



**ÇEVİRİMSSEL EĞİLME YÜKLEMELERİ ALTINDA ÇİMENTO
BAĞLAYICILI KOMPOZİTLERİN KENDİLİĞİNDEN ALGILAMA
KABİLİYETİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Oğuzhan ÖCAL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2018

Oğuzhan ÖCAL tarafından hazırlanan “ÇEVİRİSEL EĞİLME YÜKLEMELERİ ALTINDA ÇİMENTO BAĞLAYICILI KOMPOZİTLERİN KENDİLİĞİNDEN ALGILAMA KABİLİYETİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile Gazi Üniversitesi Yapı Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan : Prof. Dr. İsmail Özgür YAMAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Prof. Dr. Özgür ANIL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi:/...../.....

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Oğuzhan ÖCAL

01/02/2018

**ÇEVİRİMSSEL EĞİLME YÜKLEMELERİ ALTINDA ÇİMENTO BAĞLAYICILI
KOMPOZİTLERİN KENDİLİĞİNDEN ALGILAMA KABİLİYETİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Oğuzhan ÖCAL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2018

ÖZET

Tasarlanmış çimento esaslı kompozitler (Engineered Cementitious Composites, ECC) yapı malzemeleri alanında mekanik ve dürabilite özellikleri açısından son yıllarda oldukça öne çıkmaktadır. ECC malzemesinin üstün mekanik ve dayanıklılık özellikleri yapısal uygulamalarda bu tür malzemelerin tercih edilmesi kolaylaştırmaktadır. Son yıllarda ECC malzemesinin oldukça yaygınlaşması bu malzemenin aynı zamanda yapısal sağlık izlemesini de gerektirmektedir. Bu nedenle tez çalışması, farklı tür karbon esaslı malzemeler (karbon nanotüp-KNT, nano grafen partikülleri-NGP, karbon siyahı-KS ve karbon lif-KL) ile üretilmiş ECC malzemesinin kendiliğinden algılama kabiliyetini elastik ve plastik şekil değiştirme bölgeleri içerisinde tekrarlı yükleme boşaltma döngüleri ile incelemiştir. Deneyler, kiriş numuneler üzerinde dört noktalı eğilme yükleri altında yüklenmiş ve daha sonra yüklemenin kaldırılması şeklinde çevrimsel olarak uygulanmıştır. Elastik şekil değiştirme bölgesi içerisinde nihai gerilme dayanımının %30'unun uygulanmasına karar verilmiştir. Plastik şekil değiştirme bölgesinde ise kiriş numunelerin nihai eğilme dayanımlarının %70'ine kadar yüksek seviyelerde tekrarlı yükleme yapılmıştır. Deney sonuçları, her ne kadar elastik şekil değiştirme bölgesinde yüklemenin boşaltılması durumunda (kiriş üzerindeki yükün kaldırılması) tam olarak kendiliğinden algılama kabiliyeti göstermese de, yükleme ile uygulanan hasarlar hem elastik hem de plastik şekil değiştirme bölgesinde başarılı bir şekilde kendiliğinden algılama kabiliyeti ile test edilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, elde edilen sonuçların muhtemel nedeninin karbon esaslı malzemelerin sürekli olarak içsel elektriksel dirençlerinin artması olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan hasarın çok küçük olduğu düşünüldüğünde daha önce elektriksel dirençleri artış içerisinde olan karbon esaslı malzemelerin yüklemenin kalkması ile birlikte kiriş kompozitlerin içerisinde tam olarak deşarj olmadıkları kanısına varılmıştır. Diğer karbon esaslı malzemelere kıyasla, elastik ve plastik şekil değiştirme bölgelerinde tekrarlı yükler altında kendiliğinden algılayan ECC (Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler, Engineered Cementitious Composites) malzemesinin üretiminde en etkili karbon esaslı malzemenin karbon lif olduğu düşünülmektedir. ECC malzemesinin daha önce kanıtlanmış üstün dayanıklılık ve mekanik özelliklerinin kendiliğinden algılama davranışı ile bütünleştirilmesi sürdürülebilir yapı/altyapıların inşa edilmesinde büyük faydalar sağlayacaktır.

Bilim Kodu : 91127
Anahtar Kelimeler : ECC, Kendiliğinden algılama, Tekrarlı yükler, Karbon Esaslı Malzemeler
Sayfa Adedi : 51
Danışman : Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN

ASSESSMENT OF SELF-SENSING CAPABILITY OF ENGINEERED
CEMENTITIOUS COMPOSITES WITHIN THE ELASTIC AND PLASTIC RANGES
OF CYCLIC FLEXURAL LOADING

(M. Sc. Thesis)

Oğuzhan ÖCAL

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2018

ABSTRACT

Engineered Cementitious Composites (ECC) are recently emerging construction materials in terms of mechanical and durability characteristics. Outstanding mechanical and durability properties make the material an attractive choice for different infrastructure types. But the increased utilization of ECCs brings about the necessity to monitor the health of the structures that use them. This thesis therefore investigated on the self-sensing capability of ECC with different carbon-based materials (multi-walled carbon nanotubes [CNT], graphene nanoplatelets [GNP], carbon black [CB] and carbon fibers [CF]) when exposed to repetitive loading and unloading cycles within the elastic and plastic ranges. Tests were carried out on beam specimens as a loaded/unloaded cyclic configuration under four-point bending loading. Within the elastic deformation range, 30% of the ultimate flexural strength was determined for the application on the tested specimens. For the plastic deformation range, prismatic specimens fabricated for cyclic flexural loading at high levels were loaded up to 70% of their ultimate flexural strength. Experimental findings exhibited that for all ECC mixtures, self-sensing of operated damage (i.e. loading) was successful for both elastic and plastic ranges, although the self-sensing of load removal (i.e. unloading) in the elastic range was not achieved as successfully. This was most probably due to very small operated damage and continuously rising intrinsic electrical resistivity of individual carbon based materials under loading, which cannot be discharged in the case of unloading. Compared to other carbon-based materials, utilization of CF during ECC production was the most effective method for self-sensing capability of cyclic loading and unloading in the elastic and plastic deformation ranges. Improving the afore-proven superior mechanical and durability properties of ECC materials with self-sensing behavior will multiply the advantages for truly sustainable infrastructures.

Science Code	: 91127
Key Words	: ECC, Self Sensing, Cyclic Loading, Carbon Based Materials
Page Number	: 51
Supervisor	: Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam kapsamında her aşamadaki yardımlarından, desteklerinden ve yönlendirmelerinden ötürü danışmanım Sayın Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN'a, tez çalışmamda verdiği destekten ötürü Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Avrupa Birliği Yatırımları Dairesi Başkanı İ. Raci BAYER'e ve hayatım boyunca bana sağladıkları maddi manevi tüm imkânlar ve destekleri için eşime ve aileme teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	5
3. YÜKSEK PERFORMANSLI LİF DONATILI ÇİMENTO BAĞLAYICILI KOMPOZİTLER.....	11
4. DENEY MALZEMELERİ VE YÖNTEM.....	13
4.1. Karışımların Üretilmesinde Kullanılan Malzemeler	13
4.2. Farklı Tür Karbon Esaslı Malzeme İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Hazırlanması	23
4.2.1. Taze özellikler.....	23
4.2.2. Karışım yöntemleri	23
4.2.3. Karbon esaslı malzeme kullanım oranları.....	25
4.2.4. Elektriksel ölçümler	26
5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	33
5.1. Elastik Deformasyon Bölgesindeki Kendiliğinden Algılama Davranışı.....	33
5.2. Plastik Deformasyon Bölgesindeki Kendiliğinden Algılama Davranışı.....	38
5.3. Farklı Tür Karbon Esaslı Malzeme İçeren Kiriş Numunelerin Arayüz Özellikleri	42
6. SONUÇLAR.....	45
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	51

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Referans karışım tasarımı	13
Çizelge 4.2. Portland çimentosu, uçucu kül ve kuvarsın kimyasal özellikleri	14
Çizelge 4.3. Deney numunelerinin üretiminde kullanılan PVA lifinin mekanik ve geometrik özellikleri.....	17
Çizelge 4.4. Karbon nano tüp ve nano grafen partiküllerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri	18



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Portland çimentosu ve uçucu külün görüntüleri ve morfolojik yapısı ile birlikte ince taneli kum ve tane boyut dağılımı.....	15
Şekil 4.2. Süper akışkanlaştırıcı katkı ve istenen akıcılık için karışımlara eklenmesi.....	16
Şekil 4.3. Deneylerde kullanılan polimerik lifler.....	17
Şekil 4.4. Dört farklı karbon esaslı malzemenin SEM görüntüleri.....	22
Şekil 4.5. Mini çökme hunisi ve farklı harç numuneleri.....	23
Şekil 4.6. Karbon esaslı nano malzemelerin çimento esaslı karışımlara eklenmesi.....	24
Şekil 4.7. Karbon liflerin çimento esaslı karışımlara eklenmesi	25
Şekil 4.8. Elektrot amaçlı kullanılmak üzere test edilen malzemeler	27
Şekil 4.9. AC elektriksel direnç ölçer	28
Şekil 4.10. DC elektriksel direnç ölçer	28
Şekil 4.11. Numunelerin test sürelerine kadar geçirimsiz plastik poşetlerde kür edilmesi	29
Şekil 4.12. Eğilmede çekme yüklemesi altında 28 günlük kiriş numunelerinin tipik gerilme-sehim ilişkileri	30
Şekil 5.1. Elastik deformasyon bölgesinde tekrarlı eğilme yükleri altındaki referans kiriş numunelerin kendiliğinden algılama davranışı	34
Şekil 5.2. Elastik deformasyon bölgesinde tekrarlı eğilme yükleri altındaki karbon lif içeren kiriş numunelerin kendiliğinden algılama davranışı.....	34
Şekil 5.3. Elastik deformasyon bölgesinde tekrarlı eğilme yükleri altındaki karbon nanotüp içeren kiriş numunelerin kendiliğinden algılama davranışı.....	35
Şekil 5.4. Elastik deformasyon bölgesinde tekrarlı eğilme yükleri altındaki nano grafen partikülleri içeren kiriş numunelerin kendiliğinden algılama davranışı	35
Şekil 5.5. Elastik deformasyon bölgesinde tekrarlı eğilme yükleri altındaki karbon siyahı içeren kiriş numunelerinin kendiliğinden algılama davranışı.....	36
Şekil 5.6. Plastik deformasyon bölgesinde tekrarlı eğilme yükleri altındaki referans kiriş numunelerinin kendiliğinden algılama davranışı	38

Şekil	Sayfa
Şekil 5.7. Plastik deformasyon bölgesinde tekrarlı eğilme yükleri altındaki karbon lif içeren kiriş numunelerinin kendiliğinden algılama davranışı	39
Şekil 5.8. Plastik deformasyon bölgesinde tekrarlı eğilme yükleri altındaki karbon nano tüp içeren kiriş numunelerinin kendiliğinden algılama davranışı	39
Şekil 5.9. Plastik deformasyon bölgesinde tekrarlı eğilme yükleri altındaki nano grafen partikülleri içeren kiriş numunelerinin kendiliğinden algılama davranışı	40
Şekil 5.10. Plastik deformasyon bölgesinde tekrarlı eğilme yükleri altındaki karbon karbon siyahı içeren kiriş numunelerinin kendiliğinden algılama davranışı	40
Şekil 5.11. Karbon lif içeren numunenin ve karbon nano tüp içeren numunenin taramalı elektron mikroskobu altında çekilen görüntüleri.....	43
Şekil 5.12. Karbon lif ve uçucu küller ve karbon nano tüp ve uçucu küllerin taramalı elektron mikroskobu altında çekilen görüntüleri.....	43

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

A	Kesit alanı
I	Akım
L	İç elektrotlar arasındaki uzaklık
R_L	Yük boşaltmaları sırasında elektriksel direnci
R_o	Başlangıç anındaki elektriksel direnç değeri
V	Voltaj
ρ	Elektriksel direnç

Kısaltmalar

Açıklamalar

AC	Alternatif akım
AE	Akustik emisyon
DC	Doğrusal akım
ECC	Tasarlanmış çimento esaslı kompozitler
ED	Elektriksel direnç
FCER	Elektriksel direnç değerlerinin oransal değişimi
KL	Karbon lif
KNT	Karbon nanotüp
KS	Karbon siyahı
LVDT	Linear Variable Differential Transformers
NGP	Nano grafen partikülleri
PÇ	Portland çimentosu
PE	Polietilen
PVA	Polivinil alkol
SA	Süper akışkanlaştırıcı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
YPLDÇK	Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitler

1. GİRİŞ

Beton sudan sonra en çok kullanılan ve inşaat mühendisliğindeki çok çeşitli uygulamalarda yer alan çok önemli bir yapı malzemesidir. Betonda kullanılan ana bileşenlerden çimentonun üretimi sırasında çevreye verilen önemli zararlara rağmen, ülkelerin inşaat sektörlerindeki artış nedeni ile betona olan talep dünya çapında daha da artış göstermiştir. Çok çeşitli uygulamalarda kullanılmasından ötürü özellikle geleneksel beton malzemesinin mekanik özelliklerinden dayanım, süneklik, tokluk, darbe dayanımı vb. durabilite özellikleri bugüne kadar literatürde pek çok araştırmaya konu olmuştur. Bilindiği gibi depremler ve bir takım çevresel etkiler sonucunda yapı sağlığı bozulmakta ve yapısal bütünlük olumsuz etkilenmektedir. Ülkemiz tarihinde meydana gelen depremler sonucu binlerce vatandaşımız hayatını kaybetmiş, çok sayıda yapı yıkılmış ya da kullanılamayacak derecede hasar görmüştür. Böylesi doğa olaylarında yaşanan maddi - manevi kayıplar oldukça fazladır. Deprem gibi doğa olayları olmadan da yapıların zamanla bütünlüğünü yitirmesi mümkün olabilmektedir. Bu nedenle, esas olarak can ve mal güvenliğini sağlamak için yapıların istenilen zamanda sağlık değerlendirmelerini yapmak bir gereklilik olarak karşımızdadır. Bu noktada, betonun devam etmekte olan kalite kayıplarının önüne geçilebilmesi amacıyla deformasyon seviyelerinin mümkün olan en kısa zamanda belirlenmesi büyük önem arz etmektedir.

Her ne kadar beton ve/veya betonarme yapılar uzun süreleri olarak tasarlanırlarsa, beton bütünlüğünün bozulmasıyla yapıların performansını kaçınılmaz olarak zamanla azaltmaktadır. Sözü edilen beton bütünlüğünün hizmet ömrü süresindeki maruz kaldığı çevresel şartlar, düşük işçilik kalitesi, harici mekanik yükler gibi çeşitli nedenlerle meydana gelmektedir. Zaman içerisinde yapı performansının düşmesi beklenildiğinden, günümüzde yapısal performansları anlık olarak izleyerek, azalan yapı performansına gerekli müdahalenin zamanında yapılarak yapının tekrar güvenli bir şekilde hizmet vermesine sağlayacak modern ölçüm araçları bulunmamaktadır. Özellikle kritik yapılarda yapısal sağlık izlemenin sürekli olarak yapılması çok büyük önem arz etmektedir. Örneğin liman yapılarında, rijit ve esnek yol üstü yapılarında, havaalanı apronlarında ve sürekli olarak tekrarlı yüklere maruz kalan diğer yapılarda sözü edilen değerlendirmenin gerçekleştirilmesi çok daha zaruri olmaktadır. Bu nedenle, yapısal servis ömrünü uzatmak için özellikle yukarıda örnekleri verilen yapılarda servis ömrü sona ermeden basit tekniklerle yapılacak yapısal sağlık izleme faaliyetleri gerekmektedir [1]. Her ne kadar

yapısal sağlık izleme faaliyetleri optik fiberler, gerinim ölçerler ve piezo-elektrik şekil değiştirme sensörleri gibi sensör tabanlı uygulamalar aracılığıyla sürekli olarak yapılsa da [2-4], yapılan çalışmalar bu tür sensör uygulamalarının düşük dayanıklılık gösterdiğini ve tam olarak doğru ölçümü sağlama da yetersiz kaldıklarını kaydetmiştir [5-6]. Betonun kendiliğinden bir yapısal sağlık izleme imkanı sunabilmesi bu konuya teknik açıdan ve maliyetler yönünden etkili bir çözüm sunabilecektir. Bu özellik, geleneksel betonu gerilme altında elektriksel direncinin değiştiği ve piezo elektrik davranış gösteren bir “kendiliğinden algılayan” beton malzemesine dönüştürecektir [7]. Bu nedenle kendiliğinden algılayan beton aynı zamanda piezo-dirençli veya gerilemeye duyarlı beton olarakta adlandırılabilir. Geleneksel betonun zayıf (veya hiç) gerilme algılama kabiliyetine sahip olduğu göz önüne alındığında, betonun üzerine etkiyen gerilmeyi algılaması geleneksel karışım malzemelerinden başka, matrise karbon nanotüpler, karbon lifler ve grafen gibi işlevsel malzemelerin katılması ile mümkün olmaktadır. Sözü edilen malzemeler sadece elektriksel özellikleri iyileştirmekle kalmamakta, aynı zamanda malzemenin mekanik [8] ve dayanıklılık özelliklerine de katkıda bulunmaktadır. Karbon esaslı malzemeler ile tasarlanan yeni nesil betonun elektriksel olarak iletken olmasıyla mühendisler harici sensör sistemleri yerine, betonun kendisini hem yapısal olarak hem de sensör olarak kullanabilmektedir.

Geliştirilen beton tasarımının, yapısal sağlık koşullarının değerlendirilmesine izin vermesinin yanı sıra, kendinden algılayan beton, yapısal titreşim kontrollerinin yapılması, korozyon derecesinin belirlenmesi, trafik faaliyetlerinin tespiti ve askeri / sınır güvenliği gibi konularda da büyük bir potansiyel barındırmaktadır [10-13]. Gelişmiş mekanik ve dayanıklılık özellikleri [13- 16] ile Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (ECC), son yirmi yılda en umut verici yapı malzemelerinden biri olarak bilinmektedir. [17]. ECC'nin tasarımı, yüksek süneklik gösteren birçok metale benzer şekilde bir davranış elde etmek için, çimentolu matris ile lif takviyesinin etkileşimlerini esas alarak ikisi arasındaki ara yüzeyin kontrol edilmesine dayanan bir mikromekanik tabanlı tasarımla geliştirilmektedir [17]. ECC, diğer geleneksel beton malzemeleri gibi, Portland çimentosu, mineral katkı (uçucu kül, yer granüle yüksek fırın cürufu vb.) [18,19], su, kimyasal katkıları ve iletken olmayan, kısa ve rastgele dağılmış polimerik elyaflardan (polivinil alkol [PVA], polietilen [PE] vb.) meydana gelmektedir. Kendiliğinden algılayan ECC'nin geliştirilmesi için, tasarımında mekanik ve dayanıklılık özelliklerini sağlayan çeşitli malzeme oranlarıyla birlikte elektriksel olarak iletken materyalleri (örn. Karbon siyahı) içeren bir tasarım

gerekmektedir [12, 20, 21]. ECC'nin kendini algılama davranışı birçok araştırmacı tarafından ispatlanmış olsa da, bu çalışmalar sürekli yük altında test edilen numuneler üzerinde yürütülmüştür. Ancak tekrarlı yüklemelerin olduğu durumlarda, farklı karbon esaslı materyallere sahip ECC'lerin, yük boşaltma sonrası elektrik direnç değerlerindeki geri dönüşün sağlanması gerekmektedir. Böylesi bir yükleme altındaki kendiliğinden algılama davranışı, şüphesiz ki maksimum gerilmeye kadar yapılan yükleme altındaki kendiliğinden algılama davranışından bir takım farklılıklar içerecektir. Tekrarlı yükler sırasında oluşan elektriksel direnç değişimleriyle, karbon esaslı materyallere sahip çimento bağlayıcılı kompozitlerin elektrisel ağ sistemine bağlı olarak farklı hasar derecelerinde kendiliğinden algılama kabiliyetine sahip olması mümkün olabilmektedir. Gerçek hayatta yapıların çoğunun, hareketli taşıtlar, belirli bir frekansta çalışan makineler, rüzgar ve döngüsel gündüz / gece sıcaklık farkları ve diğer alternatif canlı yüklerden kaynaklanan çok sayıda yükleme/boşaltma olayı yaşadığı göz önüne alındığında, konunun önemi çok daha iyi anlaşılmaktadır. Tekrarlanan yüklerin varlığında yapısal sağlık izlemenin mümkün olması, gerçek hayattaki yapı koşulları düşünüldüğünde sürdürülebilir kalkınma açısından konunun ne denli büyük potansiyeller taşıdığını göstermektedir. Bu nedenle, tez çalışmaları gerçekte var olan güncel sorunlara daha doğru çözüm getirmek adına yaklaşımlar geliştirmiştir. Dört noktalı eğilme yüklemesi altında, farklı karbon esaslı malzemelerle takviye edilmiş ECC kiriş elemanlarının elektriksel direnç değerlerinin oransal değişimi (FCER) incelenmiş ve kompozitlerin kendiliğinden algılama davranışları belirlenmiştir. Yapılar/altyapılar üzerindeki tekrarlayan yükler yüksek ya da düşük seviyelerde olabileceğinden, tez çalışmasında uygulanan döngüsel yükler hem elastik hem de plastik aralıklarda seçilmiştir.

Tez çalışmaları sonunda üzerine etkiyen çeşitli seviyelerdeki gerilemeyi hassas bir şekilde kendiliğinden algılayabilen çok fonksiyonlu çimento esaslı kompozitler üretilmiştir. Geliştirilen çimento esaslı kompozitlerin uygulamalarda yer alması, yapının istenilen bölgesinden birim şekil değiştirmeyi ölçmeye imkan sağlayabilecektir. Ayrıca tez çalışmalarında yer alan kiriş elemanların referans alınmasıyla geliştirilecek kendiliğinden algılayan beton uygulamalar sayesinde, mevcut sensörlerin aksine yapının tamamından veriler alınabilecektir. Hali hazırdaki yapısal sağlık izleme metotlarından daha duyarlı bulgular sağlayan çimento esaslı kompozitler sürekli ve canlı olarak yapısal sağlık izlemeyi mümkün kılacaktır. Ayrıca geliştirilen kompozitin kendiliğinden bir sensör görevi görmesi betonun içinde uyum açısından (korozyon gibi) bir sorun teşkil etmemektedir. Tez

alışmaları sonucunda geliştirilen çok fonksiyonlu imento esaslı kompozitler daha kolay, ucuz ve güvenilir bir çözüm sunma şansına sahiptir. Bu nedenle inşaat sektöründe yeni nesil akıllı bir kompozit olan çok fonksiyonlu malzemeler yapı sağlığının izlenmesi ve değerlendirilmesi faaliyetlerini yaygınlaştıracaktır. Böylece yetersiz yapısal performans gösteren yapıların belirlenmesi kolaylaşacak ve nihai fayda olarak can ve mal kayıplarının önüne geçilebilecektir.



2. LİTERATÜR ÖZETİ

Akıllı beton Japonya’da araştırmacılar tarafından ilk olarak 1980’li yılların son dönemlerine doğru ortaya çıkmıştır. 1992 yılında Tokyo’da bulunan Yanagida Üniversitesi “kendiliğinden test olan betonu” cam ve karbon lifleri kullanarak üretmiştir (self-test concrete). Fu ve Chung adındaki araştırmacılar 1993 yılında normal çimentonun yanı sıra karbon lif-çimento etkileşimini araştırarak söz konusu malzemelerin şekil değiştirme hassasiyetlerini arttırmışlardır. Günümüze kadar yapmış oldukları çeşitli araştırmalarda, kendiliğinden çimento esaslı sensörlerin yükleme altında, yük ve elektriksel direnç değerlerinde oldukça iyi bir korelasyona sahip olduğunu tespit etmişlerdir [22, 23]. Kendi hasarlarını algılayan betonlar, tamamen kendisiyle, kaplama kullanılarak, bağlanmış ya da beton kütesine gömülmüş olarak çeşitli tiplerde kullanılabilmektedirler. Tanımlamak gerekirse, “yapısal/malzeme sağlık izleme”, düzenli bir şekilde yapıların/malzemenin durumunu olduğu yerde veya yapılara gömülmüş sensörler vasıtasıyla gerçek zamanlı olarak güvenli bir şekilde izlenmesini içermektedir. Böylelikle insan hayatı kayıplarının önüne geçilmesi, yüksek kaliteli yapılara olanak sağlaması ve yapıların onarım ve tamir masraflarının düşürülmesi açısından inşaat mühendisliği için çok önemli yararlar sağlamaktadır.

Ayrıca yapısal sağlık izleme faaliyetleri ile elde edilen kazanımlardan bir diğeri, gelecekteki olası bakımların minimize edilmesi için ne tür önleyici şartların alınması gerektiğinin öğrenilmesidir. Ayrıca bu tür faaliyetlerle inşa edilen yapı tasarımlarının uyumu kontrol edilip bir tür kalite-güvence ve kalite-kontrol mekanizması sağlanabilmektedir. Bunun yanında yapıların sağlık durumlarının sürekli olarak izlenmesi, gelecekte inşa edilecek yeni tasarımlarda daha doğru yaklaşımlara olanak sağlamaktadır. Kısaca, mekanik ve çevresel hareketli yükler sonucunda ortaya çıkacak hasarların yarattığı olası tehlikeleri azaltmak amacı ile beton/betonarme uygulamalarda hasarları sürekli olarak izlemenin yukarıda sayılan bir dizi avantajları vardır. Yapısal/malzeme sağlık izleme faaliyetleri doğrultusunda ele alınan yapı/malzeme özelliklerinden bazıları dayanım, elastik modül, birim şekil değiştirme, geçirimsizlik ve donatı korozyonu gibi özelliklerdir.

Beton/betonarme yapılarda hasarın oluştuğu bölge ile hasarın ne kadar süredir orada tespit edildiği ile ilgili bilgiler oldukça kısıtlıdır. Bu nedenle yapıların tasarlanan hizmet

ömründen çok daha kısa sürede kısmen onarılmasına, hatta tamamen yenilenmesine karar verilmektedir [24]. Böyle bir durum gereksiz pek çok masrafın oluşmasına neden olarak ülke kaynakları düşünüldüğünde oldukça sakıncalı sonuçlara sebep olmaktadır. Yapısal sağlık izleme faaliyetleri sayesinde dayanım gibi mekanik özellikler haricinde, diğer yapısal olmayan özelliklerden, yapısal titreşim, sıcaklık, elektriksel iletkenlik, termal iletkenlik, özgül ısı gibi özelliklerin de belirlenmesi akıllı yapıların tasarlanmasını kolaylaştıracaktır. Kendiliğinden algılayan akıllı betonlarla birlikte özellikle performans olarak daha kararlı bir davranış elde edilmektedir. Hassasiyet, maliyet ve yüksek dürabilite gibi özellikleri düşünüldüğünde, düşük hassasiyet, güvenilir olmayan ve sürekli tekrar edilen ölçümler, uygulama açısından personel ihtiyacı gerektirmesi gibi özelliklere sahip diğer uygulamalara göre son derece kullanılabilir bir yöntemdir [11-26]. Son yıllarda dünya çapında pek çok araştırmacı çimento esaslı kompozitlerin mekanik ve sözü edilen fonksiyonel özelliklerinin takip edilmesi üzerinde bir takım çalışmalar yürütmüştür. Bu çalışmalarda yapısal güvenlik, çevresel etkiler, üretim niteliklerinin artması ve kompozit maliyetlerinin daha makul seviyelere çekilmesi ile ilgili bir takım gelişmeler mevcuttur [27-32].

Literatürde benzer diğer gelişmelere bakıldığında; Wang ve Chung (2006) polimer-matris kompozitlerini eğilme altında hasara uğratarak numunelerdeki elektriksel değişimlerini ölçmüştür. Araştırmacılar şekil değiştirme elastik bölgede olduğunda numune basınç yüzeylerinin elektriksel direncinin tersinir olarak azaldığını (elektriksel akımın artmasından dolayı) çekme yüzündeki elektriksel direncin ise tersinir olarak arttığını gözlemlemiştir (elektriksel akımın azalmasından dolayı). Bunun yanında, şekil değiştirme daha büyük bir hasar nedeniyle elastik olmayan bir bölgeye ulaştığında bütün elektriksel dirençlerin keskin ve tersinir olmayan bir biçimde arttığını tespit etmişlerdir. Çalışmalar grafiksel olarak da değerlendirilmiş ve tekrarlı eğilme yükleri altında elektriksel direnç değerleri açısından basınç yüzeyi, çekme yüzeyi ve oransal değişimlerin sırasıyla %0'dan %0,70'e, %0'dan %6,50'ye ve %0,15'ten %1,95'e ulaştığı ve maksimum deformasyonun 0,249 mm ve 5,194 mm arasında olduğu sonucuna varılmıştır [33].

Başka bir çalışmada Wang ve diğerleri (2006) dört noktalı eğilmede çekme deneyinde numunelerin elektriksel özellikleri ile tekrarlı eğilme yükleri altındaki yorulma davranışlarını görmek amacıyla deneyler yapmışlardır. Çimento ağırlığının sadece %0,5'lik bir miktarı ile 5 mm uzunluğundaki karbon liflerle üretilen numunelerle

kendiliğinden algılama kabiliyeti oluşturulmuştur. Dört farklı karışım tipi, farklı su/çimento oranları ve çimento/agrega kompozisyonları ile 12 adet numuneden ($100 \times 100 \times 400 \text{ mm}^3$) oluşmak üzere karışımlar üretilmiştir. Bakır plakalardan yapılmış iki elektrot ($90 \times 90 \text{ mm}^2$) kalıbın orta açıklığında birbirinden 100 mm uzaklıkta karışımı dökmeden önce konmuştur. 28 gün sonra numuneler 10 N/s sabit yükleme hızı ile yüklenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar elektriksel dirençlerdeki oransal değişimin kırılma sonrasında %0,5'ten %12'ye kadar arttığını göstermiştir. Elektriksel direnç sonuçları her bir tekrarın ardından azalan yük ile birlikte azalmıştır. Bu davranış keskin bir biçimde olmuş ve numunelerin kırılmasından hemen sonra elektriksel direnç değerleri aşırı artış göstermiştir [34].

Bir başka çalışmada Chen ve Liu (2008) 5 mm uzunluğa sahip ve çimento ağırlığının %0,8'i kadar bir miktarda karbon lif kullanarak üç noktalı eğilmede çekme yüklemesi altında akustik emisyon (AE) ve elektriksel direnç hesaplamaları ile numunelerin hasarlarının tespitini yapmıştır. Bu testler için, $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ ölçülerinde iki katman olarak dökülen numuneler test edilmiştir. Numunelerin üstündeki 5 mm kalınlığındaki katmana karbon lif içerikli çimento hamuru dökülmüş altındaki katman ise normal çimento hamuru ile üretilmiştir. Direnç değerlerini belirlemek için 0,5mm/dk yükleme hızında ve tekrarlı eğilme yükleri altında DC elektriksel ölçüm cihazı ile 4 problu konfigürasyon kullanılarak deneyler yürütülmüştür. Sonuçlara göre, elektriksel dirençlerdeki oransal değişimler, basınç testindeki karbon lifli çimento harcının deformasyonunun artmasıyla birlikte %52,6 seviyesine ulaşmıştır. Bunun yanında çekme yüzündeki karbon lifli çimento harcı elektriksel direnç değeri olarak %24'lük bir değişim göstermiştir [35].

Baeza ve diğerleri (2013) karbon lif ve karbon nano lif kullanarak kiriş numuneler üretmiş ve numunelerde oluşturulan hasarın algılanabilmesi amacıyla çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Farklı döküm teknikleri, basınç ve çekme bölgeleri, elektriksel temas noktaları karşılaştırmalı olarak çalışılmıştır. Araştırmacılar, karbon nano lif ve karbon liflerin şekil değiştirme sensörü olarak kullanılmasının tersinir ve tersinir olmayan şekil değiştirme durumları için uygun olduğu sonucuna varmıştır [32].

Goldfeld ve diğerleri (2016) tarafından yeni gerçekleştirilen bir başka çalışmada karbon esaslı beton kiriş numunelerin tekrarlı yükler altında çatlak oluşmamış bölgedeki piezo dirençlilik özellikleri incelemiştir. Uzun-ince lif yünlerin birbirine sarılmış haldeki

formlarında kullanılan karbon esaslı malzemeler hem elektriksel hem de mekanik amaçlarla kullanılmıştır. Cam/karbon tekstil malzemeleri 280 mm uzunluğunda, 70 mm genişliğinde ve 24 mm genişliğinde üretilmiştir. Üniform olarak yükleme, yük boşaltma ve tekrar yükleme hızları 0,1 mm/dk olarak seçilmiştir. Yükleme döngüleri toplamda 5 kez tekrarlanmıştır. Üretilen numunelerin mekanik ve elektriksel özellikleri üzerine etkilerini bulabilmek amacıyla iki farklı düzeyde (%68 ve %80 makroskopik çatlak düzeyinde) yük uygulaması yapılmıştır. Elektriksel direnç değerlerindeki oransal değişiklikler basınç ve çekme yükleri için farklı karbon esaslı malzeme kullanılması durumlarında %3'ten daha büyük farklılık yaratmamıştır. %68'lik yükleme düzeyinde çekme ve basınç bölgelerinde hasar yüksek tekrarlanabilirlikle algılanabilmiştir. %80'lik yükleme düzeyinde ise sistem hasarlarının yoğunlaşmasından dolayı sonuçlardaki değişimler doğrusal davranış sergilemiştir [36].

Bilindiği üzere günlük yaşantımızda faydalandığımız çeşitli altyapılarda yükleme çoğu zaman tekrarlı bir şekilde meydana gelmektedir. Bu doğal tekrarlı yükler araçların hareketinden, makine elemanlarının belirli frekanstaki çalışmalarından, rüzgar ve hatta döngüsel gündüz/gece sıcaklık farklılıklardan kaynaklanabilmektedir. Bunun yanında, belirli aralıklarla yapılara etkiyen ve daha sonra tekrar ortadan kalkan hareketli yükler de, yükleme ve boşaltma tekrarlarına sebep olmaktadır. Gerçek yaşantılarımızda yüklemeler genellikle tekrarlı olduklarından kendiliğinden algılama davranışının da tekrarlı yüklemeler varlığında değerlendirilmesi oldukça önem arz etmektedir. Bu bağlamda tez çalışmasında gerçekleştirilen deneylerde çeşitli karbon esaslı malzemeler ile takviyelendirilmiş tasarlanmış çimento bağlayıcılı kompozit karışımları dört noktalı eğilmede çekme yüklemesi altında tekrarlı bir şekilde yükleme/boşaltmaya maruz bırakılmış ve kendiliğinden algılama kabiliyetinin bu koşullar altında değerlendirilebilmesi için elektriksel direnç sonuçlarındaki oransal değişimler kayıt altına alınmıştır. Yapıların üzerlerine gelen yükler düşük ve yüksek seviyelerde olabildiklerinden bu çalışmada uygulanan tekrarlı yüklerin numunelerin hem elastik hem de plastik bölgelerinde ele alınması kararlaştırılmıştır. Tez çalışmasında yukarıda bahsedilen çalışmaları da dikkate alarak basınç ve eğilme yükleri altında hasarların birbirinden ayrı olarak ele alınmasını sağlayacak giriş numunelerini tasarlamış ve ilgili deneylerin tamamını başarıyla gerçekleştirmiştir. Tasarımlarda daha önce elde edilen bulguların kullanılması ile farklı tür karbon esaslı malzemelerin sağlayacağı çok fonksiyonlu kompozit malzeme sistemlerinin inşaat mühendisliği uygulamalarında pratik bir biçimde kullanılabilmeleri hedeflenmiştir.

Tasarlanmış çimento esaslı kompozitleri (ECC) kendi şekil değiştirme ve hasarlarını algılayabilecek duruma getirmenin birinci koşulu bu tip kompozitlerin içerisinde elektriksel olarak iletken bazı malzemeler kullanmaktır. Tasarlanmış çimento esaslı kompozitler üzerinde elektriksel iletken çeşitli malzemeler takviye edilerek daha önce sözü edilen farklı çalışmalar yapılmıştır. Betonun elektriksel iletkenlik açısından çok düşük performans göstermesi ve içerisinde lif olarak yer alan çeşitli polimer esaslı liflerin elektriği iletmemesi sebebiyle, betonda kendiliğinden algılama özelliği sağlamak, karışımlarda elektriksel olarak iyi iletken malzeme kullanmakla mümkündür. Çimento esaslı kompozitlere elektriksel iletkenlik kazandırmak için demir esaslı agregalar, karbon ve çelik lifler, grafit partikülleri, karbon nanotüp vb. gibi elektriksel açıdan oldukça iletken malzemeler kullanılmaktadır. Kullanılan malzemelerin özellikle karbon esaslı olması, kompozitlerin kendiliğinden bir sensör gibi görev yapmasının yanında üstün bir mekanik performansı da sağlamaktadır. Yüksek oranda kullanılan karbon esaslı malzeme oranı akıllı betonun üretim maliyetini şüphesiz ki yükseltecektir. Bilindiği gibi karbon esaslı malzemeler betonu oluşturan diğer malzemelere kıyasla oldukça pahalıdır. Bu nedenle seçilen malzemenin hem yüksek derecede iletken olması hem de kompozitin mekanik özelliklerine olumsuz bir etki getirmeyecek şekilde uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Böylelikle geliştirilen kompozitlerin mekanik performanslarından ödün vermeyecek şekilde piezo-dirençli fonksiyon göstermesi sağlanmaktadır. Beton matrisi içerisinde yeterli miktarda iletken malzeme kullanımı sayesinde, her bir iletken malzeme, komşu diğer iletken parçacıkla etkileşime geçmektedir. Sonuç olarak doğrusal bir elektrik iletken yol elde edilebilmektedir. Gerinim ölçerler ile karşılaştırıldığında kendiliğinden algılayan akıllı beton üretimi maliyet açısından da daha uygun bir tasarım imkanı sunmaktadır. Ayrıca gerinim ölçerlerin şekil değiştirmeyi algılama hassaslığı, piezo direnç davranış gösteren çimento esaslı kompozitlere göre daha düşüktür. Şekil değiştirmenin elektriksel direnç değerlerini etkilemesi ile kendiliğinden algılama kabiliyetine sahip betonların üretimi kolaylıkla yapılabilmektedir.

Kendiliğinden algılayan kompozitlerin geliştirilmesinin asıl amacı inşaat yapılarında bu tür fonksiyondaki malzemeleri genel çapta kullanmaktır. Gerilme, şekil değiştirme, çatlak ve hasarların algılanması ile kendiliğinden algılayan betonlar (self-sensing concrete) endüstriyel anlamda büyük bir ticari potansiyele sahiptir. Kendiliğinden algılama davranışında temel olarak dış yük ile elektriksel değişikliklerin arasındaki ilişki unutulmamalıdır. Betonun kendiliğinden algılama kabiliyetinde hassasiyet çok önemli bir

parametredir. Elektriksel direnç değişikliklerinin değeri, kuvvet hassasiyet katsayısı, gerilme hassasiyet katsayısı ya da şekil değiştirme katsayısı gibi farklı değerlere göre değişmektedir. Bilindiği gibi gerilme ve şekil değiştirme değerleri elastik bölgede birbirine orantılı olarak değişmektedir. Elastik olmayan bölgede, şekil değiştirme ve gerilme arasındaki ilişki tersinir ve tersinir olmayan bir özellik göstermektedir. Kompozitin elastik olmayan şekil değiştirme bölgesinde yeteri kadar yüksek gerilme seviyesi oluşursa hasar meydana gelmektedir. BU noktada hasarın sebebini öğrenmek amacıyla gerilme-şekil değiştirme seviyesini ve hasarın oluşmadan önceki durumunda yapısal malzemenin geçmişini bilmek oldukça faydalı olacaktır. Hem hasar seviyesini hem de gerilme ve şekil değiştirme seviyelerini tespit etmek özellikle gerilme/şekil değiştirme-hasar ilişkisini daha iyi bir korelasyonda tespit etmeye yardımcı bir girdi sağlayacaktır. Geleneksel hasarsız test yöntemlerine bakıldığında; her ne kadar akustik emisyon hasarı tespit etme de fayda sağlasa da, hasarın oluşumu anında gerilme/şekil değiştirme gelişimlerinin algılanmasını sağlayamamaktadır. Aynı şekilde ultrasonik test yöntemi de çatlakları algılamada yardımcı olsa da gerilme/şekil değiştirme yönünden bir katkı sunamamaktadır. Buna karşılık elektriksel direnç hesaplama yöntemi anlık olarak devamlı bir şekilde bu değerlendirmeleri yapabilmektedir. Çünkü hasar ve gerilme/şekil değiştirme gelişimlerinin elektriksel direnç üzerinde farklı etkileri bulunmaktadır. Kısaca çimento esaslı kompozitler, karbon esaslı malzemeler ile hazırlanarak kendi şekil değiştirme değişimlerini algılayabilen kompozitler olarak üretilebilmektedir.

3. YÜKSEK PERFORMANSLI LİF DONATILI ÇİMENTO BAĞLAYICILI KOMPOZİTLER

Son yıllarda beton teknolojisi oldukça hızlı bir gelişme göstermiştir. Betonun kırılğan (gevrek) yapısını iyileştirmek için yapılan çalışmalar, yüksek performanslı lif donatılı çimento bağlayıcılı kompozitlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Geleneksel beton bilindiği gibi eksenel çekme yükleri altında ilk çatlak oluşumundan hemen sonra aniden gevrek bir biçimde kırılmaktadır. Geleneksel lif donatılı betonda ise matristeki çatlamayı şekil değiştirme yumuşaması olarak bilinen yük taşıma kapasitesindeki düşüş eğrisi takip etmektedir. Bu tip kompozitlerde, ilk çatlak oluşumundan sonra lifler fazladan yük taşıyabilmektedir. Yüklemedeki artış ile birlikte, 100 μm 'dan daha dar çatlak genişliğine sahip çoklu mikro-çatlaklar oluşmakta ve betonun şekil değiştirme kapasitesi önemli ölçüde artmaktadır. Bu sebeple, çekme gerilmesi-şekil değiştirme eğrisi metallerde olduğu gibi sünek malzemelere benzer şekilde gelişmektedir. Sünek davranışın (elastik olmayan şekil değiştirme) elde edilebilmesi için gerekli malzeme ve geometrik parametreler (lif, matris, lif-matris arayüzü, lif geometrisi ve lif hacimsel oranı gibi özellikler) öngörülmesi [37] ve geliştirilmiştir [38,39].

Parametrelerin uygun olarak seçilmesiyle, lif oranı %1,5 ile %5 arasında değişen farklı dayanımlara sahip sünek kompozitler üretilmektedir. YPLDÇK'nin maksimum eksenel çekme gerilmesindeki şekil değiştirmesi olarak tanımlanan sünekliği, matrisin tokluğu ve liflerin gerilmeyi matrise etkin bir şekilde aktarmasıyla (mikroyapısal parametrelere bağlı) ilişkilidir. Normal şartlarda, belirli lif yüzdesinde, yüksek matris tokluğu, daha düşük sünekliğin elde edilmesine sebep olmaktadır. Uygulamaya bağlı olarak, dayanım ve süneklik ihtiyaçlarını karşılayan en uygun çekme gerilmesi-şekil değiştirme ilişkisi çeşitlilik gösterebilir. Literatürde, söz konusu kompozitler araştırmacılar tarafından farklı isimlerle adlandırılmıştır. Tasarlanmış çimento bağlayıcılı kompozitler (Engineered Cementitious Composites - ECC) bu kompozitlerin çok özel bir türü olup hacimsel olarak %2 oranında lif kullanımı ile eksenel çekme yüklemesi altında %3 ile %5 arasında çekme birim şekil değiştirme deformasyonu gösterebilmektedir. Bu değer, geleneksel betonun ve lif donatılı betonun çekme şekil değiştirme kapasitesinin yaklaşık 300 ile 500 katı kadardır. ECC ilk çatlaktan sonra şekil değiştirme sertleşmesi sergilemekte ve bu özelliği ile betondan öte sünek bir metal davranışı sergilemektedir. Öte yandan, ECC hasarlara karşı oldukça toleranslı olup şiddetli eğilme ve çekme yükleri altında da sünekliğini

korumaktadır. Yük altındaki çatlak genişliği lifli betonlarda 500-750 μm seviyelerinde iken, bu değer ECC için 100 μm 'dan az olmaktadır. Bu ise ECC'nin diğer beton türlerine kıyasla çevresel şartlar altında da daha dayanıklı ve mekanik yüklemeler altında bile çok daha düşük geirirnililiğe sahip olmasını sağlamaktadır [40,41]. Ayrıca, ECC'nin eksenel çekme yüklemeleri altında 100 μm 'dan daha dar açıklıklı çatlak oluşumu sergilemesi, üstün kendiliğinden iyileşme performansı bakımından malzemeyi eşsiz kılmaktadır.



4. DENEY MALZEMELERİ VE YÖNTEM

4.1. Karışımların Üretilmesinde Kullanılan Malzemeler

Tez çalışmalarında yer alan esas deneylere başlamadan önce ön deneyler yürütülerek farklı karışımlar hazırlanmıştır. Böylelikle tez süresince farklı parametreler için gerçekleştirilen ön deneylerde karbon esaslı malzeme tipi ve miktarı hariç sabit bir karışım üzerinde durularak karışımların tasarlanmasında tutarlı bir ön araştırma ortaya konmuştur. Tez çalışmalarındaki deneylerde referans olarak kabul edilen karışım (karbon esaslı malzeme bulundurmayan kompozit) tasarımı Çizelge 4.1’de gösterilmektedir. Çizelge 4.1’de gösterilen karışıma karar verilmesinin sebepleri aşağıda kısaca verilmiştir.

- Sabit bir matris karışımına ilave edilecek iletken malzemelerin karışımın elektriksel özellikleri etkilerine hakim olmak,
- Literatürde bu tip karışımların mekanik ve dürabilite özelliklerinin kapsamlı bir şekilde bilinmesi,
- Belirtilen matris karışımının, tez çalışması ile elde edilecek deneysel sonuçlarda yüksek plastik deformasyon kabiliyeti gösterecek şekilde olması,
- Tasarımında çok yüksek hacimlerde kullanılan uçucu küllerin işlenebilirlik, sürdürülebilirlik ve elektriksel iletkenlik konularındaki olumlu etkilerin dikkate alınması,
- Karışımında karbon esaslı malzemelerin üniform olarak dağılımına engel olacak iri agregaların yerine ince kum agregalarının tercih edilmesi.

Çizelge 4.1. Referans karışım tasarımı (tüm bileşenlerin ağırlıkça oranları)

Çimento	Su	İnce kum	Uçucu kül	SA*
1,00	0,58	0,80	1,20	-

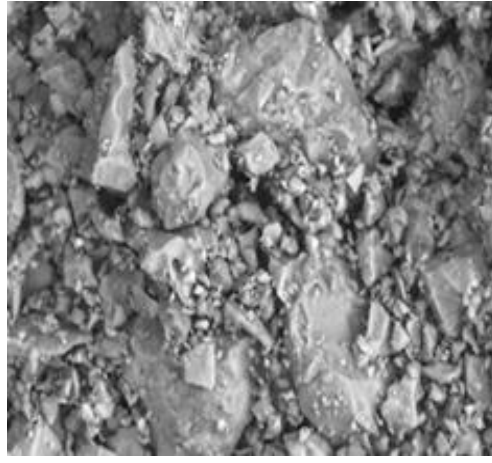
*: SA = Süper akışkanlaştırıcı; karışım sırasında işlenebilirlik durumuna göre karar verilmiştir.

Tez süresince yürütülen deneysel çalışmalarda özgül ağırlığı 3,06, Blaine özgül yüzey alanı 3250 cm²/gr olan CEM I 42,5R tipi standart Portland çimentosu (PÇ) tercih edilmiştir. Bilindiği gibi uçucu küller F ve C sınıfı olarak ikiye ayrılırlar. F sınıfında, bitümlü kömürden üretilmiş ve toplam olarak SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ yüzdesi %70’den fazla olan uçucu küller yer almaktadır. F sınıfı uçucu küllerde CaO yüzdesi %10’un altında

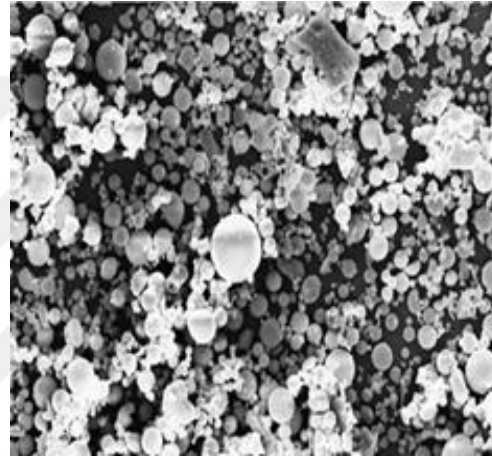
olduğu için düşük kireçli uçucu kül olarak da isimlendirilmektedirler. C sınıfı uçucu küller ise linyit/yarı bitümlü kömürden üretilmiş ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %50'den fazla olan uçucu kül tipidir. C sınıfı uçucu küllerin CaO yüzdesi %10'un üzerinde olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak bilinmektedir. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bir miktar bağlayıcı özelliğe de sahiptir. Tez çalışmasında kullanılan uçucu kül tipi F sınıfıdır. Deneylerde yüksek hacimlerde karışımlarda yer alan uçucu küller taş kömürü yakılarak enerji elde edilmekte olan Sugözü Termik santralinden, Adana ÇimSA Hazır Beton aracılığıyla temin edilmiştir. Söz konusu uçucu külünün özgül ağırlığı 2,31 ve Blaine özgül yüzeyi $2900 \text{ cm}^2/\text{gr}$ 'dir. Çimento bağlayıcılı kompozitlerin üretiminde kullanılmak amacıyla ince taneli kum tercih edilmiştir. Deneylerde kullanılan kuvars esaslı kumun ortalama tane büyüklüğü yaklaşık $1000 \mu\text{m}$, özgül ağırlığı 2,60 ve su emme kapasitesi %0,3'tür. Tablo 2'de Portland çimentosu, uçucu kül ve ince taneli kumun kimyasal özellikleri, Şekil 1'de ise aynı malzemelerin görüntüleri ve morfolojik yapıları ile birlikte ince kumun tane boyut dağılımı verilmiştir. Morfolojik özelliklerini belirlemek amacı ile yapılan çalışmalar taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleriyle gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.2. Portland çimentosu, uçucu kül ve kuvarsın kimyasal özellikleri

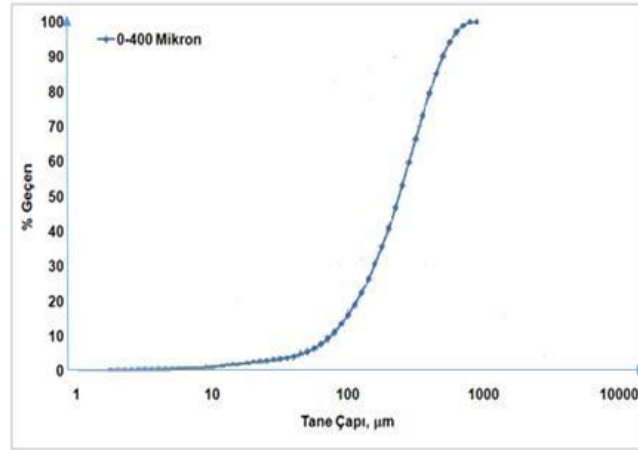
Kimyasal Kompozisyon	Portland Çimentosu	Uçucu Kül	Kuvars Kumu
CaO (%)	61,43	1,64	0,02
SiO ₂ (%)	20,77	56,22	99,79
Al ₂ O ₃ (%)	5,55	25,34	0,06
Fe ₂ O ₃ (%)	3,35	7,65	0,02
MgO (%)	2,49	1,80	0,01
SO ₃ (%)	2,49	0,32	–
K ₂ O (%)	0,77	1,88	0,01
Na ₂ O (%)	0,19	1,13	0,02
Kızdırma Kaybı (%)	2,20	2,10	0,07
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	29,37	89,21	99,87



a) CEM I 42.5R Portland çimentosu ve morfolojik yapısı



b) F sınıfı uçucu kül ve morfolojik yapısı



c) İnce taneli kum ve tane boyut dağılımı (lazer kırınım yöntemi)

Şekil 4.1. Portland çimentosu ve uçucu külün görüntüleri ve morfolojik yapısı ile birlikte ince taneli kum ve tane boyut dağılımı

Çizelge 4.1’de belirtildiği gibi karışımlarda sabit bir süper akışkanlaştırıcı miktarı kullanılmamıştır. Çünkü sabit bir oranı dikkate almak, farklı tür karbon esaslı malzemelerle hazırlanan karışımlar için doğru bir tasarım yaklaşımı değildir. Farklı karbon malzemelerle karışımların işlenebilirliği değiştiğinden, farklı karışımlarda ortalama akıcı

bir kıvam elde edilecek kadar süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Tez çalışmalarında yer alan karışımların tamamında, BASF Yapı Kimyasalları tarafından üretilmiş, MasterGlenium 51 ticari adıyla piyasada mevcut bir süper akışkanlaştırıcı katkı tercih edilmiştir. Çalışmalarda kolay işlenebilir matrisler üretmek amacıyla yer alan yüksek oranda su azaltıcı katkı polikarboksilik eter esaslıdır. Söz konusu kimyasal katkı, betonda kıvam kaybının önlenmesini sağlamıştır. Ayrıca bu tür katkılar bilindiği gibi yüksek dayanım ve dayanıklılığa gereksinim duyulan hazır beton teknolojisi için de tercih edilen katkılardır. Yaklaşık %40 oranında katı madde içermekte olan polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı katkının özgül ağırlığı yaklaşık 1,1'dir ve sıvı haldedir. Yeni nesil katkı malzemesi ile karışıma yayılma ve kıvam koruma özelliği verilerek malzeme tasarımı kolaylaştırılmıştır. Şekil 4.2'de yukarıda özellikleri açıklanan kimyasal katkının ürün halinde ve karışımlara katılması sırasındaki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.2. Süper akışkanlaştırıcı katkı (solda) ve istenen akıcılık için karışımlara eklenmesi

ECC malzemesi mikro-mekanik modellerle istenen mekanik özelliklerin elde edilmesi için en uygun hale getirilebilmektedir. Bu şekilde, lif, matris ve arayüz etkileşiminin kontrol edilmesiyle yüksek performanslı kompozitler üretilmektedir. Mikro-mekanik tasarım aşamasında sentetik liflerin mekanik ve fiziksel özelliklerinden yararlanılmaktadır. Bu amaçla tez çalışmasında sentetik lif olarak polivinil alkol (PVA) lifleri kullanılmıştır (Şekil 4.3). Bu liflerin yüzeyi ağırlıkça %1,2 oranında su iten yağ ile kaplıdır. Bu özellik sayesinde, matris ile lif arasında en uygun arayüz tasarımı elde edilmektedir. Tezde kullanılan PVA liflerinin özellikleri mikro-mekanik hesaplar neticesinde belirlenmiştir. Liflere ait mekanik ve geometrik özellikler Çizelge 4.3'te özetlenmektedir. Tez

kapsamında, PVA lifinin karışımlara eklenmesiyle yük altında çok yüksek deformasyon yapabilme yeteneğine sahip numuneler üretilmiştir. Böylelikle numunelerin elastik ve plastik deformasyonları oluşurken PVA lifinin katkısı ile kendiliğinden algılama değerlendirmeleri daha kolay hale gelmiştir.



Şekil 4.3. Deneylerde kullanılan polimerik lifler (PVA lifi)

Çizelge 4.3. Deney numunelerinin üretiminde kullanılan PVA lifinin mekanik ve geometrik özellikleri

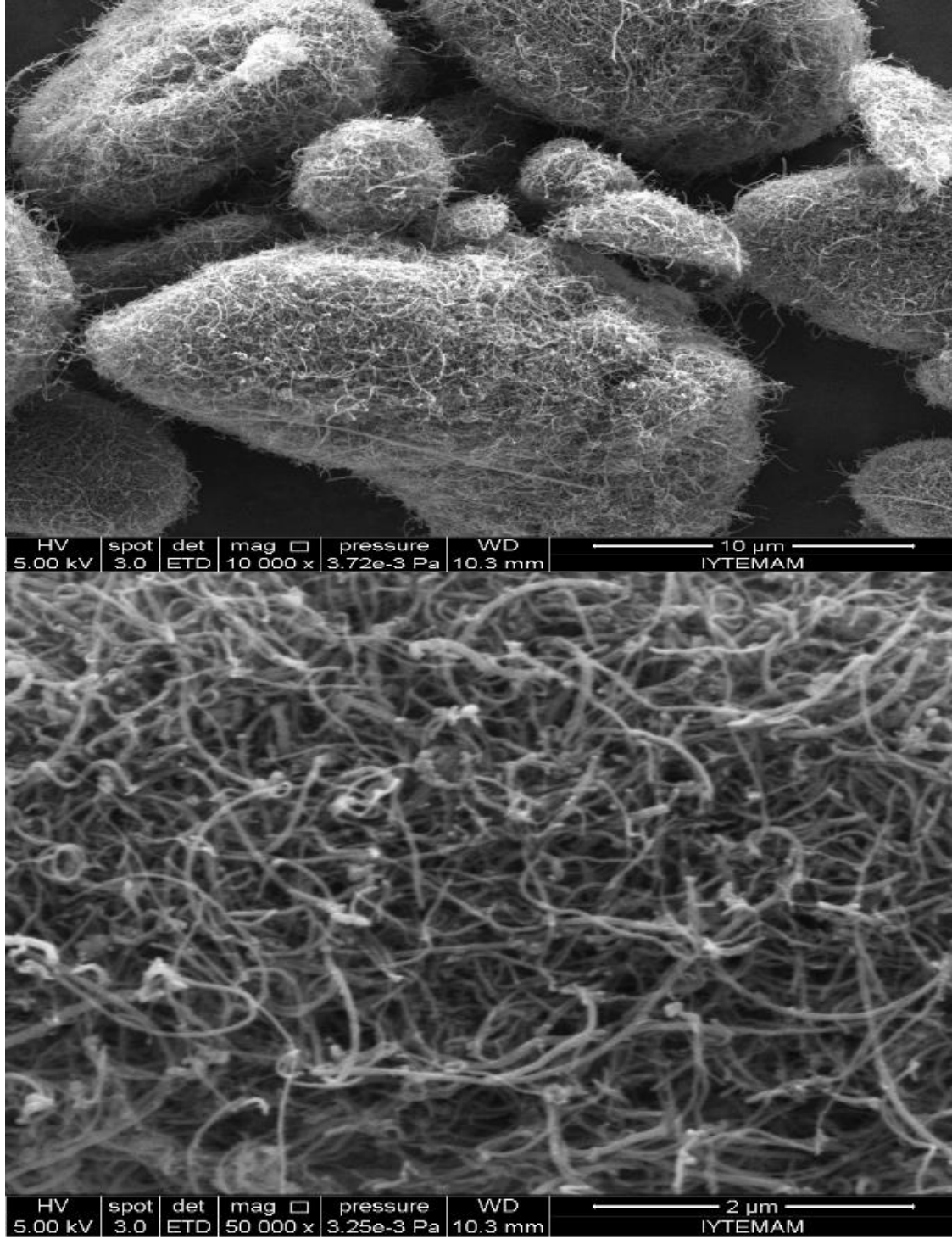
Lif Türü	Nominal Dayanım (MPa)	Görünen Dayanım (MPa)	Çap (μm)	Boy (mm)	Elastik Modülü (GPa)	Uzama (%)	Özgül Ağırlık
PVA	1620	1092	39	8	42.8	6.0	1.30

Çimento bağlayıcılı kompozitlere kendiliğinden algılama kabiliyetinin kazandırılması için üstün mekanik ve fiziksel özelliklere sahip nano karbon malzemeler tercih edilmektedir. Tez çalışmaları kapsamında üretilen numunelerin kendiliğinden algılama davranışı kazanması için toplamda dört farklı karbon esaslı malzeme kullanılmıştır. Bu malzemeler sırasıyla karbon lifler, çok duvarlı karbon nano tüpler, nano grafen partikülleri ve karbon siyahıdır. Karbon lifler 12 mm uzunluğundadır ve 1600 narinlik oranına (boy/çap) sahiptir. Karbon lifin çekme dayanımları 4200 MPa, elastik modülü 240 GPa ve uzama katsayısı %1,8'dir. Aynı malzemenin yoğunluğu 1,7-2,0 g/cm³ arasında iken çapı ise 7,5 μm 'dir. Karbon nanotüpler (KNT) bir ya da birkaç film şeklinde, yuvarlanmış halde küçük tüpler şeklindedir. Yuvarlanmış tek tabaka formundaki karbon nanotüpler tek duvarlı karbon nanotüpler olarak isimlendirilmektedir. Birden fazla yuvarlanmış katman formunda bulunan karbon nanotüpler ise çok duvarlı karbon nanotüpler'dir. Karbon nano tüplerin

maliyetleri diğer karbon esaslı malzemelere göre daha fazladır. Ancak her ne kadar maliyetli ürünler olsalar da son zamanlarda karbon nano tüp üretim tekniklerinin gelişmesi bu tip ürünlerin fiyatlarında önemli oranda düşüşler yaşanmasına neden olmuştur. Birkaç gramının yüzey alanı 500-1000 m² seviyelerine kadar bulunabilen karbon nano tüplerin üretim maliyetlerinin azalmasıyla yakın gelecekte daha geniş çapta kullanımları beklenilmektedir. Tez çalışmalarında kullanılan karbon nanotüpler 15-30 nm çapındadır. Uzunlukları 10-40 µm arasında, yüzey alanları ise 200 m²/g'den daha fazladır. Deneylerde yer alan bir diğer karbon esaslı malzeme ise nano grafen partikülleridir. Grafen partikülleri KNT'den daha farklı bir yapıya sahiptir. Daha katmanlı ve daha düz bir yapıya sahip olan grafen yaklaşık olarak 5 µm çapındadır. Kalınlığı 50-100 nm ve yüzey alanı 13 m²/g'dir. Son olarak, karışımların üretiminde kullanılan karbon esaslı malzemelerden biri de karbon siyahıdır. Çeşitli standartlarda karbon siyahının yüzey alanı 30 ile 150 m²/g arasındadır. Tane büyüklüğü ise daha çok 20 ile 55 nm arasında farklılık göstermektedir. Çizelge 4.4'te karbon nano tüp ve nano grafen partiküllerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir. Şekil 4.4'te ise tez çalışmalarında kullanılan dört farklı karbon esaslı malzemenin elektron mikroskop görüntüleri bir arada verilmiştir.

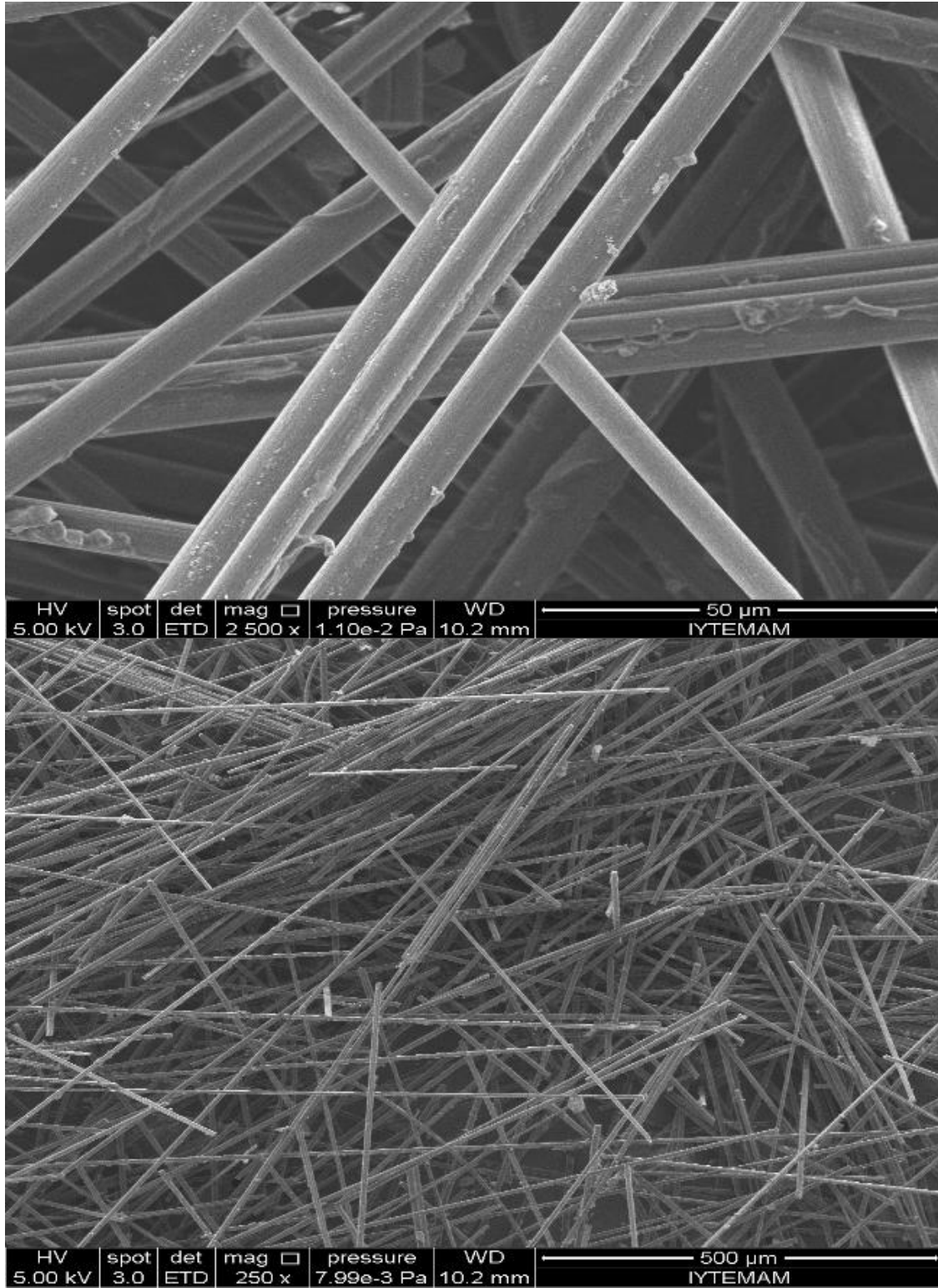
Çizelge 4.4. Karbon nano tüp ve nano grafen partiküllerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Fiziksel Özellikler	KNT	NGP
Çap (nm)	~10-30	~5
Boy (µm)	~10-30	-
Kalınlık (nm)	-	~50-100
Yüzey alanı (m ² /g)	>200	~13
Kimyasal Özellikler		
Saflık	>90%	~96-99%
Oksijen miktarı	-	~1%



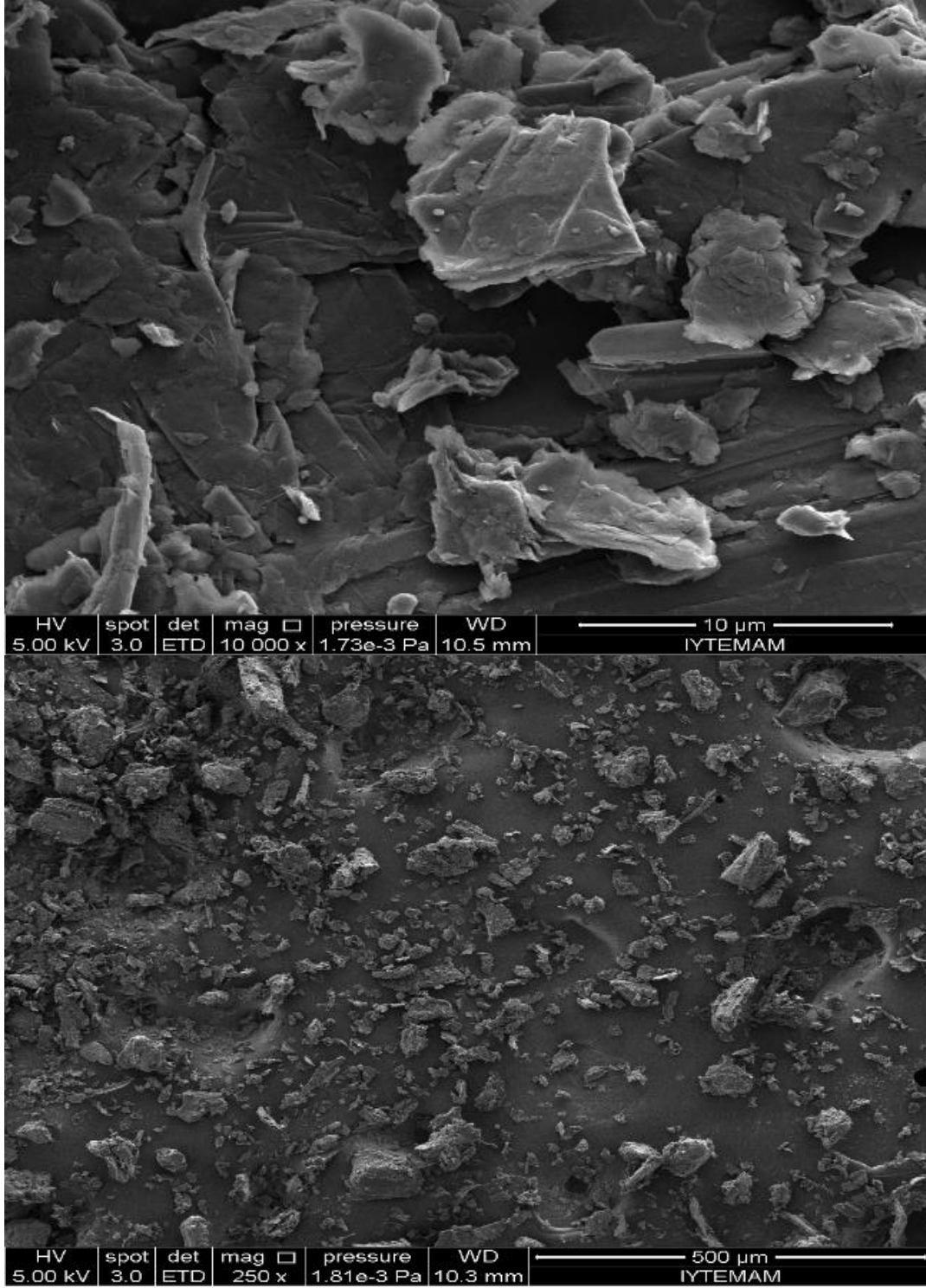
a) Karbon nanotüplerin SEM görüntüleri

Şekil 4.4. Dört farklı karbon esaslı malzemenin SEM görüntüleri



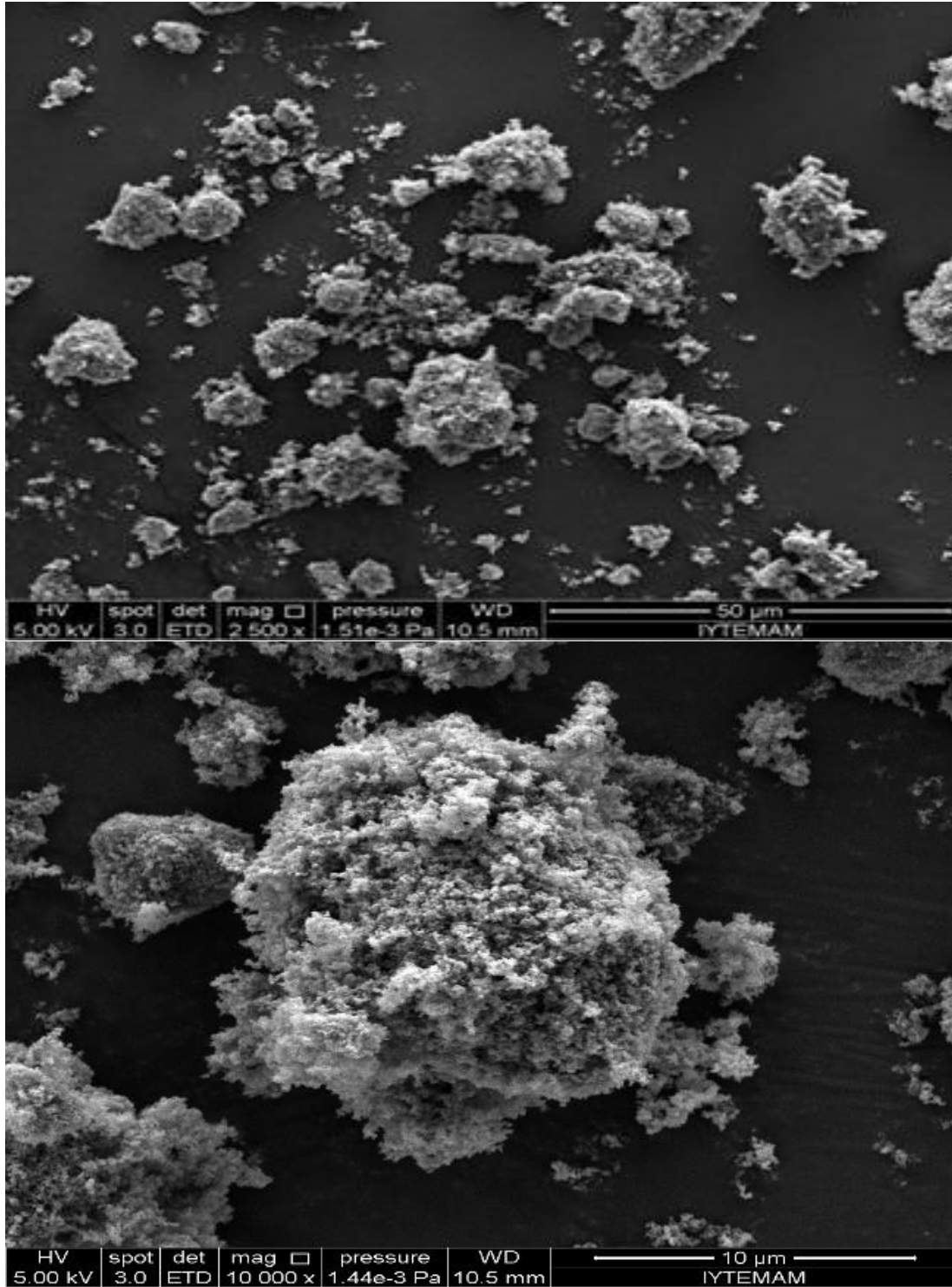
b) Karbon liflerin SEM görüntüleri

Şekil 4.4. (devam) Dört farklı karbon esaslı malzemenin SEM görüntüleri



c) Nano grafen partiküllerinin SEM görüntüleri

Şekil 4.4. (devam) Dört farklı karbon esaslı malzemenin SEM görüntüleri



d) Karbon siyahının SEM görüntüleri

Şekil 4.4. (devam) Dört farklı karbon esaslı malzemenin SEM görüntüleri

4.2. Farklı Tür Karbon Esaslı Malzeme İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Hazırlanması

4.2.1. Taze özellikler

Daha önce bahsedildiği gibi yüksek oranda su azaltıcı katkıyı bütün karışımlarda sabit oranda tutmak nano ve mikro ölçekteki karbon esaslı malzemelerin farklı tane boyutları ve özgül ağırlıkları nedeniyle mümkün değildir. Bu nedenle, farklı içeriklere sahip karışımlardan birbirine yakın işlenebilirlik özelliklerini elde etmek amacıyla mini çökme deneyi bütün karışımlar için yapılmıştır. Mini çökme deneyinde, kesik koni formunda bir kalıp (92 mm alt açıklık, 44 mm üst açıklık ve 76 mm yüksekliğe sahip) düzgün bir yüzeye yerleştirilmiş, ilgili harç numunesi ile doldurulmuş ve sonra yavaş bir şekilde yukarıya doğru kaldırılmıştır. Çökme akışının ardından, harç numunelerindeki akmanın sonlandığı nokta yayılma çapı olarak kaydedilmiştir. Deneysel hazırlıkların bu aşamasında bütün karışımlar yaklaşık 160 mm'lik bir yayılma gösterecek şekilde üretilmiştir. Şekil 4.6.'te deneylerde kullanılan çökme hunisinin ölçüleri ve harç numunelerinin benzer yayılma dereceleri verilmiştir.



Şekil 4.5. Mini çökme hunisi (solda) ve farklı harç numuneleri

4.2.2. Karışım yöntemleri

Nano ve mikro boyutlara sahip karbon esaslı malzemelerin çok yüksek narinlik oranlarına (boy/çap oranı) ve grafit özelliği gösteren yüzeylere sahip olmalarından dolayı çimento harcı karışımlarına ekleme sırasında doğabilecek homojen dağılım problemlerinin önüne geçebilmek amacıyla bir takım araştırmalar yapılmıştır. Yapılan ön deneyler ve literatür

araştırmalarında, farklı karışım yöntemlerinin en iyi sonuçlarının gözlenmesi için karbon esaslı malzeme miktarının sabit tutulduğu görülmüştür. Tez çalışmalarında numuneler hazırlanırken literatürdeki farklı tür karbon esaslı malzemeler için en iyi karışım yöntemleri göz önüne alınmıştır [8]. Sözü edilen karışım yöntemlerinde nano ölçekteki karbon esaslı malzemeler (karbon nano tüp, nano grafen partikülleri ve karbon siyahı) karışımlara aşağıda açıklandığı şekilde ilave edilmiştir:

Karbon esaslı nano malzemeler karışım suyu ve yüksek oranda su azaltıcı katkı ile birlikte dakikada 3000 devir hız ile 15 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karışımlarda yer alan kuru toz malzemeler (Portland çimentosu, uçucu kül ve kum) karbon esaslı nano malzemeler solüsyonu ile bir araya getirilmeden önce harç mikserinde dakikada 100 devir hızı ile 10 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra hazırlanan nano malzeme solüsyonu kuru karışıma 10 saniye süresince yavaşça ilave edilmiş ve tüm malzemeler dakikada 300 devir hızı ile 10 dakika boyunca tekrar karıştırılmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Karbon esaslı nano malzemelerin (sırasıyla soldan sağa) çimento esaslı karışımlara eklenmesi

Tez çalışmalarındaki numunelerin hazırlanmasında karbon lifli numuneler için de en iyi karışım tekniği belirlenmiştir. Yapılan ön deneylerde literatür ile benzer bulgular [8] elde edilmiş ve karbon lifler aşağıda açıklandığı şekilde çimento esaslı matrislere ilave edilmiştir; Karbon lifler, kuru toz malzemelerle birlikte harç mikseri içerisinde dakikada 100 devir hızı ile 10 dakika boyunca karıştırılmıştır. Mikser mevcut hızı ile karıştırma işlemine devam ederken karışım suyunun tamamı karıştırılmakta olan malzemelerin üzerine 10 saniyelik bir süre içerisinde ilave edilmiştir. Daha sonra mikserin hızı dakikada

300 devir yapacak seviyeye çıkarılmış ve bu sırada 30 saniye boyunca yüksek oranda su azaltıcı katkı ilave edilerek karıştırma işlemine dakikada 300 devirlik hızda 10 dakika boyunca devam edilmiştir. Karbon liflerin karışımlara katılmasına ilişkin görüntüler Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Karbon liflerin çimento esaslı karışımlara eklenmesi

4.2.3. Karbon esaslı malzeme kullanım oranları

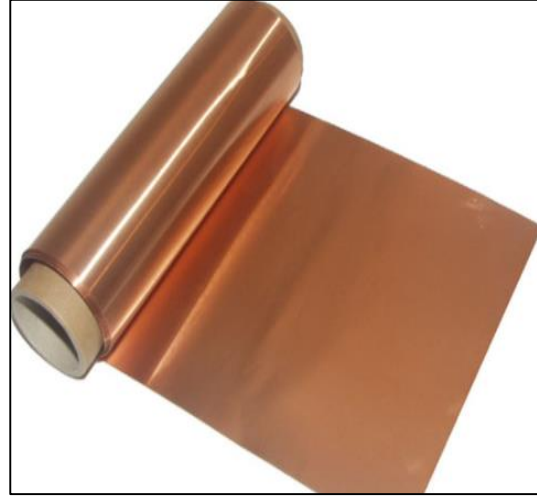
Karbon esaslı malzemelerin çimento esaslı kompozitlerde kullanılmasında dikkat edilmesi gereken bir diğer parametre bu tür malzemelerin kullanım miktarlarıdır. Çünkü geçmiş tecrübeler göstermektedir ki karbon esaslı malzemelerle üretilen tüm numunelerin elektriksel direnç değerlerinde her ne kadar sürekli bir azalma meydana gelse de değerlerdeki düşme oranları belirli bir kullanım oranından sonra belirginliğini kaybetmeye başlamaktadır. Bu sonuç, belirli kullanım oranlarında çimento esaslı matrislerin karbon esaslı iletken malzeme kullanımına doyduğunu göstermektedir. Literatürde bu noktaya “kritik kullanım eşiği (Saturation Point)” denilmektedir [42]. Tez çalışmaları kapsamında hazırlanan deney numunelerinde bu kritik eşik seviyesi dikkate alınarak karbon esaslı malzeme miktarlarında bazı sınırlamalara gidilmiştir. Böylesi bir yaklaşım maksimum elektriksel iletkenliği elde etmenin yanında beton malzemeleri içerisinde en maliyetli olan karbon esaslı malzemelerin daha az kullanılmasını sağlayarak daha ekonomik karışımların üretilmesini mümkün kılmıştır. Deneysel çalışmalarda karbon nano tüp, nano grafen partikülleri ve karbon siyahı malzemeleri için kullanım oranları sırasıyla %0,55, %2,00 ve %2,00 olarak dikkate alınmıştır.

4.2.4. Elektriksel ölçümler

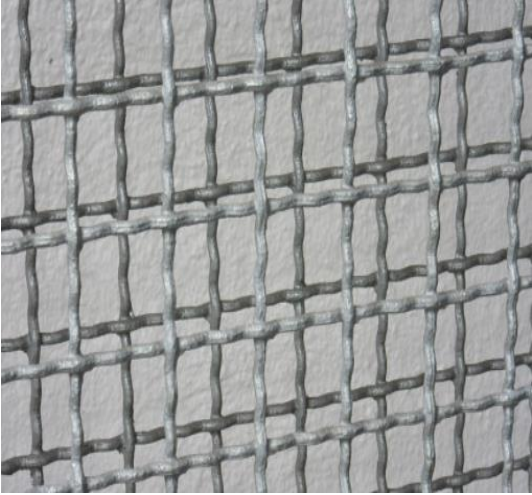
Kendiliğinden algılama davranışının hassas bir şekilde yapılması için esas deneylerden önce bir takım ön araştırmalar yürütülmüştür. Bu çalışmalar daha çok silindirik ve kübik numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Daha hassas ölçümler için farklı test konfigürasyonlarının tutarlılığı sınanmıştır. Numuneler üzerinden elektriksel ölçümleri doğrudan kayıt altına alabilmek için yüksel elektriksel iletkenliğe sahip elektrotlar kübik ve silindir ECC numuneleri içerisine gömülmüştür. Tez çalışmalarında devamlı olarak kullanılacak bir elektrot tipine karar vermek için çeşitli elektrot malzemelerin; pratik uygulanabilirliği, mekanik özelliklere zarar vermemesi ve yüksek hassasiyetli ölçüm sağlaması gibi parametrelere dikkat edilmiştir. Ön deneylerde kullanılan farklı elektrot tiplerinden bazıları çelik hasır, bakır hasır ve tel, alüminyum folyo, pirinç plaka vb. gibi çeşitli malzemelerdir. Bu malzemelerin içerisinden pirinç elektrotların numuneler içerisinde sabit konumlarını koruyarak daha hassas sonuçları yansıttığı tespit edilmiştir. Bunun yanında, gerçek uygulamalar göz önüne alındığında gömülen elektrotların çevresel etkilerden yapısal eleman tarafından korunacağı da düşünülmüştür. Tez çalışmalarının esas deneylerinde kullanılan pirinç elektrotlar yüksek dürabilite özelliklerine sahip ve kompozitlerde yer alan hidrasyon ürünleri ile herhangi bir reaksiyon göstermemiştir. Şekil 4.8.'de tez çalışmalarındaki esas deneylere geçmeden önce ön araştırmalarda kullanılan bazı elektrot tipleri verilmiştir.



a)



b)



c)



d)

Şekil 4.8. Elektrot amaçlı kullanılmak üzere test edilen malzemeler (a) bakır hasır teli (b) pirinç plaka, (c) çelik hasır teli, (d) iletken jel

Esas deneylerde kullanılmak üzere elektrot tipine karar verildikten sonra, numunelerin hangi tip elektriksel ölçümlerle en doğru şekilde ölçüm yapılması gerektiği araştırılmıştır. Genel olarak bakıldığında konu ile ilgili (plastik ve elastik deformasyon seviyelerinde kendiliğinden algılama kabiliyeti) yapılan çalışmalar çok sınırlı olması ve elektriksel ölçüm farklılıkların tam olarak ortaya konmaması sebebiyle tez çalışmalarında farklı elektriksel ölçüm teknikleri ile numunelerin kendiliğinden algılama kabiliyetlerinin test edilmesi gerektiğine karar verilmiştir. Bu kapsamda tez süresince numuneler üzerinde hem AC (alternatif akım) hem de DC (doğrusal akım) elektriksel ölçümleri yapılmıştır. 2 noktalı (AC) ve 4 noktalı (DC) olarak uygulanan yöntemler Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir.



a)

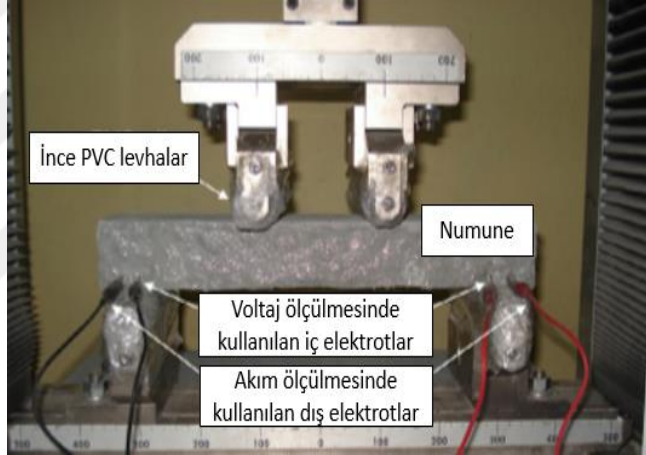


b)

Şekil 4.9. AC elektriksel direnç ölçer (a), numunenin AC ile elektriksel ölçümü (b)



a)



b)

Şekil 4.10. DC elektriksel direnç ölçer (a), numunenin DC ile elektriksel ölçümü (b)

Doğrusal akım ile ölçüm tekniğinde, dış elektrotlar arasında sabit bir akım uygulanarak iç elektrot arasında voltaj değerleri hesaplanmış ve elektriksel dirençleri bulunmuştur (Şekil 4.10.b). Temin edilen cihaz ABD tabanlı olan Keithley firmasından sağlanmıştır ve doğrudan elektriksel direnç ölçüm cihazı olarak adlandırılmaktan ziyade kaynak ölçer (SourceMeter) adı altında satılmakta ve düşük voltajlı test uygulamalarında kullanılabilmektedir (Şekil 4.10.a). Cihaz hassas voltaj ve akım kaynağı olarak çalışabilmekte ve sırasıyla $1 \mu\text{V}$ -20V ve 10 pA-1A arası ölçüm alabilmektedir. Cihaz kararlı bir DC güç kaynağı ve aynı zamanda bir multimetre özelliği taşımaktadır. Cihaz voltaj ve akım kaynağı olarak çalışabilmesinin yanı sıra, voltaj ölçer, akımölçer ya da direnç ölçer olarak da çalışabilmektedir. Çalışmalarda kullanılan RCON elektriksel direnç ölçüm cihazı ise (Şekil 4.9a), alternatif akım (AC) uygulayarak empedans sonuçları veren,

1 Hz ile 30 Hz arasında değişebilen frekans değerlerinde çalışabilen, 5 saniyeden daha kısa sürede sonuç verebilen ve 0 ile 180° arasında faz açısını tayin edebilen bir cihazdır. AC uygulamaları için en az 1 kHz'lik frekans seçilmesi polarizasyon etkisini ortadan kaldırmaktadır. Bu sebeple, geniş frekans yelpazesine rağmen, iki noktalı cihazın kullanıldığı tez çalışmasında, test frekansı sabit olacak şekilde 1 kHz olarak belirlenmiştir. İki noktalı ED lm cihazı, empedans ve faz açısı sonuçları vermektedir. Bu değerler ile aşağıdaki basit denklem kullanılarak geometrik faktörler aracılığıyla direnç değerleri elde edilebilmektedir.

$$\rho = Z \times \cos(\theta) \times \frac{A}{L} \quad (4.1)$$

Bu denklemde ρ , Z , θ , A ve L değerleri sırasıyla, direnç ($\Omega.m$), elektriksel empedans (Ω), faz açısı ($^\circ$), en kesit alanı (m^2) ve boy (m) değerlerine karşılık gelmektedir. Numunelerin yukarıdaki kısımlarda özellikleri verilen malzeme ve yöntemlerle üretilmesinden sonra, kalıplar içerisinde 24 saat süresince $50 \pm 5\%$ bağıl nem ve 23 ± 2 °C'de bekletilmiştir. 24 saatin tamamlanmasının ardından, kalıplarından çıkarılan numuneler, geçirimsiz plastik poşetler içerisine alınarak 28 güne kadar $95 \pm 5\%$ bağıl nem ve 23 ± 2 °C'de kr edilmiştir (şekil 4.11).

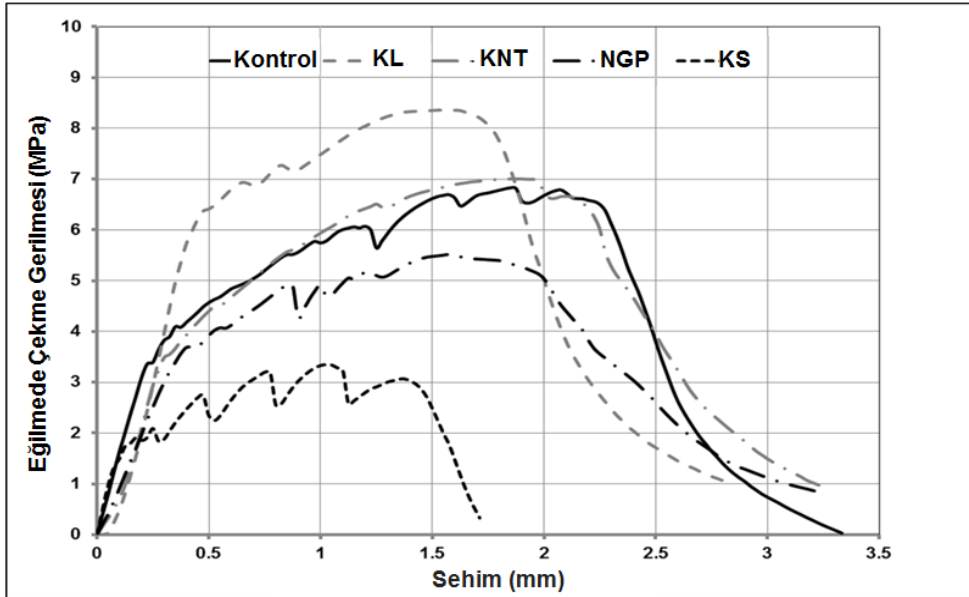


şekil 4.11. Numunelerin test sürelerine kadar geçirimsiz plastik poşetlerde kr edilmesi

İki farklı karışım yöntemi ve farklı kullanım miktarlarındaki dört farklı karbon esaslı malzemeler ile üretilen numunelerden her bir karışım için 4 adet döküm yapılmıştır. Deneyler 360*75*50 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler üzerinden 4 noktalı eğilme

deneyleri ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin kendiliğinden algılama performansının karşılaştırılması için benzer sayılarda herhangi bir karbon esaslı malzeme bulundurmeyen referans numunelerde üretilmiştir. Daha önce sözü edilen pirinç elektrotlar taze haldeki karışımlara numune kenarlarından 25 mm uzaklıkta olacak şekilde 1*10 cm ebatlarında hazırlanarak gömülmüş ve elektriksel ölçüm için hazır hale getirilmiştir.

Daha önceki kısımlarda bahsedildiği gibi, tez çalışmalarının ana amacı; hem elastik hem de plastik deformasyon bölgelerinde tersinir ve tekrarlı dört noktalı eğilmede çekme yüklemeleri altında çimento bağlayıcılı kompozitlerin kendiliğinden algılama kabiliyetlerini belirlemektir. Çalışmalarda numuneler 28 günlük yaşlarda testlere tabi tutulmuşlardır. Deneylerde yer alan farklı karışımların eğilme dayanımını ve orta açıklık sehim kapasitelerini belirlemek ve elastik/plastik bölgeleri tespit etmek amacıyla 28 gün sonunda her bir karışımdan 4 adet kiriş numune üretilmiş ve nihai dayanım seviyelerine ulaşıncaya kadar eğilme yüklemesine maruz bırakılmışlardır. 4 farklı kopma modülü değerinin (eğilme dayanımı) ortalaması her bir çeşitte üretilen kiriş numune için hesaplanmıştır. Şekil 4.12’de numunelerin tipik eğilmede çekme gerilmesi-orta açıklık sehim eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 4.12. Eğilmede çekme yüklemesi altında 28 günlük kiriş numunelerinin tipik gerilme-sehim ilişkileri

Elastik bölge içerisinde, eğilme yüklemeleri 0,05 mm/dk yükleme hızında her seferde nihai eğilme dayanımı değerinin %30'luk kısmına ulaşmak suretiyle üç defa tekrarlı bir şekilde

uygulanmış ve yük boşaltılmıştır. Bunun yanında Şekil 4.12’de görüleceği gibi, KNT ile takviye edilmiş kiriş numunelerde plastik deformasyon bölgesinin başlangıcı anlamına gelen lineer olmayan gerilme şekil değiştirme eğrisi eğilme dayanımının %40’ı seviyesinde, NGP ve KS içeren numunelerde ise eğilme dayanımının %50’si oranında gerçekleşmiştir. Bu bölge KL içeren numunelerde ise yaklaşık %58 seviyelerinde başlamıştır. Tez çalışmalarının bu aşamasında, plastik deformasyon bölgesinde yükleme ve boşaltma seviyelerinin kopma modülünün %70’i seviyesine kadar 0,30 mm/dk yükleme hızında gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. Elastik deformasyon bölgesinde olduğu gibi, plastik deformasyon bölgesinde de yükleme ve yük boşaltma çevrimleri üçer defa tekrarlanmıştır. Elastik ve plastik deformasyon bölgeleri için, kirişlere uygulanan kuvvet bir diğer yükleme çevriminin başlangıcından önce sıfır seviyesine kadar getirilip (boşaltılıp) sonra tekrar uygulanmıştır. Veri kayıtları (zaman [saniye], kuvvet [kN] ve orta açıklık kiriş deformasyonu [mm]) universal test yükleme cihazından alınmış ve her bir saniye için LVDT kullanılarak kaydedilmiştir. Yükleme ve yük boşaltma deneyleri için kullanılmak üzere toplamda 40 adet kiriş numune üretilmiştir. Farklı karbon esaslı malzemeler içeren her bir karışım için toplam 8 adet numune üretilmiş ve bunlardan 4’ü elastik bölgedeki deformasyonların, diğer 4’ü ise plastik bölgedeki deformasyonların tespit edilmesinde kullanılmıştır. Toplamda sonuçlar dört farklı numuneden kaydedilen deney sonuçlarının ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Farklı karbon esaslı malzemelerle takviye edilmiş kiriş numunelerinin yanında aynı sayıda karbon esaslı malzeme içermeyen kiriş numuneleri karşılaştırma amacıyla üretilmiştir. Ön deneylerde numunelerin elektriksel dirençlerini belirlemek amacıyla detayları daha önceki kısımlarda verilen 2 noktalı ve 4 noktalı yöntemler kullanılmıştır. Ancak ön deneyler neticesinde 4 noktalı ölçümlerin ilgili verilerin alınmasında daha hassas davranış gösterdiği tespit edilmiştir. 4 noktalı ölçümlerde elektriksel direnç değerleri eğilme yüklemesinin daha henüz başlarından itibaren alınmaya başlanmıştır. Bu nedenle tez çalışmalarının esas deneylerinde kullanılmak üzere elektriksel direnç (ED) okumaları 4 noktalı DC kaynağı ile gerçekleştirilmiştir.

Verilerin alınmasında ilgili cihaz (Şekil 4.10a) her saniyede voltaj (mV) ve akım (mA) kaydedecek şekilde ayarlanmıştır. Dış taraftaki bakır elektrotlar akım kaynağına, iç taraftaki bakır elektrotlar ise gibi voltaja bağlanmıştır (Şekil 9b). Ohm kanunu uygulanarak hesaplanan voltaj değeri akım değerine bölünmüştür. Elektriksel empedans değeri numunelerin geometrik faktörleri kullanılarak ohm birimi ile elektriksel direnç değerlerine

dönüştürülmüştür. ED değerlerinin hesaplanması sırasında kullanılan denklem aşağıda sunulmuştur:

$$\rho = \frac{V}{I} \times \frac{A}{L} \quad (4.2)$$

Burada ρ , V , I , A ve L sırası ile elektriksel direnç ($\Omega.m$), voltaj (mV), uygulanan akım (mA), bakır elektrotlar ve çimento bağlayıcılı kompozit arasındaki en kesit alanı (m^2) ve iç elektrotlar arasındaki uzaklıktır (m). Bütün gerekli verilerin hazırlanmasından sonra, oransal elektriksel direnç değişimi (fractional change in electrical resistivity – FCER) ilk olarak aşağıda verilen denklem uyarınca hesaplanmış ve piezodirençlilik davranışını temsil etmesi amacıyla zamana karşı orta açıklık sehim (mm) ilişkisi ortaya konmuştur:

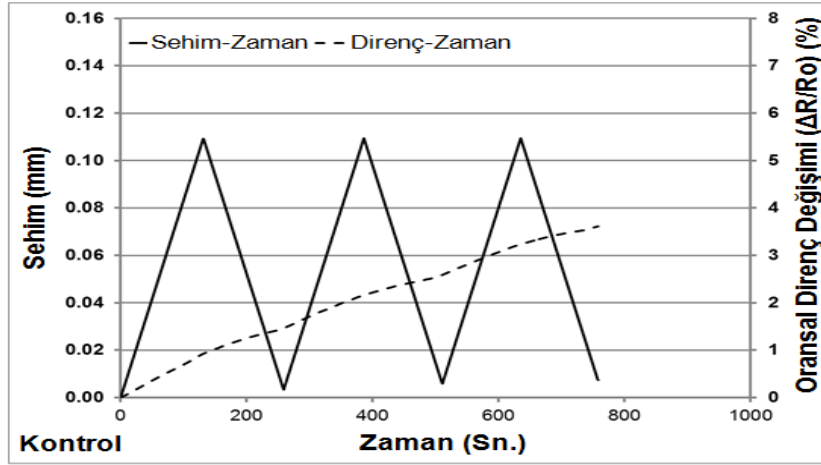
$$FCER \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right) (\%) = \left(\frac{R_L - R_0}{R_0} \right) 100 \quad (4.3)$$

Burada R_L eğilme yükleri ve yük boşaltmaları sırasında elektriksel direnci, R_0 ise başlangıç anındaki elektriksel direnç değerini vermektedir. Tez kapsamında oransal elektriksel direnç değişimleri, herhangi bir döngüde (hem yükleme hem de boşaltılma sırasında) çimento bağlayıcılı kompozitlerin başlangıç anlarındaki elektriksel direnç değerleri ile karşılaştırılarak belirlenmiştir.

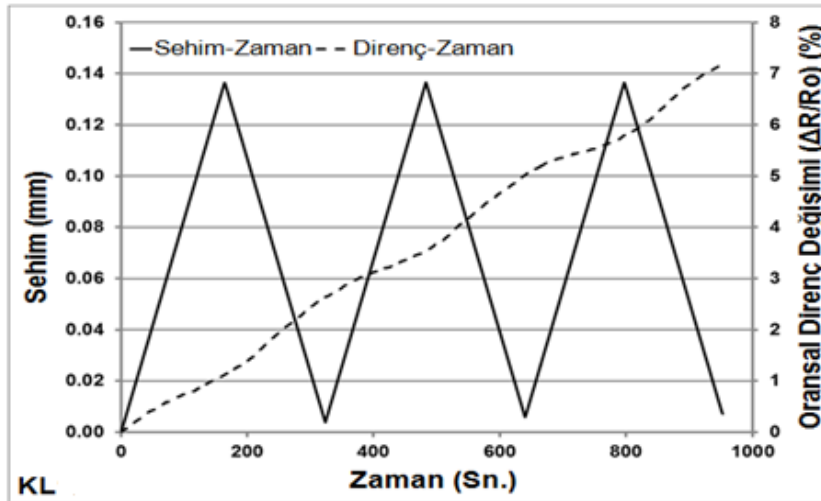
5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. Elastik Deformasyon Bölgesindeki Kendiliğinden Algılama Davranışı

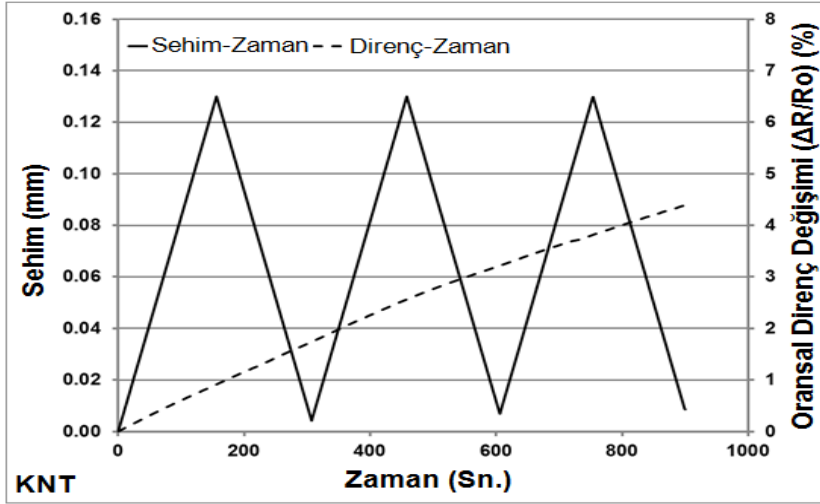
Şekil 5.1-5.5’de elastik deformasyon bölgesinde farklı tür karbon esaslı malzemeler ile hazırlanmış ve karbon esaslı malzeme içermeyen numuneler için hasarın kendiliğinden algılanma grafikleri verilmiştir. Şekillerde gösterilen grafikler elastik deformasyon bölgesinde ön yüklemenin ardından üç kez tekrar eden yükleme ve boşaltma döngüleri sonucunda oransal elektriksel direnç ve sehim değişimlerini göstermektedir. Her bir grafik dört farklı kiriş numunesinden alınan sonuçlara bağlı kalınarak hazırlanmıştır. Şekil 5.1-5.5’de görüleceği gibi elastik deformasyon bölgesinde tekrarlı yüklerin uygulanması ile karbon esaslı malzeme kullanımından bağımsız olmak üzere bütün kiriş numunelerin oransal elektriksel direnç değişim sonuçları sürekli olarak artış göstermiştir. Sonuçlarda gözlemlenen bu sürekli artış nedeninin, elastik deformasyon bölgesindeki tekrarlı yüklemeler ile karbon esaslı malzemelerin birbirinden uzaklaşması olduğu düşünülmektedir. Yapılabilecek bir diğer yorum ise birbirleri ile temas halinde olmasa da elektriksel açıdan bir iletkenlik yolu yaratan karbon esaslı malzemelerin bu yolun bozulması ile elektriksel iletkenlik özelliklerinin azalarak elektriksel direnç değerlerini arttırması olabilir. Bunun yanında karbon esaslı malzemeler ile çimento matrisi arasındaki bağın yükleme nedeni ile zayıflaması oransal direnç değişim değerlerinin artmasında önemli rol oynamaktadır. Tekrarlı yüklemeler sonucunda oransal direnç değişim miktarlarını etkileyen önemli noktalardan bir diğeri ise, yükleme ve birim şekil değişikliğinin (sehim) söz konusu olduğu durumlarda, elektriksel olarak iletken karbon esaslı malzemelerin kendi bireysel elektriksel direnç değerlerinin de artma potansiyeline sahip olmalarıdır [43].



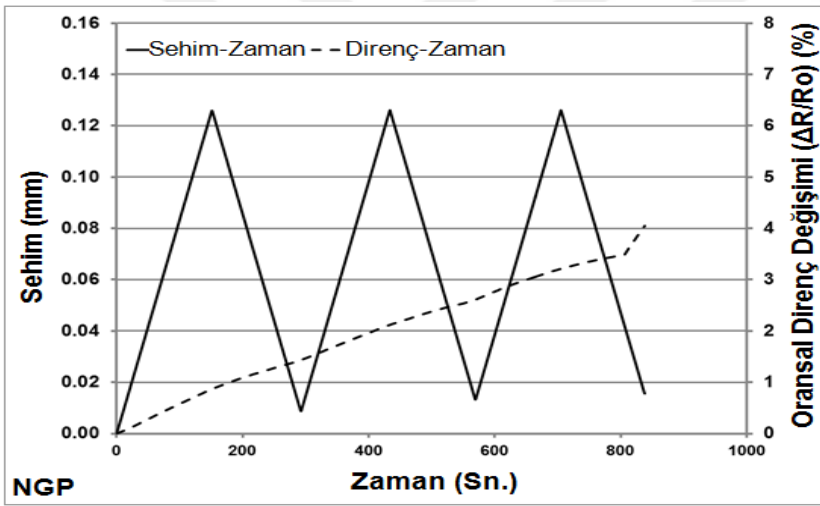
Şekil 5.1. Elastik deformasyon bölgesinde tekrarlı eğilme yükleri altındaki referans kiriş numunelerin kendiliğinden algılama davranışı



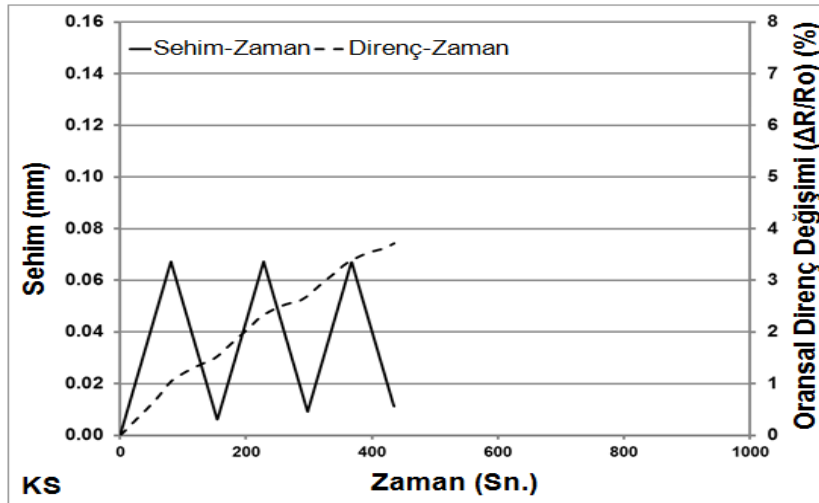
Şekil 5.2. Elastik deformasyon bölgesinde tekrarlı eğilme yükleri altındaki karbon lif içeren kiriş numunelerin kendiliğinden algılama davranışı



Şekil 5.3. Elastik deformasyon bölgesinde tekrarlı eğilme yükleri altındaki karbon nanotüp içeren kiriş numunelerin kendiliğinden algılama davranışı



Şekil 5.4. Elastik deformasyon bölgesinde tekrarlı eğilme yükleri altındaki nano grafen partikülleri içeren kiriş numunelerin kendiliğinden algılama davranışı



Şekil 5.5. Elastik deformasyon bölgesinde tekrarlı eğilme yükleri altındaki karbon siyahı içeren kiriş numunelerinin kendiliğinden algılama davranışı

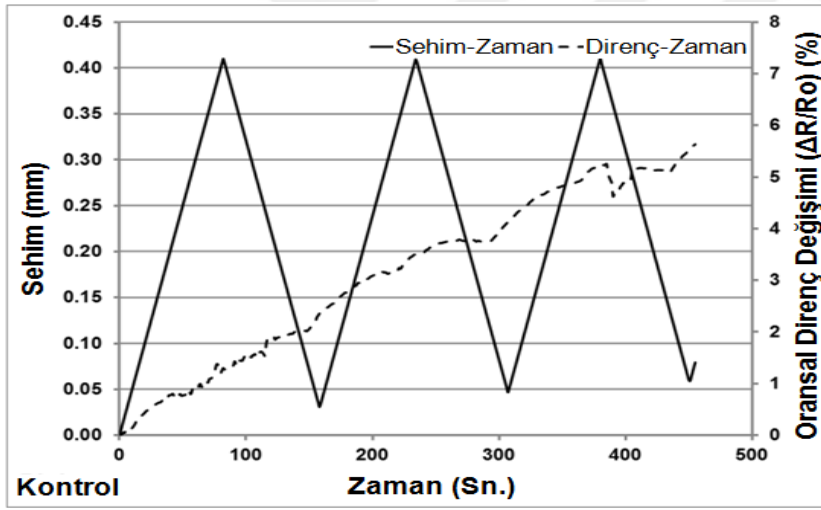
Normal şartlar altında oransal direnç değişim değerlerinde yüklemeye birlikte artış, yükün boşaltılmasıyla birlikte ise azalma beklenmektedir. Şekil 5.2 ve 5.5’den de görülebileceği üzere tekrarlı yüklemelerle beraber her ne kadar KL ve KS takviyeli kiriş numunelerinde az da olsa lineerlikten sapma (tersinir) gözlemlense de elastik deformasyon bölgesinde tekrarlı yükleme ve yük boşaltma döngüleri sonucunda kiriş numunelerin hemen hemen hepsinin lineer (tersinir olmayan) özellik gösterdikleri gözlemlenmiştir. Polarizasyonun test edilen numunelerin oransal direnç değişim değerlerinin artmasında önemli rol oynama ihtimali bulunmaktadır [44-45]. Diğer taraftan, eğilme yüklerinin kaldırılmasının ardından tersinir olmayan oransal direnç değişim sonuçlarının elde edilmesinin muhtemel açıklaması ise henüz eğilme yük çevrimleri başlamadan önce matris ve agrega arasındaki arayüz bölgesinde yer alan mikroçatlakların varlığı olabilir. Bu mikroçatlakların genişlik, uzunluk ve sayılarında yüklemenin başlamasıyla beraber artışlar olmaktadır [19]. Elastik deformasyon bölgesinde nihai dayanımın %30’una ulaşılmasından dolayı, arayüz bölgesindeki mikroçatlak sistemi yüklemenin boşlatılması ile stabil halini korumuş ve bu durum oransal direnç değişim sonuçlarının tersinir olmamasına yol açmıştır. Benzer şekilde, numunelerin maruz kaldığı deformasyon oldukça düşüktür. Bu nedenle yükleme altında karbon esaslı malzemelerin kendi elektriksel direnç değerleri sürekli olarak artış göstermiş ve yüklemenin boşaltılmasıyla beraber yük değerleri tekrar eski haline dönememiştir. Bu noktada, elastik deformasyon bölgesindeki yükleme altında elektriksel açıdan iletken malzemelerin bireysel elektriksel dirençlerinin kiriş numunelerin kendi elektriksel dirençleri üzerinde bir üstünlüğü olduğu belirtilebilir. Bu nedenle, yüklemenin

kaldırılması ile beraber elektriksel direnç değerlerinde beklenen azalmalar gerçekleşmemiş olabilir. Elde edilen sonuçlar diğer karbon esaslı malzemelere (KNT ve NGP) kıyasla KL ve KS takviyeli numunelerin birim şekil değiştirme sensörü görevi görmeleri açısından çok küçük deformasyon değerlerinde dahi daha üstün performans sergilediklerini göstermektedir.

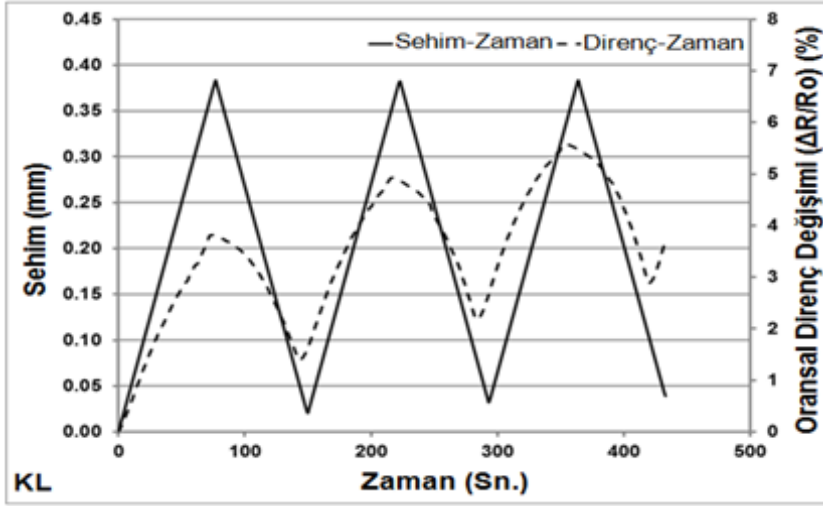
Şekil 5.1-5.5’de sunulan sonuçlarla ilgili olarak dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta, elastik deformasyon bölgesinde kiriş orta açıklık sehim değişimlerinin algılanmasında farklı kiriş karışımlarının bireysel olarak sergiledikleri performanslardır. Her ne kadar kirişlerin elastik deformasyon bölgesindeki kendiliğinden algılama özellikleri farklı tür karbon esaslı malzemelere göre değişiklik göstermiş ve bütün karbon esaslı malzemeler yüklemenin kaldırılması ile yukarıda sayılan nedenlerden dolayı beklenen davranışı göstermemiş olsa da (KL ve KS takviyeli numunelerde gözlemlenen çok az sapma hariç), tez çalışmalarında üretilen bütün karışımlar hasar oluşumuna (orta açıklık sehimini) karşı hassas bir davranış göstermiştir. Şekil 5.1-5.5’den de görülebileceği gibi, dikkat çekici bir şekilde karbon esaslı malzeme içermeyen kontrol numunelerinde dahi elastik bölgede tekrarlı yükleme ve boşaltma döngülerinin ardından oransal direnç değişim değerlerinde dikkate değer artışlar göze çarpmıştır. Bu durumun muhtemel sebebi ise kiriş numunelerin üretiminde kullanılan F-sınıfı uçucu kül taneciklerinin %10,36 oranında yanmamış karbon içermesi olabilir. Elde edilen bu sonuçlara göre, numunelerde kendiliğinden algılama davranışının mümkün kılınabilmesi için kimyasal kompozisyonun karmaşık bir şekilde modifiye edilmesi gerekliliği bulunmamaktadır. Bu noktada akıllara kendiliğinden algılama davranışı elde edilebilmesi amacıyla karışımlarda neden karbon esaslı malzemelerin kullanımına gerek duyulduğu gelebilir. Bu soru bu aşamada ancak Şekil 5.1-5.5’in incelenmesiyle cevaplandırılabilir. Verilen şekilde çok küçük sehim seviyelerinde kendiliğinden algılama davranışını elde etmek için (özellikle yüklemenin kaldırılmasından sonra) elektriksel olarak iletken malzemelerin kullanımına ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Bir sonraki bölümde de açıklanacağı üzere, karbon esaslı malzeme kullanımı ayrıca plastik deformasyon bölgesinde de kendiliğinden algılama verilerini elde etme de çok etkilidir.

5.2. Plastik Deformasyon Bölgesindeki Kendiliğinden Algılama Davranışı

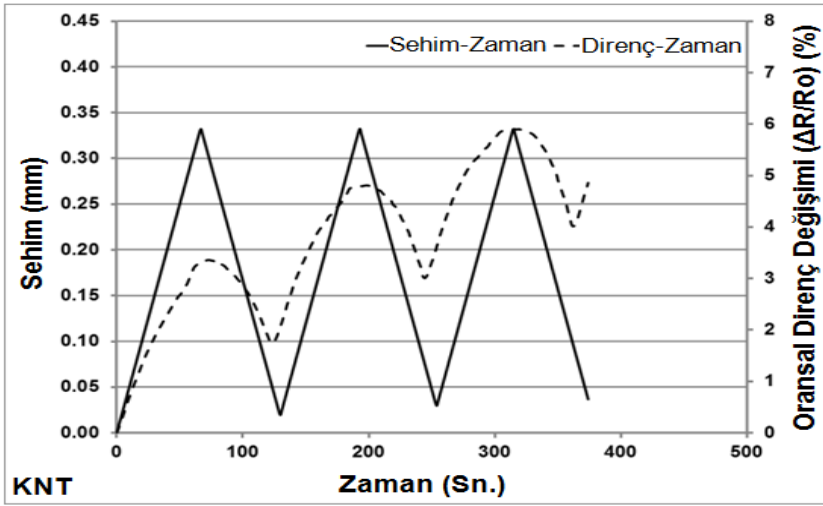
Karbon esaslı malzeme içeren ve içermeyen kiriş numunelerin plastik deformasyon bölgesinde 3 kez tekrar edilen yükleme ve boşaltma döğüleri sonrasındaki kendiliğinden algılama davranışları Şekil 5.6-5.10’da verilmiştir. Bu şekilde verilen grafiklere göre tıpkı elastik deformasyon bölgesinde olduğu gibi plastik deformasyon bölgesinde de bütün kiriş numunelerin gelişen hasara karşı hassas olduğu ve kendiliğinden algılama davranışı gösterdikleri görülmektedir. Şekil 5.1-5.5 ile Şekil 5.6-5.10 arasında karşılaştırma yapıldığında, elastik ve plastik deformasyon bölgelerindeki eğilme hasarlarının kendiliğinden algılanması arasındaki farklar çok açık bir şekilde görülmektedir. Karbon esaslı malzeme içermeyen kiriş numuneler dikkate alındığında 3 kez tekrarlı yükleme ve boşaltma döğüsü uygulandıktan sonra, numuneler hem plastik hem de elastik deformasyon bölgelerinde benzer davranışları göstermiştir.



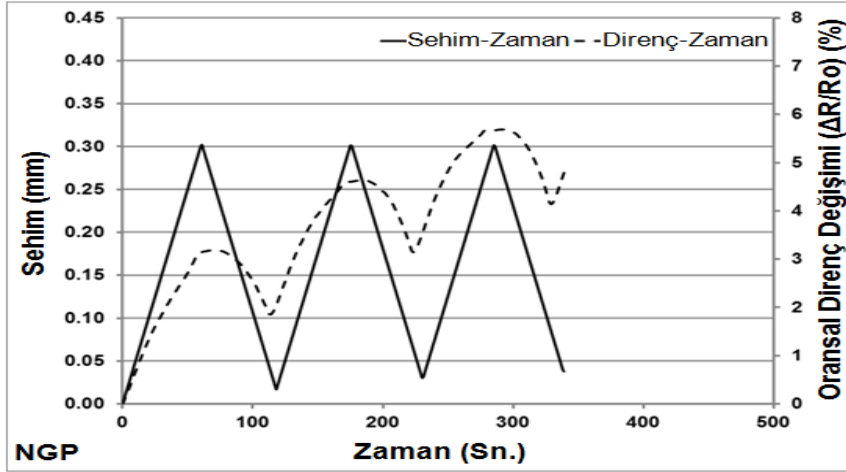
Şekil 5.6. Plastik deformasyon bölgesinde tekrarlı eğilme yükleri altındaki referans kiriş numunelerinin kendiliğinden algılama davranışı



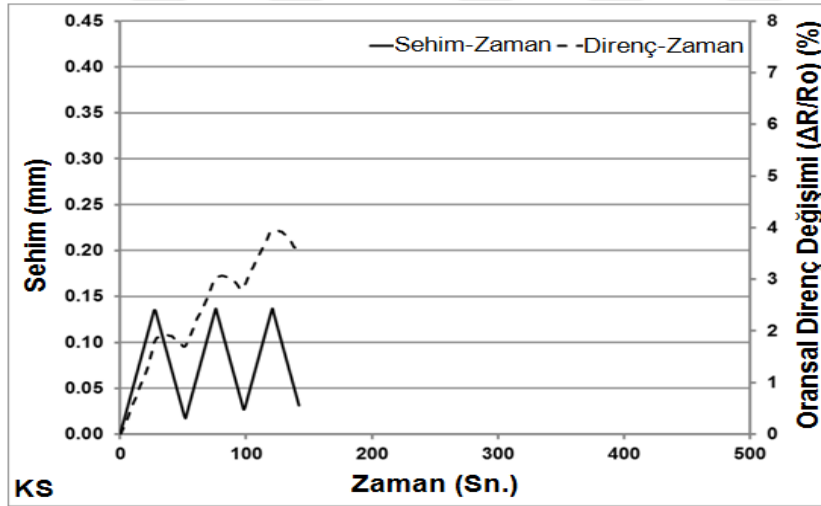
Şekil 5.7. Plastik deformasyon bölgesinde tekrarlı eğilme yükleri altındaki karbon lif içeren kiriş numunelerinin kendiliğinden algılama davranışı



Şekil 5.8. Plastik deformasyon bölgesinde tekrarlı eğilme yükleri altındaki karbon nano tüp içeren kiriş numunelerinin kendiliğinden algılama davranışı



Şekil 5.9. Plastik deformasyon bölgesinde tekrarlı eğilme yükleri altındaki nano grafen partikülleri içeren kiriş numunelerinin kendiliğinden algılama davranışı



Şekil 5.10. Plastik deformasyon bölgesinde tekrarlı eğilme yükleri altındaki karbon karbon siyahı içeren kiriş numunelerinin kendiliğinden algılama davranışı

Elastik deformasyon bölgesine kıyasla plastik deformasyon bölgesinde tekrarlı yükleme ve boşaltma uygulamaları sonucunda oransal direnç değişim değerleri doğrusallıktan çok açık bir biçimde sapma göstermiştir. Karbon esaslı malzeme içermeyen kiriş numuneler daha önce bahsedilen nedenlerden dolayı (yüklemenin kaldırılmasından sonra numunelerin sahip olduğu elektriksel yüklerin yetersiz oranda boşalması ve DC akım uygulaması nedeni ile polarizasyon etkisi) tekrarlı yükleme boşaltma uygulamaları sırasında yüklemedeki boşalmaları algılama konusunda çok etkin sonuçlar vermemiştir. Buna rağmen, karbon esaslı malzeme içermeyen numuneler yükleme altında artan hasar (sehim) seviyelerine karşı hassasiyet göstermiş ve üç kez tekrar eden yükleme ve boşaltma döngüleri sonucunda elastik ve plastik bölgelerdeki ortalama oransal direnç değişim değerleri sırasıyla %3,5 ve

%5,8 olarak kaydedilmiştir. Plastik bölgede meydana gelen daha keskin oransal direnç değişimleri Şekil Şekil 5.6-5.10'da görülebilmektedir.

Şekil 5.1-5.5 ile Şekil 5.6-5.10'da verilen grafikler ayrı ayrı incelendiğinde, karbon esaslı malzeme kullanımının yararlı etkileri daha açık bir biçimde görülmektedir. Her ne kadar kiriş numunelerinin elastik bölgedeki tekrarlı yükleme/boşaltma döngüleri sonucundaki oransal direnç değişim değerleri hemen hemen doğrusal değişiklikler gösterse de bu durum plastik deformasyon bölgesinde test edilen kiriş numuneler için geçerli olmamıştır. 5.6-5.10'da yer alan grafiklerden de görülebileceği gibi, numuneler daha yüksek sehim seviyelerine maruz kaldığında, yükleme/boşaltma döngüleri sonucunda her bir tekrara karşı başarılı bir şekilde kendiliğinden algılama davranışı göstermiştir. Buna göre, yüklemenin artışıdan dolayı elektriksel olarak iletken karbon esaslı malzemelerin birbirinden uzaklaşması nedeni ile elektriksel direnç değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Aynı şekilde yüklemenin kaldırılması ile iletken karbon esaslı malzemelerin tekrar birbirine yakın duruma gelmesi nedeni ile elektriksel direnç değerleri düşmüştür. Bir başka deyişle, plastik deformasyon bölgesindeki oransal direnç değişim sonuçları değerlendirildiğinde tersinir bir davranış söz konusudur. Bu sonuç, çalışma kapsamında üretilen numunelerin elektriksel ölçümler bakımından hasarı algılamadaki hassasiyetlerini arttırabilmek için çimento bağlayıcılı sistemlerin elektriksel olarak daha iletken bir hale getirilmesi gerektiğini ve uygulanan yükleme seviyesinin numunede hasar oluşturacak seviyede olması gerektiğini göstermektedir.

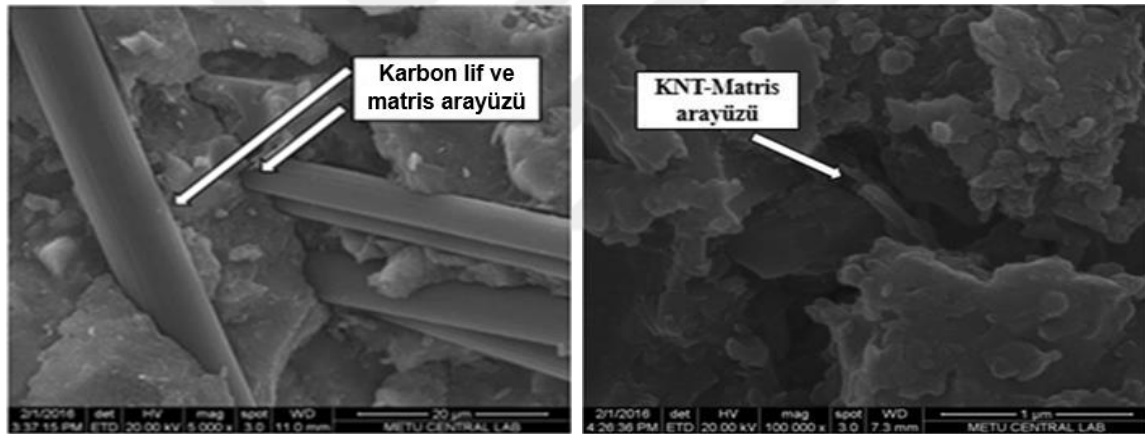
Mevcut çalışma kapsamında kullanılan bütün karbon esaslı malzemeler plastik bölge içerisinde gerek yükleme gerekse yük boşaltmalarının kendiliğinden algılanmasında farklı derecelerde etkinlik göstermişlerdir. Yük boşaltımı sırasında, her ne kadar elektriksel direnç değerlerinde bir azalma olsa da, farklı karbon esaslı malzemeler ile takviyeli numunelerde kalıcı (residual) elektriksel direnç değerlerinin (tersinir olmayan) farklı olduğu görülmüştür. Örneğin, sırasıyla KL, KNT, NGP ve KS malzemeleri ile üretilmiş kiriş numuneler için, plastik bölgede ilk yüklemenin ardından yükün kaldırılması sonucunda oransal direnç değişimlerinde oluşan farklar sırasıyla %63 ($\Delta R/R_0$ değeri 3,80'ten %1,42'ye), %43 ($\Delta R/R_0$ değeri %3,29'dan %1,87'ye), %35 ($\Delta R/R_0$ değeri %3,08'den %2,01'e) ve %5 ($\Delta R/R_0$ değeri %1,86'dan %1,77'ye)'tir. Bu durum plastik deformasyon bölgesinde kiriş numunelere uygulanan ikinci ve üçüncü yükleme/boşaltma döngüleri içinde geçerliliğini korumuştur (Şekil 5.6-5.10). Araştırma sonuçları, KS içeren

kiriş numunelerin elektriksel ağının tekrarlı yükleme/boşaltma döngüleri sonunda oluşması muhtemel tahribatlara karşı diğer karbon esaslı malzemelere kıyasla daha hassas olduklarını göstermektedir. Burada elde edilen tersinir olmayan kalıcı oransal direnç değişim değerleri farklı karbon esaslı malzemeler ile hazırlanmış kiriş numunelerinin göçme şekilleri ve mekanik özellikleri hakkında da bilgi verici nitelikte olabilmektedir. Çimento esaslı kompozitlerde elektriksel özellikler üzerinde çatlak genişliği çatlak sayısından daha önem arz etmektedir [46]. Çimento bağlayıcılı kompozitlerde tekil büyük bir çatlak oluşumu sonrasında elektriksel direnç değerlerinde gözlemlenen artışlar çoklu mikroçatlakların oluşmasından dolayı elektriksel direnç değerlerinde meydana gelen artışlardan daha fazla olmaktadır [46]. İkinci ve üçüncü yük uygulamaları sonrasında oransal direnç değişim değerlerinde meydana gelen ciddi artışlar da çatlak genişliğinin elektriksel direnç sonuçları üzerindeki etkinliğini göstermektedir. Bu sonuçlara dayanarak, karışımlarda KL kullanılmasıyla sehim kapasitesinin diğer karbon esaslı malzemelere kıyasla daha fazla arttığı ve bu durumun sünekliğin artmasıyla bölgesel çatlak sayısını ve kalıcı oransal direnç değişim miktarını düşürdüğü belirtilebilir. Bu sonuçlar literatürde KL kullanımının sadece elektriksel özellikleri değil nihai malzemenin eğilme dayanımı, eğilme tokluğu, çekme dayanımı, süneklik ve kuruma rötresi gibi özelliklerini de iyileştirdiğini ifade eden çalışmalarla da benzerlik göstermektedir [47]. Bütün bunların yanında diğer nano ölçekteki karbon esaslı malzemeler ile kıyaslandığında KL'nin daha ucuz olması ve yoğun ECC matris karışımı içerisine homojen olarak daha kolay bir şekilde dağıtılabilmelerinden ötürü avantajlı oldukları da belirtilebilir [8].

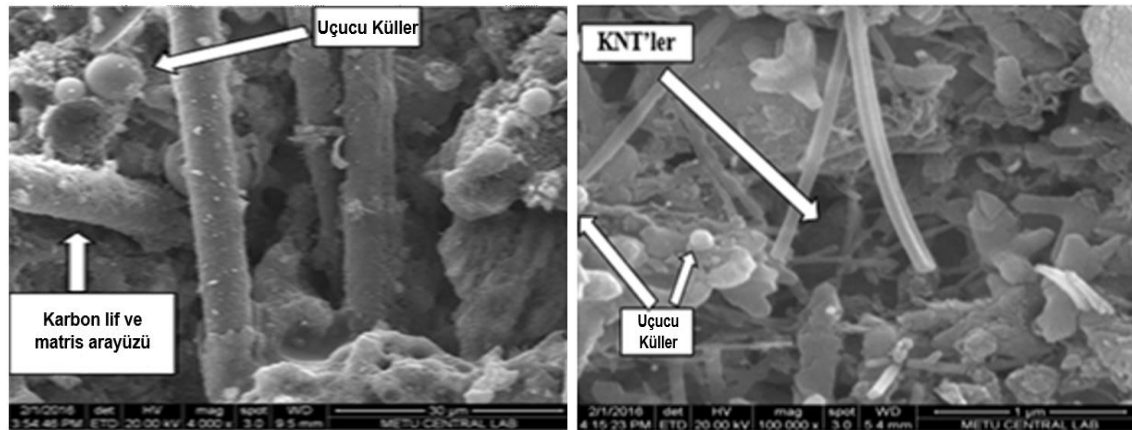
5.3. Farklı Tür Karbon Esaslı Malzeme İçeren Kiriş Numunelerin Arayüz Özellikleri

Tez çalışması kapsamında deneylerde elde edilen numuneler kullanılarak karışımların arayüz bağ özellikleri de araştırılmıştır. Bu amaçla diğer karbon esaslı malzemelere kıyasla elektriksel ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin daha belirgin olması sebebiyle karbon nano tüp ve karbon lif içeren kiriş numunelerden alınan örneklerin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinin ardındaki temel sebep, çimento bağlayıcılı matrisler içerisine belirli oranlarda ilave edilen karbon esaslı iletken malzemelerin mikroyapıda karbon esaslı malzemeler bulundurmayan karışımlara kıyasla ne tür değişimler yapacağının detaylı bir şekilde anlaşılabilmesidir. Bu amaç doğrultusunda, çimento bağlayıcılı kompozit malzeme niteliğindeki numunelerin birden fazla fonksiyonel özelliğe (üstün mikro yapı ve kendiliğinden hasar algılaması) eş zamanlı

olarak sahip olabilme durumunun net bir şekilde ortaya koyulması hedeflenmiştir. Önceki kısımlarda belirtildiği gibi deneysel çalışmalarda karbon lif ve karbon nano tüp malzemeleri için kullanım oranları sırasıyla %1 ve %0,55 olarak belirlenmişti. Yürütülen mikroyapısal analizlerle uçucu kül mineral katkısının bireysel olarak matris ve karbon esaslı filamentler arasındaki arayüz üstünde ne tarzda bir etkiye sahip olduklarının da araştırılması düşünülmüştür. Yukarıdaki kısımlarda fonksiyonel özellikleri (kendiliğinden algılama kabiliyeti) araştırılan kiriş numunelerden arta kalan parçalarla taramalı elektron mikroskobu altında (scanning electron microscope – SEM) alınan görüntüler üzerinde detaylı incelemelerde de bulunulmuştur. SEM görüntülerinin alınması sırasında kullanılan numuneler eğilmede çekme testleri sonrasında kırılan prizmatik numunelerin kırılma bölgesinin orta kısmından elde edilmiştir. Aşağıda verilen Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de karbon lif ve karbon nano tüp içeren numunelerin arayüz özellikleri incelenebilmektedir.



Şekil 5.11. Karbon lif içeren numunenin (solda) ve karbon nano tüp içeren numunenin (sağda) taramalı elektron mikroskobu altında çekilen görüntüleri



Şekil 5.12. Karbon lif ve uçucu küller (solda) ve karbon nano tüp ve uçucu küllerin (sağda) taramalı elektron mikroskobu altında çekilen görüntüleri

Yapılan çalışmalarda imento esaslı sistemlerin tane dağılım özelliklerini iyileştiren uçucu kül SEM fotoğraflarında da görülebileceği üzere daha yoğun bir mikroyapı oluşmasına katkıda bulunmuştur. Farklı karbon esaslı malzemelerle farklı mikro yapı gelişimleri mümkün olsa da geleneksel uygulamalarda kullanılan beton ile yapılan karşılaştırmalarda, geliştirilen kompozitlerin mikro yapı özelliklerinin daha gelişmiş olduğu rahatlıkla söylenebilir. Analizler yorumlanacak olursa, çok fonksiyonlu imento bağlayıcılı malzemelerin tasarımında matris içerisinde yer alan karbon esaslı malzemelerin karışımına homojen olarak dağıtıldığından ve optimum dozajlarda kullanıldıklarından emin olunduğunda mikro yapısal özellikler bakımından matris ile uyum içerisinde çalıştıkları yorumu yapılabilir.



6. SONUÇLAR

Tez çalışmaları kapsamında hem elastik hem de plastik deformasyon bölgelerinde tersinir yüklemeler altında çok fonksiyonlu çimento bağlayıcılı kompozitlerin kendiliğinden algılama kabiliyetleri belirlenmiştir. Bilindiği gibi yapı/altyapılarda yüklemeler genellikle tekrarlı olduklarından kendiliğinden algılama davranışının da tekrarlı yüklemeler varlığında değerlendirilmesi çok önemlidir. Bu bağlamda karbon esaslı malzemeler ile takviyelendirilmiş çimento bağlayıcılı kompozit karışımları tekrarlı bir şekilde yükleme/boşaltmaya maruz bırakılmış ve kendiliğinden algılama kabiliyetinin bu koşullar altında değerlendirilebilmesi için elektriksel direnç sonuçlarındaki oransal değişimler kayıt altına alınmıştır. Yapıların üzerlerine gelen yükler düşük ve yüksek seviyelerde olabildiklerinden bu çalışmada uygulanan tekrarlı yüklerin numunelerin hem elastik hem de plastik bölgelerinde ele alınması kararlaştırılmıştır.

- Çalışmalarda kullanılan karbon esaslı malzemeler ile üretilmiş numunelerin tamamı hem yüklemede hemde yük boşaltmalarında farklı kendiliğinden algılama özelliği göstermişlerdir. Yük boşaltımı sırasında elektriksel direnç değerleri bir miktar azalsada, farklı karbon esaslı malzemeler numunelerde kalıcı (residual) elektriksel direnç değerlerinin (tersinir olmayan) oluşmasına sebebiyet vermiştir. Özellikle plastik deformasyon bölgesinde yüklemenin başlaması ve ilk yüklemenin kaldırılması ile ilgili söz konusu durum daha belirgindir. Sonuçlar değerlendirildiğinde sırasıyla, karbon lif, karbon nanotüp, nano grafen partikülleri ve karbon siyahı ile takviye edilmiş kiriş numunelerde oluşan farklar sırasıyla %63, %43, %35 ve %5'tir. Tez çalışmalarının neticesinde karışımlarda karbon lif kullanılmasıyla sehim kapasitesinin diğer karbon esaslı malzemelere kıyasla daha fazla arttığı bulunmuştur. Bu durum sünekliğin artmasıyla bölgesel çatlak sayısını ve kalıcı oransal direnç değişim miktarını düşürmüştür. Bir diğer avatajlı durum ise diğer nano ölçekteki karbon esaslı malzemeler ile kıyaslandığında karbon liflerin maliyet açısından daha uygun olması ve daha matrise daha homojen dağıtılmasıdır.
- Karbon liflerle hazırlanan numuneleri tekrarlı yükler altında performans açısından takip eden bir diğer numune tipi karbon nanotüplerle takviye edilen kiriş elemanlardır. Sonuçlar özellikle plastik deformasyon bölgesindeki kendiliğinden algılama davranışları için daha açıkça görülmektedir. Kısaca karbon lif ve karbon nano tüp içeren kiriş

elemanların tersinir elektriksel direnç değişimleri nano grafen ve karbon siyahı içeren kiriş elemanlarından daha fazladır.

- Kontrol numuneleri haricinde bütün yükleme/yük boşaltma uygulamalarında farklı tür karbon esaslı malzemelerle üretilmiş kiriş numuneler başarılı bir şekilde plastik deformasyon bölgesinde test edilmiştir. Bir başka deyişle yüklemenin kaldırılmasıyla elektriksel direnç değerlerinde bariz bir biçimde tersinirlik görölmektedir. Bu nedenle hasarı tam olarak tespit etmek için, çimento esaslı kompozitler yüksek derece elektriksel olarak iletken olmalı ve yük seviyesi elektriksel iletken hattını değiştirmelidir.



KAYNAKLAR

1. Chong, K.P. (1998). Health monitoring of civil structures. *Journal Intelligent Material Systems Structures*, 9(11), 892–898.
2. De Backer, H., De Corte, W. and Van Bogaert, P. (2003). A case study on strain gauge measurements on large post-tensioned concrete beams of a railway support structure, *Insight*, 45(12), 822–826.
3. Leng, J., Winter, D., Barnes, R., Mays, G. and Fernando, G. (2006). Structural health monitoring of concrete cylinders using protected fibre optic sensors. *Smart Materials and Structures* 15(2), 302–308.
4. Park, S., Ahmad, S., Yun, C.B. and Roh, Y. (2006). Multiple crack detection of concrete structures using impedance-based structural health monitoring techniques. *Experimental Mechanics* 46(5), 609–618.
5. Deng, Y. and Sun, B. (2005) Researches on intelligent material system and its application to civil engineering. *Architecture Technology* 36 (2), 92–95.
6. Li, W.A. (2005) Method for structural safety monitoring of composite carbon fiber reinforced concrete. *China Safety Science Journal* 15, 109–112.
7. Senturia, S.D. (2001). *Microsystem design*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
8. Al-Dahawi, A., Öztürk, O., Emami, F., Yıldırım, G. ve Sahmaran, M. (2016). Effect of mixing methods on the electrical properties of cementitious composites incorporating different carbon-based materials., *Construction and Building Materials* 104, 160–168.
9. Han, B., Ding, S., and Yu, X. (2015). Intrinsic self-sensing concrete and structures: a review. *Measurement*, 59(January 2015), 110–128.
10. Mao, Q., Zhao, B., Sheng, D. and Li, Z. (1996). Resistance changement of compression sensible cement specimen under different stresses, *Journal of Wuhan University Technology Materials Science Edition* 11, 41–45.
11. Chung, D.D.L. (1998). Self-monitoring structural materials. *Materials Science and Engineering Review* 22(2), 57–78.
12. Hou, T.C. and Lynch, J.P. (2005). *Conductivity-based strain monitoring and damage characterization of fiber reinforced cementitious structural components*. In: Proceedings of SPIE 12th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, 419–429.
13. Ou, J. and Han, B. (2009) Piezoresistive cement-based strain sensors and self-sensing concrete components. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 20(3), 329–336.
14. Sahmaran, M. and Li, V.C. (2009). Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash. *Cement and Concrete Research* 39(11), 1033–1043.

15. Alyousif-Lachemi, M., Yıldırım, G., Aras, G.H. ve Sahmaran, M. (2015). Influence of cyclic frost deterioration on water sorptivity of microcracked cementitious composites. *Journal of Materials Civil Engineering* 28(4), 04015159.
16. Yıldırım, G., Sahmaran, M., Balçıkanlı, M., Özbay, E. ve Lachemi, M. (2015). Influence of cracking and healing on the gas permeability of cementitious composites. *Construction and Building Materials* 85(June 2015), 217–226.
17. Li, V.C. (2002). *Reflections on the research and development of engineered cementitious composites (ECC)*. In: Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC)– Application and Evaluation, Takayama, 1–21.
18. Sahmaran, M., Yıldırım, G. ve Erdem, T.K. (2013). Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites* 35(1), 89–101.
19. Yıldırım, G., Aras, G.H., Banyhussan, Q.S., Sahmaran, M. and Lachemi, M. (2015). Estimating the self-healing capability of cementitious composites through nondestructive electrical-based monitoring. *NDT&E International* 76 (December 2015), 26–37.
20. Lin, V.W.J., Li, M., Lynch, J.P. and Li, V.C. (2011). Mechanical and electrical characterization of self-sensing carbon black ECC, in: Proceedings of SPIE. *The International Society for Optical Engineering*, 1–12.
21. Li, M., Lin, V.W., Lynch, J.P. and Li, V.C. (2013). Carbon black engineered cementitious composites-mechanical and electrical characterization. *ACI Special Publication*, 292, 1–16.
22. Chen, P.W. and Chung, D.D.L. (1993). Carbon fiber reinforced concrete as an electrical contact material for smart structures. *Smart Materials and Structures*, 2(3), 181.
23. Kamila, S. (2013). Introduction, classification and applications of smart materials, an overview. *American Journal of Applied Sciences*, 10(8), 876.
24. Zingoni, A. (2005). Structural health monitoring, damage detection and long-term performance. *Engineering Structures*, 27(12), 1713-1714.
25. Wang, X., Fu, X. and Chung, D. (1999). Strain sensing using carbon fiber. *Journal of Materials Research*, 14(03), 790-802.
26. Fu, X., Ma, E. and Chung, D.D.L. (1997). Self-monitoring in carbon fiber reinforced mortar by reactance measurement. *Cement and Concrete Research*, 27(6), 845-852.
27. Wen, S. and Chung, D. (2005). Strain-sensing characteristics of carbon fiber-reinforced cement. *ACI Materials Journal*, 102(4), 244.
28. Wen, S. and Chung, D. (2006) Model of piezoresistivity in carbon fiber cement. *Cement and Concrete Research*, 36(10), 1879-1885.

29. Wen, S. and Chung, D. (2008). Effect of moisture on piezoresistivity of carbon fiberreinforced cement paste. *ACI Materials Journal*, 105(3), 274.
30. Chung, D.D.L. (2003). Damage in cement-based materials, studied by electrical resistance measurement. *Materials Science and Engineering*, 42(1), 1-40.
31. Chung, D.D.L. (2002). Composites get smart. *Materials Today*, 5(1), 30-35.
32. Baeza, F.J., Galao, O., Zornoza, E. and Garcés, P. (2013). Multifunctional cement composites strain and damage sensors applied on reinforced concrete (RC) structural elements. *Materials*, 6(3), 841-855.
33. Wang, S. and Chung, D.D.L. (2006). Self-sensing of flexural strain and damage in carbon fiber polymer-matrix composite by electrical resistance measurement. *Carbon*, 44(13), 2739-2751.
34. Wang, D., Wang, S., Chung, D.D.L. and Chung, J. (2006). Comparison of the electrical resistance and potential techniques for the self-sensing of damage in carbon fiber polymer-matrix composites. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 17(10), 853-861.
35. Chen, B. and Liu, J. (2008). Damage in carbon fiber-reinforced concrete, monitored by both electrical resistance measurement and acoustic emission analysis. *Construction and Building Materials*, 22(11), 2196-2201.
36. Yiska-Goldfeld, S., Ben-Aarosh, O., Rabinovitch, T. and Quadflieg, T.G. (2016). Integrated Self-Monitoring of Carbon Based Textile Reinforced Concrete Beams under Repeated Loading in the Un-Cracked Region. *Carbon*, 98, 10-56.
37. Li, V.C. and Leung, C.K.Y. (1992). Theory of steady state and multiple cracking of random discontinuous fiber reinforced brittle matrix composites. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 118(11), 2246–2264.
38. Li, V.C. (1993). From micromechanics to structural engineering – the design of cementitious composites for civil engineering applications. *JSCE Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, 10(2), 37-48.
39. Li, V.C. and Kanda, T. (1998). Innovations Forum: Engineered cementitious composites for structural applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(2), 66-69.
40. Şahmaran, M., Li, M. and Li, V.C. (2007). Transport properties of engineered cementitious composites under chloride exposure. *ACI Materials Journal*, 104(6), 604-611.
41. Sahmaran, M. and Li, V.C. (2007). De-icing salt scaling resistance of mechanically loaded engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, 37(7), 1035-1046.
42. Al-Dahawi, A., Haroon-Sarwary, M., Öztürk, O., Yıldırım, G., Akın, A., Şahmaran, M. and Lachemi, M. (2016). Electrical percolation threshold of cementitious

composites possessing selfsensing functionality incorporating different carbon-based materials. *Smart Materials and Structures*, 25 (10), 25-105005.

43. Li, G.Y., Wang, P.M. and Zhao, X. (2007). Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 29(5), 377-382.
44. Whittington, H., McCarter, J. and Forde, M. (1981). The conduction of electricity through concrete. *Magazine of Concrete Research*, 33(114), 48-60.
45. Reza, F., Batson, G. ., Yamamuro, J.A. and Lee, J.S. (2001). Volume electrical resistivity of carbon fiber cement composites. *ACI Materials Journal*, 98(1), 25-35.
46. Yıldırım, G., Aras, G. H., Banyhussan, Q. S., Şahmaran, M. and Lachemi, M. (2015). *Estimating the self-healing capability of cementitious composites through non-destructive electrical-based monitoring* NDT & E Int. 76 26-37.
47. Wen, S. and Chung, D. D. L. (2007). Electrical-resistance-based damage self-sensing in carbon fiber reinforced cement. *Carbon*, 45(4), 710-716.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÖCAL, Oğuzhan
 Uyruğu : TC.
 Doğum tarihi ve yeri : 08/08/1980 Erzincan
 Medeni hali : Evli
 Telefon : +90 533 477 1969
 e-mail : oguzhanocal24@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü	Devam ediyor
Lisans	Ankara Üniversitesi/Hukuk Fakültesi Hukuk	2017-....
Ön Lisans	Anadolu Üniversitesi/Açıköğretim Fakültesi Adalet	2016
Lisans	Orta Doğu Teknik Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/İnşaat Mühendisliği Bölümü	2005

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-.....	Çevre ve Şehircilik Bakanlığı	İnşaat Mühendisi
2011-2013	ALKON Gayrimenkul Yatırım A.Ş.	Şantiye Şefi
2009-2011	OMT Mühendislik	Teknik Ofis Şefi
2006-2009	Güriş İnşaat Mühendislik Ltd. Şti.	Saha Mühendisi
2005-2006	Jandarma İstihkam Tabur Komutanlığı	Şantiye Şefi

Yabancı Dil

İngilizce, Rusça, Arapça

Hobiler

Yüzme, kitap okuma



GAZİ GELECEKTİR..