



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**NANO BOYUTTA MODİFİYE EDİLMİŞ YENİ
NESİL AKILLI ÇİMENTO BAĞLAYICILI
KOMPOZİTLER**

Oğuzhan ÖZTÜRK

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Oğuzhan ÖZTÜRK tarafından hazırlanan “Nano Boyutta Modifiye Edilmiş Yeni Nesil Akıllı Çimento Bağlayıcı Kompozitler” adlı tez çalışması 15/11/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Ülkü Sultan Keskin

Danışman

Prof. Dr. Ülkü Sultan Keskin

Üye

Prof. Dr. Özcan Tan

Üye

Prof. Dr. Mustafa Şahmaran

Üye

Prof. Dr. Mehmet Kamanlı

Üye

Doç. Dr. Burak Uzal

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

İmza



Prof. Dr. Hakan KARABÖRK
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışmasının bir kısmı TÜBİTAK (117M954) ve ÖYP projesi ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Oğuzhan ÖZTÜRK
Tarih: 01.11.2019

ÖZET

DOKTORA TEZİ

NANO BOYUTTA MODİFİYE EDİLMİŞ YENİ NESİL AKILLI ÇİMENTO BAĞLAYICILI KOMPOZİTLER

Oğuzhan ÖZTÜRK

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN

2019, 206 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
Prof. Dr. Özcan TAN
Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN
Prof. Dr. Mehmet KAMANLI
Doç. Dr. Burak UZAL

Bu tez çalışmasında, nano ölçekteki malzemeler tekil ve kombine edilerek tasarlanmış çimento esaslı kompozit (ECC) karışımlarında kullanılmış ve geliştirilen kompozitlere kendiliğinden iyileşme ve kendiliğinden algılama özellikleri kazandırılmıştır. Yeni nesil akıllı çimento bağlayıcılı kompozitlerin geliştirilmesinde nano malzemeler (nano silika [NS] ve karbon nanotüpler [KNT]) homojen ve gerekli performansın elde edilmesinden ödün vermeden en ekonomik şekilde karışımlara ilave edilmiştir. Karşılaştırma yapmak amacıyla nano malzeme içermeyen kontrol karışımları da hazırlanarak diğer karışımlarla eşit sayıda küp, kiriş, silindir numuneler üretilmiştir. Kendiliğinden iyileşme testleri hasarsız ve hasarlı numuneler üzerinde hızlı klor iyonu geçirimsizlik testi, elektriksel direnç testi, donma çözülme testi, rezonans frekansı testi ve ağırlık kaybı testleri ile gerçekleştirilmiştir. Nano ölçekte modifiye edilen çimento esaslı kompozitlerin mekanik özellikleri, basınç ve eğilme testleri ile değerlendirilmiştir. Numunelere ait çatlaklar video mikroskop aracılığıyla takip edilerek her bir karışıma ait çatlak kapanma performansları analiz edilmiştir. Bunun yanında kendiliğinden iyileşme/algılama yeteneğine sahip numunelerin mikro yapılarını irdelemek adına mikro analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde numunelerin SEM/EDX, TGA ve XRD testleri yapılarak her bir karışım ayrı ayrı karakterize edilmiştir. Sonuçlar, her ne kadar sadece KNT kullanımının, ECC karışımlarının hem kendiliğinden algılama hem de kendi çatlaklarını iyileştirmede etkin olduğunu gösterse de, NS ve KNT'nin ikili kullanıldığı durumlarda çatlak kapanma performansı çok daha üst seviyede meydana gelmiştir. Özellikle kendiliğinden iyileşen çatlaklarda C-S-H ve CaCO₃'ün yoğunluğu ve miktarının NS ve KNT malzemelerinin eklenmesi ile arttığı gözlemlenmiştir. Karışımlarda sadece NS kullanımı, tam anlamıyla kendiliğinden iyileşmeye performansı için iki nano malzemenin kombine edilmesine kıyasla yetersiz kalmıştır. Bunun yanında kontrol karışımlarının ve sadece NS içeren karışımların hasarlarını kendiliğinden algılama performansı özellikle düşük yüklenme seviyelerinde yeterli değildir. Kendiliğinden algılama performansı açısından her ne kadar sadece KNT içeren karışımlar en iyi sonucu gösterse de, KNT ve NS'in beraber kullanıldığı karışımların piezo-dirençli davranışları da olumlu sonuçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tasarlanmış çimento esaslı kompozitler (ECC), kendiliğinden iyileşme, kendiliğinden algılama, nano malzemeler.

ABSTRACT

PhD THESIS

NEW GENERATION SMART CEMENTITIOUS COMPOSITES MODIFIED AT NANO SCALE

Oğuzhan ÖZTÜRK

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN

2019, 206 Pages

Jury

**Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
Prof. Dr. Özcan TAN
Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN
Prof. Dr. Mehmet KAMANLI
Assoc. Prof. Dr. Burak UZAL**

In this thesis, nano materials were used singularly and binary in engineered cementitious composites (ECC) and self-healing and self-sensing functionalities were added to developed composites. Nano materials (nano silika [NS] and carbon nano tubes [CNT]) were incorporated into new generation smart cementitious composites with homogeneous and the most economical way without sacrificing the required performance. Control specimens that do not contain nano materials were also produced with the same amount of cubic, beam and cylindrical specimens in order to make comparison. Experiments of thesis include rapid chloride permeability tests, electrical resistivity tests, freeze/thaw tests, resonance frequency tests and loss of weight tests on the preloaded and sound specimens. Mechanical properties of nano modified cementitious composites were undertaken with flexural and compression tests. Self-healing performances of each mixture that belongs to microcracks of specimens were analysed with video microscope tracking. Also, micro analysis were performed in order to investigate the micro structure of specimens having self-healing/sensing capabilities. Each mixture was characterized individually by conducting SEM/EDX, TGA and XRD tests. Although results indicate that CNT utilization was efficient on the self-healing and self-sensing properties, self-healing performance was at much higher level in the combination of NS and CNT. Intensity and amount of C-S-H and CaCO₃ were higher especially in self-healing cracks thanks to the presence of NS and CNT. Compared to binary use of nano materials, only NS usage was inadequate in terms of precise self-healing performance. In addition to that, self-sensing performance of control and only NS bearing specimens were not sufficient especially at the lower level of loadings. Although only CNT bearing specimens showed the best results in terms of self-sensing performance, mixtures incorporating CNT and NS was also resulted in positively.

Keywords: Engineered cementitious composites (ECC), self-healing, self-sensing, nano materials.

ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmamın başladığı andan itibaren değerli bilgilerini, fikirlerini, tecrübelerini ve yardımını esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Ülkü Sultan Keskin'e teşekkürü bir borç bilir, kendisine şükranlarımı ve saygılarımı sunarım.

Doktora tez çalışmalarımın gerçekleştirilmesi sırasında değerli bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim sayın Prof. Dr. Mustafa Şahmaran'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez jürime katılan sayın Prof. Dr. Özcan Tan, sayın Prof. Dr. Mehmet Kamanlı ve Doç. Dr. Burak Uzal'a teşekkür ederim.

Tez çalışmamın bir kısmının Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) 117M954 no'lu proje kapsamında tamamlanması nedeniyle TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım sırasında zamanlarından aldığım, bana karşı gösterdiği anlayış, sabır ve manevi destekten ötürü sevgili eşim Emel Öztürk'e ve biricik kızım Pelin Öztürk'e sonsuz sevgilerimi sunarım. Aynı şekilde hayatım boyunca beni yalnız bırakmayan ve desteklerini esirgemeyen sevgili annem Perihan Öztürk ve babam Dr. Ali Öztürk'e şükranlarımı ve saygılarımı sunarım.

Oğuzhan ÖZTÜRK
KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
1.1.ECC'nin Mikro Mekanik Tabanlı Tasarımı.....	5
1.2.Kendiliğinden İyileşen Çimento Bağlayıcılı Kompozitler	7
1.3.Kendiliğinden Algılayan Çimento Bağlayıcılı Kompozitler	12
1.4.Tezin Kapsamı	15
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	17
2.1.Kendiliğinden İyileşme.....	17
2.1.1.Mikrokapsülasyon.....	18
2.1.2.İçi Boş Lifler (hollow fiber).....	19
2.1.3.Bakteri ile Kendiliğinden İyileşme	19
2.1.4.Taşınma Özellikleri.....	20
2.1.5.Mekanik Özellikler	25
2.2.Kendiliğinden Algılama.....	31
2.2.1.Farklı Tür Karbon Esaslı Malzemelerin Karışım Yöntemleri	37
2.2.2.Karbon Esaslı Malzemelerin Kritik Doygunluk Sınırı ve Matris ile Arasında Arayüz Bağ dayanımı	38
2.2.3.Eğilmede Çekme Yüklemelerinin Elastik ve Plastik Bölgede Kendiliğinden Algılama Davranışları ile Değerlendirilmesi	40
2.2.4.Kendiliğinden Algılama Kabiliyetine Sahip Büyük Ölçekli Çimento Bağlayıcılı Kompozitler.....	42
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	44
3.1.Malzemeler	44
3.1.1.CEM I 42,5 Portland Çimentosu.....	44
3.1.2.F-sınıfı Uçucu kül (UK).....	44
3.1.3.Kuvars Kumu	46
3.1.4.Polivinilalkol (PVA) Lifleri.....	48
3.1.5.Nano ve Mikro Malzemeler	49
3.1.5.1. Karbon NanoTüpler	49
3.1.5.2. Nano Silika	52
3.1.5.3. Karbon Lif.....	53
3.1.5.4.Yüksek Oranda Su Azaltıcı Katkı.....	57

3.2.ECC Karışımlarının Tasarlanması	58
3.2.1.Nano ve Mikro Ölçekteki Malzemelerin Karışımlara Eklenmesi	59
3.2.1.1.Karbon Nano Tüplerin Karışımlara Eklenmesi	60
3.2.1.2.Nano Silislerin Karışımlara Eklenmesi.....	61
3.2.1.3.Karbon Liflerin Karışımlara Eklenmesi	62
3.2.2.Ön Deneysel Çalışmalar	64
3.3.ECC Numunelerinin Üretilmesi.....	66
3.4.Deney Yöntemleri.....	68
3.4.1.Hızlı Klor İyonu Geçirimsizliği (HKİG) Deneyi	69
3.4.2.Elektriksel Direnç (ED) Deneyi.....	73
3.4.2.1.Kendiliğinden İyileşme Deneylerinde ED Deneyi	73
3.4.2.2.Kendiliğinden Algılama Deneylerinde ED Deneyi	74
3.4.3.Donma Çözülme	84
3.4.4.Ağırlık Kaybı ve Elektriksel Direnç Ölçümleri.....	85
3.4.5.Rezonans Frekansı	86
3.4.6.Basınç Dayanımı Deneyi	87
3.4.7.Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi	88
3.4.8.SEM-EDX.....	90
3.4.9.TGA/DTA.....	91
3.4.10.XRD	91
3.4.11.Polarize Mikroskop.....	92

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA..... 94

4.1.Nano Modifiye Edilmiş Çimento Bağlayıcılı Kiriş Numunelerin Çok Fonksiyonlu Özellikleri	94
4.1.2.Deneysel Program.....	96
4.1.2.1.Malzemeler	96
4.1.2.2.Karışım Oranları	97
4.1.2.3.Basınç Dayanımı Testleri.....	99
4.1.2.4.Kendiliğinden İyileşme ve Kendiliğinden Algılama Özelliklerinin Belirlenmesi	100
4.1.3.Deneysel Sonuçlar ve Tartışma	103
4.1.3.1.Ön Deneyler ve Basınç Dayanımı Sonuçları	103
4.1.3.2.Elektriksel Direnç Sonuçlarına Göre Entegre Kendiliğinden İyileşme ve Kendiliğinden Algılama Performansı	108
4.1.3.3.Mikro yapısal Karakterizasyonlar.....	122
4.2.Kendiliğinden İyileşmiş Nano-modifiye ECC Numunelerinin HKİG Testi Sonuçları	127
4.3.Kendiliğinden İyileşen ve Kendiliğinden Algılayan Akıllı Çimento Esaslı Kompozitler	134
4.3.2.Deneysel Program.....	137
4.3.2.1.Malzemeler	137
4.3.2.2.Karışım Oranları ve Karışım Sırası	139
4.3.2.2.Deneyler.....	139
4.3.3.Araştırma Sonuçları	143
4.3.3.1.Geliştirilen Nano Modifiye ECC'lerin Eğilme Yükleri Altındaki Mekanik Özellikleri	143
4.3.3.2.ED Testlerine göre Numunelerin Kendiliğinden İyileşmesi.....	151

4.3.3.3.Çatlakların Kendiliğinden İyileşmesi	154
4.3.3.4.Çatlakların Elektriksel Davranışa Etkisi	162
4.3.3.5.Nano Modifiye Edilmiş ECC Numunelerinin Çok Fonksiyonlu Davranışları	164
4.4.Nano ve Mikro Ölçekte Modifiye Edilmiş ECC Numunelerinin Donma-Çözülme Testi Performansı	189
4.5.ECC Numunelerinin Mikro Yapısal Karakterizasyonu	193
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	202
5.1 Sonuçlar	202
5.2 Öneriler	204
KAYNAKLAR	20207
ÖZGEÇMİŞ	217

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	Disk numunenin en kesit alanı
E_m	Harç matrisin elastik modülü
C	Coulomb
CaCO₃	Kalsiyum karbonat
CH	Sönmüş kireç
C-S-H	Kalsiyum silikat hidrat jeli
D/Ç	Donma-çözülme döngüsü
ECC	Tasarlanmış çimento bağlayıcılı kompozitler
EDX	Enerji ayrımlı X-ışını analizi
HKİG	Hızlı klorür iyonu geçirimsizlik testi
J_b	Tamamlayıcı enerji
J_{tip}	Harç matrisin kırılma enerjisi
K_m	Harç matrisin kırılma tokluğu
L	Disk numunenin kalınlığı
KNT	Karbon nano tüp
KL	Karbon lif
NS	Nano silika
PÇ	Portland çimentosu
PVA	Polivinil alkol lifi
RF	Rezonant frekansı testi
S/BM	Su-bağlayıcı malzeme oranı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TÇA	Toplam çatlak açıklığı
UK	F-sınıfı uçucu kül
XRD	X-ışını kırınım analizi
YSİ	Yapısal sağlık izleme
YOSAK	Yüksek oranda su azaltıcı katkı
δ₀	Maks. çatlak köprüleme gerilmesindeki açıklık
σ₀	Maks. çatlak köprüleme gerilmesi
σ_{fc}	Harç matrisinde ilk çatlak oluşum dayanımı

1. GİRİŞ

Dünya genelinde ülkeler kalkınma çabalarını sürdürülebilir olarak devam ettirmek için çaba göstermektedir. Ülkeler kalkınma planlarını yaparken gelişme ve hızlı büyüme için otoyollar, köprüler, yer altı ulaşım sistemleri, barajlar, liman yapıları, havaalanları inşa etmektedirler. Dolayısıyla inşaat sektörü büyümeyi ve gelişmeyi teşvik ederek ticareti ve dış yatırımı destekleyen bir unsurdur. Beton dünya genelinde ülke ekonomilerinin temel taşlarından birisidir. Betonun ve üretiminde kullanılan ana bileşenlerden çimentonun üretimi sırasında çevreye verdiği zararlara rağmen, küresel olarak betona talep sürekli olarak devam etmektedir. Dolayısıyla, hali hazırda dünyada en geniş çapta kullanılan inşaat malzemesi betondur. Geleneksel betonun farklı amaçlarla kullanılması için yapısal performansını etkileyen özelliklerinden dayanım, tokluk, süneklik, darbe dayanımı ve çevresel etkenlere karşı dayanıklılık gibi özellikleri üzerinde geniş bir çerçevede bilgi birikimi oluşmuştur.

Son yirmi yıldır beton teknolojisi hızlı bir gelişme kaydetmiştir. Betonun karakteristik olarak gevrek (kırılgan) yapısını iyileştirmek için yapılan araştırmalar sonunda, çekme yüklemeleri altında daha sünek davranış gösteren yüksek performanslı çimento bağlayıcılı kompozitler (YPÇBK) geliştirilmiştir. Geleneksel beton, çekme yükleri altında ilk çatlak oluşumunun ardından gevrek bir şekilde kırılmaktadır. Geleneksel lif donatılı betonlarda ise çatlama, şekil değiştirme yumuşaması olarak ifade edilen yük taşıma kapasitesinin sona ermesiyle oluşmaktadır. YPÇBK'lerde ise ilk çatlak oluşumunun ardından, donatısız beton ve geleneksel lif donatılı betonların aksine, matris içerisinde bulunan lifler artan yükü matrise güvenle transfer edebilmektedirler. Yüklemenin artışı ile dar çatlak genişliğine sahip (100 µm mertebesinde) çoklu çatlaklar oluşarak betonun şekil değiştirme kapasitesi önemli ölçüde artmaktadır. Böylece, betonun çekme gerilmesi-şekil değiştirme kapasitesi ilişkisi metal gibi sünek malzemelere benzer şekilde şekil değiştirme sertleşmesi göstermektedir. Bu davranış için malzeme ve geometrik kriterler (lif, matris, matris-lif arayüz özellikleri, lif geometrisi ve lif miktarı) araştırılmıştır (Li ve Leung, 1992). Araştırmaların sonunda sünek davranışın elde edildiği yüksek performanslı lif donatılı betonların özel bir türü olan Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (Engineered Cementitious Composites) geliştirilmiştir (Li, 1998).

Uygun matris parametrelerinin tercih edilerek, lif oranları daha çok %1,5 ile %5 arasında değişen ve farklı dayanımlara sahip sünek çimento esaslı kompozitler üretilmektedir. YPÇBK'in en yüksek aksenal çekme gerilmeleri altındaki şekil değiştirme kapasitesi olarak tanımlanan süneklik, mikro yapısal parametrelere bağlı olarak matrisin tasarlanan tokluk durumu ve liflerin gerilmeyi matrise en uygun şekilde aktarmasıyla ilişkilidir. Normal şartlar altında, belirli lif oranında, matrisin yüksek tokluğu, daha düşük sünekliğin davranışının elde edilmesine neden olmaktadır. Uygulamanın amacına bağlı olarak, dayanım ve süneklik ihtiyaçlarını birlikte karşılayan en uygun çekme gerilmesi-şekil değiştirme ilişkisi farklılık içerebilmektedir. Literatürde, YPÇBK'lere araştırmacılar tarafından farklı isimler de verilmiştir. Tasarlanmış çimento bağlayıcılı kompozitler (Engineered Cementitious Composites, [buradan itibaren literatürdeki bilinen kısaltması ile "ECC" olarak kullanılacaktır]). ECC, YPÇBK'lerin çok özel bir tipi olup hacimsel olarak yaklaşık %2 oranında lif kullanımı ile aksenal çekme gerilmeleri altında %3 ile %5 arasında birim şekil değiştirme deformasyonu gösterebilmektedir. Bu seviye, geleneksel betonun ve lif donatılı beton tiplerinin çekme şekil değiştirme kapasitesinin yaklaşık 300 ile 500 katıdır. ECC, ilk çatlak oluşumunun ardından şekil değiştirme sertleşmesi sergilemektedir. Bu özelliği nedeniyle betondan öte sünek metallere benzer bir davranış sergilemektedir. Öte yandan, ECC hasarlara karşı oldukça yüksek toleranslıdır. ECC malzemesi, ağır eğilme ve çekme yükleri altında dahi sünekliğini korumaktadır. Yük altındaki çatlak genişliği geleneksel lifli betonlarda yüksek mertebelerde iken, ECC için çatlak genişliği 100 µm'dan az olmaktadır. ECC ağır çekme gerilmeleri altında bu davranışı nedeniyle, diğer beton türlerine kıyasla çevresel şartlar altında çok daha düşük geçirimsizliğe sahiptir (Şahmaran ve Li, 2007). Aşağıda ECC malzemesinin genel bileşenleri verilmiştir (Çizelge 1.1.)

Çizelge 1.1. ECC malzemesinin tipik karışım tasarımı

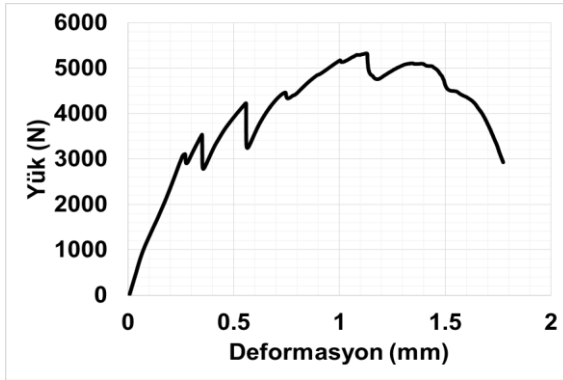
Çimento	Su	Kum	Uçucu Kül	SA*	Lif (%)
1,00	0,58	0,80	1,20	0,013	2,00

*= süperakışkanlaştırıcı; lif hariç tüm bileşenlerin ağırlıkça oranları.

ECC'nin matris tasarımı geleneksel lif donatılı çimento esaslı kompozitlere benzemesine rağmen, ECC'nin mikro çatlaklar oluşturarak gösterdiği şekil değiştirme

sertleşmesi davranışı, bileşenleri olan çimento, kum ve lif arasındaki arayüz özelliklerinin kontrol edilmesi ve mikro-mekanik düzenlemeler yoluyla sağlanmaktadır. Çimento bağlayıcılı matrislerin kırılma biçimleri farklı karışım oranları tercihleri ile kontrol edilmektedir. En-boy oranı gibi lif özellikleri ECC’de kullanım amacıyla isteğe göre uyarlanmıştır. Özellikle lif ve matris arasındaki arayüz özellikleri lif parametreleri ile optimize edilmektedir.

Genellikle yüksek performanslı lif donatılı çimento bağlayıcılı kompozit malzemelerde daha yüksek performans elde edebilmek için fazla hacimde life ihtiyaç duyulmasına karşın, ECC üretiminde toplam hacimce %2 oranında kısa ve süresiz lifler kullanılmaktadır. ECC üretiminde düşük hacimde lif kullanılmasının yanında diğer bileşenlerin kullanımı sayesinde inşaat sektörü uygulamalarında daha fazla esneklik mümkün olabilmektedir. Bugüne kadar yapılan uygulamalarda, ECC malzemesi, kendiliğinden yerleşen dökümlerde, ekstrüzyon uygulamalarda, püskürtme ve geleneksel karıştırıcı ile hazırlanan uygulamalarda ve hazır beton kamyonu içerisindeki uygulamalarda kullanılmıştır (Emmons ve Vaysburd 1995). Tasarımında %2 oranında PVA lif içeren ECC malzemesinin tipik bir eğilme gerilmesi – birim şekil değiştirme eğrisi grafiği Şekil 1.1’de gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 1.1 ECC'nin (a) eğilmede çekme gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi ve (b) çatlak gelişimi

Şekil 1.1a'dan görüleceği üzere ilk çatlak oluşumunun ardından karakteristik olarak şekil değiştirme sertleşmesi görülmektedir. Bu durum çoklu mikro çatlak gelişimi beraber ortaya çıkmaktadır. Numunenin plastik deformasyon sırasında meydana getirdiği çatlakların gelişimi Şekil 1.1b'de görülebilir. Çok aşırı eğilme yüklemelerinde, ECC kiriş numunesi plastik deformasyon göstererek sünek bir metal

gibi deformasyon göstermektedir (Şekil 1.2a). Şekil 1.2b'den görüleceği üzere çatlak genişliği azami yük taşıma kapasitesinde dahi oldukça dar çatlak aralığında kalmıştır. ECC'de meydana gelen dar çatlak genişliği kendiliğinden kontrollü olarak gelişmekte olup çelik donatı varlığından bağımsızdır. Basınç testi altında ise ECC malzemeleri normal veya yüksek dayanımlı betona benzer dayanım davranışları göstermektedir. ECC'nin geleneksel (basınç dayanımı 30-60 MPa arasında ve lifsiz) betonla karşılaştırması Çizelge 1.2'de özetlenmiştir.



(a) Çeşitli lif donatılı çimento esaslı malzemelerin gerilme-şekil değiştirme davranışı



(b) yüksek dereceden sünek ECC malzemesinin eğilme altında görünüşü

Şekil 1.2 ECC'nin genel davranışı

Çizelge 1.2. Geleneksel betonlar ile ECC malzemesinin karşılaştırılması

Özellikler	Geleneksel Beton	ECC
Boyutsal uyum	Zayıf	Geleneksel betona kıyasla uyumlu
Şekil değiştirmesi kapasitesi (%)	%0,01 - 0,03	%~2-5 (yaklaşık 150-500 kat daha sünek)
Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	4-8	8-13 (yaklaşık iki kat daha fazla)
Basınç Dayanımı (MPa)	30-60	35-120 (yaklaşık iki kat daha fazla)
Kısıtlanmış rötre çatlak genişliği	0,8-1 mm	0,03-0,04 mm
Geçirimsizlik (m/s)	$\sim 1,7 \times 10^{-5}$	$\sim 2,5 \times 10^{-10}$ (çok düşük geçirimsizlik)
Dona karşı mukavemet	Hava sürüklenmişse iyi	En az hava sürüklenmiş geleneksel beton kadar dayanıklı
Yorulma mukavemeti	Zayıf	Geleneksel betona oranla onlarca kat daha yüksek
Çatlama/Tabakalanma	Gevrek	Sünek
Korozyona dayanım	Zayıf	Yüksek performans
Darbe dayanımı	Zayıf	Yüksek performans

1.1. ECC'nin Mikro-Mekanik Tabanlı Tasarımı

Tasarlanmış çimento bağlayıcılı kompozitlerin tasarımında ilk olarak yük altında kompozitin çok sayıda mikro çatlak oluşumu ve bununla beraber şekil değiştirme sertleşmesi göstermesi beklenmektedir. Bu durum artan deformasyon seviyelerinin çoklu mikro-çatlakların üzerine yayılmasına olanak sağlamaktadır. ECC'de şekil değiştirme sertleşmesi ve çoklu çatlak gelişiminin temel dayanağı olan kararlı durum çatlak gelişimi ilk olarak Marshall ve Cox (1988) tarafından nitelendirilmiş, ardından Li ve Leung (1992) tarafından lif ile güçlendirilmiş çimento bağlayıcılı kompozitlere uyarlanmıştır. Griffith tipi çatlak oluşumundan (şekil değiştirme yumuşaması sergileyen lifli betonlarda olduğu gibi çatlak devam ederken aynı anda genişliği artmakta) farklı olarak, kararlı durum düz çatlak (çatlak yayılırken çatlak genişliği sabit kalmakta) kavramı sayesinde ECC aşırı çekme yükleri altında dahi şekil değiştirme sertleşmesi davranışı gösterebilmektedir (Şekil 1.3). Çoklu kararlı durum çatlak oluşumu, matris kırılma tokluğu ile birlikte çatlak köprüleme dayanımı-çatlak genişliği ilişkisi ile belirlenmektedir. Bu durumun elde edilebilmesi için aşağıda sunulan denklemin sağlanması gerekmektedir.



(a) Lokalize olmuş çatlak



(b) Çoklu meydana gelmiş çatlak

Şekil 1.3 Kararlı durum düz çatlak ve Griffith tipi çatlak oluşumu

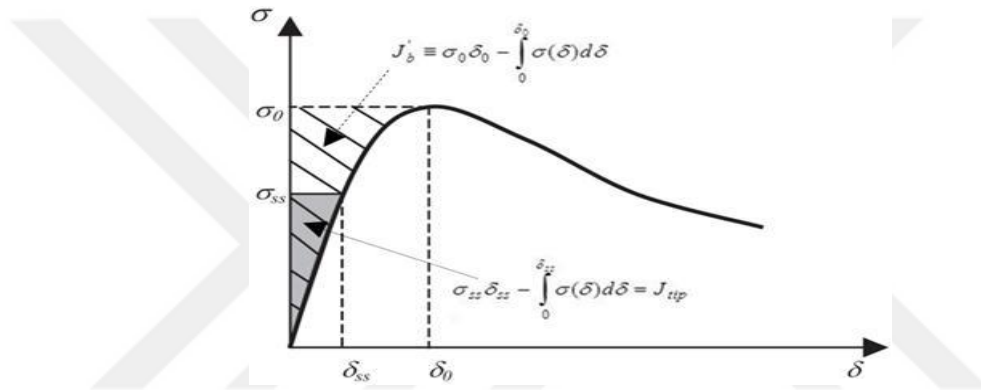
$$J'_b = \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta \geq J_{tip} \approx \frac{K_m^2}{E_m} \quad (\text{Li ve Leung, 1992}) \quad (1.1)$$

Bu denklemde J'_b tamamlayıcı enerji, σ_0 ve δ_0 sırasıyla maksimum çatlak köprüleme gerilmesi ve bu gerilmeye meydana gelen çatlak açıklığı, J_{tip} harcin kırılma enerjisi, K_m matrisin kırılma tokluğu ve E_m ise harç matrisin elastik modülüdür. Kırılma enerji kriterlerinin yanında, aşağıdaki eşitlikte verilen dayanım koşullarının da sağlanması gerekmektedir.

$$\sigma_0 > \sigma_{fc} \quad (\text{Li ve Leung, 1992}) \quad (1.2)$$

Bu denklemde σ_0 ; maksimum çatlak köprüleme gerilmesi, σ_{fc} ; harçta ilk çatlakın meydana geldiği andaki dayanımdır. Çoklu çatlakların meydana gelebilmesi için dayanım koşullarının her bir çatlak düzleminde oluşması gerekmektedir. Yukarıda detayları verilen enerji ve dayanım kriterlerinin her ikisini de ECC karışımı sağladığında kararlı durum düz çatlak oluşumu ve şekil değiştirme sertleşmesi mümkün olabilmektedir. Fakat kararlı durumda çok sayıda düz çatlak oluşumunun yanında,

matriste meydana gelecek çatlak genişliklerinin sınır değeri belirli bir limitte olmaktadır (genellikle 100 μm). Bu durum yukarıdaki ilk denklemde verilen çatlak köprüleme dayanımı-çatlak genişliği ilişkisinin uygun hale getirilmesi ile mümkün olmaktadır. Şekil 1.4'te gösterildiği gibi ECC'nin çok sayıda çatlak oluşumu sırasında göstereceği maksimum kararlı durum çatlak genişliği δ_0 , bu çatlak genişliğine karşılık gelecek maksimum çatlak köprüleme dayanımının σ_0 olduğunu farz edelim. Çatlak açıklığı δ_0 değerini geçince, çatlak köprüleme dayanımı düşmeye başlayacağından bu durumda çatlak bölgesel hale geldiğinden çoklu çatlak oluşumu mümkün olmayacaktır. Maksimum kararlı durum çatlak açıklığının δ_0 'ı, belirli bir limitin altında (100 μm mertebesinde) çok sayıda çatlama davranışı sergilemektedir.



Şekil 1.4 Şekil değiştirme sertleşmesi gösteren kompozit için tipik çatlak köprüleme gerilmesi-çatlak açıklığı eğrisi: Taralı alan tamamlayıcı enerjiyi (J'_e); gölgeli alan ise çatlak ucu tokluğunu (J_{tip}) ifade etmektedir (Wang ve Li, 2004)

Sözü edilen mikro-mekanik modeller aracılığıyla tasarlanan ECC malzemesi yüksek derecede çekme yükleri altında çok sayıda dar açıklıklı çatlak (mikro ölçek mertebesinde) meydana getirerek şekil değiştirme sertleşmesi sağlamaktadır. Kısaca, mikro-mekanik esaslı malzeme geliştirme yöntemlerinin uygulanması ile yapısal malzeme mühendisleri yüksek birim şekil değiştirme kabiliyeti ve yüksek performanslı dayanıklılık gibi gerekli yapısal koşulları sağlayabilmektedirler.

1.2. Kendiliğinden İyileşen Çimento Bağlayıcılı Kompozitler

Beton ile yapılan çeşitli yapı/altyapıların zamanla farklı nedenler ile bozulmasına genel olarak tüm dünya genelinde rastlanılmaktadır. Altyapılarda meydana gelen zamanla bozulma pek çok ülkenin bakım onarım işlerine çok fazla kaynak ayırmasına neden olmaktadır. Öyle ki bazı durumlarda bakım/onarım işleri yeni inşaat

faaliyetlerine harcanan maliyetin önüne geçmektedir. Örnek vermek gerekirse, bakım, onarım ve bozulmakta olan yapıların tekrar işlevsel haline gelmesi için ayrılan bütçe sadece ABD’de yıllık 18-21 milyar dolar civarında olduğu düşünülmektedir (Vision 2020, 2006). Önümüzdeki beş yıl içerisinde ise bakım/onarım faaliyetlerine ayrılan bütçenin ABD için 2.2 trilyon dolar, Asya altyapısı için ise 2 trilyon dolar mertebesine ulaşması düşünülmektedir. Bunların yanında, onarım uygulamalarının uzun ömürlü olmadığını belirtmekte fayda vardır. Örneğin geleneksel tamir harçları ile yapılan onarım faaliyetlerinin yarısına yakını onarım sahasında işe yaramaz hale geldiği ve yeniden bakım gerektirdiği bilinmektedir (Mather ve Warner, 2003). Söz konu yapı/altyapılarda meydana gelen bozulmalar aynı zamanda mevcut devam eden işleyişin bozularak sosyal ve çevresel olarak da sorunlar getirmektedir. Onarım/bakım faaliyetlerinin ayrıca sadece doğrudan ekonomik etkisinin yanında, kamu ve özel sektördeki iş akışını bozarak ikincil maliyetlere de neden olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, yapılarda oluşan hasarın kontrolünün sürdürülebilir olarak sağlanabilmesi için uygulanabilecek çeşitli bakım/onarım yöntemleri üzerindeki ilgi giderek artmaktadır. Ancak, kontrol ve bakım/onarımın devamlı olarak yapılması sırasında ihtiyaç duyulan fazla iş gücü ve ayrılması gereken kaynak nedeniyle özellikle büyük ölçekli altyapılarda zor durumlarla karşılaşılmaktadır. Ayrıca, yapıların farklı bölgelerinde meydana gelen hasara ulaşılabilmek her zaman elverişli olmamaktadır. Örneğin, yol yapıları ve tüneller gibi sürekli hizmet halinde olan altyapılarda bakım işlemi çok zor hatta bazı durumlarda imkansız olmaktadır. Bahsedilen koşullar göz önüne alındığında, yapılarda meydana gelen ve yapısal performansı önemli ölçüde etkileyen hasarların fazladan iş gücü ve kaynak gereksinimi yerine daha pratik yollarla onarılması gerekmektedir. Bu noktada beton yapıların ilave bir müdahaleye gerek duymadan kendi kendini onarabilmesi (kendiliğinden iyileşmesi) ilgi çekici bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır.

Son yirmi yıldır inşaat mühendisliği alanında araştırma yapan pek çok araştırmacı için çimentolu sistemlerdeki kendiliğinden iyileşme kavramı giderek daha fazla bilgi birikiminin bulunduğu bir konu olmuştur. Kendiliğinden iyileşmenin izleri altyapılar ile ilgili her ne kadar çok daha önce gözlemlenmiş olsa da (Lauer ve Slate, 1956) konuyla ilgili çalışmalar özellikle son yirmi yıl içerisinde hız kazanmıştır (Li ve Herbert, 2012). Yapıların servis ömrü üzerindeki olumlu katkıları nedeniyle, kendiliğinden iyileşmenin meydana gelmesi için son zamanlarda çeşitli araştırmacılar tarafından bazı yeni yöntemler geliştirilmiştir (Li ve Herbert, 2012; Van Tittelboom ve

De Belie, 2013; Lv ve Chen, 2014; Wu ve diğeri, 2012). Beton gibi çimento esaslı malzemelerde uygulanan çeşitli kendiliğinden iyileşme yöntemleri olarak; içi boş liflerin karışımlarda kullanılması, kimyasal içerikli kapsüllerin kullanımı, bakteri esaslı biyolojik olarak kendiliğinden iyileşme, genişleten malzemeler ve mineral katkıları, şekil hafızalı malzemeler ve kontrollü mikro çatlak gelişimiyle meydana gelen otojen kendiliğinden iyileşme sayılabilir. Yukarıda sözü edilen çeşitli kendiliğinden iyileşme yöntemleri oldukça yeni yöntemler olup hangi yöntemin üstün olduğuna karar vermek oldukça güçtür. Ancak, Van Tittelboom ve De Belie (2012)'ye göre, gelecekteki kendiliğinden iyileşme ile ilgili yapılacak olan çalışmalar, dar çatlak açıklığı, kimyasal kompozisyon ve çatlak oluşum zamanı gibi sebeplere bağlı olan otojen kendiliğinden iyileşmeden ziyade kapsül ve/veya içi boş liflerin kullanımı üzerine yoğunlaşacaktır. Diğer yandan, halihazırdaki duruma bakıldığında, dar açıklıklı çoklu mikro çatlakların varlığında meydana gelen otojen kendiliğinden iyileşmenin diğer yöntemlere kıyasla daha kararlı olduğu (Li ve Herbert, 2012) belirtilmektedir. Ayrıca, daha önce bahsedildiği üzere büyük ölçekli altyapılarda yapısal kısıtlamalar sebebiyle erişilemeyen bölgelerde, otojen kendiliğinden iyileşme mekanizması kendi kendine onarımı kolaylaştırması bakımından öne çıkmaktadır.

Beton gibi çimento esaslı kompozitlerde gözlemlenen otojen kendiliğinden iyileşme kabiliyetinin fiziksel, kimyasal ve mekanik esaslı olmak üzere üç ana nedeni bulunmaktadır (Reinhardt ve diğeri, 2013). Bir çatlağın fiziksel olarak iyileşmesi için hali hazırda var olan hidrate olmuş çimento hamurunun bileşenleri arasına fazladan su alarak "şişmesi" gerekmektedir. Her ne kadar şişme nedeniyle meydana gelen iyileşmede etki sınırlı olsa da, çatlak içerisinden geçirimsizlik özelliklerinde %10 mertebesinde bir iyileşme mümkün olabilmektedir. Çatlakların kapanması ile meydana gelen kimyasal olaylara, mekanizmalara bakıldığında daha çok iki farklı olgunun var olduğu görülmektedir. Bunlardan ilki devam eden ilave hidrasyon reaksiyonları iken diğeri kalsiyum karbonat oluşumudur. İlave hidrasyonların oluşum mekanizması iyi derece bilinen bir konu olmakla birlikte, daha çok bu oluşum hidrate olmamış çimento esaslı malzemelerin suyla reaksiyonu sonucu meydana gelmektedir. Her ne kadar devam eden ilave hidrasyon reaksiyonları ve şişme nedeniyle çok dar çatlak açıklıklarının kapanması mümkün olsa da (Reinhardt ve diğeri, 2013), belirli açıklıktaki çatlağın genişliğinin tamamen kapanması için hidrasyonların devam etmesi tek başına yeterli olmamaktadır. Karşılıklı bulunan çatlak yüzeyleri arasındaki mesafede

beyaz renkli olarak görülebilen kalsiyum karbonatlar (Şekil 1.5), hidrasyon ürünlerinden sızan Ca^{2+} iyonlarının, su ve karbondioksit varlığında meydana gelen reaksiyon sonucu ortaya çıkan bikarbonat ve/veya karbonat içerikleri ile reaksiyon sonucu oluşmaktadırlar.



Şekil 1.5. Karşılıklı çatlak yüzeyleri arasında yer alan kalsiyum karbonat ürünleri

Hidrasyon ürünlerinden biri olan kalsiyum hidroksitin (CH) karbondioksit (CO_2) varlığında doğrudan karbonatlaşma oluşturması da bir diğer kalsiyum karbonat oluşumuna verilebilecek örnektir. Kalsiyum karbonatın oluşum derecesi ortamdaki sıcaklık, reaksiyon bileşenlerinin oranları, boşluk çözeltisinin pH miktarı ve bu parametreleri etkileyen diğer faktörlere bağlıdır (Edwardsen, 1999). Her ne kadar daha önceki çalışmalar kendiliğinden iyileşmenin karışımdaki devam eden ilave hidrasyonlar ile meydana gelebileceğini belirtmiş olsa da (Neville, 1995), bu durumun daha çok erken yaştaki betonlar için geçerli olduğu ve daha ileri yaşlarda karbonat oluşumunun çatlakların kapanmasında daha etkin olduğu gözlemlenmiştir (Neville, 2002). Yukarıda sözü edilen iki kendiliğinden iyileşme mekanizması haricinde de çatlaklar kapanabilmektedir. Ancak, bu mekanizmaların daha çok daha düşük derecelerde gerçekleştiği unutulmamalıdır. Bunlardan birisi çatlakların içerisinde kalan karışıma ait parçacıkların çatlak yolunu tıkaması, bir diğeri ise su içerisinde var olan bazı katı taneciklerin çökelerek çatlak bölgesinde yer almasıdır. Çatlakların kapanması konusunda her ne kadar bahsedilen ilk iki mekanizma oldukça etkili olsa da, taşınma özelliklerindeki iyileşmeler daha çok kalsiyum karbonat oluşumuyla ilintili olurken, mekanik özelliklerde kaydedilen iyileşmeler ise ilave olarak meydana gelen hidrasyon

reaksiyonlarıyla ilgilidir. Daha iyi bir otojen kendiliğinden iyileşme performansı için gerekli olan parametreler içerisinde, çatlakların tıkanması için çimento esaslı karışım sayesinde kendiliğinden üretilecek nihai iyileşme ürün miktarının daha az olması için, dar çatlak genişlikleri oldukça önemlidir. Daha geniş açıklıklardaki çatlaklarda üretilecek kendiliğinden iyileşme ürünleri için gerekli alanın daha fazla olması ve iyileşme ürünlerinin oluşması için gerekli içeriğin çatlak içerisine daha kolay girebilmesi nedeniyle kendiliğinden iyileşme hızının da daha yüksek olması beklenebilir (Gagne ve Argouges, 2012). Ancak, çatlak genişliklerinin fazla olması tam anlamıyla (%100) bir iyileşme için yüksek miktarlarda kendiliğinden iyileşme ürününün gerekliliği anlamına gelmektedir. Geniş açıklıklı çatlakların varlığında kendiliğinden iyileşme mekanizması her ne kadar hızlı oluşsa da, tüm açıklığın iyileşme ürünleri ile dolmadığı durumlarda normal haldeki dayanıklılık ve mekanik performansın elde edilmesi mümkün olmamaktadır.

Daha önce bahsedildiği üzere, ECC kompozitlerinin çekme yükü altında çok sayıda mikro çatlak oluşumu ve buna bağlı olarak şekil değiştirme sertleşmesi göstermesi için mikro-mekanik esaslı tasarım ölçütleri kullanılmaktadır. Özet olarak, ECC malzemesinin aşırı yükleme koşulları altında mikro çatlaklı hasar sergilemesi daha iyi mekanik ve dayanıklılık özelliklerine ilaveten kendiliğinden iyileşme gibi son derece yenilikçi yetenekleri de beraberinde getirmektedir. Bir sonraki bölümdeki literatür araştırmalarında da görüleceği üzere, ECC malzemesinin çok sayıda mikro çatlaklar oluşturarak yardımcı olduğu otojen olarak kendiliğinden iyileşme kabiliyeti literatürde pek çok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Bu tezin temel amaçlarından bir tanesi literatürde bulunan bu çalışmaları tekrar etmekten ziyade, çatlaklardaki iyileşme ürünlerinin kalitesinin ve hızının daha üst düzey geliştirilerek hiç hasar görmemiş çatlaksız beton gibi performans gösteren çimento esaslı kompozitleri geliştirmektir. Böylece canlılarda bulunan kendiliğinden iyileşme kabiliyetine benzer (biyo-ilham) iyileşme kabiliyeti gösteren nano ölçekte modifiye edilen ECC karışımlarının mümkün olabileceği hipotez olarak ele alınmıştır. Tez kapsamında araştırılan bir diğer konu ise nano boyutta modifiye edilmiş ECC karışımlarının farklı yaşlardaki kendiliğinden iyileşme kabiliyetidir. Kendiliğinden iyileşmenin farklı yaşlardaki kararlılığının incelenmesi, yapılarda meydana gelecek çatlakların zamansal olarak önceden bilinmemesi problemini bir anlamda ortadan kaldırma potansiyeli nedeniyle oldukça önemli olacaktır.

Tez kapsamında ECC karışımlarının tamamında yüksek hacimde uçucu kül kullanılmıştır. Böylelikle endüstriyel atıklar değerlendirilerek çimento esaslı kompozitlerin karışım reçetelerinde çevresel ve ekonomik olarak anlamlı bir fayda sunulmuştur. Karışımlarda nano malzeme olarak karbon nano tüpler ve nano silika kullanılmıştır. Mikro ölçekte ise, karbon lifler kullanılmıştır. Tez kapsamındaki ön araştırmalarda öncelikli olarak nano malzeme-matris uyumu sağlanmıştır. Çatlaklarda meydana gelen iyileşme ürünleri mikro yapısal olarak ele alınmış ve nano malzemelerin etkisiyle kararlı/iyi/yoğun onarılmış çatlaklar elde edilmiştir. Tez kapsamında kendiliğinden iyileşme ürünlerinin kalitesi mekanik, dayanıklılık ve mikro yapısal analizler ile değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmaları nano malzeme içeren ECC karışımlarının, kendiliğinden iyileşme performansı açısından sadece nicelik olarak değil aynı zamanda nitelik açısından da üstün bir performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Böylelikle nano malzemelerle takviye edilen ECC'lerin kendiliğinden iyileşme performansı ve temel mühendislik özellikleri tez çalışmasının neticesinde somut bir biçimde ortaya konmuştur.

1.3. Kendiliğinden Algılayan Çimento Bağlayıcı Kompozitler

Yapılar, üzerlerinde meydana gelen gerilmeler, şekil değiştirmeler ve çevresel etkenler gibi nedenlerle devamlı olarak deformasyon veya hasara maruz kalmaktadır. Yapılarda meydana gelebilecek söz konusu deformasyonların derecelerinin veya hasarların seviyesinin mümkün mertebe erken sürede tespit edilmesi oldukça kritik öneme sahiptir. Bu amaçla yapılarda yapısal sağlık durumunu değerlendirmek için bir takım yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında birim şekil değiştirme ölçer, fiber optik sensör, piezoelektrik seramik ve akustik sensör gibi yöntemler yapıların hasar durumlarını belirlemede kullanılmaktadır. Fakat, sensör esaslı yapısal/malzeme sağlık kontrolü yöntemlerindeki en önemli engellerden biri, büyük ölçekli yapı sistemlerinde karşılaşılan sorunlardır. Yapısal sistemlere yerleştirilebilecek güvenilir ölçümlere dayalı, kolay uygulanabilir, düşük maliyetli ve ağır çevresel şartlara dayanıklı sensörlerin mevcut durumda yapı sektöründe eksikliği görülmektedir. Bunun yanında halihazırda uygulanan sistemler, yapılar ve malzemeler için pek çok hayati özelliği hassas olarak ölçmekten uzaktır. Ayrıca, bu tip sensörlerin düşük dayanıklılık, fazla

maliyet, kısa servis ömrü, betonarme yapılarla uyum sorunu vb. olumsuz tarafları bulunmaktadır. Bu tip sensörler sadece yapılara gömüldükleri bölgelerden ölçüm almakta ve tüm yapı sistemini taramada yetersiz kalmaktadır. Bunun yanında betonarme elemanlarla uyum sorunları nedeniyle söz konusu sensörler yerleştirildikleri bölgelerde kısmi ölçüde mekanik kayıplar meydana getirmektedir. Bu duruma göre mevcut yapısal sağlık izleme sistemlerine kıyasla sürekli ve doğru bir şekilde yapıların izlenmesi için tüm yapıyla bütünleşmiş, güvenilir ve daha az maliyetli bir sensör şebekesine ihtiyaç bulunmaktadır. İnşaat yapılarının mevcut durumlarını kontrol edilmesi ve yapısal sağlık kontrollerini gerçekleştirmek için birkaç yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden bazıları aşağıdaki teknolojilerden istifade etmektedir:

Titreşim esaslı hasar belirleme yöntemleri: Bazı dinamik test yöntemleri ve titreşim esaslı hasar tespit teknikleri yapıların sağlık durumlarını izlemede halihazırda kullanılmaktadır. Hasarsız yöntemlerle belirleme tekniği (Non-destructive evaluation, NDE) yapının ölçüm yapıldığı andaki durumunu titreşim karakteristikleri üzerinden hesaplamaktadır. Hasarsız bir şekilde yapının sağlık kontrolü aşağıdaki parametrelerle gerçekleştirilmektedir.

- Modal parametrelerin elde edilmesi için dinamik deneyler yapılmaktadır (doğal frekanslar, şekil tipleri, sönümlenme özellikleri) ya da diğer özelliklerin tespiti gerçekleştirilmektedir (yapının geçmişi, yapısal titreşimleri).
- Yapıda hasarı tespit etmek ve hasarın olduğu yer ile hasarın derecesini ilişkilendirmek için hasar tespit algoritması meydana getirilmektedir.

Kablosuz sensörler ve ağlar: Kablosuz algılayıcı elemanlar, kendi bilgi işlem yetenekleri ile hasar izleme uygulamalarında yer almaktadırlar.

Piezo-elektrik empedans transformatörleri: Elektromekanik empedans yöntemi (EMI, Electro-mechanical Impedance) ile kurşun zirkonat titanat (PZT, Lead Zirconate Titanate) empedans transformatörlerinin kullanılarak farklı mühendislik yapılarının yapısal sağlık izlemeleri (YSİ) yapılabilmektedir. Bu yöntemde, PZT transformatörleri yan yana aktüatörler ve sensörler olarak yer almaktadır. Ultrasonik titreşim aracılığıyla genel olarak yapının karakteristik durumunu belirlenmekte ve yapı hakkında bilgi sahibi olunmaktadır. Maliyet olarak görece daha uygun mertebelerde olması ve hasarın daha

hassas tespit edilebilmesi, bu tekniğinin son yıllarda daha geniş bir biçimde ele alınmasına neden olmuştur.

Manvetoelastik gerilme sensörü: Bilindiği üzere ferromanyetik malzemelerin manyetik yetenekleri gerilme seviyesinin değişmesi ile farklılaşmaktadır. Bir mühendislik uygulaması olarak manyetik-elastik gerilme sensörü inşaat altyapılarında oluşan gerilmeleri takip etmek için kullanılmaktadır.

Fiber optik sensörler: Fiber optiklerin ortaya çıkması, bilim insanlarının ışığı bir yerden başka bir yere yönlendirerek transfer etmesi, kırması ve yayması amaçlı kullanılmasına kadar eskiye gitmektedir (19.yy). Günümüzde optik fiberler, medikal ve algılama uygulamaları kadar iletişim uygulamalarında da geniş bir biçimde yer almaktadır. Mühendislik uygulamalarında optik fiberlerin geometrik özelliklerinden dolayı, şekil değiştirmeye karşı algılama özelliğinin yapısal sağlık izleme uygulamalarına uyumlu olduğu bilinmektedir. Ancak, optik fiberlerin büyük yapısal uygulamalarda kullanımları kısıtlı kalmıştır. Çünkü yerleştirme sırasında optik fiberler çok kolay hasar almaktadır. Ayrıca inşaat sırasında ya da servis ömrü süresince büyük yapısal eleman ve malzemelerle uyumsuzluk göstermektedir.

Çimento bağlayıcılı kompozitlerin yapısal ve performans özellikleri ile beraber yukarıda bahsedilen fonksiyonel özellikleri (yapısal sağlık izleme) aynı anda sergilemesi halinde “çok fonksiyonlu malzemeler” olarak tanımlanmaktadır. Genel olarak, bünyesinde herhangi bir sensör yer almadan yapısal malzemelerin doğrudan sensör amaçlı kullanılması durumu da “kendiliğinden algılama” olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla, farklı sistemlere gerek kalmadan kendiliğinden algılama özelliği sayesinde yapının yapısal/malzeme sağlık izlemesi rahatlıkla gerçekleştirilebilmektedir. Kendiliğinden algılama (piezo-dirençlilik), elektriksel olarak iletken karbon esaslı malzemelerle takviye edilmiş çimento esaslı malzemelerin gerilme ve şekil değiştirme değişikliklerinin algılanması işlemidir (Chung, 2002). Çimento esaslı kompozitlerde deformasyon ve gerilme meydana geldiğinde, karbon tanecikleri ve matris arasındaki iletkenlik değişmektedir. Bu durum malzemelerin elektriksel direnç özelliklerini etkilemektedir. Şekil değiştirme, gerilme, çatlak ve hasar gibi yapıya özgü durumlar elektriksel direnç hesaplamaları tekniği ile tespit edilebilmektedir. Bu teknik yapıların içerisinde sadece belirli bölgelere monte edilen, maliyeti yüksek, az dayanıklı

ve servis ömrü kısa yukarıda sayılan sensör tekniklerine tamamen zıttır. Bu teknik ile yapılacak bir uygulamada nihai maliyet düşürülerek durabilite arttırılabilir ve büyük fonksiyonel hacimlerle tasarım daha kolaylaştırılabilir.

Yapısal sistemlere kendiliğinden algılama yeteneğini sağlamak için çimento bağlayıcılı kompozitlerin içerisine üretim esnasında katkı olarak ilave edilen yöntemler daha az maliyetlidirler. Bu tür çok fonksiyonlu çimento bağlayıcılı kompozitlerin tasarlanmasında son yıllarda karbon esaslı tanecikler, lifler, filamentler vb. yaygın olarak yer almaktadır. Bu malzemelerden karbon nanotüpler (KNT) ve karbon nano lifler (KNL) elektriksel, manyetik, mekanik vb. açılardan yüksek mühendislik özelliklerine sahip olup polimer, metalik ve seramik matrisli kompozitlerin üretiminde nano donatı şeklinde kullanılmaktadırlar. Karbon esaslı nano malzemelerin piezo-direnç özellikleri ile üzerlerine uygulanan gerilmeye (veya birim şekil değiştirmeye) göre elektriksel dirençlerinin değişmesinden dolayı tutarlı olarak kendiliğinden algılama kabiliyetine sahip sensör uygulamalarında kullanılabilirler (Chung, 2002). Son zamanlarda bu tür malzemeler daha çok polimer, seramik ve metal karışımların içerisine dahil edilerek yeni kompozitler tasarlanmıştır. Ancak, söz konusu karbon esaslı malzemelerin çimento bağlayıcılı matrislerle birlikte kullanılması polimer, metalik ve seramik esaslı karışımlara kıyasla oranla oldukça sınırlı kalmıştır. Daha önceleri yapılan çalışmalarda, karbon esaslı nano malzemelerin gerilme ve/veya şekil değiştirmeye maruz kaldığı durumlarda elektriksel özelliklerinin uygulanan gerilme ile değişmekte olduğu anlaşılmıştır (Dharap ve diğerleri, 2004; Yu ve Kwon, 2009). Söz konusu çalışmaların benzerleri ayrıntılı olarak 2. Bölüm (Kaynak Araştırması) verilmiş olup karbon esaslı malzeme içeren çimento esaslı kompozitlerin gerilme/şekil değiştirme sensörü olarak kullanılması umut vadetmektedir.

1.4. Tezin Kapsamı

Tezin 2. Bölümünde literatürde çimento bağlayıcılı kompozitlerin kendiliğinden iyileşme davranışı üzerinde farklı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen çalışmalar gruplandırılarak detaylandırılmaktadır. Ayrıca, yine aynı bölümde çeşitli çimento esaslı malzemelerin karbon esaslı malzemelerle takviye edilmesiyle yapısal sağlık izleme amaçlı kullanılmasına yönelik çeşitli kaynaklarda verilmiştir. Tezin 3. Bölümündeki “Materyal ve Yöntem” kısmında tez çalışması sırasında kullanılan alet, ekipman ve

malzemeler ile çok fonksiyonlu ECC malzemesinin tasarımındaki üretim aşamaları aktarılmış ve takip edilen yöntemler sunulmuştur. 4. Bölüm’de ise, (Araştırma Sonuçları ve Tartışma) tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilen deneysel sonuçlar ve bu sonuçların detaylı bir şekilde değerlendirmeleri verilmiştir. Tez çalışmasında gerçekleştirilen bütün çalışmaların sonuçları ise 5. Bölüm’de sunulmuştur.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bölüm 1’de kısaca değinildiği gibi betonda gözlemlenen otojen kendiliğinden iyileşme davranışı daha çok devam eden hidrasyon reaksiyonları ve kalsiyum karbonat oluşumu ile ilgilidir. Literatüre bakıldığında söz konusu iki mekanizmanın meydana getirdiği kendiliğinden iyileşme ürünlerinin (kalsiyum silikat hidrat [C-S-H] jelleri ve kalsiyum karbonat [CaCO₃]) betonun mekanik ve taşıma özelliklerine katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Literatürde ECC malzemesinde gözlemlenen otojen iyileşme davranışının mekanik ve taşıma özellikleri üzerindeki etkisi çeşitli araştırmalarla doğrulanmıştır. Bununla birlikte yine bir önceki bölümde değinildiği üzere çimento esaslı malzemelerin gerilme ve şekil değiştirme davranışlarının kendiliğinden algılanması (piezo-dirençlilik) ile ilgili olarak literatürdeki çeşitli araştırmalar özet halinde paylaşılmıştır.

2.1. Kendiliğinden İyileşme

Yapısal malzemelerin zaman içerisinde bozulmaya uğraması günümüzde önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum zaman içerisinde ECC gibi yüksek performanslı malzemelerin tasarlanmasını kaçınılmaz kılmıştır. Ancak yapıların sadece tamir edilmesi ya da bozulmaların geciktirilmesi değil aynı zamanda deforme olmuş/hasara uğramış bölgenin kendiliğinden iyileşebilme yeteneği çok önemli bir çözümdür. Doğada canlılar yaşamlarını kendini iyileştiren organizmalar sayesinde devam ettirmektedir. Böylelikle canlı organizmalar, çeşitli nedenlerle zarar görmüş bölgelerini sürekli olarak onararak yaşamlarına devam etmektedirler. Son yıllarda gelişen malzeme teknolojisi, malzemelerin canlı organizmaların sözü edilen kendini iyileştirme prensibiyle çalışabilmesini mümkün kılmaktadır. Kendiliğinden iyileşme kabiliyetine sahip çimento esaslı malzemeler bu noktada oldukça dikkat çekmektedir. Bu tür malzemeler çatlak meydana geldiğinde belli prensiplerle reaksiyonlar oluşturmakta ve kendi hasarlarını kendileri giderebilmektedir.

Son on yılda, kendini iyileştirebilen çimento esaslı malzemelerle ilgili olarak çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu teknikler arasında mikrokapsülasyon, içi boş lifler, bakteri katkısı, mineral katkıları ve bazı iyileştirici ajan katkısı kendiliğinden iyileşmede kullanılan yöntemler olarak sıralanmaktadır. Betonun daha önceki bölümde bahsedildiği

üzere olumsuz bir özelliği olan gevrek yapısı mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri değiştirilerek giderilmeye çalışılmaktadır. Bu anlamda geliştirilen çimento esaslı kompozitler, kendini iyileştirme kabiliyetleri ile dayanım, rijitlik, kimyasal ve fiziksel bütünlüklerini korunması ve daha da iyileşmesi gibi avantajlar sunmaktadır. Yapı içerisinde kullanılan çeşitli çimento esaslı malzemelerin uzun süre dayanıklılık özelliklerinden ödün vermemesi, çatlak oluşumunu yöneterek bu çatlakları iyileştirebilmesi kuşkusuz yapı malzemelerden gelecek yıllarda beklenen niteliksek özellikleri değiştirmektedir. Tıpkı canlılarda olduğu gibi betonda zarar görmüş bazı kısımlarını onararak uzun süre zarfında kalıcılık özelliklerini koruyabilir. Bu tez çalışması da doğadaki canlılardan esinlenerek beton gibi yapısal malzemelerin kendi hasarlarını kendisinin onarmasını amaçlamıştır. Otojen kendiliğinden iyileşme olarak tanımlanan bu iyileşme kavramına geçmeden önce literatürde kendiliğinden iyileşme ile ilgili çeşitli otonom teknikler kısa başlıklar halinde aşağıda özetlenmiştir.

2.1.1 Mikrokapsülasyon

Mikrokapsülasyon tekniğinde, belirli tiplerde çok küçük parçacıklar dış koşullardan korunması amacıyla bir kapsülün içine konmaktadır. Kendi kendini iyileştirme özelliğine sahip bu parçacıklar kapsül olarak ilk kez White ve diğerleri tarafından deneyselleştirilmiştir (White ve diğerleri 2001). Mikrokapsülasyon ile, çimento esaslı malzeme için kendini iyileştirme kabiliyetine sahip ajanlar çatlak meydana geldiğinde kapsülün açılmasıyla çatlaklara dolmakta ve tepkimeye girmektedirler. Malzemenin kendisini iyileştirmesine yarayan ajanlar meydana gelen çatlakla serbest kalmaktadır. İyileştirme ajanları çatlak yüzeyinde kılcal olarak etki etmektedir. Serbest kalan iyileştirme ajanları sayesinde tepkime başlarken ve çatlaklar iyileşme ürünleri ile dolmaktadır. Boh ve Sumiga (2008), yapı malzemelerinde bu tekniği çimento esaslı matrislerin hidrasyon üretme kabiliyetini iyileştirmek için kullanmışlardır. Bir başka çalışmada ise kendiliğinden iyileşme amaçlı kullanılan epoksi reçine kapsüllere yerleştirilerek matrisin içerisinde kullanılmıştır (Nishiwaki, 1997).

2.1.2 İçi Boş Lifler (Hollow Fiber)

İçi boş lif olarak adlandırılan bu tip malzemeler yardımıyla bir başka kendiliğinden iyileşme yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde, boş bir pipet veya tüp çapına bağlı olarak yerleştirilen kendini iyileştirme ürünleri çatlak oluşmasıyla açığa çıkmakta ve kompozitin kendiliğinden iyileşme mekanizmasını tetiklemektedir. Şekil 13-a'da tüp veya pipet benzeri bir kanala yerleştirilen kendiliğinden iyileştirme ajanları görülmektedir. Aynı şeklin b kısmında ise; çatlak oluşumuyla ajanların yerlerinden çıkarak tepkimeye girmesi görülmektedir. İçi boş lif kullanımının kendini iyileştirme ajanı taşıyan kapsüllere göre daha özel bir kullanım olduğu bilinmektedir. Metilmetakrilat (Dry and McMillan, 1996), etil siyanoakrilat (Joseph vd., 2010), poliüretan (Van Tittelboom vd., 2013) gibi kendini iyileştirici ajanlar birçok araştırmacı tarafından çeşitli çalışmalarda kullanılmıştır. Bu çalışmalarda; betonun kendisini hem mekanik hem dürabilite performansı açısından iyileştirdiği gözlemlenmiştir. İçi boş liflerin kullanıldığı araştırmalarda, düşük viskoziteye sahip kimyasal katkı maddeleriyle dolu haldeki tüpün açılmasıyla akışkan katkı maddesinin kolayca çatlaklara sızarak çatlakları onardığı tespit edilmiştir. Araştırmalara genel olarak bakıldığında daha çok iyileştirici ajan olarak düşük viskoziteli iki bileşenli epoksi reçinelerin kullanıldığına rastlanmaktadır.

2.1.3 Bakteri ile Kendiliğinden İyileşme

Çimento esaslı malzemelerin kendiliğinden iyileşmesini sağlamak için farklı farklı bakteri türleri de ilave edilmektedir. Söz konusu bakteriler aracılığıyla kalsiyum karbonatlar üretilmekte ve çökelti halinde taşlaşarak çatlaklar kapanmaktadır. Çatlağın meydana gelmesiyle ortaya çıkan bakteriler önce suyla buluşmakta ve daha sonra iyileştirici ürün üretilmektedir. Bu yöntemde seçilen bakterilerin betonla uyumlu olması gerekmektedir. Kısaca seçilen bakterilerin çimento esaslı malzeme içerisinde hidratasyonu arttırması ve destekleyici ürünler açığa çıkarması gerekmektedir. Bu zamana kadar yapılan pek çok araştırmada daha iyi teknikler geliştirilmiştir. Örneğin çeşitli çalışmalarda kalsiyumun çatlak içinde çökmesine yardımcı olmak için karışım içerisine üreolitik bakteriler ilave edilmiştir. Wang vd. (2012) tarafından yapılan araştırmada "sphaericus" bakterisi türü ile numunelerin kendi kendini iyileştirmesi amaçlanmıştır. Çalışma sonuçları bünyede yüksek miktarda kalsiyum iyonları mevcut

olduğunda bakterilerin duvarlarında kalsiyum karbonat çökmesi meydana getirebileceğini göstermektedir. Bu durumun numunelerin taşınma özelliklerini ve mekanik özelliklerini tekrar kazandırma potansiyelinde olduğu kanısına varılmıştır.

2.1.4 Taşınma Özellikleri

Kaynak araştırmasının bu bölümünde ECC malzemesinin taşınma karakteristiğine bağlı olarak kendiliğinden iyileşme öncesinde ve sonrasında geçirimsizlik, difüzyon ve su emme özellikleri üzerinde literatürdeki mevcut araştırmalar özetlenmiştir.

Su geçirimsizliği:

Lepech ve Li (2009) araştırmalarında çeşitli ECC numunelerinin kendiliğinden iyileşme yeteneklerini su geçirimsizlik testi üzerinden çalışmışlardır. Araştırmalarda, CEM I 42,5R standart Portland çimentosu kullanılmıştır. Düşük kalsiyum içeren (F-sınıfı uçucu kül), ince tane çapına sahip kuvars kumu, polivinil alkol lifi (PVA, hacimce %2 oranında), içilebilir su ve süperakışkanlaştırıcı bulunduran standart ECC karışımı kullanılmıştır. Standart ECC karışımı olarak bilinen ECC-M45, bugüne kadar literatürde en fazla veriye sahip olan ve standart ECC (Mix45 – M45) olarak adlandırılan çelik donatısız ECC-M45 karışımı ve üç farklı çelik donatı oranına sahip harç numuneleri bu çalışmada yer almıştır. Tüm numuneler aynı çevresel koşullar altında, 14 gün laboratuvar ortamında kür edilmiştir. Daha sonra su geçirimsizlik testleri için doygun halde test edilmeleri amacıyla fazladan 14 gün daha suda kür altında beklemiştir. Ardından farklı hasar oluşumları meydana getirmek için eksenel çekme yüklemesi altında önyüklemeye uygulanmıştır. Karşılaştırma yapmak amacıyla bir grup numuneye önyüklemeye uygulaması yapılmamıştır. Bu çalışmanın neticesinde, çatlakların genişliklerine bağlı olarak, çatlaklara sahip harç numunelerinin su geçirimsizlik seviyelerinin hasar verilmemiş numunelerin su geçirimsizlik katsayılarının yaklaşık 10^7 katı katına kadar ulaştığı görülmüştür. Diğer yandan, benzer şekilde eksenel çekme önyüklemesinin (%1,5) ardından, ECC numunelerinin su geçirimsizlik katsayısı 1.95×10^{-10} m/s mertebesinde kaydedilmiştir. ECC numunelerinin çok düşük su geçirimsizlikleri önyüklemeye neticesinde çok dar açıklıklara sahip çatlaklara (yaklaşık 50-60 μm) sahip

olması ile ilişkilendirilmiştir. Bunun yanında, önyükleme seviyelerinin arttırması ile su geçirimsizlik değerlerinde aşırı artışlar kaydedilmemiştir.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, su geçirimsizlik değerleri önyükleme derecesine bakılmaksızın zaman içinde sabit kalmıştır. Ağır hasar almış ECC numunelerinin gösterdiği oldukça düşük su geçirimsizlik değerleri, sadece dar açıklığına sahip çatlakların varlığıyla değil, aynı zamanda deneyler sırasında mikroçatlakların kendiliğinden iyileşmesiyle de ilintilidir. ECC numunelerinin 28 günlük kürünün ardından su geçirimsizlik değerlerinin zamanla sabit hale gelmesi hidratasyon reaksiyonlarından çok kendiliğinden iyileşmenin bir sonucudur. Kendiliğinden iyileşmenin sonucu olarak ECC numunelerine ait kapanan mikroçatlakların görüntüleriyle de doğrulanmıştır. Kapanan çatlaklardaki ürünlerin daha çok kalsiyum karbonat kristallerinden meydana geldiği ortaya çıkarılmıştır (Lepech ve Li, 2009).

Yang ve diğerleri (2009) tarafından yapılan bir çalışmada, çatlak genişlikleri ve su geçirimsizlik dereceleri arasındaki bağıntı ıslanma-kuruma çevrimlerinin ardından numuneler üzerinde değerlendirilmiştir. Bu ilişkinin özellikle tek çatlağa sahip numunelerde incelenmesi amacıyla daha az lif hacminde (%0,5) bir karışım geliştirilmiştir. Bu incelemenin nedeni, geleneksel lif donatılı betonlara benzer şekilde gerilme yumuşaması davranışı oluşturmak ve kontrollü tek bir çatlak elde etmektedir. Bu çalışmada açıklıkları 0 ile 300 µm arasında değişen çatlakların su geçirimsizlik testleri yapılmıştır. Her ne kadar farklı çatlak aralıklarında değişse de, çalışma sonuçları çatlak genişliklerinin 50 µm mertebesinde altındaki durumlarda su geçirimsizlik katsayılarının hasarsız numunelere benzediği gözlemlenmiştir.

Ma ve diğerleri (2014) tarafından yapılan bir başka çalışmada farklı kür sürelerine sahip ECC numunelerinin farklı çevresel şartlar altında su geçirimsizlikleri değerlendirilmiştir. Bu çalışmada 28 günlük hasar verilmiş numunelerin su geçirimsizlik değerlerinde azalışlar olduğu tespit edilmiştir. Sonuçların 3-4 iyileşme çevrimi sonrasında sabit kalmaya başladığı ve 6-9 çevrimin ardından ise tamamen sıfır seviyesinde kaydedildiği açıklanmıştır. Çalışma sonucunda, geçirimsizlik değerlerindeki en hızlı iyileşmeye sahip numunelerin suda kür edilmiş numuneler olduğu tespit edilmiştir.

Hızlı klorür iyonu geçirimsizliği:

ASTM C1202 standardına göre gerçekleştirilen hızlı klorür iyonu geçirimsizlik (HKİG) deneyi beton numunelerinin kalite kontrollerinin yapılması için kullanılan oldukça basit bir test yöntemidir (Misra ve diğerleri, 1994). Bu deney esas olarak betonun doğrudan geçirimsizlik performansından ziyade numunenin içinden geçen elektriksel akım sırasında göstermiş olduğu direnci ölçmektedir. Bu nedenle deneyler malzemenin boşluk yapısı, boşluk çözeltisinin kimyasal durumu ve bunlara benzer farklı nedenlerden etkilenmektedir. HKİG deneyi her ne kadar betonun elektriksel iletkenlik durumu hakkında bilgiler sunuyor olsa da, bu deneylerden elde edilen değerlerin klorür iyonun geçirimsizliği ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir (Shi, 2004). Çeşitli araştırmalarda basit kullanım kolaylığı nedeniyle ECC malzemesinin kendiliğinden iyileşme kabiliyetleri HKİG testleri aracılığıyla değerlendirilmiştir (Şahmaran ve diğerleri, 2013). Bu çalışmada Şahmaran ve diğerleri (2013), farklı mineral katkı (F-sınıfı uçucu kül, C-sınıfı uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu) kullanımlarının ECC malzemesinin kendiliğinden iyileşme yeteneğine yaptığı etkiyi HKİG testleri ile değerlendirilmiştir. Deneysel araştırmalar sırasında, ECC karışımlarında yer alan mineral katkı miktarı toplam bağlayıcı malzeme miktarının ağırlıkça üzerinden %70'i seviyesinde kullanılmıştır. Üretilen ECC numuneleri suda, havada ve çevrimsel donma-çözülme çevresel şartlarında bırakılmıştır. Numunelerin hasar seviyeleri farklı yarmada çekme deformasyon seviyelerinde verilerek ön yükleme yapılmıştır. ECC numunelerinin gösterdiği kendiliğinden iyileşme kabiliyetleri 60 günlük HKİG test sonuçları ile takip edilmiştir. Bu araştırmada da, daha önce söz edilen bir başka araştırmada olduğu gibi ECC numunelerinin su kürü altında HKİG sonuçlarının daha iyi olduğu tespit edilmiştir. 60 günlük kür süresinden sonra ilave olarak uygulanan 60 günlük kür süresine eşdeğer 300 donma/çözülme çevriminin ardından, önyükleme derecesine bakılmaksızın F sınıfı uçucu kül ve C sınıfı uçucu kül içeren ECC numunelerinin HKİG deney sonuçları daha yüksek kaydedilmiştir. Diğer yandan, cüruf içeren ECC numunelerinin HKİG değerleri aynı süre içinde daha düşük meydana gelmiştir. Çalışmada etkin bir kendiliğinden iyileşme performansı için dar çatlakların oluşumunun çok önemli olduğu belirtilmiştir. Ayrıca F sınıfı uçucu kül, C sınıfı uçucu kül ve cüruf içeren ECC karışımlarında otojen bir kendiliğinden iyileşme için kabul edilen çatlak aralıklarının sırasıyla 30, 50 ve 100 µm olduğu tespit edilmiştir.

Difüzyon:

Daha önceki kısımlarda değinildiği üzere beton gevrek bir malzemedir ve kolaylıkla çatlaması doğal olarak mümkündür. Bu durum farklı zararlı mekanizmaların beton bünyesine nüfuz etmesiyle genel olarak dürabiliteye zarar vermektedir. En önemli dürabilite problemlerinden biri olan donatı çeliğinin korozyonu, buz çözücü tuzlar ve/veya deniz suyu ile taşınan klorür iyonları aracılığıyla meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, özellikle beton çatladığında klorür iyon taneciklerinin beton bünyesine doğru doğru hareketleri önemli sorunları beraberinde getirmektedir. Çeşitli taşınma özellikleri arasında betonun difüzyon özelliği, klorür iyonlarının taşınması testlerinde en fazla çalışılan konulardan birisidir. Örneğin Şahmaran ve diğerleri (2007), standart ECC ve donatılı harç numunelerinin NaCl solüsyonu (sodyum klorür) içerisine konduktan sonra klorür iyon difüzyonu konusunda araştırmalar gerçekleştirmişlerdir. Farklı ön yüklemeler yapıldıktan sonra difüzyon katsayılarında bazı değişimler gözlemlenmiştir. Bu araştırmada, yapılan ön yüklemeye ve yüksek çatlak sayılarına rağmen ECC karışımlarının kontrollü olarak çatlak oluşturma kabiliyetleri sayesinde düşük difüzyon değerlerine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun yanında, deformasyon seviyesinin artması harç numunelerinde difüzyon katsayısının artması üssel mertebede olurken, ECC numunelerindeki artışlar daha doğrusal olarak meydana gelmiştir. ECC numunelerinin gösterdiği çok düşük difüzyon değerlerinin kontrollü mikro çatlak yeteneği ile birlikte, NaCl maruz kalmalarının ardından çatlaklarının kendiliğinden iyileşmesiyle de ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır. 30 gün süresince NaCl solüsyonuna maruz bırakılmalarından sonra ECC karışımlarındaki mikro çatlakların beyaz renkli kalıntılarla kapandığına dikkat çekilmiştir. Bu durumun nedeni, çatlaklar içinde meydana gelen C-S-H jelleri, kalsiyum hidroksit ve çeşitli tuz kalıntıları ile ilişkilendirilmiştir.

Bir başka araştırmada Şahmaran ve Li (2009), yüksek hacimlerde uçucu külü ECC karışımlarında kullanmıştır. Karışımların içerisinde uçucu kül miktarları sırasıyla %55 ve %70 oranında yer almıştır. Bu çalışmada üretilen ECC numunelerinin kalıcılık özellikleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, benzer ön yükleme uygulamalarının ardından %55 uçucu kül içeren ECC numunelerine kıyasla, %70 uçucu kül içeren ECC numunelerinin ECC-1 daha dar çatlak oluşturduğu tespit edilse de, farklı karışımların difüzyon değerleri arasındaki farkın önemsiz olduğu sonucuna

varılmıştır. Ancak, ön yükleme dereceleri arttırıldığında %70 uçucu kül içeren numunelerin, %55 uçucu kül içeren ECC numunelerinden daha fazla difüzyon değerine sahip olduğu görülmüştür.

Su emme:

Geçirimlilik özelliği, beton gibi malzemelerde çeşitli zararlı iyonların taşınmasına etki eden önemli bir parametredir. Ancak malzemelerin maruz kaldığı farklı ortamlara göre temel taşınma karakteristiği değişebilmektedir. Beton malzemesinin kuru ve/veya kısmi olarak kuru olduğu durumlarda, beton içindeki taşınma mekanizması karışıkta çok küçük boşluklar tarafından meydana getirilen kılcal emme kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır (Martys ve Ferraris, 1997).

Zhang ve diğerleri (2014) yaptıkları çalışmada, farklı miktarlarda F-sınıfı uçucu kül ile üretilmiş sağlam ve hasar verilmiş ECC numunelerinin kendiliğinden iyileşme performanslarını ölçmüşlerdir. Araştırmalar kılcal su emme testleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmanın sonuçlarına göre, ilave kür edilen ECC numunelerinin kılcal su geçirimsizlik sonuçlarında ciddi azalışlar meydana gelmiştir. ECC numunelerin ilave kür uygulaması neticesinde daha az kılcal su geçirimsizlik değerleri vermesi, çimento taneciklerinin devam eden hidrasyon reaksiyonlarında yer alması ve uçucu küllerin ikincil hidrasyon reaksiyonlarına katılması ile ilişkilendirilmiştir. Tetiklenen bu reaksiyonlar sonucu mikro çatlaklarda kendiliğinden iyileşme ürünleri meydana gelmiştir.

Alyousif ve diğerlerinin (2015) yaptıkları bir çalışmada, ECC karışımlarında, düşük miktarda kalsiyum oksitli içeren F-sınıfı uçucu kül ve yüksek miktarda kalsiyum oksit içeren C sınıfı uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanmışlardır. Numunelerin kendiliğinden iyileşme performansları 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda çatlaklı (ön yüklenmiş) numuneler üzerinde kılcal su emme testleri ile gerçekleştirilerek yorumlanmıştır. Kılcal su emme testleri numunelere dört noktalı eğilmede çekme yüklemeleri altında uygulanmış ve en son sehim kapasitelerinin %80'ine kadar yükleme yapılmıştır. Ardından kendiliğinden iyileşme ile ilgili değerlendirmelerin yapılması için deneyler 7, 30, 60 ve 90 günlük su kürünün ardından tekrar edilmiştir.

Su küründe kalan ECC numunelerinin üretiminde yer alan mineral katkı tipine bakılmaksızın, kılcal su emme değerleri üzerinden değerlendirilen kendiliğinden iyileşme davranışı iyi yönde etkilenmiştir. Kılcal su emme değerlerindeki azalmalar her ne kadar belirli karışımlar için daha uzun kür sürelerinde fazla bulunmuş olsa da, kısa süreli kür sürelerinde de (7 günlük) yüksek iyileşme oranlarının mümkün olabileceği görülmüştür. Göz önüne alınan bütün kür süreleri için C sınıfı uçucu kül içeren ECC karışımları daha yüksek iyileşme kabiliyeti gösterse de, 7 günlük cüruf içeren ECC numunelerinin kılcal su emme değerleri de yüksek iyileşme performansını işaret etmektedir. Cüruf taneciklerinin diğer uçucu kül tiplerine kıyasla daha düşük puzolanik kapasiteye sahip olmasına rağmen elde edilen sonuçlar şaşırtıcı olarak değerlendirilse de, cüruf kullanılarak üretilmiş ECC numunelerinin kendiliğinden iyileşme gelişimi bir başka çalışmada (Şahmaran ve diğerleri, 2013) mikro çatlaklarda kalsiyum karbonat ürünlerinin meydana gelmesi ile açıklanmıştır.

2.1.5 Mekanik Özellikler

Hasar verilmiş ECC numunelerinin mekanik özelliklerinde kendiliğinden iyileşme neticesinde meydana gelen farklılıklar daha çok aksel çekme, eğilmede çekme ve yarmada çekme testleri ile araştırılmıştır. Bu nedenle aşağıdaki kısımlarda söz konusu deneyler aracılığıyla test edilen mekanik kendiliğinden iyileşme çalışmaları kısaca özetlenmiştir.

Eksenel çekme:

Yang ve diğerleri (2009) ECC karışımları ile hazırlanan numunelerin kendiliğinden iyileşme öncesi ve sonrasında mekanik kazanımlarını aksel çekme deneyleri ile test ederek değerlendirmiştir. Deneyler %0,3 ve %3 arasındaki şekil değiştirme seviyelerinde altı aylık numuneler üzerinde yapılmıştır. Kendiliğinden iyileşmenin yorumlanabilmesi için aksel çekme deneyleri karışımların on ıslanma ve kuruma çevriminde ya da su-sıcak hava çevriminde kür edilmesinin ardından yükleme yapılmadan tekrar edilmiştir. Bunun yanında, mekanik özelliklerin değişmesi ile ilgili olarak çevresel etkilerin anlaşılması amacıyla aksel çekme testleri kendiliğinden iyileşmemiş numuneler üzerinde de yapılmıştır. Bu çalışmanın neticesinde, numunelere on ıslanma ve kuruma çevrimi yapılmasının arkasından, kür edilen koşuldan bağımsız

olmak üzere eksenel çekme testleri altındaki başlangıç rijitlik seviyelerinde ciddi iyileşmeler meydana gelmiştir. Ayrıca, malzemelerin başlangıç rijitlik değerlerindeki değişmelerin, %3'lük eksenel çekme şekil değiştirmesi altındaki numuneler de dahi geçerli olduğu belirtilmiştir. Çalışmanın sonunda ise genel olarak, eksenel çekme yükleri altında %2 ya da %3'lük şekil değiştirmeye maruz kalan numunelerde kendiliğinden iyileşmenin etkisiyle %1,8 - %3,1 arasındaki değerlerde şekil değiştirme kapasitelerinin tekrar kazanılabileceği belirtilmiştir.

Benzer bir çalışmada Yang ve diğerleri (2011), on defa ıslanma kuruma çevrimine maruz kalan ön yükleme yapılmış ECC numuneleri üzerinde çalışmışlardır. Numunelerin yaşları erken yaşta (3 günlük) ve ileri yaşlarda (90 günlük) test edilerek rijitlik cinsi üzerinden değerlendirmelerde bulunulmuştur. Araştırmacılar, bu çalışmada da belirli süre zarfında uygulanan kür sonucunda numunelerin rijitlik değerlerinde iyileşme meydana geldiğini doğrulamıştır. Çalışmada, numunelerin erken yaşlarında hidrate olmamış çimento esaslı malzemelerin varlığı sebebiyle her ne kadar beklenen bir sonuç olmasa da, daha yaşlı numunelerin rijitlik değerlerindeki geri kazanımlar genç numunelerden daha yüksek bulunmuştur. Bu sonuç, farklı kür zamanlarında eşdeğer olarak benzer seviyede ön yükleme uygulanan ECC numunelerinin çatlak gelişimi üzerinde meydana gelen olası etkilerle ilgilidir.

Kendiliğinden iyileşme konusu üzerinde zamanla artan çalışmalarda mekanik özelliklerin ağır çevresel koşullar altında geri kazanılması bazı araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Li ve Li (2011), daha önce bahsedildiği gibi standart ECC karışımı olan M45 karışımı ile numuneler hazırlayarak kendiliğinden iyileşme performansını ağırlıkça %3 NaCl çözeltisi içeren su küründe değerlendirmişlerdir. Deneysel programlar esnasında, 28 günlük ECC karışımları sırasıyla %0 (kontrol), %0,5, %1,0 ve %1,5 mertebelerinde eksenel çekme yükleri ile şekil değiştirmeye uğratarak ön yükleme yapılmıştır. Ardından, sırasıyla 30, 60, 90 gün süresince sodyum klorür çözeltisi içinde bekletilmiş numuneler kür işleminin ardından tekrar yüklenmiştir. Buna ek olarak, kontrol numuneleri, önceden belirlenen kür zamanlarında oda sıcaklığına sahip ortamda bekletilmişlerdir. Kendiliğinden iyileşmenin numuneler üzerindeki etkileri, rijitlik, eksenel çekme şekil değiştirme kapasitesi ve eksenel çekme dayanımı gibi parametreler üzerinden değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları değerlendirildiğinde, kürü havada edilen kontrol karışımlarının nihai çekme dayanımları NaCl kürü içerisinde

beklemiş kontrol numunelerinden az da olsa (%5 ila %10 mertebesinde) daha fazla bulunmuştur. Kontrol karşımlarının aksel olarak çekme şekil değiştirme kapasitesi NaCl kürü sonrasında kür süresinden bağımsız olmak üzere net bir biçimde değişim göstermemiş olsa da, ağır çevresel koşullar ilk çatlak oluştuğu dayanımını seviyesini azaltmıştır. Benzer sonuçların ön yüklemeye yapılmış numunelerde de geçerli olduğu tespit edilmiştir. NaCl kürü içinde ilave olarak kalan numunelerin rijitlik değerlerine karşı, ön yüklenmiş ve hemen bir gün ardından tekrar yüklenmiş numunelerin rijitlik değerlerinde ciddi düşüşler gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, tekrar yüklemeye sonucunda mevcut mikro çatlakların lif köprülenmesi yeteneği daha gerçekleşmeden çatlakların yeniden aynı dizgide açılması ile ilgilidir. Bu sonuçlar tuzlu su gibi ağır çevresel koşullar altında bile ECC numunelerinin mikro çatlaklarının içerisinde kendiliğinden iyileşmenin varlığına işaret etmektedir. Ayrıca deneyler ön yüklemeye yitirilen mekanik özelliklerin geri elde edilmesinin mümkün olabileceğine işaret etmektedir.

Şahmaran ve Li (2008) standart ECC karışımını (M45) kalıcılık performansı açısından yüksek alkali ortamda incelemiştir. Çalışmalarda, 28 günlük hasar verilmemiş kupon numunelerle beraber, % 1,0 ve % 2,0 aksel olarak şekil değiştirmeye uğramış ve çatlaklı standart ECC numunelerini NaOH çözeltisine 90 gün boyunca maruz bırakmışlardır. Ön yüklemeye yapılmış ve ardından tekrar yüklenilmiş numunelerle iki farklı düzeyde aksel şekil değiştirme seviyesiyle farklı sürelerde alkali ortamda deneyler yapılmıştır. Deneysel karşılaştırmaya bakıldığında, ön yüklemeye yapılmış numunelerin rijitlik değerlerinde yüzde yüze yakın iyileşme olduğu görülmüştür. Bu durumda ağır çevresel şartlar altında mikro çatlaklarda mekanik olarak kendiliğinden iyileşmenin varlığından söz edilebilmektedir. Aynı çalışma içinde, aksel olarak çekme şekil değiştirme değerlerindeki değişimler çizilmiş ve fazladan NaOH çözeltisi içinde gerek sağlam gerekse ön yüklenmiş numunelerin değerlerinde azalmalar tespit edilmiştir. Bu sonucun, NaOH çözeltisinin lif/matris arayüz özellikleri üzerindeki zararlı etkilerinden kaynaklanabileceği yorumlanmıştır.

Eğilmede çekme:

Eksenel çekme deneyleri çimento esaslı kompozit malzemelerin şekil değiştirme sertleşmesi özelliklerinin belirlenebilmesi için kullanılacak bir test yöntemidir. Bu tip testler en uygun deney yöntemleri olarak nitelendirilse de mevcut çalışmalara

bakıldığında tam olarak şekil değiştirme sertleşmesi gösteren malzemelerin, aksenal çekme şekil değiştirme kabiliyeti ile eğilme altında deneyleri yapılan malzemelerin sehim kapasiteleri arasında uyumlu bir ilişki olduğu belirtilmektedir (Qian ve Li, 2008). Bu anlamda, geçmiş senelerde eğilme yükleri altında mekanik özelliklerin kendiliğinden iyileşme sayesinde geri kazanılması üzerinde farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Qian ve diğerleri (2009) dört noktalı eğilme yükleri altında ECC'ye benzer şekilde hazırlanan (şekil değiştirme sertleşmesi gösterebilen) çimento esaslı kompozitlerin (strain-hardening cementitious composites – SHCC) kendiliğinden iyileşme vasıtasıyla sehim kapasitelerindeki geri kazanımları incelemiştir. Bu araştırmada kullanılan karışımlar, yüksek su/bağlayıcı oranında ve F-sınıfı uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve kireçtaşı tozunun farklı kombinasyonları olarak tercih edilmiştir. Bu çalışmada sonuçlar, orijinal sehim kapasitesi değerlerinin geri kazanılabilmesinde su kürünün çok daha etkili olduğunu ortaya çıkarmıştır. Örneğin, numunelerinin sehim kapasitesilerindeki geri kazanımlarda su kürüne maruz kalmış numuneler için % 65 ila 105 aralığında kendiliğinden iyileşme mümkünken, hava kürüne maruz bırakılmış numunelerde bu değerler % 40 ila 62 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, su kürü lif köprüleme davranışını iyileştirmekte ve yükleme altında yeni kusurlu alanlarının meydana getirilmesinde katkı sağladığı belirtilmiştir. Farklı kür koşullarına maruz kalan numunelerin eğilme dayanımı sonuçlarındaki kendiliğinden iyileşme oranları da incelenmiştir. Bu değerler her ne kadar ihmal edilebilir seviyede olsa da, su küründe bekleyen numunelerin rijitliklerindeki mekanik geri kazanımlar artmıştır.

Qian ve diğerleri (2010) başka bir çalışmasında kireçtaşı tozu ile öğütülmüş yüksek fırın cürufu mineral katkı kombinasyonu ile beraber nanokil taneciklerini içsel kürleme amacıyla kullanmışlardır. Üretilen ECC numuneleri 14, 28 ve 56 günlük sürelerde kür edilmelerinin ardından dört noktalı eğilmede çekme yüklemeleri altında 1,5 mm sehim değerine kadar ön yüklenmiştir. Ardından mekanik özellikler açısından kendiliğinden iyileşmenin karşılaştırılabilmesi için tekrar yükleme yapılacak test gününe kadar su, hava ve %3'lük CO₂ konsantrasyonunda kür edilmiştir. Referans numunelerine kontrol amaçlı üretilirken, elde edilen sonuçlar tüm kür koşullarında ECC numunelerinde kendiliğinden iyileşme ile daha fazla sehim sonuçlarının elde

edilebilmesini mümkün kılmıştır. Ayrıca, doğrudan hava ile kür edilmiş numunelerde nano kil kullanımının sehîm kapasitesinde iyileşmeler sağladığı belirtilmiştir. Diğer tüm kür koşulları dikkate alındığında numunelerin rijitlik değerlerinde de iyileşmenin kaydedildiği belirtilmiştir. Bu çalışma aynı zamanda (Yang ve diğerleri, 2009) yaptığı çalışmaların sonuçlarıyla benzerlik içermektedir. Ancak, rijitlik değerlerindeki iyileşme daha uzun süre kür edilen numunelerde daha az bulunmuştur. Bu sonuç daha çok zaman içinde hidrate olmamış bağlayıcı malzemelerin azalmasıyla ilgilidir.

ECC malzemesinin kendiliğinden iyileşme davranışını olası daha kötü koşullar altında araştırmak için Yıldırım ve diğerleri (2015) tarafından bir başka araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada dört farklı mineral katkı malzemesi kullanılmıştır (farklı kireç içerikli 3 farklı uçucu kül ve cüruf). Çalışmada numuneler, hidrasyon reaksiyonlarının büyük ölçüde yavaşlaması için oldukça yeterli bir sürede kür edilmiştir (180 gün). Ardından numuneler dört noktalı eğilmede çekme yükleri altında sehîm kapasitelerinin %75'i seviyesine kadar önyüklemeye maruz bırakılmıştır. Buna ek olarak, 180 günlük ilk kür süresinin ardından fazladan 150 günlük kür süresi tamamlanana kadar her 30 gün sonunda kalıcı yük %10 oranında devamlı olarak yükseltilmiştir. Her ne kadar nihai sehîm sonuçları sürekli kalıcı yük uygulamasından dolayı daha kötü derecede etkilenmiş olsa da, kendiliğinden iyileşme sonrasında numunelerden elde edilen en düşük sehîm değerinin dahi (yaklaşık olarak 1,6 mm) geleneksel betonun yüzlerce katı seviyesinde olduğu belirtilmiştir.

ECC'nin mikro çatlaklar oluşturarak tetiklediği kendiliğinden iyileşme yeteneği ilgili olarak oldukça detaylı bir şekilde gerçekleştirilen literatür taraması sonrasında dışarıdan herhangi bir müdahale olmadan hasarını onarabildiği (self-healing) farklı araştırmacılar tarafından teyit edilmiştir. Dar açıklıklı çatlaklarda daha kolay kendiliğinden iyileşme ürünleri meydana getirmek mümkün olsa da, otojen kendiliğinden iyileşme mekanizması sayesinde kapanabilecek maksimum çatlak genişliği değerleri için literatürde farklı değerlere rastlamak mümkündür. Örneğin, Jacobsen ve diğerleri (1995), bir çatlağın tamamen kapanması için en fazla açıklığın 5-10 µm olması gerekliliğini ileri sürmüştür. İsmail ve diğerleri'ne (2004) göre bu değer 53 µm'dur. Öte yandan, Reinhardt ve Jooss (2003), Edvardsen (1999), Aldea ve diğerleri (2000) ve Clear (1985) araştırmalarında bir çatlağın tamamen kapanabilmesi için açıklıklarının sırasıyla 100 µm, 200 µm, 205 µm ve 300 µm seviyelerinin üzerine

çıkması gerektiğini belirtmiştir. Yukarıda belirtilen çalışmaların tümünde, tam manasıyla bir iyileşme elde edilebilmesi için en önemli parametrenin kabul edilebilir çatlak genişliği olduğu önemle vurgulanmaktadır. Ancak, bilindiği gibi mekanik yüklemeler altında çatlak genişliği kontrolü olmayan ve gevrek davranış sergileyen geleneksel betonların dar açıklıklı çatlak oluşturma imkanları neredeyse sifıra yakındır. Bu kısma kadar yapılan detaylı literatür taraması sonunda denilebilir ki; ECC malzemeleri kendini iyileştirme davranışı sayesinde ağır çevresel koşullar ve yükleme düzeyleri altında mekanik ve taşınma özelliklerini koruyabilmektedir. Söz konusu mekanik özelliklerin kısmını kaybetse dahi bu özellikleri büyük oranda geri kazanma şansına sahiptir. Ancak her ne kadar çatlakların kapanması mevcut durumda mümkün olsa da, çalışmalardaki hasar almış ECC çatlaklarının tam olarak kapanmadığı birçok durumda belirtilmektedir. Ayrıca bilindiği gibi çatlaklar bir dereceye kadar kapansa dahi kendiliğinden onarılan çatlakların tekrar açılmaması ve mekanik ve dürabilite performansını arttırması için kendiliğinden iyileşme ürünlerinin de kalitesinin ve hızının artması gereklidir. Böylece hasar görmemiş çatlaksız beton gibi performans gösteren kendiliğinden iyileşmiş beton elemanlardan söz etmek tam anlamıyla mümkün olacaktır. Detaylı literatür araştırmaları sonucunda bu kapsam ile ilgili olarak bir çalışmaya denk gelinmemiştir. Bu noktada, mevcut doktora tezi kapsamında literatürde daha önce hiç çalışılmamış olan yukarıda bahsedilen söz konusu sorunlara ilk defa açıklık getirilmiştir. Bu amaçla bakıldığında, literatürdeki zahmetli yöntemlerle belirli derecede kendiliğinden iyileşen ECC tasarımlarının aksine, son yıllarda birçok alanda yeni gelişmelere öncülük eden nano teknoloji ürünleri ile kendiliğinden iyileşme ürünlerinin etkinliğinin geliştirilmesi, ECC'nin otojen (içsel) kendiliğinden iyileşme potansiyeli ile bütünleştirilmiştir. Çatlaksız, yüksek performanslı betonla aynı özelliklere sahip kendiliğinden iyileşen çimento esaslı kompozitler geliştirmek doktora çalışmasının ana amacını oluşturmuştur. Tez kapsamında çimento esaslı kompozitlerin nano malzemeler aracılığıyla daha kararlı iyileşme mekanizmaları ile beraber, nano ölçekteki malzemelerin karakteristik olarak çimento esaslı sistemlere yaptığı mekanik ve dayanıklılık etkileri de bir arada sunulmuştur. Bunun yanında nano boyutta modifiye edilmiş kompozitlerde farklı yaşlarda oluşan kendiliğinden iyileşme ürünlerinin etkinliği belirlenmiştir. Kısaca, tez kapsamında nano modifikasyonla çimento esaslı kompozitler üzerinde canlılarda meydana gelen kendiliğinden iyileşme analogisinden yararlanılarak (biyo-ilham), kendiliğinden iyileşme ürünlerinin kalitesi arttırılmış ve daha iyi (yoğun) onarılmış çatlaklar elde edilmiştir. Bu noktada, kendiliğinden iyileşme

ile ilgili tez sonu bulgularını aktarmadan önce nano modifikasyonla sözü edilen sonuçların alınmasını sağlayan nano malzemelerin karışımlarda nasıl kullanıldığı anlamak oldukça önemlidir. Bilindiği gibi nano malzemelerin özel işlem gerektiren bir takım kullanım şartları nedeniyle inşaat sektöründeki diğer malzemelere (boya, yalıtım malzemeleri vb.) kıyasla beton içerisindeki kullanımı bilimsel araştırmalarda dahi sınırlıdır. Nano malzemelerin çimento esaslı karışımlarda yer almasının önündeki teknik engeller bu durumun başlıca nedeni olmakla beraber, doktora tez çalışması ile birlikte nano malzemeler ile geliştirilen çimento bağlayıcı kompozitlerde istenen fonksiyonların kararlı bir biçimde elde edilmesi sağlanmıştır. Tez dahilinde yapılan çalışmalarda daha hızlı ve yoğun onarılmış çatlakların elde edilmesi, ECC karışımlarında karbon nano tüp ve nano silis malzemelerinden etkili bir şekilde yararlanılmasıyla mümkün olmuştur. Bu noktada, geçmiş tecrübeler ek olarak literatürde tez kapsamındaki deneylerde kullanılan karbon nano tüp (KNT) ve nano silis (NS) kullanımının çimento esaslı sistemlerdeki taze ve sertleşmiş özelliklerine olan etkisi ön araştırmalarda incelenmiştir. Tez kapsamında kullanılan nano malzemelerin karakteristik özellikleri ve çimento esaslı sistemlerde karışıma katılarak ECC numunelerinin nano ölçekte modifiye edilmesi ile ilgili işlemler, ECC karışımını oluşturan diğer malzemelerle birlikte ayrıntılı olarak bir sonraki bölümde verilmiştir.

2.2 Kendiliğinden Algılama

Son yıllarda yapısal performansın yanında beton gibi çimento bağlayıcılı kompozitlerin yapısal olmayan fonksiyonel özelliklere de sahip olabilmesi için bir takım çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Yapısal olmayan fonksiyonel özellikler arasında en önemlilerden birkaçı, bu tür malzemelerin hasar, birim şekil değiştirme, yapısal titreşim, sıcaklık ve dayanıklılık gibi performanslarının kendiliğinden takip edilmesidir. Genel anlamda, bünyesinde sensör bulunmadan yapısal malzemelerin doğrudan sensör amacı ile kullanılması kendiliğinden algıma olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla entegre sistemlere gerek kalmadan betonun kendiliğinden algılama kabiliyeti sayesinde yapının yapısal/malzeme sağlık izlemesi sağlanabilmektedir. Bu bölümde kaynak araştırması olarak, kendiliğinden algılama kabiliyetine sahip çimento esaslı kompozitlerin genel olarak literatürdeki çalışmalarda karşılaşılan karışımları, üretim teknikleri, sensör olarak kullanıma yöntemleri, tersinir ve tersinir olmayan şekil değiştirmeyi algılama kabiliyetleri ve büyük ölçekli elemanlarda kullanımlarına yönelik çalışmalar ele

alınmıştır. Ayrıca bu tür çok fonksiyonlu çimento bağlayıcı kompozitlerin geliştirilmesi ve uygulamalarına yönelik yeni tartışmalar sunulmuştur. Aşağıda konu ile ilgili olarak mevcut çalışmalardan bazı örnekler verilmiştir.

Wen ve Chung (2001) yaptıkları çalışmada, karbon lif takviyeli çimento harçlarının direnç hesaplamaları esnasında elektrik polarizasyonu probleminin olduğunu belirtmişlerdir. Daha fazla kristal halde bulunan karbon liflerin çimento hamuruna takviyesi ile bu etki azaltılmıştır. Lif içeriği artışı ya da lateks yerine silis dumanı kullanımının kristalize liflerin kompozitteki mevcut iletkenliği arttırdığı belirtilmiştir. Ancak bu durumda polarizasyon voltaj yoğunlaşması, değiştirme etkisi ve yüzey-örnek ara yüzey kusurları gibi nedenlerle artmıştır. Daha sonra yapılan deneylerde bu durumun ortadan kalktığı görülmüştür.

Wen ve Chung (2007) kendi hasarını algılayabilen karbon lif esaslı çimento numunelerin basınç deneyi altında sergiledikleri davranışa göre elektriksel direnç testleri yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada, %10 ile %30 arasındaki direnç artışlarının ana hasara sebep olduğu belirtilmiştir. Elastik bölgede kalan küçük hasarlar ise direnç artışında %1 ile %7'lik değişimlere yol açmıştır. Çalışmanın sonuçları, kendi hasarını algılama yeteneğinin temelinde mikro çatlaklara köprü vazifesi gören liflerin kırılmasının yattığını yorumlamıştır.

Sanchez (2009) çalışmasında, karbon liflerin çimento esaslı kompozitlerdeki kullanımını farklı şekillerde karışımlar hazırlayarak araştırmıştır. Yüzey işlemi için nitrik asit ve homojen dağılım sağlamak için aseton kullanmıştır. Bu işlemlerin, karbon nano liflerin çimento karışımları içerisinde dağılımını kolaylaştırdığını tespit edilmiştir.

Li ve diğerleri (2011) yapmış oldukları çalışmada nano malzeme tabanlı çok fonksiyonlu betonun kendiliğinden algılama ve iyileşmiş mekanik özellikleri sayesinde altyapıların güvenliğini sağlama noktasında etkili olduğunu belirtmişlerdir. Nano karbon siyahının uygun oranda betona ilave edilmesiyle üretilen nano-betonun piezo-dirençli olarak kendiliğinden algılama özelliği kazandığı belirtilmiştir. Nano-betonun piezo-dirençlilik kabiliyetine farklı yükleme tiplerinin etkileri ayrıca deneysel olarak araştırılmıştır. Nano-betonun farklı yükleme ve çevresel koşullar altında ki gerilme ölçülerini tahmin etmek için teorik bir model meydana getirilmiştir. Elektriksel direnç

hesaplaması sırasında polarizasyonun olumsuz etkisini engellemek için nem etkisi ve su içeriği gibi olumsuz metotlar da oluşturulmuştur.

Han ve diğerleri (2011) nanoteknolojinin inşaat sektörü ve malzemelerini önemli ölçüde etkileyeceğini ve düşük hacmi, yoğunluğu ve üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri sebebiyle karbon nanotüplerin akıllı ve çok fonksiyonlu çimento bağlayıcı kompozitlerin geliştirilmesinde en önemli malzemelerden biri olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada, son gelişmeler ve karbon nanotüplerin çimento bağlayıcı kompozitlerde kullanım metotları, mekanik özellikleri, elektriksel ve piezo-direnç özellikleri, termal iletkenlikleri ve yapısal uygulama potansiyelleri de tartışılmıştır. Çok fonksiyonlu ve akıllı karbon nanotüp takviyeli çimento bağlayıcı kompozitlerin gelecekte karşılaşılabileceği sorunlara ve uygulamalara ayrıca değinilmiştir.

Dong ve ark. (2011) çalışmalarında, inşaat mühendisliğindeki uygulamalara yeni bir bakış getirebilecek mekanik sensör görevi gören çimento malzemesine piezo-elektrik seramik eklemiştir. Bu sensör belirli bir yapının anlık bilgisini sağlamakta ve gerçek zamanlı olarak yapısal sağlığını izleyebilmektedir. Bu durum özellikle beton yapılarda yerinde hesaplamalar için ideal bir tespit biçimidir. Böylece piezo-elektrik seramik ve çimento esaslı malzemenin yüksek mekanik özellikleri birleştirilerek deneysel verilerle doğrusal bir mekanik-elektriksel ilişki durumu ortaya konmuştur. Çimento esaslı piezo elektrik seramik kompozitlerin inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılmak üzere önemli bir potansiyele sahip olduğu ortaya konmuştur.

Melo ve diğerleri (2011) nano ölçekli partiküllerin kullanımının birçok farklı malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini vurgulamıştır. Bu tarz malzemelerin kullanılmasıyla, Portland çimentolu bağlayıcı kompozitlerin mekanik özelliklerinden çekme gerilmesi performansının iyileştiği belirtilmiştir. Çimento içeriğinin 0,30, 0,50 ve 0,75'i oranlarında fiziksel olarak eklenmiş karbon nanotüp ikameli numunelerin mekanik özelliklerinin (basınç dayanımı, çekme dayanımı ve elastik modülü) tespit edilmesinin amaçlandığı çalışmada iki farklı kimyasal katkı (polikarboksil ve melamin formaldehit) modifiye edilerek kullanılmıştır. Test sonuçları, çimento miktarının %0,30'u oranda karbon nanotüp takviyesi ve modifiye edilmiş polikarboksil su azaltıcı

katkı kullanımının en yüksek performanslı kompozitlerin üretilmesine olanak sağladığını göstermiştir.

Lin ve ark. (2011) yapmış oldukları çalışmalarında çekme gerilmesi altında çoklu mikroçatlak oluşumu sergileyen tasarlanmış çimento bağlayıcılı kompozitlerin kendiliğinden algılayabilme kabiliyeti üzerine odaklanmıştır. Kompozit malzeme bileşeni olarak az miktarda karbon siyahı kullanımının, kendiliğinden algılama kabiliyetinin kazanılmasında önemli katkı sağladığından bahsedilmiştir. Bu durum piezo-dirençli davranışı sağlamakla beraber, numuneleri çekme gerilmesi altında da iyileştirmiştir. Tasarlanmış çimento bağlayıcılı kompozitin çekme gerilmesi altındaki hali, çekme kapasitesi ve yük kapasitesiyle beraber kırılma şekilleri de ayrıca irdelenmiştir.

Tian ve Hu (2012) betonda elektriksel iletkenlik için herhangi özel bir yönetmelik ya da standart olmamasına karşın, iletken betonun inşaat sektörü ve diğer alanlarda uygulanabilirlik açısından önem arz ettiğini vurgulanmıştır. Bu çalışmada deney numunelerinin hazırlanması sırasında elektriksel özelliklerin belirlenebilmesi için farklı test yöntemlerinin kullanımı irdelenmiştir. İletken betonun elektriksel özellikleri araştırılırken ve analiz esnasında yazarlar numune boyutları ve iletken beton ile ilgili tespitler yapmıştır.

Konsta-Gdoutos ve Aza (2014) çimento bağlayıcılı kompozitlerin içine dağılmış karbon nanotüp ve karbon nano lif takviyelerinin varlığında kompozit malzemelerin kendiliğinden algılayabilme kabiliyetlerini araştırmıştır. Çalışmada 0,3 su/çimento oranına sahip kompozit malzemelerin çimento miktarının %0,1 ile %0,3'ü oranlarında sırasıyla karbon nanotüp ve karbon nano lifler kullanılmıştır. Deneysel program kompozit malzemelerin elektriksel direnç ölçümlerini kapsamıştır. Sonuçlar, çimento ağırlığının %0,1'i oranında karbon nanotüp içeren kompozitlerin elektriksel özelliklerinin daha iyi olduğunu göstermiştir. Ayrıca çimento ağırlığının %0,1'i oranında karbon nanotüp ve nano lif içeren kompozitlerin yük altındayken elektriksel direnç değerlerinde gözlemlenen artışın, malzemenin kendiliğinden algılama kabiliyeti için belirleyici olduğu vurgulanmıştır.

Ranade ve diğeri (2014) çalışmalarında, tasarlanmış çimento bağlayıcılı kompozitlerin üzerine uygulanan aksel çekme yüklemesi sonucunda sergiledikleri deformasyonla birlikte elektriksel direnç ölçüm değerlerinde oluşan değişimlerin yapısal durum gözlemleri için bir kontrol sistemi olabileceğini belirtmiştir. Çalışma deneysel olduğu kadar analitik olarak da desteklenmiştir.

Daha önce işaret edildiği üzere beton yapılar üzerlerine uygulanan gerilme, şekil değiştirme ve çevresel etkenler gibi nedenlerden dolayı sürekli olarak hasara uğramaktadırlar. Yapılarda meydana gelebilecek hasarların olası en erken sürede belirlenmesi kamusal güvenlik açısından çok kritik bir öneme sahiptir. Özellikle kritik yapıların mevcut durumlarını değerlendirmek için bir takım yöntemler bulunmaktadır. Tanım olarak, “yapısal/malzeme sağlık izlemesi”, sürekli veya düzenli olarak yapıların/malzemenin durumunu yerinde (çoğunlukla hasarsız test yöntemleri ile) veya yapılar entegre edilmiş sensörler kullanılarak gerçek zamanlı olarak güvenli bir şekilde izlenmesidir. Böylelikle can güvenliğinin sağlanmasında, yüksek kaliteli yapılar için inşaat maliyetlerinin azaltılması anlamında inşaat mühendisliği için çok önemli yararlar sağlamaktadır (Chung ve diğeri 2002).

Yapısal/malzeme sağlık izlemeleri sonucunda elde edilen ölçümler mühendisler tarafından yapı problemlerinin teşhisinde ve yeni başlamakta olan hasarların değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu uygulamalar gereken tamir ve onarım faaliyetlerinin zamanlamasında ve yaşam döngü tahmin modelleri kullanılarak yapıların kalan ömürlerinin belirlenmesinde fayda sağlamaktadır. Ayrıca bu tür izleme faaliyetleri sonucunda elde edilen kazanımlar ile olası gelecek bakımların minimize edilmesi için ne tür önleyici tedbirlerin alınması gerektiğine de karar verilmektedir. “Malzeme sağlık izleme” yapıların yapımında kullanılan malzemelerin özelliklerini etkileyen parametrelerin değerlendirilmesi anlamında da kullanılmaktadır. Ayrıca “yapısal sağlık izleme” yöntemleri ile inşa edilen yapının tasarımıyla uyumu kontrol edilip bir tür kalite güvence ve kalite kontrol mekanizması sağlanmış olmaktadır (Azhari, 2008). Yapıların sağlık durumlarının sürekli olarak izlenmesi ayrıca gelecekte inşa edilecek yeni tasarımlarda daha doğru yaklaşımlara olanak sağlamaktadır. Özet olarak mekanik yükler, deprem, rüzgar, okyanus dalgası, canlı yükler ve çevresel yüklerden meydana gelecek hasarlar durumunda olası tehlikeleri azaltmak amacı ile beton yapılarıdaki hasarları sürekli olarak izlemek çok büyük bir önem teşkil etmektedir.

Yapısal/malzeme sağlık izleme kapsamında değerlendirilen yapı/malzeme özelliklerine örnek olarak dayanım, elastik modülü, birim şekil değiştirme, geçirimsizlik ve donatı korozyonunun durumu gibi örnekler verilebilir.

Beton yapılarda hasarların ve performansların izlenmesi için farklı yöntemlerin geliştirilmesine rağmen, yapının/malzemenin sağlık durumunu sürekli ve mevcut kullanılan yöntemlere göre daha ekonomik bir şekilde izleyecek bir yöntem bulunmamaktadır. Mevcut durumda, ilk bölümde bahsedildiği üzere beton yapıların yapısal/malzeme sağlık izleme amacı ile birim şekil değiştirme ölçer, fiber optik sensör, akustik sensör, piezoelektrik seramik sensörler gibi sensörler yapıların kritik öneme sahip kısımlarının içerisine yerleştirilmektedir. Ancak sensör tabanlı yapısal/malzeme sağlık izlemenin önündeki en önemli engel olarak büyük ölçekli yapı sistemlerine yerleştirilebilecek güvenilir, kolay yerleştirilebilir, uygun maliyetli ve aşırı çevresel şartlara dayanıklı sensörlerin olmamasıdır.

Son yıllarda yapılan çalışmalar yapısal performans özelliklerine ek olarak, çimento esaslı malzemelerin yapısal olmayan bazı özelliklere de sahip olabileceğini göstermiştir. Çimento bağlayıcılı kompozitlerin yapısal özelliklerinin yanında sözü edilen diğer fonksiyonel özelliklere de sahip olması bu tür malzemeleri “çok fonksiyonlu malzemeler” yapmaktadır. Bu durum yapıların içerisinde sadece belirli yerlere yerleştirilen ve maliyeti yüksek olup genellikle yapısal malzemelerden daha az dayanıklı ve daha kısa servis ömrüne sahip olan algılayıcılara kıyasla oldukça yüksek uygulama potansiyeline sahiptir. Olası uygulamalarda doğrudan kullanımlarından dolayı yapılara gömülü veya entegre sensörlerin kullanımına gerek kalmayıp bu nedenle özellikle nihai maliyetin düşürülmesi mümkün olmaktadır. Kısaca, dayanıklılığın artırılarak daha büyük kesitlerdeki yapısal tasarımların da yapısal sağlık izleme faaliyetleri “kendiliğinden algılayan” (self-sensing) çimento bağlayıcılı kompozitler ile mümkün görünmektedir.

Kendiliğinden algılama kabiliyeti edinebilmek için çimento bağlayıcılı kompozitlerin içerisine üretimi sırasında katkı olarak ilave edilebilen yöntemler daha az maliyetli yöntemler olarak kabul edilebilirler. Bu tür çok fonksiyonel çimento bağlayıcılı kompozitlerin üretiminde son yıllarda karbon esaslı tanecikler, lifler, filamentler, vb. yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu tür karbon esaslı nano

malzemelerin çimento bağlayıcılı matrislerle birlikte kullanımı polimer, metalik ve seramik matrisli kompozitlere oranla oldukça sınırlı kalmıştır. Bu bölümde, farklı kompozisyon ve özelliklere sahip çimento esaslı karışımların piezo-direnç tepkileri hakkında çalışmalar sunulmuştur. Bu tür kendiliğinden algılayabilme kabiliyetine sahip çok fonksiyonlu çimento bağlayıcılı kompozitler kullanılarak büyük ve küçük ölçekli numunelerde tersinir ve tersinir olmayan (hasar) şekil değiştirmelerin güvenli bir şekilde birbirlerinden bağımsız olarak belirlenmesi konularında yapılmış olan kapsamlı çalışmalar da ayrıca sunulmuştur. Bunların yanında, büyük ölçekli yapısal elemanların donatı varlığındaki hasar durumları kendiliğinden algılama özellikleri çerçevesinde ele alınmıştır.

2.2.1 Farklı Tür Karbon Esaslı Malzemelerin Çimento Bağlayıcılı Kompozitlerdeki Karışım Yöntemleri

Karbon esaslı malzemelerin çimento bağlayıcılı kompozitler üzerinde kendiliğinden algılama ve mekanik performans anlamında verimliliklerini etkileyen iki ana parametre bulunmaktadır. Bunlardan birincisi bu tür nano malzemelerin matrise ilave edildikleri durumda matris içerisinde homojen bir şekilde dağılma yetenekleri, bir diğeri ise matris ile karbon esaslı nano malzemelerin yüzeyleri arasında geliştirdikleri bağ dayanımıdır. Özellikle nano ölçekteki karbon esaslı malzemeler yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahip olmasından dolayı birbirlerini yüksek van der Waals kuvvetleriyle çekip topaklar meydana getirmekte ve bu nedenle bu tür nano taneciklerin farklı sistemler içerisinde dağılım ve birbirlerinden ayrımı zorlaşmaktadır. Bu nedenle, matris içerisinde zayıf dağılımları sonucunda meydana gelen lif kümelenmeleri ve topaklanmaları liflerin donatı ve kendiliğinden algılama amacı için kullanılmasını engelleyerek boşluk veya zayıf nokta olarak kompozitin mekanik performansını olumsuz etkilemektedir (Mendoza ve diğ. 2013). Literatürde yapılmış olan çalışmalarda KNT ve KNL'nin matris içerisine homojen bir biçimde dağılabilmesi için bu tür nano filamentler ultrasonik karıştırıcılar ile farklı tür sürfaktanlar (etanol, akrilik asit, gam arabik, metil selüloz, silis dumanı, sodyum dodesil sülfat, triton X-100) kullanarak sıvı çözelti içerisinde dağıtılmaktadır. Belirli bir enerji ve sonikasyon süresinde, ultrasonik karıştırıcı ile sürfaktanlar kullanılarak sıvı çözeltilerde karıştırılan karbon esaslı nano filamentler çimento bağlayıcılı matris içerisinde homojen bir şekilde dağılım göstermektedirler. Ancak karbon esaslı nano filamentler belirli bir seviyenin ve sürenin

üzerinde sonikasyon enerjisine tabi tutulduklarında nano partiküller daha küçük parçacıklara kırılmaktadır. Ayrıca, bu çalışmalarda kullanılan sürfaktanlar her ne kadar karbon esaslı malzemelerin çimento esaslı kompozitlerde homojen dağılımını sağlasa da bu amaçla kullanılan sürfaktanlar genellikle çimentonun hidratasyon reaksiyonlarını olumsuz etkilemektedir. Ayrıca priz sürelerinde önemli artışlara sebep olmakta ve matrise genellikle ciddi seviyelerde hava sürüklemektedirler. Karbon esaslı malzemelerin sözü edilen çeşitli taze karışımlardaki dağıtma problemlerini gidermek için literatürde başka çalışmalarda mevcuttur (Sobolkina ve diğ. 2012). Konu ile ilgili pratik ve etkili karıştırma yöntemleri nano ölçekteki (karbon nano tüpler, karbon siyahı, nano grafen partikülleri) ve mikro ölçekteki (karbon lifler vb.) malzemeler için uygun olabilecek karıştırma yöntemlerinden biri aşağıda kısaca özetlenmiştir (Al-Dahawi, 2016).

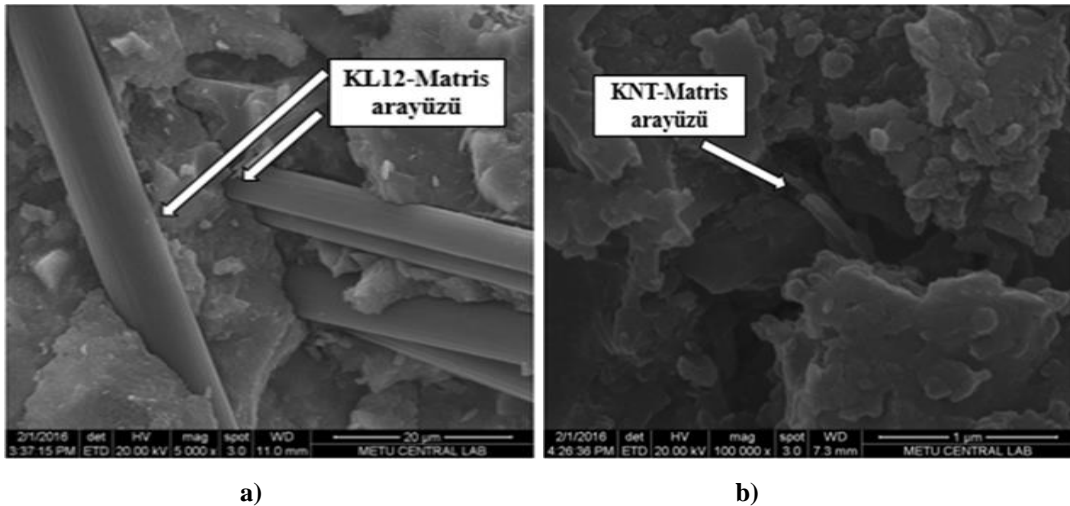
Nano ölçekteki malzemeler için: Nano malzemeler tüm karışım suyu ve süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı ile birlikte 3000 dakika/devirde (dd) 15 dakika boyunca karıştırılmaktadır. Bu işlemden önce, tüm kuru toz malzemelerin harç mikserinde 100 dd'de 10 dakika boyunca karıştırılma işlemi de ayrıca tamamlanmaktadır. Sonrasında, daha önceki aşamada hazırlanmış karışım kuru toz malzemelerin içerisine 10 saniye içerisinde yavaşça ilave edilmekte ve tüm malzemelerin harç mikseri içerisinde karıştırılmasına 300 dd'de 10 dakika boyunca devam edilmektedir.

Mikro ölçekteki malzemeler için: Bu yöntemde, malzemeler kuru toz malzemelerle birlikte (kum, çimento, uçucu kül vb.) harç mikserinde 10 dakika boyunca 100 dd'de karıştırılmaktadır. Mikser 100 dd'de çalışırken karışım suyunun tamamı daha önce karıştırılan malzemelerin üzerine 10 saniye içerisinde yavaşça dökülmektedir. Daha sonra harç mikserinin hızı 300 dd'ye çıkarılarak, süperakışkanlaştırıcı katkının tamamı 30 saniye içerisinde mikser eklenmekte ve karıştırma işlemine 300 dd'de 10 dakika boyunca devam edilmektedir.

2.2.2 Karbon Esaslı Malzemelerin Kritik Doygunluk Sınırı ve Matris ile Arasında Optimum Arayüz Bağ Dayanımı

Karbon esaslı nano filamentlerin kritik kullanım oranı ve/veya bu oranın üzerinde kullanıldıkları durumlarda, kompozit malzemenin kendiliğinden algılama kabiliyetinin matrisin nem ve sıcaklık şartları, kimyasal özellikleri ve çevresel

faktörlerden ciddi oranda etkilenmediği düşünülmektedir. Bu durum, karbon esaslı iletken malzemelerin çimento esaslı kompozit malzemelerde kritik kullanım oranında kullanılmalarının, kompozit malzemenin maruz kalacağı durum ne olursa olsun, kendiliğinden belirli bir olgunluktan sonra algılama davranışını sorunsuz ve tutarlı bir şekilde yerine getirebileceğini göstermektedir. Dolayısıyla daha ileri safhalarda büyük ölçekte tasarlanacak kompozit elemanların daha makul bir şekilde geliştirilmesi ve kompozit malzeme bütününe en pahalı bileşenlerinden biri olan karbon esaslı malzemelerin kullanım miktarının performanstan herhangi bir şekilde ödün vermeden sınırlandırılması mümkün olmaktadır. Daha önce bahsedilen homojen dağılım problemlerinin yanında, karbon esaslı malzeme içeren çimento bağlayıcılı kompozitlerin yaygın olarak üretilmesinin ve uygulanmasının önündeki en önemli engellerden bir diğeri matris ile karbon esaslı malzeme ara yüzü arasında oluşacak yetersiz bağ dayanımı olarak sıralanabilir. Bu problemler, matris içerisinde yer alan karbon esaslı malzemelerin karışımlara homojen olarak dağıtılması ve optimum dozajlarda kullanılması sağlandığında ortadan kalkmaktadır. Böylece karbon esaslı malzemeler mekanik performanstan ödün verilmeden matris ile uyum içinde kullanılmaktadır. Aşağıda verilen Şekil 1’de karbon esaslı malzemelerden 12 mm uzunluğundaki karbon liflerin (KL12) ve karbon nano tüplerin (KNT), en homojen karıştırma tekniği ve kritik doyguluk sınırında kullanılmaları durumundaki matris ile oluşturdukları arayüz görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.1 Karbon lif (a) ve karbon nano tüplerin matrisi ile optimum arayüz bağ dayanımı

2.2.3 Eğilmede Çekme Yüklemelerinin Elastik ve Plastik Bölgelerde Kendiliğinden Algılama Davranışları ile Değerlendirilmesi

Çimento esaslı kompozitlerin yapısal/malzeme sağlık izleme faaliyetlerinin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için yapıların üzerinde meydana gelecek tersinir olmayan hasarların, tersinir birim şekil değiştirmelerden (elastik) doğru bir şekilde ayırmak gerekmektedir. Çünkü birim şekil değiştirme, uygulanan yükün mertebesine göre geri dönüşüp her zaman hasar ile sonuçlanmamaktadır. Mevcut durumda geri dönüşümü olmayan birim şekil değiştirmeler numunenin üzerine bağlanan birim gerinim ölçerlerle (strain-gage) kolaylıkla tespit edilmektedir. Hasar algılama özelliğinin anlaşılabilmesi için tersinir olmayan direnç artışı ile tersinir olmayan birim şekil değiştirme arasında ilişki kurulması gerekmektedir. Karbon esaslı nano filament içeren çimento bağlayıcılı kompozitlerde hasar (tersinir olmayan birim şekil değiştirme) algılaması konusunda yapılan çalışmalarda (i) doğrudan birim şekil değiştirme ölçümü sağlanamadığından, (ii) geri dönüşü olmayan birim şekil değiştirme anlamında güvenilir sonuçlar sağlanamadığından ve (iii) yükü boşaltma sırasında ölçüm yapılamadığından dolayı tam anlamı ile yapısal/malzeme sağlık izlemesi görevinden bahsetmek zor olmaktadır. Ancak son yıllarda yapılan çalışmalar tersinir ve tersinir olmayan birim şekil değiştirmeleri elektriksel ölçümler kullanarak güvenilir bir şekilde birbirlerinden ayırt edilmelerini mümkün kılmıştır (Al-Dahawi ve diğerleri 2017). Bu çalışmada elastik deformasyon bölgesindeki kendiliğinden algılama davranışı ile ilgili yaptıkları çalışmada elektriksel direnç değerlerinin tekrarlı yükler sonucunda sürekli olarak arttığı tespit edilmiştir. Bu sürekli artışın elastik deformasyon bölgesindeki tekrarlı yüklemeler ile karbon esaslı malzemelerin birbirinden uzaklaşması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Yapılabilecek bir diğer yorum ise birbirleri ile temas halinde olmasa da bir iletkenlik yolu yaratan karbon esaslı malzemelerin bu yolun bozulması ile iletkenlik özelliklerinin azalarak 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 oynayabilmektedir. Tekrarlı yüklemeler sonucunda, oransal elektriksel direnç değişim bakımından önemli noktalardan bir diğeri ise, yükleme ve birim şekil değişikliğinin (sehim) söz konusu olduğu durumlarda, karbon esaslı malzemelerin kendi bireysel elektriksel direnç değerlerinin de artma potansiyeline sahip olmalarıdır. 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 mikro çatlakların varlığı olabilir. Bilindiği üzere bu çatlakların genişlik, uzunluk ve sayılarında yüklemenin başlamasıyla beraber artışlar olmaktadır (Mehta ve Monteiro, 2006). Elastik deformasyon bölgesinde nihai dayanımın %30'una ulaşılmasından dolayı, arayüz bölgesindeki mikro çatlak dağılımı yüklemenin boşaltılması ile stabil halini korumuş ve bu durum oransal direnç değişim sonuçlarının tersinir olmamasına yol açmıştır. Benzer şekilde, numunelerin maruz kaldığı deformasyon oldukça düşüktür ve bu durumda yüklenme altında karbon esaslı malzemelerin kendi elektriksel direnç değerleri sürekli olarak artış göstermiş ve yüklemenin boşaltılmasıyla beraber yük değerleri tekrar eski haline dönmemiştir. Bu noktada, elastik deformasyon bölgesindeki yüklenme kapsamında, 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 (karbon nano tüp, nano grafen partikülleri vb.) kıyasla, karbon lif ve karbon siyahı takviyeli numunelerin birim şekil değiştirme sensörü görevi görmeleri açısından çok küçük deformasyon değerlerinde dahi daha üstün performansa sahip olduğunu göstermektedir.

Plastik deformasyon (tersinir olmayan) bölgesindeki kendiliğinden algılama davranışına bakıldığında, kiriş numunelerin gelişen hasara karşı hassas olduğu ve kendiliğinden algılama davranışı gösterebilecekleri belirtilmiştir. Ancak plastik deformasyon bölgesinde karbon siyahından ziyade, karbon nano tüp içeren kiriş numunelerin elektriksel ağırlığın, tekrarlı yüklenme/boşaltma döngüleri sonunda oluşması muhtemel tahribatlara karşı diğer karbon esaslı malzemelere kıyasla daha hassas olduğu ortaya çıkmıştır (Al-Dahawi ve diğerleri 2017). İkinci ve üçüncü yük uygulamaları sonrasında oransal direnç değişim değerlerinde meydana gelen ciddi artışlar da çatlak genişliğinin elektriksel direnç sonuçları üzerindeki etkinliğini göstermektedir (Al-Dahawi ve diğerleri 2017). Ayrıca, karışımlarda karbon lif kullanılmasıyla sehim kapasitesinin diğer karbon esaslı malzemelere kıyasla daha fazla arttığı ve bu durumun sürekliliğin artmasıyla bölgesel çatlak sayısını ve kalıcı oransal direnç değişim miktarını düşürdüğü belirtilebilir. Bu sonuçlar literatürde karbon lif kullanımının sadece elektriksel özellikleri değil aynı zamanda malzemenin eğilme dayanımı, eğilme tokluğu,

çekme dayanımı, süneklik ve kuruma rötresi gibi özelliklerini de iyileştirdiğini ifade eden çalışmalarla da benzerlik göstermektedir (Wen ve Chung, 2007). Bu nedenle, karbon liflerin ucuz ve matris karışımı içerisine homojen olarak daha kolay bir şekilde dağıtılabilmelerinden ötürü avantajlı oldukları belirtilebilir (Al-Dahawi ve diğ. 2016).

2.2.4 Kendiliğinden Algılama Kabiliyetine Sahip Büyük Ölçekli Çimento Bağlayıcı Kompozitler

Literatürde gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde değerlendirmelerin çoğunlukla küçük ölçekli silindirik (Azhari ve Banthia, 2012), kübik (Han ve diğ. 2007) ve prizmatik (Wang ve Chung, 2006) numunelerde yapıldığı görülmektedir. Literatürdeki bu eksikliğin giderilebilmesi için konunun büyük ölçekli elemanlarda daha yoğun şekilde çalışılması gerektiğinden bahsedilebilir. Karbon esaslı malzemelerin karıştırma yöntemleri, kullanım miktarları, matris ile arayüz özellikleri ve mekanik performans özelliklerine ait bilgi birikimi arttıkça büyük ölçekli yapısal elemanların daha ekonomik ve daha üstün çok fonksiyonlu özelliklere sahip olması mümkün olacaktır. Literatürdeki sınırlı sayıdaki çalışmalara bakıldığında, büyük ölçekli karbon lif takviyeli kiriş elemanların elektriksel direnç değerleri, deneyler esnasında yüklenme devam ettikçe liflerin matristen sıyrılması nedeniyle artışa geçmektedir (Yıldırım ve diğerleri, 2018). Bu durumun sebebi sıyrılan liflerle matris arasındaki temasın azalmasıdır. Yıldırım ve diğerleri 2018 yaptıkları çalışmalarda numunelerin üzerindeki yük seviyesinin arttıkça elektriksel direnç değerlerinin de giderek arttığını gözlenmektedir. Yükleme işleminde elastik bölgenin değerlendirilmesinin özellikle kendiliğinden algılayabilen akıllı yapıların tasarlanmasındaki en önemli noktalardan birisi olduğu düşünülmektedir. Bu bölümdeki çimento esaslı kompozitlerin kendiliğinden algılama kabiliyeti ile ilgili genel olarak sonuçlar değerlendirilecek olursa; çok fonksiyonlu çimento esaslı kompozitlerin geliştirilmesinde karbon esaslı malzemelerin karışımlar içerisine homojen olarak ilave edilmesi kendiliğinden algılama performansı için oldukça önemli olduğu belirtilebilir. Bunun yanında, takviye edilen karbon esaslı malzemelerin kullanım miktarlarının kritik bir seviyede tutulması ekonomik, mekanik ve hasar izleme performansı yönünden önem arz etmektedir. Ayrıca tersinir ve tersinir olmayan şekil değiştirmelerin birbirinden ayrı olarak değerlendirilmesinin, kendiliğinden algılayabilen akıllı yapıların tasarlanmasındaki en önemli noktalardan birisi olduğu düşünülmektedir. Son olarak, konu ile artan bilgi

birikimi sayesinde önümüzdeki yıllarda büyük ölçekli kolon/kiriş gibi yapısal elemanların kendiliğinden algılama kabiliyeti performanslarının daha ileri seviyelere geleceği beklenmektedir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Malzemeler

3.1.1 CEM I 42,5R Portland Çimentosu

Deneysel çalışmalarının tamamında ASTM Tip I normal çimentoya benzer standartta CEM I tipi 42,5 R Portland çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Portland çimentosunun özgül ağırlığı 3,06, inceliği (Blaine incelegi) ise $325 \text{ m}^2/\text{kg}$ 'dir. Çimento taneciklerinin makro görüntüsü ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) aracılığıyla elde edilen mikro morfolojisine ait görüntüsü ise Şekil 3.1-a ve Şekil 3.1-b'de, lazer kırınım aracılığıyla elde edilen tanecik boyutunun dağılım grafiği ise Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 CEM I 42,5R Portland çimentosunun (a) dijital kamera ve (b) SEM görüntüsü

3.1.2 F-sınıfı Uçucu Kül (UK)

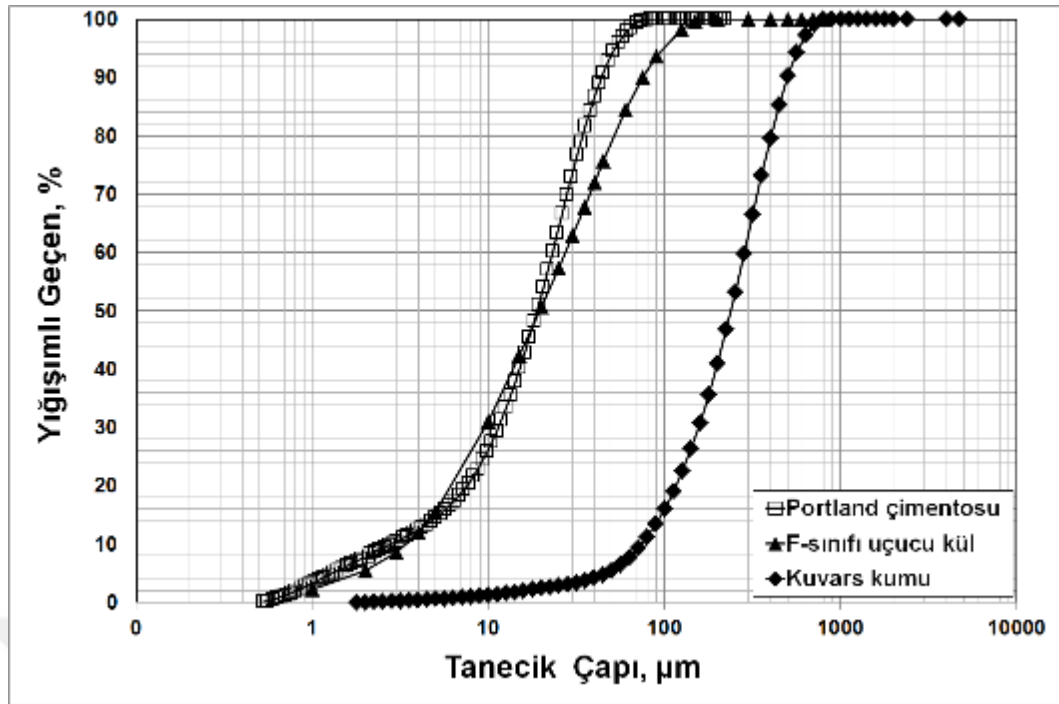
ASTM C618 (2003) standardına göre uçucu küller, F ve C tipleri ile sınıflandırılmaktadırlar. F sınıfı uçucu küller, atık bitümlü kömürden elde edilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ içeriği %70'den daha fazla olan uçucu küllerdir. F sınıfı uçucu küllerde CaO içeriği %10'un altındadır ve bu nedenle düşük kireçli uçucu küller olarak da isimlendirilmektedirler. F-sınıfı uçucu küller puzolanik özelliklere sahip malzemelerdir. C-sınıfı uçucu küller ise linyit ya da yarı-bitümlü kömürden elde edilen

ve içerik olarak $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %50'den daha fazla olan puzolanik malzemelerdir. C-sınıfı uçucu küllerin CaO içeriğinin %10'un üstünde olması nedeniyle yüksek kireçli uçucu küller olarak da adlandırılabilir. Bu nedenle C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğın yanında bağlayıcı özelliklere de sahiptirler. Tez çalışmalarında yer alan deneylerin tamamında F sınıfı uçucu kül (UK) tercih edilmiştir. Çalışmalar sırasında deneylerde kullanılmasına karar verilen Portland çimentosunun tedarik edildiği firma tarafından elde edilen fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

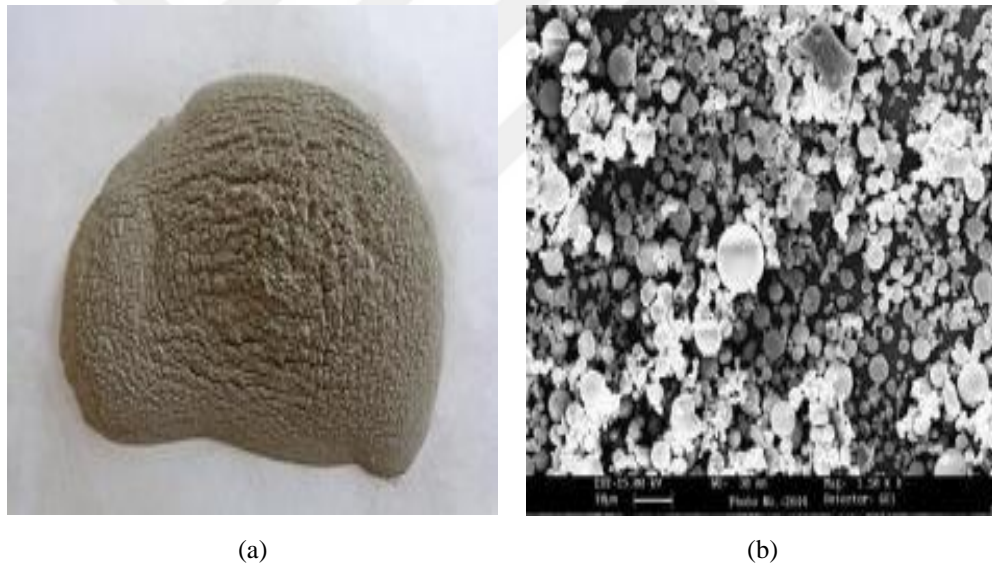
Çizelge 3.1. Portland çimentosu ve F-s malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Kompozisyon, (%)	PÇ	UK	Kuvars kumu
SiO₂	20,77	60,78	99,79
Al₂O₃	5,55	21,68	0,06
Fe₂O₃	3,35	5,48	0,02
MgO	2,49	1,71	0,01
CaO	61,43	3,48	0,02
Na₂O	0,19	0,74	0,02
K₂O	0,77	1,95	0,01
Kızdırma Kaybı	2,20	1,57	0,07
SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃	29,67	87,94	99,87
Fiziksel Özellikler			
Özgül Ağırlık	3,06	2,10	2,60
Blaine İnceliği (m²/kg)	325	269	-

Çalışmalarda kullanılmak için tercih edilen F-sınıfı uçucu kül (UK) %3,48 kireç oranına sahip olup, Sugözü Termik Santrali'nden tedarik edilmiştir. Deneylerde yer alan F sınıfı uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Şekil 3.2'de UK taneciklerinin boyut dağılımları sunulmuştur. Şekil 3.3'te ise, uçucu küllerin dijital kamera ile çekilmiş görüntüsü ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) altındaki görüntüleri verilmiştir. Şekil 3.3'ten de belirgin olarak görüleceği üzere F sınıfı uçucu kül tanecikleri oldukça pürüzsüz ve küresel yüzeylere sahip puzolanik malzemelerdir.



Şekil 3.2. Portland çimentosu, F-sınıfı uçucu kül ve kuvars kumunun tanecik boyut dağılımları



Şekil 3.3. F-sınıfı uçucu kül taneciklerinin (a) dijital kamera ve (b) SEM görüntüsü

3.1.3 Kuvars Kumu

ECC malzemesinin mikro-mekanik esaslı tasarım tekniğine göre, çimento esaslı kompozit malzemesinin çoklu mikro çatlakları oluşturarak şekil değiştirme sertleşmesi yani sünek davranış göstermesi amacıyla, matrisin kırılma tokluğunun düşük seviyelerde tutulması hayati önem arz etmektedir. Karışımlarda yer alan kumların tane boyutu ve kullanım miktarının artması halinde matrislerin kırılma tokluk seviyeleri de önemli ölçüde artmaktadır. Bu nedenle, ECC karışım tasarımlarında yer alması gereken

kumların tane boyutu ve miktarında bazı kısıtlamalara gidilmektedir. Bu nedenle, ECC malzemesi genel anlamda ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 110 μm ve maksimum tane boyutu 250 μm olan kum ve kum/bağlayıcı malzeme oranı 0,36 alınarak başarılı bir şekilde üretimleri yapılabilir. Şahmaran ve diğerleri (2009) tarafından gerçekleştirilen araştırmalarda yüksek hacimlerde uçucu kül gibi endüstriyel atık ürünlerin kullanılmasının matris kırılma tokluğu azaltma anlamında işe yaradığı bilinmektedir. Ayrıca, yüksek hacimlerde uçucu kül kullanımı sayesinde kum boyutu ile birlikte kullanım oranlarının da değiştirilmesi belirli bir dereceye kadar mümkün olmuştur. Bu sebeple deneysel çalışmalar sırasında ECC karışımlarının üretiminde kullanılmak için ortalama tane büyüklüğü yaklaşık 200 μm olan ve en büyük tane çapı ise 400 μm olan köşeli yapıda ince kuvars kumu tercih edilmiştir (Şekil 3.4). Mikro-kuvars kumunun su emme kapasitesi %0,3, özgül ağırlığı ise 2,60'tır. Kuvars kumunun tedarikçi firma tarafından verilen kimyasal kompozisyonu daha önce Çizelge 3.1'de, tanecik boyutunun dağılım eğrisi ise Şekil 3.2'te gösterilmiştir.



a) Kuvars kumu



b) karışımlara eklenmesi

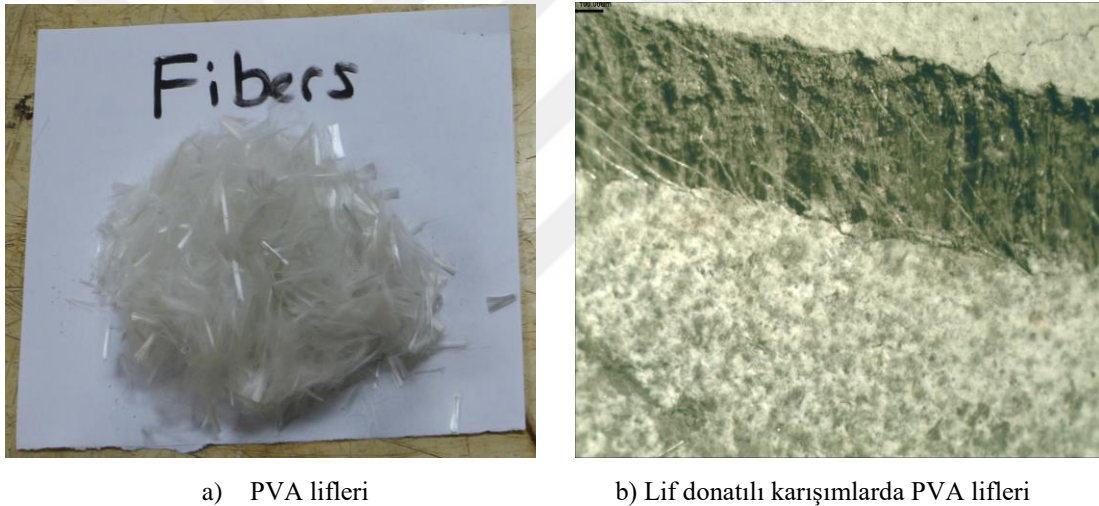


c) Tedarik edilen kuvars kumu

Şekil 3.4 Deneylerde kullanılan mikro-kuvars kumu (a,b,c)

3.1.4 Polivinilalkol (PVA) Lifleri

ECC malzemesinin gösterdiği yüksek süneklik derecesinin ana nedeni, mikro-mekanik esaslı dizaynı ile ilk çatlak oluşmasının ardından şekil değiştirme sertleşmesi özelliği göstermesidir. Mikro-mekanik modellerle mikroyapı, istenen mekanik özelliklere ulaşılması için en uygun duruma getirilmektedir. Böylece, lif, matris ve arayüzün bir aradaki etkileşiminin kontrolü ile yüksek performanslı çimento bağlayıcılı malzemeler elde edilmektedir. Mikro-mekanik dizayn sırasında liflerin mekanik ve fiziksel özellikleri gibi parametrelere dikkat edilmektedir. Tez çalışması kapsamında, ECC malzemesinin üretiminde literatürde yer alan çalışmalarda başarılı bir şekilde uygulanmış ve mikro-mekanik esaslı tasarım neticesinde geliştirilmiş polivinilalkol (PVA) lifleri kullanılmıştır (Şekil 3.5).



a) PVA lifleri

b) Lif donatılı karışımlarda PVA lifleri

Şekil 3.5 ECC karışımlarında kullanılan PVA liflerinin görüntüsü (a,b)

PVA liflerinde dikkat çeken en önemli özellik yüzeylerinin ağırlıkça %1,2 içeriğinde özel bir su itici (hidrofobik) yağ ile kaplanmış olmasıdır (Şekil 3.5). Bu özellik ile karışım (lifsiz ECC) ve lif arasında bulunan ara yüzden optimum özellikler elde edilebilmektedir. Tez içerisindeki deneysel çalışmalarda kullanılan PVA liflerinin mekanik ve geometrik özellikleri Çizelge 3.2’de detaylı olarak gösterilmektedir.

Çizelge 3.2 ECC üretiminde kullanılan PVA lifinin mekanik ve geometrik özellikleri

Lif Türü	Nominal Dayanım (MPa)	Görünen Dayanım (MPa)	Çap (μm)	Boy (mm)	Elastisite Modülü (GPa)	Kopma-Uzama Oranı (%)	Özgül Ağırlık
PVA	1620	1092	39	8	42,8	6,0	1,3

3.1.5 Nano ve Mikro Malzemeler

Son yirmi yıldır nano teknoloji alanında gerçekleştirilen araştırmalar yüksek fonksiyonlu malzemelerin geliştirilmesinde öncülük etmiştir. Kısaca nano teknolojiyi çeşitli malzemelerin nano ölçekte (metrenin milyarda biri mertebesinde) şekil ve boyutları ile kontrol edilmesi ve buna uygun olarak tasarım ve imalatının yapılması şeklinde tanımlamak mümkündür. Atom seviyesinde işlenmiş maddelerin araştırmacıların işe yarar şekilde kullanması için nanometre ölçeğindeki maddelerin sayıca fazla olması gereklidir. Ölçek anlamında nanometre yan yana 3-5 atom ile meydana gelirken, yaklaşık 80-1000 atomun bir arada oluşturduğu malzemeler nano teknolojik malzemeler olarak isimlendirilmektedir. Hali hazırda nano teknoloji uygulamaları 5-150 nm boyutlarındaki uygulamalarda, hesaplamalarda ve işlemlerde kullanılmaktadır. Nano boyutlardaki sistemlerin davranışı fiziksel olarak aynı maddenin makro boyutundaki davranışından oldukça farklıdır. Bu durum dünya genelinde çok sayıda araştırmacı tarafından nano teknoloji ürünlerinin geliştirilmesi sağlanarak malzemelerin istenen fonksiyonları daha verimli duruma getirilmiştir. Çeşitli sektörlerde olduğu gibi inşaat endüstrisinde de faydalanılan nano malzemeler, beton özelliklerinin iyileştirilmesi için büyük potansiyele sahiptir. Tez kapsamında; farklı nano ölçekteki malzemelerin üstün fiziksel yeteneklerinden faydalanılarak ECC karışımlarının kendiliğinden iyileşme yeteneği daha kaliteli, kararlı ve daha hızlı hale getirmek ve kendiliğinden algılama kabiliyetini ise daha hassas ve tutarlı olarak kombine etmek için ECC karışımları nano malzemeler ile modifiye edilmiştir. Bu malzemelerin karakteristik özelliklerini detaylı olarak incelemek için bu kısımda tez kapsamında kullanılan iki farklı nano malzemeye (NS ve KNT) ve mikro ölçekte kullanılan karbon liflere (KL) ait özellikler verilmiştir.

3.1.5.1 Karbon Nanotüpler

Nanoteknoloji alanı, birden fazla fonksiyonu içeren akıllı malzemelerin geliştirilmesinde çok disiplinli bir takım araştırmaları gerektirmektedir. 1991 yılında karbon nanotüplerin (KNT) Iijima tarafından keşfedilmesi ile bu tür malzemelerin üstün özelliklerinin farkına varılması sağlanmıştır (Iijima, 1991). Günümüzde karbon nanotüp malzemeleri, çeşitli bilimsel araştırmada yaygın bir şekilde yer almıştır. Karbon nanotüplerin gelişmiş fiziksel özellikleri olarak yüksek dayanım ve elastik

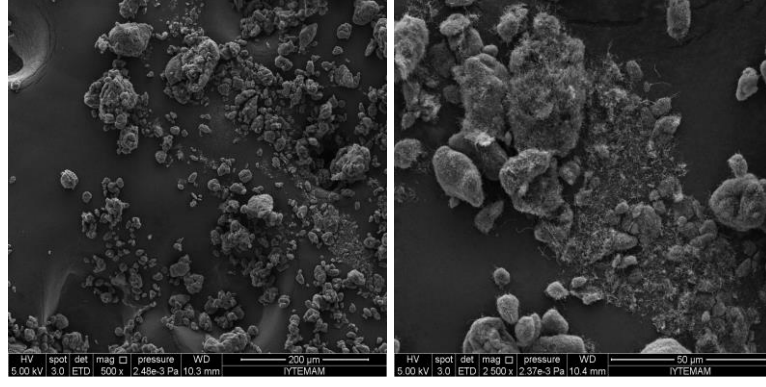
modülü (yaklaşık 1.8 TPa'dır) (Meyyappan, 2005) ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, karışım ile yüksek kenetlenme ve yüksek deformasyon kapasitesi sergilemektedir. Bunun yanında sünek yapısı, mükemmel yakın elektriksel iletkenlik özellikleri gibi nitelikler sıralanabilir (Gopalakrishnan ve diğerleri, 2011). Karbon nanotüpler tek ya da birkaç film tipinde yuvarlanmış ve pürüzsüz küçük tüpler şeklindedirler (Makar ve diğerleri, 2003). Yuvarlak tek tabaka şeklinde bulunan karbon nanotüpler tek duvarlı karbon nanotüpler olarak isimlendirilirken, birden fazla yuvarlak tabaka şeklinde bulunan karbon nanotüpler çok duvarlı karbon nanotüplerdir. Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüplere ait görüntüler Şekil 26 ve Şekil 27'de verilmiştir. Tez çalışmasında çok duvarlı karbon nano tüpler kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda yer alan çok duvarlı karbon nanotüplerin elektriksel iletkenliği ile birlikte çeşitli önemli özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3 Çok duvarlı karbon nanotüplerin özellikleri

Oda sıcaklığındaki Özellikleri	ÇDKNT
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	1,8
Elastik Modülü (TPa)	1
Dayanım (GPa)	10-60
Elektrik İletkenlik (Siemens/cm)	10 ² -10 ³
Isıl İletkenlik (Watt/metre.Kelvin)*	Yaklaşık 6000
Termal Genleşme Katsayısı	İhmal edilebilir

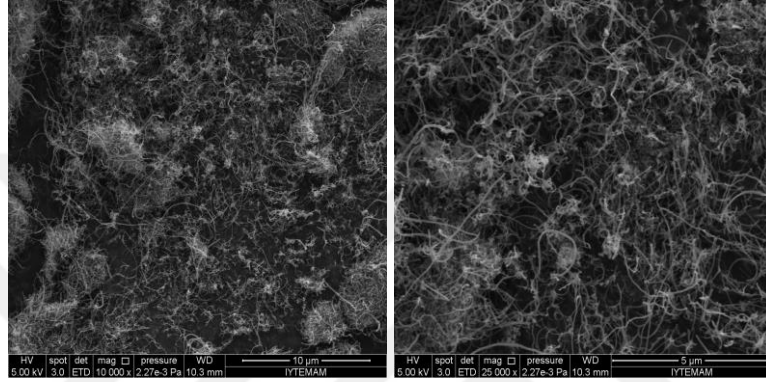
*1 W.m: 1 Kelvin'in 1 metrede uzaklığındaki ısı farkı

Son yıllarda, karbon nanotüplerin sentezlenmesi ile ilgili tekniklerinin gelişmesi sayesinde KNT fiyatları ciddi derecede düşmüştür. KNT'lerin yüzey alanları çok geniş yer kaplamaktadır. Yaklaşık olarak 1 gram KNT, neredeyse 200-300 m²'lik yer kaplayabilmektedir. Giderek azalan KNT maliyetleri ve KNT'lerin çeşitli alanlardaki kullanımlarındaki işlemlerin azalması, bu malzemenin büyük yapıların inşasında kullanımını mümkün kılabilir. Şekil 3.6'da deneysel çalışmalarda kullanılan endüstriyel olarak da satışı yapılan çok duvarlı karbon nanotüplerin farklı ölçeklerde elde edilen taramalı elektron mikroskobu görüntüleri gösterilmektedir.



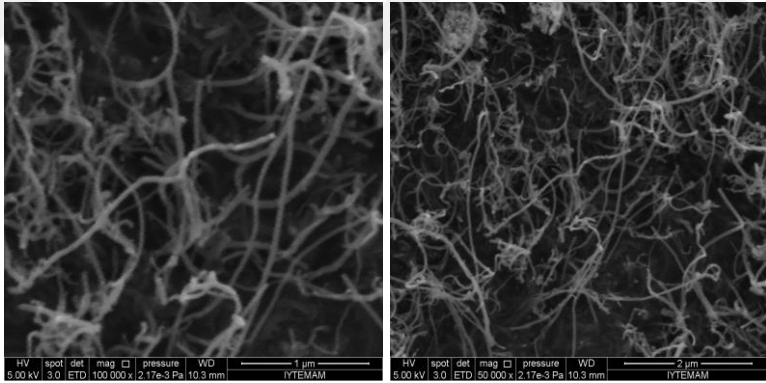
a) 200 μm

b) 50 μm



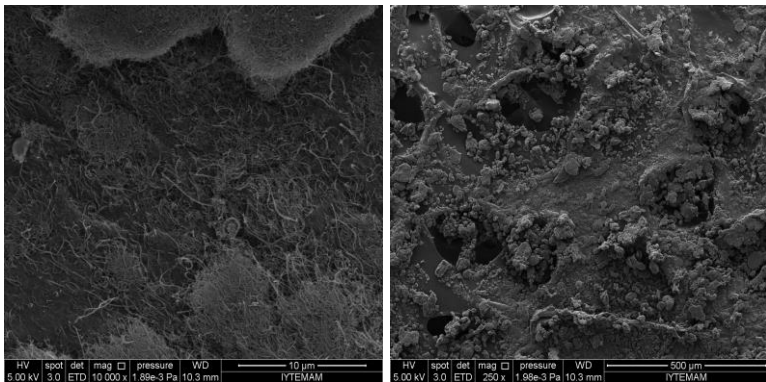
c) 10 μm

d) 5 μm



e) 1 μm

f) 2 μm



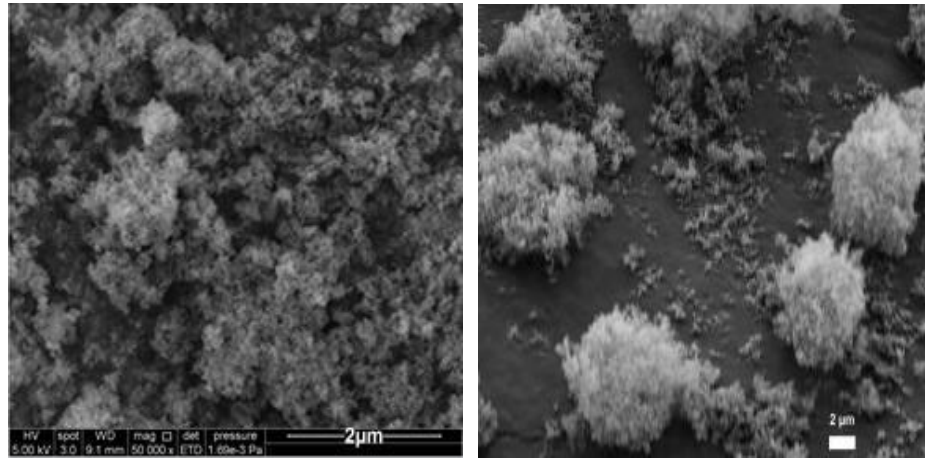
g) 10 μm

h) 500 μm

Şekil 3.6 Farklı ölçeklerde alınan karbon nanotüplerin taramalı elektron mikroskobu altındaki görüntüleri

3.1.5.2 Nano Silis

Çimento esaslı karışımlarda son yıllarda hızla yer almaya başlayan silis içerikli malzemelerden mikro seviyede silis dumanı ve tez çalışmasında da kullanılan nano seviyedeki NS, çimento hidratasyonunu tetikleyerek puzolanik aktiviteyi hızlandırmaktadır. Silis dumanı ve/veya nano silis kullanılması kalsiyum hidroksiti (CH) çok hızlı bir şekilde tüketerek hızlı reaksiyonlar oluşturmaktadır. Bu reaksiyonlar neticesinde kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) ve kalsiyum-alümina-hidrat (C-A-H) ürünleri meydana gelmektedir. Yapılan araştırmalarda erken yaş dayanım gelişimleri daha az bilinen yüksek hacimde uçucu kül muhteva eden karışımların bile erken yaş sürelerindeki dayanım kazanma hızı artmıştır (Zhang ve Islam, 2012). Literatürde mevcut kısıtlı araştırmaların çoğu çimento esaslı karışımların basınç dayanımı üzerinde araştırmaları içermektedir. Bunlara ilave olarak, nano-SiO₂ aracılığıyla nano taneciklerin geniş yüzey alanlarından ve yüksek aktivitesinden faydalanılarak uçucu küllü çimento karışımlarında ve C₃S'in hidratasyon reaksiyonlarında artış kaydedilmektedir. Ayrıca NS'in silis dumanından dayanım anlamında daha fazla katkı yapmaktadır. Nano silis, mikro yapıyı değiştirmek için yalnız dolgu malzemesi olarak değil aynı zamanda yüksek aktivasyonu olan bir puzolanik malzeme olarak reaksiyonları devam ettirmektedir. Söz konusu üstün fonksiyonel katkılar, nano silis partiküllerinin çimento esaslı karışımlarda yer almasında büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Nano silis partiküllerinin daha çok literatürde çimento esaslı karışımların mühendislik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla kullanıldığı bilinmektedir. Bu tez çalışmasında yukarıda bahsedilen bu özelliklere ilaveten, kendiliğinden iyileşen ECC karışımlarının iyileşme derecesi ve kalitesinin artması amacıyla NS kullanılmıştır. Aşağıda verilen Şekil 3.7'de çalışmalarda yer nano silika taneciklerinin SEM altındaki görüntüleri sunulmuştur. NS'in kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özelliklerine ait bilgiler Çizelge 3.4'te verilmiştir.



a) Farklı ölçeklerde NS

b) NS tanecikleri

Şekil 3.7 NS taneciklerinin taramalı elektron mikroskobu altındaki görüntüleri

Çizelge 3.4 NS'in kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Kompozisyon, %	NS
SiO ₂	99,17
Al ₂ O ₃	0,38
Fe ₂ O ₃	0,02
MnO	0,02
MgO	0,21
CaO	0,00
Na ₂ O	0,09
K ₂ O	0,00
TiO ₂	0,00
Kızdırma Kaybı	-
Fiziksel Özellikler	
Tane çapı	15 nm
Safılık	% 95
BET (m ² /g)	300

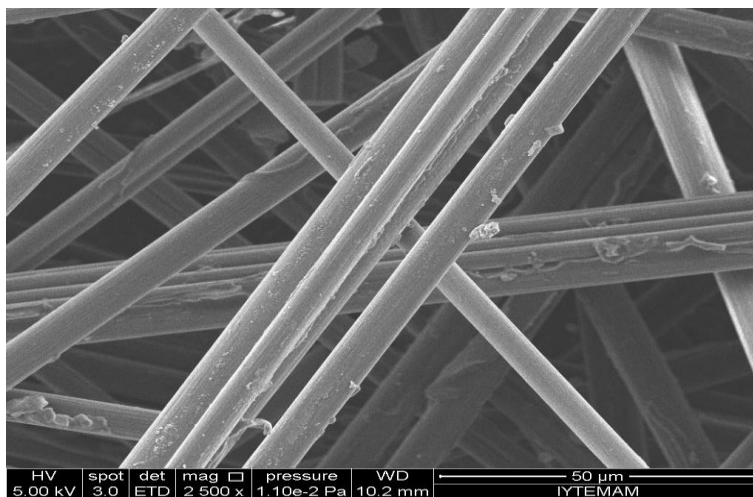
3.1.5.3 Karbon Lif

Çimento esaslı karışımlara kendiliğinden algılama yeteneğinin kazandırılması, karbon esaslı nano/mikro filamentlerin üstün mekanik ve fiziksel özellikleri ile mümkün olmaktadır. Farklı karbon içerikli malzemelerin çok fonksiyonlu çimento esaslı kompozitlerdeki elektriksel özelliklerinin mühendisliği, yapısal sağlık izleme uygulamaları için temel basamak oluşturmaktadır. Bu sebeple çimento bağlayıcılı numunelerin elektriksel özelliklerini incelemek için karbon lifler (12 mm uzunluğunda) ve karbon nanotüpler kompozitlerin üretiminde yer almıştır. Kompozit numunelerin

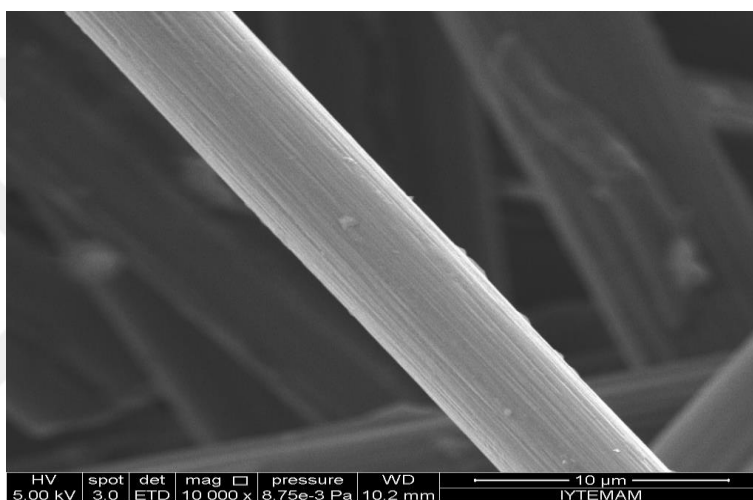
tasarımında karbon içerikli nano/mikro malzemelerin (KNT ve KL) kullanımı miktar olarak sınırlı tutulmuştur.

Karbon lifler inşaat alanındaki araştırmalarda giderek yaygın bir şekilde rastlanılan lifler olmaya başlamıştır. Bu malzeme lif olarak mevcut durumdaki en hafif malzemelerden biridir. Çelik liflerden yaklaşık beş kat daha fazla mukavemeti, aynı şekilde çelikten liften yaklaşık üç kat daha az ağırlığa sahip olmasıyla karbon lifler uzay ve havacılık alanında, askeri endüstride, inşaat mühendisliği ve araba yarışları gibi çok farklı alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bunun ilaveten, karbon liflerin düşük yoğunluktaki özelliği ile beraber dayanım/ağırlık oranının çok fazla olması sayesinde farklı uygulamalara avantajlar sunmaktadır. Karbon lifler; alüminyum, polimer ve çelik esaslı liflere göre sıcak-soğuk hava döngülerinden en az etkilenen liflerdir. Karbon lifler yapı olarak kristalize, amorf ve kısmi kristalize halde olabilmektedir. Kristalize şeklinde bir araya gelen karbon atomlarının iki boyutta, x ve y ekseninde, bal peteği şeklini benzer dizildiği bilinmektedir (Chung, 2010).

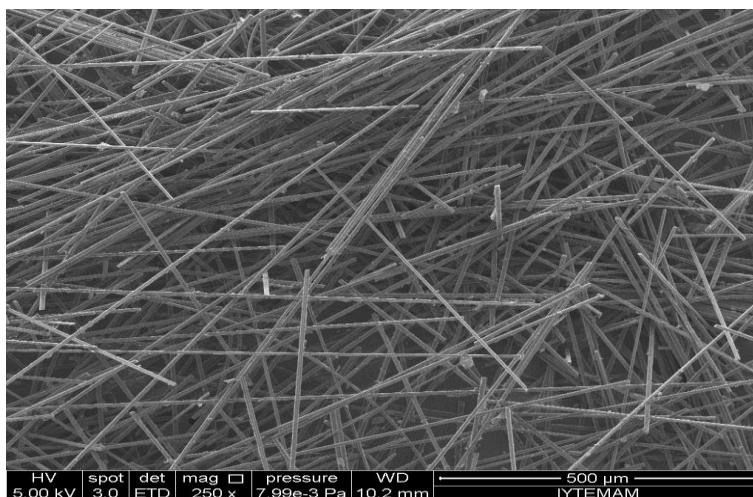
Karbon lifler, üstün çekme mukavemet özelliklerinin yanı sıra mükemmel bir iletken malzeme olmasıyla da bilinmektedir. Karbon lifler insan saçı tel kalınlığından çok daha ince boyutlardadır. Şekil 3.8’de karışımlarda kullanılan karbon liflerin SEM görüntüleri verilmiş olup görüntüler karışım yöntemleri uygulanmadan önce dağılmamış halde bulunan karbon lifleri göstermektedir. Normalde ipliksi bir yumuşaklıkta olan lifler kolayca istenilen şekle getirilebilmektedir. Ancak farklı işlemler ile (özel epoksi reçinesi gibi) muamele edilince rijit bir özelliğe kavuşabilmektedir. Birbirinden ayrılmamış (dağılmamış) şekilde bulunan karbon lifler epoksi, fenol, poliester gibi sentetik maddeler ile kompozit malzeme üretiminde kullanılmaktadır. Reçineler ile birlikte bağ yapmak için uygun olmayan karbon liflerin yüzey özellikleri % 1-5 oranında su içeren azot ortamında yaklaşık 1400-1500°C’de ısıl işleme tabi tutulmaktadır. Isıl işlem ile beraber lif yüzeyi daha aktif hale gelerek lif özelliklerinin bozulması en alt düzeye indirilmektedir. Aynı zamanda karbon liflerin özgül yüzeyinde de büyük artış olmaktadır. Söz konusu şekilde birbirine yapıştırılarak üretilen dağılmamış karbon lifler uzay ve uçak endüstrisi alanında, ortopedik malzeme kullanımında, spor malzemelerinde ve otomotiv sektöründe yaygın olarak yer almaktadır.



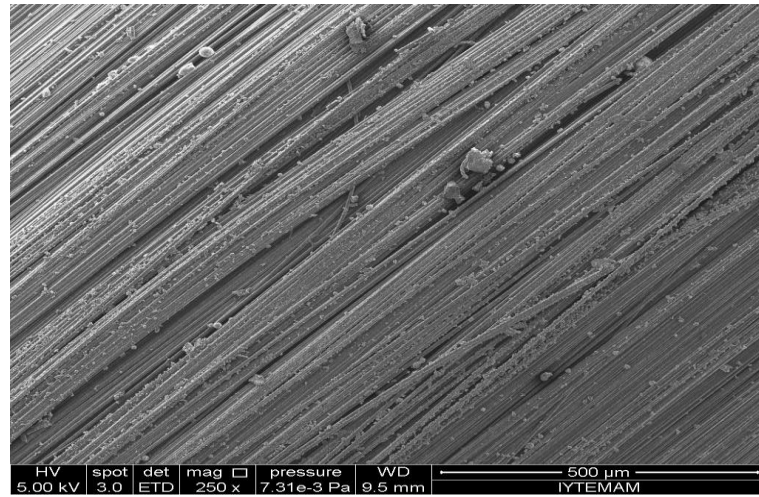
a) 50 μm



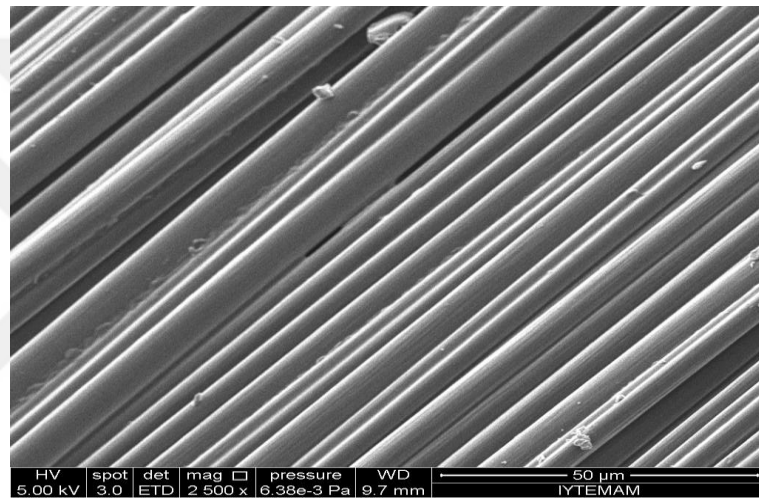
b) 10 μm



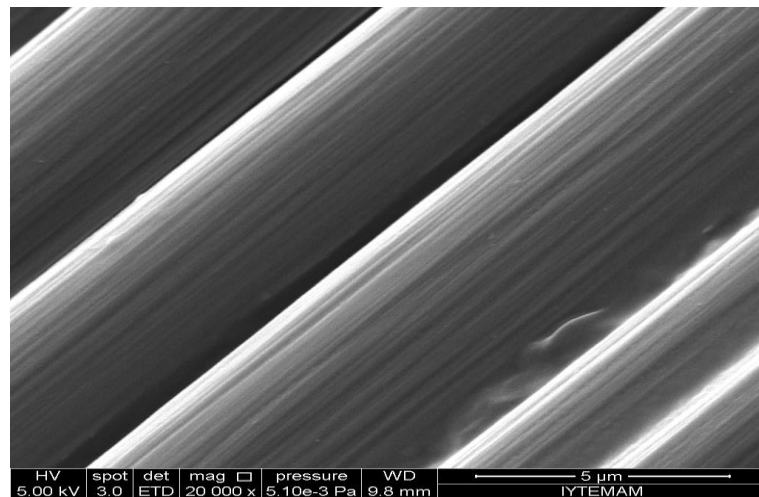
c) 500 μm



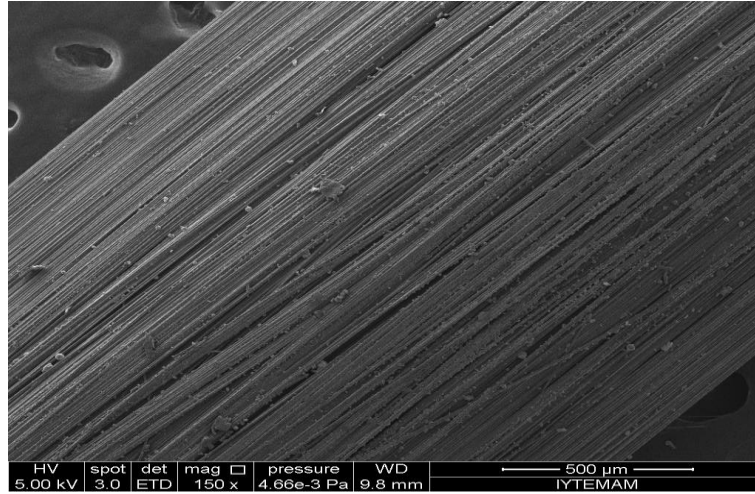
d) 500 μm



e) 50 μm



f) 5 μm

g) 500 μ m

Şekil 3.8 Karışımlarda kullanılan karbon liflerin farklı büyüklüklerdeki SEM görüntüleri

Şekil 3.8'deki görüntülerde görüleceği üzere, taramalı elektron mikroskobu (SEM) aracılığıyla araştırmalar sırasında kullanılan karbon liflerden yüksek büyütme ve yüksek çözünürlüklü görüntüler alınmıştır. Bu teknik sayesinde düşük büyütme ve çok yüksek büyütme (yaklaşık x300.000 ya da daha fazla) kadar morfolojik, yapısal ve elementel bilgiler alınabilmektedir. Yürütülen tez çalışmasında, çimento esaslı karışımlarda kullanılan karbon esaslı malzemelerden (KNT ve KL) birisi olan karbon lifler 12 mm uzunlukta karışımlarda yer almıştır. Karbon lifler, AKSACA karbon lif ürün ismiyle (AKSACA Chopped Fiber – AC 0101) DowAksa şirketinden satın alınmıştır. Karbon lifin mekanik özellikleri ilgili standartlarla birlikte Çizelge 3.5'te sunulmuştur.

Çizelge 3.5 Karbon liflerin (KL) mekanik özellikleri

Özellikler	Değer	Birim
Çekme gerilmesi	4200	ISO 10618
Çekme modülü	240	ISO 10618
Uzama oranı	1,8	ISO 10618
Özgül ağırlık	1,76	ISO 10119

3.1.5.4 Yüksek Oranda Su Azaltıcı Katkı

Üretilen çimento bağlayıcı kompozitlere miktarına numunelerin işlenebilirliğine göre karar verilen süper akışkanlaştırıcı (yüksek oranda su azaltıcı katkı - YOSAK) dökülmüştür. Bu katkı, üretimi BASF Yapı Kimyasalları tarafından

üretilmekte olan bir kimyasal katkı olup MasterGlenium 51 ticari ismiyle piyasada bulunmaktadır (Şekil 3.9). Üretilen çimento bağlayıcı kompozitlerde miktarına, kompozitlerin işlenebilirliğine göre karar verilmiştir. Söz konusu süperakışkanlaştırıcı, polikarboksilik eter esaslıdır ve yüksek oranda su azaltmaktadır. Betonda kıvam kaybının önlenmesine, yüksek dayanım ve dayanıklılığa gereksinim duyulan hazır beton endüstrisi için geliştirilmiştir. Yaklaşık %40 oranında katı madde içermekte ve özgül ağırlığı yaklaşık 1,1'dir.



Şekil 3.9 Karışımlarda kullanılan yüksek oranda su azaltıcı katkı (YOSAK)

3.2. ECC Karışımlarının Tasarlanması

Kararlı, güvenilir ve kaliteli bir şekilde kendiliğinden iyileşme özelliklerini geliştirmek amacıyla çimento esaslı karışımları nano ölçekte modifiye ederken bireysel olarak malzeme özelliklerinin kapsamlı olarak anlaşılması gerekmektedir. Böylece karışımları istenen amaca yönelik olarak dizayn mümkündür. Bu nedenle geliştirilmesi “2. Bölüm Kaynak Araştırması” bölümünde açıklandığı üzere şekil değiştirme sertleşmesi gösteren çimento esaslı kompozitler, tez çalışmasının bütününde esas alınmıştır. Bu ana karışım tipine bağlı olarak üretilen tüm karışımlarda su / bağlayıcı malzeme oranı ve uçucu kül – Portland çimentosu oranı sırasıyla 0,27 ve 1,2 seviyesinde sabit tutulmuştur. Karışımlar içerisinde kullanılan nano malzeme tipi ve YOSAK miktarı hariç olmak üzere, karışımlardaki diğer tüm bileşenlerin miktarları sabittir. Literatürde yapılan diğer çalışmalarla deney sonuçlarını daha kolay karşılaştırabilmek amacıyla karışım oranları literatürle benzer tutulmuştur (Şahmaran ve Li, 2009).

3.2.1 Nano ve Mikro Ölçekteki Malzemelerin Karışımlara Eklenmesi

Önceki bölümlerde verilen standart ECC karışımlarının en iyi şekilde nano malzemelerle modifiye edilebilmesi için NS ve KNT ile deneme karışımları üretilmiştir. Deneysel çalışmalarda nano malzemelerin etkili kullanım oranları ile daha önceki tecrübelerle dayanılarak bir takım varsayımlarda bulunulmuştur (Al-Dahawi ve diğerleri, 2016; Yeşilmen ve diğerleri, 2015). Ancak, tez kapsamında aynı anda bir karışım içerisinde nano ölçekte iki tip malzemenin kullanılması (KNT ve NS), önceki tecrübelerle kıyasla bir ilk olduğundan, bu noktada gerekli kontrollerin esas deneyler yapılmadan gerçekleştirilmesinin gerekli olduğu düşünülmüştür.

Daha önceki kısımlarda tartışıldığı üzere, numunelerin kendiliğinden iyileşme kabiliyetinin üzerinde nano malzeme miktarının etkisi oldukça fazla olacaktır. Ayrıca, nano malzemeler miktar olarak mekanik, durabilite ve kendiliğinden iyileşme mekanizmalarının yanında ekonomik bir kriter olarak da değerlendirilmelidir. Bu sayede ön deneyler ile optimum nano malzeme kullanım miktarı tespitinde maliyet etkin bir şekilde dikkate alınmıştır. Çimento esaslı sistemlere kazandırılması amaçlanan fonksiyonların ilk şartı nano malzemeleri en homojen şekilde matrise dağıtmaktır (Al-Dahawi ve diğerleri, 2016). Bu nedenle bu tür malzemelerin geleneksel beton malzemeleri ile karıştırılma yöntemleri çok önemlidir. Çünkü mevcut araştırmalara göz atıldığında karbon esaslı malzemelerin çimento esaslı kompozitlerin üretilmesindeki en önemli engel bu tip malzemelerin aşırı küçük boyutlarından dolayı çimento esaslı matrislerin içerisindeki homojen dağılımlarıdır. Nano ölçekteki karbon malzemeler çok yüksek yüzey alanı/hacim oranından dolayı taneler arası yüksek van der Waals kuvvetlerine maruzdurlar. Bu durum taneciklerin birbirini çekip topaklar meydana getirmesine neden olmaktadır ve nano taneciklerin çimento esaslı karışımlardaki dağılımları zorlaşmaktadır. Matris içerisindeki zayıf dağılımları ile oluşan lif kümelenmeleri liflerin donatı elemanı ve kendiliğinden algılama amacı ile kullanılmasını engellemektedir. Bunun yanında matris içinde boşluk veya zayıf bölgelere sebep olarak kompozitin mekanik özelliklerini kötüleştirmektedir. Farklı karışımlarda nano malzemelerin homojen bir şekilde dağıtılması için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Ancak bu yöntemler, her zaman her karışımda kararlı bir dağılım göstererek olarak olumlu sonuçlar vermemektedir. Örneğin NS ve KNT'nin homojen bir şekilde karışıma ilavesinden önce solüsyon içerisinde dağılmasını sağlayan çeşitli

sümfaktanlar, su ile çimento arasındaki reaksiyonları olumsuz bir şekilde etkilemektedir. Bunun yanında çeşitli sümfaktanlar, matrise önemli miktarda hava sürüklemekte ve priz sürelerini geciktirmektedir. Tez sahibinin karbon nanotüpler için yüksek lisans çalışmasında geliştirmiş olduğu karıştırma yöntemi deneysel çalışmalarda takip edilmiştir (Öztürk, 2015). Nano silika için ise literatürdeki bir diğer çalışmada yer alan karıştırma yöntemi takip edilerek gerçekleştirilmiştir (Yeşilmen ve diğerleri, 2015).

3.2.1.1 Karbon Nanotüplerin Karışımlara Eklenmesi

Karakteristik özellikleri 3.1.5.1’de detaylı olarak verilen KNT’ler, ECC karışımlarına aşağıdaki karıştırma sırası uygulanarak ilave edilmiştir;

Karbon nanotüpler, tüm karışım suyu ve YOSAK ile beraber yüksek hızda karışım yapabilen el karıştırıcısı aracılığıyla 3000 dd’de (devir/dakika) 15 dakika süresince karıştırılmıştır. Bu işlem den önce, tüm kuru toz malzemeler (Portland çimentosu, uçucu kül ve silis kumu) harç mikserinde 100 dd’de 10 dakika süresince ayrı olarak karıştırılmıştır. Daha sonra, bir önceki aşamada tamamlanan karışım kuru toz malzemelerin üzerine 10 saniye süresince yavaşça ilave edilmiştir. Ardından hazırlanan harç mikserde 300 dd’de 10 dakika süresince karıştırılmaya devam edilmiştir. En son aşamada, PVA lifleri taze karışıma ilave edilmiştir ve hazırlanan nihai karışım yine yüksek hızda (300 dd’de 10 dakika) fazladan üç dakika daha karıştırılmıştır. KNT’lerin daha önce geliştirilen en iyi karıştırma yöntemine ilişkin görüntüler Şekil 3.10’da verilmiştir.



a) YOSAK ve KNT



b) karıştırma



Şekil 3.10 Karbon nano tüp içeren çimento bağlayıcılı kompozitlerin üretilmesi

3.2.1.2 Nano Silislerin Karışımlara Eklenmesi

Detaylı karakteristik özellikleri Bölüm 3.1.5.2’de açıklanan nano silikaların ECC karışımları içerisinde homojen bir şekilde dağıtılabilmesi için aşağıdaki verilen karıştırma yöntemi gerçekleştirilmiştir:

İlk olarak karışım suyunun bütünü (toplam kimyasal katkı miktarının %25’iyle beraber) nano malzemeler ile beraber 5 dakika süresince ultrasonik karıştırıcı yardımıyla karıştırılmıştır. Dördüncü dakikadan itibaren, bir harç mikseri yardımıyla kuru ECC bileşenleri olan Portland çimentosu, uçucu kül ve silis kumu düşük hızda karıştırılmıştır. Ultrasonik karıştırıcı ile uygulanan 5 dakikalık karıştırma süresinin ardından hazırlanan sulu nano malzeme solüsyonu yaklaşık 1 dakikalık sürede kuru halde karıştırılmış bileşenlerle karışıma yavaşça eklenmiştir. Ardından mikser içinde karıştırma işlemi ilave 1 dakika daha devam etmiştir (Yeşilmen ve diğerleri, 2015). Yang ve diğerleri (2009) tarafından açıklandığı gibi, görsel olarak istenen taze harç özellikleri elde edilene kadar geriye kalan yaklaşık olarak %75’lik YOSAK karışıma dökülmüştür. Taze karışımların istenen işlenebilirlik özellikleri elde edildikten sonra sonra karıştırma işlemine ilave üç dakika daha yüksek hızdaki seviyede devam edilmiştir. PVA lifleri ise en son aşamada taze karışıma ilave edilmiştir. Ardından içerisinde PVA lifleri ile beraber bütün karışım fazladan üç dakika daha karıştırılarak nihai halde taze ECC karışımları elde edilmiştir. Çalışmalarda kullanılan nano silikanın karışımlarda kullanılmasına ilişkin görüntüler Şekil 3.11’de verilmiştir.



a) ses frekanslı karıştırma



b) nano silika solüsyonunun hazırlanması

Şekil 3.11 Nano silika içeren ECC karışımlarının üretilmesi

3.2.1.3 Karbon liflerin Karışımlara Eklenmesi

Karbon liflerin çimento esaslı kompozitlerdeki kullanım oranlarına bakıldığında genellikle literatürde belirli bir aralıkta olduğu görülmektedir (Chen ve Chung, 1995). Daha önce değinildiği üzere karbon esaslı liflerin kritik (doygunluk) seviyenin altında kullanılmasının nedeni daha çok basınç dayanımı, yüksek işlenebilirlik ve düşük maliyet kaygılarıdır. Bunun yanında kritik sınırın üzerindeki kullanım miktarlarının kompozitin kendiliğinden algılama kabiliyeti üzerinde çok fazla bir etkisi olmadığı bilinmektedir. Bu çalışmada kullanılan liflerin tek başına kendileri bir sensör olmamakla birlikte, çimento esaslı kompozitlerin kendiliğinden algılama yeteneklerini iyileştiren bir katkı olarak düşünülmelidir. Bunun yanında, karbon lifler boyut olarak karbon nanotüplere göre daha büyük boyutlardadır. Aynı zamanda daha az elastisite

modülü ve dayanıma sahiptir. Tez kapsamındaki deneylerde daha önce bahsedildiği üzere tek boyutta karbon lif malzemesi (12 mm) tercih edilmiştir. Deneysel araştırmalar esnasında elektriksel özellikler değerlendirilirken, daha önceki tecrübelerden hareketle karbon lif için kritik doygunluk sınırı olan hacimce %1 oranında karbon lif kullanılmıştır. Karışım sırasında, karbon lifler ilk olarak kuru malzemelerle birlikte karıştırılmıştır. Daha sonra söz konusu karışıma su ilave edilerek beş dakika süresince karışıma devam edilmiştir. PVA ve süperakışkanlaştırıcı ilavesinden sonra bütün karışım beş dakika boyunca tekrar karıştırılmış ve karbon lif takviyeli taze ECC karışımı elde edilmiştir. Karışımların üretilmesine ilişkin görüntüler Şekil 3.12’de verilmiştir.



a) KL'lerin tartılması



b) karıştırıcıya eklenmesi



c) KL ve toz malzemeler

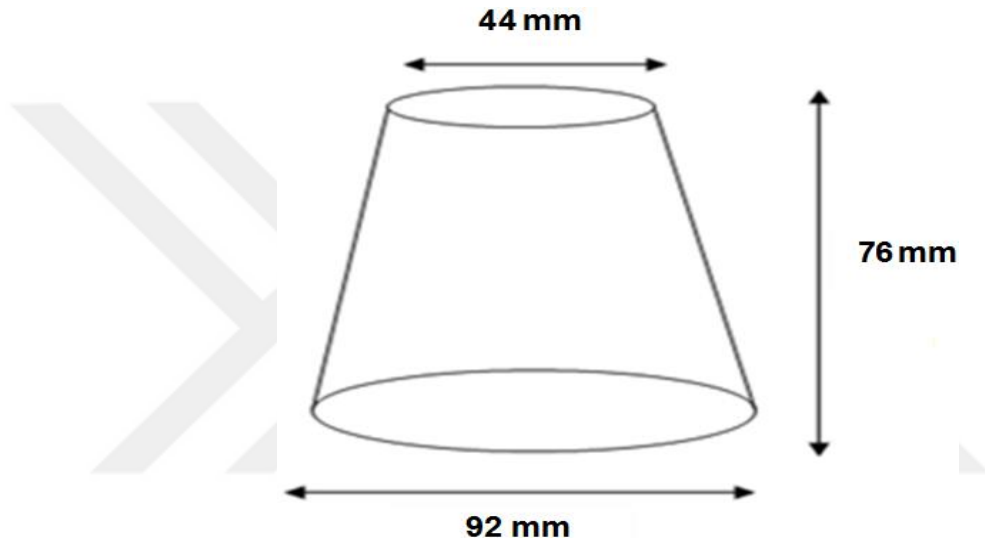


d) karışımın tamamlanması

Şekil 3.12 Karbon lif takviyeli ECC karışımlarının üretilmesi

3.2.2 Ön Deneysel Çalışmalar

Daha önce elde edilen tecrübeler ve literatürdeki çalışmalar değerlendirilerek ön araştırmalarda farklı oranlardaki nano malzemeler karışımlarda kullanılmıştır. Bağlayıcı malzeme oranınca karışımlarda ağırlıkça sırasıyla %1, %2 ve %3 nano silika ile %0,25, %0,55 ve %0,75 karbon nano tüp kullanılmıştır. Karışımların taze haldeki özellikleri belirlemek için mini çökme hunisi (Şekil 3.13) yardımıyla deneyler yapılmıştır. Farklı karışımların işlenebilirlik seviyelerini benzer hale getirmek için YOSAK kullanılmıştır (Şekil 3.14)



Şekil 3.13 Mini çökme hunisi



a) yayılma testi

b) benzer yayılma seviyeleri

Şekil 3.14 Farklı nano malzeme takviyeli ECC karışımların benzer işlenebilir özelliğe getirilmesi

Farklı oranlarda kullanılan nano malzeme içeren karışımların basınç mukavemetleri dikkate alınarak NS için optimum kullanım oranının %3, KNT için ise %0,55 olduğuna karar verilmiştir. Gerek ön araştırmalarda, gerekse daha önceki araştırmalar (Öztürk, 2015) sayesinde ECC karışımlarının içerisinde KNT ve NS malzemeleri ile ilgili karıştırma yöntemlerine ve kritik kullanım oranları ile ilgili yeterli bilgi ve tecrübeler mevcuttur (Al-Dahawi ve diğerleri, 2016). Ancak nano malzeme olarak, KNT ve NS malzemelerinin aynı anda kendiliğinden iyileşme amacıyla ilgili ilk kez ECC karışımlarında tasarlanıyor olması nedeniyle tez çalışmasında etkin bir iyileşme mekanizması sağlamak amacıyla bir takım ön araştırmalar daha gerçekleştirmiştir. Bu amaçla, belirlenen oranlarda iki tür nano malzeme içeren (KNT ve NS) ECC ön karışımlarının temel mekanik özelliklerinin araştırılmasına karar verilmiştir. Ön araştırmalarda küp ECC numuneleri kullanılarak karışımların 3, 7, 28 günlerdeki basınç mukavemet değerleri test edilmiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 NS ve KNT içeren ECC ön karışımlarının mekanik testleri

Gerçekleştirilen mekanik testler ile, karışımların içerisindeki farklı oranlarda ve farklı yöntemlerle ilave edilmiş nano malzemelerin ne kadar homojen hazırlandıkları ile ilgili bir takım somut sonuçlar da elde edilmiştir. Temin edilen karbon nano tüp ve nano silika malzemeleri ile birlikte hazırlanan taze karışımlar ön araştırma yapmak için 50×50×50 mm'lik küp kalıplara dökülmüştür. Her karışımdan 3'er adet numune hazırlanmıştır. Üretimlerinin ardından kalıplara yerleştirilen numuneler %50±5 bağıl nem ve 23±2 °C sıcaklığa sahip laboratuvar koşulları altında yüzeyleri örtülmüş şekilde kalıplar içerisinde 24 saat süresince bekletilmişlerdir. 24 saatlik kür süresinin sona

ermesinin ardından temel mekanik özelliklerin değerlendirilebilmesi amacıyla ECC küp numuneler belirlenen test yaşlarına ulaşılan kadar (3,7 ve 28. gün) plastik poşetler içerisinde $95\pm 5\%$ bağıl nem ve 23 ± 2 °C sıcaklıkta kür edilmiştir. Aşağıda verilen Çizelge 3.6'da ön araştırmalar sonunda KNT ve NS malzemelerinin birlikte kullanıldığı ECC numuneleri ile nano malzeme içermeyen ECC numunelerinin basınç dayanım sonuçları verilmiştir.

Çizelge 3.6 İki farklı nano malzeme içeren ECC'lerin mekanik ön araştırma basınç dayanımı sonuçları

Numune tipi	3.Gün (MPa)	Değişim (%)	7.Gün (MPa)	Değişim (%)	28.Gün (MPa)	Değişim (%)
ECC-KNT-NS	36,20	+ %19,9	39,12	+ %16	69,15	+ %13,2
	35,37		41,32		66,57	
	35,31		35,66		67,25	
ECC-Ref.	28,61	referans	34,16	referans	58,08	referans
	28,31		33,68		59,90	
	32,22		32,27		61,36	

Çizelge 3.6'da görüldüğü üzere farklı iki nano malzeme içeren ECC küp numuneler nano malzeme içermeyen ECC numunelerine kıyasla 3, 7 ve 28.günlerde sırasıyla, %19,9, %16, %13,2 artış göstermiştir. Bu sonuç, aynı karışıma farklı karışım yöntemleri ile farklı türlerde ilave edilen nano malzemelerin kompozitlerin temel mekanik özellikleri üzerinde olumlu olduğunu göstermektedir. Elde edilen bu artışın nedenleri detaylı olarak ilerleyen bölümlerde açıklanmış olup, bu kısma kadar yapılan ön araştırmalar sayesinde nano malzemelerin en etkin şekilde kullandığından emin olunarak esas deneylere başlanmıştır.

3.3 ECC Numunelerinin Üretilmesi

Bir önceki kısımda elde edilen deneyimler sonunda tez kapsamında kullanılacak esas ECC karışımlarının dökümleri yapılmıştır. Üretilen karışımlara ait detaylar Çizelge 3.7'de verilmiştir. Üretimlerinin ardından kalıplara yerleştirilen numuneler $50\pm 5\%$ bağıl nem ve 23 ± 2 °C sıcaklığa sahip laboratuvar koşulları altında yüzeyleri örtülmüş halde kalıplar içerisinde 24 saat boyunca bekletilmişlerdir. 24 saatlik kür süresi sona erdikten sonra ilave kür süresi ile önceden belirlenen test yaşlarına kadar bu poşetler içerisinde $95\pm 5\%$ bağıl nem ve 23 ± 2 °C sıcaklıkta kür işlemleri devam etmiştir.

Çizelge 3.7 ECC karışım oranları

Karışım İsmi	Çimento	S/BM	Kum	YOSAK* (kg/m ³)	PVA (kg/m ³)	UK/PÇ	NM/BM(%)
ECC-Ref.	1	0,27	0,36	5,1	15	1,2	-
ECC-KL-NS	1	0,27	0,36	6,4	15	1,2	1**-3
ECC-KNT-NS	1	0,27	0,36	7,2	15	1,2	0,55-3
ECC-KL	1	0,27	0,36	5,3	15	1,2	1**
ECC-KNT	1	0,27	0,36	6,9	15	1,2	0,55
ECC-NS	1	0,27	0,36	6,1	15	1,2	3

*Ön araştırmalar sonucu belirlenen benzer kıvamların elde edildiği (Şekil 3.14) farklı ECC karışımları için yaklaşık olarak kullanılan süperakışkanlaştırıcı miktarları verilmiştir.

**Toplam karışım hacmince oran

Çizelge 3.7'deki karışımlar ile kendiliğinden iyileşme ve algılama kabiliyetlerinin test edilmesi için uygulanacak deneysel yöntemlerin gerektirdiği prizmatik (360×50×75 mm), küp (50×50 mm) ve silindir (Ø150×300 mm ve Ø100×200 mm) numuneler üretilmiştir. Farklı yaşlarda olmak üzere ön araştırmalar ve esas deneylerde kullanılmak üzere, söz konusu boyutlarda toplamda altı karışıma ait 600'den fazla numune üretilmiştir. Şekil 3.16'da test edilmeye hazır numunelerden görüntüler verilmiştir.



a) farklı ebatlarda dökülen numuneler



b) kiriş numuneler

Şekil 3.16 Deneylerde kullanılan numunelerden görüntüler

3.4 Deney Yöntemleri

Üretilen numunelerin mekanik ve dayanıklılık deneyleri ile birlikte kendiliğinden iyileşme ve kendiliğinden algılama derecesi, hasarlı ve hasarsız numuneler üzerinde araştırılmıştır. Üzerinde yük geçmişi olan hasarlı numuneler, belirli bir seviyeye kadar yük altında deformasyona maruz bırakılarak oluşturulmuştur. Bu tür bir yöntemin tercih edilmesinin nedeni sadece laboratuvar çalışmalarında karşılaşılabilecek hasarsız numunelerden ziyade zaman içinde çeşitli nedenlerle hasara uğrayabilecek betonların daha gerçekçi olmasıdır. Bilindiği üzere gerçek uygulamalarda betonun farklı zamanlarda, çatlaksız durumda olması mümkün değildir. Bu nedenle tez kapsamında üretilen numunelerin kendiliğinden iyileşme performansları hasara uğramış numuneler üzerinden test edilmiştir. Aynı zamanda bu ölçümler sırasında kendiliğinden algılama kabiliyetlerini değerlendirmek için elektriksel ölçümler alınmıştır. Daha önce tez sahibinin deneyimi ve literatürde yer alan çalışmalar kendiliğinden iyileşme ile ilgili farklı yöntemlerin uygulanabileceğini göstermektedir. Kendiliğinden iyileşme performansının hassas bir şekilde güvenilir ve pratik yöntemler ile belirlenmesi oldukça değerlidir. Bu nedenle tez kapsamında kendiliğinden iyileşme performanslarının belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden birisi hızlı klor geçirimsizlik deneyi, diğer yöntem ise elektriksel direnç yöntemi olarak tercih edilmiştir. Bunun yanında kendiliğinden iyileşme performansını çok daha geniş bir şekilde değerlendirmek için donma-çözülme, rezonans frekansı, ağırlık kaybı gibi testlerde uygulanmıştır. Tez kapsamında farklı karışımlar için kendiliğinden iyileşme performansının belirlenmesinde tek bir test yönteminden ziyade birden fazla metot tercih edilmiştir. Böylece sonuçların birbiri ile karşılaştırılarak doğrulanmasının mümkün olacağı düşünülmüştür. Durabilite testleri ile kendiliğinden iyileşme etkinliğinin tespit edilmesinin yanında, aynı karışımlar mekanik testler içinde üretilip basınç ve eğilmede çekme deneyleri ile kendiliğinden iyileşme performansları belirlenmiştir. Bunların yanında elde edilen bulguların desteklenmesi adına mikro yapısal araştırmalarda gerçekleştirilmiştir.

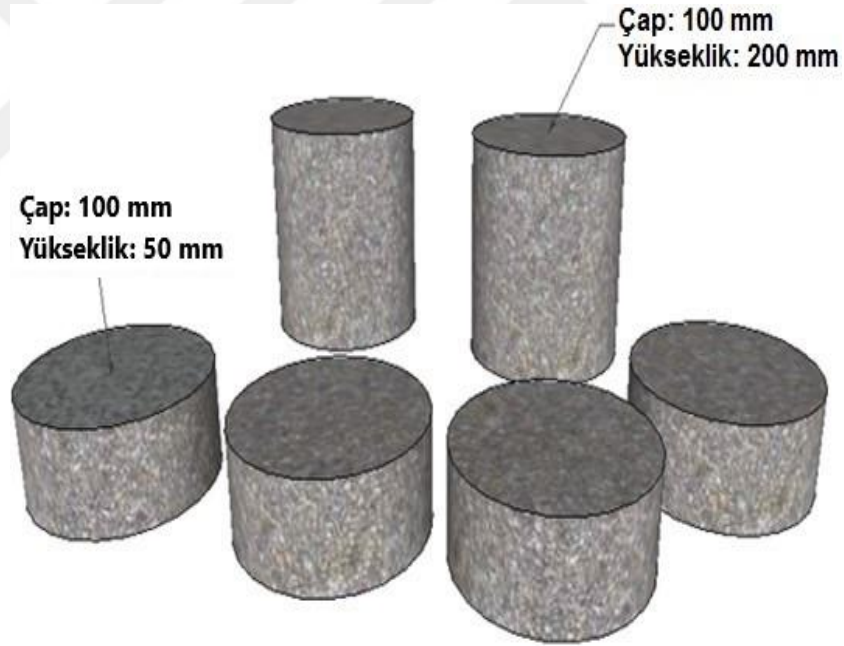
Sonuç olarak toplamda 12 farklı deney yöntemi (hızlı klor geçirimsizlik, elektriksel direnç, donma-çözülme, rezonans frekansı, ağırlık kaybı, basınç, eğilmede çekme ve yarmada çekme testleri, SEM-EDX, XRD, TGA/DTA ve Polarize mikroskop) üzerinden tezin hipotezi bütüncül ve parametrik çalışmalarla ele alınarak araştırılmıştır.

3.4.1 Hızlı Klorür İyonu Geçirimsizliği (HKİG) Deneyi

Tez çalışmasında yürütülen HKİG testleri ASTM C1202 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. HKİG testi betonun kalite kontrolünü yapmak amacıyla sıklıkla kullanılan bir deneysel yöntemdir. Deney prensibi olarak deney numunesinin içerisinden geçen elektriksel akıma karşılık gelen direnci ölçülmektedir. Bu sebeple, söz konusu direnç malzemenin boşluk yapısı ve boşluk çözeltisindeki kimyasal değişimlerle etkilendiğinden malzeme özellikleri ile ilgili sağlıklı sonuçlar vermektedir. Ayrıca, HKİG testi sonucunda elde edilen veriler sonuçların klorür iyonu geçirimsizliği ile de ilişkili olduğunu göstermiştir (Shi, 2004). Mevcut tecrübeler literatürdeki başka çalışmalarda da kendiliğinden iyileşme ile ilgili bir takım araştırmaların HKİG testi ile gerçekleştirildiğini göstermektedir (Şahmaran ve diğerleri, 2013). Mevcut tez çalışmasında da ECC numunelerinin kendiliğinden iyileşme özellikleri ön yüklemeye maruz bırakılmış toplamda altı farklı karışım üzerinden yürütülmüştür. ECC numunelerinin kalıcı yükleme sonrasında klorür iyonu geçirimsizlikleri değerlendirilmiştir. Yarmada çekme ve hızlı klorür iyonu geçirimsizliği (HKİG) testleri için Ø100×200 mm silindir numuneler üretilmiştir. Çalışmalarda kullanılan tüm ECC karışımlarının üretimi 25 litre kapasiteli Hobart tipi mikser ile yapılmıştır. Tüm numuneler 24 saat sonunda kalıplardan çıkarılmış ve test gününe kadar 23±2 °C sıcaklıkta sürekli olarak suda kür edilmiştir. 7 günlük kür süresinin ardından, her bir Ø100×200 mm boyutlarındaki silindir numuneden 3'er adet 50 mm'lik üç adet disk numune kesilmiştir (Şekil 3.17 ve Şekil 3.18). Normal şartlar altında 200 mm yüksekliğindeki silindir numuneden dörder adet 50 mm'lik numune alınabileceken, döküm yapılan taraftaki numune yüzeyinin diğer kesilen numunelerden farklılık göstermemesi için 3 adet numune kesilmiştir. Deneylerin tamamı özdeş numunelerle yapılarak kendiliğinden iyileşme performansının belirlenmesinde bütün parametreler aynı hale getirilmiştir. Birbirinden farklı altı karışımı içeren numunelerin yarmada çekme yükleri altında maksimum yük taşıma kapasiteleri tespit edilmiştir. Testler kapalı devre kontrollü bir deney cihazı ile yapılmıştır. Numunelerin yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi her bir karışımdan 3'er adet numunenin test edilmesi ile yapılmıştır. Yarmada çekme yüklemeleri 0,005 mm/s yükleme hızında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.19). Her bir karışımın kırılma anındaki maksimum yük taşıma kapasitelerinin ortalamaları alınarak hasar verilecek olan numuneler için referans oluşturulmuştur.



Şekil 3.17 Ø100×200 mm boyutlarındaki silindir numunelerin HKİG testi için kesilerek uygun hale getirilmesi



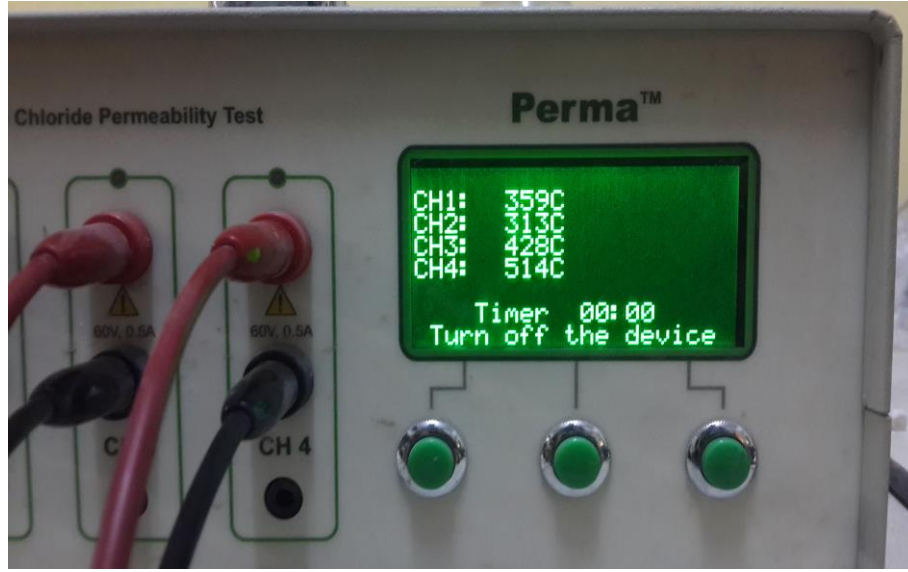
Şekil 3.18 HKİG için elde edilen silindir numuneler

Kendiliğinden iyileşme kalitesinin göz önüne alınacağı hasar verilmiş numunelerin, hasar seviyeleri referans alınan kırılma yük ortalamalarının %75'i olarak belirlenmiştir (Şekil 3.19). Bu noktada bütün numunelerde çatlak meydana gelmiştir. Böylece ağır hasar almış, dolayısıyla üzerinde kalıcı hasar bulunan beton elemanların kendiliğinden iyileşme sonrası mekanik ve dürabilite performansları incelenmiştir.



Şekil 3.19 Numunelere ön yükleme ile hasar verilmesi (maksimum taşıma gücünün %75'i seviyesinde)

Testler sırasında numuneler göz önüne alınan yük seviyesine ulaşıldıktan sonra, yükleme boşaltılmıştır. ECC tasarımının yüksek süneklik özelliği göstermesine bağlı olarak numuneler plastik deformasyon bölgesinde kalarak geniş açıklıklar yerine mikro çatlak oluşumları elde edilmiştir. Yüklemenin ardından numunelerde meydana gelen çatlaklarda kapanma derecesinin ve kalitesinin kolayca takibinin yapılması amacıyla yükleme yönüne dik olarak çizgiler çekilmiştir. Yarmada çekme yükleri altında oluşan mikro çatlakların klorür iyonu geçirimsizliği üzerindeki etkilerinin araştırılması için ise hasarlı ve hasarsız ECC numunelerine, ASTM C1202'ye (2007) göre hızlı klorür iyonu geçirimsizliği (HKİG) testleri uygulanmıştır. HKİG test yöntemi daha önce bahsedildiği üzere temel olarak betonun elektriksel özelliklerine dayanan bir test yöntemidir. Numuneler test yöntemi gereği su içine yerleştirilmiş ve deney başlangıcına kadar suya doymun halde kalmaları sağlanmıştır. Numuneler HKİG testi için sudan çıkarılmış ve çözelti hücrelerinin arasına sığacak şekilde yerleştirilmiştir. Ardından herhangi bir çözelti sızıntısı olmayacak şekilde sıkıştırılmıştır. Deneylerin gerçekleştirilmesi için hücrelerden birisine sodyum klorür, diğerine ise sodyum hidroksit çözeltisi ilgili standarda uygun olacak miktarda doldurulmuştur. Ardından 6 saat boyunca 60V sabit potansiyel farkı uygulanarak beton silindir numunelerden geçen elektriksel akım şiddeti veri toplama sistemi aracılığıyla ile Coulomb (C) cinsinden (elektriksel akım miktarı) hesaplanmıştır (Şekil 3.20 ve Şekil 3.21).



Şekil 3.20 Coulomb (C) cinsinden (numunelerden geçen miktar) verilerin elde edilmesi



Şekil 3.21 HKİG test sistemi

7. günde sağlam (ön yüklenmemiş) ve ön yüklenmiş haldeki ECC numuneleri ilave 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinin ardından HKİG testine tabi tutulmuştur. ECC numunelerin kendiliğinden iyileşme performansı klorür iyonu geçirimsizliği değerleri göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında üretilmiş olan bütün numunelerin klor penetrasyon değerleri mevcut standartlarda belirtilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Böylece nano ve mikro ölçekte modifiye edilmiş ECC numunelerden elde edilen klor penetrasyon değerleri, gerçek uygulamalar için gereken referanslar ile kıyaslanarak kendiliğinden iyileşme somut bir biçimde ortaya konmuştur.

3.4.2 Elektriksel Direnç (ED) Deneyi

3.4.2.1 Kendiliğinden İyileşme Deneylerinde ED deneyi

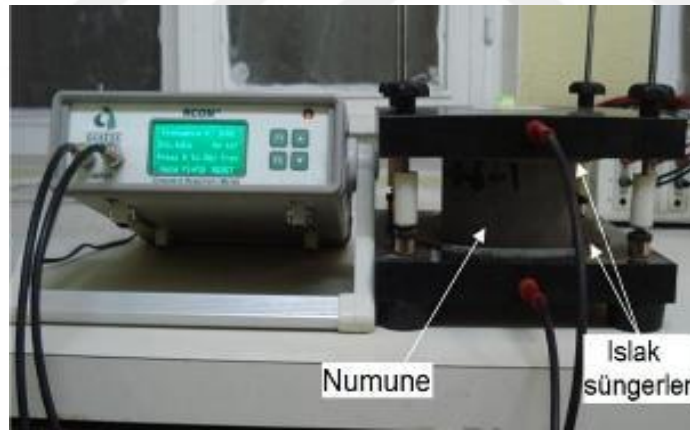
Tez kapsamında, numunelerin elektriksel iletkenlik değerleri, nano malzemelerin ve mikro malzemelerin varlığında kendiliğinden iyileşme etkisinin ve kalitesinin araştırılmasına kullanılan bir başka deney yöntemidir. Tez kapsamındaki deneylerde sırasında kendiliğinden iyileşme performansının değerlendirilmesinde HKİG yöntemine göre daha yeni olan bu deney yöntemi ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar mevcuttur (Yıldırım ve diğerleri, 2015). Bu deney yönteminde de tıpkı HKİG testlerinde olduğu gibi, $\text{Ø}100 \times 200$ mm boyutlarındaki silindir numunelerden disk biçiminde $\text{Ø}100 \times 50$ mm'lik numuneler elde edilmiştir. Farklı deneysel şartlardan etkilenmemesi adına HKİG deneylerinde kullanılan aynı boyutlardaki numuneler elektriksel direnç (ED) deneylerinde kullanılmamıştır. Bu amaçla aynı boyutlardaki numuneler her bir deney yöntemi için ayrı olarak tekrar üretilmiştir. Böylece özdeş numuneler üzerinden kendiliğinden iyileşme derecesini farklı yöntemlerle değerlendirmek daha doğru ve güvenilir bir karşılaştırma imkanı vermiştir. Elektriksel verilerin toplanması amacıyla iki noktalı ölçüm yapabilen (iki problu) beton direnç ölçer cihazı kullanılmıştır. Bu tipte bir beton direnç ölçerin konfigürasyonları standart bir şekilde üretilmektedir (Spragg ve diğerleri, 2013). Kanada menşeli Giatec firmasından satın alınan RCON isimli elektriksel direnç ölçer Şekil 3.22'de numune ile birlikte gösterilmektedir. Bu test yöntemi uygulanırken $\text{Ø}100 \times 50$ mm'lik silindirik numuneler dikey şekilde birbirine paralel iki düz elektrotun arasına konmuştur (Şekil 3.22).

Yeterli elektriksel iletkenliğin sağlanması için 10 mm yükseklik ve 150 mm çaptaki suya doymuş süngerler elektrotlar ile numune arasına yerleştirilmiştir. ED ölçümlerini süngerlerdeki ıslaklık derecesi ile etkilenebildiğinden her bir deney sırasında ölçümlere başlamadan önce süngerlerin aynı ağırlıkta (aynı su muhtevası içeren) olduğuna dikkat edilmiştir. Bu doymuş ağırlık her bir sünger için 38 gram olarak belirlenmiş ve her ölçümde aynı ıslaklık derecesi takip edilmiştir. Bu sayede ED yöntemiyle farklı numunelerin kendiliğinden iyileşme performans derecesinin belirlenmesi hassas bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan RCON marka elektriksel direnç ölçüm cihazı, alternatif akım (AA) uygulayan bir cihazdır. Elektriksel özelliklere dair sonuçları empedans değerinden vermektedir. Cihaz, 1 Hz ile

30 Hz arasında değişebilen frekans değerlerinde çalışmaktadır. 5 saniyeden daha kısa bir serede sonuç vermekle birlikte 0 ile 180° arasında faz açısı göstermektedir. Bütün deneyler sırasında cihazın frekans değeri olarak 1 Hz seçilmiştir. Bunun nedeni meydana gelebilecek polarizasyon etkisini en aza indirmektir. Literatürde 1 Hz olarak belirlenen frekans değerinin olası polarizasyon etkisini en aza indirdiği rapor edilmiştir (Hou, 2008). İki problu elektriksel direnç oler cihazı, empedans ve faz açısı sonuçları vermektedir. Bu sonuçları dikkate alarak ve test edilen numunenin geometrik özelliklerini kullanarak elde edilen sonuçları elektriksel direnç (ohm) birimine dönüştürmek mümkündür. Deneylerde elde edilen bu değerler aşağıdaki denklemin kullanılmasıyla elektriksel direnç değerine dnştrlmştir.

$$\rho = Z \times \cos(\theta) \times \frac{A}{L} \quad (3.1)$$

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.



şekil 3.22 Elektriksel direnç (ED) olm yöntemi

Silindir numunelerin yanında, benzer şekilde hasarsız ve hasarlı kiriş numunelerin de kendiliğinden iyileşme amacıyla elektriksel direnç özellikleri 7, 28 ve 90 günlük sürelerde takip edilmiştir.

3.4.2.2 Kendiliğinden Algulama Deneylerinde ED deneyi

Tez çalışmasının bu bölümünde, n araştırmalar neticesinde elde edilen verilerin ışığında doğunluk sınırlarında kullanılan nano (NS ve KNT) ile mikro malzemeler

(KL) kullanarak üretilen ECC numunelerinin kendiliğinden algılama kabiliyetlerinin olabilecek en uygun şekilde saptanabilmesi için çeşitli konfigürasyonlarında bir takım elektriksel ölçümler araştırılmıştır. Farklı numuneler ve yükleme koşulları altında çeşitli elektriksel ölçüm tekniklerinin denenmesinin altındaki sebep, saha koşullarında çok çeşitli şekillerde yük uygulamalarına maruz kalan malzeme ve/veya yapıların çeşitli hasar oluşumları durumunda genel mekanik davranışla beraber elektriksel değerlerindeki değişimi gerçek zamanlı olarak simüle etmektir. Tez çalışmasının bu zamana kadar aktarılan elektriksel ölçüm yöntemlerinde, dalgalı akım (AC) altında numuneler boyunca aksel empedans ölçümleri alan iki problu (noktalı) bir beton elektriksel direnç ölçüm cihazından bahsedilmiştir. Tez çalışmasının bir başka yönü de öngörülen deneysel çalışmalarda dalgalı akıma (AC) ek olarak doğru akım (DC) uygulamaları altında elektriksel ölçüm sonuçlarının ne ölçüde değişim göstereceğidir. Önem arz eden bir diğer konuda, iki yerine dört problu ölçümlerin gerçekleştirilmesinin elektriksel ölçüm sonuçlarını ne ölçüde etkileyeceğidir. Bu bağlamda iki noktalı AC yöntemi ile deneylerin yanında, doğru akım uygulaması altında (DC) dört noktalı olarak da elektriksel ölçümler alınmıştır. Söz konusu cihaz ABD menşeli Keithley firmasından temin edilen ve doğrudan elektriksel direnç ölçüm cihazı olarak adlandırılmaktan ziyade kaynak ölçer (SourceMeter) adı altında satılmakta olan bir cihazdır. Cihaz hassas voltaj ve akım kaynağı olarak çalışabilmektedir. Cihaz hem DC güç kaynağı ve hem de bir multimetre olarak kullanılabilir. Cihaz voltaj ve akım kaynağı olarak çalışabilmesinin yanı sıra, voltaj ölçer, akım ölçer ya da direnç ölçer olarak da çalışabilmektedir.

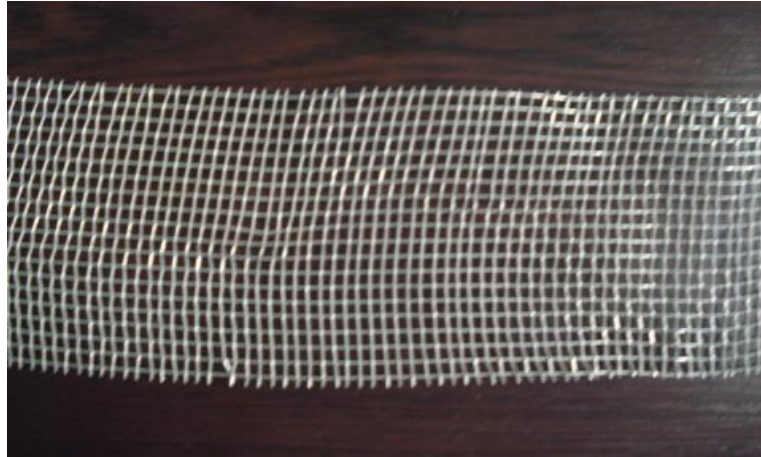
Esas deneysel çalışmalara başlamadan önce farklı numuneler üzerinde çeşitli ölçüm konfigürasyonları denenmiştir. Belirli bir ölçüm sisteminin en iyi sonucu vermesi kadar aynı zamanda hangi elektrotların en hassas sonuçları verdiği de önemlidir. Kullanılan elektrotların ECC karışımlarla en iyi uyumu göstermesi ve numunelerin elektriksel ölçümlerinin olumsuz etkilememesine dikkat edilmiştir. Bu amaçla elektrot olarak kullanılmak üzere çelik hasır teli, bakır hasır teli, pirinç plakalar, alüminyum folyo, elektriksel iletkenliğe sahip jeller gibi çeşitli elektrot tipleri denenmiştir. Çalışmalar sırasında elektrot amaçlı kullanılmak üzere denenilen malzemelerden bazıları Şekil 3.23'te gösterilmiştir.



(a) Alüminyum folyo



(b) Numunelerde elektrot olarak kullanılan çelik örgü teller



(c) Paslanmaz çelik örgü teller

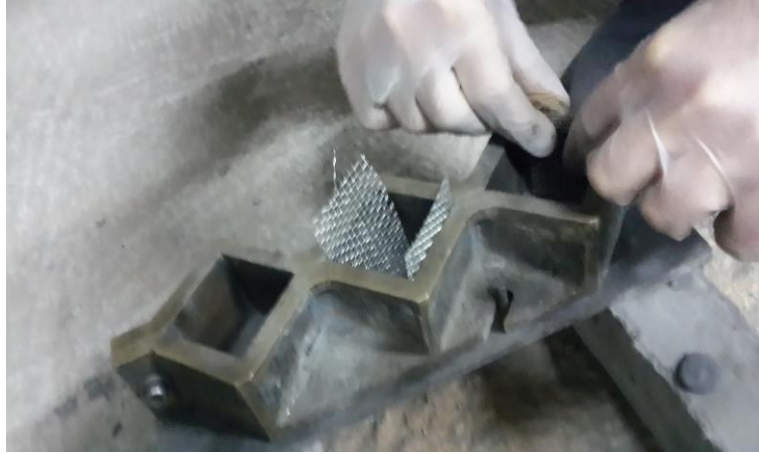
(devamı)



(d) Bakır örgü teller



(e) Pirinç plakalar

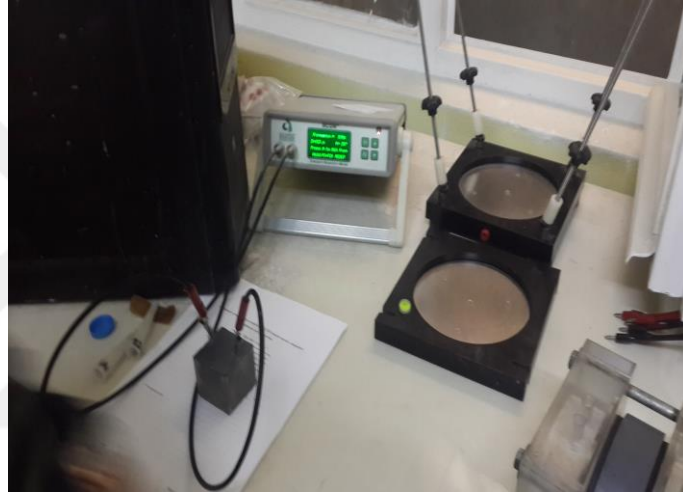


(f) Çelik örgü tellerin elektrot olarak hazırlanması

(devamı)



(g) Silindir numunelerde çelik çubuklarla elektriksel direnç ölçümü



(h) Küp numunelerde çelik tellerle elektriksel direnç ölçümü



(i) Kiriş numunelerde iletken jellerle elektriksel direnç ölçümü

Şekil 3.23 Alternatif elektrot görüntüleri

Bilindiği üzere bakır elementi yukarıda bahsedilen metallere karşılaştırıldığında elektriksel iletkenliği daha yüksek bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu

nedenle gerçekleştirilen ön çalışmalar sonunda çelik hasır tellere kıyasla bakır örgü teller veya pirinç plakaların kullanılması daha iyi sonuçlar vermiştir. Araştırmalar sırasında her ne kadar iletken jellerin kullanımı denenmiş olsa da bu jellerin içerisinde yer alan su muhtevasının belirli bir süre sonra buharlaşması ve bu durumun ölçüm sonuçları üzerinde çok etkili olması nedeniyle esas deneylerde bu yöntem dikkate alınmamıştır. Bunun yanında elektrot amaçlı kullanılan bir diğer malzeme olan alüminyum folyo numunelerin dış kısmına sarılarak kullanılmıştır. Ancak, özellikle yükleme sırasında numune üzerindeki alüminyum folyonun yırtılması elektriksel iletkenliğin bozulmasına yol açmaktadır. Bu nedenle tez çalışmasının bu bölümünde esas deneylerde kullanılmak üzere pirinç plaka elektrotların kullanılmasına karar verilmiştir. Bu kararın verilmesinde pirinç elektrotların içinde bakır muhtevasının çok fazla olması ve bakırın hasır tellere kıyasla numunelere daha kolay gömülebilmeleri gibi faktörler belirleyici olmuştur. Elektrotların numuneler içerisinde gömülmesi sırasında, kullanılan karışım cinsine bağlı olarak elektrotlar ile karışım arasında aderans sıkıntısı doğabilmektedir. Ancak, tez süresince üzerinde çalışılan ve önceki bölümlerde geliştirilen karışımlarda agrega olarak sadece 1000 mikron (1 mm) maksimum tane büyüklüğüne sahip kuvars kumu kullanılmıştır. Agrega tane büyüklüğünün çok ince oluşu ve karışımlarda yüksek miktarlarda ince toz malzeme kullanılması gibi sebeplerden ötürü, deneyler sırasında ECC numuneler içerisine gömülen elektrotların sıyrılması gibi olumsuz bir durumla karşılaşılmamıştır.

Esas deneysel çalışmalarda kullanılacak elektrot tipinin pirinç plakalar olarak belirlenmesinin ardından, farklı yükleme konfigürasyonları, elektrot dizilim çeşitleri ve elektriksel ölçümlerin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmesi üzerine odaklanılmıştır. Farklı yükleme konfigürasyonları olarak aksel basınç yüklemesi ve dört noktalı eğilmede çekme yüklemesi altında numunelerin farklı yerlerine farklı sayılarda yerleştirilen elektrotlardan yükleme altında elde edilen elektriksel ölçüm sonuçları genel olarak değerlendirilmiştir. En tutarlı sonuçları verecek elektriksel ölçüm tekniğinin belirlenebilmesi için gerçekleştirilen ön çalışmalarda ayrıca farklı yükleme konfigürasyonlarında elde edilen elektriksel direnç ölçüm sonuçlarının birbirleri arasında tutarlılığına da dikkat edilmiştir. Aksel basınç yükleri altında elektriksel ölçümler toplamda dört farklı elektrot yerleştirme durumu ve iki farklı pirinç elektrot boyutu ile araştırılmıştır. 50 mm'lik küp numuneler üzerinde gerçekleştirilen basınç yüklemesi sırasında uygulanan farklı elektrot dizilişleri Şekil 3.24'te gösterilmektedir. Küçük elektrotların boyutları 10x60 mm iken büyük elektrotlar 30x60 mm

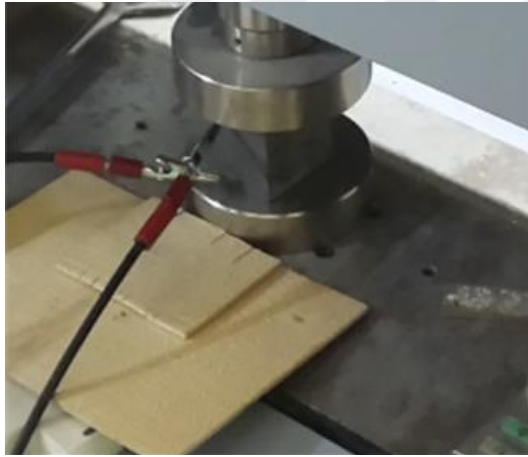
boyutlarındadır. AC ve DC ölçüm teknikleri olmak üzere 2 noktalı ve 4 noktalı elektriksel ölçümlerle deneyler gerçekleştirilmiştir. Her deney sırasında elektriksel ölçümlerin hassasiyeti açısından metal yükleme başlıklarıyla numuneler arasındaki elektriksel kontağı kesmek amacıyla çeşitli koruyucular denenmiştir.



a) elektrotların üste yerleştirilmesi



b) elektrotların ortaya yerleştirilmesi



c) farklı ölçüm yöntemleri



d) dört noktalı ölçüm



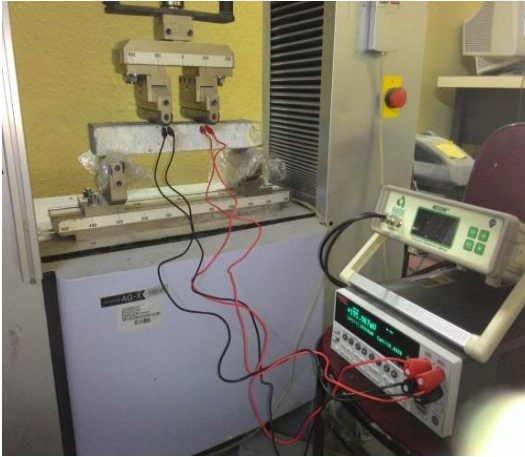
e) numunelerin yalıtılması



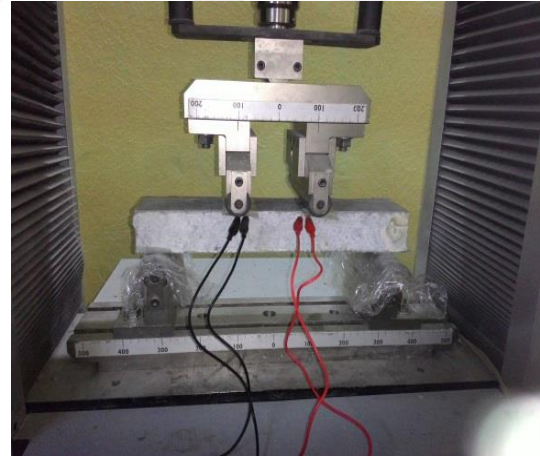
f) yalıtım için kullanılan ahşap plakalar

Şekil 3.24 AC ve DC ölçüm sistemleri ile küp numunelerin elektriksel ölçümleri için ön araştırmalar

Dört noktalı eğilmede çekme deneyi altında yapılan elektriksel ölçüm yöntemlerine ilişkin araştırmaların görüntüleri Şekil 3.25 (a-f)'te verilmiştir. Deneyler 360x75x50 mm boyutlarındaki kiriş numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Görüntülerden de görüldüğü üzere, deney sırasında yükleme cihazının numune üzerine dokunan başlıkları birbirinden yaklaşık 102 mm uzaklıktadır ve alt başlıklar birbirinden yaklaşık 305 mm uzaklıktadır. Eğilme deneyleri, kapalı devre elektro-mekanik test cihazı ile deformasyon kontrollü olarak (0,005 mm/saniye hızla) gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında, numunenin orta noktasında meydana gelen şekil değiştirme (saniyede 10 veri alınacak şekilde) ve buna karşılık gelen yükler bilgisayar sistemine kaydedilmiştir. Eğilmede çekme yüklemesi altında elektriksel ölçümlerin alınması sırasında kullanılan farklı elektrot konfigürasyonları Şekil 3.25'te gösterilmiştir. Eğilmede çekme yüklemesi altında kiriş numuneler içerisinde 10x85 mm'lik tek tip pirinç elektrotların kullanılmasına karar verilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken bir nokta tüm elektrotların tamamen basınç ya da tamamen çekme bölgesinde yerleştirilmesidir. İzlenen yöntemlerde elektriksel sonuçlar DC uygulayan dört noktalı ve AC uygulayan 2 noktalı ölçüm cihazı aracılığıyla elde edilmiştir.



a) Dört noktalı ölçümler

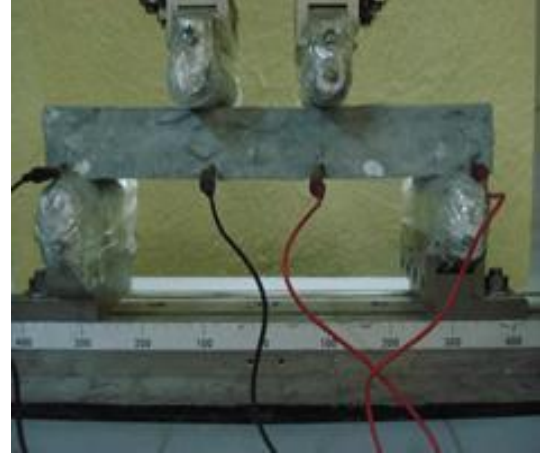


b) mesnetlerin yalıtılarak ölçümlerin alınması

(devamı)



c) AC ölçümü



d) farklı dört noktalı ölçümler



e) yükleme noktalarının altında ölçüm



f) numune üst bölgesinden ölçüm

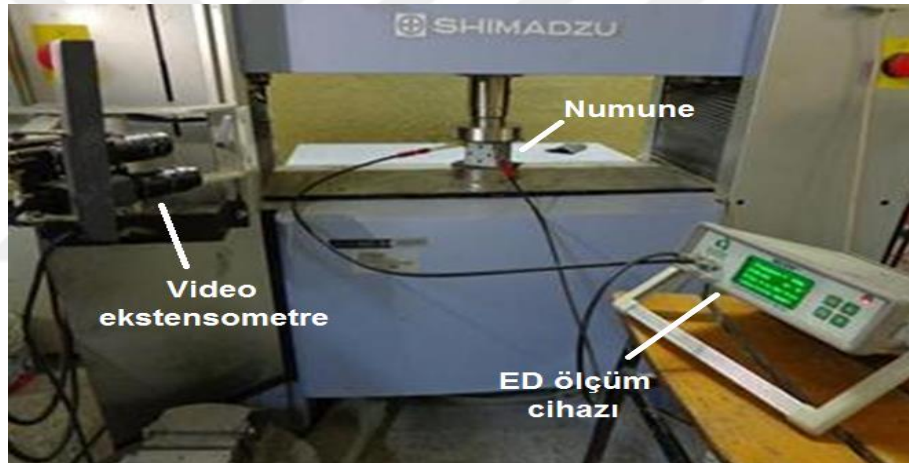
Şekil 3.25 AC ve DC ölçüm sistemleri ile kiriş numunelerin elektriksel ölçümleri için ön araştırmalar

Gerçekleştirilen ön araştırmalar sonucu elektriksel konfigürasyonlardan bazılarının çatlak bölgeselleşmesi ile ilave mekanik kayıplara neden olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, genel olarak sonuçlar yorumlandığında mekanik yükleme sonucunda oluşan hasarın tespit edilmesinde öngörülen tüm konfigürasyonların başarılı olduğu söylenebilir. Şekil 3.24-3.25'te verilen kiriş ve küp numunelerden elde edilen en kararlı sonuçları gösteren konfigürasyona ait ölçüm teknikleri aşağıda Şekil 3.26-3.27'de gösterilmiştir. Verilen elektrot konfigürasyonlarında mekanik yüklemenin başlatıldığı andan itibaren elektriksel ölçümlerinde uyumlu bir şekilde değiştiği ve bu durumun test edilen tüm numuneler için geçerli olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen daha kararlı sonuçlar göz önüne alındığında, tez çalışmasının sonraki aşamalarında basınç ve eğilme yüklemesi altında yapılan testlerde bu konfigürasyonlar kullanılmıştır.

Deneylerde bilgisayar sistemine ek olarak deformasyon değerleri video ekstensometre kullanılarak hassas bir şekilde kayıt altına alınmıştır (Şekil 3.26 ve Şekil 3.27).



Şekil 3.26 Kiriş numuneler için kararlaştırılan 2 noktalı (AC) ölçüm yöntemi



Şekil 3.27 Küp numuneler için kararlaştırılan 2 noktalı (AC) ölçüm yöntemi

Tez çalışması kapsamında daha önce sözü edilen nano ve mikro ölçekteki malzemelerin her biri için takip edilen karışım yöntemleri, kullanım miktarları ve kararlaştırılan ölçüm yöntemlerinin ardından farklı yaş ve yükleme çeşitlerinde kullanılmak üzere çeşitli miktar ve boyutlarda numuneler üretilmiştir. Genel anlamda deneyler 7, 28, 90 başlangıç kür sürelerinin tamamlanmasının ardından gerçekleştirilmiştir. Deneylerde bütün numunelerde özdeş ölçümleri yapmak için deney gününden 24 saat önce 60 °C'de fırına konularak kurutulmuştur. Bütün numunelerin kürleri yükleme yapılana kadar (7.gün) hava geçirimsiz plastik poşetlerde 95±5% BN, 23±2 °C sıcaklıkta yapılmıştır. 7.günün ardından ön yüklenen ve hasarsız numuneler bir sonraki deneyler için oda sıcaklığındaki su küründe bekletilmiştir. Deneylerin tamamı oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Eksenel basınç testleri sırasında yükleme hızı 0,30 MPa/sn iken

yarmada çekme ve dört noktalı eğilmede çekme testleri sırasında yükleme hızı 0,02 MPa/sn olarak seçilmiştir. Deneylelerden elde edilen veriler her beş saniyede bir deney sistemine bağlı bilgisayara kaydedilmiş ve deneyler ilgili ASTM standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneylelerde kaydedilen veriler; süre (saniye), yük (kN), deformasyon/sehim (mm), empedans (ohm), faz açısı (derece) ve frekanstır (KHz). Elde edilen bu sonuçlar kullanılarak gerilme (MPa) değerleri hesaplanmıştır. Bununla beraber, geliştirilen karışımların kendiliğinden algılama performanslarını değerlendirmek amacıyla, aşağıda sunulan 2 numaralı denklem kullanılarak ve elektriksel direnç değerlerindeki oransal değişimler kullanılmıştır.

$$FCER \left(\frac{\Delta R}{R_o} \right) (\%) = \left(\frac{R_L - R_o}{R_o} \right) 100 \quad (3.2)$$

Bu eşitlikteki R_L eğilme yükleri ve yük boşaltmaları sırasında kaydedilen elektriksel direnç değerini, R_o ise başlangıç durumundaki elektriksel direnç değerini temsil etmektedir. FCER (Fractional Change in Electrical Resistivity) ise oransal elektriksel direnç değişimidir.

3.4.3 Donma Çözülme

Donma-çözünme döngüsü beton gibi gözenekli ve gevrek çimento esaslı bir kompozit tipi için oldukça kritik olabilir. Özellikle donma-çözülme dayanıklılığı ile ilişkilendirilen donma etkisinin, soğuk havalarda betonarme yapılarda hizmet ömrü üzerinde çok önemli etkisi vardır. Betonun donma dayanımı, dayanım kaybı, ağırlık değişimi, genişleme ve temel frekans iletim süresine bağlı olarak hesaplanabilir. Tez çalışmasında ASTM standartları uyarınca gerçekleştirilen donma-çözünme çevrimleri 80mm×75×400 mm'lik kiriş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Üretilen numuneler kalıplardan 24 saat sonra çıkarılmış ve %100 bağıl nem (BN) ve 23 °C' de 7 gün boyunca kür edilmiştir. Numuneler donma çözülme çevrimlerine bırakılmadan önce, donma etkisini net olarak görmek amacıyla 2 gün boyunca kirece doygun su içerisine bırakılmıştır. Numunelere donma çözülme çevrimi +4 to -18 °C sıcaklıklarında günde beş ila altı arasında değişmekte olan döngülerle uygulanmıştır. Testlere ilişkin görüntü Şekil 3.28'de verilmiştir.



Şekil 3.28 Donma-çözülme testlerinde kiriş numuneler

3.4.4 Ağırlık Kaybı ve Elektriksel Direnç Ölçümleri

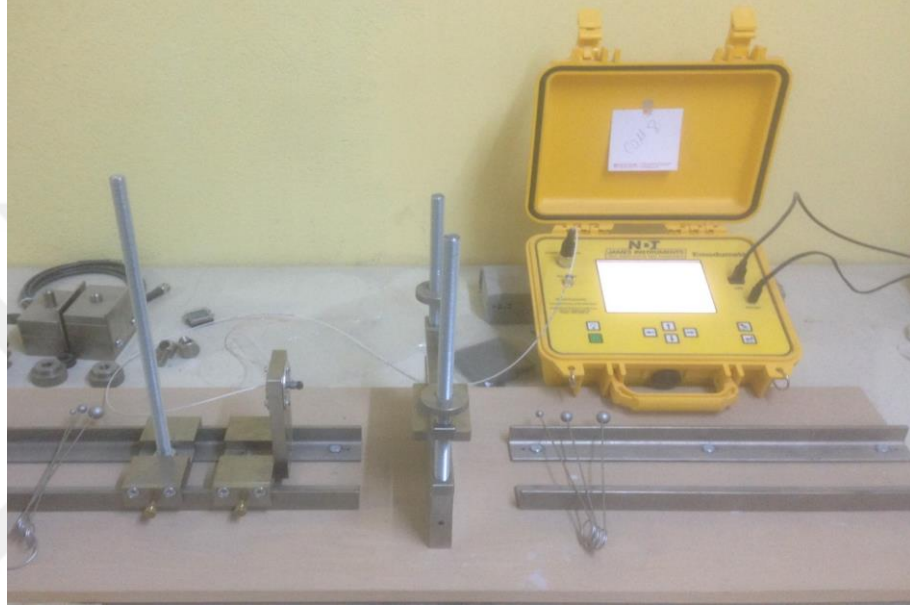
Numuneler toplamda 300 kez donma çözülme çevrimine tabi tutulmuştur. Her bir 30 çevrimden sonra numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. Her bir donma çözülme çevriminin ardından ayrıca numunelerin elektriksel dirençleri bir önce kısımda aktarılan ölçüm yöntemi ile belirlenerek kaydedilmiştir. Kiriş numunelerin ağırlık kaybı ölçümü Şekil 3.29’da verilmiştir.



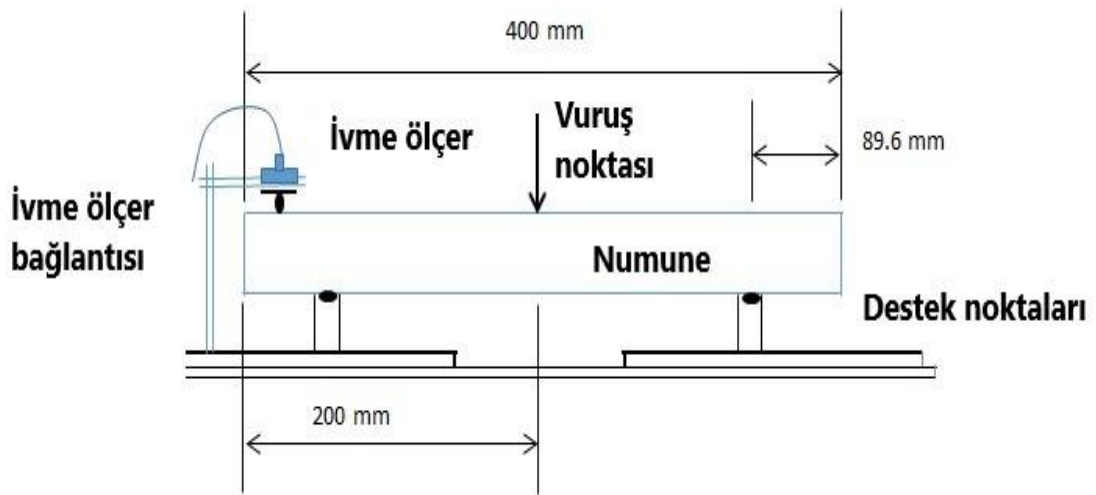
Şekil 3.29 Donma-çözülme çevrimleri sonrası kiriş numunelerin ağırlık kaybının belirlenmesi

3.4.5 Rezonans Frekansı

Her bir 30 donma-çözülme çevriminden sonra numunelerin rezonans frekansı değerleri de hesaplanarak kaydedilmiştir. Donma çözülme testi, ağırlık kaybı ve rezonans frekansı değerleri belirlenmiştir. Her bir karışıma ait numunelerin dürabilite deneyleri aşağıdaki eşitlik yardımı ile değerlendirilmiştir. Rezonans frekansı deneylerine ait görüntüler ve detaylar Şekil 3.30 – Şekil 3.31’de gösterilmiştir.



Şekil 3.30 Deneylerde kullanılan rezonans frekansı test cihazı



Şekil 3.31 Deneylerde kullanılan rezonans frekansı test cihazının şematik gösterimi

3.4.6 Basınç Dayanımı Deneyleri

Tez kapsamında planlanan mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla farklı ECC numunelerinin basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler için 50 mm boyutlarında küp numuneler üretilmiştir (Şekil 3.32). Dökümlerin tamamlanmasının ardından, numuneler 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 önceden belirlenen sürelerle kadar $95\pm 5\%$ bağıl nem ve 23 ± 2 °C’de kür edilmiştir (Şekil 3.33).



Şekil 3.32 Taze halde dökümü tamamlanmış küp numuneler (50×50 mm²)



Şekil 3.33 Taze halde dökümü tamamlanmış küp numuneler (50×50 mm²)

Deneyler, küp numunelerin 7, 28 ve 90. günlük yaşlarında gerçekleştirilmiştir. Farklı karışımlara sahip ECC numunelerinin mekanik özelliklerini karşılaştırmak amacıyla aynı sayıda nano ve mikro malzeme içermeyen referans küp numuneler de

üretimiştir. Basınç dayanımı testleri ASTM C39 standardına uygun olarak 100 ton kapasiteli bir test cihazı kullanılarak 0,9 kN/saniye yükleme hızında uygulanmıştır (Şekil 3.34).



Şekil 3.34 Nano ve mikro malzemelerle modifiye edilmiş ECC küp numunelerin basınç dayanımı deneyi

3.4.7 Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi

Tez kapsamında kendiliğinden iyileşme derecesi ve kalitesi, hızlı klor geçirimsizlik ve elektriksel direnç ölçümlerinin yanında mekanik deneylerle de araştırılmıştır. Bunun yanında kendiliğinden algılama testleri de elektriksel ölçümlerin yanında mekanik testlerle de gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla prizmatik numuneler (360×50×75 mm) üretilmiştir. Her bir karışım tipinden bazı numunelere tam olarak yükleme yapılarak nihai yük taşıma kapasitesi tespit edilmiştir. Referans alınan bu numunelere göre, her karışımdan üretilen numunelere ön yükleme uygulanmış ve numuneler ECC'nin karakteristik davranışını göstererek yük altında çoklu çatlak oluşumu elde edilmiştir. Tıpkı silindir numunelerde olduğu gibi eğilmede çekme dayanımı testinde de hasar verilen numuneler tam olarak kırılan numunelerin maksimum yük kapasitesinin %75'i mertebesinde ön yüklenmiştir. Ön yükleme 7 günlük prizmatik numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.35'te sırasıyla 6 karışıma ait olan numunelerin eğilmede çekme yüklemeleri altındaki deney görüntüleri eş zamanlı gerçekleştirilen elektriksel ölçümlerle birlikte verilmiştir.



a) 1. Karışım-ECC-Referans



b) 2. Karışım-ECC-%1 Karbon lif-%3 Nano silika



c) 3. Karışım-ECC-%0,55 Karbon nanotüp-%3 Nano silika



d) 4. Karışım-ECC-%1 Karbon lif



e) 5. Karışım-ECC-%0,55 Karbon nanotüp

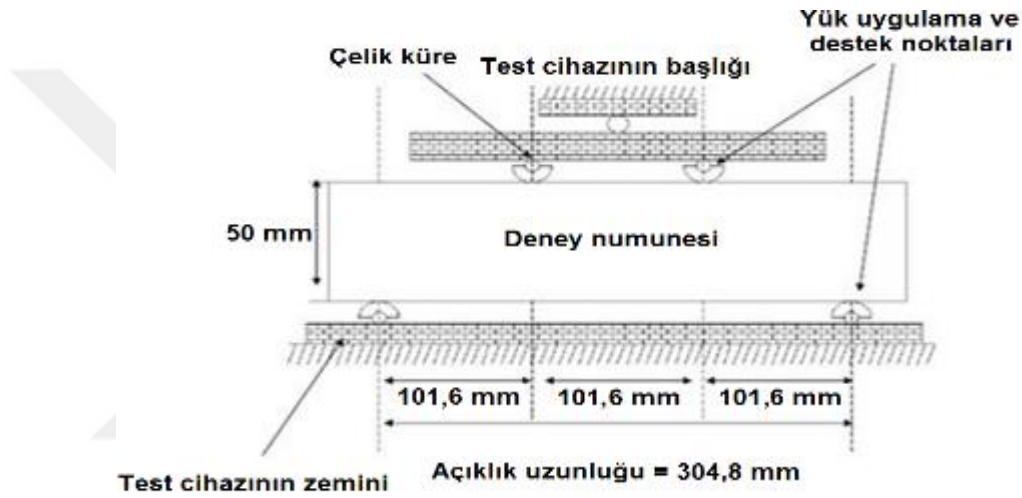


f) 6. Karışım-ECC-%3 Nano silika

Şekil 3.35 Altı farklı ECC karışımlarına ait kiriş numunelerin eğilme ve elektriksel direnç ölçümleri

Bütün numuneler ilgili deney günlerinde takip etmek adına kimliklendirilmiştir. HKİG ve ED deneyleri ile eş zamanlı ilerleyen kiriş numunelerin mekanik testlerinde suda kür edilen çatlaklı prizmatik numunelerin kendiliğinden iyileşme özellikleri elektriksel direnç ölçümleri ile takip edilmiştir. 7, 28 ve 90 günlük deneyler sonucunda

numunelerin elektriksel direnç değişimleri kaydedilmiş ve referans verileri ile karşılaştırılarak kendiliğinden iyileşme kalitesi mekanik özellikler yönünden açıkça ortaya konmuştur. Bunun yanında bir önceki kısımda açıklandığı üzere elektriksel ölçümler dikkate alınarak oransal değişimlere numunelerin kendiliğinden algılama kabiliyetleri karakterize edilmiştir. Ayrıca numunelerin mekanik olarak kendiliğinden iyileşme performansının yanında, bahsedilen deneylerden ayrı olarak her bir karışımdan hazırlanan prizmatik numuneler hasarsız halde eğilmede çekme deneylerinde test edilmişlerdir. Bu deneyler de numunelerin 7, 28 ve 90 günlük yaşlarında gerçekleştirilmiştir. Eğilmede çekme testleri ASTM C 469 deney standartlarına göre uygulanmıştır. Deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3.36'da verilmiştir.



Şekil 3.36 Dört noktalı eğilmede çekme deney düzeneği

Bu kısma kadar aktarılan deney yöntemlerinde nano ölçekte modifiye edilen ECC numunelerin farklı yaşlardaki kendiliğinden iyileşme ve algılama etkinliği dayanım ve dayanıklılık özellikleri üzerinden araştırılmıştır. Deney süreleri olarak; 7 günlük testler erken yaştaki kendiliğinden iyileşme performansını temsil ederken, 28 ve 90 günlük yaşlardaki testler ise sırasıyla nihai ve ileri yaşlardaki numune özelliklerini temsil etmektedir.

3.4.8 SEM-EDX

Tez çalışmasının bu kısmında sonuç ve tartışmalar kısmında verilen deney sonuçlarını doğrulamak adına geliştirilen çimento esaslı kompozitlerin iyileşme ürünleri ile ilgili ayrıntılı bir mikro yapısal analiz çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada numunelerin kendiliğinden algılama yetenekleri ile de ilgili detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. Küp, prizmatik ve silindir numunelerin yüzey ve iç kısımlarından

alınan kendiliğinden iyileşmiş numuneler ile SEM-EDX testleri yapılmıştır. Bilindiği üzere yapısal malzemenin karakteristik özellikleri daha özeldir o malzemenin mikro yapısına ve mikro yapıyı etkileyen gelişmelere bağlıdır. Tez kapsamında nano ve mikro malzemelerin çimento esaslı kompozitlerin kendiliğinden iyileşme özellikleri üzerine yapacağı etkiler numunelerin farklı derinliklerinden alınan örnekler ile belirlenmiştir. Böylece bu zamana kadar yapılan çalışmalardan farklı olarak; kendiliğinden iyileşme ile ilgili nano malzeme-kendiliğinden iyileşen ürün niteliği etkileşiminin daha net anlaşılması amaçlanmıştır.

3.4.9 TGA/DTA

Küp, prizmatik ve silindir numunelerin yüzey ve iç kısımlarından alınan kendiliğinden iyileşmiş numuneler ile TGA analizleri gerçekleştirilmiştir. Kendiliğinden iyileşmiş ECC numunelerinden alınan örnekler sıcaklık değişimlerinin etkisiyle bağlantılı olarak analiz edilmiştir. Bu analiz termogravimetrik testlerle kendiliğinden iyileşmiş numunelerin kütle durumlarının sıcaklığa göre ölçümleri ile gerçekleştirilmiştir. TGA ölçümlerinin sonunda kütle zamana karşı grafik değerleri TGA eğrileri adıyla incelenmektedir. ECC numunelerinin iyileşmiş çatlaklarından alınan örneklerin kütle kayıpları, malzeme kayıplarıyla ya da onu saran ortamla reaksiyona girmesiyle meydana gelmektedir. Bu oluşum TGA ve DTG eğrilerinde pik noktaları meydana getirmektedir. TGA/DTA için yaklaşık 50 mg ağırlığındaki toz numune oda sıcaklığından 1050 °C'ye kadar dakikada 10 °C yükselen sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Sıcaklığa maruz bırakma işlemi dakikada 100 ml nitrojen akışının olduğu karbondioksitsiz bir ortamda gerçekleştirilmiştir. TGA/DTA deneyleri 90 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Öğütme işlemi öncesinde hidrasyon reaksiyonlarının durdurulabilmesi için numuneler, 90. gündeki dayanım ve dayanıklılık testlerinin hemen ardından TGA/DTA analizlerine kadar aseton içerisinde bekletilmiştir.

3.4.10 XRD

Küp, prizmatik ve silindir numunelerin yüzey ve iç kısımlarından alınan kendiliğinden iyileşmiş numuneler ile XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Nihai kendiliğinden iyileşme ürünlerinin kimyasal kompozisyonları X-ışını kırınım (X-ray diffraction – XRD) yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir.

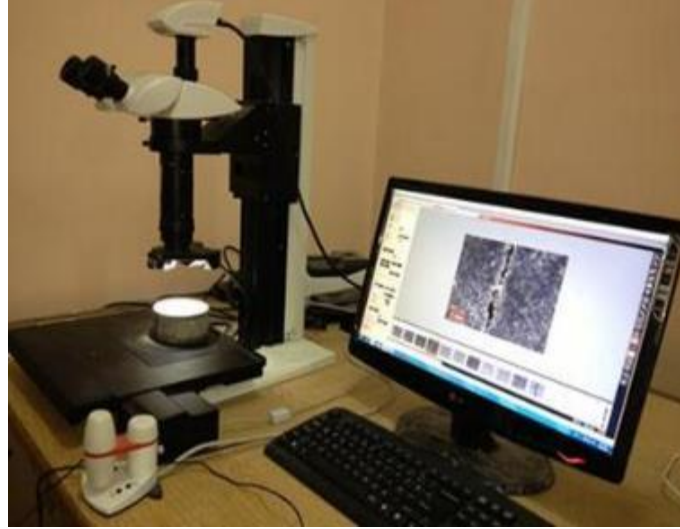
3.4.11 Polarize Mikroskop

Numuneler üzerinde elde edilen çatlaklar ayrıca video mikroskop vasıtasıyla incelenmiştir. Aynı çatlak üzerinde çatlak genişlikleri ile ilgili farklı bölgelerden ölçümler alınmıştır. Tez çalışmasında farklı deney yöntemleri kullanılması nedeniyle kendiliğinden iyileşme mekanizmalarında yanıtıcı varyasyonların önüne geçmek amacıyla her bir karışımdan dört adet çatlaklı numune kullanılmıştır. Diğer deneylerde olduğu gibi mikro yapı çalışmalarında da numuneler kimliklendirilmiş ve sürekli izlenen çatlaklar spesifik olarak numune üzerinde belirlenmiştir. Her numune için çatlak yüzeyinde, yükleme yönüne dik çizgiler çizilmiştir (Şekil 3.37).



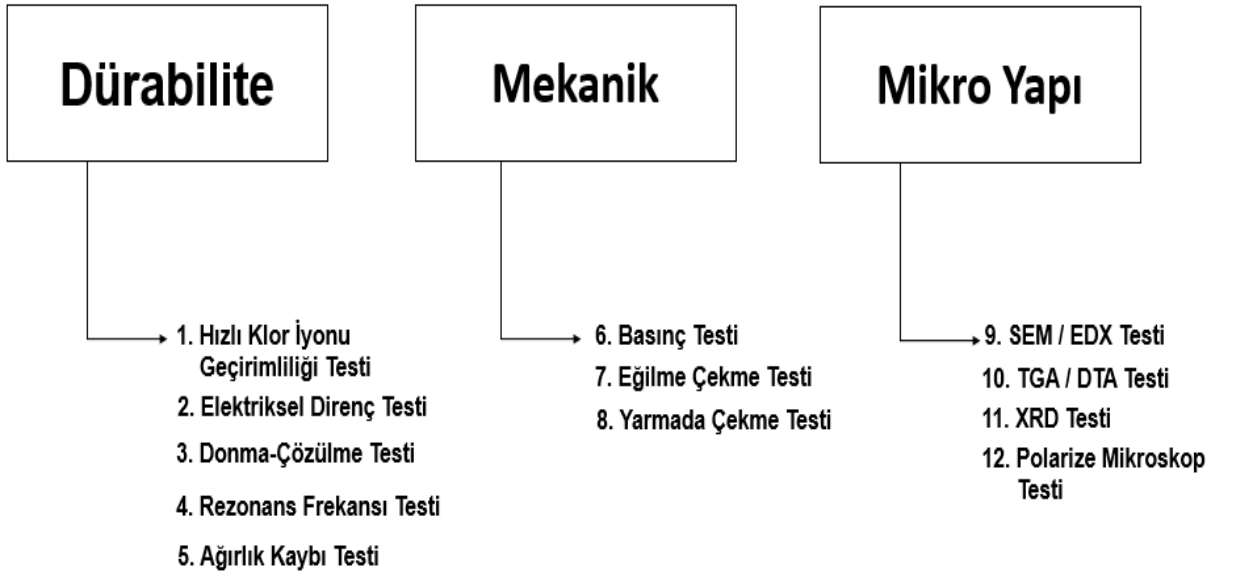
Şekil 3.37 Mikro analizler öncesi numunelerin ve çatlakların kimliklendirilmesi

Çatlak sayısı ve çatlak genişliği, 125X büyütme kapasitesine sahip bir mikroskopla bu çizgi üzerinden ölçülmüştür (Şekil 3.38). Çatlak genişliklerinin değerlendirilmesinde dijital kamera entegreli bir mikroskop kullanılmıştır ve çatlaklar belirli büyütme oranlarında incelenerek fotoğraflanmıştır.



Şekil 3.38 Optik mikroskop aracılığıyla çatlakların takip edilmesi

Tez çalışmasında ECC numunelerinin kendiliğinden iyileşme ve algılama performansının kapsamlı bir şekilde belirlenmesi amacıyla bu kısma kadar anlatılan toplamda 12 farklı deney yöntemi Şekil 3.39’da şematik olarak özetlenmiştir.



Şekil 3.39 Tez kapsamında yürütülen deneysel çalışmaların şematik olarak gösterimi

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Nano Modifiye Edilmiş Çimento Bağlayıcı Kiriş Numunelerin Çok Fonksiyonlu Özellikleri

Beton ve/veya betonarme altyapıların proje safhasında belirlenen servis ömürleri ile kullanılmaları için betonun zamanla zarar görmesinden kaçınmak gerekmektedir. Ancak, günümüzde dünya geneline bakıldığında altyapılar ağır bozulmalar göstermektedir. Bu durumun nedeni daha çok beton malzemesinin kontrolsüz bir şekilde çatlak gelişimi göstermesidir. Bu nedenle çatlak gelişiminin ve tekrarlı bozulma mekanizmalarının kontrol altına alınması yapıların kamu güvenliğini tehdit eden ani yıkılmalara karşı bir çözüm sunmaktadır. Tasarlanmış Çimento Bağlayıcı Kompozitler (“Engineered Cementitious Composites”) karakteristik olarak çatlağı kontrol eden doğal yapısı nedeniyle söz konusu problemlere karşılık bir alternatif olarak yaklaşık yirmi yıl önce geliştirilen bir yapı malzemesidir.

ECC malzemesinin inşaat endüstrisine girmesi ile beraber (Li, 1998) ECC ile ilgili araştırmalarda çok sayıda araştırma yapılmaya başlanmıştır. ECC’nin kendini kanıtladığı mekanik ve dürabilite özelliklerinin yanında ayrıca otojen kendiliğinden iyileşme gibi farklı fonksiyonel özellikleri ECC özelinde uyarlanmış ve literatüre aktarılmıştır (Şahmaran ve Li, 2009). Her ne kadar geleneksel betonda da otojen kendiliğinden iyileşme yeteneği olsa da kontrolsüz çatlak gelişimi çatlakların tamamen kapanmasını ve etkili bir iyileşme mekanizması oluşturulmasının önünde engel oluşturmaktadır. ECC malzemesi daha önce 1. Bölümde detaylı olarak bahsedildiği üzere dar çatlak genişliği ve zengin bağlayıcı hamur fazı sayesinde otojen kendiliğinden iyileştirme mekanizması bakımından çok üstün bir malzemedir (Şahmaran ve diğerleri, 2017, Yıldırım ve diğerleri, 2015, Şahmaran ve diğerleri, 2014). ECC’nin kendiliğinden iyileşme kabiliyeti farklı kür süreleri ve farklı kimyasal kompozisyonlar ile çeşitli koşullar altında geniş bir biçimde araştırılmıştır (Yıldırım et al. 2015, Snoeck and De Belie 2015, Ferrara et al. 2018).

Her ne kadar kendiliğinden iyileşme yapısal olmayan bir fonksiyon olarak değerlendirilse de mekanik ve dürabilite gibi yapısal pek çok özelliğe çok ciddi katkılar yapmaktadır. Böylelikle yapıların tekrarlı onarım/bakım/güçlendirme faaliyetlerini azalmaktadır (Şahmaran and Li, 2009). ECC ile ilgili olarak bir diğer yapısal olmayan fonksiyonel özellik kullanıcılara hasar oluşumu ve gelişimi hakkında sürekli bir bilgi seti sunan kendiliğinden algılama yeteneğidir. Bu özellik daha çok yapısal sağlık izleme amaçlı ve ani göçmenin önlenmesi için faydalı olma potansiyeli taşımaktadır (Yıldırım ve diğerleri, 2018). Beton gibi malzemelere benzer şekilde, ECC karışımları da Portland çimentosu, puzolanik malzemeler (uçucu kül ve cüruf) (Alyousif ve diğerleri, 2015, Şahmaran ve diğerleri, 2013) su, kimyasal katkıları ve kısa/iletken olmayan ve rastgele dağılmış lifler (Li 1998, Al-Najjar ve diğerleri, 2016, Felekoğlu ve diğerleri, 2016) içermektedir. Bu malzemeler ile yarı iletken bir çimento esaslı kompozit tasarlanmaktadır. Ancak ECC malzemelerinin yüksek hasar toleransına sahip olması, üzerine uygulanan yüklerle birlikte değişen elektriksel özellikleri ile kendiliğinden algılama davranışını daha hassas bir şekilde elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Bilindik çimento esaslı malzemelere benzer şekilde ECC'nin elektriksel özellikleri (kendiliğinden algılama davranışı) hidrasyon/puzolanik reaksiyonlar, su muhtevası, boşluk solüsyonu kimyası vb. gibi nedenlerle ciddi biçimde değişebilir. Bu nedenle ECC malzemesinin elektriksel özelliklerindeki ani değişimler daha iyi kendiliğinden algılama yeteneği için kontrol edilmelidir. Bu nedenle, güvenilir kendiliğinden algılama sonuçları ve yüksek elektriksel iletkenlik özelliklerini sağlamak için ECC malzemelerinin üretiminde bazı iletken malzemeler de kullanılmaktadır. Literatürdeki çalışmalar çok düşük miktarda elektriksel olarak iletken malzeme kullanımının sadece kendiliğinden algılama değil aynı zamanda mekanik/dürabilite performansı açısından da ciddi iyileştirmeler sağladığını göstermektedir. (Hou 2008, Lin ve diğerleri, 2011, Li ve diğerleri, 2013, Al-Dahawi ve diğerleri, 2017, Al-Dahawi ve diğerleri, 2016).

Bu bölümdeki çalışmanın temel amacı geleneksel içerik ve özelliklerdeki ECC karışımlarını nano ölçekte modifiye ederek kendiliğinden algılama ve kendiliğinden iyileştirme özelliklerini kazandırmaktadır. Böylece ECC malzemelerinin daha fazla kullanımını yaygınlaştırmak amaçlanmıştır. Her ne kadar literatürdeki bazı araştırmacılar, NS'yi (nano silika) ECC malzemelerinin dayanım ve dürabilite özelliklerini iyileştirmek (Mohammed et al. 2017) ve KNT'leri (karbon nano tüpler) ise elektriksel özellikleri geliştirmek için kullansalar da (Al-Dahawi et al. 2016, Kim et al. 2014), detaylı literatür taraması göstermektedir ki kendiliğinden iyileşme ve

kendiliğinden algılama amaçlı NS ve/veya KNT içeren ECC karışımları daha önce test edilmemiştir. Bu nedenle bu bölümdeki çalışma ECC karışımlarının nano ölçekte NS ve KNT malzemeleri ile modifiye edilerek kendiliğinden iyileşme ve kendiliğinden algılama özelliklerinin kazandırılmasını kapsamaktadır. Bu kısımda nano modifiye edilmiş karışımlar NS ve KNT içeren karışımların yanında hem NS hem KNT içeren karışımlar içermektedir. Nano malzeme içermeyen kontrol karışımları da sonuçların karşılaştırma yapılması amacıyla kullanılmıştır. Bu bölümde ayrıca ön yükleme öncesi ve sonrası kendiliğinden algılama ve kendiliğinden iyileşme özelliklerinin yanında hasar verilmemiş numunelerin basınç dayanımları da belirlenmiştir. Kendiliğinden iyileşme oranları video mikroskop aracılığıyla ölçülen çatlak genişlikleri ve elektriksel direnç sonuçları ile karşılaştırılarak verilmiştir. Bunların yanında farklı kendiliğinden iyileştirme ürünlerini karakterize etmek amacıyla iyileşmiş çatlaklar üzerinde taramalı elektron mikroskopu (SEM/EDX) ve termogravimetrik testler (TG/DTG) gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar her ne kadar tek başına kullanılan KNT'lerin ECC karışımlarında kendiliğinden algılama ve kendiliğinden iyileşme özelliklerini tetiklese de, NS ve KNT malzemelerinin ikili kullanımının bu özellikleri çok daha iyileştirdiğini göstermektedir. Özellikle C-S-H ve CaCO₃ yoğunluklarının ve miktarlarının her iki nano malzemenin (KNT ve NS) kullanıldığı durumlarda arttığı gözlemlenmiştir.

4.1.2. Deneysel Program

4.1.2.1. Malzemeler

ECC karışımlarında, ASTM-1 çimento tipine benzer şekilde CEM I 42.5R Portland çimentosu, %3.48 kireç içeren F-sınıfı uçucu kül, maksimum tane çapı 1 mm, su emme kapasitesi %0.3 ve özgül ağırlığı 2.60 olan silis kumu kullanılmıştır. Ayrıca karışımlarda şebeke suyunun yanında polikarboksilik eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı ve PVA lifleri de kullanılmıştır. Birçok ECC malzemesine yönelik araştırmanın aksine bu çalışmada toplam karışım hacminin %2'si (26 kg/m³) yerine %1,1 (15 kg/m³) PVA lifi kullanılmıştır. Böylece numunelerin çatlak karakteristikleri kadar düşük maliyette tasarlanması da amaçlanmıştır. Bilindiği üzere literatürde standart ECC karışımı olarak bilinen ECC-M45 karışımında PVA lif oranı toplamda karışımın hacminin %2'si olarak kullanılmaktadır (Şahmaran and Li 2008). Bu oranda numunelerin çekme gerilmeleri nedeniyle meydana gelen çatlak açıklıkları kırılma anına yakın yükleme mertebelerinde dahi genellikle 100 µm'dan daha az olmaktadır.

100 μm 'dan daha dar genişlikteki çatlaklar ıslanma kurulanma ve suda kür gibi işlemlerle otojen kendiliğinden iyileşme göstererek kapanmaktadır (Yıldırım ve diğerleri, 2015). Literatürdeki nano malzemelerle geleneksel ECC karışımlarının otojen kendiliğinden iyileşme üzerine yapılan araştırmalardan (Sakulich and Li 2011, Sun et al. 2017), farklı olarak bu çalışma toplam lif miktarını sınırlayarak 100 μm 'dan daha geniş çatlakların nano malzeme varlığında kendiliğinden iyileşme kabiliyetini incelemiştir. Kullanılan malzemelerin özellikleri daha önce Bölüm 3: Materyal ve Yöntem kısmında verildiği için bu bölümde tekrar malzemelerin bireysel özellikleri üzerinde durulmamıştır.

4.1.2.2. Karışım Oranları

Bütün karışımlar sabit uçucu kül (UK) Portland çimentosu (PÇ) oranında (1.2) üretilmiştir. Su / bağlayıcı oranı 0.27'dir. Kısaca UK/PÇ oranı standart ECC-M45 karışımına (Şahmaran and Li, 2008) benzer şekilde tercih edilmiştir. KNT miktarı ise Al-Dahawi ve diğerlerinin, (2016) çalışmasına bağlı olarak seçilmiştir. İlgili çalışmada ECC karışımları farklı oranlarda KNT ile hazırlanmış ve farklı kür yaşlarında elektriksel dirençlerindeki değişimler belirlenmiştir. Araştırma sonuçları KNT miktarının bağlayıcı malzeme oranınca %0.55 oranını geçtiği durumlarda elektriksel özelliklerin çok fazla değişmediğini göstermektedir. KNT kullanımının ECC karışımlarındaki bu kritik oranı literatürde sızdırma eşiği (percolation threshold) olarak tanımlanmakta ve karbon nano tüp miktarının çimento esaslı kompozitlerin elektriksel direnç değerlerindeki ani düşüşlerinin son bulduğu değere karşılık gelmektedir. Her ne kadar kritik kullanım sınırı olarak tarif edilen sızdırma eşiği farklı kür yaşlarında değişiklik gösterse de (Schuller ve diğerleri, 1998), bağlayıcı malzeme oranınca %0.55 KNT kullanımı çimento esaslı karışımların elektriksel direnç değerlerinde 1, 3, 7, 28, 90 ve 180 günlük ölçümlerde düşüş sağlamıştır (Al-Dahawi ve diğerleri, 2016). Dolayısıyla bu çalışmada 7 günden 97 güne kadar kür yaşından bağımsız olmak üzere söz konusu miktardaki KNT katkısının kendiliğinden algılama amacıyla kullanılabilmesini mümkün olacağı düşünülmüştür. Kısaca her ne kadar farklı kür yaşlarında kritik kullanım sınırı değişmesi mümkün olsa da beton yapıların üretildiği tarihten servis ömrü sonuna kadar yapısal sağlık izleme amaçlı kullanılması gerektiğinden bütün yaşlardaki numunelerde bağlayıcı malzeme oranınca %0.55 KNT-ECC karışımlarında yer almıştır.

Ayrıca, belirtilmelidir ki, bu noktada NS miktarı elektriksel olarak iletken olmamasından dolayı sadece mekanik açıdan irdelenmiştir. Bu amaçla mekanik açıdan optimum NS içeriğine karar vermek için bir ön araştırma programı oluşturulmuştur. Bu aşamada NS, ECC karışımları içerisine bağlayıcı malzeme oranınca toplamda %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında ilave edilmiştir. Karışım yöntemi ve ön deney sonuçları sonraki aşamalarda irdelendiğinden bu noktada daha fazla bir yorum getirilmemiştir. Her iki nano malzemenin (KNT ve NS) kullanıldığı karışımlarda ise mekanik testler sonucunda karar verilen optimum NS miktarı diğer karışımlarla benzer şekilde (daha az PVA [15 kg/m^3]) ECC karışımına ilave edilerek üretilmiştir. Ancak, her iki nano malzemenin kullanıldığı durumlarda çok aşamalı sızdırma eşiği ile ilgili araştırmalar (Sanches ve diğerleri, 2017), iki nano malzemenin sabit bir işlenebilirlik için karışıma gerektirdiği farklı kimyasal katkı ve kompozisyon nedeniyle gerekmektedir. Mevcut çalışmada KNT ve NS nano malzemelerinin kullanımı sırasıyla optimum elektrik ve mekanik özellikler yönünden ele alınmıştır. Bu sayede farklı nano malzeme ve kimyasal katkı içeriği haricinde geliştirilen özel beton karışımlarının kendiliğinden iyileşme ve kendiliğinden algılama açısından birbirleri ile özdeş olması sağlanmıştır. Kısaca özetlemek gerekirse farklı iki nano malzemenin karışımlarda kullanılması KNT'nin kritik kullanım sınırını değiştirmesi muhtemeldir. Bunun nedeni NS varlığında karışımların iyonik konsantrasyonlarının değişmesi ve buna bağlı olarak elektriksel iletken yolların etkilenmesi ile ilişkilendirilebilir (Tchmutin ve diğerleri, 1998). Bu nedenle farklı nano malzemelerin elektriksel teması ve parçacıklar arası elektriksel yükün aktarılmasının (tünel etkisi) değişmesi ECC karışımlarında NS ve KNT'nin birlikte kullanıldığı durumlarda tam olarak bir sızdırma eşiği değeri elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle sözü edilen konu özelinde daha ileri araştırmalar gerekmektedir.

Nano malzemelerin bireysel olarak ECC karışımlarında kullanılma teknikleri bir önceki bölümde detaylı olarak sunulduğundan bu noktada tekrar bir açıklama yapılmamıştır. Ancak her iki nano malzemenin birlikte PVA lifli azaltılmış ECC kullanılması açıklanacak olursa öncelikle KNT toplam karışım suyunun yarısı ve yüksek oranda su azaltıcı katkının $\frac{3}{4}$ 'ü ile ayrı bir karıştırıcıda 15 dakika boyunca dakikada 3000 devirde (round per minute[rpm]) karıştırılmıştır. Ardından NS karışım suyunun kalan yarısı ve yüksek oranda su azaltıcı katkının $\frac{1}{4}$ 'ü ile birlikte ultrasonik bir karıştırıcı vasıtasıyla 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Birinci ve ikinci aşamaların

tamamlanmasının ardından karışımların katı içerikleri 100 rpm'de standart harç mikserinde 1 dakika süresince karıştırılmıştır. Ardından hazırlanan NS ve KNT solüsyonları yavaşça esas karışımın içerisine dökülmüştür. Kısaca daha önce açıklandığı üzere ECC-KNT/NS karışımı ECC-NS ve ECC-KNT karışımlarına benzer şekilde üretilmiştir. Ancak karışım sırasında sadece karışım suyu ve yüksek oranda su azaltıcı kimyasal katkıının kullanım sırası ve nano malzemelerle muamele edilişindeki miktarlar farklılık içermektedir. nano malzemelerin beton karışımlarındaki üniform dağılımı daha yoğun bir mikro yapı oluşumu ile mekanik özelliklerden ve kendiliğinden algılama performansından ödün vermemek için oldukça elzemdir. Literatürde farklı karışım teknikleri KNT ve NS malzemeleri için kullanılmıştır (Al-Dahawi ve diğerleri, 2016, Yeşilmen ve diğerleri, 2015, Öztürk, 2015).

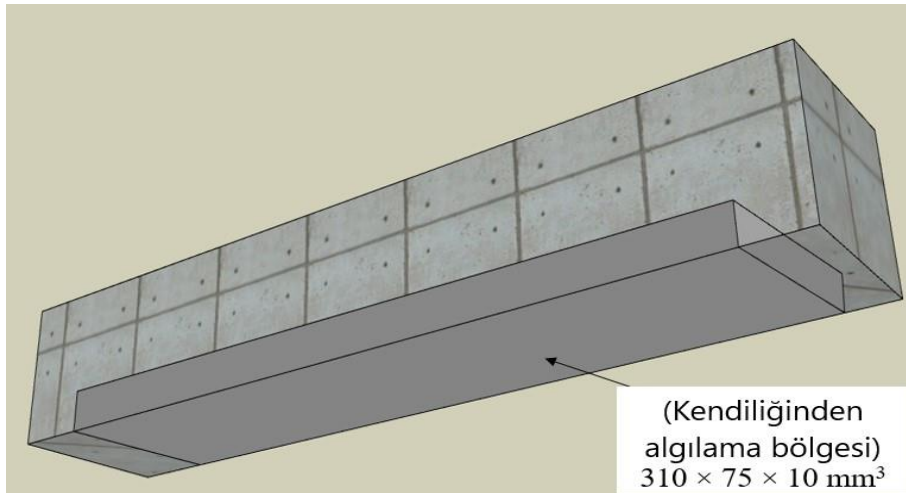
Karışım işlemlerinin tamamlanmasından sonra taze karışımlar yağ ile kaplanmış kalıplara dökülmüş ve plastik kaplarla çevrilerek %50±5 bağıl nemde 23±2 °C'de 24 saat süresince kür edilmiştir. Basınç dayanımı için ayrılan numuneler ise benzer şekilde plastik kaplar ile örtüldükten sonra %95±5 bağıl nem ve 23±2 °C'de 7, 28 ve 90 günlük günlerde test edilmek üzere kür edilmişlerdir. Kendiliğinden iyileşme ve kendiliğinden algılama performansının değerlendirilmesi için ayrılan numuneler ise 7 günlük ilk kür döneminin ardından ön yüklemeye tabi tutulmuş (Bölüm 3) ve ön yüklemenin ardından ilave olarak 90 gün daha kür edilmiştir.

4.1.2.3. Basınç Dayanımı Testleri

Tez çalışmasının ana amacı kendiliğinden iyileşme ve kendiliğinden algılama fonksiyonlarını ECC karışımlarında geliştirmek olsa da, farklı nano malzemeler içeren numunelerin basınç yükleri altındaki davranışını belirlemek amacıyla testler gerçekleştirilmiştir. Deneyler numunelerin 7, 28 ve 90 günlük yaşlarında gerçekleştirilmiş olup yükleme hızı 0,9 kN/s tercih edilmiştir. Sonuçlar, her bir karışıma ait 6 adet küp numunenin ortalama basınç dayanımı değerleri alınarak belirlenmiştir.

4.1.2.4. Kendiliğinden İyileşme ve Kendiliğinden Algılama Özelliklerinin Belirlenmesi

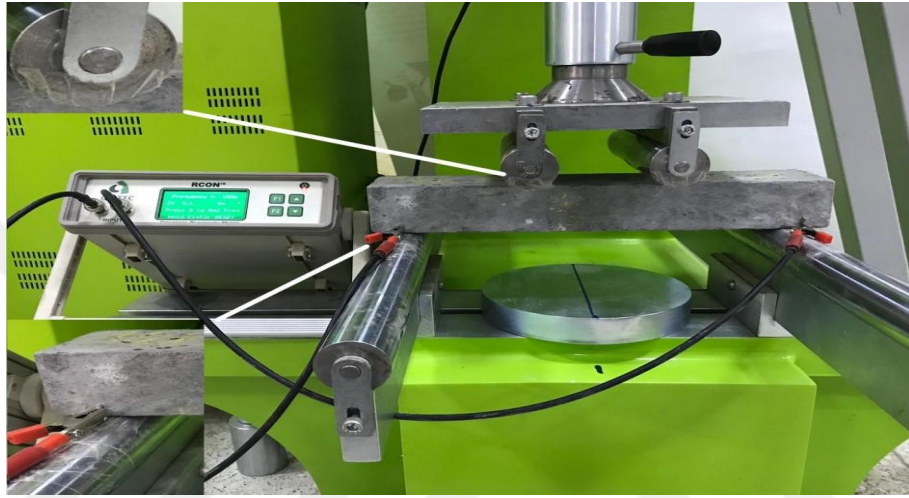
ECC karışımları ile bütünleştirilen kendiliğinden algılama ve kendiliğinden iyileşme fonksiyonları hasarsız ve hasarlı numuneler üzerinde elektriksel direnç (ED) testleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla $360 \times 75 \times 50$ mm (uzunluk \times yükseklik \times genişlik) boyutlarındaki numuneler hazırlanarak 4 noktalı eğilme testi altında veri kaydedebilen universal deney cihazı ile test edilmiştir. Eğilme yükleri 304 mm mesnet açıklığındaki numunelere 0.005 mm/s. yükleme hızında uygulanmıştır. ECC numunelerindeki elektriksel değişimi ölçmek amacıyla 100×10 mm (boy \times genişlik) boyutlarındaki pirinç elektrotlar kullanılmıştır. Pirinç elektrotlar numunelerin içerisine taze halde gömülmüştür. Elektrotlar numunelerin çekme bölgesinde her iki kenarından 25 mm olacak şekilde yerleştirilmiş olup toplamda $310 \times 75 \times 10$ mm³'lük bir bölgedeki elektriksel direnç değişimini taramaktadır (Şekil 4.1). Tez çalışmasında tercih edilen bu yöntem daha önce Al-Dahawi ve diğerleri, (2017) yaptığı çalışmalarda elektriksel ölçüm tekniğine göre karar verilmiştir. Buna yönteme göre elektrotlar yükleme noktalarındaki çatlakların lokalize olması ve numunelerin daha hızlı göçmelerini engellemek amacıyla numune kenarlarına yakın yerlere gömülmüşlerdir. Ölçümler sırasında elektriksel değerlerin hassas bir şekilde alınması için kiriş numuneler ile universal test cihazı arasında ve mesnet noktalarında yalıtkan malzeme konmuştur.



Şekil 4.1 Kiriş numunelerden elektriksel direnç verilerinin elde edildiği çekme bölgesi

Numunelerin nem durumu elektriksel ölçümler yapılmadan önce 24 saat süresince 60°C fırında tutularak standart hale getirilmiştir. Böylelikle nem durumu

kaynaklı ED ölçümlerinde herhangi bir varyasyon ile karşılaşılmamıştır. Nem durumu standart hale getirilirken 60°C seçilmesinin nedeni elektrotların gömüldüğü yer ile numune arasında herhangi bir mikro çatlak meydana gelmesini engellemek içindir. Bu işlem ayrıca su muhtevassından dolayı ED değerlerinde herhangi bir farklılık ortaya çıkmaması içinde tercih edilmiştir (Siad ve diğerleri, 2018). Daha önceki kısımlarda belirtildiği üzere daha iyi kolay ve hassas ölçümün alındığı iki noktalı elektriksel direnç ölçer (AC) ile deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 4 noktalı eğilmede çekme ve ED testi deney düzeneği

Alternatif akım (AC) ile yapılan yöntemde elektriksel empedans değerleri doğrudan cihazdan okunmaktadır. Ayrıca, polarizasyon etkisi oldukça düşük olup, özellikle büyük ölçekteki elemanlarda daha doğru sonuçlar göstermektedir (Yıldırım ve diğerleri, 2018). İki noktalı AC beton direnç ölçer cihazının daha önce bahsedildiği üzere frekans değeri polarizasyon etkisini en aza indirmek için 1 kHz'de sabitlenmiştir (Şahmaran ve diğerleri, 2017; Hou 2008). Elektriksel verilerin elektriksel direnç değerine dönüşümü ve geometrik parametrelere dair formüller 3.Bölümde detaylı olarak verildiğinden burada tekrar değinilmemiştir. Kendiliğinden algılama ve kendiliğinden iyileşme performansı ED testleri ile gerçekleştirilmiş olup numuneler 7 günlük yaşlarında çatlak oluşturmak amacıyla ön yüklemeye tabi tutulmuşlardır. Ön yükleme derecesi numunelerin nihai yük taşıma kapasitesinin %75'i mertebesinde uygulanmış olup ağır hasar verilmiştir. Nano malzemelerin ECC numuneleri üzerindeki kendiliğinden algılama performansını değerlendirmek amacıyla ED değerleri yüklemeye önce ve sonra kaydedilmiştir. Bu amaçla aşağıda verilen denklem (3.3) ED değerlerindeki oransal değişimler için kullanılmıştır;

$$FCER = \frac{ER_{PL} - ER_S}{ER_S} \times 100 \quad (3.3)$$

Burada, $FCER$, ER_{PL} and ER_S sırasıyla elektriksel dirençteki yüzdesel değişime, ön yüklenmiş numunenin elektriksel direnç değerine ve hasarsız haldeki numunenin elektriksel direnç değerine karşılık gelmektedir. Ön yüklemenin ardından kaydedilen ilk ED değeri elektriksel özelliklerin irdelenmesinde referans olarak ele alınmıştır Yıldırım ve diğerleri, (2015). Böylece kombine edilen kendiliğinden algılama ve kendiliğinden iyileşme özellikleri nano ölçekte modifiye edilen ECC numunelerinin 7, 28 ve 90 günlük sürelerinde belirlenmiştir. Kendiliğinden iyileşme oranı ise 7 günlük hasarsız numunelerden referans alınan elektriksel direnç değerlerinin zamana bağlı olarak (7, 28 ve 90 günlük) hasarlı numunelerle karşılaştırılması ile belirlenmiştir. Hesaplamalar sırasında kullanılan denklem (3.4) aşağıda verilmiştir.

$$\% = \left[\left\{ \frac{(ER_{PL} \text{ at } i^{th} \text{ day} - ER_{PL} \text{ at } 7^{th} \text{ day})}{(ER_{PL} \text{ at } 7^{th} \text{ day})} \times 100 \right\} - \left\{ \frac{(ER_S \text{ at } i^{th} \text{ day} - ER_S \text{ at } 7^{th} \text{ day})}{(ER_S \text{ at } 7^{th} \text{ day})} \times 100 \right\} \right] \quad (3.4)$$

Burada, ER_{PL} and ER_S sırasıyla hasarlı ve hasarsız haldeki numunelerin elektriksel direnç değerlerine karşılık gelmektedir. Nano malzemelerle geliştirilen ECC numunelerinde kendiliğinden algılama ve kendiliğinden iyileşmeye dair elde edilen bulguları desteklemek adına detaylı mikroanalizler gerçekleştirilmiştir. Mikro çatlak genişlikleri ön yüklemmeden sonra belirlenmiş ve çatlak genişliklerindeki değişimler 7, 28 ve 90 günlük zamanlarda tekrar kaydedilmiştir. Fiziksel anlamda yapılan bu çatlak ölçümleri Leica DFC450 C video mikroskop yardımıyla yapılmış olup cihazın büyütme kapasitesi 125X'tir. Ayrıca, mikro analizler daha önce bahsedildiği gibi SEM ve TG analizleri ile de gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sırasında 20.0 kV'da işlem yapan QUANTA 400F Field Emission SEM markalı cihaz ve Diamond TG/DTA markalı cihazlar kullanılmıştır. TG/DTG analizi için elde edilen tozlar kendiliğinden iyileşmiş çatlakların yüzeyinden ve 5 mm altından bir jilet vasıtasıyla kazınmış olup analiz süresine kadar hidratasyonun devam etmemesi için aseton ile muamele edilmiştir. Numunelerin termal analizleri sırasında toz örnekler (her bir karışımdan 50 mg) oda sıcaklığından 1050 °C'ye kadar 10 °C/dk. hızında test edilmiştir.

4.1.3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

4.1.3.1. Ön deneyler ve Basınç Dayanımı Sonuçları

Daha önce kısaca açıklandığı gibi NS taneciklerinin ECC karışımları içerisinde ne oranda kullanılacağına yönelik araştırmalar küp numunelerin 28 günlük yaşlarındaki basınç dayanımı testleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla toplam bağlayıcı malzeme miktarının %1-2-3-4-5 oranlarında kullanılan NS ile ECC karışımları aynı sayıda nano malzeme içermeyen ECC karışımları ile birlikte üretilmiştir. Her bir karışımdan 4 adet numune üretilmiş ve elde edilen basınç dayanımı sonuçlarının ortalamaları alınarak Çizelge 4.1’de sunulmuştur.

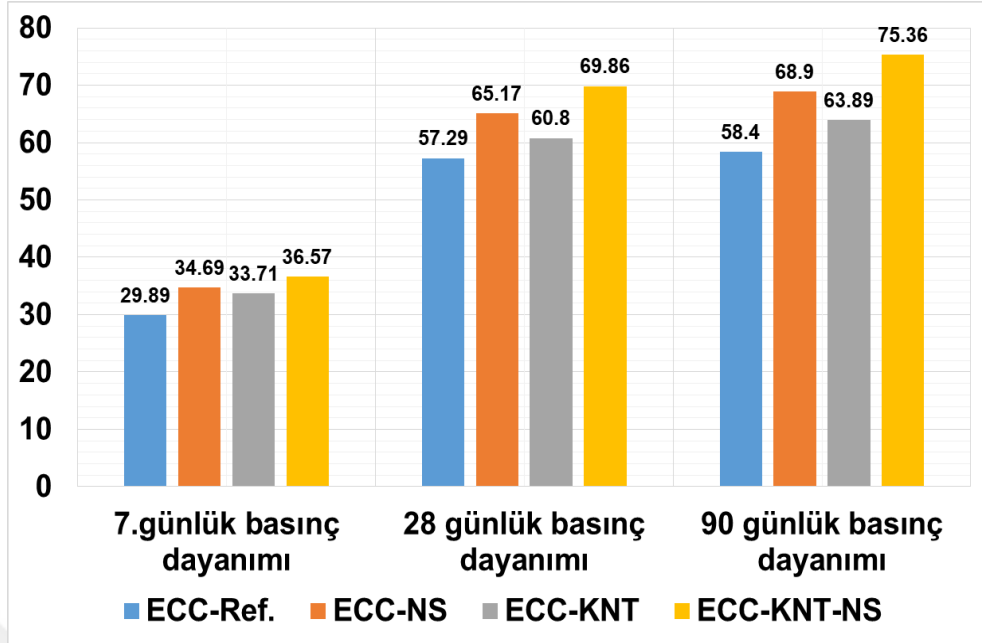
Çizelge 4.1 Farklı miktarlarda NS içeren ECC numunelerinin basınç dayanımı sonuçları (sonuçlar MPa cinsindedir ve parantez içinde gösterilen değerler standart sapmalarıdır)

ECC-Ref	ECC-NS-1%	ECC-NS-2%	ECC-NS-3%	ECC-NS-4%	ECC-NS-5%
61.0 (4.10)	61.3 (3.81)	65.0 (0.96)	68.7 (0.87)	69.9 (1.28)	70.3 (1.18)

Çizelge 4.2’de görüldüğü üzere NS miktarı arttıkça basınç dayanımlarında sürekli bir artış görülmektedir. Ancak basınç dayanımı sonuçlarındaki artış %3 NS kullanımının olduğu karışımların ortama basınç dayanımı sonuçlarından görüleceği üzere artış miktarı azalmıştır. Çizelgede verilen sonuçlar ve NS malzemesinin üretim maliyetleri de göz önüne alındığında esas deneylerdeki ECC karışımlarında NS kullanım oranının bağlayıcı malzeme ağırlığına %3 olmasına karar verilmiştir. Ön deneylerin ardından esas deneylerde nano malzemelerle takviye edilen ECC karışımlarının ASTM C39 standardına basınç dayanımları belirlenmiştir. Çizelge 4.2’de her bir karışımdan hazırlanan 6 adet numunenin ortalama değerleri verilmiştir. Basınç dayanımı test sonuçlarının varyasyon değişkeni %2’nin altında sonuçlandığından değerler ortalama olarak gösterilmiştir. Sonuçların daha iyi irdelenmesi için numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri Şekil 4.3’te ayrıca sunulmuştur.

Çizelge 4.2 Farklı ECC karışımlarının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları (MPa)

Numune	7.gün		28. gün			90. gün			
<i>ECC-Ref.</i>	28,96	29,95	30,66	53,84	58,08	59,91	59,14	58,21	57,74
<i>ECC-NS</i>	31,64	36,36	36,09	63,85	65,22	66,43	70,54	68,41	67,77
<i>ECC-KNT</i>	32,48	34,36	34,31	59,32	62,21	60,84	63,45	61,46	66,74
<i>ECC-KNT-NS</i>	36,20	36,08	37,45	69,79	70,36	69,44	74,58	73,48	77,98



Şekil 4.3 ECC numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

7 günlük basınç dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek basınç dayanımına ECC-KNT/NS numunelerinin sahip olduğu görülecektir. ECC-KNT/NS numunelerinin ortalama basınç dayanımı referans ECC karışımlarına (ECC-Ref.) kıyasla 7.günde %18,4 daha yüksektir. Basınç dayanımındaki söz konusu artışın nedeni nano ölçekteki (nano silika ve karbon nano tüp) malzemelerinin üstün karakteristik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. ECC-KNT/NS karışımlarında kullanılan nano silika tanecikleri karışımlarda hidrasyon reaksiyonlarını hızlandırmış ve etkin bir puzolanik aktivite sağlamıştır. Bu durum iki nano malzeme ile hazırlanan ECC karışımlarına ait basınç dayanımının referans numunelerine göre daha yüksek olmasını sağlamıştır. Ayrıca bir başka nedenin de karbon nano tüpler ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. KNT'ler karışımlar içerisinde küçük boşlukları ve mevcut çatlakları köprüleme kabiliyeti sayesinde basınç dayanımını arttırmıştır. KNT'ler C-S-H jelleri için çekirdeklenme etkisi getirerek daha hızlı ve kompakt (yoğun) bir mikro yapı oluşumunu sağlamıştır.

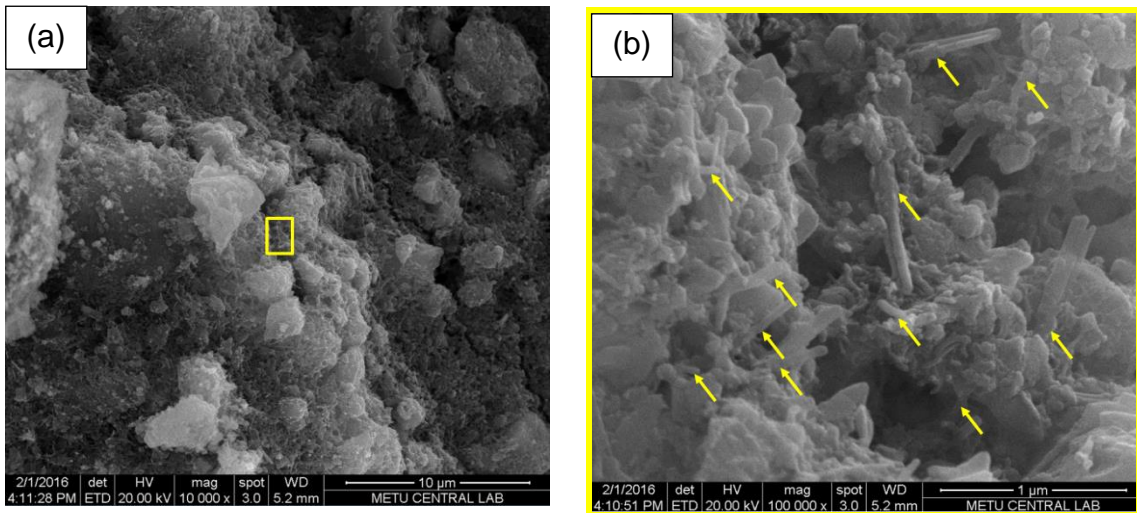
ECC karışımlarında, KNT'lerin meydana getirdiği çekirdeklenme mekanizmasını; C-S-H jel formunun, komşu hidrate olmamış çimento taneciklerinin olduğu bölgede oluşacağı yerde, KNT yüzeyinde oluşması olarak açıklamak mümkündür. Böylelikle ECC-KNT/NS karışımlarında referans karışıma kıyasla hidrasyonun devam edebileceği daha fazla bölge meydana gelmiş olabilir. 7. günde devam eden ve hızla artan hidrasyon ürünleri basınç dayanımını arttıran en önemli

neden olarak tespit edilmiştir. Benzer artış oranı %18 ile 28. Gündeki ECC-Ref ve ECC-KNT/NS numuneleri için elde edilen veriler arasında da görülmektedir. 90. günde ise ECC-KNT/NS numuneleri ECC-Ref numunelerinden ortalama %20'den daha fazla bir basınç dayanımı artışı göstermiştir.

Sonuçlar yorumlanacak olursa, özellikle erken yaşlardan itibaren ortaya çıkan kalsiyum hidroksitin (CH) 28. ve 90. günlerde NS ve UK tarafından tüketilerek mikro yapıda daha sıkı ve yoğun bir oluşum meydana getirdiği söylenebilir. Bu durum, mevcut NS ve UK'nın CH'ı tüketerek, matris içerisindeki önceki C-S-H formunun dolduramadığı mevcut daha küçük boşlukları puzolanik reaksiyon sonucu oluşan yeni C-S-H jelleriyle doldurması ile ilişkilendirilebilir. Söz konusu gelişme daha iyi bir mikro yapının oluşumunu sağlayarak basınç dayanımının ileri yaşlarda yüksek kalmasına yardımcı olmuştur. KNT ise daha önce açıklanan çekirdeklenme etkisi sayesinde hidrasyonu hızlandırmış ve erken yaşlarda kontrol numunelerine kıyasla daha fazla CH'ın kısa sürede matriste oluşmasını tetiklemiş olabilir. Artan puzolanik reaksiyonlar, erken yaşlardan itibaren yukarıda açıklanan nedenlerle ileri yaşlarda dahil olmak üzere, ECC-KNT/NS numuneleri için ECC-Ref numunelerine kıyasla 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda sırasıyla %18,4, %18 ve %20,4 daha yüksek basınç dayanımı elde edilmesini sağlamıştır. Her ne kadar KNT ve NS'yı beraber içeren numuneler kadar yüksek olmasa da, tekil olarak nano malzeme içeren ECC-NS ve ECC-KNT numunelerinde de ECC-Ref numunelerine kıyasla daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Bu değerler ECC-NS karışımları için 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda sırasıyla %16,2, %12,0 ve %15,2 artış oranlarında olmuştur. Sonuçlardan görüleceği üzere ECC-NS karışımları ile elde edilen basınç dayanımları ECC-KNT/NS numuneleri kadar fazla basınç dayanımı göstermemiştir. Bu durumun nedeni önceki kısımlarda bahsedilen ve ön araştırmalar safhasında belirlenen optimum nano malzeme oranlarının seçilmesiyle nano malzemelerden basınç dayanımı yönünden en yüksek performansın elde edilmesidir. Kısaca, KNT ve NS'nin üstün fiziksel boyutlarının hassas oranlarda kombine edilerek ECC karışımlarında kullanılması daha üst seviyede bir mekanik özellik elde edilmesini mümkün kılmıştır. Bu noktada, her iki karışım arasındaki farkın KNT olduğuna dikkat çekilmesi gerekmektedir. Sonuçlardan KNT'nin basınç yükü altında kapiler boşlukları köprüleme özelliği ile daha yüksek yük taşıma kapasitesine yardımcı olduğu anlaşılmaktadır. Daha önce bahsedildiği üzere çekirdeklenme etkisi KNT içeren karışımlarda gözlemlenen bir başka mekanizma olabilir. ECC-KNT

karışımları ile hazırlanan küp numuneler basınç dayanım ortalamaları da tıpkı ECC-NS karışımları gibi referans numunelerden daha yüksektir. Ancak, artışların oranları ECC-NS ve ECC-KNT-NS numuneleri kadar belirgin değildir. Söz konusu yüzdelik artışlar ECC-KNT karışımları için 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda sırasıyla %11, %5,7 ve %8,6 olarak gerçekleşmiştir. Sonuçlara dikkat edildiğinde özellikle 7. gündeki daha yüksek artışın sebebinin KNT'nin daha önce açıklanan hidrasyon gelişimini hızlandırma etkisi ile ilişkili olduğu doğrudan görülebilir. ECC-KNT karışımlarına numunelerin ortalama basınç dayanım sonuçları bütün yaşlarda ECC-NS ve ECC-KNT/NS karışımlarından daha az basınç dayanımı sergilemiştir. Yukarıda açıklanan nedenlerle birlikte düşünüldüğünde, optimum oranlarda kullanılan nano malzemelerin birleşik etkisinin çimento esaslı kompozitlerin mekanik dayanımlarını iyileştirmede çok etkili olduğu söylenebilir. Ancak, burada mekanik artışın nedenini söz konusu nano malzemelerin açıklanan fonksiyonel etkilerinin yanında taze karışımlara homojen olarak dağılımının başarı ile sağlanmasını da eklemek gereklidir. Çimento esaslı sistemlere homojen olarak dağılım yöntemleri kanıtlanmış (Al Dahawi ve diğerleri, 2016) nano malzemelerin, fonksiyonel olmayan bazı özellikleri geliştirdiği gibi (Al Dahawi ve diğerleri, 2017) mekanik özellikleri de iyileştirmede etkin rol oynadığı rahatlıkla belirtilebilir. Bu kısımda sunulan nano malzemelerle modifiye edilmiş ECC numunelerinin ortalama basınç dayanımları özetlenecek olursa, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip NS ve KNT'nin optimum düzeyde (Al Dahawi ve diğerleri, 2016; Yeşilmen ve diğerleri, 2015) karışımlarda yer alması, bütün kür sürelerinde nano malzemelerin karakteristik özelliklerinden istifade edilerek yüksek performans elde edilmesini sağlamıştır. Referans numunelerle kıyaslandığında, tekil olarak KNT ve NS malzemelerinin de ECC karışımlarında yer alması basınç dayanımı yönünden olumlu ve tavsiye edilebilir niteliktedir. Şekil 4.3'te verilen basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, daha önce NS ile ilgili literatürde rapor edilen ileri yaşlarda gözlemlenen dayanım değerlerinde düşüş olduğu (Hou ve diğerleri, 2012) tespit edilmemiştir. Her ne kadar literatürde bu durumun nedenini tam olarak ortaya koyan bir çalışma detaylı olarak mevcut olmasa da (Najigivi ve diğerleri, 2013), muhtemel sebebin çimento esaslı kompozitlerde meydana gelen otojen rötre veya C-S-H jellerinin tobermorite dönüşmesi olabileceği düşünülmektedir (Hou ve diğerleri, 2012). Ayrıca bir başka nedenin NS'in yukarıda açıklandığı gibi daha kompakt bir C-S-H oluşuma neden olarak, UK tanecikleri üzerinde kalın bir tabaka meydana getirmesi ve bunun sonucunda UK taneciklerinin puzolonik reaktivitesini geciktirdiği sanılmaktadır (Najigivi ve

diğerleri, 2013). Bu nedenlere bakıldığında, her ne kadar basınç dayanımı artışları bütün yaşlarda net bir biçimde NS içeren karışımlar için gözlemlense de, farklı yaşlardaki dayanım kazanma hızlarına dikkat edildiğinde, ileri yaşlarda NS içeren her iki numunenin dayanım kazanma hızının (28 ve 90 günler arası) ECC-Ref. karışımlarına kıyasla azaldığı görülmektedir. 7 günlük yaşlarda NS içeren karışımların daha yüksek basınç dayanımları her ne kadar diğer yaşlarda yüksek kalmaya devam etse de, dayanım artış hızı 28 ve 90. günler arası ECC-Ref numuneye kıyasla az bir miktarda olsa düşük kalmıştır. Sonuçlardan 7, 28 ve 90 günlük 4 farklı karışım tipi için verilen dayanım kazanma hızlarının genel olarak benzer olduğu anlaşılmasına rağmen, NS içeren karışımlarının ileri yaşlarda dayanım kazanma hızının azaldığı belirtilmelidir. Elde edilen sonuçlar daha önce açıklanan nedenlerin aksine, ileri yaşlarda NS içeren her iki karışım (ECC-NS ve ECC-KNT/NS) için otojen rötre ve C-S-H jellerinin tobermorite dönüşmesi gibi bir oluşum olmadığını göstermektedir. Ancak dayanım hızının ileri yaşlarda ECC-Ref numunelerine kıyasla az bir oranda olsa da düşüş göstermesi; NS'in meydana getirdiği yoğun C-S-H formasyonunun UK üzerinde kalın bir tabaka ile örtmesine ve sonuç olarak UK'nın puzolonik reaksiyonunun bir miktar aksamasına neden olduğu ile ilişkilendirilebilir (Najigivi ve diğerleri, 2013). Aşağıda Şekil 4.4'te 28 günlük ECC-CNT/NS numunesine ait SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntülerden sarı oklarla gösterilen CNT taneciklerinin çevresinde ve üzerinde çekirdeklenme etkisi ile oluşmuş yoğun hidrasyon ürünleri görülmektedir.



Şekil 4.4 28 günlük ECC-KNT/NS numunesine ait SEM görüntüsü; (a) genel, (b) KNT tanecikleri üzerinde ve etrafında oluşmuş yoğun hidrasyon ürünleri

4.1.3.2. Elektriksel Direnç Sonuçlarına Göre Entegre Kendiliğinden İyileşme ve Kendiliğinden Algılama Performansı

Hasarsız ve hasarlı kiriş numunelerin elektriksel direnç sonuçlarına ait ortalama değerler Çizelge 4.3'te verilmiştir. Çizelgede verilen elektriksel direnç sonuçları her karışımdan 4 adet numunenin ortalaması olarak hesaplanmıştır. Önemle belirtilmesi gerekir ki numunelerden elde edilen ED değerleri birbirine çok yakın sonuçlanmış olup varyasyon katsayısı %3'ten daha azdır.

Çizelge 4.3. Kiriş numunelerin ortalama ED sonuçları (birimler $\Omega.m$ cinsindedir).

Karışım Adı	Hasarsız				Hasarlı			
	7-gün	14-gün	35-gün	97-gün	7-gün	14-gün	35-gün	97-gün
ECC-Ref.	23.0	30.2	34.1	80.1	24.5	33.7	39.1	94.0
ECC-NS	12.3	16.5	24.6	52.3	15.4	23.6	38.4	74.2
ECC-KNT	9.31	16.1	21.2	31.2	19.0	39.2	51.6	73.5
ECC-NS/KNT	19.6	23.3	36.7	45.6	26.7	43.9	64.2	79.2

Betonun elektriksel direnç değerlerindeki değişim temel olarak boşluk yapısı, boşluk solüsyonu kimyası ve boşlukların kıvrımlılığı ile ilgilidir (Spragg ve diğerleri, 2013). Bu nedenle ortalama ED değerlerindeki değişimler bu parametreler dikkate alınarak incelenmiştir. Çizelge 4.3'te gösterildiği üzere, devam eden hidratasyon/puzzolanik reaksiyonlar sonucu daha az iletken iyonik parçacıklar ve daha az sayıdaki az dirençli kıvrımlar nedeniyle bütün hasarsız numunelerde ED değerleri artmıştır (Yıldırım ve diğerleri, 2015). Ancak, yine de ED sonuçları çok yüksek oranda karışımların kompozisyonuna bağlıdır. Hasarsız numuneler için bütün kür yaşlarında, en yüksek ED değeri ECC-Ref. karışımı için kaydedilmiştir. ECC-Ref. karışımını sırasıyla ECC-KNT/NS, ECC-NS ve ECC-KNT karışımları takip etmiştir. Sonuçlarda özellikle ECC-NS numunelerinin ECC-Ref numunelerine kıyasla daha düşük ED sonuçları göstermesi şaşırtıcıdır. Çünkü ECC karışımlarına NS ilavesinin, karışım suyu miktarını azaltarak boşlukların kıvrımlılığını, devam eden hidratasyonlar ve puzzolanik reaksiyonlarla arttırması beklenmekteydi. Ancak, elde edilen sonuç daha çok boşluk solüsyonun iyonik durumu ile yakından ilişkili olabilir. Çimento esaslı malzemeler su ile karıştığında karışım suyuna yüksek oranlarda Na^+ , K^+ , OH^- , Ca^{2+} ve SO_4^{2-} iyonları salmaktadır. Prizin ve erken yaşlardaki hidratasyonun etkisi ile Ca^{2+} and SO_4^{2-} iyonları dikkate değer biçimde azalmaktadır. Bu durum boşluk suyundaki çözülmüş alkali

hidroksilleri azaltmaktadır. Adamson (1973)'a göre Na^+ , K^+ , OH^- iyonlarının elektriksel iletkenlikleri 25 °C gibi oda sıcaklığı sayılabilecek bir seviyede sırasıyla 50,1, 73,5 and 198 $\text{cm}^2 \cdot \text{equiv}^{-1} \cdot \Omega^{-1}$ 'dir.

Yüksek derecede puzolanik olarak aktif NS taneciklerinin varlığında H_2SiO_2 daha fazla Ca^{2+} tüketerek ikincil C-S-H jellerinin oluşmasını sağlamış olabilir. Bu durum numunelerin boşuklarında OH^- iyonlarını arttırmış olabilir (Singh ve diğerleri, 2013). Böylece azalan OH^- iyonu, ECC-NS numunelerinin ortalama ED değerlerinin ECC-Ref numunelerinden daha az olmasının nedeni olarak görülebilir. Bu ilişki özellikle ileri yaşlardaki giderek azalan ED farkı ile desteklenmektedir. Burada NS partiküllerinin miktarının ilerleyen yaşlarla birlikte azaldığı bilinmektedir. Bunun yanında, ECC-NS numunelerinin hazırlanmasında kullanılan yüksek oranda su azaltıcı katkı (ECC-Ref'e göre) çimento matrisinin nano sistemi içerisinde daha yüksek oranda bağlı suyun kaldığını işaret etmektedir. Bünyedeki bu su, daha ileri yaşlarda ECC-NS numuneleri için C-S-H oluşumunu tetiklemesi nedeniyle (Han ve diğerleri, 2017) karışımın ED değerlerini etkilemiş olabilir.

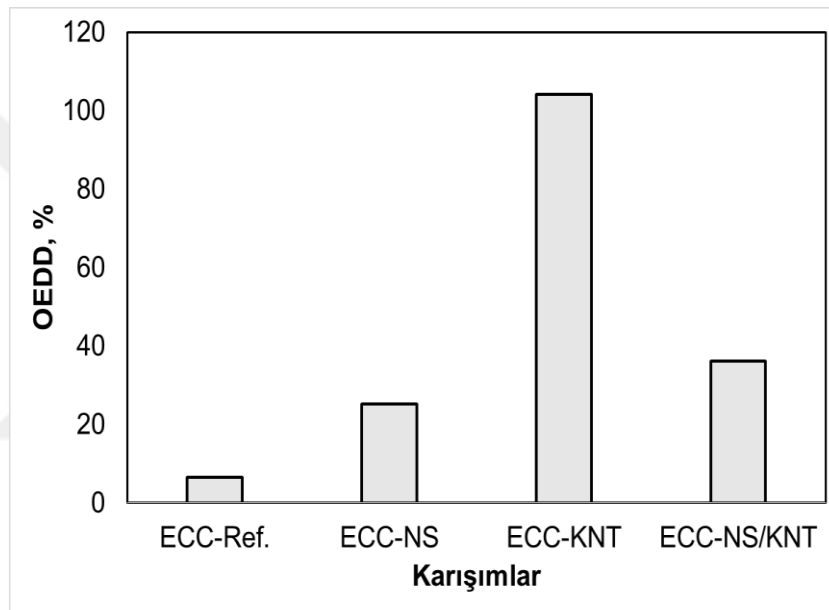
Hasarsız haldeki ECC-KNT numunelerinin ortalama ED değeri 7.günde referans numunelerine kıyasla %60 daha düşüktür. Bu durum beklenen bir sonuç olarak kaydedilmiştir çünkü bireysel olarak KNT taneciklerinin yüksek derecede elektriksel iletken oluşu ve çimento matrisindeki muhtemel birbiri ile olan teması ECC karışımlarında daha fazla elektriksel olarak iletken yolların varlığını kolaylaştırmış olabilir (Al-Dahawi ve diğerleri, 2016). NS ve KNT tanecikleri ECC-NS/KNT karışımlarında beraber kullanıldığında ECC-KNT'ye göre ED değerlerinde daha fazla artış meydana gelmiştir. Yukarıda açıklandığı gibi, ECC-NS/KNT karışımlarında NS kullanımını KNT ve C-S-H arasındaki arayüzün daha yoğun birleşimini sağlamış olabilir (Şekil 4.4) (Li ve diğerleri, 2017). Bu durum her ne kadar basınç dayanımları için olumlu olsa da, elektriksel iletkenliğin artması için olumlu olarak değerlendirmekten uzaktır. Daha yoğun C-S-H oluşumu muhtemelen KNT parçacıklarının etrafında meydana gelerek sürekli olarak elektriksel iletkenliğin sağlanmasını engellemiş olabilir.

Ön yükleme sırasında kendiliğinden algılama performansı:

Bu tez çalışmasındaki deneylerde ECC karışımlarında kullanılan PVA lifi (yaklaşık karışım hacminin %1.1'i) daha önce literatürde ECC ile ilgili yapılan deneylerden farklı olarak, nano malzeme varlığında daha geniş çatlaklarda kendiliğinden iyileşme ve maliyet etkin bir karışım oluşturmak amacıyla düşük

tutulmuştur. Çatlak karakteristiklerinin malzemenin ED ve oransal elektriksel değişimi üzerinde etkili olduğu bilindiğinden (Al-Dahawi ve diğerleri, 2017), çatlak genişlikleri ön yüklemenin hemen ardından orta açıklıkta meydana gelen çatlak bölgelerinden ele alınmıştır. Özellikle çatlak genişlikleri daha yüksek deformasyona ve mikroçatlak bakımından doygun olan bölgeden alınmıştır. Çizelge 4.4'te verilen çatlak genişlikleri numunelerin ön yüklenmesi ve yüklemenin boşaltılmasının ardından elde edilmiştir. Böylelikle ön yüklemenin ardından kapanan küçük/orta ölçekli çatlaklar göz önüne alınmamıştır. Çizelge 4.4.'te görüleceği üzere kaydedilen çatlak genişlikleri geleneksel ECC karışımlarında kullanılan %2 PVA lifi ve 100 µm'den daha dar çatlak tiplerinden farklıdır (Şahmaran ve diğerleri, 2013, Yıldırım ve diğerleri, 2014). Bu bakımdan çizelgedeki çatlak genişlikleri değerlendirildiğinde %1,1 PVA lifi kullanmanın amacına ulaştığından söz edilebilir. Sonuçlarda belirli bir çatlak sayısı bakımından ECC-NS, ECC-KNT ve ECC-NS/KNT karışımları içinde sadece NS içeren (ECC-NS) numunelerin referans numunelere kıyasla daha fazla çatlak genişliğine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuç; PVA lifleri ile çimento matrisi arasında artan kimyasal dayanım, daha yüksek kırılma tokluğu ve düşük lif kullanımına bağlı olarak daha düşük çatlak köprülenme derecesi ve yüksek lif kopma derecesi ile ilişkilendirilebilir (Wang ve Li 2007). NS'te olduğu gibi KNT kullanımının da numunelerin kırılma tokluğunu ve lif-matris bağımlı olarak özellikle nano boyutta arttırdığından söz edilebilir. Böylelikle ECC-KNT ve ECC-NS/KNT numunelerinin de ECC-Ref numunelerinden daha geniş çatlaklara sahip olduğu görülebilir. Ancak, yine de KNT taneciklerinin PVA lifleri üzerinde bir dereceye kadar yer alması bu liflerin tamamen kırılmasını engelleyerek ECC-NS karışımlarına kıyasla daha az çatlak genişliği göstermesine neden olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4.5'te 7 günlük hasarlı ve hasarsız numunelerin oransal elektrik direnç değişimi (OEDD) ile ilgili sonuçlar verilmiştir. Ön yüklemenin uygulanmasının ardından ED artışlarında farklı değerler bulunmuştur. Ön yüklemenin ardından, OEDD sırasıyla; ECC-Ref., ECC-NS, ECC-KNT ve ECC-NS/KNT numuneleri için %6,5, %25, %104 ve %36 kaydedilmiştir. Bu sonuçlar göstermektedir ki, her ne kadar farklı derecelerde olsa da ECC karışımlarının tamamı hasara karşı elektriksel özellik bakımından bir tepki vermektedir. Şekil 4.5'te gösterildiği gibi, yüksek derecede hasar aldığı göz önüne alındığında, her ne kadar kendiliğinden algılama oranı düşüğe olsa (%6.5) ECC-Ref. numuneleri bile verilen hasarı algılayabilmiştir.

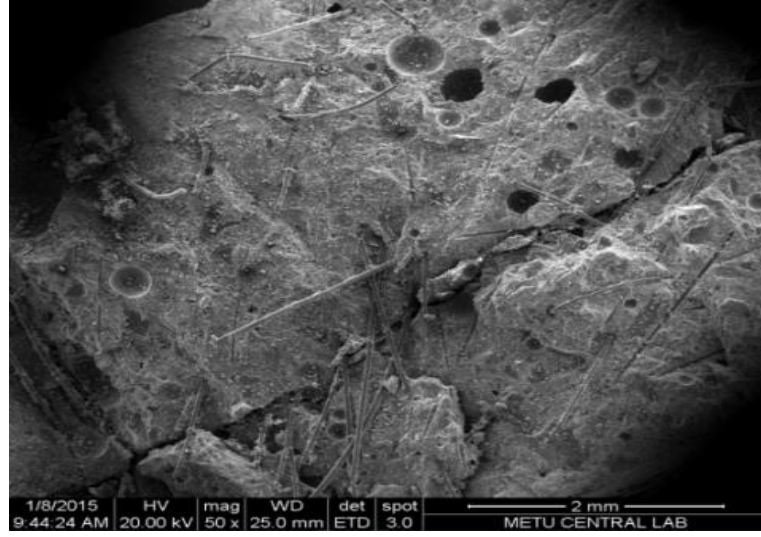
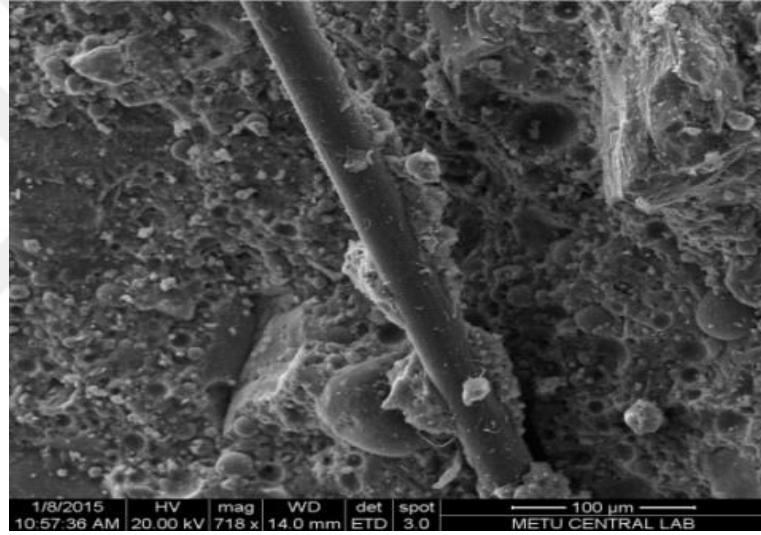
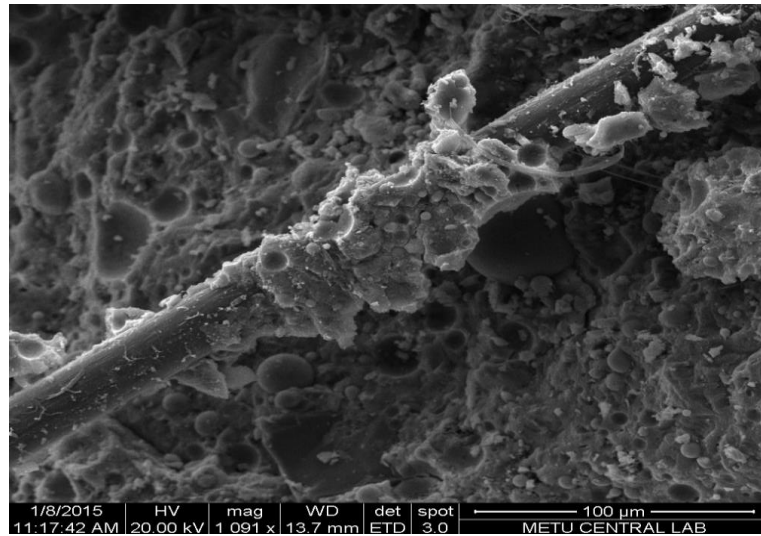


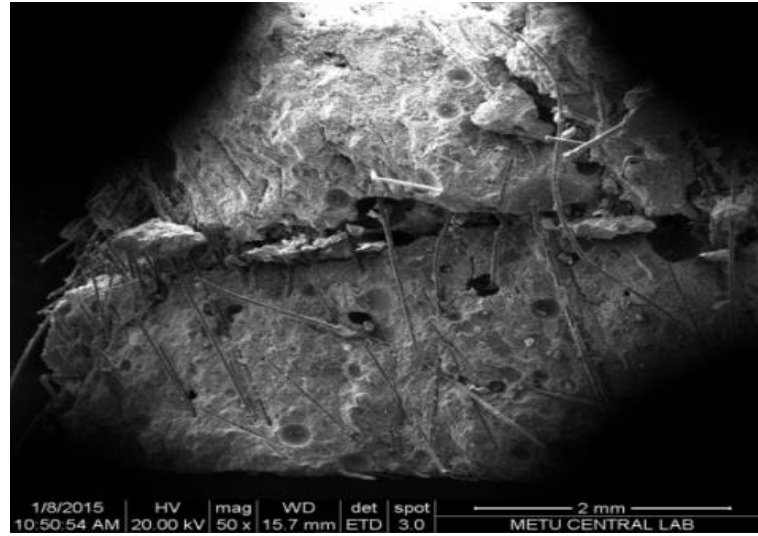
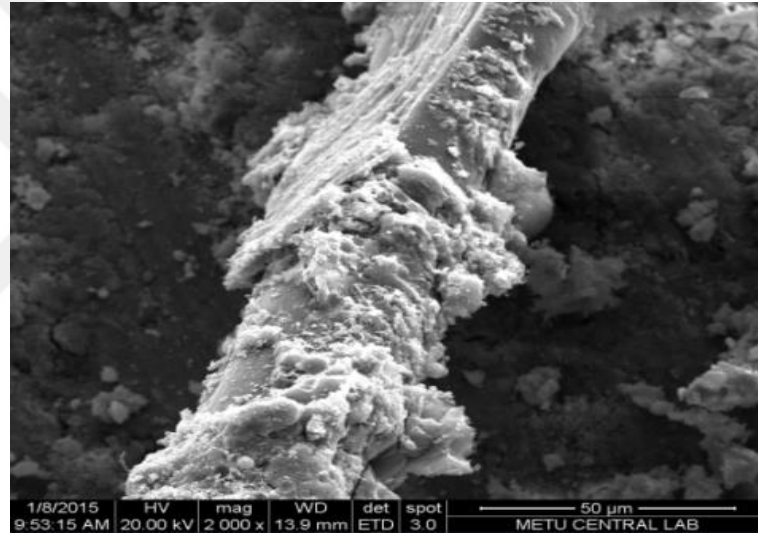
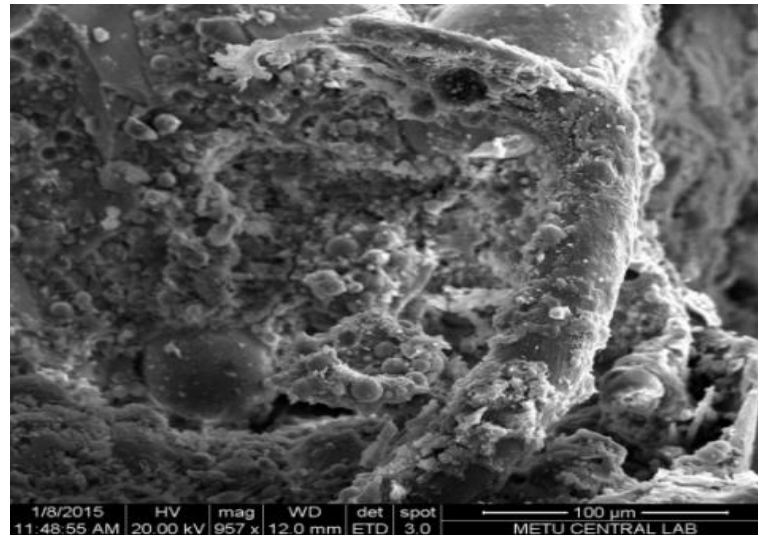
Şekil 4.5. Farklı karışımlara ait numunelerin 7. Gündeki ortalama OEDD değerleri

ECC-Ref. karışımına ait numunelerin üzerlerine uygulandığı deformasyon/şekil değiştirmelerin hasarsız olarak elektriksel hesaplamalarla belirlenmesi (piezo-dirençlilik), daha önce literatürde yer almıştır (Ranade ve diğerleri, 2014). Her ne kadar geleneksel beton malzemeleri (burada ECC) elektriksel olarak iletken olmayan malzemelerle üretilmiş olsa da, bağlı halde bulunmayan bünye suyunun ve mikro boşluklardaki çözülü iyonların hareketi ile meydana gelen elektriksel alanda etkilenmekte ve sonuç olarak iletken fazlarının yükleme ile birlikte birbirinden ayrılması neticesinde piezo-dirençli bir davranış göstermektedir. Ancak burada dikkat edilmelidir ki ECC-Ref. numunelerinin daha yüksek ED değişimi sadece daha büyük deformasyon/şekil değiştirme seviyelerinde meydana gelmektedir (Ranade ve diğerleri, 2014).

ECC-Ref. karışımına kıyasla daha yüksek OEDD değeri ECC-NS için (%25) tespit edilmiştir. Bu sonuç daha çok elektrik akımına karşı bir bariyer gibi görev alan daha geniş açıklığı ile ilgilidir. Özellikle ECC-NS numunelerinin ön yüklemenin hemen ardından ölçülen çatlak genişliklerine bakıldığında ECC-Ref. numunelerinden iki kat daha fazla çatlak genişliğine sahip olduğu görülecektir. Bu açıklama son zamanlarda çimento esaslı malzemelerin çatlaklarının ED üzerindeki etkisi ile ilgili yapılan çalışmalarla uyumludur (Al-Dahawi ve diğerleri, 2017, Yıldırım ve diğerleri, 2015, Ranade ve diğerleri, 2014). Şekil 4.6 ve 4.7 ön yüklemenin ardından ECC-Ref. ve ECC-NS numunelerine ait SEM görüntüleri içermektedir. Görüntülerden anlaşılacağı üzere, her iki karışımda mikro çatlaklar PVA tarafından oldukça iyi köprülenmiş durumdadır. PVA lifleri her ne kadar elektriksel olarak iletken olmasa da, elektrik akımına imkan veren iletken çimento esaslı matris parçacıkları ile kaplıdır. Ancak artan kırılma tokluk derecesi ve PVA lifleri ile çimento matrisi arasındaki yüksek kimyasal bağ dayanımı (Wang and Li 2007) nedeniyle, PVA lifleri referans karışımına kıyasla ECC-NS numunelerinde daha ağır hasar görmüş ve/veya tamamen kırılmış durumdadır (Şekil 4.7). PVA liflerinin yükleme esnasında daha fazla hasar görme veya kırılma yatkınlığı ECC-Ref. numunelerine göre daha fazla OEDD değerine sahip olmasının bir başka nedeni olabilir. ECC-KNT ve ECC-NS/KNT karışımlarına ait numunelere kıyasla, ECC-NS numunelerinin daha yüksek çatlak genişliğine sahip olması, daha düşük OEDD sonuçlarının alınmasına neden olmakta dolayısıyla sadece NS kullanımı ECC numunelerinin kendiliğinden algılama kabiliyeti üzerinde olumsuz etki yapmaktadır.

ECC-KNT numuneleri ise diğer bütün karışımlara ait numunelere kıyasla mikro çatlak oluşumlarına çok daha yüksek OEDD (%108) değeri göstermiştir. Bu durum aslında kendiliğinden algılama kabiliyetini elde etmek için yükleme seviyesinin az olduğu durumlarda dahi ECC karışımlarında elektriksel olarak iletken malzemelerin varlığını zorunlu kılmaktadır (Hou 2008, Siad ve diğerleri, 2018). KNT parçacıklarının ECC karışımlarında elektriksel iletkenlik derecesini önemli ölçüde arttırarak verilen hasara karşı yüksek bir kendiliğinden algılama kapasitesine sahip olmasını sağlamıştır. Yükleme durumunda, karbon nano tüpler tarafından matris içindeki nano/mikro köprülenme kalitesi hasar görmekte ve sonuç olarak artan yükleme şartlarında ED değerleri değişmektedir (Al-Dahawi ve diğerleri, 2016a). Mikro çatlakların meydana gelmesinin ardından KNT parçacıkları nano sistemden tamamen ayrılmakta ve çatlak açıklıklarının iyi derecede kendiliğinden algılanması ile sonuçlanmaktadır. ECC-NS numunelerinin, ECC-KNT numunelerine kıyasla daha geniş çatlaklara ve daha düşük OEDD'ne sahip olması hasarın derecesinden ziyade, daha çok kendiliğinden algılama kapasitesinin elektriksel iletkenlik ağı ile ilişkili olduğunu göstermektedir.

a) 2 μm b) 100 μm c) 100 μm **Şekil 4.6** 7 günlük ECC-Ref. numunelerinin SEM görüntüsü

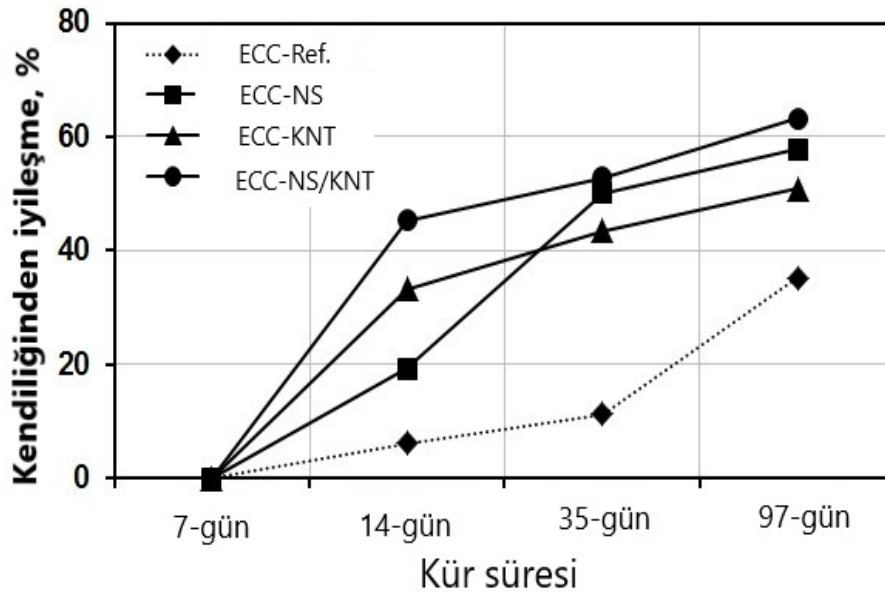
a) 2 μm b) 50 μm c) 100 μm **Şekil 4.7.7** günlük ECC-NS numunelerinin SEM görüntüsü

Her ne kadar ECC-CNT numuneleri kadar yüksek kendiliğinden algılama yeteneğine sahip olmasa da ECC-NS/KNT numuneleri de ECC-NS ve ECC-Ref. numunelerinden daha fazla OEDD'ne sahip olmuştur. Dahası, her ne kadar KNT parçacıklarının etrafında ve/veya üzerinde daha yoğun hidrasyon ürünleri olmasına rağmen, ECC-NS/KNT numunelerinin ECC-KNT numunelerine kıyasla daha az çatlak genişliğine sahip olması hasara karşı daha hassas olduğunu kanıtlamaktadır (Li ve diğerleri, 2017).

Ön yüklenmiş Numunelerin Elektriksel Direnç Değerlerine Bağlı Kendiliğinden İyileşme Performansı:

Aynı anda kendiliğinden iyileşme ve kendiliğinden algılama özelliklerini izlemek için numunelerin elektriksel direnç değişimleri belirlenmiş ve ölçümler Çizelge 4.3'te verilmiştir. Hasarsız numunelerde olduğu gibi hasarlı numunelerinde ED değerleri kür yaşları ilerledikçe artmıştır. Ancak özellikle nano malzemelerin varlığında hasarlı ve hasarsız numunelerin ED artışlarındaki farklı mekanizmalardan bahsetmek yerinde olacaktır. Örneğin hasarsız numunelerde, ED sonuçlarındaki artışlar daha çok matrisin kür yaşının artmasıyla birlikte daha yoğunlaşması/olgunlaşması ile meydana gelmiştir. Ancak, ön yüklenmiş numunelere bakıldığında, her ne kadar matrisin zamanla olgunlaşması devam etse de çatlakların devam eden hidrasyon ve karbonasyon reaksiyonları ile kapanması mümkün olabilir. Bu sebeplerle, ön yüklenmiş ECC numuneleri hasarsız numunelerle birlikte karşılaştırma yapılarak iyileşme oranları elektriksel özellikler üzerinden belirlenmiştir (Şekil 4.8).

Her ne kadar nano malzeme tipine ve kendiliğinden iyileşme süresine bağlı olarak değişmekle birlikte, nano malzemeli hazırlanan ECC karışımlarına ait numunelerin tamamı ECC-Ref. numunelerine kıyasla daha yüksek kendiliğinden iyileşme performansı göstermiştir. 7 günlük iyileşme süresinin ardından ECC-NS, ECC-KNT, ECC-NS/KNT numunelerinin ortalama ED artışı ECC-Ref. numunelerinin ortalama ED artışından sırasıyla, %12,8, %27,1 ve %39.3 daha yüksek kaydedilmiştir. 90 günlük kendiliğinden iyileşme süresinin sonunda, bu artışlar aynı karışımlar için sırasıyla %21,2, %16,3 ve %28.6 olarak gerçekleşmiştir. Nano malzemelerin ECC karışımlarında yer alması, çatlaklarda da muhtemelen daha fazla çekirdeklenme bölgesi sağlayarak (Al-Najjar ve diğerleri, 2016, Zhang ve diğerleri, 2012) ana kendiliğinden iyileşme ürünleri olan kalsiyum karbonat (CaCO_3) ve/veya C-S-H jellerinin oluşumunun hızlanmasına ve miktarca artmasını sağlamış olabilir. Kısaca, CaCO_3 ve C-S-H oluşumlarının daha fazla CH tüketerek karbonasyon ve hidrasyon/puzolanik reaksiyonlar vasıtasıyla PVA lifleri ve nano ölçekteki tanecikler ile birlikte porozite ve iyonik elektriksel hareketi azalttığından söz edilebilir.

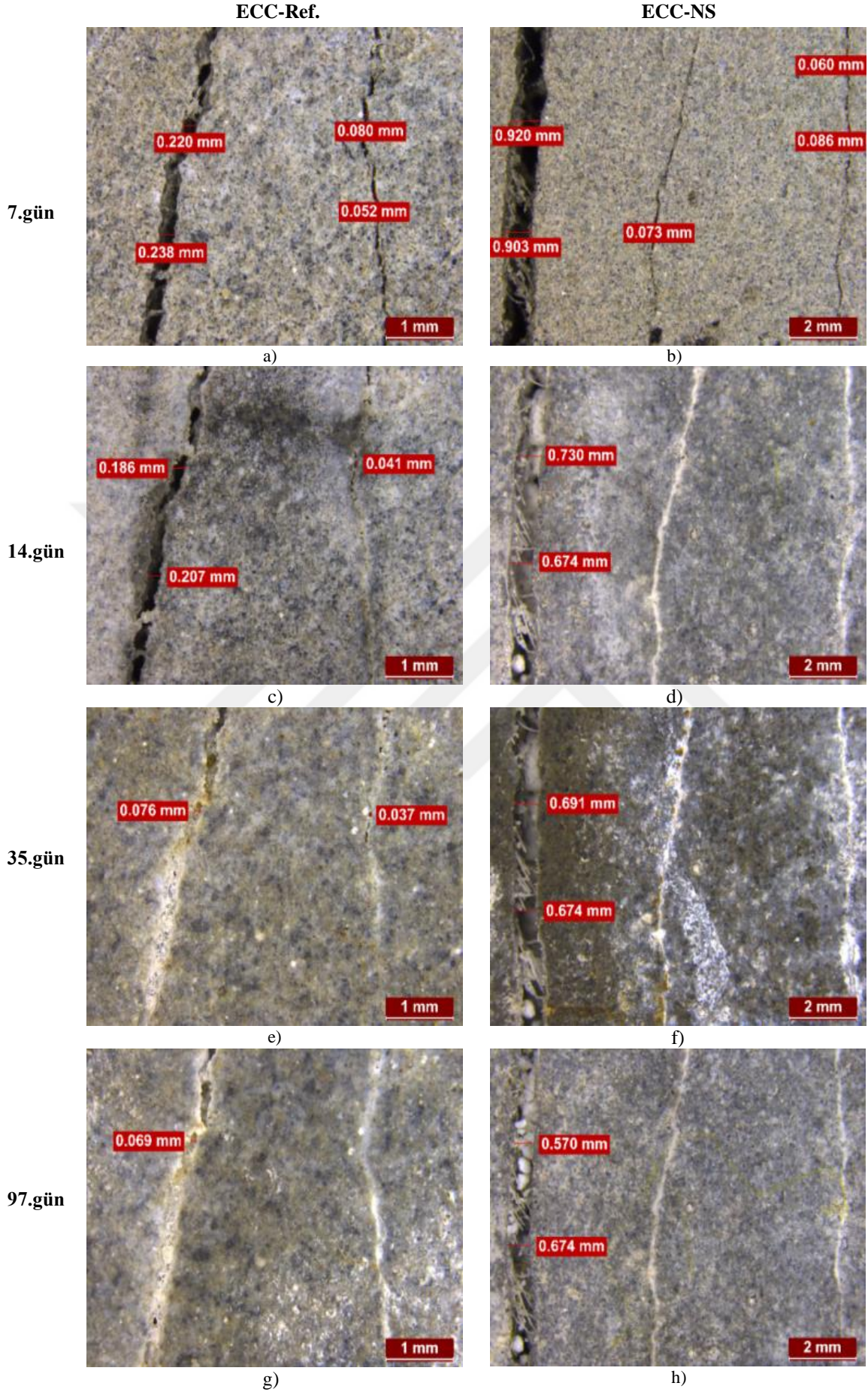


Şekil 4.8 Farklı ECC numunelerinin ortalama kendiliğinden iyileşme oranı (ED değeri üzerinden)

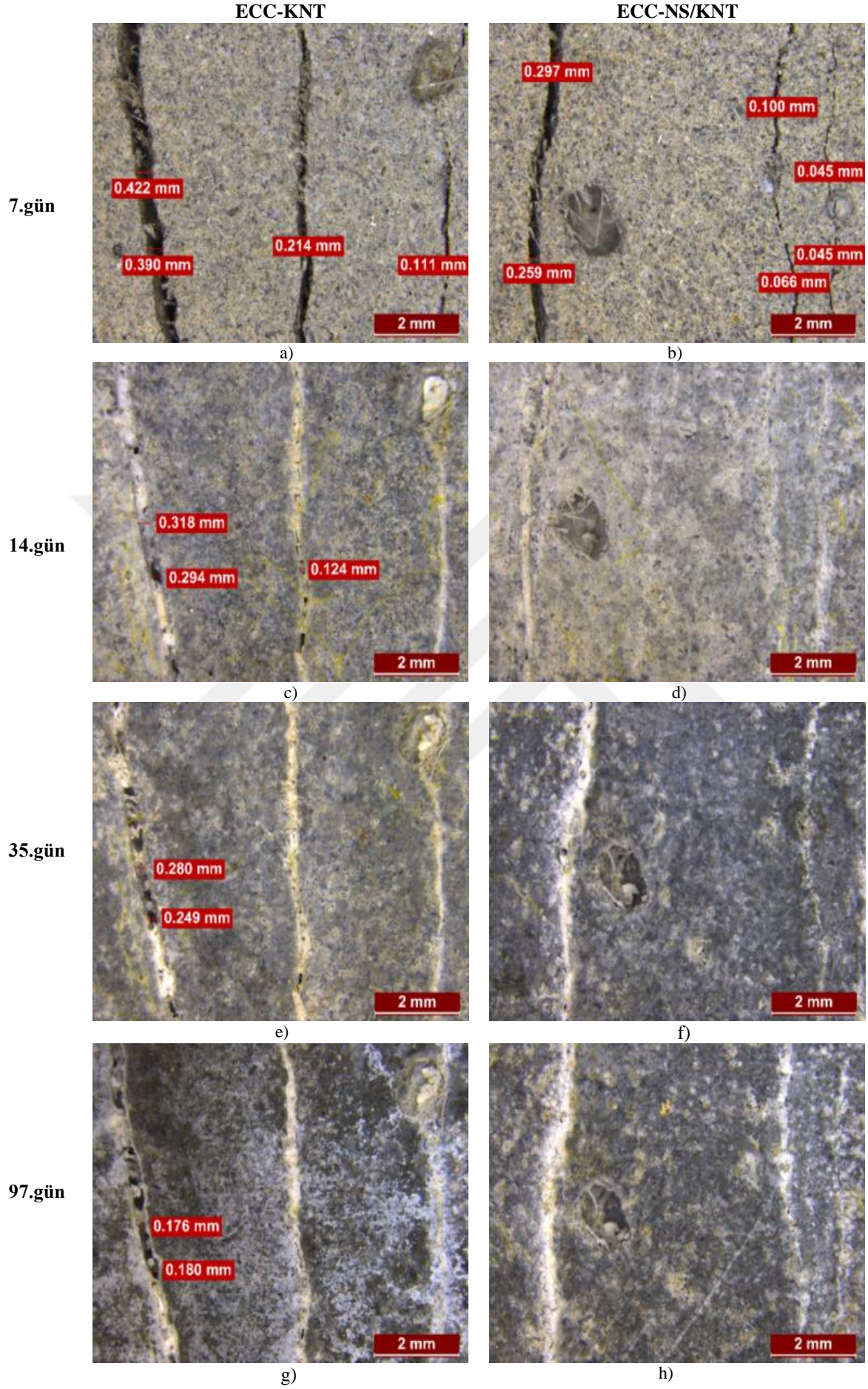
ECC-NS/KNT karışımlarına ait numunelerin ECC-NS ve ECC-KNT karışımlarına ait numunelerden daha yüksek elektriksel direnç artışı gösterdiği anlaşılmaktadır. Çimento esaslı malzemelerin kendiliğinden iyileşme derecesi çatlak genişliği ile çok yakından ilişkilidir (Gagné ve Argouges, 2012). ECC-NS/KNT numunelerinin daha yüksek kendiliğinden iyileşme etkinliği söz konusu numunelerin diğer karışımlara ait numunelere kıyasla daha dar çatlak genişliğine sahip olması ile yakından ilgilidir. Ayrıca, NS ile birlikte karışımlarda kombine edilerek kullanılan KNT daha yüksek miktarda ve/veya kalitede CaCO_3 ve C-S-H oluşumunu tetiklemiş olabilir. Bu durum özellikle tekil olarak nano malzemelerin kullanıldığı ECC karışımlarına ait numunelerin referans numunelerden daha fazla kendiliğinden iyileşme gösterdiği ile de doğrulanabilir. ECC-NS numuneleri ile ECC-KNT numuneleri kıyas edildiğinde, ECC-KNT numuneleri daha yüksek ED artışına bağlı olarak kendiliğinden iyileşme etkinliğini erken yaşlarda daha yükseltmesine karşın, ileri yaşlarda her ne kadar ECC-NS'ten daha yüksek bir değer gösterse de görece daha sınırlı kalmıştır.

Kendiliğinden İyileşen Çatlaklar:

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da farklı yaşlardaki numunelere ait kendiliğinden iyileşen mikro çatlaklar daha önce Çizelge 4.4'te verilen numuneleri temsilen verilmiştir. Verilen çatlaklara ait görüntüler Çizelge 4.4'teki her karışıma ait 1. numunelerin çatlak genişlikleri ile birlikte takip edilebilir.



Şekil 4.9 ECC-Ref ve ECC-NS numunelerine ait çatlakların kendiliğinden iyileşmesi

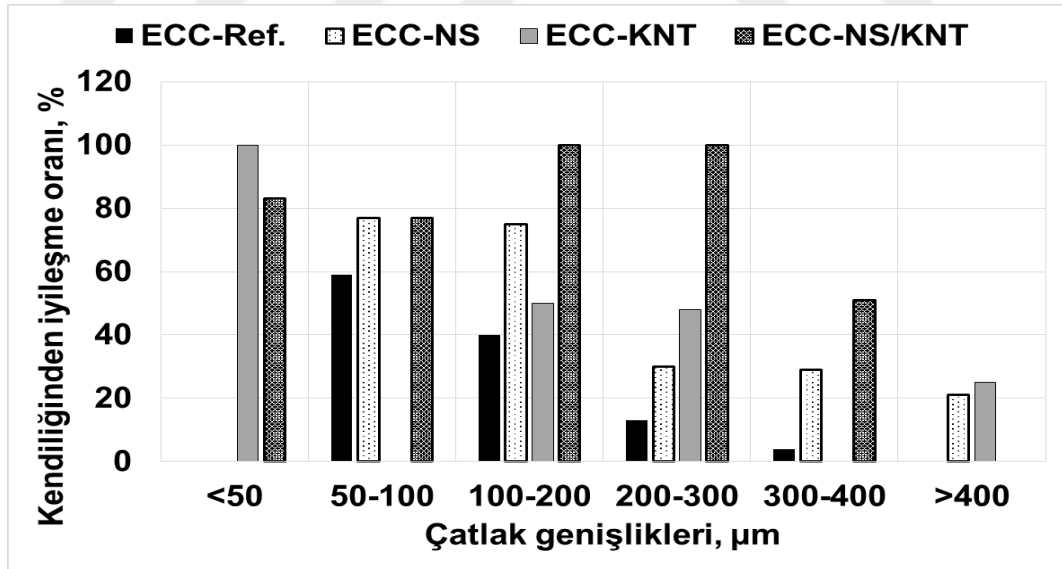


Şekil 4.10 ECC-KNT ve ECC-NS/KNT numunelerine ait çatlakların kendiliğinden iyileşmesi

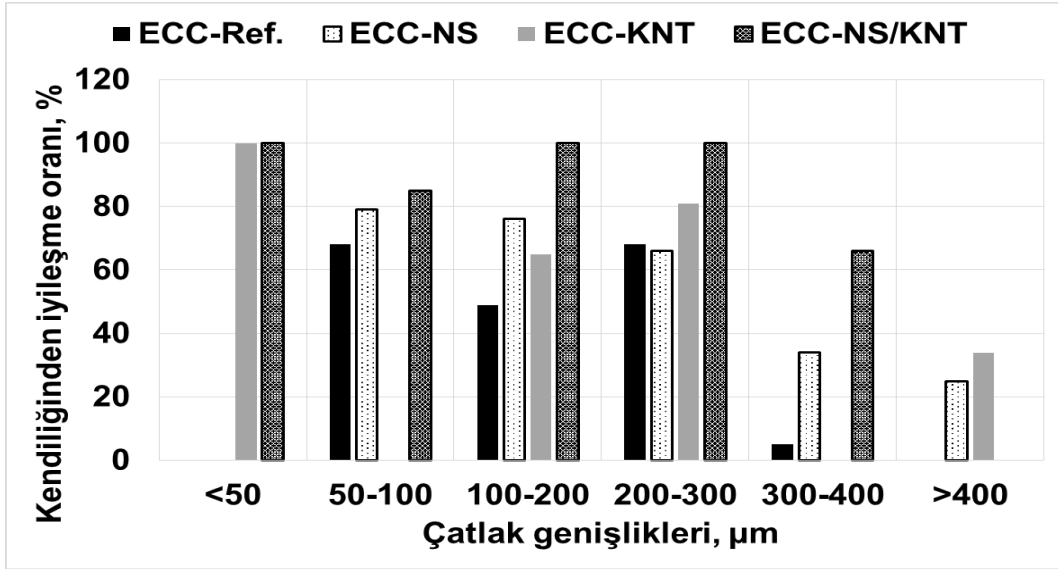
Nano modifiye edilmiş ECC numunelerin kısa bir kür süresinin ardından tamamen ya da kısmi olarak kendi çatlaklarını onardığı görülmüştür. 7 günlük kendiliğinden iyileşme süresinden sonra (numuneler 14 günlük iken) birçok nano ölçekte modifiye edilmiş ECC numunelerine ait 100 µm'lik çatlak genişliğinde veya daha az mikro çatlakların tamamen kapandığı görülmektedir. Nano takviyeli numunelerin aksine, ECC-Ref. numuneleri içerisinde 80 µm çatlak genişliğine sahip numunelerin ancak 90 günlük kür süresinin ardından kapandığı görülmektedir. Bu davranış Şekil 4.11-13'de verilen ve Çizelge 4.4'te gösterilen çatlak genişliklerini dikkate alınarak hesaplanan farklı karışımların çatlak genişlikleri üzerindeki (14, 35 ve 97. günlerdeki) kendiliğinden iyileşme performanslarından da anlaşılabilir. Şekil 4.11'de çatlak genişliklerine göre verilen kendiliğinden iyileşme oranları aşağıdaki denklem (4.5) aracılığıyla hazırlanmıştır.

$$\text{Kendiliğinden iyileşme oranı, \%} = \left[\left\{ \frac{(CW \text{ at } i^{\text{th}} \text{ day} - CW \text{ at } 7^{\text{th}} \text{ day})}{(CW \text{ at } 7^{\text{th}} \text{ day})} \times 100 \right\} \right] \quad (4.5)$$

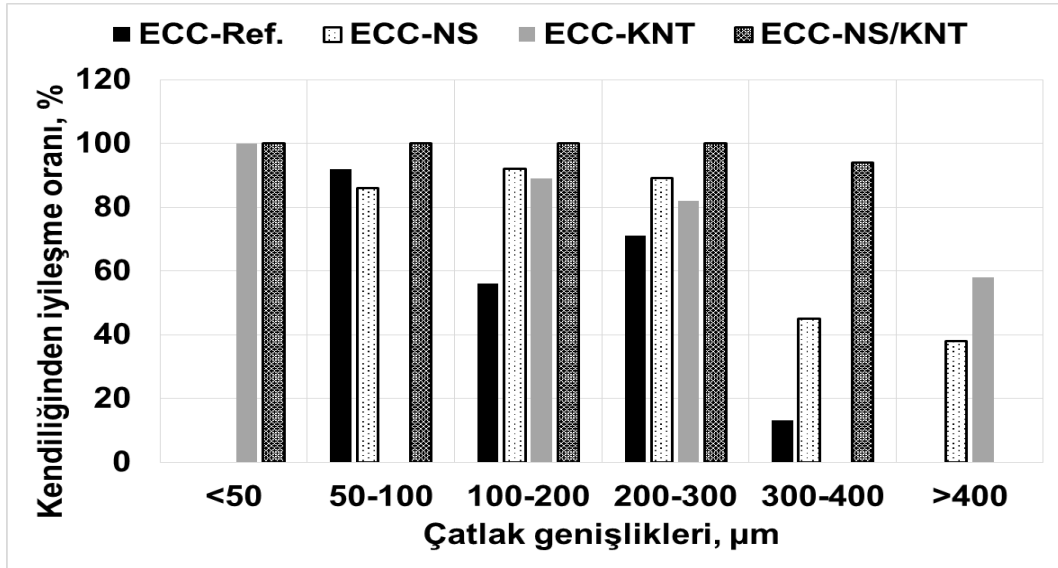
Buradaki CW_i (crack width) göz önüne alınan herhangi bir i. gündeki çatlak genişliğine CW₇ ise ilgili karışımın 7. Gündeki çatlak genişliklerine karşılık gelmektedir.



Şekil 4.11 14 günlük ECC numunelerin çatlak genişliğine bağlı kendiliğinden iyileşme oranları



Şekil 4.12 35 günlük ECC numunelerin çatlak genişliğine bağlı kendiliğinden iyileşme oranları



Şekil 4.13 97 günlük ECC numunelerin çatlak genişliğine bağlı kendiliğinden iyileşme oranları

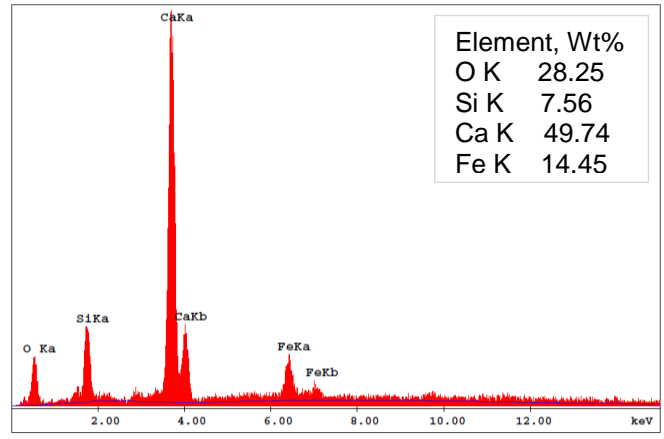
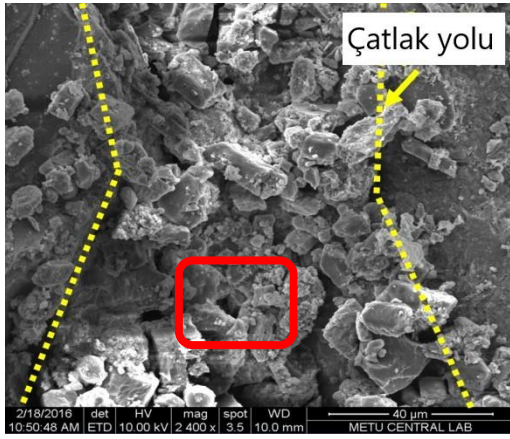
Şekil 4.9-10'da verilen numunelerin çatlaklarına ait görüntüler ve Şekil 4.11-13'te verilen iyileşme performanslarına bakıldığında, daha dar çatlakların nano modifiye edilmiş ECC karışımlarınca ECC-Ref numunelere kıyasla çok daha hızlı ve yüksek kendiliğinden iyileşme oranı ile kapandığı görülecektir. Karışımlardan bağımsız olmak üzere çatlak genişliklerinin derecesi, o çatlak genişliğini dolduracak kendiliğinden iyileşme ürününün miktarı ile doğrudan orantılı olduğu için oldukça önemlidir. Bu tez kapsamında elde edilen bulguların en önemlilerinden biri ECC-NS/KNT karışımının sadece 7 günlük kür süresinin ardından 297 µm genişliğindeki çatlağın tam olarak kapanmasıdır. Kapanan bu çatlak genişliği literatürde otojen kendiliğinden iyileşme ile ilgili yapılan çalışmalarda 5-10 µm

(Jacobsen ve diğeri, 1995), 100 μm , (Reinhardt ve Jooss 2003), 200 μm (Edwardsen 1999), 205 μm (Aldea ve diğeri, 2000) sonuçlanan çatlak genişliğinden daha yüksektir. Ancak, önemle belirtmek gerekir ki, 7 günlük bir ECC numunesinin kendiliğinden iyileşme etkinliği ile daha ileri yaşlardaki numunelerin kendiliğinden iyileşmeleri azalan CH ve matris nem miktarı nedeniyle değişkenlik gösterebilir (Yıldırım ve diğeri, 2018). ECC-NS/KNT karışımlarına ait numunelerin referans ECC numunelere göre daha hızlı ve daha yüksek kendiliğinden iyileşme derecelerine ek olarak ECC-KNT ve ECC-NS numunelerindeki farklılığa da dikkat etmek gerekmektedir. ED sonuçlarının aksine ECC-KNT numunelerinin çatlak genişlikleri ECC-NS numunelerinkine kıyasla daha yüksek bir iyileşme göstermiştir. Bu durum özellikle daha ileri yaşlarda belirgin hale gelmiştir. KNT tanecikleri inert yapıları nedeniyle doğrudan hidrasyon ve puzolanik reaksiyonlara katılmamaktadır. Ancak bu malzemelerin yüksek yüzey alanlarından dolayı, daha önce mekanizması açıklanan çekirdeklenme etkisi ve daha yoğun (sıkı) C-S-H jellerinin oluşumuna yardımcı olduğu için kendiliğinden iyileşmeye de katkı sağlamaktadır (Siad ve diğeri, 2018). Bu durum ECC-KNT numunelerinin aynı zamanda ED hesaplamaları açısından mikro çatlaklara en fazla cevap veren karışım olduğu hatırlandığında oldukça ilgi çekicidir.

4.1.3.3. Mikro yapısal karakterizasyonlar

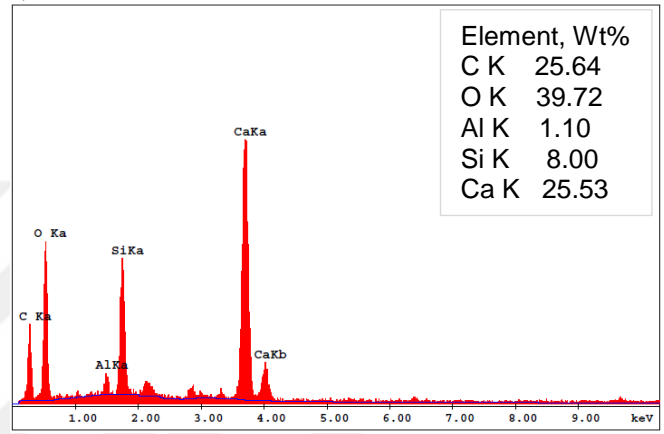
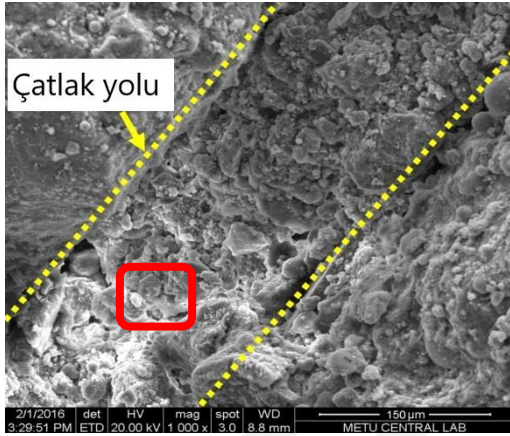
Bu çalışma kapsamındaki mikro yapısal analizler taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile birlikte EDX dedektörü ve termogravimetrik analizleri (TG/DTG) kapsamaktadır. Bu analizler kendiliğinden iyileşme ürünlerinin nicelik ve nitelik açıdan tanımlanması amacıyla gerçekleştirilmiştir. SEM/EDX analizleri için numuneler iyileşmiş numunelerin doğrudan yüzeylerinden alınmıştır. TG/DTG analizleri için ise numunelerin kendiliğinden iyileşmiş çatlaklarının yüzey kısmından ve 5 mm altından örnekler alınmıştır. Bütün numunelerin analizi 97 günün sonunda bitirilmiştir. SEM/EDX ve TG/DTG analizlerine ait sonuçlar sırasıyla Şekil 4.14 ve Şekil 4.15-4.18 arasında sunulmuştur. SEM analizlerinden elde edilen sonuçlar bütün ECC numunelerinin iyi derecede kendiliğinden iyileştiğini doğrulamaktadır. Bütün çatlaklar iyileşme ürünleri ile iyileşebilecek niteliktedir. Ancak, ECC-Ref numunelerine kıyasla, ECC-NS/KNT numuneleri daha yoğun ve daha eksiksiz bir çatlak kapanma performansı göstermiştir. KNT partiküllerinin inert olması ve daha yoğun kendiliğinden iyileşme ürünlerine katkısı bu çalışmanın amaçlarından biri olduğundan, ECC-KNT ve ECC-NS karışımlarında yer alan KNT parçacıklarının SEM görüntüleri kendiliğinden iyileşme ile ilgili daha iyi bir fikir verilmesi amacıyla düşünülmüştür. Ancak, muhtemelen çok küçük KNT parçacıklarının yeni oluşan hidrasyon ürünleri ile örtülmesi nedeniyle bu mümkün olmamıştır. Buna rağmen farklı iyileşmiş çatlaklardaki iyileşme ürünlerine ait bilgiler EDX dedektörü sayesinde alınmıştır.

ECC-Ref



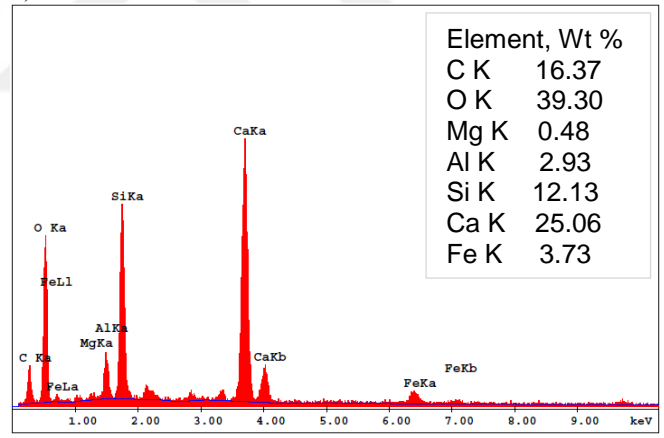
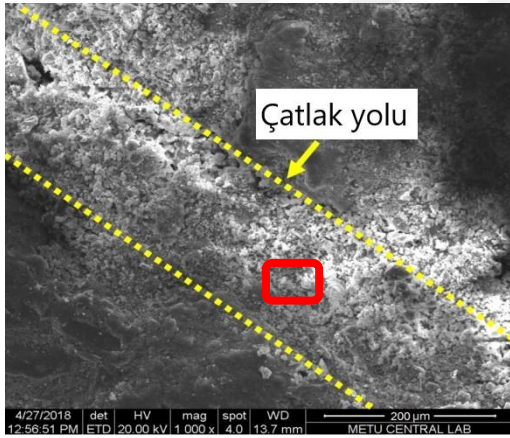
a) ECC-Ref

ECC-NS



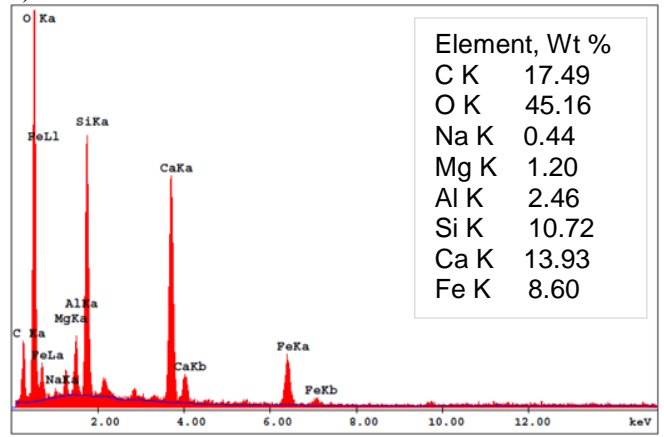
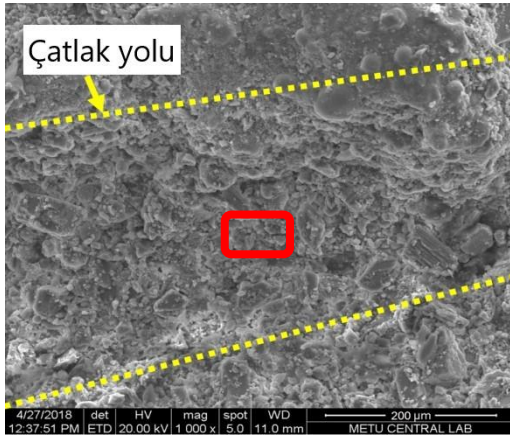
b) ECC-NS

ECC-KNT



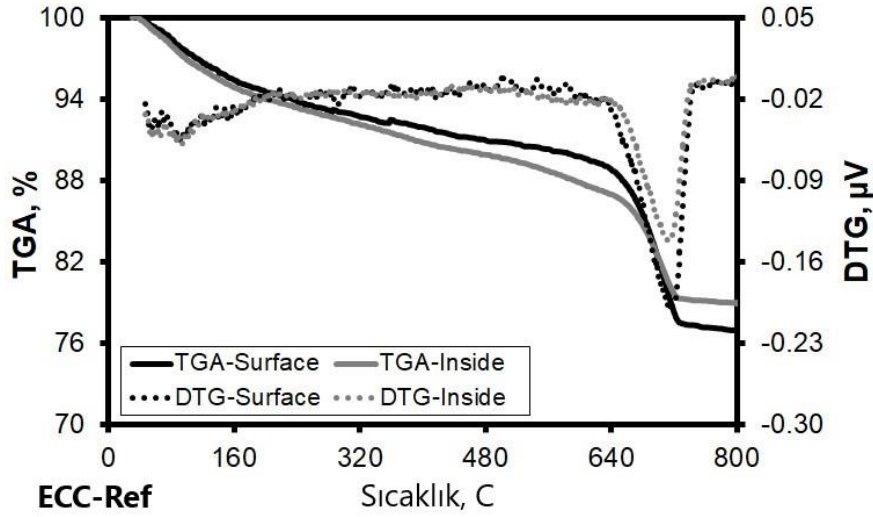
c) ECC-KNT

ECC-NS/KNT

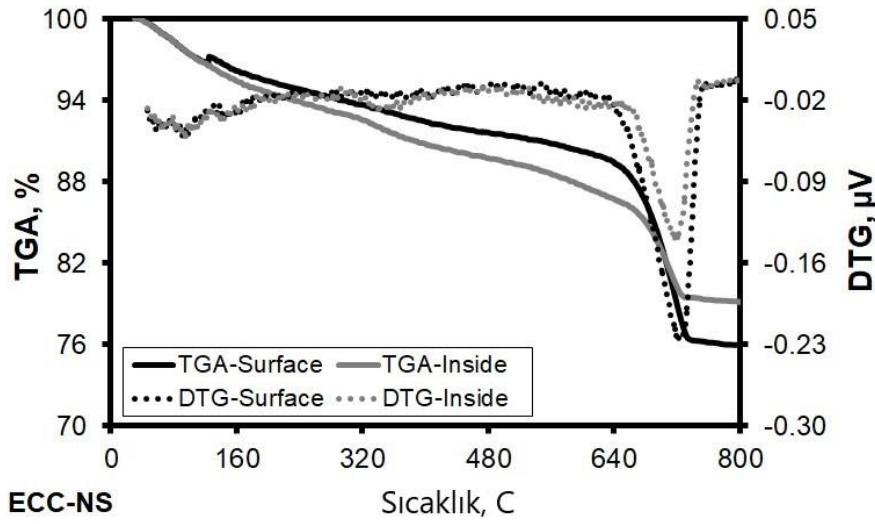


d) ECC-NS/KNT

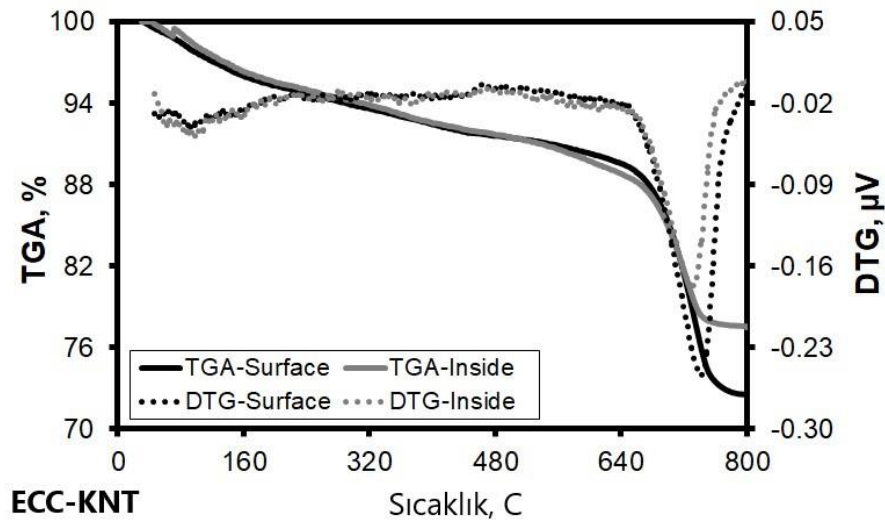
Şekil 4.14 Mikro çatlaklar içerisinden alınan iyileşme ürünlerinin EDX dağılımları ve SEM görüntüleri



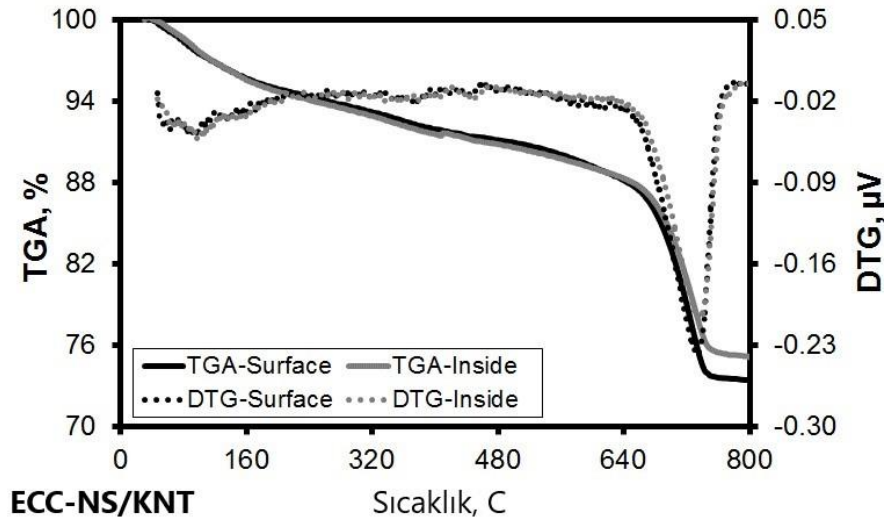
Şekil 4.15 ECC-Ref numunelerinin TG/DTG sonuçları



Şekil 4.16 ECC-NS numunelerinin TG/DTG sonuçları



Şekil 4.17 ECC-KNT numunelerinin TG/DTG sonuçları



Şekil 4.18 ECC-NS/KNT numunelerinin TG/DTG sonuçları

Şekil 4.14'te gösterildiği gibi kendiliğinden iyileşen çatlaklardan alınan temel elementler karbon (C), oksijen (O), kalsiyum (Ca) ve Silika (Si) elementleridir. Yüksek miktarda elde edilen Si ve Ca değerleri CaCO_3 ile C-S-H'nin kendiliğinden iyileşme ürünleri olduğunu kanıtlar niteliktedir. ECC-Ref, ECC-NS, ECC-KNT ve ECC-NS/KNT numunelerinin Ca/Si oranları sırasıyla 6,58, 3,19, 2,07 ve 1,30 olarak elde edilmiştir. Kendiliğinden iyileşme ürünlerinin Ca/Si oranı doğrudan C-S-H jellerinin yoğunluğu ve rijitliği ile ilgilidir (Siad ve diğerleri, 2018). Sonuçlardan nano malzeme kullanımının daha az Ca/Si oranına sahip numunelere işaret ettiği dolayısıyla ECC-referans numunelere kıyasla daha rijit ve yoğun (sıkı) C-S-H jellerinin oluştuğundan söz edilebilir. Sonuçlar ECC karışımlarında sadece NS kullanımının daha yüksek Ca/Si oranı oluşturmasına bağlı olarak kendiliğinden iyileşme dönemi içerisinde porozitesi daha yüksek C-S-H jellerinin üretildiğini göstermektedir. Bu nedenle ECC-KNT ve ECC-NS/KNT karışımlarının bu noktada daha avantajlı olduğundan söz edilebilir. Tekil olarak NS kullanımının aksine, reaktif olmayan KNT'ler ile kendiliğinden iyileşme ürünlerinden birisi olan C-S-H jellerinin yoğunluğu ve rijitliğinin artarak ECC-KNT/NS numunelerinde daha fazla kendiliğinden iyileşmeye neden olduğu anlaşılmaktadır.

Mikro çatlaklardaki CaCO_3 dikkate alındığında, Şekil 4.15-4.18'de verilen grafiklere dikkat etmek yararlı olacaktır. Grafiklerde açık bir şekilde gösterilen DTG piklerine bakıldığında, grafikteki trendin 650-750 °C arasında bozulduğu anlaşılacaktır. Bu nokta CaCO_3 polimorflarının bozulduğunu işaret etmektedir (Cole ve Kroone, 1960, Sauman, 1971). Sauman (1971)'a göre DTG piklerindeki bozulmaların 500-600 °C, 600-750 °C ve 750-800 °C sıcaklıklardaki karşılıkları sırasıyla vaterite, aragonite ve kalsittir. Bu noktada bütün ECC numunelerinde elde edilen bileşimin aragonite olduğu anlaşılmaktadır. Sonuçlar aynı

zamanda nano malzemelerin meydana gelen CaCO_3 tipi üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.15-Şekil 4.18'e bakıldığında, CaCO_3 'ün çatlak yüzeylerinde daha kolay olduğu meydana gelen daha fazla kütle kayıplarından anlaşılabilir. Bu durumun nedeni Çatlak yüzeylerinin atmosfere daha yakın olmasına bağlı olarak CO_2 ile temasının kolay olması ve CaOH ile reaksiyonun iç kısımlara göre daha muhtemel olması ile ilişkilendirilebilir. Çizelge 4.5'te 650-750 °C sıcaklıkları arasında farklı numunelerin mikro çatlaklarının içinden (TGA-inside; DTG inside) ve yüzeyinden (TGA-surface; DTG surface) elde edilen CaCO_3 kütle kayıpları verilmiştir. Her ne kadar NS içeren karışım için %1 artış elde edilse de, diğer nano malzeme içeren karışımlarda göz önüne alındığında ECC-Ref numunelerinden daha fazla değerinde CaCO_3 kütle kayıpları elde edilmiştir. Bu sonuçlar bir kez daha nano malzeme içeren karışımların kendiliğinden iyileşme ürünü olarak daha fazla C-S-H oluşturmasının yanında daha fazla CaCO_3 'ta oluşturduğuna işaret etmektedir. Bunun yanında, ECC-KNT ve ECC-NS/KNT karışımlarına ait numunelerin ECC-NS numunelerine göre daha fazla CaCO_3 ürünü oluşturduğunu da belirtmek gerekmektedir. ECC-NS, ECC-KNT ve ECC-NS/KNT numunelerinin ön yüklenmesi ile bünyede daha yüksek Ca^{+2} ve CH meydana geldiği ve sonuç olarak daha büyük CaCO_3 formasyonlarının sağlandığından söz edilebilir. Ayrıca NS partiküllerinin halihazırdaki Ca^{+2} iyonlarının bir kısmını tüketerek yüksek rijitliğe sahip C-S-H jellerini oluşturduğu ve KNT ile kombine edilmesinin C-S-H jellerinin zincir ölçüsünü ve yapısını iyileştirdiğinden söz edilebilir (Pacheco-Torgal ve Jalali 2011, Gaitero, 2008). Araştırma sonuçları ayrıca daha önce kendiliğinden algılama performansı için çok hayati bir malzeme olan KNT partiküllerinin tek kullanıldığı karışımlarda da, ECC-Ref numunelerine kıyasla kendiliğinden iyileşme açısından çok ciddi kazanımların sağladığını göstermektedir.

Çizelge 4.5 Kendiliğinden iyileşme ürünlerindeki toplam CaCO_3 miktarı

Karışım adı	Toplam CaCO_3 kütle kaybı, %
ECC-Ref	19
ECC-NS	20
ECC-KNT	24
ECC-NS/KNT	27

4.2. Kendiliğinden İyileşmiş Nano-modifiye ECC Numunelerinin HKİG Testi Sonuçları

İlk bölümdeki literatür çalışmalarında verildiği üzere mevcut araştırmalardaki tecrübeler kendiliğinden iyileşme performansının belirlenmesi ile ilgili farklı yöntemlerin uygulandığını göstermektedir. Kendiliğinden iyileşme kabiliyetinin hassas bir şekilde güvenilir ve pratik teknikler ile belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu nedenle tez kapsamında kendiliğinden iyileşme davranışının belirlenmesinde kullanılacak yöntemlerden birisi hızlı klor geçirimsizlik (HKİG) deneyi olarak tercih edilmiştir. Daha önce yöntemsel detayları verilen HKİG testi ile numuneler 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda test edilmiştir. Bu testlerde her karışım tipinden altışar adet numune hazırlanmıştır. Her karışımdan iki numune karşılaştırma yapmak amacıyla hasarsız olarak test edilirken dört numuneye ise ön yükleme ile hasar verilmiş ve kendiliğinden iyileşme yetenekleri HKİG testi üzerinden araştırılmıştır. Deneyler sırasında her bir numune tek tek ele alınmış ve nano malzemelerle modifiye edilmiş ECC karışımlarının çatlak kapanma yaygınlığı ve derecesi bütün yaşlarda (7. 28. ve 90. günlerde) araştırılmıştır. Aşağıda verilen Çizelge 4.6’da hasarsız ve hasarlı (ön yüklenmiş) farklı ECC numunelerinin 7, 7+7, 7+28 ve 7+90 gün sonundaki hızlı klorür iyonu geçirimsizlik (HKİG) testi sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.6 Nano modifiye ECC numunelerinin hızlı klorür iyonu geçirimsizlik sonuçları (Coulomb)

Numune İsmi			7+0 gün	7+7 gün	7+28 gün	7+90 gün
ECC-Ref.	Hasarsız	1	630	233	152	120
		2	640	214	146	131
ECC-NS	Hasarsız	1	214	117	83	73
		2	286	143	100	94
ECC-KNT	Hasarsız	1	179	160	99	98
		2	250	141	109	102
ECC-KNT-NS	Hasarsız	1	104	97	65	45
		2	96	92	84	74
ECC-Ref.	Hasarlı	1	2831	1270	395	385
		2	2982	1048	279	251
		3	2296	1486	436	319
		4	2450	884	297	262
ECC-NS	Hasarlı	1	2234	1237	947	884
		2	1330	682	421	330
		3	1774	1005	545	449
		4	1624	1029	586	459
ECC-KNT	Hasarlı	1	2130	986	618	423
		2	1867	1000	629	568
		3	1710	540	273	170
		4	1159	566	310	259
ECC-KNT-NS	Hasarlı	1	2165	740	463	221
		2	1922	714	656	260
		3	1590	721	493	339
		4	2122	760	575	244

7 günlük ilk kür süresinin ardından numunelerin klorür iyonu geçişi sonuçları değerlendirildiğinde, hasarlı ECC-Ref. numunelerinin HKİG değerlerinin 2982-2296 arasında yer aldığı görülmektedir. Yine ilk 7 günlük sürenin ardından nano malzemeler ile modifiye edilmiş ECC karışımlarının HKİG sonuçlarına bakıldığında; ECC-NS, ECC-KNT ve ECC-KNT-NS karışımları için söz konusu değerlerin sırasıyla 1330-2234, 1159-2130, 1590-2165 olduğu görülecektir. Deney bulguları göz önüne alınırsa, 7+0. gün koşullarına göre bütün nano malzemelerle modifiye edilmiş ECC karışımlarının daha az HKİG değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Kısaca farklı nano malzemeler ile modifiye edilmiş her üç karışım içinde daha fazla çatlak genişliğine rağmen başlangıç HKİG değerlerinin daha az olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni NS ve KNT malzemelerinin çimento esaslı matrislerdeki üstün fonksiyonel özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Nano malzemelerden NS, 7. güne kadar ECC karışımlarında hidrasyon ürünlerini artırarak çok hızlı bir pozolonik malzeme olarak aktivite göstermiştir. Böylece daha yüksek bir matris olgunluğu HKİG değerlerinin referans numunelere kıyasla daha az olmasına neden olmuştur. Ayrıca karışımlarda kullanılan KNT'ler de, NS ile aynı minerolojiye sahip olmasa da, benzer fiziksel üstünlükle mekanizması daha önce açıklanan çekirdeklenme etkisi sayesinde erken yaşlardan itibaren daha hızlı ve yoğun bir mikro yapı oluşumuna katkı sağlamıştır. Bu noktada, KNT içeren ECC karışımlarında hızla artan hidrasyon ürünleri matrisin daha doymuş olmasını etkilemiş olabilir. Sonuç olarak NS ve KNT ile takviye edilmiş üç farklı ECC karışımlarında, 7. gün sonunda matrislerinde muhtemel daha az boşluk suyu mevcut olması HKİG değerlerinin daha az elde edilmesine sebep olmuştur. Benzer sonuçlar ön yüklenmemiş numuneler için de yukarıda açıklanan nedenlerden dolayı geçerlidir. Tez kapsamında araştırılan kendiliğinden iyileşme performansları her ne kadar hasarlı numuneler üzerinden yapılsa da, referans almak amacıyla hasarsız dört farklı ECC karışımına bakıldığında, numunelerin HKİG değerleri ortalaması ECC-Ref., ECC-NS, ECC-KNT ve ECC-KNT-NS için sırasıyla, 635, 250, 215 ve 100 Coulomb olduğu görülecektir. Daha önce bahsedildiği gibi HKİG deneyleri ASTM C 1202 (1997) standardına göre gerçekleştirilmiştir. İlgili standartta, farklı beton sınıfları için geçen klorür iyonu üzerinden bir Coulomb değeri belirlenerek farklı seviyeler oluşturulmuştur. İlgili standardın bu bölümüne ait detaylar Çizelge 4.7'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde hasarsız bütün ECC karışımlarının daha 7. günde standarda göre çok düşük geçirimsizlik seviyesinde olduğu görülmektedir. Bunun yanında farklı nano malzemelerin bir arada modifiye edildiği ECC-NS/KNT numuneleri için söz konusu karşılaştırma daha fazla göze çarpmaktadır. Hasarsız iki adet ECC-NS/KNT numunelerinin ortalama HKİG değerinin 100 Coulomb olması, daha henüz 7. günden itibaren polimer emdirilmiş betonların geçirimsizlik seviyesine ulaştığını göstermektedir. Bu noktada ECC-

NS/KNT karışımlarına ait geçirimsizlik performansının, karışımlarının zahmetli ve yüksek maliyetleri olan polimer emdirilmiş betonlarla benzer değerlerde olması oldukça dikkat çekicidir.

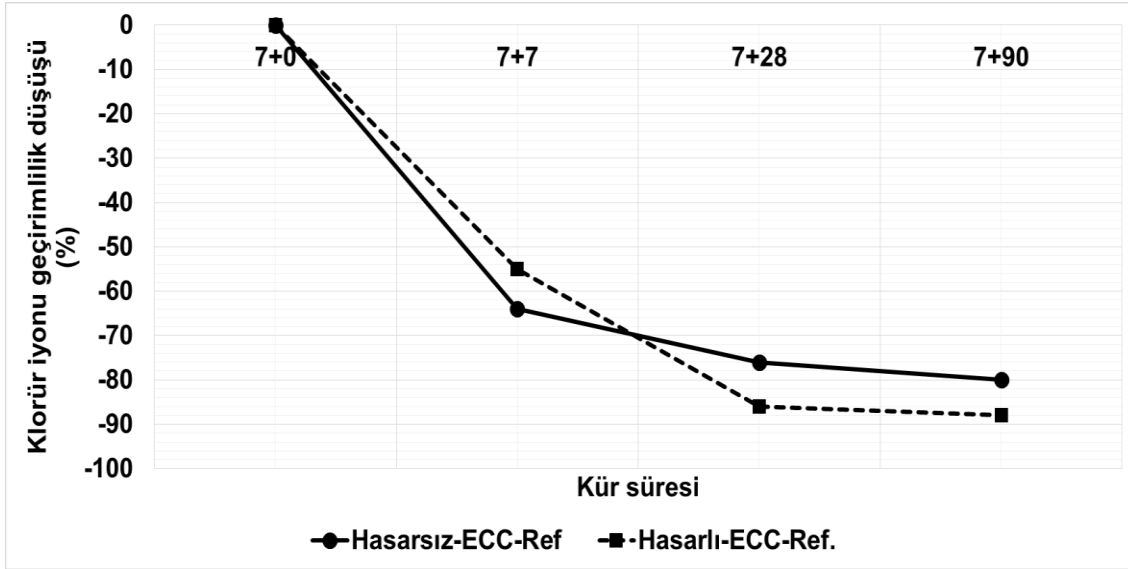
Çizelge 4.7 ASTM C 1202 Standardına göre farklı beton tipleri için klorür geçirgenlik seviyeleri

Geçen iyon (Coulomb)	Klorür geçirimsizliği	Beton tipi
>4,000	Yüksek	Yüksek su/çimento oranı (>0,60) geleneksel Portland çimentolu betonlar
2,000–4,000	Normal	Normal su/çimento oranı (0,40-0,50) geleneksel Portland çimentolu betonlar
1,000–2,000	Düşük	Düşük su/çimento oranı (<0,40) geleneksel Portland çimentolu betonlar
100–1,000	Çok düşük	Lateks ile modifiye edilmiş veya içten kür edilmiş betonlar
<100	İhmal edilebilir	Polimer emdirilmiş betonlar, Polimer betonlar

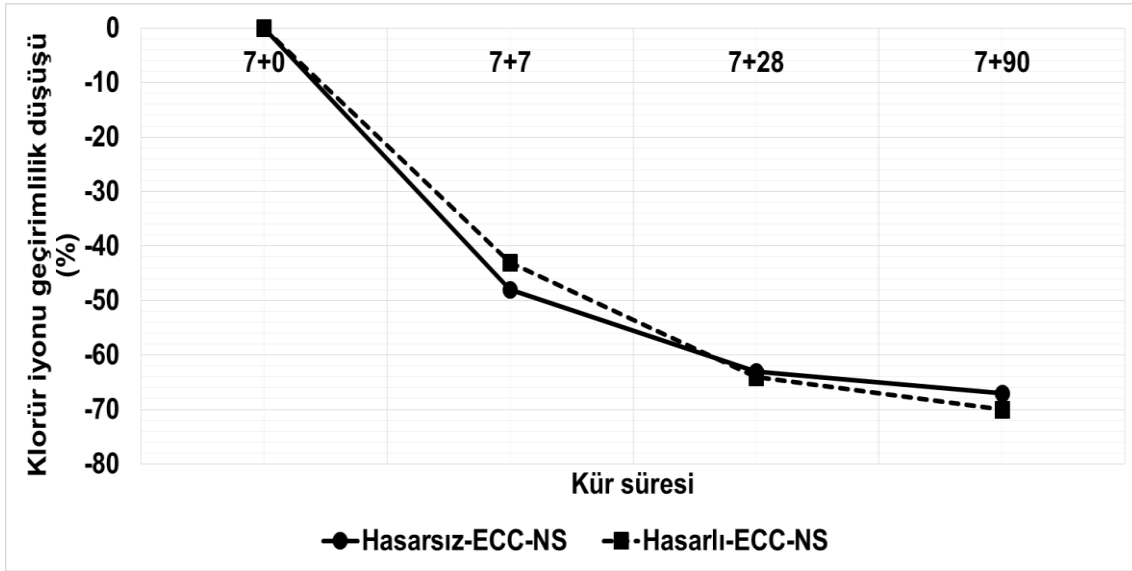
Daha önce aktarılan verilerle ilişkili olarak NS içeren karışımların daha geniş çatlak açıklıkları düşünüldüğünde karışımların matris tokluğunun yüksek olması düşünülebilir. Bu noktada karışımlarda kullanılan KNT'ler PVA liflerine nano/mikro boyutta yardımcı olmaya çalıştığından söz edilebilir. Böylece çatlak oluşumu için gerekli enerji miktarı azalmış ve daha küçük açıklıklara sahip mikro çatlakların oluşması tetiklenmiştir. Bu yorum, aynı zamanda daha önce kirli numuneler için verilen Çizelge 4.4'teki toplam çatlak açıklığı değerleri ile doğrulanabilir. Böylelikle hasarlı ECC-NS/KNT numunelerinin önyüklemeye klorür iyonu geçirimsizlik değerlerinin aşırı artış göstermesi söz konusu olmamıştır.

Bilindiği üzere farklı yüklemeler sonucunda mevcut çatlaklar betonun taşınma özelliklerini kötüleştirir. Bu durumda betona dışarıdan temas eden su, oksijen ve klorür iyonları betonun içerisine kolaylıkla nüfuz ederek donatıyı paslandırabilmektedir. Sonuç olarak betonun servis ömrü çok ciddi şekilde azalmaktadır. Bu nedenle HKİG test sonuçları, betonun dürabilite özellikleri ile ilgili oldukça güvenilir bir deney yöntemi olmakla birlikte, kendiliğinden iyileşmenin belirlenmesi için de hassas bir değerlendirme tekniğidir. Gerek hasarlı gerekse hasarsız ECC karışımlarına dikkat edildiğinde, daha düşük HKİG değerleri nano malzeme içeren karışımlar için Çizelge 4.6'da görülmektedir. Özellikle ECC-NS/KNT karışımı başta olmak üzere tane boyut dağılımı iyileşen nano malzeme ile modifiye edilmiş ECC karışımları, toplam çimento hamurunun yüzey alanını artırarak geçirimsizliğin artmasında önemli rol oynamıştır. Farklı ECC numunelerinin 7. gündeki ilk HKİG testinin ardından kür işlemi 7 gün daha devam etmiş ve tekrar HKİG testi uygulanmıştır. 7+7. günde hasarsız numunelerde hasarlı numuneler kadar HKİG değerleri düşüş görülmemiştir. Bu

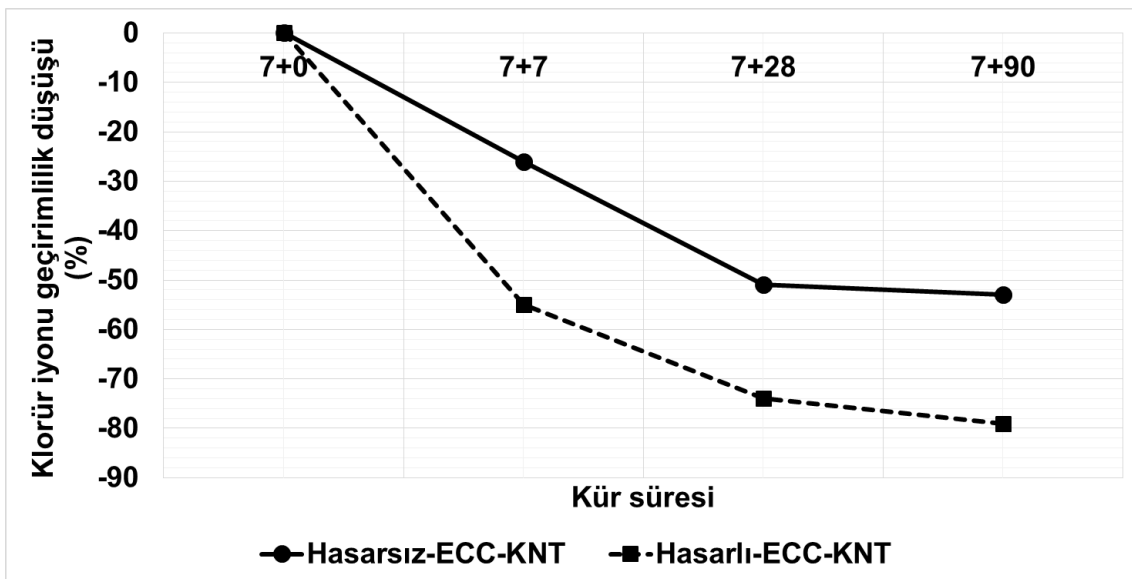
durum hasarsız ECC-NS/KNT numuneleri için daha belirgin olmuştur. Bunun nedeni ise KNT ve NS malzemelerinin matris yoğunluğunun çok büyük bir kısmını ilk 7 günde sağlamış olmasıdır. Böylece her ne kadar devam eden yaşlarda azalış sürse de diğer karışım tipleri kadar HKİG değerlerinde çok düşüş gözlemlenmemiştir. Hasarsız numunelere bakıldığında özellikle 7+7. gün bütün numuneler için en fazla düşüşün kaydedildiği yaş olmuştur. HKİG değerlerindeki bu hızlı düşüşün nedeni hidrate olmamış çimento taneciklerinin hızlı bir şekilde tükenerek hidrasyon ürünü oluşturmasıdır. Hasarlı numuneler incelendiğinde, 7. ve 7+7. günde kaydedilen ortalama HKİG değerleri ECC-Ref., ECC-NS, ECC-KNT ve ECC-KNT-NS numuneleri için sırasıyla 2640-1172, 1740-988, 1716-773, 1950-734 Coulomb olmuştur. Bu durum 7+7. günden başlamak üzere bütün yaşlarda KNT ve NS ile modifiye edilmiş numunelerin çatlak kapanma kabiliyetinin daha yüksek olduğunu işaret etmektedir. Farklı karışımlara ait diğer iyileşmelerin daha iyi takip edilmesi adına aşağıda Şekil 4.19-22 arasında hasarlı ve hasarsız haldeki farklı ECC karışımların farklı yaşlardaki HKİG test sonuçlarındaki oransal düşüşler verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere bütün karışımlarda en çok düşüşün meydana geldiği 7+7. günde en belirgin düşüş Şekil 4.22'deki ECC-NS/KNT için gerçekleşmiştir. Ayrıca, dikkati çeken bir başka sonuç, başlangıç HKİG değerleri birbirinden farklı olan ECC-NS/KNT numunelerinin 7+7. günde 714-760 aralığında dar bir varyasyondaki değerleridir. Sonuçlar, NS ve KNT ile modifiye edilen ECC karışımlarının başlangıçtaki farklı çatlak sayısı ve çatlak genişliğine rağmen bir noktada benzer iyileşme performansının elde edildiğini göstermektedir. Bu sonuç özellikle erken yaşlardan itibaren, geliştirilen nano modifiye ECC karışımının kendiliğinden iyileşme mekanizmasının daha etkin ve yaygın olduğunu doğrulamaktadır. Diğer karışımların aksine, sadece ECC-NS/KNT karışımına ait numunelerinin tamamı 7+7. günde 1000 Coulomb değerinin altına düşerek Çizelge 4.7'de verilen standart tabloya göre çok düşük klorür iyonu geçirgenliğine sahip beton seviyesine ulaşmıştır.



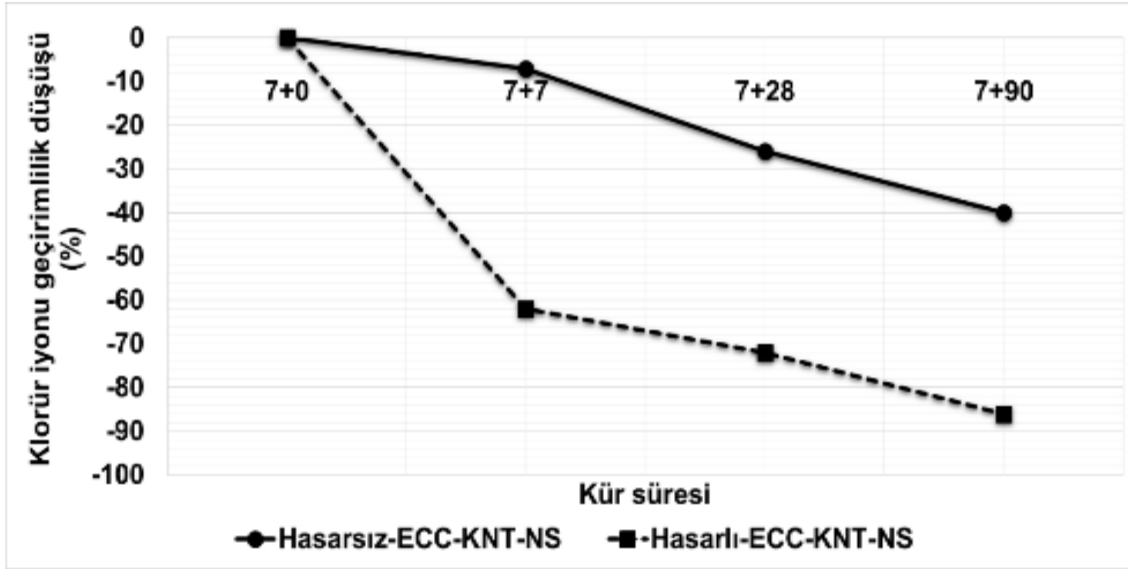
Şekil 4.19 ECC-Ref numunelerinin 7, 7+7, 7+28 ve 7+90. günlerdeki HKİG değerleri



Şekil 4.20 ECC-NS numunelerinin 7, 7+7, 7+28 ve 7+90. günlerdeki HKİG değerleri



Şekil 4.21 ECC-KNT numunelerinin 7, 7+7, 7+28 ve 7+90. günlerdeki HKİG değerleri



Şekil 4.22 ECC-NS/KNT numunelerinin 7, 7+7, 7+28 ve 7+90. günlerdeki HKİG değerleri

KNT'lerin nano/mikro ölçekte hidrasyon ürünleri arasındaki yük aktarma kabiliyeti, NS'nin matrisin tokluk seviyesini arttırmasını bir ölçüde dengeleyerek daha fazla çatlak genişliğini engellerken aynı zamanda kendiliğinden iyileşmenin daha yaygın olmasını sağlamış olabilir. Bu noktada diğer kendiliğinden iyileşme parametreleri ile birlikte çatlak açıklığının önemini vurgulamak gerekmektedir. ECC karışımlarında önyükleme sonucunda oluşturulan mikro çatlaklar kendiliğinden iyileşme ürünlerince doldurulmak üzere yeterli alan sağlasa da, çatlakların tam anlamıyla kapanmasının istendiği koşullarda sadece dar açıklıklı çatlaklar etkili olabilmektedir. Çatlak genişliğinin artmasıyla kendiliğinden iyileşme kinetiği hızlansa da, çatlakların tamamen tıkanması için ihtiyaç duyulan ürün miktarının artması sebebiyle tamamen kapanma mümkün olmayabilmektedir. Diğer bir deyişle, çatlak sayısının daha fazla olması, iyileşme oranını da arttırmakta ve çatlakların kendi kendine kapanması daha mümkün olmaktadır. 7+7. günde KNT ile hazırlanan ECC karışımlarının iyileşme derecesi incelendiğinde her ne kadar hasarlı ECC-KNT/NS kadar iyileşme performansı elde edilemese de, ortalama HKİG sonuçları değerlendirildiğinde, 7+7. günde hasarlı ECC-NS numunelerine kıyasla az da olsa daha iyi performans gösterdiği anlaşılabilir. 7. günde hasarlı ECC-KNT ve ECC-NS numunelerinin ortalama HKİG değerleri sırasıyla 1716 ve 1740 Coulomb iken, birbirine yakın bu iki değer 7+7. günde sırasıyla 773 ve 988 olmuştur. Söz konusu ortalama düşüşler oransal olarak (sırasıyla %55 ve %43) Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de her bir karışım için takip edilebilir. Ayrıca, özellikle NS içeren karışımların daha yüksek matris yoğunluğu göstermesi nedeniyle 7+7 günde daha düşük HKİG değeri beklenmesine rağmen söz konusu durumun gerçekleşmediğine dikkat çekilmelidir. NS'in üstün puzolanik yeteneğine rağmen, 7+7. günde ECC-KNT numunesine kıyasla daha sınırlı düşen ortalama oransal HKİG değeri büyük olasılıkla daha geniş çatlak açıklıklarına ve dolayısıyla sınırlı iyileşmeye bağlı olmuştur. Ayrıca, KNT taneciklerinin 1 gramının kapladığı alanın 500 m²

olması (1 gram NS için 300 m²) nedeniyle karışımlarda tane boyut dağılımını daha iyileştirdiği de söylenebilir.

Nano modifiye ECC karışımlarının 7+28. gündeki kendiliğinden iyileşme performanslarına bakıldığında Şekil 4.22'den görüleceği gibi en iyi iyileşme kinetiğinin ECC-NS/KNT numunelerinde olduğu açıkça görülmektedir. Ancak tekil olarak nano malzeme içeren ECC karışımlarına kıyasla, ECC-Ref. numunelerinin de benzer iyileşme performansına eriştiği görülebilir. Şekil 4.19'a bakılacak olursa, ECC-Ref. numunelerinin 7+7-7+28. gündeki oransal HKİG değerlerindeki düşüşün, diğer karışımların aynı yaştaki düşüş değerlerine kıyasla daha belirgin olduğu görülecektir. Hatırlanacağı üzere önceki kısımlarda HKİG değerleri açısından en çok düşüşün 7+7. günde meydana geldiği nedenleri ile birlikte detaylı olarak açıklanmıştı. Bu noktada düşüşün en sınırlı olduğu karışım ise ECC-Ref numuneleriydi. 7+28 günlük sürede, ECC-Ref karışımı için, nano malzemelerle takviye edilmiş ECC karışımlarına kıyasla daha fazla düşüşün nedeni, 28. güne kadar matris doygunluğunun artarak devam etmesidir. Nano malzemeli karışımlarda bu doygunluk derecesi çok daha erken yaşlarda gerçekleştiği için HKİG değerlerindeki oransal düşüş belirgin olmakla birlikte ECC-Ref numuneler kadar sert düşüşler kaydedilmemiştir (Şekil 4.19-22). Bu noktada, HKİG test yönteminin kendiliğinden iyileşme performansının belirlenmesinde son derece tutarlı bir ölçüm yöntemi olduğu, elde edilen sayısal ve daha önceki konu başlığından elde edilen mikroskopik incelemelerle de doğrulanmaktadır. Farklı ECC karışımlarının kendiliğinden iyileşme performansları HKİG test sonuçları ile genel olarak değerlendirilse, ilerleyen yaşlarda hidrate olmamış taneciklerin azalması nedeniyle özellikle 7+28 ile 7+90 günlük yaşlarda karışımlarda daha düze yakın bir eğrinin varlığından söz edilebilir (Şekil 4.19-22). Ancak, Şekil 4.22'ye bakıldığında (ECC-NS/KNT), söz konusu kür süreleri içerisinde, her ne kadar benzer düşüş geçerli olsa da artan kür süresine karşılık gelen oransal HKİG değerlerindeki düşüş diğer karışım tipleri kadar düzleşmediği görülecektir. Bu durum ECC-NS/KNT numuneleri için ileri yaşlarda hala kendiliğinden iyileşme potansiyelini göstermektedir. Karışımda tamamen hidrate olmadan kalan uçucu kül taneciklerinin ileri yaşlardaki hidrasyon reaksiyonları için bünyede bulanabileceğinden, elde edilen sonuç literatürde mevcut bilgi birikimi ile benzerlik taşımaktadır (Song ve Van Zijl, 2004). Sonuçlar genel olarak yorumlandığında, KNT ve NS'in ECC karışımlarında kombine edilerek bütün yaşlarda kendiliğinden iyileşme derecesini arttırdığından rahatlıkla söz edilebilir. Ancak nano malzemelerin tekil olarak kullanıldığı durumlarda (ECC-NS ve ECC-KNT), her ne kadar referans numunelere kıyasla daha etkin kendiliğinden iyileşme performansı elde edilse de, ECC-NS/KNT numuneleri kadar belirgin bir iyileşme elde edilmemiştir.

Özellikle NS'nin yüksek lif-matris sürtünme gerilmesi ve matris kırılma tokluğunu arttırması nedeniyle meydana gelmiştir. Ayrıca, sadece KNT içeren numunelerde NS'nin yer almaması da iyileşmenin ECC-NS/KNT numunelerine göre daha zayıf olmasına neden olmuştur. NS nedeniyle, karışımların yüksek matris doygunluk derecesi, verilen hasarın ardından daha çoklu çatlak oluşumunu engellemiştir.

Geniş açıklıklı çatlaklarda, yüksek matris kırılma tokluğu ve içsel malzemelerin NS varlığında daha hızlı tüketilmesi nedeniyle, kendiliğinden iyileşme daha sınırlı olmuştur. Bu durum, ECC-NS numunelerinin artan yaşlarda ortalama oransal HKİG değerlerindeki düşümlere bakıldığında da görülebilir (Şekil 4.20). Sonuçlar, ECC karışımlarında tam bir iyileşme performansı için yalnız NS kullanımı yerine, KNT ile NS'nin kombine edilerek daha dar açıklıkta ve çoklu çatlak oluşumu ile desteklenmesi gerektiğini göstermektedir. Bu sebeple, önce kısımlarda olduğu gibi kendiliğinden iyileşme geniş çatlaklarda her ne kadar daha hızlı meydana gelse de, tam anlamıyla iyileşme gerçekleşebilmesi için gerekli bileşenler hidrate olmamış tanecikler, bünyede su ve dar çatlaklardır. Kendiliğinden iyileşmenin klorür iyonu geçirimsizlik sonuçları ile değerlendirilmesinde kritik olabilecek bir başka konu boşluk çözümleridir. ECC-NS/KNT numunelerinin yüksek kendiliğinden iyileşme performansının, C-S-H jelleri ve/veya kalsiyum hidroksitten daha fazla Ca^{2+} iyonunun sızması ile $CaCO_3$ oluşumu sonucunda, boşluk çözümlerinin pH değerinin değişmesiyle ilgisi olabilir (Şahmaran ve diğerleri, 2013). Geliştirilen ECC-NS/KNT karışımları ile bir çatlağın kendiliğinden iyileşme aracılığıyla tamamen kapanabilmesi için farklı çalışmalarda belirtilen minimum sınır değerlerinin üzerinde bir sonuç elde edilmesi mümkün olmuştur (Reinhardt ve Jooss, 2003; Edvardsen, 1999; Aldea ve diğerleri, 2000). Söz konusu çalışmalarda tam olarak kapanabilecek bir çatlağın genişliği 100 μm (Reinhardt ve Jooss, 2003), 200 μm (Edvardsen, 1999) ve 205 μm (Aldea ve diğerleri, 2000) ile sınırlandırılırken, mevcut çalışmada, bir önceki bölümdeki kiriş numunelerin çatlak görüntülerine bakıldığında ECC-NS/KNT karışımları için bütün yaşlarda 297 mikronluk bir çatlağın tam olarak kapanması sağlanmıştır.

4.3. Kendiliğinden İyileşen ve Kendiliğinden Algılayan Akıllı Çimento Esaslı Kompozitler

Tez çalışmasının bu bölümünde; üzerine uygulanan hasar sonucunda meydana gelen çatlakları hem kendiliğinden algılayabilen (self-sensing) hem de aynı çatlakları kendiliğinden iyileştiren (self-healing) Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitleri tasarlamaya yönelik araştırmalar yapılmıştır.

Bu amaçla, önceki kısımlarda olduğu gibi bu aşamada da, NS ve KNT malzemelerinin tekli ve birlikte kullanıldığı silindir numuneler üzerinde elektriksel direnç (ED) hesaplamaları yapılmıştır. Bunun yanında aynı karışımlarla hazırlanan kiriş ECC numunelerin hasarsız ve hasarlı durumları karşılaştırılarak kendiliğinden iyileşme mekanik olarak da incelenmiştir. ECC kiriş numunelerin mühendislik özellikleri incelenirken göz önüne alınan parametreler sırasıyla eğilme dayanımı, deformasyon kapasitesi, süneklik oranı, başlangıç rijitlik oranı ve enerji yutma kapasitesidir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve polarize mikroskobik analizleri ayrıca kendiliğinden algılama ve kendiliğinden iyileşme mekanizmalarını ECC matrisleri içerisinde daha iyi anlamak adına gerçekleştirilmiştir. Araştırmalar nano malzemelerin geleneksel ECC karışımlarında kombine edilmesinin daha yüksek mekanik geri kazanımla ve daha geniş çatlakların kapanma potansiyeli ile sonuçlandığını göstermektedir. Ayrıca, her iki nano malzemenin (NS ve KNT) kombine edilmesi, tekil olarak nano malzeme ihtiva eden karışımlara kıyasla daha iyi bir piezo-dirençli davranışı (kendiliğinden algılama) sağladığını göstermektedir. Ancak yine de, sadece KNT kullanımını ECC karışımlarında sadece NS kullanımına göre daha umut vadeden kendiliğinden algılama ve kendiliğinden iyileşme davranışı meydana getirdiğinden rahatlıkla söz edilebilir. Yapısal hasarlar, insan sağlığı üzerinde deprem, boyutsal değişiklikler, mekanik yükler, çevresel etkiler ve/veya bu etkilerin kombinasyonu gibi nedenlerden dolayı tehlike oluşturmaktadır. Bu nedenle, altyapıların hizmet ömrü içerisinde gerekli yapısal hasarların en erken zamanda teşhisi ve onarımı çok önemli bir durum almaktadır. Ne var ki, pek çok yapı/altyapı neden meydana geldiği önemli olmaksızın çatlak oluşumlarından dolayı ağır hasarlara maruz kalmaya başlamaktadır. Bu durumu önlemek için beton teknolojisi yıllarca çözüm geliştirmeye çalışmış ve nihayetinde lif donatılı çimento esaslı kompozitler üretilmiştir (Li, 1998). Bunların arasında ECC malzemeleri ağır yüklemeler altında dar açıklıklı mikro çatlak oluşumunu desteklemesi nedeniyle oldukça ilgi çekmiş ve 1998 yılında Victor Li tarafından inşaat endüstrisinin istifadesine sunulmuştur. ECC ile ilgili olarak 20 yıl boyunca giderek artan sayıda çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu zaman içerisinde, ECC malzemelerine ilave olarak yapısal ve yapısal olmayan çeşitli özellikler kazandırılmaya gayret edilmiştir (Banyhussan ve diğerleri, 2016, Siad ve diğerleri, 2017, Li ve diğerleri, 2013, Şahmaran ve diğerleri, 2017). Örneğin, farklı yöntemlerle pek çok çaba ECC malzemelerinin kendiliğinden iyileşme özelliği için gerçekleştirilmiştir (Yang ve diğerleri, 2009, Jacobsen, 1995). Tekrarlı onarım/bakım uygulamalarının en pratik ve en etkili yoldan azaltma yollarından birisi çimento esaslı malzemelerin otojen kendiliğinden iyileşme mekanizmasıdır. Çimento esaslı malzemelerin geleneksel kompozisyonları ile kendiliğinden iyileşme pek çok kez rapor edilmiştir (Breugel, 2012).

Çimento esaslı kompozitlerin kendiliğinden iyileşme performansları ile ilgili karışımların modifikasyonu da son zamanlarda konu ile ilgili araştırmaların başında gelmektedir (Şahmaran ve diğerleri, 2008, Ferrara ve diğerleri, 2016). Ancak, geleneksel matris modifikasyonları yerine, gelişen teknoloji nano malzemelerin çimento esaslı karışımlarda kendiliğinden iyileşme amacıyla kullanılmasına imkan vermektedir. Ancak buna rağmen geleneksel ECC karışımlarında kendiliğinden iyileşme amacıyla nano malzeme kullanımı oldukça sınırlı kalmıştır. Ayrıca, mevcut çalışma sonuçları çok fazla farklılık içermekte ve kararlı kendiliğinden iyileşme mekanizmalarını gerçekleştirme noktasında yetersiz kalmaktadır (Huseien ve diğerleri, 2019). Bu nedenle geleneksel ECC karışımlarının içeriklerini ve özelliklerini nano ölçekte modifiye etmek tez çalışmasının en önemli amaçlarından biridir. Son zamanlarda çimento esaslı malzemelerle ilgili olarak bir diğer önem yapıların sürekli olarak mevcut durumlarını kontrol etmek amacıyla yapılan yapısal sağlık izleme (YSİ) araştırmalarına verilmiştir. Her ne kadar çeşitli YSİ sistemleri yapıdan elde edilen veriler vasıtasıyla sürekli bir yapısal sağlık izlemeye imkan verse de, bu yöntemlerin pek çoğunun inşaat endüstrisi tarafından kolayca adapte edilememesi karşılaşılan en önemli sorunlardan birisidir. Örneğin bazı YSİ sensörlerinin kısa ömürlü ve yüksek maliyetleri kadar yapılarla uyumsuzlukları da belirtilen sorunların başında gelmektedir (Han ve diğerleri, 2014). Ayrıca zamanla bozulan yapıların hasar tespiti bazı zamanlarda hasarın konumuna göre yapı/altyapı içerisinde ulaşılabilir durumda olmamaktadır. Dahası, onarım/bakım faaliyetleri sırasındaki iş gücü kaybı ve o yapıda verilen hizmetlerin aksaması konu ile çözüm getirilmesi gereken ikincil problemlere de yol açmaktadır. Bu amaçla, yapısal malzemelerin elektriksel iletkenlik özelliklerini uyumlu hale getirerek malzemeyi üzerine etkileyen herhangi bir şekil değiştirmenin algılanmasına karşı hassas hale getirmek oldukça ilgi çekmektedir (Yu ve Kwon, 2012). Kendiliğinden algılama (self-sensing) yani piezo-dirençli davranış, şekil değiştirme altında elektriksel direnç seviyesinin değişmesi anlamına gelmekte ve kullanıcılara bu yöntemle harici bir sensör şebekesine ihtiyaç duymadan yapısal sağlık izleme imkanı vermektedir. Örneğin ECC malzemeler diğer çimento esaslı malzemeler gibi genellikle yarı iletken özellikte ve $10^1-10^5 \Omega\cdot m$ elektriksel dirence sahip olup uygun şekilde içeriği modifiye edildiği takdirde piezo-dirençli olarak kullanılacak son derece umut vadeden bir malzemedir (Chung, 2002 ve Hou 2005). Daha önce bahsedildiği üzere hem kendiliğinden iyileşme (Liu ve diğerleri 2011) hem de kendiliğinden algılama (Galao, 2014) özellikleri dikkate alındığında, daha sürdürülebilir ve akıllı yapıların tasarlanmasında söz konusu yapı

malzemeleri sürekli olarak yapısal sağlık izleme ve otojen kendiliğinden iyileşme fonksiyonları ile bütünleştirilebilir. Tez çalışmasının bu bölümünde ECC malzemelerinin mikro yapılarının nano modifikasyonu sayesinde kendiliğinden algılama ve kendiliğinden iyileşme yetenekleri ele alınmıştır. Her ne kadar çimento esaslı malzemelerin söz konusu kombine edilen çok fonksiyonlu özellikleri az sayıda mevcut olsa da (Siad ve diğerleri, 2018), sadece oransal elektriksel direnç değişiminden ziyade kendiliğinden algılama ve nano modifikasyonla otojen kendiliğinden iyileşme özelliklerinin bir arada olduğu çalışma literatürde rast gelinmemiştir. Bu nedenle, mevcut tez çalışmasının bu bölümü de ECC malzemelerinin NS, KNT ve hem KNT hem NS nano malzemelerinin birlikte kullanıldığı karışımlarda kendiliğinden algılama ve kendiliğinden iyileşme kabiliyetlerini kapsamaktadır. Geliştirilen ECC malzemelerinin çok fonksiyonlu özellikleri elektriksel direnç (ED) hesaplamaları ile belirlenmiştir. ED hesaplamalarına ek olarak ön yüklenmiş numunelerin video mikroskop aracılığıyla fiziksel olarak kapanan mikro çatlakları da araştırılmıştır.

4.3.2. Deneysel Program

4.3.2.1. Malzemeler

Bu bölümde ECC numunelerinin hazırlanmasında kullanılan malzemeler sırasıyla; CEM-I 42.5 R standart Portland çimentosu, F-sınıfı uçucu kül, ince silis kumu (maksimum agrega tane çapı 0.4 mm) ve yüksek oranda su azaltıcı katkıdır. Portland çimentosu, uçucu kül ve silis kumuna ait kimyasal ve fiziksel özellikler daha önce Bölüm 3'te verilen Çizelge 3.1'de verildiğinden bu aşamada malzemelerin özellikleri tekrar verilmemiştir. ECC ile ilgili yapılan literatürdeki çalışmaların çoğunluğunun aksine (hacimce %2) (Şahmaran ve Li, 2008) PVA lifi oranı bu aşamada da azaltılmıştır (hacimce %1,1). Tez çalışmasındaki lif oranının azaltılması ECC karışımlarında en önemli maliyet girdisi olan PVA liflerinin azalması ile genel maliyetlerin düşmesinin yanında daha geniş açıklıkta mikro çatlakların meydana gelmesi mümkün olmuştur. Böylelikle, nano malzemelerin varlığında ECC numunelerinin geniş çatlaklarının kapanma potansiyeli daha net bir şekilde ortaya konmuştur. ECC numunelerinde kullanılan nano malzemelerden KNT'ler 20-30 nm çapında, 10-30 µm uzunluğunda ve yüzey alanı 200 m²/g'den daha fazladır. NS ise 15-20 nm çapında ve 300 m²/g yüzey alanındadır.

4.3.2.2 Karışım Oranları ve Karışım Sırası

Uçucu kül (UK) / Portland çimentosu oranı 1,2, su bağlayıcı oranı ise 0,27 olarak tercih edilmiştir. KNT oranı daha önce Al-Dahawi ve diğerlerinin (Al-Dahawi ve diğerleri, 2016) çalışmasına bağlı olarak bağlayıcı malzemelerin %0,55 ağırlığı oranınca kullanılmıştır.

Bir önceki bölümde olduğu gibi NS miktarı yine aynı şekilde bağlayıcı malzemelerin %3'ü olarak tercih edilmiştir. Bu orana karar verilirken NS içeren karışımlar için ön deneyler gerçekleştirilmiş olup ön deneylerin sonuçları daha önce Çizelge 4.1'de verildiğinden bu başlıkta tekrar sunulmaya gerek duyulmamıştır. Karışımlar sırasında YOSAK miktarını bütün taze ECC karışımları için sabit tutmak oldukça zor olmuştur. Bu nedenle benzer işlenebilirlik özelliklerini temsil etmek amacıyla karışımlarda farklı YOSAK oranları kullanılmıştır. Benzer işlenebilirlik özelliklerini bütün karışımlarda elde etmek için tekrarlı pek çok deney yapılarak her bir karışım için gerekli YOSAK miktarı tespit edilmiştir. Bu testler mini-slump testleri ile gerçekleştirilmiştir (Al-Dahawi ve diğerleri, 2016). Daha önce önemle bahsedildiği üzere nano malzemelerin söz konusu fonksiyonları ECC karışımlarına kazandırması için taze karışımlara uniform şekilde dağıtılması gerekmektedir. Bu amaçla aşağıda Şekil 4.23'te şematik olarak verilen karışım prosedürü uygulanmıştır.



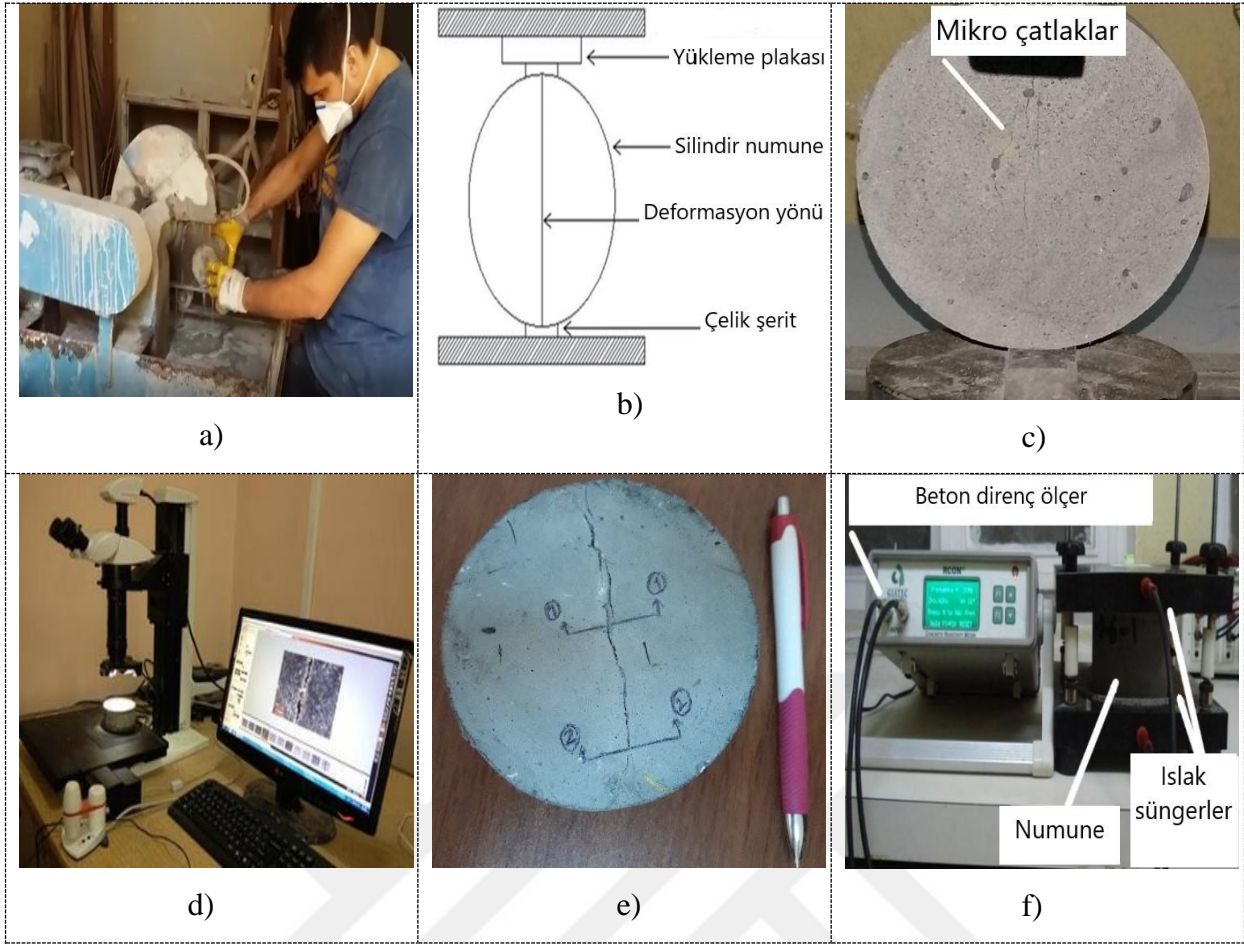
Şekil 4.23 Karışım sırası

Karışım işleminin tamamlanmasının ardından taze harçlar kalıplara dökülmüş ve $50 \pm 5\%$ BN ve 23 ± 2 °C sıcaklıkta 24 saat süresince plastic kaplar içerisinde bekletilmiştir. 1 günün ardından numuneler $95 \pm 5\%$ BN ve 23 ± 2 °C'lik ortama sahip kür odasına alınmıştır. Kendiliğinden iyileşme/algılama için numuneler 7 gün boyunca kür edilmişlerdir. Ön yüklemenin uygulanmasının ardından ise numuneler test edileceği yaşlara kadar su içerisinde bekletilmişlerdir.

4.3.2.3. Deneyler

Kendiliğinden İyileşmenin Belirlenmesi için Elektriksel Direnç Testleri:

Kendiliğinden iyileşme testleri için $\text{Ø}100 \times 200$ mm boyutlarındaki numuneler her bir karışımdan elektriksel direnç hesaplamaları için üretilmiştir. 7. Günde, $\text{Ø}100 \times 200$ mm boyutlarındaki numunelerden $\text{Ø}100 \times 50$ mm'lik disk şeklinde numuneler kesilmiştir (Şekil 4.24-a). Aynı disk numuneler ön yüklemeye kadar kendiliğinden iyileşme ve kendiliğinden algılama özelliklerinin belirlenmesi için test edilmiştir. Ön yüklenmemiş numunelerden ikişer adet ön yüklenmiş numunelerden ise 4'er adet numune her bir karışımdan elde edilerek yarmada çekme yükleri altında test edilmiştir. Yarmada çekme testlerinin şematik olarak gösterimi Şekil 4.24-b'de gösterilmiştir. İlk olarak, her bir ECC numunesinin mekanik karakteristikleri ön yükleme öncesi belirlenmiştir. Her bir karışımdaki farklı nano malzeme içeriğinin dolayı, nano malzeme içeren ECC numuneleri farklı yük taşıma kapasiteleri göstermiştir. Referans numunelerle birlikte, her bir nano malzeme içeren farklı ECC karışımlarına ait numunelere daha önceden belirlenen ön yükleme seviyesinde (yük taşıma kapasitesinin %75'i) test yapılmıştır. Deneyler kapalı sistem üniversal bir test cihazında 0.005 mm/s yükleme hızında gerçekleştirilmiş olup çatlaklar numune yüzlerinde belirgin olana kadar deneye devam edilmiştir (Şekil 4.24-c). Meydana gelen çatlaklar, büyütme kapasitesi 125 X olan bir video mikroskop aracılığıyla ölçülmüştür. Şekil 4.24-d'de gösterildiği üzere, ortalama çatlak genişlikleri aynı çatlağın iki farklı noktadan ölçümü ile belirlenmiştir. 7. Gündeki ilk ölçümlerden sonra, ED testleri numunelerin mikroskop ölçümleri ile birlikte 7., 28. ve 90. günlerinde gerçekleştirilmiştir. ED hesaplamalarında herhangi bir ölçüm ile ilgili problemle karşılaşılması için numuneler 24 saat boyunca $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de kür edilerek nem durumları standart hale getirilmiştir. ED testleri iki sondaki (prob) beton direnç ölçer ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.24-f). Numunelerin elektriksel ölçümleri cihaz yardımıyla alternatif akım (AC) kullanılarak sabit 1 kHz frekans seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem daha önce literatürde 30 kHz frekansa kadar yapılan çeşitli deneyler sonucunda polarizasyon etkisini en az seviyeye indirmek için tercih edilmiştir (Hou, 2008).



Şekil 4.24. Numunelerin ve test konfigürasyonlarının sırasıyla hazırlanması; (a) disk numunelerin çıkarılması, (b) yarmada çekme testinin şematik gösterimi (c) Ön yüklemeye sırasında mikroçatlakların meydana gelmesi (d) Çatlakların mikroskopik incelemesi (e) çatlakların karakterize edilmesi f) ED konfigürasyonu

Numunelerin elektriksel direnç değerlerinin empedans üzerinden belirlenmesinde kullanılan denklem (4.1) aşağıda verilmiştir.

$$R = Z \times \cos(\theta) \quad (4.1)$$

Burada R , Z ve teta açısı sırasıyla; elektriksel direnç (Ω), elektriksel empedans ve faz açısına ($^{\circ}$) karşılık gelmektedir. Hasarlı numunelerin 7,28 ve 90 günlük su kürelerinin ardından kendiliğinden iyileşme oranları hasarsız 7 günlük numuneler ile hasarlı numunelerin karşılaştırılmasıyla ED sonuçlarına göre değerlendirilmiştir. Göz önüne alınan değerlendirme aşağıdaki denklem (4.2) yardımı ile yapılmıştır.

$$\% = \left[\left\{ \frac{(ER_{PL} \text{ at } i^{\text{th}} \text{ day} - ER_{PL} \text{ at } 7^{\text{th}} \text{ day})}{(ER_{PL} \text{ at } 7^{\text{th}} \text{ day})} \times 100 \right\} - \left\{ \frac{(ER_S \text{ at } i^{\text{th}} \text{ day} - ER_S \text{ at } 7^{\text{th}} \text{ day})}{(ER_S \text{ at } 7^{\text{th}} \text{ day})} \times 100 \right\} \right] \quad (4.2)$$

burada, ER_{PL} and ER_S sırasıyla hasarlı ve hasarsız numunelerin ilgili kür yaşlarındaki ED değerlerine karşılık gelmektedir.

Kendiliğinden Algılamanın Belirlenmesi için Elektriksel Direnç Testleri:

Numunelere hasar verilmesinin ardından kaydedilen ED değerleri hasarsız haldeki ED değerleri ile karşılaştırılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Böylece hem kendiliğinden iyileşme hem de kendiliğinden algılama özellikleri ED testleri üzerinden yapılmıştır. Daha önce belirtildiği üzere ED konfigürasyonu ile aşağıda verilen eşitlik uygulanmış ve numunelerin yük taşıma kapasitelerinin %75'ine kadar kendiliğinden algılama kabiliyetleri tespit edilmiştir.

$$FCER = \frac{ER_{PL} - ER_S}{ER_S} \times 100 \quad (4.3)$$

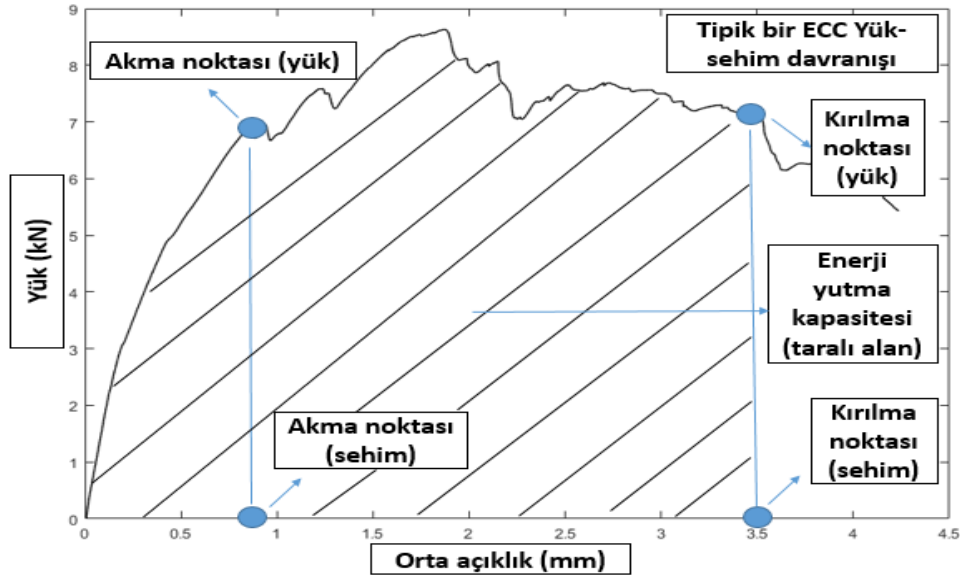
burada, FCER, ER_{PL} and ER_S sırasıyla oransal elektriksel direnç değişimini, ön yüklenmiş ve ön yüklenmemiş numunelerin ED değerlerini göstermektedir.

Kiriş Numunelerin Mekanik Olarak Kendiliğinden İyileşme Testleri:

Kendiliğinden algılama/iyileşme özellikleri mekanik ve elektriksel direnç testleri üzerinden belirlenmiştir. Kendiliğinden iyileşmeyi mekanik olarak da belirlemek amacıyla giriş numuneler (360 mm × 75 mm × 50 mm [boy × yükseklik × en]) üretilmiş ve silindir numunelerde olduğu gibi taşıma kapasitesinin %75'ine kadar yüklenerek hasar verilmiştir. 7 günlük sürenin ardından hasarlı ve hasarsız numuneler su altında kür edilmişlerdir. Kendiliğinden iyileşmenin mekanik olarak belirlenmesi amacıyla araştırmalar numunelerin eğilme dayanımları ve deformasyon kapasitelerindeki geri kazanımlar üzerinden yapılmıştır. Ayrıca, 28 günlük numunelerin akma ve eğilme dayanımları 4 noktalı eğilme testleri altında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin süneklik oranları kırılma anındaki deformasyon kapasitesinin akma anındaki deformasyon kapasitesine oranlanması ile belirlenmiştir.

Akma noktası numunelerin akma noktasına ulaştığı ve eğilme dayanımı-deformasyon grafiğindeki çizginin yatay bir hal aldığı nokta olarak işaretlenmiştir. Numunelerin kırılma noktası ise maksimum yük taşıma kapasitesinin ani olarak %85'ine düştüğü nokta olarak işaretlenmiştir. Numunelerin başlangıç rijitlikleri elastik bölgedeki yük-orta açıklık eğimleri ile belirlenmiştir. Son olarak giriş numunelerin enerji yutma kapasitesi yük-deformasyon bölgesi altındaki alanın hesaplanması ile bulunmuştur (Şekil 4.25). Her bir numunenin yük-deplasman grafikleri belirlenerek mühendislik özelliklerindeki (akma dayanımı, eğilme dayanımı, süneklik oranı, başlangıç rijitlik ve enerji yutma kapasitesi) geri kazanımlar hesaplanmıştır. Bu testlerden hariç olarak numunelerin 28 günlük hasarsız haldeki aynı

özellikleri de ayırt edilmek üzere test edilmiştir. Testler her bir karışımdan 4'er kiriş adet numunenin ilgili kür yaşı için üretilmesi ile gerçekleşmiştir.



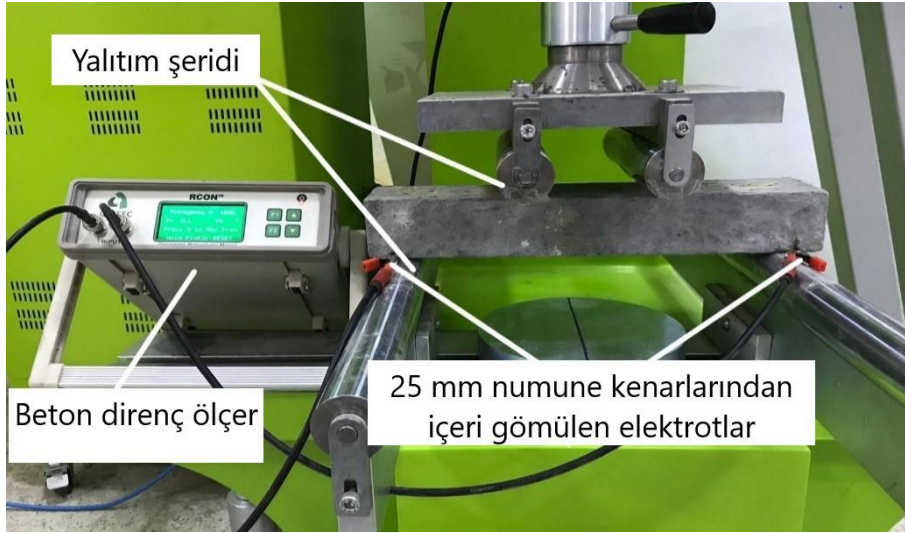
Şekil 4.25. Mekanik geri kazanımların (kendiliğinden iyileşme) hesaplanmasına kullanılan yük-deplasman grafiğindeki parametreler

Kiriş Numunelerin Kendiliğinden Algılama Testleri:

Daha önce açıklandığı üzere hem kendiliğinden algılama hem de kendiliğinden algılama özellikler elektriksel direnç testleri üzerinden hesaplanmıştır. Numunelerin kendiliğinden algılama özelliklerini incelemek için, 100 × 10 mm (boy × en) boyutlarında pirinç elektrotlar asal eksenin altında olacak şekilde (çekme bölgesinde) numunelerin içerisinde kenarlardan 25 mm içeride olacak yerleştirilmiştir. Böylece yükleme sırasında mesnet noktalarında elektrotla numune arasında herhangi bir ayrılma söz konusu olmamıştır. Deney sırasında yükleme noktalarına Şekil 4.26'da görüleceği üzere yalıtım uygulanmıştır. Elektriksel empedans değerleri aşağıdaki denklem (4.4) kullanılarak ED değerlerine çevrilmiş ve numunelerin kendiliğinden algılama özellikleri belirlenmiştir.

$$(ER[\rho]) = Z \times \cos(\theta) \times \frac{A}{L} \quad (4.4)$$

burada, ρ , Z , θ , A ve L sırasıyla; ED ($\Omega.m$), elektriksel empedans, faz açısı ($^\circ$), en kesit alanı (m^2) ve numune uzunluğuna (m [elektrotlar arası]) karşılık gelmektedir.



Şekil 4.26 Kendiliğinden algılama test konfigurasyonu

Mikro yapısal Araştırmalar:

Elektriksel ve mekanik testlerin yanında video mikroskop aracılığıyla daha detaylı mikro yapısal araştırmalar mikro çatlaktaki durumu kendiliğinden iyileşme/algılama için gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla ayrıca SEM görüntüleme yöntemiyle de testler yapılmıştır.

4.3.3 Araştırma Sonuçları

4.3.3.1 Geliştirilen Nano Modifiye ECC'lerin Eğilme Yükleri Altındaki Mekanik Özellikleri

ECC numunelerinin kendiliğinden iyileşme özelliklerinin mekanik açıdan incelenmesinin haricinde, tez kapsamında farklı nano malzemelerle modifiye edilmiş küp ve prizmatik ECC karışımlarının karakteristik olarak mekanik özellikleri bu kısımda sunulmuştur. Tez kapsamında bütün eğilmede çekme testleri ASTM C 469 deney standartları uyarınca gerçekleştirilmiş olup deneysel parametreler ile ilgili detaylar daha önceki bölümlerden takip edilebilir. Bilindiği üzere bir çimento esaslı malzemenin eğilmede çekme performansının tespit edilebilmesi için yapılan deneylerde hata payı en az olan test yöntemi tek eksenli gerilme deneyleridir. Ancak bu yöntem, test cihazları tarafından numunede ilave gerilme oluşmasına sebep olduğundan (Mehta ve Monteiro, 2006) nadiren tercih edilmektedir. Eğilme yükleri altında şekil değiştirme sertleşmesi gösteren ECC numunelerinin performansı doğrudan çekme performansının dolaylı bir ifadesidir. Daha önceki araştırma sonuçları eğilme kapasitesi ile elde edilen dayanım değerlerinin çekme kapasitesi değerleri ile lineere yarın bir korelasyon içerisinde olduğunu göstermiştir (Qian ve Li, 2008). Bu noktada,

tez kapsamında ECC karışımları ile ilgili yapılan bütün dört noktalı eğilmede çekme testlerinde; maksimum yük, orta açıklık eğilme kapasitesi, süneklik oranı, başlangıç rijitlik oranı, enerji yutma kapasitesi gibi parametreler üzerinden detaylı olarak mekanik özellikler incelenmiştir. Sözü edilen özellikler toplamda dört farklı ECC karışımı için 7, 28 ve 90 günlük deney sürelerinde belirlenmiştir. Deneyler sonucu ECC karışımlarına ait numunelerin 7,28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımları aşağıda Çizelge 4.8’de verilmiştir.

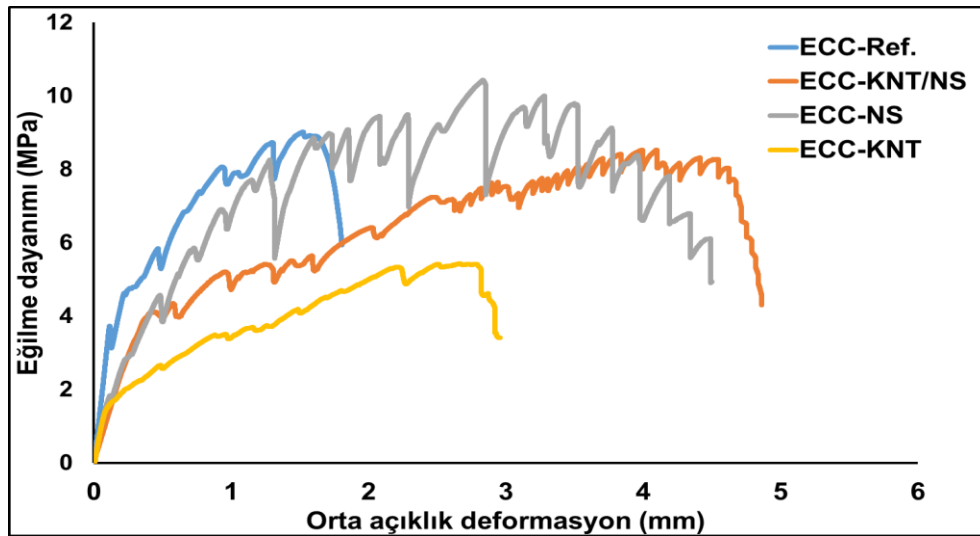
Çizelge 4.8 7, 28 ve 90 günlük ECC numunelerinin ortalama eğilme dayanımları (MPa)

Numune ismi	7.gün	28. gün	90.gün
ECC-Ref.	7,64	8,56	8,56
ECC-NS	8,36	8,40	11,50
ECC-KNT	6,20	10,67	12,98
ECC-KNT-NS	8,35	8,50	13,36

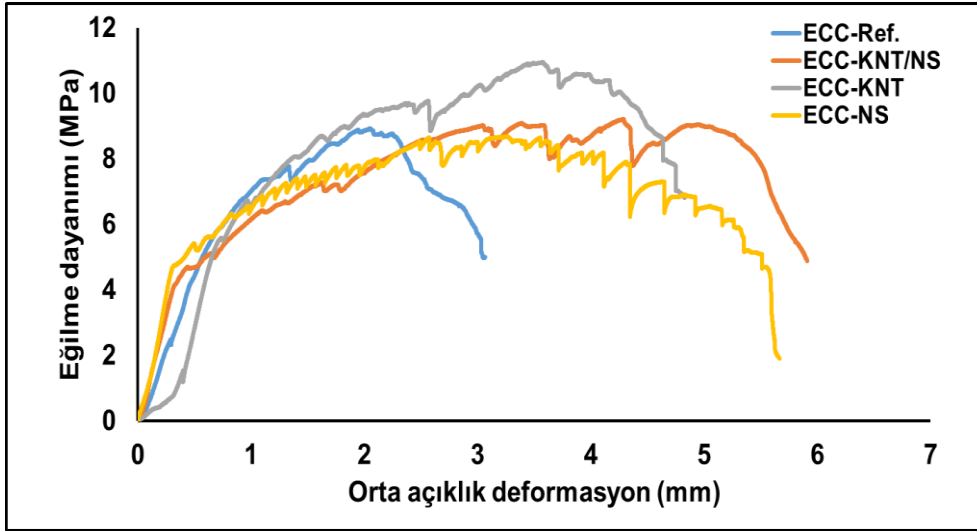
ECC karışımlarının eğilmede çekme dayanımları değerlendirildiğinde kontrol karışımına kıyasla, ECC-KNT/NS ve ECC-NS numuneleri %8,6 daha yüksek eğilme dayanımına sahip olmuştur. Referans numuneleri ile kıyaslandığında KNT içeren ECC karışımlarının daha az eğilme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Her ne kadar ilerleyen yaşlarda (28. ve 90. Gün) KNT içeren karışımların eğilme dayanımları referans numunelerinden daha fazla olsa da 7 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde referans numunelerine kıyasla %18 daha az eğilme dayanımına sahip olmasının nedeni erken yaşlardaki KNT karışımlarının daha az matris olgunluğuna sahip olması ile ilişkili olabilir. 7. günde suyun daha fazla matris bünyesinde bulunması nedeniyle lokal gerilmeleri daha fazla arttıran KNT tanecikleri dayanımın daha az elde edilmesine neden olmuş olabilir. Ancak ilerleyen yaşlarda bu durumun ortadan kalkması ve KNT taneciklerinin özellikle 7 ve 28 günler arasındaki hidrasyon reaksiyonlarını çekirdeklenme mekanizmaları ile arttırması KNT içeren karışımlar için ileri yaşlarda çok yüksek eğilme dayanımlarının elde edilmesini sağlamıştır. 7 günlük ECC-KNT/NS karışımları da KNT içermesine karşın, erken yaşlarda NS’nin üstün hidrasyonu hızlandırma yeteneği matrisi daha olgun duruma getirerek sadece KNT içeren karışımlarda meydana gelen 7. gündeki dayanımı azaltan mekanizmayı ötelemiştir. Bu sonuç, 7. günde ECC-NS ve ECC-KNT/NS karışımlarından elde edilen sırasıyla 8,36 ve 8,35 MPa’lık neredeyse aynı eğilme dayanımı değerleri ile Çizelge 4.8’den kolaylıkla takip edilebilir. Sözü edilen karışımlar referans numuneleri ile kıyaslandığında, daha önce belirtildiği gibi %8,6 daha yüksek eğilme dayanımı elde edildiği görülecektir. Bu durumun nedeni NS’in erken yaşlardan başlamak üzere hidrasyonu hızlandırma etkisi, eğilmede çekme dayanımının erken yaşta gelişiminde önemli rol oynamasıdır.

28 günlük eğilmede çekme dayanım değerlerine bakıldığında, 7 ve 28. günler arasında devam eden hidrasyon reaksiyonları sonunda, NS içeren ECC karışımları ile modifiye edilmemiş referans numuneler arasında eğilmede çekme dayanım farkı giderek azalarak aynı seviyeye gelmiştir. KNT içeren nano malzemeli karışımlar 28. günde değerlendirildiğinde, referans karışımların sonuçlarından %24,6 daha fazla eğilme dayanımına sahip olduğu görülecektir. KNT tanecikleri ile nano ölçekte modifiye edilen ECC karışımları, 28. günde kontrol ve diğer karışımlara kıyasla belirgin bir eğilme dayanımı artışına sahip olması oldukça dikkat çekicidir. Elde edilen sonuç 7. günden sonra 28. Güne kadar KNT'lerin yeni oluşan C-S-H jelleri için çekirdeklenme etkisi ile hızla ve yoğun bir mikro yapının oluşmasına yardımcı olduğunu göstermektedir. Hidrasyonu devam ettirecek daha fazla bölgenin KNT ile oluşturulması yüksek eğilme dayanımı elde edilmesini sağlamıştır. 90. gündeki bütün ECC karışımları değerlendirildiğinde ise tekil ve karma olarak nano modifiye edilen bütün ECC karışımlarının referans ECC karışımlarından daha yüksek eğilme dayanımı gösterdiği açıkça görülmektedir. Söz konusu iyileştirmeler referans karışımlarına kıyasla 90. günde, ECC-NS, ECC-KNT ve ECC-KNT-NS karışımları için sırasıyla %34,3 , %51,6 ve %56 olarak gerçekleşmiştir. Tez çalışması kapsamında kendiliğinden iyileşme performansından bağımsız olmak üzere gerçekleştirilen nano modifiye edilmiş ECC karışımları, basınç mukavemeti sonuçlarında olduğu gibi eğilmede çekme mukavemeti açısından da kontrol numunelerine kıyasla açıkça üstün mekanik özellikler göstermiştir. Basınç mukavemet değerlerinin de önemini teslim etmekle birlikte, özellikle doğrudan çekme mukavemetinin bir fonksiyonu olan eğilmede çekme mukavemetini nano malzemelerle bahsi edilen yüksek artışlarla iyileştirmek, betonun bilindik bir dezavantajı olan çekme yükleri altındaki zayıf davranışını daha yüksek bir performansa çıkarma anlamında oldukça değerlidir. Ancak, bu noktada kontrol numunelerinin de ECC karışımlarından oluştuğu ve dolayısıyla geleneksel betondan daha iyi eğilme dayanımına sahip olduğu ve karşılaştırmanın ECC matrisleri içerisinde yapıldığı unutulmamalıdır. Sonuçlara bakıldığında aynı ECC matrisleri ile sadece küçük ölçeklerde nano malzeme kullanımıyla (KNT için %0,55 ve NS için %3) ve etkin bir modifikasyon şartı ile (homojen dağılım) çok daha yüksek mukavemet değerleri elde etmenin mümkün olduğu doğrulanmıştır. Bilindiği gibi literatürde hidrasyon gelişimini tamamlamış çimento esaslı kompozitlerin mikro-yapısının numunelerin eğilme özelliklerini etkilediğine sıklıkla değinilmiştir. Buna ek olarak, PVA lifleri ve hidrate olmuş çimento ürünleri arasındaki ara yüz özellikleri, ECC'nin eğilme performansı üzerinde ciddi derecede rol oynamaktadır. Matris ile PVA lifleri arasındaki daha yoğun bir mikro yapının genellikle lif donatılı kompozitlerde daha yüksek eğilmede çekme dayanımı ile neticelendiği bilinmektedir (Bentur, 2000).

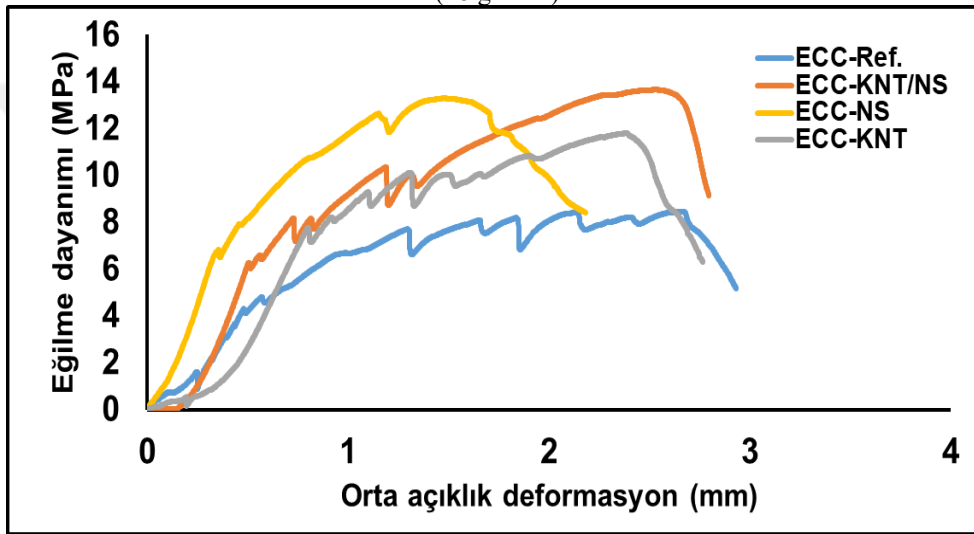
Daha önceki kısımlarda da açıklandığı üzere nano malzemelerin matrisin ve ara yüz de dahil olmak üzere her iki bölgede de daha kompakt bir alan oluşturduğu yüksek eğilme dayanımı sonuçlarından anlaşılmaktadır. Arayüz sürtünmesi PVA lifleri ve matris arasındaki sertlik ve yoğunlukla ilgilidir (Wang ve Li, 2007). Literatürdeki mevcut bulgular değerlendirildiğinde tez kapsamında nano modifikasyonla geliştirilen ECC karışımlarının eğilmede çekme dayanımlarının iyileşmesi daha yüksek sürtünme bağ kuvveti ile açıklanabilir. Bunun yanında ECC-NS ve ECC-KNT/NS numunelerinde erken yaşlardan itibaren görülen eğilmede çekme dayanımı artışı matriste hızlanan hidrasyonla ilişkilidir. İlerleyen yaşlarda ortamda devam eden puzolanik reaksiyonlar mevcut CH'nin (kalsiyum hidroksit) azalarak C-S-H jellerinin artmasına neden olmaktadır. Nano boyuttaki tanecikler ise çekirdeklenme etkisiyle arayüz bölgesinde oluşan sürtünme kuvvetine katkı sağlamaktadır. Özellikle NS ve KNT'yi beraber içeren ECC karışımlarda görülen bütün yaşlardaki artışın nedeni açıklanan bu durum ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Gelişen sürtünme bağ dayanımı daha yüksek seviyelerde eğilme yükleri taşınmasına imkan vermiştir. Ayrıca eğilme yükleri altında nano malzemelerle modifiye edilmiş ECC matrislerinin diğer temel mekanik özellikleri de yine bu kısımda sunulmuş ve açıklanmıştır. Tez çalışmasında üretilen farklı nano malzemelerle geliştirilmiş ECC numunelerine ait gerilme-orta açıklık sehim kapasitesi grafikleri sırasıyla 7, 28 ve 90 günler için Şekil 4.27-29 arasında gösterilmiştir.



Şekil 4.27. Nano malzemelerle geliştirilmiş ECC'lerin gerilme-orta açıklık sehim grafikleri (7 günlük)



Şekil 4.28. Nano malzemelerle geliştirilmiş ECC'lerin gerilme-orta açıklık sehim grafikleri (28 günlük)



Şekil 4.29 Nano malzemelerle geliştirilmiş ECC'lerin gerilme-orta açıklık sehim grafikleri (90 günlük)

Eğilme yükleri altında ECC numunelerinin orta açıklık sehim kapasiteleri 7 ve 28 günlük yaşlarda benzer seviyelerde olmasına karşın 90. günde nano malzemelerle hazırlanmış numuneler için sehim kapasiteleri azalmıştır. Bu sonuç zamana bağlı olarak arayüz bağ özellikleri ve matris kırılma tokluğunda meydana gelen değişikliklerle açıklanabilmektedir (Bentur, 2000; Wang ve Li, 2007). Hidratasyonun devam etmesi zamanla liflerin davranışında farklılaşma meydana getirebilmektedir. Daha ileri yaşlarda görülen (90. günde) yüksek sertlikteki hidrate olmuş matrisler lif yüzeylerinde bazı hasarlar meydana getirebilmektedir. Bu durumda lif yüzeylerinin kısmen bozularak eğilme yükleri altında erken yaşlara kıyasla daha farklı sehim kapasiteleri elde edilmektedir. Özellikle 28. gün ve sonraki yaşlarda lif donatılı çimento esaslı kompozitlerde söz konusu gelişim daha belirgin olarak görülmüştür. Bu davranış, Şekil 4.29'da 90 günlük ECC karışımlarında da gözlemlenmekte ve matrisler ilerleyen yaşlarda dayanım kazanmaya devam ettikçe ECC numunelerinin sehim kapasiteleri azalmaktadır. Nano malzemelerle modifiye edilmiş numunelerin temel mekanik özellikleri daha önce açıklanan parametrelere bağlı olarak hazırlanmış ve Çizelge 4.9'da sunulmuştur.

Çizelge 4.9 Nano malzemelerle hazırlanmış farklı ECC karışımlarının 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda temel mekanik özellikleri

7.gün

Karışım adı	Akma noktası		Kırılma noktası		Süneklik oranı	Başlangıç rijitlik (kN/mm)	Enerji yutma kapasitesi (kN.mm)
	Yük (kN)	Deplasman (mm)	Yük (kN)	Deplasman (mm)			
<i>ECC-Ref.</i>	2,33	0,17	4,62	1,74	10,23	13,70	7,19
<i>ECC-NS</i>	2,68	0,45	4,40	2,85	6,33	5,96	12,12
<i>ECC-KNT</i>	1,23	0,25	3,26	2,50	5,00	4,92	8,44
<i>ECC-KNT/NS</i>	2,45	0,46	4,39	4,69	10,19	5,32	18,20

28.gün

Karışım adı	Akma noktası		Kırılma noktası		Süneklik oranı	Başlangıç rijitlik (kN/mm)	Enerji yutma kapasitesi (kN.mm)
	Yük (kN)	Deplasman (mm)	Yük (kN)	Deplasman (mm)			
<i>ECC-Ref.</i>	3,39	0,66	4,50	2,51	3,80	5,13	10,03
<i>ECC-NS</i>	3,27	0,57	4,42	4,65	8,16	5,73	20,11
<i>ECC-KNT</i>	3,89	0,90	5,60	4,45	4,95	4,32	21,78
<i>ECC-KNT/NS</i>	2,48	0,32	4,41	5,56	17,375	7,75	25,24

90.gün

Karışım adı	Akma noktası		Kırılma noktası		Süneklik oranı	Başlangıç rijitlik (kN/mm)	Enerji yutma kapasitesi (kN.mm)
	Yük (kN)	Deplasman (mm)	Yük (kN)	Deplasman (mm)			
<i>ECC-Ref.</i>	2,51	0,47	4,50	2,51	5,34	5,34	10,24
<i>ECC-NS</i>	4,83	0,48	6,83	1,84	3,83	10,06	10,83
<i>ECC-KNT</i>	4,74	0,75	6,05	2,52	3,36	6,32	11,74
<i>ECC-KNT/NS</i>	3,69	0,52	7,03	2,72	5,23	7,09	15,27

Çizelge 4.9 incelendiğinde, hibrit olarak (KNT ve NS) nano malzemelerin modifiye edilmesi ve ECC karışımlarında kullanılması bütün yaşlarda (7. 28. ve 90. gün) enerji yutma kapasitelerini (kN.mm) belirgin biçimde iyileştirmiştir. Daha önce bahsedildiği ECC karışımlarının enerji yutma kapasiteleri kırılma noktasına kadar devam eden (maksimum yükün %85'i) yük-deplasman grafiğinin altındaki toplam alan olarak belirlenmiştir. Bu noktada prizmatik numunelerin maksimum taşıma yükleri ile birlikte gösterdiği sünek davranışın da özellikle enerji yutma kapasitesini arttırdığını belirtmek gerekmektedir. ECC-KNT/NS numunelerine bakıldığında kontrol numunelerine kıyasla 7, 28 ve 90 günlerde sırasıyla enerji yutma kapasitesi %153,1 %151,6 ve %49,12 artış göstermiştir. Özellikle 7 ve 28 günlük yaşlarda 90 günlük yaşlara kıyasla enerji yutma kapasitelerinin çok daha yüksek olması erken yaşlardaki yüksek orta açıklık sehim kapasitesi ile ilişkili olduğu Çizelge 4.9'a bakılarak rahatlıkla söylenebilir. Her ne kadar 90. günde bütün ECC karışımlarından daha yüksek yük seviyelerinde kırılma kaydedilse de, daha düşük sehim kapasitesi artan matris tokluğunda ve zamana bağlı arayüz özelliklerinin değişimi nedeniyle meydana geldiği düşünülmektedir. Bu nedenle 7. ve 28. günlerdeki ECC-KNT-NS numunelerinin enerji yutma kapasitesi 90 günlük ECC-KNT/NS numunelerine kıyasla daha yüksek olsa da, 90. günde farklı nano malzemelerle modifiye edilmiş ECC karışımlarının %50'ye yakın artışla daha fazla eğilme yüklerini tolere ettiği unutulmamalıdır. Ayrıca söz konusu iyileşmeler sadece hibrit modifiye edilmiş ECC karışımlarında değil, tekil olarak nano malzemelerle modifiye edilmiş ECC karışımlar (ECC-NS ve ECC-KNT) için de geçerlidir. Çizelge 4.9'a bakıldığında, ECC-NS numuneleri için ECC-Ref. numunelerine kıyasla 7, 28 ve 90. günlerde enerji yutma kapasiteleri sırasıyla %68,56, %100,50 ve %5,76 artışlar olarak kaydedilmiştir. Aynı durum ECC-KNT numuneleri için yine 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda sırasıyla %17,6 , %117,0 ve %14,6 artışlarda gerçekleşmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde nano malzemelerle hazırlanmış üç karışım için kontrol karışımlara kıyasla bütün yaşlarda eğilme yükleri altında enerji yutma kapasitelerinin geliştirildiği yorumu yapılabilir.

Önceki kısımlarda belirtildiği üzere farklı nano malzemelerin kombine edilerek kullanılması, tek türde kullanılan nano malzeme ile takviye edilmiş karışımlara kıyasla daha geliştirilmiş/iyileştirilmiş arayüz özelliklerinin elde edildiğini göstermektedir. Süneklilik ve orta açıklık sehim kapasitesi sonuçlarına ilave olarak, farklı ECC karışımlarının başlangıç rijitlikleri yine Çizelge 4.9'dan görülebilmektedir. Özellikle 7. günlük ECC karışımlarına bakıldığında nano malzeme içeren her üç karışım içinde daha düşük rijitlik değeri elde edildiği görülmektedir. Bu durumun nedeni referans karışımlara kıyasla nano malzeme ile modifiye edilmiş ECC numunelerinin akma noktasındaki orta açıklık sehim kapasitelerinin

daha yüksek olmasıdır. Bu değerler referans ECC karışımlarında 0,17 mm iken, ECC-NS, ECC-KNT ve ECC-KNT/NS karışımları için sırasıyla 0,45 mm, 0,25 mm ve 0,46 mm'dir. Ancak bu durum Çizelge 4.9'dan da görüleceği üzere 28 ve 90 günlük yaşlarda aynı şekilde gelişmemiştir. ECC-KNT numuneleri hariç özellikle NS içeren her iki ECC karışımı (ECC-NS ve ECC-KNT) akma noktasında referans karışımlara kıyasla daha düşük sehim değeri göstermiştir. Bu durum akma anındaki yük seviyesinin de etkisiyle kontrol numunelerine kıyasla 28. ve 90. günlerde NS içeren ECC karışımlarının daha yüksek başlangıç rijitlik değerine ulaşmasına neden olmuştur. ECC-NS numuneleri için 28 ve 90 günlük yaşlarda rijitlik değerleri kontrol numunelerine kıyasla sırasıyla %11,7 ve %88,4 olarak gerçekleşmiştir. Aynı yaşlarda ECC-KNT-NS numuneleri için kontrol numunelerine kıyasla rijitlik değerlerinde %51,0 ve %32,7'lik artışlar elde edilmiştir. Sadece KNT içeren ECC karışımlarına bakıldığında her ne kadar 90 günlük yaşlarda kontrol numunelerine kıyasla az da olsa bir artış olsa da, 7 ve 28 günlük yaşlarda ECC-KNT karışımları akma anında daha az rijitlik değerine sahip olmuştur.

28 günlük ECC-KNT rijitlik değerleri incelendiğinde, en fazla akma yüküne sahip olan karışımın KNT ile hazırlanan numuneler olmasına karşın bu noktada yüksek sehim kapasitesi göstermesi daha düşük rijitlik değerine sahip olmasına neden olmuştur. KNT ile hazırlanan ECC karışımlarının henüz akma noktasındaki yüklerden itibaren yüksek sehim yapma kapasitesi KNT'lerin mikro/nano çatlak ve boşlukları köprülleme özelliğinden kaynaklanmaktadır (Arnon ve diğerleri, 2010). Ayrıca bu özelliğin, fiziksel olarak KNT'lerin hidratasyon ürünleri arasındaki boşlukların doldurulması yoluyla gerçekleştirildiği bildirilmektedir (Arnon ve diğerleri, 2010). Benzer sonuç literatürdeki diğer çalışmalarda da (Kontsta-Gdoustos ve diğerleri, 2013) KNT'lerin jel boşluklarını azalttığı yönündeki bulgularla doğrulanabilir. KNT'lerin mikro ölçekte kapiler boşlukların köprülenerek sehim kapasitesinin artırılmasına ek olarak, en yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olduğu özellikle 28. günde, hem akma hem de kırılma noktasındaki yük seviyelerinden (sırasıyla 3,89 kN ve 5,60 kN) anlaşılabilir. Aynı şekilde 90. günde de kontrol numunelerine kıyasla daha yüksek yük taşıma kapasitesine eriştiği gözlemlenebilir.

Çizelge 4.9'da göz önüne alınan akma noktasındaki ECC-KNT karışımı için sehim değeri 0,90 mm iken, ECC-Ref karışımı için akma noktasındaki sehim değeri 0,66 mm'dir. Kırılma noktasındaki deplasman değerleri ise ECC-KNT ve ECC-Ref numuneleri için sırasıyla 4,45 mm ve 2,51 mm olarak kaydedilmiş ve Çizelge 4.9'da görüleceği üzere ECC-KNT numunelerinin enerji yutma kapasitesi iki katından fazla bir değere erişmiştir. Bu bölümdeki mekanik deneysel çalışmaların en önemli yanlarından biri eğilmede çekme dayanımı ve eğilme yükleri altındaki numunelerin sehim kapasiteleridir. Erken ve ileri yaşlarda yapılan eğilme parametreleri ölçümlerinde KNT ve NS ile modifiye edilmiş ECC

karışımlarında yukarıda belirtilen gelişmeler kaydedilmiştir. Bu gelişmelerin temel nedeni arayüz sürtünme kuvvetlerinin kritik bir değerde liflerin çekilmesini kolaylaştırmaması ve liflerin kontrol karışımlarına kıyasla kopmaması ile açıklanabilir. Aksi takdirde bilindiği üzere kırılma daha kolay gerçekleşecektir. KNT ve NS ile modifiye edilen ECC karışımlarında bu noktada arayüz sürtünmesindeki artışın optimum olması PVA liflerinin matrise yaptığı mekanik katkının artması anlamına gelmektedir. Bu sonuç literatürde konu ile ilgili yapılan diğer çalışmalarla benzer nitelik taşımaktadır (Redon ve diğerleri, 2001). Farklı yaşlar için verilen ECC karışımlarının tamamının şekil değiştirme sertleşmesi gösterdiği görülmektedir. Arayüz bağ dayanımının düşük olması, daha düşük limitte daha fazla lifin koparak eğilmede çekme mukavemetinin az olmasına neden olmaktadır. Daha iyi bir arayüz için, arayüz sürtünme dayanımı artışı, liflerin kayma dayanımı davranışını geliştirirken, liflerin tamamı çekilmeden önce kopan liflerin oranını yükseltmektedir. Sözü edilen durumda kompozitler şekil değiştirme sertleşmesi göstermektedir. Bu davranış, sürtünme bağ dayanımının optimum değeri, liflerin en yüksek oranda çekildiği ve en düşük oranda da koptuğu kısaca kompozitlerin hem çekme dayanımının hem de sünekliğini geliştirdiği denge durumunu sağlamaktadır. Sonuç olarak, literatürdeki mevcut bilgi birikimine ilaveten, tez çalışmasında nano boyutlu taneciklerin dahil edildiği ECC karışımlarında, kontrol karışımına kıyasla PVA lifleri ve bağlayıcı matris arasında yüksek bir sürtünme bağ dayanımı elde edilmekle birlikte, kompozitlerin hem eğilmede çekme dayanımı hem de sünekliği geliştirilmiştir.

4.3.3.2 ED Testlerine göre Numunelerin Kendiliğinden İyileşmesi

Hasarsız ve hasarlı silindir numunelerin elektriksel direnç sonuçları Çizelge 4.10'da verilmiştir. Her bir değer hasarlı numuneler için 4'er hasarsız numuneler için 2'şer numenin ortalaması olarak dikkate alınmıştır. ED sonuçlarındaki standart hata payı %5'ten daha az olup son derece düşüktür.

Çizelge 4.10 Numunelerin ortalama ED değerleri (birimler k Ω cinsindedir)

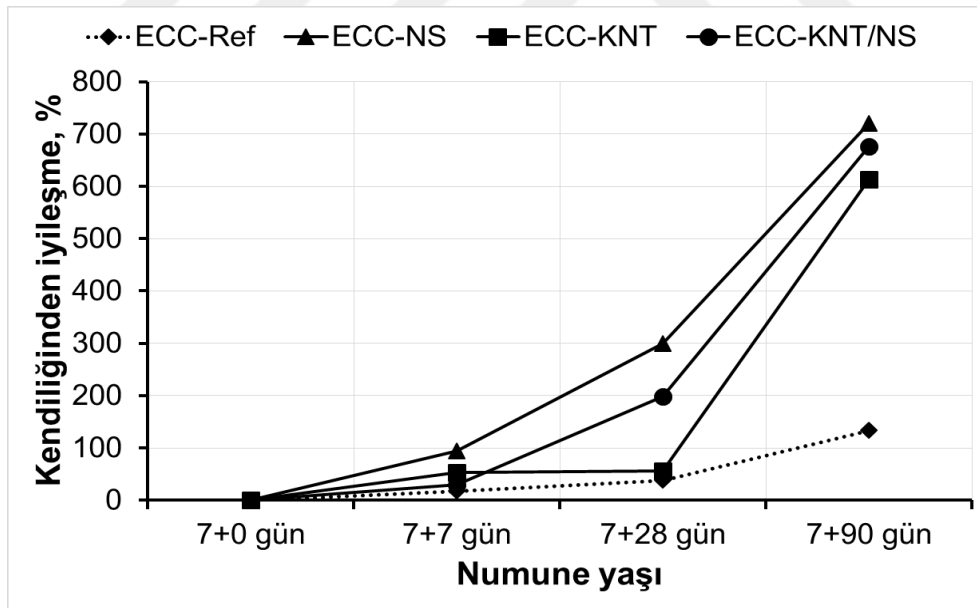
Karışım adı		#Numune adedi	7+0 day	7+7 day	7+28 day	7+90 day
ECC-Ref.	Hasarsız	2	7.8	44	55	72.5
ECC-NS	Hasarsız	2	12.4	50	65	93
ECC-KNT	Hasarsız	2	2.4	17.5	30	46.5
ECC-KNT/NS	Hasarsız	2	10.2	30	70	113.5
ECC-Ref.	Hasarlı	4	11.9	69.2	88.5	126.5
ECC-NS	Hasarlı	4	16	79.5	131.7	235.2
ECC-KNT	Hasarlı	4	5.3	41.5	69.2	135.2
ECC-KNT/NS	Hasarlı	4	12.5	46.7	110.5	223.7

Çimento esaslı malzemelerin ED değerlerindeki değişimler daha çok boşluk yapısı, boşluk solüsyonu kimyası ve boşluk kıvrımlılığı ile yakından ilişkilidir (Spragg ve diğerleri, 2013). Bu nedenle farklı numunelerin ED sonuçları bu kriterler üzerinden belirlenmiş ve tartışılmıştır. Çizelge 4.10'da gösterildiği üzere silindir numunelerin ED değerlerinde zamanla Karışım tipinden bağımsız olmak üzere artış gözlemlenmiştir. Bu durum devam eden hidrasyon ve puzolanik reaksiyonlarla açıklanabilir. Devam eden hidrasyon ve puzolanik reaksiyonlar Karışım içerisinde iletken iyonik parçacıkların (alkaliler) miktarını azaltarak daha az iletken kıvrımlara neden olabilirler (Yıldırım ve diğerleri, 2015). Ancak, ED sonuçları karışım kompozisyonuna büyük ölçüde bağlıdır. 7. günlük kür süresinde hasarsız ECC-NS numunelerinde daha yüksek ED değerleri kaydedilmiştir. ECC-NS karışımını sırasıyla ECC-NS/KNT, ECC-Ctr ve ECC-KNT karışımları takip etmiştir. ECC-KNT/NS numunelerinin ECC-Ref numunelerine karşı daha yüksek ED değerleri sonuçlar açısından şaşırtıcı olmuştur. Bunun nedeni KNT taneciklerinin iletken yollar yaratarak numuneler içerisinde elektriksel iletkenlik derecesini arttırmasıdır. Ancak elde edilen sonuç NS varlığında gerçekleşmemiştir. Elde edilen sonuçların muhtemel nedeni, ECC karışımının boşluk suyundaki iyonik içerikle yakından ilişkilidir. Karışım suyu ile birleştiğinde bağlayıcı malzemeler yüksek miktarda ortama Na^+ , K^+ , OH^- , Ca^{2+} ve SO_4^{2-} iyonları verirler. Bunlar içerisinde Ca^{2+} ve SO_4^{2-} önemli derecede erken hidrasyonu düşürürler. Portlandit iyonlarının (kalsiyum hidroksit [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] NS tanecikleri tarafından daha hızlı tüketilmesi boşluk suyu içerisindeki elektriksel iletkenlik derecesini azaltarak muhtemel KNT kritik kullanım miktarını değiştirmiş olabilir. Ancak bu durum 7+7 günde geçerli olmamıştır (ECC-KNT [en az ED] ve ECC-NS [en çok ED] ve sonuçlar beklenen şekilde gerçekleşmiştir. Adamson'a göre (Adamson, 1973) Na^+ , K^+ , OH^- iyonlarının elektriksel iletkenlik değerleri oda sıcaklığındaki bir sıvıda yaklaşık olarak sırasıyla 50.1, 73.5 and 198 $\text{cm}^2 \cdot \text{equiv}^{-1} \cdot \Omega^{-1}$ mertebesindedir. H_2SiO_2 'dan ayrılan reaktif NS parçacıkları çok daha fazla Ca^{2+} iyonunu tükettikleri için 14. Güne kadar ikincil C-S-H jelleri oluşumunu arttırmışlardır (7+7 gün). Bu durum boşluk yapısındaki OH^- iyonlarının daha fazla kalmasına neden olarak ECC-KNT/NS numuneleri için (30 k Ω) ECC-Ref. numunelerine kıyasla (44 k Ω) daha düşük ED değerlerine yol açmış olabilir.

Daha ileri yaşlara bakıldığında ise (7+28 ve 7+90 gün) ECC-KNT/NS numunelerinin ED değerlerinin ECC-NS numunelerinkinden daha yüksek olduğu görülecektir. Bunun yanında ECC-KNT numuneleri en düşük ED değerlerine sahip olmayı devam ettirmiştir. NS ile KNT beraber kullanıldığında (ECC-KNT/NS) ECC-KNT numunelerine kıyasla keskin ED artışları gözlemlenmiştir. Öte yandan, ECC-KNT/NS karışımlarında NS kullanımı daha yoğun/sıkı C-S-H jeli oluşumuna sebep olarak KNT parçacıklarının etrafını sarmış ve elektriksel iletken yolu karışım içerisinde azaltmış olabilir. Her ne kadar bu durum daha üstün mekanik özellikleri sağlama potansiyeli taşısa da bu noktada elektriksel iletkenliği karışım içerisinde

kolaylaştırmamıştır. Elektriksel iletkenlik derecelerinin en yükseği ECC-KNT karışımına ait olmuştur ve bu karışım sırasıyla 7+0, 7+7, 7+28, 7+90 günlük yaşlarda ECC-Ref karışımına kıyasla %225, %151,4, %83,3 ve %55,9 daha yüksek iletkenlik derecesine sahiptir. Bu sonuç KNT taneciklerinin yüksek iletkenlik seviyeleri ve ECC karışımları içerisinde muhtemel birbirlerine olan temasları ile sürekli bir iletkenlik yolu sağlaması ile ilişkili olabilir (Al-Dahawi, 2017).

Hasarsız numunelere benzer şekilde, kür yaşı ilerledikçe hasarlı numunelerin ED değerleri artmıştır. Ancak, hasarlı ve hasarsız numunelerin ED artışları içerisinde özellikle nano malzeme içeren karışımlar özelinde farklılıklar vardır. Örneğin hasarsız numunelerde, ED artışları daha çok matrisin olgunlaşmasına bağlı olarak artan kür yaşı ile ilgilidir. Hasarlı numuneler için, matris olgunlaşması benzerlik taşısa da, çatlakların devam eden hidrasyon ve puzolanik reaksiyonlar sonucu kapanması mümkün olabilmektedir. Bu nedenle, karşılaştırma kendiliğinden iyileşmenin tam anlamıyla yapılabilmesi için hasarsız numunelerin ED sonuçları ile hasarlı numunelerin sonuçları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Aşağıda verilen Şekil 4.30'da numunelerin ED değerleri üzerinden kendiliğinden iyileşme oranları gösterilmiştir.



Şekil 4.30 ED değerleri üzerinden farklı ECC karışımlarının kendiliğinden iyileşme oranları

Şekil 4.30'da gösterildiği üzere, ECC karışımları kendiliğinden iyileşme etkinliği açısından farklı davranışlar göstermiştir. Ancak, yine de nano malzeme içeren bütün ECC karışımları dikkate alındığında referans karışımlarına kıyasla daha yüksek bir kendiliğinden iyileşme yeteneği görülmüştür. 7 günlük kür süresinin ardından (7+7 gün) ECC-NS, ECC-KNT ve ECC-KNT/NS numunelerinin kontrol karışımlarına kıyasla ED artışları sırasıyla %76,6, %36,4 ve %13,1 daha yüksek gerçekleşmiştir. 90 günlük kür süresinden sonra ise bu artış nano malzeme içeren karışımlar için aynı sırasıyla %586,5, %479,5 ve %543,5 olarak

gerçekleşmiştir. Nano malzemelerin karışımlara ilave edilmesi Çatlak içerisinde zamanla çekirdeklenme bölgeleri yaratarak kendiliğinden iyileşme ürünleri olan CaCO_3 ve C-S-H jellerinin oluşma hızını arttırmış olabilir (Yeşilmen, 2015).

4.3.3.3 Çatlakların Kendiliğinden İyileşmesi

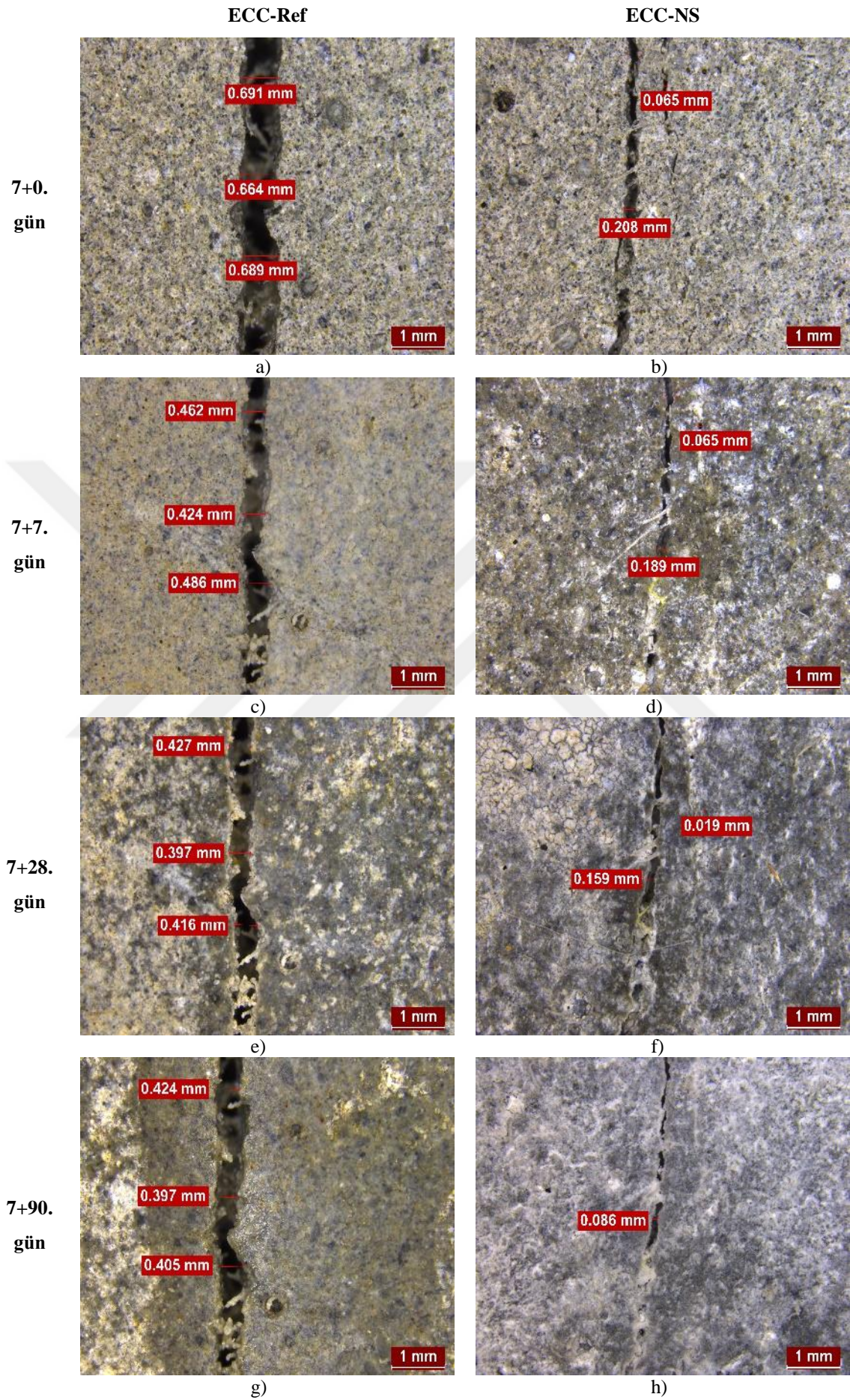
Hasar verilmiş numunelere bakıldığında kendiliğinden iyileşmiş çatlaklara ait ölçümler Çizelge 4.11’de verilmiştir. Çizelge 4.11’de görüldüğü gibi numunelerin genelinin çatlak genişlikleri standart M45-ECC karışımından (%2 PVA lif içeren) daha geniştir (Şahmaran ve Li, 2008). ECC karışımlarında %1,1 oranında PVA lifi kullanılması bu anlamda tez kapsamında amaçlanan daha geniş çatlakların elde edilmesine yardımcı olmuştur. Referans numuneleri (281,8 μm) nano malzeme içeren numunelere göre (sırasıyla ECC-NS, ECC-KNT ve ECC-KNT/NS numuneleri için 89 μm , 173 μm ve 168 μm) ortalama çatlak açıklıkları daha geniş elde edilmiştir. Bu sonuç nano malzeme içeren karışımlara kıyasla ECC-Ref numunelerinin daha az çatlak köprüleme yeteneği ile açıklanabilir.

Çizelge 4.11 Numunelere hasar verilmesinin ardından elde edilen çatlak karakteristikleri

Karışım adı	Numune sırası	7 gün			14 gün			35 gün			97 gün		
		ÇG µm	TÇG µm	# çatlak sayısı	ÇG µm	TÇG µm	# çatlak sayısı	ÇG µm	TÇG µm	# çatlak sayısı	ÇG µm	TÇG µm	# çatlak sayısı
ECC-Ref	1	236	236	1	217	217	1	200	200	1	172	172	1
	2	137, 71	208	2	112, 61	173	2	100, 51	151	2	41, 17	58	2
	3	691	691	1	462	462	1	427	427	1	424	424	1
	4	508-48	556	2	320	320	1	300	300	1	300	300	1
ECC-NS	1	208, 65	273	2	189, 65	254	2	159-19	178	2	86	86	1
	2	72	72	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	73	73	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	55, 125, 30	210	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ECC-KNT	1	93, 236	329	2	64, 85	149	2	30, 35	65	2	12	12	1
	2	605, 294, 43	942	3	367, 108	475	2	339-108	447	2	337, 99	436	2
	3	100, 93	193	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	73, 112, 86	271	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ECC-NS/KNT	1	19, 40, 130, 107	296	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	59-70	129	2	35,38	73	2	27, 38	65	-	-	-	-
	3	810	810	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	22, 89	111	2	52	52	1	48	48	-	-	-	-

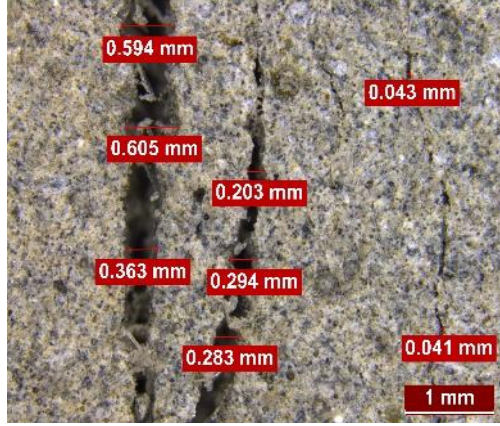
ÇG: Çatlak Genişliği, TÇG: Toplam Çatlak Genişliği

Şekil 4.31’de Çizelge 4.11’de verilen numunelerin çatlak genişliklerine ait görüntüler verilmiştir. Şekil 4.31 her bir karışımdan elde edilen en geniş çatlak görüntüsü göstermektedir. Bu tez çalışmasının ana amaçlarından biri geniş çatlak açıklıklarının kendiliğinden iyileşmesidir. Buna bağlı olarak Şekil 4.31’de farklı karışımların en geniş çatlak genişliğinde kendiliğinden iyileşme kapasiteleri görülmektedir. Buna göre belirli bir süresinin ardından ECC numunelerin kaydedilen en geniş çatlak açıklıkları (691 μm -ECC-Ref., 208 μm -ECC-NS, 605 μm -ECC-KNT ve 810 μm -ECC-KNT/NS) kısmi ya da tam anlamıyla kendiliğinden iyileşme göstermiştir. İlk olarak bakıldığında ECC-Ref numunelerinin en geniş çatlak genişliği açısından diğer karışımlara kıyasla daha düşük performans gösterdiği anlaşılmaktadır. Örneğin ECC-Ref numunesine ait çatlak genişliği (691 μm) 90 günün ardından sadece 424 μm ’ye düşmüştür. ECC-NS karışımına bakıldığında en geniş çatlak açıklığını 208 μm ’den (7+0 gün) 86 μm ’ye (7+90 gün) düşürmüştür. ECC-KNT karışımı ise 605 μm ’den (7+0 gün) 372 μm ’ye (7+90 gün) çatlak genişliğini azaltmıştır. Öte yandan, sadece 7 günlük kür süresinin ardından, NS ve KNT nano malzemelerinin kombine edilerek hazırlanmasıyla üretilen ECC-KNT/NS karışımı en geniş çatlak açıklığının (810 μm) tamamını iyileştirmiştir. Bu sonuç, otojen kendiliğinden iyileşme ile ilgili olarak bu kadar geniş bir çatlak seviyesinin kendi kendine kapatılması açısından literatürde daha önce rastlanılmamıştır. Ancak önemle belirtmek gerekirken ECC-KNT/NS numunesine erken yaşta (7.günde) hasar verilmiştir ve bu nedenle daha ileri yaşlardaki hasar durumlarındaki kendiliğinden iyileşme potansiyeli bir başka araştırmanın konusu olmalıdır. Çünkü numunenin uzun dönemdeki nem durumu ve portlandit miktarının değişeceği kaçınılmazdır (Yıldırım ve diğerleri, 2018). Şekil 4.32’de verilen görüntülerde aynı şekilde Çizelge 4.11’de verilen numunelere ait çatlakların kendiliğinden iyileşme görüntüleridir. Şekil 4.32 de net olarak görüleceği üzeri dar çatlak genişliklerinin nano malzemelerin varlığında ECC-Ref numunelerine kıyasla çok daha kısa sürede tam olarak kapanması mümkündür. Bu noktada meydana gelen gelişme bir önceki kısımda kendiliğinden iyileşme ile ilgili aktarılan nedenlerle aynıdır. Dikkat edilmelidir ki dar çatlak genişliği o çatlak dolduracak kendiliğinden iyileşme ürünlerinin miktarı nedeniyle otojen iyileşme için çok önemlidir.

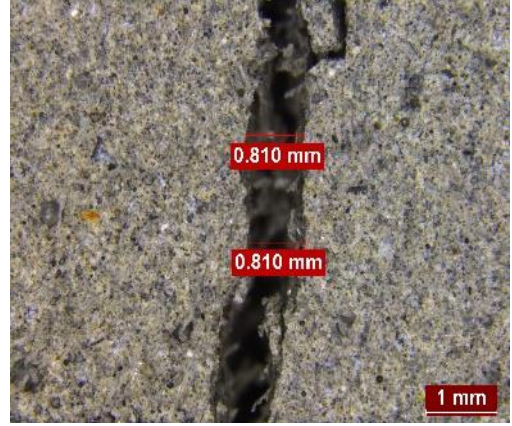


ECC-KNT

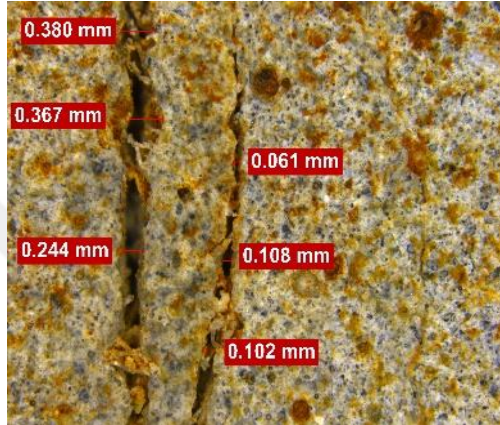
ECC-NS/KNT

7+0.
gün

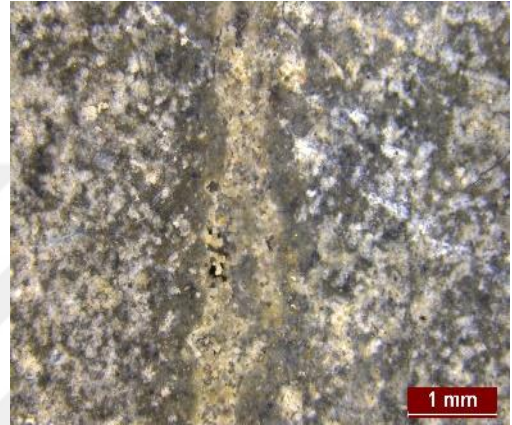
i)



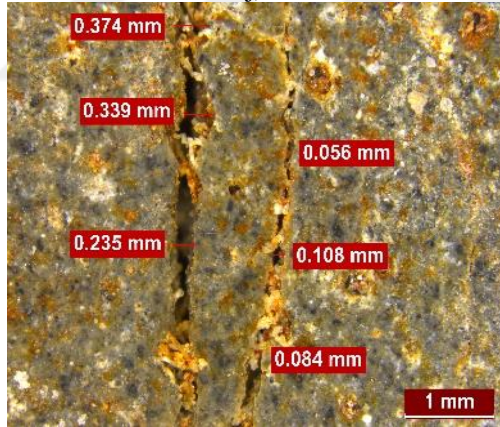
i)

7+7.
gün

j)



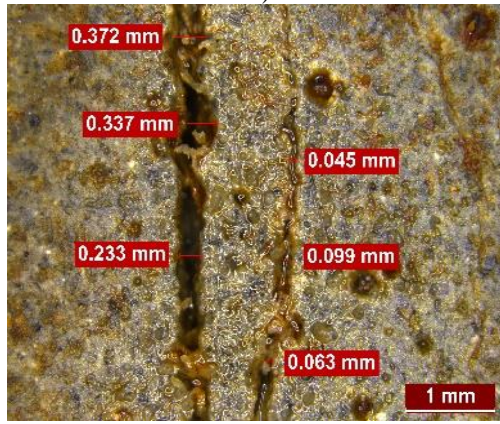
k)

7+28.
gün

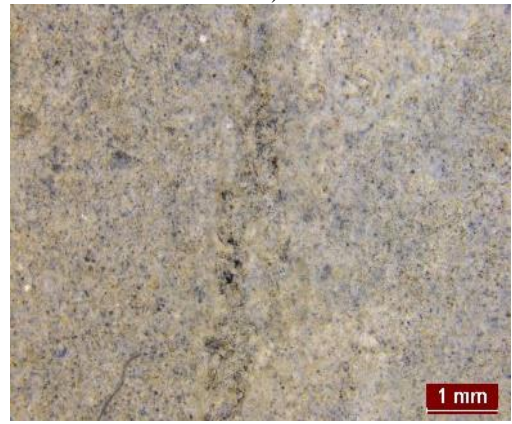
l)



m)

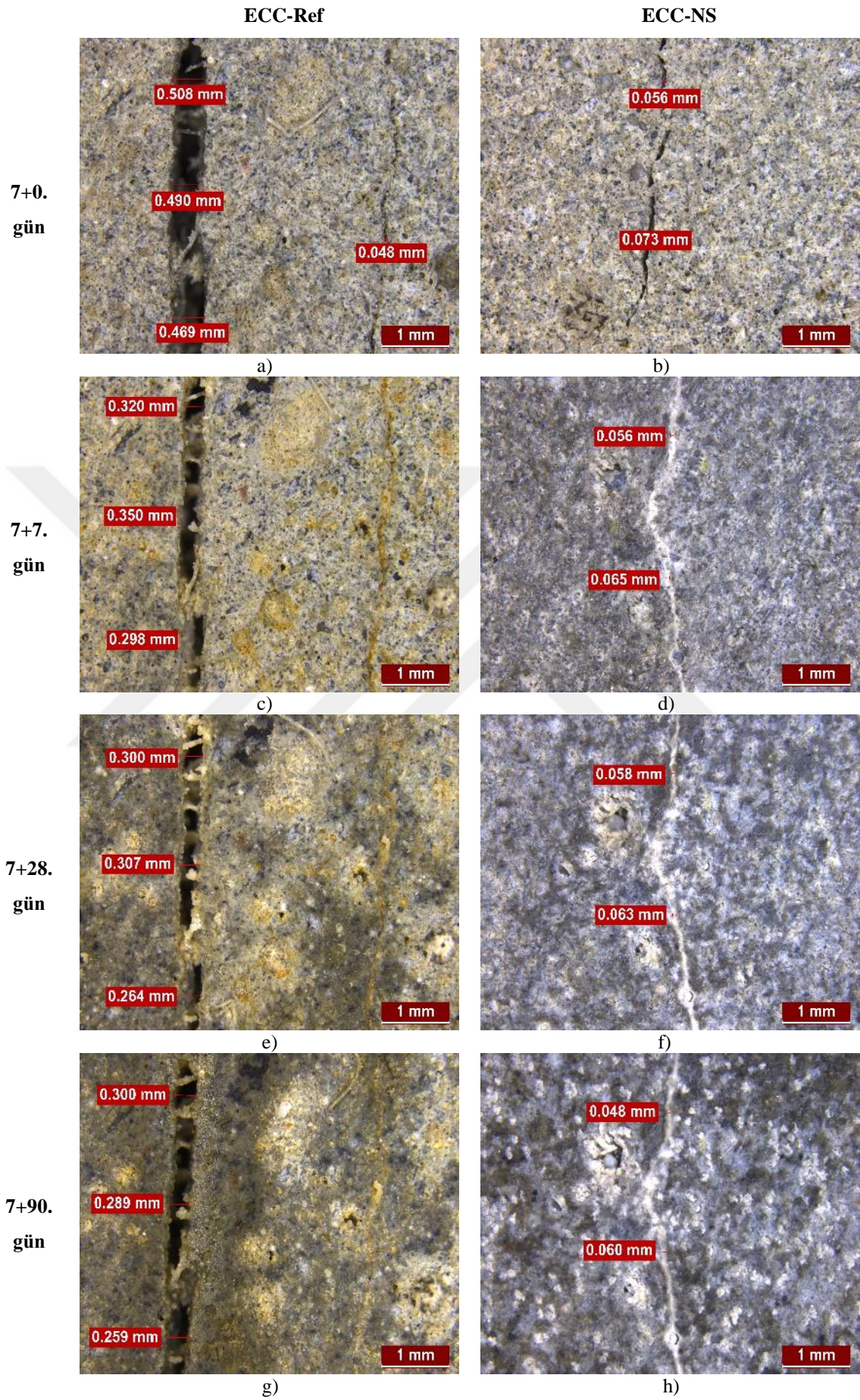
7+90.
gün

n)



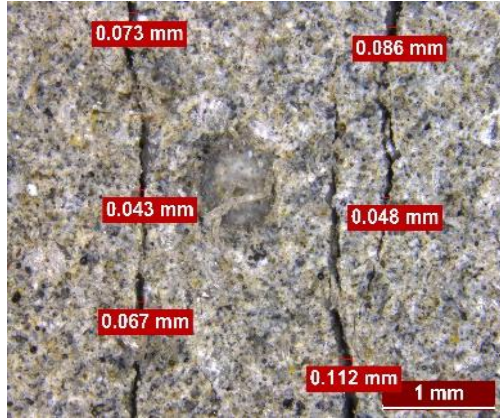
o)

Şekil 4.31 ECC karışımlarına ait numunelerden en geniş çatlak genişlikleri ve kendiliğinden iyileşme kapasitesi (ECC-Ref [691 µm], ECC-NS [208 µm], ECC-KNT [605 µm], ECC-KNT/NS [810 µm])

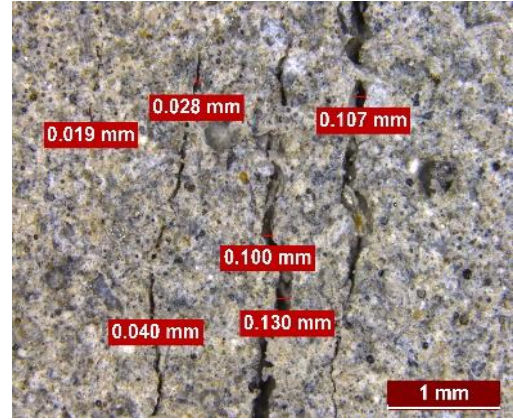


ECC-KNT

ECC-NS/KNT

7+0.
gün

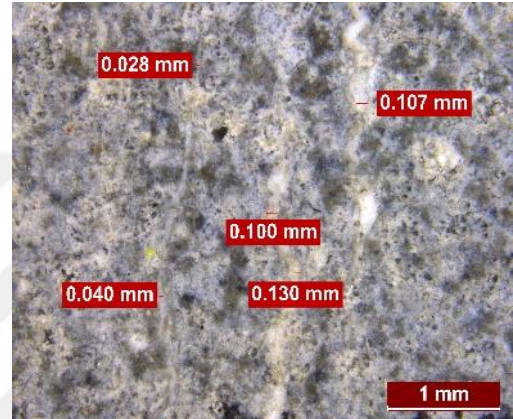
1)



i)

7+7.
gün

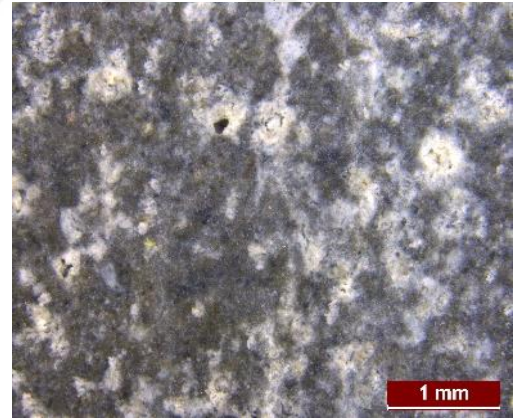
j)



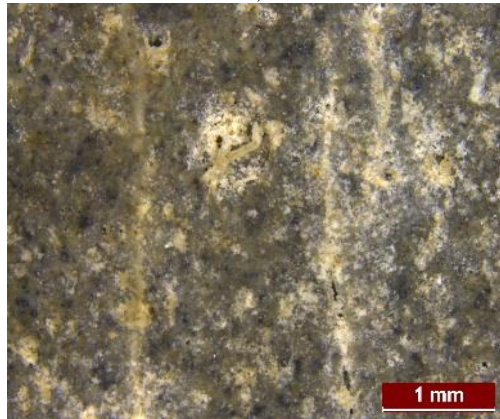
k)

7+28.
gün

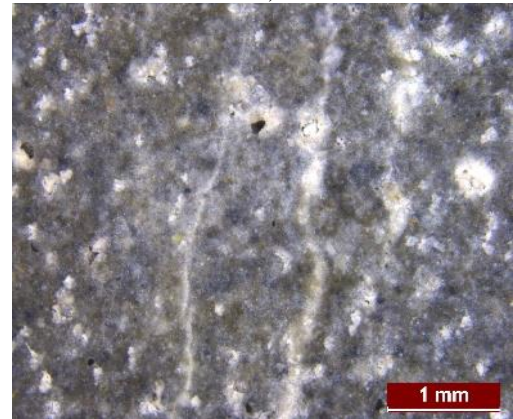
l)



m)

7+90.
gün

n)

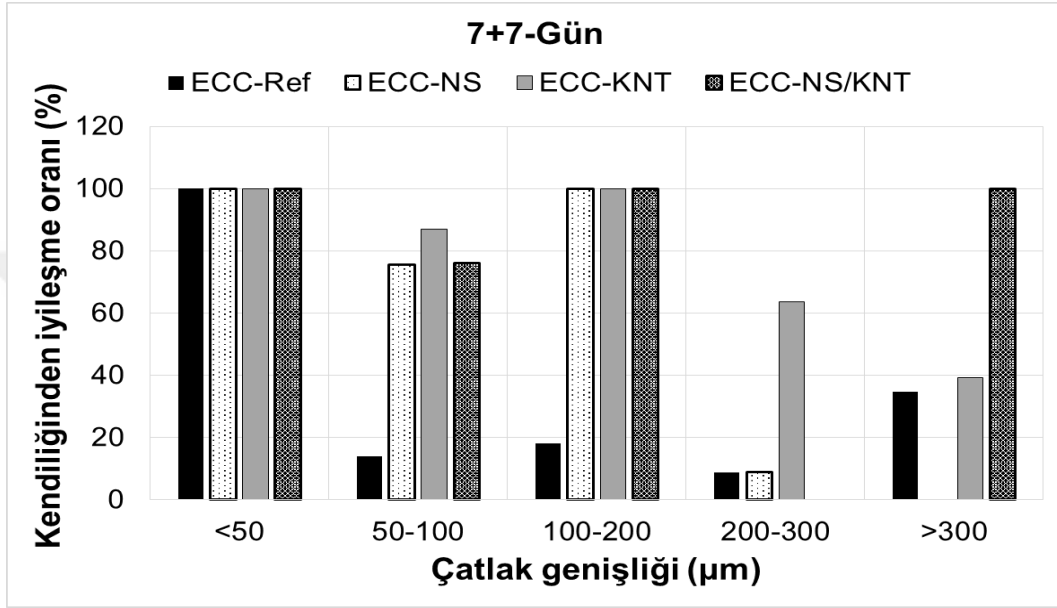


o)

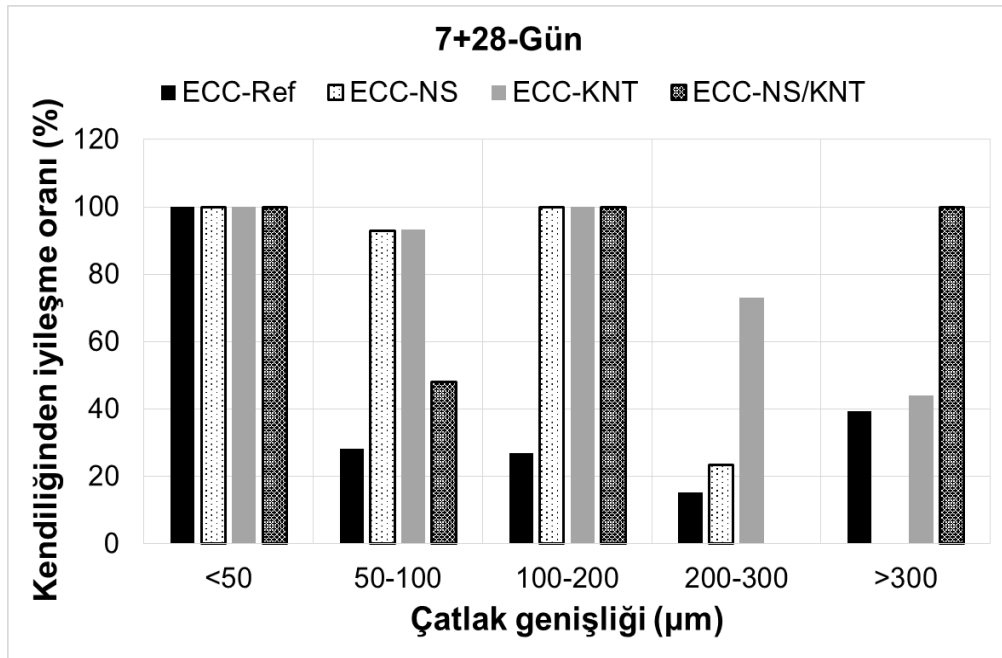
Şekil 4.32 ECC karışımlarına ait numunelerin kendiliğinden iyileşme kapasitesi

Çizelge 4.11’de verilen çatlak kapanma durumlarına göre numunelerin kendiliğinden iyileşme oranları aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenmiştir. Kapanan çatlak aralıkları ile beraber Şekil 4.33-4.35’te her bir karışımın performansı gösterilmiştir.

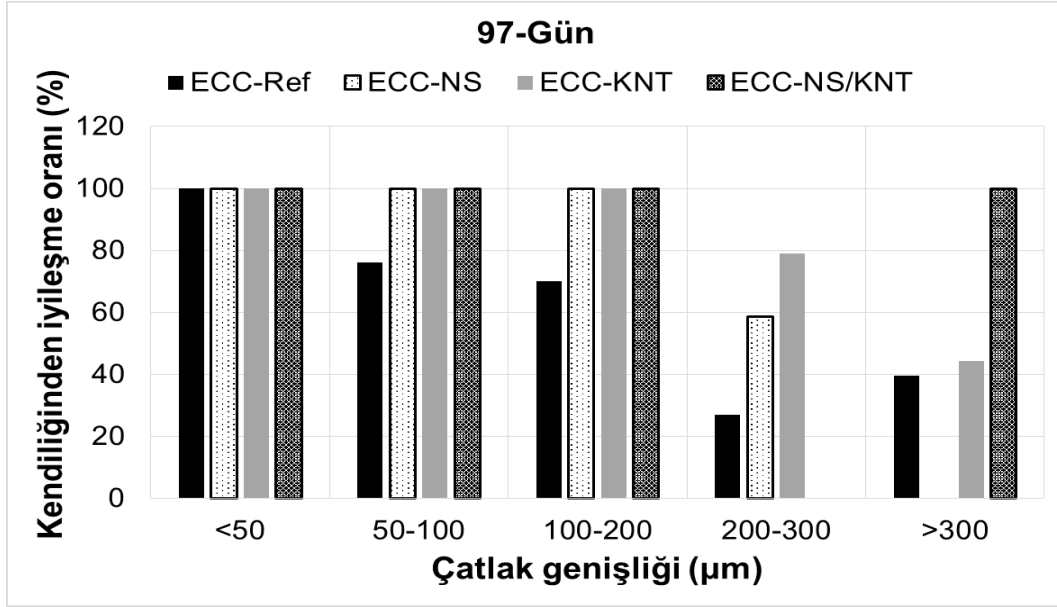
$$\text{Kendiliğinden İyileşme Oranı, \%} = \left\{ \left[\frac{(CW \text{ at } 7^{\text{th}} \text{ day} - CW \text{ at } i^{\text{th}} \text{ day})}{(CW \text{ at } 7^{\text{th}} \text{ day})} \times 100 \right] \right\} \quad (5)$$



Şekil 4.33 14 günlük silindir ECC numunelerin çatlak genişliğine bağlı kendiliğinden iyileşme oranları



Şekil 4.34 35 günlük silindir ECC numunelerin çatlak genişliğine bağlı kendiliğinden iyileşme oranları

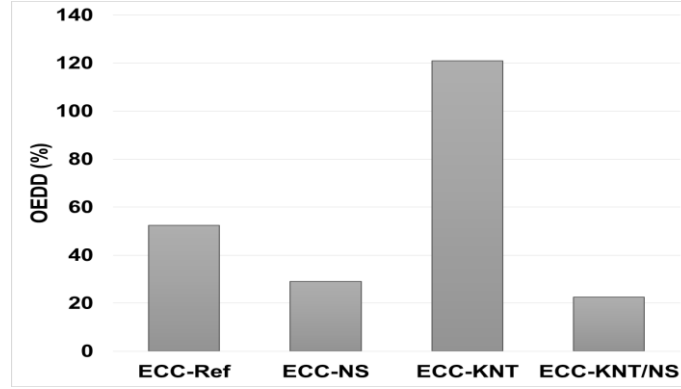


Şekil 4.35 97 günlük silindir ECC numunelerin çatlak genişliğine bağlı kendiliğinden iyileşme oranları

Şekil 4.33-4.35'te gösterilen grafiklere bakıldığında her bir ECC karışımı için çatlak genişliklerinin otojen kendiliğinden iyileşme için çok önemli olduğu görülecektir. Ayrıca tez kapsamında elde edilen önemli bulgulardan biri olan ECC-NS/KNT karışımına ait bir numunenin 810 µm'lik bir çatlak genişliğini sadece 7 günde kapattığından söz etmek gereklidir.

4.3.3.4 Çatlakların Elektriksel Davranışa Etkisi

Daha önce bahsedildiği gibi sıcaklık ve nem numunelerin elektriksel özelliklerini etkilemektedir. Bu nedenle deneyler sırasında numuneler aynı ortam ve bünye koşullarında test edilmişlerdir. Farklı mikroyapı ve kompozisyonlara sahip ECC'lerin elektriksel direnç değerleri ön yükleme ile farklılık göstermiştir. Şekil 4.36'da farklı ECC numunelerin OEDD değerleri 7. günde ön yükleme öncesi ve sonrasında alınarak çatlakların elektriksel davranışı incelenmiştir.



Şekil 4.36 Farklı ECC karışımlarının meydana gelen çatlaklara bağlı elektriksel direnç davranışı

Numunelerin maksimum taşıma gücünün %75'i kadar bir seviyede hasara uğratılmasının ardından ED artışlarında farklılıklar gözlemlenmiştir. ECC-Ref, ECC-NS, ECC-KNT ve ECC-KNT/NS numuneleri için kaydedilen OEDD değeri sırasıyla %52,5, %29, %121 ve %22,6 olmuştur. Sonuçlar ED değişimi oranlarında farklılık gösterebilir bütün karışımlara ait çatlakların ön yüklemeye elektriksel açıdan tepki verdiği anlaşılmaktadır. Örneğin ECC-Ref numunelerinin NS içeren karışımlara kıyasla (ECC-NS ve ECC-KNT/NS) elektriksel dirence daha fazla cevap verdiği görülmektedir. Bu durum numunelerin farklı çatlak davranışları ile ilişkilendirilebilir. Ranade ve diğerlerine göre (Ranade, 2014), çatlak genişliği fazla olan ECC numuneleri daha yüksek ED değişimi göstermektedir. Matris içerisindeki elektriksel iletkenliğe ek olarak, PVA lifleri de çatlak arasında köprüleme vazifesi görürken bir yandan elektriksel iletkenliğin devamını sağlayabilir. Her ne kadar PVA'in kendisi yalıtkan bir malzeme olsa da karışımlar içerisinde üzeri iletken matris parçaları ile kaplıdır. Ön yükleme sırasında bu lifler sıyrılabılır veya kırılabilir ve sonuç olarak numunenin elektriksel iletkenliğini değiştirebilir. Örneğin, ECC-Ref numunelerinin ortalama çatlak genişliği (281.8 μm) iken nano malzeme ile modifiye edilmiş ECC karışımlarından ECC-NS, ECC-KNT ve ECC-KNT/NS numunelerinin ortalama çatlak genişlikleri sırasıyla; 89 μm , 173 μm ve 168 μm olmuştur. Bu açıdan bakıldığında ECC-Ref numunelerinin içerisindeki PVA liflerin daha fazla kırılma ihtimali yüksektir. Ayrıca tez kapsamında kullanılan PVA liflerinin geleneksel karışımlara göre ECC numunelerinde daha az kullanılması PVA lifleri üzerinde matris parçacıklarını ED değerlerini etkilemesi bakımından daha hassas (belirleyici) hale getirmiş olabilir.

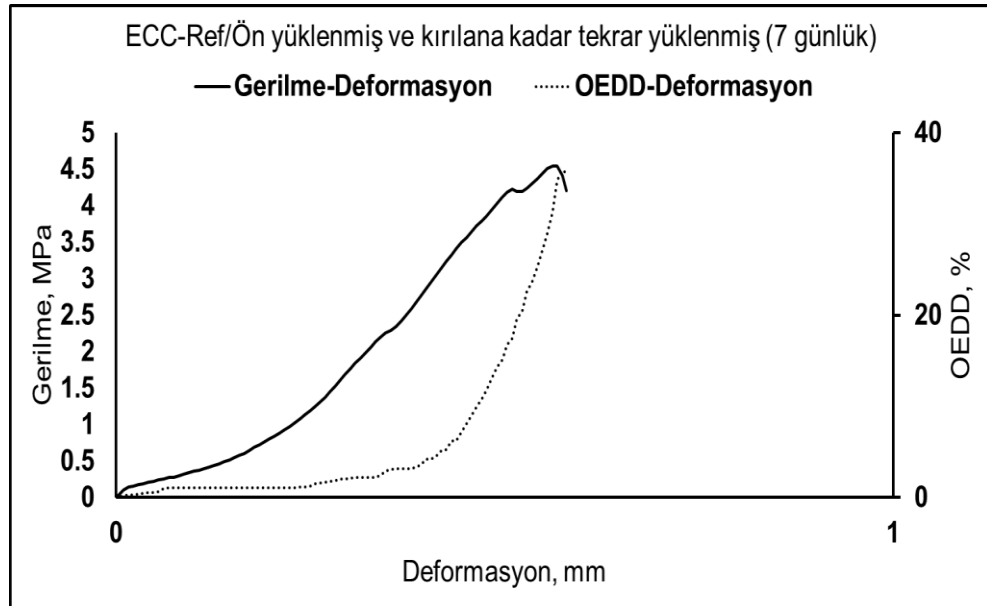
Her ne kadar belirli bir çatlak sayısı için daha geniş çatlak genişliği daha yüksek bir ED değişimini yaratması beklense de, sonuçlar ECC-KNT karışımını ECC-Ref

karışımı ile kıyaslandığında bu yönde gerçekleşmemiştir. Her ne kadar KNT içeren numunelerin ortalama çatlak genişlikleri (173 μm) referans numunelerinkinden (281.8 μm) daha dar olsa da, ECC-KNT numunelerinin OEDD değişimi değerleri ECC-Ref. numunelerine göre daha fazladır. Bu sonuç literatürdeki diğer çalışmalarla benzerlik göstermektedir (Siad, 2018). Nano ölçekteki KNT parçacıkları ECC karışımlarında sürekli bir elektriksel iletim hattı oluşturmuş ve iletken elektron hareketliliğini kolaylaştırmıştır. Hasar verildiğinde ise, KNT parçacıkları matristen sıyrılmış ve çatlak köprüleme yeteneği zarar görerek OEDD değişimine yol açmıştır (%121).

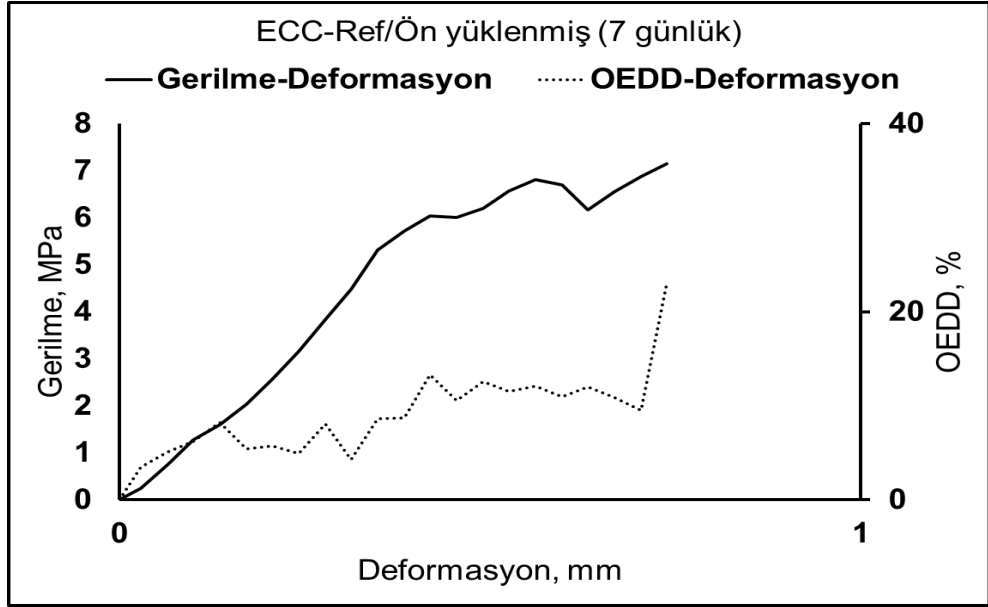
4.3.3.5 Nano Modifiye Edilmiş ECC numunelerin Çok Fonksiyonlu Davranışları

Kendiliğinden İyileşme:

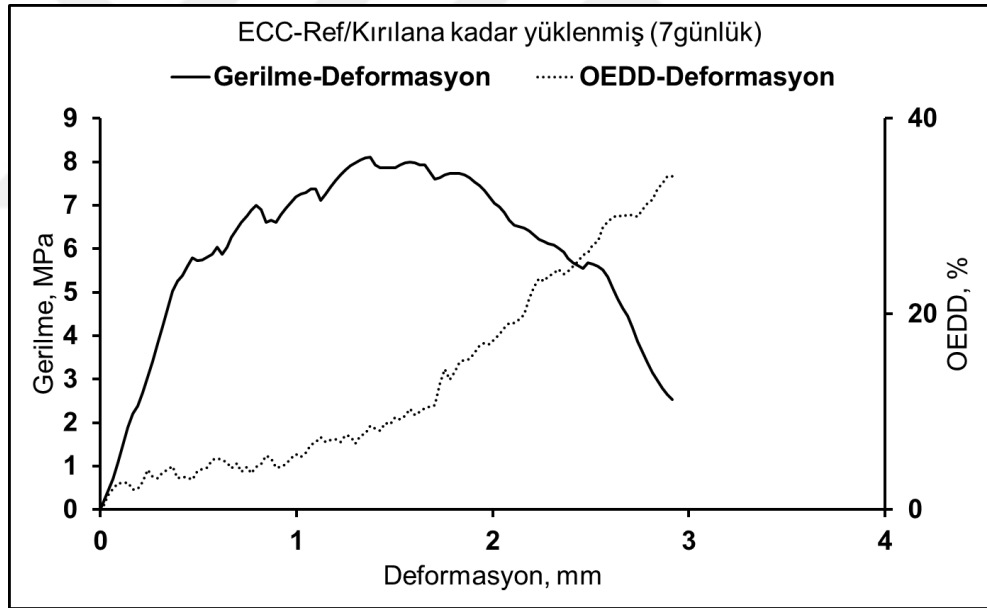
Her ne kadar doğrudan çekme testi ECC'nin şekil değiştirme davranışını belirlemede en doğru yöntem olarak kabul edilsede, literatürdeki mevcut çalışmalar göstermektedir ki eğilme testi altındaki davranışlar numunelerin doğrudan çekme testi ve deformasyon kapasitesiyle güçlü bir korelasyon içerisindedir (Qian ve Li, 2008). Şekil 4.37-4.56'de nano modifiye edilmiş ECC numunelerin çok fonksiyonlu davranışı (mekanik geri kazanımı [kendiliğinden iyileşme] ve kendiliğinden algılama) gösterilmiştir. Şekilde verilen grafikler her bir karışımdan 4 noktalı eğilme deneyi altında test edilmiş 3'er adet numunenin ortalama değerleridir.



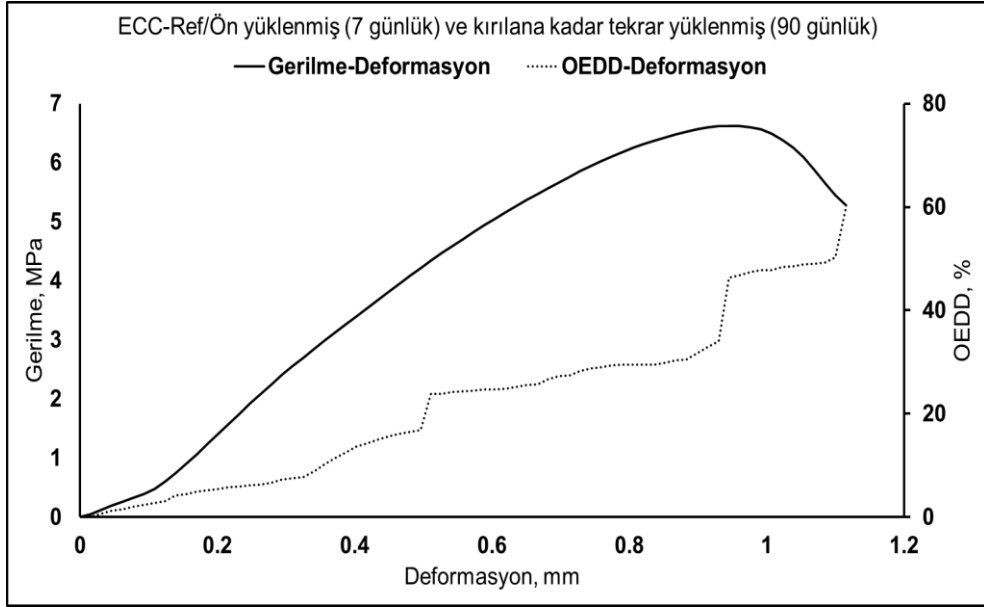
Şekil 4.37 Ön yüklenmiş ve kırılana kadar tekrar yüklenmiş 7 günlük ECC-Ref numunelerinin gerilme-deformasyon ve OEDD-deformasyon davranışı



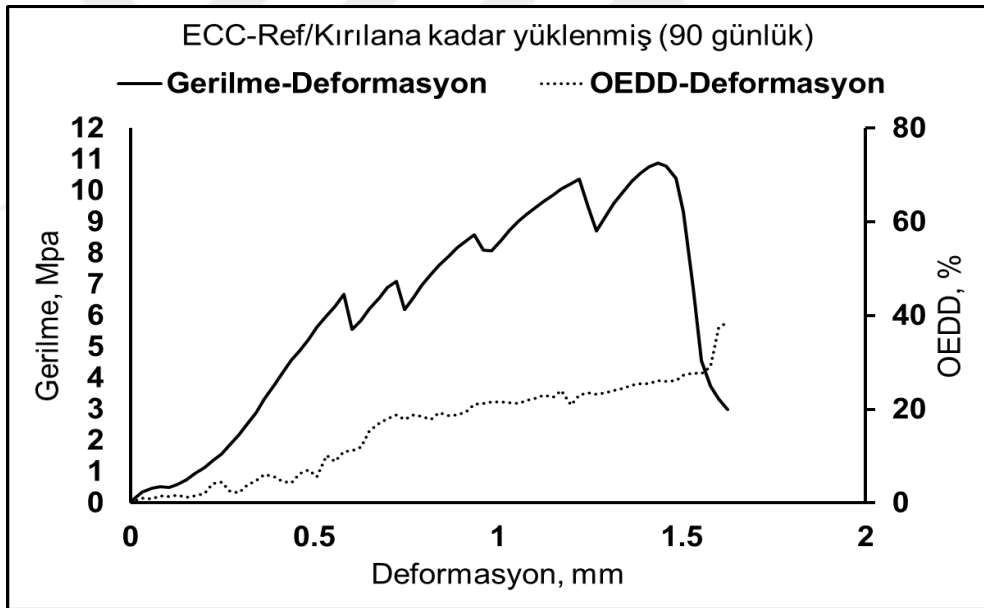
Şekil 4.38 Ön yüklenmiş 7 günlük ECC-Ref numunelerinin gerilme-deformasyon ve OEDD-deformasyon davranışı



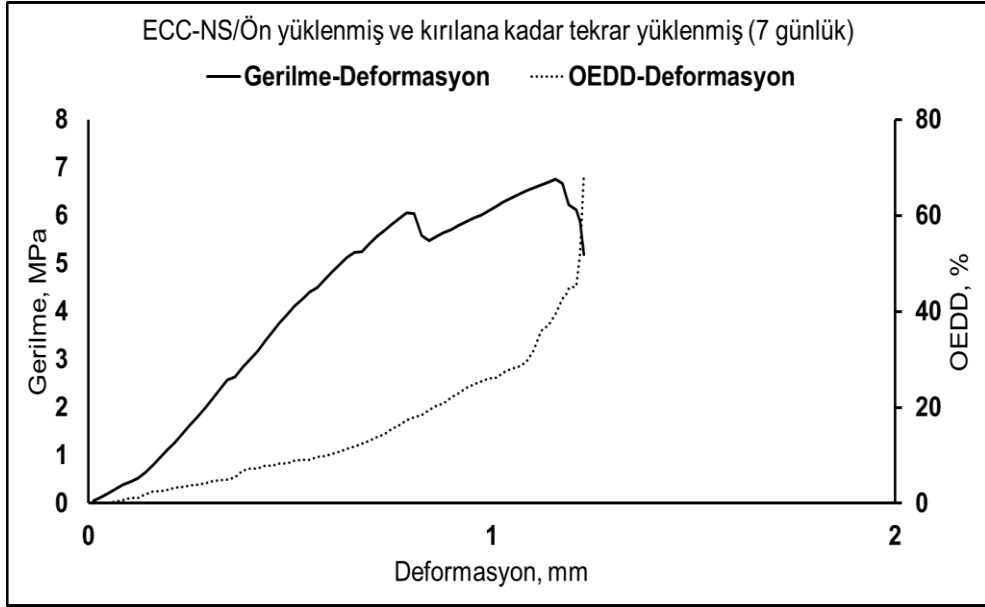
Şekil 4.39 Kırılana kadar yüklenmiş 7 günlük ECC-Ref numunelerinin gerilme-deformasyon ve OEDD-deformasyon davranışı



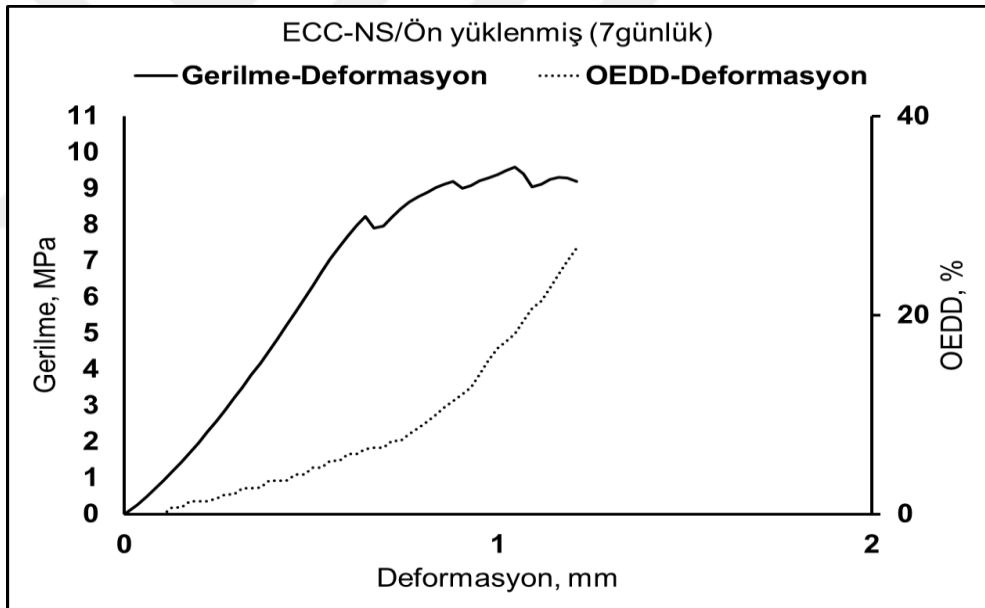
Şekil 4.40 7 günlük ön yüklenmiş ve ardından 90. günde kırılana kadar tekrar yüklenmiş 7 ECC-Ref numunelerinin gerilme-deformasyon ve OEDD-deformasyon davranışı



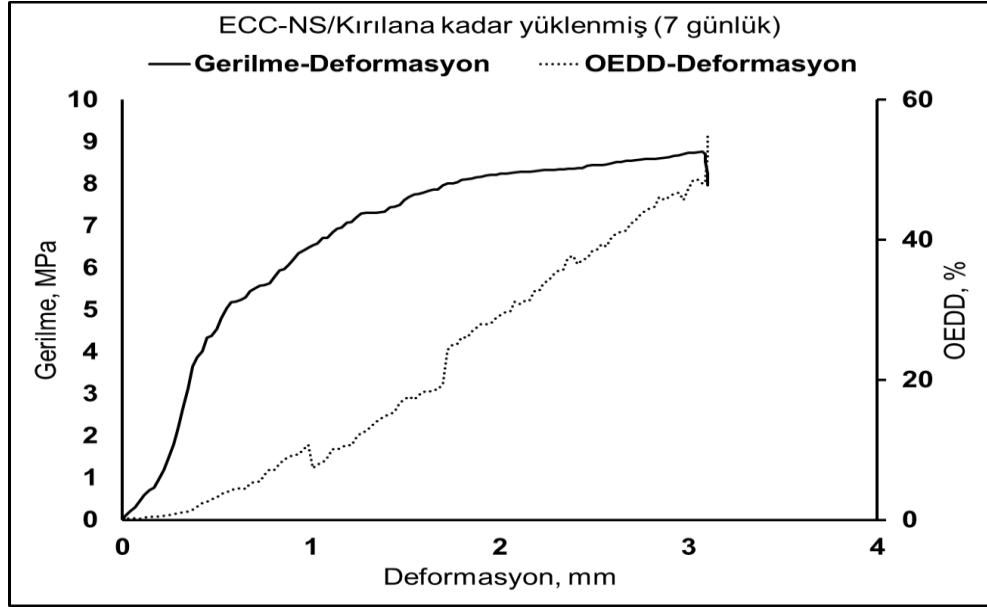
Şekil 4.41 90 günlük kırılana yüklenmiş ECC-Ref numunelerinin gerilme-deformasyon ve OEDD-deformasyon davranışı



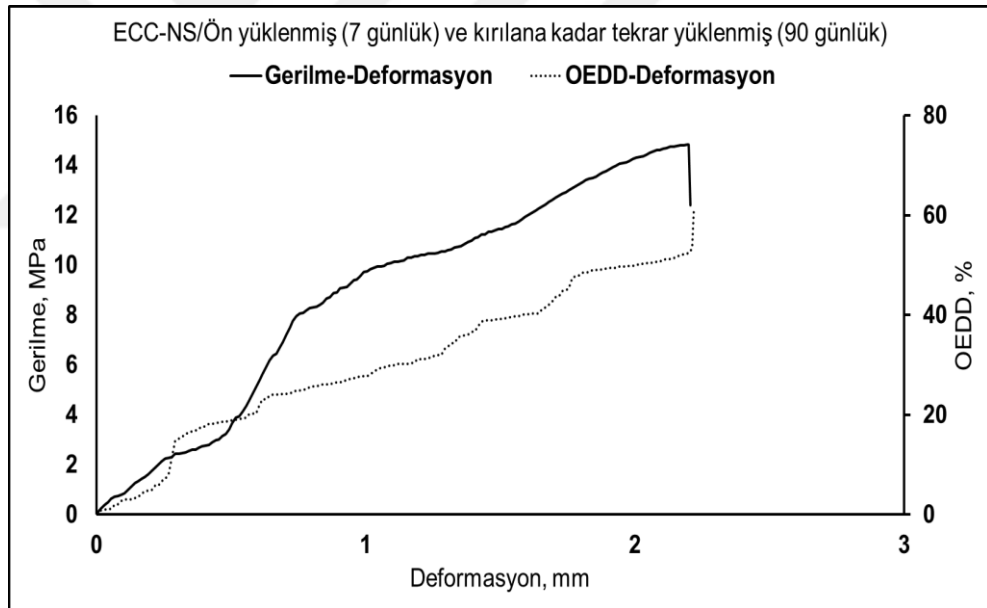
Şekil 4.42 Ön yüklenmiş ve kırılana kadar tekrar yüklenmiş 7 günlük ECC-NS numunelerinin gerilme-deformasyon ve OEDD-deformasyon davranışı



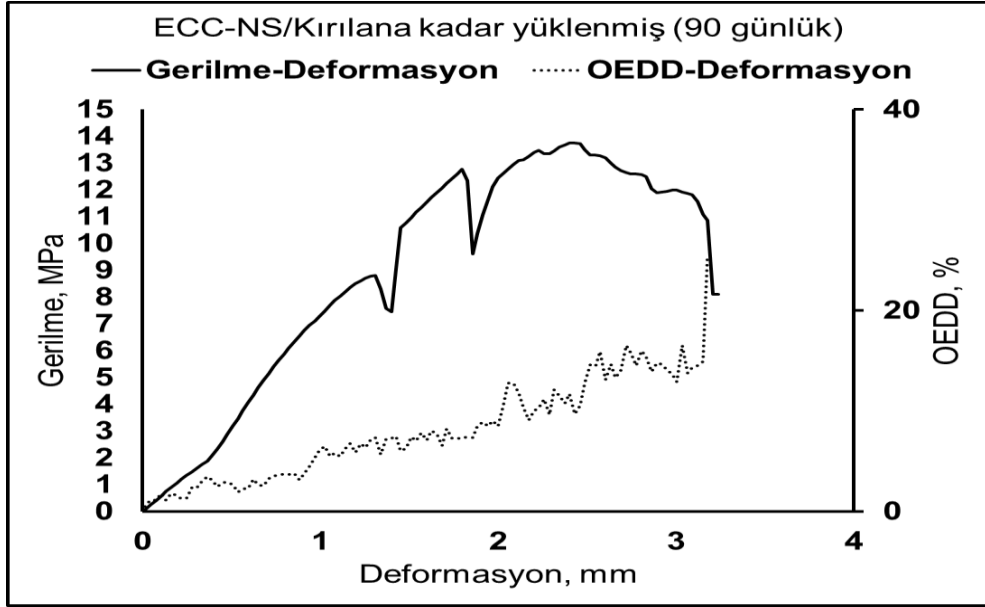
Şekil 4.43 Ön yüklenmiş 7 günlük ECC-NS numunelerinin gerilme-deformasyon ve OEDD-deformasyon davranışı



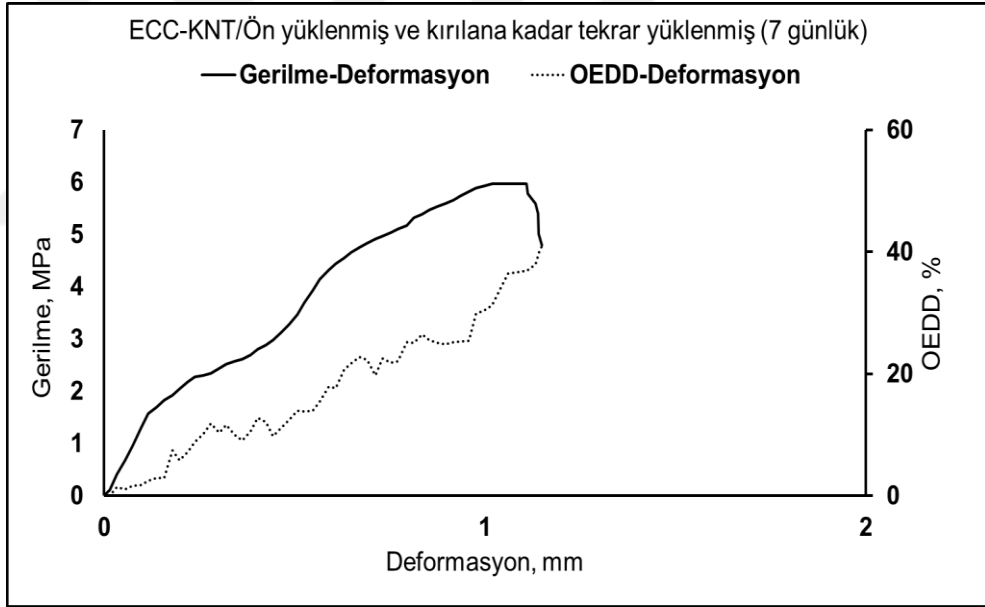
Şekil 4.44 Kırılana kadar yüklenmiş 7 günlük ECC-NS numunelerinin gerilme-deformasyon ve OEDD-deformasyon davranışı



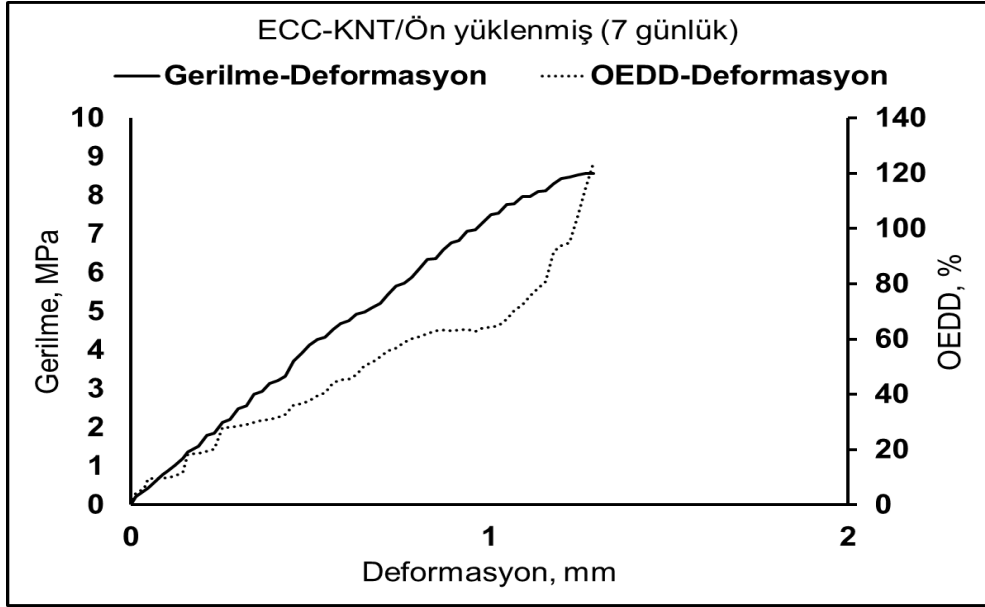
Şekil 4.45 7 günlük ön yüklenmiş ve ardından 90. günde kırılana kadar tekrar yüklenmiş 7 ECC-NS numunelerinin gerilme-deformasyon ve OEDD-deformasyon davranışı



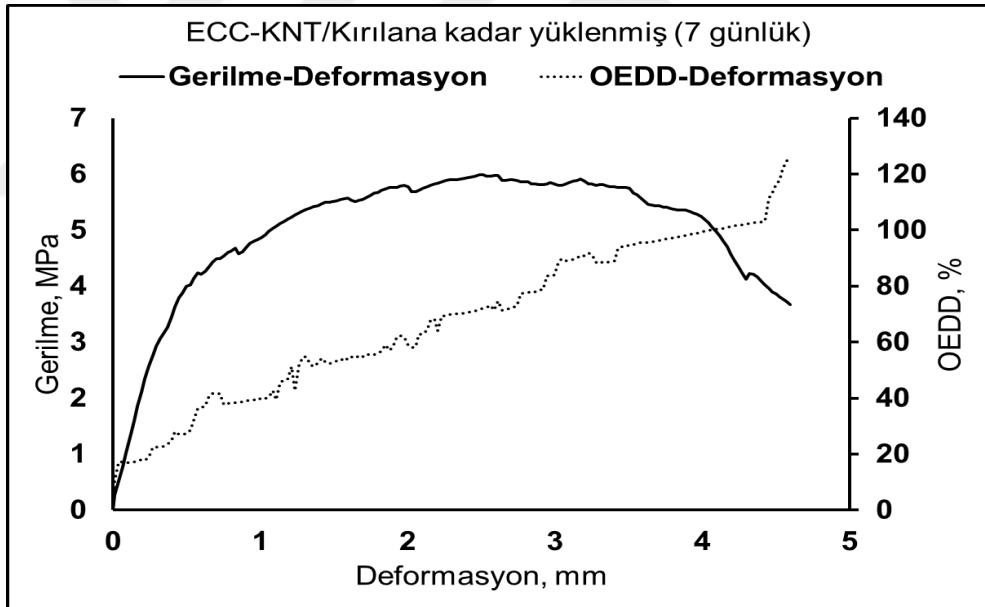
Şekil 4.46 90 günlük kırılana yüklenmiş ECC-NS numunelerinin gerilme-deformasyon ve OEDD-deformasyon davranışı



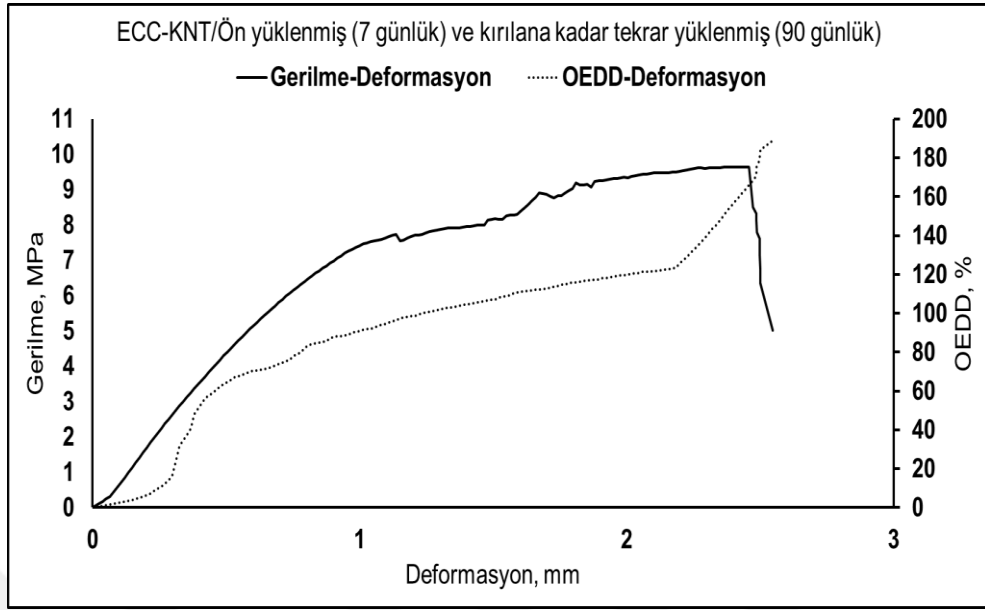
Şekil 4.47 Ön yüklenmiş ve kırılana kadar tekrar yüklenmiş 7 günlük ECC-KNT numunelerinin gerilme-deformasyon ve OEDD-deformasyon davranışı



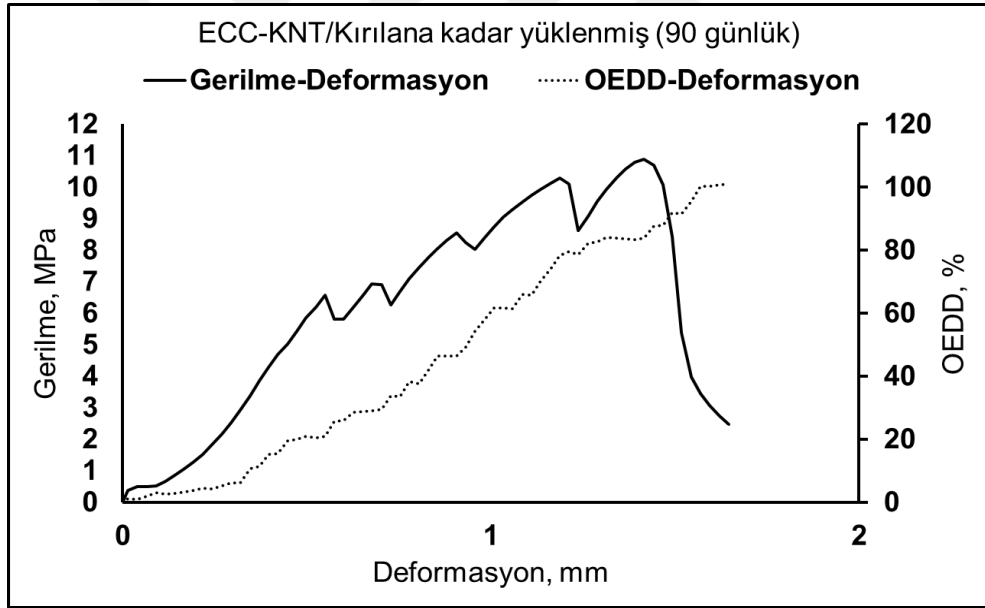
Şekil 4.48 Ön yüklenmiş 7 günlük ECC-KNT numunelerinin gerilme-deformasyon ve OEDD-deformasyon davranışı



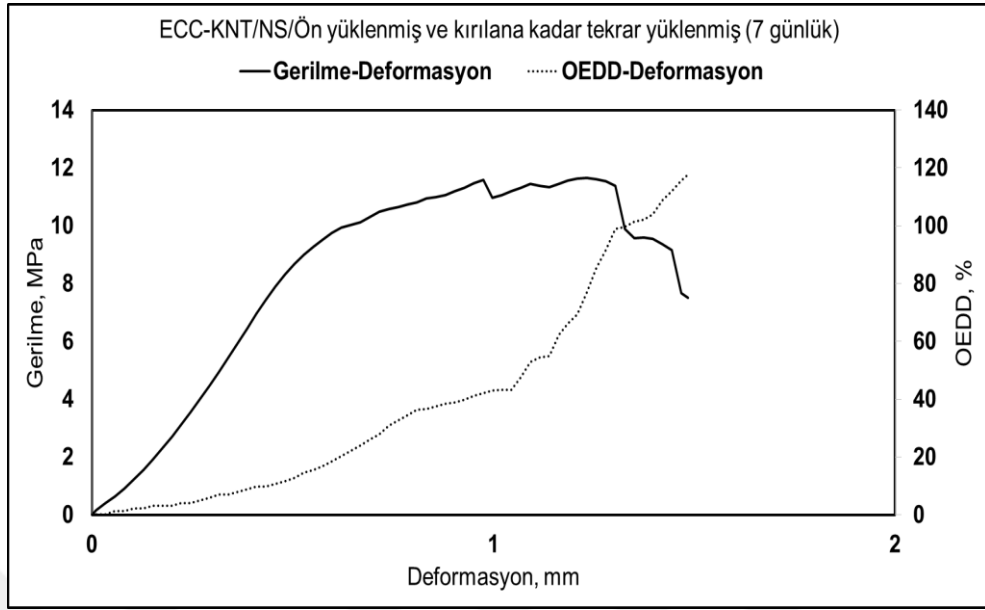
Şekil 4.49 Kırılana kadar yüklenmiş 7 günlük ECC-KNT numunelerinin gerilme-deformasyon ve OEDD-deformasyon davranışı



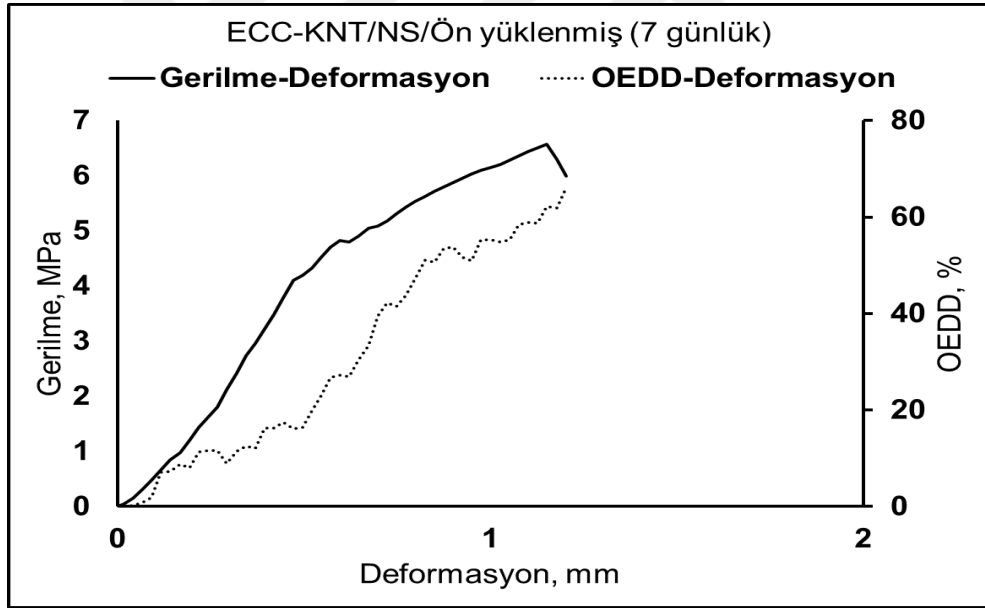
Şekil 4.50 7 günlük ön yüklenmiş ve ardından 90. günde kırılana kadar tekrar yüklenmiş ECC-KNT numunelerinin gerilme-deformasyon ve OEDD-deformasyon davranışı



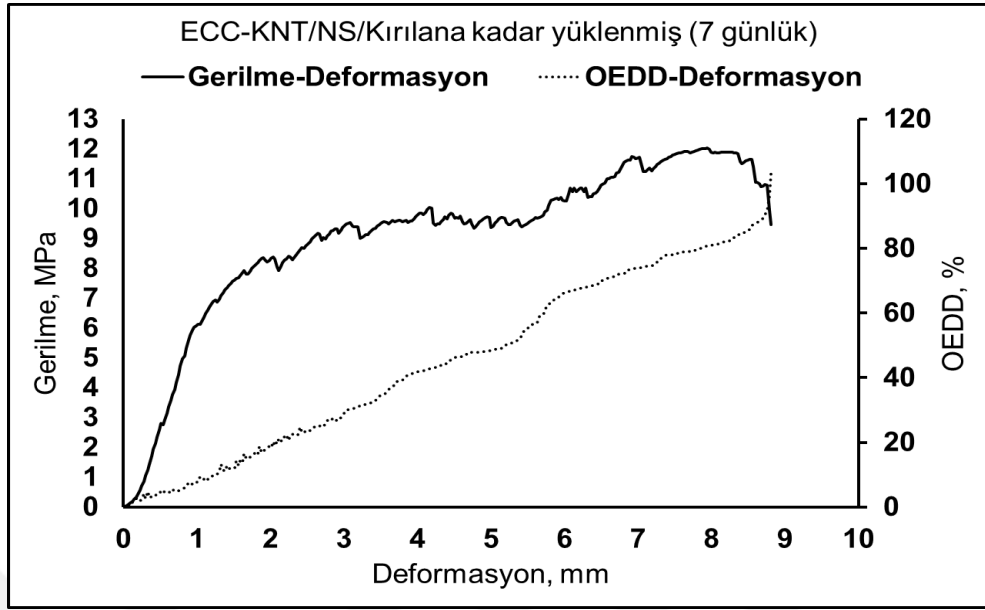
Şekil 4.51 90 günlük kırılana yüklenmiş ECC-KNT numunelerinin gerilme-deformasyon ve OEDD-deformasyon davranışı



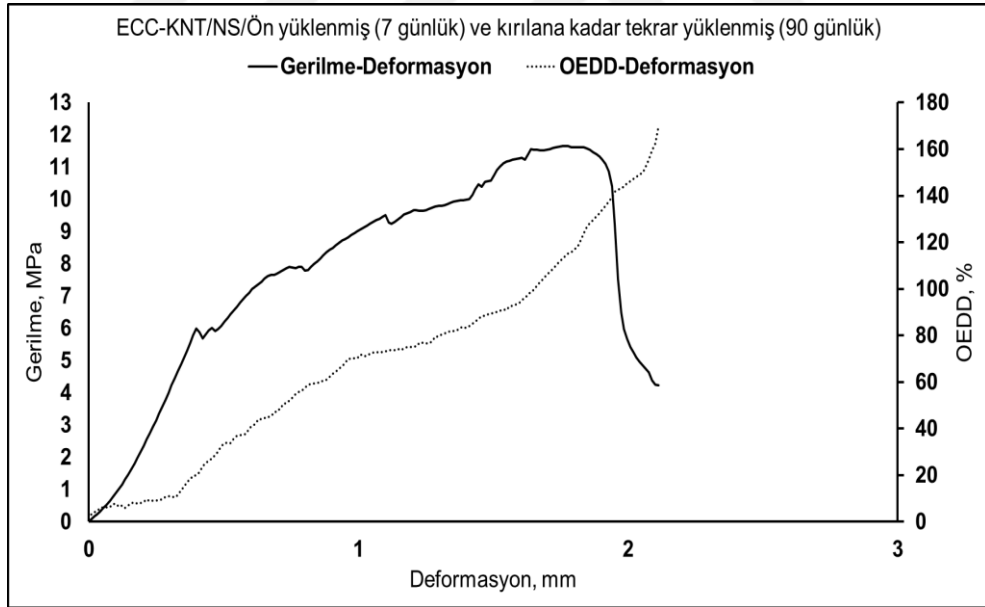
Şekil 4.52 Ön yüklenmiş ve kırılana kadar tekrar yüklenmiş 7 günlük ECC-KNT/NS numunelerinin gerilme-deformasyon ve OEDD-deformasyon davranışı



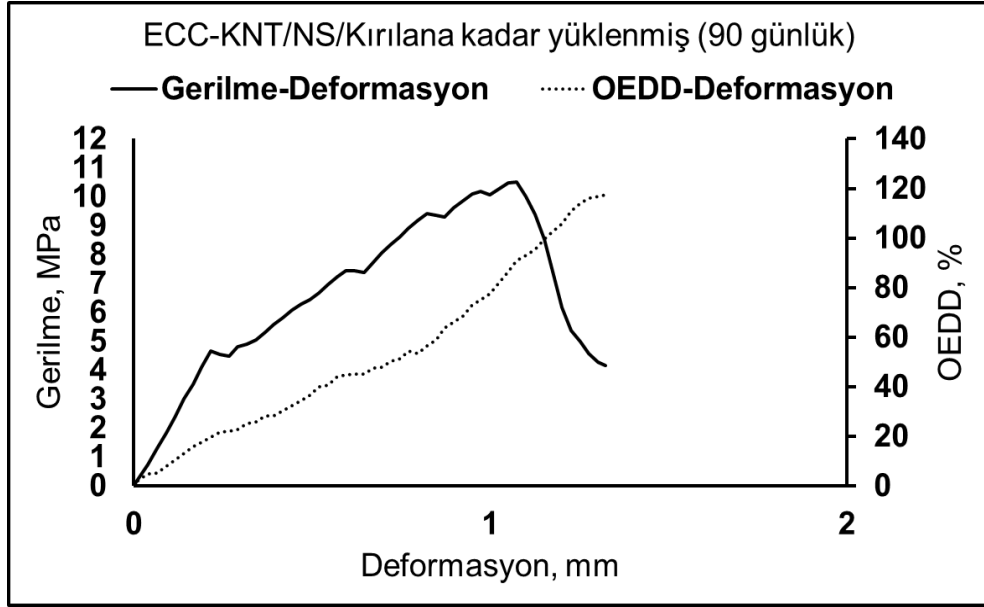
Şekil 4.53 Ön yüklenmiş 7 günlük ECC-KNT/NS numunelerinin gerilme-deformasyon ve OEDD-deformasyon davranışı



Şekil 4.54 Kırılana kadar yüklenmiş 7 günlük ECC-KNT/NS numunelerinin gerilme-deformasyon ve OEDD-deformasyon davranışı



Şekil 4.55 7 günlük ön yüklenmiş ve ardından 90. günde kırılana kadar tekrar yüklenmiş ECC-KNT/NS numunelerinin gerilme-deformasyon ve OEDD-deformasyon davranışı



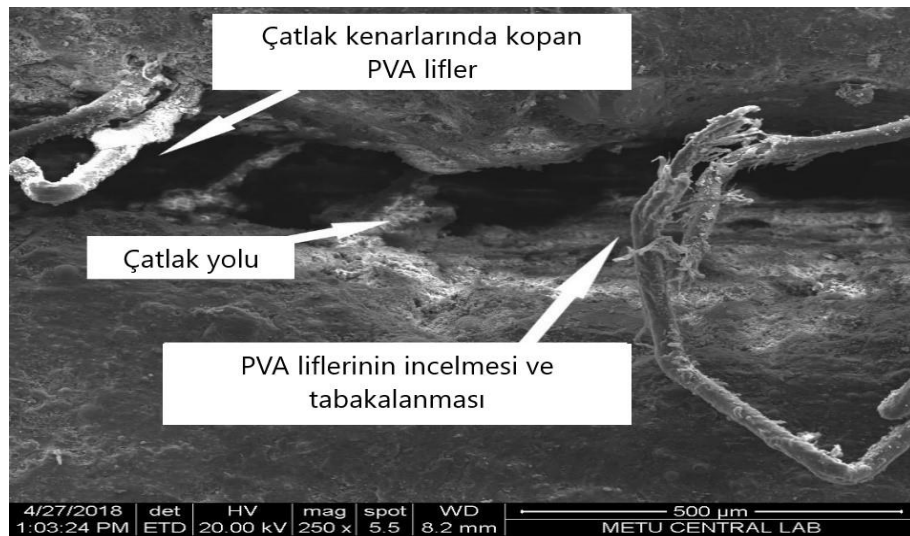
Şekil 4.56 90 günlük kırılana yüklenmiş ECC-KNT/NS numunelerinin gerilme-deformasyon ve OEDD-deformasyon davranışı

Bu tez çalışmasında, mekanik olarak kendiliğinden iyileşme ile ilgili nano malzeme ile modifiye edilmiş ECC karışımlarının deformasyon kapasitesi ve eğilme dayanımlarındaki geri kazanımlar üzerinde önemle durulmuştur. Bu amaçla, daha önce bahsedildiği gibi 7. Günde numunelere hasar verilmiş ve 90 güne kadar suda bekletilerek numunelerin hidrasyon derecelerinin dengelenmesi sağlanmıştır. Ardından eğilme testleri tekrar uygulanarak numunelerin mekanik geri kazanımları belirlenmiştir. Karışımlara ait numunelerin geriye kalan mekanik geri kazanımlarına ilişkin sonuçlar 4.37-4.56 arasında verilirken mekanik kazanımları ilgili grafiklerden daha net ifade etmek adına Çizelge 4.12 hazırlanmış ve aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 4.12 Karışımların mekanik geri kazanımları

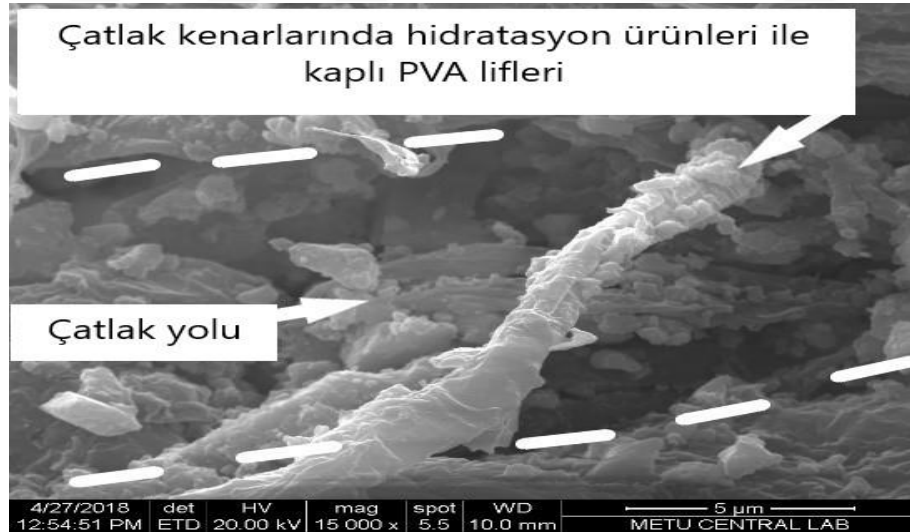
	ECC-Ref	ECC-NS	ECC-KNT	ECC-KNT/NS
Dayanım ([MPa] Ön yüklenmiş ve kırılana kadar tekrar yüklenmiş [7 günlük])	6.62	14.82	9.64	11.65
Deformasyon ([mm] Ön yüklenmiş (7 günlük) ve kırılana kadar tekrar yüklenmiş [90 günlük])	0.94	2.20	2.45	1.77
Dayanım ([MPa] Kırılana kadar yüklenmiş)	10.90	13.75	10.88	10.51
Deflection ([mm] Kırılana kadar yüklenmiş)	1.43	2.43	1.41	1.15
Mekanik geri kazanım (% [dayanım])	60.7	108	88	110
Mekanik geri kazanım (% [deformasyon])	65.7	90	220	154

Genellikle, su kürü özellikle deformasyon kapasitesinin geri kazanılmasında oldukça önemlidir. Örneğin, ECC-Ref. numunelerinin ortalama deformasyon ve eğilme dayanımının geri kazanılması sırasıyla %65,7 ve %60,7 olmuştur. Bu geri kazanım yüzdeleri literatür ile kıyas edildiğinde benzer seviyelerdedir (Qian ve diğerleri, 2009). Örnek vermek gerekirse, Qian ve diğerleri (2009) su ile kür edilen numunelerin deformasyon kapasitesinin en az %65 olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada da test edilen numuneler nano malzeme içermeseler de önemli derecede kendiliğinden iyileşme potansiyeline sahiptirler. Bu durumun nedeni PVA liflerinin tekrar yükleme sırasında çatlak köprülerken yeni kusur bölgelerinin meydana gelmesinde yardımcı olmasıdır. 7. Gündeki ön yüklemenin ardından devam eden hidrasyon reaksiyonları ECC-Ref numuneleri için mekanik kazanımın geri kazanılmasında bir dereceye kadar etkili olmuşlardır. Dikkate değer artışlar ayrıca ECC-Ref numunelerinin başlangıç rijitliklerinde meydana gelmiştir. Verilen şekillerden anlaşılacağı üzere, ECC-Ref numunelerinin 7. Gündeki ilk lineer elastik kabul edilen bölgesinin eğimi çok daha azken 90. Günde hasarsız numunelerle kıyas edildiğinde aynı eğim derecesine geldiği görülmektedir. Ancak, 90 günde tekrar kırılana kadar yüklenen hasar verilmiş ECC-Ref numunelerine bakıldığında geriye kalan eğilme dayanımı ve deformasyon kapasitesinin nano malzemelerle hazırlanmış karışımlara kıyasla çok daha az olduğu görülecektir (Çizelge 4.12). Bu sonuç özellikle 90 günlük eğilme testi sonrası PVA liflerinin numuneler içerisinde yükleme nedeniyle kopması ve zarar görmesi ile ilişkili olabilir. Şekil 4.57’de verilen SEM görüntüsü ECC-Ref numunelerinden alınmış olup sözü edilen bulguyu destekler niteliktedir.



Şekil 4.57 ECC-Ref numunesinin SEM görüntüsü

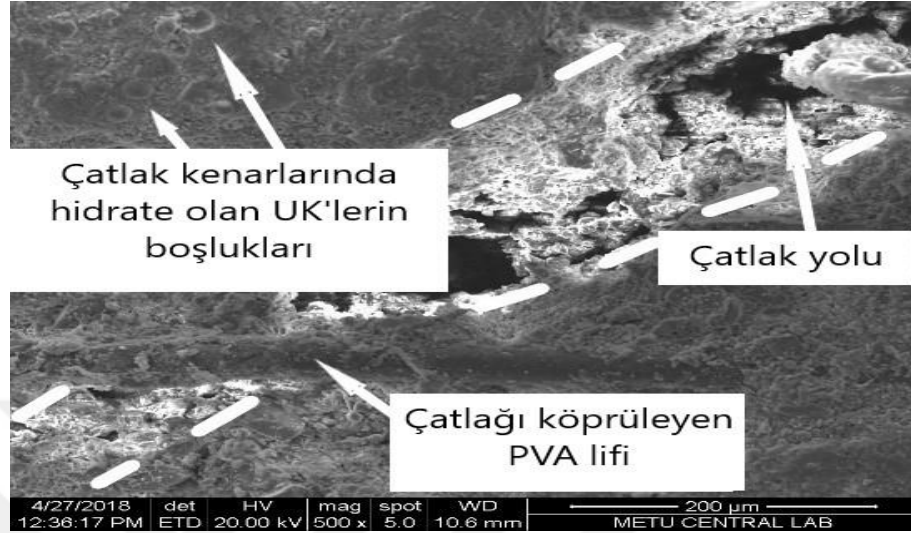
ECC-NS numuneleri için değerlendirildiğinde, hasarlı (14,82 MPa) ve hasarsız numunelerde (13,75 MPa) en yüksek eğilme dayanımının elde edildiği görülecektir (Çizelge 4.12). ECC-NS numunelerinin diğer 3 karışıma kıyasla daha yüksek eğilme dayanımı NS ilavesinin C-S-H kalitesini artırmasıyla ilgili olabilir. PVA lifleri ve matris arasında NS parçacıklarının çekirdeklenme reaksiyonları sayesinde artan kimyasal bağ dayanımı ECC-NS'in daha yüksek yük taşıma kapasitesine erişmesini sağlamış olabilir. Bunun yanında, YOSAK ilavesinin ECC-Ref numunelere göre daha fazla kullanımı ECC-NS karışımı içerisinde daha fazla bağlı bünye suyunun varlığı anlamına gelebilir. Bu su ilerleyen sürelerde C-S-H oluşumuna çok büyük katkı sunmaktadır (Han ve diğerleri, 2017). Ancak diğer nano malzemeli karışımlarla kıyaslandığında ECC-NS numunelerinin deformasyon kapasitesinin benzer bir artışta olmadığı görülecektir. Bu sonuç PVA ve matris arasındaki yüksek kimyasal bağın 90 gündeki tekrar yükleme sırasında çok daha erken deformasyon seviyelerinde mikro çatlaklar meydana getirmesi ile ilgili olabilir. SEM görüntüsü verilen PVA lifleri üzerindeki C-S-H oluşumu deformasyon kapasitesi için daha önemli olan fiziksel bağ dayanımı yerine yüksek kimyasal bağ dayanımını doğrular niteliktedir (Şekil 4.58).



Şekil 4.58 ECC-NS numunesinin SEM görüntüsü

ECC-KNT karışımı ise deformasyon kapasitesini geri kazanma bakımından çok daha umut vadeden sonuçlar göstermiştir. 90. Günde KNT içeren hasarlı ECC numunelerin deformasyon kapasitesi ortalaması 2.45 mm iken hasarsız numuneler için bu değer 1.21 mm olmuştur. Bu sonuç KNT parçacıklarının su altında kür edilen ECC

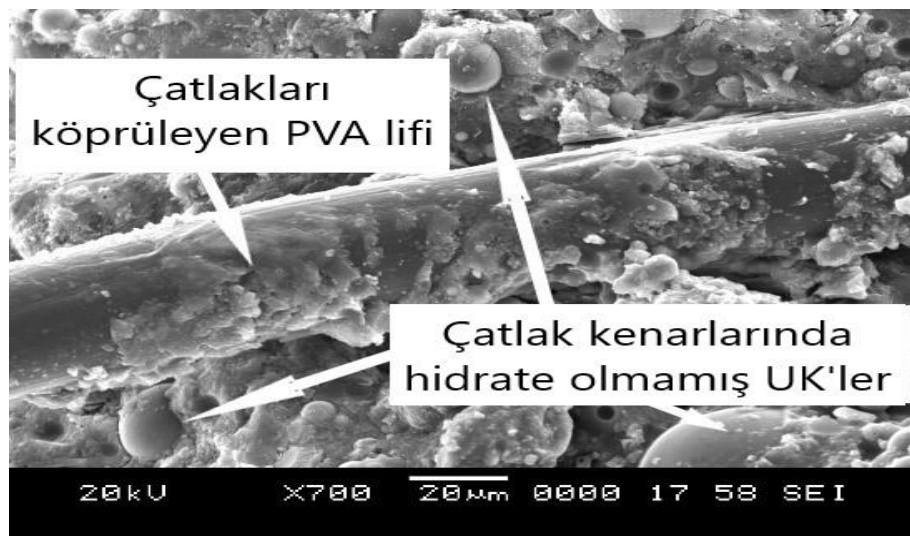
numuneleri üzerinde çok büyük etkisi olduğunu göstermektedir. Su altında devam eden hidrasyon ürünleri KNT üzerinde gerçekleşmiş olabilir. Bu bulgu Şekil 4.59'da verilen SEM görüntüsü ile de desteklenmektedir.



Şekil 4.59 ECC-KNT numunesinin SEM görüntüsü

Şekilde çatlak kenarlarında bünyede bulunan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girmiş UK taneciklerinden kalan boşluklar gösterilmiştir. Sadece NS kullanımının aksine, KNT tanecikleri de daha sıkı/yoğun C-S-H jellerinin meydana gelmesine ve kendiliğinden iyileşme ürünlerinin daha çok meydana gelmesini tetiklemiş olabilir (Siad ve diğerleri, 2018). KNT parçacıkları normalde inert malzemelerdir ve bu nedenle doğrudan hidrasyon/puzolanik reaksiyonlara katılmazlar. Ancak yüksek yüzey alanı yüzünden C-S-H jellerinin başka yerde oluşmasından ziyade kendi üstlerinde oluşmasına zemin hazırlayarak (çekirdeklenme etkisi) yeni ve daha küçük boşlukları doldurabilen C-S-H jellerinin artmasını sağlayabilirler. Önemle belirtmelidir ki ECC malzemesinin en önemli özelliklerinden biri yüksek deformasyon ve enerji yutma kapasitesidir. Her ne kadar en yüksek deformasyon geri kazanımı ECC-KNT için gerçekleşse de, nano malzeme içeren karışımlar içerisinde değerlendirildiğinde ECC-KNT numunelerinin eğilme dayanımını tekrar kazanma da en düşük sonuç verdiğini görmek mümkündür (%88 [Çizelge 4.12]). Bu durumun nedeni (diğer nano malzemeli karışımlara kıyasla) NS parçacıklarının ECC-KNT karışımında yer almadığından dolayı matrisi daha yoğun C-S-H oluşumunda eksik bırakması ile ilgili olabilir.

ECC-KNT/NS numuneleri değerlendirildiğinde ise, Çizelge 4.12'den görüleceği gibi deformasyon kapasitesinin ve eğilme dayanımının geri kazanımı sırasıyla %154 ve %110 olarak gerçekleşmiştir. Şekil 4.52-4.56 ve Çizelge 4.12'ye göre her iki parametrede (deformasyon kapasitesi ve eğilme dayanımı) %100'ü geçen tek karışım ECC-KNT/NS karışımı olmuştur. Şekil değiştirme sertleşmesi gösteren çimento esaslı kompozitlerle kıyas edildiğinde mevcut sonuçlar Qian ve diğerlerinin (2009) çalışmasını bir adım öteye taşımıştır. İlgili çalışmada araştırmacılar su altında kür edilen yüksek performanslı betonların %105'e kadar iyileşme gösterebileceğini rapor etmişlerdir. Tez kapsamındaki diğer karışımlara ve Qian ve diğerlerinin (2009)'nin araştırması ile kıyas edildiğinde bu sonuç KNT-C-S-H arayüzündeki yoğun bağ dayanım ile ilişkili olabilir (Agullo ve diğerleri, 2009). Deformasyon kapasitesi ve eğilme dayanımının geri kazanılmasının yanında başlangıç rijitliğinde geri kazanılması dikkat çekicidir. JSCE'nin tasarım tavsiyelerine göre (JSCE, 2008) ilk çatlağın meydana geldiği dayanım seviyesi ilk çatlağın çekme yükleri altında meydana geldiği noktadır ve bu nokta lineer elastik bölgenin sonu anlamı taşımaktadır. Başlangıç rijitlik değeri ise bu akma noktasına kadar devam eden eğimin derecesidir. Buna göre hasarlı 90 günlük ECC-KNT/NS karışımı neredeyse 90 günlük hasarsız numuneye kıyasla %25 daha fazla rijitliğe sahiptir. Yüksek rijitlik derecesi devam eden yoğun hidrasyon derecesine ve mikro çatlakların yüksek dereceden kendiliğinden iyileşmesi ile yakından ilgilidir (Herbert ve Li, 2013). Şekil 4.60'ta verilen SEM görüntüsünde desteklemektedir ki, 90 günün sonunda hasarlı ECC numunelerin çatlak kenarlarında hala hidrate olabilecek UK parçacıkları bulunmaktadır.



Şekil 4.60 ECC-KNT/NS numunesinin SEM görüntüsü

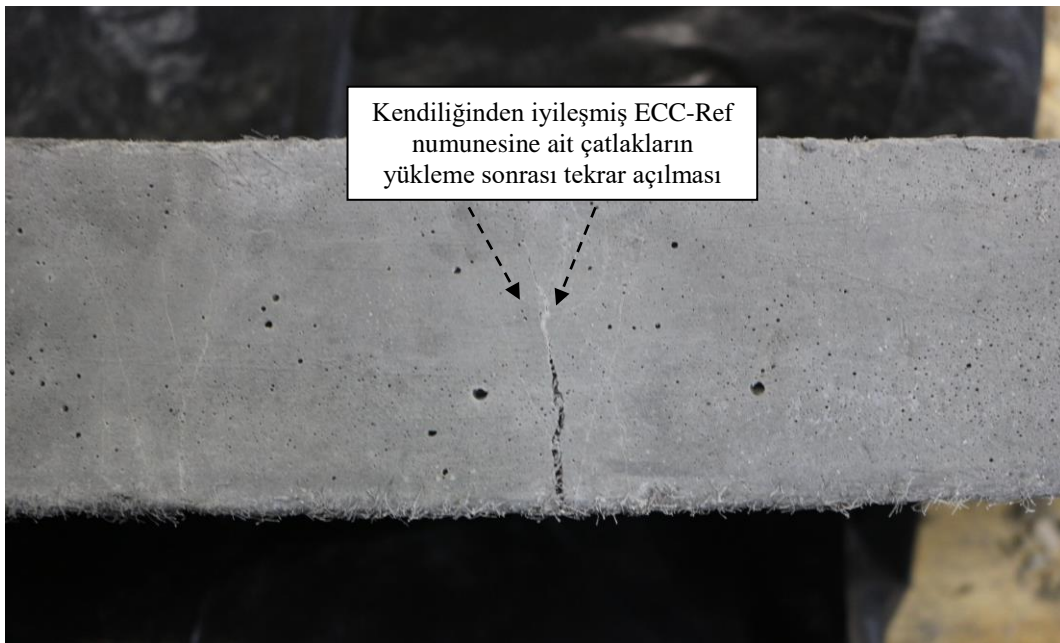
Sonuçlara bakıldığında ECC-KNT/NS numuneleri etkili bir şekilde nano malzemelerin kombine edilmesiyle ilk çatlak dayanımını %100'den fazla oranda geri kazanmaktadır. Bu durum KNT ve NS tanecikleri tarafından numunelere hasar verilmesinin ardından ilave olarak sağlanan C-S-H jelleri ile meydana gelmiştir. Ayrıca, sonuçlarda başka bir ilginç noktaya dikkat çekmek gerekmektedir. Hasarsız ECC-KNT/NS numunelerinin 7 günlük yaşlarında numuneler neredeyse 9 mm'lik bir deformasyon kapasitesi göstermiş ve şekil değiştirme oranı yaklaşık olarak %12 olarak kaydedilmiştir. Bu sonuç diğer karışımlara kıyasla çok fazla deformasyon kapasitesinin hasarsız durumda da ECC-KNT/NS numuneleri için elde edilebildiğini göstermektedir. Hasarsız numunelerden de elde edilen yüksek deformasyon kapasitesi KNT parçacıklarının çekirdeklenme etkisi ve daha yoğun C-S-H varlığı ile yakından ilişkilidir. Daha önce açıklandığı gibi NS parçacıkları tarafından iyileştirilen C-S-H jelleri komşu C-S-H jelleri ile arasında kalan KNT parçacıkları sayesinde daha yüksek deformasyon yeteneğine sahip olmuştur. Bu sonuç Sanchez ve Ince (2009) tarafından yapılan çalışma ile benzerlik taşımaktadır. İlgili çalışmada silika dumanı KNT ile matris arasındaki arayüzü yoğun hale getirmiş ve böylece yük taşıma kapasitesi arttırılmıştır. Ancak Sytnoski ve diğerlerinin (2015) belirttikleri bulgulara göre silika malzemeleri KNT taneciklerinin çekirdeklenme reaksiyonlarını azaltmaktadır. Ancak bu tez çalışmasında NS varlığında KNT açısından çekirdeklenme reaksiyonlarının yavaşladığı ile ilgili somut bir sonuca rastlanmamıştır. Bu çalışmanın aksine, KNT parçacıkları NS'in çok ince yapısından dolayı hızlanan hidrasyon ürünlerinin altında kalmış olabilir. Bu nedenle hidrasyon ürünleri ile KNT arasındaki artan sürtünme kuvveti daha yüksek deformasyon kapasitesinin elde edilmesini sağlamış olabilir. Bunu söylemekle birlikte, nano malzemeli karışımların mekanik geri kazanımı kendiliğinden iyileşme ürünlerinin nano malzemelerce hızlandırılmasıyla meydana gelmiştir. Ancak her ne kadar bu tez çalışmasının amacı olmasa da, numunelerin hasar verildiği yaş söz konusu daha yüksek mekanik geri kazanımın elde edilmesini kolaylaştırdığı düşünülmektedir. (Qian ve diğerleri, 2009)

Kendiliğinden Algılama:

Şekil 4.37-4.56'da aynı zamanda 4 noktalı eğilme yükleri altında numunelerin kendiliğinden algılama kabiliyetleri verilmiştir. Bu kısımda bir önceki bölümden farklı olarak numunelerin sadece ön yükleme sonundaki OEDD değil, yükleme sırasında sürekli olarak OEDD sonuçları verilmiştir. Verilen şekillerdeki OEDD-Deformasyon

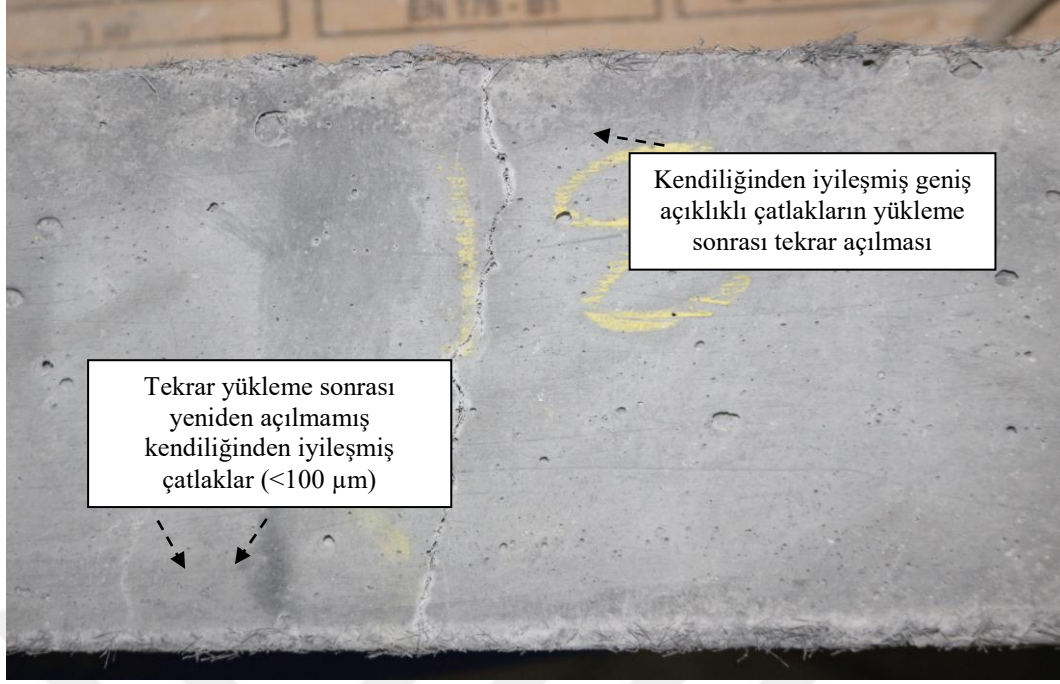
grafikleri üç bölümde ele alınabilir. Birinci bölüm başlangıç rijitlik kriterinin göz önüne alındığı lineer elastik bölge sayılan (ilk çatlak oluşumuna kadar) noktaya kadar alandır. İkinci bölüm ilk çatlak oluşumdan başlamakta ve numunenin şekil değiştirme sertleşirmesi gerçekleştirdiği çoklu mikroçatlakların devamında ele alınmıştır. Üçüncü ve son bölüm ise numunenin şekil değiştirme yumuşaması gösterdiği ve yük taşıma yeteneğinin ani olarak düştüğü bölgedir. Genel olarak bakıldığında ECC-KNT numuneleri hariç ilk kısımda sürekli OEDD artışı çok belirgin değildir. Mikroçatlaklar mevcut değilken KNT içermeyen numunelerden elde edilen OEDD değişimi matrisin eğilme yükleri altında elektriksel fazları ile ilgili olabilir. Ayrıca, eğilme yüklerinin diğer aşamalarından ziyade elastik deformasyon bölgesinde kompozitlerin elektriksel davranışları polarizasyondan daha kolay etkilenebilir. Bir başka neden hali hazırda matris ve agregalalar arasındaki mevcut mikroçatlakların varlığı olabilir. Yüklemin seviyesi arttıkça ve numuneler şekil değiştirme sertleşmesi gösterdikçe OEDD'deki değişimler bütün karışımlar için sürekli olarak artmıştır. Sonuçlar göstermektedir ki mikroçatlakların oluşumu iletken yolların ortadan kalkmasına ve/veya zarar görmesine neden olmuştur. Çok daha keskin OEDD artışlar numunelerin nihai kırılma anına yaklaştığında gerçekleşmiştir. Bu noktada belirli mikroçatlakların lokalize olması OEDD değerlerini çok daha yukarı itmiştir. Şekil 4.37-4.41'den de görüleceği üzere ECC-Ref numuneleri dahi her ne kadar düşük seviyede de olsa hasar altında kendiliğinden algılamayı sağlamıştır. ECC-Ref numunelerinin uygulanan deformasyona/şekil değiştirmeye karşı elektriksel davranılı daha önce literatürde detaylı olarak aktarılmıştır. ECC-ref numuneleri her ne kadar diğer beton gibi malzemeler kadar iletken olmayan malzemeler içerse de, bünyede bağlı olmayan su ve mikro boşluklar da çözülü iyonlar bir dereceye kadar elektriksel alan yaratarak piezo-dirençli davranış göstermektedir. Ancak önemle belirtmek gerekir ki, büyük deformasyonlar altında bu seviyede bir ED değişimi yapısal sağlık izleme uygulamaları için yeterli değildir. Verilen OEDD-Deformasyon eğrilerinden görüleceği gibi belirli çatlak kenarları PVA lifleri tarafından birbiri ile bağlanmış olup liflerin üzerinden iletken çimento esaslı malzeme parçacıkları bulunmaktadır. Genel olarak bakıldığında ECC-NS numunelerinin OEDD değişimi ECC-Ref numunelerinkinden daha yüksek olmuştur. Öte taraftan sadece NS içeren karışımlara ait OEDD değerlerinin ECC-KNT ve ECC-NS/KNT numunelerinin değerleri ile kıyas edildiğinde sadece NS kullanmanın kendiliğinden algılama kabiliyetini ECC karışımlara kazandırmada yetersiz kalacağı anlaşılmaktadır. ECC-KNT numuneleri ise bütün kür yaşlarında ve yükleme

durumlarında mikroçatlak oluşumuna karşı çok yüksek dereceden elektriksel davranış göstermiştir. Özellikle hasar seviyesi çok düşükken dahi kendiliğinden algılama yeteneği elde etmek açısından KNT kullanımı zaruri olarak düşünülmektedir. Her ne kadar ECC-KNT karışımı kadar olmasa da, ECC-NS/KNT karışımında ECC-NS ve ECC-Ref numunelere kıyasla daha yüksek OEDD değişimi göstermiştir. Sonuçlar göstermektedir ki, ECC-KNT/NS numuneleri de yüklemenin başından sonuna kadar kendiliğinden algılama kabiliyeti göstermiştir. Şekil 4.37-4.41 ve Çizelge 4.12 incelendiğinde akma noktasına kadar (yük ve sehım kapasitesi) oldukça yüksek iyileşme performansı elde edilen referans kiriş numunelerin akma yük ve sehım değerlerinin neredeyse en az hasarsız haldeki özellikleri kadar olduğu dikkat çekicidir. Referans kiriş numunelere ait gerilme-deformasyon sonuçları her ne kadar akma noktasına kadar benzerlik taşısa bu seviyeden sonra yük taşıma kapasitesi hasarlı ECC-kiriş numuneler için oldukça düşmüştür. Bu nedenle mevcut iyileşmiş çatlakların tam olarak kapanıp kapanmamasından bağımsız olmak üzere, iyileşmiş çatlakların yüklemenin başlaması ile tekrar aynı çatlak kıvrımlarından açıldığı anlaşılabilir. Söz konusu durum hasarlı bir ECC-Ref numunesinin, 7+90 gün sonundaki eğilmede çekme testinin ardından çekilen görüntüsünden de anlaşılmaktadır. Şekil 4.61’de görüleceği gibi, ön yüklenmiş ECC-Ref kiriş numunesinin 7+0. günden 7+90. güne kadar iyileşmiş mikro çatlakları görünmekle birlikte, kiriş numunesinin orta bölgesinde daha önce iyileşmiş ancak eğilme yükleri altında tekrar aynı yerden açıldığı rahatlıkla görülmektedir.



Şekil 4.61 Kendiliğinden iyileşmiş ECC-Ref numunesine ait çatlakların yüklenme sonrası tekrar açılması

Hasarlı ECC-NS numuneleri, her ne kadar ileri yaşlarda (7+90.gün) muhtemel hidrasyona katılmamış taneciklerin su kürü altında hidrasyon reaksiyonlarına devam etmesiyle kaybettiği bazı mekanik özellikleri geri kazansa da (sehim kapasiteleri), tam yükleme sonrası elde edilen daha düşük süneklilik derecesinin matris lif-matris arayüzü ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bu noktada, özellikle ECC-NS numuneleri için daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi, ön yükleme sonucu çatlak genişliklerinin kendiliğinden iyileşme etkinliği için daha fazla önemli olduğu hususu tekrar edilmelidir. Dikkat edilecek olursa, diğer karışımlara ait numunelere kıyasla gerek hasarlı gerekse hasarsız ECC-NS numunelerinde en yüksek kırılma yük değerleri kaydedilmiştir. Bu sonucun nedeni daha önceki kısımlarda açıklandığı gibi, NS'in mikro yapının gelişimine erken yaşlardan itibaren katkı sağlayarak hızlı bir aktivatör olarak puzolanik reaksiyonları tetiklemesidir. Ayrıca reaksiyona katılmamış olan NS tanecikleri de bir yerde filler/dolgu etkisi yapmış olabilir. İyileşen mikro yapı daha yüksek bir kimyasal bağın lif (PVA) ile matris arasında meydana gelmesine zemin hazırlamış olabilir. Böylece artan tokluk seviyesi, ECC-NS numunelerde ön yükleme sonucu daha geniş açıklıklı çatlakların oluştuğuna işaret etmektedir. Bu durum kendiliğinden iyileşme derecesi ve etkinliği için engel yaratabilecek bir sonuç olarak değerlendirilmektedir. Ancak çoklu çatlak oluşumunda NS içeren numunelerin gerek mikroskopla, gerekse gözle yapılan kontroller sonucu, daha dar çatlakların yükleme sonrası dahi aynı çatlak dizgisinden tekrar açılmadan kalabildiğini göstermiştir. Bu noktada ECC-NS numuneleri için meydana gelen iyileşme ürünlerinin 100 µm'a kadar mekanik özellikleri koruma da etkinlik göstererek yeni çatlakların başka bölgelerden oluşmasına katkı sağladığı, daha geniş çatlak seviyesinde ise aynı noktadan tekrar çatlakların meydana geldiği yorumu deney sonuçlarına göre söylenebilir. Şekil 4.62'de söz konusu sonuçları daha iyi anlamak adına yükleme sonrası daha kendiliğinden iyileşmiş daha geniş çatlakların (>100 µm), nihai yükleme sonrası tekrar aynı noktadan açıldığı görülebilir. Tekrar açılan çatlak kenarlarına bakıldığında daha önce mevcut olan kendiliğinden iyileşme ürünleri de görülebilmektedir.



Şekil 4.62 Hasarlı ECC-NS kiriş numunesinin 7+90 gün sonra tam yüklenmiş görüntüsü

Hasarlı ve hasarsız ECC-KNT kiriş numuneleri incelendiğinde, farklı yaşlardaki farklı sehim kapasiteleri numunenin olgunluk durumu ile yakından ilişkili olduğu görülmektedir. Elde edilen daha yüksek kırılma ve akma sehim kapasiteleri sonucu, süneklilik ve enerji yutma kapasiteleri de hasarlı ve hasarsız ECC-KNT numuneleri için yüksek kaydedilmiştir. KNT ile geliştirilen ECC kiriş numunelerinin çoğu temel mekanik özelliklerinin, en az hasarsız haldeki aynı karışıma ait numuneler kadar performans göstermesi daha dar çatlaklardaki iyileşme ürünlerinin daha kaliteli bir şekilde oluşması ile ilişkilidir. Dar çatlaklarda oluşan daha kararlı kendiliğinden iyileşme ürünleri tekrar yükleme sırasında, hasarlı ECC-KNT numunelerinin daha iyi performans göstermesini sağlamış olabilir. Şekil 4.63'te çok daha dar açıklıklı kendiliğinden iyileşmiş ECC-KNT kiriş numunelerine ait çatlaklar yukarıda açıklanan yorumları desteklemektedir. Ayrıca, önceki görüntülere kıyasla (Şekil 4.61 ECC-Ref ve Şekil 4.62 ECC-NS) gözle görülür çoklu dar açıklıklı kendiliğinden iyileşmiş çatlak sayısı da daha fazladır.



Şekil 4.63 Hasar verilmiş ECC-KNT kiriş numunelerinin kendiliğinden iyileşmiş dar açıklıklı çoklu çatlakları

Bilindiği üzere karbon nano tüpler (KNT) çimento esaslı malzemelerde nano donatı olarak kullanılmaya aday malzemelerdir. Elastik modül açısından TPa, eğilme dayanımı açısından ise GPa seviyesinde üstün özelliklere sahip olan KNT'ler aynı zamanda çimento esaslı kompozitlere farklı fonksiyonlar kazandırılmasında umut vadetmektedir. Çatlakların tamir edilerek hasarsız haldeki mekanik özelliklerin tekrar elde edilmesinde ve tekrar yükleme sonucu iyileşmiş haldeki çatlakların performansı üzerinde KNT'lerin daha önce sözü edilen üstün özelliklerinin katkı sağladığı düşünülmektedir. KNT varlığında nano/mikro boyutlarda iyileşen arayüz bağ dayanımı, hasarlı kiriş numunelerin tekrar yüklenmesinin ardından eğilme yüklerini aktararak çatlak ve boşluklar boyunca köprüleme görevi yapmıştır. Bu gelişme KNT'lerin ECC numunelerinin mekanik özelliklerinin geri kazanılmasında (hasarsız numunelere kıyasla) çok fayda sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar literatürde diğer hasarsız olarak test edilen ve KNT içeren çimento esaslı kompozitlerin özellikleri ile benzerlik taşımaktadır (Makar, 2003). Söz konusu iyileşmelerin bağlayıcı malzeme oranınca sadece %0,55 KNT'lik bir nano malzeme katkısı ile yapılması konunun ayrıca önümüzdeki yıllarda KNT maliyetlerindeki beklenen düşüşlerle birlikte çimento esaslı kompozitler için çok daha yaygın bir şekilde araştırma, geliştirme ve uygulama faaliyetlerinde yer alabileceğini göstermektedir. Bu potansiyelin gerçekleşmesinde kuşkusuz KNT'ler ile

ilgili yüzey özellikleri, çimento esaslı matrislere dağıtım teknikleri ve malzemeye özgü olarak uygun kullanım oranların tespit edilmesi çok önemli rol oynayacaktır. Bu noktada tez sonuçlarının, ilerleyen yıllarda KNT'ler ile ilgili yapılacak çimento esaslı sistemleri ilgilendiren çeşitli konularda çok fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

ECC-KNT/NS kiriş numunelerine ait temel mekanik özelliklere bakıldığında, NS ve KNT malzemelerin ECC matrislerinde uygun dağıtım teknikleri ve kullanım oranlarında modifiye edilmesiyle, hasarlı ECC numunelerinin mekanik olarak hasarsız ECC'lerin özelliklerine yakın hatta bazı özellikler açısından daha iyi bir performans gösterdiğinden rahatlıkla söz edilebilir. Aynı şekilde tıpkı hasarlı ECC-KNT numunelerindeki olduğu gibi eğilme yükleri altında ECC-KNT-NS numunelerinin hem akma hem de kırılma anındaki sehim kapasiteleri artış göstermiştir. Daha önce belirtildiği gibi kiriş numunelerin akma noktaları yük deformasyon doğrusal eğrisinin bozulduğu ilk nokta (ilk çatlak oluşma bölgesine yakın) olarak kaydedildiğinden bu noktada mevcut hasarların kalıcı olduğu bilinmektedir. Elde edilen sonuçlar kalıcı mikro çatlakların sadece geçirimsizlik olarak değil aynı zamanda mekanik olarak eğilme yükleri altında direnç gösterecek şekilde iyileştiğini göstermektedir. NS ve KNT'lerin, ECC'nin karakteristik özelliklerini (yüksek deformasyon kapasitesi) iyileştirerek daha dar açıklıkta çatlakların elde edilmesinde de yardımcı olduğu söylenebilir. Daha önceki bölümlerde, dar açıklıktaki çatlakların daha fazla kapanma potansiyeline sahip olduğu ve geçirimsizlik özelliklerinin iyileşmesi için oldukça önemli bir parametre olarak dikkate alınması gerektiği detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bu bölümde ise daha çok sayıda daha dar açıklıktaki çatlaklarda daha kaliteli ve daha yaygın kendiliğinden iyileşme ürünlerinin oluştuğundan söz edilebilir. ECC-KNT/NS karışımı için, mekanik olarak özellikle akma bölgesine kadar kendiliğinden iyileşme ürünlerinin katkı sağladığı ve sonuç olarak eğilme yükleri altında yeni çatlak gelişimlerini mümkün kılarak nihai kırılmayı bir ölçüde daha geciktirdiği anlaşılmaktadır. Matris bünyesinde ve su kürü altındaki elverişli koşullarda ilerleyen ilave hidratasyon reaksiyonları, çatlakların mekanik olarak hasarsız özellikleri temsil edecek seviyede bir gelişim göstermesini sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında, geliştirilen ECC-KNT/NS numunelerinin enerji yutma kapasitelerinin de arttığını belirtmek gereklidir. Sonuçlardaki iyileşen sehim ve yük kapasitelerine bağlı olarak, daha fazla enerji yutma kapasitesine sahip hasarlı ECC-KNT/NS numunelerin özellikle deprem, rüzgar ve hareketli yükler altında yeni nesil yapıların yapı dinamiği hesaplarında çok önemli faydalar sağlayabilecek

potansiyelde olduğu düşünölmektedir. Aşağıda verilen Şekil 4.64 ve Şekil 4.65'te hasarlı ECC-KNT/NS kiriş numunesinin görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 4.64 Hasarlı ECC-KNT/NS kiriş numunelerinin bütöün çatlaklarının tam olarak (%100) kendiliğinden iyileşmesi



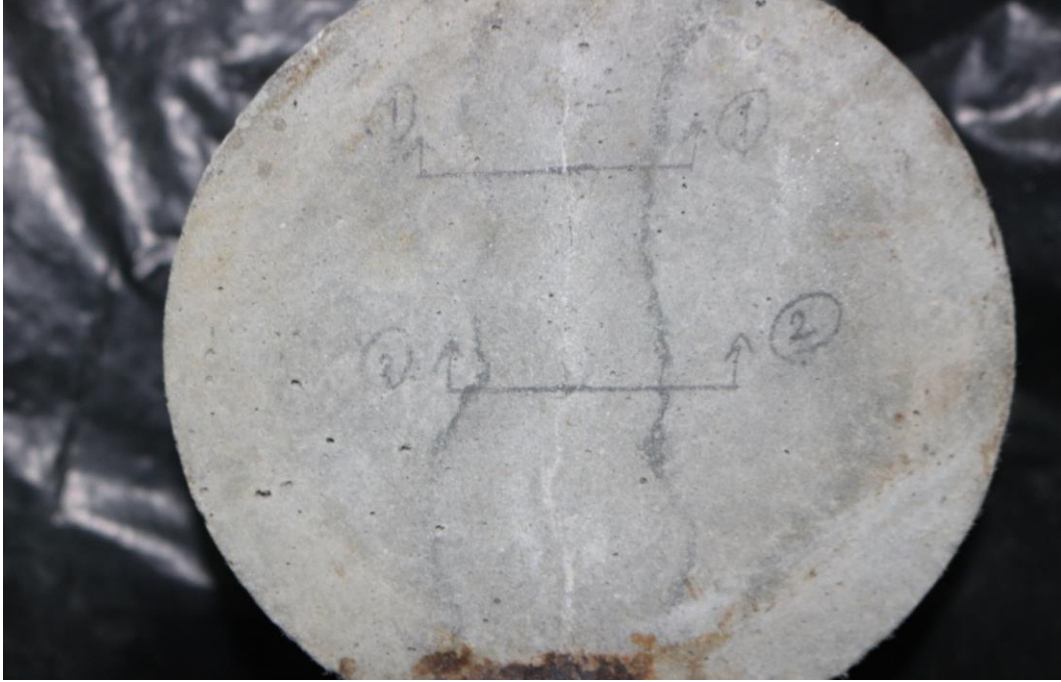
Şekil 4.65 Hasarlı ECC-KNT/NS kiriş numunesinin kendiliğinden iyileşmiş çoklu çatlakları

Göröleceğı üzere çatlak sayısının oldukça çok ve dar açıklıklarda meydana gelmesi, kendiliğinden iyileşme ürünlerinin daha kararlı ve yaygın olarak numunelere

nüfuz etmesine ve sonuç olarak mekanik geri kazanımların tam anlamıyla mümkün olmasını sağlamıştır. Şekil 4.66-Şekil 4.70’te verilen görüntüler tez genelinde daha iyi kendiliğinden iyileşme performansı göstermiş ECC-KNT ve ECC-KNT/NS numunelerine ait görüntülerdir.



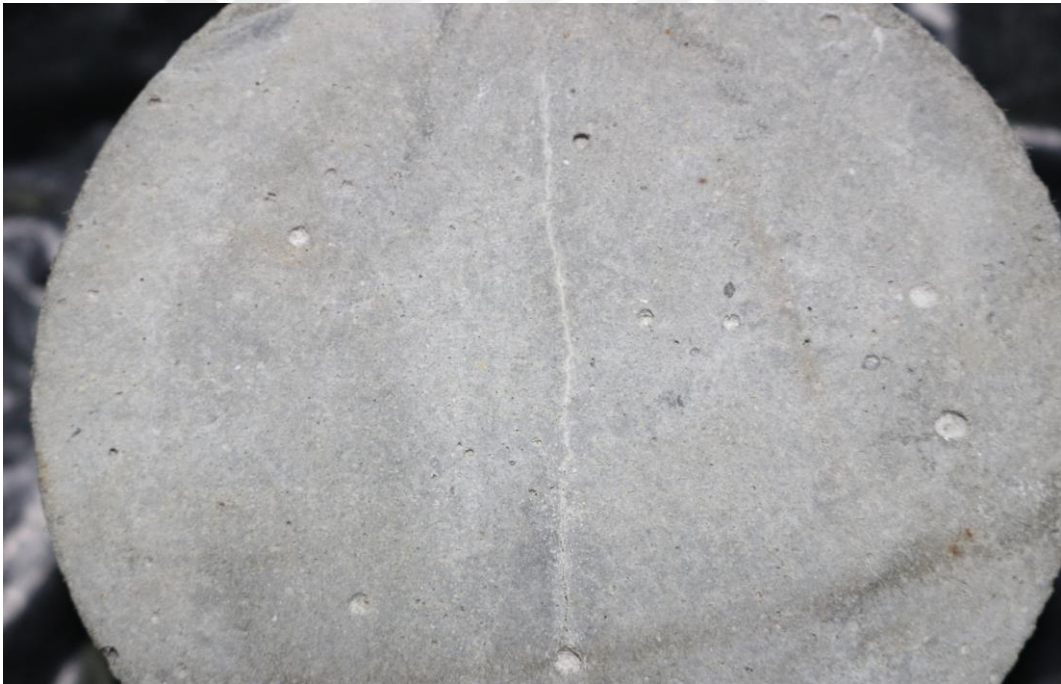
Şekil 4.66 Nano malzemelerle modifiye edilmiş ECC numunelerinin bütun çatlaklarının kendiliğinden iyileşmesi



Şekil 4.67 Nano malzemelerle modifiye edilmiş silindirik ECC numunelerinin çatlaklarının kapanması



Şekil 4.68 Nano malzemelerle modifiye edilmiş silindir ECC numunelerinin geniş açıklıktaki çatlaklarının kendiliğinden iyileşmesi



Şekil 4.69 Nano malzemelerle modifiye edilmiş silindir ECC numunelerinin tam olarak çatlaklarının kapanması



Şekil 4.70 Nano malzemelerle modifiye edilmiş kiriş ECC numunelerinin bütün çatlaklarının kendiliğinden iyileşmesi

4.4. Nano ve Mikro ölçekte Modifiye Edilmiş ECC numunelerin Donma-Çözülme Testi Performansı

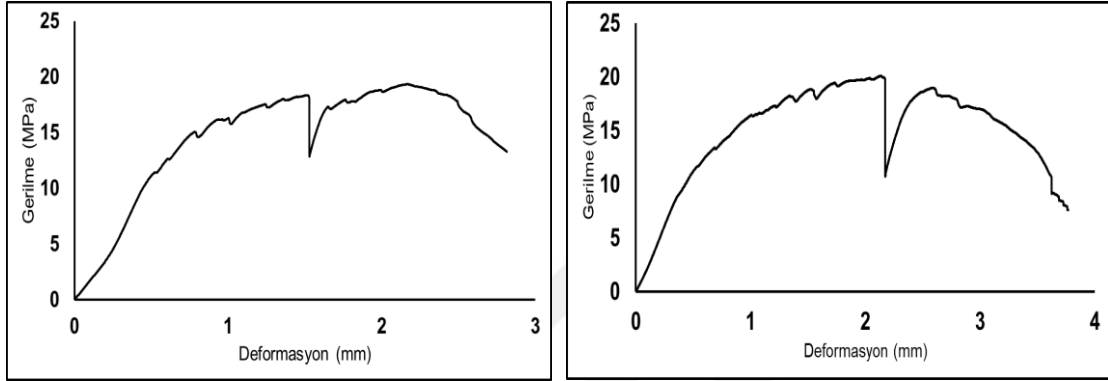
Donma çözülme çevrimleri beton gibi boşluklu ve gevrek çimento esaslı kompozitler için bozucu etkiler oluşturmaktadır. Bu nedenle, don etkisini incelemek amacıyla çimento esaslı kompozitlerin donma-çözülme testleri dayanıklılıklarının performansını gösteren test türlerinden biridir. Betonda oluşan donma-çözülme direnci dayanım kaybı, ağırlık değişimi, genleşme ve temel frekans süresi gibi özelliklere göre değerlendirilmektedir. Nano malzemeler karışımların mikro yapısını etkilediğinden dolayı kontrol karışımları da dahil olmak üzere tez kapsamında üretilen tüm karışımlar donma-çözülme deneyine tabi tutulmuştur. Tez çalışması kapsamında akıllı beton geliştirmek için kendiliğinden hasarların iyileştirilmesi amacıyla üstün mekanik ve fiziksel özelliklere sahip nano malzemelerin yanında bu aşamada mikro ölçekte karbon lifler de ECC karışımlarına dahil edilmiştir. Kullanılan karbon liflere ait detaylı bilgiler ve ilgili testlere ait görüntüler daha önce gösterildiğinden bu aşamada tekrar değinilmemiştir. ECC numunelerinin toplamda 300 donma çözülme (D/Ç) çevrimi sonunda ve her 30 D/Ç çevriminin ardından rezonant frekansı (RF) sonuçlarındaki değişimler her bir karışıma ait numune için aşağıda gösterilmektedir (Çizelge 4.13).

Çizelge 4.13 ECC numunelerinin Donma-çözülme sonrası RF testi sonuçları

	14+0	14+30	14+60	14+90	14+120	14+150	14+180	14+210	14+240	14+270	14+300
ECC-Ref. 1.numune	1602	1563	1563	1563	1523	1523	1523	1523	1487	1452	1304
ECC-Ref. 2.numune	1602	1563	1563	1523	1484	1484	1523	1523	1357	1305	1244
ECCKL/NS. 1.numune	1602	1602	1602	1602	1563	1602	1602	1602	1605	1598	1584
ECC-KL/NS. 2.numune	1602	1602	1563	1602	1563	1563	1563	1563	1608	1611	1601
ECC-KNT/NS 1.numune	1367	1328	1289	1289	1289	1250	1250	1250	1250	1245	1436
ECC-KNT/NS 2.numune	1367	1367	1289	1289	1289	1250	1289	1250	1244	1258	1232
ECC-KL 1.numune	1641	1641	1602	1641	1602	1602	1602	1602	1598	1566	1566
ECC-KL 2.numune	1641	1641	1641	1641	1641	1641	1641	1641	1620	1605	1588
ECC-KNT 1.numune	1172	1133	1133	1133	1133	1133	1172	1133	1120	1115	1018
ECC-KNT 2.numune	1018	1172	1172	1172	1172	1172	1188	1172	1150	1150	1144
ECC-NS 1.numune	1250	1172	1133	1172	1172	1172	1211	1172	1148	1146	1146
ECC-NS 2.numune	1172	1133	1172	1172	1172	1172	1172	1160	1160	1154	1145

D/Ç çevrimleri sonrasında muhtemel çatlakların meydana gelmesi ile RF değerlerinde zaman içerisinde düşüşlerin yer alması beklenen bir durumdur. Ancak, genel olarak bakıldığında karışım tipinden bağımsız olarak RF değerlerinde bazı dalgalanmaların olduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen değerlerde gözlemlenen bu dalgalanmalar her ne kadar yanıltıcı gibi anlaşılabilir de tahribatsız test yöntemlerinden biri RF testi diğer yöntemlerine kıyasla bu şekilde daha değişken sonuçlar verebilmektedir. RF değerlerinin D/Ç döngüleri sonrasında belirgin bir şekilde düşüş göstermemesi geliştirilen tüm karışımların (özellikle nano malzemelerle modifiye edilmiş karışımlar) dona dayanıklılıklarının oldukça yüksek seviyede olduğu ile ilgili fikir vermektedir. Nitekim bu durum D/Ç çevrimlerinin ardından yapılan ağırlık kaybı ve temel mekanik özelliklerde elde edilen değişimler göz önüne alındığında da doğrulanmıştır. Tez kapsamında üretilmiş olan tüm karışımlarda matris içerisinde meydana gelen boşluklar arasındaki mesafe çok küçük olmasından dolayı da donma çözülme etkisi numuneler üzerinde tam olarak gözlemlenmemiş olabilir (Attigbe, 1996, Girska ve Skripkiūnas, 2017). Karışımlarda kullanılan nano malzeme tipine bağlı olmaksızın 300 D/Ç çevrimi sonunda numunelerin yüzeylerinde herhangi bir pullanma ya da hasar belirtisi kaydedilmemiştir. Nano malzemelerin ECC karışımlarında kullanılması donmaya karşı

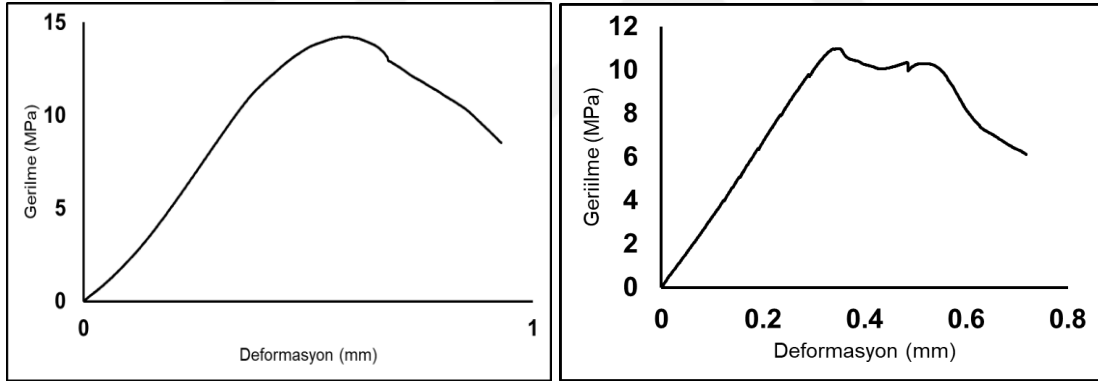
direnci artmaktadır. Çünkü çok küçük tane boyutuna sahip olan bu tanecikler sadece puzolanik reaksiyonu artırmamakta ayrıca dolgu etkisiyle de çimento hamurunun mikroyapısını yoğunlaştırmakta ve betonun gözenek yapısını geliştirmektedir. 300 D/Ç çevrimi sonunda yapılan mekanik testlerin sonuçları Şekil 4.71-4.76 arasında verilmiştir. Mekanik davranışlara ilişkin açıklamalar bir önceki bölümde çok detaylı olarak verildiğinden bu aşamada tekrar benzer neden-sonuç ilişkilerine değinilmemiştir.



a) 1. Numune

b) 2. Numune

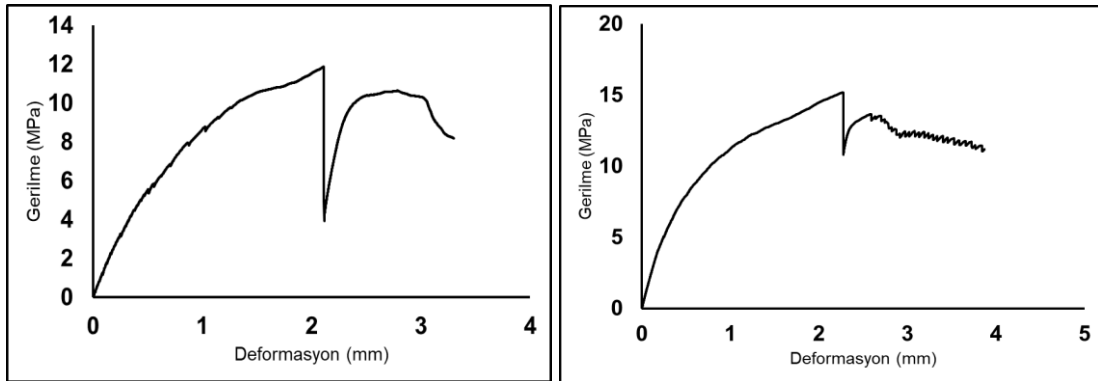
Şekil 4.71 ECC-Ref karışımının donma çözülme sonrası mekanik davranışı



a) 1. Numune

b) 2. Numune

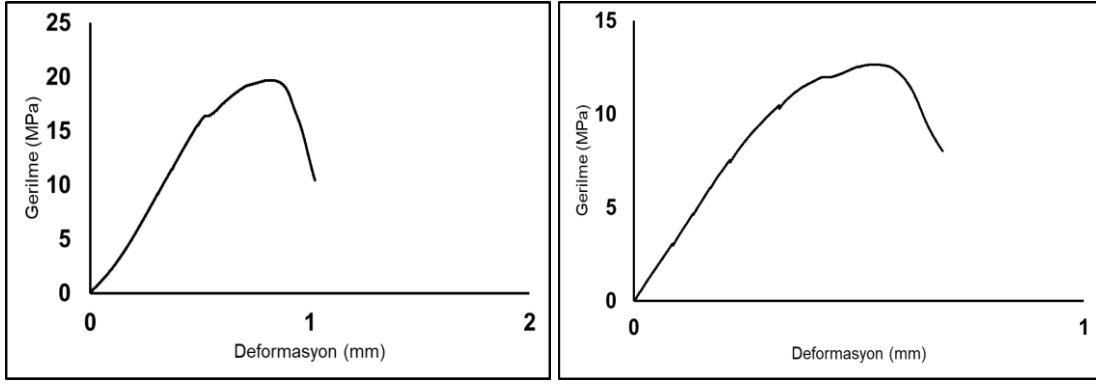
Şekil 4.72 ECC-KL/NS karışımının donma çözülme sonrası mekanik davranışı (1. ve 2. numuneler)



a) 1. Numune

b) 2. Numune

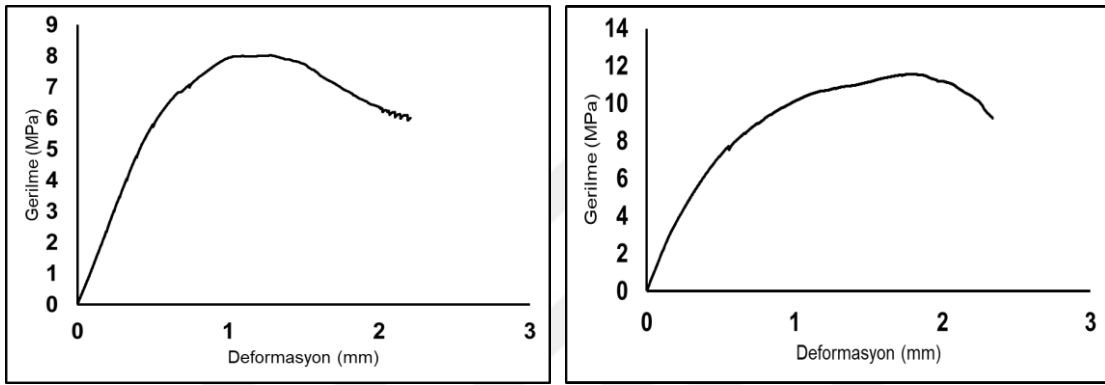
Şekil 4.73 ECC-KNT/NS karışımının donma çözülme sonrası mekanik davranışı (1. ve 2. numuneler)



a) 1. Numune

b) 2. Numune

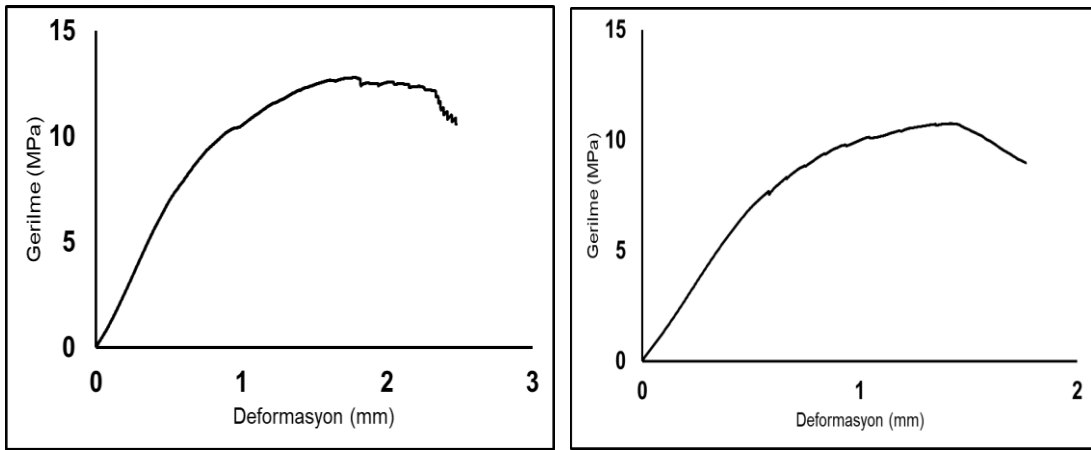
Şekil 4.74 ECC-KL karışımının donma çözülme sonrası mekanik davranışı (1. ve 2. numuneler)



a) 1. Numune

b) 2. Numune

Şekil 4.75 ECC-KNT karışımının donma çözülme sonrası mekanik davranışı (1. ve 2. numuneler)



a) 1. Numune

b) 2. Numune

Şekil 4.76 ECC-NS karışımının donma çözülme sonrası mekanik davranışı (1. ve 2. numuneler)

Tüm karışımlarda zamanla numune ağırlıklarında artışlar gözlemlenmiş olmasına rağmen ağırlıklardaki artışlar zaman içerisinde daha stabil bir hal almıştır. Farklı karışımların neredeyse tamamında gözlemlenen bu durum, numunelerin don etkisi sonunda suya doygun hale gelmeleri ile ilgilidir. Her ne kadar suya doygun numunelerin ileri D/Ç çevrimleri sonunda don hasarı nedeniyle ağırlık kayıpları sergilemeleri beklenmiş olsa da bu durumun az gerçekleşmiş geliştirilen karışımların

don hasarına olan dirençlerini ortaya koymaktadır. Kısaca sonuçlar, numunelerin zaman içerisinde ağırlıklarının devamlı artması don hasarından ziyade ilerleyen yaşlarda numune boşluklarının daha çok suyla dolduğunu göstermektedir. ECC numunelerinin toplamda 300 donma çözülme (D/Ç) çevrimi sonunda ve her 30 D/Ç çevriminin ardından kontrol edilen ağırlıkları karışıma ait numune için aşağıda gösterilmektedir (Çizelge 4.14).

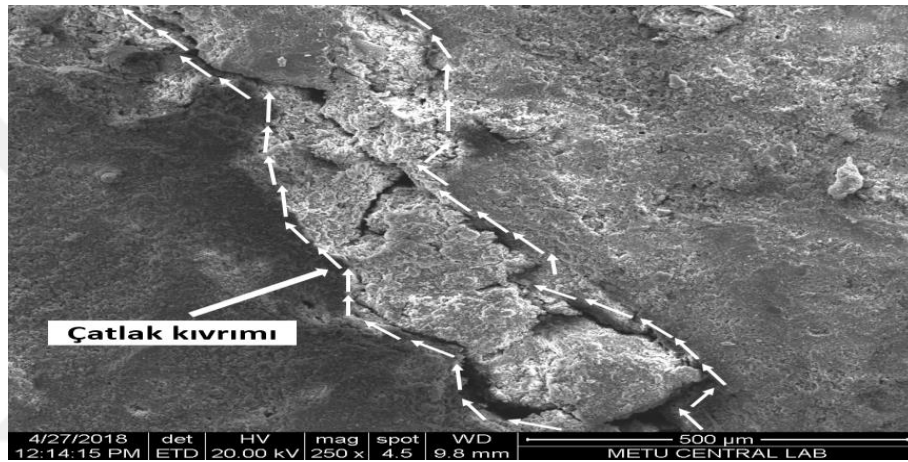
Çizelge 4.14 ECC numunelerinin Donma-çözülme sonrası RF testi sonuçları (gram)

	14+0	14+30	14+60	14+90	14+120	14+150	14+180	14+210	14+240	14+270	14+300
ECC-Ref. 1.numune	4559	4499	4499	4600	4601	4601	4601	4593	4593	4583	4583
ECC-Ref. 2.numune	4583	4563	4561	4560	4507	4557	4564	4566	4565	4567.5	4567
ECCKL/NS. 1.numune	4567	4567	4670	4670	4634	4668	4673	4677	4675	4679	4658
ECC-KL/NS. 2.numune	4667	4668	4576	4577	4577	4579	4580	4582	4579	4580	4562
ECC-KNT/NS 1.numune	3794	3697	3780	3779	3785	3784	3788	3791	3791	3793	3793
ECC-KNT/NS 2.numune	3713	3772	3702	3706	3710	3712	3715	3715	3714	3717	3680
ECC-KL 1.numune	4636	4633	4633	4639	4615	4637	4640	4642	4641	4643	4624
ECC-KL 2.numune	4706	4712	4712	4713	4714	4715	4714	4715	4713	4713	4697
ECC-KNT 1.numune	3391	3360	3347	3336	3309	3323	3315	3316	3305	3297	3256
ECC-KNT 2.numune	3375	3330	3319	3308	3308	3302	3298	3300	3297	3298	3298
ECC-NS 1.numune	3298	3913	4049	3911	3910	3919	3917	3922	3918	3926	3881
ECC-NS 2.numune	3945	4056	3909	4046	4035	4039	4038	4030	4037.5	4041	3993

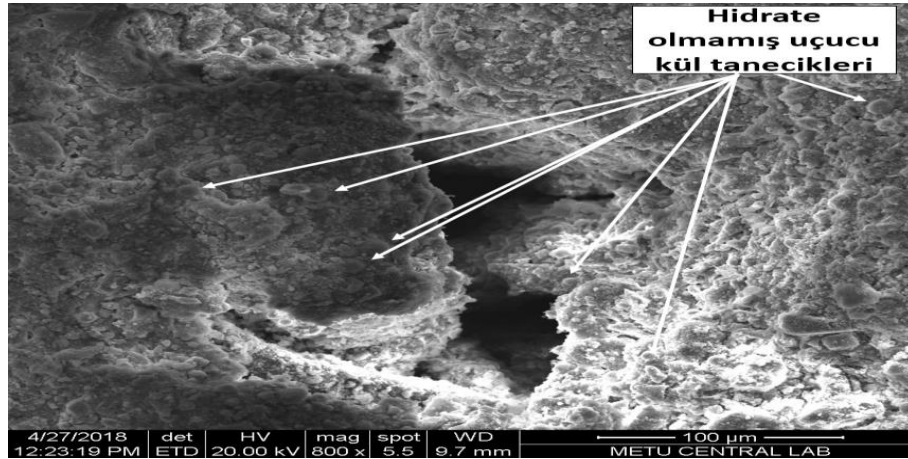
4.5. ECC numunelerinin Mikro Yapısal Karakterizasyonu

Tez çalışmasının bu bölümünde daha önce ilgili kısımların SEM/EDX ve TGA analizleri ile aktarılan bölümlerine ilave olarak kendiliğinden iyileşmiş çatlakların tamamı üzerinden yürütülen SEM ve XRD sonuçları verilmiş ve mikro yapı ile ilgili genel bulgular değerlendirilmiştir. Analizler kiriş ve silindir numunelerin yüzey ve iç kısımlarından alınan kendiliğinden iyileşmiş numuneler gerçekleştirilmiştir. Bilindiği üzere yapısal malzemenin karakteristik özellikleri daha özeldir o malzemenin mikro yapısına ve mikro yapıyı etkileyen gelişmelere bağlıdır. Daha önce yapılan çalışmalar çimento esaslı kompozitlerin mikro yapısal analizlerini SEM ile birlikte X-ışınları ile

tomografik olarak analiz edilebildiğini göstermiştir (Gallucci ve diğerleri, 2007). Her ne kadar SEM analizi malzemenin yüzeyi ile ilgili bir fikir verse de araştırmacılar için pek çok bilgi sağlayabilmektedir. Bunun yanında XRD tekniği ile numuneye ait kimyasal ve yapısal olarak çok detaylı bilgilere ulaşmak mümkündür. Bu bölümde, daha önceki kısımlarda elde edilen bulguların mikro yapısal çalışmalarla desteklenmesi amacıyla, kendiliğinden iyileşen ECC numunelerinin SEM ve XRD sonuçları verilmiş olup, sonuçlar detaylı olarak ilgili numune analizlerinin altında yorumlanmıştır. İlk olarak aşağıda verilen Şekil 4.77 ve 4.78’de sırasıyla ECC-Ref karışımına ait SEM ve XRD sonuçları gösterilmiştir.

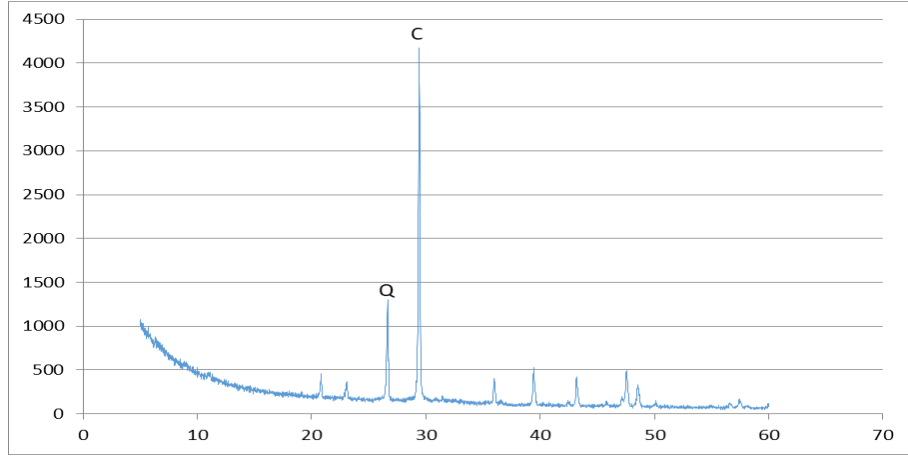


a) 500 µm

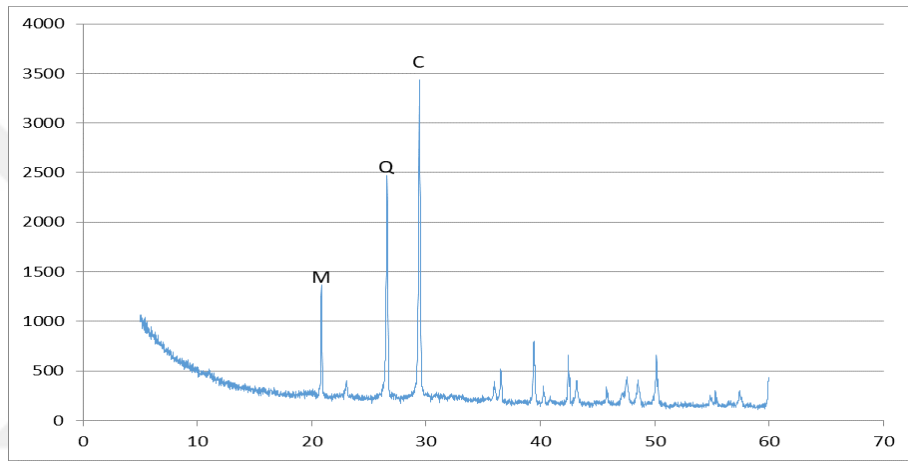


b) 100 µm

Şekil 4.77 ECC-Ref numunesinin görüntüsü (Taramalı elektron mikroskobu, SEM)



(a) çatlak yüzeyi (XRD)



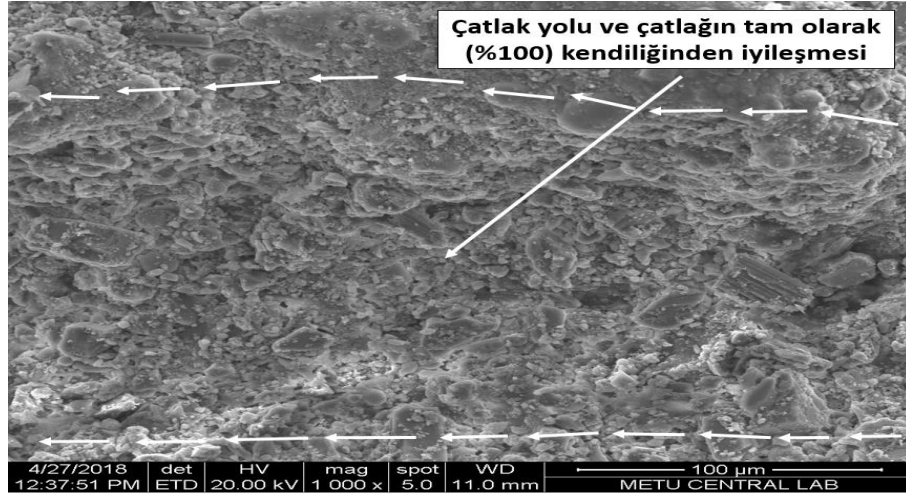
(b) çatlak içi (XRD)

Şekil 4.78. ECC-Ref. numunesinin iyileşmiş çatlak yüzeyi (a) ve (b) çatlak içi XRD sonuçları

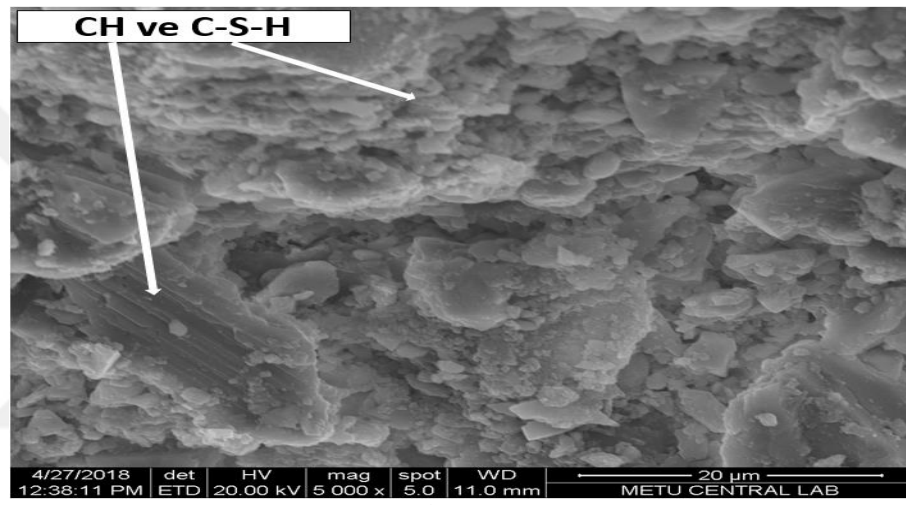
SEM görüntülerine bakıldığında, ECC numunelerinin kontrol numuneleri olsa dahi dar açıklıklı olmak şartıyla çatlaklarını tam olarak kapatma potansiyeli bulunmaktadır. Ancak mekanik olarak tekrar yüklemelerde, ECC numunelerinin iyileşen çatlak bölgelerinden tekrar açılması ancak kendiliğinden iyileşme ürünlerinin kalitesi ile açıklanabilir. Tekrar yükleme sonunda eğilme yükleri altında ECC numunelerinin aynı bölgeden tekrar çatlaması iyileşme ürünlerinin daha çok sadece çatlak yüzeyinde sınırlı olması ile ilişkilidir. Bulguları desteklemek adına Şekil 4.77'deki SEM görüntüsünde, ECC-Ref numunesinin çatlak yüzeyinde hidrate olmamış uçucu kül tanecikleri küresel şekilleri ile rahatlıkla tespit edilebilmektedir. 90. günde gerçekleştirilen testler sonucu, tekrar açılan çatlaklar muhtemeldir ki hidrate olmamış bağlayıcı malzemeler nedeniyle, her ne kadar az da olsa, su kürü altında bir miktar daha hidratasyon ürünleri oluşturarak dayanıma daha fazla katkı yapabilir. Şekil 4.78'de verilen XRD sonuçları değerlendirildiğinde ise, iyileşmiş çatlak yüzeyinden kazınan

örneklere göre Ca piklerinin kalsiyum karbonat ürünleri olduğu anlaşılmaktadır. Kuvars piklerinin ise çatlak kazıma sırasında iyileşme ürünleri ile karışan silika kumu olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu pik (Q) her ne kadar sınırlı da olsa C-S-H ve C-A-S-H oluşumu olabilir.

Şekil 4.79’da ECC-KNT/NS numunelerinin SEM görüntüleri verilmiştir. ECC-KNT/NS numunesine ait görüntü SEM altında incelendiğinde iyileşme ürünlerinin referans numunelere kıyasla daha yoğun ve daha kararlı iyileşme ürünleri olduğu gözlemlenmektedir. Elde edilen SEM görüntülerine göre iyileşme ürünlerinin daha sıkı (kompakt) olması KNT’nin ECC’nin karakteristik özelliğini destekler nitelikte (daha dar açıklıklı çatlaklar oluşturmaya yardımcı olması) olmasıyla da ilişkilidir. Bilindiği üzere dar açıklıklı çatlakları tamamen (%100) iyileşmesi daha mümkün olabilmektedir. Ayrıca daha önce açıklandığı gibi, dar açıklıklarda iyileşme ürünleri sadece geçirimsizlik özellikleri ile değil aynı zamanda mekanik olarak daha iyi kendiliğinden iyileşme imkanı sağlayabilmektedir. Önceki bölümlerde verilen mekanik testler sonucu, hasarlı ECC-KNT/NS numunelerinin hasarsız ECC numuneleri gibi mekanik özellikleri tekrar geri kazanmasının nedeni mikro yapı analizleri ile daha iyi anlaşılmıştır. Analiz edilen numunelerde de suyun varlığında NS (ilerleyen yaşlarda az da olsa bir miktar NS’in bünyede bulunduğu düşünülmektedir) ve UK’ler birlikte puzolanik reaksiyonlara katılarak ikincil hidratasyon ürünleri olarak yeni C-S-H jelleri meydana getirmiştir. Ayrıca Şekil 4.80’de verilen XRD analizleri sonuçlarına bakıldığında, kuvars piklerinin sadece çatlak içlerinden alınan örneklerde değil aynı zamanda çatlak yüzeyinden alınan iyileşme ürünlerinde de gözlemlenmesi analizde sadece silika kumunu değil aynı zamanda da C-S-H jellerinin de ön yükleme sonrası çatlaklarda geliştiğini göstermektedir. Bilindiği üzere KNT’ler inert malzemeler olup ECC bünyesinde sürekli olarak bulunmaya devam etmektedir. Ön yükleme sonrası çatlak içinde ve yüzey bölgelerinde, ikincil C-S-H jellerinin de çatlak kenarlarında bulunan KNT’ler üzerinde gelişerek çekirdeklenme etkisi ile daha yoğun bir C-S-H formasyonu oluşturduğu anlaşılmaktadır. KNT üzerinde çekirdeklenen yeni C-S-H jelleri ve daha yoğun meydana gelen kalsit ürünleri, numunelerinin ilk çatlak çekme dayanımını ve nihai çekme dayanımlarını geliştirerek yeni çatlak bölgeleri oluşmasına zemin hazırlamıştır. KNT’ler NS ile kombine edilerek, suyun varlığında daha kararlı iyileşme ürünleri ile tekrar yükleme altında çatlak köprüleme derecesini arttırarak mekanik olarak yüksek dereceden (%100’den fazla) kendiliğinden iyileşmeyi sağlamıştır.

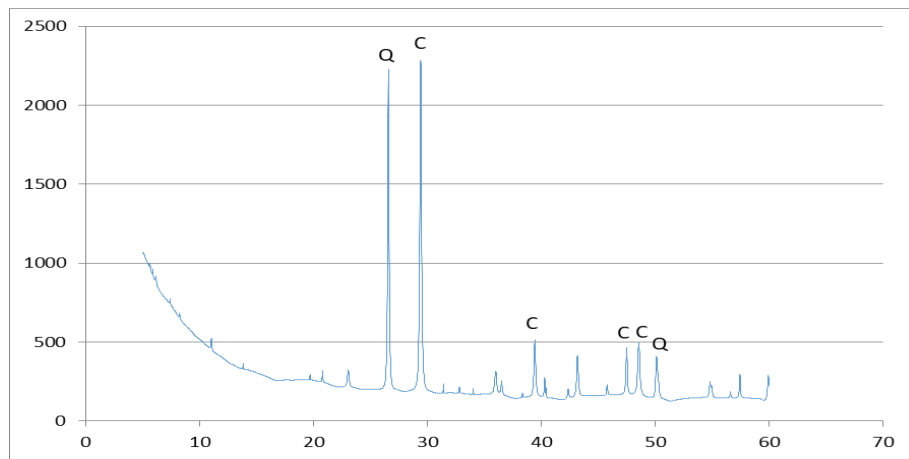


a) 100 μm



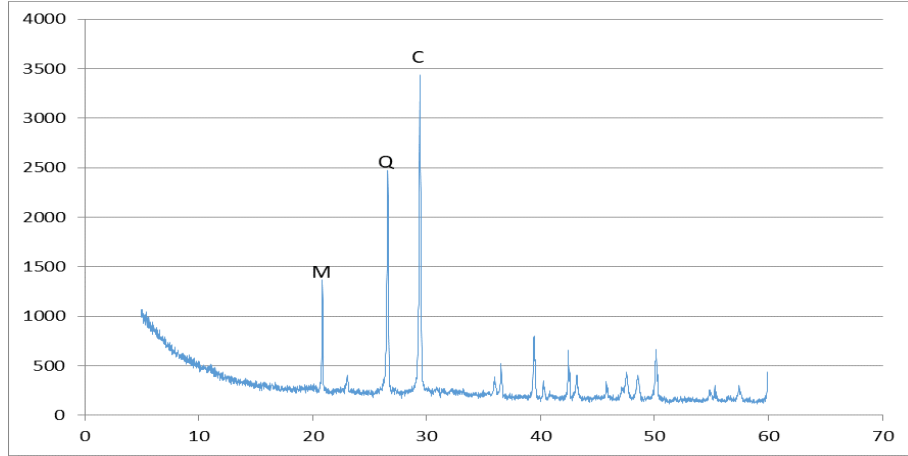
b) 20 μm

Şekil 4.79 ECC-KNT/NS numunesinin görüntüsü (Taramalı elektron mikroskobu, SEM)



(a) çatlak yüzeyi (XRD)

(devamı)

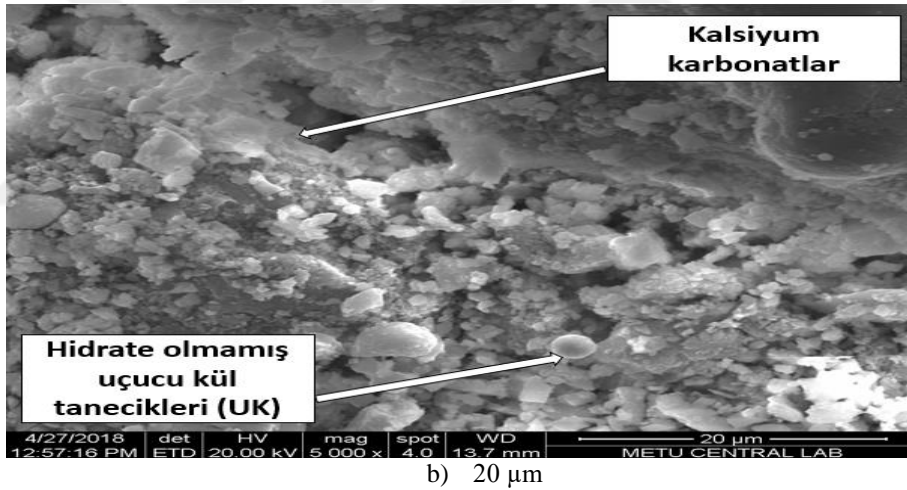
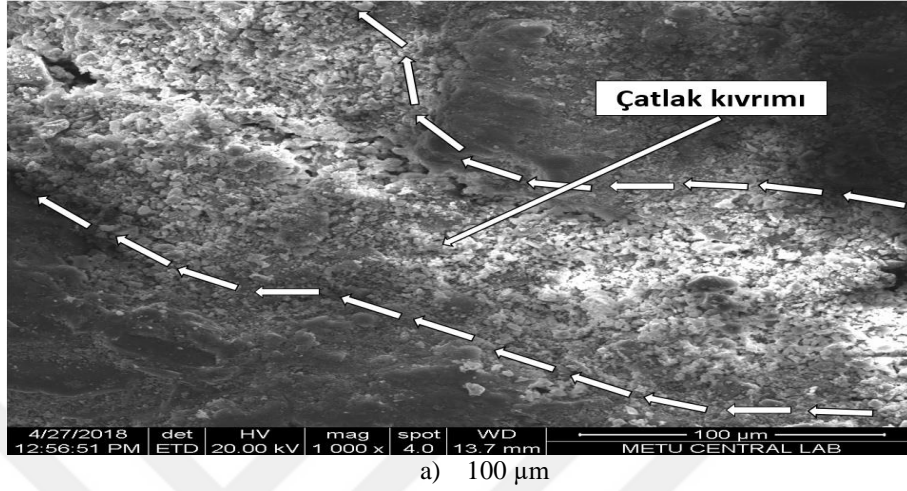


(b) çatlak içi (XRD)

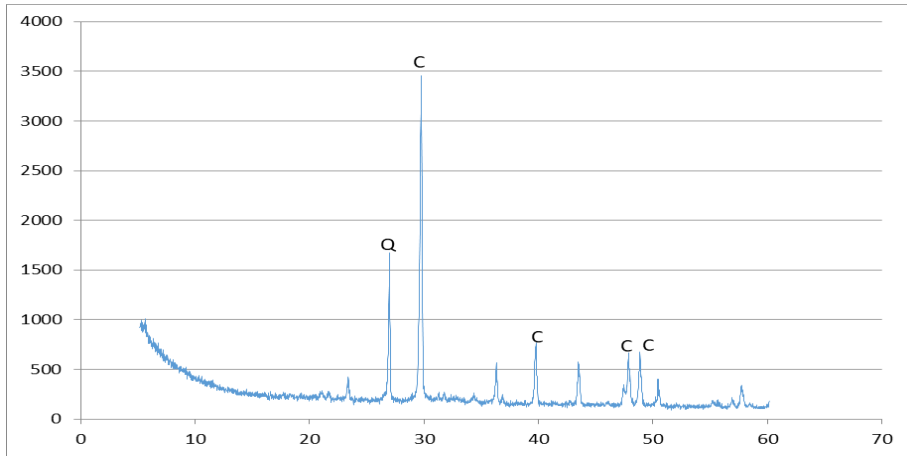
Şekil 4.80 ECC-KNT-NS numunesinin iyileşmiş çatlak yüzeyi (a) ve (b) çatlak içi XRD sonuçları

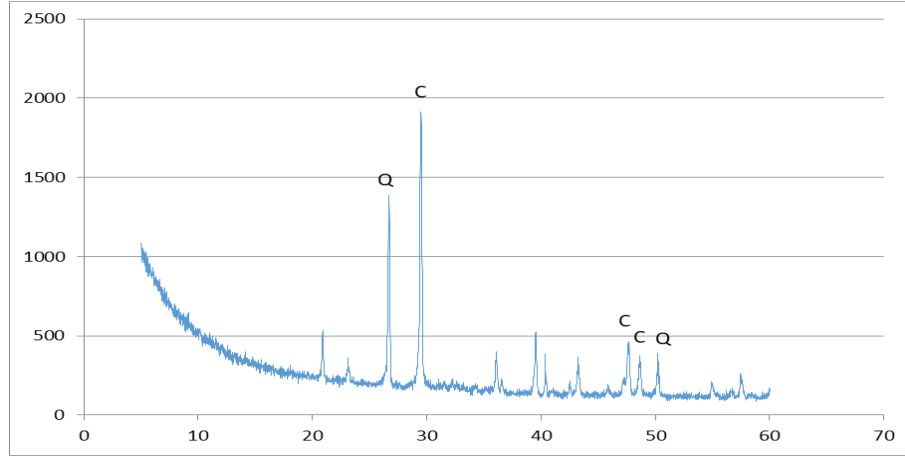
Şekil 4.81’de ECC-KNT numunesine ait SEM görüntüleri de verilmiştir. Hasarlı ECC-KNT numunesinin iyileşme ürünleri incelendiğinde, kalsiyum karbonatların iyileşme ürünleri olarak görmek mümkündür. Aynı şekilde henüz hidrate olmamış uçucu kül tanecikleri ileriki yaşlarda hala kendiliğinden iyileşmenin mümkün olabileceğini göstermektedir. Özellikle suyun varlığında CO_2 ’in çözünmesinin çok daha kolay olması CaO reaksiyon sonucu kalsit ürünlerinin oluşmasını kolaylaştırmıştır. Daha önceki bölümlerde açıklanan gerek geçirimsizlik gerekse mekanik özellikler açısından kendiliğinden iyileşmenin KNT içeren karışımlarda referans karışımlara göre daha iyi derecede olması, KNT taneciklerinin dar açıklıklı çatlak oluşumunu desteklemesi ile ilişkilidir. Daha fazla kapanma imkanı olan çatlaklar geçirimsizlik özelliklerini iyileştirirken, aynı zamanda matris içerisinde ikincil hidratasyon reaksiyonlarını (yeni oluşan C-S-H’lar) KNT’ler üzerinde gerçekleştirme imkanı bulmuşlardır. İkincil C-S-H ürünleri, KNT üzerinde meydana gelerek hasarlı ECC-KNT numunelerinin yük transferi kapasitesini arttırarak enerji yutma kapasitesi ve süneklik derecesinde mekanik olarak kendiliğinden iyileşme sağlamıştır. Şekil 4.82’de verilen XRD sonuçları irdelendiğinde yüksek oranda Ca atomunun kalsit oluşumunu gösterdiği anlaşılmaktadır. Ayrıca kuvars atomu daha önce açıklandığı üzere silika kumu kaynaklı olabileceği gibi yeni oluşan C-S-H jellerini de işaret edebilir. Bu noktada KNT taneciklerinin tekil olarak kullanıldığı ECC karışımlarında çatlak kenarlarında (iç bölgede ve yüzeyde) KNT’lerin eski matris bünyesi ile kendiliğinden iyileşmiş ürünler arasında bir sürtünme kuvveti yaratarak tekrar yükleme sırasında meydana gelen çekme yüklerine karşı önemli bir direnç gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu noktada her ne kadar KNT’lerin tekil olarak ECC karışımlarında modifiye edilmesi, kendiliğinden

iyileşmenin kontrol karışımlarına kıyasla geçirimsizlik ve mekanik açıdan çok daha yukarı seviyelere çıkarılmasına imkan sağlasa da; daha önceki bölümlerde elde edilen bulgular ve mikro analizler ışığında KNT ve NS ile birlikte kombine edildiği karışımlardaki iyileşme ürünlerinin daha kararlı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.81 ECC-KNT numunesinin görüntüsü (Taramalı elektron mikroskobu, SEM)

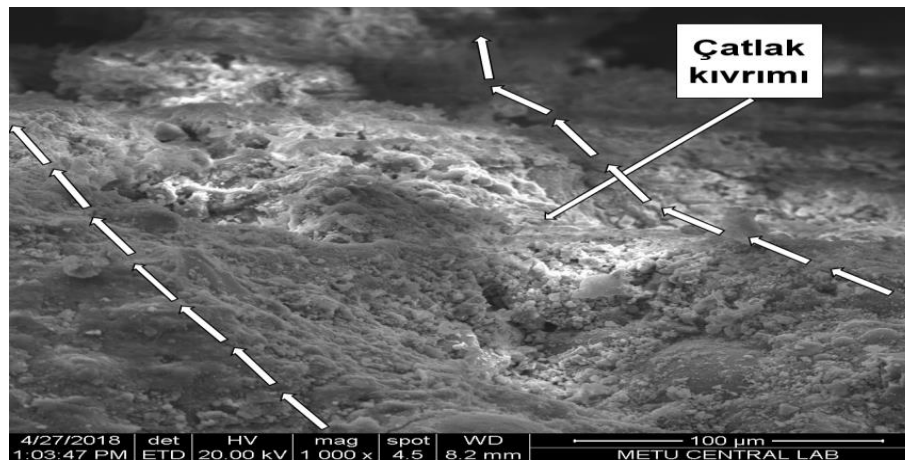




(b) çatlak içi (XRD)

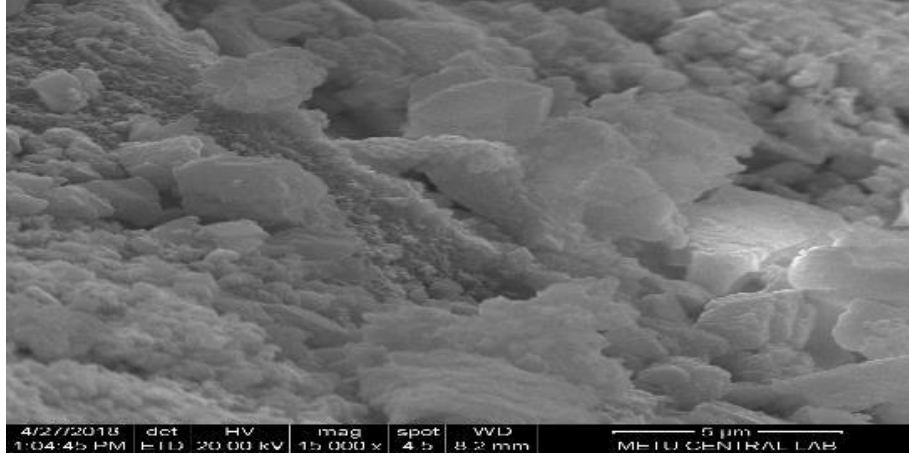
Şekil 4.82 ECC-KNT numunesinin iyileşmiş çatlak yüzeyi (a) ve (b) çatlak içi XRD sonuçları

Şekil 4.83'te verilen ECC-NS numunesine ait görüntü incelendiğinde, diğer karışımlara ait makro ölçekteki görüntülere kıyasla daha geniş çatlak oluşumdaki kendiliğinden iyileşme ürünleri görülmektedir. Söz konusu neden NS varlığında ECC numunelerinin tokluk seviyelerinin artmasına bağlı olarak eğilme yükleri altında daha geniş açıklıklı çatlaklar meydana getirmesidir. Daha önceki bölümlerde çok detaylı olarak açıklandığından bu noktada tekrar yorum getirmeye gerek görülmemiştir. XRD sonuçlarında (Şekil 4.84) görülen yüksek Ca pikleri kendiliğinden iyileşme ürünlerini gösterirken aynı zamanda C-S-H jellerinin de iyileşme ürünü olması yüksek Si ve XRD sonuçlarındaki kuvars atomlarından anlaşılmaktadır.



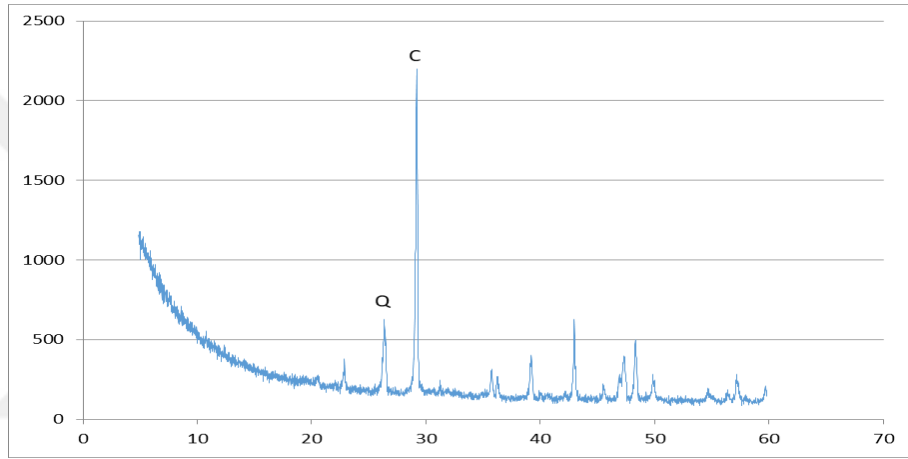
a) 100 µm

(devanı)

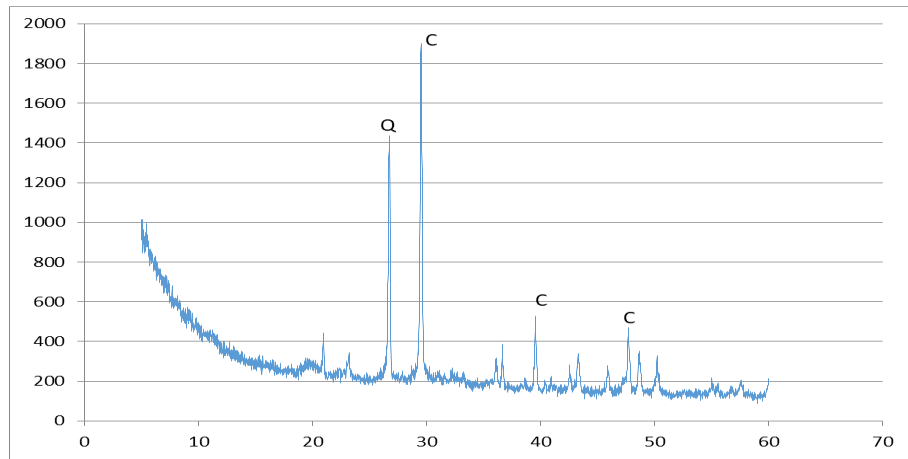


b) 5 μ m

Şekil 4.83 ECC-NS numunesinin görüntüsü (Taramalı elektron mikroskobu, SEM)



(a) çatlak yüzeyi (XRD)



(b) çatlak içi (XRD)

Şekil 4.84 ECC-NS numunesinin iyileşmiş çatlak yüzeyi (a) ve (b) çatlak içi XRD sonuçları

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, ECC karışımlarında bütüncül olarak ele alınan kendiliğinden iyileşme performansı, canlılardaki iyileşme süreçlerine benzer şekilde mimik edilerek (taklit edilerek) nano malzemeler aracılığıyla hasarsız haldeki performans özelliklerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Sonuç olarak, bütün karışımlarda iyileşme ürünlerinin kalsit ve C-S-H jelleri olduğu anlaşılmakla birlikte bu ürünlerin tez kapsamında açıklanan nedenlerle farklı kalitelere meydana gelmesi kendiliğinden iyileşmenin derecesini çok ciddi bir şekilde etkilemiştir. Optimum oranda NS ve KNT kullanımının en homojen karışım teknikleri ile ECC matrislerinde modifiye edilmesi, ağır hasarlı numunelerin daha güçlü kendiliğinden iyileşme mekanizmalarıyla hasarsız haldeki özelliklerine erişmesini, hatta bazı özelliklerinin daha üstün performansta geliştirilmesini mümkün kılmıştır.

Erken yaşlardan itibaren bazı ECC-KNT/NS numuneleri için hasarlı haldeki özellikler hızlı bir zaman dilimi içerisinde hasarsız haldeki performans seviyesine gelebilmektedir. Bunun haricinde, kendiliğinden iyileşme özelliklerinin belirlenmesi testlerinden bağımsız olarak gerçekleştirilen mekanik testlerde, nano malzemeler ECC numunelerin temel mühendislik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmişlerdir. Nano malzemelerle modifiye edilen karışımların eğilme dayanımları, kırılma anındaki sehim kapasiteleri, akma noktasındaki sehim kapasiteleri, başlangıç rijitlik değerleri, süneklik değerleri ve enerji yutma kapasiteleri ciddi bir şekilde referans numunelerden daha iyi sonuç göstermiştir. Sonuçlar, farklı mühendislik özellikleri için tekil olarak kullanılan nano malzemelerin kontrol karışımlarına kıyasla çok daha iyi performans elde edildiğini gösterse de, kendiliğinden iyileşme kalitesi ve etkinliği ile birlikte düşünüldüğünde, KNT ve NS malzemelerinin birlikte modifiye edilerek ECC karışımları geliştirmenin üstün mekanik, geçirimsizlik ve kendiliğinden iyileşme performansı ile sonuçlandığı anlaşılmıştır. Daha dar açıklıklı çatlakların ve suyun varlığında KNT ile birlikte kombine edilen NS tanecikleri, gerek kalsit gerekse devam eden puzolonik reaksiyonlar vasıtasıyla çatlak bölgelerinde ikincil C-S-H oluşumunu her yaşta gerçekleştirmiştir. NS ile geliştirilen ECC karışımlarında daha çok gözlemlenen gelişmeler sırasıyla aşağıda verilmiştir.

- i) çekirdeklenme bölgeleri,

- ii) puzolanik reaksiyonlar sonucu daha çok C-S-H jelleri oluşturma,
- iii) kristalizasyon kontrolü ve
- iv) mikro/nano düzeyde dolgu etkisi tespit edilmiştir. NS içeren ECC matrislerinin sözü edilen mekanizmalarla modifiye edilmesi, ECC numunelerinin mikro yapısındaki kazanımlara bağlı olarak mekanik özelliklerinde iyileşmeler meydana getirmiştir.

KNT'ler, tez kapsamında üretilen ECC numunelerini daha düşük ilk çatlak dayanım seviyeleri ve daha yüksek nihai kırılma sehim kapasiteleri göstermesine bağlı olarak yüksek süneklik indeksleri elde edilmesini sağlamıştır. KNT'ler, diğer karbon esaslı malzemelere kıyasla literatürde rapor edilen ECC'ler için yüksek ilk çatlak dayanımının aksine, mekanik özellikler açısından (süneklik indeksi) üstün niteliklere ve dar açıklıklı çatlak gelişimini tetikleyerek ağır hasarlı ECC numunelerini hasarsız özelliklerine geri getirmesinde yardımcı olmuştur.

Tez kapsamında, nano silika (NS), çok duvarlı karbon nanotüp (KNT) ve her iki nano malzemenin (KNT ve NS) birlikte kullanıldığı ECC karışımlarının kendiliğinden iyileşme ve kendiliğinden algılama karakteristikleri detaylı olarak araştırılmıştır. PVA liflerinin toplam hacimce %1.1 kullanıldığı nano malzemelerce takviye edilen ECC numunelerinin çatlak açıklıklarının 100 µm'dan daha geniş olması amaçlanmıştır. Numunelerin kendiliğinden algılama davranışları karışımların taze haldeyken içine gömülen pirinç elektrotlar sayesinde belirlenmiştir. Kendiliğinden iyileşme oranları ED hesaplamaları ile birlikte video mikroskop aracılığıyla çatlakların incelenmesi ile gerçekleştirilmiş ve aşağıda sıralanan sonuçlar elde edilmiştir:

- ECC-Ref numunelerine kıyasla bütün kür yaşlarında farklı nano malzeme takviyesi daha yüksek ortalama basınç dayanımı ile sonuçlanmıştır. KNT ve NS malzemelerinin beraber kullanıldığı karışımlarda tekil KNT ve NS içeren karışımlara göre basınç dayanımı daha yüksek elde edilmiştir.
- Her bir kür yaşının sonunda ECC-Ref numunelerinin ED değerleri ECC-NS numunelerinden dahi daha az elde edilmiştir. Bu sonuç, daha çok farklı kompozisyonlardaki ECC numunelerinin boşluk solüsyonu karakteri ile ilgilidir.
- Ön yükleme numunelerde farklı ED sonuçlarına yol açmış ve bu sonuçlar kullanılan nano malzeme ve çatlak genişliği ile ilişkili olmuştur. ECC-KNT

numuneleri hasara karşı en çok cevap veren numune tipi olurken bu karışımı sırasıyla, ECC-NS/KNT, ECC-NS ve ECC-Ref karışımları takip etmiştir.

- Nano malzemeli ECC numunelerinin daha belirgin bir kendiliğinden iyileşme performansı sergilediği farklı çatlak tiplerinden anlaşılmaktadır. Böylelikle daha geniş çatlaklar nano malzemelerin varlığında daha kısa sürede iyileşmiştir. Çatlak kapanma oranları dikkate alındığında ECC-NS/KNT numuneleri en iyi performansı göstermiş olup bu karışımı sırasıyla ECC-KNT, ECC-NS ve ECC-Ref karışımları takip etmiştir.
- Farklı nano malzemelerin varlığında nihai durumda (97.gün) oluşan kendiliğinden iyileşme ürünleri başta NS ve KNT içeren karışımlarda olmak üzere oldukça yoğundur. Kendiliğinden iyileşme ürünlerinden elde edilen EDX analizleri ECC-NS numunelerinin daha yüksek Ca/Si oranına sahip olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, NS malzemesinin KNT ve NS/KNT'ye kıyasla kendiliğinden iyileşme süresince daha porozitesi yüksek C-S-H jelleri oluşturduğunu doğrulamaktadır. TG/DTG analizleri diğer karışımlara kıyasla ECC-NS/KNT numunelerinde daha yüksek miktarda CaCO₃ kütle kaybı meydana geldiğini göstererek kendiliğinden iyileşmenin daha nitelikli gerçekleştiğini doğrulamaktadır.
- ECC karışımlarında düşük su/çimento oranı kullanılması, yüksek oranda mineral katkı (UK), nano malzeme ve fuller eğrisine çok yakın derecede bir agrega gradasyonunun tercih edilmesine bağlı olarak çok düşük seviyede porozite sahip numunelerin RF değerlerinde belirgin bir farklılık elde edilememiştir.
- Tahribat, numune yüzeylerinde pullanma ve ağırlık kaybı gibi bir değişim meydana gelmeden karışımların 60 D/Ç çevrimine kadar ağırlıklarında artış kaydedilmiştir. Nitekim bu durum sonuç matris içindeki mikro/nano düzeydeki çatlaklara suyun dolması ile yorumlanmıştır. ECC karışımların ağırlıklarında deformasyona bağlı bir kaybın meydana gelmemiş olması numunelerin don hasarına karşı dirençli olarak dizayn edildiğini göstermektedir.

5.2 Öneriler

Bilindiği üzere kalsiyum karbonat gibi iyileşme ürünlerinin çatlaklarda daha çok ve yoğun şekilde kendiliğinden iyileşme ürünü olarak meydana gelmesi için Ca²⁺ iyonlarının sertleşmiş hidratasyon ürünlerinden sızarak çatlak bölgelerine gelmesi ve bu

arada mevcut karbondioksit ile reaksiyona girmesi gerekmektedir. Suyun var olmadığı durumlarda söz konusu Ca^{2+} sızıntısı mümkün olmamaktadır. Gaz formundaki karbondioksit, kalsiyum hidroksit ile yüksek bağıl nem ve uzun sürelerde reaksiyona girmektedir. Su varlığında ise, karbondioksit daha yüksek oranlarda çözülmüş gaz ve bikarbonat solüsyonu olarak mevcut olmaktadır. Bu durum laboratuvar ortamındaki hava kürünün daha sınırlı karbondioksit muhtevası taşıdığını göstermektedir. Ayrıca hidrate olmamış çimento taneciklerinin hidratasyonu su kürü altında daha hızlı ilerlemektedir. Bu nedenlerden dolayı bütün hasarlı numuneleri su kürü altında test edilen ECC karışımlarımız için hava kürü ile de test etmek ilerleyen çalışmaların konusu olarak düşünülebilir.

Hızlı, kararlı ve daha yüksek dereceden kendiliğinden iyileşme performansı boşluk suyu solüsyonunun yüksek pH derecesi ile korelasyon içerisinde görülebilir. Bilindiği üzere çimento esaslı sistemlerde boşluk solüsyonu domine eden C-S-H jelleri ile beraber kalsiyum hidroksit ve alkalilerin pH dereceleridir. Her ne kadar başlangıçta yüksek alkali ortam bünyede mevcut olsa da, ilerleyen yaşlarda kalsiyum hidroksitin tüketilmesi pH derecesini aşağıya çekmektedir. Bu nedenle kendiliğinden iyileşme kalitesi ve etkinliğini bütün yaşlarda araştırmak oldukça önemlidir. Her ne kadar yüksek oranda silis içeren NS içerikli karışımlar yukarıda açıklanan nedenlerle pH derecesinin düşmesine (azalan kalsiyum hidroksit nedeniyle) bağlı olarak daha az kendiliğinden iyileşme imkanına sahip olacakları düşünülse de, NS'in hâlâ bünyede bulunduğu durumlarda (ileri yaşlarda) dahi uçucu kül tanecikleri ile birlikte suyun varlığında daha güçlü iyileşme ürünleri oluşturulabilir.

NS'ye benzer şekilde KNT'ler de çekirdeklenme ve dolgu etkisi ile ECC numunelerinin mikro yapısal özelliklerini iyileştirmiştir. Ancak, söz konusu etkinin nano malzemelerin ECC karışımlarına homojen olarak ilavesi ile çok yakından ilişkili olduğu unutulmamalıdır. Nano malzemelerin homojen olarak ECC matrislerinde yer almaması bu malzemelerin yüksek yüzey gerilimleri nedeniyle topaklanarak söz konusu sonuçlara bir katkı yapmaktan öte daha kötüleştirilmesi mümkün olabilir.

Nano malzeme içeren hasarlı ECC kırıntı numuneler genel olarak değerlendirildiğinde, ön yüklemenin ardından iyileşen çatlakların yerine komşu yeni çatlakların eğilme yükleri altında da tekrar oluştuğu söylenebilir. Ancak tez

çalışmasındaki deney sonuçları değerlendirildiğinde, belirtilmelidir ki daha dar açıklıklı çatlak genişlikleri geçirimsizlik özelliklerinden ziyade, mekanik özelliklerin geri kazanılmasında daha belirleyici olmaktadır. Özellikle bu noktada söz konusu sınırlı, KNT ve NS içeren ECC numuneler için genel olarak 100 μm 'dan daha az çatlaklarda geçerli olduğunu söylemekte fayda vardır. Çatlak genişliklerinin yaklaşık 100 μm seviyesini aştığı durumlarda tekrar yükleme sonucunda çatlaklar ilk iyileştikleri bölgelerden tekrar açılma yönelimi göstermektedir.

Her ne kadar KNT ve NS ile modifiye edilen ECC numunelerinin kendiliğinden iyileşme performansının araştırılması literatürde bilginiz dahilinde ilk çalışma olması nedeniyle ilave çalışmalar gerektirse de, sonuçlar tekrarlanan yükleme durumlarında mekanik iyileşmenin mümkün olduğunu göstermektedir. ECC-KNT/NS numunelerinin testlerimiz sonucu elde edilen üstün mekanik özellikleri NS ve KNT'nin matris karışımlarına en uygun şekilde modifiye edilmesi ile çok yakından ilişkilidir.

KAYNAKLAR

- Adamson A.W. 1973. "Physical chemistry". 2nd ed., Orlando: Academic Press.
- Al-Dahawi A, Öztürk O, Emami F, Yıldırım G ve Şahmaran M (2016). Effect of mixing methods on the electrical properties of cementitious composites incorporating different carbon-based materials *Constr. Build. Mater.* 104 160-8.
- Al-Dahawi A, Yıldırım G, Öztürk O and Şahmaran M 2017 Assessment of self-sensing capability of Engineered Cementitious Composites within the elastic and plastic ranges of cyclic flexural loading *Constr. Build. Mater.* 145 1-10
- Al-Dahawi A, Sarwary M H, Öztürk O, Yıldırım G, Akın A, Şahmaran M and Lachemi M 2016 Electrical percolation threshold of cementitious composites possessing self-sensing functionality incorporating different carbon-based materials *Smart Mater. Struct.* 25 105005.
- Aldea, C. M., Song, W. J., Popovics, J. S., ve Shah, S. P. (2000). Extent of healing of cracked normal strength concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 12(1), 92-96.
- Alyousif, A., Lachemi, M., Yıldırım, G., ve Şahmaran, M. (2015). Effect of self-healing on the different transport properties of cementitious composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 13(3), 112-123.
- Al-Najjar Y, Yeşilmen S, Al-Dahawi A, Şahmaran M, Yıldırım G, Lachemi M and Amleh L 2016 Physical and chemical actions of nano-mineral additives on properties of high-volume fly ash engineered cementitious composites *ACI Mater. J.* 113 791-801.
- Arnon, C., Thanongsak, N., Watcharapong, W., Pincha, T. 2010. "Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes-fly ash cement composites". *Mater. Sci. Eng. A* 527; 1063-1067.
- ASTM Standard C1202. (1997). Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Azhari, F. (2008) Cement-based sensors for structural health monitoring. Dissertation for the Master Degree of Applied Science. University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Azhari, F. ve Banthia, N. (2012). Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing, *Cement and Concrete Composites*, 34(7), 866873
- Bentur, A. 2000. "Role or interfaces in controlling durability of fiber-reinforced cements". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 48:12, 2-7.
- B. Han, X. Yu, J. Ou, *Self-sensing Concrete in Smart Structures*, Butterworth Heinemann, (2014). 398

Boh, B. and Sumiga, B. (2008). Microencapsulation technology and its applications in building construction materials. *Materials and Geoenvironment*, 55 (3), 329–344.

Chen P W ve Chung D D L (1995). Improving the electrical conductivity of composites comprised of short conducting fibers in a nonconducting matrix: The addition of a nonconducting particulate filler J. *Electron. Mater.* 24 47-51.

Chung, D.D.L., Electrical conduction behavior of cement-matrix composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2002. 11(2): p. 194-204.

Chung, D. D. L. (2010). *Composite materials science and applications. Engineering materials and processes.*, London, Springer-Verlag London: xv, 349 p.

Clear, C. A. (1985). *The effects of autogenous healing upon the leakage of water through cracks in concrete*, Wexham Springs: Cement and Concrete Association.

Cole W F and Kroone B 1960 Carbon dioxide in hydrated Portland cement *ACI J. Proc.* 56 1275-1296.

Dharap, P., Li, Z., Nagarajaiah, S., and Barrera, E.V. (2004), Flexural strain sensing using carbon nanotube film, *Sensor Review*, Vol. 24(3), 271-273.

Dong, B., Xing, F., & Li, Z. (2011). Cement-Based Piezoelectric Ceramic Composite and Its Sensor Applications in Civil Engineering, (108), 543–549.

Emmons, P., and Vaysburd, A. 1995. “Performance criteria for selection of repair materials”. Phase I. Technical Report REMR-CS-47.

Edvardsen C. (1999). Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Materials Journal*, 96(4), 448–455.

E. N. Herbert, V. C. Li (2013) Self-Healing of Microcracks in Engineered Cementitious Composites (ECC) Under a Natural Environment, *Materials*, 6;2831-2845.

E. K. (1996). Predicting freeze-thaw durability of concrete-A new approach. *Materials Journal*, 93(5), 457-464.

Felekoğlu B, Tosun-Felekoğlu K, Keskinateş M and Gödek E 2016 A comparative study on the compatibility of PVA and HTPP fibers with various cementitious matrices under flexural loads *Constr. Build. Mater.* 121 423-428.

Ferrara L, Van Mullem T, Alonso M, Antonaci P, Borg R, Cuenca E, Jefferson A, Ng P, Peled A, Roig M, Sanchez M, Schroefl C, Serna P, Snoeck D, Tulliani J and De Belie N 2018 Experimental characterization of the self-healing capacity of cement based materials and its effects on the material performance: a state of the art report by COST Action SARCOS WG2 *Constr. Build. Mater.* 167 115–142.

Gagne, R. ve Argouges, M. (2012). A study of the natural self-healing of mortars using air-flow measurements. *Materials and Structures*, 45(11), 1625-1638.

Gopalakrishnan, K., B. Birgisson, P. Taylor and N. O. Attoh-Okine (2011). *Nanotechnology in Civil Infrastructure : A Paradigm Shift*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.

Girskas, G. and Skripkiūnas, G. (2017). The effect of synthetic zeolite on hardened cement paste microstructure and freeze-thaw durability of concrete. *Construction and Building Materials*, 14(2), 117-127

Gagné R and Argouges M 2012 A study of the natural self-healing of mortars using air-flow measurements *Mater. Struct.* 45 1625-1638.

Gallucci, E. Et al. 2007. "3D experimental investigation of the microstructure of cement pastes using synchrotron X-ray". *Cement and Concrete Research*, 37: , 360-368.

Gaitero J 2008 Multi-scale study of the fibre matrix interface and calcium leaching in high performance concrete PhD dissertation Centre for nanomaterials applications in construction of Labein-Tecnalia, Spain.

Han, B., Yu, X, ve Ou, J. (2011). Multifunctional and smart carbon nanotube reinforced cement-based materials. *Nanotechnology in Civil Infrastructure*, 1-47.

Han B, Zhang L, Zeng S, Dong S, Yu X, Yang R and Ou J 2017 Nano-core effect in nano-engineered cementitious composites *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 95 100-9.

Han, B. ve Ou, J. (2007). Embedded piezoresistive cement-based stress/strain sensor. *Sensors and Actuators A Physical*, 138(2), 294-298.

H. Siad, M. Lachemi, M. Sahmaran, H.A. Mesbah, K.M. Anwar Hossain, A. Ozsunar, Potential for using recycled glass sand in engineered cementitious composites, *Mag. Concr. Res.* 3 (2017 May) 1–4.

Hou T C 2008 Wireless and electromechanical approaches for strain sensing and crack detection in FRC materials PhD dissertation Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI.

Hou, P., K. Wang. J. Qian S. Kawashima. D. Kong, S.P. Shah. 2012. "Effects of colloidal nano SiO₂ on fly ash hydration". *Cem. Concr. Comp.* 34: 345-354.

Iijima, S. (1991). "Helical microtubes of graphitic carbon." *Nature* 354: 56-58.

Ismail, M., Toumi, A., Francois, R., ve Gagne, R. (2004). Effect of crack opening on the local diffusion of chloride in inert materials. *Cement and Concrete Research*, 34(4), 711-716.

Jacobsen, S., Marchand, J., ve Hornain, H. (1995). SEM observations of the microstructure of frost deteriorated and self-healed concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(8), 1781-1790.

Japan Society of Civil Engineers. Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC) Tokyo, Japan: 2008

Kim H K, Nam I W and Lee H K 2014 Enhanced effect of carbon nanotube on mechanical and electrical properties of cement composites by incorporation of silica fume *Composite Struct.* 107 60-69.

Konsta,G., Marai, S. ve Aza, C. A. (2014). Self sensing carbon nanotube (CNT) and nanofiber (CNF) cementitious composites for real time damage assessment in smart structures. *Cement and Concrete Composites*, 53(8), 162-169.

Lauer, K. R. (1956). Autogenous healing of cement paste. *ACI Journal Proceedings*, 52(6), 1083-1098.

Lepech, M. D. ve Li, V. C. (2009). Water permeability of engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 744-753.

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 EngineeringMechanics*, 118, 2246–2264.

Liu S, Zuo M. Influence of slag and fly ash on the self-healing ability of concrete. *Adv. Mater Res.* (2011), 306–307:1020–1023

Li, V. C. (1998). ECC – Tailored Composites through micromechanical modeling. *Fiber ReinforcedConcrete: Present and the Future*, Banthia et al., CSCE, Montreal, (1998), 64 - 97.

Li, V. C. ve Herbert, E. (2012). Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(6), 207-218.

Lv, Z. ve Chen, D. (2014). Overview of recent work on self-healing in cementitious materials. *Materiales de Construcción*, 64(316).

Lin, V. W., Li, M., Lynch, J. P. ve Li, V. C. (2011). Mechanical and electrical characterization of self-sensing carbon black ECC. In *SPIE Smart Structures and Materials+Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. International Society for Optics and Photonics, 798316-798316

Li, M. ve Li, V. C. (2011). Cracking and healing of engineered cementitious composites under chloride environment. *ACI Materials Journal*, 108(3), 333-340.

Li W, Ji W, Isfahani F T, Wang Y, Li G, Liu Y and Xing F 2017 Nano-silica sol-gel and carbon nanotube coupling effect on the performance of cement-based materials *Nanomaterials*, 7 185.

Ma, H., Qian, S., ve Zhang, Z. (2014). Effect of self-healing on water permeability and mechanical property of medium-early-strength engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 68, 92-101.

Makar, J.M., Beaudoin, J.J. (2003), "Carbon nanotubes and their application in the construction industry", In: *Proceedings of the 1st International Symposium on Nanotechnology in Construction*, Paisley, p. 331

M. Li, V.W. Lin, J.P. Lynch, V.C. Li, Carbon Black Engineered Cementitious Composites-mechanical and Electrical Characterization Special Publication. vol. 2 (292) (2013) 1–6.

M. Sahmaran, G. Yildirim, G.H. Aras, S.B. Keskin, Ö.K. Keskin, M. Lachemi, Self-healing of cementitious composites to reduce high CO₂ emissions, *ACI Mater. J.* 114 (1) (2017).

Marshall, D. B. and Cox, B. N. 1988. "A J-integral method for calculating steady state matrix cracking stresses in composites". *Mechanics of Materials*, 8, 127–133.

Martys, N. S. ve Ferraris, C. F. (1997). Capillary transport in mortars and concrete. *Cement and Concrete Research*, 27(5), 747-760.

Mather, B. ve Warner, J. (2003). Why do concrete repairs fail. Interview held at University of Wisconsin, Department of Engineering Professional Development, Wisconsin.

Melo, V. S., Calixto, J. M., Ladeira, L. O. ve Silva, A. P. (2011). Macro-and microcharacterization of mortars produced with carbon nanotubes. *ACI Materials Journal*, 108 (3), 327-332.

Mendoza, O., Sierra, G. ve Tobón, J. I. (2013). Influence of super plasticizer and Ca(OH)₂ on the stability of functionalized multi-walled carbon nanotubes dispersions for cement composites applications. *Construction and Building Materials*, 47, 771-778.

Mehta, P. ve Monteiro, P. (2006). *Concrete: Microstructure, properties and materials*. 3rd edition. USA: McGraw-Hill.

Meyyappan, M. (2005). *Carbon nanotubes : science and applications*. Boca Raton, Fla., CRC Press.

Mohammed B S, Achara B E, Nuruddin M F, Yaw M and Zulkefli M Z 2017 Properties of nano-silica-modified self-compacting engineered cementitious composites *Journal of Cleaner Production*, 162 1225-1238.

Misra, S., Yamamoto, A., Tsutsumi, T., ve Motohashi, K. (1994). Application of rapid chloride permeability test to quality control of concrete. *ACI Special Publication*, 145, 487-502.

Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete*. Harlow: Longman.

Neville, A. M. (2002). Autogenous healing – a concrete miracle. *Concrete International*, 24(11), 76–82.

Nishiwaki, T. (1997). Fundamental study on development of intelligent concrete with self-healing capability. Master's thesis, Tohoku University.

Najjigivi, A., A. Khaloo., I.Z. Azam, S.A Rashid. 2013. Investigating the effects of using different types of SiO₂ nanoparticles on the mechanical properties of binary blended concrete, *Comp. Part B* 54. 52-58.

O. Galao, F.J. Baeza, E. Zornoza, P. Garcés, 2014 Strain and damage sensing properties on multifunctional cement composites with CNF admixture, *Cem. Concr. Compos.* 46 ; 90–98

Öztürk. O, 2015. Farklı tür karbon esaslı malzemelerin çimento bağlayıcılı kompozitlerin elektriksel özelliklerine etkileri, yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Qian, S. ve Li, V. C. (2008). Simplified inverse method for determining the tensile properties of strain hardening cementitious composites (SHCC). *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6(2), 353-363.

Qian, S., Zhou, J., De Rooij, M. R., Schlangen, E., Ye, G., ve Van Breugel, K. (2009). Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials. *Cement and Concrete Composites*, 31(9), 613-621.

Qian, S. Z., Zhou, J., ve Schlangen, E. (2010). Influence of curing condition and precracking time on the self-healing behavior of engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 32(9), 686-693.

Q.S. Banyhussan, G. Yıldırım, E. Bayraktar, S. Demirhan, M. Sahmaran, Deflection-hardening hybrid fiber reinforced concrete: the effect of aggregate content, *Constr. Build. Mater.* 30 (125) (2016 Oct) 41–52.

Pacheco-Torgal F and Jalali S 2011 Nanotechnology: advantages and drawbacks in the field of construction and building materials *Constr. Build. Mater.* 25 582-90.

Reinhardt, H. W., Jonkers, H., Van Tittelboom, K., Snoeck, D., De Belie, N., De Muynck, W., Verstraete, W., Wang, J., ve Mechtcherine, V. (2013). Self-healing phenomena in cement-based materials: Recovery against environmental action, Springer, 65-117.

Redon, C., Li, V.C., Wu, C., Hoshiro, H., Saito, T. and Ogawa, A. 2001. Measuring and modifying interface properties of PVA fibers in ECC matrix. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13, 399–406.

- Reinhardt, H. W. ve Jooss, M. (2003). Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width. *Cement and Concrete Research*, 33(7), 981-985.
- Ranade, R., Zhang, J., Lynch, J. P. ve Li, V. C. (2014). Influence of micro-cracking on the composite resistivity of engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, 58, 1-12.
- Sanchez, F. ve Ince, C. (2009). Microstructure and macroscopic properties of hybrid carbon nanofiber/silica fume cement composites. *Composites Science and Technology*, 69 (7), 1310-1318.
- Shi, C. (2004). Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test results. *Cement and Concrete Research*, 34(3), 537-545.
- S. Qian, V.C. Li, Simplified inverse method for determining the tensile properties of strain hardening cementitious composites (SHCC), *J. Adv. Concr. Technol.* 6 (2008) 353–363.
- Sobolkina, A., Mechtcherine, V., Khavrus, V., Maier, D., Mende, M., Ritschel, M. ve Leonhardt, A. (2012). Dispersion of carbon nanotubes and its influence on the mechanical properties of the cement matrix. *Cement and Concrete Composites*, 34 (10), 1104-1113.
- Stynoski P., Mondal P., Marsh C. (2015) Effects of silica additives on fracture properties of carbon nanotube and carbon fiber reinforced Portland cement mortar. *Cem. Concr. Compos.* 55:232–240.
- Spragg R, Bu Y, Snyder K, Bentz D and Weiss J 2013 Electrical testing of cement-based materials: role of testing techniques, sample conditioning, and accelerated curing. Publication FHWA/IN/JTRP-2013/28. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Snoeck D and De Belie N 2015 From straw in bricks to modern use of microfibers in cementitious composites for improved autogenous healing—A review, *Constr. Build. Mater.* 95 774-787.
- Sakulich A R and Li V C 2011 Nanoscale characterization of engineered cementitious composites (ECC) *Cem. Concr. Res.* 41 169-175.
- Sun S, Ding S, Han B, Dong S, Yun X, Zhou D and Ou J 2017 Multi-layer graphene-engineered cementitious composites with multifunctionality/intelligence *Compos. Part B: Eng.* 129 221–232.
- Schueler R, Petermann J, Schulte K, Wentzel H P 1998 Agglomeration and electrical percolation behavior of carbon black dispersed in epoxy resin *J. Appl. Polym. Sci.* 63 1741-1746.

Sanches A O, Kanda D H F, Malmonge L F, da Silva M J, Sakamoto W K, and Malmonge J A 2017 Synergistic effects on polyurethane/lead zirconate titanate/carbon black three-phase composites Polym. Test 60 253-259.

Siad H, Lachemi M, Şahmaran M, Mesbah H A and Hossain K A 2018 Advanced engineered cementitious composites with combined self-sensing and self-healing functionalities Constr. Build. Mater. 176 313-322.

Singh L P, Karade S R, Bhattacharyya S K, Yousuf M M and Ahalawat S 2013 Beneficial role of nanosilica in cement based materials–A review Constr. Build. Mater. 47 1069-77.

Sauman Z 1991 Carbonation of porous concrete and its main binding components Cem. Concr. Res. 1 645-662.

Song, G. and Van Zijl, G.P.A.G. 2004. “Tailoring ECC for commercial application.” 6th RILEM Symposium on Fiber Reinforced Concrete, BEFIB 2004, RILEM Pro039, Varenna, 1391-1400.

S. Qian, V.C. Li, Simplified inverse method for determining the tensile properties of strain hardening cementitious composites (SHCC), J. Adv. Concr. Technol. 6 (2008) 353–363.

Tchmutin I A, Ponomarenko A T, Shevchenko V G, Ryvkina N G, Klason C, McQueen D H 1998 Electrical transport in 0-3 epoxy resin–barium titanate–carbon black polymer composites J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys. 36 1847-1856.

T.C. Hou, J.P. Lynch, 2005, Monitoring strain in engineered cementitious composites using wireless sensors, International conference on Fracture XI, Turin, Italy.

Şahmaran, M. ve Li, V. C. 2007. “De-icing salt scaling resistance of mechanically loaded engineered cementitious composites”. Cement and Concrete Research, 37:7, 1035-1046.

Şahmaran, 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.

Şahmaran, M. ve Li, V. C. (2009). Durability properties of micro-cracked ecc containing high volumes fly ash. Cement and Concrete Research, 39(11), 1033-1043.

Şahmaran, M. ve Li, V. C. (2008). Durability of mechanically loaded engineered cementitious composites under highly alkaline environments. Cement and Concrete Composites, 30(2), 72-81.

Şahmaran M, Yıldırım G, Aras G H, Keskin S B and Keskin Ö K and Lachemi M 2017 Self-healing of cementitious composites to reduce high CO₂ emissions ACI Mater. J. 114 93-104.

Şahmaran M, Yıldırım G, Özbay E, Ahmed K and Lachemi M 2014 Self-healing ability of cementitious composites: effect of addition of pre-soaked expanded perlite Mag. Concr. Res. 66 409-419.

Tian, X. ve Hu, H. (2012). Test and study on electrical property of conductive concrete. *Procedia Earth and Planetary Science*, 5, 83-87.

Van Tittelboom, K. ve De Belie, N. (2013). Self-healing in cementitious materials - a review. *Materials*, 6(6), 2182-2217.

Vision 2020. (2006). A vision for the concrete repair protection and strengthening industry, The Strategic Development Council (URL: [http://www.concretesdc.org/pdfs/Vision2020-Version1.0 %20May2006.pdf](http://www.concretesdc.org/pdfs/Vision2020-Version1.0%20May2006.pdf)).

Wang, S., Li, V.C. 2007. ‘‘Engineered cementitious composites with high-volume fly ash’’. *ACI Materials Journal*, 104, 233-241.

Wen, S. ve Chung, D. D. L. (2001). Electric polarization in carbon fiber-reinforced cement. *Cement and Concrete Research*, 31 (1), 141-147.

Wen, S. ve Chung, D. D. L. (2007). Electrical-resistance-based damage self-sensing in carbon fiber reinforced cement. *Carbon*, 45 (4), 710-716.

Wang, S. ve 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.

Wu, M., Johannesson, B., ve Geiker, M. (2012). A review: self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. *Construction and Building Materials*, 28(1), 571-583.

White, S. R., Sottos, N. R., Geubelle, P. H., Moore, J. S., Kessler, M. R. and Sriram, S. R. (2001). Autonomic healing of polymer composites. *Nature*, 409 (6822), 794.

Yu, X. ve Kwon, E. (2009). A carbon nanotube/cement composite with piezoresistive properties. *Smart Materials and Structures*, 18 (5), 055010.

Yang Y., Lepech M.D., Yang E., Li V.C. (2009). Autogenous healing of Engineered Cementitious Composites under wet–dry cycles. *Cement and Concrete Research*, 39(5), 382-390.

Yang, Y., Yang, E. H., ve Li, V. C. (2011). Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age. *Cement and Concrete Research*, 41(2), 176-183.

Yeşilmen S, Al-Najjar Y, Balav M H, Şahmaran M, Yıldırım G and Lachemi M 2015 Nano-modification to improve the ductility of cementitious composites *Cem. Concr. Res.* 76 170-179.

Yıldırım, G., Alyousif, A., Şahmaran, M., ve Lachemi, M. (2015). Assessing the self-healing capability of cementitious composites under increasing sustained loading. *Advances in Cement Research*, 27(10), 581-592.

Yıldırım G, Sarwary M H, Al-Dahawi A, Öztürk O, Anıl Ö and Şahmaran M 2018 Piezoresistive behavior of CF-and CNT-based reinforced concrete beams subjected to static flexural loading: Shear failure investigation *Constr. Build. Mater.* 168, 266-279.

Yıldırım G, Khiavi A H, Yeşilmen S and Şahmaran M 2018 Self-healing performance of aged cementitious composites *Cem. Concr. Compos.* 87 172-186

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.

Yingzi Yang, Michael D. Lepech, En-Hua Yang, Victor C. Li, (2009), Autogenous healing of engineered cementitious under wet-dry cycles, *Cement and Concrete Research*, 39; 382-390.

Zhang, Z., Qian, S., ve Ma, H. (2014). Investigating mechanical properties and self-healing behavior of micro-cracked ecc with different volume of fly ash. *Construction and Building Materials*, 52, 17-23.

Zhang M H, Islam J and Peethamparan S 2012 Use of nano-silica to increase early strength and reduce setting time of concretes with high volume of slag *Cem. Concr. Compos.* 34 650–62.

Zhang, M., H. and Islam, J. 2012. ‘‘Use of nano-silica to reduce setting time and increase early strength of concretes with high volumes of fly ash or slag’’. *Construction and Building Materials*, 29, 573–580.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Oğuzhan Öztürk
Uyruğu : T.C
Doğum Yeri ve Tarihi : Antalya-19.01.1990
Telefon : 0531 853 67 34
Faks :
E-Posta : oozturk@ktun.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Adı	İlçe	İl	Bitirme Yılı
Lise	: Kuleli Askeri Lisesi	Çengelköy	İstanbul	2008
Üniversite (Yatay Geçiş):	Kara Harp Okulu	Dikmen	Ankara	2010
Üniversite	: Akdeniz Üniversitesi	Konyaaltı	Antalya	2013
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi	Selçuklu	Konya	2015
Doktora	: -			

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2013-2014	Ado-Grup	Beton İmalat Sorumlusu

UZMANLIK ALANI

İnşaat Mühendisliği/Yapı Malzemeleri

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

(SCI, SCI-Expanded)

- 1) G. Yıldırım, M. H. Sarwary, A. Al-Dahawi, **O. Öztürk**, Ö. Anıl, M. Sahmaran, “Piezoresistive behavior of CF- and CNT-based reinforced concrete beams subjected to static flexural loading: Shear failure investigation” Construction and Building Materials 168 (2018) 266–27.
- 2) **O Öztürk**, B Dalgic, Ü.S Keskin “Mechanical And Workability Evaluation Of Self-Compacting Concrete Incorporating High Volume Ground Granulated Blast Furnace Slag, (2017), Cement Wapno Beton 22 (2), 145-153.

- 3) A Al-Dahawi, **O Öztürk**, F Emami, G Yıldırım, M Şahmaran ‘‘Effect of mixing methods on the electrical properties of cementitious composites incorporating different carbon-based materials’’, (2016), Construction and Building Materials 104, 160168.
- 4) A. Al-Dahawi, M. H. Sarwary, **O. Öztürk**, G. Yıldırım, A. Akın, M. Şahmaran, M. Lachemi, ‘‘Electrical percolation threshold of cementitious composites possessing self-sensing functionality incorporating different carbonbased materials’’, (2016) Smart Materials and Structures, 25,10-105005.
- 5) A Al-Dahawi, G Yıldırım, **O Öztürk**, M Şahmaran ‘‘ Assessment of self-sensing capability of Engineered Cementitious Composites within the elastic and plastic ranges of cyclic flexural loading’’ (2017) Construction and Building Materials 145, 110.
- 6) **O.Öztürk**, G. Yıldırım, U.S.Keskin, M. Şahmaran ‘‘Nano-tailored Multi-functional Cementitious Composites’’ Composite Part B: Engineering. (underreview) (Doktora tezinden)

Alan endeksleri kapsamındaki dergilerde yayınlanmış araştırma makalesi

- 1) C. Aksoylu, **O. Öztürk**, İ. H. Erkan, M.H. Arslan, ‘‘Investigation of Vertical Column Discontinuity in Reinforced Concrete Buildings’’ (2016), Int. & Eng. Research, Volume7, Issue6, ISSN 2229-5518.

Tebliğ (Bildiri)

- 1) G. Yıldırım, **O. Öztürk**, M. Şahmaran, M.Lachemi ‘‘ Influences of ductility and microcracking on the frost durability of cementitious composites with high volumes of fly ash’’ International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering Conference segment on Frost Action in Concrete 22-23 August 2016, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- 2) A. Majeed Al-Dahawi, **O. Öztürk**, F. Emami, Mustafa Şahmaran and Mohamed Lachemi Self-Sensing Cementitious Composites for Smart Structures, SMAR 2015-Third Conf. on Smart Monitoring Assessment and Rehab. of Civil Structures, Antalya, Turkey.
- 3) **O. Öztürk**, A. Akın ‘‘Potential Applications of Nano-Silica Particles in Civil Engineering’’, 3rd International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'16)-2016, Turkey.
- 4) **O.Öztürk**, Z.Ziyad and U.S.Keskin ‘‘Comparison of Concrete Specification between ACI Code and Turkish Standard (TS 500), ICOCEE – CAPPADOCIA 2017 Nevsehir, Turkey, May 8 - 10, 2017.
- 5) **O.Öztürk**, E.S.Özen, I.Turgutlu and U.S.Keskin ‘‘Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Concrete Incorporating Waste Aggregates’’ Icocee – Cappadocia 2017 Nevsehir, TURKEY, May 8 - 10, 2017
- 6) **O. Öztürk**, Ceyhun Aksoylu, Musa Hakan Arslan ‘‘An Investigation On Vertical Discontinuity In Frame Type Reinforced Concrete Buildings, International Burdur Earthquake & Environment Symposium, 7-9 May 2015, Burdur-Türkiye.
- 7) **O. Öztürk**, Ülkü Sultan Keskin, and Mustafa Şahmaran, ‘‘Self-Sensing Fiber Reinforced Cement Mortars for the Monitoring Of Critical and Transport Infrastructures, EGU General Assembly 2018, Vol. 20, EGU2018-2000-1, Wien, Austria. (Doktora tezinden)

- 8) **O. Öztürk**, Omeed Adwal Ali Ali, Ülkü Sultan Keskin, İlker Bekir Topçu, Mechanical Properties of Air-entrained Concrete Incorporating, Fly-ash, 3. ICOCEE – CESME, April 24-27, 2018.
- 9) **O. Öztürk**, Merve Ceyhan, Hacer Tülen, İlker Bekir Topçu, Ülkü Sultan Keskin, Mechanical and Durability Properties of Different Types of Fiber Reinforced Concrete, Fly-ash, 3. ICOCEE – CESME, April 24-27, 2018.
- 10) **O.Öztürk**, G.Yıldırım, Ü.S.Keskin, M.Şahmaran, Hocine Siad, Mohamed Lachemi, Engineered Cementitious Composites for Reducing High CO2 Emissions through Intrinsic Self-healing Mechanisms, ACE, İzmir, 2018.
- 11) **O. Öztürk**, G. Yıldırım, A.Kul, Ü. S. Keskin, Mustafa Şahmaran ‘Nano-Scale Tailoring Of Engineered Cementitious Composites For Simultaneous Achievement Of Enhanced Self-Healing And Self-Sensing Attributes, Synercrete’18, Funchal, Madeira Island, Portugal. (Doktora tezinden)

