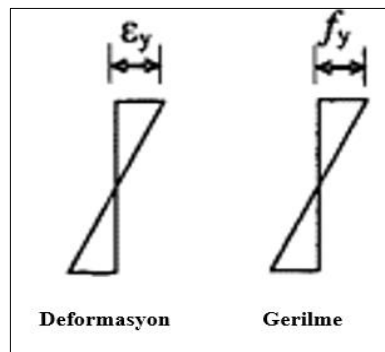
5. Homojen karışım 150 mm×150 mm×300 mm boyutlarında yağlanmış kalıba dökülmüş, ardından çelik çubukla yerleştirilmiştir. Şekil 73'te gösterildiği gibi döküm işlemi sırasında sensörün beton elemanın üst yüzey merkezine gömülmesine dikkat edilmiştir. Şekil 74'de gösterildiği gibi elemanın üst ve altı yüzeyinde basınç gerilmesi maksimum miktarında olup ortaya giderek gerilme en düşük miktara gelmektedir (Teng and Jiang 2008). Bu yüzden elemanın maksimum basınç gerilmesi olduğu noktada üst yüzeye sensörü yerleştirilmiştir. Sensör ile yeni eleman betonu arasındaki yapışmayı sağlamak amacıyla katkı maddesi Teknolatex500 kullanılmıştır.
6. Numuneler bir spatula ile düzeltilerek 24 saat sonra kalıptan çıkarılmak üzere plastik bir film ile kaplanmıştır.
7. Kalıptan çıkarıldıktan sonra, nemin sensörlere girmesini önlemek için elemanların üst yüzeyi epoksi ile kaplanmıştır, numuneler, basınç testlerine kadar 28 gün standart su kürü ortamında bekletilmiştir.

**Tablo 13.** Beton Elemanının Karışım Oranları (kg/m<sup>3</sup>)

| Çimento | UK  | SD | İnce ag. | İri ag. | Su  | HRWR |
|---------|-----|----|----------|---------|-----|------|
| 690     | 138 | 48 | 495      | 380     | 351 | 2.2  |



**Şekil 73.** Akıllı beton elemanın döküm işlemi (a) sensörlerin elemana gömülmesi, (b) eleman üst yüzeyinin epoksi reçine ile kaplanması.



**Şekil 74.** Beton elemanın tek eksenli basınç altında gerilme-deformasyon dağılım düzeni (Teng and Jiang 2008).

## Ölçüm Yöntemleri

### Ön çalışmalarda elektriksel direnç ve basınç dayanım ölçümü

Her bir karıştırma yöntemi için elektrik empedans/direnç ölçümleri, Şekil 75'te gösterildiği gibi RCON™ beton öz direnç ölçer-GIATEC kullanılarak 1, 3, 7, 14, 28, 60, 90 ve 180 gün sonunda test edilmiştir. Banthia *et al.* (1992), Chen *et al.* (2004) ve Yoo *et al.* (2018b) çalışmalarında istenmeyen polarizasyonu azaltmak için çalışma boyunca çalışma frekansı 30 kHz olarak ayarlamışlardır.

Bu çalışmada kullanılan beton öz direnç ölçer, Denklem (3) ile geometrik faktörler kullanılarak öz direnç değerlerine dönüştürülebilen empedans ve faz açısı değerlerini vermektedir. 28 günlük kürleme sonrasında TS EN 12390-3(2010)'e göre her bir karışım yöntemi ve kontrol numunesi için ortalama basınç dayanımını değerlendirmek için üç küp numune kullanılmıştır. Numunelerin basınç dayanımı daha önce anlatıldığı ve Şekil 59'da gösterdiği gibi basınç altında test edilmiştir.



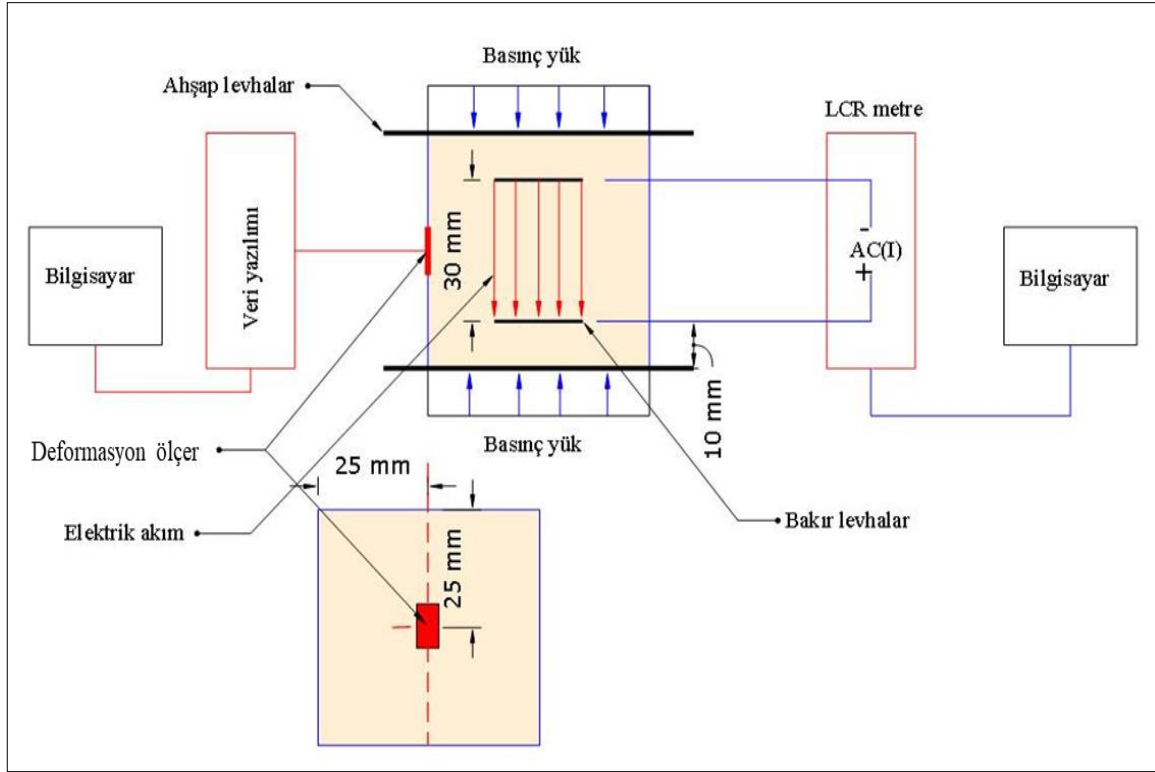
Şekil 75. Kompozitlerin elektrik direnç ölçümleri (Giatec RCON2).

### Elektriksel direnç ve kendiliğinden algılama ölçümleri

Bu çalışmada kompozitlerin elektriksel direnç ölçümlerinde Alternatif akım (AC) ölçüm yöntemi ve doğru akım (DC) yöntemi kullanılmıştır.

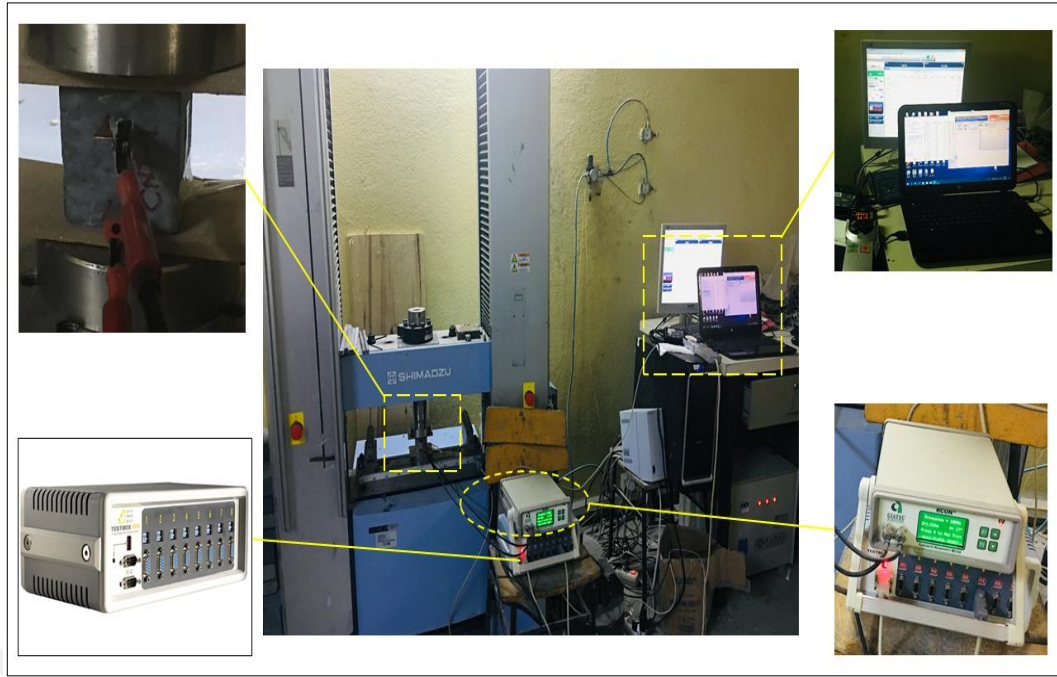
28 günlük numunelerin elektriksel empedansının ölçülmesinden sonra, kompozitlerin piezorezistif kapasitesini değerlendirmek için monotonik ve periyodik yükleme uygulanmıştır. Elektrik empedansını ölçmek için 2-prob-GIATEC RCON™ (30 kHz) beton direnç ölçer kullanılmıştır. Basınç testini temsil eden şematik diyagram Şekil 76'da gösterilmiştir. Elektrik empedansındaki değişiklikleri basınç gerilme-deformasyon davranışı ile karşılaştırmak için, pres aleti kullanılmıştır. Monotonik yükleme için numuneler Şekil 59'da gösterildiği gibi, bir 1000 kN kapasiteli basınç test makinesi kullanılarak 0,7 kN/sn'lik hızıyla test edilmiştir.

Periyodik yükleme testi için, Şekil 77’de gösteren 100 kN kapasiteli Shimadzu yükleme presi kullanılmıştır. Yükleme hızı (LR) her yük fazında değişerek ve  $LR = \pm 0.2 \times n \text{ kN/s}$  değeri alınmıştır, burada  $n$ , Şekil 78’de gösterildiği gibi bölümün faz sayısıdır.

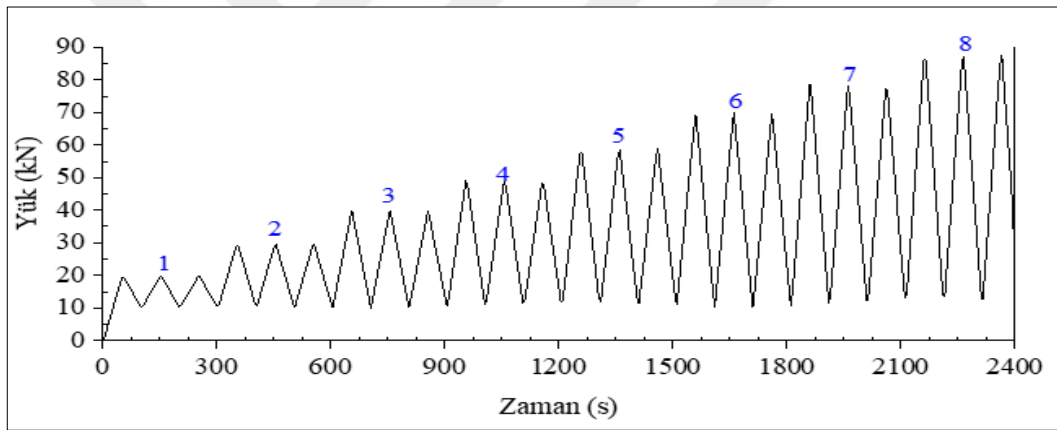


**Şekil 76.** Kendiliğinden algılayan basınç testi için deneysel şematik diyagram.

Literatürden hareketle periyodik basınç yüklemesi altında kompozitlerin elastik ve plastik bölgedeki algılama davranışı daha iyi incelemek için Şekil 78’de gösterildiği gibi yükleme tarzı seçilmiştir (Yoo *et al.* 2018a). Her fazda 3 döngü ve fazlar arasında maksimum yük 10 kN değişerek en son fazda maksimum yük 80 kN değerinde testi edilmiştir. Basınç yüklemesi yüklemenin ilk aşamalarında (ön yükleme) numunelerin yerleşimini aza indirmek için, monotonik ya da periyodik yükleme altında 10 kN olarak seçilmiştir (Yoo *et al.* 2018b). Şekil 77’de gösterildiği gibi herhangi bir elektrik temasını önlemek için numune ve yük hücresi arasına numunenin üst ve alt taraflarına ahşap plakalar yerleştirilmiştir.



**Şekil 77.** Periyodik yükleme altında kendiliğinden algılama testi deneysel sistemi.



**Şekil 78.** Periyodik yükleme testi için yük-zaman ilişkisi.

Monotonik ve periyodik yükleme testlerinde numunenin deformasyonu Şekil 79'da gösterildiği gibi numunenin yan yüzeyine tutturulmuş 10 mm uzunluğunda folyo ölçüler kullanılarak ölçülmüştür. Deformasyon ölçer özellikleri Tablo 14'te gösterilmiştir. Çimento kompozitlerinin gösterge faktörü (gauge factor), uygulanan yük ile akım arasındaki yöne göre önemli ölçüde değişmektedir (Teomete 2014). Bu nedenle, monotonik ve periyodik yüklemede, Şekil 76'da gösterildiği gibi akım yönünün etkisini ortadan kaldırmak için akımın yönü yük yönüne paralel olacak şekilde tasarlanmıştır. Monotonik ve periyodik yükleme sırasında empedansın (FCI) fraksiyonel değişimi, Denklem 15'e göre hesaplanmıştır;

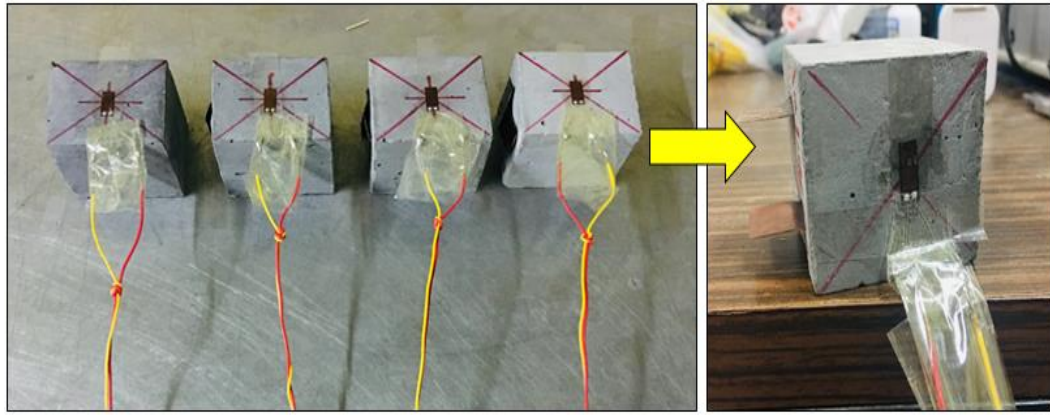
$$FCI = (I_x - I_0) / I_0 \quad (15)$$

$I_0$ , kompozitin başlangıç elektrik empedansıdır ( $\Omega$ ),  $I_x$  yükleme sırasında kompozitin elektriksel empedansıdır ( $\Omega$ ).

Tüm numunelerin kendiliğinden algılama kapasitesi, yük altında öz dirençteki değişim oranının belirlenmesine dayanılarak araştırılmıştır. Kompozitler ve elektrotlar arasındaki temas alanı (2x5 cm) tüm numuneler için aynı olduğundan, direncin değişim oranı (FCR) aşağıdaki formüle göre hesaplanabilir:

$$FCR = \Delta\rho/\rho_0 \doteq \Delta R/R_0 \doteq FCI \quad (16)$$

Burada  $\Delta\rho$  elektriksel direnç değişimi,  $\rho_0$  ilk elektrik direnci,  $\Delta R$  ve  $R_0$  sırasıyla dirençte değişim ve LCR ölçer ile ölçülen başlangıç direncidir. Bu nedenle, empedansın değişimi (FCI), Denklem 15'e göre hesaplanmıştır. Bu (FCI) monotonik ve periyodik yükleme testlerinde kendiliğinden algılama kapasitesini temsil etmektedir. Gerilme-deformasyon, yükler ve direnç değişiminin sonuçlarını karşılaştırmak için tüm veriler toplanmış ve Origin Pro programında (version 2019b) çizilmiştir.

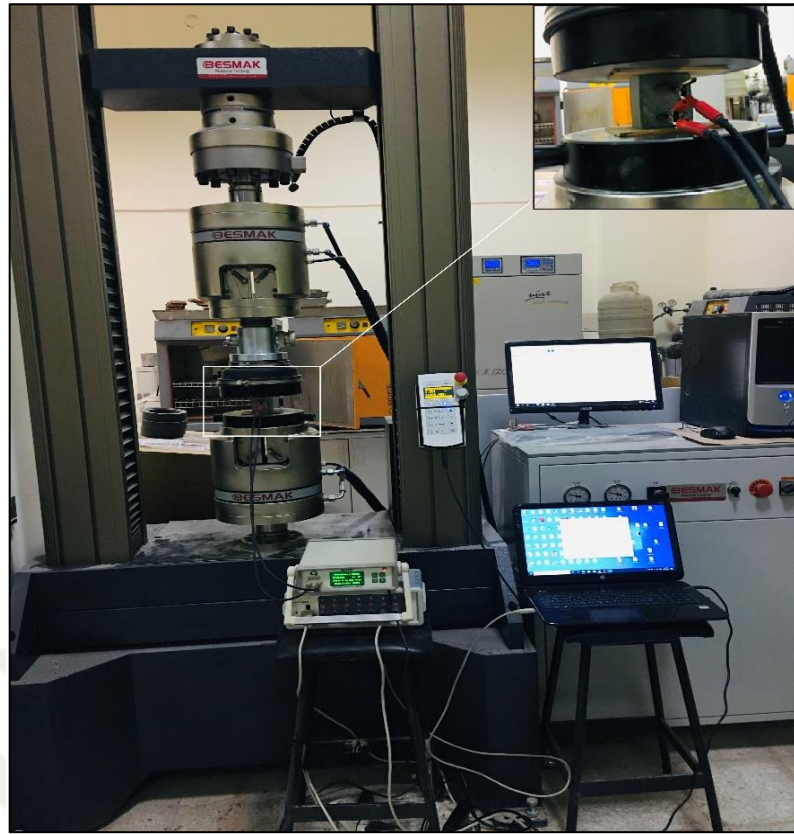


**Şekil 79.** Numunenin yan yüzeyine yapıştırılan deformasyon ölçerler.

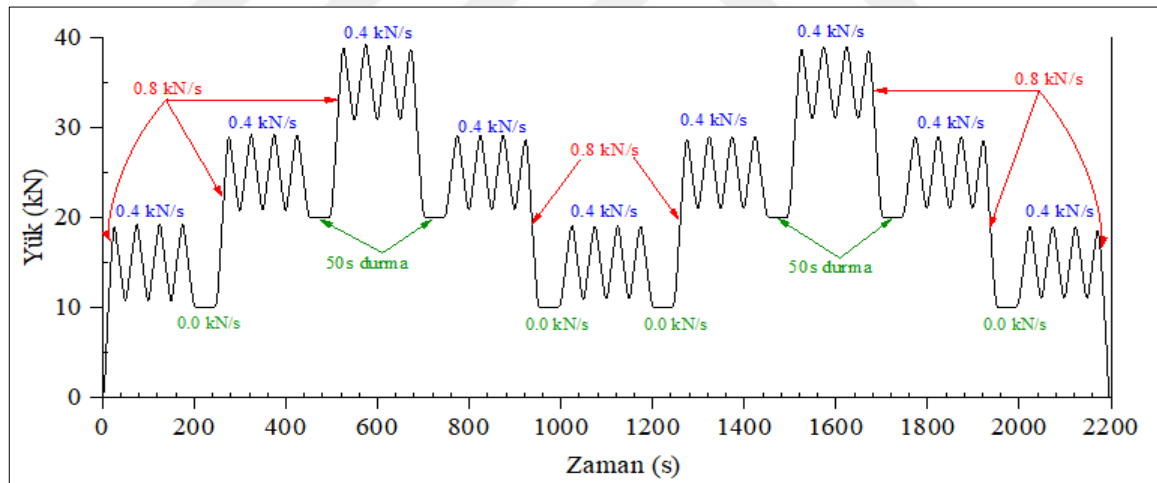
**Tablo 14.** Deformasyon Ölçerin (Strain Gauge) Teknik Özellikleri

| Tip          | Ohms      | Gösterge faktörü | Sınıf |
|--------------|-----------|------------------|-------|
| BF-120-10-AA | 120.3±0.1 | 2.0±1%           | A     |

Tekrarlanan ve simetrik periyodik yüklemesi altında kompozitlerin deney düzeneği Şekil 80'de gösterilmektedir. Periyodik testte tekrarlanan döngüler ve durdurma noktaları Şekil 81'de verilmiştir. Her aşamanın dört döngüsü vardır, tüm döngülerin süresi 50 s olacak şekilde ayarlanmıştır ve durma süresi de 50 s olarak seçilmiştir. İç döngülerin yükleme hızı (LR), LR = 0,4 kN/s olarak alınmıştır ve periyodik fazlar arasında değişiklik yapabilmek için LR, Şekil 81'de gösterildiği gibi 0,8 kN/s alınmıştır. Simetrik testin toplam süresinin 2200 s olduğunu ve kompozitlerin periyodik basınç altında tekrarlanabilirliğini ve yüksek hassasiyetini sağlamak için iletken kompozitler için test iki kez tekrarlanmıştır. Deformasyon, daha önce gösterildiği gibi numunenin yan yüzeyine yapıştırılan deformasyon ölçer (strain gauge) ile ölçülmüştür.



**Şekil 80.** Tekrarlanan ve simetrik periyodik yüklemenin deneysel düzeneği.



**Şekil 81.** Tekrarlanan ve simetrik periyodik basınç testi için yükleme şartları.

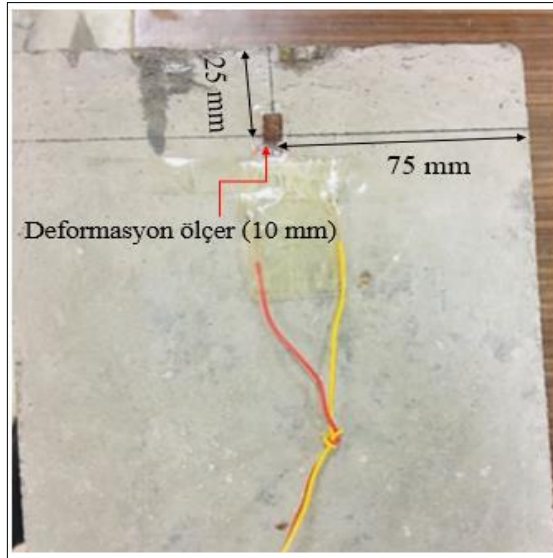
## Beton Elemanda Sensör Ölçümleri

Beton elemanın periyodik ve monotonik yükleme altında basınç testi, Şekil 82’de gösterildiği gibi 3000 kN kapasiteli bir pres makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kendiliğinden algılama özelliğini ölçmek için beton elemanlar periyodik ve monotonik yükleme altında test edilmiştir. İlk olarak, bu elemanlar, periyodik basınç altında (yükleme hızı 5.5 kN/s ve uygulanan yükün maksimum amplitüdü 400 kN) test edilmiştir. Periyodik testlerin döngü sayısı 6 döngü olarak ayarlanmıştır. Sonra, aynı elemanlar 5.5 kN/s yükleme hızıyla monotonik yükleme altında kırılana kadar test edilmiştir. Elemanın yük yönüne paralel olarak

deformasyon, geleneksel deformasyon ölçerler kullanılarak ölçülmüştür. Deformasyon ölçer, Şekil 83'te gösterildiği gibi gömülü sensörün yükleme yönüne paralel olarak elemanın üst kenarından 25 mm uzakta bir yan yüzeyde yapışmıştır. Elemanın deformasyonu, bilgisayara bağlı bir veri toplama sistemi tarafından toplanmıştır. Sensörün elektriksel empedansı, bir beton direnç ölçer-GIATEC kullanılarak iki elektrotlu AC yöntemi ile test edilmiştir. RCON'da mevcut maksimum AC frekansı (30 kHz) monotonik ve periyodik basınç testlerinde kullanılmıştır. Test sırasında tüm ölçümler bir bilgisayar ile otomatik olarak kaydedilmiştir.



**Şekil 82.** Akıllı beton elemanın periyodik ve monotonik basınç yüklemesi altında deneysel testi.



**Şekil 83.** Akıllı beton elemanın yan yüzeyine deformasyon ölçerinin yerleştirilmesi.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde ön çalışmaların ve gerçek deneylerde kullanılan çimento kompozitlerinin elektriksel özellikleri anlatılacaktır. Ayrıca, AC/DC ölçüm teknikleri, iki ve dört prob yöntemleri, kürlenme yaşlarının etkisi ve çimento kompozitlerinin elektriksel direncini etkileyen AC akımı frekansının etkisi de bu bölümde incelenmiştir.

### Ön Çalışmaların Karışım/Dispersiyon Verimliliğinin Değerlendirilmesi

Çimentolu kompozitlerde katkı malzemelerinin karışım/dağıtma etkinliğini anlamak ve değerlendirmek önemlidir. Katkı maddelerinin çimento hamurunun içindeki dağılımını değerlendirmek için elektriksel direnç ve basınç dayanımını içeren ölçümler kullanılmıştır. İletken malzemeler düzgün bir şekilde dağıldıkça çimentolu kompozitlerde elektrik iletkenliği artmaktadır. Ayrıca iletken katkı maddelerinin dağılımı, basınç dayanımını olumsuz ya da olumlu bir şekilde etkileyebilmektedir. İletken malzemeli çimento kompozitlerinin elektriksel ve basınç dayanımı özelliklerinin belirlenmesinde yapılan ön çalışmaların sonuç değerlendirmeleri aşağıda açıklanmıştır.

### İletken çimento esaslı kompozitlerin elektriksel direnci

İletken malzemeler içeren kompozit numuneleri 1, 3, 7, 14, 28, 60, 90 ve 180. günlerde elektrik empedansı (AC yöntemi) kullanarak test edilmiştir. İletken malzemelerin eklenmesi ile çimento hamuru matrisinde üç boyutlu bir iletken ağ oluşmaktadır. Malzemelerin dağılımı iletken ağı doğrudan etkileyecek ve böylece çimento kompozitlerinin elektriksel direnci de etkilenecektir. Bu nedenle, iletken malzemelerin kompozite karışma ve dağılma homojenliğini değerlendirmek için kompozitlerin elektriksel direnç ölçümleri kullanılabilir.

Kürlenme yaşı, mikroyapı, gözenek yapısı, gözeneklilik ve gözenek ağı gibi kompozitlerin elektriksel özelliklerini etkileyebilecek birçok faktör bulunmaktadır (Spragg *et al.* 2013). Tablo 15 ve Şekil 84, KNT, NNi ve KF'ler içeren çimento kompozitlerinin elektrik empedansını göstermektedir. Tablo 15'te belirtilen yöntemlerin detayları Tablo 8, 9 ve 10'da verilmiştir. Tablo 15'ten görüldüğü gibi, karıştırma yöntemine bakılmaksızın elektriksel empedans/öz direnç özellikleri, KNT ve NNi içeren kompozitlerin kürlenme yaşıyla artmıştır. Kürlenme yaşı ile sürekli olarak elektriksel direnç artışı; zaman içinde çimento hidratasyonu ile gözenek yapısının dolması ve gözenek içinde buharlaşan su içeriğine bağlıdır. Çimento

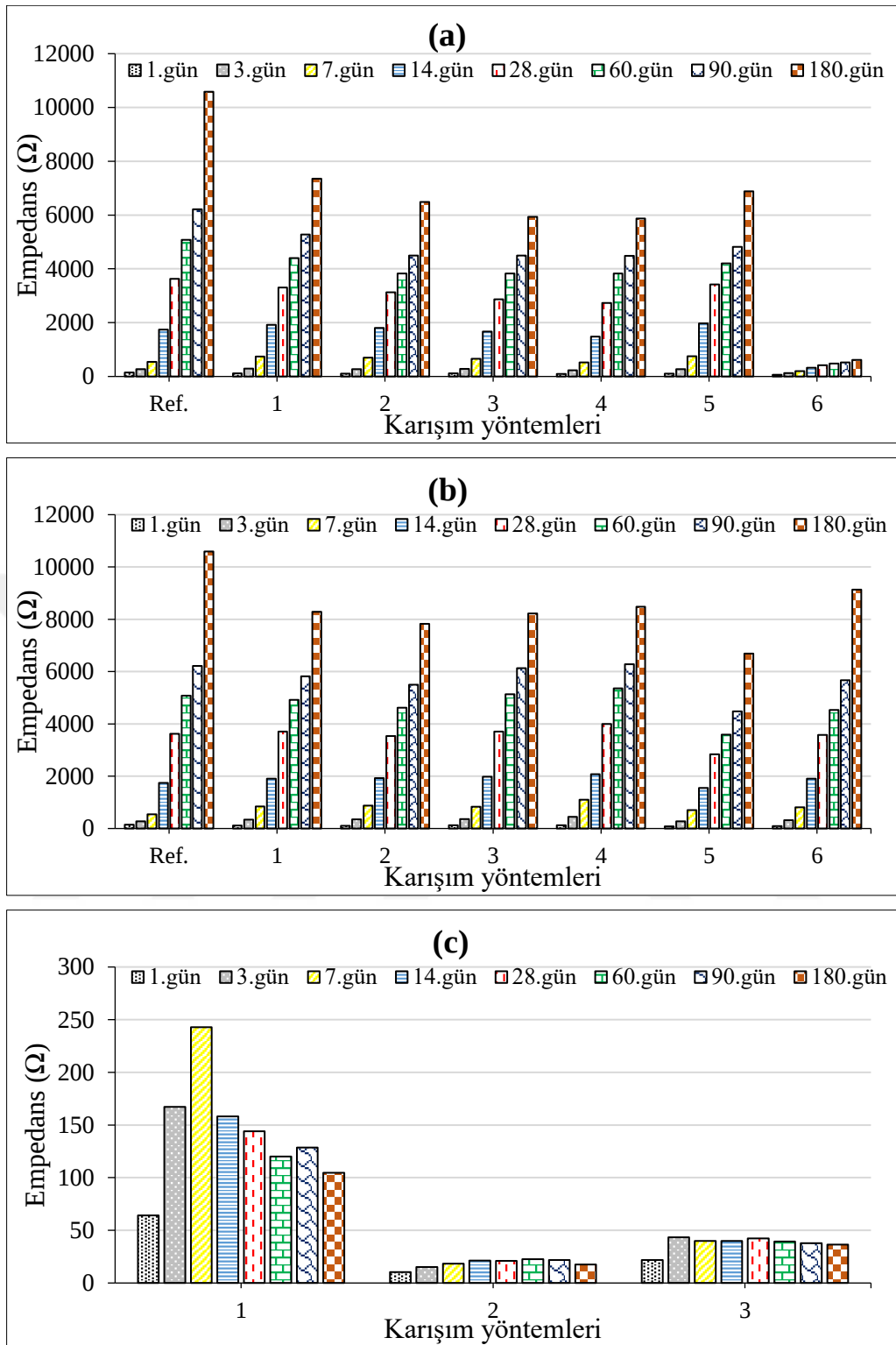
hamuruna silis dumanının eklenmesi iletken katkı maddelerinin homojen dağılımını destekleyecek ve gözenekler azalacaktır.

**Tablo 15.** Kompozitlerin Karıştırma Yöntemlerine Göre Elektriksel Empedans Ölçüm değerleri ( $\Omega$ )

| <b>Karbon Nanotüpler (KNT)</b> |        |        |        |         |         |         |         |          |
|--------------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Karışım Yöntemleri             | 1. gün | 3. gün | 7. gün | 14. gün | 28. gün | 60. gün | 90. gün | 180. gün |
| Kontrol                        | 142,0  | 270,0  | 538,6  | 1743,3  | 3626,6  | 5076,6  | 6213,0  | 10590,0  |
| 1. yöntem                      | 112,7  | 294,0  | 743,6  | 1916,6  | 3306,6  | 4403,3  | 5280,0  | 7353,3   |
| 2. yöntem                      | 108,3  | 273,3  | 699,0  | 1803,3  | 3126,6  | 3830,0  | 4496,6  | 6490,0   |
| 3. yöntem                      | 116,7  | 282,0  | 661,0  | 1673,3  | 2866,6  | 3826,6  | 4496,7  | 5936,6   |
| 4. yöntem                      | 98,4   | 229,0  | 525,5  | 1485,0  | 2730,0  | 3830,0  | 4485,0  | 5870,0   |
| 5. yöntem                      | 102,3  | 268,7  | 756,3  | 1976,6  | 3423,3  | 4200,0  | 4823,3  | 6880,3   |
| 6. yöntem                      | 65,9   | 129,7  | 201,3  | 326,3   | 413,0   | 479,6   | 526,0   | 618,3    |
| <b>Nano nikel tozu (NNi)</b>   |        |        |        |         |         |         |         |          |
| Kontrol                        | 142,0  | 270,0  | 538,7  | 1743,3  | 3626,6  | 5076,6  | 6213,0  | 10590,0  |
| 1. yöntem                      | 118,3  | 342,6  | 846,0  | 1910,0  | 3710,0  | 4923,3  | 5816,6  | 8283,3   |
| 2. yöntem                      | 105,7  | 352,6  | 872,3  | 1926,6  | 3540,0  | 4620,0  | 5493,3  | 7830,0   |
| 3. yöntem                      | 121,0  | 355,6  | 837,0  | 1985,0  | 3710,0  | 5135,0  | 6135,0  | 8225,0   |
| 4. yöntem                      | 126,3  | 450,0  | 1097,6 | 2075,0  | 4000,0  | 5355,0  | 6280,0  | 8485,0   |
| 5. yöntem                      | 76,7   | 279,6  | 702,0  | 1556,7  | 2833,3  | 3593,3  | 4483,3  | 6686,7   |
| 6. yöntem                      | 90,6   | 317,6  | 812,0  | 1906,6  | 3580,0  | 4536,6  | 5666,6  | 9130,0   |
| <b>Karbon fiberler (KF)</b>    |        |        |        |         |         |         |         |          |
| Kontrol                        | 142,0  | 270,0  | 538,6  | 1743,3  | 3626,6  | 5076,6  | 6213,0  | 10590,0  |
| 1. yöntem                      | 64,0   | 167,1  | 242,9  | 158,1   | 144,0   | 120,0   | 128,5   | 104,7    |
| 2. yöntem                      | 10,3   | 15,1   | 18,4   | 21,3    | 21,0    | 22,5    | 21,7    | 17,7     |
| 3. yöntem                      | 21,8   | 43,3   | 39,8   | 39,9    | 42,3    | 39,5    | 37,9    | 36,3     |

KF'li kompozitler, karışım yöntemlerinden bağımsız olarak, kürlenme yaşı ile fazla elektrik empedans artışı göstermemiştir. Hatta elektrik empedansı, 60 günlük kür süresinden sonra sabit kalmıştır. Çimento matrisi içinde iyi dağılmış KF ilerleyen günlerde bile yüksek elektriksel iletken ağ oluşturmuştur. Ayrıca liflerin yüksek boy/çap oranı, çimento kompozitlerinin içindeki elektrik empedansının istikrarlı bir şekilde azalmasını sağlamaktadır.

İletken malzemelerin çimento matrisindeki homojen karışma derecesi sadece karıştırma metoduna değil aynı zamanda malzemelerin türü, yüzey alanı, malzeme konsantrasyonu, malzeme morfolojisi, yüzey aktif madde tipi, yüzey aktif madde konsantrasyonu ve su/çimento oranına da bağlıdır. Yüksek su/çimento oranı, yüksek yüzey aktif madde konsantrasyonu, düşük katkı madde içeriği, düşük boy/çap oranı ve yüksek katkı maddesi boyutu, çimento kompozitlerindeki katkı malzemelerinin dağılımını iyileştirmeye yardımcı olabilmektedir (Han *et al.* 2009b; Luo *et al.* 2009; Yazdanbakhsh 2012; Saafi *et al.* 2013).



**Şekil 84.** Farklı karıştırma yöntemlerine dayanan çimento örneklerinin elektrik empedans ölçümleri (a) KNT (b) NNI (c) KF.

İletken malzemelerin çimento matrisine eklenmesi, elektriksel empedansı azaltacaktır ve bu azalma, kullanılan karışım yöntemlerine dayanarak değişmektedir. KNT'lerin çimento kompozitleri, farklı karışım yöntemleri ile elektrik empedansında bir azalma sergilemiştir. 1., 2., 3., 4. ve 5. KNT karışım yöntemleri önceki çalışmalarda başarılı yöntemlerdir, Fakat ön çalışmalarımızda iyi bir elektriksel iletkenlik göstermemiştir. Tablo 15'ten veya Şekil 84'ten,

6. karışım yönteminde, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında en iyi elektrik empedans azalımının olduğu görülmüştür. Örnek olarak, 6. karışım yöntemine göre yapılan KNT çimento hamurunun elektrik empedansı 28. günde  $413 \Omega$ , bu yaklaşık kontrol numunelerindekinden ( $3626.67 \Omega$ ) % 90'undan daha azdır. Bunun nedeni, KNT'nin ( $510 \text{ m}^2/\text{g}$ ) yüksek yüzey alanının hidrasyon artırması gözenekliliği doldurması ve elektrik empedansında azalmaya neden olması olabilmektedir. 6. karıştırma yöntemine göre karıştırılan KNT'nin homojen dağılımlı dispersiyonu, iyi bir elektriksel iletken ağ oluşturmaktadır. Benzer bulgular araştırmacı Al-Dahawi *et al.* (2017) tarafından desteklenmektedir.

6. yöntemdeki numuneler, diğer karışım yöntemlerine kıyasla kürlenme yaşının ilerlemesiyle birlikte elektriksel empedansta yüksek artış göstermemiştir. Diğer KNT karışım yöntemleri, elektriksel empedansta kabul edilebilecek bir azalma göstermemiştir. Bu duruma KNT parçacıklarının çimento kompozitlerinin içindeki topaklama yapmış olabilmesi neden olabilmektedir (Tyson *et al.* 2011b). Sonikasyon dispersiyon yöntemi, sonikasyon sürelerinin artmasıyla bile KNT kompozitlerin elektrik empedansında etkili bir azalma göstermemiştir. Bunun nedeni yüksek oranda alkalın çimentolu ortamlarda KNT'nin yeniden topaklaşması, KNT parçacıklarının bükülmesi, çimento hamurunun gözenekliliği olabilmektedir (Tyson *et al.* 2011a).

Çimento hamuruna nano nikel parçacıklarının ilave edilmesi elektriksel empedansı kontrol kompozitlerine kıyasla azaltmıştır. Nano nikel kompozitlerin 5. karışım yöntemi, diğer karıştırma yöntemleriyle karşılaştırıldığında en düşük elektrik empedans sonuçlarını göstermiştir. Nano nikel parçacıklarının yüksek yoğunluğu, suda iyi dağılmasını veya kuru ham çimentolu malzemelerle (PÇ+SD) iyice karıştırılmasını zorlaştırabilmektedir. Bu nedenle, nano nikel parçacıkları 5. karışım yöntemine dayanarak taze çimento ile iyice karıştırılarak dağıtılmaktadır. Taze ıslak çimento matrisi, ağır nikel partiküllerini su veya kuru karışımda dispersiyondan daha iyi dağıtacaktır. Örnek olarak, Nano nikel kompozitlerin 5. yöntemine dayanan elektrik empedansındaki azalma, 28 gün kürlenme süresindeki kontrol kompozitlerinininkine kıyasla yaklaşık %28'e kadar azalmıştır. Genel olarak, NNi kompozitlerin, KNT veya KF kompozitlerinininkine kıyasla gösterdiği elektrik empedansı daha azdır. Bu durumun esas nedeni, aynı oranlı karışımda malzemenin miktarı ağırlıkça aldığında NNi'nin yüksek yoğunluğu ( $8,9 \text{ g}/\text{m}^3$ ) nedeniyle diğer kullanılan iletken malzemelere göre az miktarda karışıma eklenmesidir.

KF kompozitlerinde karışım yöntemlerinden bağımsız olarak kontrole kıyasla oldukça fazla elektrik empedansı azalması görülmüştür. Kullanılan üç karışım yöntemi arasında, 2. yöntemde diğer yöntemlere kıyasla daha fazla azalma (%99.5) gözlemlenmiştir. Karbon

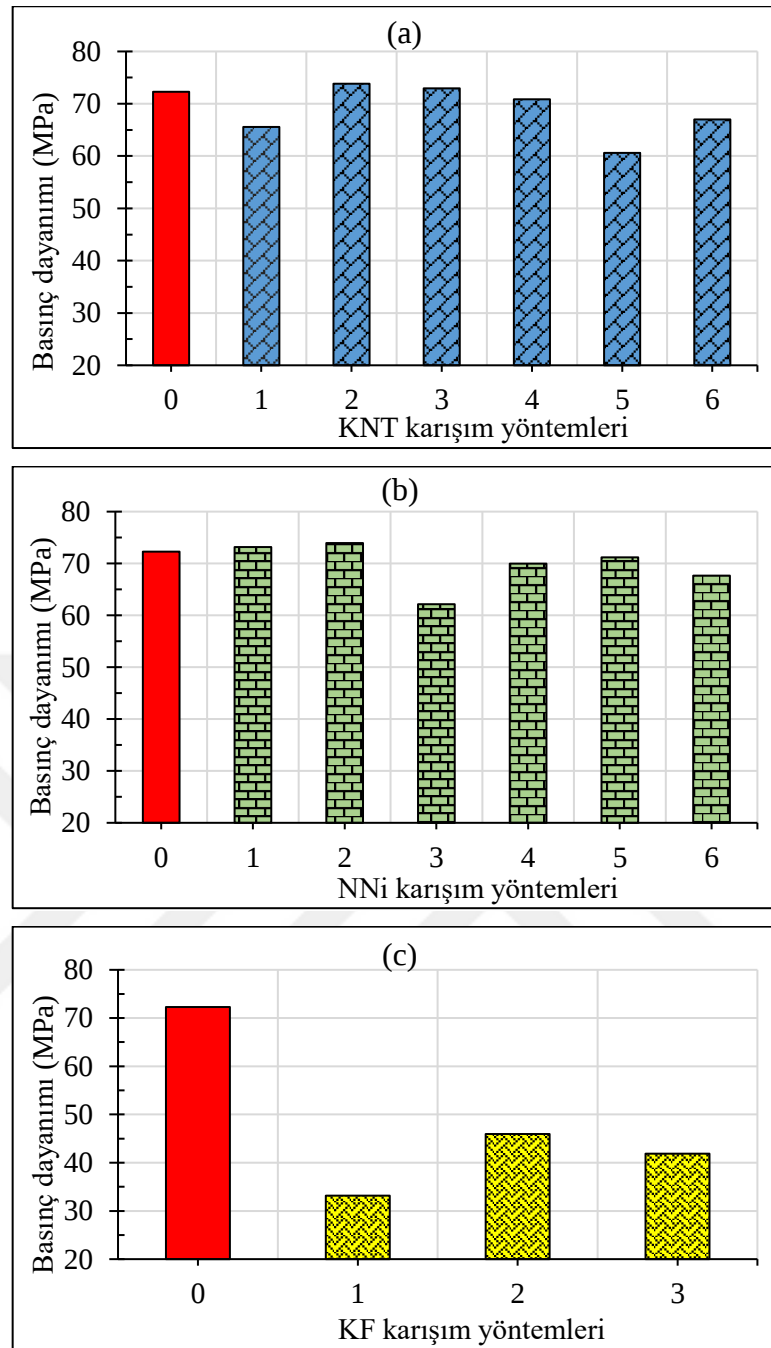
fiberlerin yüksek iletkenliği ve yüksek boy/çap oranı (1600), kompozitlerin elektrik empedansında büyük bir azalmaya yol açmıştır. Ayrıca, kuru imento malzemeler (P+ SD) karbon fiberlerin dağılımlarında birbirine yapışması engelleyerek matrisi daha homojen hale getirmektedir. Sonuç olarak, Tablo 15 veya şekil 84’te gösterilen, 6., 5. ve 2. karıştırma yöntemlerinin sırasıyla KNT, NNi ve KF kompozitleri için en iyi sonuçları gösterdiği açık olarak görülmüş ve çalışmanın devamında kullanılmıştır.

### **Çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımı lmleri**

Farklı karışım yöntemleri ile üretilen iletken malzemeli imento kompozitlerinin 28 günlük basınç dayanımının bulunmasıyla elde edilen sonuçlar şekil 85’te gösterilmiştir. KNT’li kompozitlerinin basınç dayanımı 60.6 MPa ve 73.8 MPa arasında değişirken kontrol numunenin basınç dayanımı yaklaşık 72.3 MPa çıkmıştır (şekil 85a).

2. ve 3. karışım yöntemleri, basınç dayanımında kontrol kompozitlerine kıyasla kk bir artış değeri göstermiştir. Diğer karışım yöntemleri, kontrol kompozitlerine kıyasla basınç dayanımlarında kk bir azalma göstermiştir. Artış veya azalmaya bakılmaksızın basınç dayanımındaki kk değişiklik; karıştırma yöntemlerinin değişimi, sonikasyon süresi, gözenek boyutu, puzolanik reaktivite, silis dumanı (SD) ve sperplastikleştirici (HRWR) içeriği ve ayrıca iletken malzemelerin imento matrisindeki homojen olmayan dağılımı gibi birçok faktöre bağlıdır (Sanchez 2009; Yazdanbakhsh *et al.* 2010; Tyson *et al.* 2011b).

NNi kompozitlerinin sonuçları şekil 85b’de gösterilmiştir. NNi kompozitlerin basınç dayanımı kontrol kompozitlerinin dayanımına yakın çıkmıştır, ancak 5. ve 6. metotlarda basınç dayanımları daha az olduğu grlmştir. Aslında, NNi yüksek yoğunluğuna ( $8.9 \text{ g/cm}^3$ ) kıyasla eklenen NNi parçacıklarının miktarı, çimentolu malzemelerden (P+SD) düşüktür ve ağırlıkça sadece % 0.5’i kadar NNi kullanılmaktadır. Ayrıca, ağır nano nikel partiküllerinin suda çözünmesi, elektriksel empedans veya basınç dayanımı için imento kompozitlerinde olumlu sonuçlar göstermemiştir.



**Şekil 85.** Farklı karışım yöntemleri ile üretilen kompozitlerin basınç dayanımları, (a) KNT (b) NNi (c) KF.

Karışım yöntemi tipine bakılmaksızın, KF çimento kompozitleri basınç dayanımında belirgin bir azalma göstermiştir. Bilindiği gibi karbon lifler, çekmede basınçtan daha etkili olabilmektedir. Uzunluğu 12 mm olan karbon fiberler maksimum dayanım değerine gelmeden oluşan mikro çatlamada etkili olabilir, sonrası mikro çatlaklarda çok etkili değildir ve basınç dayanımını azaltırlar (Al-Dahawi *et al.* 2017). Ayrıca, karbon fiberler, kompozitlerin gözenek yapısını etkileyen çimento matrisinin içinde boşluklar oluşturmaktadır. Şekil 85c'den, 2. karışım yöntemlerinin diğer karışım yöntemlerine kıyasla daha iyi bir basınç dayanımı sergilediği görülebilmektedir. Bu çalışmada iletken çimento kompozitlerinin elektriksel

özelliklerine odaklanıldığından elektrik empedansı ve kendiliğinden algılama özelliklerinin sonuçları, basınç dayanımı sonuçlarından daha önemli olarak kabul edilmektedir.

### **Kompozitlerin Elektriksel Özellik Ölçümleri**

Daha önce belirtildiği gibi, her bir karışım oranı için elektriksel empedans/direnç ölçümleri, direnç ölçerler kullanılarak farklı yaşlarda izlenmiştir. Alternatif akım (AC) direnci, Şekil 71’de gösterildiği gibi RCON™ beton direnç ölçer-GIATEC kullanılarak iki elektrot yöntemi ile ölçülmektedir. Doğru akım (DC) direnci, Keithley 2410 dijital multimetre (Keithley Instruments Inc., ABD) ile iki ve dört elektrot yöntemi ile ölçülmüştür. Bu çalışmada AC yönteminin geniş bir frekans aralığı (1Hz ila 30 kHz) kullanılmıştır.

#### **Elektriksel özellikleri belirlemede kullanılan parametrelerin seçimi**

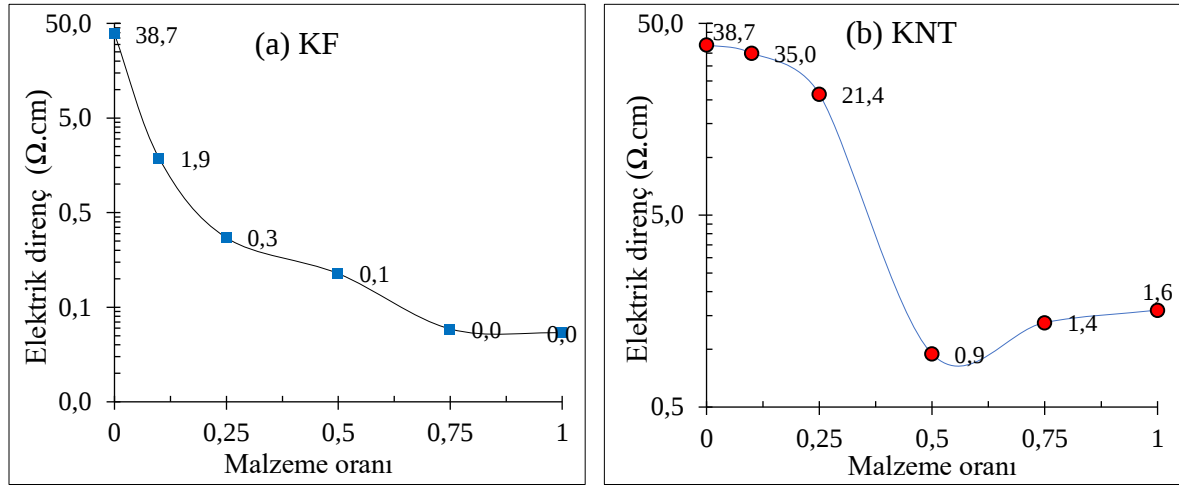
Çimento kompozitlerinin elektriksel direncini etkileyen AC/DC ölçüm teknikleri, iki ve dört prob yöntemleri, kürlenme yaşlarının etkisi ve AC akımı frekansının etkisi ayrı ayrı başlıklar halinde irdelenmiştir.

##### **➤ DC/AC tekniklerinin etkisi**

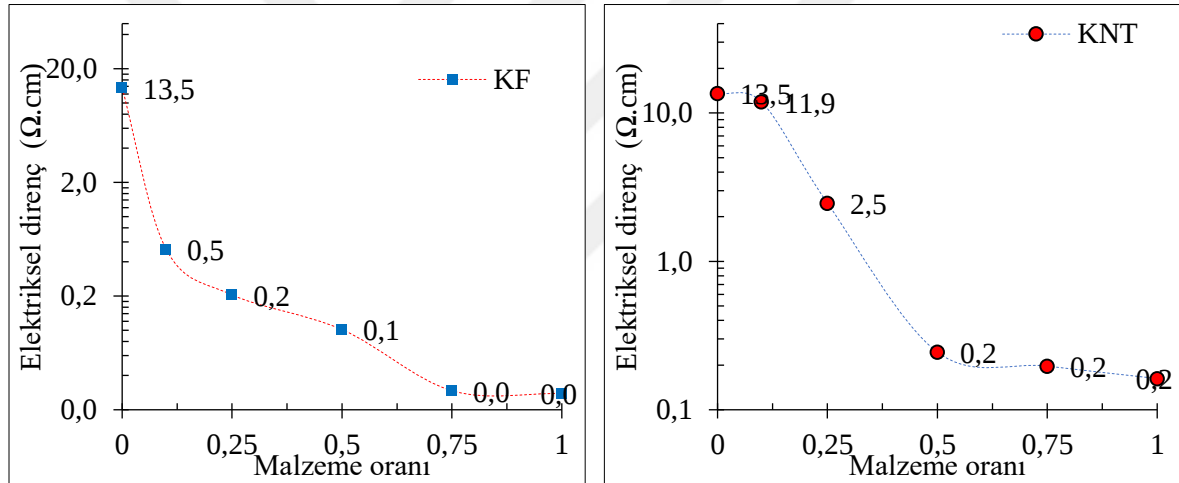
Farklı iletken malzemelere sahip çimento hamuru kompozitlerinin DC elektrik öz direnç ölçümleri Şekil 86’da gösterilmektedir. DC yönteminin ölçümleri 2-prob yöntemine dayanarak KF ve KNT kompozitinin sonuçları verilmiştir. DC ölçümlerinde, elektrik akımı 100µA, voltaj tüm testler için 2.1V olarak seçilmiştir. Elektrik öz direnci, 3 denkleme göre belirlenmiştir. Şekil 86’dan, iletken malzemelerin konsantrasyonunun artmasıyla kompozitlerin elektriksel direncinin azaldığı görülebilmektedir.

Şekil 87 KF’lerin ve KNT’lerin çimento kompozitlerinin AC elektriksel direncini göstermektedir. Ölçümler 2-prob yöntemine göre yapılmıştır. AC ölçüm cihazı (RCON™) bize faz açısı ( $\theta$ ) cinsinden empedans değerlerini ( $Z$ ) verdiği için, elektrik direnci ( $R$ ) 6 denkleme ( $R = |Z| \cos \theta$ ) göre belirlenmiştir, daha sonra bu direnç elektrik öz direnç tayini için denklem 3’e göre hesaplanmıştır. AC elektrik direnci, ilave iletken malzemelerin artmasıyla azalmıştır. Direncin azalmasının temel nedeni, iletken malzemelerin artmasıyla iletken ağ oluşmasıdır. Bu ağ, birbirleriyle temas eden iletken malzemeler arasındaki elektronların hareketinden oluşan temas iletimidir (Han 2005; Wang and Zhao 2005; Han *et al.* 2011c). İletken ağ oluşmasında tünel iletimi de elektrik direncini azaltan bir nedendir (2. bölümde açıklandığı gibi). Tünel iletimi, elektronlar çimento matrisindeki iletken malzemeler arasındaki enerji bariyerlerinden atladığında gerçekleşmektedir (Li *et al.* 2006b; Li *et al.* 2007; Han and Yu 2010; Han *et al.* 2011b). Ayrıca, iyonik iletim de özellikle kompozitlerin erken yaşlarında elektrik direncini

azaltmaktadır. Kompozitlerin gözeneklerindeki serbest su, kılcal gözeneklerde iyonların (esas olarak  $\text{Ca}^{2+}$  ve  $\text{OH}^-$ ) çözülmesi yoluyla iyonik iletim oluşturmaktadır (Wen and Chung 2006a).



Şekil 86. Kompozitlerin DC elektrik direnci (a) KF (b) KNT (28. gün).



Şekil 87. Kompozitlerin AC elektrik direnci (a) KF (b) KNT (28 gün ve 1kHz).

Sonuç olarak doğru akım (DC), polarizasyon etkisi nedeniyle zamanla ölçülen elektrik direncini arttırmaktadır. Bu bulgulara göre AC yöntemi DC yöntemine tercih edilmektedir. Aynı bulgular birçok araştırmacı tarafından da doğrulanmıştır (Han and Yu 2010; Lin *et al.* 2011; Azhari and Banthia 2012; Ding *et al.* 2015; Han *et al.* 2017a; Yoo *et al.* 2018b).

#### ➤ İki ve dört prob yöntemlerinin etkisi

AC RCON<sup>TM</sup> beton direnç ölçer-GIATEC sadece iki prob konfigürasyonuna sahiptir. Bu nedenle, burada iki problu AC ölçümleri sunulmuştur. DC Keithley 2410 dijital multimetre (Keithley Instruments Inc., ABD) hem iki hem de dört probludur. Çalışmada kuramsal temellerde prensipleri açıklanan iki ve dört prob yöntemi incelenmiştir. AC/DC iki problu yöntemleri Tablo 16'da ve Şekil 88'de karşılaştırılmalı olarak verilmiş, dört problu DC elektrik

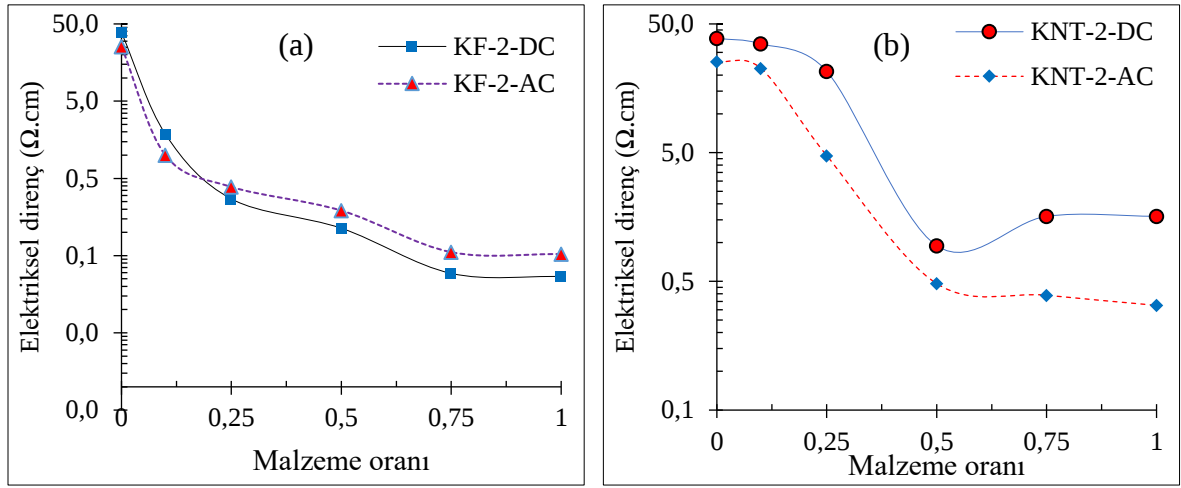
direnci de aynı tabloda ve KF, KNT kompozitlerinin grafikleri Şekil 88 ve 89’da gösterilmiştir. İki problu sistem Denklem 3’e göre dört problu sistem ise Denklem 3 ve 2’ye göre belirlenmiştir.

**Tablo 16.** 28 Günlük Kompozitlerin İki ve Dört Problu AC/DC Elektrik Özdirenç Ölçümleri

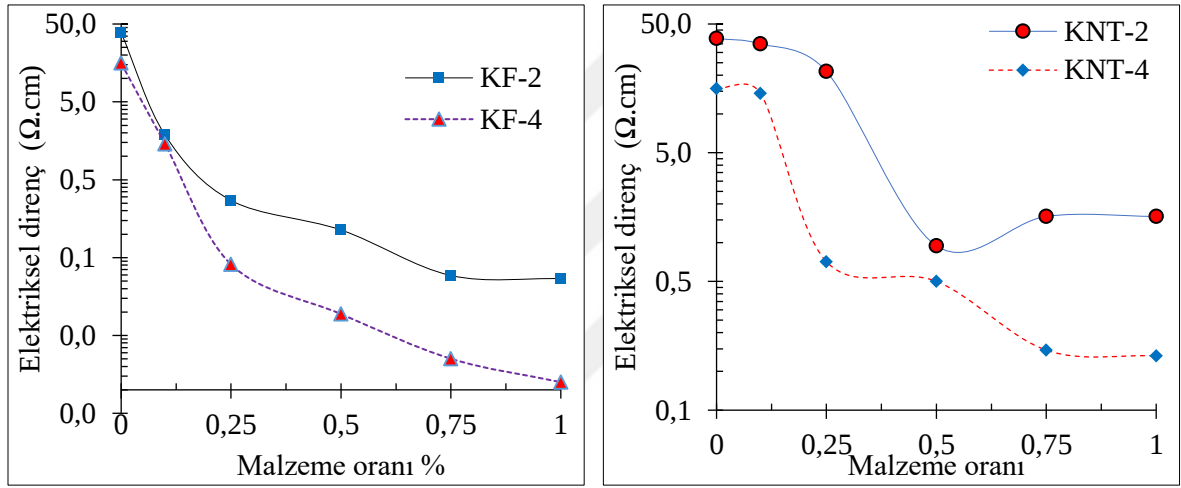
| Numuneler                                                        | * AC özdirenç ( $\Omega$ .cm) | DC özdirenç ( $\Omega$ .cm) |             |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------|
|                                                                  | İki problu                    | İki problu                  | Dört problu |
| Kontrol                                                          | 13540,70                      | 38666,00                    | 15700,00    |
| <b>Karbon nanotüpler (KNT) numuneleri</b>                        |                               |                             |             |
| KNT0.1                                                           | 11883,00                      | 34999,70                    | 14444,00    |
| KNT0.25                                                          | 2468,80                       | 21416,50                    | 711,70      |
| KNT0.5                                                           | 244,50                        | 946,70                      | 501,20      |
| KNT0.75                                                          | 197,00                        | 1600,00                     | 146,30      |
| KNT1                                                             | 162,40                        | 1601,10                     | 131,90      |
| <b>Nano nikel tozu (NNi) numuneleri</b>                          |                               |                             |             |
| NNi0.1                                                           | 13162,00                      | 31166,40                    | 14820,80    |
| NNi0.25                                                          | 12359,00                      | 28666,40                    | 12936,80    |
| NNi0.5                                                           | 11226,40                      | 26888,60                    | 12371,60    |
| NNi0.75                                                          | 10382,20                      | 25999,70                    | 12246,00    |
| NNi1                                                             | 10260,30                      | 25733,10                    | 11618,00    |
| <b>Karbon fiber (KF) numuneleri</b>                              |                               |                             |             |
| KF0.1                                                            | 518,00                        | 1868,90                     | 1431,80     |
| KF0.25                                                           | 205,10                        | 271,10                      | 40,80       |
| KF0.5                                                            | 101,60                        | 113,10                      | 9,40        |
| KF0.75                                                           | 29,40                         | 29,40                       | 2,50        |
| KF1                                                              | 27,80                         | 26,80                       | 1,30        |
| <b>Karbon fiberler (KF) + Karbon nanotüpler (KNT) numuneleri</b> |                               |                             |             |
| KFKNT0.1                                                         | 2805,20                       | 28221,90                    | 3558,70     |
| KFKNT0.25                                                        | 836,20                        | 4888,80                     | 864,50      |
| KFKNT0.5                                                         | 259,50                        | 826,70                      | 25,10       |
| KFKNT0.75                                                        | 167,30                        | 667,70                      | 18,80       |
| <b>Karbon fiber (KF) + Nano nikel tozu (NNi) numuneleri</b>      |                               |                             |             |
| KFNNi0.1                                                         | 1965,10                       | 24844,20                    | 3954,30     |
| KFNNi0.25                                                        | 1038,80                       | 7666,60                     | 1394,20     |
| KFNNi0.5                                                         | 416,00                        | 663,30                      | 65,90       |
| KFNNi0.75                                                        | 298,30                        | 350,00                      | 10,00       |

\*AC Elektrik direnci 1kHz frekans ile ölçülmüştür.

Şekil 88, 2-prob yöntemi ile ölçülen KF ve KNT’li kompozitlerin AC/DC elektrik direnci göstermektedir. Şekil 88a’dan, 2-prob yöntemi içinde AC ve DC elektrik özdirenç sonuçları arasında fazla bir fark olmadığı görülebilmektedir. Bu, kullanılan AC veya DC ölçüm yöntemlerinden bağımsız olarak, polarizasyon etkisinin KF kompozitlerinde mevcut olmadığını doğrulamıştır. 2-prob yönteminde AC ve DC arasındaki fark KNT kompozitlerinde Şekil 88b’de gösterildiği gibi daha açıktır. Bu KNT’li kompozitlerin polarizasyon etkisinin KF’li kompozitlerden daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir.



**Şekil 88.** 28 günlük kompozitlerin iki problu elektriksel direnci (a) KF, 2 problu AC/DC (b) KNT, 2 problu AC/DC.



**Şekil 89.** 28 günlük kompozitlerin iki ve dört prob yöntemi ile DC elektrik direnci sonuçları (a) KF (b) KNT.

DC ölçümlerinde, iki ve dört problu yöntemlerin elektriksel direnci arasında büyük bir fark vardır. DC-dört-problu elektriksel direnç ölçümleri hem KF’lerde hem de KNT kompozitlerinde iki problardan daha düşüktür (Şekil 89a, b). Çünkü dört problu yöntem, elektrotlar ve beton numunesi arasındaki temas direncini ve polarizasyon etkisini ortadan kaldırmaktadır. Bu fenomenler, kendiliğinden algılayan beton üretimi ile ilgili birçok deneyde doğrulanmıştır (Chiarello and Zinno 2005; Han and Ou 2007; quan *et al.* 2008; Han *et al.* 2009b; Jia 2009). Sonuçlardan görüldüğü gibi değerler kompozit türüne oldukça bağlı olup dört problu iki problu yöntemle göre AC ve DC ölçümlerinde daha düşük sonuçlar vermektedir.

#### ➤ **Kürlenme yaşının etkisi**

Daha önce belirtildiği gibi, DC elektrik direnci ve tüm numuneler için AC empedansı 1, 3, 7, 14 ve 28 günün sonunda direnç ölçerler kullanılarak izlenmiştir. Kürlenme koşulları, çimento kompozitlerinin elektrik direncini doğrudan etkileyebilmektedir. Bu nedenle çimento

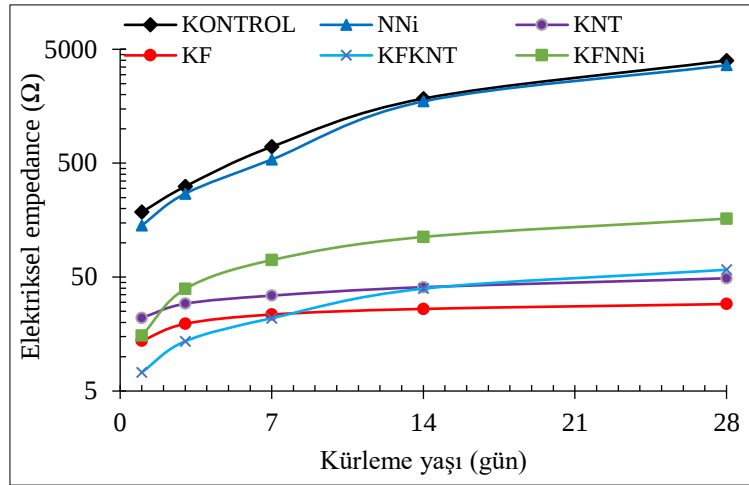
kompozitlerinin kürlenme durumu dikkate alınmalıdır. Kürlenme yöntemi ve bu yöntemin seçilme nedeni daha önce açıklanmıştır. Numunelerin 1 kHz frekansında AC elektrik empedansı Tablo 17’de gösterilmiştir. Örnek olarak, kullanılan tüm iletken malzemelerin hacimce % 0,5’i oranı olan kompozitleri için kür yaşına bağlı olarak değişen AC elektrik empedansları (30 kHz) Şekil 90’da çizilmiştir.

**Tablo 17.** Farklı Kürlenme Yaşlarında Numunelerin İki Probu AC Elektrik Empedans Ölçümleri ( $\Omega$ )

| Numuneler                                                     | Yaş (gün) |        |        |         |         |
|---------------------------------------------------------------|-----------|--------|--------|---------|---------|
|                                                               | 1         | 3      | 7      | 14      | 28      |
| Kontrol                                                       | 146,67    | 280,33 | 680,67 | 1866,67 | 4063,3  |
| <b>Karbon nanotüpleri (KNT) numuneleri</b>                    |           |        |        |         |         |
| KNT0.1                                                        | 125,50    | 332,50 | 707,50 | 1645,00 | 3600,00 |
| KNT0.25                                                       | 103,95    | 212,00 | 343,00 | 553,00  | 754,50  |
| KNT0.5                                                        | 28,60     | 40,65  | 50,40  | 61,15   | 76,50   |
| KNT0.75                                                       | 22,87     | 30,67  | 37,17  | 46,33   | 62,10   |
| KNT1                                                          | 15,66     | 23,76  | 28,10  | 34,23   | 51,80   |
| <b>Nano nikel tozu (NNi) numuneleri</b>                       |           |        |        |         |         |
| NNi0.1                                                        | 150,00    | 284,00 | 739,50 | 1800,00 | 3950,00 |
| NNi0.25                                                       | 148,00    | 285,67 | 593,00 | 1723,00 | 3710,00 |
| NNi0,5                                                        | 149,00    | 263,00 | 582,00 | 1670,00 | 3370,00 |
| NNi0,75                                                       | 133,00    | 254,67 | 548,00 | 1550,00 | 3116,60 |
| NNi1                                                          | 130,00    | 250,00 | 505,00 | 1285,00 | 3080,00 |
| <b>Karbon fiber (KF) numuneleri</b>                           |           |        |        |         |         |
| KF0.1                                                         | 35,50     | 55,60  | 85,40  | 115,70  | 158,70  |
| KF0.25                                                        | 23,70     | 35,30  | 45,33  | 53,40   | 61,70   |
| KF0.5                                                         | 19,70     | 25,20  | 27,80  | 28,80   | 30,50   |
| KF0.75                                                        | 9,10      | 11,20  | 8,80   | 8,90    | 8,80    |
| KF1                                                           | 8,10      | 8,20   | 8,00   | 8,60    | 8,30    |
| <b>Karbon fiber (KF)+ Karbon nanotüpleri (KNT) numuneleri</b> |           |        |        |         |         |
| KFKNT0.1                                                      | 59,87     | 125,67 | 257,00 | 575,65  | 867,30  |
| KFKNT0.25                                                     | 28,60     | 61,53  | 109,73 | 145,10  | 255,00  |
| KFKNT0.5                                                      | 14,57     | 25,57  | 37,27  | 60,00   | 80,10   |
| KFKNT0.75                                                     | 11,27     | 18,87  | 27,10  | 42,55   | 53,10   |
| <b>karbon fiber (KF)+ Nano nikel tozu (NNi) numuneleri</b>    |           |        |        |         |         |
| KFNNi0.1                                                      | 59,30     | 124,00 | 226,30 | 481,00  | 614,30  |
| KFNNi0.25                                                     | 38,50     | 82,30  | 144,00 | 276,30  | 319,00  |
| KFNNi0.5                                                      | 27,20     | 58,80  | 93,60  | 130,00  | 125,30  |
| KFNNi0.75                                                     | 21,80     | 54,30  | 74,00  | 91,40   | 89,60   |

Şekil 90’dan, özellikle kontrol ve NNi kompozitleri için kürlenme yaşının artmasıyla elektriksel empedansın arttığı görülebilmektedir. Bunun nedeni, çimento ve su arasındaki kesintisiz hidrasyonun, zamanla sertleşmiş çimento hamurunun gözeneklerindeki su miktarını azaltması veya ortadan kaldırması ile hidrasyon ürünleriyle dolu kompozitlerin oluşmasıdır (Yoo *et al.* 2018b). Tablo 17’de verildiği gibi iletken malzemelerin oranı arttıkça kürlenme süresinin empedans değerleri üzerinde etkisinin azaldığı belirlenmiştir. Ancak, empedansın KF’ler ve KNT kompozitleri için kürlenme yaşı ile artış aralığı, diğer kompozitlerle karşılaştırıldığında düşük veya sabit görülmüştür. Bunun nedeni içeriğindeki su miktarının

hidratasyonla azalması ve direncin düşmesine rağmen KF ve KNT iletken malzemelerinin yüksek boy/çap oranlarının da etkisiyle, bulunduğu kompozitlerde yüksek sürekli iletkenliği sağlamalarıdır. (Şekil 90).

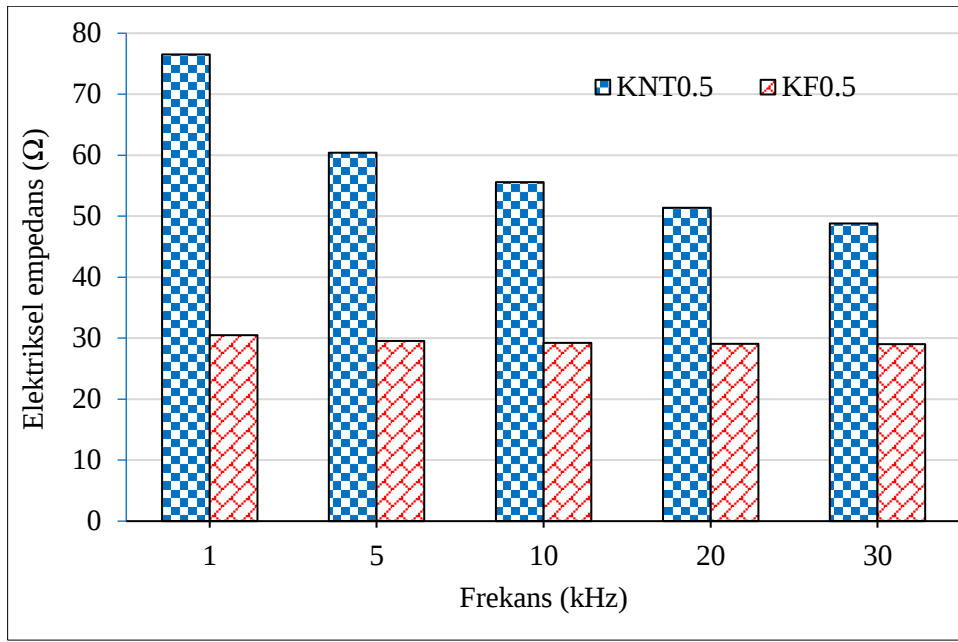


**Şekil 90.** Farklı kürleme yaşlarında (AC frekansı 30 kHz) % 0.5 iletken malzemeli çimento kompozitlerinin elektrik empedans ölçümleri.

#### ➤ AC akım frekansının etkisi

Bilindiği gibi, AC ölçüm yönteminde, akım frekansı dikkate alınması gereken çok önemli bir faktördür. Çimento kompozitleri doğası gereği kapasitiftir. AC akım frekansını yükseltmek veya AC voltajının genliğini düşürmek, çimento kompozitlerinin kapasitif özelliklerini azaltmakta veya ortadan kaldırmakta ve bununla birlikte elektrik empedansını azaltmaktadır (Fu *et al.* 1997b; Hou and Lynch 2005; Zheng *et al.* 2005; Li *et al.* 2007; Han *et al.* 2012d). Bu nedenle, akım frekansının çimento bazlı kompozitlerin elektrik empedansı üzerindeki etkisini araştırmak için bir dizi frekans testi (1, 5, 10, 20 ve 30 kHz) gerçekleştirilmiştir.

Farklı akım frekans aralıklarına sahip tüm numuneler için AC elektrik empedansı ( $\Omega$  birimli) Tablo 18'de sunulmaktadır. AC elektrik empedansı, tüm numuneler için akım frekansı arttırıldığında azalmaktadır. Frekansın artmasıyla KF'li kompozitlerin haricinde diğer numunelerin elektriksel empedansı azalmıştır. Örnek olarak, KF0.5 ve KNT0.5 kompozitlerinin 28. günde empedans sonuçları Şekil 91'de gösterilmektedir. Bu şekilden, akım frekansını yükseltmenin KF kompozitlerinin elektrik empedansını azaltmadığı görülebilmektedir (Tablo 18). Bunun nedeni kürlenme yaşı etkisinde anlatıldığı gibi özellikle KF'lerin içeriği artarken yüksek görünüm oranından dolayı yüksek iletkenlik özelliği göstermesi ve polarizasyon etkisinin az olduğunu doğrulamasıdır (Wen and Chung 2007; Hambach *et al.* 2016). Bu durumda, akım frekansının etkisi azalacak veya olmayacaktır.



**Şekil 91.** 28 günlük KF0.5 ve KNT0.5 numunelerinde akım frekansının elektrik empedans değerleri üzerindeki etkisi.

**Tablo 18.** 28 Günlük Numunelerin Farklı Frekanslarda Elektriksel Empedans Ölçümleri

| Numuneler                                                     | AC akım frekansı(kHz) |         |         |         |         |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------|---------|---------|---------|---------|
|                                                               | 1                     | 5       | 10      | 20      | 30      |
| Kontrol                                                       | 4063,3                | 3956,67 | 3866,67 | 3733,33 | 3626,67 |
| <b>Karbon nanotüpleri (KNT) numuneleri</b>                    |                       |         |         |         |         |
| KNT0.1                                                        | 3600,00               | 3050,00 | 2830,00 | 2610,00 | 2465,00 |
| KNT0.25                                                       | 754,50                | 668,50  | 639,50  | 611,00  | 590,00  |
| KNT0.5                                                        | 76,50                 | 60,40   | 55,60   | 51,40   | 48,80   |
| KNT0.75                                                       | 62,10                 | 48,70   | 44,80   | 41,60   | 39,50   |
| KNT1                                                          | 51,80                 | 40,10   | 37,00   | 34,80   | 33,30   |
| <b>Nano nikel tozu (NNi) numuneleri</b>                       |                       |         |         |         |         |
| NNi0.1                                                        | 3950,00               | 3860,00 | 3803,00 | 3700,00 | 3610,00 |
| NNi0.25                                                       | 3710,00               | 3700,00 | 3660,00 | 3610,00 | 3573,00 |
| NNi0,5                                                        | 3370,00               | 3348,00 | 3300,00 | 3265,00 | 3225,00 |
| NNi0,75                                                       | 3116,60               | 3095,00 | 3025,00 | 3000,00 | 2968,00 |
| NNi1                                                          | 3080,00               | 3020,00 | 3000,00 | 2980,00 | 2910,00 |
| <b>Karbon fiber (KF) numuneleri</b>                           |                       |         |         |         |         |
| KF0.1                                                         | 158,70                | 137,50  | 132,70  | 130,10  | 128,07  |
| KF0.25                                                        | 61,70                 | 58,10   | 57,10   | 56,50   | 56,10   |
| KF0.5                                                         | 30,50                 | 29,53   | 29,20   | 29,00   | 29,00   |
| KF0.75                                                        | 8,80                  | 8,73    | 8,70    | 8,70    | 8,60    |
| KF1                                                           | 8,30                  | 8,27    | 8,10    | 8,20    | 8,20    |
| <b>Karbon fiber (KF)+ Karbon nanotüpleri (KNT) numuneleri</b> |                       |         |         |         |         |
| KFKNT0.1                                                      | 867,30                | 716,70  | 682,30  | 655,70  | 636,30  |
| KFKNT0.25                                                     | 255,00                | 221,70  | 211,00  | 202,70  | 197,30  |
| KFKNT0.5                                                      | 80,10                 | 65,20   | 60,20   | 56,00   | 53,10   |
| KFKNT0.75                                                     | 53,10                 | 39,90   | 36,10   | 33,40   | 31,50   |
| <b>Karbon fiber (KF)+ Nano nikel tozu (NNi) numuneleri</b>    |                       |         |         |         |         |
| KFNNi0.1                                                      | 614,30                | 508,70  | 484,33  | 465,70  | 453,70  |
| KFNNi0.25                                                     | 319,00                | 280,30  | 271,67  | 265,30  | 261,30  |
| KFNNi0.5                                                      | 125,30                | 116,70  | 115,00  | 112,70  | 111,00  |
| KFNNi0.75                                                     | 89,60                 | 86,80   | 86,17   | 85,50   | 85,20   |

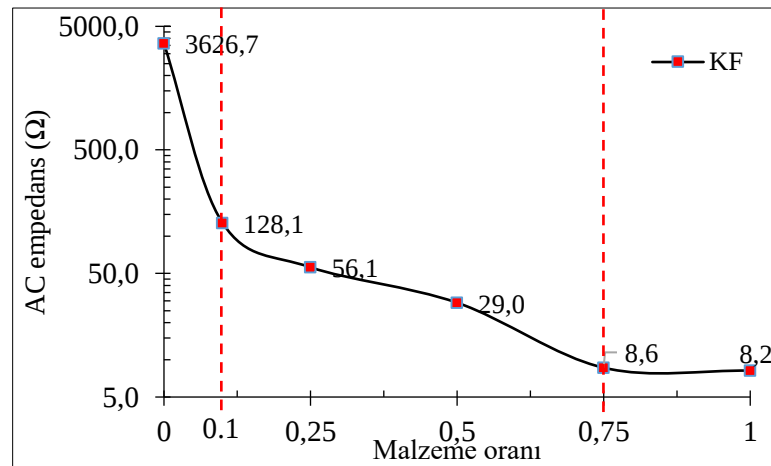
## Elektriksel perkolasyon eşiği

28 günlük numuneler üzerinde 30 kHz frekanslı AC-2-prob ölçüm yöntemi kullanılarak kompozitlerin perkolasyon eşiği belirleme aşamaları aşağıda anlatılmıştır.

### ➤ KF'li kompozitler

Karbon fiberler diğer kullanılan iletken malzemeler içinde elektrik empedansını en çok düşüren en iyi iletken malzemedir. Şekil 92'de ve Tablo 19'da gösterildiği gibi KF kompozitlerinin perkolasyon eşiği (Şekil 92'de kesikli kırmızı çizgi) hacimce % 0.1 ila 0.75 oranları arasında belirlenmiştir. Şekil 92'deki empedans ekseninde, kontrol örneğinin ve KF örneklerinin empedansları arasındaki yüksek fark nedeniyle logaritmik olarak alınmıştır. Örnek olarak, hacimce %0.1 ve %0.25 oranında KF'li kompozitlerin elektrik empedansı kontrole göre sırasıyla %96 ve % 98 oranında ve hacimce %0.5 ve 0.75 oranında KF'li kompozitler ise %99 ve %99.8 oranında azaltmıştır.

KF içeriğinin artırılması ile çimento matrisindeki KF'ler arasındaki mesafe azalmış, böylece elektronlar iletken malzeme arasında kolayca hareket edebilir hale gelerek elektrik empedansında bir azalma sağlamıştır. Bu iletken ağ sayesinde çimento matrisinden geçen elektrik akımı empedansta büyük bir düşüş oluşturmuştur. Bu bulgular, Jiang *et al.* (2018) 'nin çalışması ile aynı doğrultudadır. KF'lerin görünüm oranı arttıkça elektriksel direnç azalmıştır çünkü daha uzun KF uzun mesafeli bir ağ oluşturup daha fazla iletkenliğe sahip olabilmektedir (Reza *et al.* 2001; Wang *et al.* 2002; Park *et al.* 2004; Chung 2018; Jiang *et al.* 2018).

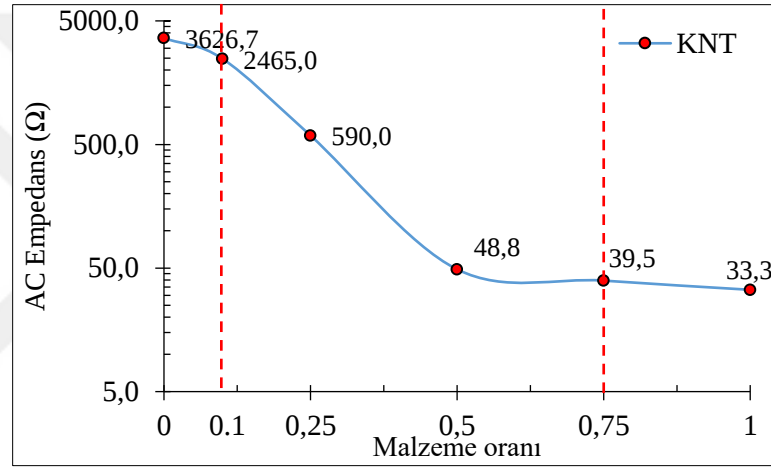


Şekil 92. KF'li kompozitlerin AC elektrik empedans değerleri (30 kHz, 28. gün).

### ➤ KNT'li kompozitler

28 günlük KNT çimento kompozitlerinin AC elektrik empedansı Şekil 93'te gösterilmiştir. Şekilden, KNT'lerin perkolasyon eşiğinin hacimce %0.1 ila 0.75 arasında olduğu görülmektedir. Hacimce %0,75'ten fazla KNT eklemek, elektrik empedansında çok farklı bir

azalma sağlamamıştır. Bu sonuç, az miktarda KNT eklenerek elektrik empedansında yüksek bir azalmanın elde edilebileceğini doğrulamaktadır. Şekil 93 ve Tablo 18’den KNT’lerin hacimce %0.1, 0.25, 0.5 ve 0.75 oranlarında eklenmesinin, kompozitlerin AC elektrik empedansını normal çimento kompozitlerine kıyasla sırasıyla %32, %83.7, %98.7 ve %98.9 oranında azalttığı görülmektedir. İletken malzemeler arası mesafenin azalması, etkili tünel mesafesi elde edilmesi ve KNT içeriğinin artırılmasıyla kompozitlerin elektrik empedansı azalmıştır (Zare and Rhee 2018; Zare and Rhee 2019; Talamadupula and Seidel 2020). Ancak, bazı araştırmacılar KNT kompozitlerinin perkolasyon eşiğinin hacimce % 0.15-0.45 olduğunu bulmuşlardır (Zhang *et al.* 2020). Öte yandan, %1.52-%3.01 arasında olan perkolasyon eşiği (Xiao *et al.* 2014), Kim *et al.* (2016) tarafından önerilen perkolasyon eşiği değerlerinden (ağırlıkça % 0.3 ila ağırlıkça % 0.6 arasında) daha büyüktür.

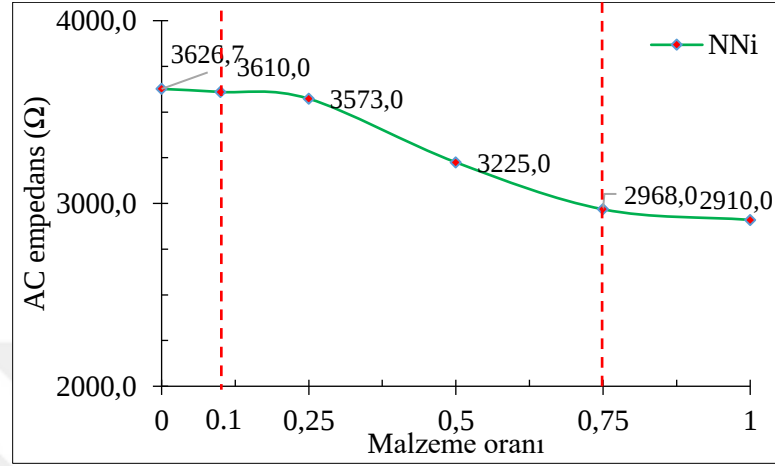


Şekil 93. KNT’li kompozitlerin AC elektrik empedansı (30 kHz, 28. gün).

#### ➤ NNi’li kompozitler

NNi’li kompozitler, Şekil 94’te ve Tablo 18’de gösterildiği gibi çimento kompozitlerinin elektrik empedansında çok az bir azalma göstermiştir. Diğer kompozitlerde alınan logaritmik eksen NNi kompozitlerde alınmamıştır. Nano nikel hacimce %0.1, 0.25, 0.5, 0.75 ve 1 oranında eklemek, elektrik empedansında sırasıyla yaklaşık %0.44, %1.46, %11, %18.14 ve %19.75’lik azalma göstermektedir. Daha fazla Nano nikel eklenmesinin diğer malzemelere kıyasla küçük bir azalma göstermesi üç nedenden kaynaklanabilmektedir. İlk olarak, karışım sırasında Nano nikel, ortamdaki Oksijen ile reaksiyona girerek yarı iletken malzeme olan nikel oksiti oluşturduğu düşünülmektedir (Bai *et al.* 2016). İkincisi, Nano nikelin karışım esnasında topraklaması nedeniyle elektriksel iletkenliği düşürmüş olabileceği söz konusudur. Üçüncüsü, çimento yoğunluğu ile nano nikelin yoğunluğu arasındaki büyük farktan dolayı, kompozitlerin elektriksel empedansını etkileyen homojen olmayan bir karışım olabileceği tahmin edilmektedir. Ancak, mikro boyutta (çap 3 µm) nikel partikül

kompozitlerinin perkolasyon eşiğinin hacimce %17 ve %23 arasında olduğu Xiao *et al.* (2018) 'nin çalışmasında bulunmuştur. Çimento kompozitlerinin elektriksel direncini azaltmak için büyük miktarda mikro nikel ihtiyacı duyulduğu bu çalışmada, nikelin çimento matrisine dağılımını iyileştirmek için manyetik işlem (MF) uygulanmıştır. Sadece MF'nin paralel yönü, dikey yönü karşısında belirgin sonuçlar göstermiştir (Xiao *et al.* 2018).

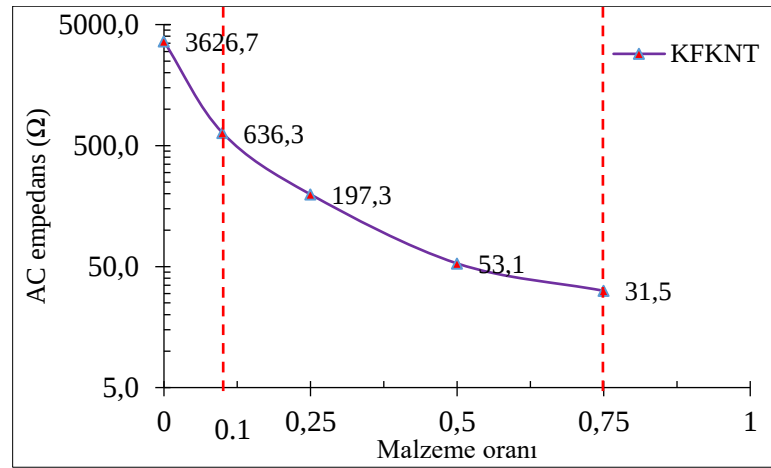


Şekil 94. NNi'li kompozitlerin AC elektrik empedansı (30 kHz, 28. gün).

#### ➤ KFKNT'li kompozitler

İletken malzemelerin birleşik etkisinin görülmesi için bu malzemeler ikili olarak kullanılarak ölçümler yapılmıştır. KF, NNi ve KNT'li kompozitlerin perkolasyon eşiği hacimce %0.1 ila 0.75 arasında olduğundan, önerilen hibrid hacim oranları da hacimce %0.1, 0.25, 0.5 ve 0.75 olarak seçilmiştir. Bu hacim oranları, kullanılan malzemelerin maliyeti ve karışım prosedürlerine göre daha ekonomik ve ideal içerik olarak belirlenmiştir.

KFKNT kompozitlerin AC elektrik empedansı Şekil 95'te sunulmaktadır. Şekil 95'te ve Tablo 18'den görülebileceği gibi, malzemeler tek başına kullanıldıklarında ikili kullanımlarına göre AC empedansında iyi bir azalma göstermiştir. Hacimce %0.1, 0.25, 0.5 ve 0.75 KFKNT oranlı çimento kompozitleri kontrol numunesine göre, AC empedansında sırasıyla %82.5, % 94.6, %98.5 ve %99.1 oranlarında azalma göstermiştir. Bu, KFKNT'nin perkolasyon eşiğinin hacimce % 0.1 ila 0.75 arasında olduğunu doğrulamaktadır. Sonuçlara göre KNT'li kompozitler ile karşılaştırıldığında hibrit kompozitler daha düşük empedansa sahiptir. Bu sonuç KNT'ye göre daha maliyetli olduğundan hibrit kullanımı daha ekonomik olacaktır. Ayrıca, KFKNT0.25 (197 Ω), KNT0.25'tekinden (590 Ω) daha düşük AC empedansına sahiptir. Beklenildiği gibi KFKNT li kompozitler KF ve KNT nin tek kullanıldığı grupların AC empedans değerleri arasında bir değer almaktadır.

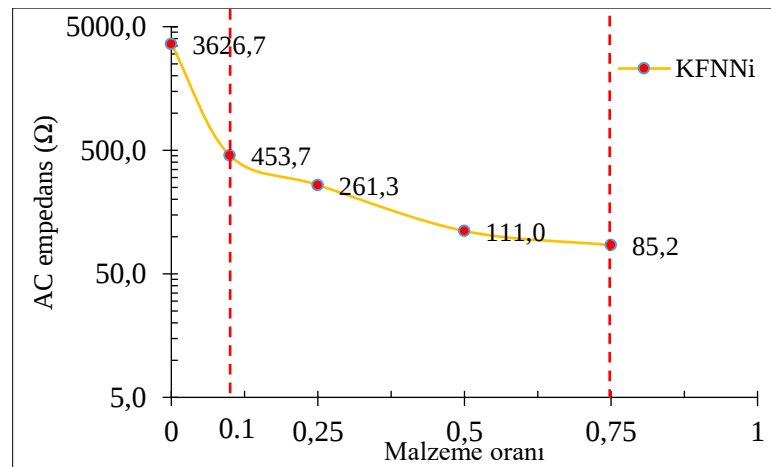


Şekil 95. KFKNT'li kompozitlerin AC elektrik empedansı (30 kHz, 28. gün).

#### ➤ KFNNi'li kompozitler

NNi, KF ile birlikte kullanılarak elektriksel özellikleri incelenmiştir. KFNNi'nin perkolasyon eşiği, Şekil 96'da gösterildiği gibi hacimce %0.1 ila 0.75 arasında bulunmuştur. KF ile NNi kullanımı, empedansı sadece NNi kullanılan gruplara göre daha fazla azaltmıştır. İletken ağın çimento matrisinde oluşturulmasını sağlayan lif-partikül teması, çimento kompozitlerinin AC empedansının azaltılmasına yol açmaktadır.

Ancak, KFNNi kompozitlerinin AC empedansındaki azalma oranı, tek başına KF'den daha az ve tek başına NNi'den daha fazladır. Bu sonuç, KF'yi NNi ile hibrid olarak kullanmanın, NNi kompozitleriyle karşılaştırıldığında empedansı azaltmak için iyi ve ekonomik bir çözüm olabileceğini doğrulamaktadır. Örneğin, KFNNi0.25 ve KFNNi0.5 gruplarında, sırasıyla 453.7Ω ve 261.3Ω AC empedans değerleri elde edilmiştir. Bu değerler, NNi0.25 veya NNi0.5 kompozitlerine kıyasla çok küçük çıkmıştır. Bu, KF'lerin NNi ile ikame edilmesi için iyi bir alternatif olabileceği anlamına gelmektedir.



Şekil 96. KFNNi'li kompozitlerin AC elektrik empedansı (30 kHz, 28. gün).

## Kompozitlerin Kendiliğinden Algılama Özellikleri

Bu bölümde kompozitlerin monotonik ve periyodik basınç yüklemesi altında davranışları açıklanmıştır. Tekrarlanan ve simetrik periyodik yükleme altında KNT ve KFKNT'li kompozitlerin davranışları da bu bölümde yer almıştır. Basınç dayanım sonuçları ve XRD analizlerine de yer verilmiştir.

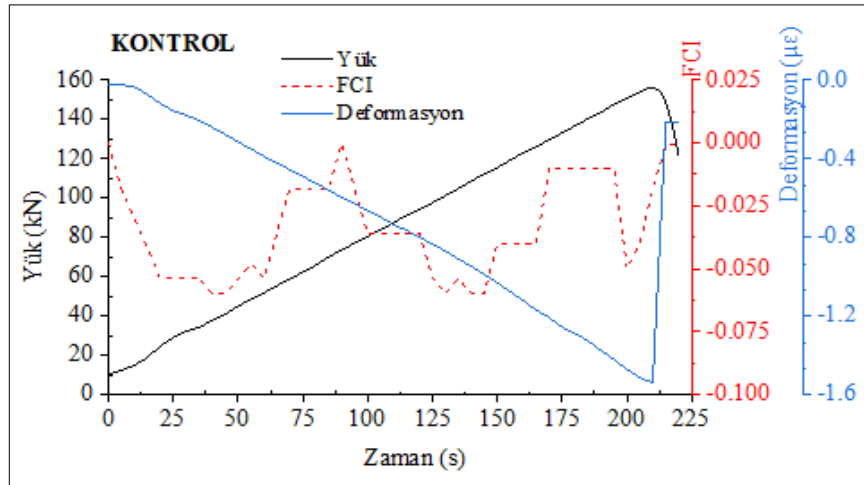
### Monotonik Yükleme Altında Kompozitlerin Kendiliğinden Algılama Davranışı

Normalde, kompozitlerin monotonik basınç yüklemesi altında FCI değeri azalmakta ve kompozitler maksimum dayanımına ulaştığında çatlaklar oluşmasından FCI'yı artmaktadır. Bu nedenle, kompozitlerin monotonik yükleme altında kendiliğinden algılama testi, çatlak oluşumunu ve kompozitlerin maksimum dayanımında kırılma noktasında tespit etmek için önemlidir (Dong *et al.* 2019b). Şekil 97, monotonik yükleme altındaki kontrol numunesinin davranışı göstermektedir. Şekildeki kırmızı noktalı çizgi empedans değişimi (FCI) gösterir, siyah çizgi ve mavi çizgi yük ve deformasyon (strain) sırayla temsil etmektedir. Yük arttıkça empedans azalmaktadır ancak kontrol numunesinin empedans değişimi küçük ve düzensizdir. Kontrol numunesinde iletken malzeme bulunmadığından elektrik davranışı düzensizdir. Yine de empedanstaki küçük bir azalma, yük altındaki elektrotlar arasındaki mesafenin azalmasından kaynaklanmaktadır. Bilindiği üzere elektrik akım yönünün yük yönüne paralel olması, küçük değerlerde bile yükleme altında empedansın düşmesine neden olmaktadır. Şekil 97'de gösterilen deformasyon eğrisinde yükleme altındaki numunenin yüksekliğindeki azalmayla orantılı olarak yük arttıkça deformasyon azalmıştır.

Normalde, iletken çimento kompozitlerinde, empedansın değişimi (FCI), yükleme altında empedansın azalması nedeniyle negatif olmaktadır. Bu, kontrol numunesinin FCI ve gerinim ölçümlerine dayalı olarak yüklemeyi algılayamadığı anlamına gelmektedir. Bir deformasyon sensörü olarak numunenin hassasiyetini değerlendirmek için, gösterge faktörü (GF) hesaplanmalıdır. Gösterge faktörü aşağıdaki denkleme göre hesaplanabilmektedir:

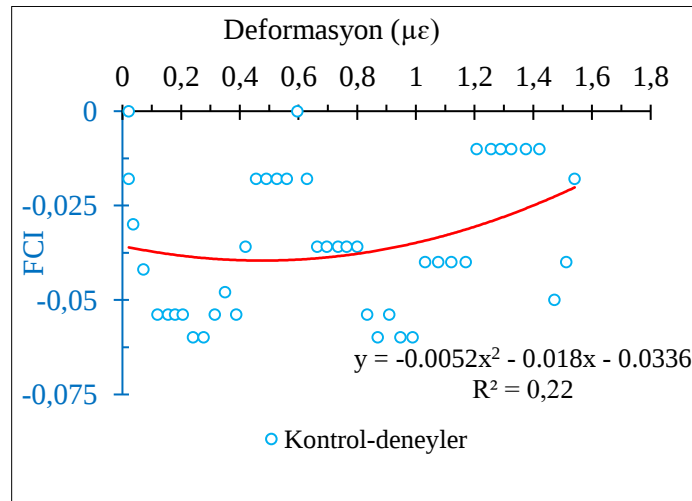
$$GF = (\Delta\rho/\rho_0)/\varepsilon \quad (17)$$

Burada  $\varepsilon$ , bir deformasyon ölçer ile ölçülen basınç deformasyondur ve  $\Delta\rho/\rho_0$ , Denklem (15) kullanılarak hesaplanan FCI'ya eşittir. GF birçok faktöre göre değişmektedir. Bunlar: malzeme türü, malzeme oranı, karışım yöntemi, kütleme koşulu, direnç ölçme yöntemi, yükleme türü ve yönü, deformasyon ölçme tipi ve deformasyon ölçerin GF'sidir.



**Şekil 97.** Monotonik yükleme altında kontrol grubunun kendiliğinden algılama davranışı.

Kontrol numunelerinin kendiliğinden algılama davranışı düzensiz olduğundan, gerçek GF'yi değerlendirmesi zordur. Örneğin, maksimum yükleme noktasında (200 s zamanında) maksimum deformasyon ( $1,47\mu\epsilon \approx 0,00147\epsilon$ ), FCI (0,089) ve GF değeri 61 olarak çıkmıştır. Monotonik yükleme altında FCI ve deformasyon arasındaki ilişki Şekil 98'de gösterilmektedir. Tüm iletken çimento kompozitleri için aynı ayarlar dikkate alınmaktadır. Şekil 98'den FCI ve deformasyon arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığı ve korelasyon katsayısı  $R^2 = 0,22$  olduğu, bunun da kontrol numunelerinde hiçbir doğrusal eğilim olmadığı anlamına gelmektedir. Yani, kontrol grubu, kendiliğinden algılama mekanizmasına dayalı olarak deformasyonu algılayamamaktadır. Diğer kompozitlerin kendiliğinden algılama kapasitesi aşağıda irdelenmiştir.



**Şekil 98.** Kontrol numunesinin basınç deformasyonu- FCI arasındaki ilişkisi.

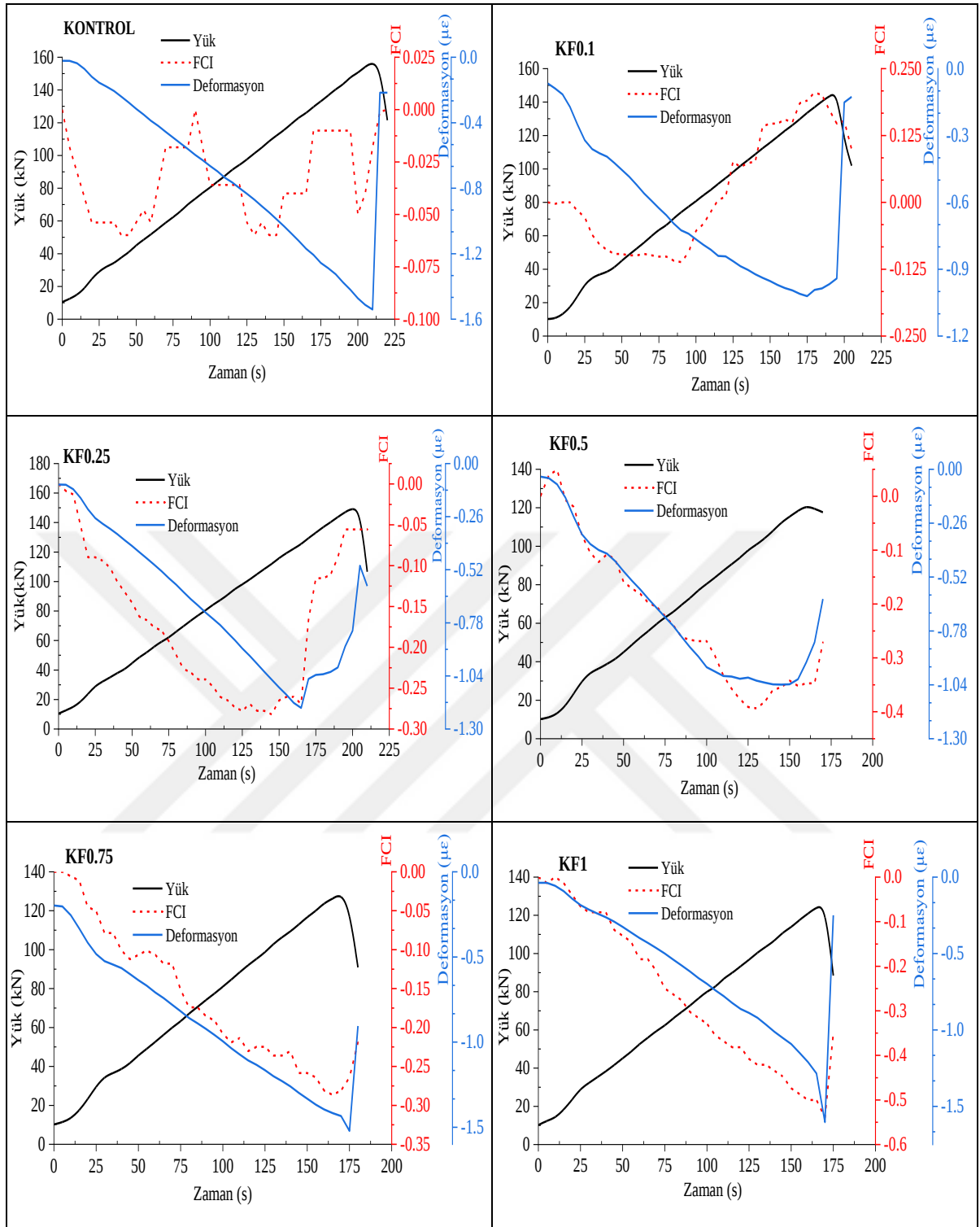
### Monotonik basınç yüklemesi altında KF'li kompozitler

Monotonik yükleme altında KF kompozitler için FCI'nın değişimini Şekil 99'da gösterilmiştir. Basınç altında, yük arttıkça empedans azalır, bu da basınç yükünün artmasıyla

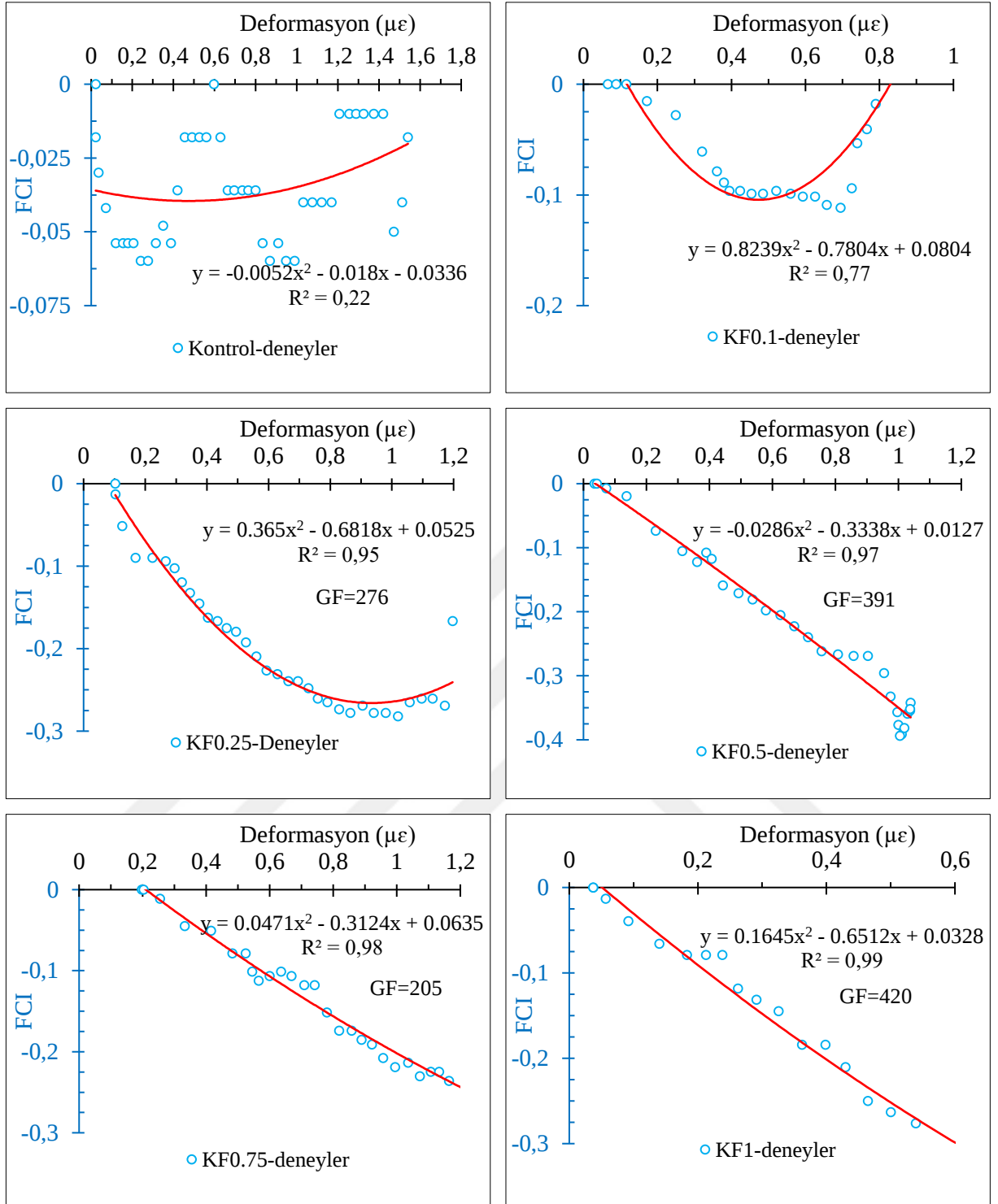
FCI'da (eksi yön) negatif bir artış olarak gösterilmiştir. KF kompozitler, basınç yüklemesi altında daha iyi kendiliğinden algılama davranışı göstermişlerdir. Bunun nedeni, karbon fiber içeriğinin çimento matrisinde artması, fiberler arasındaki mesafenin azalması ve böylece daha iletken ağ oluşmasıdır. Elektrik akımının iletken malzemelerle temas ederek veya tünel oluşturarak lifler üzerinde geçişi sağlanmaktadır (Yoo *et al.* 2017). Ancak, KF0.1 kompozitleri yeterli elektrik iletkenliğine sahip olmadığından, basınç yüklemesi altında iyi bir algılama yanıtı göstermemiştir.

KF kompozitleri, basınç yüklemesi altında bariz istenmeyen kararsızlık (noise) göstermiştir. Bunun nedeni, liflerin çimento kompozitleri içinde topaklaşması olduğundan yükleme sırasında FCI düzgün bir şekilde yükü takip etmemiştir. Ayrıca, KF'nin artmasıyla çimento matrisinde gözenek boyutu artmaktadır ve FCI'nın tepkisi etkilenmektedir. Şekil 99'dan, kompozitler maksimum yükleme kapasitesine ulaşana kadar basıncın artmasıyla birlikte FCI'nın azalmasının devam ettiği görülebilmektedir. Sonra, yükleme altındaki çimento matrisinin çatlaması nedeniyle FCI aniden artmaktadır. Çimento matrisindeki çatlama sonucunda, çatlak yüzeyler arasındaki mesafe artmakta, liflerin bağlantısı kesilmekte ve böylece empedans artmaktadır (Yoo *et al.* 2018b).

Çimento kompozitlerindeki lif içeriğinin artırılması, Şekil 99 ve 100'de gösterilen aynı yükleme koşulu altında FCI'yı (eksi yönde) arttırmıştır. Bu da artan liflerle mesafenin azalması ve daha fazla iletken matris oluşturulması ile sağlanmaktadır. Şekil 100, tüm KF kompozitlerinin basınç deformasyon ve FCI arasındaki ilişki gösterilmektedir. KF0.1 kompozitleri, deformasyon ve FCI arasındaki doğrusal eğilim göstermemiştir, sırasıyla korelasyon katsayıları  $R^2 = 0,95, 0,97, 0,98$  ve  $0,99$  değerlerine sahip olan KF0.25, KF0.5, KF0.75 ve KF1 kompozitlerinin monotonik basınç yüklemesi altında deformasyonu algılayabildiğini göstermektedir.



Şekil 99. KF grubunun monotonik yükleme altında deformasyon-FCI arasındaki ilişki.



**Şekil 100.** KF kompozitlerinin monotonik basınç altında deformasyon-FCI arasındaki korelasyon.

KF kompozitlerinin gösterge faktörü (GF), her numune için maksimum  $((\Delta p / \Delta p_0) / \epsilon)$  temel alınarak değerlendirilmektedir. KF0.1'in FCI'sı basınç deformasyonu ile doğrusal olmadığından, bu kompozitin doğru GF'sini belirlemek zordur. KF0.25, KF0.5, KF0.75 ve KF1'in gösterge faktörleri sırasıyla 276, 391, 205 ve 420 olarak çıkmıştır. Normalde, kompozitlerin GF'sinin artması, bazı çalışmalarda belirtildiği gibi deformasyon hassasiyetinin artması anlamına gelmektedir (Reza *et al.* 2003; Meehan *et al.* 2010; Baeza *et al.* 2013a). Ancak

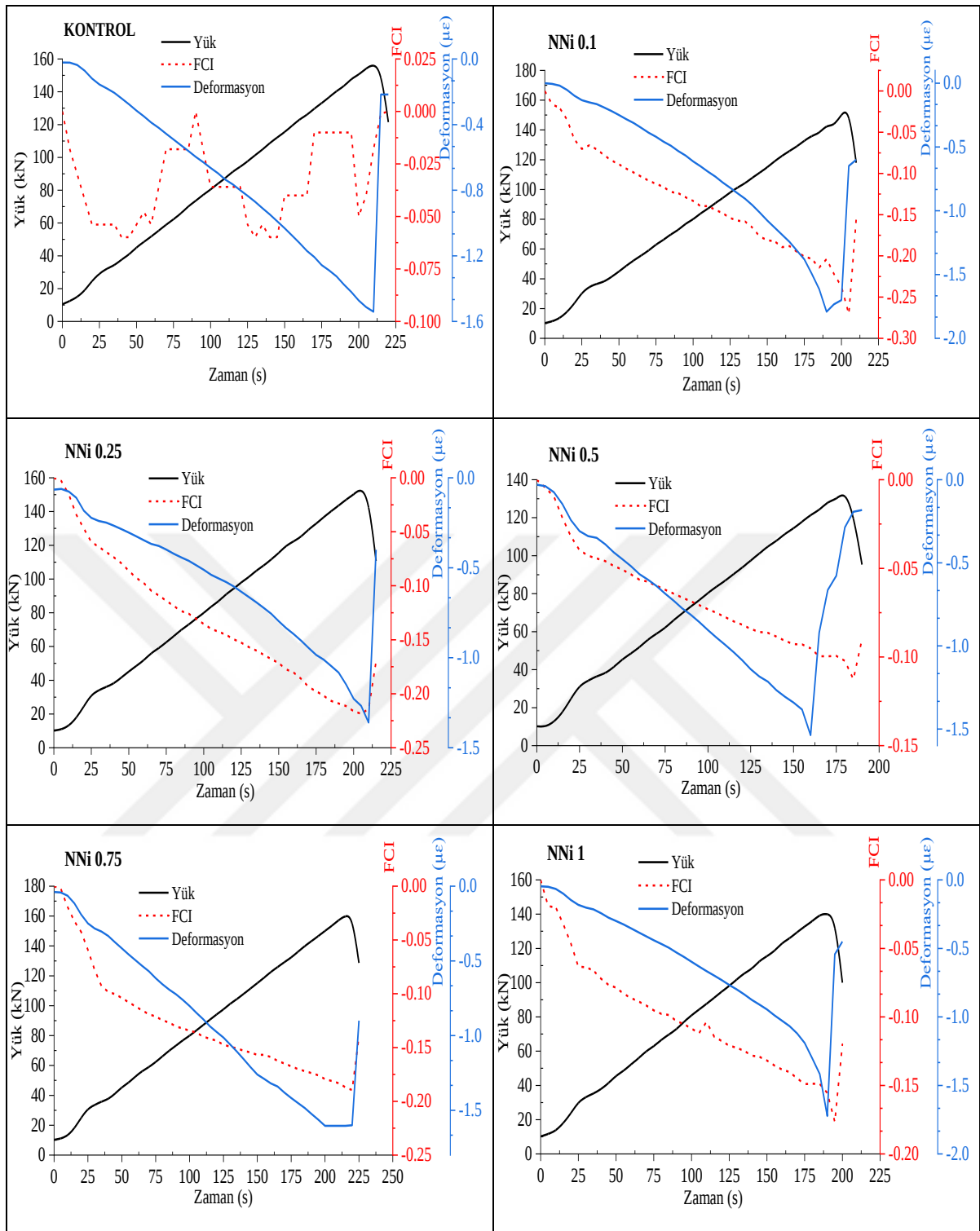
GF, basınç deformasyonuna bölünen maksimum FCI'ya dayalı olarak belirlendiğinden, KF'nin GF'si, her bir kompozit için deformasyonun değiştirilmesine bağlı olarak değişmektedir. KF içeriğinin arttırılması, basınç altındaki deformasyon değerlerini etkilemekte ve bu da farklı GF ile sonuçlanmaktadır. Bu nedenle, aynı malzemelerin farklı oranlarda kullanılması durumunda daha hassas kompozit için her zaman daha yüksek GF elde etmek doğru olmayacaktır. Genel olarak, tüm KF kompozitlerinin GF'si kontrol numunesinden (61) daha yüksektir.

Lee *et al.* (2017) çalışmasında hacimce %0.5 KF'lerin GF'si 405,2 iken, aynı hacimde kısa karbon fiber içeriği 700 kadar daha yüksek çıkmıştır (Baeza *et al.* 2013b). Azhari ve Banthia (2012) çalışmasında KF'nin hacimce %15, GF 445 olarak gösterdiğini bulmuştur. Çimento kompozitlerin hacimce %0.5 kısa kesilmiş süper ince paslanmaz tel (SSSW) içeren ve elektrik direnci dört elektrotlu-DC kullanılarak ölçülen monotonik yükleme altında 94,9 GF elde edilmektedir (Dong *et al.* 2016). Sonuç olarak, değerlerin eğilimini belirlemek için çizilen eğri ve korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) değeri, deformasyon duyarlılığını GF'ye göre daha iyi göstermektedir.

KF0.25, KF0.5, KF0.75 ve KF1 kompozitleri, monotonik yükleme altında iyi bir deformasyon algılama davranışı göstermiştir. Tüm KF kompozitlerinin GF'si, kontrol numunesininkinden (61) ve 2.0-3.0 arasında bir gösterge faktörüne sahip olan deformasyon ölçerinkinden daha yüksek olduğu gösterilmiştir. Kontrol numunelerinin FCI değerleri %10'a bile ulaşmamış, KF0.25, KF0.5, KF0.75 ve KF1 kompozitleri ise sırasıyla %30, %40, %30 ve %50'ye kadar ulaşmıştır. Bu sonuçlar, literatürdeki KF kompozitlerinin FCI değerlerinden daha iyi çıkmıştır.

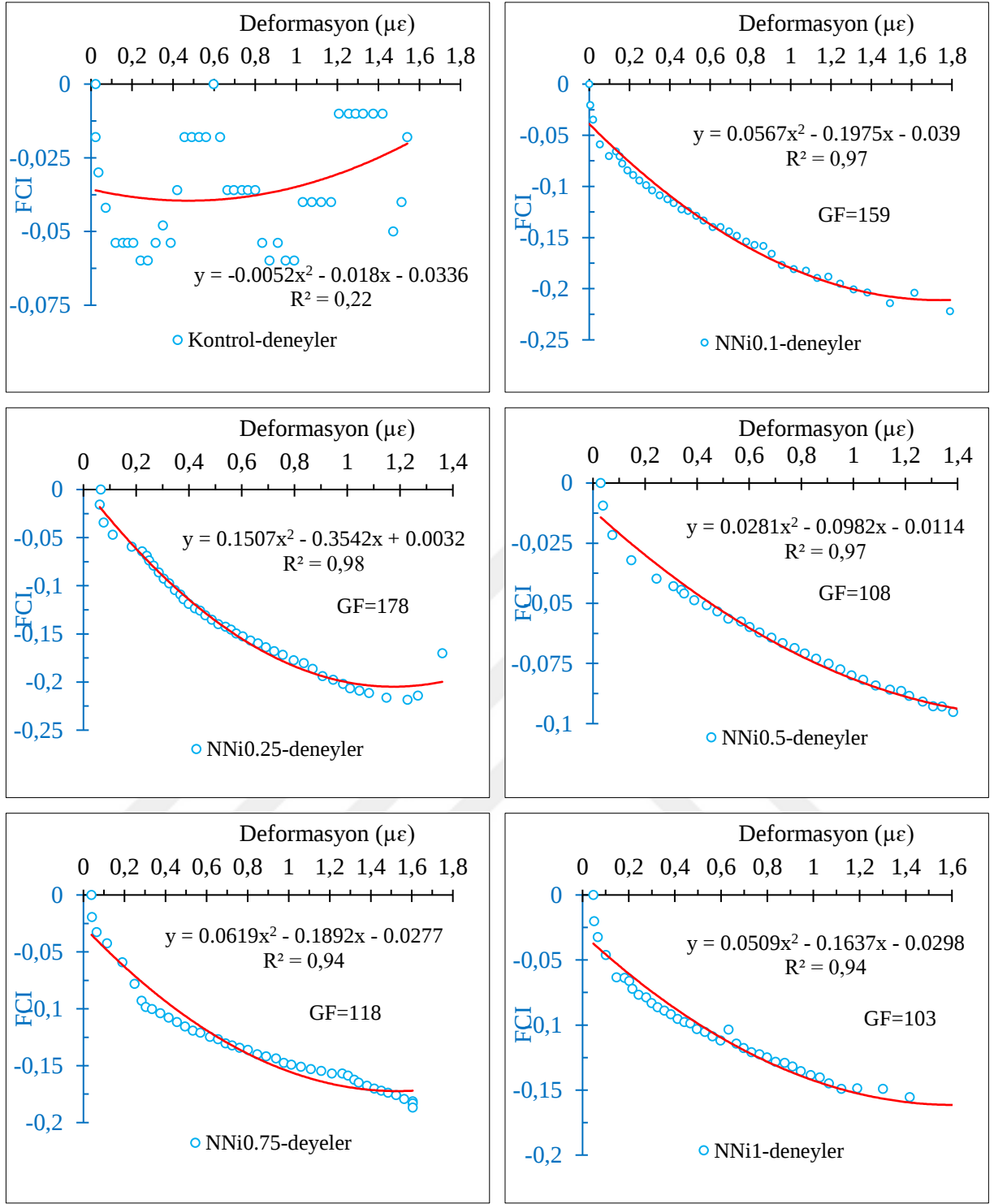
### **Monotonik basınç yüklemesi altında NNi'li kompozitler**

Monotonik yükleme altında NNi kompozitlerinin kendiliğinden algılaması Şekil 101'de gösterilmektedir. NNi kompozitlerinde monotonik yük arttıkça FCI azalmıştır. Nano nikel tozlarının yüksek iletkenliği, yükleme altındaki parçacıklar arasındaki mesafeyi azaltarak iletken bir ağ oluşturmaktadır. NNi0.1, NNi0.25, NNi0.5, NNi0.75 ve NNi1'in maksimum FCI'sının sırasıyla %27, %23, %11, %20 ve %17 olduğu Şekil 101'den görülebilmektedir. NNi kompozitleri, KF gibi monotonik yükleme altında herhangi bir FCI kararsızlık (noise) göstermemiştir. Bunun sebebi gözenek yapısını dolduran nano boyutta nikel partikülleri olabilmektedir. NNi kompozitleri, Şekil 101'de gösterildiği gibi, numune maksimum dayanıma ulaştığında FCI'daki ani artışla numunede kırılmalar olduğu tespit edilmektedir.



**Şekil 101.** NNi kompozitlerinin monotonik yükleme altında deformasyon-FCI arasındaki ilişki.

Monotonik basınç altında FCI ve deformasyon arasındaki korelasyon Şekil 102’de gösterilmiştir. NNi0.1, NNi0.25, NNi0.5, NNi0.75 ve NNi1 için korelasyon katsayıları sırasıyla  $R^2 = 0,97, 0,98, 0,97, 0,94$  ve  $0,94$  olarak elde edilmiştir. Bu, FCI değişimlerinin NNi oranına bakılmaksızın, basınç deformasyonu ile FCI arasında iyi bir korelasyon olduğunu göstermiştir.



**Şekil 102.** NNi kompozitlerinin monotonik basınç altında deformasyon-FCI arasındaki korelasyon.

Tüm NNi kompozitlerinin gösterge faktörü de daha önce bahsedilen aynı yöntemle hesaplanmıştır. Şekil 102’de gösterildiği gibi NNi0.1, NNi0.25, NNi0.5, NNi0.75 ve NNi1’in gösterge faktörü değerleri sırasıyla 159, 178, 108, 118 ve 103 olarak çıkmıştır.

Monotonik basınç altında her kompozitin maksimum FCI’sına dayalı olarak NNi kompozitlerinin GF’ı değişiklik göstermiştir. NNi kompozitlerinin tüm GF’si kontrol

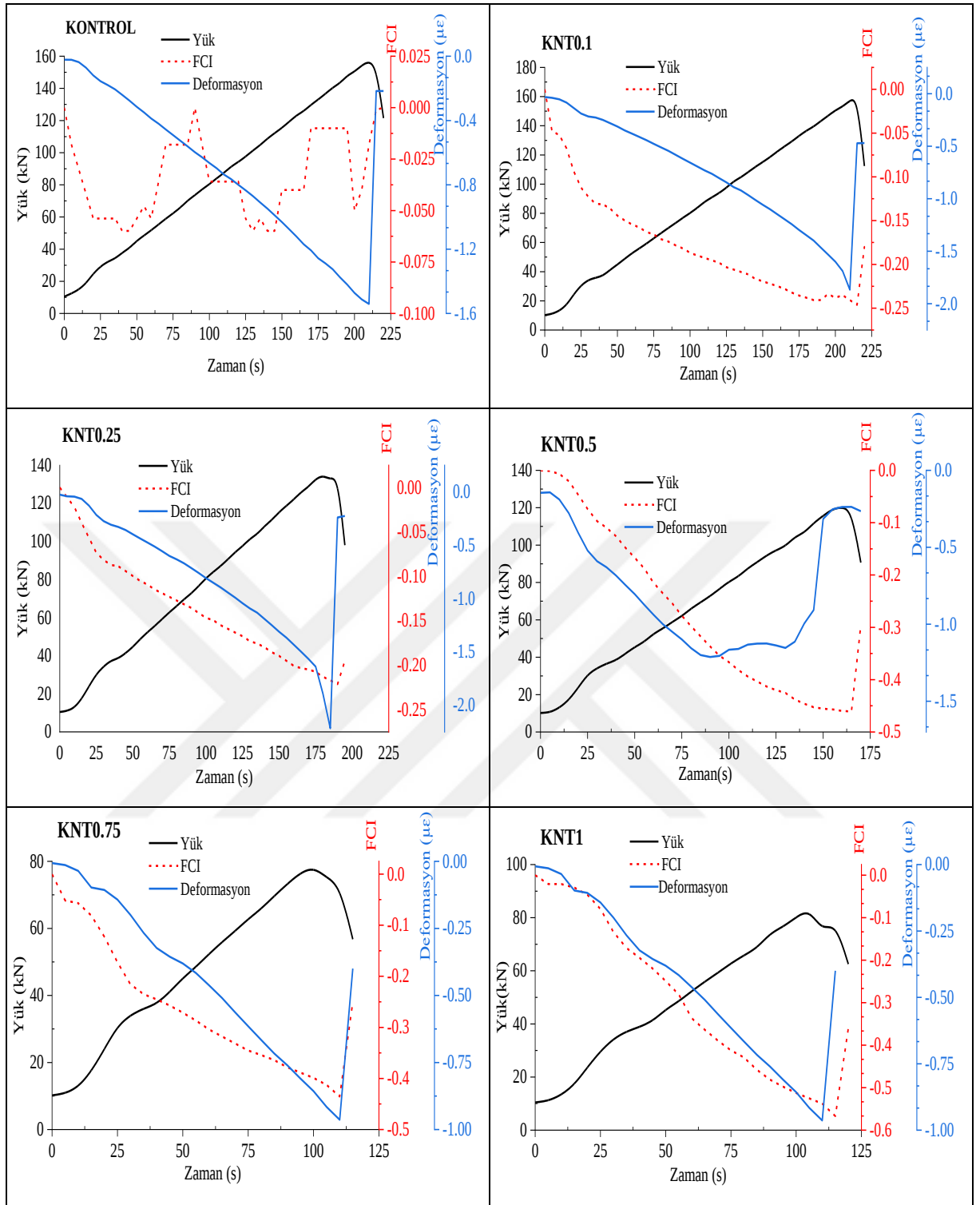
numunesininkinden (61) daha yüksek çıkmıştır, bu kompozitlerin yükleme altında bariz bir FCI gösterdiği anlamına gelmektedir. NNi kompozitlerinin GF değerleri, KF kompozitlerinkinden daha düşük çıkmıştır. Çimento kompozitlerinde mikro boyutta nikel parçacıklı çalışmalar az sayıda olmasına rağmen nano nikel partiküllerinin algılama özelliklerini karşılaştırmak için hiçbir çalışma bulunmamaktadır.

Han vd. 2009 (20×20×40 mm) boyutlarında çimento kompozitleri imal etmek için partikül boyutları 3–7 µm aralığında olan (hacimce %24) nikel tozu kullanılmıştır (Han *et al.* 2009b). Elektrik direnci ölçmek için 4-problu yöntemini kullanarak basınç gerilmesi 0 ila 12,5 MPa aralığında olduğunda FCI'nın maksimum değişiminin %63'e kadar çıktığını belirtmişlerdir. Aynı araştırmacılar, hacimce %24 oranında kullanılan 3–7 µm boyutundaki nikel partiküllerinin, FCR'ye bağlı kendiliğinden algılama tepkisinin iyi olduğunu ve bunun da 40MPa basınç gerilmesi altında FCR'nin yaklaşık %75'e vardığını bulmuşlardır (Han and Yu 2010). Ancak, yüksek hacim oranlı ve mikro boyutlu nikel partiküllerinin, nikel kompozitlerinin piezodirenç algılamasını geliştirebilmektedir. Hacimce %17 (Ni17) nikel parçacıkları eklenerek imal edilen (20×20×20 mm) numunenin, %18 ve %19 oranlı kompozitlerden (Ni18 ve NI19) daha yüksek bir GF (631) değerine sahip olduğunu saptamışlardır. Manyetik işlem uygulanmış Ni17 kompoziti, Ni18 ve Ni19 içerenlerden daha yüksek FCR (%50) değerinde olduğu görülmüştür (Lan *et al.* 2018). Bu nedenle, karışım yöntemi, yüksek nikel içeriği, partiküllerin mikro ölçekli boyutu ve manyetik işlem, bu numunelerin piezorezistivitesini artırabilmektedir.

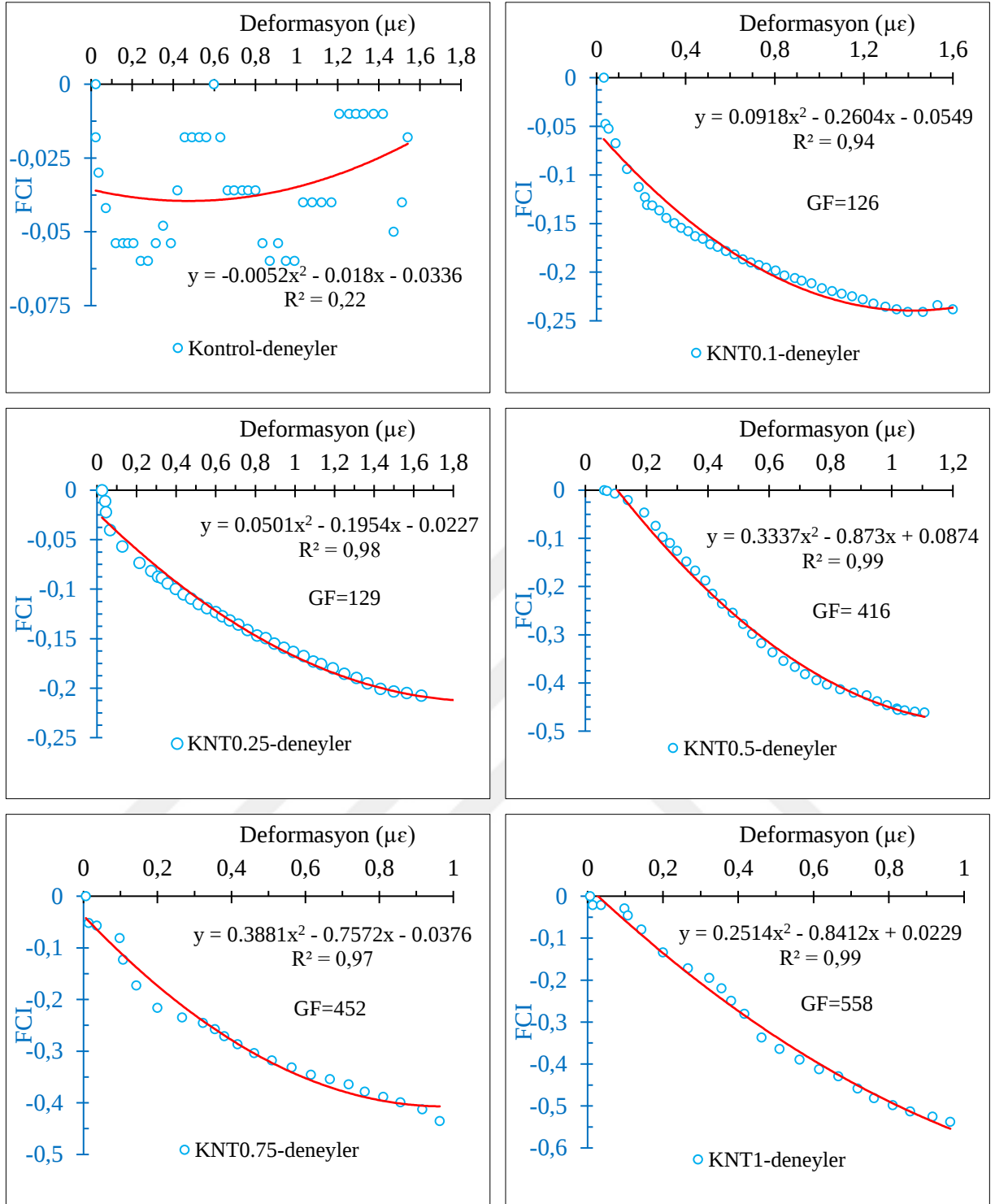
### **Monotonik basınç yüklemesi altında KNT'li kompozitler**

Monotonik basınç altındaki KNT kompozitlerinin davranışı Şekil 103'te gösterilmektedir. FCI değerleri uygulanan yüklerin artmasıyla azalmaktadır. KNT kompozitleri, KF ve NNi kompozitlerinden daha iyi bir algılama tepkisi göstermiştir. KNT kompozitlerinin kendiliğinden algılama testi sırasında istenmeyen noise oluşmamaktadır. Şekil 103'ten monotonik basınç altında KNT0.1, KNT0.25, KNT0.5, KNT0.75 ve KNT1'in maksimum FCI değerlerinin sırasıyla %25, %23, %47, %45 ve %57 olduğu görülebilmektedir.

KNT içeriğinin artmasıyla FCI değerleri artmaktadır. Gruplar arasında KNT0.1 ve KNT0.25, diğer KNT kompozitlerine kıyasla düşük FCI değeri göstermesine rağmen kendiliğinden algılama tepkisinin aynı içerik seviyesine sahip KF veya NNi kompozitlerinden daha iyi olduğu söylenebilmektedir.



**Şekil 103.** KNT kompozitlerinin monotonik yükleme altında deformasyon-FCI arasındaki ilişki.



**Şekil 104.** KNT kompozitlerinin monotonik basınç altında deformasyon-FCI arasındaki korelasyon.

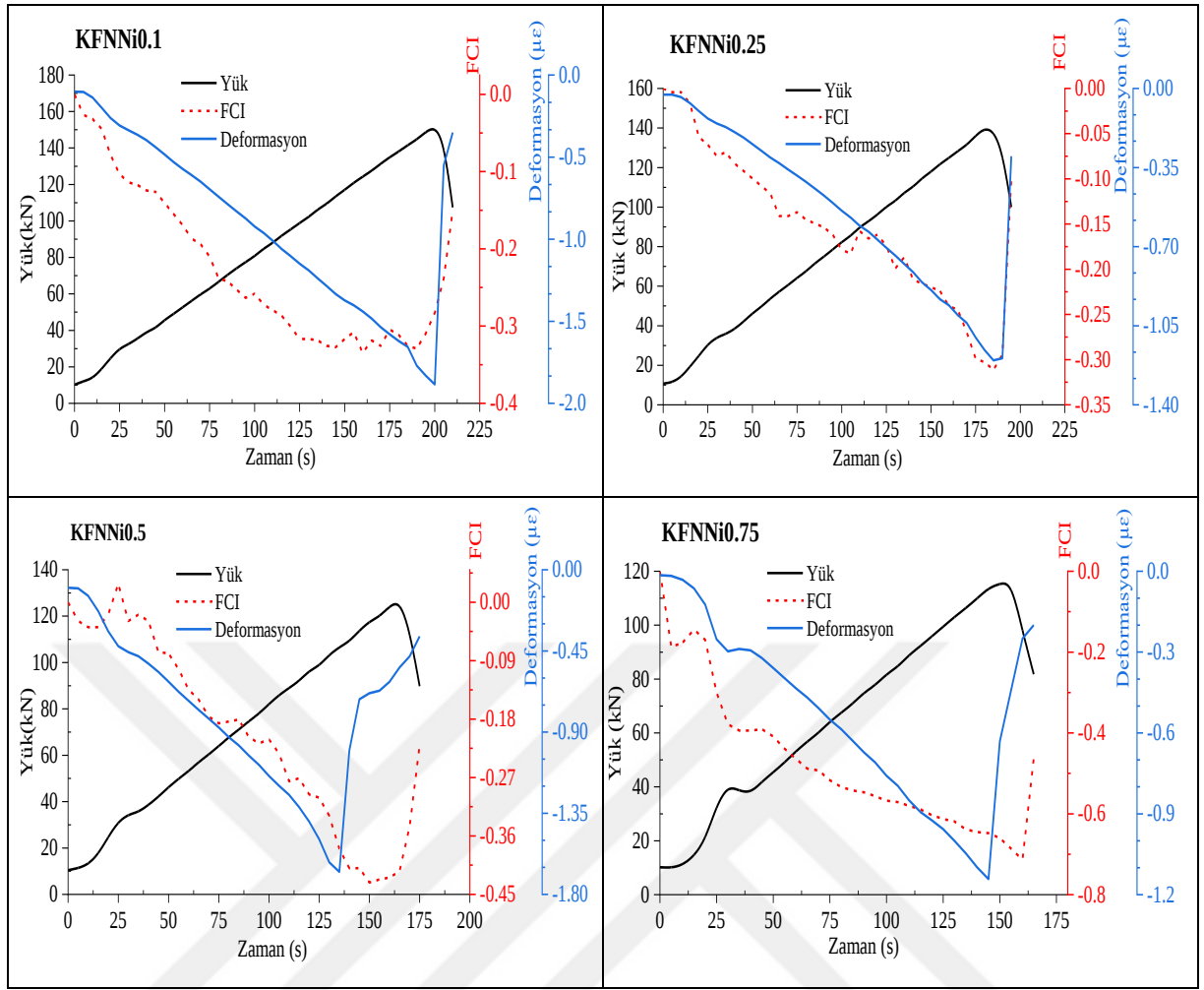
FCI ve KNT'nin basınç deformasyonu arasındaki korelasyonu Şekil 104'te gösterilmektedir. KNT içeriği %0.1 hacim oranından arttığında FCI ve deformasyon arasında ilişkiden hareketle daha iyi algılama özelliği olduğu gözlenmiştir. KNT0.1, KNT0.25, KNT0.5, KNT0.75 ve KNT1 kompozitlerinin korelasyon katsayıları sırasıyla  $R^2 = 0,94$ ,  $0,98$ ,  $0,99$ ,  $0,97$  ve  $0,99$  olarak bulunmaktadır. Özellikle KNT1 grubunda tüm numunelere göre en yüksek FCI-deformasyon ilişkisi elde edilmiştir. KNT yüksek iletkenliği nedeniyle KNT kompozitlerinin

kendiliğinden algılama hassasiyetini artırmıştır. KNT'nin iletken ağ oluşturmaları ve parçacıkların arasındaki elektrik tüneline dolaylı elektrik akımı aktarılabilir (Han *et al.* 2010). Kompozitler maksimum kapasitesine ulaştığında çimento matrisinde çatlakların oluşması nedeniyle FCI artmaktadır. Çatlak oluşumu, KNT arasındaki mesafeyi artırır ve böylece KNT ile çimento matrisi arasındaki bağlantı kesilmektedir (Yoo *et al.* 2018b).

KNT içeriğinin artması, FCI ile basınç deformasyonu arasındaki doğrusal ilişkiyi artırmakta ve bu GF'yi de artırmaktadır. Örneğin, KNT0.1, KNT0.25, KNT0.5, KNT0.75 ve KNT1 kompozitlerinin GF değerleri sırasıyla 126, 129, 416, 452 ve 558 olarak belirlenmiştir. Tüm KNT kompozitlerinin GF'si, kontrol kompozitinkinden daha yüksektir. KNT0.1 ve KNT0.25 kompozitlerinin GF'si birbirine yakın çıkmıştır. KNT içeriğinin artırılması GF'yi artırmıştır, Bu da kompozitlerin algılama hassasiyetini artması anlamına gelmektedir. Yoo *et al.* (2018b) çalışmasında hacimce %1 KNT oranlı kompozitlerin GF değerinin 219,8'e eşit olduğunu bulmuşlardır. Diğer bir çalışmada, ağırlıkça %1 KNT içeren çimento kompozitlerinin GF değerinin 130 olduğu bildirilmiştir (García-Macías *et al.* 2017). Bunlara ilaveten çalışmamızda elde edilen GF sonuçları literatürde bahsedilen değerlerden daha yüksek çıkmıştır. Bu, çalışmamızda seçilen oran ve kullanılan karışım yönteminin literatüre göre tercih edilme sebebi olabileceğini göstermektedir. Özellikle KNT0.5, KNT0.75 ve KNT1 oranlarının monotonik yükleme altında deformasyona daha duyarlı olduğu düşünülmektedir.

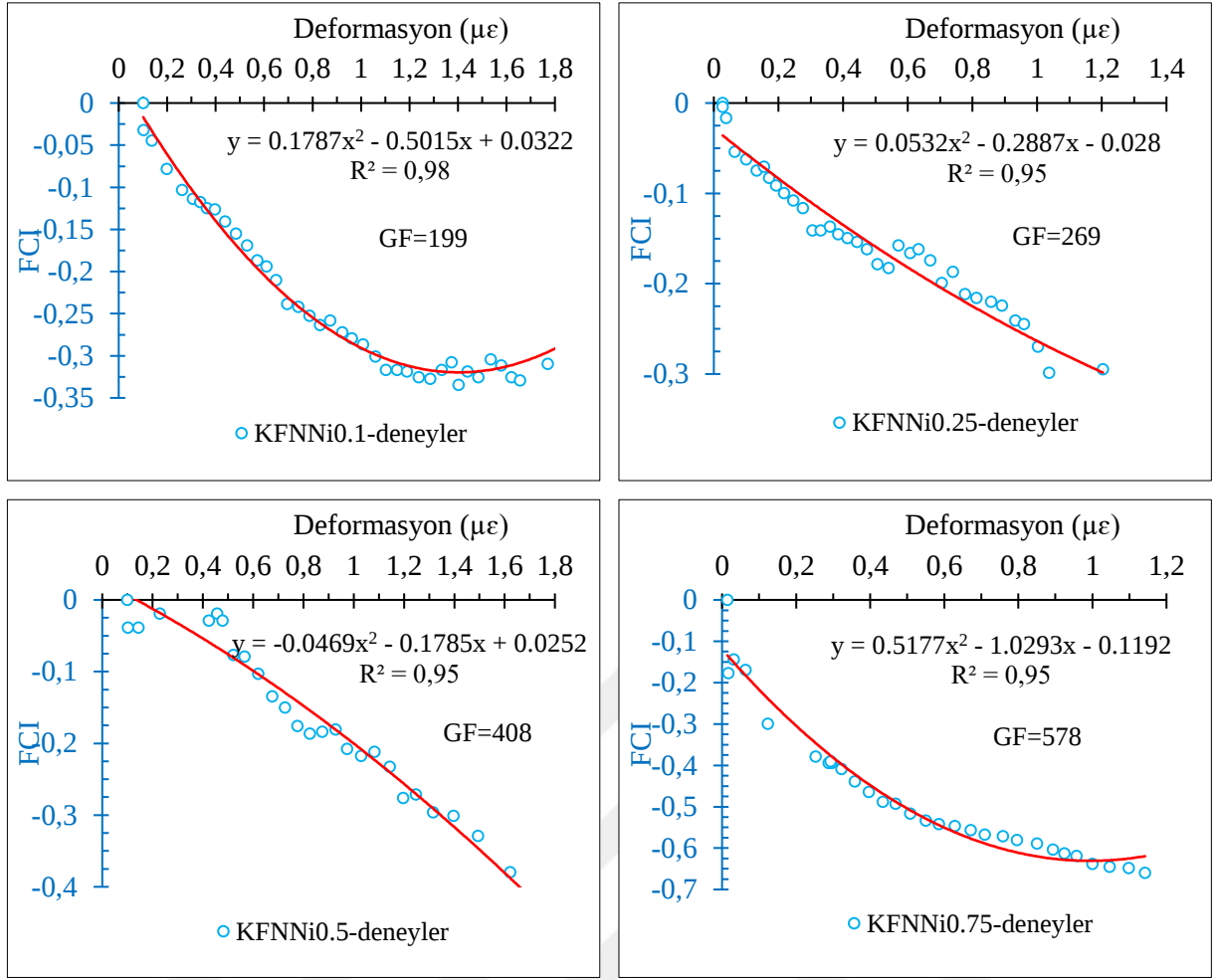
### **Monotonik basınç yüklemesi altındaki KFNNi'li kompozitler**

KF, NNi ve KNT içeren hibrit kompozitlerin kendiliğinden algılama özellikleri değerlendirildiğinde monotonik basınç altındaki FCI, yük ve deformasyon ilişkileri Şekil 105'te gösterilmektedir. Basınç altında KFNNi kompozitlerinin tek başına KF kompozitleri veya NNi kompozitleri ile karşılaştırıldığında iyi bir algılama özelliğine sahip olduğu gözlenmiştir. KFNNi'li kompozitlerin kendiliğinden algılama testleri sırasında istenmeyen kararsızlık (noise) oluşmuştur. Bunun nedeni, daha önce bahsedildiği gibi kompozitlerdeki KF içeriğinden kaynaklanmaktadır. KFNNi0.1, KFNNi0.25, KFNNi0.5 ve KFNNi0.75 için maksimum FCI sırasıyla %32, %33, %43 ve %70 olarak tespit edilmiştir. Bilindiği gibi NNi'nin maliyeti KF'den daha yüksektir. Hibrit kompozitler, NNi içerik seviyesini düşürerek ve KF ile ikame ederek yüksek maliyeti düşürebilmektedir. Ayrıca az miktarda hibrit malzeme bile Şekil 105'te gösterildiği gibi kontrol numunesine kıyasla büyük bir algılama hassasiyeti oluşturmaktadır. Hatta oran arttıkça daha duyarlı algılama yanıtı elde edilmiştir. Hibrit malzemelerde, partiküller çimento matrisinde KF'ler arasında akım aktarımı sağlayan fiber partikül matrisini geliştirmiştir.



**Şekil 105.** KFNNi kompozitlerinin monotonik yükleme altında deformasyon-FCI arasındaki ilişki.

Şekil 106’da FCI ile deformasyon arasında iyi bir ilişki gözlemlendiği görülmektedir. KFNNi0.1, KFNNi0.25, KFNNi0.5 ve KFNNi0.75’in korelasyon katsayıları sırasıyla  $R^2 = 0,98, 0,95, 0,95$  ve  $0,95$  olarak çıkmıştır. KFNNi0.1, KFNNi0.25, KFNNi0.5 ve KFNNi0.75’in GF değerleri sırasıyla 199, 269, 408 ve 578 olarak belirlenmektedir. Hibrit malzeme içerik seviyesi arttığında kompozitlerin GF değerleri de artmıştır. Bu, monotonik basınç altında deformasyon algılama hassasiyetini geliştirmektedir. Maksimum yük kapasitesinin altında ani FCI artışı ile kompozitlerin hasar fazı da tespit edilebilir. Çimento matrisinin kırılarak iletken ağın bağlantısının kesilmesi, lifler ve parçacık arasındaki mesafenin artması ile olmaktadır.



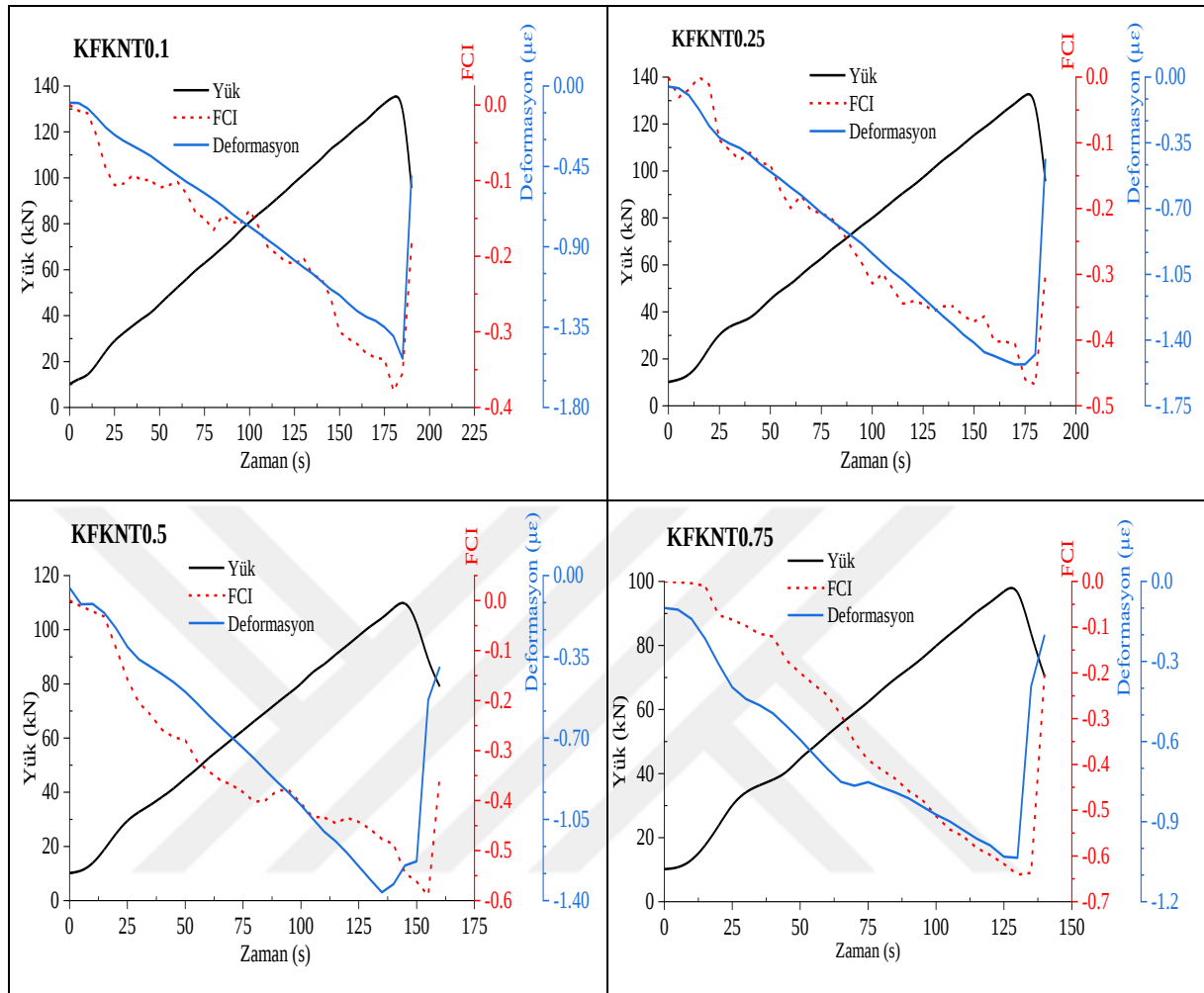
**Şekil 106.** KFNNT kompozitlerinin monotonik basınç altında deformasyon-FCI arasındaki korelasyon.

### Monotonik basınç yüklemesi altındaki KFKNT'li kompozitler

Şekil 107'de, KFKNT kompozitlerinin monotonik yükleme altındaki piezorezistif davranışı gösterilmektedir. Monotonik yükleme altında KFKNT kompozitleri iyi bir algılama davranışı göstermekle beraber KF nedeniyle test sırasında küçük bir istenmeyen kararsızlık (noise) gözlemlenmiştir. Ancak, KFKNT kompozitlerindeki kararsızlığın KFNNT'ninkinden daha az olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni, KNT'nin nano-gözenekleri NNT'dekinden daha iyi doldurabilmesi sonucu oluşan yüksek fiber partikül içeren iletken matris ortamından kaynaklanmaktadır.

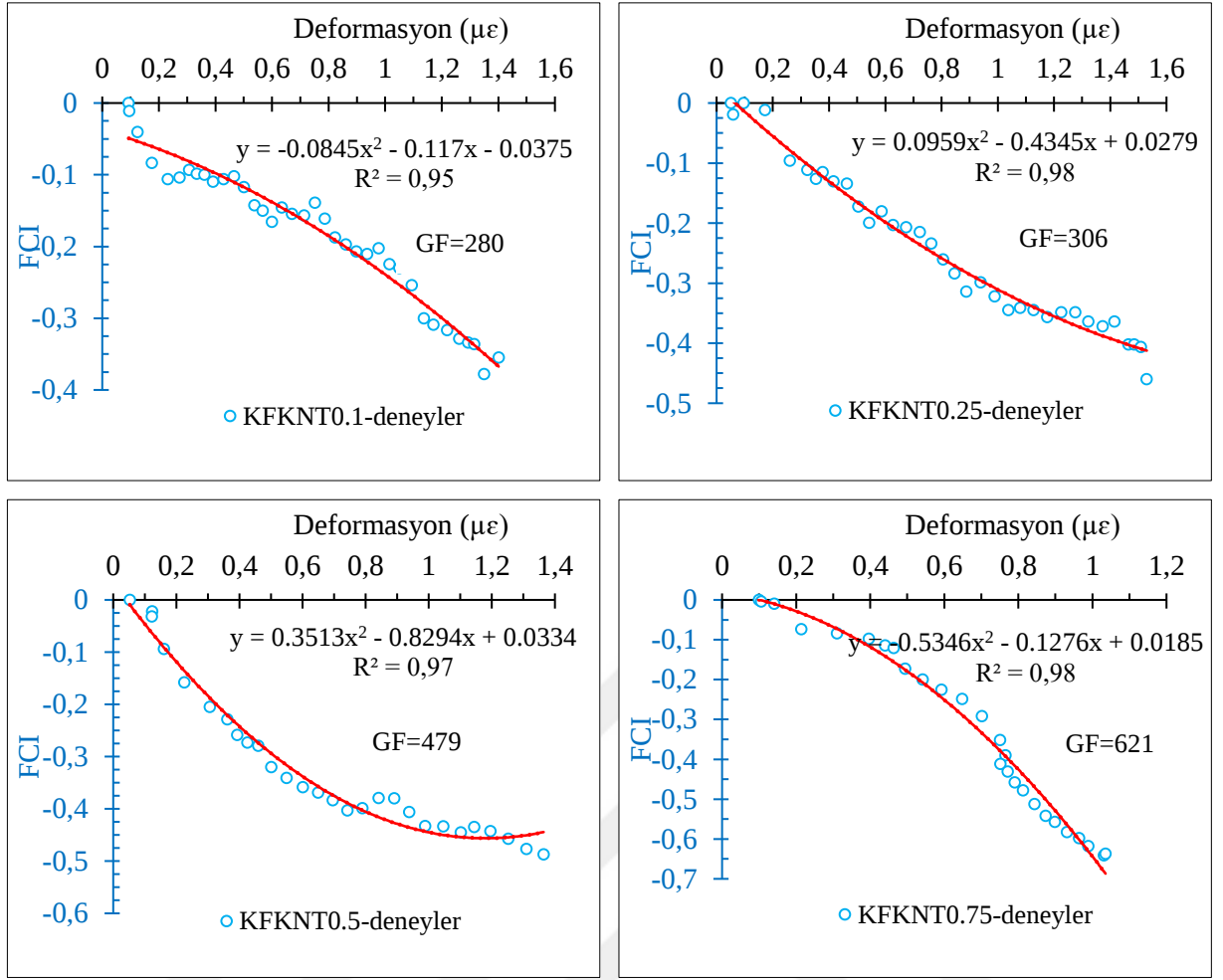
KFKNT kompozitlerin maksimum kapasitesine kadar basınç yükü arttıkça FCI değerleri azalmıştır. Şekil 107'den, KFKNT0.1, KFKNT0.25, KFKNT0.5 ve KFKNT0.75 kompozitlerinin FCI değerlerinin sırasıyla %37, 47, 58 ve 65 olduğu görülebilmektedir. Bu, kompozitlerin monotonik basınç altında mükemmel algılama hassasiyeti geliştirdiği anlamına gelmektedir. Hibrit malzemelerin oranının artması, kompozitlerin algılama hassasiyetini artırmıştır. Kompozitlerin gereken iletken malzeme miktarının bir miktarı KF ile ikame edilerek

KNT'nin yüksek maliyeti azaltılabilmektedir. Şekil 107'de gösterildiği gibi az miktarda hibrit malzeme ile büyük bir fark sağlanabilmektedir.



**Şekil 107.** KFKNT kompozitlerinin monotonik yükleme altında deformasyon-FCI arasındaki ilişki.

Şekil 108, monotonik basınç altında FCI ve KFKNT kompozitlerinin deformasyon arasındaki korelasyonu göstermektedir. KFKNT0.1, KFKNT0.25, KFKNT0.5 ve KFKNT0.75 kompozitlerinin korelasyon katsayısı değerleri sırasıyla  $R^2 = 0,95$ ,  $0,98$ ,  $0,97$  ve  $0,98$  olarak elde edilmiştir. Bu, basınç altında FCI ile deformasyon arasında mükemmel bir uyumun olduğu anlamına gelmektedir. KNT ve KF'nin homojen dağılımı, çimento kompozitlerinin içinde lif-parçacık fazını geliştirdiği düşünülmektedir. KNT'lerin KF'ler arasındaki mesafeyi doldurarak çimento matrisi içinde iletken bir ağ oluşturduğu söylenebilir.



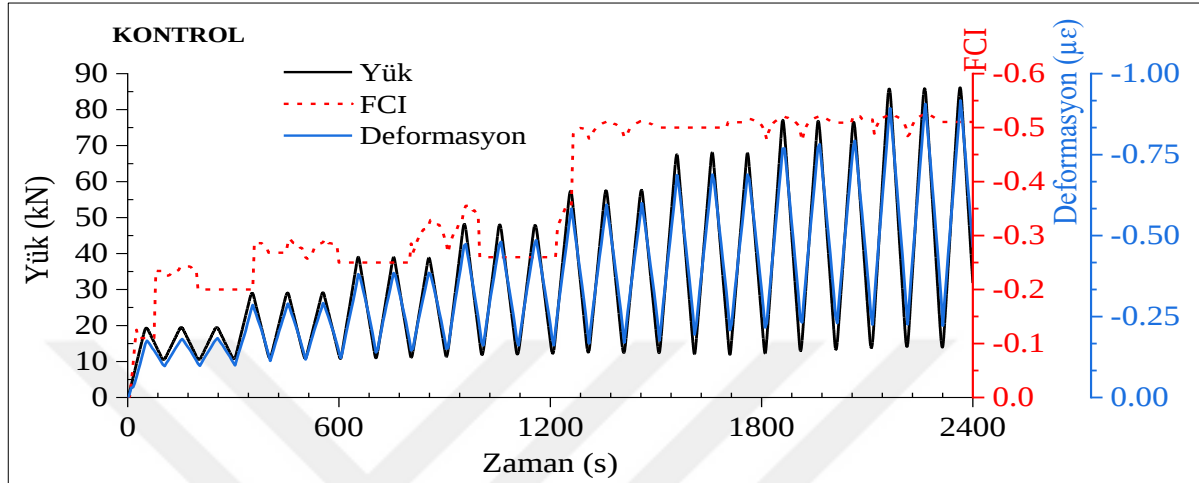
**Şekil 108.** KFKNT kompozitlerinin monotonik basınç altında deformasyon-FCI arasındaki korelasyon.

KFKNT0.1, KFKNT0.25, KFKNT0.5 ve KFKNT0.75 kompozitlerinin GF'si sırasıyla 280, 306, 479 ve 621 olarak elde edilmiştir. Kompozitlerde hibrit malzemelerin artmasıyla GF artmıştır. Bu aynı zamanda kompozitlerin yüksek algılama hassasiyetini de göstermektedir. (Lee *et al.* 2017); sonuçlarımızla uyumlu olarak hibrit KF0.1 ve KNT0.5 kompozitlerinin  $R^2 = 0,8742$  ve GF değerinin 149,9 olduğunu bulmuşlardır.

### Periyodik Basınç Yüklemesi Altında Kompozitlerin Kendiliğinden Algılama Davranışları

Monotonik basınç yüklemesi altında kompozitlerin algılama kapasitesini test ettikten sonra, periyodik basınç altındaki algılama kapasiteleri araştırılmıştır. Çimento kompozitlerinin çoğusu, monotonik basınç altında iyi bir algılama hassasiyeti göstermekle beraber uygulama açısından daha hassas ve gerçekçi algılama davranışları periyodik yükleme altında elde edilmektedir. Bazı kompozitler, monotonik basınç altında iyi bir davranış göstermesine rağmen periyodik basınç altında aynı davranışı gösterememektedir. Bu nedenle, tüm kompozitler periyodik basınç altında da test edilmiştir.

Kompozitlerin elastik ve plastik bölgedeki davranışlarını incelemek için periyodik yükleme şartları Şekil 75'te gösterildiği gibi tasarlanmıştır. Yükleme ve boşaltma testi ile algılama kapasitesini belirlemek için her yükleme aşaması için üç döngü gerçekleştirilmiştir. Kıyaslamak için kontrol numunesinin FCI, periyodik basınç yükü ve deformasyonu Şekil 109'da gösterilmektedir.

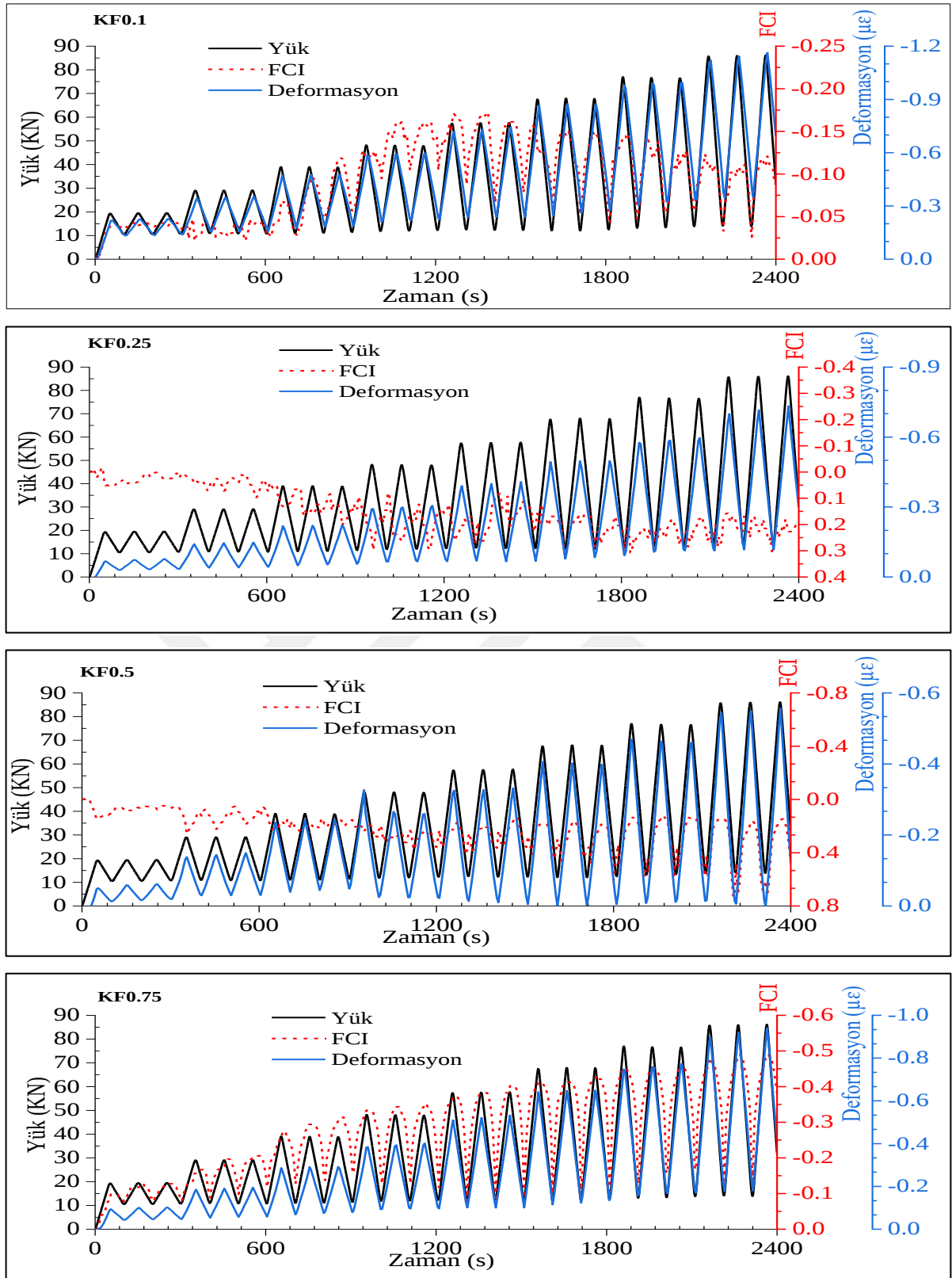


**Şekil 109.** Kontrol numunelerinin periyodik basınç yüklemesi altında algılama davranışı.

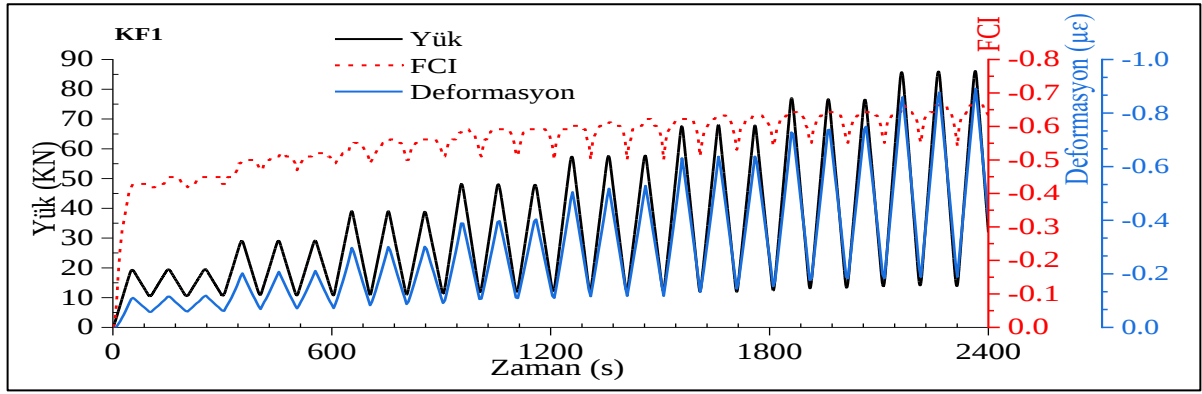
Elektrik akımının yönü yük yönüne paralel olduğundan, yük arttıkça elektrik empedansı azalır ve periyodik basınç yükü altında FCI'da (eksi yön) negatif bir artışa neden olmaktadır. Periyodik basınç altındaki yük ve FCI değerlerinin değişimini kolayca karşılaştırmak için, tüm kompozitlerde deformasyonu ve FCI'nın mutlak değerleri alınmıştır. İçeriğinde iletken bir malzeme bulunmayan kontrol numunesi periyodik yükleme altında Şekil 109'da görüldüğü gibi iyi bir algılama davranışı göstermemiştir. Deformasyon, beklendiği gibi yüklemeye azalan ve boşaltmada artan bir davranış göstermiştir. Periyodik basınç altındaki deformasyon ve FCI arasında hiçbir uyum gözlenmemiştir. Diğer iletken kompozitlerin kendiliğinden algılama davranışları aşağıda irdelenmiştir.

### **Periyodik basınç yüklemesi altındaki KF'li kompozitler**

Şekil 110'da, periyodik basınç yüklemesi altında KF kompozitlerinin kendiliğinden algılama davranışı gösterilmektedir. % 0.1, 0.25 ve 0.5'ine sahip yükleme/boşaltma yapılan periyodik yüklemeye iyi bir algılama göstermemiştir. Bu kompozitlerin bu yükleme altında elektriksel iletkenliği düşüktür. KF0.75 kompozitleri, Şekil 110'de gösterildiği gibi iyi bir davranış göstermiştir. KF0.75'in FCI'si de her yükleme döngüsünde bariz ve istenmeyen kararsızlık üretmiştir. KF0.75 karbon fiberler monotonik yükleme kısmında anlatıldığı gibi, iyi bir iletken ağ oluşturmuştur. Hatta yükleme/boşaltma döngüsünde bile iletken ağ aktif kalmıştır.

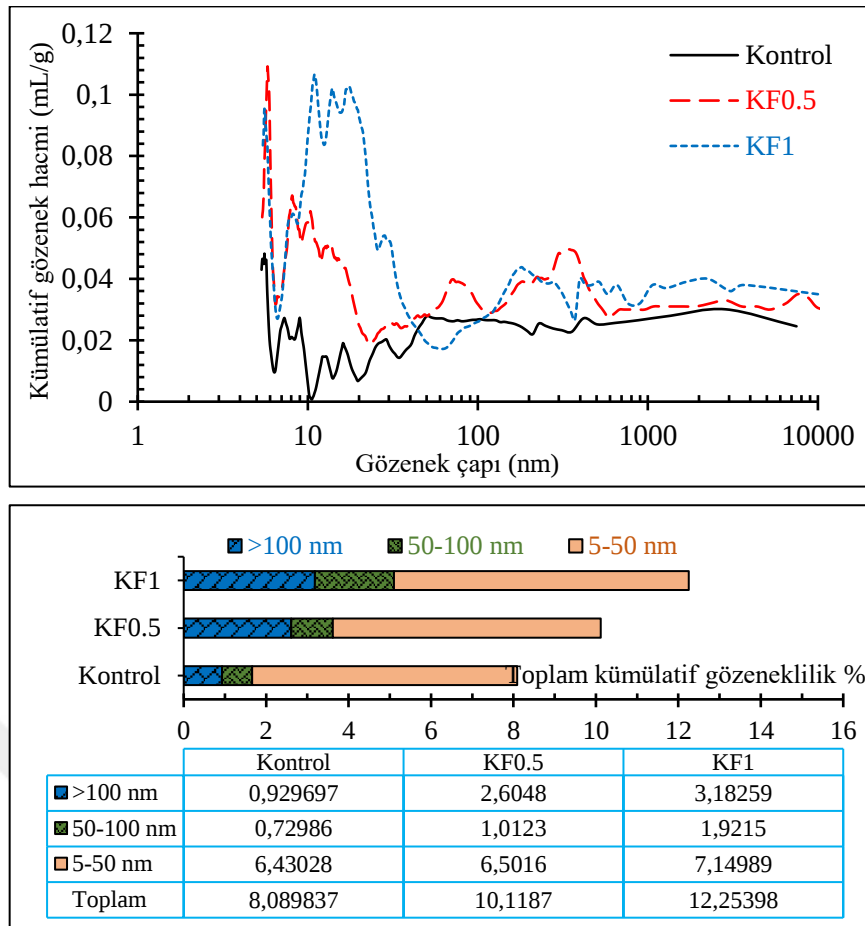


Şekil 110. KF numunelerinin periyodik basınç yüklemesi altında algılama davranışı.

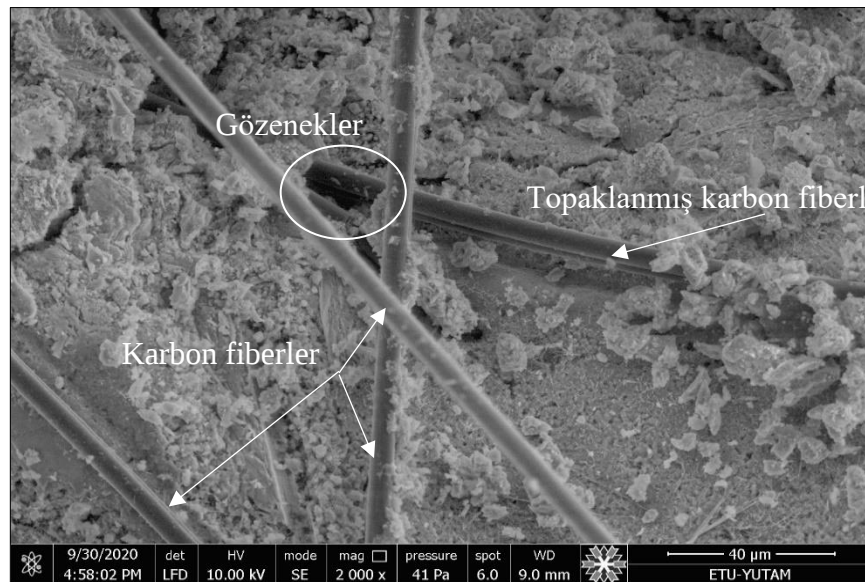


**Şekil 110.** KF numunelerinin periyodik basınç yüklemesi altında algılama davranışı (devamı).

KF1 kompozitleri, KF0.75 kompozitlerine göre daha az bir algılama göstermiştir. Bunun nedeni, yüksek KF içeriğinin çimento kompozitlerinde KF topaklaşma alanı oluşturabileceğidir. Ayrıca, KF'nin çimento matrisinde artması, yapının gözenek boyutunu artırır ve bu da kompozitin kendiliğinden algılama özelliklerini etkilemektedir. KF içeriğinin kendiliğinden algılama özelliklerine olan etkisini araştırmak için, gözeneklilik, Şekil 111'de gösterildiği gibi civa porozimetresi (MIP) testi ile ölçülmüştür. Aradaki farkın görülebilmesi için KF1 ve KF0.5 kompoziti kıyaslanmıştır. KF1 kompozitinin artan gözenek hacmi, Şekil 111'de KF0.5 ve normal çimento hamurunkinden daha büyük olduğu görülmüştür. Literatürden hareketle, kümülatif gözenek boyutu, Şekil 111'de gösterildiği gibi önceki çalışmalara (Zeng *et al.* 2012; Mehta and Monteiro 2017) dayalı olarak üç boyut aralığında incelenmiştir (1) (5-50 nm) gözenek boyutlarında mezo gözeneklerdir, bunlar genellikle C-S-H gibi hidrasyon ürünleri arasındaki boşluğu gösterir; (2) kılcal gözenekler (50-100 nm); (3) büyük kılcal gözenekler (> 100 nm), çimento partikülleri arasındaki veya arayüzey geçiş bölgesindeki (ITZ) gözenekleri göstermektedir. Bu gözenekler çimento hamurunun dayanımı ve geçirgenliğini etkileyebilmektedir. KF'lerin varlığı, özellikle hacimce %0,5'ten %1'e çıktığında geniş kılcal gözenekleri artırmıştır. Bu nedenle, KF1 kompozitinin toplam gözenekliliği (%12.25), sırasıyla, normal çimento hamurun (% 8.089) ve KF0.5 (% 10.12) kompozitlerinden yaklaşık %51.5 ve %25 daha yüksektir. KF içeriğinin artması, liflerin çimento hamurunda birbirine yapışması nedeniyle büyük gözenekler oluşturmaktadır. Bu sonuçlar Lee *et al.* (2017) 'nin araştırmasıyla uyumlu çıkmıştır. KF0.5 numuneleri normal çimento hamurundan yaklaşık %21 daha yüksek bir toplam gözeneklilik elde ettiğini belirtmişlerdir. Kılcal gözenekler (> 50nm) ve geniş kılcal gözenekler (> 100nm), KF içeriğinin artmasıyla artmıştır, bu artış Şekil 112'de gösterildiği gibi SEM görüntü analizleri ile desteklenmiştir. Gözenekler, karbon fiber ve çimento hamuru arasında koyu bölgeler olarak Şekil 112'de görünmektedir.



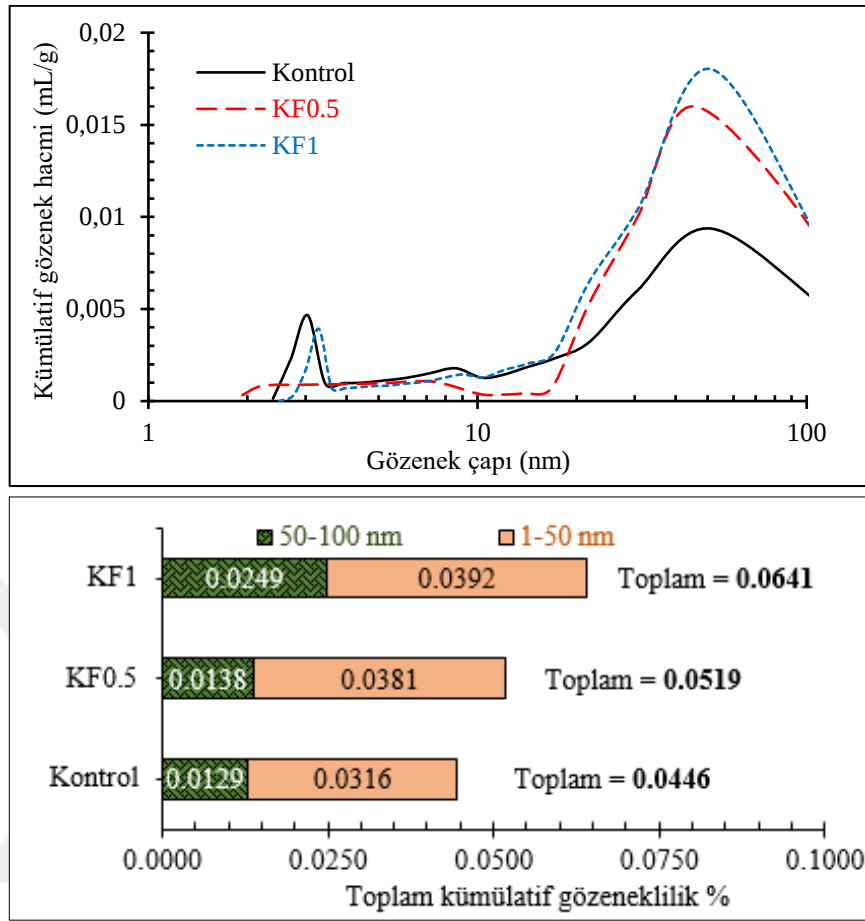
Şekil 111. KF0.5 ve KF1 numunelerinin MIP sonuçları.



Şekil 112. KF1'li kompozitin SEM görüntüsü.

100 nm'den küçük gözenek boyutuna sahip KF kompozitlerinin gözenekliliğini araştırmak için BET analizi de yapılmıştır. KF0.5 ve KF1 kompozitleri için BET sonuçları Şekil 113'te gösterilmektedir. Bu şekilden, gözenekliliğin KF içeriğinin artmasıyla arttığı

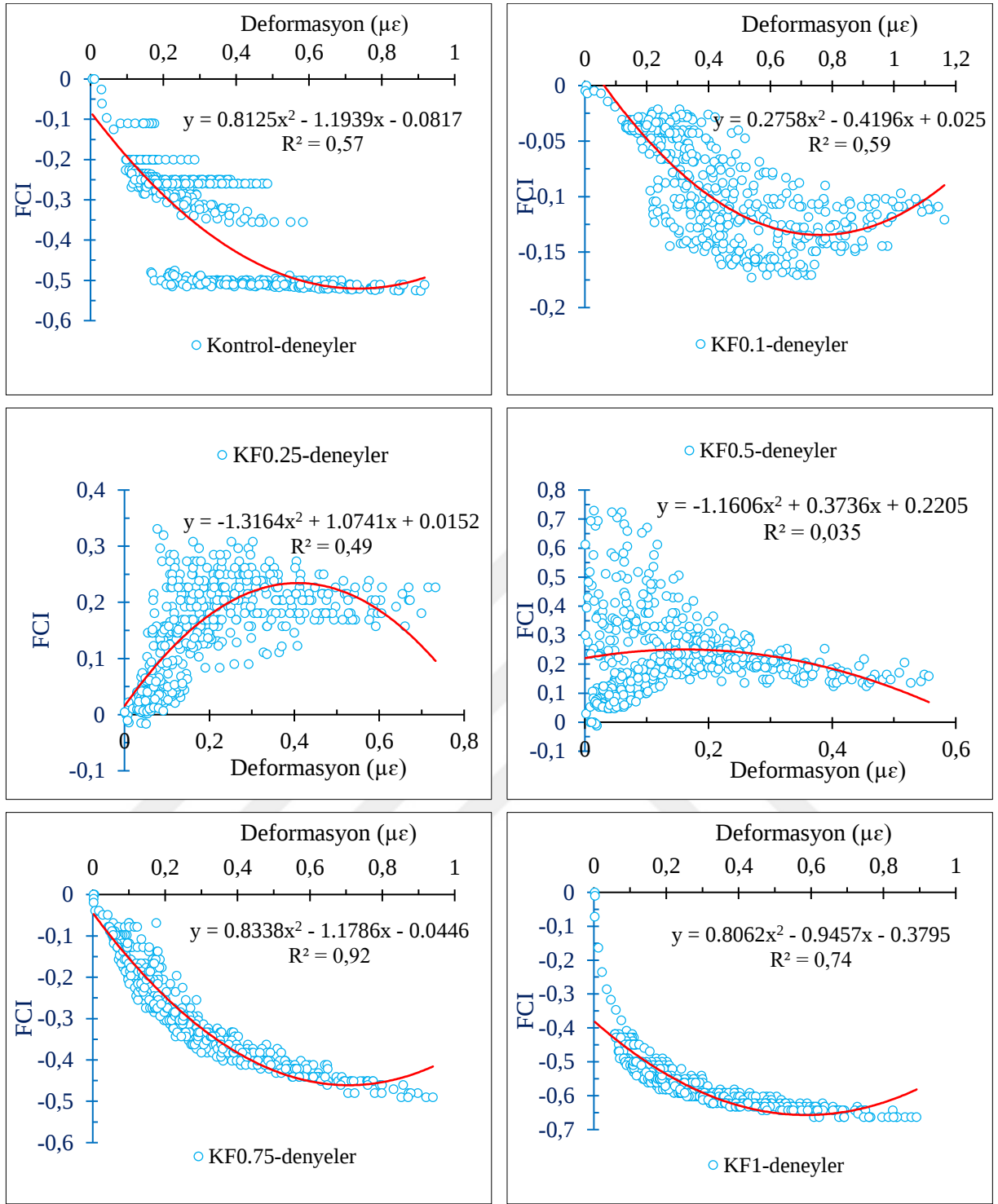
görülebilmektedir. KF0.5 ve KF1 kompozitlerinin gözenekliliği çimento hamurununkinden sırasıyla %16,44 ve %43,8 daha yüksek çıkmıştır.



**Şekil 113.** KF kompozitlerinin BET sonuçları.

KF içeriğini artırmak, önceki araştırmada (Wen and Chung 2005) gösterildiği gibi her zaman iyi algılama özellikleri üretmek anlamına gelmez. Bu bulgular, önceki bölümde elektriksel empedans sonuçlarıyla da uyumludur. Şekil 92’de gösterildiği gibi KF0.75 ve KF1 kompozitleri elektrik empedansında çok fazla fark göstermemiştir. Bu nedenle, monotonik basınç altında KF’nin kabul edilebilen algılama göstermesine rağmen, %0.75 hacim KF içeriği periyodik basınç altında FCI’yı algılamak için ideal bir oran olabilmektedir. Periyodik basınç altında FCI ve basınç deformasyonu arasındaki korelasyon Şekil 114’te gösterilmektedir. Elastik veya plastik bölgeden bağımsız olarak tüm periyodik fazlar için korelasyon eğrisi çizilmiştir.

Şekil 114’te, KF0.75 ( $R^2 = 0,92$ ) grubu FCI ve deformasyon arasında iyi bir uyum göstermektedir. Bazı deformasyon değerleri tam olarak periyodik yükleme eğilimini takip etmemektedir. Bunun nedeni, numunenin ilk oturması veya deformasyon ölçer (strain gauge) ile küp numunelerin yüzeyi arasındaki temas bölgesinde beklenmeyen kayma veya deformasyondan kaynaklanmaktadır.



**Şekil 114.** KF kompozitlerin periyodik basınç yüklemesi altında deformasyon-FCI arasında korelasyon.

Literatürde KF kompozitlerinin kendiliğinden algılama kapasitesini araştırmak için %0.1, 0.5 ve 1 hacim oranında 6 mm uzunluğunda KF kullanmışlardır (Lee *et al.* 2017). KF'nin periyodik yükleme altında bariz istenmeyen kararsızlık ürettiğini ve KF0.5'in yük ile uyumlu bir FCR eğilimi gösterdiğini bulmuşlardır. Farklı boy/çap oranlarına ve kullanım oranlarına sahip KF kompozitlerinin algılama kapasitesi Baeza *et al.* (2013a) tarafından incelenmiştir.

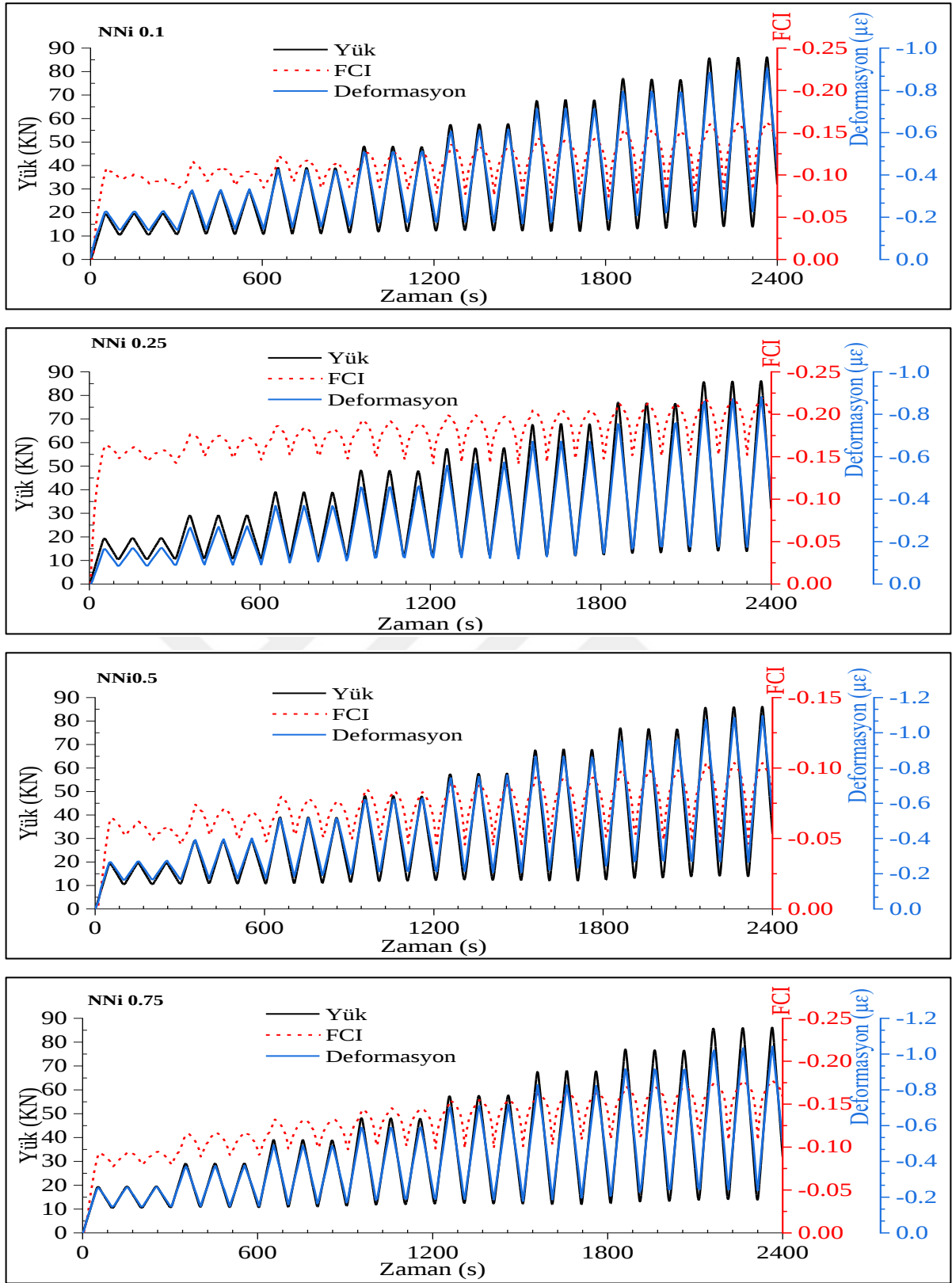
Çimentonun ağırlığının %0.5'i KF'ye sahip  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  numuneler, periyodik yükleme altında iyi bir algılama davranışı gösterdiğini belirtmişlerdir.

### **Periyodik basınç yüklemesi altındaki NNi'li kompozitler**

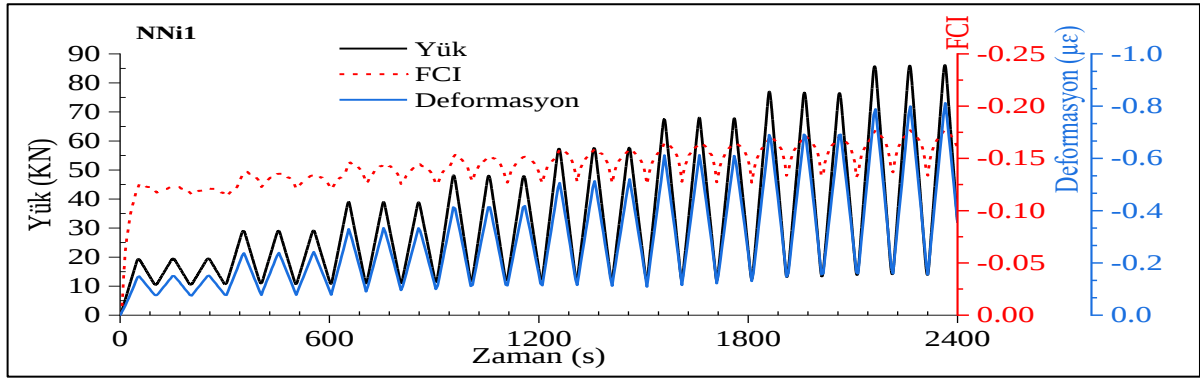
NNi kompozitlerinin periyodik basınç altında piezorezistif davranışı Şekil 115'te gösterilmektedir. Periyodik basınç döngüleri ve aşamalarına bağlı olarak FCI değerleri yükleme sırasında azalmış ve boşaltma sırasında artmıştır. NNi kompozitlerinin periyodik basınç testlerinde gözlenen açık bir istenmeyen kararsızlık (noise) yoktur. Yükleme aşamaları arasında yük büyüklüğünün artırılması ile yük altında FCI değerlerinde bir artış oluşmuştur. Bu, NNi'nin farklı yükleri ve farklı döngüleri algılayabildiğini göstermektedir. Nano nikel parçacıklarının yüksek iletkenliği, kompozitlerin yükler altında algılanmasını iyileştirmektedir. Ek olarak, nikel parçacıkları ve tünelleme mesafesi etkisi arasındaki mesafe, çimento matrisinin iletken ağını iyileştirebilmektedir.

Nano nikel partikül içeriğinin hacimce %0.25'ten daha fazla kullanımı Şekil 116'da gösterildiği gibi periyodik basınç altındaki kompozitlerin hassasiyetini artırabilmektedir. Yani NNi0.5 ve NNi0.75, NNi1 kompozitleri NNi0.25'e göre daha iyi algılama hassasiyeti göstermiştir. NNi1 kompozitlerinin, yükleme sırasında 0.5 ve 0.75 oranlarına göre FCI değerleri değişim aralığı daha farklıdır. Bunun nedeni, NNi içeriğinin artmasının, NNi'nin topaklaşması ve iletken ağ oluşumunda zayıflığa yol açması olabilmektedir. Ayrıca, daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi, iletken nano nikelin büyük bir kısmı, karışım işlemi sırasında havadaki oksijen ile reaksiyona girerek iletken olmayan bir nikel okside aktarılabilir. Ancak, NNi kompozitleri, periyodik basınç altında, FCI değişimlerine bakılmaksızın KF'den daha iyi kabul edilebilen algılama yanıtı göstermiştir.

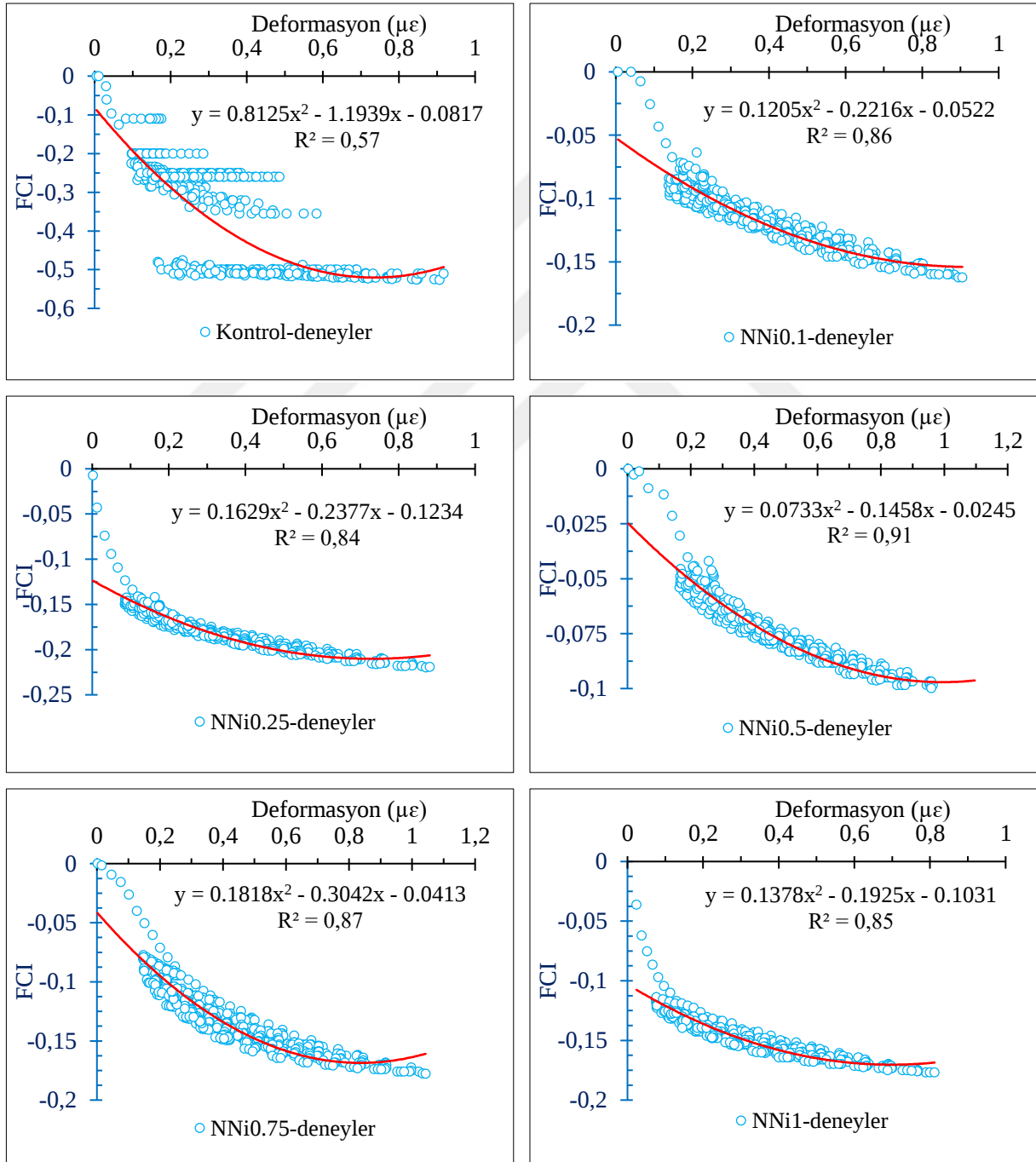
Daha önce belirtildiği gibi, çimento kompozitlerinin kendiliğinden algılama tepkisini incelemek için nano nikel partiküllerinin kullanıldığı bir çalışma literatürde yoktur. Trafik yoğunluğu algılaması amacıyla  $5 \text{ cm}^3$  boyutlu numunelerde ortalama boyutu 3–7 $\mu\text{m}$  (kompozitlerde hacimce %21) olan mikro nikel kullanılmıştır (Han *et al.* 2011d). Sonuçta nikel parçacıklarının laboratuvar ve dış mekan trafik yoğunluğu algılama özelliklerini geliştirdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmada uygulanan manyetik işlem, nikel partiküllerini çimento matrisine homojen dağıtarak kompozitlerin algılama kapasitesinin iyileştirilmesine yol açabilmektedir (Lan *et al.* 2018).



Şekil 115. NNi’li kompozitlerin periyodik basınç altında algılama davranışları.



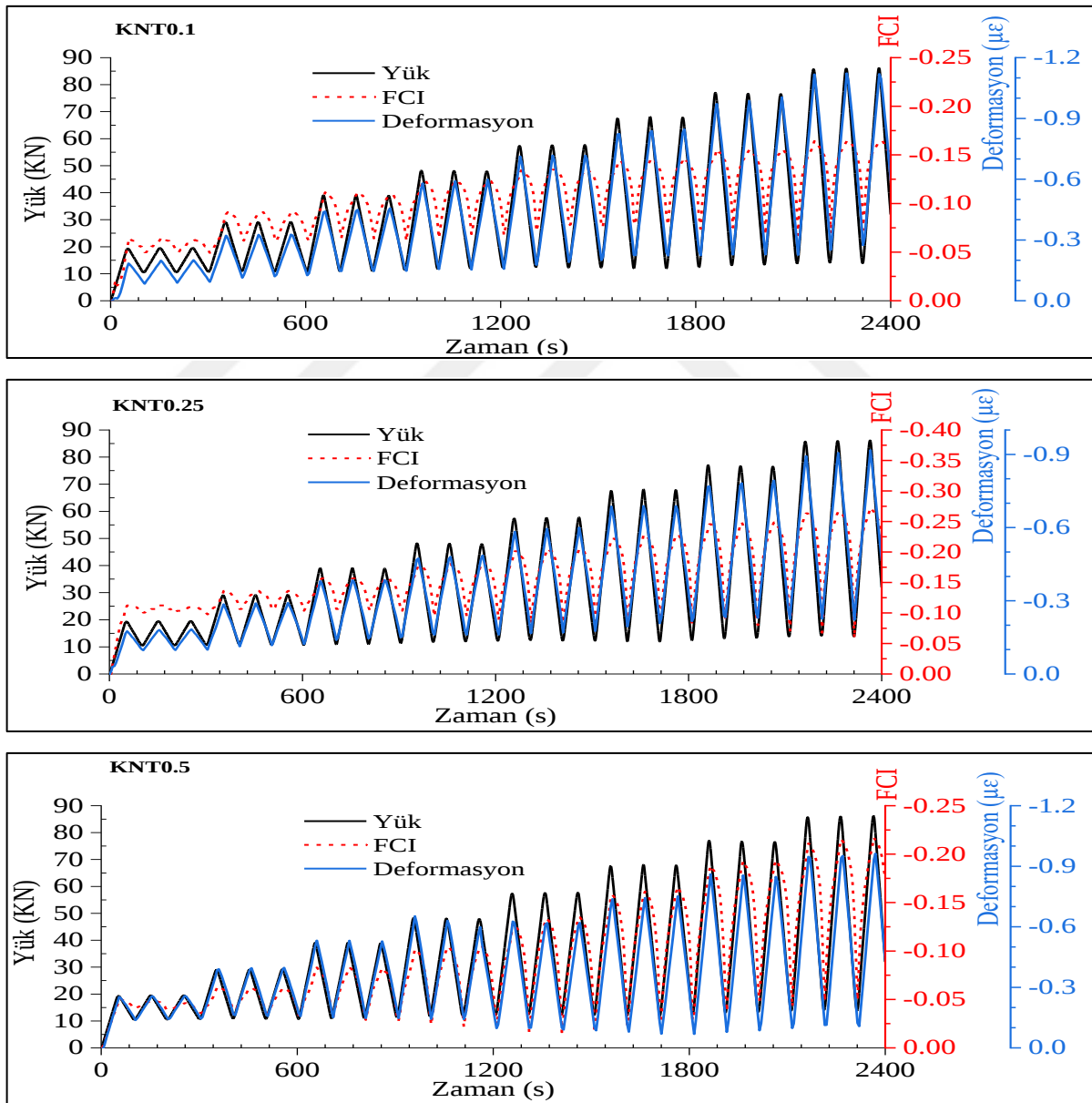
**Şekil 115.** NNi'li kompozitlerin periyodik basınç altında algılama davranışları (devamı).



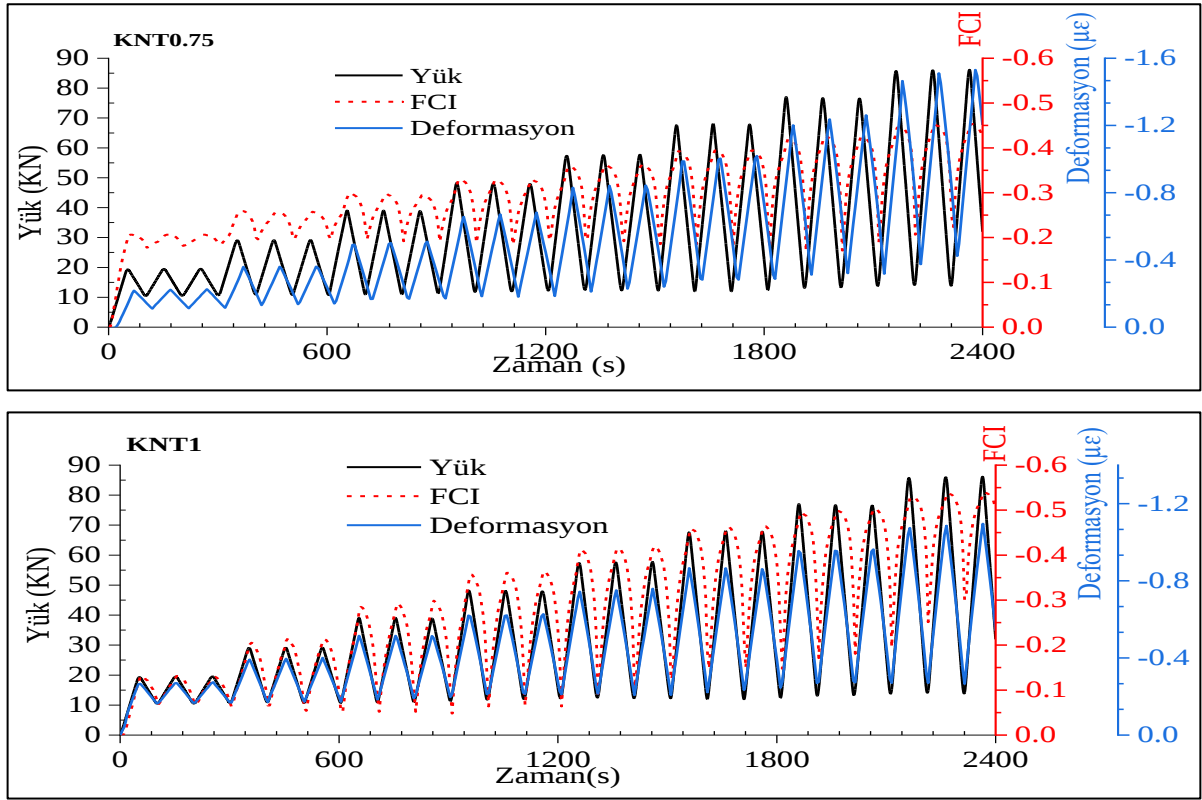
**Şekil 116.** NNi'li kompozitlerin periyodik basınç altında deformasyon-FCI arasında korelasyon.

### Periyodik basınç yüklemesi altındaki KNT'li kompozitler

KNT kompozitlerinin periyodik basınç yüklemesi altındaki algılama davranışları Şekil 117'de gösterilmektedir. Basınç altında, yük arttıkça (yükleme) FCI azalmıştır ve yük azaldıkça (boşaltma) artırmıştır. Şekil 117'den, KNT kompozitlerinin periyodik yükleme altında diğer kompozitlere göre mükemmel kendiliğinden algılama davranışı gösterdiği görülebilmektedir. KNT içeriğinin artması, kompozitlerin basınç altındaki algılama hassasiyetini artırmıştır. Genel olarak, kompozitlerin FCI değeri, yüklemenin tüm aşamalarında yük ve deformasyon ile uyumlu periyodik bir eğilim izlemiştir. Numunelerin testi sırasında istenmeyen noise oluşmamıştır.



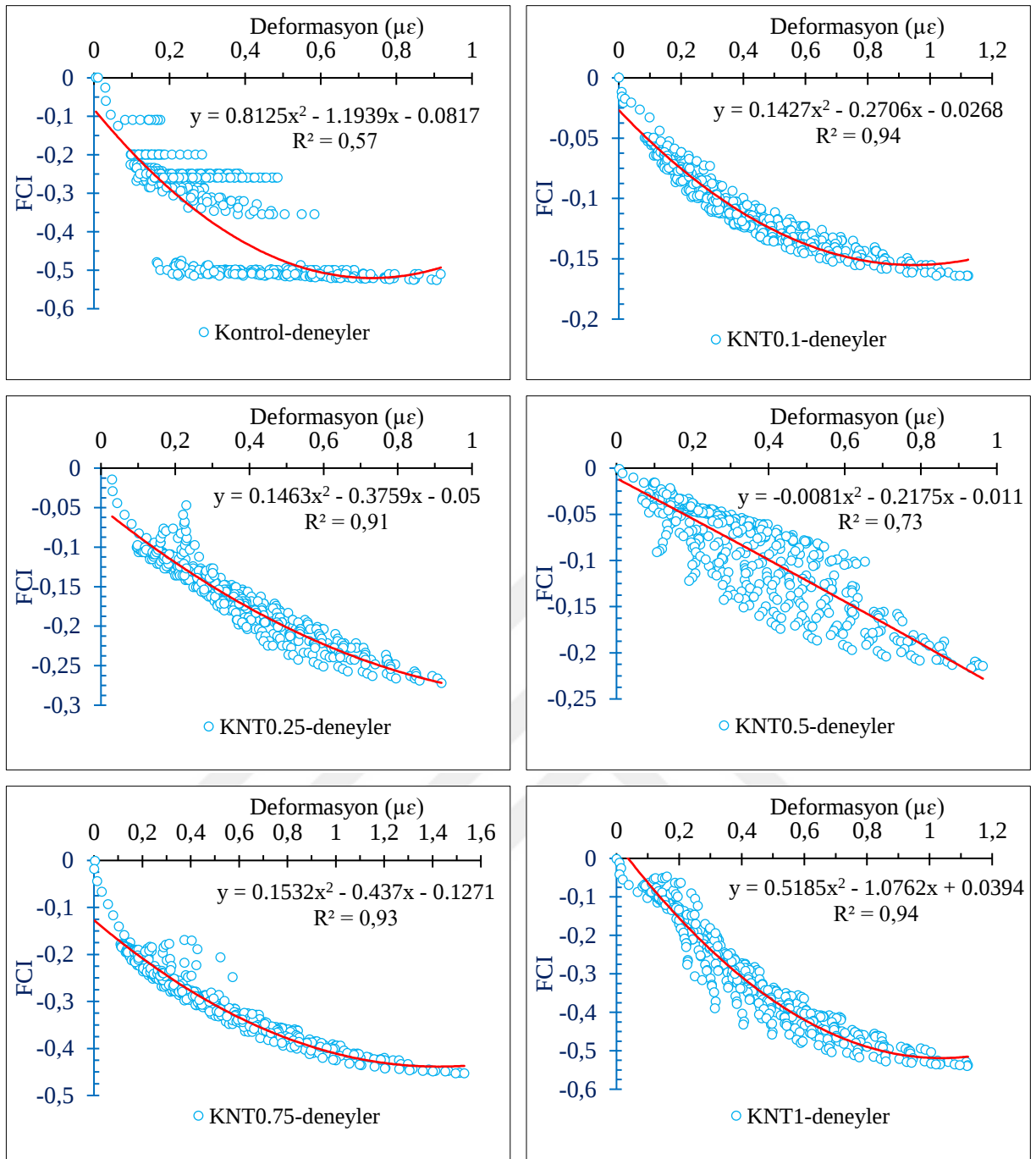
Şekil 117. KNT'li kompozitlerin periyodik basınç altındaki algılama davranışları.



**Şekil 117.** KNT’li kompozitlerin periyodik basınç altındaki algılama davranışları (devamı).

KNT kompozitlerinin basınç yüklemesi ve FCI arasında korelasyonu Şekil 118’de gösterilmektedir. Az miktarda KNT (örneğin 0.1) bile periyodik basınç altında iyi algılama davranışı göstermiştir, KNT içeriği arttıkça duyarlılık artmıştır. KNT içeriği hacimce %0.75’ten %1’e artırıldığında, FCI ve basınç deformasyon, korelasyon katsayıları sırasıyla  $R^2 = 0,93$  ve  $0,94$  ile daha iyi uyum göstermiştir. Değerlerden hareketle KNT kompozitleri KF veya NNT kompozitlerinden daha iyi algılama davranışı göstermiştir.

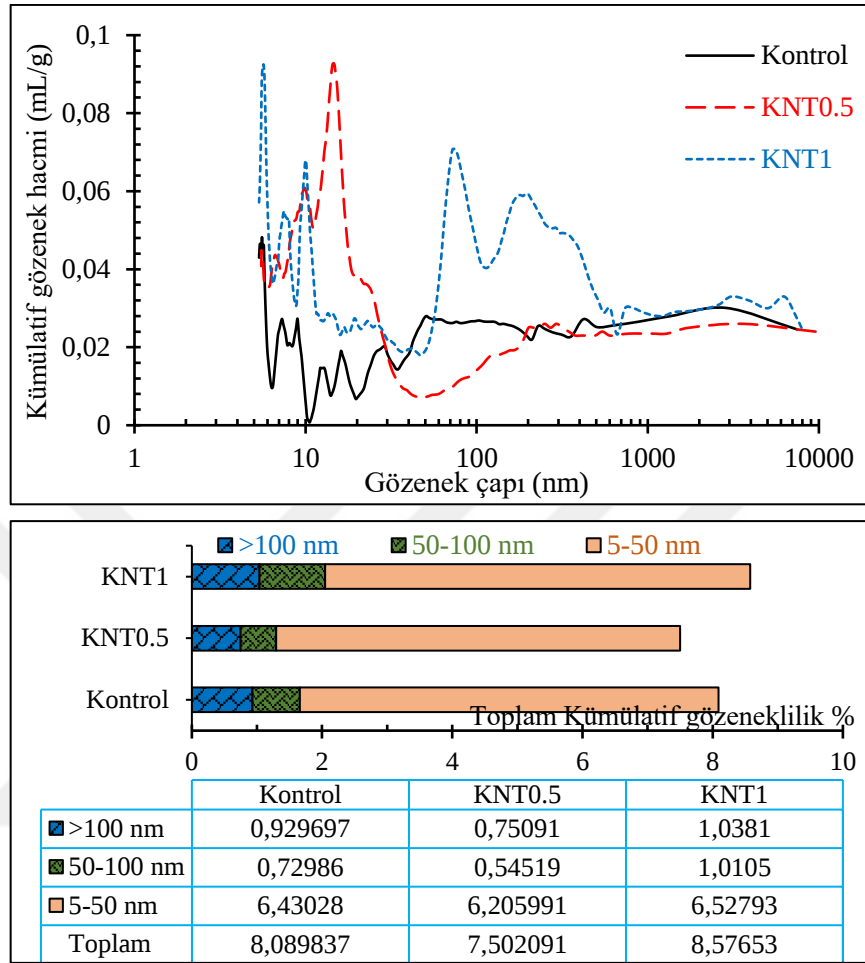
KNT, KF’lerden farklı olarak nano ölçekli malzemelerdir ve çimento hamuruna daha homojen dağılabilmekte ve KNT içeriğinin artırılması ile çimento hamurunun içinde iletken bir ağ oluşumu geliştirilmektedir. Şekil 119’da gösterildiği gibi KNT kompozitlerinin gözenek boyutunu araştırmak için MIP testi de yapılmıştır. KNT0.5 kompozitleri, çimento hamurundan yaklaşık %7,5 daha az toplam gözeneklilik göstermiştir. Bu, küçük nano ölçekli KNT’nin büyük gözenekleri çimento hamuruna doldurduğu anlamına gelmektedir. Ancak, KNT1’in gözenekliliği çimento hamurununkinden yaklaşık %6 oranında fazla çıkmıştır. Yüksek KNT içeriğinden dolayı büyük kılcal gözenek boyutunda artış olabilmektedir (Şekil 120). KNT1 kompozitlerinin toplam gözenekliliğinde çimento hamurununkine göre küçük artışa rağmen, yine de KF1 grubundan daha düşüktür. KNT1 kompozitlerinin toplam gözenekliliği, KF1 kompozitlerinininkinden %43 daha azdır (Şekil 111 ve 117).



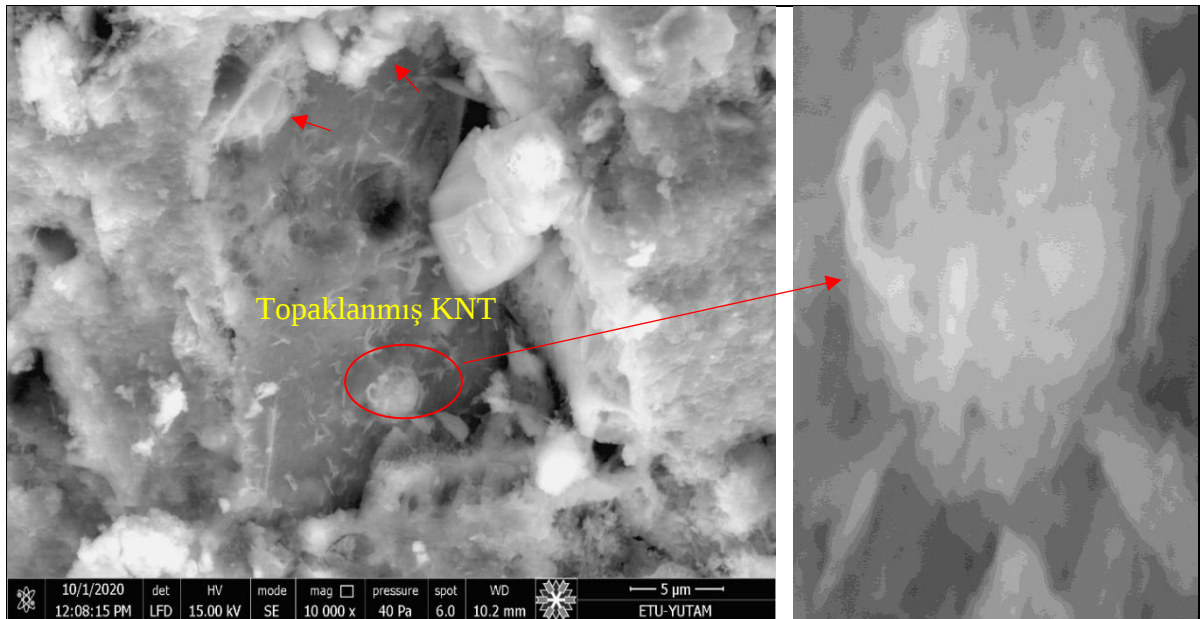
**Şekil 118.** KNT'li kompozitlerin periyodik basınç altında deformasyon-FCI arasındaki korelasyon.

Şekil 121'de gösterildiği gibi gözenek boyutlarını ( $<100\text{nm}$ ) araştırmak için BET testleri de yapılmıştır. KNT1 kompozitlerinin gözenekliliği ile kontrol numuneleri gözenekliliği arasında çok fazla fark yoktur. KNT0.5 kompozitlerinin gözenekliliği, Şekil 121'de gösterildiği gibi çimento hamurunun gözenekliliğinden yaklaşık %6 daha az görülmektedir. Bu, KNT partiküllerinin küçük gözenekleri ( $<100\text{nm}$ ) doldurabileceği ve gözeneklilikteki farkın, Şekil 119'da gösterildiği gibi yalnızca büyük gözeneklerdeki ( $>100\text{nm}$ ) KNT1'de görüldüğü anlamına gelmektedir. Bu nedenle, nano ölçekli KNT, KF kompozitlerine kıyasla toplam gözeneklilik açısından daha iyi sonuçlar göstermiştir. Li *et al.* (2005) ve Lee *et al.* (2017)

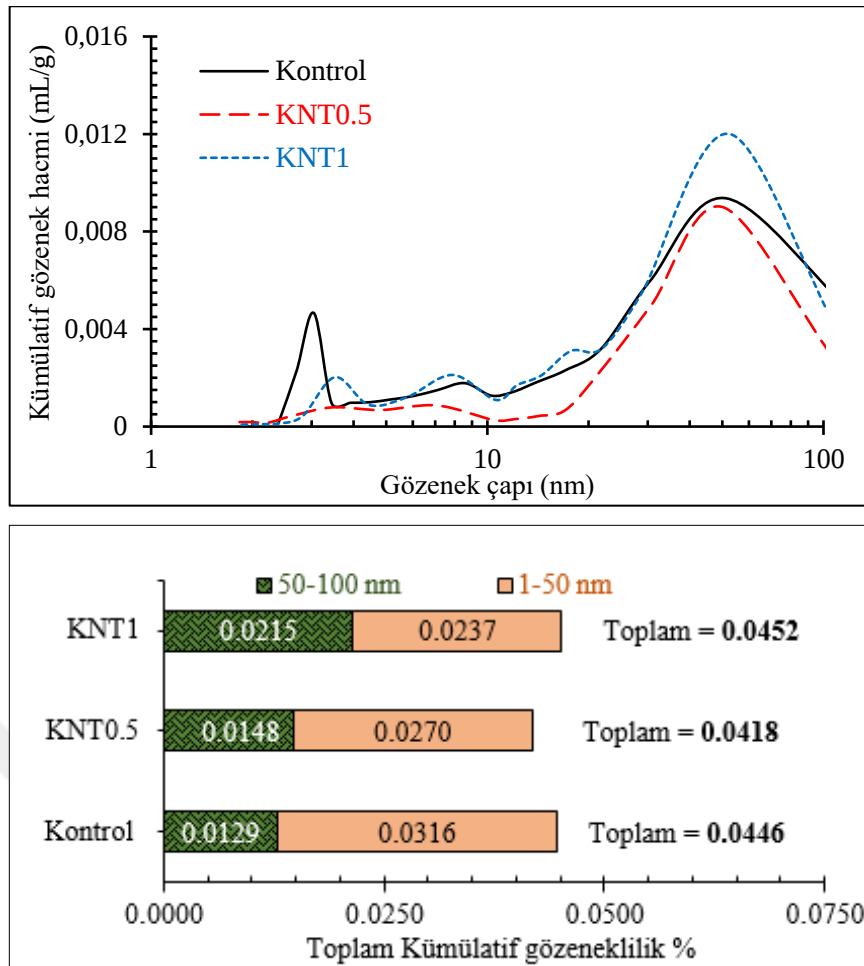
çalışmalarında da aynı bulgular gözlemlenmiştir. Li *et al.*, 2005, %0.5 KNT içeren çimento esaslı kompozitlerin toplam gözenekliliğinin kontrol numunelerinden yaklaşık %64 daha az olduğunu bulmuşlardır.



Şekil 119. KNT'li kompozitlerin MIP sonuçları.



Şekil 120. KNT1'li kompozitlerin SEM görüntüsü.



**Şekil 121.** KNT’li kompozitlerin BET sonuçları.

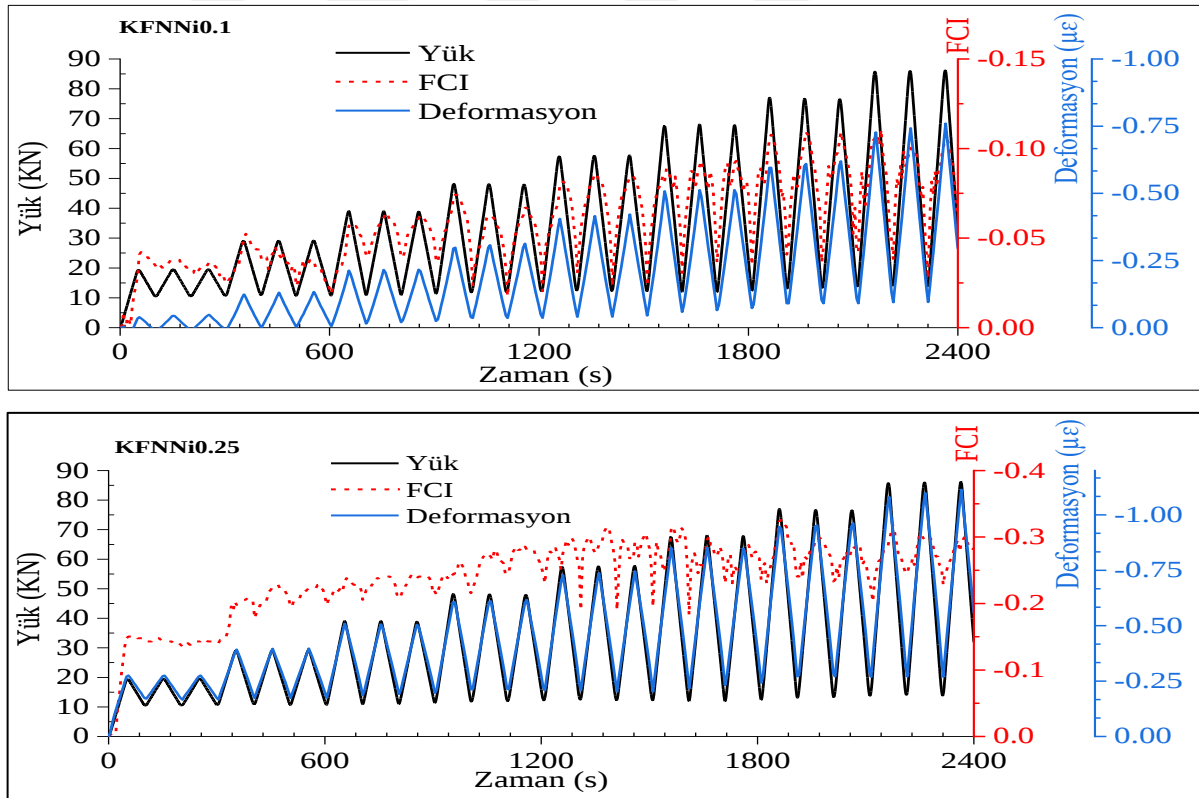
Bu sonuçlara göre, KNT içeriği arttığında kompozitin periyodik basınç yüklemesi altında deformasyon duyarlılığı artmıştır. KNT1 kompozitleri, diğer KNT kompozitlerine kıyasla en iyi deformasyon algılama hassasiyetini göstermiştir. Bu, nano ölçekli KNT’nin gözenekleri doldurmasına ve yük altında birbirlerine daha yakınlaşarak yüksek iletken bir ağ oluşturmasıyla açıklanabilir. KNT arasındaki ortalama mesafe, maksimum yük arttıkça küçülür ve böylece algılama hassasiyeti artar. Bu olay elastik bölge içinde daha belirgindir, plastik bölgede çatlak oluşumu KNT arasındaki mesafeyi artırabilmektedir (Yu and Kwon 2009; D'Alessandro *et al.* 2016a). Periyodik yükleme altındaki maksimum FCI büyüklüğü, Şekil 117 ve 118 ‘de gösterildiği gibi KNT’nin artmasıyla artmıştır.

Hacimce %1 KNT’li kompozitlerin kullanıldığı Lee *et al.* (2017) çalışmasında bu kompozitler iyi algılama hassasiyeti göstermiştir. %1 ve 1.5 ağırlıkça KNT içeriğine sahip kompozitlerin, periyodik yükleme altında FCR’ye dayalı iyi deformasyon sensörleri olduğu bulunmuştur (García-Macías *et al.* 2017). Diğer araştırmacılar, ağırlıkça sadece %0.1 oranında KNT içeren çimento hamurunun iyi deformasyon algılama özelliklerine sahip olduğunu bulmuşlardır (Yu and Kwon 2009; D'Alessandro *et al.* 2016a). KNT kompozitlerinin duyarlılığı, daha önce açıklandığı gibi birçok faktöre bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Bu

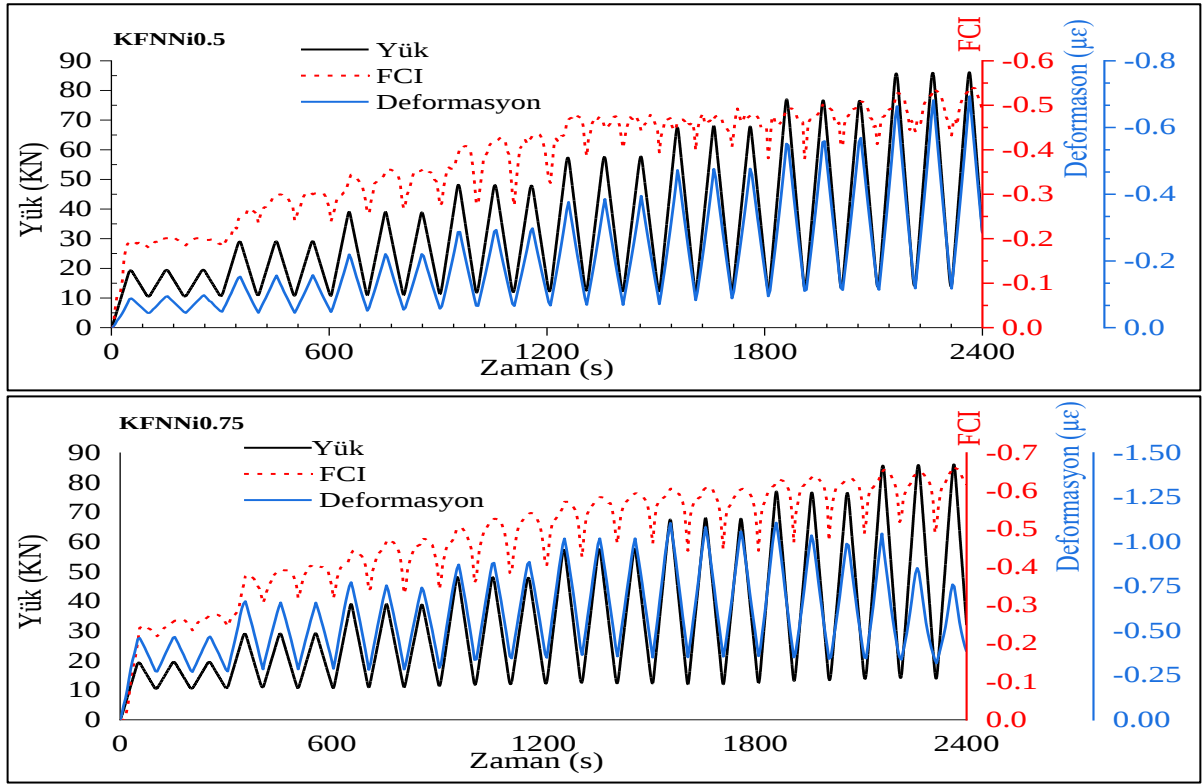
çalışmada, periyodik yükleme altındaki KNT kompozitlerinin sonuçları, daha önce anlatılan elektrik direnci ve monotonik yükleme sonuçlarıyla uyumludur. Bu nedenle, KNT kompozitlerinin sonuçları deformasyon sensörleri için dikkate alınmalıdır.

### Periyodik basınç yüklemesi altındaki KFNNi'li kompozitler

KFNNi'li kompozitlerinin periyodik basınç altındaki davranışları Şekil 122'de gösterilmektedir. Yalnızca KFNNi0.1 kompozitleri, periyodik basınç altında FCI'nın kabul edilebilen bir davranış göstermiştir. Bunun nedeni, düşük KF içeriğinin çimento matrisine dağılması ve fiber-partikül bağlarıyla NNi'in iletken bir ağ oluşturması olabilmektedir. KF içeriğinin artırılması, periyodik basınç testi sırasında istenmeyen kararsızlığı arttırmıştır. Artan KF ve NNi miktarları, KF, NNi ve çimentonun yoğunluğundaki farklılıklar nedeniyle topaklaşma bölgeleri artmış olabilmektedir. Daha önce gösterildiği gibi, tek başına KF ve NNi de KNT'e göre iyi bir yanıt vermemiştir. Bu nedenle, hibrit KFNNi kompozitlerinin davranışlarının da böyle olması beklenen bir davranıştır.

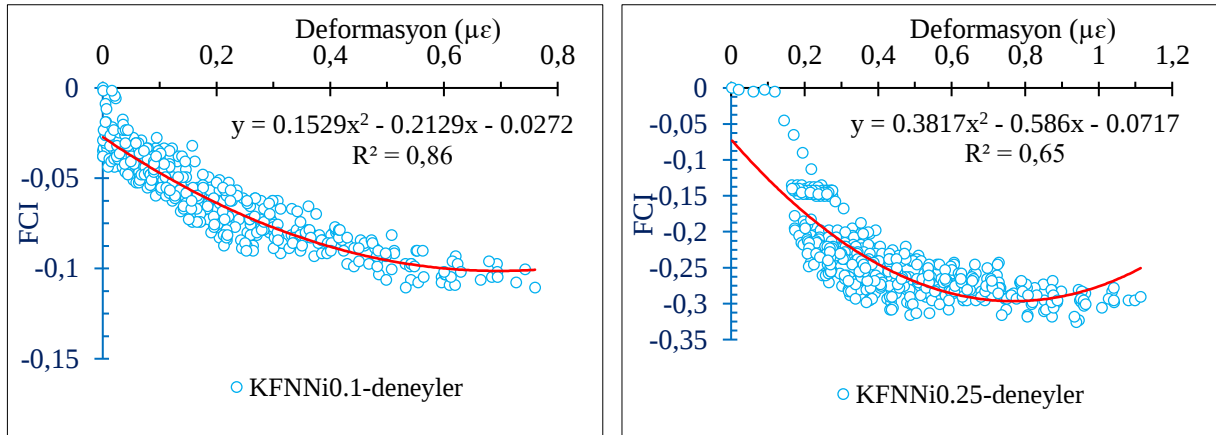


Şekil 122. KFNNi'li kompozitlerin periyodik basınç altında algılama davranışları.

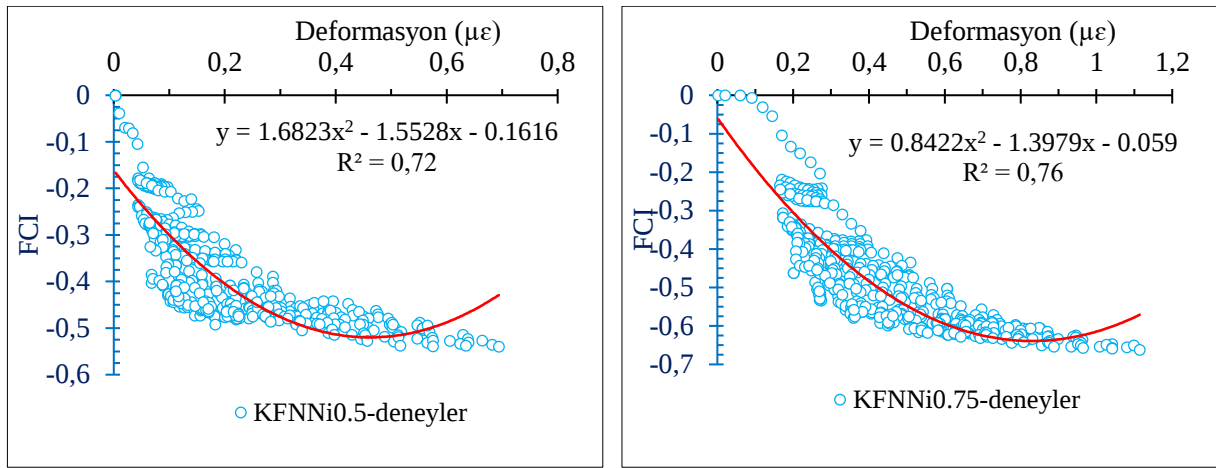


**Şekil 122.** KFNNi’li kompozitlerin periyodik basınç altında algılama davranışları (devamı)

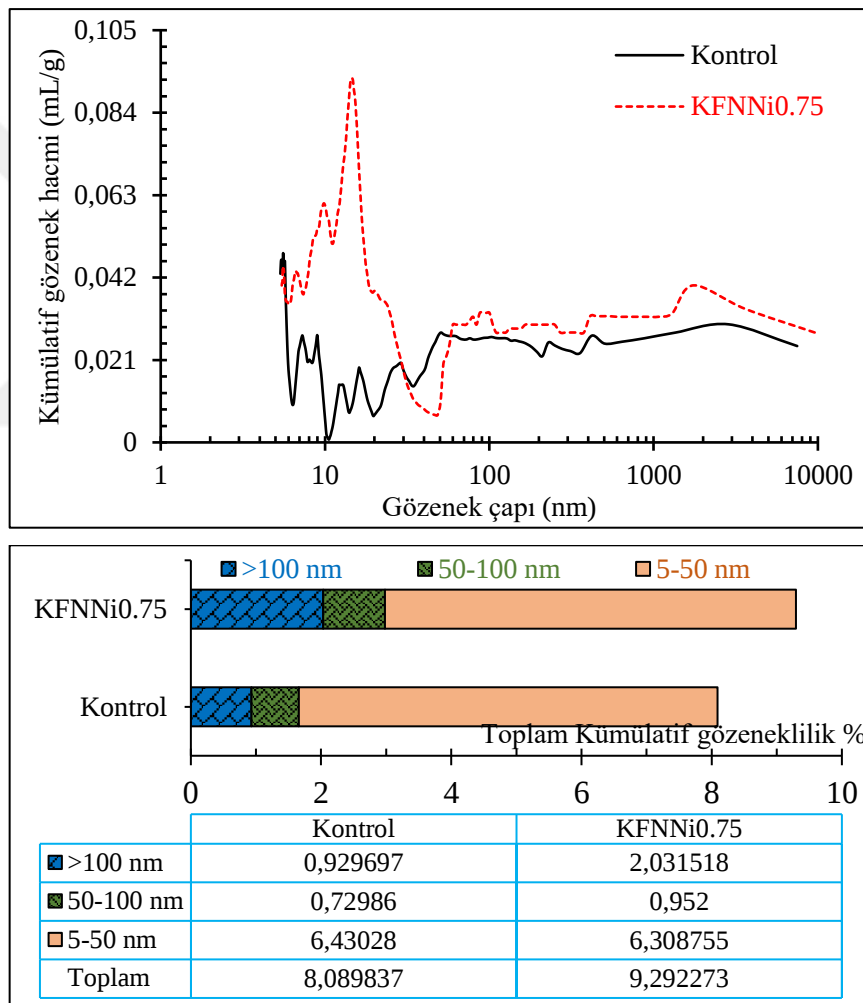
KFNNi kompozitlerinin FCI ile periyodik basınç deformasyonun korelasyonu Şekil 123’te gösterilmektedir. Buradan, sadece KFNNi0.1 kompozitinin  $R^2 = 0,86$  ile tekrarlanabilen bir lineer davranış gösterdiği görülmektedir. Diğer kompozitler, Şekil 123’te gösterildiği gibi basınç yüklemesiyle uyumu zayıf FCI davranışına sahiptir. Ek olarak, KFNNi içeriğinin artırılması, Şekil 124’te gösterildiği gibi çimento hamurunun gözenekliliğini arttırmıştır. Şekil 124’ten görülebileceği gibi, KFNNi0.75 kompozitin toplam gözenekliliği % 9,29’dır, çimento hamurunkiden (% 8.089) yaklaşık %14,86 daha yüksek çıkmıştır. Bu beklenen bir durumdur çünkü KF’lerin çimento hamuruna eklenmesi, daha önce açıklandığı gibi çimento hamurunun toplam gözenekliliğini arttırmıştır.



**Şekil 123.** KFNNi’li kompozitlerin Periyodik basınç altında deformasyon-FCI arasındaki korelasyon



Şekil 123. KFN Ni'li kompozitlerin Periyodik basınç altında deformasyon-FCI arasındaki korelasyon (devamı)

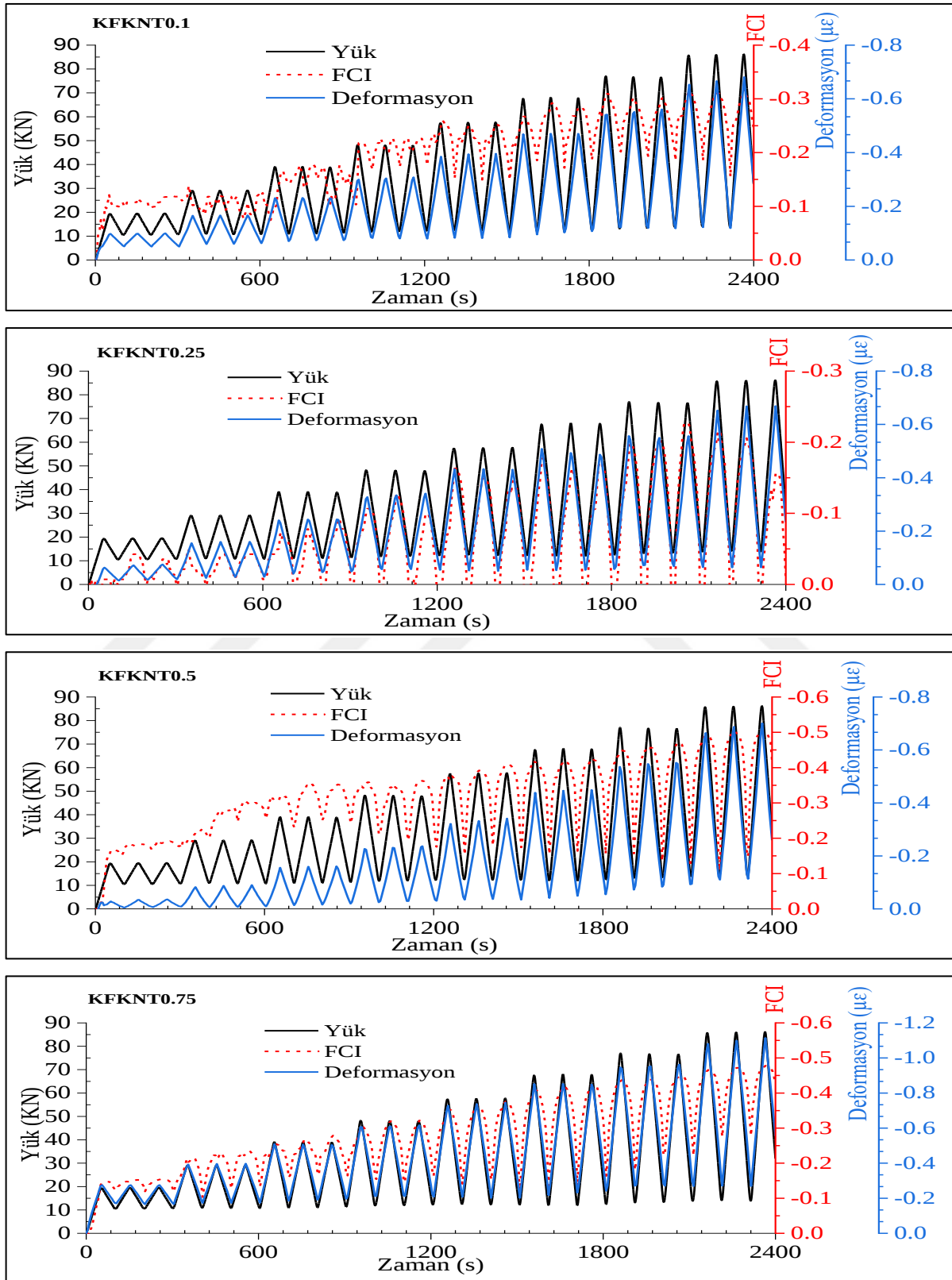


Şekil 124. KFN Ni0.75'li kompozitlerin MIP sonuçları.

### Periyodik basınç yüklemesi altındaki KFKNT'li kompozitler

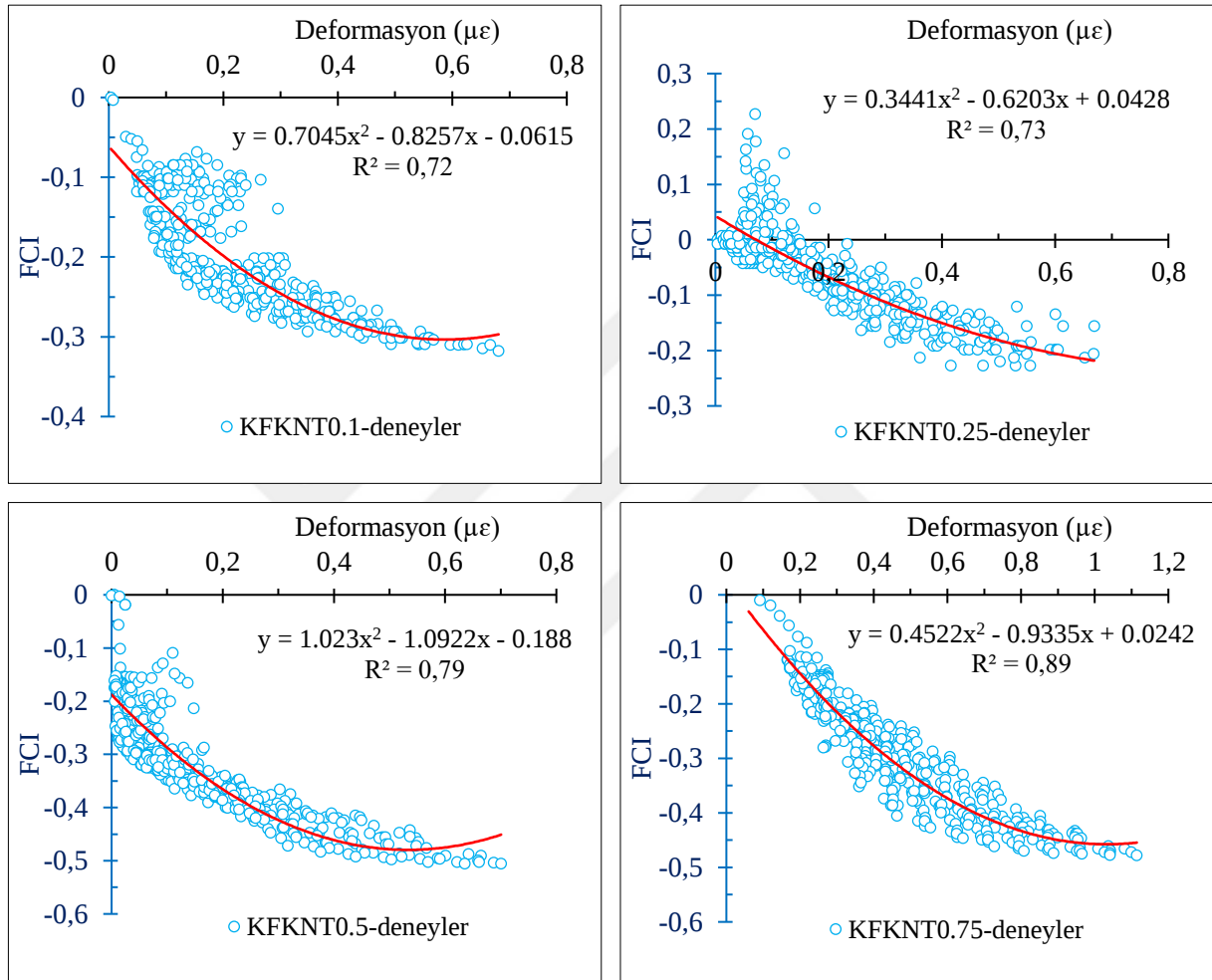
KFKNT kompozitlerinin periyodik basınç altındaki tepkisi Şekil 125'te gösterilmektedir. KFKNT0.1 kompoziti, yeterli bir iletken bir ağ oluşturmamış bunun nedeni, iletken malzemelerin arasındaki mesafenin hala birbirine uzak olmasıdır. KFKNT içeriğinin

arttırılması, periyodik basınç altında FCI ve deformasyon arasındaki tekrarlanabilen doğrusal davranışı arttırmıştır. KFKNT0.75 kompozitleri, fiber-partikül bağıyla yeterli iletken ağ oluşumu nedeniyle diğerlerinden daha iyi yanıt göstermiştir.



Şekil 125. KFKNT’li kompozitlerin periyodik basınç altındaki algılama davranışları.

KFKNT kompozitlerinin FCI ve basınç deformasyon değerleri arasındaki korelasyon Şekil 126’da gösterilmiştir. KFKNT içeriğinin arttırılması, korelasyon katsayısı değerlerini arttırmıştır. Bu, deformasyon algılamanın hassasiyetinin de arttığını doğrulamaktadır. KFKNT0.25 kompozitler, periyodik basıncının ilk aşamalarında FCI’da bir miktar pozitif artış göstermiştir. Bu, numunenin ilk yüklemde oturmasından ve ölçüm hatasından kaynaklanabilmektedir. KFKNT0.75, korelasyon katsayısı  $R^2 = 0,89$  ile en iyi yanıt vermiştir.

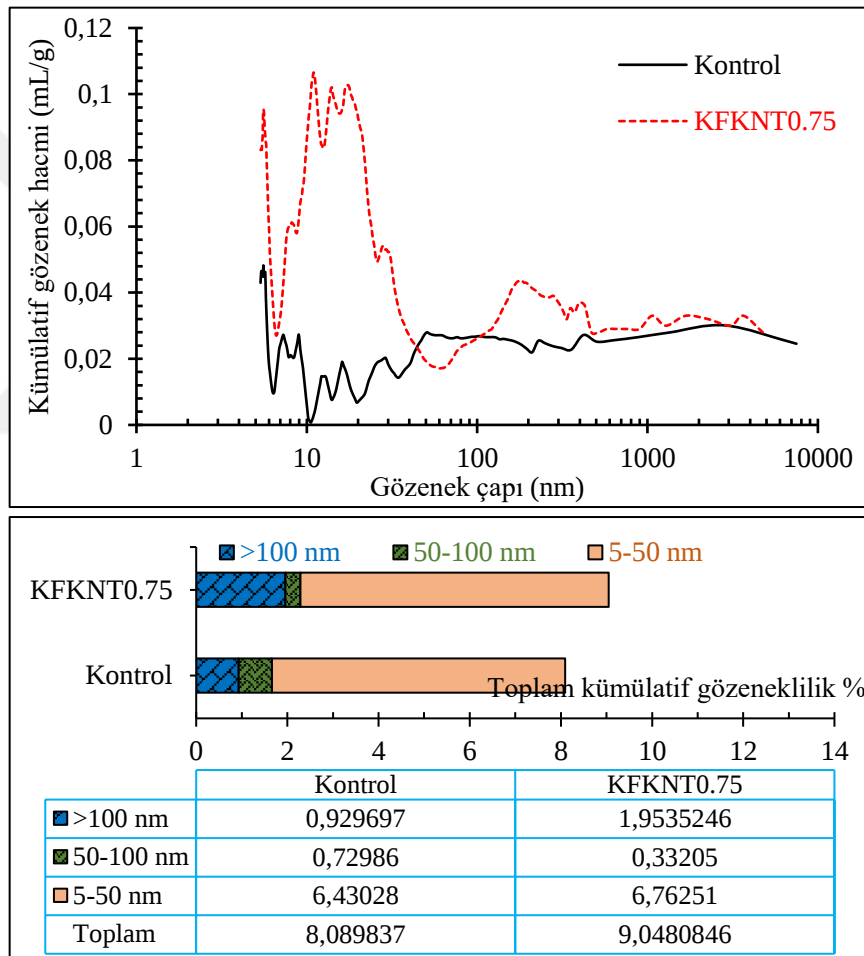


**Şekil 126.** KFKNT’li kompozitlerin periyodik basınç altında deformasyon-FCI arasındaki korelasyonu.

MIP testi, Şekil 127’de gösterildiği gibi KFKNT0.75 kompozitinin toplam gözenekliliğini araştırmak için yapılmıştır. KFKNT0.75 kompozitlerinin toplam gözenekliliği, çimento hamurundan yaklaşık %11,84 daha yüksek çıkmıştır. Bu beklenen bir durumdur çünkü KFKNT hacimce %0.75’e ulaştığında çimento hamurun içerisinde KF’nin oranı artmaktadır. Çimento hamuruna göre KFKNT hacimce %0.75 kullanıldığında geniş kılcal gözenekler yaklaşık %110 oranında artmıştır.

Hibrit KFKNT kompozitlerinin piezorezistif davranışı Lee *et al.* (2017) tarafından incelenmiştir. KF içeriğini azaltma ve KNT’yi artırmanın yüksek algılama hassasiyeti

artırabileceğini bulmuşlar. Kompozitler %0.1 hacimsel oranında KF ve % 0.5 hacimsel oranında KNT içeren  $R^2 = 0,92$  ile en iyi algılama hassasiyeti göstermiştir. KNT'yi düşürmek ve KF içeriğini artırmak kompozitlerin algılama hassasiyetini düşürmüştür. Bu, KF'nin hidrofobik özelliğinden dolayı gözenek boyutunu kontrol numuneleri değerlerine yükseltir. Çünkü lifler etrafında arayüzey geçiş bölgesi daha boşluklu hale gelir bu da KF ve çimento matrisinin bağıni etkilemektedir (Fu and Chung 1996). Önceki çalışmalar ve çalışma sonuçları, KNT'nin tek başına KF veya NNi'den daha etkili olduğunu desteklemiştir. KNT'nin nano boyutu çimento hamuruna dağılımını ve yerleşmesini ve KF'nin çimento matrisi ile bağlantısını desteklemektedir. Bu nedenle, KFKNT kompozitlerinin, özellikle de KFKNT0.75 kompozitlerinin iyi bir deformasyon sensörü olabileceği düşünülmektedir.



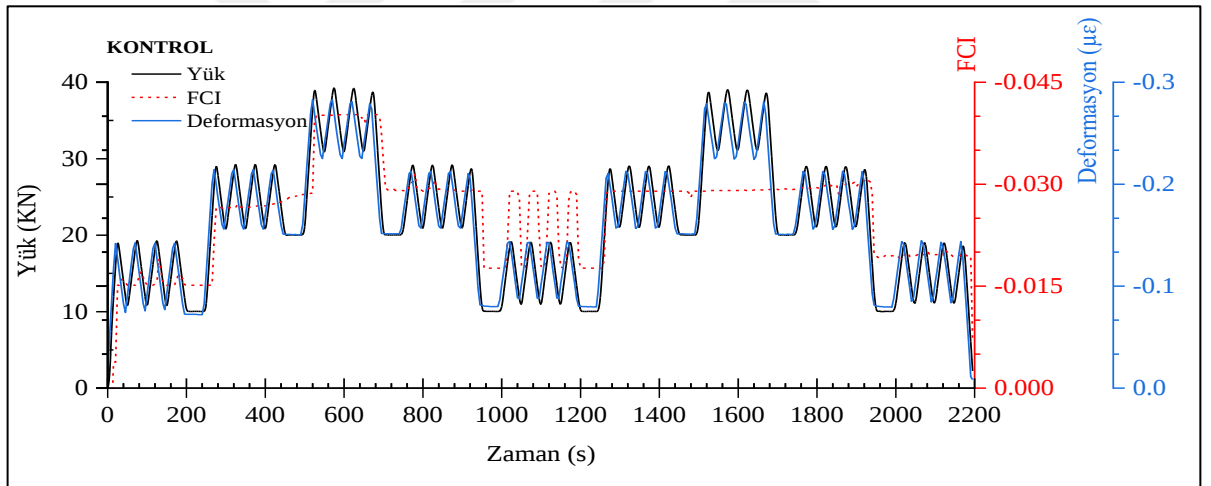
Şekil 127. KFKNT0.75'li kompozitlerin MIP sonuçları.

### Tekrarlanan ve Simetrik Periyodik Yükleme Altında Kompozitlerin Kendiliğinden Algılaması

Çalışmada literatürde olmayan ve çoklu periyodik döngülere sahip yükleme şartları altında hassasiyet değerlendirilmesi de yapılmış olup bu döngü periyodik yükleme ilaveten maksimum değerden sonra 2 aşamalı düşük yükleme altında periyodik yükleme ve sonrasında tekrar artan değerlerde periyodik yükleme aşamalarını içermektedir.

Önceki sonuçlara dayanarak KNT ve KFKNT0.75 kompozitleri, monotonik ve periyodik basınç altında FCI ve deformasyon en iyi ilişkisini göstermiştir. Bu nedenle, bu kompozitler, elastik bölge içindeki algılama hassasiyetlerini sağlamak için tekrarlanan ve simetrik periyodik yükleme altında test edilmiştir. Matristeki çatlama, uygulanan yük maksimum yükün %50 veya 60'ına ulaştığında başlamaktadır (Mehta and Monteiro 2017). Bu kompozitlerin nihai basınç yükü yaklaşık 100 kN veya daha fazla olduğundan, elastik bölge dahilinde numunelerin deformasyonunu sağlamak için maksimum yük 100 kN'nin %45'inden daha az olan 40 kN olarak ayarlanmıştır. Deneysel test düzeneği Şekil 80'de gösterilmektedir. Periyodik testte tekrarlanan döngüler ve durdurma noktaları Şekil 81'de verilmiştir.

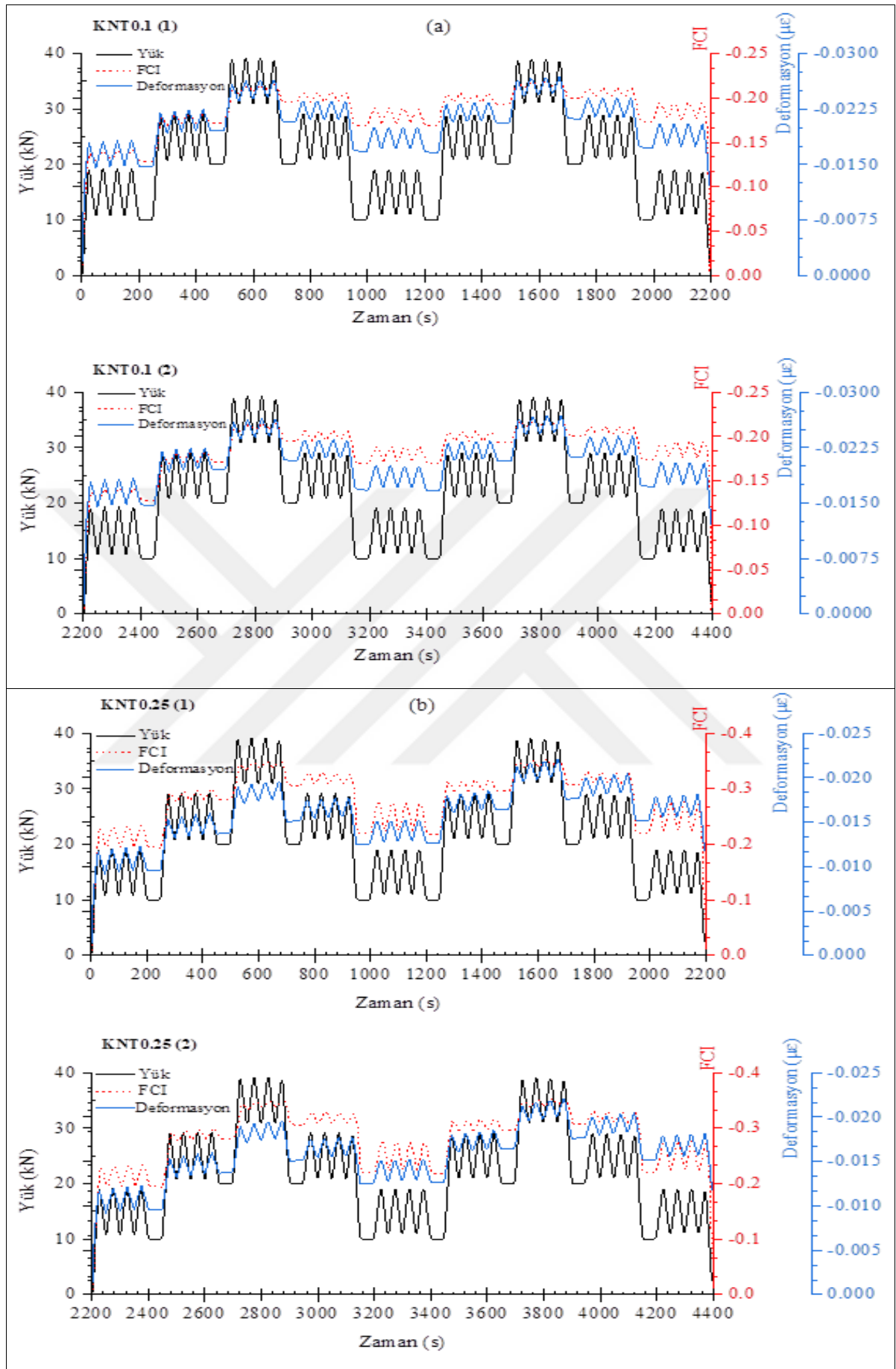
Kontrol numunesinin tekrarlanan ve simetrik periyodik basınç altındaki davranışı Şekil 128'de gösterilmektedir. Çimento matrisinde iletken malzeme olmadığından, kontrol numuneleri beklendiği gibi deformasyon ve basınç yükü ile FCI eğilimi göstermemiştir. Küçük görülen algılama yanıtı, Şekil 128'de gösterildiği gibi basınç altındaki elektrotlar arasındaki mesafenin değişmesinden kaynaklanmaktadır.



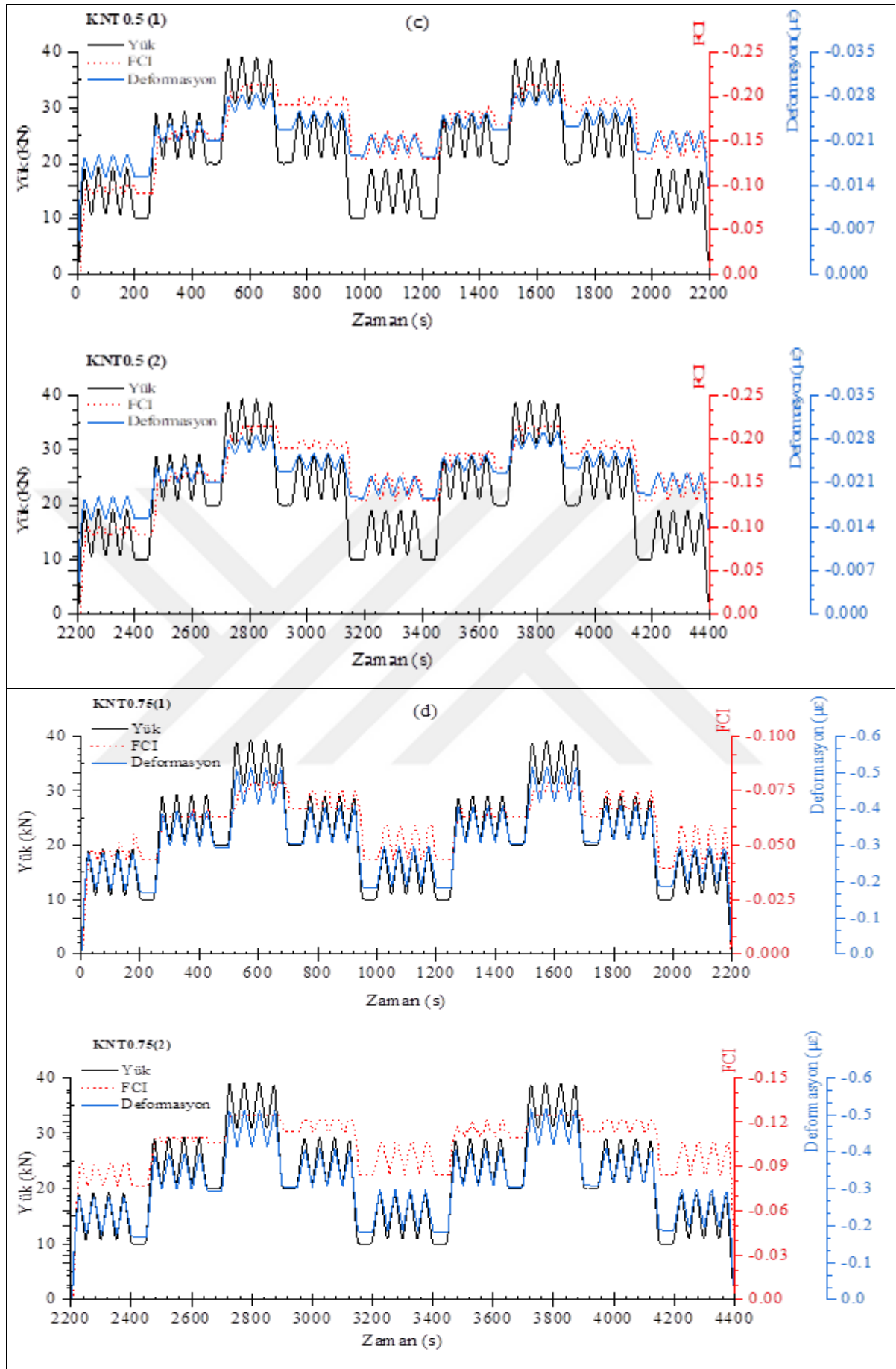
**Şekil 128.** Kontrol grubunun tekrarlanan ve simetrik periyodik basınç altındaki davranışı.

### **KNT kompozitlerinin kendiliğinden algılama davranışları**

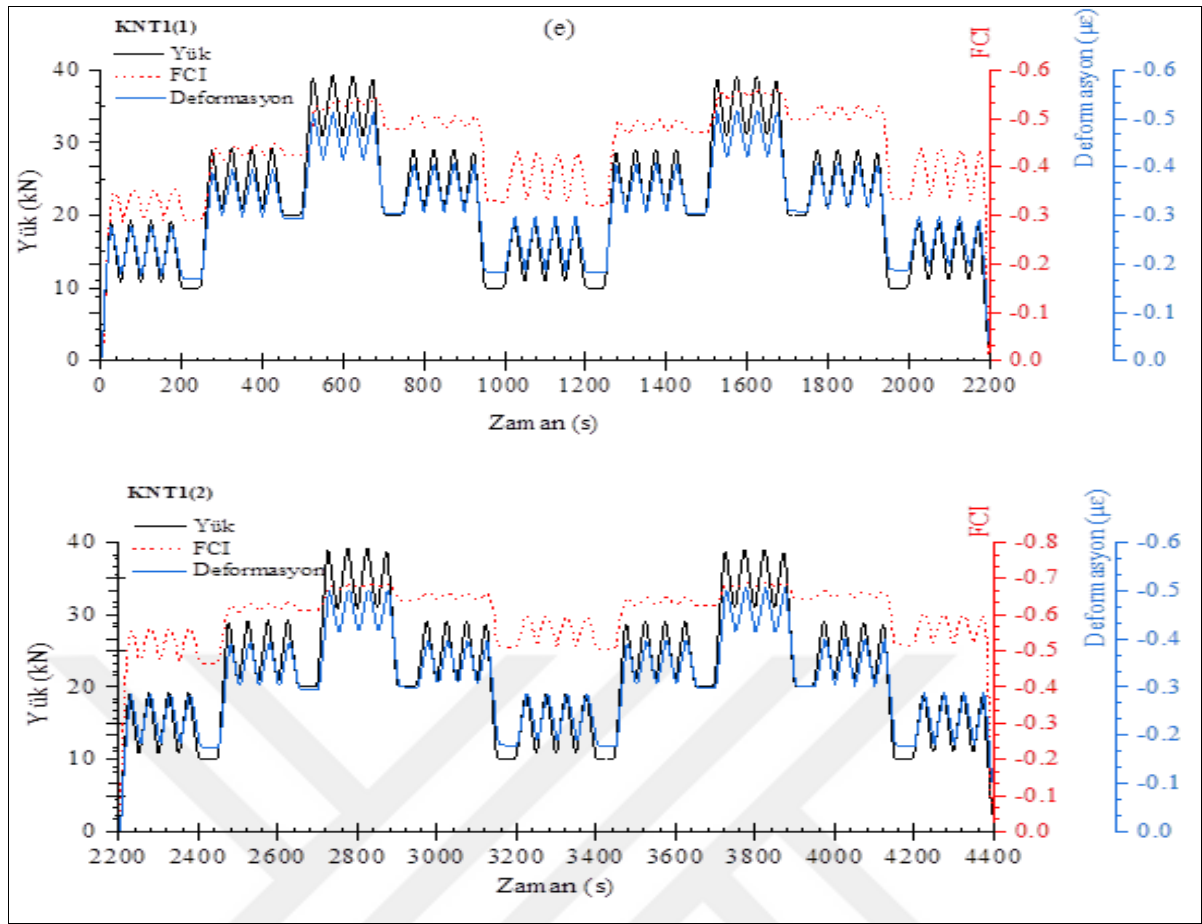
KNT kompozitlerinin farklı yük ve yükleme hızlarına sahip tekrarlanan ve simetrik periyodik yükler altındaki piezorezistif tepkisi Şekil 129'de gösterilmektedir. Elektriksel empedanstaki fraksiyonel değişim (FCI), periyodik basınç altında deformasyonla uyumludur. Tüm KNT kompozitlerinde periyodik basınç yükü arttıkça maksimum FCI değeri de artmıştır. KNT kompozitleri elastik bölgede periyodik yükleme altında iyi bir algılama davranışı göstermiştir.



**Şekil 129.** KNT'li kompozitlerin tekrarlanan ve simetrik periyodik basınç altında davranışları  
(a) KNT0.1 (b) KNT0.25 (c) KNT0.5 (d) KNT0.75 (e) KNT1.

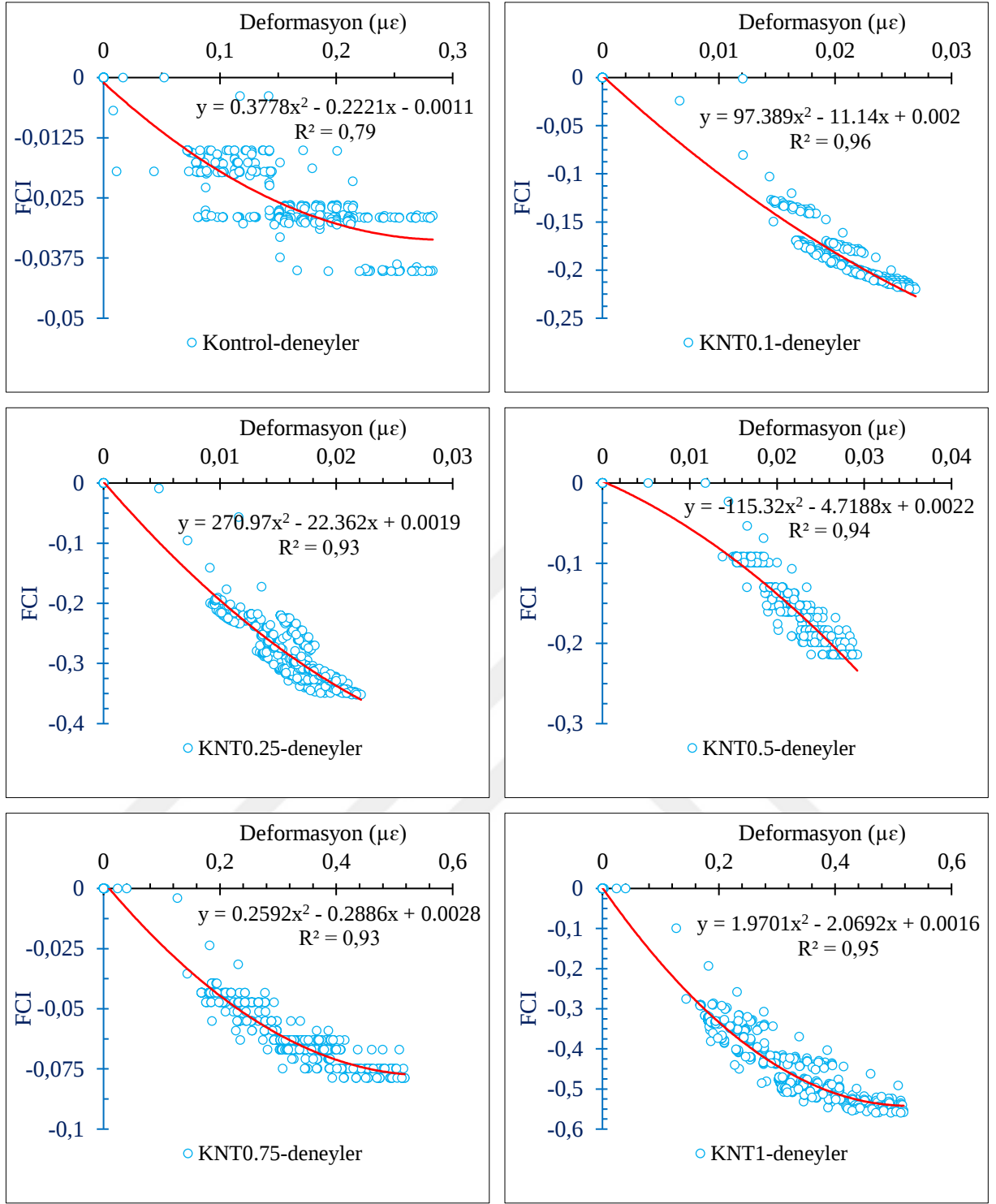


**Şekil 129.** KNT'li kompozitlerin tekrarlanan ve simetrik periyodik basınç altında davranışları (a) KNT0.1 (b) KNT0.25 (c) KNT0.5 (d) KNT0.75 (e) KNT1 (devamı).



**Şekil 129.** KNT'li kompozitlerin tekrarlanan ve simetrik periyodik basınç altında davranışları (a) KNT0.1 (b) KNT0.25 (c) KNT0.5 (d) KNT0.75 (e) KNT1 (devamı).

Ek olarak, 2. kez tekrarlanan test de periyodik basınç altında iyi bir FCI davranışı göstermiştir. Basınç testinin durma süresinde (50 sn) bile iyi FCI ve deformasyon uyumu göstermiştir. Basınç altındaki KNT kompozitlerin FCI ve deformasyonun korelasyonunu Şekil 130'da gösterilmektedir. Şekil 130'dan görülebileceği gibi KNT içeriği artırılarak FCI ile basınç deformasyonu arasında ilişkiyi artırmaktadır. KNT0.1, KNT0.25, KNT0.5, KNT0.75 ve KNT1 kompozitlerinin korelasyon katsayıları  $R^2 = 0,96, 0,93, 0,94, 0,93$  ve  $0,94$  olarak bulunmuştur.



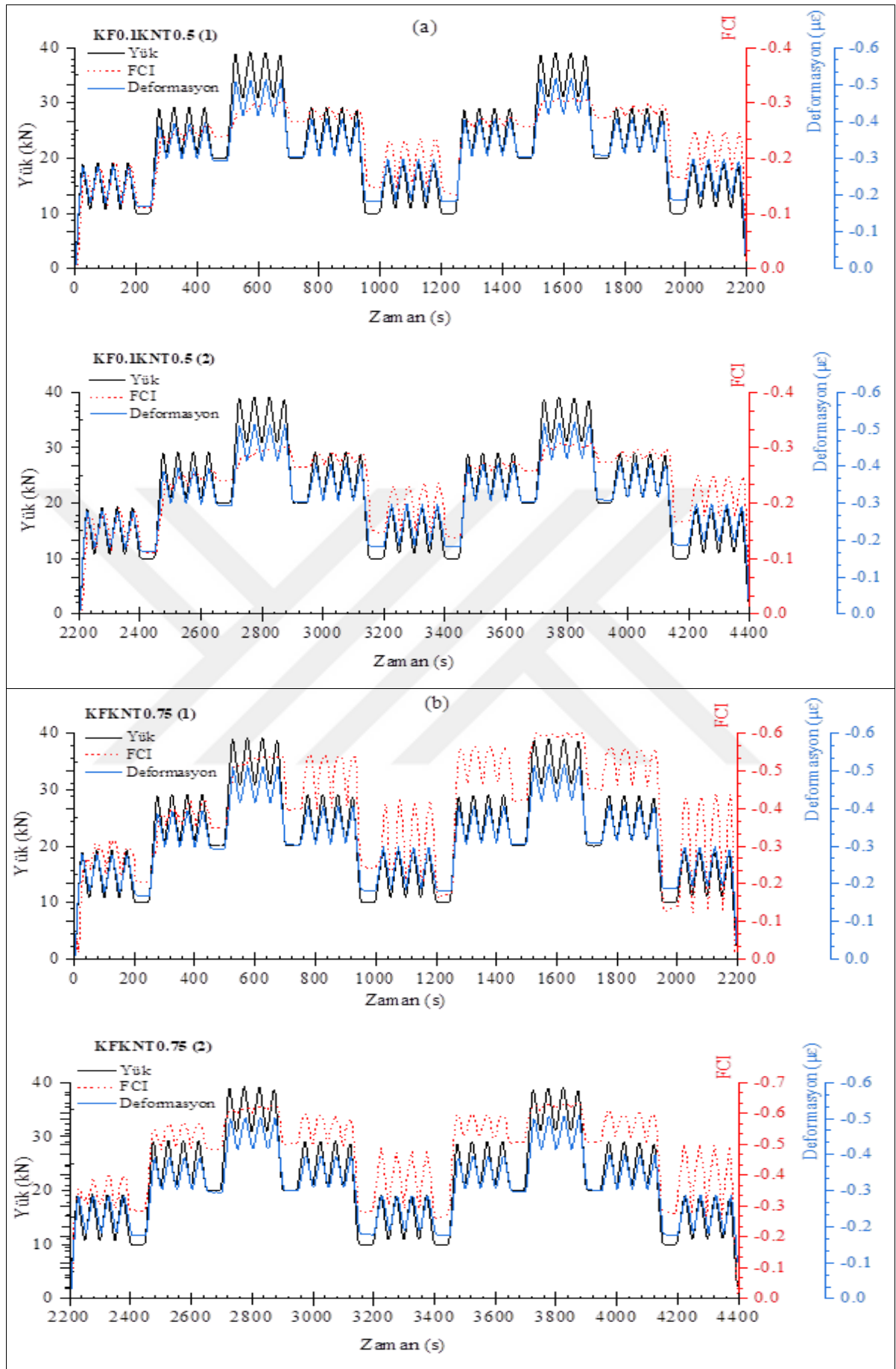
**Şekil 130.** KNT'li kompozitlerin tekrarlanan ve simetrik periyodik basınç altında deformasyon-FCI arasındaki korelasyon.

### **KFKNT kompozitlerinin kendiliğinden algılama davranışı**

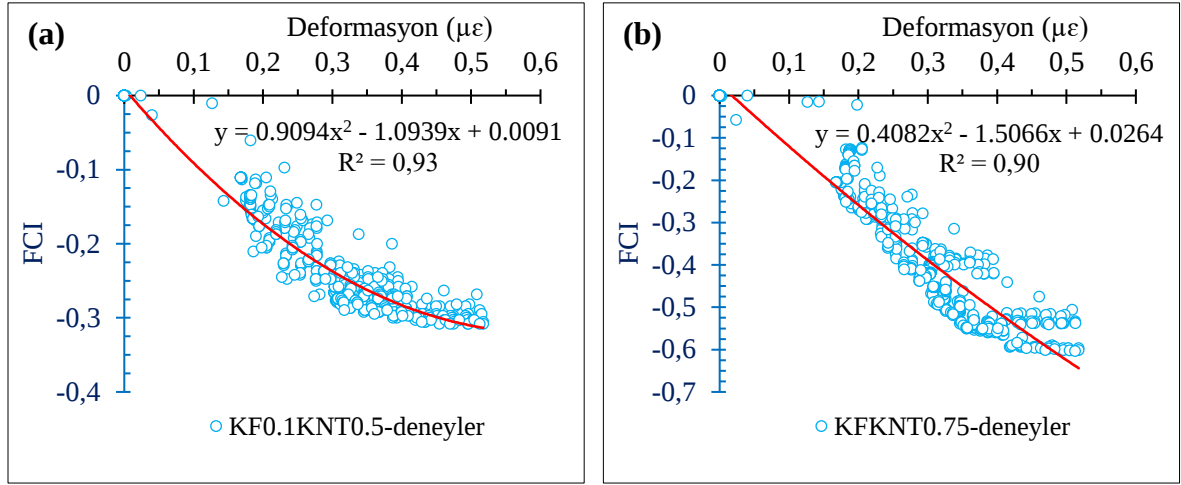
KFKNT'li kompozitlerinin tekrarlanan ve simetrik basınç yükleri altındaki davranışı Şekil 131'de gösterilmektedir. KFKNT0.75'li kompozitler, önceki bölümde gösterildiği gibi periyodik basınç altında iyi bir piezorezistif davranış göstermiştir. Ayrıca literatürden hareketle KF0.1 ve KNT0.5'e sahip başka bir kompozit de (KF0.1KNT0.5) üretilerek davranışı incelenmiştir. Şekil 131'den KFKNT0.75 ve KF0.1KNT0.5'in basınç yüklemesi altında iyi bir FCI davranışı gösterdiği görülebilmektedir. FCI değerleri, periyodik basınç yüklemesi ile yüksek uyum göstermiştir.

KF0.1KNT0.5, Şekil 132'de gösterildiği gibi, KFKNT0.75'inkinden daha yüksek algılama hassasiyetine sahiptir. KF0.1KNT0.5 kompozitlerinin FCI eğrisi, KFKNT0.75'e göre deformasyon eğrisiyle daha uyumlu görülmüştür. KF0.1KNT0.5 ve KFKNT0.75 kompozitlerinin korelasyon katsayıları sırasıyla  $R^2 = 0,93$  ve  $0,90$  olarak çıkmıştır. Bu, az miktarda KF'nin çimento matrisine KNT0.5 ile yüksek iletken ağı geliştirebileceğini göstermektedir. KF0.1KNT0.5 kompozitleri, KFKNT0.75'ten daha düşük bir maksimum FCI göstermiştir, ancak FCI'nın KF0.1KNT0.5 kompozitlerinin basınç deformasyon ile tekrarlanabilirliğinin daha doğru olduğu görülmektedir. Tekrarlanan testler, ilk teste benzer bir yanıt göstermiştir. Bu kompozitler, küçük basınç yük uygulandığında bile elastik bölgede yüksek hassasiyet göstermektedirler.

Önceki sonuçlara göre, KNT ve KFKNT kompozitleri, normal periyodik basınç, tekrarlanan ve simetrik basınç altında daha iyi deformasyon hassasiyeti göstermiştir. Bu nedenle, bu kompozitlerin yapı elemanlarına gömülü yapısal deformasyon sensörleri olarak kullanılabileceği tavsiye edilmektedir.



**Şekil 131.** KFKNT'li kompozitlerin tekrarlanan ve simetrik periyodik basınç altında algılama davranışı (a) KF0.1KNT0.5 (b) KFKNT0.75.



**Şekil 132.** KFKNT'li kompozitlerin tekrarlanan ve simetrik periyodik basınç altında deformasyon-FCI arasındaki korelasyon (a) KF0.1KNT0.5 (b) KFKNT0.75.

### Kompozitlerin Basınç Dayanımı

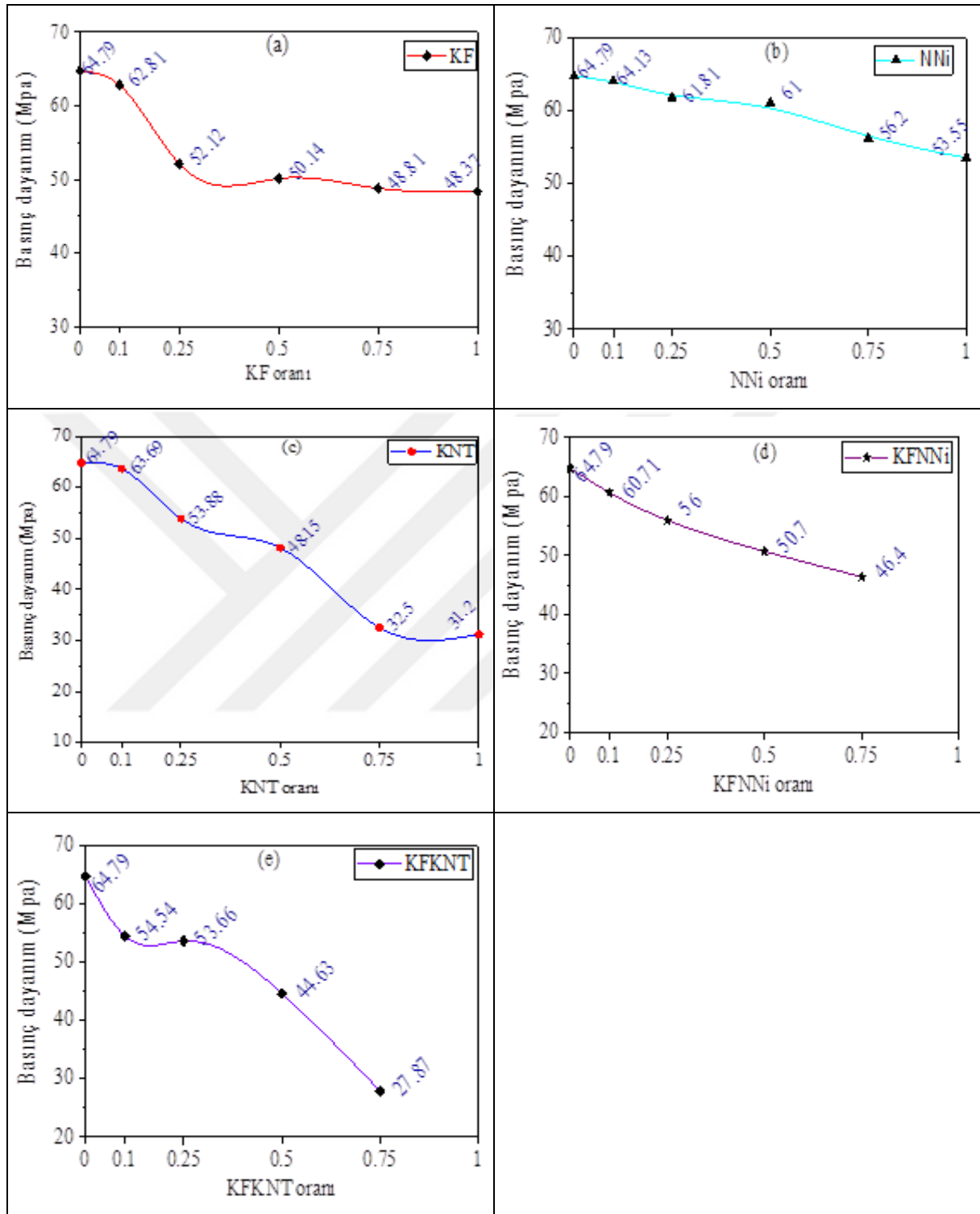
Tüm kompozitlerin basınç dayanım değerleri Şekil 133'te gösterilmektedir. Kompozitlerin basınç dayanımı aşağıdaki 18 denklemi kullanılarak hesaplanmıştır;

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (18)$$

Burada  $\sigma$  kompozitin basınç dayanımı,  $P$  uygulanan yük ve  $A$ , numunenin yük uygulanan yüzey alanıdır ( $=2500 \text{ mm}^2$ ). Numunelerin kendiliğinden algılama kapasitelerini araştırırken önceki bölümde monotonik yükleme testinden elde edilen maksimum yük değerleri alınarak basınç dayanımı hesaplanmıştır. Önceki çalışmalarda bildirildiği gibi, küp numunelerin basınç dayanımının bakır elektrotların yerleştirilmesiyle azaltılabileceği unutulmamalıdır (Han *et al.* 2007; Lee *et al.* 2017). Bu nedenle, basınç dayanımının sonuçları, elektrotsuz kompozitlerin sonuçları kadar doğru olmayabilmektedir.

Tüm kompozitlerin basınç dayanımı, kontrol numunesininkinden daha düşük çıkmıştır. Temel olarak, iletken malzemelerin içeriği hacimce %0.1'den fazla arttıkça basınç dayanımı azalmaktadır. Çimento kompozitlerine eklenen KF malzemesi, kontrol numunesine kıyasla basınç dayanımında bir azalma göstermiştir. Örnek olarak, dayanımın azalma oranı KF0.1 için %3,05, KF0.25 için %19,55, KF0.5 için %22,66, KF0.75 için %24,66 ve KF1 için %25,34 olarak belirlenmiştir (Şekil 133a). Ancak, KF0.1, KF0.25, KF0.5, KF0.75 ve KF1'in basınç dayanımları yine de sırasıyla 62,81 MPa, 52,12 MPa, 50,14 MPa, 48,81 MPa ve 48,37 MPa'ya ulaşmıştır. KF'nin hidrofobik yapısı, çimento matrisinde gözenek boyutunu arttırmış ve bu da kompozitlerin ITZ'sinde zayıflamaya neden olmaktadır (Fu and Chung 1996). Daha önce Şekil 111'de sunulan KF kompozitlerinin MIP testi bu açıklamayı desteklemektedir. Topaklaşma

oluşturabilecek KF dispersiyonu ile ilgili diğer neden de, Şekil 112’de gösterildiği gibi KF ile çimento matrisi arasındaki bağda zayıflığa neden olmuştur.



**Şekil 133.** Çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanım değerleri (a) KF (b) NNi (c) KNT (d) KFNNi (e) KFKNT.

NNi kompozitlerin basınç dayanımı Şekil 133b’de gösterilmiştir. Yine de artan NNi içeriğinin kompozitlerde kontrol numunesine kıyasla basınç dayanımlarında azalma gösterdiği görülmektedir. %0.1, 0.25, 0.5, 0.75 ve 1 oranlarında NNi’nin eklenmesi kompozitlerin basınç

dayanım değerleri sırasıyla %1, 4,6, 5,86, 13,25 ve 17,35 oranlarında azalmıştır. Fakat bu azalma oranları KF kompozitlerinkine göre daha azdır. Ancak, NNi0.1, NNi0.25, NNi0.5, NNi0.75 ve NNi1'in basınç dayanımları yine de sırasıyla 64,13 MPa, 61,81 MPa, 61 MPa, 56,2 MPa ve 53,55 MPa'ya ulaşmıştır. Karıştırma sırasında NNi havadaki oksijen ile oksidasyonu, çimento kompozitlerinin basınç dayanımını olumsuz etkilediğı düşünölmektedir.

Artan KNT içeriğı, malzeme içeriğı 0.1'den fazla olduğunda basınç dayanımında azalma göstermiştir. Basınç dayanımındaki azalma oranı, KF ve NNi kompozitlerinden daha yüksektir. Örneğın, KNT0.1 için %1,7, KNT0.25 için %16,85, KNT0.5 için %25,7, KNT0.75 için %49,85 ve KNT1 için %51,85 azalma oranı çıkmıştır (Şekil 133c). KNT'nin artmasıyla su/bağlayıcı oranının artması, kompozitlerin basınç dayanımını azalmasının nedeni olabilmektedir (Zhang *et al.* 2017). KNT oranındaki artış ile çimento kompozitlerinin elektriksel direnci %95'ten fazla düşmüştür, bu da kendiliğinden algılama özelliklerini geliştirmek için uygundur.

Hibrit KFNNi veya KFKNT malzemeleri de basınç dayanımlarında belirgin bir düşüş göstermiştir. KFNNi kompozitleri, tek başına KNT veya KF'ninkinden daha az gösterirken tek başına NNi'ninkinden daha fazla azalma oranları göstermiştir. KFNNi0.1, KFNNi0.25, KFNNi0.5 ve KFNNi0.75 kompozitler, sırasıyla %6,31, % 13,6, % 21,75 ve % 28,4 basınç dayanımında azalma göstermektedir. Ancak, KFNNi 0.1, KFNNi 0.25, KFNNi 0.5 ve KFNNi0.75'in basınç dayanımları yine de sırasıyla 60,7 MPa, 56 MPa, 50,7 MPa ve 46,4 MPa'ya ulaşmıştır (Şekil 133d). Şekil 124'te gösterildiğı gibi KFNNi kompozitlerinde artan KF içeriğı gözenek boyutunu artırmıştır.

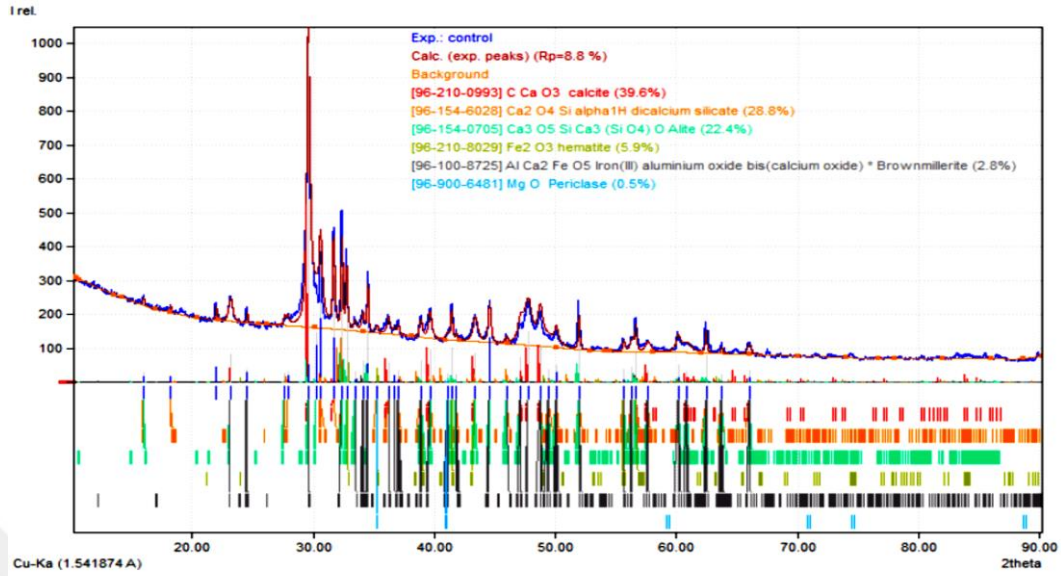
KFKNT'li kompozitlerinin basınç dayanımı, KFNNi'li veya tek bir iletken malzemeye sahip herhangi bir kompozitten daha fazla azalmıştır. KFKNT0.1, KFKNT0.25, KFKNT0.5 ve KFKNT0.75 kompozitler, sırasıyla %15,83, %17,19, %31,12 ve %57 basınç dayamında düşüş göstermektedir (Şekil 133e). KF veya KNT'de belirgin bir düşüş gösterdiğinden, hibrit kompozitlerin basınç dayanımında bu düşüş beklenmektedir. Ayrıca, Şekil 127'de gösterildiğı gibi hem KF hem de KNT içeriğı artınca gözenek boyutu da artmıştır.

## **XRD Analizleri**

Bu tez çalışmasında Portland çimentosundan üretilen bir kontrol numune ve % 0.1, 0.25, 0.5, 0.75 ve 1 oranlarında sırasıyla KF, KNT, NNi, KFKNT ve KFNNi katkılı çimento numunelerinin XRD ölçümleri alınmıştır.

Alınan ölçümlerden elde edilen datalar CRYSTAL IMPACT MATCH ve ORIGIN 2018 programlarında değerlendirilmiştir. MATCH programı ile kontrol numune için elde edilen

çimento fazları Şekil 134’te verilmiştir. XRD net bir kantitatif bilgi vermez. Ancak numune içeriği hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlamaktadır.



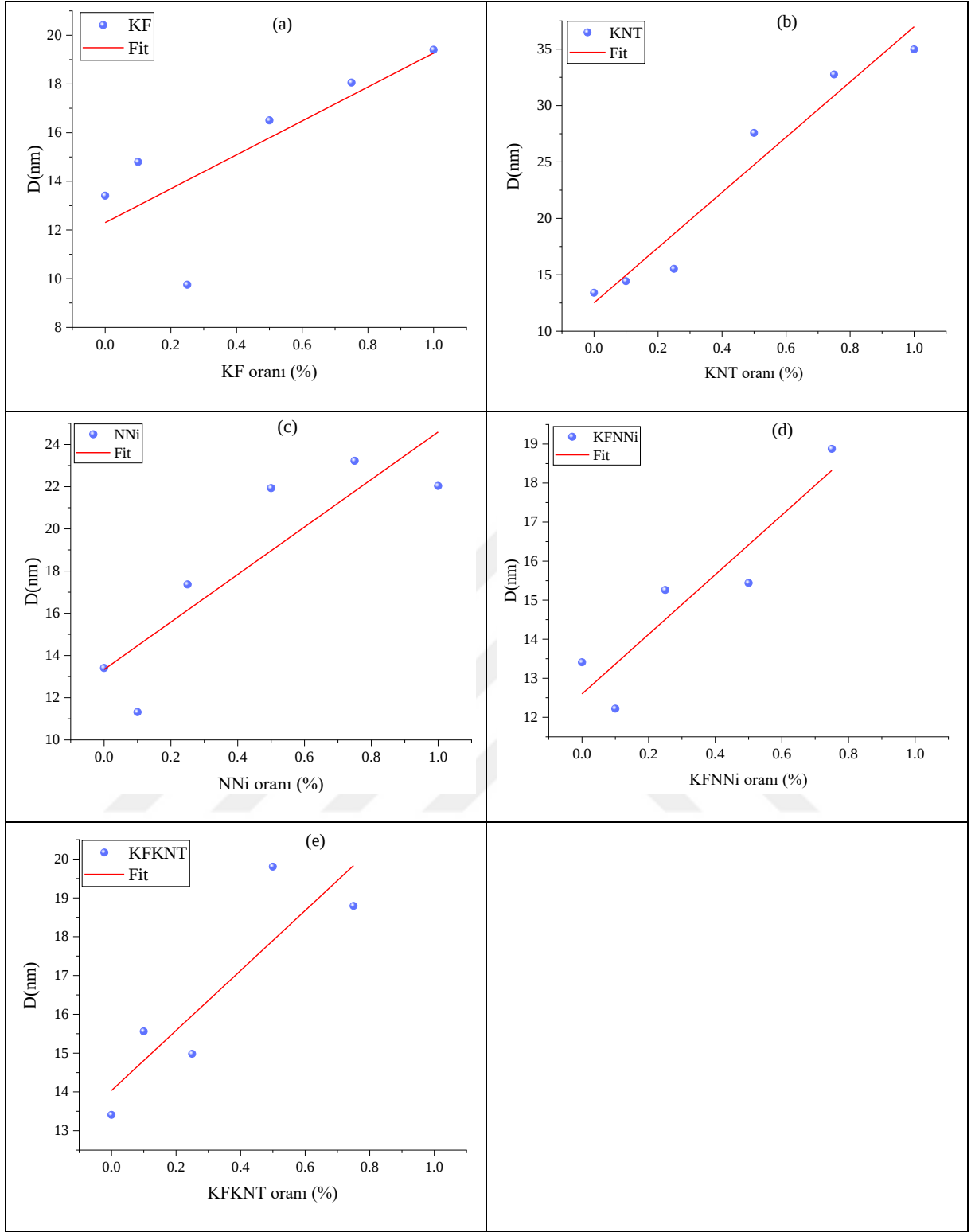
Şekil 134. MATCH programı ile XRD datalarının değerlendirilmesi.

Elde edilen XRD deseninden pik pozisyonlarına bağlı olarak hangi fazların var olabileceği, pik genişliklerinden numunenin kristal boyutu ve pik yüksekliklerinden fazların derişimi hesaplanabilmektedir (Atınçekici 2007). Çoğunlukla büyük kristal yapılar yüksek ve keskin pikler veririrken, piklerin genişliği arttıkça kristal yapısı küçülür (Speakman 2016). Numunelerin parçacık büyüklükleri (kristalit boyutları) Scherrer (19) denklemi ile hesaplanmıştır.

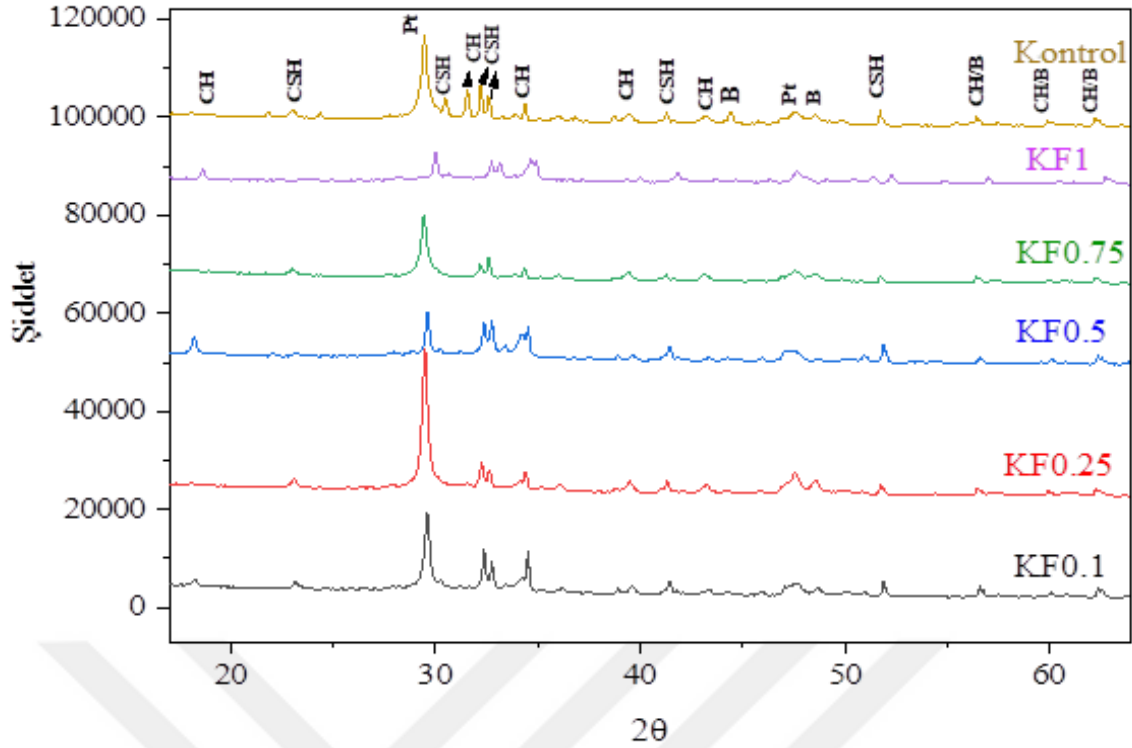
$$D(nm) = \frac{0,9 \lambda_{K_{\alpha}(Cu)}}{\beta \cos \theta} \quad (19)$$

Burada;  $D(nm)$ ; Parçacık Boyutu,  $\lambda_{K_{\alpha}(Cu)}$  X-ışını dalga boyu (Cu için, 0,154056 nm)  $\theta$  ilgili pike ait maksimum açı değeri (Radyan),  $\beta$  yine pike ait yarı maksimumdaki tam genişlik (FWHM değeri, (Radyan)’dir.

Tüm numune grupları için ilave edilen malzeme konsantrasyonuna bağlı olarak D’nin değişimi Şekil 135’te verilmiştir. Kontrol numune için XRD sonuçlarının incelendiğinde en güçlü pik değeri Pt (Portlandit) mineraline aittir. Bu minerallerle birlikte beton gruplarına ait numunelerde C-S-H, CH ve (B) Brownmillerite piklerinin de olduğu görülmüştür. Elde edilen mineraller literatürle uyumludur (Ransinchung RN and Kumar 2010; Nguyen *et al.* 2016; Stutzman *et al.* 2016).

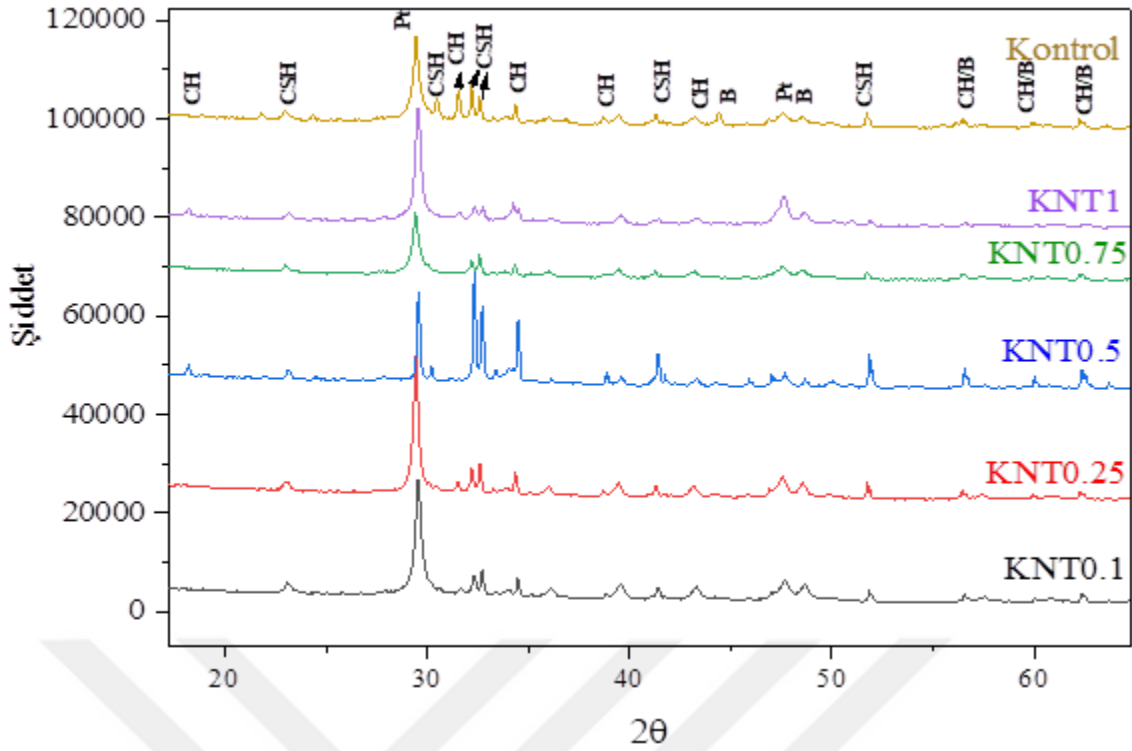


Şekil 135. Katkı oranına göre parçacık büyüklüğü D'nin değişimi.



**Şekil 136.** KF katkılı çimento numuneleri için elde edilen XRD desenleri.

KF katkılı numuneler için XRD deseni Şekil 136’da verilmiştir. Şekil 136’dan, KF ilavesiyle yeni piklerin oluşmadığı ve çimento bileşiminin mineral içeriği açısından stabil kaldığı görülmektedir. Buna karşın, piklerin genliklerinde ve FWHM değerlerinde değişiklikler olduğu gözlenmiştir. Kontrol numune ile karşılaştırıldığında, KF ikame oranı arttıkça, genel olarak daha düşük C-S-H ve daha yüksek (B) Brownmillerite zirveleri gözlenmiştir. Bu sonuç, KF’nin hidrofobik doğası nedeniyle KF ile çimento matrisi arasındaki bağın zayıflamasından kaynaklanabilmektedir. Bu sebeple ana fazlardan olan C-S-H piklerinin şiddetinde artan KF oranıyla azalma meydana gelmiştir. KF katkılı numuneler için KF konsantrasyonuna bağlı olarak parçacık büyüklüğü D’nin değişimi incelendiğinde KF ilavesi ile parçacık büyüklüğü arttığı görülmektedir (Şekil 135a). KF ilavesi çimento numunelerinin mikro yapısını kademeli olarak azaltmıştır ve basınç dayanım testlerinde bulduğumuz sonuçlara paralel olarak numunelerin basınç dayanımları da azalmıştır. Bu da KF ilavesinin çimento numunelerinin mekanik özelliklerini bozduğunu göstermektedir.

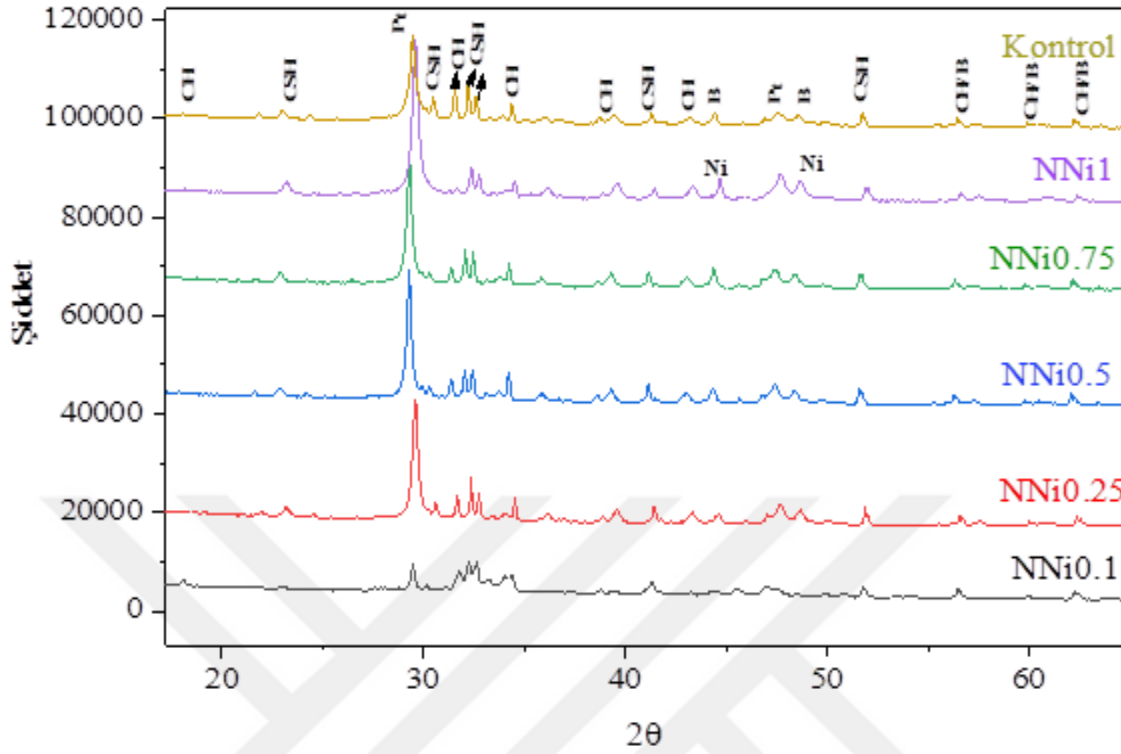


**Şekil 137.** KNT katkılı çimento numuneleri için elde edilen XRD desenleri.

Şekil 137’de KNT katkılı çimentoların XRD desenlerini göstermektedir. Yine KF katkılı çimento örneklerinin XRD desenlerinde olduğu gibi, KNT katkılı çimento hamurlarının XRD piklerinde kontrol numuneden farklı mineraller gözlenmemiştir. Ancak pik şiddetlerinde önemli farklılıklar olduğu açıktır. Büyük kristal yapılar olan CH ve C-S-H piklerinin şiddetlerinde başlangıçta önemli bir artış olduğu ancak sonrasında KNT0.5’ten sonra azalma olduğu dikkat çekmektedir. Genel olarak düzenli bir değişim olduğu söylenemez. Şekil 135b’den görüleceği gibi parçacık büyüklüğü KNT0.1, 0.25 ve 0.5 numuneleri için 14,32nm ve 15,52 nm aralığında değişirken diğer KNT katkılı numuneler için 27,58-34,97nm aralığında değişmektedir. Bu sonuç faz şiddetlerindeki değişimi desteklemektedir. KNT0.5 numunesinde Belite fazının baskın olduğu 30°-35° arasındaki piklerde artış görülmektedir. KNT’nın oranı arttıkça D’nin arttığı görülmektedir.

Bir diğer numune grubunda geleneksel Portlant çimentosuna nano nikel (NNi) 0.1, 0.25, 0.5, 0.75 ve 1 hacim oranlarında eklenmiştir. Bu numune grubu için XRD desenleri Şekil 138’de verilmiştir. Artan NNi miktarına bağlı olarak büyük kristal yapıların pik şiddetlerinin arttığı görülmektedir. Aynı zamanda küçük kristal yapılarından B piklerinin şiddeti de artmıştır. KNT katkılı numunelere kıyasla NNi katkılı numunelerin parçacık büyüklüğü daha azdır ve 11,31-23,22 nm aralığında değişim göstermektedir. NNi katkılı numune grubunun basınç dayanımlarına bakıldığında diğer numunelerden daha büyük basınçlara karşı direnç gösterebildiği açıktır. Basınç dayanımının diğer numune gruplarına göre daha küçük bir aralıkta

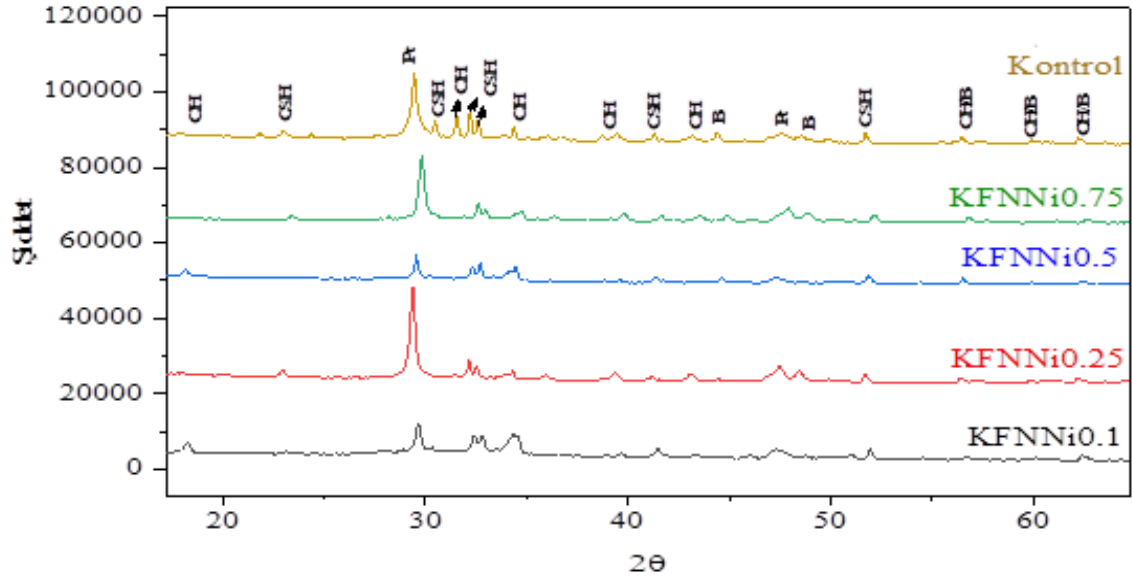
azalması, CH ve C-S-H minerallerinin pik şiddetlerinin artması ve numune büyüklüğünün geniş bir aralıkta değişmemesinin bir sonucudur.



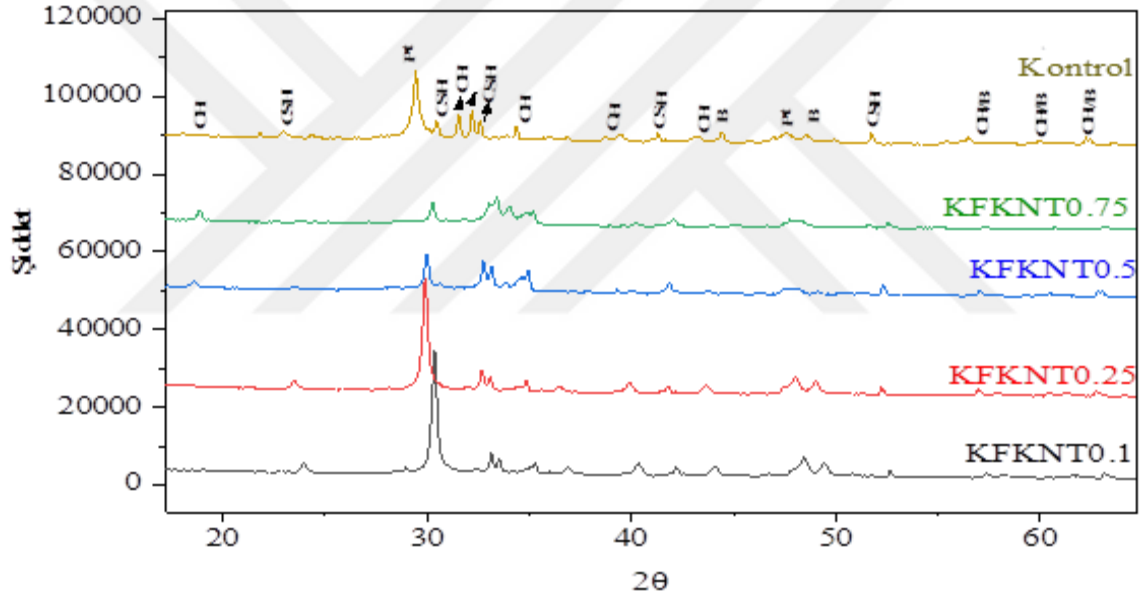
**Şekil 138.** NNi katkılı çimento numuneleri için elde edilen XRD desenleri.

Karbon fiber- nano nikel katkılı çimento hamurlarının XRD desenlerine baktığımızda KF katkılı 1. Numune grubununkine benzer olduğu görülmektedir. Buradan KF katkısının NNi'ye kıyasla büyük kristal yapıların pik şiddetini daha fazla etkilediğini çıkarabilmekteyiz (Şekil 139). Ayrıca B pik şiddetinde küçük de olsa artışlar olduğu görülmektedir. Artan KFNNi miktarı ile D'nin artışı görülmektedir (Şekil 135d). Pik şiddetinin azalması büyük kristal yapıların bozulmasına ve mikro yapıların azalmasına neden olur. Basınç dayanım testlerinde görüldüğü gibi artan KFNNi miktarına bağlı olarak numunenin parçacık büyüklüğü artarak çimento numunelerinin mekanik özelliklerini azalttığı söylenebilir.

KFKNT katkılı numuneler için XRD spektrumu Şekil 140'ta verilmiştir. % 0.1 ve 0.25 katkılı numuneler için CH ve C-S-H şiddetlerine artış olduğu buna karşın % 0.5 ve 0.75 katkılı numunelerde pik şiddeti önemli ölçüde azalmıştır. B pik şiddetlerinde ise artış olmuştur. Şekil 135e'den KFKNT katkılı numunelerde parçacık büyüklüğünün arttığı görülmektedir. Tüm numuneler içinde basınç dayanımı en az olan KFKNT katkılı numunelerdir. C-S-H pik şiddetlerinin diğer numune gruplarına kıyasla büyük bir orada düşmesi ve aynı zamanda parçacık büyüklüğünün artması KFKNT katkılı numunelerin mekanik özelliklerini düşürmüştür.



**Şekil 139.** KFNNi katkılı çimento numuneleri için elde edilen XRD desenleri.



**Şekil 140.** KFKNT katkılı çimento numuneleri için elde edilen XRD desenleri.

Sonuç olarak iletken malzemelerin tipine ve oranına bağlı olarak çimento kompozitleri çeşitli algılama davranışları göstermiştir. Monotonik yükleme altında iyi davranış gösteren bazı kompozitler, periyodik yükleme altında iyi bir davranış göstermemiştir. KNT ve KFKNT0.75’li aynı miktarlarda KF ve NNi ile karşılaştırıldığında çimento hamurunun küçük miktarda KNT kendiliğinden algılamasını geliştirmede etkilemektedir. KNT ve KFKNT0.75 kompozitler, elastik bölgede etkinliğini sağlamak için tekrarlı ve simetrik periyodik basınç altında test edilmiştir. Bu kompozitler yüksek algılama hassasiyeti gösterdiği için yapı elemanında yapısal deformasyon sensörleri olarak kullanılabilir ve KNT ve KFKNT kompozitlerinin tek eksenli basınç altında ana yapıda sensör olarak kullanımı detaylıca araştırılmıştır.

## **Piezorezistif Çimento Bazlı Sensörler Kullanarak Beton Elemanın Deformasyon İzlemesi**

Yapılar normalde çevresel sorunların neden olabileceği harici statik ve dinamik yüklere maruz kalmaktadır. Bu nedenle, yapısal sağlık izleme (YSİ), yapıları uzun süreli hizmet ömrü boyunca izlemek için önemli bir yöntemdir (Li *et al.* 2007; Han *et al.* 2017b; Liew *et al.* 2017). YSİ, yapıların hasar noktasına ulaşmadan önce bakım çözümlerini sağlamak için yükleme altında yapının gerilme-deformasyon değişiminin izlenmesini temsil etmektedir. Yapının YSİ 'sini izlemek için birçok sensör türü kullanılmıştır. Ancak son yıllarda araştırmacılar, yapıların sağlığının izlenmesinde akıllı çimento esaslı kompozitlerin kullanılmasına odaklanmışlardır. Bu sensörlerin düşük maliyet, yüksek dayanıklılık, yüksek algılama hassasiyeti ve yapı ile yüksek uyumluluk gibi birçok avantajı vardır (Li *et al.* 2018). Bu sensörler, iletken malzemeler içerir (örneğin, KNB, KNT ve KF), uygulanan yük altında FCR değerlerini ölçerek gerilme, deformasyon ve hasarı algılama yeteneğine sahiptirler (Howser *et al.* 2011; Baeza *et al.* 2013b; Dong *et al.* 2016; Yıldırım *et al.* 2018).

Önceki bölüm'de elde edilen sonuçlara dayanarak KNT ve KFKNT kompozitleri monotonik ve periyodik yükleme altında daha iyi bir kendiliğinden algılama özellikleri göstermiştir. Bu nedenle, KNT ve KFKNT içeren çimento esaslı sensörler imal edilerek YSİ'nin uygulanabilirliğini doğrulamak için beton elemana gömülmüştür. Gömülü sensörlerin piezorezistivitesi, periyodik ve monotonik yükleme altında incelenmiştir. Deformasyon ölçerler tarafından ölçülen deformasyon miktarı, sensörlerin FCI değerleri ile karşılaştırmak amacıyla da kaydedilmiştir. Sensörlü ve sensörsüz beton elemanların basınç dayanımı, sensörleri eleman dayanımına yerleştirmenin etkisini karşılaştırmak için araştırılmıştır.

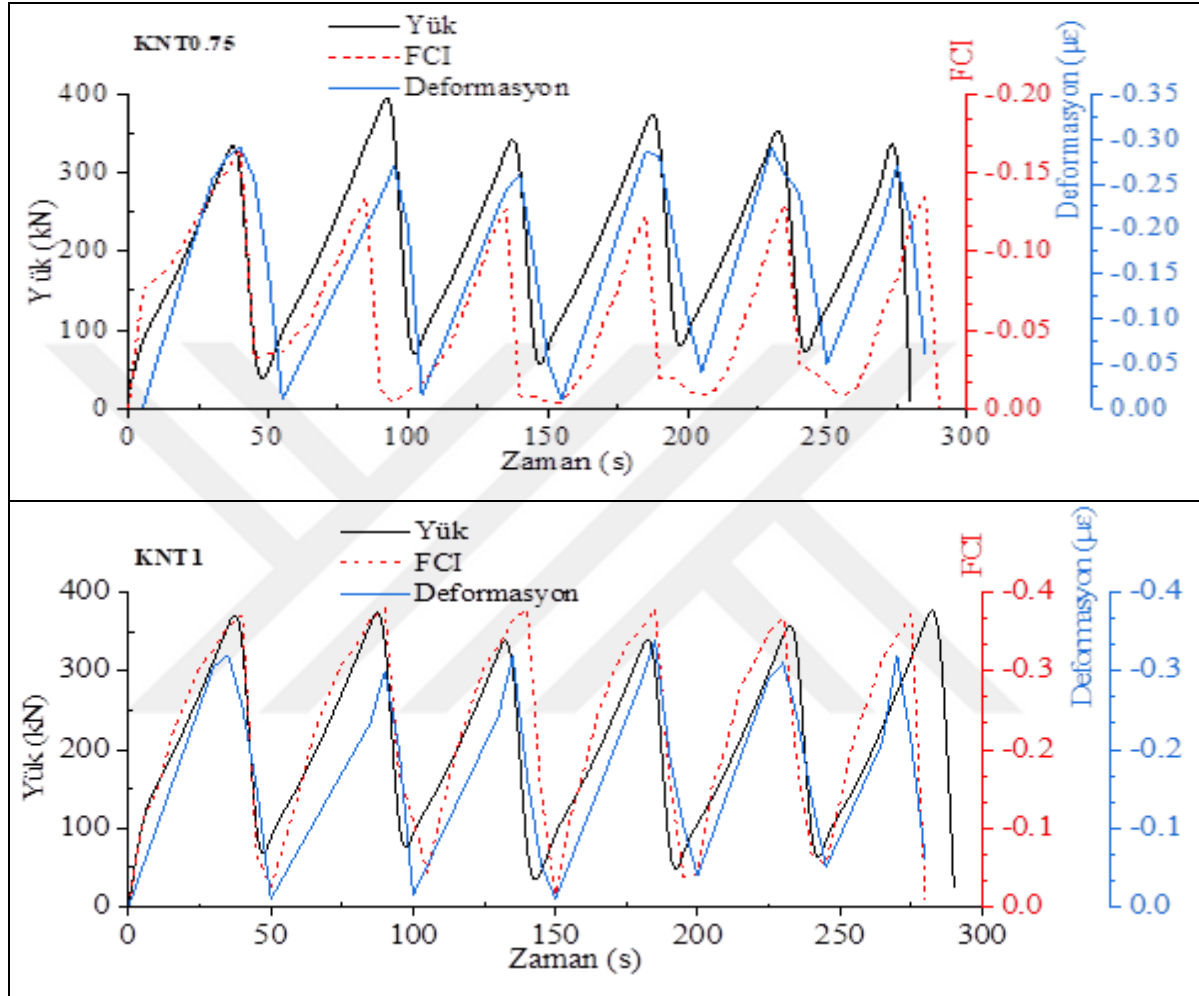
Beton elemanlar önce periyodik yükleme altında ve ardından kırılana kadar monotonik yükleme altında test edilmiştir. Bu nedenle, önce periyodik yükleme altındaki bulgular ve ardından monotonik yükleme bulguları sunulmuştur.

### **Elastik Aralıkta Periyodik Yükleme Altında Sensörlerin ve Akıllı Beton Elemanın Piezorezistif Algılaması**

#### **❖ KNT sensörleri**

Periyodik yükleme (maksimum 400 kN) altında beton elemana gömülü KNT sensörlerinin kendiliğinden algılama davranışı Şekil 141'de gösterilmektedir. Şekilden, KNT0.75 ve KNT1 sensörlerinin, eleman yüzeyine uygulanan periyodik yüklerle iyi uyum gösterdiği görülebilmektedir. Her döngü sırasında, sensörün FCI değeri yüklerin artmasıyla azalmış ve boşaltma durumu sırasında artmıştır. Sensörlerin kendiliğinden algılama davranışı, periyodik yükleme sırasında kararlı ve tekrarlanabilen olarak görülmektedir. Bu durum,

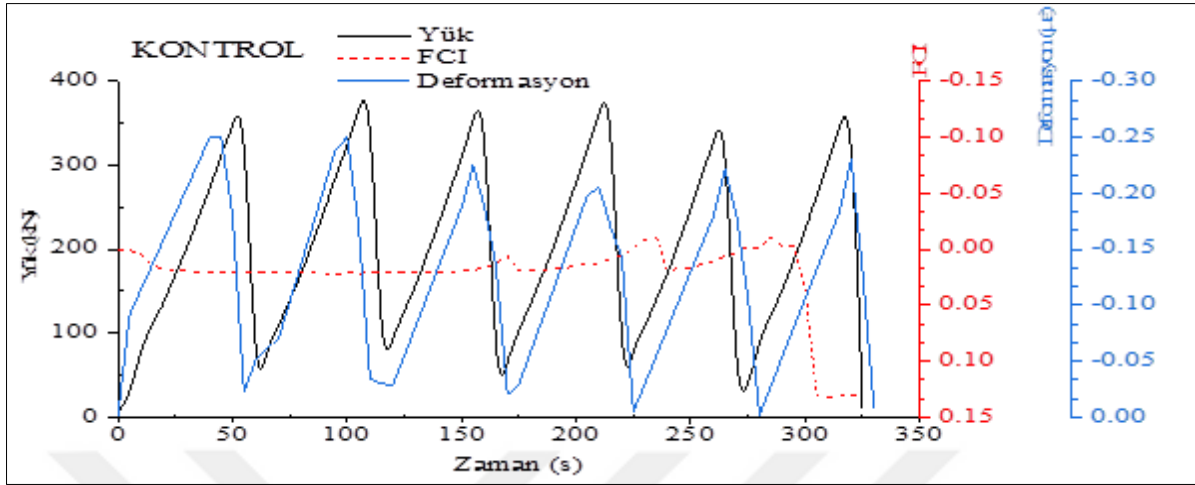
sensörün beton elemana gömülmesinin, yük altındaki sensörlerin algılama yeteneğini etkilemediğini veya bozmadığını göstermektedir. Yani eleman içerisine gömülü çimento esaslı kompozitin sensör olarak kullanılabileceği sonucunu desteklemekle birlikte betonarme elemanlarda da kullanımının gerçekleştirilmesi ile uygulamada kullanıp kullanılmayacağının belirlenmesi gerekmektedir.



**Şekil 141.** KNT sensörlerin periyodik yükleme altında kendiliğinden algılama davranışı (a) KNT0.75 (b) KNT1.

Şekil 141’de gösterildiği gibi, KNT1 sensörünün davranışı KNT0.75 sensörlerinden daha hassastır. KNT içeriğinin artması, yükleme altında sensörün algılama hassasiyetini artırmıştır. Ancak, uygulanan aynı basınç yükleri altında, gömülü sensörün kendiliğinden algılama davranışı, harici sensörinkinden farklıdır. Harici sensör, uygulanan basınç yükleri altında doğrudan deforme olur ve bu da yükler altında yüksek FCI ile sonuçlanmaktadır. Gömülü sensör beton elemanlarla tutarlı bir şekilde deforme olur ve bu yükler altında düşük FCI değerleri verir. Buna ek olarak, gömülü sensörler, beton elemanların tek eksenli basmasından farklı olarak üç eksenli gerilmeye maruz kalmaktadır (Ding *et al.* 2019). KNT gömülü sensörlerin iyi bir yanıt gösterdiği sırada, Şekil 142’de gösterildiği gibi gömülü kontrol

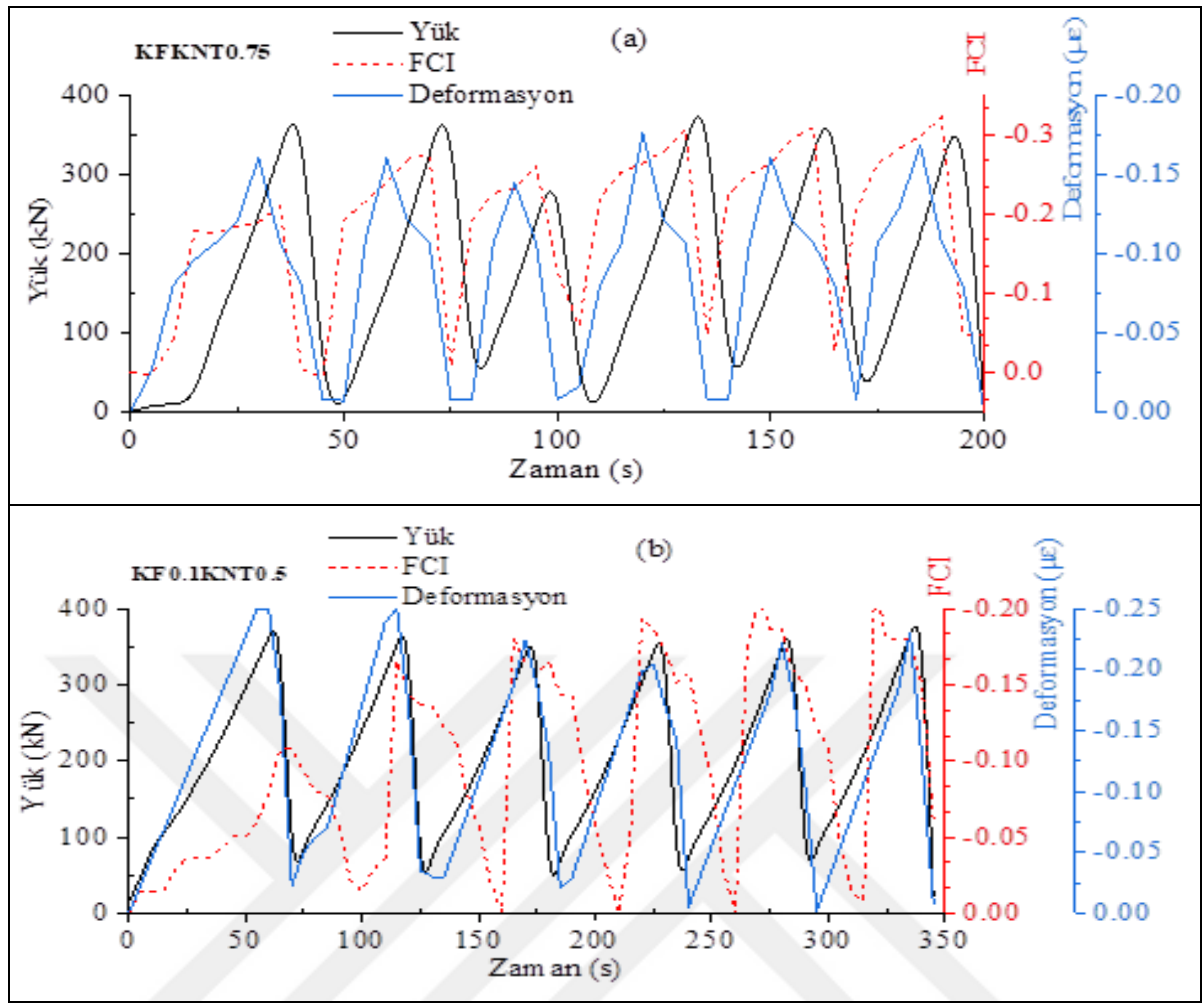
numuneleri herhangi bir algılama davranışı göstermemiştir. Bu nedenle, KNT0.75 ve KNT1 sensörleri, basınç yüklerini ve deformasyon algılamak için yapısal sensörler olarak kullanılabileceği düşünülmektedir.



**Şekil 142.** Kontrol numunesi gömülü elemanların periyodik yükleme altında kendiliğinden algılama davranışı.

#### ❖ *KFKNT sensörleri*

Şekil 143'te beton elemanlara KFKNT gömülü sensörler periyodik yükleme altında kendiliğinden algılama davranışı göstermiştir. Şekil 143'te görüldüğü gibi KFKNT sensörleri periyodik yükleme altında iyi algılama davranışı göstermişlerdir. Elemanın yüzeyine uygulanan yüklerin arttırılması, periyodik yük altında sensörün FCI değerinin azalmasına neden olmaktadır. Buna bağlı olarak, sensörün döngü sırasında boşaltma durumunda FCI değeri artmıştır. Yük altında, iletken malzemeler arasındaki mesafe birbirine daha yakın olur, böylece iletken ağ artarak elektriksel direncin azalmasına neden olmaktadır. Ancak, Şekil 143'te görüldüğü gibi periyodik yüklemede FCI ile yük deformasyon uyumu iyi olmasına rağmen KNT sensörleriyle karşılaştırdığımızda KNT sensörlerinin daha iyi algılama hassasiyeti gösterdiği söylenebilmektedir (Şekil 141). Bunun sebebi, KF den dolayı algılama özelliğinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Yine de Şekil 143'te gösterilen sonuçlara dayanarak KFKNT periyodik basınç yüklemesi altında gerilme-deformasyonu tespit etmek için iyi bir yapısal sensör olarak davranabileceği tahmin edilebilmektedir.

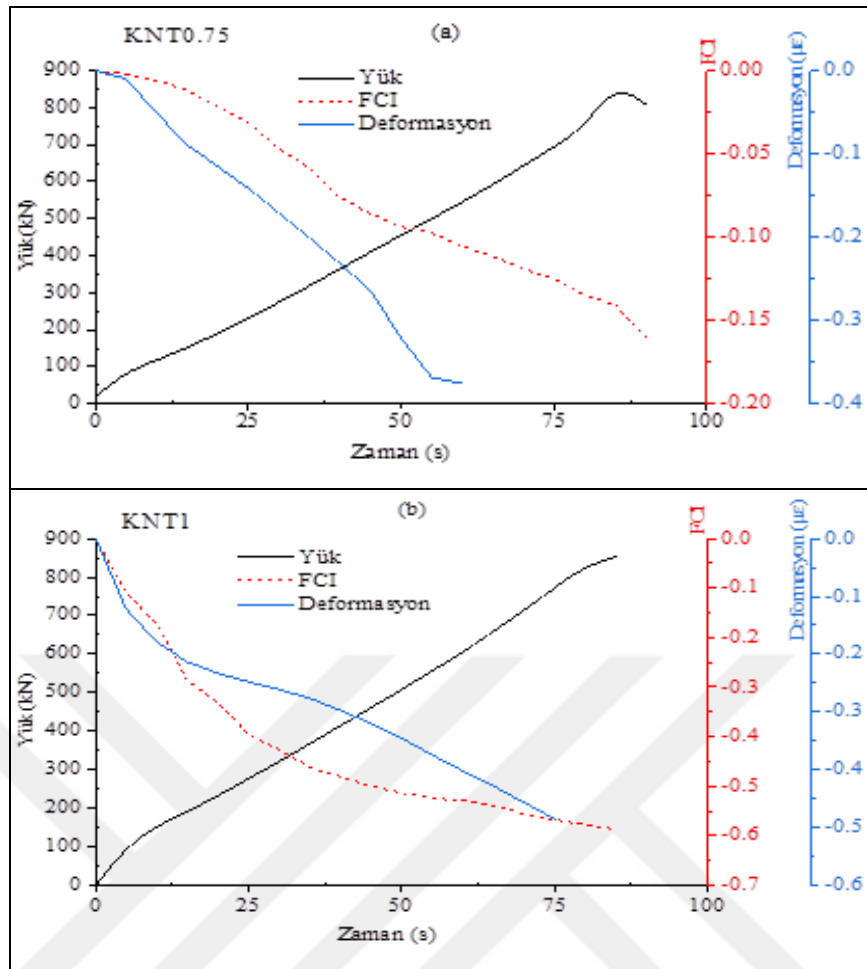


**Şekil 143.** Gömülü KFKNT sensörlerinin periyodik yükleme altında kendiliğinden algılama davranışı (a) KFKNT0.75 (b) KF0.1KNT0.5.

### Monotonik Yükleme Altında Sensörlerin ve Akıllı Beton Elemanın Piezorezistif Algılaması

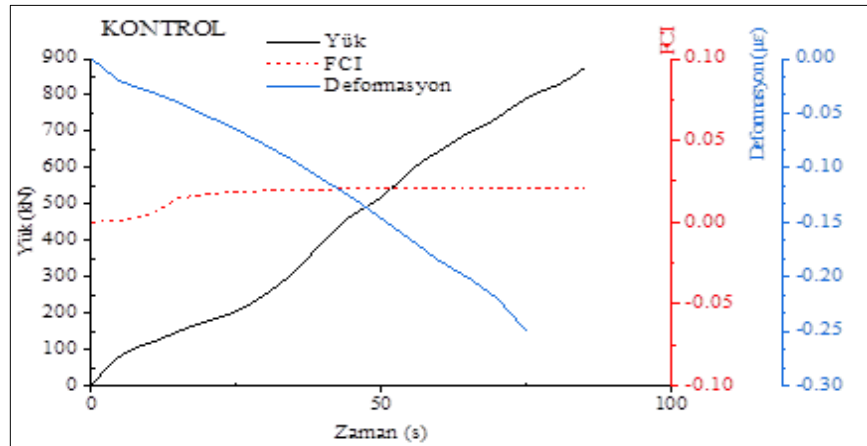
#### ❖ KNT'li sensörler

Şekil 144'te beton elemanın yüzeyine uygulanan monotonik yükleme altında gömülü KNT sensörlerinin kendiliğinden algılama davranışı gösterilmiştir. Uygulanan monotonik yükün artmasıyla sensörün FCI değeri azalmıştır. KNT0.75 ve KNT1 sensörleri, monotonik yükleme altında kontrol numunesine kıyasla iyi algılama göstermiştir (Şekil 145). Monotonik yükleme altında FCI değerlerinin azalması doğrusal şeklinde görülmektedir. Yükleme testi esnasında beton eleman nihai basınç dayanımına ulaşmadan önce deformasyon değerleri elemanın üst kenarlarının kırılmasından dolayı yanlış deformasyon değerleri vermektedir (Şekil 144). Şekil 146'da elemandan parça ayrılması ve deformasyon ölçerin kopma problemi göstermektedir. Ancak, beton elemanın kırılmasına kadar gömülü sensör FCI değer okuması devam etmiştir.



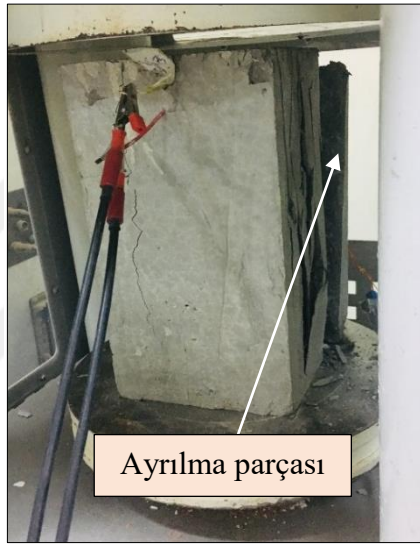
**Şekil 144.** Gömülü KNT sensörlerinin monotonik yükleme altında kendiliğinden algılama davranışı (a) KNT0.75 (b) KNT1.

Beton eleman nihai dayanıma ulaştığında, sensörün FCI değeri nihai değerine ulaşmaktan çok uzaktır. Bu, gömülü sensörlerin, elemandaki nihai kırılmaya kadar basınç dayanımını algılayabildiğini göstermektedir. Beton eleman nihai dayanımına ulaştığında çatlaklar artarak eleman hasar görmüştür. Aynı zamanda, beton elemana gömülen sensörde hasar görmemiş, sensörler kendiliğinden algılama özelliği devam etmiştir(Şekil 147).



**Şekil 145.** Gömülü kontrol numunesinin monotonik yükleme altında kendiliğinden algılama davranışı.

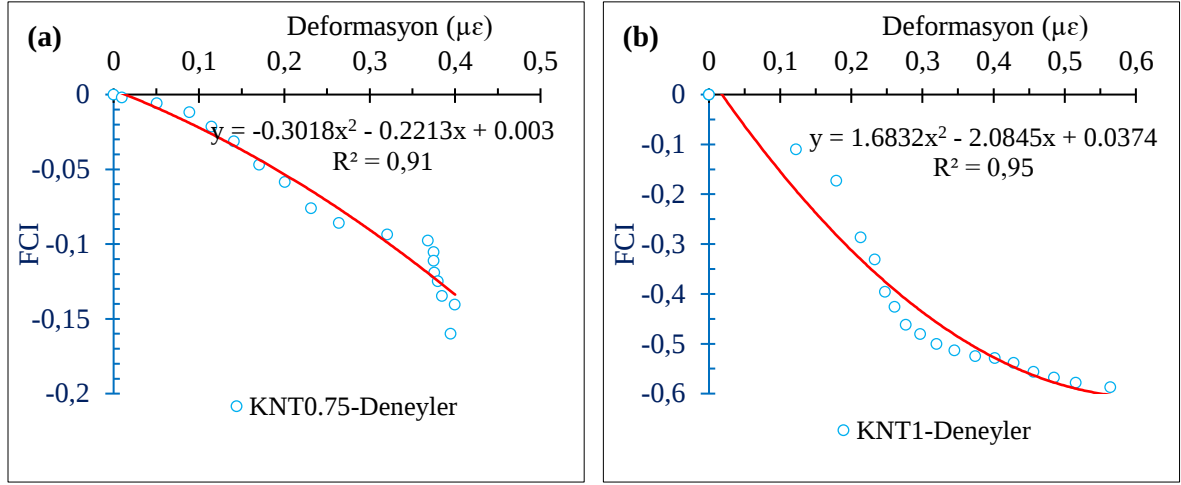
Şekil 148’de, monotonik yükleme altındaki gömülü sensörlerin FCI değerleri ile elemanın basınç deformasyonu arasındaki korelasyonu göstermektedir. FCI ve basınç deformasyonu arasında iyi bir ilişki gözlemlenmiştir. KNT0.75 ve KNT1 sensörlerinin korelasyon katsayıları sırasıyla  $R^2 = 0,91$  ve  $0,95$  çıktığında elemanın basınç deformasyonu ile gömülü sensörlerin FCI’si arasında yüksek bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Ancak, sensörlerin basınç deformasyonu ve FCI arasındaki küçük fark, gömülmeden önceki (tek eksenli basınç) ve sonraki (üç eksenli basınç) arasındaki farklı deformasyon koşullarına da bağlanabilmektedir. Bu nedenle, KNT gömülü sensörler, hasara karşı monotonik yükleme altında doğru izleme sinyalleri sergilediği söylenebilmektedir. Bu sensörler, gerçek uygulamalarda yapısal izleme kullanımı için uygundur.



**Şekil 146.** Monotonik yükleme altında deformasyon ölçer ile beton elemanın üst kenarının ayrılması.



**Şekil 147.** Beton elemanın hasar şekli.

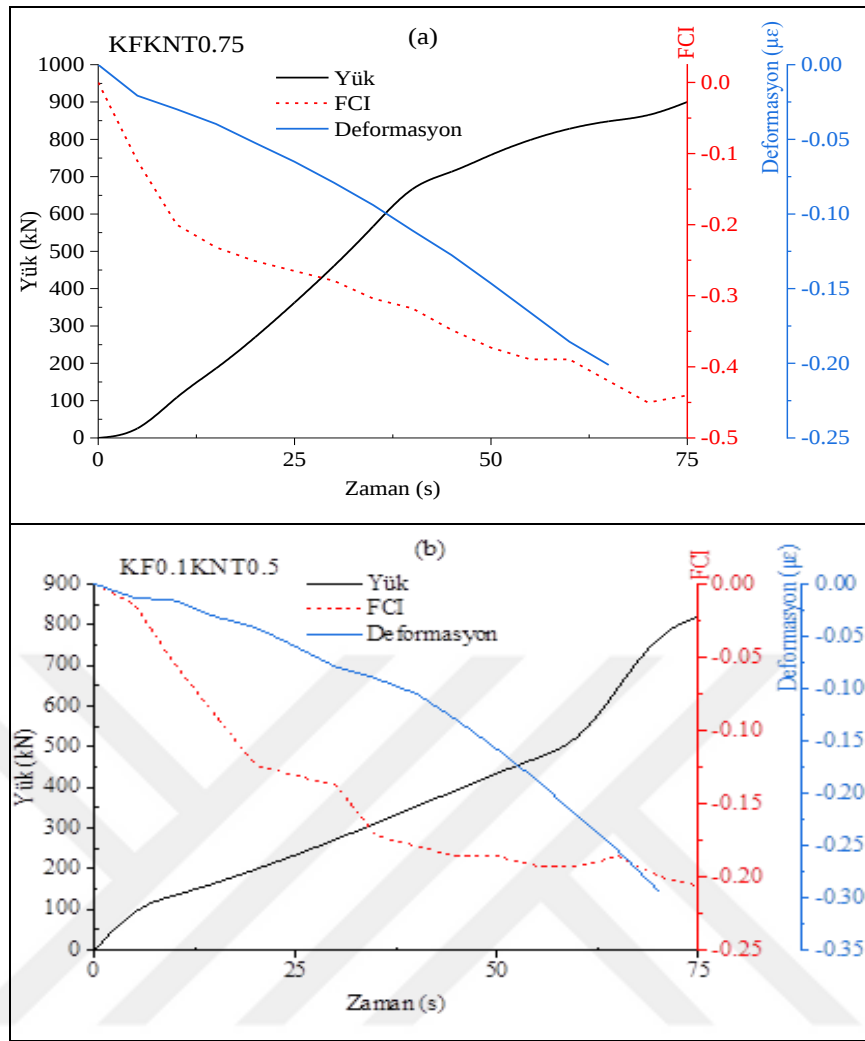


**Şekil 148.** Gömülü KNT sensörlerinin monotonik yükleme altında eleman basınç deformasyonu ile FCI değerleri arasındaki ilişki (a) KNT0.75 (b) KNT1.

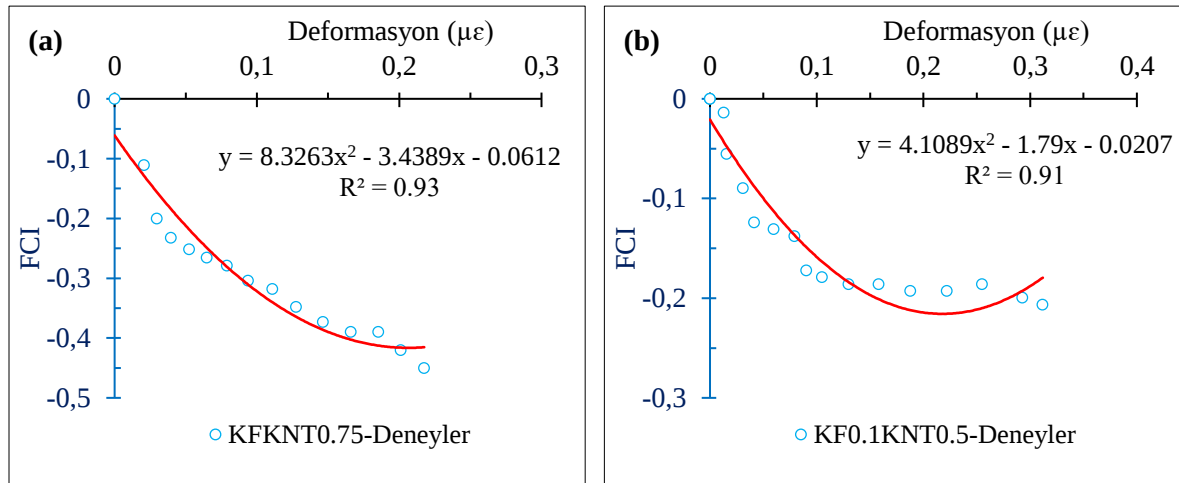
#### ➤ *KFKNT sensörleri*

KFKNT gömülü sensörlerin monotonik yükleme altında hasara karşı kendiliğinden algılama davranışı Şekil 149’da gösterilmektedir. Elemana uygulanan monotonik yükün artışıyla sensörlerin FCI değerleri düşerek iyi bir algılama tepkisi göstermiştir. Eleman üzerine uygulanan monotonik yükler arttığında, sensörlerin FCI değerleri azalmıştır. Bu, sensörün içindeki iletken malzemelerin (KF ve KNT) algılama özelliğini iyileştirmek için iletken bir ağ haline getirildiği anlamına gelmektedir. Şekil 149’dan, eleman basınç deformasyonu ile sensörün FCI arasında küçük bir fark olduğu görülebilmektedir. Bu daha önce de bahsedildiği gibi, sensörün üç eksenli basınç gerilmesi ve elemana uygulanan tek eksenli basınç gerilmesi arasındaki fark nedeniyle olabilmektedir. Yine de, beton elemanlar hasar gördüğünde sensörler hasarlı durumda değildir. Bu, deformasyon ölçerler elemandan ayrılırken sensörlerin uygulanan yükler altına hasar aşamasında bile algılayabilmesini sağlamaktadır.

Şekil 150, sensörlerin FCI’sı ile uygulanan basınç deformasyonu arasındaki korelasyon ilişkisini göstermektedir. KFKNT sensörlerinin  $R^2 = 0,93$  ve  $0,91$  değeriyle daha iyi kendiliğinden algılama davranışı gösterdiğinde hasara karşı monotonik yükleme altında beton elemanı izleyebildiği anlamına gelmektedir. Elde edilen sonuçlara dayanarak, tüm sensörler, gerçek uygulamalarda yapısal izleme için kullanılabilen periyodik ve monotonik yükleme altında iyi algılama davranışı göstermişlerdir. KNT1 sensörü  $R^2 = 0,95$  değerine sahip diğer sensörlerle karşılaştırıldığında en iyi algılama sonuçlarını göstermiştir.



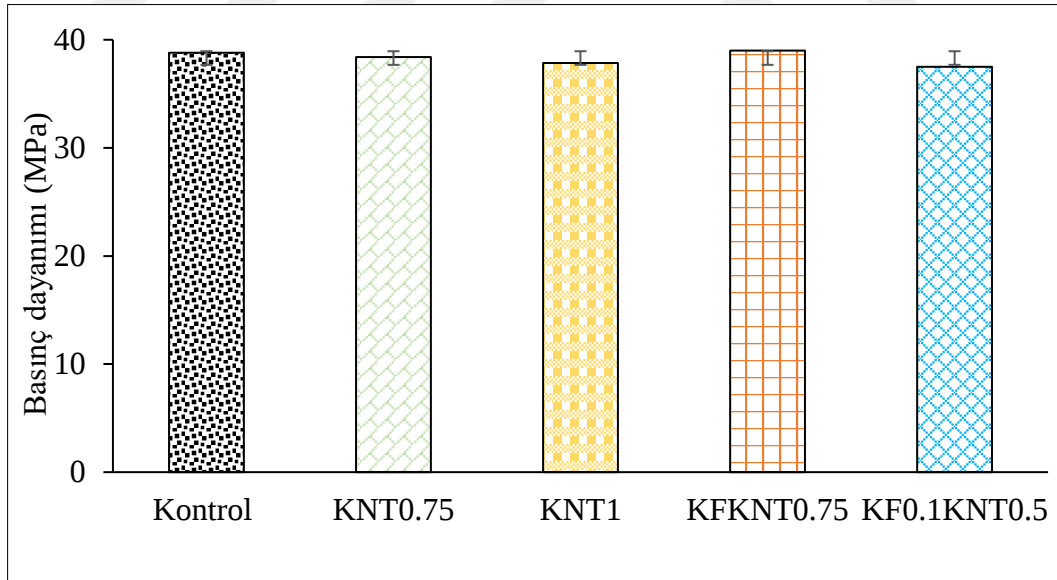
**Şekil 149.** Gömülü KFKNT sensörlerinin monotonik yükleme kendiliğinden algılama davranışı (a) KFKNT0.75 (b) KF0.1KNT0.5.



**Şekil 150.** Gömülü KFKNT sensörlerinin monotonik yükleme altında eleman basınç deformasyonu ile FCI değerleri arasındaki ilişki (a) KFKNT0.75 (b) KF0.1KNT0.5.

## Sensörlerin Beton Elemanların Basınç Dayanımına Etkisi

Sensörlerin elemana yerleştirilmesinin etkisini incelemek için beton elemanın basınç dayanımı araştırılmıştır. Gömülü sensörlerin beton elemanın basınç dayanımından etkilenip etkilemeyeceğinden emin olmak için deney testleri yapılmalıdır. Normalde, gömülü sensörün boyutu 50x50x50 mm'dir, beton eleman boyutuna (150 mm x150 mm x300 mm) kıyasla küçüktür. Sonuç olarak, gömülü sensörler beton elemanın basınç dayanımını etkilememelidir. Ancak, tüm beton elemanların basınç dayanımı Şekil 151'de gösterilmiştir. Şekil 151'den, kontrol elemanı, KNT0.75, KNT1, KFKNT0.75 ve KF0.1KNT0.5 akıllı elemanlarının basınç dayanımlarının sırasıyla 38,8MPa, 38,4MPa, 37,85MPa, 39MPa ve 37,5 MPa olduğu görülebilmektedir. Basınç dayanımı sonuçları birbirine yakın görünmektedir, bu durum gömülü sensörlerin beton elemanın basınç dayanımına zarar vermediği anlamına gelmektedir. Gömülü sensörlerin etrafı eleman betonuyla sarıldığından sensörler üç eksenli basınca maruz kalırken beton eleman tek eksenli basınca maruz kalmaktadır. Bu, sensöre uygulanan doğrudan tek eksenli basınç deformasyonun, tüm beton elemana uygulanandan daha az olmasını sağlamaktadır (Ding *et al.* 2019). Bu nedenle, basınç yükleme altındaki beton elemanın tam kırıldıktan sonra gömülü sensörlerin henüz sağlam olduğu görülmüştür. Bu bulgular, sensörün beton yapı elemanının tüm hasar sürecini izleyebildiğini göstermektedir.



Şekil 151. Normal ve akıllı beton elemanların basınç dayanımı.

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada YSİ için piezorezistif çimento bazlı kompozitler sensör olarak üretilmiş ve piezorezistif sensörler için çimento hamurunda mikro malzemeler (KF) ve nanomalzemelerin (KNT'ler ve NNi) iletken malzemeler olarak kullanılmasının uygulanabilirliği incelenmiştir. Bu iletken malzemeler çimento hacmine farklı hacim oranlarında (%0.1, 0.25, 0.5, 0.75 ve 1) ilave edilmiştir. KF+KNT veya KF+NNi'nin hibrit kompozitleri de üretilerek çimento kompozitlerinin piezorezistif davranışı incelenmiştir. Yapılan deneysel program sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Literatürde önerilen ve ön çalışmalarda kullanılan karıştırma yöntemleri, iletken malzeme türlerine bağlı olarak numunelerin elektrik direnci değerlerinde bariz farklılık göstermiştir.
2. Bu çalışmada, tüm malzemeler için ultrasonik karıştırma yöntemi, diğer karıştırma yöntemlerine kıyasla etkili bir karıştırma yöntemi olmamakla birlikte KF kompozitleri için kuru karıştırma yöntemi (2. yöntem) en iyi karıştırma yöntemi olarak bulunmuştur. NNi'nin taze beton karışımına eklenmesinde NNi-5 yöntemi, en homojen dağılım yöntemi olarak belirlenmiştir. KNT'li kompozitler için mekanik karıştırma CNT-6 yöntemi en iyi karıştırma yöntemi olarak seçilmiştir. En iyi karışım yöntemine en az elektrik direncine sahip karışım yöntemli numunelerden hareketle karar verilmiştir.
3. İletken malzeme oranları belirlenirken tüm numunelerin perkolasyon eşiği hesaplanmıştır. Tüm malzemelerde bu değer hacimce %0.1 ile 0.75 arasında olduğu bulunmuştur. İletken malzeme içeriğinin artması, çimento kompozitlerinin elektriksel direncini azaltmıştır. Elektrik direncini azaltma oranı, malzemelerin türüne ve hacim içeriğine bağlı olarak değişmektedir. KF ve KNT kompozitleri, elektrik direnç azalma oranları NNi kompozitlerinininkine göre daha yüksektir.
4. Tüm numunelerde DC ölçüm yönteminde dört problu yöntem, iki problu yöntemden daha düşük elektrik direnç sonuçları göstermiştir.
5. AC ölçüm yöntemi, kavramında farklı frekans aralıklarında da ölçüm yapılması ve polarizasyon etkisini mümkün olduğu kadar azaltması sebebi ile DC yöntemine kıyasla tercih edilmiştir. Ayrıca AC yöntemi ile DC yönteminden daha düşük elektrik öz dirençleri bulunmuştur.

6. AC ölçüm yönteminde elektriksel empedans, özellikle kontrol ve NNi kompozitleri için kürlenme yaşının artmasıyla artmıştır. Ancak, KF ve KNT kompozitleri için kürlenme yaşıyla birlikte empedans artış aralığı çok daha azdır. Bu sonuç iletken malzeme türünün ve kürlenme yaşının empedansa olan etkisinin önemli olduğunu göstermiştir.
7. Monotonik yükleme altında iletken kompozitler, kontrol kompozitlerine kıyasla daha iyi kendiliğinden algılama davranışı göstermiştir. Kompozitlerin FCI değerlerinin azalması nihai dayanımlarına kadar devam etmiştir. Nihai dayanım sonrasında kompozit kırılmaya başlamış ve FCI değerleri hızla artmıştır.
8. Monotonik yükleme altında tüm iletken kompozitler iyi bir algılama davranışı gösterirken, KNT ve KFKNT hem monotonik hem de periyodik yükleme altında en iyi sonuçlar göstermiştir. KNT1 ve KFKNT0.75 gruplarının FCI ve monotonik basınç deformasyonu arasında korelasyon katsayıları sırasıyla  $R^2 = 0,99$  ve  $0,98$  değerleri alırken, periyodik yüklemede ise sırasıyla  $R^2 = 0,94$  ve  $0,89$  değerleri ile en iyi algılama özelliği gösterdikleri görülmüştür.
9. Çimento matrisine KF'nin eklenmesi ile kompozitin gözenek boyutunu arttığından monotonik ve periyodik yükleme kendiliğinden algılama davranışı diğer iletken malzemeli kompozitlere göre daha zayıftır.
10. KNT0.75, KNT1, KF0.1KNT0.5 ve KFKNT0.75 kompozitleri, elastik bölgede tekrarlanan ve simetrik periyodik basınç yükleri altında yüksek algılama hassasiyeti gösterdiğinden yapısal elemana gömülerek yapısal deformasyon sensörleri olarak kullanılmıştır.
11. İletken malzemelerin içeriğı arttıkça tüm kompozitlerin basınç dayanımları azalmıştır. Ölçümde kullanılan numunelerin içindeki elektrotlar basınç dayanımı sonuçlarına olumsuz etki etmiştir.
12. XRD analizlerine göre tüm iletken malzemelerin oranının artırılması çimento kompozitlerinde CH ve C-S-H içeriğini düşürmüştür. İletken malzemelerin konsantrasyonunun değışmesi ile numunelerin parçacık boyutları (kristalit boyutları) da değışmiştir. Buna göre, yetersiz puzolanik reaksiyon sonucunda C-S-H miktarı yeterli seviyelere ulaşamayacağından kompozitlerin basınç dayanımlarında belirgin oranda azalmıştır.
13. Kullanılan tüm gömülü sensörler, yükleme altındaki yapının deformasyon davranışını izlemek için iyi bir performans göstermiştir. YSİ için KNT1 sensörleri, diğer sensörlere kıyasla periyodik ve monotonik yükleme altında en iyi deformasyon algılama özelliğine sahip olduğu söylenebilmektedir.

14. Gömülü Sensörlerde üç eksenli basınç gerilmesi ve beton elemana tek eksenli gerilmenin uygulanması farklılığından dolayı sensörün algılama sinyali özelliklerinde bariz farklılıklar tesbit edilmiştir.
15. Gömülü sensörler beton elemanın basınç dayanımını etkilememiştir. Bu nedenle, geliştirilen gömülü sensörler, beton elemanlarının gerilme-deformasyon davranışını doğru bir şekilde yansıtmaktadır.
16. Bu çalışmadan hareketle çimento esaslı sensörlerin; yapıların deformasyon davranışını izlemek için yapılardaki kolon, kiriş vb. taşıyıcı elemanlarda kullanımının uygun olacağı düşünülmekle beraber donatılı elemanlarda da kullanımları denenerek değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu sensörlerin yüksek hassasiyet, iyi uyumluluk ve uzun hizmet ömrü gibi birçok avantajı vardır.

### **Gelecek Çalışmalar için Öneriler**

Aşağıda YSİ'de kullanılacak iletken kompozitlerle ilgili ileride yapılacak çalışmalara ışık tutması için bazı öneriler verilmiştir:

- Çimento kompozitlerinin performans (mekanik ve durabilite), elektriksel özellikleri üzerinde karışım oranları, yöntemleri ile farklı iletken malzeme, matris kullanımının incelenmesi,
- İdeal iletken malzemelerle üretilmiş gömülü sensörlerin farklı mekanik etkiler altında farklı yapı elemanlarında ve kritik bölgelerde davranışının değerlendirilmesi,
- İletken sensörlerin yapı elemanına farklı yerleştirme şekillerinin kendiliğinden algılama kapasiteleri üzerindeki etkisinin araştırılması,
- Betonarme yapı elemanlarının monotonik ve periyodik yüklemeler altında piezorezistif davranışının değerlendirilmesi ve iletken kompozitlerin kendiliğinden ısınma özelliklerinin incelenmesi tavsiye edilmektedir.

## KAYNAKLAR

- AASHTO-95, 2011. Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. American Association of State Highway Transportation Officials, AASHTO, Washington, DC.
- AASHTO-95, 2014. Standard test method for surface resistivity of concrete's ability to resist chloride ion penetration. American Association of State Highway Transportation Officials USA.
- Abrishambaf, A., Barros, J. and Cunha, V., 2013. Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels. *Cement Concrete Research*, 51, 57-66.
- Aitcin, P.C., 2000. Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*, 30 (9), 1349-1359.
- Akkaya, Y., Picka, J. and Shah, S.P., 2000. Spatial distribution of aligned short fibers in cement composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 12 (3), 272-279.
- Al-Dahawi, A., Yıldırım, G., Öztürk, O. and Şahmaran, M., 2017. Assessment of self-sensing capability of Engineered Cementitious Composites within the elastic and plastic ranges of cyclic flexural loading. *Construction Building Materials*, 145, 1-10.
- Al-Saleh, M.H. and Sundararaj, 2009. A review of vapor grown carbon nanofiber/polymer conductive composites. *Carbon*, 47 (1), 2-22.
- Aravand, M., Lomov, S.V., Verpoest, I. and Gorbatikh, L., 2014. Evolution of carbon nanotube dispersion in preparation of epoxy-based composites: From a masterbatch to a nanocomposite. *Express Polymer Letters*, 8 (8), 596-608.
- Armoosh, S.R., Oltulu, M., 2019. Self-heating of electrically conductive metal-cementitious composites. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 30 (15), 2234-2240.
- Ashour, A., 2011. Aspect Ratio Effect of Functionalized/Non-Functionalized Multiwalled Carbon Nanotubes on the Mechanical Properties of Cementitious Materials, Master Thesis, Texas A and M University, Texas, USA.
- ASTM-C150/C150M, 2017. Standard Specification for Portland Cement, American Society for Testing and Materials. ASTM, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM-C230/C230M-14, 2014. Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM-C494/C494M, 2011. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. ASTM International, USA.
- ASTM-C618-13, 2013. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM international, West Conshohocken, PA.
- ASTM-C1437, 2007. Standard test method for flow of hydraulic cement mortar. ASTM, USA.
- ASTM, 2012. Standard test method for bulk electrical conductivity of hardened concrete. West Conshohocken (PA).
- Atınçekici, T.G., 2007. Nanoboyutlu Bakır İçeren İkili Katalizörlerin Hazırlanması ve Tanımlanması, Doktora Tezi, Kimya Mühendisliği: Proses ve Reaktör Tasarımı, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Austin, T.S., Singh, M.M., Gregson, P.J., Dakin, J.P. and Powell, P.M., 1999. Damage assessment in hybrid laminates using an array of embedded fiber optic sensors, *Smart Structures and Materials: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*. International Society for Optics and Photonics, pp. 281-288.
- Azhari, F., 2008. Cement-based sensors for structural health monitoring, Doctoral dissertation, University of British Columbia, Canada.
- Azhari, F. and Banthia, N., 2010. Structural health monitoring using piezoresistive cementitious composites, *Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*. Ancona, Italy.

- Azhari, F. and Banthia, N., 2012. Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing. *Cement and Concrete Composites*, 34 (7), 866-873.
- Baeza, F.J., Galao, O., Zornoza, E. and Garcés, P., 2013a. Effect of aspect ratio on strain sensing capacity of carbon fiber reinforced cement composites. *Materials & Design*, 51, 1085-1094.
- Baeza, F.J., Galao, O., Zornoza, E. and Garcés, P., 2013b. Multifunctional cement composites strain and damage sensors applied on reinforced concrete (RC) structural elements. *Materials* 6(3), 841-855.
- Bahari, A., Mousavi, M.A. and Milani Moghadarm, H., 2019. Environmental impacts related to MWCNT-COOHs, TiO<sub>2</sub> and NM nanoparticles on the cement composites with quality factor and RSM concept. *Journal of Water Environmental Nanotechnology*, 4 (1), 75-87.
- Bai, D.S., Suvarna, R.P. and Krishna, C.B.M., 2016. Characterization and DC Conductivity Studies of NiO Nano Particles. *Indian J. Adv. Chem. Sci*, 4 (1), 98-101.
- Bai, S., Jiang, L., Jiang, Y., Jin, M., Jiang, S. and Tao, D., 2020. Research on electrical conductivity of graphene/cement composites. *Advances in Cement Research*, 32 (2) , 45-52.
- Balaguru, P. and Shah, S., 1992. *Fiber-Reinforced Cement Composites*. McGraw-Hill, 531 p, New York.
- Banfill, P., Starrs, G., Derruau, G., McCarter, W. and Chrisp, T., 2006. Rheology of low carbon fibre content reinforced cement mortar. *Cement and Concrete Composites*, 28 (9), 773-780.
- Banthia and Nemkumar, 1994. Carbon fiber reinforced cements: structure, performance, applications and research needs. *Special Publication*, 142, 91-120.
- Banthia, N., Bindiganavile, V. and Mindess, S., 2003. Impact resistance of fiber reinforced concrete: A progress report, In *Proceedings, British colombia, Canada*, pp. 117-131.
- Banthia, N. and Boyd, A., 2000. Sprayed fibre-reinforced polymers for repairs. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27 (5), 907-915.
- Banthia, N., Djeridane, S. and Pigeon, M., 1992. Electrical resistivity of carbon and steel micro-fiber reinforced cements. *Cement and Concrete Research*, 22 (5), 804-814.
- Banyhussan, Q.S., Yıldırım, G., Bayraktar, E., Demirhan, S. and Şahmaran, M., 2016. Deflection-hardening hybrid fiber reinforced concrete: The effect of aggregate content. *Construction and Building Materials*, 125, 41-52.
- Banyhussan, Q. S., Yıldırım, G., Anıl, Ö., Erdem, R. T., Ashour, A., and Şahmaran, M. 2019. Impact resistance of deflection-hardening fiber reinforced concretes with different mixture parameters. *Structural Concrete*, 20(3), 1036-1050.
- Barlian, A.A., Park, W.-T., Mallon, J.R., Rastegar, A.J. and Pruitt, B.L., 2009. Semiconductor piezoresistance for microsystems, *Proceedings of the IEEE, Canada*, pp. 513-552.
- Belli, A., Mobili, A., Bellezze, T. and Tittarelli, F., 2020. Commercial and recycled carbon/steel fibers for fiber-reinforced cement mortars with high electrical conductivity. *Cement and Concrete Composites*, 109, 103569.
- Bharj, J., Singh, S., Chander, S., Singh, R. and Technology, 2014. Role of dispersion of multiwalled carbon Nanotubes on compressive strength of cement paste, *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical Computer Engineering*, pp. 340-343.
- Bing, C., Keru, W. and Wu, Y., 2005. The smart behavior of cement-based composite containing Carbon fibers under three-point-bending load. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 20 (4), 128-131.
- Bontea, D.-M., Chung, D. and Lee, G., 2000. Damage in carbon fiber-reinforced concrete, monitored by electrical resistance measurement. *Cement and Concrete Research*, 30 (4), 651-659.

- Calleja, J., 1952. Effect of current frequency on measurement of electrical resistance of cement pastes, *Journal Proceedings*, pp. 329-332.
- Cao, J. and Chung, D., 2001. Improving the dispersion of steel fibers in cement mortar by the addition of silane. *Cement and Concrete Research*, 31 (2), 309-311.
- Cassar, L., 2005. Nanotechnology and photocatalysis in cementitious materials, *Proceedings of the 2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction. NANOC*, pp. 277-683.
- Castro, J., Spragg, R. and Weiss, J., 2012. Water absorption and electrical conductivity for internally cured mortars with a W/C between 0.30 and 0.45. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24 (2), 223-231.
- Chacko, R.M., Banthia, N. and Mufti, A.A., 2007. Carbon-fiber-reinforced cement-based sensors. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34 (3), 284-290.
- Chan, Y., Luo, X. and Sun, W., 2000. Compressive strength and pore structure of high-performance concrete after exposure to high temperature up to 800 C. *Cement and Concrete Research*, 30 (2), 247-251.
- Chang, C., Ho, M., Song, G., Mo, Y.-L. and Li, H., 2009. A feasibility study of self-heating concrete utilizing carbon nanofiber heating elements. *Smart Materials and Structures*, 18 (12), 127001.
- Chen, B. and Liu, J., 2008. Damage in carbon fiber-reinforced concrete, monitored by both electrical resistance measurement and acoustic emission analysis. *Construction Building Materials*, 22 (11), 2196-2201.
- Chen, B., Liu, J. and Wu, K., 2005. Electrical responses of carbon fiber reinforced cementitious composites to monotonic and cyclic loading. *Cement and Concrete Research*, 35 (11), 2183-2191.
- Chen, B., Wu, K. and Yao, W., 2004. Piezoresistivity in carbon fiber reinforced cement based composites. *Journal of Materials Science Technology*, 20 (6), 746-750.
- Chen, H.P., 2018. *Structural health monitoring of large civil engineering structures*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- Chen, K., Xiong, C., Li, L., Zhou, L., Lei, Y. and Dong, L., 2009. Conductive mechanism of antistatic poly (ethylene terephthalate)/ZnOw composites. *Polymer Composites*, 30 (2), 226-231.
- Chen, M., Gao, P., Geng, F., Zhang, L. and Liu, H., 2017. Mechanical and smart properties of carbon fiber and graphite conductive concrete for internal damage monitoring of structure. *Construction Building Materials*, 142, 320-327.
- Chen, P.-W. and Chung, D., 1995. Improving the electrical conductivity of composites comprised of short conducting fibers in a nonconducting matrix: The addition of a nonconducting particulate filler. *Journal of Electronic Materials*, 24 (1), 47-51.
- Chen, P.-W. and Chung, D., 1996a. Concrete as a new strain/stress sensor. *Composites Part B: Engineering*, 27 (1), 11-23.
- Chen, P.-W. and Chung, D., 1996b. Low-drying-shrinkage concrete containing carbon fibers. *Composites Part B: Engineering*, 27 (3-4), 269-274.
- Chen, P.-W. and Chung, D.D., 1993a. Carbon fiber reinforced concrete for smart structures capable of non-destructive flaw detection. *Smart Materials and Structures*, 2 (1), 22.
- Chen, P. and Chung, D., 1993b. Concrete reinforced concrete as a smart material capable of non-destructive flaw detection. *Smart Mater Struct*, 2, 22-30.
- Chermant, J.-L., Chermant, L., Coster, M., Dequiedt, A.-S. and Redon, C., 2001. Some fields of applications of automatic image analysis in civil engineering. *Cement and Concrete Composites*, 23 (2-3), 157-169.
- Chiarello, M. and Zinno, R., 2005. Electrical conductivity of self-monitoring CFRC. *Cement and Concrete Composites*, 27 (4), 463-469.

- Chirila, V., Marginean, G. and Brandl, W., 2005. Effect of the oxygen plasma treatment parameters on the carbon nanotubes surface properties. *Surface and Coatings Technology*, 200 (1-4), 548-551.
- Cholker, A.K. and Tantray, M.A., 2019. Micro carbon fiber based concrete as a strain-damage sensing material, *Materials Today: Proceedings*, pp. 152-157.
- Chung, D., 2002. Piezoresistive cement-based materials for strain sensing. *Journal of intelligent material systems and structures*, 13 (9), 599-609.
- Chung, D., 2005. Dispersion of short fibers in cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17 (4), 379-383.
- Chung, D.D., 2000. Composite materials for electronic functions. Trans Tech Publications.
- Chung, D.D., 2001. Applied materials science: applications of engineering materials in structural, electronics, thermal, and other industries. CRC Press.
- Chung, D.D., 2010. Composite materials: science and applications. Springer-Verlag London, London.
- Chung, D.D.L., 2018. Multifunctional Cement-Based Materials. CRC Press, new york, USA.
- Claisse, P., 2014. Letter: Using Electrical Tests as Durability Indicators. *Concrete International*, 36 (10), 17.
- Collins, F., Lambert, J. and Duan, W.H., 2012. The influences of admixtures on the dispersion, workability, and strength of carbon nanotube–OPC paste mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 34 (2), 201-207.
- Conrad, R. and Boris, B.N., 2015. Ferromagnetic alloys: Magnetoresistance, microstructure, magnetism and beyond. *Journal of Nano and Electronic Physics*, 7 (4), 1-16.
- Consoliver, E.L. and Mitchell, G.I., 1920. Automotive ignition systems. McGraw-Hill.
- Cota, F.d.P., Panzera, T.H., Schiavon, M.A., Christoforo, A.L., Borges, P.H.R., Bowen, C. and Scarpa, F., 2012. Full factorial design analysis of carbon nanotube polymer-cement composites. *Materials Research*, 15 (4), 573-580.
- Cullinan, M.A., Panas, R.M., DiBiasio, C.M. and Culpepper, M.L., 2012. Scaling electromechanical sensors down to the nanoscale. *Sensors and Actuators A: Physical*, 187, 162-173.
- Cwirzen, A., Habermehl-Cwirzen, K. and Penttala, V., 2008. Surface decoration of carbon nanotubes and mechanical properties of cement/carbon nanotube composites. *Advances in Cement Research*, 20 (2), 65-73.
- D'Alessandro, A., Ubertini, F., Laflamme, S., Rallini, M., Materazzi, A.L. and Kenny, J.M., 2016a. Strain sensitivity of carbon nanotube cement-based composites for structural health monitoring, *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2016*. International Society for Optics and Photonics, pp. 19.
- D'Alessandro, A., Ubertini, F. and Materazzi, A., 2016b. Self-sensing concrete nanocomposites for smart structures. *International Journal of Civil Environmental Engineering*, 10 (5), 599-604.
- D'Alessandro, A., Ubertini, F., García-Macías, E., Castro-Triguero, R., Downey, A., Laflamme, S., Meoni, A. and Materazzi, A.L., 2017. Static and dynamic strain monitoring of reinforced concrete components through embedded carbon nanotube cement-based sensors. *Shock and Vibration*, 2017, 11.
- Daum, W., 2013. Guidelines for structural health monitoring. *Handbook of Technical Diagnostics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 539-541.
- Demirciloglu, E., Teomete, E. and Ozbulut, O.E., 2020. Strain sensitivity of steel-fiber-reinforced industrial smart concrete. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 31 (1), 127-136.
- Ding, S., Ruan, Y., Yu, X., Han, B. and Ni, Y.-Q., 2019. Self-monitoring of smart concrete column incorporating CNT/NCB composite fillers modified cementitious sensors. *Construction and Building Materials*, 201, 127-137.

- Ding, Y., Chen, Z., Han, Z., Zhang, Y. and Pacheco-Torgal, F., 2013. Nano-carbon black and carbon fiber as conductive materials for the diagnosing of the damage of concrete beam. *Construction Building Materials*, 43, 233-241.
- Ding, Y., Huang, Y., Zhang, Y., Jalali, S. and Aguiar, J., 2015. Self-monitoring of freeze–thaw damage using triphasic electric conductive concrete. *Construction Building Materials* 101, 440-446.
- Dirjish, M., 2012. What's The Difference Between Piezoelectric And Piezoresistive Components?, <https://www.electronicdesign.com/>, (25.11.2020).
- Doebeling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B. and Shevitz, D.W., 1996. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review, Los Alamos National Lab., NM (United States).
- Dong, S., Dong, X., Ashour, A., Han, B. and Ou, J., 2020a. Fracture and self-sensing characteristics of super-fine stainless wire reinforced reactive powder concrete. *Cement and Concrete Composites*, 105, 103427.
- Dong, S., Han, B., Ou, J., Li, Z., Han, L. and Yu, X., 2016. Electrically conductive behaviors and mechanisms of short-cut super-fine stainless wire reinforced reactive powder concrete. *Cement and Concrete Composites*, 72, 48-65.
- Dong, W., Li, W., Long, G., Tao, Z., Li, J. and Wang, K., 2019a. Electrical resistivity and mechanical properties of cementitious composite incorporating conductive rubber fibres. *Smart Materials and Structures*, 28 (8), 085013.
- Dong, W., Li, W., Tao, Z. and Wang, K., 2019b. Piezoresistive properties of cement-based sensors: review and perspective. *Construction Building Materials*, 203, 146-163.
- Dong, W., Li, W., Wang, K., Luo, Z. and Sheng, D., 2020b. Self-sensing capabilities of cement-based sensor with layer-distributed conductive rubber fibres. *Sensors and Actuators A: Physical*, 301, 111763.
- Ebbesen, T.W., Hiura, H., Bisher, M.E., Treacy, M.M., Shreeve-Keyer, J.L. and Haushalter, R.C., 1996. Decoration of carbon nanotubes. *Advanced Materials*, 8 (2), 155-157.
- Fan, X., Ao, F., Sun, M. and Li, Z., 2011. Piezoresistivity of carbon fiber graphite cement-based composites embedded in concrete column. *Jornal of Building Materials* 14 (1), 88-91.
- Farrar, C.R. and Worden, K., 2007. An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical Engineering Sciences*, 365 (1851), 303-315.
- Feng, D., Xie, N., Gong, C., Leng, Z., Xiao, H., Li, H. and Shi, X., 2013. Portland cement paste modified by TiO<sub>2</sub> nanoparticles: a microstructure perspective. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 52 (33), 11575-11582.
- Ferdiansyah, T., Turatsinze, A. and Balayssac, J.-P., 2018. Design and characterization of self-sensing steel fiber reinforced concrete, *Matec Web of Conferences*. EDP Sciences, pp. 11008.
- Ford, S., Shane, J. and Mason, T., 1998. Assignment of features in impedance spectra of the cement-paste/steel system. *Cement and Concrete Research*, 28 (12), 1737-1751.
- Frangopol, D.M. and Messervey, T.B., 2009. Maintenance principles for civil structures. *Principles of SHM-based Structural Monitoring, Design and Maintenance*. John Wiley & Sons, USA.
- Fu, X. and Chung, D., 1995. Contact electrical resistivity between cement and carbon fiber: its decrease with increasing bond strength and its increase during fiber pull-out. *Cement and Concrete Research*, 25 (7), 1391-1396.
- Fu, X. and Chung, D., 1996. Self-monitoring of fatigue damage in carbon fiber reinforced cement. *Cement and Concrete Research*, 26 (1), 15-20.
- Fu, X. and Chung, D., 1998. Sensitivity of the bond strength to the structure of the interface between reinforcement and cement, and the variability of this structure. *Cement and concrete research*, 28 (6), 787-793.

- Fu, X., and Chung, D., 1997a. Effect of curing age on the self-monitoring behavior of carbon fiber reinforced mortar. *Cement and Concrete Research*, 27 (9), 1313-1318.
- Fu, X., Ma, E., Chung, D. and Anderson, W., 1997b. Self-monitoring in carbon fiber reinforced mortar by reactance measurement. *Cement and Concrete Research*, 27 (6), 845-852.
- Galao, O., Baeza, F.J., Zornoza, E. and Garcés, P., 2017. Carbon nanofiber cement sensors to detect strain and damage of concrete specimens under compression. *Nanomaterials*, 7 (12), 413.
- Galchev, T., McCullagh, J., Peterson, R. and Najafi, K., 2011. Harvesting traffic-induced vibrations for structural health monitoring of bridges. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 21 (10), 104005.
- Gandhi, M.V. and Thompson, B., 1992. *Smart materials and structures*. Champan and hall, 296 p, USA.
- García-Macías, E., D'Alessandro, A., Castro-Triguero, R., Pérez-Mira, D. and Ubertini, F., 2017. Micromechanics modeling of the uniaxial strain-sensing property of carbon nanotube cement-matrix composites for SHM applications. *Composite Structures*, 163, 195-215.
- Giner, V., Ivorra, S., Baeza, F. and Ferrer, B., 2011. Effect of different admixtures on dynamic structural behavior of fiber reinforced concrete elements, *Proc. of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN* pp. 3245-3251.
- Gopalakrishnan, K., Birgisson, B., Taylor, P. and Attoh-Okine, N.O., 2011. *Nanotechnology in civil infrastructure: a paradigm shift*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Gopalakrishnan, K., Ceylan, H., Kim, S., Yang, S. and Abdualla, H., 2015a. Electrically conductive mortar characterization for self-heating airfield concrete pavement mix design. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 8 (5), 315.
- Gopalakrishnan, K., Ceylan, H., Kim, S., Yang, S. and Abdualla, H., 2015b. Self-heating electrically conductive concrete for pavement deicing: a revisit, *Transportation Research Board 94th Annual Meeting*, Washington DC, United States.
- Gu, P., Xu, Z., Xie, P. and Beaudoin, J., 1993. An AC impedance spectroscopy study of micro-cracking in cement-based composites during compressive loading. *Cement and Concrete Research*, 23 (3), 675-682.
- Guan, H., Liu, S., Duan, Y. and Cheng, J., 2006. Cement based electromagnetic shielding and absorbing building materials. *Cement and Concrete Composites*, 28 (5), 468-474.
- Guan, H., Liu, S., Duan, Y. and Zhao, Y., 2007. Investigation of the electromagnetic characteristics of cement based composites filled with EPS. *Cement and Concrete Composites*, 29 (1), 49-54.
- Gupta, S., Gonzalez, J.G. and Loh, K.J., 2017. Self-sensing concrete enabled by nano-engineered cement-aggregate interfaces. *Structural Health Monitoring*, 16 (3), 309-323.
- Hambach, M., Möller, H., Neumann, T. and Volkmer, D., 2016. Carbon fibre reinforced cement-based composites as smart floor heating materials. *Composites Part B: Engineering*, 90, 465-470.
- Han, B., 2005. *Properties, sensors and structures of pressure-sensitive carbon fiber cement paste*. Harbin Institute of Technology.
- Han, B., Ding, S., Wang, J. and Ou, J., 2019. *Nano-Engineered Cementitious Composites: Principles and Practices*. Springer, Singapore
- Han, B., Ding, S. and Yu, X., 2015a. Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review. *Measurement*, 59, 110-128.
- Han, B., Guan, X.-c. and Ou, J.-p., 2006. Experimental research of electrical conductivity and pressure-sensitivity of carbon fiber reinforced cement. *Materials Science and Technology*, 1.
- Han, B., Guan, X. and Ou, J., 2004. Specific Resistance and Pressure-Sensitivity of Cement Paste Admixing with Nano-TiO<sub>2</sub> and Carbon Fiber. *Journal-Chinese Ceramic Society*, 32 (7), 884-887.

- Han, B., Guan, X. and Ou, J., 2007. Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 135 (2), 360-369.
- Han, B., Guan, X. and Ou, J., 2009a. Application of ultrasound for preparation of carbon fiber cement-based composites. *Material Science and Technology* 17 (3), 368-372.
- Han, B., Han, B. and Ou, J., 2009b. Experimental study on use of nickel powder-filled Portland cement-based composite for fabrication of piezoresistive sensors with high sensitivity. *Sensors and Actuators A: Physical*, 149 (1), 51-55.
- Han, B., Han, B., Yu, X. and Ou, J., 2011a. Ultrahigh pressure-sensitive effect induced by field emission at sharp nano-tips on the surface of spiky spherical nickel powders. *Sensor Letters*, 9 (5), 1629-1635.
- Han, B. and Ou, J., 2007. Embedded piezoresistive cement-based stress/strain sensor. *Sensors and Actuators A: Physical* 138 (2), 294-298.
- Han, B., Qiao, G. and Jiang, H., 2012a. Piezoresistive response extraction for smart cement-based composites/sensors. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 27 (4), 754-757.
- Han, B., Wang, Y., Dong, S., Zhang, L., Ding, S., Yu, X. and Ou, J., 2015b. Smart concretes and structures: A review. *Journal of intelligent material systems and structures*, 26 (11), 1303-1345.
- Han, B., Wang, Z., Zeng, S., Zhou, D., Yu, X., Cui, X. and Ou, J., 2017a. Properties and modification mechanisms of nano-zirconia filled reactive powder concrete. *Construction Building Materials*, 141, 426-434.
- Han, B. and Yu, X., 2010. Effects of the content level and particle size of nickel powder on the piezoresistivity of cement-based composites/sensors. *Smart Materials and Structures* 19 (6), 065012.
- Han, B., Yu, X. and Kwon, E., 2009c. A self-sensing carbon nanotube/cement composite for traffic monitoring. *Nanotechnology*, 20 (44), 445501.
- Han, B., Yu, X., Kwon, E. and Ou, J., 2012b. Effects of CNT concentration level and water/cement ratio on the piezoresistivity of CNT/cement composites. *Journal of Composite Materials*, 46 (1), 19-25.
- Han, B., Yu, X. and Ou, J., 2010. Effect of water content on the piezoresistivity of MWNT/cement composites. *Journal of materials science*, 45 (14), 3714-3719.
- Han, B., Yu, X. and Ou, J., 2011b. Multifunctional and smart carbon nanotube reinforced cement-based materials. *Nanotechnology in civil infrastructure*. Springer, 1-47.
- Han, B., Yu, X. and Ou, J., 2014. *Self-sensing concrete in smart structures*. Elsevier, 385 p, USA.
- Han, B., Yu, Y., Han, B. and Ou, J., 2008. Development of a wireless stress/strain measurement system integrated with pressure-sensitive nickel powder-filled cement-based sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 147 (2), 536-543.
- Han, B., Zhang, K., Burnham, T., Kwon, E. and Yu, X., 2012c. Integration and road tests of a self-sensing CNT concrete pavement system for traffic detection. *Smart Materials and Structures*, 22 (1), 015020.
- Han, B., Zhang, K., Yu, X., Kwon, E. and Ou, J., 2011c. Fabrication of piezoresistive CNT/CNF cementitious composites with superplasticizer as dispersant. *Journal of Materials in Civil engineering*, 24 (6), 658-665.
- Han, B., Zhang, K., Yu, X., Kwon, E. and Ou, J., 2011d. Nickel particle-based self-sensing pavement for vehicle detection. *Measurement*, 44 (9), 1645-1650.
- Han, B., Zhang, K., Yu, X., Kwon, E. and Ou, J., 2012d. Electrical characteristics and pressure-sensitive response measurements of carboxyl MWNT/cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 34 (6), 794-800.
- Han, B., Zhang, K., Yu, X., Kwon, E. and Ou, J.J.M., 2011e. Nickel particle-based self-sensing pavement for vehicle detection. 44 (9), 1645-1650.

- Han, B., Zhang, L. and Ou, J., 2017b. Smart and multifunctional concrete toward sustainable infrastructures. Springer, Singapore.
- Han, B., Zhang, L., Sun, S., Yu, X., Dong, X., Wu, T. and Ou, J., 2015c. Electrostatic self-assembled carbon nanotube/nano carbon black composite fillers reinforced cement-based materials with multifunctionality. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 79, 103-115.
- He, P., Gao, Y., Lian, J., Wang, L., Qian, D., Zhao, J., Wang, W., Schulz, M.J., Zhou, X.P. and Shi, D., 2006. Surface modification and ultrasonication effect on the mechanical properties of carbon nanofiber/polycarbonate composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37 (9), 1270-1275.
- He, X. and Shi, X., 2008. Chloride permeability and microstructure of Portland cement mortars incorporating nanomaterials. *Transportation Research Record*, 2070 (1), 13-21.
- Heaviside, O., 2011. *Electrical papers*, 2. Cambridge University Press, 590 p.
- Henkensiefken, R., Castro, J., Bentz, D., Nantung, T. and Weiss, J., 2009. Water absorption in internally cured mortar made with water-filled lightweight aggregate. *Cement and Concrete Research*, 39 (10), 883-892.
- Hoheneder, J.A., 2012. Smart carbon nanotube/fiber and PVA fiber-reinforced composites for stress sensing and chloride ion detection, *Science in Engineering*, The University of Wisconsin-Milwaukee Milwaukee, USA, 109 pp.
- Hong, L., 2006. Study on the Smart Properties of the Graphite Slurry Infiltrated Steel Fiber Concrete, Dissertation for the Doctor Degree in Engineering: , University of Dalian
- Hong, L. and Wang, S.-m., 2010. Study on the stress-resistance effect of the graphite slurry infiltrated steel fiber concrete. *Functional Materials*, 31, 135-137.
- Horszczaruk, E., Sikora, P. and Łukowski, P., 2016. Application of nanomaterials in production of self-sensing concretes: contemporary developments and prospects. *Archives of Civil Engineering* 62 (3), 61-74.
- Hou, T.-C. and Lynch, J.P., 2005. Conductivity-based strain monitoring and damage characterization of fiber reinforced cementitious structural components, *Smart Structures and Materials: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*. International Society for Optics and Photonics, pp. 419-429.
- Hou, T.-C., Su, Y.-M., Chen, Y.-R. and Chen, P.-J., 2017. Effects of coarse aggregates on the electrical resistivity of Portland cement concrete. *Construction and Building Materials*, 133, 397-408.
- Howser, R., Dhonde, H. and Mo, Y., 2011. Self-sensing of carbon nanofiber concrete columns subjected to reversed cyclic loading. *Smart Materials and Structures*, 20 (8), 085031.
- Huang, L., Zhang, D., Wu, S. and Zhao, J., 2005. Study on pulling sensitivity character of CFRC and smart monitoring of beam specimens. *Jornal of Material Engineering*, 2 (26-29), 33.
- Huang, Y., Xiang, B., Ming, X., Fu, X. and Ge, Y., 2008. Conductive mechanism research based on pressure-sensitive conductive composite material for flexible tactile sensing, *International Conference on Information and Automation*. IEEE, China, pp. 1614-1619.
- Ivorra, A., Al-Sakere, B., Rubinsky, B. and Mir, L.M., 2008. Use of conductive gels for electric field homogenization increases the antitumor efficacy of electroporation therapies. *Physics in Medicine & Biology*, 53 (22), 6605.
- Jang, J. and Yang, H., 2000. The effect of surface treatment on the performance improvement of carbon fiber/polybenzoxazine composites. *Journal of Materials Science*, 35 (9), 2297-2303.
- Jeon, I.-Y., Shin, Y.-R., Sohn, G.-J., Choi, H.-J., Bae, S.-Y., Mahmood, J., Jung, S.-M., Seo, J.-M., Kim, M.-J. and Chang, D.W., 2012. Edge-carboxylated graphene nanosheets via ball milling, *Proceedings of the National Academy of Sciences, China*, pp. 5588-5593.

- Jia, X., 2009. Electrical conductivity and smart properties of Fe 1- $\sigma$  o waste mortar, Chongqing University, China.
- Jiang, C., Li, Z., Song, X. and Lu, Y., 2008. Mechanism of functional responses to loading of carbon fiber reinforced cement-based composites. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 23 (4), 571-573.
- Jiang, S., Zhou, D., Zhang, L., Ouyang, J., Yu, X., Cui, X. and Han, B., 2018. Comparison of compressive strength and electrical resistivity of cementitious composites with different nano-and micro-fillers. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18 (1), 60-68.
- Julio-Betancourt, G. and Hooton, R., 2004. Study of the Joule effect on rapid chloride permeability values and evaluation of related electrical properties of concretes. *Cement and Concrete Research*, 34 (6), 1007-1015.
- Kalliopi, A., 2005. Pore structure of cement-based materials: testing, interpretation and requirements. Taylor and francis, London.
- Kang, I., Schulz, M.J., Kim, J.H., Shanov, V. and Shi, D., 2006. A carbon nanotube strain sensor for structural health monitoring. *Smart Materials and Structures*, 15 (3), 737.
- Kim, G., Naeem, F., Kim, H. and Lee, H.-K., 2016. Heating and heat-dependent mechanical characteristics of CNT-embedded cementitious composites. *Composite Structures*, 136, 162-170.
- Kim, H.-Y., Sofo, J.O., Velegol, D., Cole, M.W. and Lucas, A.A., 2007. Van der Waals dispersion forces between dielectric nanoclusters. *Langmuir*, 23 (4), 1735-1740.
- Kim, H., Nam, I.W. and Lee, H.-K., 2014. Enhanced effect of carbon nanotube on mechanical and electrical properties of cement composites by incorporation of silica fume. *Composite Structures*, 107, 60-69.
- Kim, J., Lee, C. and Park, S., 2017. Artificial neural network-based early-age concrete strength monitoring using dynamic response signals. *Sensors*, 17 (6), 1319.
- Klein, L.A., Mills, M.K. and Gibson, D.R., 2006. Traffic detector handbook: Volume I, Turner-Fairbank Highway Research Center.
- Ko, J. and Ni, Y.Q., 2005. Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges. *Engineering structures*, 27 (12), 1715-1725.
- Kon, S., Oldham, K. and Horowitz, R., 2007. Piezoresistive and piezoelectric MEMS strain sensors for vibration detection, *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems International Society for Optics and Photonics*, pp. 65292V.
- Konsta-Gdoutos, M.S. and Aza, C.A., 2014. Self sensing carbon nanotube (CNT) and nanofiber (CNF) cementitious composites for real time damage assessment in smart structures. *Cement and Concrete Composites*, 53, 162-169.
- Lan, C., Xiao, H., Liu, M., Wang, G. and Ma, M., 2018. Improved piezoresistivity of cement-based composites filled with aligned nickel powder. *Smart Materials and Structures*, 27 (9), 095003.
- Lataste, J., Siriex, C., Frappa, M. and Breysse, D., 2001. Electrical resistivity measurement applied to Non Destructive Testing in civil engineering: influence of the humidity, 7 th EEGS symposium, Birmingham, pp. 60-61.
- Layssi, H., Ghods, P., Alizadeh, A.R. and Salehi, M., 2015. Electrical resistivity of concrete. *Concrete International*, 37 (5), 41-46.
- Lee, S.J., You, I., Zi, G. and Yoo, D.Y., 2017. Experimental investigation of the piezoresistive properties of cement composites with hybrid carbon fibers and nanotubes. *Sensors*, 17 (11), 2516.
- Li, G.Y., Wang, P.M. and Zhao, X., 2005. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. *Carbon*, 43 (6), 1239-1245.

- Li, G.Y., Wang, P.M. and Zhao, X., 2007. Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 29 (5), 377-382.
- Li, H., Ou, J., Xiao, H., Guan, X. and Han, B., 2011. Nanomaterials-enabled multifunctional concrete and structures. *Nanotechnology in Civil Infrastructure*. Springer, 131-173.
- Li, H., Ou, J., Zhao, X., Zhou, W., Li, H., Zhou, Z. and Yang, Y., 2006a. Structural health monitoring system for the Shandong Binzhou Yellow River highway bridge. *Computer-Aided Civil Infrastructure Engineering*, 21 (4), 306-317.
- Li, H. and Ou, J.P., 2009. Smart concrete, sensors and self-sensing concrete structures, *Key Engineering Materials*. Trans Tech Pub., pp. 69-80.
- Li, H., Xiao, H.-g. and Ou, J.-p., 2006b. Effect of compressive strain on electrical resistivity of carbon black-filled cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, 28 (9), 824-828.
- Li, H., Xiao, H.-g., Yuan, J. and Ou, J., 2004. Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Cement Composites Part B: Engineering*, 35 (2), 185-189.
- Li, H., Xiao, H. and Ou, J., 2008a. Electrical property of cement-based composites filled with carbon black under long-term wet and loading condition. *Cement Composites Science and Technology*, 68 (9), 2114-2119.
- Li Ping, G., Wei, S. and Qing Yu, C., 2010. Multiscale material design and crack path prediction of a polymer-modified cementitious cover layer. *Computational Materials Science*, 49 (1), 184-189.
- Li, S., Wang, F., Wang, Y., Wang, J., Ma, J. and Xiao, J., 2008b. Effect of acid and TETA modification on mechanical properties of MWCNTs/epoxy composites. *Journal of Materials Science*, 43 (8), 2653-2658.
- Li, Z., Ding, S., Yu, X., Han, B. and Ou, J., 2018. Multifunctional cementitious composites modified with nano titanium dioxide: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 111, 115-137.
- Liew, K., Kai, M. and Zhang, L., 2017. Mechanical and damping properties of CNT-reinforced cementitious composites. *Composite Structures*, 160, 81-88.
- Lin, K., Chang, W.C., Lin, D., Luo, H. and Tsai, M., 2008. Effects of nano-SiO<sub>2</sub> and different ash particle sizes on sludge ash–cement mortar. *Journal of Environmental Management*, 88 (4), 708-714.
- Lin, V.W., Li, M., Lynch, J.P. and Li, V.C., 2011. Mechanical and electrical characterization of self-sensing carbon black ECC, *Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security International Society for Optics and Photonics*, pp. 798316.
- Liu, C., Liu, G., Ge, Z., Guan, Y., Cui, Z. and Zhou, J., 2019. Mechanical and Self-Sensing Properties of Multiwalled Carbon Nanotube-Reinforced ECCs. *Advances in Materials Science and Engineering* 2019.
- Liu, H., Gao, J., Huang, W., Dai, K., Zheng, G., Liu, C., Shen, C., Yan, X., Guo, J. and Guo, Z., 2016. Electrically conductive strain sensing polyurethane nanocomposites with synergistic carbon nanotubes and graphene bifillers. *Nanoscale*, 8 (26), 12977-12989.
- Liu, M., Xiao, H., Liu, R. and Liu, J., 2018a. Dispersion characteristics of various contents of nano-TiO<sub>2</sub> and its effect on the properties of cement-based composite. *Structural Concrete*, 19 (5), 1301-1308.
- Liu, Q., Gao, R., Tam, V.W., Li, W. and Xiao, J., 2018b. Strain monitoring for a bending concrete beam by using piezoresistive cement-based sensors. *Construction and Building Materials*, 167, 338-347.
- Liu, Q., Schlangen, E., García, Á. and van de Ven, M., 2010. Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 24 (7), 1207-1213.

- Liu, X. and Wu, S., 2011. Study on the graphite and carbon fiber modified asphalt concrete. *Construction Building Materials*, 25 (4), 1807-1811.
- Lixia, Z., Xianhui, S. and Zhuoqi, L., 2004. Self-monitoring of the deformation in smart concrete structures. *Journal-Huazhong university of Science and Technology Nature Science Chinese Edition*, 32 (4), 30-31.
- López-Higuera, J.M., Cobo, L.R., Incera, A.Q. and Cobo, A., 2011. Fiber optic sensors in structural health monitoring. *Journal of Lightwave Technology*, 29 (4), 587-608.
- Luo, J., Duan, Z. and Li, H., 2009. The influence of surfactants on the processing of multi-walled carbon nanotubes in reinforced cement matrix composites. *Physica Status Solidi*, 206 (12), 2783-2790.
- Manbachi, A. and Cobbold, R.S., 2011. Development and application of piezoelectric materials for ultrasound generation and detection. *Ultrasound*, 19 (4), 187-196.
- Marken, F., Neudeck, A., Bond, A. and Scholz, F., 2010. *Electroanalytical Methods: Guide to Experiments and Applications*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Mason, T.O., Campo, M., Hixson, A. and Woo, L., 2002. Impedance spectroscopy of fiber-reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 24 (5), 457-465.
- Mather, B., 2004. Concrete durability. *Cement and Concrete Composites*, 26 (1), 3-4.
- McCarter, W.J., Starrs, G., Kandasami, S., Jones, R. and Chrisp, M., 2009. Electrode configurations for resistivity measurements on concrete. *ACI Materials Journal*, 106 (3), 258.
- Meehan, D.G., Wang, S. and Chung, D., 2010. Electrical-resistance-based sensing of impact damage in carbon fiber reinforced cement-based materials. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 21 (1), 83-105.
- Mehta, P.K. and Monteiro, P.J., 2017. *Concrete microstructure, properties and materials*. McGraw-Hill, USA.
- Millard, S. and Wenner, 1991. Reinforced concrete resistivity measurement techniques, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, pp. 71-88.
- Miller, H.D., 2019. Surface treatment of steel fibres and carbon nanotubes to develop chemical bonds with concrete, *Civil and Environmental Engineering*, The University of New South Wales, Australia, 269 pp.
- Millikan, R.A. and Bishop, E.S., 1917. *Elements of electricity: a practical discussion of the fundamental laws and phenomena of electricity and their practical applications in the business and industrial world*. American Technical Society, 285 p.
- Mo, Y., Gautam, A., Chen, Y., Chen, J. and Joshi, B., 2020. Electrical impedance of carbon nanofiber aggregates. *Smart Nanoconcretes and Cement-Based Materials*. Elsevier, USA, 333-349.
- Mobasher, B., Stang, H. and Shah, S., 1990. Microcracking in fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 20 (5), 665-676.
- Monfore, G., 1968. *The electrical resistivity of concrete*, Portland Cement Association.
- Moore, V.C., Strano, M.S., Haroz, E.H., Hauge, R.H., Smalley, R.E., Schmidt, J. and Talmon, Y., 2003. Individually suspended single-walled carbon nanotubes in various surfactants. *Nano letters*, 3 (10), 1379-1382.
- Morris, W., Moreno, E. and Sagüés, A., 1996. Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner array probe. *Cement and concrete research*, 26 (12), 1779-1787.
- Mpler, R.S. and Reichenbach, G., 1999. Conducting polymer composites. *Journal of Electroceramics*, 3 (4), 329-346.
- Mufti, A., 2001. *Guidelines for structural health monitoring*, Design manual 2. ISIS Canada Corporation, Winnipeg, Manitoba.
- Muto, N., Yanagida, H., Nakatsuji, T., Sugita, M., Ohtsuka, Y. and Arai, Y., 1992. Design of intelligent materials with self-diagnosing function for preventing fatal fracture. *Smart Materials and Structures*, 1 (4), 324.

- Nadelman, E. and Kurtis, K., 2014. A resistivity-based approach to optimizing concrete performance. *Concrete International*, 36 (5), 50-54.
- Nam, I., Park, S.M., Lee, H.-K. and Zheng, L., 2017. Mechanical properties and piezoresistive sensing capabilities of FRP composites incorporating CNT fibers. *Composite Structures*, 178, 1-8.
- Nam, I., Souri, H. and Lee, H.-K., 2016. Percolation threshold and piezoresistive response of multi-wall carbon nanotube/cement composites. *Smart Structure Systems* 18 (2), 217-231.
- Newlands, M., Jones, M.R., Kandasami, S. and Harrison, T., 2008. Sensitivity of electrode contact solutions and contact pressure in assessing electrical resistivity of concrete. *Materials and Structures* 41 (4), 621.
- Nguyen, D.-L., Lam, M.N.-T., Kim, D.-J. and Song, J., 2020. Direct tensile self-sensing and fracture energy of steel-fiber-reinforced concretes. *Composites Part B: Engineering*, 183, 107714.
- Nguyen, H.-A., Chang, T.-P., Shih, J.-Y., Chen, C.-T. and Nguyen, T.-D., 2016. Sulfate resistance of low energy SFC no-cement mortar. *Construction and Building Materials*, 102, 239-243.
- Nikje, M.A., Khanmohammadi, M. and Garmarudi, A.B., 2009. Interpretation of Mechanical and Thermal Properties of Heavy Duty Epoxy Based Floor Coating Doped by Nanosilica. *Nanotechnology in Construction* 3. Springer, 163-167.
- Oltulu, M., 2011a. Mineral katkili çimento harçlarının fiziko-mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerine nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlarının tekli ve bileşik etkisi. Doktora tezi, Atatürk üniversitesi, Erzurum, Türkiye.
- Oltulu, M., and Şahin, R., 2011b. Single and combined effects of nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders on compressive strength and capillary permeability of cement mortar containing silica fume. *Materials Science and Engineering: A*, 528(22-23), 7012-7019.
- Oltulu, M., and Şahin, R. 2013. Effect of nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders on compressive strengths and capillary water absorption of cement mortar containing fly ash: A comparative study. *Energy and Buildings*, 58, 292-301.
- Ou, J. and Han, B., 2009. Piezoresistive cement-based strain sensors and self-sensing concrete components. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20 (3), 329-336.
- Panchakarla, L. and Govindaraj, A., 2008. Covalent and non-covalent functionalization and solubilization of double-walled carbon nanotubes in nonpolar and aqueous media. *Journal of Chemical Sciences*, 120 (6), 607-611.
- Paredes, M., Jackson, N.M., El Safty, A., Dryden, J., Joson, J., Lerma, H. and Hersey, J., 2012. Precision statements for the surface resistivity of water cured concrete cylinders in the laboratory. *Advances in Civil Engineering Materials*, 1 (1), 1-23.
- Park, S.J., Seo, M.K., Shim, H.B. and Rhee, K.Y., 2004. Effect of different cross-section types on mechanical properties of carbon fibers-reinforced cement composites. *Materials Science and Engineering: A*, 366 (2), 348-355.
- Parveen, S., Rana, S. and Fanguero, R., 2013. A review on nanomaterial dispersion, microstructure, and mechanical properties of carbon nanotube and nanofiber reinforced cementitious composites. *Journal of Nanomaterials*, 2013, 19.
- Paul, E.L., Atiemo-Obeng, V.A. and Kresta, S.M., 2004. Rotor-stator mixing devices. *Handbook of industrial mixing: Science and practice*. Wiley Online Library, USA, 479-505.
- Peng, N., Zhang, Q., Lee, Y.C., Huang, H., Tan, O.K., Tian, J. and Chan, L., 2008. Humidity and temperature effects on carbon nanotube field-effect transistor-based gas sensors. *Sensor Letters*, 6 (6), 796-799.
- Pinhua, S.M.C., 1997. Study on Volume Resistance and Surface Resistance of CFRC *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 19 (2), 65-67.

- Polder, R.B., 2001. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete-a RILEM TC-154 technical recommendation. *Construction and Building Materials*, 15 (2-3), 125-131.
- Pushparaj, V.L., Nalamasu, O. and Birang, M., 2011. Carbon nanotube-based load cells. *Google Patents*, pp. 12.
- Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K. and Rongshen, C., 2007. Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. *Construction Building Materials*, 21 (3), 539-545.
- Quan, Z., Tang, J.X.-w. and Jue shi, Q., 2008. Investigation on the strain sensitivity of steel slag concrete under axial load. *Journal of Functional Materials* (8), 32.
- Ramachandran, V.S., 1996. *Concrete admixtures handbook: properties, science and technology*. William Andrew, 1183 p, Canada.
- Ramezani, M., Kim, Y.H., Hasanazadeh, B. and Sun, Z., 2016. Influence of carbon nanotubes on SCC flowability, *Proceedings of 8th International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete*, Washington DC, USA. Rilem Publications, Bagneux, France, pp. 397-406.
- Ramezani, M., Kim, Y.H. and Sun, Z., 2019. Mechanical properties of carbon-nanotube-reinforced cementitious materials: database and statistical analysis. *Magazine of Concrete Research*, 72 (20), 1047-1071.
- Rana, S., Subramani, P., Fangueiro, R. and Correia, A.G., 2016. A review on smart self-sensing composite materials for civil engineering applications. *AIMS Materials Science*, 3 (2), 357-379.
- Ransinchung RN, G. and Kumar, B., 2010. Investigations on pastes and mortars of ordinary portland cement admixed with wollastonite and microsilica. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22 (4), 305-313.
- Rao, C.R. and Govindaraj, A., 2011. *Nanotubes and nanowires*, 18. Royal Society of Chemistry, 531 p, USA.
- Rao, R., Sindu, B. and Sasmal, S., 2020. Synthesis, design and piezo-resistive characteristics of cementitious smart nanocomposites with different types of functionalised MWCNTs under long cyclic loading. *Cement and Concrete Composites*, 108, 103517.
- Reza, F., Batson, G.B., Yamamuro, J.A. and Lee, J.S., 2001. Volume electrical resistivity of carbon fiber cement composites. *Materials Journal*, 98 (1), 25-35.
- Reza, F., Batson, G.B., Yamamuro, J.A. and Lee, J.S., 2003. Resistance changes during compression of carbon fiber cement composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15 (5), 476-483.
- Roopa, A., Hunashyal, A.M., Venkaraddiyavar, P. and Ganachari, S., 2020. Smart hybrid nano composite concrete embedded sensors for structural health monitoring, *Materials Today: Proceedings*, pp. 603-609.
- Rosado Mérida, K.P., Rana, S., Gonilho-Pereira, C. and Fangueiro, R., 2013. Self-sensing hybrid composite rod with braided reinforcement for structural health monitoring, *Materials Science Forum*. Trans Tech Publ, pp. 379-384.
- Rovnaník, P., Kusák, I., Bayer, P., Schmid, P. and Fiala, L., 2019. Comparison of electrical and self-sensing properties of Portland cement and alkali-activated slag mortars. *Cement and Concrete Research*, 118, 84-91.
- Rowe, M., 2012. Resistivity is the key to measuring electrical resistance, *EDN network*.
- Rupnow, T.D. and Icenogle, P., 2011. Evaluation of surface resistivity measurements as an alternative to the rapid chloride permeability test for quality assurance and acceptance, *Louisiana Transportation Research Center*, Baton Rouge.
- Saafi, M., 2009. Wireless and embedded carbon nanotube networks for damage detection in concrete structures. *Nanotechnology*, 20 (39), 395502.

- Saafi, M., Andrew, K., Tang, P.L., McGhon, D., Taylor, S., Rahman, M., Yang, S. and Zhou, X., 2013. Multifunctional properties of carbon nanotube/fly ash geopolymeric nanocomposites. *Construction Building Materials*, 49, 46-55.
- Sabba, Y. and Thomas, E., 2004. High-concentration dispersion of single-wall carbon nanotubes. *Macromolecules*, 37 (13), 4815-4820.
- Salemi, N. and Behfarnia, K., 2013. Effect of nano-particles on durability of fiber-reinforced concrete pavement. *Construction Building Materials*, 48, 934-941.
- Sanchez, F., 2009. Carbon nanofibre/cement composites: challenges and promises as structural materials. *International Journal of Materials Structural Integrity*, 3 (2-3), 217-226.
- Sanchez, F. and Ince, C., 2009. Microstructure and macroscopic properties of hybrid carbon nanofiber/silica fume cement composites. *Composites Science and Technology*, 69 (7-8), 1310-1318.
- Sanli, A. and Kanoun, O., 2020. Electrical impedance analysis of carbon nanotube/epoxy nanocomposite-based piezoresistive strain sensors under uniaxial cyclic static tensile loading. *Journal of Composite Materials*, 54 (6), 845-855.
- Sarwary, M. H., Yıldırım, G., Al-Dahawi, A., Anıl, Ö., Khiavi, K. A., Toklu, K., and Şahmaran, M. 2019. Self-sensing of flexural damage in large-scale steel-reinforced mortar beams. *ACI Materials Journal*, 116(4), 209-221.
- Sassani, A., Ceylan, H., Kim, S., Arabzadeh, A., Taylor, P.C. and Gopalakrishnan, K., 2018. Development of carbon fiber-modified electrically conductive concrete for implementation in Des Moines International Airport. *Case studies in construction materials*, 8, 277-291.
- Schwartz, M., 2008. Smart materials. *Intelligent Synthesis of Smart Ceramic Materials*, 1, 568-580.
- Sengul, O., 2014. Use of electrical resistivity as an indicator for durability. *Construction Building Materials*, 73, 434-441.
- Sengul, O. and Gjorv, O.E., 2008. Electrical resistivity measurements for quality control during concrete construction. *ACI Materials Journal*, 105 (6), 541.
- Sengul, O. and Gjorv, O.E., 2009. Effect of embedded steel on electrical resistivity measurements on concrete structures. *ACI Materials Journal*, 106 (1), 11.
- Senturia, S.D., 2007. *Microsystem design*. kluwer academic 573 p, New York, USA.
- Sett, K., 2003. Characterization and modeling of structural and self-monitoring behavior of fiber reinforced polymer concrete. Master Thesis Thesis, Science in Civil Engineering University of Houston, Texas, USA, 224 pp.
- Shah, S., 1992. Do fibers increase the tensile strength of cement-based matrix? *Materials Journal*, 88 (6), 595-602.
- Shah, S.P., Konsta-Gdoutos, M.S. and Metaxa, Z.S., 2016. Highly-dispersed carbon nanotube-reinforced cement-based materials. Google Patents, USA.
- Shane, J.D., 2001. Electrical conductivity and transport properties of cement-based materials measured by impedance spectroscopy, *Material and Civil Engineering* Northwestern University, Evanston, Cook, 205 pp.
- Shi, C., 2004. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. *Cement and Concrete Research*, 34 (3), 537-545.
- Shi, Z.-Q. and Chung, D., 1999. Carbon fiber-reinforced concrete for traffic monitoring and weighing in motion. *Cement and Concrete Research*, 29 (3), 435-439.
- Shimizu, Y., 1928. An electrical method for measuring the setting time of portland cement. *Mill Section of Concrete*, 32 (5), 111-113.
- Siddiqui, N.A., 2010. Mechanical and Functional Properties of Carbon Nanotubes-high Performance Fibre Hybrid Composites. Doctoral Thesis Thesis, Mechanical Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, 109 pp.

- Singh, Y., 2013. Electrical resistivity measurements: a review, *International journal of modern physics: Conference series*. World Scientific, pp. 745-756.
- Snyder, K.A., Ferraris, C., Martys, N. and Garboczi, E., 2000. Using impedance spectroscopy to assess the viability of the rapid chloride test for determining concrete conductivity. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 105 (4), 497.
- Sobolkina, A., Mechtcherine, V., Khavrus, V., Maier, D., Mende, M., Ritschel, M. and Leonhardt, A., 2012. Dispersion of carbon nanotubes and its influence on the mechanical properties of the cement matrix. *Cement and Concrete Composites*, 34 (10), 1104-1113.
- Song, G., Gu, H. and Mo, Y.-L., 2008. Smart aggregates: multi-functional sensors for concrete structures-a tutorial and a review. *Smart Materials and Structures*, 17 (3), 033001.
- Song, G., Wang, C. and Wang, B., 2017. Structural health monitoring (SHM) of civil structures. *Applied Science*
- Song, X.H., Zheng, L.X. and Li, Z.Q., 2006. Temperature compensation in deformation testing for smart concrete structures, *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publ, pp. 1503-1506.
- Speakman, S., 2016. Basics of X-ray Diffraction, Massachusetts Institute of Technology, USA.
- Spragg, R., Bu, Y., Snyder, K., Bentz, D. and Weiss, J., 2013. Electrical testing of cement-based materials: Role of testing techniques, sample conditioning, and accelerated curing, Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, , West Lafayette, India.
- Spragg, R.P., Castro, J., Nantung, T., Paredes, M. and Weiss, J., 2012. Variability analysis of the bulk resistivity measured using concrete cylinders. *Advances in Civil Engineering Materials*, 1 (1), 1-17.
- Stutzman, P.E., Feng, P. and Bullard, J.W., 2016. Phase analysis of Portland cement by combined quantitative X-ray powder diffraction and scanning electron microscopy. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 121, 47-107.
- Sun, M.-q., Liew, R.J., Zhang, M.-H. and Li, W., 2014. Development of cement-based strain sensor for health monitoring of ultra high strength concrete. *Construction Building Materials*, 65, 630-637.
- Sun, M., Liu, Q., Li, Z. and Hu, Y., 2000. A study of piezoelectric properties of carbon fiber reinforced concrete and plain cement paste during dynamic loading. *Cement and Concrete Research*, 30 (10), 1593-1595.
- Sun, S., Han, B., Jiang, S., Yu, X., Wang, Y., Li, H. and Ou, J., 2017. Nano graphite platelets-enabled piezoresistive cementitious composites for structural health monitoring. *Construction Building Materials*, 136, 314-328.
- Sun, S., Yu, X., Han, B. and Ou, J., 2013. In situ growth of carbon nanotubes/carbon nanofibers on cement/mineral admixture particles: A review. *Construction Building Materials*, 49, 835-840.
- Talamadupula, K.K. and Seidel, G.D., 2020. Statistical Analysis of Effective Piezoresistivity of Carbon Nanotube Reinforced Polymer Nanocomposites from Electron Tunneling Effects, *AIAA Scitech Forum*, pp. 22-59.
- Tang, Z., Li, Z., Qian, J. and Wang, K., 2005. Experimental study on deicing performance of carbon fiber reinforced conductive concrete. *Journal of Materials Science Technology*, 21 (1), 113-117.
- Teng, J. and Jiang, T., 2008. Strengthening of reinforced concrete (RC) columns with fibre-reinforced polymer (FRP) composites. *Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites*. Elsevier, 158-194.
- Teomete, E., 2014. Transverse strain sensitivity of steel fiber reinforced cement composites tested by compression and split tensile tests. *Construction and Building Materials*, 55, 136-145.

- Teomete, E., 2016. The effect of temperature and moisture on electrical resistance, strain sensitivity and crack sensitivity of steel fiber reinforced smart cement composite. *Smart Materials and Structures*, 25 (7), 075024.
- Tian, Z., Li, Y., Zheng, J. and Wang, S., 2019. A state-of-the-art on self-sensing concrete: Materials, fabrication and properties. *Composites Part B: Engineering*, 177, 107437.
- Tombler, T.W., Zhou, C., Alexseyev, L., Kong, J., Dai, H., Liu, L., Jayanthi, C., Tang, M. and Wu, S.-Y., 2000. Reversible electromechanical characteristics of carbon nanotubes under local-probe manipulation. *Nature*, 405 (6788), 769-772.
- Torrents, J., Mason, T.O. and Garboczi, E., 2000. Impedance spectra of fiber-reinforced cement-based composites: a modeling approach. *Cement and Concrete Research*, 30 (4), 585-592.
- Torrents, J., Mason, T.O., Peled, A., Shah, S.P. and Garboczi, E.J., 2001. Analysis of the impedance spectra of short conductive fiber-reinforced composites. *Journal of Materials Science*, 36 (16), 4003-4012.
- Trettin, R. and Kowald, T., 2005. nanotubes for highperformance concretes. *Concrete Precasting Plant and Technology*, 72 (2), 20-21.
- TS-EN-196-1, 2016. Methods of Testing Cement, Determination of strength, British Standards Institution, London.
- TS-EN-197-1, 2012. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim: Özellikler ve Uygunluk Kriterleri.
- TS-EN-1008, 2003. Mixing water for concrete:, Specifications for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete. Turkish Standardization Institute., Ankara.
- TS-EN-12390-1, 2012. Testing Hardened Concrete, Part 1: Shape, Dimensions and Other Requirements for Specimens and Moulds. British Standards, London.
- TS-EN-12390-2, 2010. Testing hardened concrete, Part 2: Making and curing specimens for strength tests. TSE.
- TS-EN-12390-3, 2010. Testing hardened concrete-Part 3: Compressive strength of test specimens. Turkish Standards Institute, Ankara, Turkey.
- Tyson, B.M., Abu Al-Rub, R.K., Yazdanbakhsh, A. and Grasley, Z., 2011a. Carbon nanotubes and carbon nanofibers for enhancing the mechanical properties of nanocomposite cementitious materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (7), 1028-1035.
- Tyson, B.M., Al-Rub, R.K.A., Yazdanbakhsh, A. and Grasley, Z., 2011b. A quantitative method for analyzing the dispersion and agglomeration of nano-particles in composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 42 (6), 1395-1403.
- Vaisman, L., Wagner, H.D. and Marom, G., 2006. The role of surfactants in dispersion of carbon nanotubes. *Advances in colloid interface science*, 128, 37-46.
- Valdes, L.B., 1954. Resistivity measurements on germanium for transistors. *Proceedings of the IRE*, 42 (2), 420-427.
- Veedu, V.P., 2010. Multifunctional cementitious nanocomposite material and methods of making the same. Google Patents.
- Viet, L.H., Do, H.L. and Joo, K.D., 2020. Effects of steel slag aggregate size and content on piezoresistive responses of smart ultra-high-performance fiber-reinforced concretes. *Sensors and Actuators A: Physical*, 305, 111925.
- Vilaplana, J.L., Baeza, F.J., Galao, O., Zornoza, E. and Garcés, P., 2013. Self-sensing properties of alkali activated blast furnace slag (BFS) composites reinforced with carbon fibers. *ACI Materials Journal*, 6 (10), 4776-4786.
- Wang, F., Wang, H., Sun, H. and Hu, S., 2014a. Research on a 0–3 cement-based piezoelectric sensor with excellent mechanical–electrical response and good durability. *Smart Materials and Structures*, 23 (4), 045032.

- Wang, J., Fang, Z., Gu, A., Xu, L. and Liu, F., 2006a. Effect of amino-functionalization of multi-walled carbon nanotubes on the dispersion with epoxy resin matrix. *Journal of Applied Polymer Science*, 100 (1), 97-104.
- Wang, S., Shui, X., Fu, X. and Chung, D., 1998. Early fatigue damage in carbon-fibre composites observed by electrical resistance measurement. *Journal of Materials Science*, 33 (15), 3875-3884.
- Wang, S., Wen, S. and Chung, D., 2004. Resistance heating using electrically conductive cements. *Advances in Cement Research*, 16 (4), 161-166.
- Wang, W., Dai, H. and Wu, S., 2008. Mechanical behavior and electrical property of CFRC-strengthened RC beams under fatigue and monotonic loading. *Materials Science and Engineering: A*, 479 (1-2), 191-196.
- Wang, W., Wu, S. and Dai, H., 2006b. Fatigue behavior and life prediction of carbon fiber reinforced concrete under cyclic flexural loading. *Materials Science and Engineering: A*, 434 (1-2), 347-351.
- Wang, X., Wang, Y. and Jin, Z., 2002. Electrical conductivity characterization and variation of carbon fiber reinforced cement composite. *Journal of Materials Science*, 37 (1), 223-227.
- Wang, Y. and Zhao, X., 2005. Positive and negative pressure sensitivities of carbon fiber-reinforced cement-matrix composites and their mechanism. *Acta Mater. Compos. Sin.*, 22 (4), 40-46.
- Wang, Z., Gao, J., Ai, T., Jiang, W. and Zhao, P., 2014b. Quantitative evaluation of carbon fiber dispersion in cement based composites. *Construction Building Materials*, 68, 26-30.
- Wei, Z., Bin, X.H. and Jinwei, L., 2004. Experimental study on elastic stress self-monitoring of carbon fiber reinforced smart concrete beams. *Journal of Southeast University* (5), 18.
- Wen, S. and Chung, D., 2001a. Carbon fiber-reinforced cement as a strain-sensing coating. *Cement and Concrete Research*, 31 (4), 665-667.
- Wen, S. and Chung, D., 2001b. Electric polarization in carbon fiber-reinforced cement. *Cement and Concrete Research*, 31 (1), 141-147.
- Wen, S. and Chung, D., 2003. A comparative study of steel-and carbon-fibre cement as piezoresistive strain sensors. *Advances in Cement Research*, 15 (3), 119-128.
- Wen, S. and Chung, D., 2005. Strain-sensing characteristics of carbon fiber-reinforced cement. *ACI Materials Journal*, 102 (4), 244.
- Wen, S. and Chung, D., 2006a. The role of electronic and ionic conduction in the electrical conductivity of carbon fiber reinforced cement. *Carbon*, 44 (11), 2130-2138.
- Wen, S. and Chung, D., 2006b. Self-sensing of flexural damage and strain in carbon fiber reinforced cement and effect of embedded steel reinforcing bars. *Carbon*, 44 (8), 1496-1502.
- Wen, S. and Chung, D., 2007. Double percolation in the electrical conduction in carbon fiber reinforced cement-based materials. *Carbon*, 45 (2), 263-267.
- Wenner, F., 1916. A method of measuring earth resistivity. US Government Printing Office.
- Whiting, D.A. and Nagi, M.A., 2003. Electrical resistivity of concrete-a literature review. *R&D Serial*, 2457.
- Whittington, H., McCarter, J. and Forde, M., 1981. The conduction of electricity through concrete. *Magazine of Concrete Research*, 33 (114), 48-60.
- Woo, L., Wansom, S., Ozyurt, N., Mu, B., Shah, S. and Mason, T., 2005. Characterizing fiber dispersion in cement composites using AC-Impedance Spectroscopy. *Cement and Concrete Composites*, 27 (6), 627-636.
- Wu, B., Huang, X.-j. and Lu, J.-z., 2005. Biaxial compression in carbon-fiber-reinforced mortar, sensed by electrical resistance measurement. *Cement and concrete research*, 35 (7), 1430-1434.

- Wu, H., 2006. Advanced civil infrastructure materials: Science, mechanics and applications. Woodhead Publishing, USA.
- Wu, S., Dai, H. and Wang, W., 2007. Effect of CFRC layers on the electrical properties and failure mode of RC beams strengthened with CFRC composites. *Smart Materials and Structures*, 16 (6), 2056.
- Wypych, G., 2016. 6-Chemical properties of fillers and filled materials. *Handbook of Fillers* (4th Edition). ChemTec Publishing, Scarborough, Canada, 373-413.
- Xi, X. and Chung, D., 2020. Piezoelectret-based and piezoresistivity-based stress self-sensing in steel beams under flexure. *Sensors and Actuators A: Physical*, 301, 111780.
- Xiao, H., Jiang, J., Li, H. and Wang, G., 2014. Design of strain sensors based on the resistivity-percolation curves and piezoresistivity curves of different conductive composites, *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2014*. International Society for Optics and Photonics, pp. 90613C.
- Xiao, H., Li, H. and Ou, J., 2011a. Self-monitoring properties of concrete columns with embedded cement-based strain sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 22 (2), 191-200.
- Xiao, H., Li, H. and Ou, J., 2011b. Strain sensing properties of cement-based sensors embedded at various stress zones in a bending concrete beam. *Sensors and Actuators A: Physical*, 167 (2), 581-587.
- Xiao, H., Liu, M. and Wang, G., 2018. Anisotropic electrical and abrasion-sensing properties of cement-based composites containing aligned nickel powder. *Cement and Concrete Composites*, 87, 130-136.
- Xie, P., Gu, P. and Beaudoin, J., 1996. Electrical percolation phenomena in cement composites containing conductive fibres. *Journal of Materials Science*, 31 (15), 4093-4097.
- Xie, X.-L., Mai, Y.-W. and Zhou, X.-P., 2005. Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: a review. *Materials science and engineering: R: Reports*, 49 (4), 89-112.
- Xu, J., Cao, Y., Jiang, L., Feng, W., Song, Y. and Shan, H., 2018. Microstructure and pressure-sensitive properties of cement-based composite with Ni nanowires. *Construction Building Materials*, 159, 46-53.
- Xu, Y. and Chung, D., 1999a. Carbon fiber reinforced cement improved by using silane-treated carbon fibers. *Cement and Concrete Research*, 29 (5), 773-776.
- Xu, Y. and Chung, D., 1999b. Increasing the specific heat of cement paste by admixture surface treatments. *Cement and Concrete Research*, 29 (7), 1117-1121.
- Yang, L., Jia, Z., Zhang, Y. and Dai, J., 2015. Effects of nano-TiO<sub>2</sub> on strength, shrinkage and microstructure of alkali activated slag pastes. *Cement and Concrete Composites*, 57, 1-7.
- Yang, Q., Liu, P., Ge, Z. and Wang, D., 2020. Self-Sensing Carbon Nanotube-Cement Composite Material for Structural Health Monitoring of Pavements. *Journal of Testing Evaluation*, 48 (3).
- Yazdanbakhsh, A., 2012. Production, characterization, and mechanical behavior of cementitious materials incorporating carbon nanofibers, *Civil Engineering Texas A&M University, Texas, USA*, 138 pp.
- Yazdanbakhsh, A., Grasley, Z., Tyson, B. and Al-Rub, R.K., 2010. Distribution of carbon nanofibers and nanotubes in cementitious composites. *Transportation Research Record*, 2142 (1), 89-95.
- Yazdanbakhsh, A., Grasley, Z., Tyson, B., Al-Rub, R.K. and Manufacturing, 2011. Dispersion quantification of inclusions in composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (1), 75-83.
- Ye, X., Su, Y. and Han, J., 2014. Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Using Optical Fiber Sensing Technology: A Comprehensive Review. *The Scientific World Journal*, 2014, 11.

- Yıldırım, G., Sarwary, M. H., Al-Dahawi, A., Öztürk, O., Anıl, Ö., and Şahmaran, M. 2018. Piezoresistive behavior of CF-and CNT-based reinforced concrete beams subjected to static flexural loading: shear failure investigation. *Construction and Building Materials*, 168, 266-279.
- Yoo, D.Y., Kim, S. and Lee, S.H., 2018a. Self-sensing capability of ultra-high-performance concrete containing steel fibers and carbon nanotubes under tension. *Sensors and Actuators A: Physical*, 276, 125-136.
- Yoo, D.Y., You, I. and Lee, S.J., 2017. Electrical properties of cement-based composites with carbon nanotubes, graphene, and graphite nanofibers. *Sensors*, 17 (5), 1064.
- Yoo, D.Y., You, I. and Lee, S.J., 2018b. Electrical and piezoresistive sensing capacities of cement paste with multi-walled carbon nanotubes. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18 (2), 371-384.
- Yoo, D.Y., You, I., Zi, G. and Lee, S.J., 2019. Effects of carbon nanomaterial type and amount on self-sensing capacity of cement paste. *Measurement*, 134, 750-761.
- Yu, X. and Kwon, E., 2009. A carbon nanotube/cement composite with piezoresistive properties. *Smart Materials and Structures*, 18 (5), 055010.
- Yu, X. and Kwon, E., 2012. Carbon Nanotube Based Self-sensing Concrete for Pavement Structural Health Monitoring, Department of Civil Engineering, University of Minnesota, Duluth.
- Zare, Y. and Rhee, K.Y., 2018. A power model to predict the electrical conductivity of CNT reinforced nanocomposites by considering interphase, networks and tunneling condition. *Composites Part B: Engineering*, 155, 11-18.
- Zare, Y. and Rhee, K.Y., 2019. The effective conductivity of polymer carbon nanotubes (CNT) nanocomposites. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 131, 15-21.
- Zeng, Q., Li, K., Fen Chong, T. and Dangla, P., 2012. Pore structure characterization of cement pastes blended with high-volume fly-ash. *Cement and Concrete Research*, 42 (1), 194-204.
- Zhang, D., Luo, Z., Liu, Z. and Wu, S., 2004a. Sensitivity of reinforced components of CFRC. *Jornal of Harbin Institute Technology* 36 (10), 1411-1413.
- Zhang, D., Su, Y., Huang, L., Wu, S. and Zhao, J., 2005. Experimental research on the smart character of laminated CFRC bending test specimens. *Low Temperature Archit. Technology* 103 (1), 62-64.
- Zhang, D., Wu, S., Ma, B. and Zhao, J., 2004b. Sensitivities of carbon fiber reinforced concrete under bending loading. *Jornal of Jilin University Technology* 4(34), 679-683.
- Zhang, D.j. and Xu, S.l., 2008. Experimental study on fracture parameter of three-point bending beam based on smart properties of CFRC. *Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. Earth & Space, China*, 1-9.
- Zhang, J., Lu, Y., Lu, Z., Liu, C., Sun, G. and Li, Z., 2015. A new smart traffic monitoring method using embedded cement-based piezoelectric sensors. *Smart Materials and Structures*, 24 (2), 025023.
- Zhang, L., Ding, S., Li, L., Dong, S., Wang, D., Yu, X. and Han, B., 2018. Effect of characteristics of assembly unit of CNT/NCB composite fillers on properties of smart cement-based materials. *Composites Part A: Applied Science Manufacturing*, 109, 303-320.
- Zhang, L., Dong, S., Ding, S., Sun, S. and Han, B., 2016. Intrinsic Self-Sensing Concrete for Smart Infrastructures, 1st International Workshop on Structural Health Monitoring for Railway System. DEStech Publishing, USA.
- Zhang, L., Han, B., Ouyang, J., Yu, X., Sun, S. and Ou, J., 2017. Multifunctionality of cement based composite with electrostatic self-assembled CNT/NCB composite filler. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17 (2), 354-364.

- Zhang, L., Li, L., Wang, Y., Yu, X. and Han, B., 2020. Multifunctional cement-based materials modified with electrostatic self-assembled CNT/TiO<sub>2</sub> composite filler. *Construction and Building Materials*, 238, 117787.
- Zhang, Q. and Li, H., 2011. Experimental investigation of road snow-melting based on CNFP self-heating concrete, *Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites 2011*. International Society for Optics and Photonics, pp. 797825.
- Zhang, W., Suhr, J. and Koratkar, N., 2006. Carbon nanotube/polycarbonate composites as multifunctional strain sensors. *Journal of Nanoscience Nanotechnology*, 6 (4), 960-964.
- Zhao, H., 2010. *Carbon Nanotubes and Carbon Nanotube Fiber Sensors: Growth, Processing and Characterization*, Mechanical Engineering, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, 137 pp.
- Zheng, L., Song, X. and Li, Z., 2005. Investigation on the method of AC measurement of compression sensibility of carbon fiber cement. *Jornal of Wuhan Urban Construction Institute* 22 (2), 27-29.
- Zhu, S., Qin, X., Zou, Z., Zhang, R. and Jiang, Y., 2020. Preparation and evaluation of surfactant-stabilized graphene sheets and piezoresistivity of GPs/cement composite. *Carbon Letters*, 30 (1), 93-98.
- Zuo, J., Yao, W., Liu, X. and Qin, J., 2012. Sensing properties of carbon nanotube–carbon fiber/cement nanocomposites. *Journal of Testing Evaluation*, 40 (5), 838-843.

## ÖZGEÇMİŞ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Kişisel Bilgiler</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                          |
| <b>Adı Soyadı:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Salam ARMOOSH                                                                                            |
| <b>Doğum tarihi:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 01.11.1985                                                                                               |
| <b>Doğum Yeri:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Hit/İrak                                                                                                 |
| <b>Uyruğu:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | İrak                                                                                                     |
| <b>Adres:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Ankara/ Türkiye                                                                                          |
| <b>Tel:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0090-538-644-47-99                                                                                       |
| <b>E-mail:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | salamrafea.armoosh14@ogr.atauni.edu.tr<br><a href="mailto:rafeasalam@gmail.com">rafeasalam@gmail.com</a> |
| <b>Eğitim</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                          |
| <b>Lise:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Hit Lisesi                                                                                               |
| <b>Lisans:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Al-Anbar Üniversitesi/İrak                                                                               |
| <b>Yüksek lisans:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | UKM Üniversitesi/Malezya                                                                                 |
| <b>Doktora:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Atatürk Üniversitesi/Türkiye                                                                             |
| <b>Yabancı Dil Bilgisi</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                          |
| <b>İngilizce:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | İyi                                                                                                      |
| <b>Arapça</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Ana dili                                                                                                 |
| <b>Türkçe</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | İyi                                                                                                      |
| <b>Diğer</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                          |
| <b>Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                          |
| İrak İnşaat Mühendislik Birliği                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                          |
| <b>Tez Ön Çalışmalarından Üretilmiş Yayınlar</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                          |
| <p>1. Armoosh, S. R. and Oltulu, M. (2019).<u>Self-heating of electrically conductive metal-cementitious composites</u>, Journal of Intelligent Material Systems and Structures 30 (15), 2234-2240.</p> <p>2. Armoosh, S. R., and Oltulu, M. (2019).<u>Effect of different micro metal powders on the electrical resistivity of cementitious composites</u>, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng 471 (3).</p> <p>3. Kavaz, E. Armoosh, S.R. Perişanoğlu, U., Ahmadi, N., &amp; Oltulu, M. (2020).<u>Gamma ray shielding effectiveness of the Portland cement pastes doped with brass-copper: An experimental study</u>, Radiation Physics and Chemistry 166, 108526.</p> <p>4. Perişanoğlu, U., Kavaz, E., Tekin, H. O., Armoosh, S.R., Ekin, N., &amp; Oltulu, M. (2020).<u>Comparison of gamma and neutron shielding competences of Fe-Cu-and brass-added Portland cement pastes: an experimental and Monte Carlo study</u>, Applied Physics A 126, 470.</p> |                                                                                                          |