

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AKILLI HAFİF BETONUN GERİLME VE SICAKLIK
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Bahar DEMİREL

Tez Yöneticisi
Yrd. Doç.Dr. Salih YAZICIOĞLU
Prof. Dr. Nuri ORHAN

DOKTORA TEZİ
YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI
ELAZIĞ, 2006

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AKILLI HAFİF BETONUN GERİLME VE SICAKLIK
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Bahar DEMİREL

Doktora Tezi
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

Bu tez, 19.09.2006 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Salih YAZICIOĞLU

Üye: Prof.Dr. Nuri ORHAN

Üye: Doç.Dr. Zülfü Çınar ULUCAN

Üye: Yrd.Doç.Dr. M. Şükrü YILDIRIM

Üye: Yrd.Doç.Dr. Mehmet TUĞAL

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŐEKKÜR

Bu tezin önerilmesinde ve yönlendirilmesinde yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Yrd. Doç. Dr. Salih YAZICIOĞLU'na, ikinci danışmanım Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Nuri ORHAN'a en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Ayrıca deneysel çalışmalar esnasında bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım tüm Teknik Eğitim Fakültesi Öğretim Elemanları ve Teknik Personeline; Fırat Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU'na; 1033 nolu proje kapsamında tezi finanse eden Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) Birimi ve çalışanlarına da teşekkürlerimi sunarım.

Bahar DEMİREL

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| İÇİNDEKİLER | I |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | III |
| TABLolar LİSTESİ | V |
| ÖZET | VI |
| ABSTRACT | VIII |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. BETON | 4 |
| 2.1 Betonu Oluşturan Ana Bileşenler | 4 |
| 2.1.1 Çimento | 4 |
| 2.1.2 AgregA | 5 |
| 2.1.3 Su | 7 |
| 2.2 Beton Çeşitleri | 7 |
| 2.2.1 Hafif Beton | 7 |
| 2.2.2 Normal Beton | 7 |
| 2.2.3 Ağır Beton | 8 |
| 2.3 Betonda Kullanılan Mineral Katkılar | 8 |
| 2.3.1 Silis Dumanı | 8 |
| 2.3.2 Uçucu Kül | 9 |
| 3. AKILLI YAPILAR | 11 |
| 3.1 Akıllı Beton | 14 |
| 3.1.1 Dıştan Akıllı Beton | 14 |
| 3.1.2 İçten Akıllı Beton | 15 |
| 3.1.2.1 İçten Akıllı Beton İçin Akıllı Davranma Koşulları ve Özellikleri | 17 |
| 3.2 Akıllı Betonun Çalışma Prensibi | 18 |
| 3.2.1 Radyo Dalgalarının Reflektivitesi (Yansıma Oranı) | 18 |
| 3.2.2 Deformasyon Sezme | 18 |
| 3.2.3 Hasar Sezme | 19 |
| 3.2.4 Termistörler | 19 |
| 3.2.5 Termoelektrikli Aletler | 20 |
| 3.3 Akıllı Betonun Kullanıldığı Yerler | 21 |
| 4. AKILLI BETON ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR | 24 |
| 4.1 Literatür Araştırması | 24 |

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| 4.2 Bu Tez Çalışmasının Amacı ve Literatürdeki Yeri | 32 |
| 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR | 33 |
| 5.1 Malzeme | 33 |
| 5.2 Numunelerin Hazırlanması | 36 |
| 5.2 Deneyler ve Ölçümler | 39 |
| 5.2.1 Basınç Dayanımı Deneyi | 39 |
| 5.2.2 Çekme Dayanımı Deneyi | 39 |
| 5.2.3 Elektrik Ölçümleri | 41 |
| 5.2.4 Termoelektrik Ölçümler | 43 |
| 5.2.5 Mikroyapı ve Fraktografik İncelemeler | 44 |
| 6. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME | 45 |
| 6.1 Hazırlanan Numunelerin Mikroyapıları | 45 |
| 6.2. Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları | 52 |
| 6.3 Basınç Numunelerinin Fraktografisi | 56 |
| 6.4 Eğilmede Çekme Dayanımı Sonuçları | 65 |
| 6.5 Eğilmede Çekme Numunelerinin Fraktografisi | 66 |
| 6.6 Elektrik Ölçümleri Sonuçları | 78 |
| 6.7. Termoelektrik Ölçüm Sonuçları | 87 |
| 7. SONUÇ VE ÖNERİLER | 90 |
| 7.1 Sonuçlar | 90 |
| 7.2 Öneriler | 91 |
| KAYNAKLAR | 92 |

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 3.1 Piezoelektrik Etkinin Şematik Görünümü | 12 |
| Şekil 3.2 Şekil Hafızalı Alaşımların Çalışma Prensibi | 13 |
| Şekil 3.3 Poliakronitril (Pan) Öncü Malzemeden Yüksek Dayanımlı Yüksek Modüllü Karbon Lifleri Üretimindeki İşlem Kademeleri | 15 |
| Şekil 3.4 Akıllı Malzemelerin Genel Kullanım Alanları | 23 |
| Şekil 5.1 Kullanılan Agreganın Granülometrisi | 34 |
| Şekil 5.2 Numune Konfigürasyonu | 38 |
| Şekil 5.3 Hidrolik Yük Kontrollü Pres | 39 |
| Şekil 5.4 Eğilmede Çekme Deney Düzeneği | 40 |
| Şekil 5.5 Elektriksel Ölçümler için Deney Düzeneği | 41 |
| Şekil 5.6 İki Prob Metodu Bağlantı Şeması | 42 |
| Şekil 5.7 Termoelektrik Ölçümü İçin Hazırlanan Düzenek | 43 |
| Şekil 5.8 İncelemelerin Yapıldığı Taramalı Elektron Mikroskobu | 44 |
| Şekil 6.1 N-CF Serisi Mikroyapı SEM Fotoğrafı (1) | 46 |
| Şekil 6.2 N-CF Serisi Mikroyapı SEM Fotoğrafı (2) | 46 |
| Şekil 6.3 N-CF Numunesinin EDX Analizi Bölgesi | 47 |
| Şekil 6.4 UK-CF Serisi Mikroyapı SEM Fotoğrafı (1) | 48 |
| Şekil 6.5 UK-CF Serisi Mikroyapı SEM Fotoğrafı (2) | 48 |
| Şekil 6.6 UK -CF Numunesinin EDX Analizi Bölgesi | 49 |
| Şekil 6.7 SD-CF Serisi Mikroyapı SEM Fotoğrafı (1) | 50 |
| Şekil 6.8 SD-CF Serisi Mikroyapı SEM Fotoğrafı (2) | 50 |
| Şekil 6.9 SD-CF Numunesinin EDX Analizi Bölgesi | 51 |
| Şekil 6.10 Tüm Serilerin Kür Yaşına Göre Basınç Dayanım Değişimi | 52 |
| Şekil 6.11 Çalışmada Kullanılan Soma Uçucu Külünün Mikroyapısı | 54 |
| Şekil 6.12 Çalışmada Kullanılan Silis Dumanının Mikroyapısı | 54 |
| Şekil 6.13 Tüm Serilere Ait 28 Günlük Basınç Dayanımları | 55 |
| Şekil 6.14 N-CF Serisi Basınç Numunesine Ait SEM Fotoğrafı (1) | 56 |
| Şekil 6.15 N-CF Serisi Basınç Numunesine Ait SEM Fotoğrafı (2) | 57 |
| Şekil 6.16 N-CF Serisi Basınç Numunesine Ait SEM Fotoğrafı (3) | 57 |
| Şekil 6.17 N-CF Serisi Basınç Numunesine Ait SEM Fotoğrafı (4) | 58 |
| Şekil 6.18 N-CF Serisi Basınç Numunesinin EDX Analizi Bölgesi | 58 |
| Şekil 6.19 UK-CF Serisi Basınç Numunesine Ait SEM Fotoğrafı (1) | 59 |
| Şekil 6.20 UK-CF Serisi Basınç Numunesinin EDX Analizi Bölgesi (1) | 60 |

| | |
|--|----|
| Şekil 6.21 UK-CF Serisi Basınç Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (2) | 61 |
| Şekil 6.22 UK-CF Serisi Basınç Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (3) | 61 |
| Şekil 6.23 UK-CF Serisi Basınç Numunesinin EDX Analizi Bölgesi (2) | 62 |
| Şekil 6.24 SD-CF Serisi Basınç Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (1) | 63 |
| Şekil 6.25 SD-CF Serisi Basınç Numunesinin EDX Analizi Bölgesi | 64 |
| Şekil 6.26 Tüm Serilere Ait 28 Günlük Eğilmede Çekme Dayanımları | 65 |
| Şekil 6.27 N-CF Serisi Eğilme Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (1) | 66 |
| Şekil 6.28 N-CF Serisi Eğilme Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (2) | 67 |
| Şekil 6.29 N-CF Serisi Eğilme Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (3) | 67 |
| Şekil 6.30 N-CF Serisi Eğilme Numunesinin EDX Analizi Bölgesi | 68 |
| Şekil 6.31 N-CF Serisi Eğilme Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (4) | 69 |
| Şekil 6.32 UK-CF Serisi Eğilme Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (1) | 70 |
| Şekil 6.33 UK-CF Serisi Eğilme Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (2) | 70 |
| Şekil 6.34 UK-CF Serisi Eğilme Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (3) | 71 |
| Şekil 6.35 UK-CF Serisi Eğilme Numunesinin EDX Analizi Bölgesi | 72 |
| Şekil 6.36 SD-CF Serisi Eğilme Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (1) | 73 |
| Şekil 6.37 SD-CF Serisi Eğilme Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (2) | 73 |
| Şekil 6.38 SD-CF Serisi Eğilme Numunesinin EDX Analizi Bölgesi | 74 |
| Şekil 6.39 SD-CF Serisi Eğilme Numunesinin Renklendirme İşlemi Gerçekleştirilmiş EDX Analiz Bölgesi | 75 |
| Şekil 6.40 (a)-Ca, (b)-C, (c)- Al ve (d)-Si Elementlerinin Kırık Yüzeydeki Dağılımları | 76 |
| Şekil 6.41 SD-CF Serisi Eğilme Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (3) | 77 |
| Şekil 6.42 Prizma Numunelerin Yüksüz Durumda Frekans-İletkenlik Değişimleri | 78 |
| Şekil 6.43 Küp Numunelerin Yüksüz Durumda Frekans-İletkenlik Değişimleri | 79 |
| Şekil 6.44 Fiberli Numunelerin Yüke Bağlı Frekans-İletkenlik Değişimleri | 81 |
| Şekil 6.45 Tekrarlı Basınç Gerilmesi Altında İletkenlik Değişimi | 82 |
| Şekil 6.46 N ve N-CF Serilerinin Artan Yük Altındaki İletkenlik Değişimi | 83 |
| Şekil 6.47 UK ve UK-CF Serilerinin Artan Yük Altındaki İletkenlik Değişimi | 84 |
| Şekil 6.48 SD ve SD-CF Serilerinin Artan Yük Altındaki İletkenlik Değişimi | 85 |
| Şekil 6.49 Prizma Numunelerin Sabit Frekansta Yük-İletkenlik Değişimi | 86 |
| Şekil 6.50 N-CF Serisine Ait $\Delta V-\Delta T$ Grafiği | 87 |
| Şekil 6.51 UK-CF Serisine Ait $\Delta V-\Delta T$ Grafiği | 88 |
| Şekil 6.52 SD-CF Serisine Ait $\Delta V-\Delta T$ Grafiği | 88 |

TABLolar LİSTESİ

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| Tablo 2.1 Çimentonun Ana Bileşenleri | 5 |
| Tablo 3.1 Akıllı Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları | 14 |
| Tablo 5.1 Kullanılan Çimentonun Özellikleri | 33 |
| Tablo 5.2 Hafif Agrega Birim Ağırlıkları | 34 |
| Tablo 5.3 Kullanılan Mineral Katkıların Özellikleri | 35 |
| Tablo 5.4 Karbon Fiberin Özellikleri | 36 |
| Tablo 5.5 1m ³ Beton İçin Yaklaşık Karışım Miktarları,(kg) | 37 |
| Tablo 5.6 Karışımlarda Kullanılan Kimyasal Katkılar | 37 |
| Tablo 6.1 N-CF Serisi Mikroyapı EDX Analizi Değerleri | 47 |
| Tablo 6.2 UK-CF Serisi Mikroyapı EDX Analizi Değerleri | 49 |
| Tablo 6.3 SD-CF Serisi Mikroyapı EDX Analizi Değerleri | 51 |
| Tablo 6.4 Numunelerin Yoğunlukları | 52 |
| Tablo 6.5 N-CF Serisi Basınç Numunesinin EDX Analizi Değerleri | 59 |
| Tablo 6.6 UK-CF Serisi Basınç Numunesinin EDX Analizi Değerleri (1) | 60 |
| Tablo 6.7 UK-CF Serisi Basınç Numunesinin EDX Analizi Değerleri (2) | 62 |
| Tablo 6.8 SD-CF Serisi Basınç Numunesinin EDX Analizi Değerleri | 64 |
| Tablo 6.9 N-CF Serisi Eğilme Numunesinin EDX Analizi Değerleri | 68 |
| Tablo 6.10 UK-CF Serisi Eğilme Numunesinin EDX Analizi Değerleri | 72 |
| Tablo 6.11 SD-CF Serisi Eğilme Numunesinin EDX Analizi Değerleri | 74 |
| Tablo 6.12 Karbon Fiberli Serilerin Seebeck Katsayıları ve Mutlak Termoelektrik Güçleri | 89 |

ÖZET

Doktora Tezi

AKILLI HAFİF BETONUN GERİLME VE SICAKLIK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Bahar DEMİREL

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

2006, Sayfa : 95

Bu tez çalışmasında, matrisi hafif agregadan oluşan karbon fiber takviyeli hafif betonun gerilme ve sıcaklık gibi dış zorlamalara verdiği tepkiler incelenmiştir. Çalışma ile, ilimizde mevcut olan pomza agregasının kullanılmasıyla yörenin doğal kaynaklarının değerlendirilmesi de amaçlanmıştır.

Çalışmada, beton iletken kısa karbon fiber takviyesi ile akıllı hale getirilmiş; basınç, çekme ve sıcaklık farkına bağlı olarak elektrik iletkenliğinde meydana gelen değişim izlenerek deformasyon ve sıcaklığı sezme kabiliyeti araştırılmıştır. Ayrıca, uçucu kül ve silis dumanı gibi mineral katkıların akıllı hafif betonun sezme kabiliyetinde meydana getirdiği değişimler incelenmiştir. Hazırlanan numunelerin basınç ve çekme dayanımları belirlenmiş; statik ve tekrarlı yüklemeler uygulanarak elektrik iletkenliğinde meydana gelen değişimler gözlenmiştir.

Numunelerin mikroyapı ve kırık yüzeyleri SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) kullanılarak incelenmiş ve malzemenin iç yapısının akıllılık üzerine yaptığı etkiler tespit edilmiştir. Ayrıca, karbon fiber takviyeli hafif betonun sadece basınç ve çekme gerilmelerini değil, sıcaklığı da sezebilen akıllı bir malzeme olduğu malzemenin Seebeck katsayısını hesaplamak suretiyle belirlenmiştir.

Tez 7 bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, tez konusu genel hatlarıyla izah edilmiş ve çalışmanın amacı kısaca belirtilmiştir. 2.bölümde yapıların temelini oluşturan beton genel hatlarıyla anlatılmıştır. 3.bölümde yapılarda, malzemede ve betonda akıllılığın nasıl gerçekleştiği, akıllı betonun çalışma prensibi, akıllı betonun kullanıldığı yerler gibi temel konular verilmiştir. Literatür araştırması ve tezin literatürdeki yeri 4.bölümde ayrıntılı olarak verilmiştir. 5.bölüm, deneysel çalışmaları, malzeme ve metot konularını içerirken; 6.bölüm ise bulgular ve değerlendirmeyi içermektedir. Son bölümde ise sonuç ve öneriler yer almaktadır.

Sonuç olarak, literatürde akıllılık özellikleri henüz incelenmemiş olan karbon fiber takviyeli hafif betona akıllılık özelliği kazandırılabilceği görülmüştür. Böylelikle, gerilme ve sıcaklığın meydana getirdiği deformasyon ve hasarın akıllı hafif beton ile de sezilebileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Akıllı Hafif Beton, Sezme Kabiliyeti, Karbon Fiber, Uçucu Kül, Silis Dumanı

ABSTRACT

PhD Thesis

THE INVESTIGATION OF STRESS AND TEMPERATURE BEHAVIOURS OF THE SMART LIGHTWEIGHT CONCRETE

Bahar DEMİREL

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Construction Education

2006, Page :95

In this thesis, the reactions of the carbon fiber reinforced lightweight concrete, whose matrix was formed by pumice aggregate, in response to the external forcing such as stress and temperature were investigated. With this study, it was also aimed to evaluate pumice, which is a natural material in the region, by using as aggregate in concrete.

In the study, the concrete was made smart by adding short conductive carbon fibers and its sensing ability of strain and temperature was investigated by observing the change on the electrical conductivity under the compression, tension and temperature differences. In addition, the changes that mineral admixtures such as fly ash and silica fume constituted on the self-sensing ability of the smart lightweight concrete were investigated. Compressive and tensile tests were applied to the samples prepared for this study and electrical conductivity change was observed by applying the static and cycling loading.

Microstructures of the samples and fractured surfaces were examined by SEM (Scanning Electron Microscope) thus determining structural properties and changes affecting the sensing ability of concrete. In addition, it was shown that carbon fiber reinforced lightweight concrete was a smart material that could sense not only compressive or tensile stress, but also temperature differences by the aid of Seebeck coefficient calculated.

The thesis consists of 7 Chapters. In the first chapter, the topic of thesis is explained in a general frame and the aim of the study is clarified shortly. In the second chapter the common material of the structures, concrete, is dealt with in general. In the third chapter, the fundamental chapters such as how smartness occurs in structures, smart materials and concrete, functional principle of smart concrete and the places where smart concrete are used are given. Literature research and the place of the thesis in the literature are given in chapter 4 in detail. The 5th chapter comprises experimental studies, materials and methods whereas in the 6th chapter results and discussions are presented. In the last chapter, conclusions and recommendations take place.

As a result, it was seen that carbon fiber reinforced lightweight concrete had the ability of smartness which has not been investigated so far. Therefore, it was concluded that deformation and damage due to the stress and temperature could be sensed in lightweight concrete.

Keywords: Smart Lightweight Concrete, Sensing Ability, Carbon Fiber, Fly Ash, Silica Fume

1. GİRİŞ

Yapı malzemeleri, çelik, beton gibi mekanik açıdan güçlü malzemelerden, hem daha güçlü hem de daha hafif olan kompozit malzemelere doğru bir gelişim göstermektedir. Son zamanlarda ise, buna ilaveten kendi kendini izleyebilen malzemelere doğru bir ilerleme söz konusudur.

Beton, uzun yıllardır değişik tipteki yapılar için kompozit bir malzeme olarak kullanılmaktadır. Betonun zayıf yönlerinden biri, yapıya uygulanan çekme gerilmelerine karşı dayanıklı bir malzeme olmamasıdır. Betondaki çatlamları gözlemek ve bu çatlakların daha fazla ilerlemesini önlemek için büyük bir talep olmuş ve bu talepten hareketle akıllı beton ortaya çıkmıştır.

Akıllı beton temel hatlarıyla dıştan akıllı beton ve içten akıllı beton olmak üzere iki kısma ayrılır. Eğer beton, içine veya yüzeyine sensörler, aktuatörler veya kimyasallar gömülerek ya da yapıştırılarak akıllı hale getiriliyorsa; yani deformasyon ya da hasarı sezme kabiliyetine eriştiliyorsa bu çeşit beton dıştan akıllı betondur [1]. Bu yapılarda bilgi, sensörler tarafından gözlenir; kontrol edicilerle analiz edilir. Sonra aktuatörler verilen uyarıya cevap verirler [2]. Betona sensör vs. gömmek veya yapıştırmak pahalı bir yöntemdir ve uzun ömürlü olmamaktadır. Çünkü yapının içine gömüldüğü zaman, betonda çentik etkisi yaratmakta ve bu da betonun dayanımını azaltmaktadır.

İçten akıllı beton ise, betonun içerisine küçük miktarlarda (en az hacimce %0,2 - %0,5), mikroskobik iletken kısa karbon fiber ilave edilmesiyle elde edilen akıllı betondur. Kısaca akıllı beton olarak adlandırılan karbon fiber takviyeli beton (CFRC-Carbon Fiber Reinforced Concrete), SUNY (State University of New York) / Buffalo profesörlerinden D.D.L Chung tarafından keşfedilip, geliştirilmiş ve patenti alınmıştır.

İçerisine iletken fiberler ilave edilerek iletkenliği arttırılmış olan beton, kısaca akıllılık olarak tabir edilen kendi kendini izleme kabiliyetine erişmiş olur. Kendi kendini izlemek, malzemenin deformasyonunu, hasarını ve sıcaklığını sezmesi olayıdır. Akıllı betonun çalışma prensibi, elektrik direncinin harici zorlanmalara tepki olarak değişmesidir. Bu elektrik direncinin ölçülmesi yoluyla da betonda meydana gelen deformasyon sezilmiş olur.

Geleneksel betona karbon fiber ilave edilmesi, fiber boyutuna bağlı olarak değişmekle birlikte, maliyeti yaklaşık olarak %30 arttırmaktadır. Fakat bu maliyet bile, yapı içerisine sensör gömerek betonu akıllı yapmaktan daha hesaplı bir yöntemdir. Fiber ilave edilerek akıllı hale getirilen beton, fiberden dolayı, özellikle çekme ve eğilme gerilmelerine karşı fibersiz betondan daha kuvvetli olmaktadır. Akıllı beton, kırılmadan önce fibersiz betona göre daha yüksek

enerjiyi absorbe eder. Bu da akıllı betonun eğilmesi için daha büyük bir kuvvete ihtiyacı olduğu anlamına gelmektedir [3].

Akıllı betonun kendi kendini izleme yeteneği başka bir deyişle deformasyon ve hasarı sezme olayı, bilim adamlarını bu malzemeden nerelerde faydalanabilecekleri konusunda araştırma yapmaya yöneltmiştir.

Örneğin, akıllı beton yollarda kullanılmış ve bu sayede araçlar karayolunda seyir halindeyken dahi yerleri, hızları ve ağırlıklarının belirlenebileceği tespit edilmiştir.

Ayrıca elektrik direnci ile ağırlık arasındaki ilişki irdelenmiştir. Laboratuvarında, anayolda seyir halindeki bir kamyonun hareketinin ve ağırlığının bir modeli yapılmış ve biri akıllı betondan üretilmiş olan iki beton rulo silindirik yan yüzleri arasında dönen bir araba lastiği ile bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Akıllı betondan yapılmış olan ruloya yapılan elektrik bağlantısı ile tekerlek arada döndüğü müddetçe yüzeye yakın betonun elektrik direncindeki değişim ölçüldükten sonra bu elektriksel değişimler değerlendirilerek hem lastikteki yükün hem de dönme hızının kontrol edilebileceği belirtilmiştir [4].

Akıllı beton ile inşa edilmiş yapılarda akıllı betonun; bu yapıları deprem sırasında gözlemleyerek riski azaltmak için yapının zamanında hizmet dışı bırakılması fikrine karar verebileceği araştırmacılar tarafından belirtilmiştir [5].

Karbon fiberli beton üzerinde yapılan çalışmalar bu kompozit malzemenin sıcaklığı da sezebildiğini göstermektedir. Barajlarda, çimentonun hidrasyonu, güneş ışınları, gölette biriken suyun ve havanın sıcaklık değişimi, yapının çatlamasına neden olabilecek çekme gerilmeleri üretir. Bu nedenle barajların güvenliğinin temini için, betonun kendi kendini izleme kabiliyetine sahip olması gereklidir. Karbon fiber takviyeli betonun ısı iletkenliği düşük olduğundan dolayı, ısıya karşı tepki süresi uzundur. Yapılan araştırmalar sıcaklık değişiminin düşük olduğu baraj ve köprüler gibi ağır beton kütleli yapılarda ana kütleyle gömülü termal sensörler olarak kullanılabilirliğini de göstermektedir.

İlimiz de dahil olmak üzere ülkemizin çeşitli yörelerinde doğal hafif agrega kaynakları çok ve yaygındır. Fakat bu kaynakların kullanımı oldukça düşük düzeydedir. İlimizdeki bu doğal malzemenin akıllı yapı malzemesi olarak kullanım imkanlarını araştırmak açısından, özellikle bu tez çalışmasında ana matrisi bir hafif agrega türü olan ve Elazığ Meryem Dağı civarından temin edilen pomza agregasından oluşturulan akıllı hafif beton kullanılmıştır. Bu taşıyıcı hafif betonun gerilme ve sıcaklık altındaki davranışları incelenerek kendi kendini izleme yeteneğinin belirlenmesine çalışılmıştır.

Çalışma 7 ana bölümden oluşmaktadır. 1. bölümde konuya genel bir giriş yapılmıştır. 2. bölüm, yapıların temelini oluşturan beton hakkında genel bilgileri içermektedir. 3. bölüm ise akıllı yapılar başlığı altında, akıllı malzemenin ve akıllılığın tanımları ile birlikte akıllı betonun

akıllı malzeme içerisindeki yerini izah etmektedir. 4. bölüm akıllı beton üzerine yapılmış literatür çalışmalarının kapsamlı bir özetini ve bu çalışmanın amacını içermektedir. 5. bölümde, yapılan deneysel çalışmada kullanılan malzemeler, yapılan deneyler ve yöntemleri verilmektedir. 6. bölüm, deneyler sonucunda elde edilen bulguları ve bunların yorumlarını içermektedir. 7. bölüm ise, sonuç ve öneriler kısmını oluşturmaktadır.

Bu tez çalışması FÜBAP (Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri) tarafından desteklenmiş olup proje numarası 1033'tür.

2. BETON

Beton günlük hayatımızın her safhasına girmiş önemli ve popüler bir yapı malzemesidir. Evler, işyerleri, okullar, spor tesisleri, araç otoparkları ve alışveriş merkezleri gibi günlük hayatımızın büyük bir bölümünün geçtiği yapıların inşasında beton kullanılmaktadır.

Çimento, su, agrega (kum, çakıl, kırma taş, hafif agrega v.b.) ve gerekli hallerde bazı katkı maddelerinin birlikte karıştırılması ile elde edilen bir yapı malzemesidir. Sözü edilen malzemeler belli oranlarda karıştırıldığında, kalıplarda istenilen biçimi alabilecek plastik bir malzeme elde edilir. Betonun diğer yapı malzemelerinden üstün kılan en önemli özelliği, istenilen biçimin verilebilmesini sağlayan plastik kıvamıdır [6].

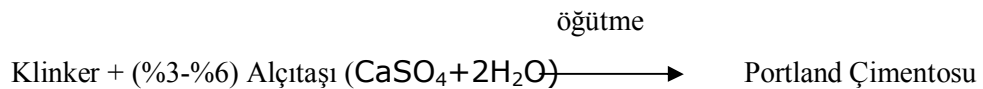
Çimento ve su arasında hemen başlayan ve devam eden kimyasal reaksiyonların (hidratasyonun) etkisiyle, çimento hamurunun başlangıçtaki plastik özelliği, zaman ilerledikçe azalmaktadır. Böylece bir veya birkaç saat içerisinde, çimento hamuru katılaşmakta ve daha sonraları da tamamen sertleşmiş bir duruma gelmektedir. Beton karıştırılıp kalıba döküldükten kısa bir süre sonra katılaşır ve zamanla dayanım kazanır[7]. Betonun özellikleri beton karışımında kullanılan malzemenin özellikleri ile yakından ilişkilidir.

2.1 Betonun Oluşturan Ana Bileşenler

2.1.1 Çimento

Bağlayıcılık özelliğine sahip olmasından ötürü, betonu oluşturan ana bileşen çimentodur. Çimentolar hidrolik bağlayıcı malzemeler olup, su ile karıştırılıp hamur haline getirildikten sonra gerek havada gerekse su içinde sertleşerek suni taş haline dönüşür[8]. Çimentolar içinde en yaygın olarak bilinen çimento türü Portland çimentodur. Portland çimentosu için verilen standart TS EN 197-1 dir [9].

Portland çimentosu, kalker (CaCO_3) ve kil karışımı hammaddelerin yüksek sıcaklıktaki döner fırında pişirilmeleri ile ortaya çıkan ve klinker olarak adlandırılan malzemenin çok az miktarda alçıtaşı ile öğütülmesi sonunda elde edilen bir çimento türüdür.



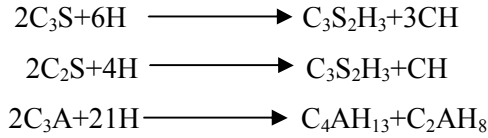
Fırın içerisinde oluşan bu yüksek sıcaklığın etkisiyle, hammadde karışımından açığa çıkan oksitler kendi aralarında kimyasal reaksiyonlara başlarlar. Bu kimyasal reaksiyonlar sonucunda klinkeri meydana getiren ana bileşenler ortaya çıkmaktadır.

Tablo2.1’de verilen bu ana bileşenler, aynı zamanda portland çimentosunun da ana bileşenlerini meydana getirmektedir.

Tablo 2.1 Çimentonun Ana Bileşenleri

| Ana Bileşenler | Çimento Kimyasındaki Sembolü |
|--|------------------------------|
| Dikalsiyum silikat ($2CaO.SiO_2$) | C_2S |
| Trikalsiyum silikat ($3CaO.SiO_2$) | C_3S |
| Trikalsiyum alüminat ($3CaO.Al_2O_3$) | C_3A |
| Tetrakalsiyum alüminoferrit ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) | C_4AF |

Beton karışımı yapılırken, karma suyu ilave edildiği andan itibaren, her ana bileşen su ile ayrı ayrı reaksiyona girer. Aşağıda bazı ana bileşenlerin reaksiyon denklemleri gösterilmektedir.



Verilen denklemlerde H, (H_2O) suyun; $C_3S_2H_3$ ise ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$) tobermoritin çimento kimyasındaki gösterim şeklidir. Tobermorit jeli kısaca C-S-H (kalsiyum-silika-hidrat) jeli olarak adlandırılmaktadır[7].

2.1.2 Agregata

Betonun yapımında, çimento ve su ile birlikte kullanılan, kum, çakıl ve kırmataş gibi taneli malzemelerdir. Beton hacminin yaklaşık % 75’i agregadan oluşmaktadır. Agreganın maliyeti, betonu oluşturan bir diğer malzeme olan çimentonun maliyetinden çok daha düşük olduğu için, istenilen kalitedeki betonu elde etmek kaydıyla, betonda mümkün olduğunca çok miktarda agregata kullanılması, betonun daha ekonomik olmasını sağlamaktadır.

Agregalar için standart TS 706 EN 12620 dır. Bu standart, beton yapımında kullanılmak amacıyla, doğal, yapay ve geri kazanma yoluyla elde edilen agregaların, dolgu malzemesi olarak kullanılan agregaların ve bu malzemelerin oluşturduğu karışımların bütün özelliklerini kapsar [10].

Agregaları çeşitli şekillerde sınıflandırmak mümkündür. Fakat en çok kullanılan sınıflandırmalar, kaynağına, özgül ağırlık veya birim ağırlıklarına, tane büyüklükleri ve tane şekillerine göre yapılan sınıflandırma tipleridir.

1. Kaynağına göre agregalar

Doğal Agregalar: Bu tür agregalar, nehir yatakları, eski buzul yatakları, deniz ve göl kenarları, taş ocakları gibi doğal kayalardan elde edilmiş olan agregalardır. Bu agregalara konkasörde kırma, elekten eleyerek değişik tane boyu sınıflarına ayırma ve yıkama işlemleri haricinde hiçbir işlem uygulanmaz. Kum, çakıl, kırmataş en çok kullanılan doğal agregalardır. Hafif beton üretiminde kullanılan pomza taşı ve bims gibi hafif agregalar ile hematit (Fe_2O_3), magnetit (Fe_3O_4) ve barit ($BaSO_4$) gibi demir cevherinin kırılması ile elde edilen ağır agregalar da bu sınıfa girmektedir[7].

Yapay Agregalar: Bu tür agregaların bir diğer adı da sanayi ürünü agregalardır. İkinci bir işlem sonucu beton yapımında kullanılır hale getirilebilirler [8]. Yapay agregalar arasında en çok kullanılanları, yüksek fırın cürufu, genleştirilmiş kil agregası, uçucu kül agregası ve genleştirilmiş perlittir.

2. Özgül ağırlık ve birim ağırlıklarına göre agregalar

Normal agregası: EN 1097-6 standardına uygun olarak tayin edilen etüv kurusu tane yoğunluğu 2 gr/cm^3 - 3 gr/cm^3 arasında olan agregalar bu sınıfa girmektedir [11].

Hafif Agregası: EN 1097-6 standardına uygun olarak tayin edilen etüv kurusu tane yoğunluğu $\leq 2 \text{ gr/cm}^3$ veya EN 1097-3 standardına uygun olarak tayin edilen etüv kurusu yığın (boşluklu) yoğunluğu $\leq 1,2 \text{ gr/cm}^3$ olan mineral esaslı agregalar hafif agregası olarak adlandırılırlar [11].

Ağır agregalar: EN 1097-6 standardına uygun olarak tayin edilen etüv kurusu tane yoğunluğu $\geq 3 \text{ gr/cm}^3$ olan agregalardır [11].

3. Tane büyüklüğüne göre agregalar

İri ve ince agregası: TS 706 EN 12620 ye göre, 4mm göz açıklıklı kare delikli elekten geçen agregası ince, bu elek üzerinde kalan agregası ise iri olarak adlandırılmaktadır. İnce agregaya yaygın olarak kum denilmektedir. Büyük taşların konkasörde kırılması ile elde edilen kırmataş bir iri agregasıdır. Çakıl ise kırma işlemine tabi tutulmamış olan iri agregasıdır. Standartta, iri ve ince agregasının karışımından meydana gelmiş agregası için ise tuvenan agregası tabiri kullanılmaktadır [10].

4. Tane şekline göre agregalar

Yuvarlak, köşeli, yassı ve uzun agregalar: Genellikle nehir yataklarından temin edilen, taneleri küresel şekilde veya küresele yakın şekilde olan agregalar yuvarlak agrega olarak tanımlanır. Kırılma işleminden dolayı yüzeyinde çıkıntılar bulunan agregalar ise köşeli agregalardır. Kırmataş agregaları bu gruba girer. Üçüncü boyutu diğer iki boyutuna göre çok küçük olan agregalar yassı; iki boyutu dar, üçüncü boyutu ise çok büyük olan agregalar ise uzun agrega olarak adlandırılırlar. Uzun ve yassı taneler şekilce kusurlu olarak tabir edilirler [7].

2.1.3 Su

Betonu oluşturan bir diğer ana bileşen sudur. Çimento ve agreganın karılmasında kullanılan karışım suyu, çimento ile birleşerek hidrasyonun oluşmasını sağlar. Yine karılma işlemi sırasında agrega ve çimento tanelerinin yüzeyini ıslatarak üretilen taze beton karışımına istenilen işlenebilmeyi de sağlar. Beton üretiminde kullanılan karışım suyunun kalitesi ve miktarı betonun özelliklerini etkiler.

2.2 Beton Çeşitleri

Yapılarda kullanılan betonlar; birim ağırlıklarına göre, basınç dayanımlarına göre ve üretildikleri yerlere göre sınıflandırmak mümkündür.

TS EN 206 standardı dikkate alınarak birim ağırlığına göre beton temel olarak 3 sınıfta incelenebilir [11].

2.2.1 Hafif Beton

Etüv kuru durumdaki birim hacim kütlesi (yoğunluğu), $0,8 \text{ gr/cm}^3$ veya daha büyük olup, 2 gr/cm^3 değerini geçmeyen beton türüdür. Hafif betonda kullanılan agreganın bir kısmı veya tamamı hafif agrega olabilir. Taşıyıcı hafif betonlarda kuru birim ağırlığın en fazla $1,9 \text{ gr/cm}^3$, 28 günlük basınç dayanımının da en az 16 N/mm^2 civarında olması istenir. Taşıyıcı hafif beton düşük birim ağırlığı nedeni ile yapı tasarımında daha küçük eleman kesitlerini ve daha uzun açıklıkları mümkün kılar, taşınması kolaydır, kalıp işlerinde de ekonomi sağlar [12].

2.2.2 Normal Beton

Etüv kuru durumdaki yoğunluğu, 2 gr/cm^3 değerinden büyük olup, $2,6 \text{ gr/cm}^3$ 'ü geçmeyen ve genellikle doğal agrega kullanılarak üretilen beton türüdür. Bu betonlar, önemli bir ayrıcalık istemeyen bina inşaatlarında kullanılırlar. Maliyetleri ucuzdur.

2.2.3 Ağır Beton

Etüv kurusu durumdaki yoğunluğu $2,6 \text{ gr/cm}^3$ 'ten daha büyük olan beton türüdür. Ağır betonlar özellikle zararlı ışınlara karşı bir kalkan oluşturmak maksadıyla kullanılırlar. Kullanım yerleri arasında nükleer reaktörler, hastanelerin ışın tedavisi yapılan bölümleri gösterilebilir. Ağır betonların agregaları, yoğunlukları yüksek olan agregalardır.

Basınç dayanımlarına göre bir sınıflandırma yapmak gerekirse, 28 günlük basınç dayanımı sınıfı C 50/60'dan daha yüksek olan normal veya ağır betonlar ile 28 günlük basınç dayanımı sınıfı LC 50/55 'den daha yüksek olan hafif betonlar yüksek dayanımlı beton sınıfına girmektedir. Bu sınırlar altında basınç dayanımına sahip betonlar ise normal dayanımlı beton sınıfına girmektedirler [11].

2.3 Betonda Kullanılan Mineral Katkılar

Betonda katkı maddesi olarak kullanılan mineral malzemelerin mutlaka ince taneli olmaları gerekmektedir. İnce taneli mineral katkı maddeleri beton üretiminde kullanılan temel malzemelerin (çimentonun, agreganın ve suyun) yanısıra ayrı bir malzeme olarak beton karışımına doğrudan dahil edilmekte ve temel malzemelerle beraber karılmaktadırlar. Çoğu zaman betonda kullanılacak çimento miktarı azaltılmakta ve azaltılan miktar kadar ince taneli katkı maddesi konulmaktadır [7]. Bunların kullanılabilecekleri oranlar ilgili standartlarca belirlenmiştir. Bu ince taneli mineral katkıları içerisinde en yaygın kullanılanları, beton üretimi ile doğrudan ilgili olmayan ve bir endüstri kolunda yan ürün olarak elde edilen silis dumanı ve uçucu küldür.

2.3.1 Silis Dumanı

Silisyum elementinin veya silisyumlu metal alaşımların üretimi esnasında ortaya çıkan gazın hızlı soğutulmasıyla yoğunlaştırılması sonucunda elde edilen ve %85-%98 kadar silis içeren amorf yapıya sahip çok ince parçacıklardan oluşan malzemeye silis dumanı denilmektedir. Silis dumanının rengi açık griye doğru değişim göstermektedir. Karbon içeriği arttıkça rengi daha koyu olmaktadır. Silis dumanının tane boyutu $0,1-0,2 \mu\text{m}$ ve yoğunluğu $2,2-2,3 \text{ gr/cm}^3$ [7]. Çok ince taneli olması ve % 75'in üzerinde amorf silis içermesinden dolayı çok aktif bir puzolandır [12].

Silis dumanındaki " $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ " miktarının yüksek olması, puzolanik aktivitenin daha iyi olmasına yol açmaktadır. Betonda katkı maddesi olarak kullanılan silis dumanı hidrasyon ısısını azaltmaktadır. Ayrıca sertleşmiş betonun sülfatlara karşı dayanıklılığını arttırırken; su geçirimsizliğini ve alkali-silika reaksiyonunu azaltmaktadır. Bu

olumlu etkilerinin yanısıra, silis dumanı ile üretilen betonlarda daha fazla karışım suyuna ihtiyaç duyulması ve nispeten daha koyu renkli bir beton elde edilmesi de olumsuz etkileri arasında sıralanabilir [7].

2.3.2 Uçucu Kül

Elektrik enerjisi üretimi için termik santrallerin çoğunda pulverize kömür kullanılmaktadır. Kömür, % 80'i 75 µm elekten geçebilecek inceliğe sahip olacak tarzda öğütülmekte ve havayla birlikte, buhar üretici kazanları ısıtmak amacıyla, yakıt olarak püskürtülmektedir. Pulverize kömürün yanmasıyla büyük miktarı çok ince olan kül tanecikleri ortaya çıkmaktadır. Çok ince tanelere sahip küller, yakıt gazlarıyla beraber uçarak bacadan dışarı çıkmak üzere hareket etmektedirler. Atık malzeme olarak ortaya çıkan küllerin yaklaşık %75 -%80'i gazlarla birlikte bacadan çıkma eğilimi gösteren çok ince taneli küllerdir. Bu küllere uçucu kül denilmektedir. Bacadan dışarıya çıkacak küller bir takım elektrostatik veya elektromekanik yöntemler vasıtasıyla tutulmakta ve kül toplayıcı silolara kanalize edilmektedir.

Uçucu küllerde çok yüksek miktarlarda yer alan oksitler SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 'dür. Bunların yanısıra, bir miktar CaO , MgO , C ve Na_2O da bulunabilmektedir.

Uçucu küllerin tane boyutları 1–150 µm arasında değişiklik göstermektedir. Normal olarak 2,1–2,7 gr/cm³ yoğunluğa sahiptirler. İçerisinde karbon miktarı fazla olan uçucu küller koyu gri renkte iken, daha çok demir içerenler ise açık gri renktedir[7].

Birçok ülke standardında uçucu küller bir sınıflandırmaya tabi tutulmazken, ASTM C 618 no.lu standart uçucu külleri F ve C sınıfı olarak iki grupta değerlendirmektedir[13].

- F sınıfı

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%70$; antrasit veya bitümlü kömürlerden elde edilir. Ayrıca puzolanik özelliğe sahiptir.

- C sınıfı

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%50$; linyit veya düşük bitümlü kömürlerden elde edilir. Puzolanik özelliğinin yanısıra %10'dan fazla CaO içerdiği için kendiliğinden de bir miktar bağlayıcı özelliğe sahiptir.

Betonda katkı maddesi olarak kullanılan uçucu küllerin betonun özelliklerine olumlu ve olumsuz etkileri mevcuttur. Uçucu kül taze betonda işlenebilirliği arttırırken aynı zamanda, betonun hidratasyon ısını ve su geçirimsizliğini de azaltmaktadır. Tanelerinin küreselliği sayesinde taze betonun kararlılığını, kolay yerleşmesini ve kolay sıkıştırılmasını sağlamaktadır. Çimento ile belirli yüzdelerde yer değiştirdiği için ekonomiklik de sağlamaktadır. Fakat uçucu kül prizi biraz geciktirdiği için, bu durum soğuk havalarda bir dezavantaj olarak belirmektedir. Ayrıca uçucu küllü betonlar daha uzun süre küre ihtiyaç duyarlar.

Ülkemizde doğal hafif agrega kaynakları çok ve yaygın olmasına karşın kullanımı oldukça düşük düzeydedir. Hafif agregalı taşıyıcı hafif betonlarla üretilen yapının ölü yükünün azalması; böylece kesitlerde küçülme nedeniyle hacim genişlemesi ve donatı ekonomisi sağlanması, ayrıca depremlerde can ve mal kaybının az olması; yapılan literatür araştırmalarında kısa karbon fiber takviyeli hafif agregalı taşıyıcı beton uygulamalarının çok kısıtlı düzeyde kalması gibi belli başlı nedenlerden ötürü bu tez çalışmasında kompozitin ana matrisi hafif agregadan meydana getirilmiştir.

3. AKILLI YAPILAR

Akıllı mühendislik yapıları, piezoelektrik, elektrostriktif, magnetrostriktif, ve fiber optik gibi malzemelerin pasif yapılara entegre edilmeleriyle elde edilen yapılardır. Akıllı yapılar, pasif yapının istenildiği gibi yönlendirilmesine imkan veren özellikleri ile günümüz mühendislik uygulamalarında geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Akıllı yapılar, geometrik ve yapısal özelliklerini beklenen görevlerine uygun biçimde değiştirebilen yapılar olarak tanımlanmaktadır. Görevin amacı açısından faydalı olan bu değişimler dıştan uygulanan kumandalarla olabileceği gibi, dış uyarılara karşı yapının otomatik olarak gösterdiği tepkiler biçiminde de olabilir. Akıllı yapılar aslında pasif yapı ile birlikte uyarıcılar (actuators), algılayıcılar (sensors) ve yönlendiricilerin (controllers) bir arada bulunduğu entegre sistemlerdir. Uyarıcılar ve algılayıcılar farklı elemanlar olabileceği gibi aynı eleman da olabilirler. İki farklı amaç için kullanılacak bu tür elemanların tersinir özelliklere sahip malzemeler olması gerekmektedir. İşte bu malzemeler de akıllı malzeme olarak tanımlanırlar [14]. Bir başka şekilde tanımlamak gerekirse, akıllı malzemeler çevreden gelen uyarılara özelliklerini veya şekillerini değiştirerek cevap veren malzemelerdir [15].

Bir malzemeyi akıllı yapan uygulanan harici “kuvvet” alanlarının etkisinde şekil değiştirip bu etki kalktığında tekrar eski hallerine dönebilmeleridir.

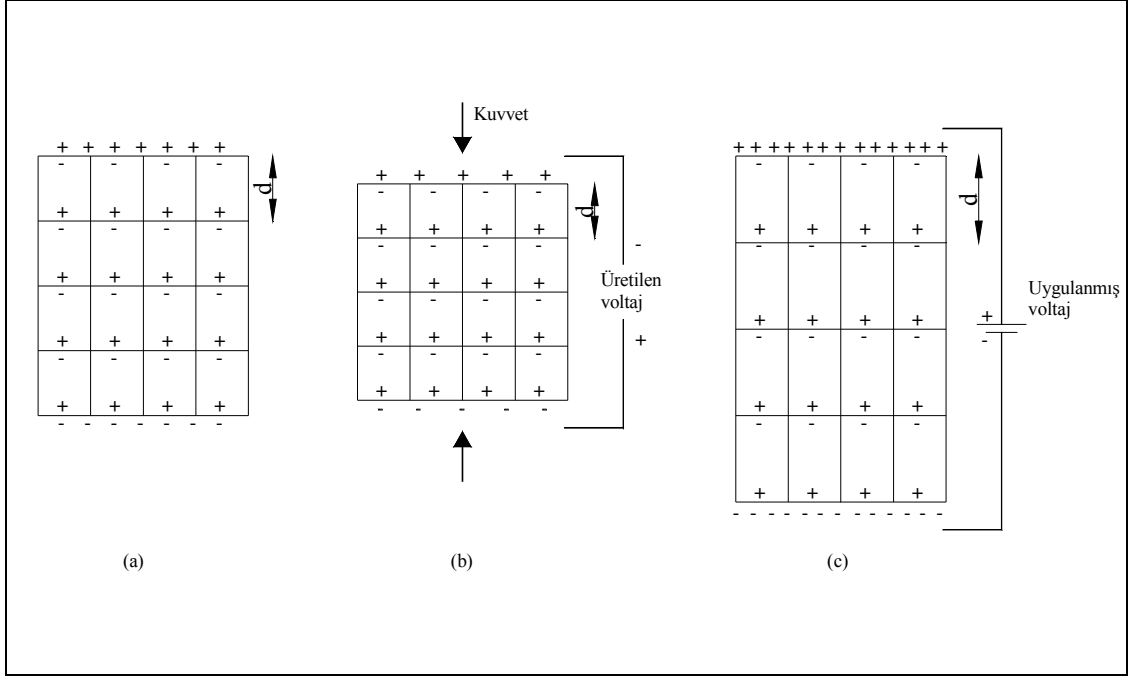
Akıllı malzeme alanında henüz sınırları kesin hatlarla çizilmiş akademik ve ticari bir sınıflandırma sistemi bulunmamakla birlikte en geniş ölçekte akıllı malzemeler 3 ana gruba ayrılabilir [16]:

- Piezoelektrik Malzemeler
- Şekil Hafızalı Alaşımlar (Shape Memory Alloys; SMAs)
- Magnetrostriktif Malzemeler

- Piezoelektrik Malzemeler:

Piezoelektrik etki ilk defa 1880’de Jaques ve Pierre Curie tarafından Rochelle tuzunda keşfedilmiştir. Temel olarak piezoelektrik etki, mekanik basınç altında bırakılan bazı yalıtkan(dielektrik) kristallerin bir yüzünde pozitif, karşı yüzünde ise negatif elektrik yüklerinin ortaya çıkması şeklinde tanımlanır. Bu durumun tersi de mümkündür. Bir kristalin iki yüzüne bir potansiyel farkı uygulanması sonucunda kristalde boyut değişikliği görülmektedir. Bu prensipten yola çıkarak piezoelektrik özellik gösteren malzemeler hem aktüatör olarak hem de sensör olarak kullanılabilirler. En yaygın olarak kullanılanlar kuvars kristalleri, Rochelle tuzu ve kurşun-zikronat-titanattır(Lead-zikronat-titanate; PZT) [16].

Piezoelektrik etkiyi daha açık bir şekilde ifade etmek gerekirse; dielektrik malzemenin boyutu değiştirildiğinde polarizasyon (kutuplaşma) olur ve bir voltaj veya alan oluşturulur (Şekil 3.1). Bu şekilde geri dönebilen davranış sergileyen malzemeler piezoelektrik malzemelerdir [17].

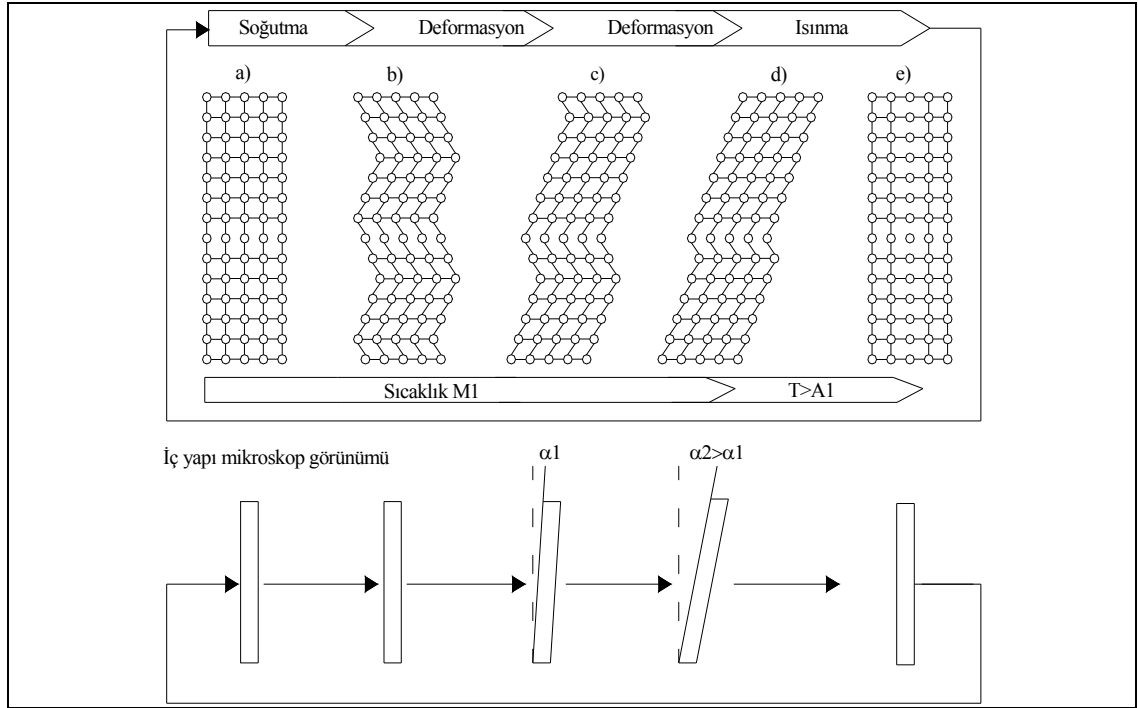


Şekil 3.1 Piezoelektrik Etkini Şematik Görünümü [17]

Şekil 3.1(a)'da görüldüğü gibi piezoelektrik bir malzeme kalıcı kutup çiftlerinden dolayı bir yük farkına sahiptir. Malzemeye bir basınç kuvveti uygulandığında, yük merkezleri arasındaki mesafeyi azaltır ve bir voltaj oluşturur (b). Bu voltaj yük merkezleri arasındaki mesafeyi değiştirerek boyutta bir değişime neden olur (c).

- Şekil Hafızalı Alaşımalar (Shape Memory Alloys) (SMA)

Bu malzemeler bir sıcaklık farkı altında faz değişimine uğrayarak hacimsel ve geometrik şekil değişiklikleri göstermektedir. Eğer doğru bir biçimde dizayn edilirse ve “eğitilirse”, bu değişim tamamen tersinir kılınabilmekte ve bu alaşımlar aktuatör olarak kullanılabilir (Şekil 3.2). SMA’lar piezoelektrik malzemelere göre daha güçlü olmalarına rağmen, tepki hızları sıcaklık değişimi ile doğrudan alakalı olduklarından birçok uygulama için çok yavaş kalmaktadırlar.



Şekil 3.2 Şekil Hafızalı Alaşımların Çalışma Prensibi

- **Magnetostriktif Malzemeler**

Bu malzemeler ise manyetik alana tepki vermektedirler. Temel çalışma mantığı magnetostriktif malzemenin etrafına sarılan bobinden elektrik akımı geçirilerek oluşturulan manyetik alanın istenilen uzamayı vermesi şeklindedir. Halen birçok farklı alaşımdan magnetostriktif malzemeler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Gelecekte güçlü aktüatörler olarak kullanılacakları öngörülmektedir [16].

Tablo 3.1’de bu 3 grup akıllı malzemenin avantaj ve dezavantajları toplu olarak verilmiştir.

Bahsedilen üç ana gruba ilave olarak elektroeolojik ve magnetoeolojik sıvılar da üzerinde araştırma yapılan akıllı malzemeler arasında sayılabilir. Bu sıvılar elektrik akımına ya da manyetik alana maruz kaldıklarında çok ciddi viskozite değişimleri gösteren sıvılar olarak bilinmektedirler.

Tablo 3.1 Akıllı Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları[16]

| | SMA.s | Magnetostriktif Malzemeler | Piezoelektrik Seramikler |
|----------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Avantajları | Yüksek enerji yoğunluğu | Yüksek çalışma frekansları | Geniş bant aralığı |
| | Yüksek mukavemet | Geniş çalışma sıcaklığı aralığı | Yüksek çalışma frekansları |
| | Yüksek Esneklik | | Düşük güç ihtiyacı |
| Dezavantajları | Dar bant aralığı | Sınırlı uzama | Sınırlı uzama |
| | Dar çalışma sıcaklığı aralığı | Düşük mukavemet | Düşük mukavemet |
| | Düşük çalışma frekansları | | Dar çalışma sıcaklığı aralığı |

3.1 Akıllı Beton

Akıllı beton, yapı sektöründe kullanılabilecek şekilde tasarlanmış bir akıllı malzeme olup, betonu izleme ihtiyacından hareketle ortaya çıkmıştır. SUNY (State University of New York) / Buffalo profesörlerinden D.D.L Chung tarafından keşfedilip, geliştirilmiş ve patenti alınmıştır. D.D.L. Chung'a göre akıllı beton, mikroskobik kısa karbon fiberle güçlendirilmiş betondur. Küçük miktarlarda (en az hacimce %0.2 - %0.5) karbon fiber ilavesiyle içeriği değiştirilmiş beton, bu haliyle, akıllılık vasfı kazanmış olur. Geleneksel betona karbon fiber ilave edilmesi, maliyeti %30 arttırmaktadır. Fakat bu maliyet bile, yapı içine sensör gömerek akıllı yapı elemanı elde etmekten daha hesaplı bir yöntemdir.

Genel olarak akıllı beton iki kısma ayrılmaktadır.

3.1.1 Dıştan Akıllı Beton

Beton, içine veya yüzeyine sensörler, aktuatörler veya kimyasallar gömülerek veya yapıştırılarak akıllı hale getiriliyor; bir başka deyişle, deformasyon ya da hasarı sezme kabiliyetine eriştiriliyorsa bu çeşit beton dıştan akıllı betondur [1].

Bu yapılarda bilgi, sensörler tarafından gözlenir; kontrol edicilerle analiz edilir. Sonra aktuatörler verilen uyarıya cevap verirler [2]. Betona sensör vs. gömmek veya yapıştırmak pahalı bir yöntemdir ve fazla uzun ömürlü değildir. Bunun diğer bir dezavantajı da, sensör ve aktuatörler yapının içine gömüldüğü zaman, betonda çentik etkisi yaratması ve bunun da betonun dayanımını azaltmasıdır [18].

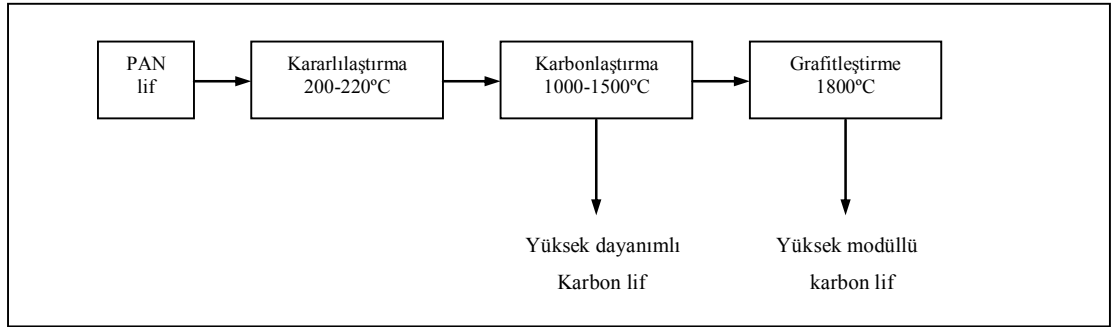
3.1.2 İçten Akıllı Beton

Karbon fiber takviyeli beton (CFRC-Carbon Fiber Reinforced Concrete), içerisinde hacimce en az %0.2 oranında mikroskobik karbon fiber parçacıkları bulunan içten akıllı bir betondur. Bu haliyle, basınç veya çekme gerilmelerini hem elastik hem de inelastik bölgelerde sezebilme kabiliyetine erişmiş olur. Bu kabiliyet, dış etkiler yüzünden elektrik direncini, geri dönüşümlü veya dönüşümsüz değiştirmesi temeline dayanır [19].

Karbon lifleri öncü adı verilen başlıca iki hammaddeden üretilir. Bu hammaddeler, poliakronitril (PAN) ve katrandır [20].

Karbon lifleri genel olarak PAN öncülerden üç işlem aşamasında üretilir.(Şekil 3.3):

1. Kararlılaştırma
2. Karbonlaştırma
3. Grafitleştirme



Şekil 3.3 Poliakronitril (Pan) Öncü Malzemeden Yüksek Dayanımlı Yüksek Modüllü Karbon Lifleri Üretimindeki İşlem Kademeleri

Kararlılaştırma aşamasında PAN lifleri her bir lifteki polimer ağının lif eksenine paralel hale gelmesi için gerilerek, gerilmiş durumda, havada, 200 – 220 °C sıcaklıkları arasında oksitlenir. Karbonlaştırma aşamasında ise, yüksek dayanımlı karbon lifleri karbonlaştırılır. Bu işlemde kararlılaştırılmış PAN asıllı karbon lifleri, bünyelerindeki O, H ve N uzaklaştırılmaya kadar kavrulur. Karbonlaştırma ısıl işlemi çoğunlukla yansız bir atmosferde 1000 – 1500 °C sıcaklıkları arasında yapılır. Karbonlaştırma işlemi sırasında, her bir lifin içinde grafit benzer şeritler oluşarak malzemenin çekme dayanımını büyük miktarda artırır. Üçüncü aşama olan grafitleştirme işlemi, çekme dayanımındaki düşme pahasına esneklik modülünde bir artış isteniyorsa uygulanır. 1800 °C sıcaklığın üzerinde yapılan grafitleştirme işlemi ile her bir lif içindeki, grafit benzeri kristallerin tercihli yönlenmeleri artırılır [20].

Kompozitin özelliklerini geliştirmek için, karbon fiber parçacıkları yüzey işlemine tabi tutulabilir. Bu işlem, fiberle matris arasındaki bağı güçlendirdiği için faydalı bir yöntemdir. Bu

yüzey işlemleri; ısıyla, Silan (SiD₄) ile, Ozon (O₃) ile, SiO₂ parçaları kullanılarak, NaOH çözeltisiyle gerçekleştirilebilir [21].

Çimento matrisli kompozit içerisinde yüzey işleminden geçirilmiş olsun ya da olmasın fiber ilave edilmesi deformasyon veya gerilmeyi sezme kabiliyetini arttırmak için yapılır. Ayrıca karbon ilavesi yapılması, betonun mekanik özelliklerinde bir düşüş meydana getirmez. Kısa karbon fiberler beton mikseriyle, betona karıştırıldığı zaman, betonun elektrik direnci deformasyon veya gerilmeye tepki olarak değişir. Karbon fiberin elektrik iletkenliği betondan daha fazla olduğu için fiberli beton kendi kendine bir sensör gibi davranır. Bu yüzden, artık içine optik fiber, strain gage, şekil hafızalı alaşımlar (SMA- Shape Memory Alloy) gömmeye gerek yoktur [1,19].

Beton deforme olduğunda ya da gerildiğinde, fiber ile çimento matrisi arasındaki temas etkilenir. Ayrıca, hacimsel elektrik öz direnci de etkilenir. Deformasyon, elektrik direncindeki değişimin ölçülmesi yoluyla sezilmiş olur. Yani küçük yapısal çatlaklar büyük boyutlara ulaşmadan akıllı beton kullanarak hasarı izlemek mümkün olur. Bu kabiliyet, depremi takip etme ve yapının iç şartlarını izlemekte kullanılabilir. Ayrıca betonun içindeki karbon fiber, betonun özellikle çekme ve eğilme dayanımını da arttırarak, çatlakların hızlı bir şekilde yayılmaması için çatlamları da kontrol eder.

Fiber takviyeli malzemeler, en genel anlamıyla bir kompozit olduklarından, akıllı kompozitleri ana matrisin türüne göre polimer ve çimento matrisli kompozit olarak gruplandırmak mümkündür [22].

Kompozitin ana matrisini polimerler teşkil ediyorsa bunlar polimer matrisli kompozittir. Bu matrisin içine sürekli karbon fiber katılarak kompozit akıllı hale getirilir. Sürekli karbon fiberler, kısa karbon fiberlerden daha pahalıdır. Çimento matrisli kompozitlerde ise, kompozitin matrisini çimento teşkil etmektedir. Çimento matrisi genelde matrisin içerisindeki malzemenin çeşidine göre aşağıdaki şekillerde teşkil edilir.

- Beton: Çimento ve suyun haricinde ince ve kaba agrega içeren matristir.
- Harç: Çimento, su ve sadece ince agrega içeren matristir.
- Çimento Hamuru: Sadece çimento ve sudan teşkil edilen matristir. İçine ne ince ne de kaba agrega eklenir.

Bu kompozitlere kısa iletken fiber parçacıkları katılarak akıllı hale getirilmiş olur. İlave edilen fiberler de çeşitlidir. Bunlar; polimer, çelik, cam ve karbon olabilirler.

Karbon fiber ihtiva eden çimento matrisli kompozitler, karbon fiber maliyetinin gün geçtikçe azalması, aynı zamanda yapısal ve fonksiyonel özelliklere olan talebin artması nedeniyle büyük bir öneme sahip yapı malzemeleridir. Bu kompozitler, beton içindeki çelik

takviyenin katodik korumasını da sağlarlar. Ayrıca, kendi deformasyonunu sezme yanında, hasarı ve ısıyı da sezebilme yeteneğine sahiptirler [23].

Karbon fiberli kompozitler, deformasyon sezme açısından çelik fiberlilerden daha üstündür. Fakat termoelektrik davranışta, karbon fiberler çelik fiberler kadar etkili değildir [21].

3.1.2.1 İçten Akıllı Beton İçin Akıllı Davranma Koşulları ve Özellikleri

İçten akıllı beton olan karbon fiber takviyeli çimento matrisli kompozitler için kendi kendini izleme yeteneği ile ilgili hususlar en genel haliyle aşağıdaki maddelerle özetlenebilir[24].

- 1- Akıllı olma ya da sezme özelliği fiberlerle sağlanır. Dolayısıyla fiber olmadığında sezme kabiliyeti olmaz.
- 2- Fiberler iletken olduğunda (karbon ya da çelik gibi) sezme kabiliyeti var, iletken olmadığında(polietilen gibi) yoktur.
- 3- Düşük karbon fiber hacim oranlarında bile sezme kabiliyeti oluşur.
- 4- Karbon fiber hacimce en az % 0.2 olduğunda sezme kabiliyeti meydana gelir. Bu değer iletken geçirgenlik eşiğinin altında kalan bir değerdir [25,26].
- 5- Sezme kabiliyetinin oluşumu için hacim elektrik özdirencinde maksimum bir eşik yoktur.
- 6- Kırılma yüzeyi incelendiğinde karbon fiberlerin birbirinden ayrıldığı görülür.
- 7- Yapılan araştırmalarda, 7 günlük numunenin ilk basınç gerilmesi çevrimi hariç, elektrik direncinin çekme gerilmesi altında arttığı (fiber uzaklaşmasından dolayı), basınç gerilmesi altında ise azaldığı (fiber yaklaşmasından dolayı) belirlenmiştir.
- 8- Karbon fiber, basınç gerilmesi sonucunda betonda oluşan çatlak boyu ya da yüksekliğini 100µm den 1µm ye hatta bu değer de altına düşürmektedir [5].
- 9- Karbon fiber varlığı kompozitin burkulma tokluğunu ve çekme sünekliğini oldukça artırır.
- 10- Bir tek fiberi çekip çıkarma testindeki sonuçlar neticesinde[27]; kısa karbon fiberli kompozitte fiberi çekip çıkarmak için gerekli olan gerilmenin, karbon fiber ve çimento hamuru arasındaki aderans dayanımına bağlı olduğu söylenebilir.
- 11- Basınç etkisi ile numunede oluşan ayrılmalar sırasında, çimento hamuru ile fiber arasındaki temas elektrik özdirenci artar.
- 12- Çimento hamuruna gömülü tek karbon fiberdeki artık gerilme ihmal edilebilir.

3.2 Akıllı Betonun Çalışma Prensibi

Karbon fiber takviyeli betonların, sezme davranışları 5 ana grupta incelenebilir [22].

3.2.1 Radyo Dalgalarının Reflektivitesi (Yansım Oranı)

Çimentoya elektrik iletkenliğine sahip karbon fiber ilave edilmesi kompozitin radyo dalgalarını yansıtma kabiliyetini artırır. Böylece EMI (electromagnetic interference-shielding) elektromanyetik ara yüzey kalkanı ve karayolları için otomatik bir rehber olarak görev yapabilir.

Deri etkisinden (Skin Effect-Deri Etkisi, 1 GHz gibi yüksek frekanslı bir elektromanyetik radyasyonun, bir iletkenin sadece yüzey bölgesine nüfuz etmesi, derine işlememesi olayıdır.) dolayı çapı 0,1µm olan karbon filamentleri (katalitik besleme yoluyla karbon gazından yapılmış katkı malzemesi) radyo dalgalarının iletilmesinde, çapı15 µm olan parçacık halindeki karbon fiberlerden daha etkilidir. Ancak 0,1µm'lik filamentler takviye malzemesi olarak 15 µm çapındaki parça karbon fiberlerden daha az etkilidir.

Polimer ve çimento matrisli kompozitler kıyaslandığı zaman, polimerin yalıtkan yapısına göre nispeten biraz daha iletkenliğe sahip çimentodan dolayı, çimento matrisli kompozitler, yüzeydeki çatlaklar tespit edilebilmesine yardımcı olan radyo dalgalarının iletimi konusunda, polimer matrisli kompozitlere göre daha etkilidirler [22].

3.2.2 Deformasyon Sezme

Karbon fiber takviyeli çimento matrisli kompozitler, deformasyonun hacim elektrik direnci üzerindeki etkisinden dolayı, kendi deformasyonunu sezme kabiliyetine sahip malzemelerdir.

Deformasyonun sezilmesi, akıllı yapılarla ilgilidir. Genelde, deformasyonun sezilmesi yapıya tutturulan strain-gagelerin kullanılmasıyla olur. Strain-gageler çoğunlukla dirençli tiptedirler. Başka bir deyişle, dirençleri deformasyonla değişir. Yani direnç deformasyonun bir göstergesi olarak görev yapar. Dirençli strain-gageler için alet faktörü (Gage Factor-birim deformasyon başına dirençteki kısmi değişim) 2 olmakla beraber , maliyetleri de oldukça yüksektir. Ayrıca kullanım sırasında ayrılmaya yatkın olması da bir dezavantajdır. Alternatif olarak, deformasyon sezmeyi sağlayacak optik fiberler yapı içine gömülebilir. Bu gömme işlemi ise malzemenin mekanik özelliklerini azaltabilir [18].

Kısa karbon fiberle güçlendirilmiş çimento, deformasyonun hacim elektrik öz direncinde ve yine deformasyonun elektrik polarizasyonda değişiklik meydana getirmesi sonucu kendi deformasyonunu sezer. Alet faktörü 700 kadardır. Çekme altında (hem tek eksenli çekmede hem de eğilmeye maruz numunenin çekme yüzünde), öz direnç geri dönüşümlü olarak artar. Basınç

altında ise (hem tek eksenli basınçta hem de eğilmeye maruz numunenin basınç yüzünde), özdirenç geri dönüşümlü olarak azalır. Fibersiz numunelerde ise direncin değişimi daha düşük ve geri dönüşüm daha az olmaktadır Bu piezoresistivite; basınç altında fiberlerin birbirine yaklaşması, çekme altında ise fiberlerin birbirinden uzaklaşması sonucunda meydana gelir [18].

3.2.3 Hasar Sezme

Mekanik ve termal hasarların ikisi de, çimento matrisli malzemeleri ilgilendiren bir konudur. Çimento matrisli malzemelerdeki hasarı sezme, düşük hasarlarda bile, yüksek duyarlılıkta olmaktadır. Donma – çözünme olayında meydana gelen hasar, çimento matrisli malzemeler için ısının neden olduğu yangın hasarı kadar bilinmesine rağmen, bu tür hasarların sezilmesi üzerine yapılan çalışmalar; yangın hasarı gibi bir termal hasar araştırma çalışmasından çok, mekanik hasarların araştırılmasına yakındır [22].

Çimento matrisli malzemeler, artan hasarla birlikte değişen elektrik direnci vasıtasıyla, elastik deformasyon sırasında meydana gelen hasarları bile küçük büyük hasar ayırt etmeden sezme özelliğine sahiptirler. Katkı olarak karbon fiber kullanımı hassasiyeti artırır. Hem çimento matrisli malzemedeki hasar hem de ara yüzeydeki hasar sezilebilir. Bu ara yüzey ya matris ile çelik çubuk arasındaki ya da tabakalı dökülen betonlarda eski ve yeni çimento matrisli malzemeler arasındaki ara yüzeydir. Bir çimento matrisli malzemedeki meydana gelen hasar, malzemenin hacimsel elektrik özdirencindeki değişimle belirlenir. Çünkü malzemenin kendisi bir sensör vazifesi görür. Ara yüzeydeki hasar ise ara yüzeyin temas elektrik özdirencindeki değişim ile belirlenir. Bu kez ara yüzeyin kendisi bir sensör gibi davranır.

3.2.4 Termistörler

Termistör, elektrik özdirenci sıcaklıktaki artış ile birlikte değişen (genellikle azalan) bir malzeme (genelde bir yarı iletken veya çimento bazlı bir malzeme) içeren termoelektrik bir aygıttır. Bu algılayıcılar küçük sıcaklık değişikliklerine karşı duyarlıdır. Düşük sıcaklık uygulamaları için (sınırlı sıcaklık aralıklarında) uygundur.

Daha önce deformasyon sezici olarak tanımlanan karbon fiber takviyeli çimento matrisli malzemeler aynı zamanda bir termistördür. Çünkü onun özdirenci, artan sıcaklıkla geri dönüşümlü olarak azalır. Termistörün hassasiyeti fibersiz daha düşüktür. Termistör etki olarak tanımlanan elektrik özdirencin ısıya bağlı değişim göstermesi, iletim mekanizması ve özellikle iletkenlik için aktivasyon enerjisi hakkında temel bilgiler verir.

3.2.5 Termoelektrikli Aletler

Akıllı beton üzerine yapılan son çalışmalar, karbon fiber takviyeli betonun Seebeck etkisinden dolayı, sıcaklığı da sezebileceğini göstermiştir. Termal olarak kendi kendini izleme yeteneği yoluyla, baraj gibi ağır kütle beton yapılarda önemli olan çekme gerilmelerindeki değişim gözlenebilir ve barajlarda soğutma olayı gerçekleştirilebilir [19] .

Seebeck etkisi; ısıl çift (termocouple) ve termoelektriksel enerji üretiminin temelini oluşturan bir termoelektrik etkidir. Bu etki, bir malzemede iki uç arasında bir sıcaklık farkı meydana getirmek suretiyle, yük taşıyıcılarının sıcak uçtan soğuk uca doğru hareketini içerirler. Bu durum iki nokta arasında potansiyel fark oluşturur.

Seebeck katsayısı olarak da adlandırılan termoelektrik güç (S), (1) nolu formül ile tanımlanmaktadır [28].

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (1)$$

Formülde S, seebeck katsayısını, ΔV iki uç arasındaki potansiyel farkını, ΔT ise uçlar arasındaki sıcaklık farkını ifade etmektedir.

Genelde katılarda termoelektrik güç ölçümü, onların elektrik iletim mekanizmaları hakkında bir fikir vermesi bakımından önemlidir. Eğer çoğunlukla taşıyıcılar elektron ise termoelektrik güç negatiftir ve malzeme n tipi yarı iletkenidir.

$$S = \frac{dV}{dT} \frac{dx}{dx} < 0 \quad (\text{n tipi}) \quad (2)$$

Eğer çoğunlukla taşıyıcılar boşluklar ise termoelektrik güç pozitifdir ve malzeme p tipi yarı iletkenidir.

$$S = \frac{dV}{dT} \frac{dx}{dx} > 0 \quad (\text{p tipi}) \quad (3)$$

Karbon fiber takviyeli çimento hamurundaki Seebeck etkisi çimento hamurundaki elektronlar ve/veya iyonlar ile fiberlerdeki pozitif boşlukların hareketi ile meydana gelen bir olaydır. Hem iyon ve/veya elektronların hem de boşlukların katkısı, geçirgenlik eşiğinde eşittir. Geçirgenlik eşiği, fiber miktarının çimento ağırlığının %0,5 - %1,0 arasında olduğu duruma verilen isimdir [22].

Çimento, iletkenliği çok az olmakla birlikte, n tipi bir yarı iletkenidir. Yani iletkenlik elektronların hareketi ile gerçekleşir [29]. Çimentoya etkili bir miktarda kısa karbon fiber ilavesiyle p tipi bir kompozit elde edilir [30]. P tipi yarı iletkenlerde iletkenlik boşluk hareketi ile olur. Bunu sağlayan karbon fiberdir. Çünkü karbon fiberler, üretim sürecinde 600–1750 °C lik bir işleme tabi tutulurlar. Bu karbonizasyon süreci, valans bandında pozitif boşlukların artması ile son bulur [31]. Çimentoya kısa çelik fiber ilave edildiğinde ise daha kuvvetli bir n tipi kompozit elde edilmiş olur. Çünkü ilave edilen çelik fiberlerde iletkenlik elektron hareketi ile gerçekleşir.

Hiçbir katkı olmadan, sadece su ve çimentodan meydana getirilen çimento hamuru için seebeck katsayısı $-2 \mu V / ^\circ C$ dır. Geçirgenlik eşliğinin üstünde ve altında, karbon fiber miktarının artmasıyla boşluk katkısı monoton bir şekilde artar ve seebeck katsayısı $+17 \mu V / ^\circ C$ ye ulaşır. Metalde bulunan serbest elektronlardan dolayı, örneğin çelik fiber takviyesi içeren çimento kompozitin termoelektrik gücü, fiber takviyesiz çimento kompozitin termoelektrik gücünden daha negatiftir. Bu negatiflik yaklaşık olarak $-68 \mu V / ^\circ C$ kadardır [22].

3.3 Akıllı Betonun Kullanıldığı Yerler

Akıllı betonun bu kendi kendini izleme olayı, başka bir deyişle deformasyon ve hasarı sezme olayı, bilim adamlarını bu malzemeden, nerelerde faydalanabilecekleri konusunda araştırma yapmaya yöneltmiştir.

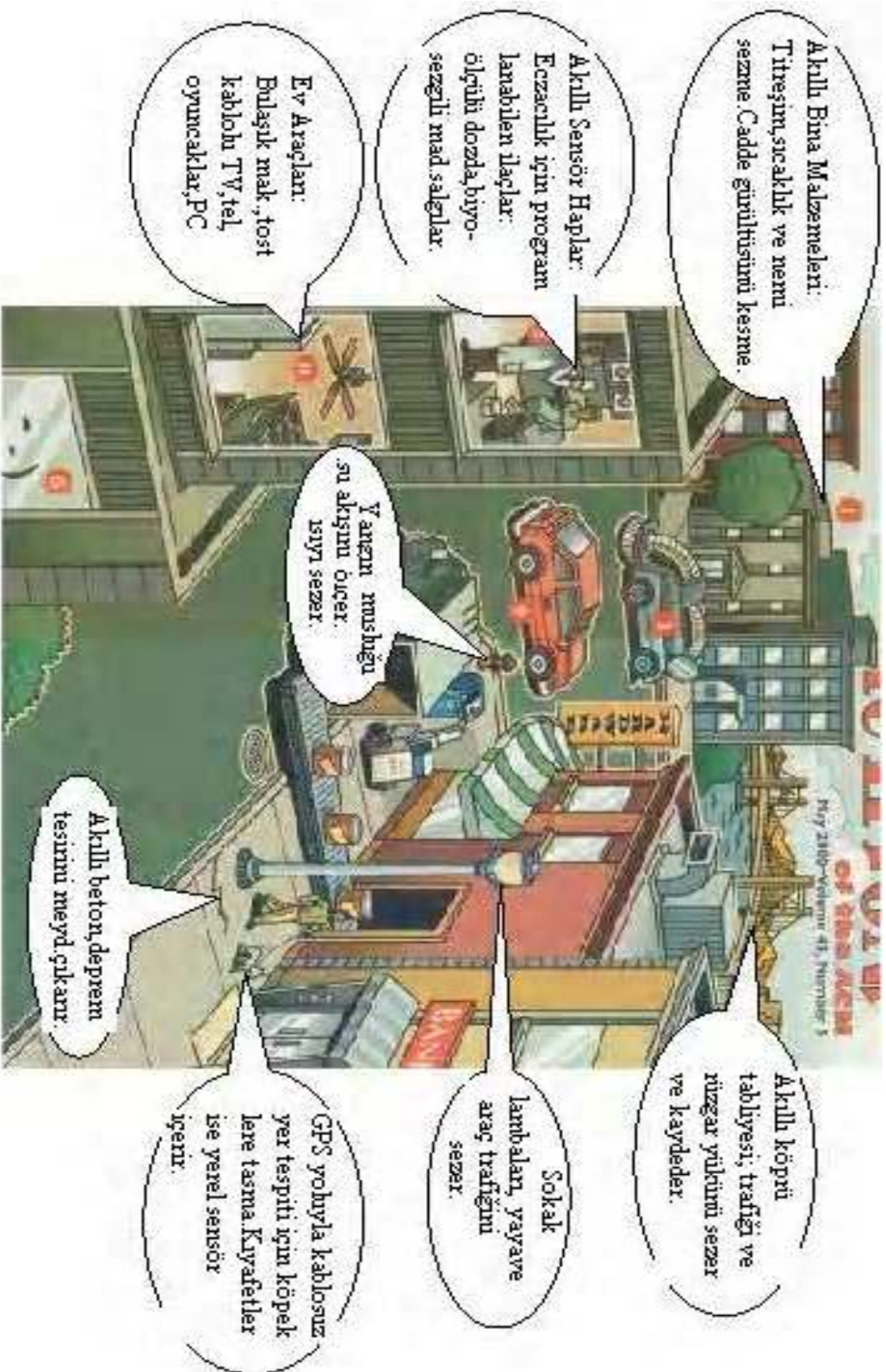
Akıllı betonla yapılmış yollar, araçların nerede olduğunu, hızını ve ağırlığını belirlemektedir. Araçlar, karayolu üzerinde seyir halindeyken bu bilgileri öğrenmemiz akıllı beton sayesinde olmaktadır. Araştırmacılar, tüm akıllı beton testlerini değerlendirerek elektrik direnci ile ağırlık arasındaki ilişkiyi irdelenmişlerdir. Laboratuvarında, anayolda seyir halindeki bir kamyonun hareketini ve ağırlığının eşini yapmışlar ve biri akıllı betondan üretilmiş olan iki adet beton rulonun silindirik yan yüzleri arasında dönen bir araba lastiği ile bir deney düzeneği hazırlamışlardır. Akıllı betondan yapılmış olan ruloya yapılan elektrik bağlantısı ile tekerlek arada döndüğü müddetçe yüzeye yakın betonun elektrik direncindeki değişimi ölçtükten sonra bu elektriksel değişimleri değerlendirerek hem lastikteki yükün hem de dönme hızının kontrol edilebileceğini belirtmişlerdir [4].

Akıllı beton, binalardaki titreşimi azaltmak için de kullanılabilir. Akıllı beton ile inşa edilmiş yapılarda akıllı beton; bu yapıları deprem sırasında gözlemleyerek riski azaltmak için kullanılabilmesi gibi, deprem sonrasında yapının kullanılacak düzeyde olup olmayacağı hakkında bir fikir vereceği için uzmanlar, yapıların zamanında hizmet dışı bırakılmasına bu sayede karar verebilirler.

Karbon fiberli beton üzerinde yapılan çalışmalar bu kompozit malzemenin sıcaklığı da sezebildiğini göstermektedir. Barajlarda, çimentonun hidrasyonu, güneş ışınları, gölette biriken suyun ve havanın sıcaklık değişimi, yapının çatlamasına neden olabilecek çekme gerilmeleri üretir. Bu nedenle barajların güvenliğinin temini için, betonun kendi kendini izleme kabiliyetine sahip olması gereklidir. Karbon fiber takviyeli betonun ısı iletkenliği düşük olduğundan dolayı, ısıya karşı tepki süresi uzundur. Sıcaklık değişiminin düşük olduğu baraj ve köprü gibi ağır beton kütleli yapılarda CFRC ana kütleyle gömülü termal sensörler olarak kullanılarak yapının bünyesinde çatlak meydana getirebilecek küçük sıcaklık değişimleri sezilebilir [30].

Betondan imal edilmiş yapılar, kullanım ömrü süresince gerek hidrasyonun uzun süre devam etmesi ile gerekse mevsimsel şartlardan dolayı bünyelerindeki suyu devamlı kaybetmektedirler. İlk kür yaşlarında hidrasyondan sırasında bünyelerinde oluşan iyonlardan dolayı betonun bir miktar iletken olduğu söylenebilir. Fakat kullanım ömrü süresince bu iletkenlik değeri yok denecek kadar düşmektedir.

Akıllı malzemelerin genel kullanım alanlarını gösteren şematik resim Şekil 3.5'te verilmiştir [32].



Şekil 3.4 Akıllı Malzemelerin Genel Kullanım Alanları

4. AKILLI BETON ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

4.1 Literatür Araştırması

Literatürdeki bütün çalışmalarda, karbon fiber takviyesinin sezme kabiliyetine yaptığı genel etkiler değişik boyutları ile incelenmiştir.

Chen ve Chung [1], bir çalışmalarında akıllı betonun dıştan ve içten olmak üzere temel olarak iki kısma ayrılabilceğini, eğer kısa karbon fiber beton içine katılıyorsa bu yapının içten akıllı beton olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada numuneler üzerine basınç yüklemesi, ya kırılma gerilmesine kadar tek çevrimde yada kırılma gerilmesinin 1/3 oranına eşit bir basınç değerine kadar çoklu çevrimler halinde yapılmıştır. Sonuçta tek çevrim uygulandığı zaman hazırlanan fibersiz numuneler basınç altında kırılmaya kadar, ya herhangi bir direnç değişimi göstermemiş veya ihmal edilecek kadar küçük bir değişim sergilemişler ve numunenin kırılması ile birlikte oluşan çatlakların yerine numuneden daha yalıtkan olan havanın dolmasından dolayı, direncin aniden arttığını belirtmişlerdir. Fiberli numunelerin dirençlerinin ise kırılmaya kadar bir artış sergilediğini, kırılma ile birlikte ani olarak azaldığını gözlemişler ve bu durumu, fiberlerin kırılma sonrası birbirine temas etmesinden kaynaklandığı şeklinde yorumlamışlardır.

Fibersiz harçlara çevrimli basınç yükü uygulanmış ve çökeltici türü ne olursa olsun çevrimler sırasında dirençte bir değişim gözlenmemiştir. Fiberli harçlarda ise durum biraz daha farklılık göstermiştir. İlk basınç yüklemesi sırasında, direnç geri dönüşümsüz olarak artmıştır. Başka bir deyişle iletkenlik azalmıştır. İkinci ve bunu takip eden yüklemelerde ise, direnç geri dönüşümlü olarak azalmış yani iletkenlik artmıştır. Yükü kaldırma sırasında ise hem ilk hem de daha sonraki çevrimlerde ise, direnç geri dönüşümlü olarak artmış yani iletkenlik azalmıştır.

Dirençteki geri dönüşümsüz artma, çatlak oluşumundan meydana gelmiştir. Numune ilk kez yüklenince içinde çatlaklar oluşmuş ve bundan dolayı da direnç geri dönüşümsüz olarak artmıştır. Yani iletkenlikte kalıcı bir azalma meydana gelmiştir. Yükün numune üzerinden kaldırılmasıyla, dirençte meydana gelen ve geri dönüşümlü olan artış da oluşan mikro çatlakların açılmasından kaynaklanmaktadır. Aynı numuneye ikinci bir çevrimle tekrar yük uygulananınca bu kez açılmış olan çatlaklar tekrar kapanmış ve böylece direnç geri dönüşümlü olarak azalmış yani iletkenlik artmıştır. Sonuçta; direnç değişimi ile gerilme arasında lineere yakın bir değişim söz konusu ise, bu malzemenin çatlakların tahribatsız izlenmesinde kullanılabilir bir malzeme olduğunu vurgulamışlardır [1,33].

Ayrıca harç içerisinde fiberi homojen olarak dağıtıp çökeltmek için iyi düzeyde bir iletkenlik meydana getirmek için kullanılabilir en uygun çökeltici maddeyi yine bu çalışmada belirlemişlerdir. Latex, metilselüloz ve silis dumanını çökeltici olarak kullanmış ve maliyet

açısından değerlendirildiğinde, ucuz olmasından ötürü metilselülozun çökeltici olarak kullanılabilceği sonucunu elde etmişlerdir[1]. Yine Fu ve diğ. [34] yapmış oldukları bir çalışmada fiberleri çökeltmek için latex, metilselüloz ve silis dumanını kullanmışlar, fakat bu kez bu maddeleri ilave edildikleri karbon fiber takviyeli harcın deformasyon sezme özelliğinde meydana getirmiş oldukları değişime göre kıyaslamışlardır. Sonuç olarak, çökeltici olarak latex kullanılan fiber takviyeli harcın, silis dumanı ve metilselüloz kullanılanlardan daha az bir deformasyon sezme hassasiyeti olduğunu tespit etmişlerdir. Chung [35], kompozit içerisindeki fiberin çökmesi ne kadar iyi olursa, elektrik iletkenliğinin buna paralel olarak da akıllılığının da o kadar iyi olacağını belirtmiştir. Bu amaçla değişik içeriklere sahip olan kompozitlerdeki fiber çökelmelerini kompozitlerin elektrik dirençlerini kıyaslayarak yorumlamış; silis dumanının çökelmeye yardımcı bir katkı olarak kullanılabilceğini ve bunun da kompozitin elektrik iletkenliğini az bir miktar arttırdığını söylemiştir.

Banthia ve diğ. [36], tarafından iletken mikro fiber takviyeli çimento hamurunun elektrik direncini ölçülmüştür. Karbon fiber ve çelik fiber olmak üzere iki çeşit mikro fiber kullanmış; bunlar arasındaki farklılıkları gözlemlemekle birlikte, kompozit içindeki hacimce fiber miktarını değiştirerek bu parametrenin etkisini de incelemiştir. Ölçümler sırasında yöntem olarak yüksek alternatif akım kullanılmıştır. Sonuçta, tek başına karbon fiber, çelik fibere göre daha az iletken olmasına rağmen; karbon fiber takviyeli çimento harcının çelik fiberli den daha fazla iletken olduğu tespit edilmiştir. Çünkü karbon fiberler çelik fiberlere göre kompozit içerisinde daha homojen dağılmışlardır. Kompozit için kullanılan fiberin çok yüksek iletkenlikte olmasından çok, önemli olan kullanılan fiberin kompozit içerisindeki boyut ve dağılımıdır.

Fu ve diğ. [34], alternatif akım kullanarak karbon fiber takviyeli harcın kendini izleme kabiliyetini gözlemiştir. Empedans ölçümleri sırasında 2 prob metodu kullanılmıştır. Elektrik bağlantısını teşkil etmek için iki paslanmaz çelik plaka harç içine gömülmüştür. Numunelerin (R) direnç ve (X) reaktans değerini bularak (Z) empedans değerini belirlemiştir. Fibersiz harçlarda direnç ve reaktansa herhangi bir değişim gözlenmezken, karbon fiber takviyeli harçlarda ise, reaktansın dirence göre daha hassas bir deformasyon indikatörü olduğu belirlenmiştir. Ayrıca alternatif akımın frekansının artırılması hem direnci hem de reaktansı düşürmüştür. Başka bir ifade ile frekans artırımı iletkenliği arttırmıştır. Alternatif akım ile yapılmış olan bu çalışma, doğru akım verileri ile mukayese edilmiş ve sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür. Alternatif akıma göre daha pratik olması ve maliyetinin biraz daha düşük olmasından dolayı doğru akım tavsiye edilmiştir.

Chen ve Chung [3], karbon fiber takviyeli betonun sezme kabiliyetinin başarısı için en kritik konunun fiberlerin homojen dağılımı için uygun olan çökeltme tekniğini belirlemek olduğunu söylemişler ve bunu belirlemek için iki çeşit karıştırma yöntemini mukayese

etmişlerdir. Birincisi, ince agrega, çimento ve fiberlerin kuru halde karıştırılmasıyla meydana gelen kuru karışım (dry mix), diğeri ise su içerisinde çözdürülen çökelticinin içine fiberlerin koyularak karıştırılması ve bu sulu harcın ince agrega ve çimentoya karıştırılması ile elde edilen ıslak karışım (wet mix) dir. Islak karışımın daha pratik ve daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Özellikle çökeltici ve köpük önleyici kullanıldığında ıslak karışım tekniği kullanarak fiberleri çökeltmenin daha etkili olduğunu vurgulamışlardır. Yapmış oldukları çalışma ile fiberin betonun donma-çözünme dayanımı ve özellikle eğilme dayanımını arttırdığını; 3.0, 5.1 ve 12.7 mm genişliklerinde fiberlerle hazırlanmış oldukları beton numuneler üzerinde yapmış oldukları iletkenlik ölçümleri sonucunda, karışımlarda kullanılacak optimum fiber genişliğinin 5.1 mm olarak alınabileceğini belirlemişlerdir. Maliyet açısından inceleme yapıldığında ise çimento ağırlığının % 0.5'i kadar fiber ilavesi maliyeti % 39, çimento ağırlığının % 1.0'i kadar fiber ilavesi ise % 56 arttırdığı belirlenmiştir. Hem bu açıdan hem de fazla fiber kullanımının karıştırma ve çökeltme işlemini güçleştirme bakımından, çimento ağırlığının % 0.5'i kadar fiber kullanılmasının optimum olacağını belirlemişlerdir.

Chen ve Chung [3], kullanılan agreganın max tane çapının akıllılık üzerine ne gibi bir etki yaptığını gözlemek için, iki tip harç ve iki tip beton karışımı üzerinde bir seri çalışma yapmışlardır. Ve agrega boyut etkisinin akıllılık üzerine oldukça küçük bir etkisi olduğunu belirleyerek, karbon fiber takviyeli beton teknolojisinin genellikle yol üst kaplaması olarak kullanılan kaba agregalı betonlarda da kullanılabileceğini vurgulamışlardır. Benzer bir çalışma, hafif agrega kullanılarak yapılmış ve bunda sadece fiberlerin kümeleşmemesi için kullanılabilecek optimum agrega tane büyüklüğü araştırılmıştır. Agreganın maksimum tane boyutunun artmasının fiberlerin üniform dağılımını olumsuz etkilediği ve toplamdaki agrega hacminin artmasının da fiberlerde kümelenme meydana getirdiği sonucuna varılmıştır [37].

Fiber takviyesinin betonun basınç dayanımlarına etkileri araştırılmış; fiber ilave edilmesi karışım içerisindeki hava muhtevasının artmasına neden olacağından silis dumanı ve kimyasal katkıları ilave edilmediği müddetçe, betonun basınç dayanımının düştüğü belirlenmiştir[3].

Yang ve Chung [38], karbon fiberli çimento harcında latex kullanımını araştırmışlar ve latexin bir köpük önleyici ile birlikte çökeltici olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Yalnız belli bir orandan fazla latex kullanılması durumunda, numune çimento matrisli kompozit yerine polimer matrisli kompozit özellikleri gösterdiği için, latex oranının uygun seçilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Basınç dayanımı açısından incelediklerinde; sadece latex ve köpük kesici ilavesinin basınç dayanımını arttırdığını, bunlarla birlikte fiber de kullanılmasının belirli bir fiber yüzdesinden sonra dayanımı düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Elektriksel iletkenlik açısından incelediklerinde ise; sadece latex ilavesinin elektrik iletkenliğini çok fazla

etkilemediğini, fakat fiber ilavesi ile iletkenliğin arttığını gözlemlemişlerdir. Maliyet açısından latex ile bir diğer çökeltici olan metilselülozu kıyaslamışlar ve latex ağırlıkça metilselülozdan çok fazla oranda kullanıldığı için latexli karbon fiber takviyeli harcın maliyetinin metilselülozlu karbon fiber takviyeli harcından daha fazla olduğu sonucuna varmışlardır.

Yine Yang ve Chung [38], latexli karbon fiberli harçların eğilme testi sonrasında kırık yüzeylerinin SEM fotoğraflarını incelemişlerdir. Fibersiz ve latexsiz numunelerde, kum ve çimento arasında zayıf bir bağ teşkil ettiğini görürken; sadece latex bulunan harçta kum çimento arayüzeyinde ve çatlak bölgelerinde iğne formunda hidrate çimento kristalleri ve yama formunda polimerler görmüşlerdir. Latexsiz sadece fiber içeren harcın kırık yüzey fotoğrafında fiberlerin çıktığı yerde düz bir iz bırakarak sıyrıldığını aynı zamanda da sıyrılan fiberlerin yüzeylerinin de oldukça temiz olduğu gözlemlemişlerdir. Bu olayı fiber ile çimento matrisi arasında meydana gelen bağın zayıf olmasına bağlamışlardır Buna karşın hem fiberli hem de latexli harcın SEM fotoğrafında ise fiberlerin kısmen de olsa bir polimer tabaka ile çevrelendiğini ve daha az fiberin sıyrılarak çıktığını görmüşlerdir. Ayrıca sıyrılan fiberlerin yüzeylerinin parçacıkların yapışık olduğunu da belirtmişlerdir. Tüm bu gözlemledikleri farklılıkları, latexin çimento ile fiber arasındaki bağı kuvvetlendirdiği sonucuna bağlamışlardır.

Bir başka çalışmada, Chen ve diğ.[25] ile Chiarello ve Zinno [26], klasik geçirgenlik teorisine dayanarak karbon fiber takviyeli çimento esaslı kompozitlerin elektrik iletkenliğindeki geçirgenlik eşliğinin nasıl belirleneceğini analiz etmiş ve tartışmışlardır. Kompozitin elektrik iletkenliğini artan fiber hacim oranına bağlı olarak incelemişler ve iletkenliğin fiber hacim oranı ile doğru orantılı olarak arttığını belirtmişlerdir. Ancak iletkenlik artış sürecinde, iletkenliğin keskin bir artış yaptığı bir bölge olduğunu bularak bu dar bölgeyi geçirgenlik değişim zonu olarak tanımlamışlardır. Bu bölgenin dışındaki fiber yüzdelерinde iletkenliğin marjinal olarak arttığını belirlemişlerdir.

Ayrıca, nemli bir beton numunenin biri, iletken fazdaki serbest elektronların hareketinden oluşan elektronik iletkenlik değeri boşluk çözeltilisindeki iyon hareketinden dolayı oluşan elektrolitik iletkenlik olan 2 çeşit elektrik iletme mekanizmasının olduğu ve temelde prensip olarak elektrolitik iletkenliğin özellikle ölçümler sırasında alternatif akım kullanılarak ihmal edilip elektronik iletkenliğin dikkate alındığı literatürde belirtilmiştir [25,26].

Sun ve diğ.[31], karbon fiber takviyeli betonun boşluk iletme olayı üzerine çalışmışlardır. Fiber takviyeli ve takviyesiz olan betonlarda TEF termoelektrik kuvvet ölçümleri yapmışlar fiberli betonlarda TEF gözlenirken, fibersizlerde ise böyle bir şey gözlenmediğini ve karbon fiberin pozitif boşluk hareketinden dolayı ılık uç negatif elektrot olurken, soğuk ucun ise TEF'in pozitif elektrotu olduğunu belirtmişlerdir. Temelde iyonik(elektrolitik) ve elektronik iletkenlikten oluşan karbon fiber takviyeli betonun iletkenlik mekanizmasına boşluk

iletkenliğinin katkıda bulunduğunu söyleyerek, karbon fiber takviyeli betonun iletkenliğinin hesaplanmasında;

$$\sigma = \sigma_i + \sigma_e + \sigma_h \quad (4)$$

formülünün kullanılmasını önermişlerdir. Burada; σ_i = iyonik iletkenlik, σ_e = elektronik iletkenlik, σ_h = boşluk iletkenliğidir.

Betonda istenilen iletkenlik değerine erişmek ve böylelikle betona kendi kendini izleme kabiliyeti kazandırmak için hacimce fiber yüzdesini çok fazla arttırmanın gereksiz olduğu bunun yerine fiber genişliğini arttırmanın maliyet açısından daha mantıklı olduğu belirtilmiştir [26]. Ayrıca geçirgenlik eşiğinin hidratasyon zamanından etkilenmediği, 4 prob ile ölçümün 2 proba kıyasla daha hassas sonuçlar verdiği de vurgulanmaktadır [26].

Fu ve Chung [39], çimento hamurunun spesifik ısı ve termal iletkenliği üzerinde latex, metilselüloz, silis dumanı ve karbon fiberin etkilerini incelemişlerdir. Termal iletkenliğin düşük olması yapılarda arzu edilen bir özellik olduğunu belirterek; latex, metilselüloz ve silis dumanının termal iletkenliği azaltmada etkili olduğunu, aynı zamanda karbon fiberin ise termal iletkenliği arttırmadığını tespit etmişlerdir. Ayrıca aynı çalışmada, silis dumanı ve latexin betonun elektrik direncini arttırdığını buna karşın karbon fiberin ise beton elektrik direncini düşürdüğünü vurgulamışlardır.

Wen ve Chung [23], yapmış oldukları bu çalışmada ise karbon fiber takviyeli çimentonun elektronik polarizasyonunu incelemişlerdir. Kutuplaşma anlamına da gelen polarizasyonun pozitif ve negatif eşit olmamasından kaynaklandığını belirterek; elektrik alana maruz dielektrik malzemelerde meydana geldiğini söylemişlerdir. Elektrik direnç ölçümü sırasında meydana gelen elektrik alandan dolayı malzemede oluşan polarizasyonun, ölçülen direncin artmasına neden olduğundan hem ölçüm işlemini zorlaştırdığını hem de istenmeyen bir durum olduğunu belirtmektedirler. Malzeme ne kadar iletken olursa polarize olma eğilimi o kadar az olacağından, iletken karbon fiber takviyesinin çimento harcının polarizasyonunu azalttığını belirlemişlerdir. Ama buna rağmen yine de karbon fiber takviyeli çimento harcında bir miktar polarizasyon olur. Bu olay deformasyon sezen bir malzeme açısından dikkat gerektiren bir konudur. Ayrıca Latexin silis dumanından daha fazla polarizasyona neden olmasından dolayı, çökeltici olarak silis dumanı kullanılmasının daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır. Çalışmada, numunenin yüksek direncinden dolayı, 2 prob metodu, 4 prob ile benzer sonuçları vermiştir.

Chen ve Chung [40], akıllı yapılar için, karbon fiber takviyeli betonun bir elektrik temas malzemesi olarak kullanılıp kullanılmayacağını araştırmışlardır. Numunelerin temas dirençlerini ölçmek için problemleri mutlaka betona gömmenin şart olmadığına karar vermişler, problemleri iletken

gümüş boya sürerek veya çok düşük bir basınç uygulayarak CFRC' ye temas ettirmenin temas direncini ölçmek için yeterli olacağını belirtmişlerdir.

Sun ve diğ.[19], karbon fiber takviyeli betonun çekme ve basıncın yanı sıra, sıcaklığa da tepki verebilen içten akıllı bir malzeme olduğunu gösteren deneysel çalışmalar yapmışlardır. Termal kendini izleme kabiliyetinin Seebeck Etkisi olarak adlandırılan "Farklı iki iletken bir devre oluşturuyorsa ve devrenin iki noktası arasında bir sıcaklık farkı var ise bu devreden bir akım geçer." prensibi ile ilgili olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca Cao ve Chung [41], çimento esaslı malzemelerin seebeck etkisi üzerinde nemin rolünü araştırmışlar ve sonuçta nem kaybının elektrik direncini arttırırken, mutlak termoelektrik güç üzerinde fazla bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir.

Sun ve diğ.[2], küçük karbon fiber takviyeli beton sensörlerle teşkil edilen akıllı beton kirişin beton içindeki sıcaklığı ve ısı transferi olayını gözleyebileceğini yapmış oldukları deneylerle göstermişlerdir. Ayrıca karbon fiber takviyeli betonun hem termal sensör hem de termal aktuatör olarak kullanılabilmesine bu çalışmada karar vermişlerdir.

Sun ve diğ.[30], çimentonun hidrasyonu ve güneş ışınlarından dolayı oluşan sıcaklık farkının, beton yapının çatlamasına neden olan çekme gerilmeleri meydana getirebildiği baraj gibi kütle beton yapılarda termal yükün çok önemli olduğunu belirterek, karbon fiber takviyeli betonda sıcaklık farkı ile termoelektrik kuvvet (TEF- thermoelectric force) arasında lineer bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca karbon fiber takviyeli betondaki fiber miktarını değiştirerek numunelerde meydana gelecek termoelektrik geçirgenlik sınırını ve betona akıllılık vasfı verecek optimum fiber miktarını tespit etmişlerdir.

Sun ve diğ [42], dinamik yük altında klasik çimento hamuru ile CFRC' nin piezoelektrik özelliklerini incelemişler; fibersiz harcın da piezoelektrik özellik gösterdiğini tespit etmişlerdir. Bu tespitten hareketle, oluşan piezoelektrik etkiden çimentodaki takviye fiberin değil, hidrate olmuş çimento hamurunun özel mikroyapısının sorumlu olduğu yorumunu yapmışlardır.

Wen ve Chung [18], karbon fiber takviyeli çimentonun deformasyon sezici tabaka olarak da kullanılabilmesini belirtmişlerdir. Büyük ebatlarda hazırlanacak olan numunelerin tümünü karbon fiberli olarak tertip etmenin maliyet açısından sıkıntı doğuracağını düşünerek; numunelerin çekme veya basınca çalışan yüzlerine ince bir tabaka halinde fiberli beton dökülmesinin deformasyon sezme için yeterli olacağını deneyler sonucunda göstermişlerdir.

Chung ve Wen [43], tek eksenli çekme gerilmesine maruz kalan karbon fiberli çimento hamurunun hem enine hem de boyuna öz dirençlerinde geri dönüşümlü artışların olduğunu; buna karşın fibersiz numunelerde ise bu direnç artışının daha küçük ve geri dönüşümün daha az olduğunu tespit etmişlerdir.

Cao ve Chung [44], karbon fiberin harç içinde çökmesinde kullanılabilir çöktürücü çeşitlerini araştırmışlardır. Akrilik kökenli çöktürücülerin fiberli betona yüksek çekme dayanımı ve çekme duktilitesi kazandırmada çok etkili karışımlar olduğunu belirlemişlerdir.

Yang [45], karbon fiber takviyeli betonda fiberlerin çökme metodlarını araştırmış ve fiber çöktürücülerin etkisinin en iyi görülebildiği yöntemin simülasyon deneyi olduğunu belirtmiştir.

Fu ve diğ.[46], ozonla işlem görmüş karbon fiberlerle takviye edilmiş çimentonun deformasyon sezme kabiliyetini araştırmışlar ve çalışma sonunda fiberin ozonla işlem görmüş olmasının fiber ile onu çevreleyen çimento hamuru arasındaki bağ mukavemetini arttırdığını tespit etmişlerdir. Ayrıca çekme mukavemetinin de ozonla işlem görmüş fiberli numunelerde ozonsuz olanlardan daha yüksek olduğu belirlemişlerdir. Bu arada ozonun, fiberin kendi morfolojisine, çekme mukavemetine ve hacim elektrik öz direncine de olumsuz bir etki yapmadığını deneyler sonucunda tespit etmişlerdir.

Fu ve Chung [27], çimento ile kullanılan takviye fiber arasındaki bağ dayanımının kuvvetliliği ile, temas elektrik direncinin değişimi arasında bir ilişki kurmaya çalışmışlardır. Eğer takviye olarak çelik fiber kullanılırsa, artan bağ dayanımı ile temas elektrik direncin arttığını, karbon fiber kullanılırsa, artan bağ dayanımı ile temas elektrik direncin azaldığını tespit etmişlerdir. Bu sonucu çelik fiber etrafında mevcut olan fakat karbon fiber etrafında olmayan oksit film tabakasının çimento ile fiber arasındaki bağlanmaya yardımcı olurken, diğer taraftan da yüksek hacim elektrik direncinden dolayı temas direncinin arttırmasına bağlamışlardır. Karbon fiberli harçtaki temas elektrik direncindeki düşüşün ise; fiber ile çimento arasındaki elektrik olarak yalıtkan özelliğe sahip hava boşluklarının fazlalığı sonucu oluşan zayıf bağlanmadan kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Bontea ve diğ. [47], karbon fiber takviyeli betonun hem basınç deformasyonunu hem de elastik bölgede bile olsa artan gerilme altında kendi hasarını sezebildiğini, elektrik direncinde oluşan değişimi gözleyerek tespit etmişlerdir. Bunu numunelerin elektrik direncinde geri dönüşümlü bir düşme varsa basınç deformasyonunun olduğu, eğer elektrik direnç artmaya başladıysa artık numunede hasarların başladığı şeklinde yorumlamışlardır. Betonda oluşan hasarın, genellikle gözle görülmeyecek kadar küçük çatlaklardan meydana gelen küçük hasar ile gözle görülecek büyüklükteki çatlaklardan meydana gelen büyük hasar şeklinde iki kısma ayrılabilirliğini ve bunların izlenmesinin tamamen tahribatsız bir yöntem olan elektrik direnç ölçümü yöntemi kullanılarak yapılabileceğini açıklamışlardır. Uygulanan bir çevrimli basınç yükünde, her çevrimden sonra dirençte geri dönüşümlü bir artış var ise hasarın henüz küçük hasar olarak adlandırılabilirliğini, fakat dirençte geri dönüşümsüz bir artış oluyorsa bu durumda da hasarın büyük hasar olarak adlandırılacağını vurgulamışlardır.

Fu ve Chung [48], k r s renin karbon fiber takviyeli harcın kendini izleme davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlar, bunu yaparken numunelere çevrimli basınç gerilmesi uygulamışlar ve elektrik direncindeki değişim farklılıklarına göre sonuçları değerlendirmişlerdir. 7 günlük kür edilen numunenin ilk yüklemesinde direnç monolitik olarak artarken 14 ve 28 günlük numunelerde ise direnç monolitik olarak azalmıştır.

Reza ve diğ.[49], karbon fiberli  imento matrisli kompozitlerin basınç altında sergilediği akıllı davranışı incelemişlerdir. Büyük bir çatlak gelişmediği müddetçe tekrarlı basınç yüklemesinden dolayı dirençte meydana gelen düşmenin geri dönüşümlü olacağını belirtmişlerdir.

Chen ve Chung [50],  imento matrisli kompozitlerin iletkenliğini arttırmanın iletken karbon fiber katılarak mümkün olabileceğini; buna ilave olarak özellikle düşük fiber hacim oranlarında, iletken olmayan matrise silis dumanı gibi yine iletken olmayan ikinci bir ince malzeme katmanın iletkenliği arttıracağını savunmuşlardır. Fibersizken  imento harcına silis dumanı ilavesinin iletkenliği azalttığını; fiber var iken ise silis dumanının,  okeltici etki yaparak homojen dağılımı sağladığı için kompozitin iletkenliği arttırdığını belirtmişlerdir.

Wen ve Chung [51], karbon fiberin kalitesinin(sınıfının-grade) de karbon fiber takviyeli çimentonun elektriksel davranışını etkilediğini, amorf veya kristal yapıda olmasının sonuçları değiştirebileceğini vurgulamışlardır.

Shi ve Chung [4], tüm akıllı beton testlerini değerlendirerek elektrik direnci ile ağırlık arasındaki ilişkiyi irdelemişlerdir. Laboratuarda, anayolda seyir halindeki bir kamyonun hareketinin ve ağırlığının bir modelini yapmışlar ve biri akılı betondan üretilmiş olan iki beton rulo silindirik yan yüzleri arasında dönen bir araba lastiği ile bir deney düzeneği hazırlamışlardır. Akıllı betondan yapılmış olan ruloya yapılan elektrik bağlantısı ile tekerlek arada döndüğü müddetçe y zeyeye yakın betonun elektrik direncindeki değişimi ölçtükten sonra bu elektriksel değişimleri değerlendirerek hem lastikteki yükün hem de dönme hızının kontrol edilebileceğini belirtmişlerdir.

Kayali ve diğ.[52], diğer çalışmalardan farklı olarak ana matris olarak hafif agregalı beton ve takviye fiber olarak da  elik ve polipropilen fiber kullanmış ve bu liflerin kompozitin basınç ve indirekt çekme dayanımı, kırılma ve elastisite modülü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.  elik fiberlerin düktilitede artışa neden olduğunu belirtmişlerdir.

Reza ve diğ.[53], karbon fiber ile takviye edilmiş harcın çekme dayanımının fiber takviyesizinkinden 3 kat daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca aynı çalışmada, karbon fiber takviyeli betonun kırılma mekaniği çalışmalarında da kullanılabileceğini de vurgulamışlardır.

4.2 Bu Tez Çalışmasının Amacı ve Literatürdeki Yeri

Betonun akıllılık olarak adlandırılan kendi kendini izleme kabiliyeti ancak iletken olabilmesi ile mümkündür. Betonun iletken duruma getirmek ve bu iletkenliğin sürdürülebilirliğini temin etmek, ana matris içerisine iletkenliği matristen daha fazla olan bir malzeme ilave etmekle olur.

Klasik betonun akıllı beton olarak adlandırılabilmesi için çevreden gelen uyarılara özelliklerini veya şeklini değiştirerek cevap vermesi gerekmektedir. Deprem gibi çok büyük dinamik zorlanmalar, yapılar için çevre tarafından oluşturulmuş bir uyarı tipidir ve yapı bu uyarılara elektriksel iletkenliğini değiştirerek cevap verir. Yapılan deneysel çalışmalar bu çeşit zorlanmalarda fiber içermeyen betonlardan herhangi bir tepki alınmadığını göstermiştir [1]. Bu nedenle, kullanıldığı süreçte elektrik iletkenliği çok düşük seviyelere düşen beton, kısa karbon fiber takviyesi ile iletken hale getirilebilir. Böylece çevresel zorlanmalar karşısında göstereceği tepki, elektriksel iletkenlik değişiminin kaydedilmesi ile izlenebilir. Sonuçta bu kendi kendini izleme yapıda çevresel etkiler sırasında oluşan yapısal kusurların boyutları hakkında bilgi vermekle birlikte, zorlanmalar sonrasında da yapının kullanılabilirlik düzeyi hakkında bir fikir verir.

Akıllı betonun uygulamadaki en büyük zorluğu, tepkilerinin izlenmesi için bilgisayar destekli donanımlara gerek duyulmasıdır. Bunun uygulama açısından maliyet artırıcı bir unsur olduğu açık olmakla birlikte, deprem, yangın gibi afetlerde hasar ve can kaybını önlemede yapacağı olumlu katkı düşünüldüğünde bu maliyetin çok önemli olmadığı kolayca anlaşılabilir.

Yapılan literatür araştırması sonucunda, hafif agrega ile üretilen taşıyıcı hafif betonun akıllılık ya da dış etkilere tepki verme özelliği ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Ülkemizin bir deprem kuşağında yer aldığı düşünülürse, binalardaki kritik bölgelerde özellikle akıllı hafif beton kullanımının hem insan hem de ekonomik kayıpları önleme manasında değerlendirilmesi gereken bir yapı malzemesi olduğu anlaşılmaktadır.

Ülkemizde doğal hafif agrega kaynakları çok ve yaygın olmasına rağmen kullanımı oldukça düşüktür. Hafif agregalı taşıyıcı betonlarla üretilen yapının ölü yükünün azalması; böylece kesitlerde küçülme nedeniyle hacim genişlemesi ve donatı ekonomisi sağlanması, ayrıca ölü yükün azalmasına paralel olarak depremlerde can ve mal kaybının az olması gibi belli başlı nedenlerden ötürü, hafif agregalı taşıyıcı betonun dış zorlanmalara verdiği tepki olarak tarif edilen kendi kendini izleme özelliğinin incelenmesi bu çalışmanın başlıca amacını oluşturmaktadır.

Bununla birlikte ilimizde mevcut olan pomza agregasının kullanılması ile yörenin doğal kaynaklarının değerlendirilmesini teşvik etmek ise tezin dolaylı amacını oluşturmaktadır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışma, literatürde, birçok özellikleri araştırılmış olan karbon fiber takviyeli betonlardan farklı olarak, hafif ağırlıklı agrega kullanılarak karbon fiber takviyeli taşıyıcı hafif betonun gerilme ve sıcaklık altındaki davranışlarını araştırmak üzere yapılmıştır.

5.1 Malzeme

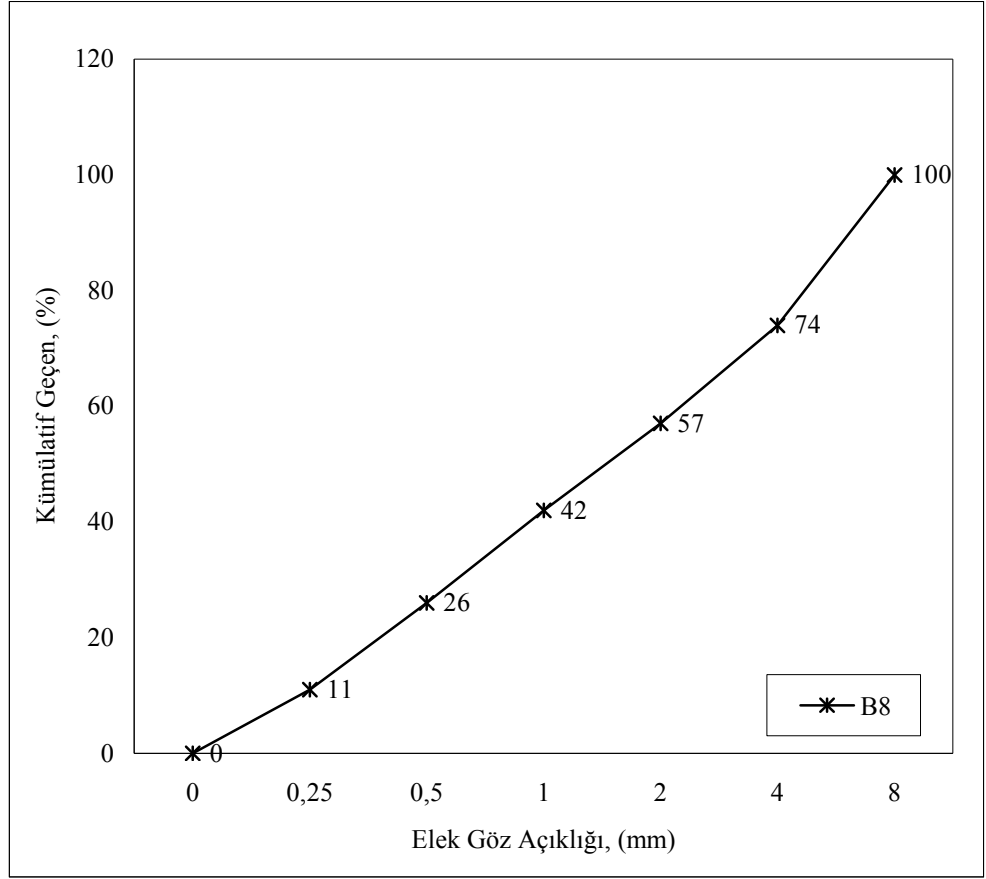
Numunelerin ana matrisi; su, çimento ve hafif agregadan oluşmaktadır. Karışım suyu olarak Elazığ şehir şebeke suyu ve ana bağlayıcı olarak da TS EN 197-1 standardında belirtilen CEM I 42,5 N Portland çimento kullanılmıştır [9]. Elazığ Altınova Çimento San. Ve Tic. A.Ş.'den temin edilen çimento, deney aşamasına kadar uygun koşullarda muhafaza edilmiş ve hazırlanacak tüm seriler aynı özelliklere sahip çimento ile üretilmiştir.

Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 5.1 de verilmiştir.

Tablo 5.1 Kullanılan Çimentonun Özellikleri

| (%) | CEM I 42,5 N |
|---------------------------------|--------------|
| SiO ₂ | 21.12 |
| Al ₂ O ₃ | 5.62 |
| Fe ₂ O ₃ | 3.24 |
| CaO | 62.94 |
| MgO | 2.73 |
| SO ₃ | 2.30 |
| Na ₂ O | - |
| K ₂ O | - |
| C | - |
| Blaine | 3382 |
| Kızdırma Kaybı | 1.78 |
| Yoğunluk, (gr/cm ³) | 3.10 |

Taşıyıcı hafif beton üretimi amaçlandığı için, agrega olarak hafif agrega kullanılmıştır. Elazığ Meryem Dağı civarından temin edilen bazik karakterli pomza agregası, $d_{max}= 8$ mm olacak şekilde elenmiş ve granülometrisi düzenlenmiştir. B8 granülometrik sınıfına giren agreganın granülometri eğrisi Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1 Kullanılan Agreganın Granülometrisi

Kullanılan bu pomza agregası gevşek birim ağırlık bakımından TS 1114 standardına uygun bir agregadır [54] (Tablo 5.2).

Tablo 5.2 Hafif Agreganın Birim Ağırlıkları

| Agrega Türü | Gevşek Birim Ağırlık (gr/cm^3) (max) (TS1114) | Gevşek Birim Ağırlık (gr/cm^3) (max) (Tezde Kullanılan) |
|------------------|--|--|
| İnce Agregası | 1,2 | 1,028 |
| İri Agregası | 1,0 | 0,912 |
| Karışık Agregası | 1,1 | 0,970 |

Yine TS EN 206-1 standardında, agreganın hafif agregası sınıfına girebilmesi için etüv kurusu tane yoğunluğunun $\leq 2 \text{ gr}/\text{cm}^3$ olması gerektiği belirtilmektedir. Tez çalışmasında kullanılan $1,88 \text{ gr}/\text{cm}^3$ tane yoğunluğuna sahip iri agregası ile, $1,69 \text{ gr}/\text{cm}^3$ tane yoğunluğuna sahip ince agregası, etüv kurusu tane yoğunluğu bakımından da standarda uymaktadır [11].

Uçucu kül ve silis dumanı gibi mineral katkı maddelerinin kullanılması ile karbon fiberli hafif betonun basınç ve çekme dayanımlarıyla, kendi kendini izleme kabiliyetinde meydana gelebilecek değişimler gözlemlendi.

TS EN 450-1 standardına göre, kullanılacak uçucu kül miktarı; uçucu kül/çimento $\leq 0,33$ (kütlece) olmalıdır [55]. Çalışmada kullanılan uçucu kül miktarı çimento ağırlığının %15'i kadardır ve standarda uymaktadır.

Kullanılacak silis dumanı miktarı; silis dumanı/çimento $\leq 0,11$ (kütlece) olmalıdır [11]. Yine çalışmada kullanılan silis dumanı miktarı çimento ağırlığının %10'u kadardır ve standarda uymaktadır.

Uçucu kül Manisa ili Soma ilçesinde bulunan Soma Termik Santrali'nden; silis dumanı ise, Antalya'da bulunan Eti Elektro Metalürji A.Ş.'den temin edilmiştir. Bu katkı maddeleri deney yapım aşamasına kadar torbalanmış ve laboratuvar şartlarında muhafaza edilmiştir. Kullanılan silis dumanı ve uçucu külün özellikleri Tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.3 Kullanılan Mineral Katkıların Özellikleri

| (%) | Silis Dumanı | Uçucu Kül |
|------------------------------------|--------------|-----------|
| S(SiO ₂) | 91 | 42,82 |
| A(Al ₂ O ₃) | 0,58 | 20,82 |
| F(Fe ₂ O ₃) | 0,24 | 4,57 |
| S+A+F | 91,82 | 68,21 |
| CaO | 0,71 | 23,45 |
| MgO | 0,33 | 1,74 |
| SO ₃ | 1,06 | 1,47 |
| Na ₂ O | 0,38 | 0,32 |
| K ₂ O | 4,34 | 1,31 |
| C | 0.8-1.0 | - |
| S | 0.1-0.3 | - |
| Kızdırma Kaybı | 1,84 | 2,75 |
| Yoğunluk, (gr/cm ³) | 2.20 | 2,50 |

Çimentonun ağırlıkça % 0,5'i oranında takviye malzemesi olarak kullanılan karbon fiber, piyasadan temin edildi. Şerit halinde alınan fiberler döküm öncesi 5 mm boyunda kesilerek beton harç içine koyulacak boyuta getirildi. Kullanılan karbon fiberin teknik verileri Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4 Karbon Fiberin Özellikleri

| | |
|-------------------|-------------------------|
| Filament Çapı | 15±3µm |
| Çekme Dayanımı | 3,43 GPa |
| Elastisite Modülü | 230GPa |
| Kopmada Uzama | %1,5 |
| Elektrik Direnci | 1,6x10 ⁻⁵ Ωm |
| Yoğunluk | 1,82 gr/cm ³ |
| Seebeck Katsayısı | +7,256 µV/°C |

Kompozit içerisindeki fiberin çökmesi ne kadar iyi olursa, elektrik iletkenliği ve buna paralel olarak da akıllılığı da o kadar iyi olmaktadır [35]. Bundan dolayı, maliyet açısından uygunluğu göz önünde bulundurularak [38], fiberin harç içerisinde homojen dağılmasını ve çökmesini temin etmek için Culminal 9115 modifiye metilselüloz (Hercules,Inc,USA), metilselüloz kullanıldığında meydana gelecek köpüklenmeyi önlemek için ise Rhoximat DF 770 DD (Rhodia,Inc,USA) köpük önleyici kullanıldı.

Karbon fiber ilave edilen numunelerde daha fazla su ihtiyacı ortaya çıkmakta, başka bir deyişle, çökme (slump) değeri düşmektedir [40]. Karışıma su ilave etmeden işlenebilmeyi kolaylaştırmak için tüm fiberli serilere ve silis dumanı ilavesiyle meydana gelen işlenebilme kaybını önlemek için de silis dumanı katkılı fibersiz seriye YKS firmasından temin edilen YKS MR 25 (Lingin Sülfonat esaslı) akışkanlaştırıcı ilave edildi.

5.2 Numunelerin Hazırlanması

Bu tez çalışmasında ana matrisi aşağıda belirtilen özelliklerde ve karışım hesapları TS 2511 [56] standardı dikkate alınarak gerçekleştirilen toplam 6 seri numune hazırlanmıştır.

1. su +çimento+hafif agrega (N)
2. su +çimento+hafif agrega+uçucu kül (UK)
3. su +çimento+hafif agrega+silis dumanı (SD)
4. su +çimento+hafif agrega+karbon fiber (N-CF)
5. su +çimento+hafif agrega+karbon fiber+uçucu kül (UK-CF)
6. su +çimento+hafif agrega+karbon fiber +silis dumanı (SD-CF)

Her serinin 1m³'ü için kullanılan yaklaşık karışım miktarları Tablo 5.5'te; kullanılan kimyasal katkıların ağırlıkça % miktarları ise Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.5 1m³ Beton İçin Yaklaşık Karışım Miktarları, (kg)

| Seriler | Su | Çimento | UK | SD | İnce Agregası (0-4mm) | İri Agregası (4-8mm) |
|---------|-----|---------|------|----|-----------------------|----------------------|
| N | 310 | 450 | - | - | 710 | 225 |
| UK | 295 | 382,5 | 67,5 | - | 705 | 219 |
| SD* | 315 | 405 | - | 45 | 701 | 220 |
| N-CF* | 310 | 450 | - | - | 710 | 225 |
| UK-CF* | 295 | 382,5 | 67,5 | - | 705 | 219 |
| SD-CF* | 315 | 405 | - | 45 | 701 | 220 |

* Akışkanlaştırıcı kullanılan seriler

Tablo 5.6 Karışımlarda Kullanılan Kimyasal Katkılar

| Kullanılan Kimyasallar | Miktar |
|------------------------------------|--------|
| Çökeltici –Metilselüloz (Çim.ağ.%) | 0,4 |
| Köpük Önleyici (Hacimce%) | 0,13 |
| Akışkanlaştırıcı(Çim.ağ.%) | 0,8 |

Hafif agregalı betonların karışım hesapları normal ağırlıklı betonunkinden biraz farklılık gösterir. Bunda hafif agregaların çok gözenekli oluşları ve yüksek su emme özellikleri rol oynar. Ayrıca çok pürüzlü ve gözenekli olan yüzeyleri dolayısıyla agregaların “doğru kuru yüzey” durumlarını hassas olarak belirlemek zordur. Bu nedenle, normal ağırlıklı agregalarla yapılan betonlarda kullanılan “net karışım suyu” veya “net karışım suyu/çimento” kavramları hafif agregalı betonlarda ancak yaklaşık olarak kullanılabilir. Dolayısıyla su/çimento-dayanım ilişkisi yerine, yapılan deneme karışımları sonucunda işlenebilirliğe göre bulunan çimento dozajı-dayanım ilişkisinin dikkate alınması daha sağlıklı sonuçlar vermektedir [12].

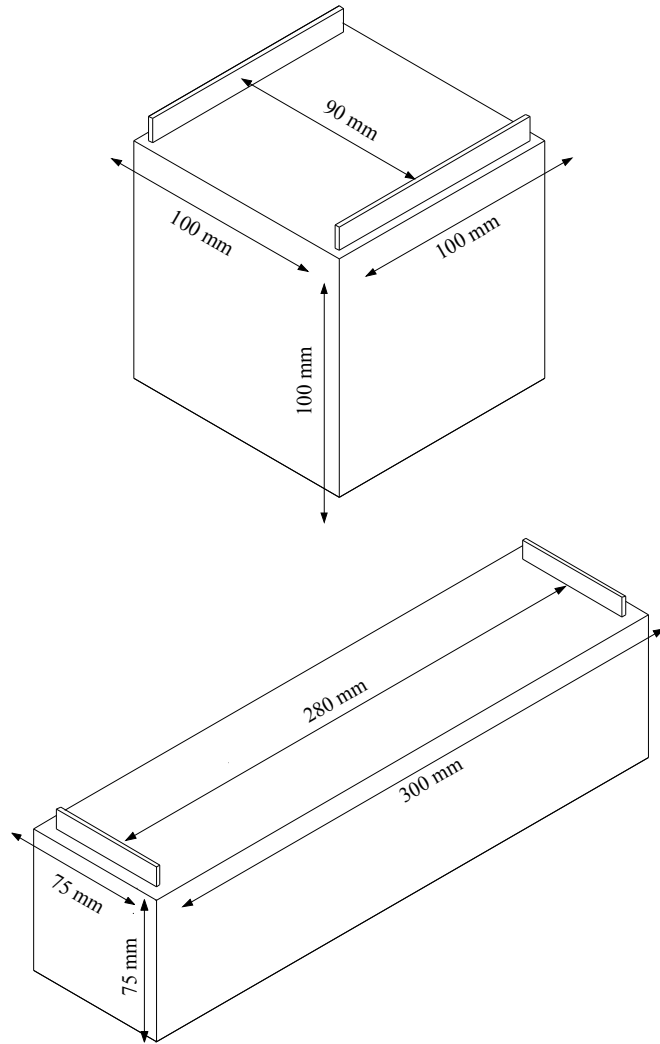
Bu bilginin ışığında, yapılan deneme karışımları sonucunda, tez çalışmasında hazırlanan numune serilerinin çimento dozajı 450 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Karışımlar hazırlanırken, sabit slump değerinde çalışılmış çökme sınıfı S3 olarak alınmıştır [11].

Fibersiz seriler hazırlanırken iri ve ince agregası, çimento ve serisine göre uçucu kül ve silis dumanı yaklaşık 3 dk. kuru halde karıştırıldıktan sonra su ve akışkanlaştırıcı (eğer seride varsa) ilave edildi. Su ile birlikte yaklaşık 5 dk. daha karıştırılarak kalıplara dökülmeye hazır hale getirildi.

Fiberli karışımlar hazırlanırken ise daha farklı bir sıra izlendi. Önce çimento mikserinde metilselüloz, kullanılacak suyun bir kısmında karıştırılarak çözdürüldükten sonra fiberler ve köpük önleyici de ilave edilerek 3 dk. karıştırıldı. Daha sonra bu karışım, beton mikserinde yaklaşık 5 dk. karıştırılmış ince ve iri agregası, çimento, uçucu kül ve silis dumanı (eğer seride

varsa) kuru karışımına ilave edildi. Seriler fiberli olduğundan akışkanlaştırıcı ilavesi de yapıldıktan sonra yaklaşık 5 dk. daha karıştırıldı [44].

Basınç dayanımının tespiti için 100×100×100 mm boyutunda küp, eğilmede çekme dayanımının tespiti için ise 75×75×300 mm boyutunda prizma kalıplara döküldü. Karbon fiberli ve fibersiz betonlarda kür yaşının basınç dayanımına etkisini gözleyebilmek için küp numunelerden 3, 7 ve 28 günlük için ayrı, elektrik ve ısı ölçümleri için de (Şekil 5.2’de gösterildiği gibi bakır elektrot gömülerek) ayrı numuneler hazırlandı. Prizma numunelerde elektrik ölçümü yapabilmek için (Şekil 5.2’de gösterildiği gibi bakır elektrot gömülerek) ayrı, sadece 28 günlük eğilmede çekme dayanımı için ise ayrı numune hazırlandı. Hazırlanan numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak kirece doymun 23±2 °C deki su ile dolu kür tankının içerisine kürlerini tamamlamaları için yerleştirildi.



Şekil 5.2 Numune Konfigürasyonu

5.2 Deneyler ve Ölçümler

5.2.1 Basınç Dayanımı Deneyi

Seriler basınç deneyine tabi tutulmadan önce, 28 günlük etüv kurusu yoğunluklarının belirlenmesi için 28 günlük kürünü tamamlayan numuneler etüvde kurutuldu. Hesaplanan değerlerin TS EN 206-1'e uygunluğu araştırıldı.

Bu aşamadan sonra, küp numunelerin basınç deneyleri Şekil 5.3'te görülen Autotest 3000 hidrolik yük kontrollü Beton Basınç Dayanım Presinde, TS EN 12390-3'e göre, 3 kN/sn yükleme hızı uygulanarak gerçekleştirildi [57]. Karbon fiberli ve fibersiz olarak hazırlanan 6 serinin her birinden 3'er numune kırılarak bunların ortalamaları o seriye ait basınç dayanımı değeri olarak kaydedildi.



Şekil 5.3 Hidrolik Yük Kontrollü Pres

5.2.2 Çekme Dayanımı Deneyi

Betonun çekme dayanımı, eksenel çekme deneyi ile direkt olarak belirleneceği gibi, eğilme ve silindir yarma deneylerinden de elde edilebilir. Bu tür deneylerden elde edilen sonuçlar temel alınarak, betonun karakteristik çekme dayanımı olarak ifade edilen f_{ctk} , aşağıda gösterildiği gibi hesaplanabilir [58].

$$f_{ctk} = \frac{\text{silindir yarma deneyinde elde edilen çekme dayanımı}}{1,5} \quad (5)$$

$$f_{ctk} = \frac{\text{eğilme deneyinden elde edilen çekme dayanımı}}{2} \quad (6)$$

Çalışmada, TS EN 12390-5 standardına göre, numune ortadan yüklenerek, eğilmede çekme dayanımı tayini deneyleri yapılmış ve betonun çekme dayanımları belirlenmiştir [59]. Yükleme yine Autotest 3000 hidrolik yük kontrollü pres ile, yükleme hızı 0,2 kN/sn alınarak fakat bu kez cihazın Şekil 5.4'da görülen eğilme aparatı kullanılarak gerçekleştirildi. Eğilmede çekme dayanımlarını tespit etmek için de hazırlanan 6 serinin her birinden 3'er tane dikdörtgen prizma şeklindeki numune kırıldı. Bu değerlerin ortalamaları o seriye ait eğilmede çekme dayanımı olarak kaydedildi.



Şekil 5.4 Eğilmede Çekme Deney Düzenegi

Bu yöntem ile çekme dayanımı (7) nolu denklem ile hesaplandı.

$$\sigma_e = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (7)$$

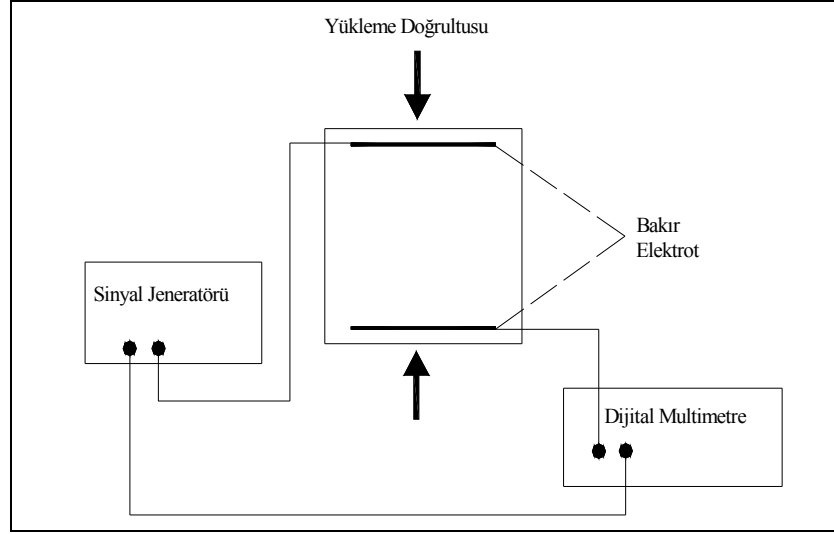
Formülde; P, eğilmeye sebep olan yük, L , prizma numunenin boyu, b, prizma kesitinin eni ve d ise prizma kesitinin yüksekliğini vermektedir.

5.2.3 Elektrik Ölçümleri

Elektrik iletkenlik ölçümleri, taze beton hazırlanıp kalıplara döküldükten sonra Şekil 5.2'de gösterildiği gibi, numuneye gömülen iki bakır elektrot vasıtasıyla yapıldı. Ölçüm yöntemi olarak iki prob metodu kullanıldı. Numunelerin gerek basınç ve eğilme altında, gerekse yüksüz durumdaki elektrik iletkenliğini tespit etmek için (AC) alternatif akım uygulandı. Bu amaçla, Thurlby Thandar TG 230 sweep/function sinyal jeneratörü ve Fluke 45 Dual Display multimetre kullanıldı. Deney düzeneği ve elektrik ölçümleri sırasında cihazların bağlantı şeması sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmektedir.



Şekil 5.5 Elektriksel Ölçümler için Deney Düzeneği



Şekil 5.6 İki Prob Metodu Bağlantı Şeması

Elektrik ölçümleri hem fiberli hem de fibersiz numuneler için aşağıdaki prosedüre göre yapıldı.

1. Fiber katkısının elektrik iletkenliğine yaptığı etkiyi belirlemek için, hazırlanan 6 tip seriden hem küp hem de prizma şeklindeki numunelerin yüksüz durumda, artan frekansa karşı iletkenliklerinde meydana gelen değişim belirlendi.
2. Bir önceki aşamada yüksüz halde iletkenlik değişimleri belirlenen CF katkılı serilere maksimum kırılma yükünün yaklaşık 1/3'ü kadar basınç tatbik edildi. Numunelerin iletkenlikleri bu kez, yük altında ve yük uygulanıp kaldırıldıktan sonra artan frekansa bağlı olarak yeniden ölçüldü.
3. CF katkılı numunelere $f=25$ kHz sabit frekans altında max kırılma yükünün % 70'i kadar çevrimli basınç yükü uygulandı. Çevrim sayısının artmasının yüklü ve yüksüz durumlarda iletkenlikte meydana getirdiği değişim belirlendi.
4. Hazırlanan 6 tip serinin küp numunelerine maximum kırılma yükü değerinin %10'una karşılık gelen değerden başlanarak, %10'luk artışlarla basınç yükü uygulandı. Her yüklemeye önce ve yükleme esnasında elektrik iletkenlik ölçümü yapıldı. Mineral katkılı ve katkısız numunelerin fiberli ve fibersiz tiplerinde meydana gelen elektriksel değişimler birbirleriyle kıyaslandı.
5. Son olarak prizma numunelerin sabit frekansta ve sürekli artan çekme gerilmesi altında iletkenliklerinde meydana gelen değişim kaydedilerek, çekme gerilmesi altında fiberli hafif betonun sergilediği davranış yorumlandı.

Referans olarak bakır elektrot kullanıldığı için bulunan Seebeck katsayıları bakırın mutlak termoelektrik güç değeri olan ($+2,34\mu V/^{\circ}C$) değeri ile toplanarak, serilere ait mutlak termoelektrik güç değerleri elde edilmiştir.

5.2.5 Mikroyapı ve Fraktografik İncelemeler

Hazırlanan serilere ait numunelerin deneylerden önce mikroyapı incelemeleri ile basınç ve eğilmede çekme deneylerinden sonraki fraktografik incelemeleri Şekil 5.8’de görülen Leo Evo 40VP model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-Scanning Electron Microscope) ile gerçekleştirildi. İncelemelerde, fiber matris ara yüzeyi, fiberlerin dağılımı ve betonun yapısı dikkate alındı. Fiber matris etkileşimleri ve betonda hidratasyon ürünleri EDX (Energy Dispersive X-Ray) ile belirlendi.

Mikroyapı incelemeleri genel olarak 3 kısımda yapıldı. İlk olarak herhangi bir zorlanmaya maruz bırakılmayan numunelerden SEM yüzey görüntüleri alındı. Bu amaçla, tahribatsız numuneler, numune kesme makinesinde SEM cihazının inceleyebileceği boyuta gelene kadar kesildi. Net görüntü alınması için zımpara ve çuha ile parlatıldı. Daha sonra, basınç deneyleri sonrası numunelerin kırık yüzeylerinden SEM fotoğrafları alınarak, farklılık gösteren belirli noktalarda EDX analizleri yapıldı. Son olarak eğilmede çekme deneyi sonrası numunelerin kırık yüzeylerinin SEM ve EDX analizleri yapıldı.



Şekil 5.8 İncelemelerin Yapıldığı Taramalı Elektron Mikroskobu

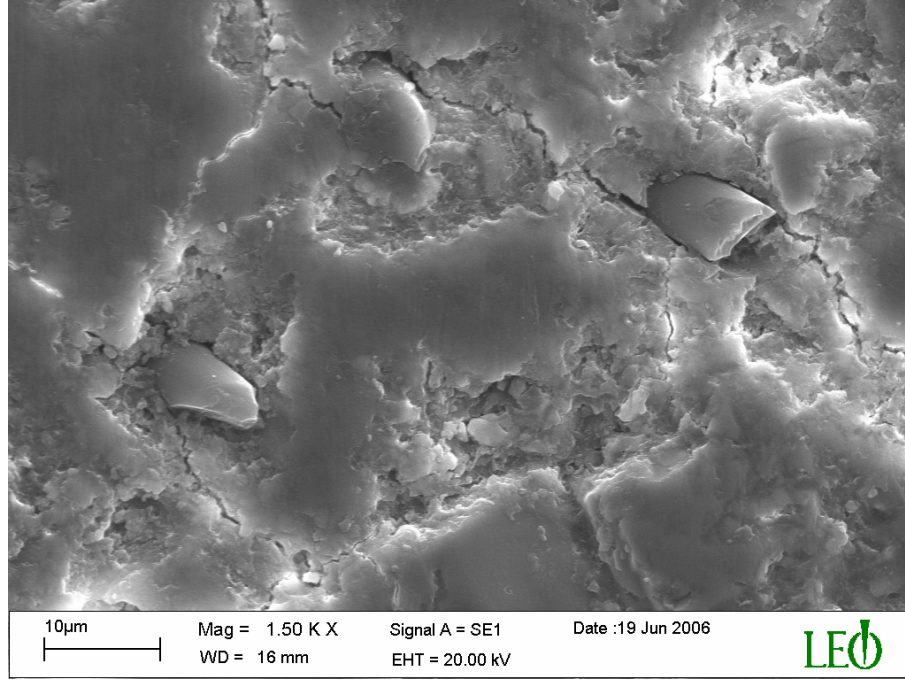
6. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

6.1 Hazırlanan Numunelerin Mikroyapıları

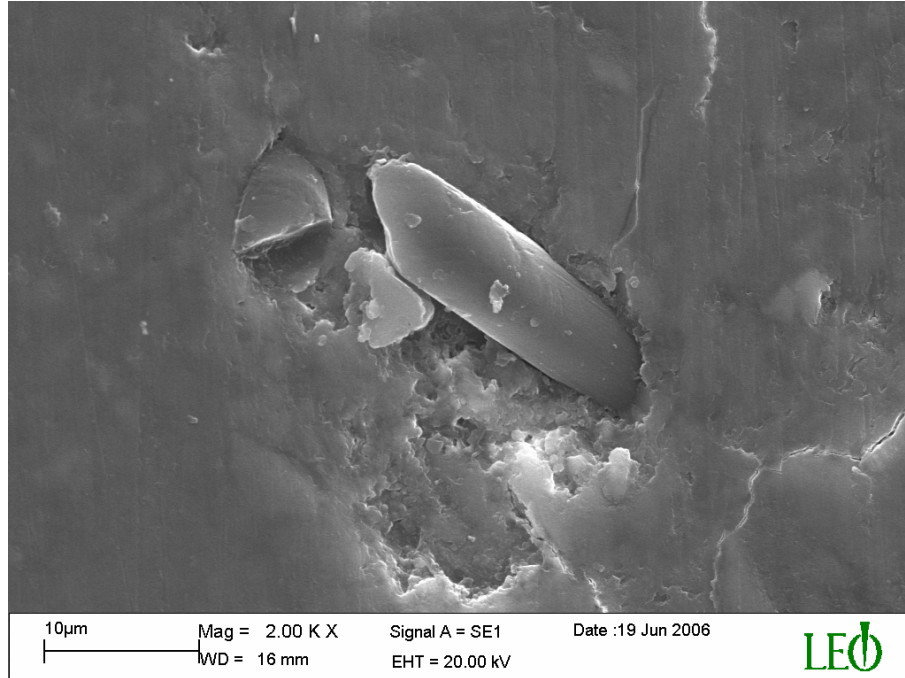
N-CF serisine ait numunenin tüm testler öncesi alınan SEM fotoğrafları Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de verilmiştir.

Şekil 6.2’de, fiberlerin yüzeylerinin çok temiz olmadığı, ana matristen kalıntılar olduğu dikkati çekmektedir. Bu fiber ile matris arasındaki adhezyonun iyi olduğu anlamına gelmektedir. Chen ve Chung [40] yaptıkları bir çalışmada, fiber yüzeyi ne kadar temiz olursa, fiber ile matris arasındaki temas direncinin o kadar küçük olacağını ifade etmişlerdir. Ayrıca temas direncinin betonun genel hacimsel iletkenliği üzerinde bir etkisi olmadığını da belirtmişlerdir.

Temas direncinin küçük olması, karbon fiber ile matris arasındaki adhezyon kuvvetinin az olduğu anlamına da gelir. Bu durumda, N-CF serilerinin yüzey fotoğraflarında fiberlerin üzerinde matris malzemesinden kalıntılar olması, adhezyonun tam olduğunu göstermektedir.

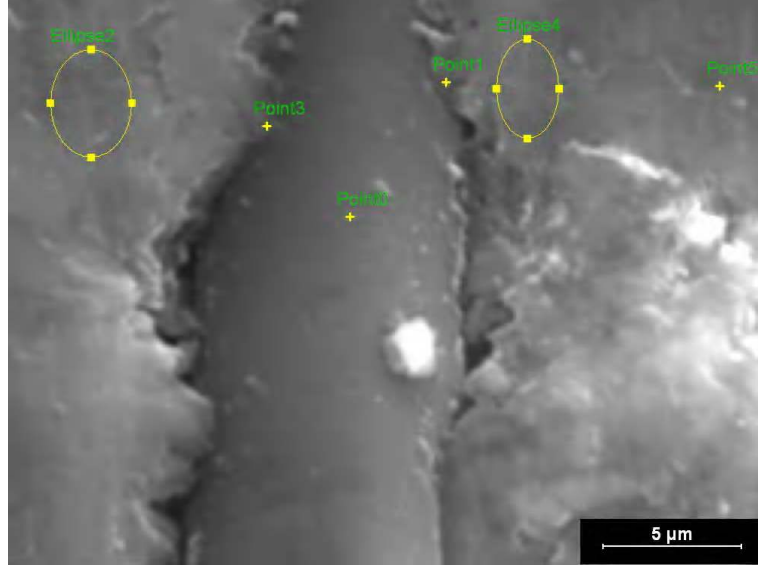


Şekil 6.1 N-CF Serisi Mikroyapı SEM Fotoğrafi (1)



Şekil 6.2 N-CF Serisi Mikroyapı SEM Fotoğrafi (2)

EDX analizinin yapıldığı numuneye ait Şekil 6.3'teki fotoğrafta fiber üzerindeki pürüzlülük çok daha net görülmektedir. Yapılan EDX analizi sonucu Şekil 6.3'te belirlenen bazı nokta ve bölgelerdeki elementlerin ağırlıkça % miktarları Tablo 6.1'de verilmektedir. Fiberden uzak noktalarda da yüksek miktarda karbon elementine rastlanması, adhezyonun gerçekleşmiş olduğunu desteklemektedir.

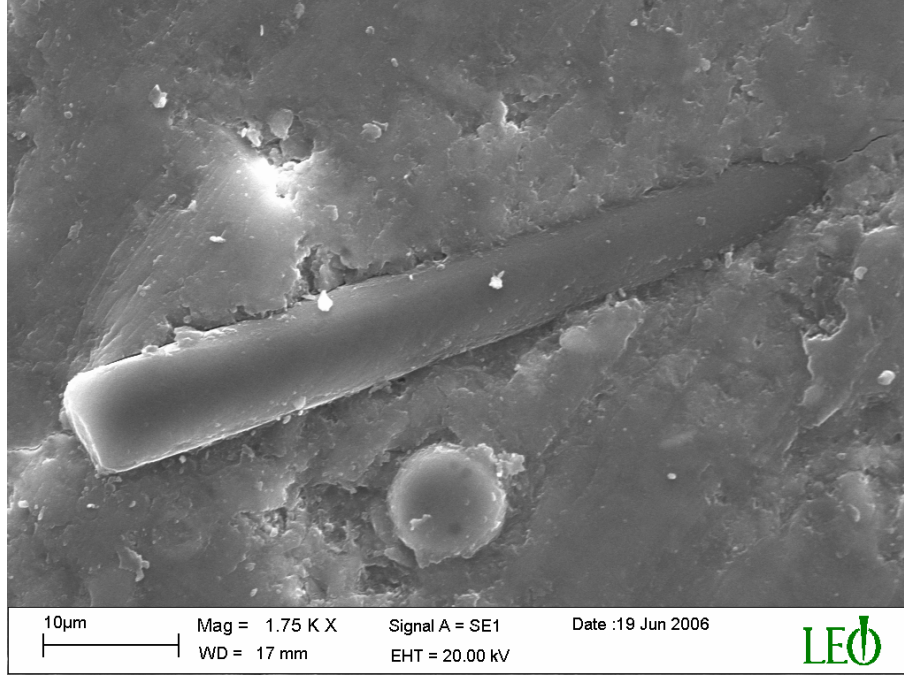


Şekil 6.3 N-CF Numunesinin EDX Analizi Bölgesi

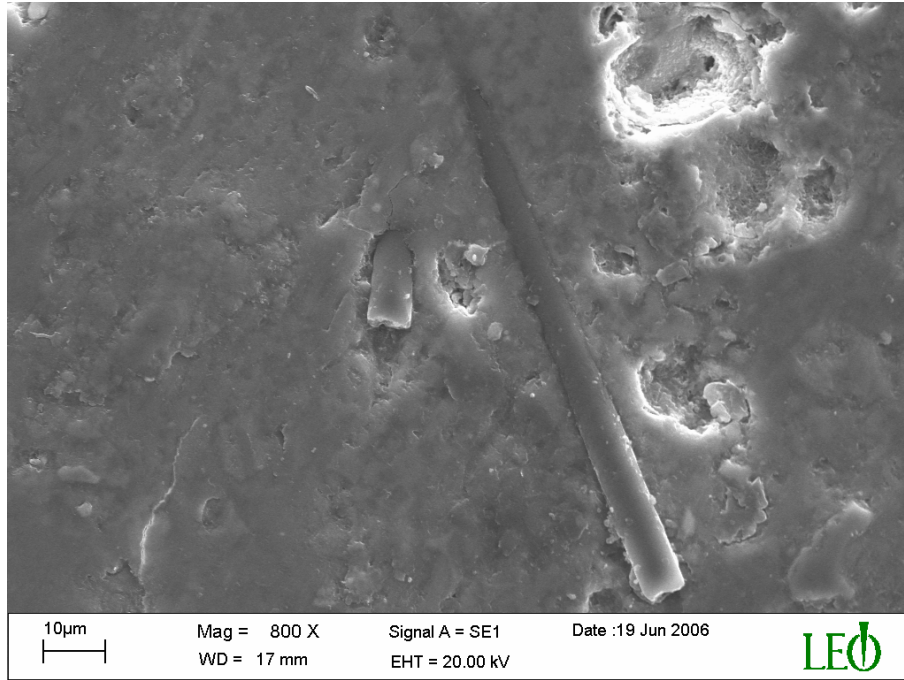
Tablo 6.1 N-CF Serisi Mikroyapı EDX Analizi Değerleri

| Element | Nokta 0 (ağırlıkça%) | Nokta 1 (ağırlıkça%) | Elips 4 (ağırlıkça%) |
|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| C | 98,28 | 93,64 | 47,91 |
| Ca | 0,80 | 4,15 | 31,98 |
| Si | 0,22 | 1,11 | 10,57 |
| S | 0,11 | 0,12 | 1,03 |
| Al | 0,07 | 0,24 | 2,97 |
| Mg | 0,06 | 0,19 | 2,95 |
| Fe | 0,36 | 0,41 | 1,92 |

Ana matrisinde uçucu kül bulunan UK-CF serisine ait mikroyapı SEM fotoğrafları Şekil 6.4 ve Şekil 6.5’de verilmektedir.

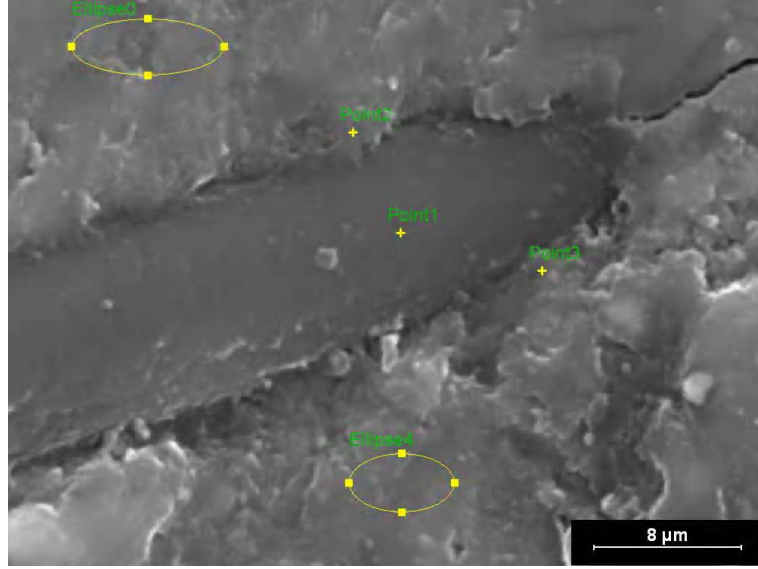


Şekil 6.4 UK-CF Serisi Mikroyapı SEM Fotoğrafi (1)



Şekil 6.5 UK-CF Serisi Mikroyapı SEM Fotoğrafi (2)

UK-CF serisine ait mikroyapı fotoğraflarında fiberlerin yüzeylerinin pürüzlü olması ve yüzeyde matris kalıntılarının bulunması, adhezyonun bu numunede de gerçekleşmiş olduğunu göstermektedir (Şekil 6.6).



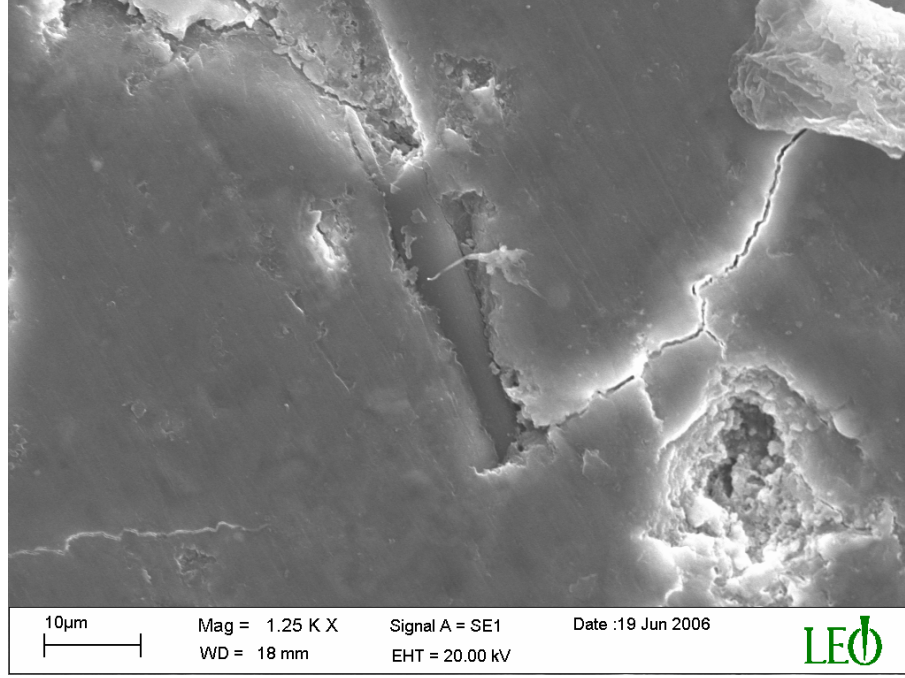
Şekil 6.6 UK -CF Numunesinin EDX Analizi Bölgesi

Şekil 6.6’da belirlenen birkaç nokta ve bölgede yapılan EDX analizi sonuçları Tablo 6.2’de verilmiştir. EDX analizinde 2 noktasında karbonun yüksek oranda bulunması adhezyonun varlığını doğrulamaktadır.

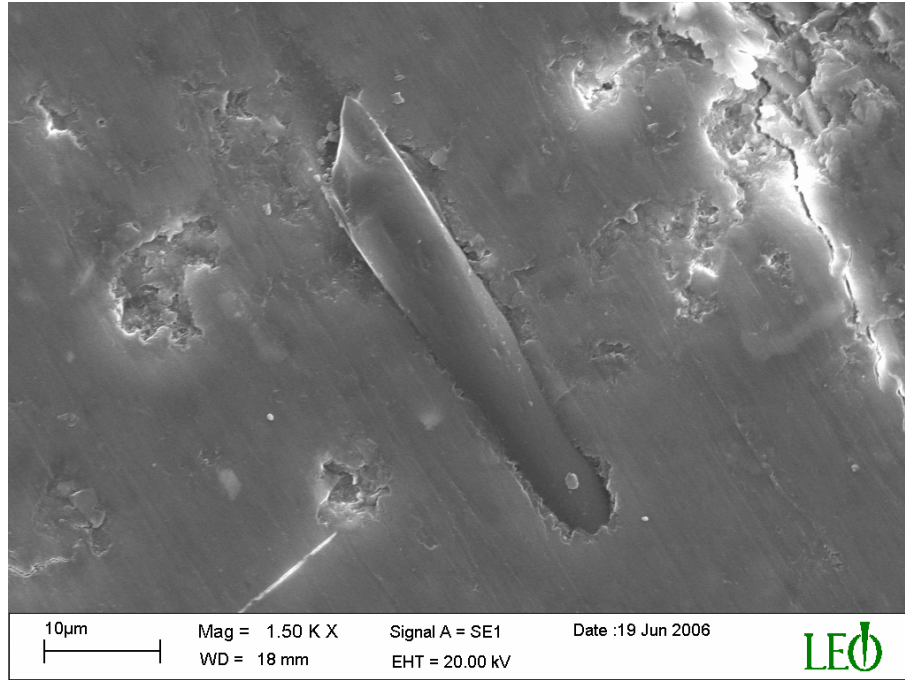
Tablo 6.2 UK-CF Serisi Mikroyapı EDX Analizi Değerleri

| Element | Elips 0 (ağırlıkça%) | Nokta 1 (ağırlıkça%) | Nokta 2 (ağırlıkça%) | Elips 4 (ağırlıkça%) |
|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| C | 30,60 | 98,41 | 84,19 | 0,17 |
| Ca | 64,20 | 0,52 | 14,20 | 64,88 |
| Si | 2,92 | 0,25 | 0,85 | 22,37 |
| S | 0,66 | 0,12 | 0,14 | 3,18 |
| Al | 0,34 | 0,17 | 0,07 | 4,25 |
| Mg | 0,07 | 0,21 | 0,02 | 0,62 |
| Fe | 0,95 | 0,21 | 0,43 | 3,50 |

Matrisinde silis dumanı bulunan SD-CF serisinin mikroyapı SEM fotoğrafları Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de verilmiştir.



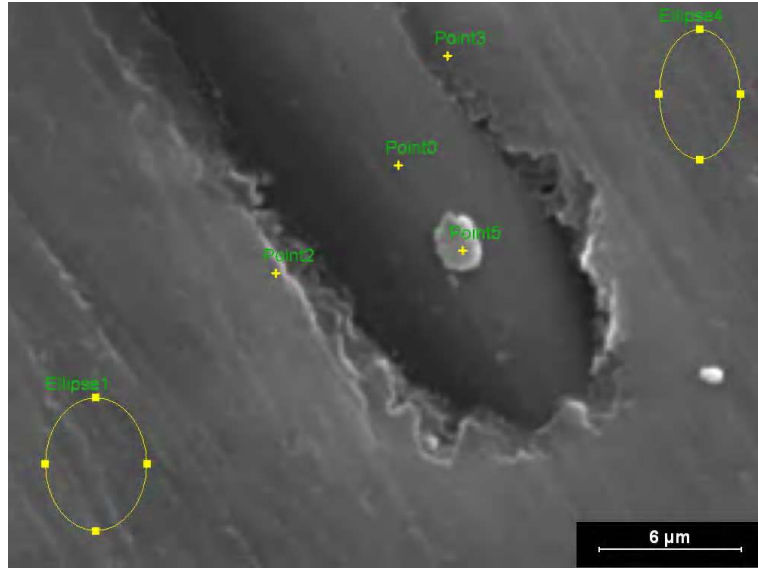
Şekil 6.7 SD-CF Serisi Mikroyapı SEM Fotoğrafi (1)



Şekil 6.8 SD-CF Serisi Mikroyapı SEM Fotoğrafi (2)

Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de dikkati çeken ilk özellik fiberlerin yüzeyindeki pürüzsüzlük ve temiz görünümüdür. Fiber yüzeyinin temiz ve pürüzsüz olması, fiber ile matris arasındaki temas direncinin küçük olmasından [40], başka bir ifadeyle matris ile fiber arasındaki adhezyon kuvvetinin küçük olmasından kaynaklanmaktadır.

EDX analizi için çekilen Şekil 6.9’daki fotoğrafta fiberin pürüzsüz yüzeyi açık bir şekilde görülmektedir. Üstelik fotoğrafta belirtilen noktalarda yapılan analizin sonucunun verildiği Tablo 6.3 incelendiğinde; fibere çok yakın noktalarda dahi C elementi miktarının çok az olması, adhezyonun zayıf olduğu görüşünü desteklemektedir. Muhtemelen silis dumanından dolayı, ana matrisin kendi içerisinde boşluksuz ve diğer numune türlerine kıyasla daha kuvvetli olması, fiberle oluşacak adhezyon kuvvetini zayıflatmıştır.



Şekil 6.9 SD-CF Numunesinin EDX Analizi Bölgesi

Tablo 6.3 SD-CF Serisi Mikroyapı EDX Analizi Değerleri

| Element | Elips 1 (ağırlıkça%) | Nokta 2 (ağırlıkça%) | Nokta 0 (ağırlıkça%) |
|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| C | 0,02 | 1,52 | 98,12 |
| Ca | 58,86 | 58,38 | 0,77 |
| Si | 26,89 | 26,91 | 0,44 |
| S | 3,75 | 2,85 | 0,10 |
| Al | 4,59 | 4,72 | 0,13 |
| Mg | 1,27 | 1,31 | 0,10 |
| Fe | 3,19 | 3,26 | 0,25 |

6.2 Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları

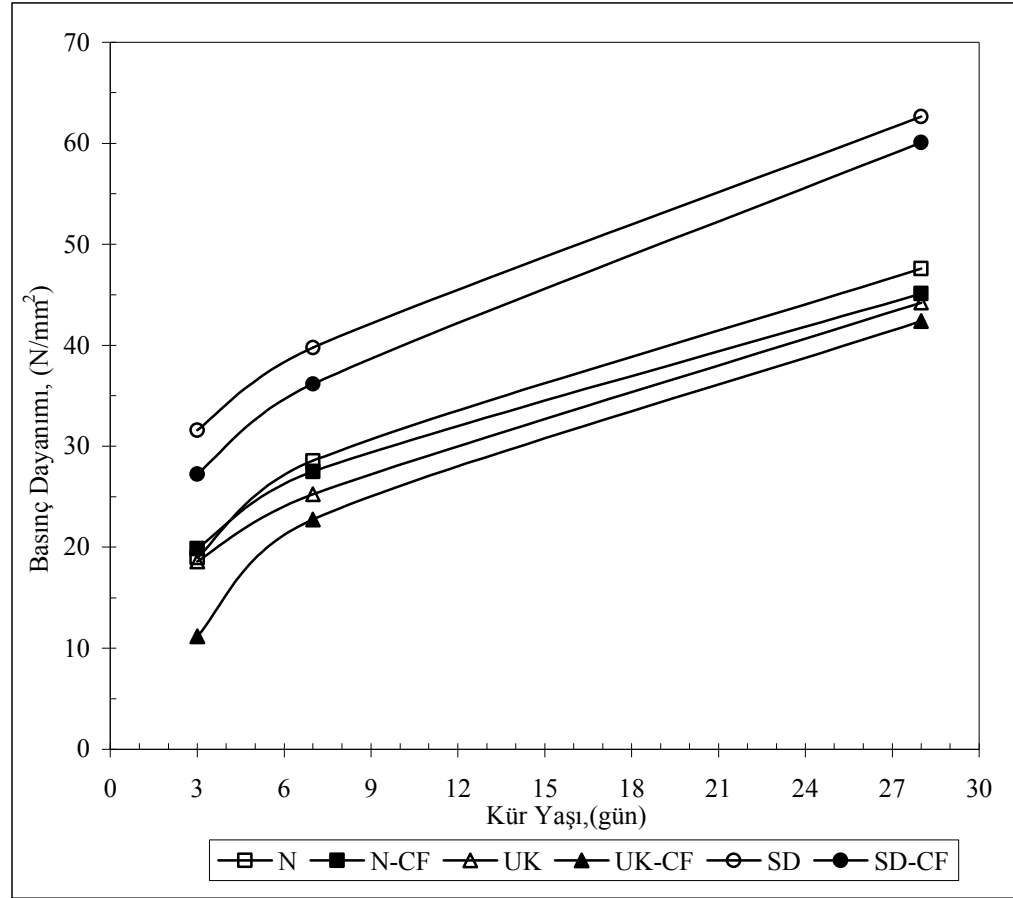
28 günlük numunelerin etiv kuru yoğunlukları bulunmuş ve hazırlanan tüm serilerin TS EN 206-1'e göre hafif beton sınıfına girdiği belirlenmiştir [11](Tablo 6.4).

Tablo 6.4 incelendiğinde, fiberin her seride yoğunluğu düşürdüğü görülmektedir. Literatürde fiberin numunelerde ağırlık kaybı meydana getirdiği belirtilmekle beraber, silis dumanı katkılı serilerde ise ağırlık kaybının en az olduğu özellikle vurgulanmıştır [39,41]. Bu durumda bulunan sonuçlar literatür sonuçları ile uyumludur.

Tablo 6.4 Numunelerin Yoğunlukları

| Beton Serisi | N | UK | SD | N-CF | UK-CF | SD-CF |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 28 Günlük Etiv Kuru Yoğ. (gr/cm ³) | 1,947 | 1,931 | 1,964 | 1,933 | 1,917 | 1,955 |

Hazırlanan 6 seri numunenin kür yaşına bağlı olarak değişen basınç dayanımları Şekil 6.10'da toplu halde verilmektedir.



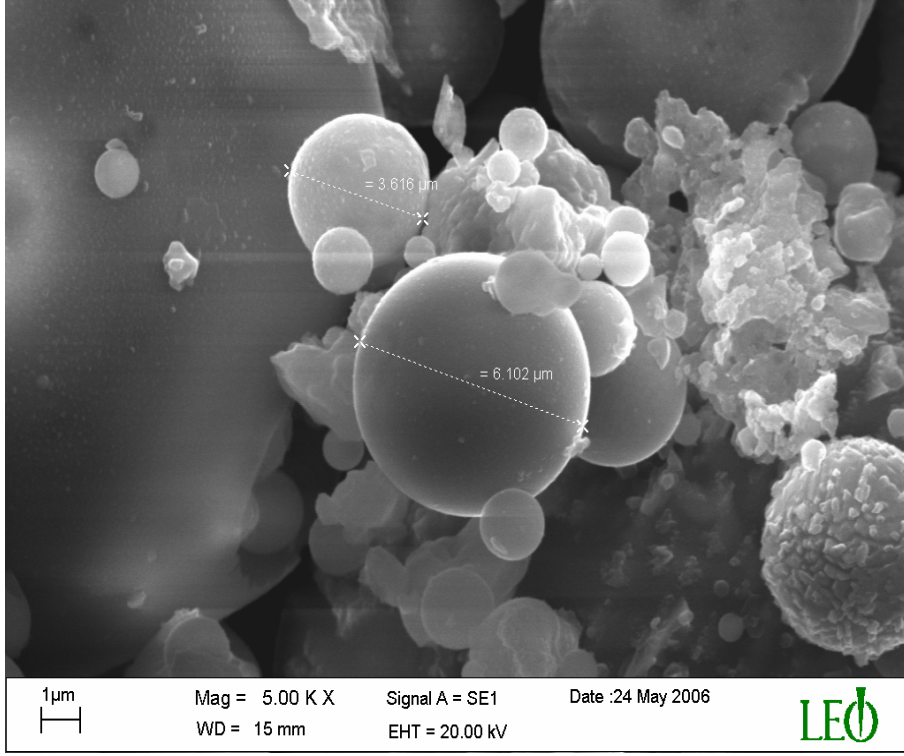
Şekil 6.10 Tüm Serilerin Kür Yaşına Göre Basınç Dayanım Değişimi

Şekil 6.10 incelendiğinde, karbon fiberin her kür yaşında da basınç dayanımını azaltıcı etki yaptığı görülmektedir. Bu sonuç, Chen ve Chung [3]'ün, karbon fiberin hem harç hem de normal agregalı beton numunelerin basınç dayanımları ile ilgili olarak elde ettikleri sonuçlarla uyumludur. Basınç dayanımında gözlenen bu düşme, fiberlerin harç ve beton içerisinde hava boşluğu miktarını arttırmasından kaynaklanmaktadır [3].

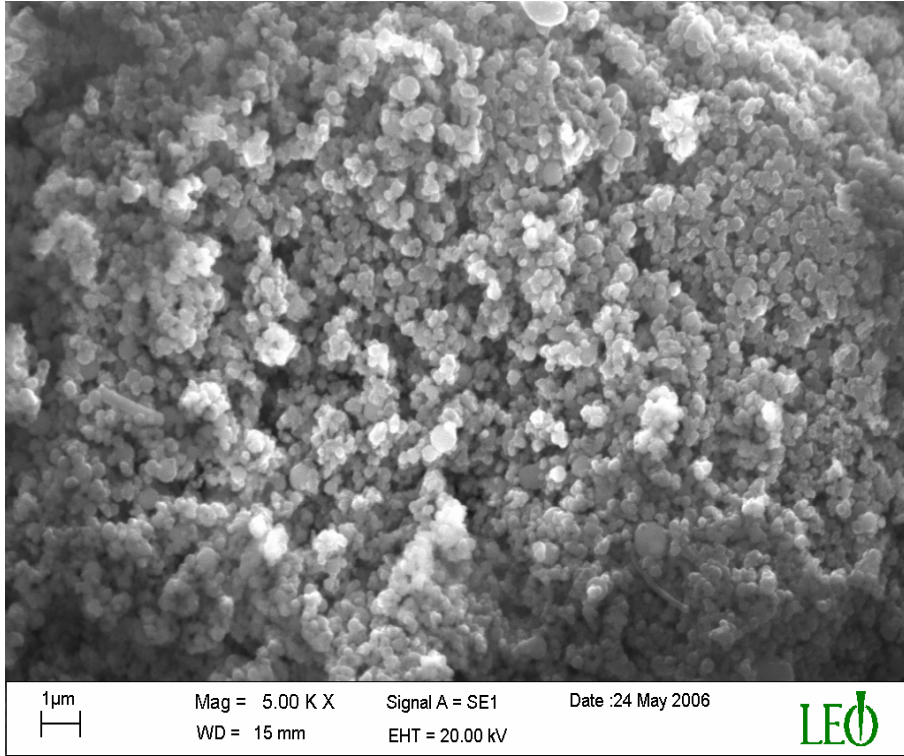
Yine Chen ve Chung [3], bu dayanım düşmesinin silis dumanı kullanarak önlenebileceğini vurgulamışlardır. Zaten Şekil 6.10'a bakıldığında da, silis dumanı katkılı fiberli numunenin (SD-CF) dayanımının, diğer fiber katkılı numunelerin (UK-CF ve N-CF) dayanımlarından yüksek olduğu açıkça görülmektedir.

Silis dumanının fiber takviyeli betonda dayanımı artırıcı etki yapması, muhtemelen hem fiberlerin çökmesine yardımcı olmasından hem de çok ince taneli olması sebebiyle fiberin kullanılmasıyla oluşan hava boşluklarını doldurmasından kaynaklanmaktadır [23]. Tez çalışmasında kullanılan uçucu kül ve silis dumanının sırasıyla Şekil 6.11 ve Şekil 6.12'de verilen SEM fotoğrafları incelendiğinde silis dumanının tane boyutunun boşlukları doldurabilecek kadar küçük olduğu daha açık anlaşılmaktadır.

Şekil 6.11 ve Şekil 6.12'den, silis dumanının tane boyutunun uçucu külün tane boyutundan çok küçük olduğu görülmektedir. Tane boyutu 1-150 μm arasında değişim gösteren uçucu külün [7], homojen olmayan tane boyutları Şekil 6.11'de açıkça görülmektedir. Ayrıca, 5.00 KX büyütmede, 3,616–6,102 μm aralığında tane çapları ölçülmekle birlikte, bu değerden küçük ve daha büyük tanelerin varlığı da yine aynı şekilde görülmektedir. Tane boyutu 0,1-0,2 μm arasında değişim gösteren silis dumanının [7], Şekil 6.12'de görülen SEM fotoğrafından da tane boyutlarının uçucu küle oranla çok daha küçük ve dağılımının da homojen olduğu görülmektedir.



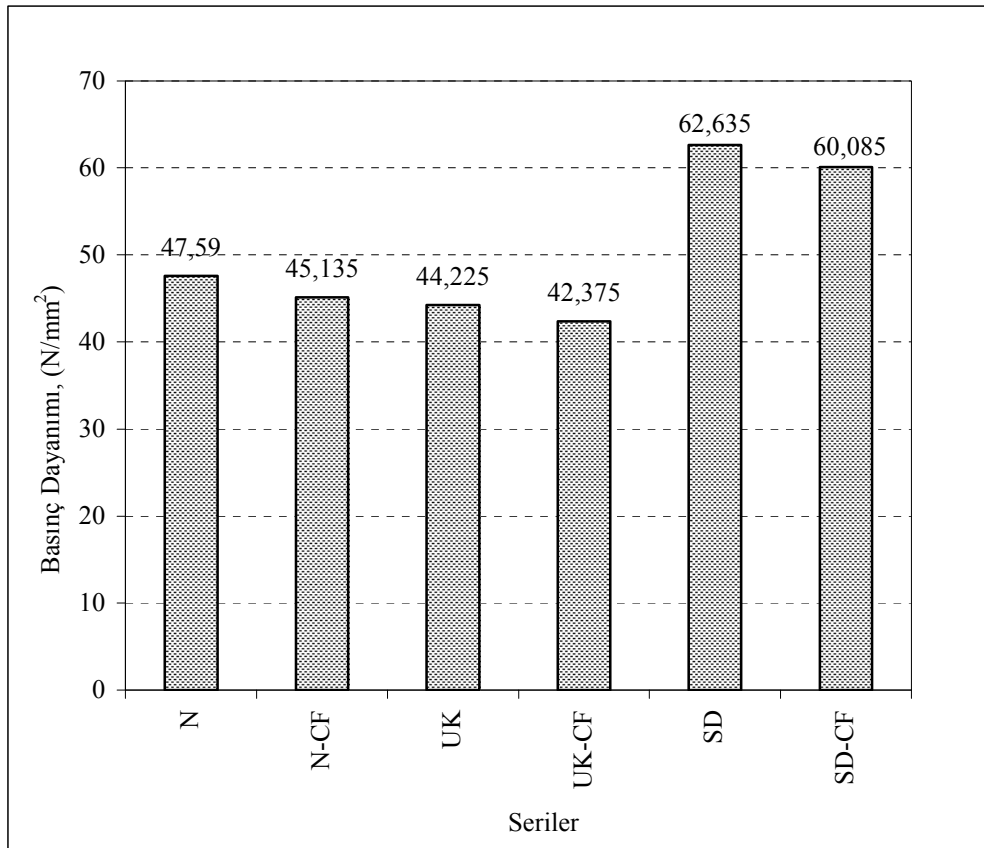
Şekil 6.11 Çalışmada Kullanılan Soma Uçucu Külünün Mikroyapısı



Şekil 6.12 Çalışmada Kullanılan Silis Dumanının Mikroyapısı

Numunelere ait 28 günlük basınç dayanımı değerleri, Şekil 6.13'te verilmiştir. Şekilden karbon fiber takviyesinin her seride de basınç dayanımını azalttığı görülmektedir. Literatürde karbon fiberin matristeki hava boşluğu miktarını arttırmak suretiyle dayanımı azalttığı vurgulanmaktadır [3]. Dolayısıyla elde edilen bulgular literatür bulguları ile uyumludur.

Fiber takviyesi, katkısız serinin (N) basınç dayanımını % 5,153, uçucu küllü serininkini (UK) % 4,183, silis dumanı katkılı serininkini (SD) ise % 4,071 oranında azaltmıştır. Buna göre fiber takviyesi en az silis dumanı katkılı serinin basınç dayanımını azaltmıştır. Bu durum muhtemelen silis dumanının ince yapısından dolayı boşlukları doldurmasından kaynaklanmaktadır [23].



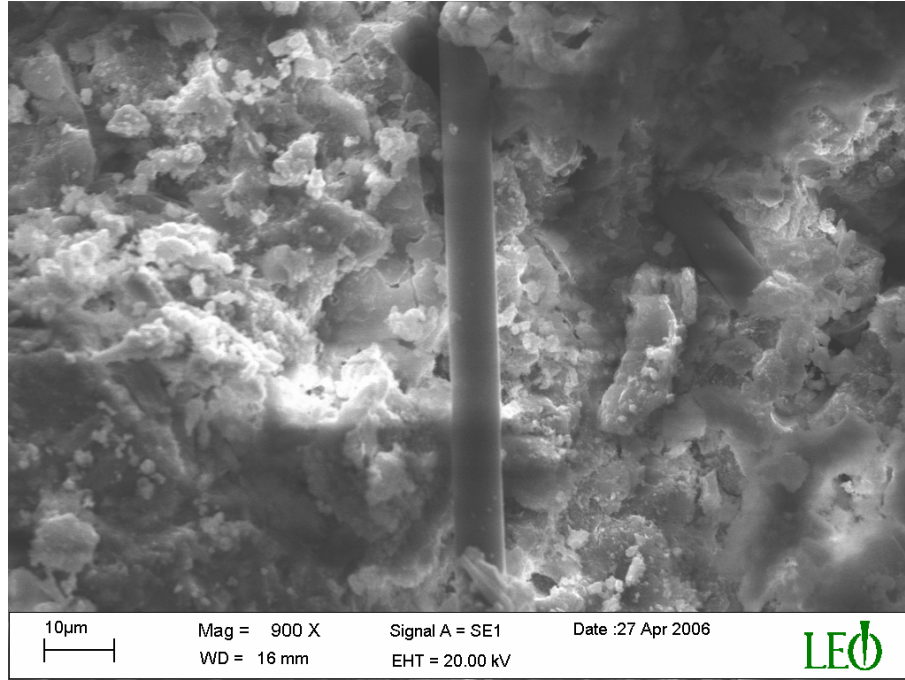
Şekil 6.13 Tüm Serilere Ait 28 Günlük Basınç Dayanımları

6.3 Basınç Numunelerinin Fraktografisi

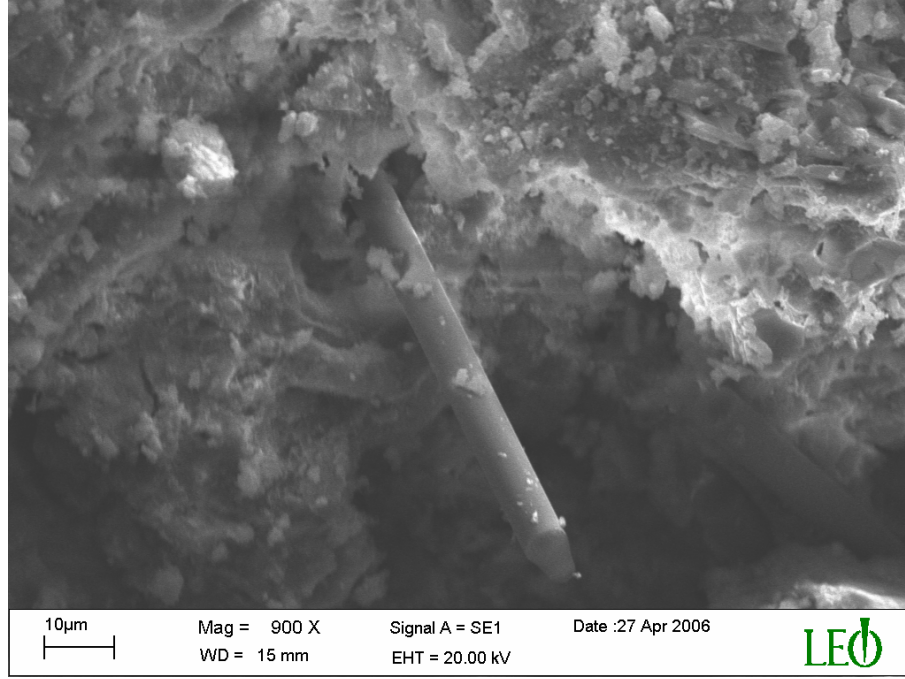
Basınç gerilmesinin %10 arttırılarak tatbik edilmesi sonucu kırılan karbon fiber takviyeli numunelerin fraktografik incelemeleri bu kısımda verilmektedir.

Şekil 6.14'den Şekil 6.17'ye kadar, N-CF serisinin kırık yüzeyine ait çeşitli açılardan çekilmiş kırık yüzey SEM fotoğrafları görülmektedir.

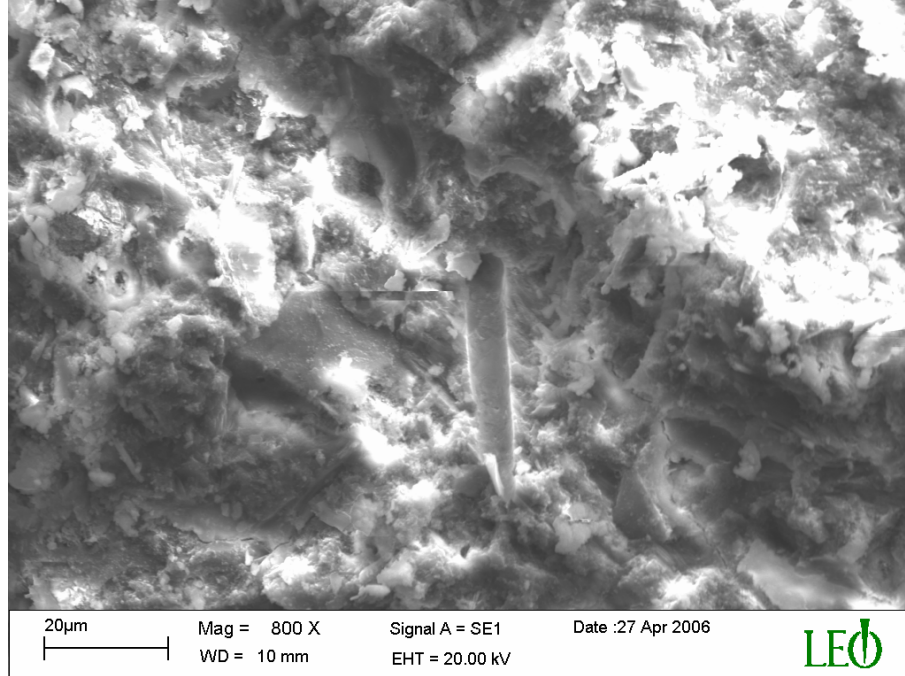
Bu fotoğraflar incelendiğinde; bazı fiberlerin koptuğu, bazılarının da sıyrılıp çıktığı dikkati çekmektedir. Muhtemelen bu farklı davranış, basınç yükünün artması ile birlikte büyüyen çatlak ve kırıkların ilerlediği kısımlardaki fiberlerin dağılım doğrultusuna bağlıdır. Ayrıca sıyrılarak ana matristen kurtulan fiberlerin üzerinde ana matristen kalıntılar göze çarpmaktadır. Bu da, numunelerin mikroyapı incelemelerinde izah edildiği gibi, matris ile fiber arasında adhezyonun gerçekleştiğini göstermektedir.



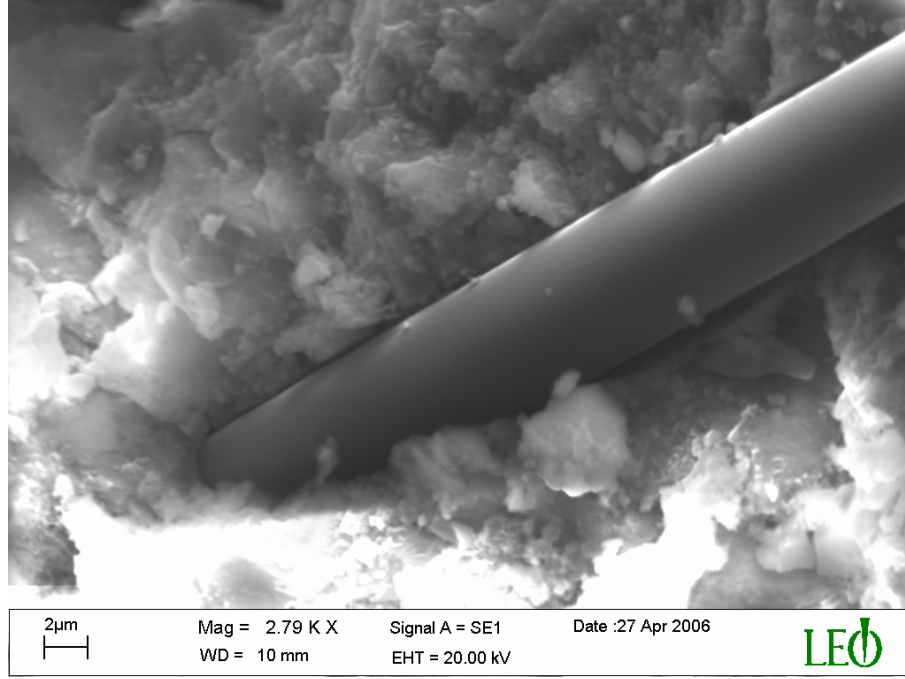
Şekil 6.14 N-CF Serisi Basınç Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (1)



Şekil 6.15 N-CF Serisi Basınç Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (2)

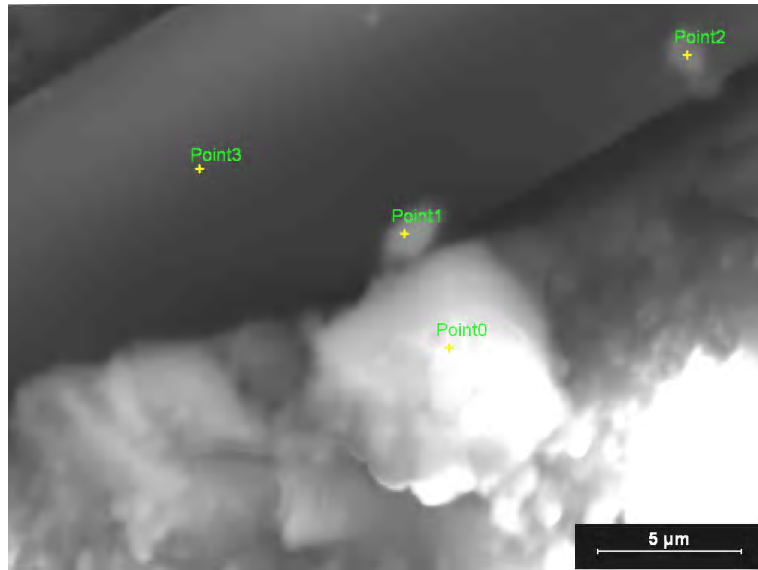


Şekil 6.16 N-CF Serisi Basınç Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (3)



Şekil 6.17 N-CF Serisi Basınç Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (4)

Şekil 6.17'deki fiber matris arasındaki ilişkiyi belirlemek üzere Şekil 6.18'deki SEM fotoğrafı çekilerek bu bölgede tespit edilen 4 noktada EDX analizi yapılmış ve adhezyonun gerçekleştiği belirlenmiştir. Analiz yapılan noktalardaki element miktarları ağırlıkça % olarak Tablo 6.5'te verilmiştir. Bu EDX sonuçlarına göre; adhezyon gerçekleştiği için, matriste yüksek oranlarda C belirlenmiş ve fibere yaklaştıkça % olarak C miktarında artma gözlenmiştir.

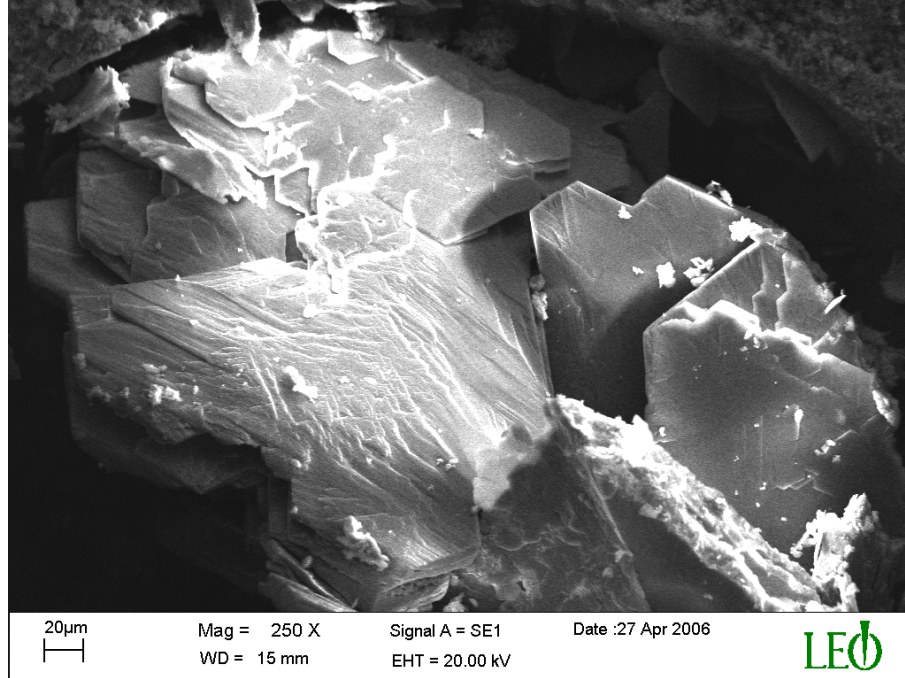


Şekil 6.18 N-CF Serisi Basınç Numunesinin EDX Analizi Bölgesi

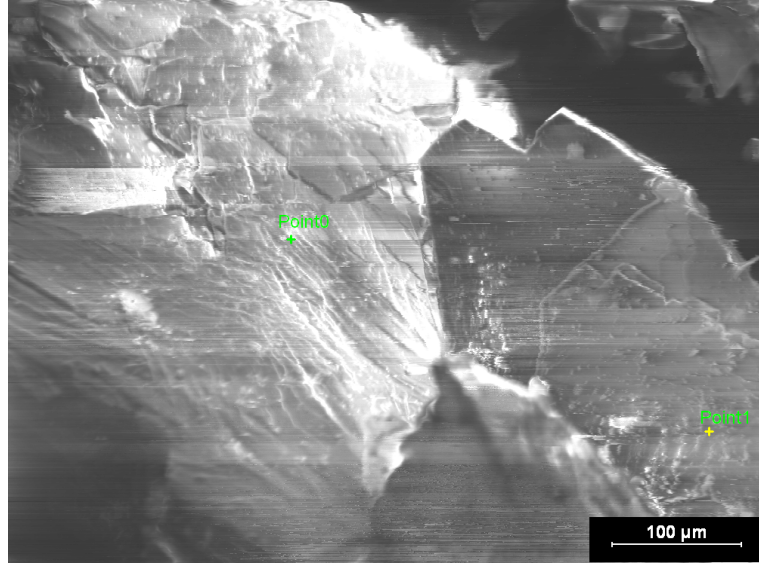
Tablo 6.5 N-CF Serisi Basınç Numunesinin EDX Analizi Değerleri

| Element | Nokta 0 (ağırlıkça%) | Nokta 1 (ağırlıkça%) | Nokta 2 (ağırlıkça%) | Nokta 3 (ağırlıkça%) |
|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| C | 40,89 | 85,46 | 91,45 | 96,59 |
| Ca | 55,90 | 13,53 | 6,47 | 1,57 |
| Si | 2,24 | 0,69 | 0,94 | 0,71 |
| S | 0,45 | 0,31 | 0,51 | 0,41 |
| Al | 0,39 | 0,01 | 0,32 | 0,25 |
| Mg | 0,13 | 0,00 | 0,31 | 0,24 |

Uçucu kül katkılı UK-CF serisine ait numunenin kırık yüzey fotoğrafı Şekil 6.19'da verilmiştir. Bu bölgede EDX analizi yapılmıştır. EDX yapılan noktaya ait fotoğraf ise Şekil 6.20'de görülmektedir



Şekil 6.19 UK-CF Serisi Basınç Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (1)



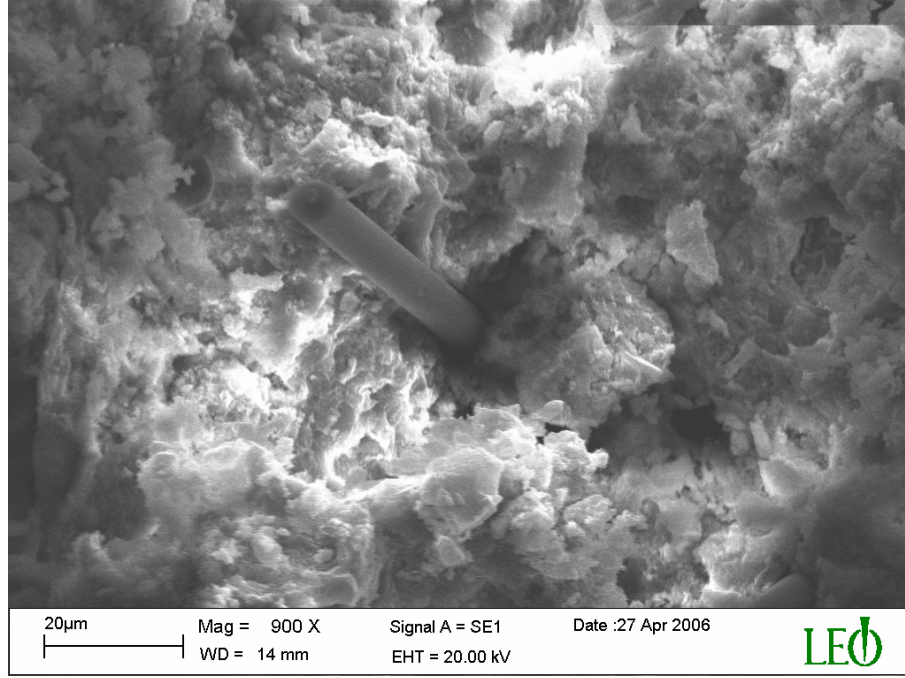
Şekil 6.20 UK-CF Serisi Basınç Numunesinin EDX Analizi Bölgesi (1)

Tablo 6.6’de verilen analiz değerlerinde, Al elementinin bulunduğu görülmektedir. Al elementinin yüksek oranda varlığının nedeni, uçucu külde % 20,82 oranında var olan ve çimento kimyasındaki sembolü A olan Alümin (Al_2O_3)’dir.

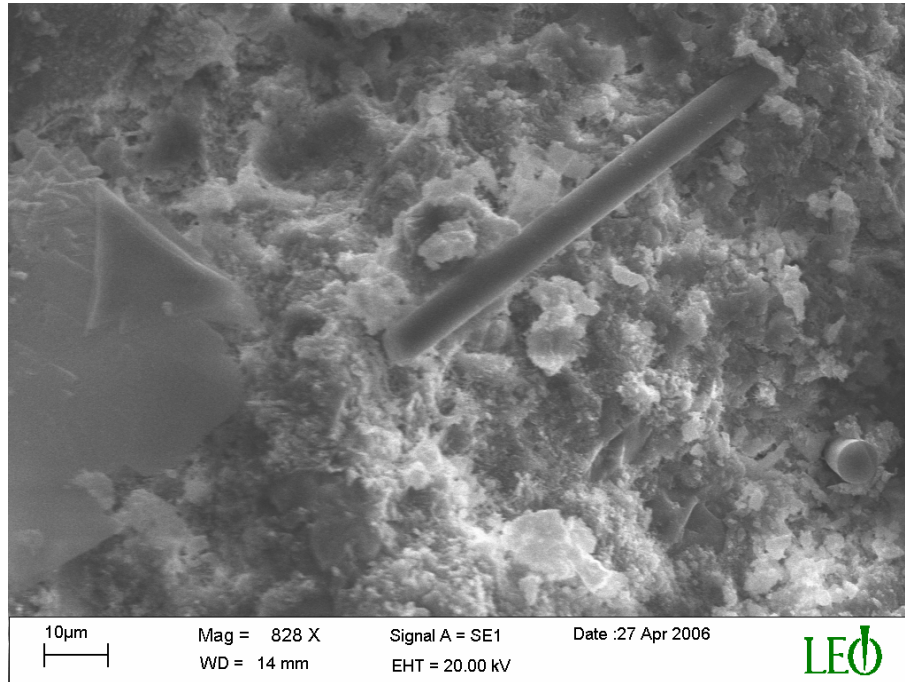
Tablo 6.6 UK-CF Serisi Basınç Numunesinin EDX Analizi Değerleri(1)

| Element | Nokta 1 (ağırlıkça%) |
|---------|-------------------------|
| Si | 30,49 |
| Al | 28,92 |
| Ca | 23,42 |
| S | 7,51 |
| Fe | 5,51 |
| K | 4,14 |
| C | - |

UK-CF serisinin, fiber görüntülerini içeren değişik açılardan çekilmiş SEM fotoğrafları Şekil 6.21 ve Şekil 6.22’de verilmektedir.

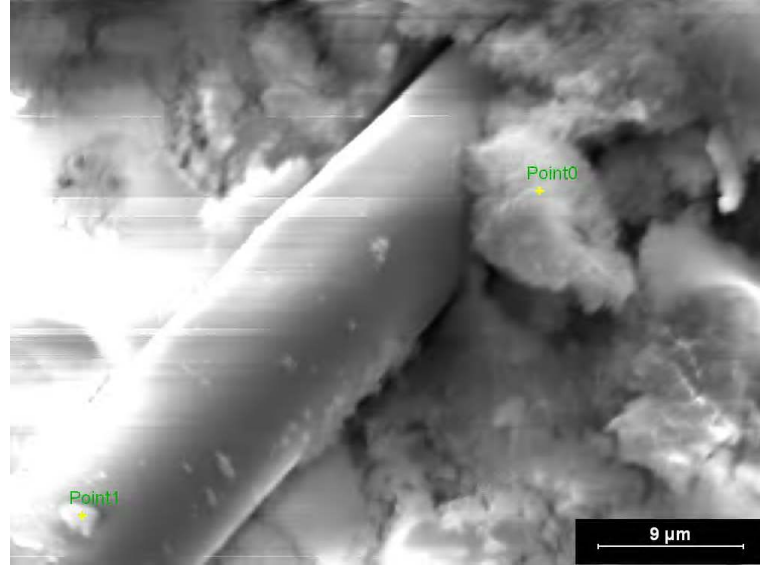


Şekil 6.21 UK-CF Serisi Basınç Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (2)



Şekil 6.22 UK-CF Serisi Basınç Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (3)

Şekil 6.22’de verilen yapıya ait fiber-matris arakesit fotoğrafı Şekil 6.23’te verilmiştir. Şekil 6.23’te 1 ve 2 no ile gösterilen 2 noktada yapılan EDX analizlerinin sonuçları ise Tablo 6.7’de verilmiştir.



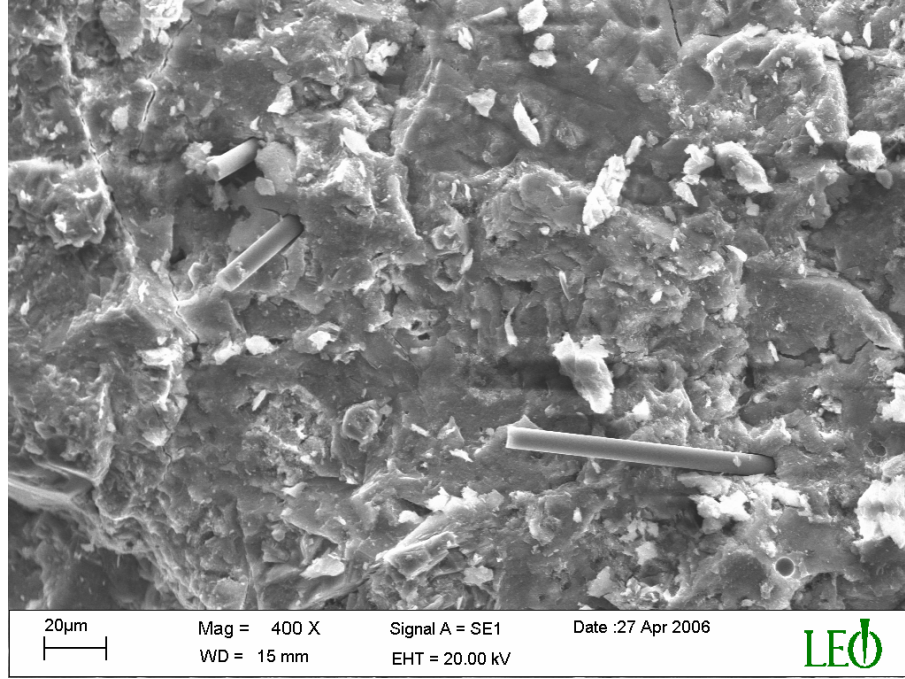
Şekil 6.23 UK-CF Serisi Basınç Numunesinin EDX Analizi Bölgesi (2)

Tablo 6.7 UK-CF Serisi Basınç Numunesinin EDX Analizi Değerleri (2)

| Element | Nokta 0 (ağırlıkça%) | Nokta 1 (ağırlıkça%) |
|---------|-------------------------|-------------------------|
| C | 57,24 | 93,38 |
| Ca | 28,42 | 3,33 |
| Si | 5,44 | 1,70 |
| Mg | 4,67 | 0,30 |
| Al | 2,57 | 0,56 |
| Fe | 1,20 | 0,32 |
| S | 0,45 | 0,39 |

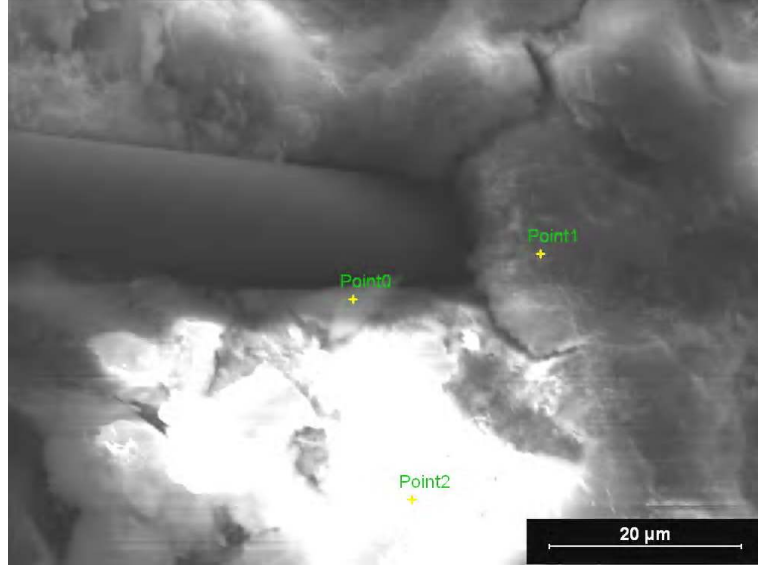
Tablo 6.7’de uçucu kül ihtiva etmeyen N-CF numunesindeki gibi temel hidrasyon ürünlerinin varlığına ilaveten, fibere yaklaştıkça C miktarındaki belirgin artış görülmesi, aynı zamanda fiber üzerindeki pürüzlülük, bu numunede de adhezyonun gerçekleşmiş olduğunu göstermektedir.

Silis dumanı katkılı SD-CF serisine ait numunenin kırık yüzey fotoğrafı Şekil 6.24'de verilmiştir.



Şekil 6.24 SD-CF Serisi Basınç Numunesine Ait SEM Fotoğrafı (1)

Şekil 6.24'te belirgin olarak dikkati çeken ilk özellik, fiberlerin yüzeylerinin gayet temiz ve pürüzsüz olduğudur. Fiber yüzeyinin temiz olması, fiber ile matris arasındaki temas direncinin küçük olmasından [40], başka bir ifadeyle matris ile fiber arasındaki adhezyon kuvvetinin küçük olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.25 SD-CF Serisi Basınç Numunesinin EDX Analizi Bölgesi

Şekil 6.25’de Nokta 0, Nokta 1 ve Nokta 2 olarak belirtilen 3 nokta için EDX analizi yapılmış ve sayısal sonuçları Tablo 6.8’de verilmiştir. Hem fibere uzak hem de daha yakın kısımlardan alınan noktasal EDX sonuçlarına bakıldığında, Ca ve Si miktarındaki fazlalık dikkati çekerken, C miktarının çok az olması, adhezyonun zayıf olduğunu göstermektedir. Muhtemelen silis dumanından dolayı, ana matrisin kendi içerisinde boşluksuz ve diğer numune türlerine kıyasla daha kuvvetli olması fiberle oluşacak adhezyon kuvvetini zayıflatmıştır. Ayrıca Şekil 6.25’te fiber yüzeyinin pürüzsüzlüğü daha net görülmektedir.

Tablo 6.8 SD-CF Serisi Basınç Numunesinin EDX Analizi Değerleri

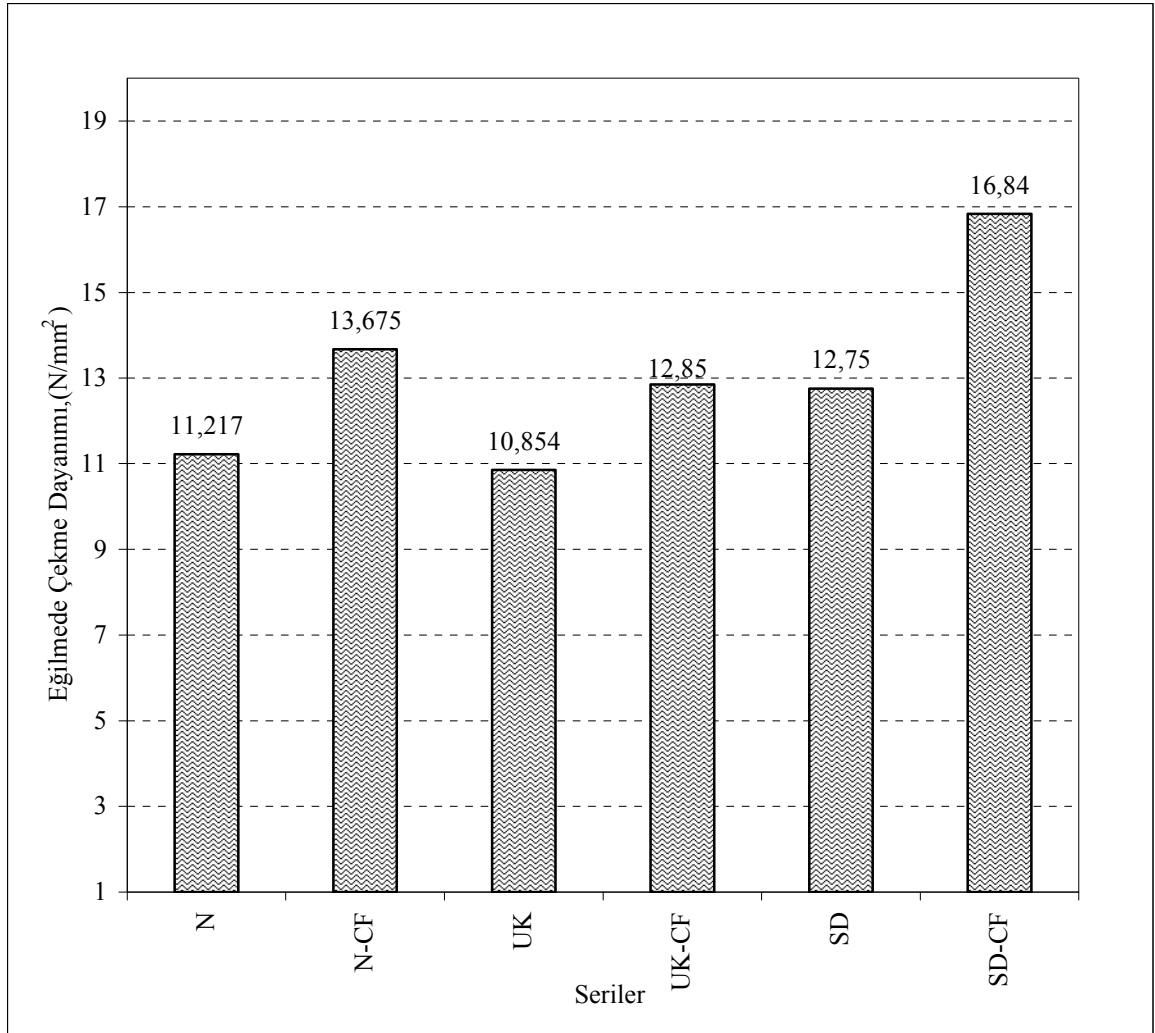
| Element | Nokta 0 (ağırlıkça%) | Nokta 1 (ağırlıkça%) | Nokta 2 (ağırlıkça%) |
|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| C | 0,04 | 0,10 | 0,03 |
| Ca | 67,71 | 60,33 | 70,11 |
| Si | 21,79 | 27,34 | 20,22 |
| S | 1,27 | 2,90 | 1,08 |
| Al | 3,48 | 4,25 | 2,18 |
| Mg | 0,39 | 1,11 | 0,11 |
| Fe | 3,66 | 2,79 | 4,04 |
| K | 1,66 | 1,12 | 2,23 |

6.4 Eğilmede Çekme Dayanımı Sonuçları

Hazırlanan 6 tip hafif beton serisine ait 28 günlük eğilmede çekme dayanımı değerleri Şekil 6.26'da mukayeseli olarak verilmektedir.

Şekil 6.26'da karbon fiber takviyesi matrisin içeriği ister katkısız ister uçucu kül veya silis dumanı olsun, her durumda eğilme dayanımını arttırmaktadır. Literatürde karbon fiberin beton ve harç numunelerinde eğilme dayanımını arttırdığı özellikle vurgulanmaktadır [3,37,38]. Dolayısıyla elde edilen bulgular literatür bulguları ile uyumludur.

Fiber takviyesi, katkısız serinin (N) eğilmede çekme dayanımını % 21,91, uçucu küllü serinin (UK) eğilmede çekme dayanımını % 18,38, silis dumanı katkılı serinin (SD) eğilmede çekme dayanımını ise % 32,07 oranında arttırmıştır. Buna göre fiber takviyesi en çok silis dumanı katkılı serinin eğilmede çekme dayanımını arttırmıştır.

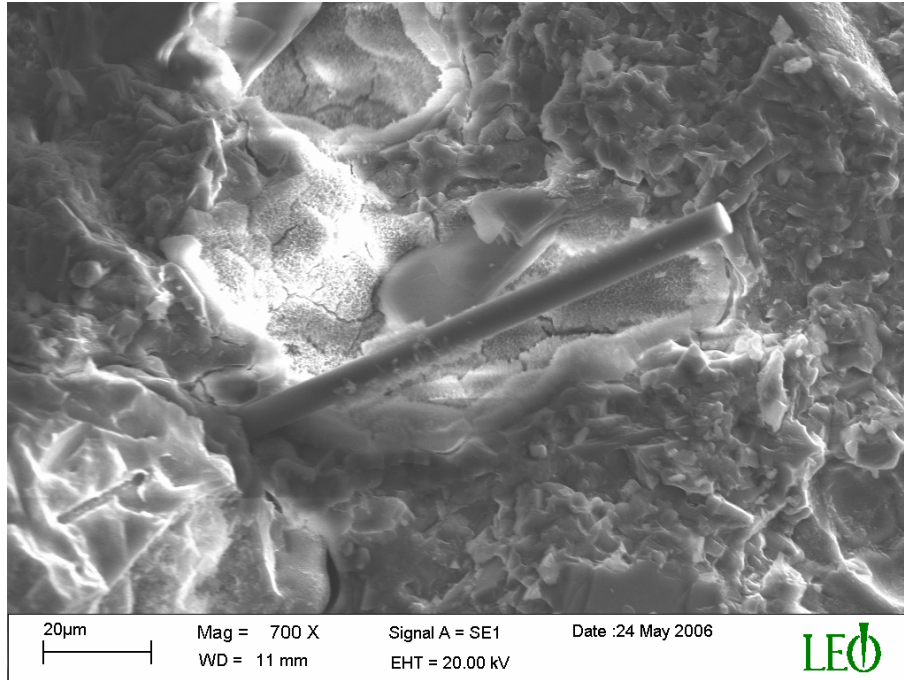


Şekil 6.26 Tüm Serilere Ait 28 Günlük Eğilmede Çekme Dayanımları

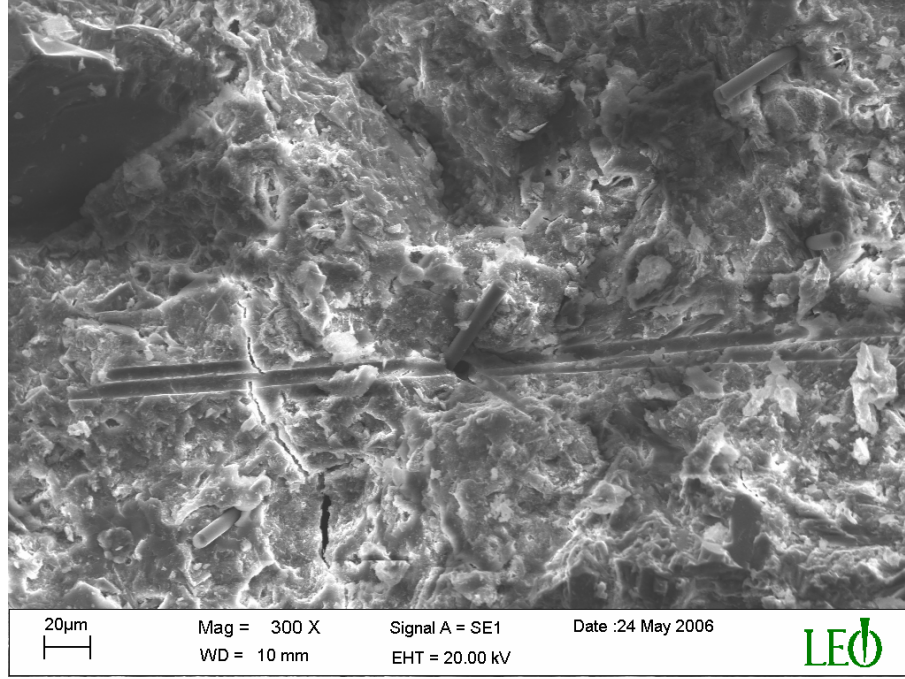
6.5 Eğilmede Çekme Numunelerinin Fraktografisi

Eğilme gerilmesi arttırılarak kırılan karbon fiber takviyeli numunelerin kırık yüzeyleri üzerinde yapılan mikroyapı incelemeleri bu kısımda verilmektedir.

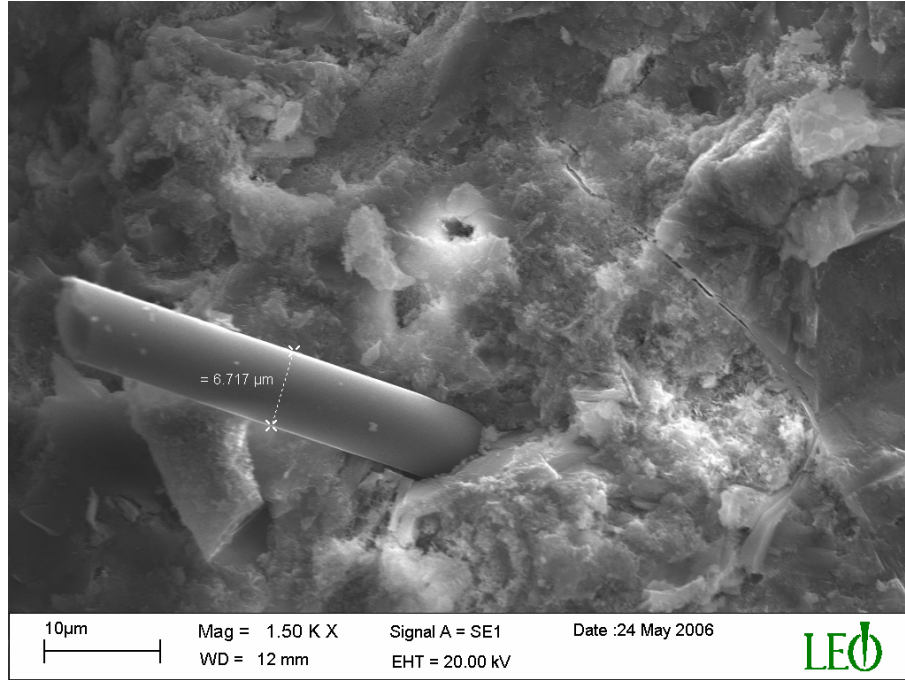
Şekil 6.27'den Şekil 6.29'a kadar verilen fotoğraflar, eğilme gerilmesi ile kırılan N-CF serilerinin SEM fotoğraflarını içermektedir. Bu fotoğraflarda da, basınç ile kırılan numunelerdeki gibi, kırılan veya sıyrılıp çıkan fiberler ve bunların ana matriste bıraktığı izler çok açık olarak görülmektedir. Özellikle Şekil 6.27'de sıyrılan fiberlerin üzerinde ana matristen kalıntılar görülmektedir.



Şekil 6.27 N-CF Serisi Eğilme Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (1)

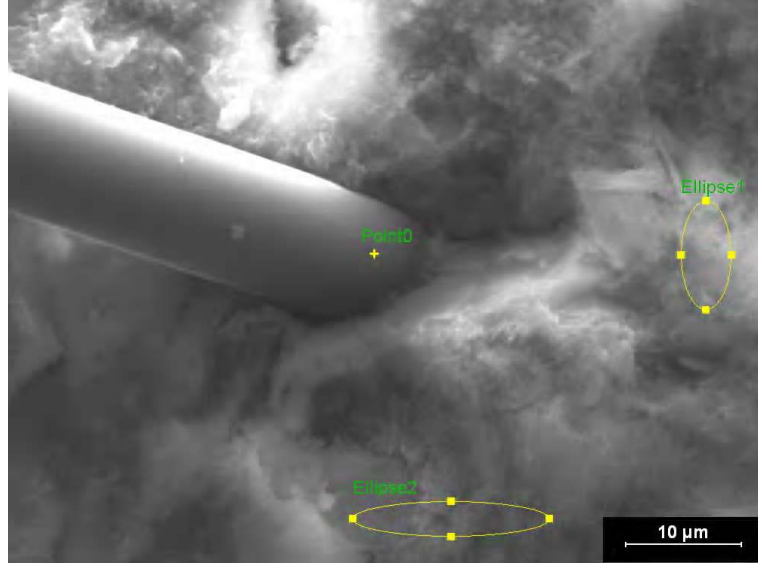


Şekil 6.28 N-CF Serisi Eğilme Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (2)



Şekil 6.29 N-CF Serisi Eğilme Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (3)

Matris ile fiber arakesitinin özelliklerini daha iyi anlayabilmek için Şekil 6.29'daki bölgede daha yakın bir görüntü alınmıştır (Şekil 6.30). Fotoğrafta işaretlenen bölgelerde EDX analizi yapılmıştır.



Şekil 6.30 N-CF Serisi Eğilme Numunesinin EDX Analizi Bölgesi

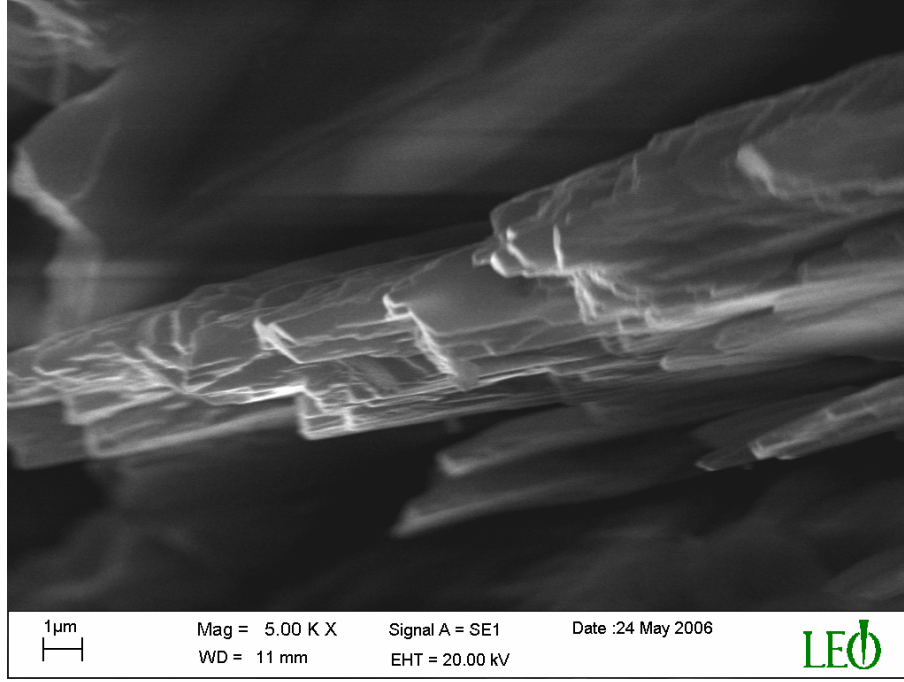
Şekil 6.30'da Nokta 0, Elips1 ve Elips2 olarak belirlenmiş noktalarda yapılan EDX analizlerinin sonuçları toplu halde Tablo 6.9'da verilmiştir.

Tablo 6.9 N-CF Serisi Eğilme Numunesinin EDX Analizi Değerleri

| Element | Nokta 0 (ağırlıkça%) | Elips1 (ağırlıkça%) | Elips2 (ağırlıkça%) |
|---------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| C | 97,50 | 0,04 | 0,01 |
| Ca | 1,68 | 70,92 | 55,38 |
| Si | 0,15 | 14,59 | 23,07 |
| S | 0,11 | 1,68 | 1,67 |
| Al | - | 6,56 | 5,97 |
| Mg | - | 0,39 | 5,95 |
| Fe | 0,27 | 3,08 | 2,69 |
| K | 0,19 | 2,35 | 3,38 |

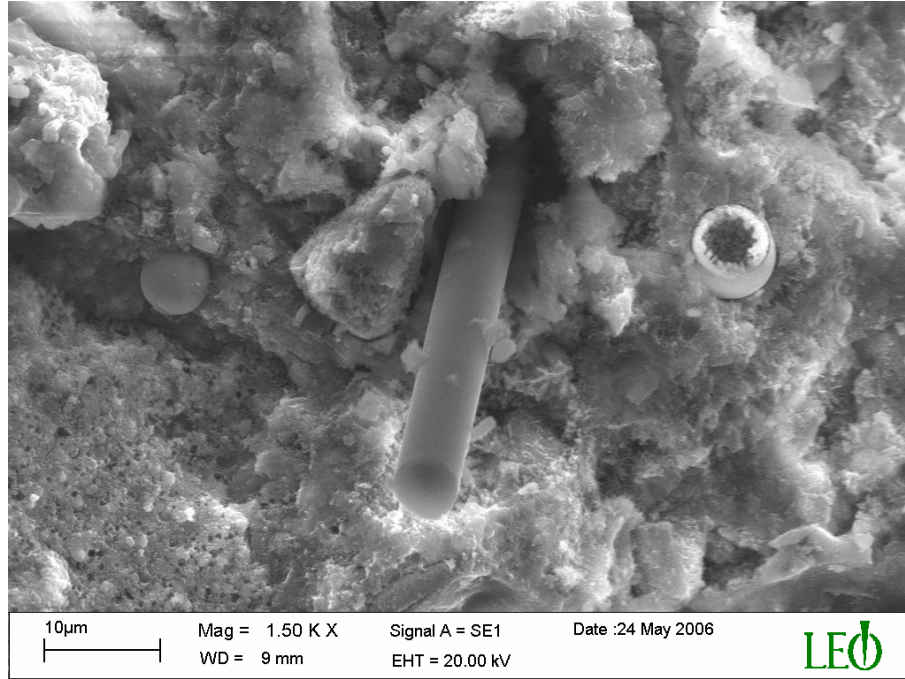
Bu EDX sonuçları incelendiğinde, CF üzerinden alınan 0 noktasında doğal olarak yüksek miktarda karbon bulunmaktadır. Kullanılan CEM I 42,5 N Portland çimentosunda % 21,12 SiO₂, % 62,94 CaO bulunması (bkz., Tablo 5.1), elips olarak seçilen 1 ve 2 nolu bölgelerde özellikle Ca ve Si elementinin yüksek oranlarda bulunma nedenini açıklamaktadır.

Şekil 6.31, N-CF numunesinin kırılma yüzeyini göstermektedir. Eğilme gerilmesinden dolayı numunenin yüzeyinde ezilme şeklinde kırıklar yerine, keskin ve sivri kırıklar mevcuttur.

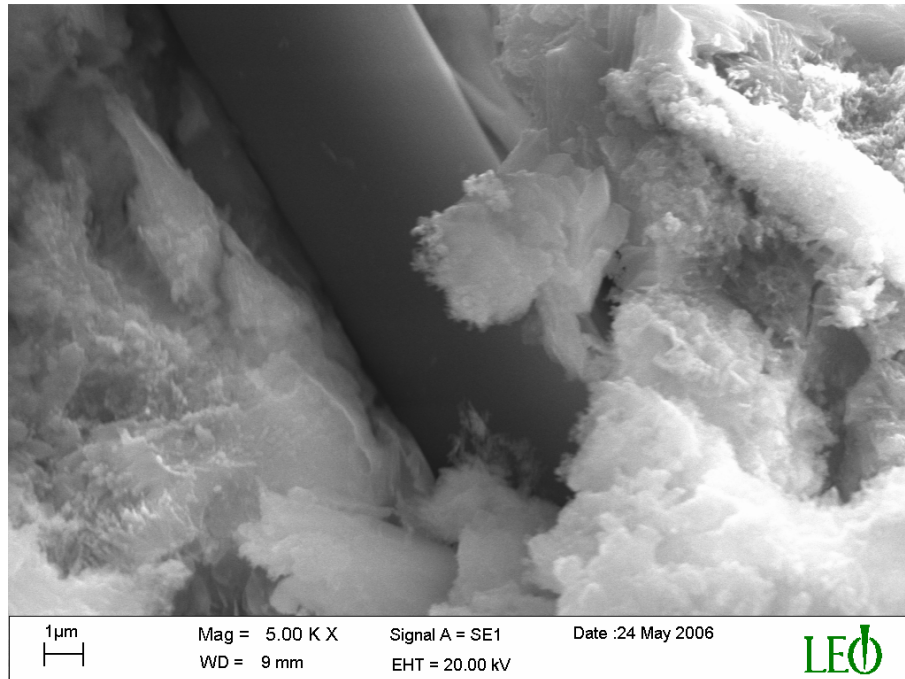


Şekil 6.31 N-CF Serisi Eğilme Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (4)

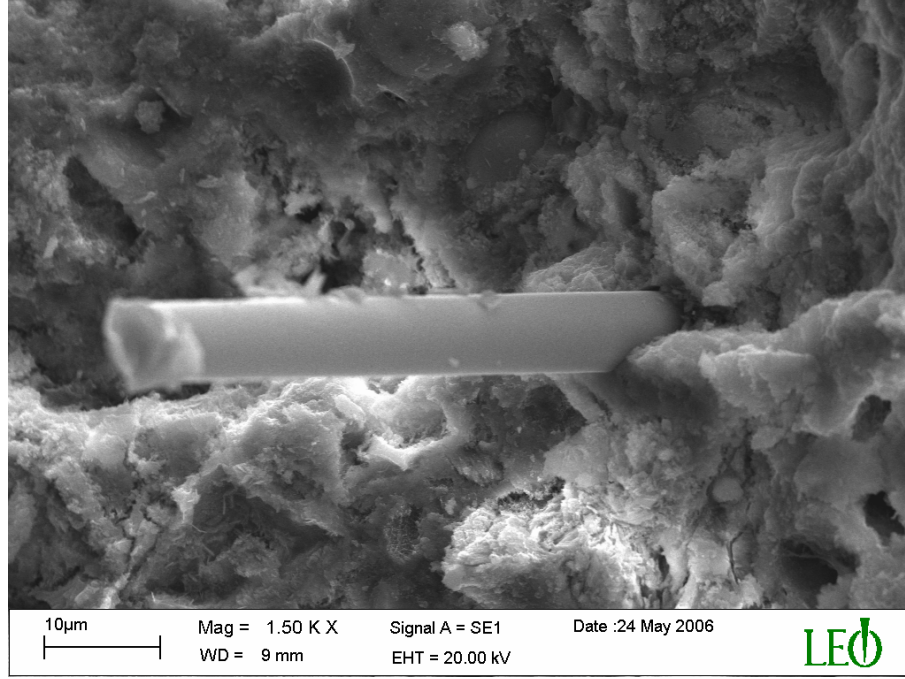
Uçucu kül katkılı UK-CF serisine ait eğilme numunesinin kırık yüzey SEM fotoğrafları Şekil 6.32, Şekil 6.33 ve Şekil 6.34’de verilmiştir.



Şekil 6.32 UK-CF Serisi Eğilme Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (1)



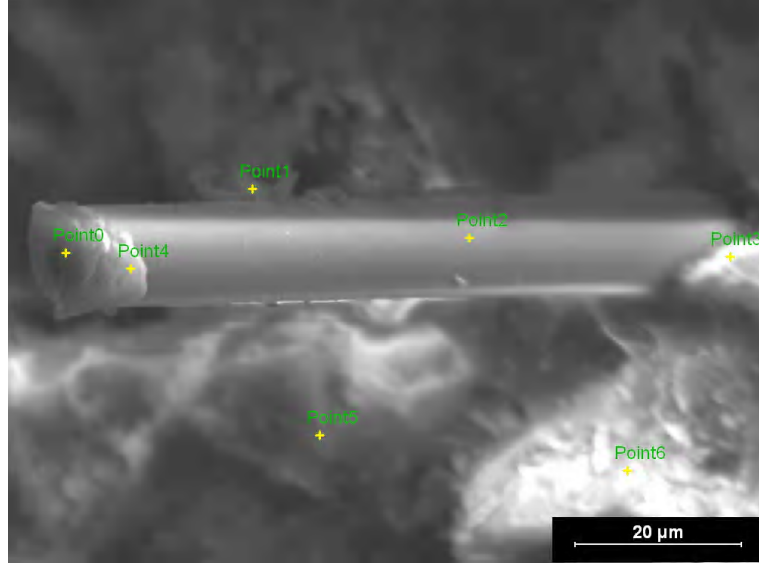
Şekil 6.33 UK-CF Serisi Eğilme Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (2)



Şekil 6.34 UK-CF Serisi Eğilme Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (3)

Şekil 6.33'te görülen 5.00KX büyütme SEM fotoğrafında fiber etrafındaki matrisin yapısı dikkat çekmektedir. Kristal şekilli oluşan bu yapılar muhtemelen çimento ana bileşenleri C_2S ve C_3S 'in hidrasyonu sonucu oluşan C-S-H ve $Ca(OH)_2$ 'ye ait görünümüdür. Çünkü Erdoğan [7], C-S-H jellerinin amorf yakın zayıf kristalli koloidal parçalardan oluştuğunu ve elektron mikroskopunda küçük dikenleri olan keseler şeklinde görüldüğünü belirtmiştir.

Şekil 6.34'te de hidrasyon ürünlerinin (özellikle C-S-H jelleri) varlığı açık olarak görülmektedir. Ayrıca basınç numunelerinde olduğu gibi fiber yüzeylerinin tam temiz olmadığı da dikkati çekmektedir. Bu durum, adhezyon olayının burada da gerçekleştiğini göstermektedir. Bu görüşü desteklemek amacıyla, Şekil 6.34'teki bölgede daha yakın bir görüntü alınmış ve belirtilen noktalardan EDX analizi yapılmıştır (Şekil 6.35). Analiz sonucunda bulunan elementler Tablo 6.10'da toplu halde verilmiştir.



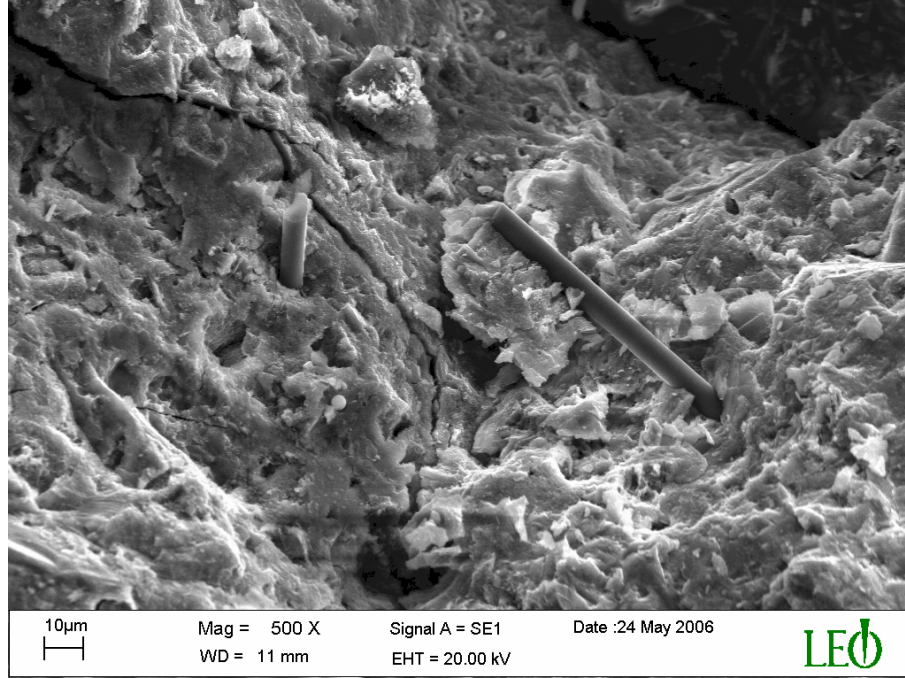
Şekil 6.35 UK-CF Serisi Eğilme Numunesinin EDX Analizi Bölgesi

Tablo 6.10 UK-CF Serisi Eğilme Numunesinin EDX Analizi Değerleri

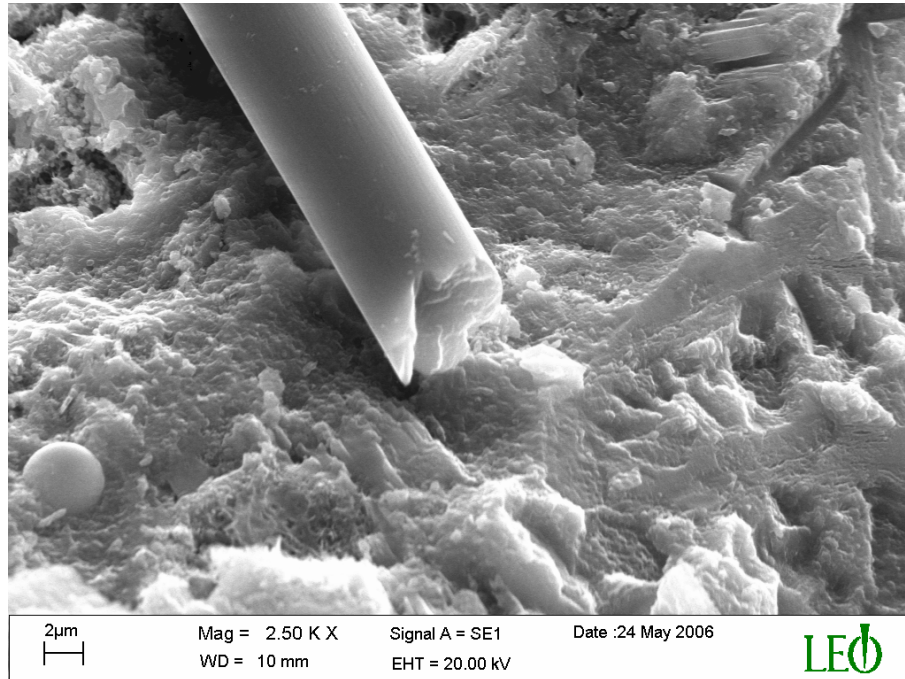
| Element | Nokta 0 (ağırlıkça%) | Nokta 1 (ağırlıkça%) | Nokta 3 (ağırlıkça%) | Nokta 6 (ağırlıkça%) |
|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| C | 95,84 | 45,45 | 53,63 | 25,25 |
| Ca | 1,75 | 46,63 | 33,42 | 56,80 |
| Si | 1,18 | 4,59 | 8,87 | 12,61 |
| Al | 0,46 | 1,40 | 2,33 | 1,40 |
| Mg | 0,30 | 0,47 | 0,34 | 0,08 |
| Fe | 0,47 | 1,46 | 1,41 | 3,86 |

UK-CF serisinin Tablo 6.10'da verilen EDX sonuçları incelendiğinde, matristeki Ca miktarının, uçucu kül içermeyen N-CF numunesinden daha az olduğu dikkati çekmektedir (Tablo 6.8). Uçucu külün kimyasal kompozisyonuna bakıldığında (Tablo 5.3), % 23,45 CaO ihtiva ettiği, bu değer ise Portland çimentosundaki CaO değerinden (%62,94) düşük olduğu görülmektedir. Özellikle, fiberin eğilmeye çalışarak kırıldığı uç bölgesi olan 0 noktasında, Ca ve diğer elementlerin yok denecek kadar az olması, muhtemelen kırılma sırasındaki max gerilmeden dolayı matrisin fibere tutunamamasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 6.36 ve Şekil 6.37 SD-CF serisi eğilme numunelerinin değişik büyütmelerle çekilmiş kırık yüzey görüntüleridir. İki fotoğrafta da dikkati çeken fiber yüzeylerinin temiz görünümüdür.

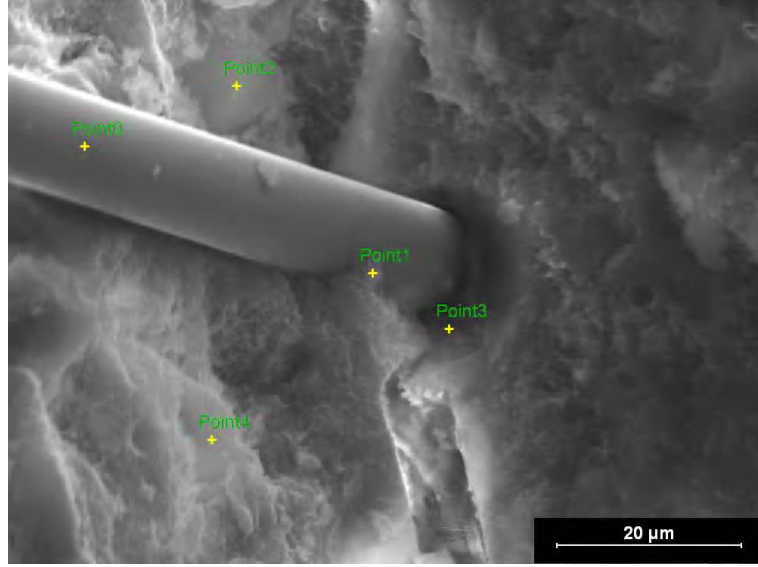


Şekil 6.36 SD-CF Serisi Eğilme Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (1)



Şekil 6.37 SD-CF Serisi Eğilme Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (2)

Bu durum basınç numunelerinde izah edildiği gibi fiber ile matris arasındaki zayıf adhezyondan kaynaklanmaktadır. EDX analizi sonuçlarında fiberin kök kısmında dahi (Şekil 6.38’de 3 nolu nokta) C elementine rastlanmaması, zayıf adhezyonu desteklemektedir (Tablo 6.11).



Şekil 6.38 SD-CF Serisi Eğilme Numunesinin EDX Analizi Bölgesi

Tablo 6.11 SD-CF Serisi Eğilme Numunesinin EDX Analizi Değerleri

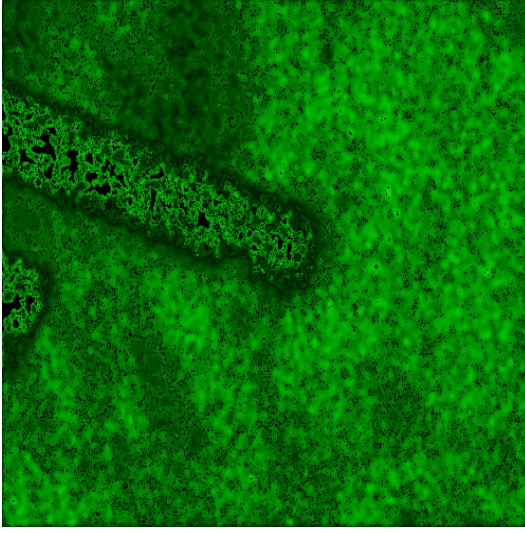
| Element | Nokta 0 (ağırlıkça%) | Nokta 1 (ağırlıkça%) | Nokta 3 (ağırlıkça%) | Nokta 4 (ağırlıkça%) |
|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| C | 93,96 | 51,19 | - | - |
| Ca | 2,95 | 32,48 | 68,54 | 60,06 |
| Si | 1,38 | 9,50 | 23,62 | 10,14 |
| S | 0,12 | - | - | 5,69 |
| Al | 0,49 | 2,07 | 3,03 | 17,16 |
| Mg | 0,42 | - | - | 2,13 |
| Fe | 0,40 | 1,54 | - | 4,82 |
| K | 0,28 | 1,63 | 4,80 | - |

X ışınları kullanılarak yüzey renklendirme işlemi uygulanan kırık yüzey fotoğrafı Şekil 6.39'da verilmektedir.

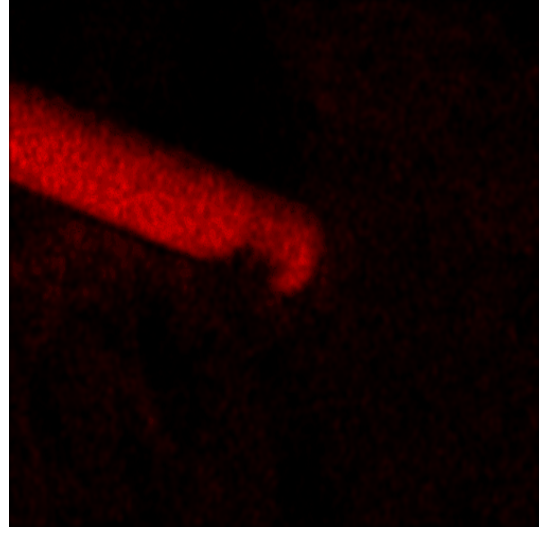


Şekil 6.39 SD-CF Serisi Eğilme Numunesinin Renklendirme İşlemi Gerçekleştirilmiş EDX Analizi Bölgesi

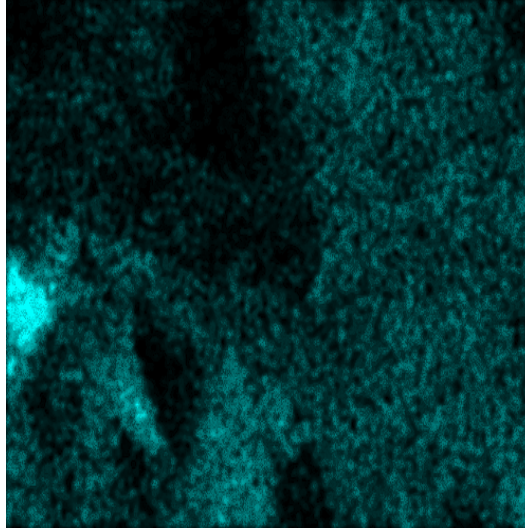
Renklendirme işlemi sonucunda, Şekil 6.39'da görüldüğü gibi numunede olması muhtemel elementler (C, Ca, Si, Al), farklı renklerde temsil edilmiştir. Bu elementlerin kırık yüzeydeki dağılımları ise Şekil 6.40 (a-d)'de verilmektedir.



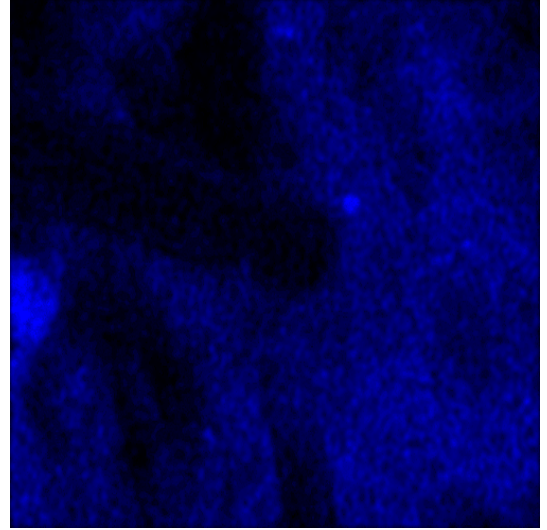
(a)



(b)



(c)

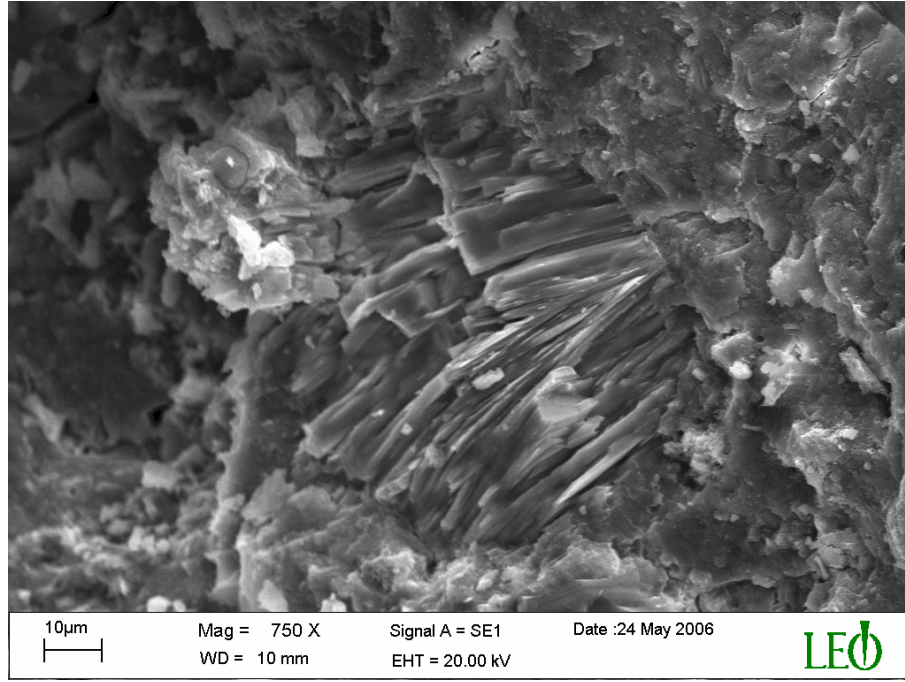


(d)

Şekil 6.40 (a)-Ca, (b)-C, (c)- Al ve (d)-Si Elementlerinin Kırık Yüzeydeki Dağılımları

Numunede %91 oranında SiO₂ içeren silis dumanı bulunmasından dolayı, Şekil 6.40 (d)'de belirgin bir şekilde Si elementi görülmektedir.

Şekil 6.41’de eğilme ile zorlanan SD-CF kodlu numunenin yüzeyinde oluşan kırıkların açıkça görüldüğü bir SEM fotoğrafı yer almaktadır. N-CF kodlu numunede olduğu gibi bunda da sivri kırıklar görülmektedir. Farklı olan durum, kırık boylarının silisli numunede daha küt ve kısa olmasıdır. SD-CF numunesinin eğilme dayanımının, N-CF numunesinin dayanımından daha fazla olması bu farklılığın bir sebebi olabilir.

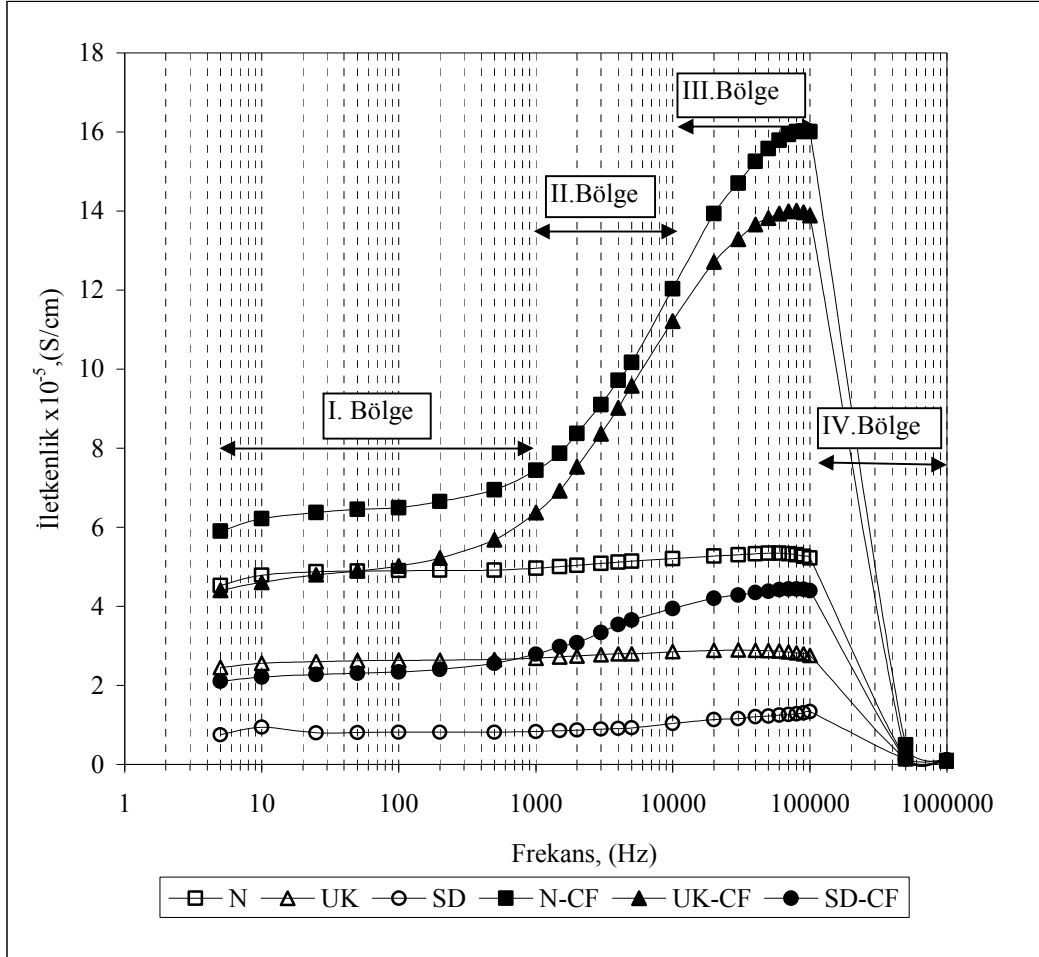


Şekil 6.41 SD-CF Serisi Eğilme Numunesine Ait SEM Fotoğrafi (3)

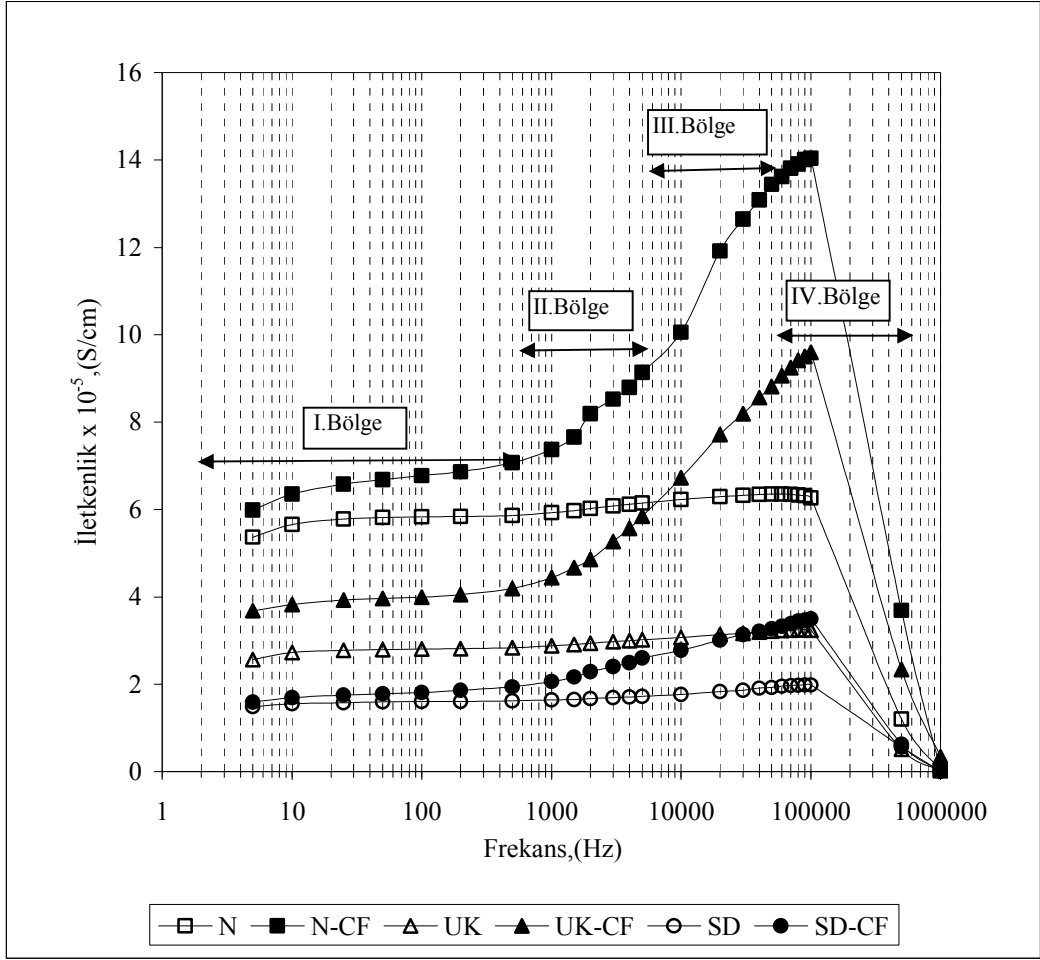
6.6 Elektrik Ölçümleri Sonuçları

Elektrik ölçümleri 5.bölümde verilen prosedüre göre yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Tüm seriler için, hem dikdörtgen prizma hem de küp şeklinde hazırlanan numunelerin yüksüz durumda artan frekansa karşı iletkenlik değişimleri sırasıyla Şekil 6.42 ve Şekil 6.43'te verilmektedir.



Şekil 6.42 Prizma Numunelerin Yüksüz Durumda Frekans-İletkenlik Değişimleri



Şekil 6.43 Küp Numunelerin Yüksüz Durumda Frekans-İletkenlik Değişimleri

Bütün frekanslarda fibersiz numunelerin iletkenliklerinin fiberli numunelerden daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum düşük akım frekanslarında bile oldukça belirgindir. Yine artan frekansla, tipi ne olursa olsun, tüm fibersiz numunelerin iletkenlik değerlerinin belirgin bir artış göstermediği dikkati çekerken; fiber içeren tüm numunelerin iletkenlikleri artan frekansla artmıştır.

Bunun nedeni şöyle açıklanabilir;

Deney için hazırlanan numuneler, test esnasında bir kondansatör gibi davranmaktadır.

Kondansatörün Alternatif akıma (AC) karşı gösterdiği direnç X_C ,

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (9)$$

formülü ile verilir [44]. Burada f , frekans, C ise kapasitansdır. Dolayısıyla, her iki numunede de frekans arttıkça iletkenliğin artması beklenir. Fakat fibersiz numunenin dielektrik katsayısı

fiberliye göre çok düşük olduğundan yani fibersiz numune yalıtkan olduğundan dolayı C kapasitans değeri oldukça küçüktür. Fibersiz numunede frekansın artması iletkenliğe tesir etmemektedir [17].

Kapasitans;

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (10)$$

formülü ile verilir. Formüldeki ϵ_0 , boşluğun dielektrik katsayısı, ϵ_r , malzemenin dielektrik katsayısı, A, elektrotun kesit alanı, d ise iki elektrot arasındaki mesafedir.

Frekans ile iletkenlik arasındaki ilişkiyi veren Şekil 6.42 ve Şekil 6.43 incelendiğinde, fiberli numunelere ait eğrilerde 4 bölge göze çarpmaktadır.

- I. Bölge: İletkenliğin 1-10³ Hz arası çok az değiştiği bölgedir.
- II. Bölge: İletkenlikte hızlı bir artışın meydana geldiği 10³ Hz ile 10⁴ Hz arasındaki bölgedir.
- III. Bölge: Eğimin azalmaya başladığı, iletkenliğin max olduğu noktaya kadar olan bölgedir.
- IV. Bölge: İletkenliğin hızla düştüğü bölgedir.

Sabit frekans altında yapılacak olan ölçümlerde, eğimin azalmaya başladığı bölgedeki ortalama frekans değeri olan f=25 kHz sabit frekans değeri olarak belirlendi.

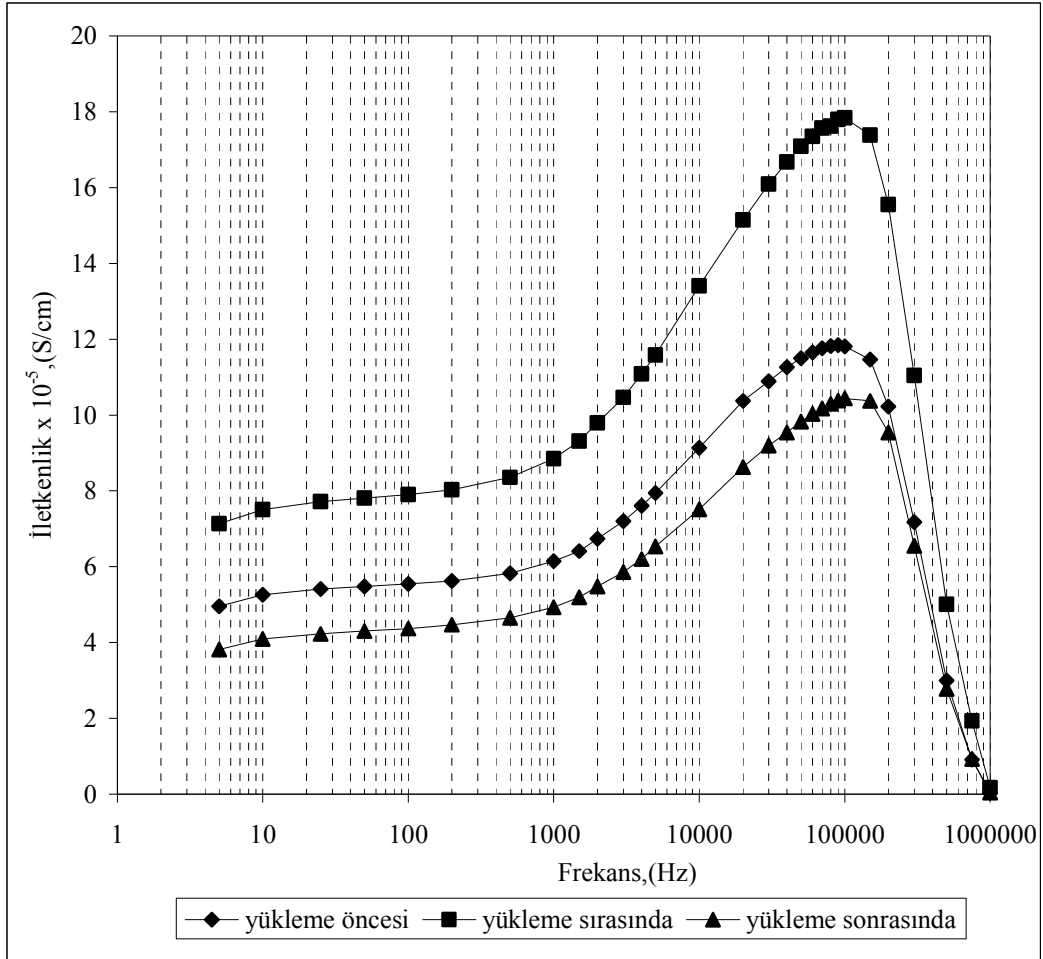
Silis dumanı ve uçucu külün, karbon fibersiz numunelerde elektrik iletkenliğini düşürdüğü Şekil 6.42 ve Şekil 6.43'te görülmektedir. Bulunan bu sonuç literatür ile uyumludur [39, 60].

Chen ve Chung [50] ve Chung [35], fiberli numunelerde, silis dumanının fiberin homojen dağılımına yardımcı olarak iletkenliği artırıcı etki yapacağını belirtirken; Şekil 6.42 ve Şekil 6.43'te görüldüğü gibi silis dumanı fiberli numunelerde de iletkenliği düşürmektedir. Bu durum muhtemelen, kullanılan çökeltici metilselülozun fiberi yeterince çökeltmesi dolayısıyla, silis dumanının buna bir katkıda bulunmamasından kaynaklanmaktadır. Katılan silis dumanı çökeltici görevi yapmadığından iletkenlik arttırıcı bir etkide de bulunmamıştır.

Şekil 6.43'te küp numuneler için verilen frekansa bağlı olarak iletkenlik değişimi incelendiğinde tüm serilerde iletkenliğin değişiminin doğasının aynı olduğu dikkati

çekmektedir. Ayrıca fiberli numunelerde tepki çok daha belirgindir. Bu nedenle içlerinden bir tip fiberli numune seçilerek (N-CF) bu tip numune, kendi max kırılma yükünün 1/3'ü kadar bir basınç yüküne maruz bırakıldı. Bu kez yük bu değerde sabit iken artan frekans ile iletkenlik değişimi arasındaki değişim kaydedildi. Son aşama olarak; numune üzerinden yük kaldırıldı ve yine yüksüz durumda artan frekansa bağlı iletkenlik değişimi kaydedildi. Tüm bu değişimler toplu halde Şekil 6.44'te verilmektedir.

Şekil 6.44'te görüldüğü gibi; hangi frekans değerinde olursa olsun, numunenin yük altındaki iletkenlik değeri, yüksüz durumundan daha büyüktür. Malzemenin piezoelektrik özelliğe sahip olmasından dolayı, bu durum beklenen bir özelliktir. Fakat aynı zamanda, uygulanan basınç ile fiberler birbirine yaklaşarak iletkenliğin artmasına neden olurken; basıncın kaldırılmasıyla fiberler birbirinden uzaklaşarak iletkenliği düşürmüştür [24].

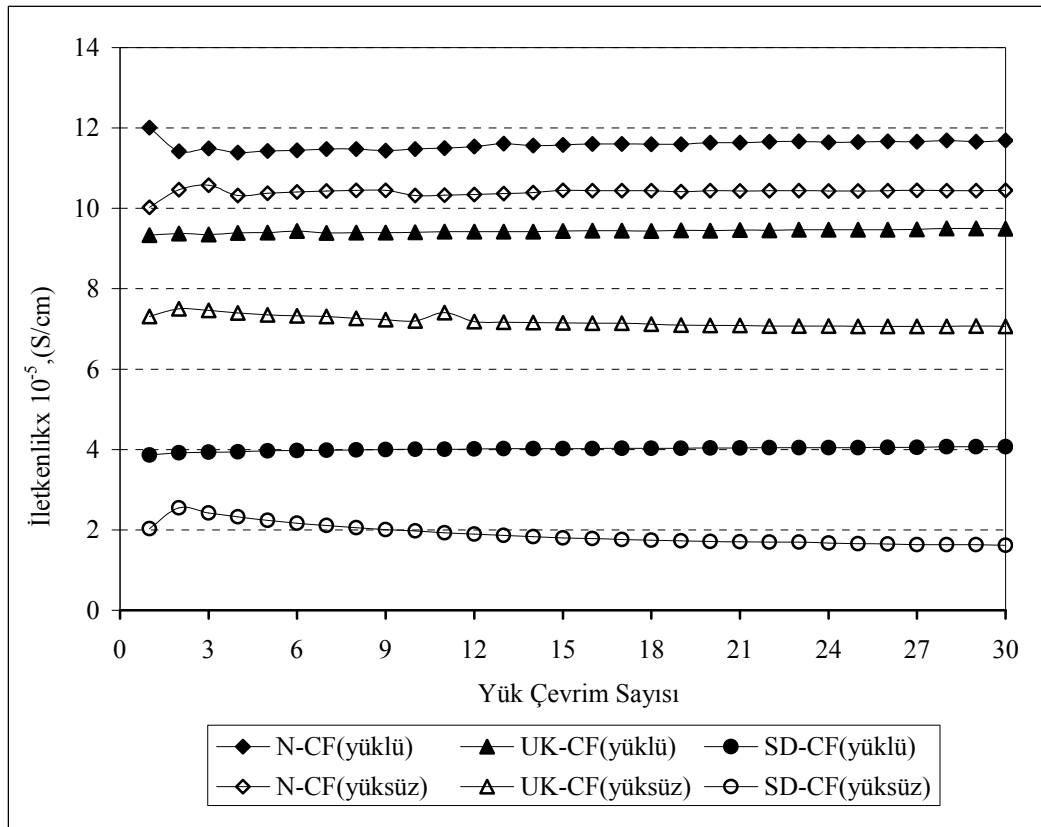


Şekil 6.44 Fiberli Numunelerin Yüke Bağlı Frekans-İletkenlik Değişimleri

Numunelerin daha önce belirlenen basınç dayanımları dikkate alınarak CF katkılı numunelere $f=25$ kHz'lik sabit frekansta altında max kırılma yükünün % 70'i kadar bir yükün

çevrimli olarak uygulanması sonucu elde edilen iletkenlik değişimi toplu olarak Şekil 6.45’de verilmektedir.

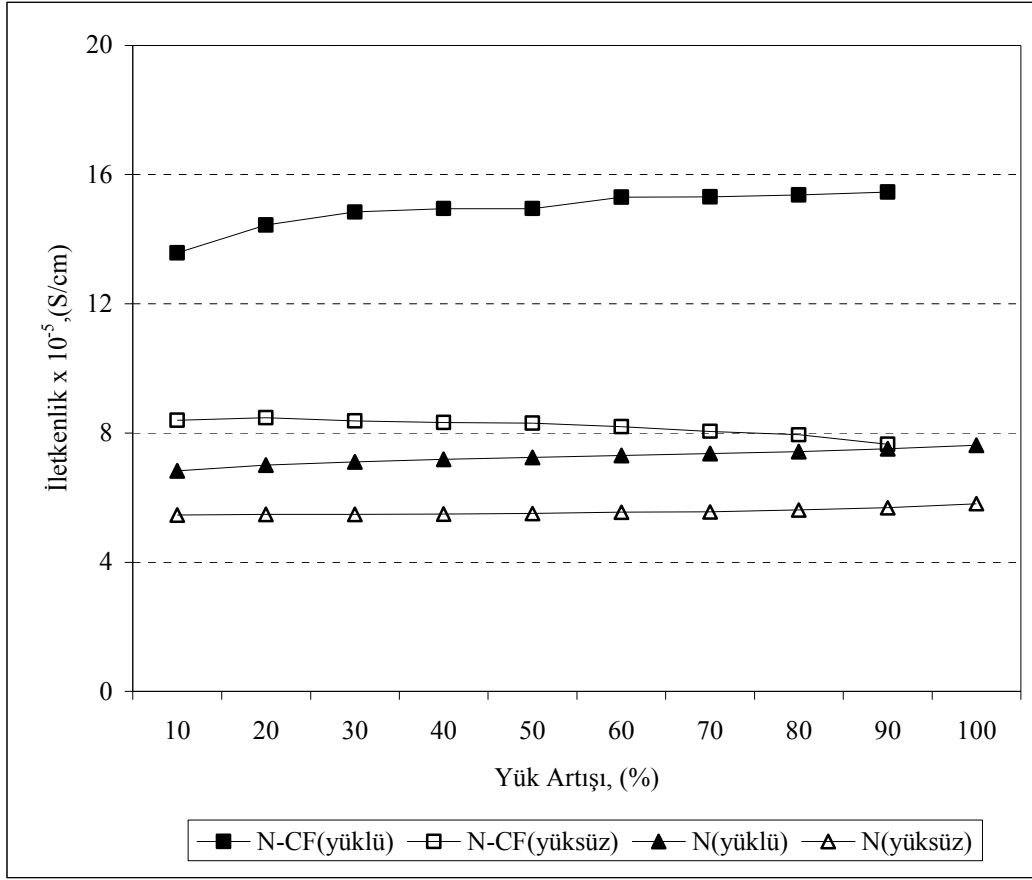
Şekil 6.45 incelendiğinde, bütün numunelerde yük kaldırıldıktan sonra iletkenliğin düştüğü görülmektedir. Bu düşüş SD-CF kodlu numunede en fazladır. Bunu UK-CF kodlu numune izlemektedir. Yapılan bu çevrimli ölçümde, çevrim sayısı arttıkça yük altında iletkenlikte bir değişme meydana gelmediği görülmektedir. Bütün numunelerde, uygulanan ilk çevrim sonrası yüksüz durumdaki iletkenliğe bakıldığında, küçük de olsa bir artış göze çarpmaktadır. Bunun sebebi, muhtemelen numune içerisindeki küçük yapısal kusurların uygulanan ilk yük ile kapanması ve çevrim yükü değerinin büyük olması sebebiyle de açılmamasıdır. Sonraki yüklemelerde önce bu kusurlar açılmakta, bunu tekrarlanan yükten dolayı oluşan çatlakların açılmaları izlemektedir. Ayrıca her yüklemde fiber yaklaşması, yük kaldırılması ile de fiber uzaklaşması olayı sürekli birbirini takip etmektedir. Fiber ile matris ara yüzeyi hasar oluşarak zayıflamaktadır [24]. Bu da yaklaşık olarak 5. çevrim ile 9.çevrimden sonra iletkenlik düşüşü ile kendini göstermektedir.



Şekil 6.45 Tekrarlı Basınç Gerilmesi Altında İletkenlik Değişimi

Her cins numune için max kırılma yükü değerinin %10’una karşılık gelen değerden başlanarak, %10’luk artışlarla uygulanan basınç gerilmesinden kaynaklanan iletkenlik değişimi,

N ve N-CF, UK ve UK-CF, SD ve SD-CF kodlu seriler için sırasıyla Şekil 6.46, Şekil 6.47 ve Şekil 6.48’de verilmektedir.



Şekil 6.46 N ve N-CF Serilerinin Artan Yük Altındaki İletkenlik Değişimi

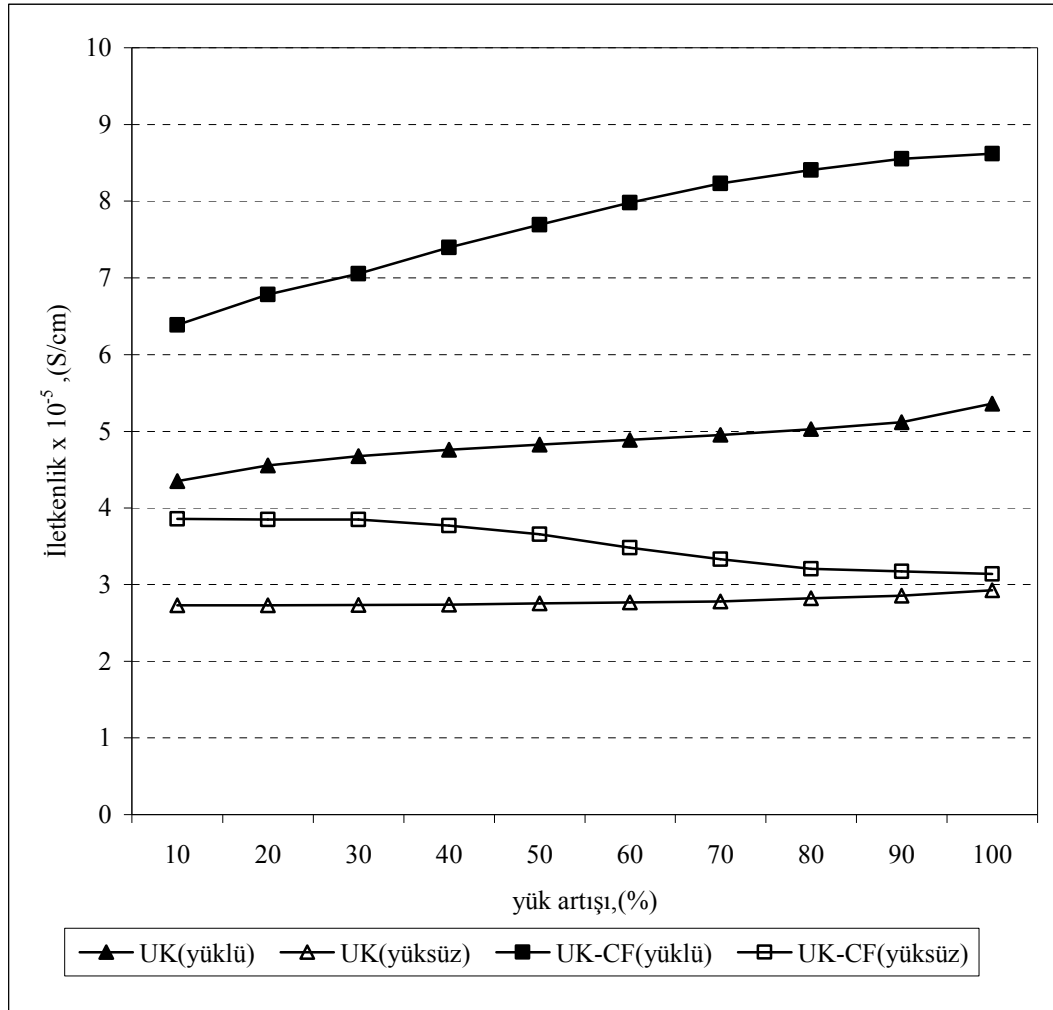
Çimento pastası piezoelektrik özellik gösteren bir yapı malzemesidir [42]. Dolayısıyla yük altında iletkenliği değişim gösterir. Uygulanan yük, malzemeyi piezoelektrik hale getirmekte ve betonun iletkenliği yük altında bir miktar artmaktadır (Şekil 6.46). Yalnız bu iletkenlik değişimi fazla değildir ve pratikte ancak çok hassas ölçümlerle sezebilir. Dolayısıyla teknik açıdan pratik faydası yoktur. Şekil 6.46’da N-CF kodlu numunelerin yük değişiminden çok daha fazla etkilendiği açıkça görülmektedir. Bunun sebebi, muhtemelen yük altında çatlak kapanması ve fiberlerin birbirine daha fazla yaklaşmasıdır [24]. Yük kaldırıldığında, yük altında sıkışıp kapanmış olan çatlakların açılması ile birlikte, iletkenliğin açıkça azaldığı ve kırılma yükünün %90’ına ulaşıldığında, fiberli numunenin iletkenliğinin, fibersiz numunenin iletkenlik değerine kadar düştüğü de dikkati çekmektedir. Yük artışı ile iletkenlikte oluşan artış, malzemeye doğrudan daha büyük basınç kuvvetleri uygulanması ve bunun da çatlaklar hangi

uzunlukta olurlarsa olsunlar kapanmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, bu durumda muhtemelen bazı fiberler de birbirleriyle temas etmektedirler.

Şekil 6.47’de, uçucu kül katkılı serilerde genel görünümün biraz farklı olduğu dikkati çekmektedir.

UK-CF kodlu seride, yüklü ve yüksüz durumlar arasındaki iletkenlik farkı, yük arttıkça daha belirgin hale gelmektedir. Yani %10 artımlı yük numuneden her kaldırıldığında, matraste oluşan ve muhtemelen N-CF serisinden daha fazla olan çatlakların açılması ile iletkenlik her çevrimde biraz daha düşmekte; tekrar yüklendiğinde ise bir önceki çevrime kıyasla daha fazla çatlak kapanması ve buna paralel olarak daha fazla fiberin birbirine temasından dolayı her çevrimde iletkenlik daha fazla artmaktadır.

UK-CF serilerinde çatlakların N-CF serilerinden daha fazla olması, basınç dayanımının N-CF serilerinden düşük olmasına bağlanabilir.

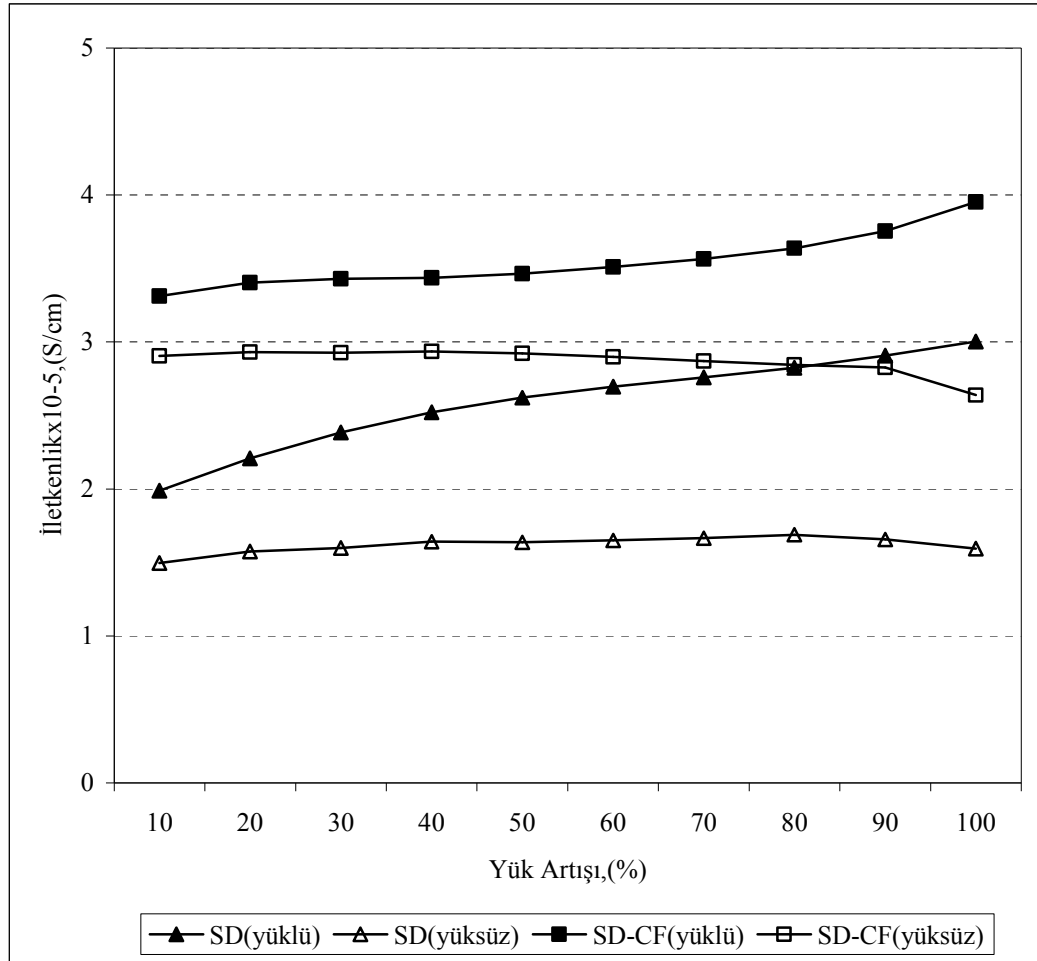


Şekil 6.47 UK ve UK-CF Serilerinin Artan Yük Altındaki İletkenlik Değişimi

Şekil 6.48’de ise silis dumanı katkıli serilerin iletkenliklerinin, %10’luk artışlarla uygulanan basınç gerilmesi karşısında sergilediği durum görülmektedir.

Hem karbon fiberli hem de karbon fibersiz numunelerde yük altında oluşan çatlakların kapanması ve fiberlerin birbirine yaklaşması nedeniyle, yüksüz duruma kıyasla iletkenliğin daha fazla olduğu görülmektedir. Yük kaldırıldığında, yapıda oluşan çatlaklar nedeniyle iletkenlik azalmaktadır.

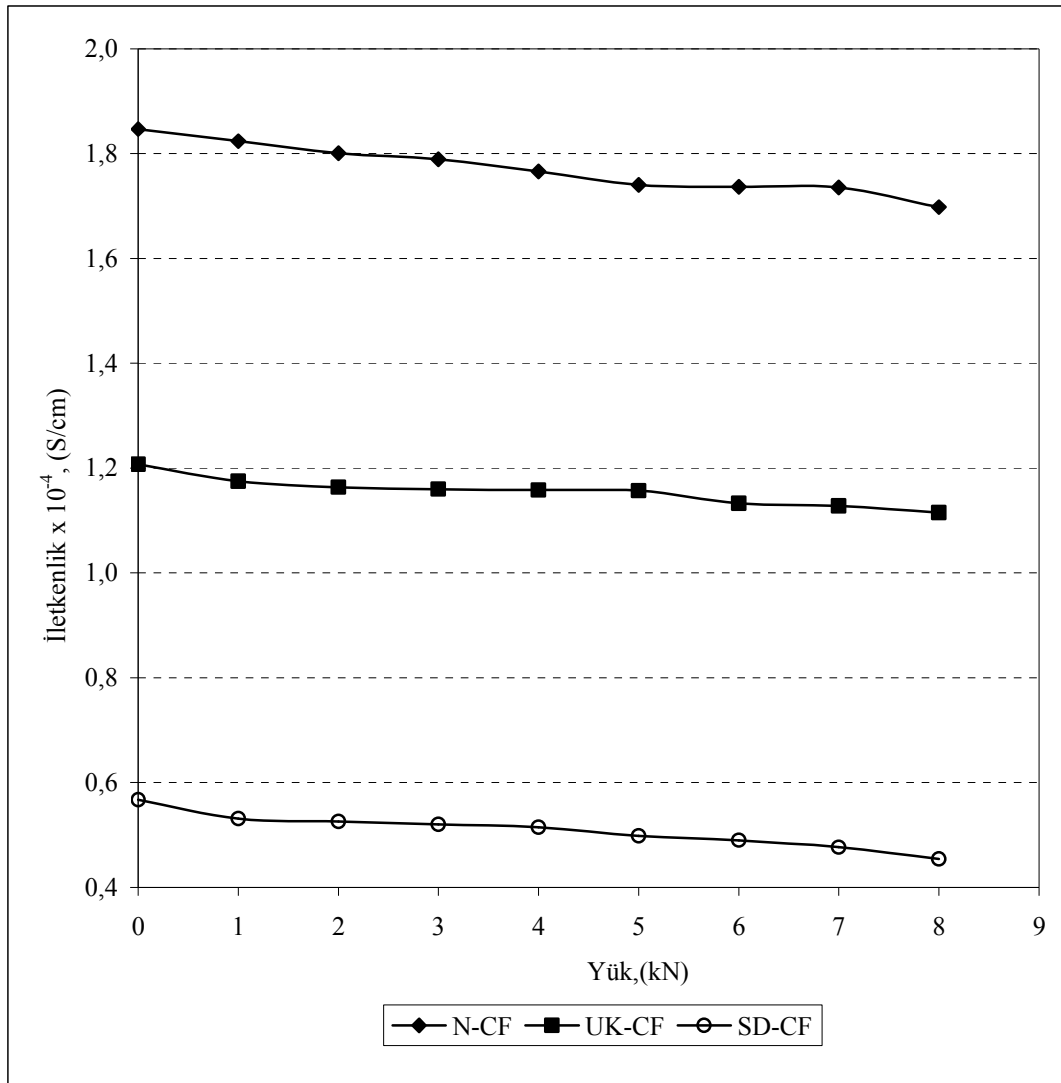
Karbon fiberli numunede yük altında ve yüksüz durumda iletkenlik değerleri arasındaki fark, karbon fibersiz numunelere göre daha azdır. Bu durum, bünyede çatlak oluşmasına rağmen fiberin yaptığı katkıyı göstermektedir. Yük altında yapıda oluşan çatlak boyu, fiberli numunelerde daha azdır [5]. Bunda silis dumanının çok küçük tane boyutundan dolayı matrisi daha iyi doldurması da etkili olmaktadır. Basınç dayanımının %80’ine ulaştığında, çatlak boyu çok büyüdüğü için iletkenlikte daha belirgin bir düşüş görülmektedir.



Şekil 6.48 SD ve SD-CF Serilerinin Artan Yük Altındaki İletkenlik Değişimi

Şekil 6.49'da, prizma numunelerin sabit frekansta ve sürekli artan çekme gerilmesi altındaki iletkenlik değişimi görülmektedir.

Chung [24], çekme gerilmesi altında elektrik direncin arttığını söyleyerek bunun da çekme ile meydana gelen fiber uzaklaşmasından meydana geldiğini belirtmiştir. Direncin tersi olarak tanımlanan iletkenliğin de artan çekme gerilmesi sonucu fiberlerin birbirinden uzaklaşması ile azalması beklenen ve literatürle uyum gösteren bir sonuçtur.

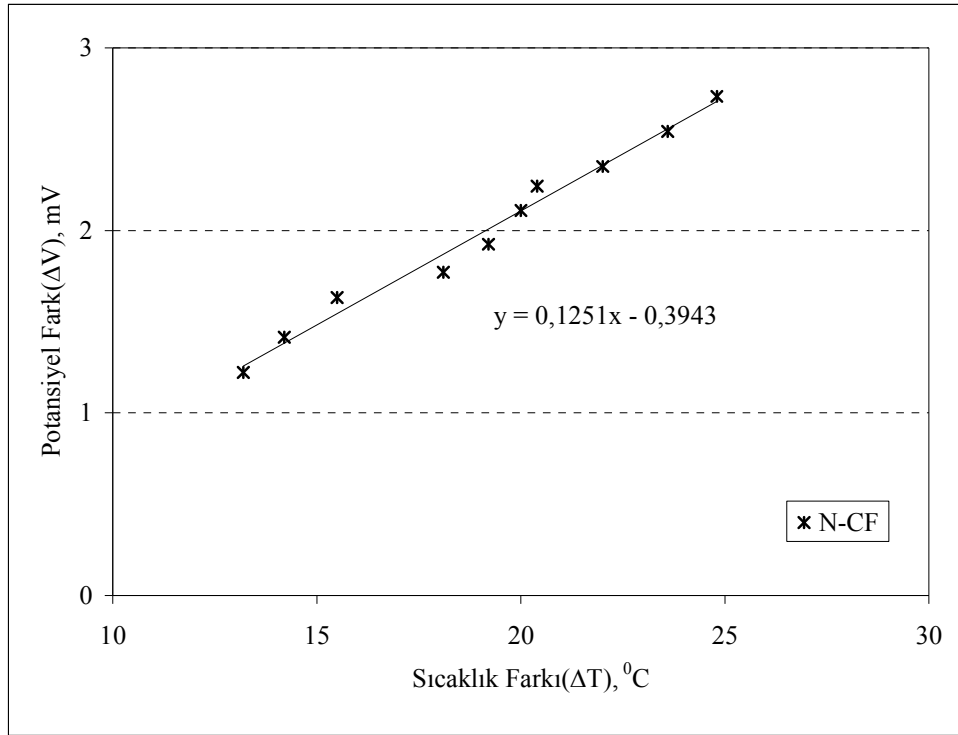


Şekil 6.49 Prizma numunelerin Sabit Frekansta Yük-İletkenlik Değişimi

6.7 Termoelektrik Ölçüm Sonuçları

Fiberli 3 serinin termoelektrik özelliğini belirlemek için yapılan ölçümlerin sonuçları bu bölümde verilmektedir. Fibersiz numuneler için de ölçüm yapılmaya çalışılmış fakat ölçüm aletlerinden tutarlı sonuçlar elde edilememiştir. Bu konu üzerinde daha önceden yapılan bazı çalışmalarda katkı olmadan, sadece su ve çimentodan meydana getirilen çimento hamuru için Seebeck katsayısı $-2 \mu\text{V} / ^\circ\text{C}$ olarak belirtilirken [22], bir başka çalışmada fibersiz çimentoda Seebeck etkisinin bulunmadığı belirtilmektedir [29].

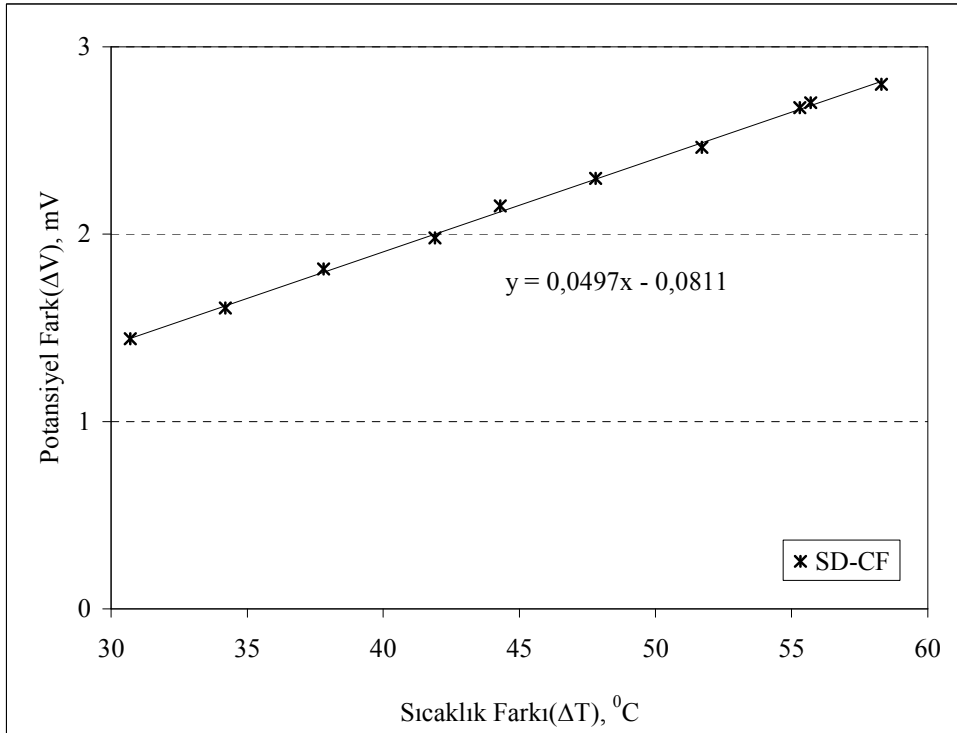
Şekil 6.50, Şekil 6.51 ve Şekil 6.52 sırasıyla N-CF, UK-CF ve SD-CF serileri için, Seebeck voltajı [61] olarak da tanımlanan ΔV 'nin sıcaklık farkı ΔT ile değişimini göstermektedir.



Şekil 6.50 N-CF Serisine Ait ΔV - ΔT Grafiği



Şekil 6.51 UK-CF Serisine Ait ΔV - ΔT Grafiği



Şekil 6.52 SD-CF Serisine Ait ΔV - ΔT Grafiği

Şekiller incelendiğinde, seebeck voltajının sıcaklık ile doğrusal olarak arttığı görülmektedir. Bu durum karbon fiber içeren numunelerin termoelektrik özelliğe sahip olduğunun bir göstergesidir [61]. Bu konuda yapılmış bir çalışmada, bu artışın fibersiz numunelerde doğrusal olmadığı, buna karşın fiberli numunelerde doğrusal olduğu belirtilmektedir [29].

Sonuçta termoelektrik açıdan irdelendiğinde; karbon fiber takviyeli betonda, matrisin içeriği ne olursa olsun fiberin asıl işlevi, Seebeck voltajının lineerliğini temin etmektir.

Bakır elektrot kullanıldığından dolayı, grafiklerin eğimlerinden elde edilen seebeck katsayıları, bakır referans olarak bulunan değerdir. Bulunan bu seebeck katsayıları, bakırın mutlak termoelektrik gücü olan (+2,34 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$) değeri ile toplanarak numunelere ait mutlak termoelektrik güç belirlenmiştir. Tüm bu değerler Tablo 6.12’de toplu olarak verilmektedir.

Tablo 6.12 Karbon Fiberli Serilerin Seebeck Katsayıları ve Mutlak Termoelektrik Güçleri

| Seriler | Seebeck Katsayısı* ($\text{mV} / ^\circ\text{C}$) | Mutlak Termoelektrik Güç ($\text{mV} / ^\circ\text{C}$) |
|---------|---|---|
| N-CF | + 0,1251 | + 0,12744 |
| UK-CF | + 0,0661 | + 0,0684 |
| SD-CF | + 0,0497 | + 0,0520 |

* Bakır Referans Olarak

Tablo 6.12’de, çok büyük farklar olmamakla birlikte, mineral katkıların seebeck katsayısını dolayısıyla malzemenin mutlak termoelektrik gücünü düşürdüğü görülmektedir.

Yapılan termoelektrik ölçümler, karbon fiber ilavesi ile kompozitte p tipi bir iletim olduğunu göstermiştir. Çünkü mutlak termoelektrik gücün başka bir deyişle Seebeck katsayısının (-) işaretli olması, iletimin elektron hareketi ile gerçekleştiğini yani kompozitin n tipi bir yarı iletken olduğunu gösterirken; bu katsayının (+) işaretli olması ise iletimin boşluk hareketi gerçekleştiğini yani kompozitin p tipi bir yarı iletken olduğunu göstermektedir [22,28].

Seebeck katsayısının büyüklüğü, baraj ve köprü ayakları gibi ağır kütle beton yapılar için önemli olan termal yükün oluşturacağı hasarın izlenmesinde sensör olarak kullanılıp kullanılmayacağını hakkında bir fikir vermektedir.

Yine seebeck etkisinin varlığı, yangın gibi termal zorlanmaların büyük tahribatlar vermemesi için erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesinde, karbon fiber takviyeli betonların termal sensör olarak kullanılabilirliğini göstermektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, matrisini hafif agreganın oluşturduğu karbon fiber takviyeli hafif betonun gerilme ve sıcaklık gibi dış zorlamalara verdiği tepkiler incelenmiştir. Bu tepkiler, betonun elektrik iletkenliğinde meydana gelen değişimlerin bütünüdür ve bunların tümü akıllılık olarak adlandırılan deformasyon ve hasarı sezme yeteneğini oluşturmaktadır.

Yapılan incelemeler sonucunda, literatürde akıllılık özellikleri henüz incelenmemiş olan karbon fiber takviyeli hafif betona akıllılık özelliği kazandırılabilceği görülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalar sırasında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- ✓ Çimentonun yaklaşık % 0,5'i oranında karbon fiber ilavesi, elektrik iletkenliğini arttırmak suretiyle, hafif agrega ile üretilen hafif betona sezgi kabiliyeti kazandırmıştır. Bu haliyle hafif beton, akıllı hafif beton olarak adlandırılabilir.
- ✓ Hafif betona karbon fiber ilave edilmesi, mineral katkı kullanılsın ya da kullanılsın, çekme dayanımını arttırırken; basınç dayanımını azaltmıştır. Bu azaltıcı etki fiberin harç içindeki hava boşluğu miktarını arttırmasından kaynaklanmıştır. Bu da fiberli betonların etüv kurusu yoğunluklarının fibersiz olan hafif betonlardan daha az olması ile kendini göstermektedir.
- ✓ Fiberli serilerde, silis dumanının basınç dayanımını en az düşüren, çekme dayanımını da en fazla arttıran mineral katkı olduğu belirlenmiştir.
- ✓ Silis dumanı, elektrik iletkenliğine olumsuz etki etmektedir. Dolayısıyla, betonun sezme özelliğinin önemli olduğu uygulamalarda dikkatle kullanılmalıdır.
- ✓ Mineral katkısız, silis dumanlı ve uçucu küllü tüm serilere karbon fiber ilavesi, elektrik iletkenliklerini arttırmıştır. Frekansın artırılması ile yapılan elektrik ölçümlerinde, fibersiz numunelerin iletkenlikleri artan frekansla değişmezken; fiber içeren tüm numunelerin iletkenlikleri artan frekansla artmıştır.
- ✓ Mineral katkısız seri en yüksek iletkenliğe sahip iken; bunu uçucu küllü seri izlemektedir. Silis dumanı katkılı serinin ise silis dumanının çok ince taneli ve yalıtkan olması sebebiyle en düşük elektrik iletkenliğine sahip olduğu görülmüştür. Bu dizilim hem fiberli hem de fibersiz tipler için aynıdır.
- ✓ Uygulanan basınç gerilmesi ile fiberli numunelerin elektrik iletkenlikleri artmıştır. Mevcut yapısal çatlakların kapanması ve fiberlerin birbirine yaklaşması ile oluşan bu artış, basıncın kaldırılması ile tekrar düşmüştür.

- ✓ Uygulanan çekme gerilmesi ile fiberli numunelerin elektrik iletkenlikleri azalmıştır. İletkenlikteki bu azalma, numunede çatlakların açılması ve fiberlerin birbirinden uzaklaşması sonucunda oluşmaktadır.
- ✓ Fiberli numunelere tekrarlı basınç yükü uygulandığında, her çevrimde iletkenliğin geri dönüşümlü olarak arttığı belirlenmiştir. Fakat yaklaşık 5-9.çevrim sonucunda yapı içinde kalıcı çatlak ve kusurların oluşmasından dolayı, yüksüz durumdaki iletkenliklerde düşmeler gözlenmiştir.
- ✓ Fibersiz çimento pastası çok düşük piezoelektrik özelliğe sahipken; fiber takviyesi numunenin daha fazla piezoelektrik özellik göstermesini sağlamış ve böylelikle dışardan gelen zorlamalara verdiği tepki daha belirgin ve ölçülebilir sınırlar içinde olmuştur.
- ✓ Mikroyapı ve fraktografik incelemeler sonucunda, katkısız (N-CF) ve uçucu küllü (UK-CF) numunelerde fiber ile matris arasında kuvvetli bir adhezyon olduğu; silis dumanı katkılı numunede (SD-CF) ise adhezyonun çok zayıf olduğu, fakat buna rağmen çekme dayanımlarının diğer iki seriden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Çekme ve basınç zorlamalarında numunelerden alınan elektriksel tepkinin de adhezyon ile doğru orantılı bir seyir izlediği belirlenmiştir.
- ✓ Fiberli numunelerin termoelektrik özellikleri incelenmiş ve karbon fiber takviyeli hafif betonun seebeck etkisinin varlığından dolayı sıcaklığı sezebildiği belirlenmiştir.

7.2 Öneriler

- ✓ Kullanılan karbon fiberin ağırlıkça yüzdesinin arttırılmasıyla, elektriksel davranışlarının değişimi incelenebilir.
- ✓ Matriste farklı agrega türleri ve farklı karışım oranları kullanılarak, tüm bu değişimlerin kendi kendini izleme kabiliyetinde meydana getireceği değişimler araştırılabilir.
- ✓ Karbon fiber takviyeli hafif betonun termoelektrik özelliğinin yanı sıra termal iletkenlik özelliği de araştırılabilir.
- ✓ Karbon fiberli beton kullanılarak kolon veya kiriş gibi bir yapı elemanı tasarlanabilir. Bu yapı elemanının dinamik yük altında zorlanan bölgelerine elektrik bağlantıları yapılarak sezgi kabiliyetindeki değişim yerinde (in-situ) araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Chung, D.D.L. and Chen, P., (1993), Carbon Fiber Reinforced Concrete For Smart Structures Capable of Non-Destructive Flaw Detection, *Smart Mater. Struct.*,2, 22-30.
2. Mingqing, S., Zhuoqiu, L., Qingping, L., Zhigang, T., Darong, S., (2000), A study on Thermal Self-Diagnostic and Self-Adaptive Smart Concrete Structures, *Cem.Concr.Res.*, 30, 1251-1253.
3. Chen, P. and Chung, D.D.L., (1993), Concrete Reinforced with up to 0.2 vol % of Short Carbon Fibres, *Composites*, 24(1), 33-52.
4. Shi, Z.Q. and Chung, D.D.L., (1999), Carbon Fiber Reinforced Concrete for Traffic Monitoring and Weighing in Motion, *Cem.Concr.Res.*, 29, 435-439.
5. Chen, P. and Chung, D.D.L., (1996), Carbon Fiber Reinforced Concrete as an Intrinsically Smart Concrete for Damage Assessment during Static and Dynamic Loading, *ACI Materials J.* 78(3), (1995) 816-818.
6. Ersoy, U., (1995), *Betonarme*, Evrim Yayınevi, İstanbul, 643s.
7. Erdoğan, T.Y., (2003), *Beton*, ODTÜ Yayıncılık, Ankara, 741s.
8. Şimşek, O., (2000) *Yapı Malzemesi-II*, Beta Yayınevi, İstanbul, 211s.
9. TS EN 197-1, (2002), Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 25s.
10. TS 706 EN 12620, (2003), Beton Agregaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 46s.
11. TS EN 206-1, (2002), Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 68s.
12. Yeğınobalı, A., (1997), Hafif Beton ve Yüksek Dayanımlı Hafif Beton, *Çimento ve Beton Dünyası*, Yıl 2, Sayı 18, 20-30.
13. ASTM C 618, (1994), Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, *Annual Book Of ASTM Standards*.
14. Yaman, Y., Çalışkan, T., Nalbantoğlu, V., (2002), Akıllı Yapıların Havacılık ve Uzay Mühendisliğindeki Uygulamaları, SAVTEK 2002 Savunma Teknolojileri Kongresi, 24-25 Ekim 2002, 333-339, ODTÜ, Ankara.
15. Okay, O., (2003) , Polimerik Malzemelerin Bugünü ve Yarını, Yapı Malzemesi Kurultayı 8-9 Aralık 2003 Lütfi Kırdar Kongre ve Sergi Sarayı, İstanbul, (Davetli Konuşmacı).
16. Aydınçak, İ., (2003), Akıllı Malzemeler ve Havacılık, *Mühendis ve Makine Dergisi*, Mart 2003, Sayı 518.

17. Askeland, D.R., (1990), *The Science and Engineering of Materials*, Chapman&Hall, London, 880p.
18. Wen, S. and Chung, D.D.L., (2001), Carbon Fiber Reinforced Cement as a Strain-Sensing Coating, *Cem.Concr.Res.*, 31, 665-667.
19. Mingqing, S., Zhuoqiu, L., Qizhao, M., Darong, S., (1999), A study on Thermal Self-Monitoring of Carbon Fiber Reinforced Concrete, *Cem.Concr.Res.*,29,769-771.
20. Smith,W.F.,(Çeviri:Kınıkoğlu, N. G.), (2001), *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, Literatür Yayıncılık,İstanbul
21. Chung, D.D.L.,(2000), Cement Reinforced with Short Carbon Fibers: a Multifunctional Material, *Composites: Part B*,31,511-526.
22. Chung, D.D.L., (2002), Composites Get Smart, *Materials Today*, Jan 2002, 30-35.
23. Wen, S. and Chung, D.D.L., (2001), Electric Polarization in Carbon Fiber-Reinforced Cement, *Cem.Concr.Res.*, 31, 141-147.
24. Chung, D.D.L., (1998), Self-Monitoring Structural Materials, *Materials Science and Engineering*, R22, 57-78.
25. Chen, B., Wu, C., Wu, Y., (2004), Conductivity of Carbon Fiber Reinforced Cement-Based Composites, *Cem. Concr. Comp.*, 26, 291-297.
26. Chiarello, M. and R.Zinno, (2005), Electrical Conductivity of Self-monitoring CFRC, *Cem.Concr.Comp.* 27, 463-469
27. Fu, X., and Chung, D.D.L., (1995), Contact Electrical Resistivity Between Cement and Carbon Fiber: Its Decrease with Increasing Bond Strength and Its Increase During Fiber Pull-Out, *Cem.Concr.Res.*, 25(7), 1391-1396.
28. Kao, K.C., Hwang, G.W., (1981), *Electrical Transport in Solids with Particular Reference to Organic Semi Conductors*, Pergamon Press, England, 660p.
29. Wen, S. and Chung, D.D.L., (1999), Seebeck Effect in Carbon Fiber-Reinforced Cement, *Cem.Concr.Res.*, 29, 1989-1993.
30. Mingqing, S., Zhuoqiu, L., Qizhao, M., Darong, S., (1998), Thermoelectric Percolation Phenomena in Carbon Fiber Reinforced Concrete, *Cem.Concr.Res.*, 28, 12. 1707-1712.
31. Mingqing, S., Zhuoqiu, L., Qizhao, M., Darong, S., (1998), Study On the Hole Conduction Phenomenon in Carbon Fiber-Reinforced Concrete, *Cem.Concr.Res.*, 28(4), 549-554.
32. www.acm.org/cacm/
33. Cao, J. and Chung, D.D.L., (2001), Defect Dynamics And Damage of Concrete Under Repeated Compression, by Electrical Resistance Measurement, *Cem.Concr.Res.*,31, 1639-1642.

34. Fu, X., Ma, E., Chung, D.D.L., Anderson, W.A., (1997), Self-Monitoring in Carbon Fiber Reinforced Mortar By Reactance Measurement, *Cem.Concr.Res.*27 (6) 845-852.
35. Chung, D.D.L., (2005), Dispersion of Short Fibers in Cement, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, July/August 2005, 379-383.
36. Banthia, N., Djeridane, S., Pigeon, M., Electrical Resistivity Of Carbon And Steel Micro-Fiber Reinforced Cements
37. Soroushian, P., Nagi, M., Hsu, J., (1992), Optimization of the Use of Lightweight Aggregates in Carbon fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, 89(3), 267-276.
38. Yang, X. and Chung, D.D.L., (1992), Latex-Modified Cement Mortar Reinforced by Short Carbon Fibres, *Composites*, 23(6), 453-460.
39. Chung, D.D.L. and Fu, X., (1997), Effects of Silica Fume, Latex, Methylcellulose and Carbon Fibers on the Thermal Conductivity and Specific Heat of Cement Paste, *Cem.Concr.Res.* 27, (12), 1799-1804.
40. Chen, P. and Chung, D.D.L., (1993), Carbon Fiber Reinforced Concrete as an Electrical Contact Material for Smart Structures, *Smart Mater. Struct.*, 2,181-188.
41. Cao, J. and Chung, D.D.L., (2005), Role of Moisture in the Seebeck Effect in Cement-Based Materials, *Cem.Concr.Res.*, 35, 810-812.
42. Mingqing, S., Qingping, L., Zhuoqiu, L., Yaozu, H., (2000), A Study of Piezoelectric Properties of Carbon Fiber Reinforced Concrete and Plain Cement Paste During Dynamic Loading, *Cem.Concr.Res.*30 1593-1595.
43. Wen, S. and Chung, D.D.L., (2000), Uniaxial Tension in Carbon Fiber Reinforced Cement, Sensed by Electrical Resistivity Measurement in Longitudinal and Transverse Directions, *Cem.Concr.Res.*,30, 1289-1294.
44. Cao, J. and Chung, D.D.L., (2001), Carbon Fiber Reinforced Cement Mortar Improved by Using Acrylic Dispersion as an Admixture, *Cem.Concr.Res.*31 1633-1637.
45. Yang, Y., (2002), Methods Study on Dispersion of Fibers in CFRC, *Cem.Concr.Res.*32 747-750.
46. Fu, X., Lu, W., Chung, D.D.L., (1998), Ozone Treatment of Carbon Fiber for Reinforcing Cement, *Carbon*, 36(9), 1337-1345.
47. Bontea, D-M., Chung, D.D.L., Lee, G.C., (2000), Damage in Carbon Fiber Reinforced Concrete Monitored by Electrical Resistance Measurement., *Cem.Concr.Res.*, 30, 651-659.
48. Fu, X., and Chung, D.D.L., (1997), Effects of Curing Age on the Self-Monitoring Behavior of Carbon Fiber for Reinforced Mortar, *Cem.Concr.Res.*, 27(9), 1313-1318.
49. Reza, F., Yamamuro, J.A., Batson, G.B., (2002), 15 th ASCE Engineering Mechanics Conference June 2-5, 2002, Columbia University, New York, NY

50. Chen, P. and Chung, D.D.L., (1995), Improving the Electrical Conductivity of Composites Comprised of Short Conducting Fibers in a Nonconducting Matrix: The Addition of Nonconducting Particulate Filler, *Journal of Electronic Materials*, 24(1), 47-51.
51. Wen, S. and Chung, D.D.L., (2001), Effect of Carbon Fiber Grade on the Electrical Behavior of Carbon Fiber Reinforced Cement, *Carbon*, 39, 369-373.
52. Kayalı, O., Haque, M.N., Zhu, B., (2003), Some characteristics of High Strength Fiber Reinforced Lightweight Aggregate Concrete, *Cem.Concr.Comp.*, 25, 207-213.
53. Reza, F., Yamamuro, J.A., Batson, G.B., (2004), Electrical Resistance Change in Compact Tension Specimens of Carbon Fiber Cement Composites, *Cem.Concr.Comp.*, 26, 873-881.
54. TS 1114, (1986), Hafif Agregalar-Beton İçin, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 11s.
55. TS EN 450-1, (2006), Uçucu kül – Betonda kullanım için – Bölüm 1: Tarifler, özellikler ve uygunluk kriteri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 35s.
56. TS 2511, (1977), Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 13s.
57. TS EN 12390-3, (2003), Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Dene Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 12s.
58. TS 500, (2000), Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 79s.
59. TS EN 12390-5, (2003), Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 5: Dene Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 5s.
60. Abo El-Enein, S.A., Kotkata, M.F., Hanna, G.B., Saad, M., Abd El-Razek, M.M., (1995), Electrical Conductivity of Concrete Containing Silica Fume, *Cem.Concr.Res.*, 25(8), 1615-1620.
61. Wen, S. and Chung, D.D.L., (2002), Thermoelectric behavior of Carbon-Cement Composites, *Carbon*, 40, 2495-2505.

ÖZGEÇMİŞ

1975 yılında Elazığ'da doğdu, ilk, orta ve lise tahsilini Elazığ'da tamamladıktan sonra 1992 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 4 yıllık lisans eğitiminden sonra 1996 yılında aynı bölümde yüksek lisans eğitimine başlayarak 1999 yılında inşaat yüksek mühendisi ünvanı aldı. 2001 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi bölümünde doktora eğitimine başladı. 2003 yılı Aralık ayında aynı bölümde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. Evli ve bir çocuk annesi olan Bahar Demirel halen Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi bölümünde görev yapmaktadır.