



**HASARLARINI KENDİLİĞİNDEN ALGILAMA VE İYİLEŞTİRME  
KABİLİYETİNE SAHİP ÇOK FONKSİYONLU ÇİMENTO BAĞLAYICILI  
KOMPOZİTLER**

**Adem Afşın ULU**

**DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2021**

## ETİK BEYAN

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

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

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

Adem Afşın ULU

15/01/2021

# HASARLARINI KENDİLİĞİNDEN ALGILAMA VE İYİLEŞTİRME KABİLİYETİNE SAHİP ÇOK FONKSİYONLU ÇİMENTO BAĞLAYICILI KOMPOZİTLER

(Doktora Tezi)

Adem Afşın ULU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2021

## ÖZET

Tasarlanmış çimento bağlayıcılı kompozitlere (ECC) nano (karbon nano tüp [KNT]) ve mikro (karbon fiber lif [KF]) ölçekte karbon esaslı malzeme ilavesi ile kendiliğinden iyileşme ve kendini algılama özelliklerinin birlikte değerlendirildiği çok fonksiyonlu akıllı çimento esaslı kompozitlerin geliştirilmesi tez çalışmasının temel amacıdır. Geliştirilen kompozitlerin kendiliğinden iyileşme ve kendini algılama özelliklerinin gerçekçi ortam koşullarında ve uzun dönemlerde sürdürülebilirliğinin incelenmesi adına sürekli su ve ıslanma kuruma kürünün kısa ve uzun dönemdeki etkileri tez çalışması kapsamında incelenmiştir. Ayrıca karbon esaslı malzeme kullanılarak oluşturulan kompozitlerde yüksek ve düşük kızdırma kaybına sahip uçucu küllerin farklı oranlarda (uçucu kül / portland çimentosu: 1,2; 2,2) ikamesinin karışımların kendiliğinden iyileşme ve kendini algılama özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir. Karbon esaslı malzeme içeren karışımlarla karşılaştırma yapmak amacıyla karbon esaslı malzeme içermeyen kontrol karışımları da hazırlanmıştır. Kendiliğinden iyileşme testleri hasarsız (sağlam) ve çatlaklı (ön yüklenmiş) numuneler üzerinde hızlı klor iyonu geçirimsizlik testi, elektriksel direnç testleri ile gerçekleştirilmiştir. Karbon esaslı kompozitlerin mekanik özellikleri, basınç ve eğilme testleri ile değerlendirilmiş, ön yükleme yapılarak çatlattılmış ve belirtilen kür koşullarında iyileştirilmiş numunelerle mukayese edilmiştir. 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 SEM/EDX, TGA ve XRD testleri yapılarak her bir karışım ayrı ayrı karakterize edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre genel olarak, karbon esaslı malzeme içeren numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarında yer yer kontrol numunelerine kıyasla düşüşler yaşanmış, ancak elektriksel direnç testlerinde hasar karşısında kendini algılama performansı (özellikle KNT) üst seviyede bulunmuştur. Bunun yanında genel olarak ön yüklenmiş numunelerde, karışım ve kür koşullarından bağımsız olarak çatlaklarda iyileşmenin belirgin olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu : 91127

Anahtar Kelimeler : Tasarlanmış çimento bağlayıcılı kompozitler, kendiliğinden iyileşme, kendiliğinden algılama, nano ve mikro ölçekli malzemeler

Sayfa Adedi : 174

Danışman : Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN

MULTIFUNCTIONAL CEMENTITIOUS COMPOSITES CAPABLE OF  
SELF-SENSING AND SELF-HEALING OF DAMAGES

(Ph. D. Thesis)

Adem Afşın ULU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2021

ABSTRACT

The main purpose of the thesis is the development of multi-functional smart cement-based composites, in which self-healing and self-sensing properties are evaluated together with the addition of nano (carbon nano tube [CNT]) and micro-scale (carbon fiber [CF]) carbon-based materials to Engineered Cementitious Composites (ECC). In order to examine the self-healing and self-sensing properties of the developed composites under realistic environmental conditions and long-term sustainability, the short and long term effects of continuous water and wetting drying cure were examined within the scope of the thesis study. In addition, the effect of substitution of fly ashes with high and low ignition loss at different rates (fly ash / portland cement: 1,2; 2,2) in composites formed using carbon-based materials on the self-healing and self-sensing properties of the mixtures was evaluated. Control mixes without carbon based material were also prepared for comparison with mixtures containing carbon-based material. Self-healing tests were performed on undamaged (sound) and cracked (pre-loaded) samples by Rapid Chloride Permeability Test and electrical resistance tests. The mechanical properties of carbon-based composites were evaluated by compression and flexural tests, and compared with samples that were cracked by preloading and improved under specified curing conditions. Cracks belonging to the samples were followed by video microscope and the crack closing performances of each mixture were analyzed. In addition, SEM / EDX, TGA and XRD tests were performed in order to examine the microstructure of samples with self-healing / sensing capabilities, and each mixture was characterized separately. According to the results of the study, in general, the compressive and flexural strength of the samples containing carbon-based material sometimes decreased compared to the control samples, but the self-sensing performance (especially CNT) was found at a high level in electrical resistance tests. In addition, it was observed that the improvement in the cracks was pronounced in the preloaded samples, regardless of the mixing and curing conditions.

Science Code : 91127  
Key Words : Engineered cementitious composites, self-healing, self-sensing, nano and micro scale materials  
Page Number : 174  
Supervisor : Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN

## TEŞEKKÜR

Tez çalışması boyunca değerli fikirlerini ve her türlü yardımını esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN'a çok teşekkür ederim. Ayrıca deneysel çalışmalarımın gerçekleştirilmesi sırasında yanımda olan fikir alışverişinde bulunduğum tüm çalışma arkadaşlarıma, hocalarıma ve tez jürime katılan sayın jüri üyelerine teşekkürü borç bilirim.

Son olarak, tüm öğrenim hayatım boyunca bu günlere gelmemi sağlayan ailemle desteğini hiç esirgemeyen eşim Nursel ve kızım Miray'a sonsuz şükranlarımı sunarım.



## İÇİNDEKİLER

|                                                                                      | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                                           | iv    |
| ABSTRACT.....                                                                        | v     |
| TEŞEKKÜR.....                                                                        | vi    |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                    | vii   |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....                                                            | x     |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....                                                             | xii   |
| RESİMLERİN LİSTESİ .....                                                             | xv    |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                                         | xvii  |
| 1. GİRİŞ.....                                                                        | 1     |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....                                                       | 15    |
| 2.1. Mühendislik Özellikleri Tasarlanmış Çimento Bağlayıcılı Kompozitler (ECC) ..... | 15    |
| 2.2. Tasarlanmış Çimentolu Kompozitlerin Çok Fonksiyonlu Özellikleri .....           | 18    |
| 2.2.1. Otojen kendiliğinden iyileşme.....                                            | 18    |
| 2.2.2. Su geçirimsizliği .....                                                       | 19    |
| 2.2.3. Hızlı klorür geçirimsizliği testi.....                                        | 19    |
| 2.2.4. Gaz geçirgenliği .....                                                        | 22    |
| 2.2.5. Difüzyon.....                                                                 | 23    |
| 2.2.6. Su emme .....                                                                 | 25    |
| 2.2.7. Tek eksenli çekme testi .....                                                 | 26    |
| 2.2.8. Eğilme testi.....                                                             | 28    |
| 2.2.9. Yarmada çekme testi .....                                                     | 30    |
| 2.2.10. Kendiliğinden algılama .....                                                 | 31    |
| 2.2.11. Farklı koşullarda hasar tespiti.....                                         | 35    |
| 2.3. Kendiliğinden İyileşme ve Kendiliğinden Algılama Özellikleri .....              | 38    |

|                                                                                                       | <b>Sayfa</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>3. DENEYSEL PROGRAM .....</b>                                                                      | <b>45</b>    |
| 3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler .....                                                           | 45           |
| 3.1.1. Portland çimentosu (PÇ) .....                                                                  | 45           |
| 3.1.2. Yüksek kızdırma kaybına sahip F-sınıfı uçucu kül (UK-H) .....                                  | 45           |
| 3.1.3. Düşük kızdırma kaybına sahip C-sınıfı uçucu kül (UK-L) .....                                   | 47           |
| 3.1.4. Kuvars kumu .....                                                                              | 48           |
| 3.1.5. Polivinil-alkol (PVA) lifleri .....                                                            | 49           |
| 3.1.6. Karbon fiber (KF) lifler .....                                                                 | 51           |
| 3.1.7. Karbon nano tüp (KNT) .....                                                                    | 52           |
| 3.1.8. Yüksek oranda su azaltıcı katkı (süperakışkanlaştırıcı) .....                                  | 54           |
| 3.2. ECC Karışımlarının Üretimi .....                                                                 | 55           |
| 3.3. ECC Numunelerinin Üretimi ve Karışım Oranları .....                                              | 56           |
| 3.4. Deneysel Yöntem .....                                                                            | 57           |
| 3.4.1. Basınç dayanımı testi .....                                                                    | 57           |
| 3.4.2. Eğilme dayanımı testi .....                                                                    | 58           |
| 3.4.3. Önyükleme ve kendiliğinden iyileşmenin değerlendirilmesinde<br>kullanılan yöntemler .....      | 60           |
| 3.4.4. Kendiliğinden algılama testi .....                                                             | 62           |
| 3.4.5. Mikro yapısal karakterizasyon testleri .....                                                   | 63           |
| <b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....</b>                                                       | <b>65</b>    |
| 4.1. Basınç Dayanımı Sonuçları .....                                                                  | 65           |
| 4.2. Eğilme Dayanımı Sonuçları .....                                                                  | 73           |
| 4.3. Karbon Esaslı Malzemelerle Takviye Edilmiş ECC'lerin Kendiliğinden<br>İyileşme Performansı ..... | 83           |
| 4.3.1. Elektriksel direnç yöntemiyle kendiliğinden iyileşmenin belirlenmesi .                         | 84           |
| 4.3.2. HKİG testi ile kendiliğinden iyileşmenin belirlenmesi .....                                    | 115          |

**Sayfa**

|                                                                                                               |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3.3. Elektriksel direnç sonuçlarına göre kendiliğinden iyileşme ve kendiliğinden algılama performansı ..... | 122        |
| 4.3.4. Kendi kendine iyileşmenin eğilme performansı üzerine etkileri.....                                     | 132        |
| 4.4. Mikro Yapısal Karakterizasyon (Tanımlama) .....                                                          | 139        |
| <b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>                                                                             | <b>151</b> |
| 5.1. Basınç Dayanımı Sonuçları.....                                                                           | 151        |
| 5.2. Eğilme Dayanımı Sonuçları .....                                                                          | 151        |
| 5.3. Karbon Esaslı Malzemelerle Takviye Edilmiş ECC'lerin Kendiliğinden İyileşme Performansı .....            | 152        |
| 5.4. Mikro Yapısal Karakterizasyon .....                                                                      | 154        |
| 5.5. Öneriler .....                                                                                           | 154        |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                                                        | <b>157</b> |
| <b>EKLER.....</b>                                                                                             | <b>165</b> |
| EK-1. Belli kür koşullarında kür edilen ECC silindir numunelerinin elektriksel direnç test sonuçları.....     | 166        |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                                                                         | <b>174</b> |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                                                                                | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 1.1. ECC malzemesinin tipik karışım tasarımı .....                                                                                             | 10    |
| Çizelge 1.2. Geleneksel beton ile ECC'nin özelliklerinin karşılaştırılması .....                                                                       | 11    |
| Çizelge 2.1. Farklı ECC karışımları ve lif donatılı diğer harç numuneleri için difüzyon katsayısı ile ön yükleme deformasyon seviyesinin ilişkisi..... | 24    |
| Çizelge 3.1. CEM I 52,5R beyaz portland çimentosu ve puzolanik malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri .....                                     | 46    |
| Çizelge 3.2. ECC üretiminde kullanılan PVA lifinin mekanik ve geometrik özellikleri .....                                                              | 50    |
| Çizelge 3.3. Karbon lifin tipik özellikleri, (12 mm uzunluk).....                                                                                      | 51    |
| Çizelge 3.4. ECC karışım oranları .....                                                                                                                | 57    |
| Çizelge 4.1. Toplam bağlayıcı malzeme oranınca %60 uçucu kül içeren ECC karışımlarının 3 ve 28 günlük basınç dayanımları (MPa) .....                   | 65    |
| Çizelge 4.2. Toplam bağlayıcı malzeme oranınca %80 uçucu kül içeren ECC karışımlarının 3 ve 28 günlük basınç dayanımları (MPa) .....                   | 66    |
| Çizelge 4.3. Bağlayıcı malzeme ağırlığınca %60 oranında UK içeren karışımların ortalama eğilme testi sonuçları (28 günlük) .....                       | 73    |
| Çizelge 4.4. Bağlayıcı malzeme ağırlığınca %80 oranında UK içeren karışımların ortalama eğilme testi sonuçları (28 günlük) .....                       | 74    |
| Çizelge 4.5. Bağlayıcı malzeme ağırlığınca %60 oranında UK içeren karışımların ortalama eğilme testi sonuçları (180 günlük) .....                      | 78    |
| Çizelge 4.6. Bağlayıcı malzeme ağırlığınca %80 oranında UK içeren karışımların ortalama eğilme testi sonuçları (180 günlük) .....                      | 78    |
| Çizelge 4.7. 28 günlük silindir numunelerin ortalama ED değerleri (kΩ cinsinden) ...                                                                   | 93    |
| Çizelge 4.8. 180 günlük silindir numunelerin ortalama ED değerleri (kΩ cinsinden) .                                                                    | 95    |
| Çizelge 4.9. 28 günlük silindir numunelerin ön yüklemeleri ardından ve ileri yaşlarda kaydedilen çatlak nitelikleri .....                              | 105   |
| Çizelge 4.10. 180 günlük silindir numunelerin ön yüklemeleri ve ileri yaşlarda kaydedilen çatlak nitelikleri .....                                     | 109   |
| Çizelge 4.11. 28 günlük numunelerin HKİG testi sonuçları (C: Coulomb).....                                                                             | 116   |
| Çizelge 4.12. 180 günlük numunelerin HKİG testi sonuçları (C:Coulomb).....                                                                             | 117   |

| <b>Çizelge</b>                                                                                          | <b>Sayfa</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Çizelge 4.13. ASTM C 1202 göre farklı betonlar için klorür geçirgenlik dereceleri .....                 | 122          |
| Çizelge 4.14. 28 günlük kiriş numunelerin ortalama ED sonuçları ( $\Omega.m$ cinsindendir).             | 126          |
| Çizelge 4.15. 180 günlük kiriş numunelerin ortalama ED sonuçları ( $\Omega.m$ cinsindendir) .....       | 127          |
| Çizelge 4.16. ECC kiriş numunelerin yükleme anındaki (28+0) çatlak genişlikleri .....                   | 127          |
| Çizelge 4.17. ECC kiriş numunelerin yükleme anındaki (180+0) çatlak genişlikleri ....                   | 128          |
| Çizelge 4.18. 28 günlük kiriş numunelerin ortalama eğilme dayanım- deformasyon sonuçları (ECC-1.2)..... | 134          |
| Çizelge 4.19. 28 günlük kiriş numunelerin ortalama eğilme dayanım-deformasyon sonuçları (ECC-2.2).....  | 135          |
| Çizelge 4.20. 180 günlük kiriş numunelerin ortalama eğilme dayanım-deformasyon sonuçları (ECC-1.2)..... | 136          |
| Çizelge 4.21. 180 günlük kiriş numunelerin ortalama eğilme dayanım-deformasyon sonuçları (ECC-2.2)..... | 138          |
| Çizelge 4.22. Kendiliğinden iyileşme ürünlerindeki toplam $CaCO_3$ miktarı.....                         | 147          |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                                                                                   | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 1.1. Otojen kendiliğinden iyileşmeye sebep olabilecek çeşitli mekanizmalar ....                                                                                   | 7     |
| Şekil 2.1. Dört noktalı eğilme yükü altında ECC ve normal betonun orta açıklık sehim kapasitesi .....                                                                   | 15    |
| Şekil 2.2. Çimento esaslı malzemelerde otojen kendiliğinden iyileşme mekanizmaları.....                                                                                 | 18    |
| Şekil 2.3. 28 günlük başlangıç küründen sonraki 30 günlük kür uygulamasından sonra ECC karışımlarının gaz geçirgenliği (GP) ölçümlerindeki yüzde değişimi.....          | 23    |
| Şekil 2.4. D/Ç çevrimleri ile sağlam ve mikro çatlaklı ECC numunelerinin su emme ölçümlerindeki değişiklikler .....                                                     | 26    |
| Şekil 2.5. Farklı deformasyon derecelerindeki ECC karışımlarına ait numunelerin sağlam ve çatlaklı haldeki yarmada çekme gerilmesi-deformasyon grafikleri .....         | 31    |
| Şekil 2.6. Farklı kullanım oranlarında kullanılan farklı karbon esaslı malzemelerle 1 ve 7 günlük ECC harçlarının elektriksel direnç değerlerindeki değişiklikler ..... | 34    |
| Şekil 2.7. ECC numunelerinin 7 ve 28 günlük kür süresi sonrasında sürekli basınç yüklemesi altında kendini algılama davranışı.....                                      | 36    |
| Şekil 2.8. ECC numunelerinin elastik aralıkta (üstte) ve plastik aralıkta (altta) tekrarlanan eğilme yükü altında kendiliğinden algılama davranışı .....                | 37    |
| Şekil 3.1. Çalışmalar sırasında kullanılan katı malzemelerin tanecik boyut dağılımları.....                                                                             | 47    |
| Şekil 3.2. Karbon Nanotüp: (a) KNT yapısı (b) KNT SEM görüntüsü .....                                                                                                   | 53    |
| Şekil 3.3. Dört noktalı eğilmede çekme testi için deney düzeneği .....                                                                                                  | 59    |
| Şekil 3.4. Yarmada çekme deney düzeneği ve optik mikroskop .....                                                                                                        | 60    |
| Şekil 4.1. ECC-1.2 karışımlarına ait numunelerin ortalama basınç dayanımı (3.gün).....                                                                                  | 68    |
| Şekil 4.2. ECC-1.2 karışımlarına ait numunelerin ortalama basınç dayanımı (28.gün).....                                                                                 | 70    |
| Şekil 4.3. ECC-2.2 karışımlarına ait numunelerin ortalama basınç dayanımı (3.gün).....                                                                                  | 71    |

| Şekil                                                                                                                                                                               | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 4.4. ECC-2.2 karışımlarına ait numunelerin ortalama basınç dayanımı (28.gün).....                                                                                             | 72    |
| Şekil 4.5. Bağlayıcı malzeme ağırlığınca %60 oranında UK içeren 28 günlük kırıış numunelerin eğilme testi sonuçları.....                                                            | 76    |
| Şekil 4.6. Bağlayıcı malzeme ağırlığınca %80 oranında UK içeren 28 günlük kırıış numunelerin eğilme testi sonuçları.....                                                            | 77    |
| Şekil 4.7. Bağlayıcı malzeme ağırlığınca %60 oranında UK içeren 180 günlük kırıış numunelerin eğilme testi sonuçları.....                                                           | 81    |
| Şekil 4.8. Bağlayıcı malzeme ağırlığınca %80 oranında UK içeren 180 günlük kırıış numunelerin eğilme testi sonuçları.....                                                           | 82    |
| Şekil 4.9. 28 günlük sağlam ve ön yüklenmiş ECC silindir numunelerinin sürekli su (SS) ve ıslanma-kuruma (I/K) kür koşullarında, zamana bağlı ED değişim oranları (ECC-1.2) .....   | 99    |
| Şekil 4.10. 28 günlük sağlam ve ön yüklenmiş ECC silindir numunelerinin sürekli su (SS) ve ıslanma-kuruma (I/K) kür koşullarında, zamana bağlı ED değişim oranları (ECC-2.2) .....  | 100   |
| Şekil 4.11. 180 günlük sağlam ve ön yüklenmiş ECC silindir numunelerinin sürekli su (SS) ve ıslanma-kuruma (I/K) kür koşullarında, zamana bağlı ED değişim oranları (ECC-1.2) ..... | 103   |
| Şekil 4.12. 180 günlük sağlam ve ön yüklenmiş ECC silindir numunelerinin sürekli su (SS) ve ıslanma-kuruma (I/K) kür koşullarında, zamana bağlı ED değişim oranları (ECC-2.2) ..... | 104   |
| Şekil 4.13. 28 günlük ön yüklenmiş silindir numunelerin çatlak iyileşme oranları .....                                                                                              | 108   |
| Şekil 4.14. 28 günlük ön yüklenmiş silindir numunelerin çatlak iyileşme oranları .....                                                                                              | 114   |
| Şekil 4.15. 28 günlük sağlam ve çatlaklı numunelerin nihai durumda (28+90 gün) ve başlangıçtaki (28+0 gün) HKİG değerlerine göre azalış yüzdesi (ECC-1.2).....                      | 119   |
| Şekil 4.16. 28 günlük sağlam ve çatlaklı numunelerin nihai durumda (28+90 gün) ve başlangıçtaki (28+0 gün) HKİG değerlerine göre azalış yüzdesi (ECC-2.2) .....                     | 120   |
| Şekil 4.17. 180 günlük sağlam ve çatlaklı numunelerin nihai durumda (180+90 gün) ve başlangıçtaki (180+0 gün) HKİG değerlerine göre azalış yüzdesi (ECC-1.2).....                   | 121   |
| Şekil 4.18. 180 günlük sağlam ve çatlaklı numunelerin nihai durumda (180+90 gün) ve başlangıçtaki (180+0 gün) HKİG değerlerine göre azalış yüzdesi (ECC-2.2).....                   | 121   |

| Şekil                                                                                                      | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 4.19. 28 günlük karışımların elektriksel direncindeki oransal değişim yüzdeleri (FCER).....          | 124   |
| Şekil 4.20. 180 günlük karışımların elektriksel direncindeki oransal değişim yüzdeleri (FCER).....         | 125   |
| Şekil 4.21. 28 günlük kırıış numunelerin elektriksel direnç geri kazanım oranı .....                       | 130   |
| Şekil 4.22. 180 günlük kırıış numunelerin elektriksel direnç geri kazanım oranı .....                      | 131   |
| Şekil 4.23. Mikro çatlaklar yüzeyinden alınan iyileşme ürünlerinin EDX analizleri ve SEM görüntüleri ..... | 140   |
| Şekil 4.24. ECC numunelerinin çatlak yüzeylerinden alınan iyileşme ürünlerinin TGA sonuçları .....         | 144   |
| Şekil 4.25. ECC-1.2 numunelerinin iyileşmiş çatlak yüzeyi XRD sonuçları (180+90 gün) .....                 | 149   |
| Şekil 4.26. ECC-2.2 numunelerinin iyileşmiş çatlak yüzeyi XRD sonuçları (180+90 gün) .....                 | 150   |

## RESİMLERİN LİSTESİ

| Resim                                                                                                                                                                                                                                             | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Resim 2.1. ECC'nin eğilme yüklemeleri altında çoklu çatlak gelişimi .....                                                                                                                                                                         | 16    |
| Resim 2.2. Tekrarlı önyüklemeden önce ve sonraki I/K döngüleri sırasında F-ECC_5.0 numunelerinin mikro ölçekteki çatlak görüntüleri .....                                                                                                         | 21    |
| Resim 2.3. (a) Hasarlı numunelerde sürekli yükleme uygulaması için ekipman, (b) tork anahtarı ile sürekli yükleme seviyesinin artırılması, (c) kür için hazır durumda olan numuneler, (d) kendiliğinden iyileşme için suya konmuş numuneler ..... | 29    |
| Resim 2.4. Pirinç elektrot gömülü numunelerin a) basınç b) dört noktalı eğilme altında kendiliğinden algılama değerlendirmesi .....                                                                                                               | 35    |
| Resim 2.5. (a) ECC-Kontrol, (b) ECC-NS/KNT numunelerin 90 gün sürekli su küründen sonra oluşan kendiliğinden iyileşme ürünlerini gösteren temsili SEM görüntüleri .....                                                                           | 40    |
| Resim 3.1. CEM I 52,5 R Beyaz portland çimentosu dijital kamera görüntüsü (sağda), SEM görüntüsü (solda) .....                                                                                                                                    | 45    |
| Resim 3.2. UK-H taneciklerinin dijital kamera (sol) ve SEM görüntüsü (sağ) .....                                                                                                                                                                  | 47    |
| Resim 3.3. UK-L taneciklerinin dijital kamera (sol) ve SEM görüntüsü (sağ) .....                                                                                                                                                                  | 48    |
| Resim 3.4. Mikro-kuars kumunun görüntüsü .....                                                                                                                                                                                                    | 49    |
| Resim 3.5. ECC karışımlarının üretiminde kullanılan (a, b, c) PVA liflerinin ve (d) lif yüzeylerindeki su itici kaplamanın taramalı elektron mikroskobu (SEM) altındaki görüntüsü .....                                                           | 50    |
| Resim 3.6. Doğranmış karbon liflerinin görüntüsü .....                                                                                                                                                                                            | 51    |
| Resim 3.7. Doğranmış karbon liflerin mikroskop (solda) ve SEM (sağda) görüntüleri .....                                                                                                                                                           | 52    |
| Resim 3.8. Tez kapsamında kullanılan çok duvarlı karbon nanotüplerin SEM fotoğrafları .....                                                                                                                                                       | 53    |
| Resim 3.9. (a) YOSA ilavesi, (b) yüksek frekansta karışımın hazırlanması, (c) KNT solüsyonunun esas karışıma aktarılması, (d) karışımların kalıplara dökülmesi .....                                                                              | 56    |
| Resim 3.10. Basınç dayanım testi .....                                                                                                                                                                                                            | 58    |
| Resim 3.11. ECC numunesinin 4 noktalı eğilme deneyi .....                                                                                                                                                                                         | 59    |
| Resim 3.12. Eksenel konfigürasyona sahip iki problu elektriksel direnç ölçüm sistemi .....                                                                                                                                                        | 61    |

| <b>Resim</b>                                                                            | <b>Sayfa</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Resim 3.13. HKİG testi.....                                                             | 62           |
| Resim 3.14. Aynı anda yapılan ED ve 4 noktalı eğilme testileri.....                     | 63           |
| Resim 4.1. 28 günlük çatlaklı, kür edilmiş silindir numunelerin çatlak görüntüleri .... | 87           |
| Resim 4.2. 180 günlük çatlaklı, kür edilmiş silindir numunelerin çatlak görüntüleri ..  | 111          |



## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

| Simgeler      | Açıklamalar                                      |
|---------------|--------------------------------------------------|
| $E_m$         | Harç matrisin elastik modülü                     |
| $J'_b$        | Tamamlayıcı enerji                               |
| $J_{tip}$     | Harç matrisin kırılma enerjisi                   |
| $K_m$         | Harç matrisin kırılma tokluğu                    |
| $R$           | Elektriksel direnç                               |
| $R_0$         | Başlangıç elektriksel direnç                     |
| $\delta_0$    | Maksimum çatlak köprüleme gerilmesindeki açıklık |
| $\sigma_0$    | Maksimum çatlak köprüleme gerilmesi              |
| $\sigma_{fc}$ | Harç matrisinde ilk çatlak oluşum dayanımı       |

| Kısaltmalar | Açıklamalar                                 |
|-------------|---------------------------------------------|
| AC          | Alternatif akım                             |
| BM          | Bağlayıcı malzeme                           |
| C           | Coulomb                                     |
| $CaCO_3$    | Kalsiyum karbonat                           |
| $CaO$       | Kalsiyum oksit                              |
| CH          | Sönmüş kireç                                |
| C-S-H       | Kalsiyum silikat hidrat jeli                |
| ÇG          | Çatlak genişliği                            |
| DC          | Doğrusal akım                               |
| ECC         | Tasarlanmış çimento bağlayıcılı kompozitler |
| EDX         | Enerji ayırmalı X-ışını analizi             |
| FCER        | Oransal elektriksel direnç değişimi         |
| HKİG        | Hızlı klorür iyonu geçirimsizlik testi      |
| I/K         | Islanma-kuruma kürü                         |
| KF          | Karbon lifler                               |

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

|             |                                                |
|-------------|------------------------------------------------|
| <b>KNT</b>  | Karbon nanotüp                                 |
| <b>NM</b>   | Nano malzeme                                   |
| <b>PÇ</b>   | Portland çimentosu                             |
| <b>PVA</b>  | Polivinil alkol lifi                           |
| <b>S/BM</b> | Su-bağlayıcı malzeme oranı                     |
| <b>SEM</b>  | Taramalı elektron mikroskobu                   |
| <b>SS</b>   | Sürekli su kürü                                |
| <b>TÇS</b>  | Toplam çatlak sayısı                           |
| <b>UK-H</b> | Yüksek oranda kızdırma kaybına sahip uçucu kül |
| <b>UK-L</b> | Düşük oranda kızdırma kaybına sahip uçucu kül  |
| <b>XRD</b>  | X-ışını kırınım analizi                        |
| <b>YOSA</b> | Yüksek oranda su azaltıcı katkı                |

## 1. GİRİŞ

Dünya genelinde ülkeler ekonomik problemlerini sürdürülebilir bir şekilde çözmek amacıyla büyük çaba sarf etmektedir. Gelişmekte olan ülkeler açısından bakıldığında söz konusu çabaların daha ivedi şekilde uygulamaya geçirilmesi gerekmektedir. Genel olarak limanlar, otoyollar, köprüler, yer altı taşıma sistemleri, barajlar, atık su yapıları, havaalanları gibi bütün altyapılar betonla inşa edilmektedir. Bu nedenle neredeyse sudan sonra en çok kullanılan malzeme betondur ve ekonomik olarak gelişmenin temel taşlarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Betonda yer alan ana bileşenlerden biri olan çimentonun üretimi esnasında çevreye ciddi zararlar verilmektedir. Ancak ülkelerin inşaat endüstrilerindeki devamlılık nedeni ile betona olan talebi bütün dünyada azalmanın aksine giderek daha fazla artmaktadır. Özellikle geleneksel betonun çeşitli uygulamalarda kullanılmasını kolaylaştırmak amacıyla dayanım, süneklik, tokluk, darbe dayanımı, dayanıklılık performansı bugüne kadar çeşitli araştırmacılar tarafından çalışılmıştır.

Bilindiği üzere yapılar, üzerlerinde meydana gelen gerilme, şekil değiştirme ve çevresel etkenler gibi nedenlerden dolayı farklı derecelerde deformasyona ve/veya hasara uğramaktadır. Bu nedenle deformasyon seviyelerinin ve/veya hasarların mümkün olan en erken zamanda belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla yapıların hizmet süresi içerisinde mevcut durumunu incelemek için birtakım teknikler geliştirilmiştir. Bu tekniklerden bazılarına örnek vermek gerekirse; şekil değiştirme ölçerler, fiber optik sensörler, akustik sensörler, piezoelektrik seramik sensörler gibi araçlar sayılabilir. Yapıların hasar durumlarını tespit etmede kullanılan sensör esaslı yapısal/malzeme sağlık izleme yöntemlerinin karşılaştığı en önemli problemlerden biri daha büyük yapı sistemlerinde kullanılabilecek güvenilir, pratik, maliyet açısından makul ve ağır çevresel şartlar altında görev alacak sensörlerin eksikliğidir. Ayrıca mevcut sistemlerde sözü edilen sensörler, yapılar için gerekli pek çok özelliği hassas bir şekilde takip etmemektedir. Söz konusu sensörlerin az ömürlü olması, maliyetleri ve beton yapılarla uyum sorunları bir diğer olumsuzluktur. Buna ek olarak mevcut sensörler sadece yerleştirildikleri kısıtlı kesimlerden veri almaktadır. Bu nedenle tüm yapı alanını tam anlamıyla tarayamamaktadır. Yapılara gömülerek uygulanan sensörler aynı zamanda bulundukları bölgelerde mekanik sorunlara da neden olmaktadır. Kısaca yapıların mevcut durumlarının devamlı ve hassas bir şekilde izlenmesi için tüm yapıyı sürekli anlık olarak tarayacak, güvenilir ve maliyet açısından uygun bir sensör şebekesi gerekmektedir. Özellikle kritik kamusal binalarda yapısal sağlık

izlemelerinin yürütülmesi, altyapıların herhangi bir hizmet aksamasına yol açmaması açısından çok önemlidir. Yapıların mevcut durumlarının kontrol edilmesinde geliştirilen birkaç yaklaşım aşağıda verilen uygulamalar kapsamında yer almaktadır:

#### Piezoelektrik empedans transformatörleri

Farklı mühendislik alanlarında elektromekanik direnç tekniği uygulamaları kurşun zirkonat titanat transformatörlerinden faydalanılarak yapılmaktadır. Yapısal sağlık izleme faaliyetlerinde kullanılan bu yöntemde PZT transformatörleri birlikte aktüatör ve sensör olarak yer almaktadır. Ultrasonik titreşimlerle yapının karakteristik özellikleri belirlenmektedir ve yapı ile ilgili bilgiler ortaya konmaktadır.

#### Kablosuz sensörler ve ağlar

Kablosuz algılama sağlayıcıları ile bilgi işlem kabiliyetleri sayesinde hasar takip uygulamalarında kullanılabilir.

#### Manyeto-elastik gerilme sensörü

Bilindiği üzere ferro-manyetik malzemelerin belirli özellikleri gerilme seviyesi ile birlikte değişmektedir. Uygulamalarda manyeto-elastik gerilme sensörü meydana gelen gerilmeleri takip etmede kullanılmaktadır.

#### Titreşim tabanlı hasar tespit teknikleri

Vibrasyon tabanlı hasar belirleme yöntemleri ve dinamik testler yapıların takip edilmesinde kullanılmaktadır. Hasarsız belirleme yöntemleri yapının hali hazırdaki titreşimi üzerinden belirlenerek hesaplanmaktadır. Bu takip; modal bazı parametrelerin elde edilmesinde dinamik deney uygulamaları, yapının geçmiş özellikleri ve yapısal titreşim parametrelerini içermektedir. Ayrıca yapıdaki mevcut hasarların tespit edilmesi ve hasarın olduğu alan ile hasarın ne seviyede olduğunu belirlemek için hasar tespit algoritması meydana getirilmelidir.

### Fiber optik sensörler

Fiber optik malzemelerin ortaya çıkması ışığı bir yerden başka bir yere transfer etmek amacıyla yapılan çalışmalara dayanmaktadır. Optik fiberlerden telekomünikasyon alanında geniş bir şekilde faydalanılmaktadır. Yapısal açıdan bakıldığında optik fiberler sahip oldukları geometrik özellikler sayesinde şekil değiştirmeye karşı oldukça hassastırlar. Ancak büyük ölçekli alanlarda optik fiberlerin kullanılması sakıncalı olabilmektedir. Bu durumun temel sebebi uygulama esnasında narin optik fiberlerin kolayca hasar alması ve yapısal elemanlarla birtakım uyumsuzluklar göstermesidir.

Söz konusu sensör uygulamalarına dikkat edildiğinde hasarın takip edilmesi ile ilgili iki esas kriterin ortaya konmasında problem meydana gelmektedir. Bu kriterler sırasıyla uygulamanın amacı ile ilgili olarak, gerekli verilerin elde edilmesi ve yapının içerisindeki hasar durumlarının tespit edilmesinde entegre edilmiş sensörlerin hasar görmesini engellemektir. Çimento esaslı kompozitlerin tasarımında gerek yapısal anlamda gerekse fonksiyonel açıdan beklenen özelliklerin elde edilmesi bu tipteki malzemeleri çok fonksiyonlu yapmaktadır. Genel olarak bakıldığında içerisinde herhangi bir harici sensör bulunmadan kompozitlerin doğrudan sensör amacıyla kullanılması “kendiliğinden algılama” olarak tanımlanmaktadır. Böylece harici yöntemlere gerek kalmadan kendiliğinden algılama kabiliyeti sayesinde yapısal malzemelerin hasar kontrolleri anlık olarak rahatlıkla yapılmaktadır. Kendiliğinden algılama kısaca, elektriksel olarak iletken karbon esaslı malzemeler ile takviye edilmiş çimento bağlayıcılı kompozitlerin gerilme ve şekil değiştirme değişimlerinin izlenmesi olarak tanımlanabilir. Çimento esaslı kompozitlerin içerisinde deformasyon ve gerilme oluştuğunda karbon esaslı malzemelerin matrisle etkileşimi sırasındaki elektriksel iletkenlikleri farklı bir hal almaktadır. Piezo-dirençlilik adı verilen bu kavramda; şekil değiştirme, çatlak ve hasara dayalı veriler kaydedilmektedir. Kendiliğinden algılama davranışını sağlamak için kompozitlerin karışımında katkı olarak karbon esaslı malzemeler kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında geliştirilen çimento esaslı kompozitlerin kendiliğinden algılama davranışlarını elde edebilmek için karbon nano tüp ve karbon lif kullanılmıştır. Ayrıca kompozitlerin elektriksel iletkenliklerine doğrudan etki eden karbon esaslı malzemelerin hangi oranda kullanılacağına ve malzemelerin bireysel olarak karışımlara ilavesi sırasında karışım yöntemlerine ilişkin bilgiler verilmiştir. Yürütülen deneylerde çimento esaslı kompozitlerin piezo-dirençlilik ile ilgili karakteristik durumları belirlenmiş ve numunelerin kendiliğinden algılama davranışları ortaya konmuştur.

Çalışmalardaki elektriksel ölçümler alternatif akım (AC) ölçümleri ile gerçekleştirilmiştir. Numuneler karbon lif ve karbon nanotüp takviyeli olarak hazırlanmıştır. Elektriksel ölçümleri gerçekleştirmek üzere yerleştirilen elektrotlar kirişlerin çekme bölgelerine gömülerek monte edilmiştir. Karbon nanotüp ve karbon lif ile üretilen numunelerin çekme bölgelerindeki elektriksel direnç ölçümler hassas bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Endüstriyel olarak 19 yy. dan itibaren daha geniş çapta kullanılmaya başlanan beton malzemesi, dünya genelinde en çok tercih edilen yapı malzemesidir. Üretimi için gerekli malzemelerin kolay temin edilebilir olması beton malzemesinin tercih edilmesini her geçen gün arttırmaktadır. Bunun yanında, sürekli artan dünya nüfusu ve sanayileşme sebebiyle üretimin gelecekte de artarak devam etmesi muhtemel bir durumdur. İnşaat alanındaki yüksek popülaritesine rağmen, beton tam olarak inşaat mühendisliği için kusursuz bir malzeme değildir. Bu durumun önündeki en önemli etken, basınç dayanımı ile kıyas edildiğinde çok düşük olan çekme dayanımıdır. Bu sebeple, dünya genelindeki inşaat uygulamalarında da karşılaşılabileceği üzere beton, içine gömülen donatı çeliği ile birlikte (betonarme) tasarlanmaktadır. Beton ve çelik arasında her ne kadar uyumlu bir etkileşim olsa da geleneksel betonun çok düşük çekme dayanımı ve sünekliği nedeniyle, dayanıklılık ve mekanik özellikleri ile ilgili sorunlar ortaya çıkarak yapının servis ömrünü azaltmaktadır. Çoğu zaman çatlak gelişimi ile ilişkilendirilen ve servis ömrünün azalmasına neden olan bu sorunlar, altyapılarda bozulan bölgelerin hızlı ve etkili bir şekilde bakım ve/veya onarımını zorunlu kılmaktadır.

Beton altyapıların çeşitli sebeplerle bozulması tüm dünyada yaygın olarak karşılaşılan bir durumdur. Altyapılarda gözlemlenen çeşitli bozulma tipleri ciddi seviyelere ulaşmıştır. Öyle ki birçok ülkede bakım/onarım işleri için harcanan para yeni inşaat uygulamalarına ayrılan tutarın çok daha üstündedir. Örnek verilecek olursa, önümüzdeki beş yıl içerisinde bakım/onarım işlemlerine ayrılan miktarın ABD altyapısı için 2,2 trilyon dolar, Asya altyapısı için ise 2 trilyon dolar seviyesine ulaşması beklenmektedir. Tüm bunlara ek olarak, onarım uygulamalarının uzun ömürlü olmadığı belirtilmektedir öyle ki geleneksel tamir harçlarıyla yapılan onarım işlemlerinin yarısına yakınının saha şartlarında tamamen göçtüğü ya da yeniden bakım gerektirdiği belirtilmektedir (Mather ve Warner, 2003). Beton altyapılarında meydana gelen bozulmalar, toplumları sadece ekonomik yönden değil sosyal ve çevresel olarak da ciddi biçimde etkilemektedir. Bu nedenlerden dolayı, beton yapılarda oluşan hasarların denetlenmesi ve daha sürdürülebilir bir servis ömrünün sağlanabilmesi için

uygulanabilecek çeşitli bakım/onarım yöntemlerinin detaylı bir şekilde bilinmesi giderek önem kazanmaktadır. Ancak, denetleme ve bakım/onarımın sürekli bir şekilde yapılması, ihtiyaç duyulan aşırı iş gücü ve kaynak sebebiyle özellikle büyük çaplı beton altyapılarında oldukça zor olabilmektedir. Ayrıca, çeşitli yapıların farklı yerlerinde oluşan hasarın bakım/onarımı ulaşılabilirlik bakımından her zaman elverişli değildir. Özellikle, otoyol ve tüneller gibi sürekli hizmet halinde olan altyapılarda bakım işlemi çok zor hatta bazı zamanlarda imkânsız olabilmektedir. Öte yandan, büyük çaplı altyapılarda bakım/onarım işlemleri uygulanabilir olsa da ihtiyaç duyulan iş gücü ve ekonomik gereksinimlerin çok fazla olması yükleniciler için caydırıcı olabilmektedir. Bu koşullarda, yapılarda gözlemlenen ve performansı önemli ölçüde değiştiren hasarların (meydana gelen hayati çatlaklar), aşırı iş gücü ve kaynak gereksinimine ihtiyaç olmadan kendi kendini onarabilmesi (kendiliğinden iyileşme) önem verilmesi gereken konulardan biri olarak değerlendirilmektedir.

Son yıllarda inşaat mühendisliği alanında araştırma yapan birçok kişi için kendiliğinden iyileşme oldukça önem arz eden bir konu olarak görülmektedir. Kendiliğinden iyileşmenin izleri kamusal altyapılarda her ne kadar yaklaşık yüzyıl önce gözlemlenmiş olsa da (Lauer ve Slate, 1956; Nijland ve diğerleri, 2007), konuyla alakalı çalışmalar özellikle son yirmi yılda hız kazanmıştır (Li ve Herbert, 2012; Van Tittelboom ve De Belie, 2013). Kendiliğinden iyileşme ile ilgili çalışmaların son yıllarda hız kazanmasının arkasındaki temel neden, yukarıda da açıklandığı üzere tekrarlı bakım/onarım gerektiren ve kalitesiz, dayanıksız ve düşük servis ömrüne sahip geleneksel betonla üretilen altyapılardaki bozulmalardır. Bu bağlamda, beton içeren altyapılarda hasarın (çatlakların) kendiliğinden iyileşme sayesinde onararak bozulma oranının ve onarım sıklığının azaltılması beklenmektedir (Li ve Herbert, 2012). Böylece beton ile yapılmış altyapıların servis ömürleri arttırılabilecektir.

Yapısal servis ömrü üzerindeki olumlu etkileri nedeniyle, kendiliğinden iyileşmenin arttırılması için son yıllarda çeşitli araştırmacılar tarafından yeni yöntemler ortaya konmuştur. Bu yöntemlerin detaylı bir şekilde tartışıldığı birçok derleme makalede konu ile ilgili çeşitli bulgular paylaşılmıştır (Li ve Herbert, 2012; Van Tittelboom ve De Belie, 2013; Lv ve Chen, 2014; Wu ve diğerleri, 2012). Beton gibi çimento bağlayıcılı kompozit malzemelerde uygulanan farklı kendiliğinden iyileşme teknikleri;

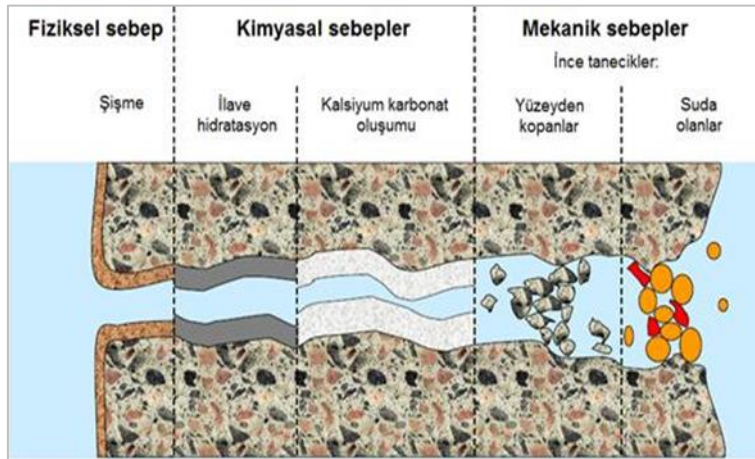
- İçi boş liflerin kullanımı,
- Kimyasal malzemeler bulunduran kapsüllerin kullanımı,
- Bakteri esaslı biyolojik teknikle kendiliğinden iyileşme,
- Genleşen malzemeler ve mineral katkıları,
- Biçim belleğine sahip malzemeler,
- Kontrollü mikroçatlak oluşumuyla gerçekleştirilen otojen kendiliğinden iyileşme sayılabilir.

Yukarıda sıralanan her bir kendiliğinden iyileşme yöntemi oldukça yeni sayılmaktadır ve bu yöntemler gelecekteki uygulamalar açısından büyük öneme sahiptir. Ancak her yöntemin kendi içerisinde zorlukları olduğu göz önüne alındığında, hangi yöntemin diğerinden daha üstün olduğu üzerine karar verebilmek kolay olmamaktadır. Ancak, Van Tittelboom ve De Belie (2013)'ye göre, gelecekteki kendiliğinden iyileşme çalışmaları, dar çatlak açıklıkları, kimyasal kompozisyon, çatlak oluşum anı vb. sebeplere bağlılık gösteren otojen kendiliğinden iyileşmeden ziyade daha yenilikçi yöntemler olan kapsül ve/veya boş liflerin kullanımı üzerine yoğunlaşacaktır. Diğer taraftan hâlihazırdaki duruma bakıldığında, dar açıklıklı çoklu mikroçatlakların oluşumuyla meydana gelen otojen kendiliğinden iyileşmenin diğer tekniklere kıyasla daha kararlı olduğu (Li ve Herbert, 2012) ve özellikle büyük altyapılarda yapısal kısıtlamaların olduğu alanlarda tamir işlerini kolaylaştırması bakımından öne çıktığı görülmektedir.

#### Otojen kendiliğinden iyileşme ve çatlak genişliği

Beton gibi çimento bağlayıcılı malzemelerde elde edilen otojen kendiliğinden iyileşme özelliğinin fiziksel, kimyasal ve mekanik kaynağı olmak üzere üç temel sebebi bulunmaktadır (Reinhardt ve diğerleri, 2013). Bir çatlağın fiziksel olarak kapanabilmesi hâlihazırdaki hidrate olmuş çimento hamurunun bileşenleri arasına fazladan su alarak “şişmesiyle” ilişkilendirilmektedir. Etkisi her ne kadar kısıtlı olsa da şişme mekanizması sayesinde çatlak içerisinden sıvı akışında %10 civarında bir azalma olabilmektedir. Çatlak kapanmasından sorumlu olabilecek kimyasal sebeplere bakıldığında ise iki farklı mekanizma görülmektedir: Bunlar sırasıyla; devam eden hidrasyon ve kalsiyum karbonat oluşumdur. İlave hidrasyonun mekanizması son derece iyi bilinmektedir ve hidrate olmamış çimento esaslı malzemelerin suyla reaksiyonuyla ilgilidir. Ancak, devam eden ilave hidrasyon ve şişme nedeniyle 100 µm seviyesinden daha dar açıklıklara sahip çatlakların

kapanabildiği kaydedilse de (Reinhardt ve diğerleri, 2013), belirli bir çatlağın tamamen kapanması için hidratasyonun tek başına yeterli olmadığı belirtilmektedir. Karşılıklı çatlak yüzeyleri arasında beyaz kalıntılar şeklinde beliren kalsiyum karbonat, hidratasyon ürünlerinden sızan  $Ca^{2+}$  iyonlarının su ve karbondioksit arasındaki reaksiyon sonucu ayrıışarak oluşan bikarbonat ve/veya karbonat iyonlarıyla reaksiyona girmesiyle meydana gelmektedir. Yine bir hidratasyon ürünü olan kalsiyum hidroksitin karbondioksit varlığından doğrudan karbonatlaşması da çatlaklarda kalsiyum karbonat oluşumuna yardımcı olmaktadır. Kalsiyum karbonatın oluşum derecesi sıcaklık, reaksiyon bileşenlerinin oranları, boşluk çözeltisinin pH seviyesi ve bunlara benzer parametrelere bağlılık göstermektedir (Edwardsen, 1999). Önceki çalışmalarda kendiliğinden iyileşmenin çimento esaslı matrisin devam eden hidratasyonu ile ilişkili olduğu belirtilmiştir (Neville, 1995). Ancak daha sonra bu durumun sadece erken yaşlardaki betonlar için geçerli olduğu ve ilerleyen zamanlarda kalsiyum karbonat oluşumunun çatlakların kapanmasında daha belirgin bir rol oynadığı gözlemlenmiştir (Neville, 2002). Düşük bir ihtimalle de olsa çatlaklar mekanik olarak da kapanabilmektedir. Örneğin, çatlakların kırılmış beton parçacıkları ve/veya su içerisinde hâlihazırda var olan tanecikler aracılığıyla kapandığı bazı durumlardan literatürde söz edilmektedir. Çimento bağlayıcılı malzemelerde gözlemlenen otojen kendiliğinden iyileşmeye sebep olabilecek çeşitli mekanizmalar Şekil 1.1’de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Otojen kendiliğinden iyileşmeye sebep olabilecek çeşitli mekanizmalar (Reinhardt ve diğerleri, 2013)

Yukarıda da belirtildiği üzere, beton malzemesinin kendi hasarını onarabilmesi daha çok kimyasal mekanizmalarla (ilave hidratasyon reaksiyonları ve kalsiyum karbonat oluşumu) ilgilidir. Çatlakların kapatılması konusunda her ne kadar iki mekanizma oldukça etkili olsa

da, taşınma özelliklerindeki değişimler genellikle kalsiyum karbonat oluşumuyla alakalı olurken, mekanik özelliklerde gözlemlenen değişimler ise genellikle devam eden hidratasyon reaksiyonlarıyla ilişkilidir.

Etkili bir otojen kendiliğinden iyileşme performansı için gereken çeşitli parametreler arasında, çatlakların kapanması için çimento esaslı yapı tarafından üretilecek nihai kendiliğinden iyileşme ürün miktarının daha az olması bakımından, dar çatlak açıklıklarının ayrı bir yeri vardır. Daha geniş açıklığa sahip çatlakların varlığında, üretilecek kendiliğinden iyileşme ürünleri için gerekli alanın fazla olması ve ürünlerin oluşması için gerekli malzemelerin çatlak içerisine daha kolay girebilmesi sebeplerinden ötürü kendiliğinden iyileşme hızının daha yüksek olması beklenebilir (Gagne ve Argouges, 2012). Ancak, çatlak açıklıklarının fazla olması tam anlamıyla bir iyileşme için yüksek hacimlerde kendiliğinden iyileşme ürününün üretilmesini gerektirmektedir. Büyük açıklıktaki çatlakların varlığında kendiliğinden iyileşme her ne kadar daha hızlı olsa da, tüm açıklığın kapanmaması durumunda çatlak oluşumundan önceki orijinal dayanıklılık ve mekanik özelliklerin geri kazanılması mümkün değildir. Dar açıklıklı çatlakların daha kolay bir şekilde iyileşebileceğini düşünmek her ne kadar daha mantıklı görünse de, otojen kendiliğinden iyileşme aracılığıyla kapanabilecek maksimum izin verilebilir çatlak açıklığı değerleri için literatürde farklı değerler belirtilmiştir. Örneğin, Jacobsen ve diğerleri (1995), bir çatlağın tamamen kapanabilmesi için maksimum açıklığın 5-10  $\mu\text{m}$  ile sınırlı olması gerektiğini öne sürmüştür. Ismail ve diğerleri'ne (2004) göre ise bu değer en fazla 53  $\mu\text{m}$ 'dur. Öte yandan Reinhardt ve Jooss (2003), Edvardsen (1999), Aldea ve diğerleri (2000) ve Clear (1985) çalışmalarında bir çatlağın tamamen kapanabilmesi için açıklıklarının sırasıyla 100  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , 205  $\mu\text{m}$  ve 300  $\mu\text{m}$  seviyelerinin altında olması gerektiğini belirtmiştir. Yukarıda belirtilen çalışmaların tümünde, tam manasıyla bir iyileşme elde edilebilmesi için en önemli parametrenin kabul edilebilir çatlak genişliği olduğu belirtilmelidir. Ancak, mekanik yüklemeler altında çatlak kontrolü olmayan ve gevrek davranışa sahip geleneksel betonların dar çatlak oluşturma şansı neredeyse yoktur.

#### Dar açıklıklı mikroçatlaklara sahip yüksek performanslı lif donatılı çimento bağlayıcılı kompozitler (YPLDÇK)

Son yıllarda beton teknolojisi hızlı bir gelişme içerisinde. Betonun gevrek yapısını değiştirmek için yapılan çalışmalar, eksenel çekme yüklemeleri altında sünek davranış

sergileyen yüksek performanslı lif donatılı betonların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Geleneksel beton eksenel çekme yükleri altında ilk çatlak oluşumundan hemen sonra aniden gevrek bir şekilde kırılmaktadır. Geleneksel lif donatılı betonda ise matristeki çatlamayı şekil değiştirme yumuşaması olarak bilinen yük taşıma kapasitesindeki ani düşüş eğrisi takip etmektedir. Yüksek performanslı lif donatılı çimento bağlayıcılı kompozitlerde, ilk çatlak oluşumundan sonra, lifler fazladan yükü matrise transfer etmektedir. Yüklemedeki artış ile birlikte, 100  $\mu\text{m}$ 'den daha dar genişlikte çatlaklar oluşmakta ve betonun şekil değiştirme kapasitesi artmaktadır. Bu sebeple, çekme gerilmesi-şekil değiştirme eğrisi metallere benzer şekilde çatlak sonrası şekil değiştirme sertleşmesi sergilemektedir. Sünek davranışın (elastik olmayan şekil değiştirme) elde edilebilmesi için gerekli malzeme ve geometrik parametreler (lif, matris, lif-matris ara yüzü, lif geometrisi ve lif hacimsel oranı gibi özellikler) Li ve Leung (1992) tarafından öngörülmüş ve Li (1993) ve Li ve Kanda (1998) tarafından geliştirilmiştir.

Parametrelerin uygun seçilmesiyle, lif oranı hacimce %1,5 ile %5 arasında değişen farklı dayanımlara sahip, sünek çimento esaslı kompozitler üretilebilmektedir. Bu tip malzemelerin maksimum eksenel çekme gerilmesindeki şekil değiştirmesi olarak tanımlanan süneklik derecesi, matrisin tokluğu ve liflerin gerilmeyi matrise etkili bir şekilde aktarması (mikroyapısal parametrelere bağlı) ile yakında ilgilidir (Li, 1997). Normal şartlarda, belirli lif yüzdesinde yüksek matris tokluğu, daha düşük sünekliğin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Uygulamaya bağlı olarak, dayanım ve süneklik ihtiyaçlarını karşılayan en uygun çekme gerilmesi-şekil değiştirme ilişkisi farklılık gösterebilir. Literatürde, bu tip malzemeler araştırmacılar tarafından farklı isimlerle adlandırılmıştır. Tasarlanmış çimento bağlayıcılı kompozitler (ECC) [Engineered Cementitious Composites] yüksek performanslı çimento esaslı malzemelerin özel bir türü olup hacimsel olarak %2 oranında lif kullanımı ile eksenel çekme yüklemesi altında %3 ile %5 arasında süneklik göstermektedir. Bu değer, geleneksel betonun ve lif donatılı betonların çekme yükleri altındaki şekil değiştirme kapasitesinin yaklaşık 300 ile 500 katı kadardır. ECC ilk çatlaktan sonra şekil değiştirme sertleşmesi sergilemektedir. Bu özelliği ile betondan daha sünek bir metal davranışı sergilemektedir. Öte yandan, ECC hasarlara karşı oldukça yüksek toleranslı olup, ağır eğilme ve çekme yükleri altında da sünekliğini korumaktadır. Yük altındaki çatlak genişliği lifli betonlarda 500-750  $\mu\text{m}$  seviyelerinde iken, bu değer ECC için 100  $\mu\text{m}$ 'dan az olmaktadır. Bu ise ECC'nin diğer beton türlerine kıyasla çevresel şartlar altında daha dayanıklı ve mekanik yüklemeler altında bile çok daha düşük geçirimsiliğe sahip olmasını

sağlamaktadır (Şahmaran ve diğerleri, 2007; Şahmaran ve Li, 2007). Ayrıca, ECC'nin eksenel çekme yüklemeleri altında 100  $\mu\text{m}$ 'dan daha dar açıklıklı çatlak oluşumu sergilemesi, üstün kendiliğinden iyileşme performansı bakımından malzemeyi birçok mühendislik sorunun çözümünde kullanışlı yapmaktadır. Aşağıda ECC malzemesine ait tipik bir karışımın tasarımının oranları 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 bileşenleri geleneksel lif donatılı betona benzer olmasına rağmen, ECC'nin mikro çatlaklar aracılığıyla göstermiş olduğu şekil değiştirme sertleşmesi özelliği, malzemeler (çimento, kum ve lif) arasındaki ara yüz özelliklerinin kontrolü sayesinde ve mikro-mekanik düzenlemeler sayesinde elde edilmektedir (Mehta, 1994; Emmons ve Vaysburd, 1995; Morgan, 1996; Mather ve Warner, 2003). Çimento bağlayıcılı matrisin kırılma parametrelerine göre karışım oranları özenle kontrol edilmektedir. Dayanım, elastisite modülü ve en-boy oranı gibi lif özellikleri ECC'de kullanım amacına uygun olarak uyarlanmıştır. Ayrıca, lif ve matris arasındaki ara yüz özellikleri de bu malzemede kullanılmak üzere üreticiyle iş birliği yapılarak optimize edilmiştir. Poli-vinil-alkol (PVA) lifler kullanılarak üretilen tipik ECC'nin karışım oranları Çizelge 1.1'de verilmiştir. Birçok yüksek performanslı lif donatılı çimento bağlayıcılı kompozit malzeme, yüksek performans elde edebilmek için yüksek hacimde life ihtiyaç duymasına rağmen, ECC üretiminde hacimce %2 oranında, kısa süreksiz lifler kullanılmaktadır. ECC üretiminde düşük hacimde lif kullanımı ile beraber, yaygın bileşenlerin kullanımı ile inşaat uygulamalarında esnekliğe olanak sağlanmaktadır. Bugüne kadar ECC malzemelerinin, kendiliğinden yerleşen dökümler, ekstrüzyon, püskürtme ve geleneksel karıştırıcı ya da hazır beton kamyonu kullanılarak üretimi gerçekleştirilmiştir (Emmons ve diğerleri, 1993; Li ve Stang, 2004; Vaysburd ve Emmons, 2004; Li ve Li, 2009).

ECC'de meydana gelen dar çatlak genişliği kendiliğinden kontrollü olup çelik donatı oranından bağımsızdır. Çok aşırı eğilme yüklemelerinde, ECC kiriş numunesi plastik deformasyon göstererek sünek bir metal görünümü almaktadır. Basınç yüklemeleri altında ise ECC malzemesi, normal veya yüksek dayanımlı betona benzer basınç dayanımı göstermektedir (Vaysburd ve Emmons, 2004). ECC'nin geleneksel (basınç dayanımı

yaklaşık 30-60 MPa arasında ve lif içermeyen) betona kıyasla diğer avantajları Çizelge 1.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 1.2. Geleneksel beton ile ECC'nin özelliklerinin karşılaştırılması

| Özellikler                                                 | Geleneksel Beton         | ECC                                             |
|------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------|
| Boyutsal uyumluluk                                         | Zayıf                    | Geleneksel betonla çok uyumlu                   |
| Şekil değiştirmesi kapasitesi                              | 0,01% - 0,02%            | ~2-5% (yaklaşık 200-500 kat daha sünek)         |
| Eğilmede çekme dayanımı (MPa)                              | 5-8                      | 10-14 (yaklaşık iki kat daha yüksek)            |
| Basınç dayanımı (MPa)                                      | 30-60                    | 40-150 (üç kata kadar daha yüksek)              |
| Kısıtlanmış rötre çatlak genişliği                         | 1 mm                     | 0,03 mm                                         |
| Geçirimsizlik (m/s)                                        | $1,7 \times 10^{-5}$     | $2,5 \times 10^{-10}$ (çok düşük geçirimsizlik) |
| Dona karşı dayanım                                         | Hava sürüklenmişse iyi   | En az hava sürüklenmiş beton kadar dayanıklı    |
| Yorulma mukavemeti                                         | Zayıf                    | Geleneksel betona oranla onlarca kat daha iyi   |
| Çatlama/Tabakalanma<br>Korozyona dayanım<br>Darbe dayanımı | Gevrek<br>Zayıf<br>Zayıf | Sünek<br>Üst Düzey<br>Üst Düzey                 |

#### ECC’nin mikro-mekanik tabanlı tasarım yaklaşımı

ECC tasarımında birinci öncelik yük altında kompozitin çoklu mikro çatlak oluşturması ve şekil değiştirme sertleşmesi davranışı göstermesidir. Bu durum büyük deformasyonların çoklu mikro-çatlakların üzerine yayılmasına izin verir. ECC’de şekil değiştirme sertleşmesi özelliği ve çoklu çatlamanın dayanağı olan kararlı durum düz çatlak yayılması ilk kez Marshall ve Cox (1988) tarafından nitelendirilmiş, ardından Li ve Leung (1992) tarafından lif donatılı çimento bağlayıcılı kompozitlere uyarlanmıştır. Griffith tipi çatlak oluşumundan (şekil değiştirme yumuşaması sergileyen lif donatılı betonlarda olduğu gibi çatlak yayılırken aynı anda genişliği artmakta) farklı olarak, kararlı durum düz çatlak (çatlak yayılırken genişliği sabit kalmakta) oluşumu sayesinde ECC aşırı çekme deformasyonları altında şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergilerken tüm numuneye yayılmış çoklu mikro çatlak

davranışı sergilemektedir. Çoklu kararlı durum çatlak oluşumu matris kırılma tokluğu ile birlikte “Çatlak Köprüleme Dayanımı- Çatlak Açıklığı” ilişkisi ile yönetilmektedir. Bu durumun elde edilebilmesi için aşağıda sunulan eşitliğin sağlanması gerekmektedir.

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

Bu eşitlikte  $J'_b$  tamamlayıcı enerji,  $\sigma_0$  ve  $\delta_0$  maksimum çatlak köprüleme gerilmesi ve bu gerilmeye meydana gelen çatlak açıklığı,  $J_{tip}$  harç matrisin kırılma enerjisi,  $K_m$  harç matrisin kırılma tokluğu ve  $E_m$  ise harç matrisin elastik modülüdür. Kırılma enerji kriterine ilaveten, aşağıdaki eşitlikte açıklanan dayanım kriterinin de sağlanması gerekmektedir.

$$\sigma_0 > \sigma_{fc} \quad (1.2)$$

Bu eşitlikte  $\sigma_0$  maksimum çatlak köprüleme gerilmesi,  $\sigma_{fc}$  ise harç matrisinde ilk çatlak oluşum dayanımıdır. Yayılı çoklu çatlakların oluşabilmesi için, Wang ve Li (2004) dayanım kriterinin her bir çatlak düzleminde sağlanması gerektiğini bulmuştur.

Yukarıda detayları verilen enerji ve dayanım kriterlerinin her ikisini de sağlayan ECC karışımlar seçildiğinde çoklu kararlı durum düz çatlak oluşumu ve şekil değiştirme sertleşmesi davranışı gerçekleştirilebilmektedir. Ancak çoklu kararlı durum düz çatlakların oluşumuna ilaveten, kompozitte oluşacak çatlakların genişliklerinin sınır değeri olan 100  $\mu\text{m}$  mertebesinin altında olması gerekmektedir. Bu durum yukarıdaki ilk denklemde verilen Çatlak Köprüleme Dayanımı-Çatlak Açıklığı ilişkisinin uygun hale getirilmesi ile elde edilebilmektedir. ECC'nin çoklu çatlak davranışı esnasında sergileyeceği maksimum kararlı durum çatlak genişliğinin “ $\delta_0$ ” ve bu çatlak açıklığına karşılık gelecek maksimum çatlak köprüleme gerilmesinin “ $\sigma_0$ ” olduğu kabul edilir. Çatlak genişliği  $\delta_0$  değerini aşınca, çatlak köprüleme gerilmesi düşmeye başlayacak, bu durumda çatlak bölgeselleşip çoklu çatlak oluşumu meydana gelemeyecektir. Maksimum kararlı durum çatlak genişliği  $\delta_0$ 'ı sınır değeri olan 100  $\mu\text{m}$  mertebesinin altında tutarak, ECC malzemesi çoklu çatlama davranışı sergilerken aynı anda dayanıklılık ve kendiliğinden iyileşme özellikleri için önemli olan dar çatlak genişliği özelliği de elde edilmiş olmaktadır.

Yukarıda bahsedilen temel mikro-mekanik modeller kullanılarak ECC'nin çekme yükleri altında çoklu mikro çatlak oluşumu ile şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergilemesi sağlanmaktadır. Özetle, mikro-mekanik tabanlı malzeme tasarım yöntemlerinin uygulanması ile malzeme mühendislerine yüksek birim şekil değiştirme kapasitesi ve yüksek dayanıklılık gibi özel yapısal talepleri karşılamaya olanak sağlayacak imkânlar yaratılabilmektedir. Literatürde ECC'nin mikro-mekanik tabanlı tasarım yaklaşımı ile ilgili çok daha kapsamlı bilgiler bulunabilir. Önceki bölümlerde de değinildiği üzere, ECC malzemesinin çekme yükleri altında çoklu mikro çatlak oluşumu ile şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergilemesi için mikro-mekanik tabanlı tasarım modelleri kullanılmaktadır. Özetle belirtmek gerekirse, malzemenin aşırı yükleme koşullarında dahi mikroçatlak hasarı sergilemesi üstün mekanik ve dayanıklılık özelliklerine ek olarak kendiliğinden iyileşme gibi oldukça yenilikçi özellikleri de beraberinde getirmektedir. Bir sonraki bölümden de görülebileceği gibi, ECC malzemesinin çoklu mikroçatlaklar oluşturmak suretiyle tetiklediği otojen kendiliğinden iyileşme davranışı literatürde birçok araştırmacı tarafından çok farklı test yöntemleri ve ortam koşulları altında araştırılmıştır.

Tez geneline bakıldığında 2. Bölüm'de literatürde ECC malzemesinin otojen kendiliğinden iyileşme ve kendiliğinden algılama davranışı üzerine farklı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen çalışmalar detaylandırılmıştır. Tezin 3. Bölümünü oluşturan “Deneysel Program” kısmında çalışmalar sırasında kullanılan malzemeler ve testler sırasında uygulanan yöntemler verilmiştir. 4. Bölüm'de, tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel sonuçlar ve bu sonuçların detaylı değerlendirmeleri toplu şekilde verilmiştir. Tez kapsamında gerçekleştirilen tüm çalışmaların sonuçları ise 5. Bölüm'de özetlenerek sunulmuştur.

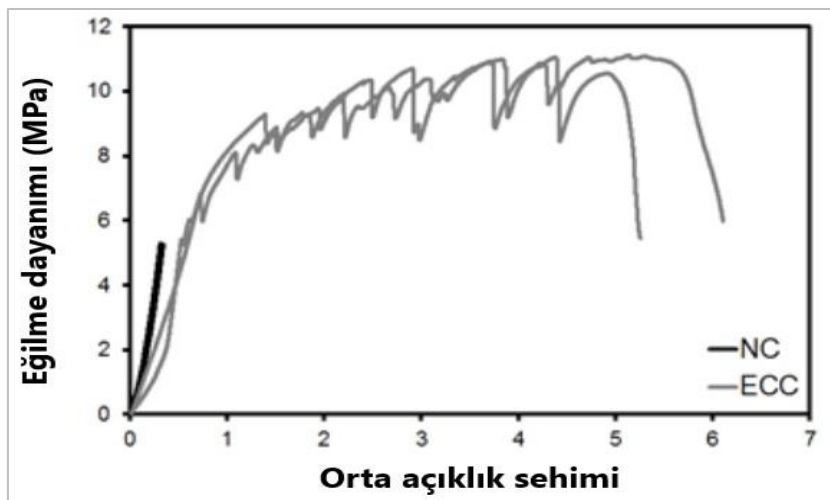
Bu tez çalışmasının amacı ise; yukarıda bahsedilen sürdürülebilirlik ve mekanik açıdan üstün özelliği olan, yapı servis ömrü uzun karbon esaslı malzeme takviyesi yapılarak üretilmiş erken ve ileri yaştaki (28 ve 180 gün) ECC'lerin ön yükleme ile hasar verilerek kendiliğinden algılama ve akabinde belli kür koşullarında kendiliğinden iyileşme performansını değerlendirmektir.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1. Mühendislik Özellikleri Tasarlanmış Çimento Bağlayıcı Kompozitler (ECC)

Konvansiyonel betonun gevrek davranışını iyileştirmek için yaklaşık son yirmi yıldır pek çok çaba sarf edilmiştir. Bu tür çabaların başarılı sonuçlarından biri, daha önce söz edildiği üzere Yüksek Performanslı Lif Takviyeli Çimento Esaslı Kompozitler (HPFRCC) kategorisinde yer alan ECC'lerdir (Li, 1998). ECC malzemesinin üstün özelliklere sahip olmasının altındaki en büyük etken, alüminyum gibi yaygın metalik malzemelere benzer şekilde ilk çatlağın oluşmasının ardından gösterdiği yüksek şekil değiştirme kapasitesidir. Mikro-mekanik tasarım kullanılarak ECC'de, nihai kırılma aşamasında dahi mikro çatlak esaslı hasar gelişimine bağlı olarak çatlaklarının genişlikleri yaklaşık olarak  $100\ \mu\text{m}$ 'nin altında kalmaktadır (Şahmaran ve diğerleri, 2013). Ayrıca, homojen olarak dağılmış liflerin, matris özelliklerinin ve matris-lif arasındaki ara yüzün özelliklerinin uygun şekilde dengelenmesiyle,  $30\ \mu\text{m}$  kadar dar genişliğe sahip mikro çatlaklar kolayca elde edilebilmektedir (Şahmaran ve diğerleri, 2012). Çatlak kontrolü, geleneksel ve lif takviyeli betondaki (FRC) çelik donatıya bağlı olsa da çelik donatı oranına bakılmaksızın ECC için karakteristik bir özelliktir. Geleneksel betona ve ECC malzemesine ait karşılaştırma Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Bir ECC numunesine ait dar açıklıklı çatlak oluşumu ise Resim 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Dört noktalı eğilme yükü altında ECC ve normal betonun orta açıklık sehim kapasitesi (Yıldırım, 2020)



Resim 2.1. ECC'nin eğilme yüklemeleri altında çoklu çatlak gelişimi

Çatlak genişliklerinin sınırlı tutulması, ağır çevresel koşullar altında çalışan betonarme yapıların daha uzun servis ömrünün sağlanması için önemlidir (Yıldırım, 2018). Benzer şekilde, literatürdeki geniş kapsamlı araştırmalar göstermektedir ki, ECC dar mikro çatlak gelişimi sayesinde, korozyon (Şahmaran ve diğerleri, 2015), donma/çözülme (Şahmaran ve diğerleri, 2013; Alyousif ve diğerleri, 2016), alkali silika reaksiyonu (Şahmaran ve Li, 2016), sülfat saldırısı (Liu ve diğerleri, 2017), tuz maruziyeti (Şahmaran ve Li, 2009a) gibi betonarme yapılarda gözlemlenen çoğu dayanıklılık sorunlarına karşı oldukça dirençlidir.

ECC karışımları farklı malzeme bileşenleri ile üretilebilir. Bunun yanında, bugüne kadar en çok araştırılan karışım, literatürde standart ECC veya Karışım 45 (ECC-M45) olarak bilinmektedir. ECC-M45'in basınç dayanımı, orta ve yüksek dayanımlı geleneksel betona (30-90 MPa) benzer bir aralıktadır. Bununla birlikte basınç altındaki birim şekil değiştirmesi yaklaşık %50 daha yüksektir. Standart ECC karışımı sırasıyla 7-12 MPa ve 4-7 mm aralığında eğilme dayanımı ve orta açıklık sehim kapasitesi göstermektedir. Tek eksenli çekme yükü koşullarında dayanım ve birim uzama (şekil değiştirme) kapasiteleri ise sırasıyla 4-6 MPa ve %3-5 aralığındadır. Çoklu mikro çatlaklar sayesinde aşırı plastik deformasyon yapma yeteneği, çekmeye dayalı yükleme koşulları altında geçerlidir (örneğin; tek eksenli, eğilme ve yarma gerilmesi). Ayrıca ECC karışımlarının içeriği, belirli bir ihtiyaç için gerekli mekanik özellikleri elde edecek şekilde modifiye edilmektedir. ECC'nin yukarıda belirtilen üstün mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin yanı sıra ECC, aynı zamanda otojen kendi kendine iyileşme gibi yapısal olmayan özelliklerle de karakterize edilmektedir. Loving (1936), Lauer ve Slate (1956)'nin çalışmalarından da görüleceği üzere, çimentolu malzemelerde otojen kendiliğinden iyileşme gözlemi iki yüzyıl öncesine kadar dayanmaktadır. ECC, otojen olarak kendiliğinden iyileşme özelliği için en uygun çimento esaslı malzeme tiplerinden biridir ve dış müdahaleye gerek olmaksızın karışım bileşimleri

sayesinde kendi çatlaklarını onarabilmektedir. Yapısal olmayan bir özellik olmasına rağmen, otojen kendi kendine iyileşme, zarar görmüş çimento esaslı malzemelerin mekanik ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirdiğinden dolayı yapısal fonksiyonlara da büyük ölçüde katkı sağlamaktadır (Şahmaran ve Li, 2009a).

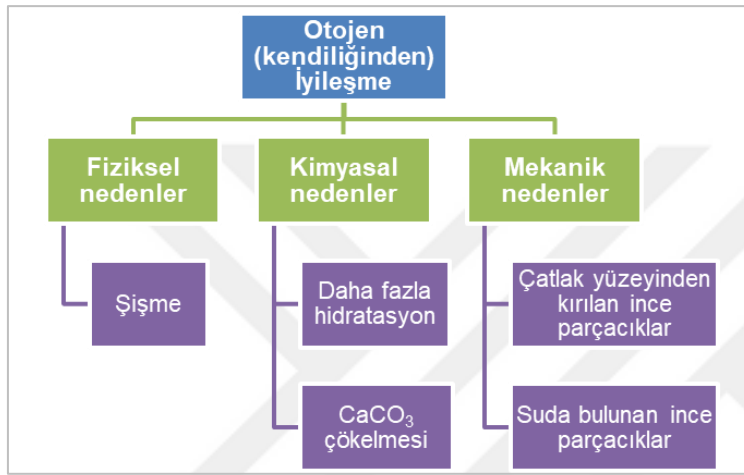
ECC'nin daha fonksiyonel olarak kullanılmasında yarar sağlayabilecek kendiliğinden algılama kabiliyeti, piezo-dirençliliğe (uygulanan gerilmeye bağlı olarak elektriksel direnç değişimi) bağlıdır. Kendiliğinden algılama, kullanıcıların hasar oluşumlarını sürekli olarak gözlemlemelerine olanak sağlamaktadır. Özellikle yapısal sağlık izlenmesi ve ani bozulma risklerini önleme amaçları için oldukça avantajlı olduğu düşünülmektedir (Yıldırım ve diğerleri, 2018a). Geleneksel ECC karışımlarının bileşenleri, Portland çimentosu, puzolanik malzemeler, su, kimyasal katkıları, kum, kısa ve yalıtkan liflerdir. Geleneksel ECC'nin karışım suyunun, hidrasyon ve puzolanik reaksiyonların ilerlemesi üzerine elektriksel iletkenlik derecesinin iyice azalmasına bağlı olarak, neredeyse iletken olmayan ve bu nedenle uygulanan gerilmelere karşılık elektriksel direnç özelliklerinde değişim gösteremeyen bir malzeme olduğu kabul edilebilir. Bununla birlikte, literatürdeki pek çok araştırma, geleneksel ECC tasarımı üzerinde gerekli uyarlamaların yapılarak kendi kendine algılama özelliğinin kazandırılmasını ve meydana gelen hasarların başarılı bir şekilde izlenebileceğini açıkça ifade etmektedir (Ranade ve diğerleri, 2014). ECC malzemesinde ilk çatlak oluşumundan sonra ani kırılma olmadığı ve aşırı plastik deformasyon sergilediği için, elektriksel ölçümlerle hasarın izlenmesi daha kolay yapılabilir.

Öte yandan, nano malzemelerin harç ve beton gibi inşaat malzemelerinde kullanımı günümüzde popüler hale gelmiştir. Literatür araştırmaları göstermektedir ki, nano malzemelerin çimento içeren sistemlerde kullanılması daha çok taze özellikleri, hidrasyon, mikro yapı, gözenek yapısı incelemelerine ve mekanik/taşıma/dayanıklılık özelliklerinin karakterizasyonuna odaklandığını ortaya koymaktadır (Safiuddin ve diğerleri, 2014). Ancak farklı nano materyallerin kullanımıyla ilgili olarak ECC, halihazırda hala pek çok bilgi eksikliği içermeye devam etmektedir. Bu üstün malzemelerin çok fonksiyonlu olması hakkında ayrıntılı bilgi vermek amacıyla aşağıdaki bölümler, ECC karışımları ile birlikte üretilen kendiliğinden iyileşme/algılama davranışları hakkında detaylı tartışmalara ayrılmıştır.

## 2.2. Tasarlanmış Çimentolu Kompozitlerin Çok Fonksiyonlu Özellikleri

### 2.2.1. Otojen kendiliğinden iyileşme

Çimento esaslı malzemelerdeki otojen kendiliğinden iyileşme olgusunun tez çalışmasının giriş kısmında da ifade edildiği ve Şekil 2.2’de görüleceği üzere fiziksel, kimyasal ve mekanik mekanizmalardan kaynaklandığı belirtilmiştir (Rooij ve diğerleri, 2013).



Şekil 2.2. Çimento esaslı malzemelerde otojen kendiliğinden iyileşme mekanizmaları (Rooij ve diğerleri, 2013).

Bunların içerisinde belirleyici rol oynayan mekanizmalar, çimento tanelerinin sürekli hidratasyonunu ve kalsiyum karbonatın ( $\text{CaCO}_3$ ) çökmesini içeren kimyasal bir dizi işlemlerdir. Hidratasyonun devamında yer alan reaksiyonlar literatürde oldukça iyi bilinmektedir. Genellikle kapalı çatlaklar üzerinde beyaz kalıntılar olarak gözlemlenen  $\text{CaCO}_3$ , hidratasyon ürünlerinden ve reaksiyondan ayrılan bikarbonat ve/veya karbonat iyonlarının kombinasyonundan oluşan  $\text{Ca}^{2+}$  iyonları ile meydana gelmektedir. Devam eden hidratasyon reaksiyonları sonucunda oluşan kendiliğinden iyileşme ürünlerinin (kalsiyum silikat hidrat jelleri [CSH]), çatlaklı çimento esaslı malzemelerin mekanik özelliklerinin geri kazanılmasında daha değerli olduğu,  $\text{CaCO}_3$  çökelişinin ise farklı taşıma mekanizmalarının geri kazanılması ile daha yakın ilişki içinde olduğu bildirilmiştir (Yıldırım ve diğerleri, 2015a). Bu nedenle, tez çalışmasının bu aşamasında ECC'nin otojen kendiliğinden iyileşme kabiliyetinin etkisine ilişkin mevcut literatür çalışmalarının bir özeti sunulmuştur. Bu özette farklı taşınma özellikleri (geçirgenlik [su, gaz ve klorür iyonu], difüzyon ve emilim) ve

çekme gerilmesine dayalı mekanik özelliklerde (tek eksenli, eğilme ve yarma gerilmesi) geri kazanımlara değinilmiştir.

### 2.2.2. Su geçirimliliği

ECC'nin su geçirimliliğine ilişkin en eski çalışmalardan biri Lepech ve Li (2009) tarafından yapılmıştır. İlgili çalışmada araştırmacılar, standart ECC-M45 numunelerinin ve farklı karışım oranlarına sahip harçların su geçirimlilik sonuçlarını tek eksenli çekme yükü altında test ederek hasar öncesi ve sonrası durumda kıyaslamalı olarak analiz etmişlerdir. Sonuçlar, aynı ön yükleme seviyesinde, ECC'nin su geçirimlilik sonuçlarının, diğer farklı karışım oranlarına sahip harçlarınkine kıyasla daha az olduğunu göstermiştir. Gözlenen davranışın nedenleri sadece ECC'nin daha küçük çatlak genişliklerine değil, aynı zamanda su geçirimliliği testlerinin uygulanması sırasında otojen kendiliğinden iyileşme yoluyla bu mikro çatlaklarda beyaz birikintiler olarak da görülebilen  $\text{CaCO}_3$  çökeltilerinin oluşumuna da bağlanmıştır.

Başka bir çalışmada farklı kür yaşlarına ve farklı bozulma seviyelerine maruz kalan ECC karışımlarına ait numunelerin kendiliğinden iyileşme performansı araştırılmıştır (Ma ve diğerleri, 2014). Sonuçlar, ilk 3 ila 4 çevrim ıslanma kuruma işleminin, su geçirimlilik derecesini hızla azaltmada çok etkili olduğunu göstermiştir. Etkili bir başka kür rejimi, ilave  $\text{CaCO}_3$  kristallerinin oluşumunu kolaylaştıran ve havadaki  $\text{CO}_2$ 'nin bolluğuna bağlı çevrimsel ıslanma kurulanma kür tipidir. Bir başka çalışmada, ECC'nin kendi kendini iyileştirme kabiliyeti Zhang ve Zhang (2017) tarafından yapılan doğrudan su akışı testleriyle de araştırılmıştır. 28 ila 90 günlük kür süresinden sonra ön yüklenen numuneler, 20° C'de suya batırma, 60° C'de sıcak suya daldırma ve kalsiyum hidroksit ile doymuş çözelti içine daldırma olmak üzere üç farklı çevre koşuluna tabi tutulmuştur. Kür yaşından bağımsız olmak üzere, kendiliğinden iyileşme yoluyla çatlakların kapanması su miktarının geçirimliliğini önemli ölçüde azaltmıştır.

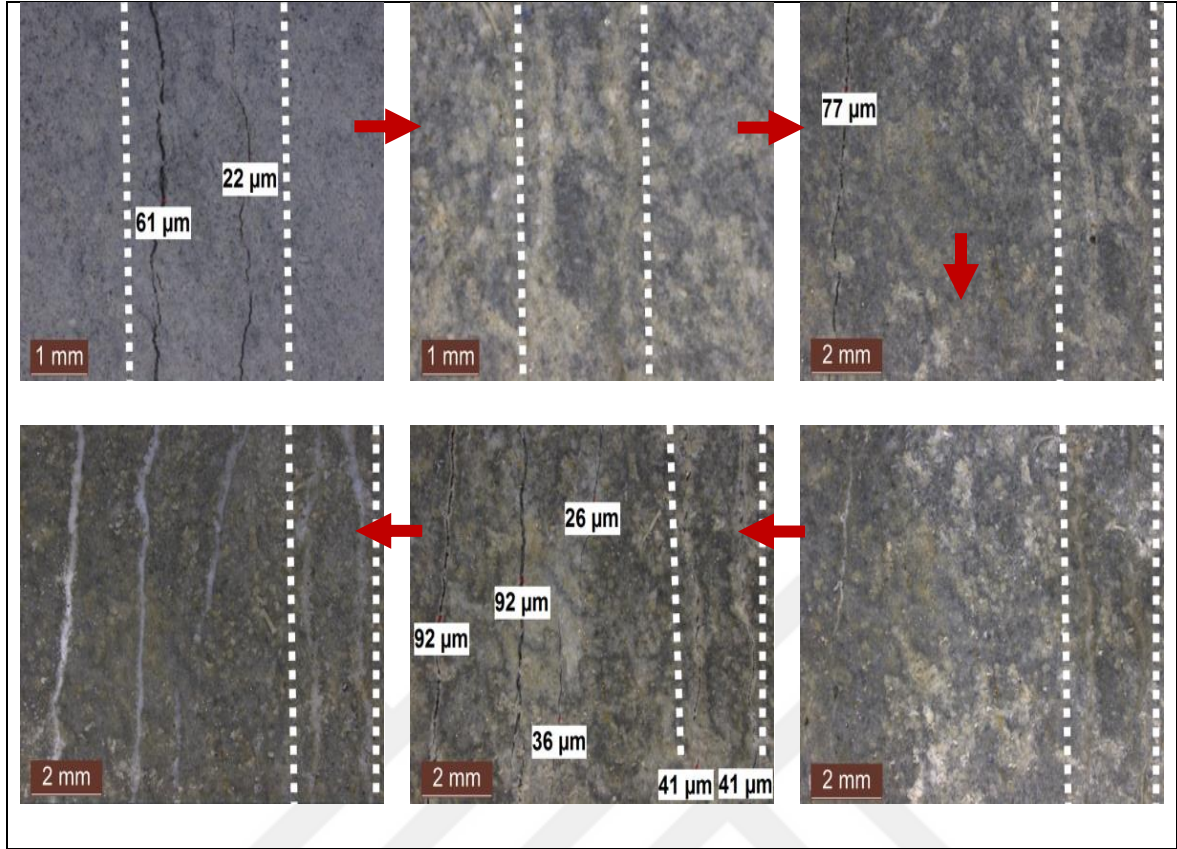
### 2.2.3. Hızlı klorür geçirimliliği testi

Hızlı klorür geçirimliliği testi (HKİG) (Rapid Chloride Permeability Tests [RCPT]), ASTM C1202 standardına uygun olarak, ECC'nin kendiliğinden iyileşme davranışını test etmek için kullanılan pratik yöntemlerden biridir. HKİG testi aslında betonun geçirimliliğini ölçmese

de farklı gözenek karakteristikleri ve gözenek çözeltisi kimyası da dahil olmak üzere belirli parametrelerden etkilenen elektrik akımına karşı malzeme direnci hakkında fikir verir. HKİG sonuçları, çimento esaslı malzemelerin donatı korozyonu ile alakalı bilgi veren bir test olması nedeniyle de avantajlıdır. Bu nedenle konuyla ilgili literatürden seçilen bazı çalışmaların bulguları aşağıda sunulmuştur.

Şahmaran ve diğerleri (2013), HKİG testlerinde yüksek hacimli farklı pozolanik malzemelerle (düşük kireçli F sınıfı uçucu kül, yüksek kireçli C sınıfı uçucu kül ve cüruf) üretilen 60 günlük ağır hasarlı ECC numunelerinin kendiliğinden iyileşme yeteneğini araştırmışlardır. Kendi kendine iyileşmenin gözlemlenmesi için, numuneler sürekli su (SS), sürekli hava (SH) ve donma/çözülme (D/Ç) çevrimleri altında 60 gün boyunca küre tabi tutulmuştur. Deneysel sonuçlara göre, SS kürünün, HKİG testi sonuçlarının geri kazanılmasında en etkili kürleme yöntemi olduğu bulunmuştur. 60 günlük çevrimsel D/Ç maruziyetinden (300 döngü) sonra dahi, cüruf içeren ECC numunelerinin, HKİG test sonuçları, başlangıçta ölçülen 60 günlük sonuçlardan daha düşük değer vermiştir. Bu sonuç farklı uçucu kül türlerine sahip numuneler için geçerli değildir. Bu nedenle, cüruf içeren numunelerin mikro çatlaklarındaki kendiliğinden iyileşme olgusu, D/Ç'nin zararlı etkilerini karşıladığı anlamına gelmektedir.  $\text{CaCO}_3$ , cüruf içeren numuneler için kendiliğinden iyileşme ana ürünü iken; farklı uçucu kül türlerine sahip olan numuneler için, kendiliğinden iyileşme ana ürünleri olarak, çatlak yüzeylerinde CSH jelleri ve  $\text{CaCO}_3$  olarak gözlemlenmiştir.

Yıldırım ve diğerleri (2015b) tarafından yapılan çalışmada, yüksek hacimli F sınıfı uçucu kül içeren ECC karışımları, farklı miktarlarda hidrate edilmiş kireç ilavesiyle üretilmiştir (%0 [F-ECC\_0], %2.5 [F-ECC\_2.5] ve %5.0 [F- Çimento esaslı malzemelerin toplam ağırlığının % ECC\_5.0'ı]). Kendiliğinden iyileşme mekanizmalarının tekrar edilebilirliği, numunelerin tekrarlı olarak ön yüklemmeden önce ve sonra olarak test edilmesi ile araştırılmıştır. Numuneler ıslak/kuru (I/K) kür çevrimlerine maruz bırakılmıştır. Ardından kendiliğinden iyileşme performansının belirlenmesi için HKİG testi yapılmıştır. Sonuçlar, sırasıyla F-ECC\_0, F-ECC\_2.5 ve F-ECC\_5.0 numunelerinin ortalama HKİG test değerleri ile beş tekrarlı önyüklemenin ardından değerlendirilmiştir. Nihai durumda 50 I/K kür çevrimini takip eden numuneler, orijinal değerlerden sırasıyla %40, %37 ve %2 oranında daha az HKİG değerleri göstermiştir. Tekrarlanan kendiliğinden iyileşme mekanizmalarına ait ürünler, numunelerin farklı çatlak yüzeylerinde de tespit edilmiştir (Resim 2.2).

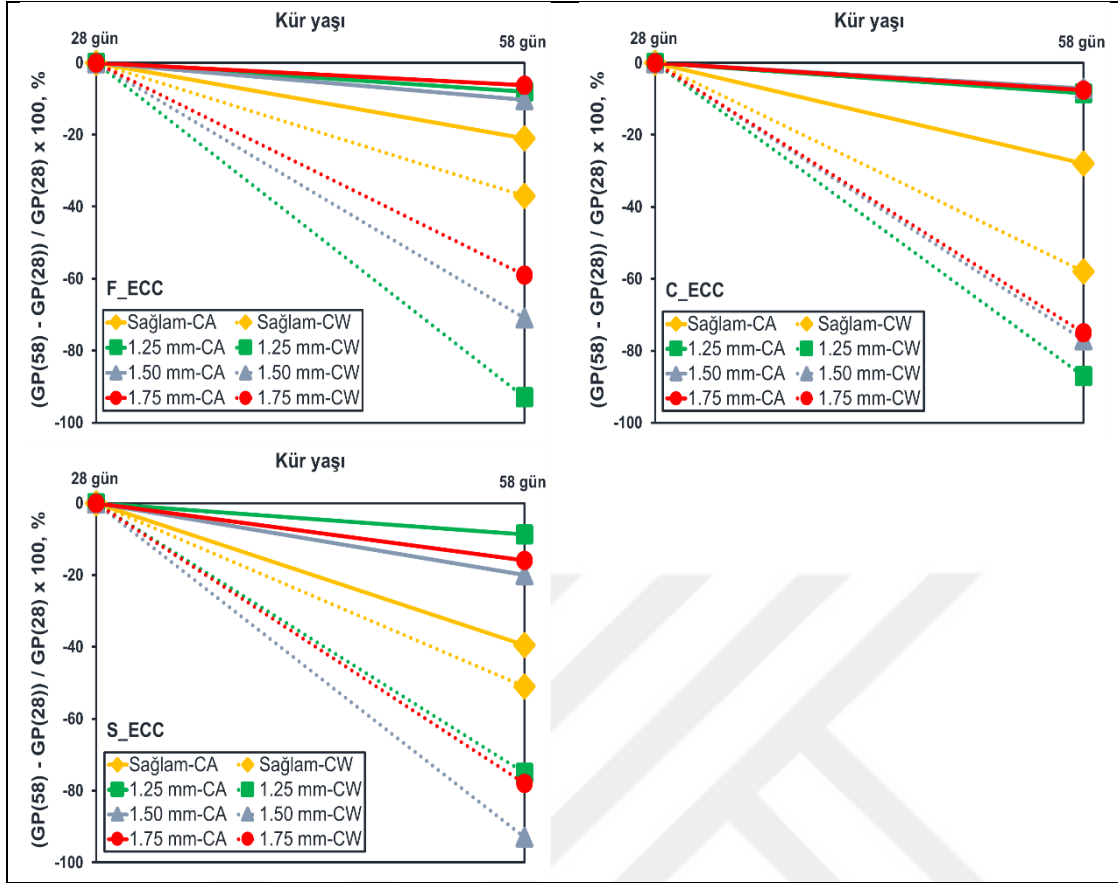


Resim 2.2. Tekrarlı önyüklemeden önce ve sonraki I/K döngüleri sırasında F-ECC\_5.0 numunelerinin mikro ölçekteki çatlak görüntüleri (kesikli çizgiler arasındaki mikro çatlaklar ilk önyüklemeden sonra oluşturulmuştur) (Yıldırım ve diğerleri, 2015b)

Yıldırım ve diğerleri (2018b) tarafından yapılan bir başka çalışmada, çatlak iyileşmesinin ileri yaştaki numunelerde geçerli olup olmadığını anlamak için araştırma yapılmıştır. Bu araştırma sırasında HKİG testi kendiliğinden iyileşme performansını değerlendirmek için kullanılan yöntemlerden birisidir. Deneysel sonuçlar, ileri yaştaki ECC numunelerinin (365 gün) çatlak iyileşme performansının erken yaştaki numuneler kadar etkin olabileceğini göstermiştir. Sonuçlarda, 458 µm'ye kadar mikro çatlak genişliklerinin, uygun şekilde numunelere uygulanan sınırlı bir kür süresi içinde karışım bileşimleri ile kendiliğinden kapatılabileceği ortaya konmuştur. Söz konusu kendiliğinden kapanabilen çatlak genişliği seviyesinin, mevcut literatürdeki en yüksek seviye olduğu belirtilmiştir. Benzer şekilde, ECC'nin belirli şartlar altında kendiliğinden iyileşme yeteneği, ağır hasar görmüş numunelerin HKİG test sonuçlarının, sağlam olanlarla neredeyse aynı olmasını sağlamıştır.

#### 2.2.4. Gaz geçirgenliği

elik donatının korozyonu, ülkelerin altyapılarını bozan ve tekrar yenilenmesini gerektiren en yaygın dayanıklılık sorunlarından biridir. Donatı korozyonu çeliği koruyan pasif film katmanının parçalanmasıyla başlamaktadır. Korozyonun başlamasında ve ilerlemesinde rol oynayan mekanizmalar imento esaslı sistemlerde bazı gaz halindeki maddelerin varlığını gerektirmektedir. Bu nedenle, gaz halindeki bazı içeriklerin imento esaslı sistemlerde geçirgenlik üzerinden kontrol edilmesi, korozyona karşı korunma için kritik öneme sahiptir. Gaz geçirgenliğinin, imento tabanlı malzemelerin özellikleri üzerindeki etkileri literatürde yaygın olarak bulunmaktadır. Ancak bu durum, hava akımı ölçümleri bakımından kendiliğinden iyileşme değerlendirmeleri için geçerli değerdir. Bu boşluğu gidermek için Yıldırım ve diğerleri (2015c) tarafından, yüksek hacimlerde farklı puzolanik malzemelerle üretilen ECC karışımının (F sınıfı uçucu kül içeren [F\_ECC], C sınıfı uçucu kül içeren [C\_ECC] ve cüruf içeren [S\_ECC]) gaz geçirimliliği ölçümlerini içeren ortak bir çalışma geerleştirilmiştir. Bu alışma için 28 günlük silindirik ECC numunelerine, 1,25; 1,50 ve 1,75 mm'lik yarma çekme deformasyon seviyelerine kadar önceden hasar verilmiştir. Hasar seviyeleri farklı karışımın nihai yarma çekme deformasyon kapasitesinin %50, %60 ve %70'ine karşılık gelmiştir (ortalama 2,50 mm). Bazı sağlam numuneler de karşılaştırma yapmak amacıyla kullanılmıştır. Numunelerin kendiliğinden iyileşmesini sağlamak için sürekli su (SS) veya sürekli hava (SH) koşullarında 30 gün boyunca kür işlemi uygulanmıştır. Sonuçlar, 50 m'den daha geniş olmayan dar açıklıklı çatlakların, gaz geçirgenliğindeki çarpıcı azalışlardan sorumlu olabileceğini göstermiştir. ECC üzerinde yapılan hava akımı ölçümlerinin sonuçları, çatlakların genişliğine, çatlak sayısından daha fazla bağlıdır. Gaz geçirgenliği açısından kendiliğinden iyileşme, daha fazla kr edilmiş numuneler üzerinde daha etkili olmuştur. Özellikle su ile kr edilmiş numunelerde kendiliğinden iyileşme derecesi gaz geçirimliliği açısından çok daha st seviyelere çıkarılmıştır. SH ve SS krleri dikkate alındığında karışım bileşimlerine bağlı olarak yaklaşık sırasıyla %20 ve %90'dan fazla gaz geçirimliliği artışı kaydedilmiştir (şekil 2.3).



Şekil 2.3. 28 günlük başlangıç küründen sonraki 30 günlük kür uygulamasından sonra ECC karışımlarının gaz geçirgenliği (GP) ölçümlerindeki yüzde değişimi (Yıldırım ve diğerleri, 2015c)

### 2.2.5. Difüzyon

Deniz suyu ve/veya buz çözücü tuzlardan kaynaklanabilen klorür iyonları, betonun içinde ve dışında iyonik konsantrasyon denge haline gelinceye kadar beton yüzeyinden yayılabilir. Klorür difüzyonu, donatı üzerindeki koruyucu pasif filme çok hızlı bir şekilde zarar vererek, demir korozyonunun önemli ölçüde hızlanmasına neden olabilir. Bu nedenle, klorür iyonlarının donatı ile güçlendirilmiş çimento esaslı malzemelere difüzyonunu önlemek kritik öneme sahiptir. Özellikle betonarme sistemlerin çatladığı durumlarda bu husus çok daha önemli hale gelmektedir. Klorür iyonlarının ECC'ye penetrasyonunu değerlendiren en eski çalışmalardan biri Miyazato ve Hiraishi tarafından yapılmıştır (Miyazato ve Hiraishi, 2005). Aynı eğilimde çekme yükleri altında önyüklenmiş ve aynı şartlarda hızlandırılmış klorüre maruz kalan betonarme ve takviyeli ECC kirişleri için, kaydedilen klorür iyonu penetrasyon derinliğinin ECC esaslı numuneler için önemli ölçüde daha düşük olduğu gösterilmiştir. Şahmaran ve diğerleri (2007) tarafından yapılan çalışmada, farklı deformasyon

seviyelerinde standart ECC karışımlarına (ECC-M45) ve farklı harç karışımlarına ait numunelerin difüzyonu belirlenmiştir. Bu çalışma sonunda, ECC'nin difüzyon katsayısı sonuçları değerlendirildiğinde diğer harç numunelerine kıyasla NaCl çözeltisine maruz kalmış 30 günlük ECC numunelerin daha düşük difüzyona sahip olduğu sonucuna varılmıştır (Çizelge 2.1). ECC numunelerinin mikro çatlakları CSH jelleri, kalsiyum hidroksit ve tuz birikintilerinin karışımı olduğu tespit edilen beyaz renkli kendiliğinden iyileşme ürünleri ile kaplanmıştır. Klorür iyonlarının, farklı hacimlerde uçucu kül ile üretilen ECC karışımlarına difüzyonuna, Şahmaran ve Li'nin (2009a) çalışmasında da dikkat çekilmiştir. Bu çalışmada, ECC-1 (ECC-M45'e benzer şekilde) ve ECC-2 karışımlarında, sırasıyla ağırlıkça %55 ve %70 oranında F sınıfı uçucu kül Portland çimentosu yerine kullanılmıştır. Hem ECC-1 hem de ECC-2 karışımlarının difüzyon katsayıları, NaCl'ye maruz bırakılmış çatlakların kendiliğinden iyileşmesi nedeniyle, diğer harç numunelerinden (Çizelge 2.1) oldukça düşük tespit edilmiştir.

Çizelge 2.1. Farklı ECC karışımları ve lif donatılı diğer harç numuneleri için difüzyon katsayısı ile ön yükleme deformasyon seviyesinin ilişkisi (Şahmaran ve Li, 2009a; Şahmaran ve diğerleri, 2007)

|                                                       | Harç  | ECC-1 (ECC-M45) | ECC-2 |
|-------------------------------------------------------|-------|-----------------|-------|
| Kiriş<br>Deformasyonu, mm                             | 0,00  | 0,00            | 0,00  |
|                                                       | 0,70  | 1,00            | 1,00  |
|                                                       | 0,80  | 1,50            | 1,50  |
|                                                       | 0,83  | 2,00            | 2,00  |
| Ortalama çatlak genişliği,<br>µm                      | —     | —               | —     |
|                                                       | ~150  | ~50             | ~10   |
|                                                       | ~300  | ~50             | ~25   |
|                                                       | ~400  | ~50             | ~35   |
| Etkili difüzyon katsayısı,<br>$m^2/s \times 10^{-12}$ | 10,6  | 6,75            | 10,7  |
|                                                       | 35,5  | 28,0            | 27,1  |
|                                                       | 126,5 | 37,5            | 48,8  |
|                                                       | 205,8 | 54,2            | 106,3 |

Ayrı bir araştırmada Li ve diğerleri (2007) tarafından, deniz ortamına maruz bırakılan sağlam ve önceden çatlak oluşturulmuş ECC numunelerinin dayanıklılıkları ve mekanik özellikleri test edilmiştir. ECC'nin, deniz ortamına maruz kalmadan önce şekil değiştirme sertleşmesi gösterdiği seviyede dahi dayanıklılık özellikleri büyük ölçüde doğrulanmıştır. Mikro çatlakların kendi kendini iyileştirmesi sayesinde, numunelerin test sonuçlarındaki geri kazanımlar göze çarpmaktadır.

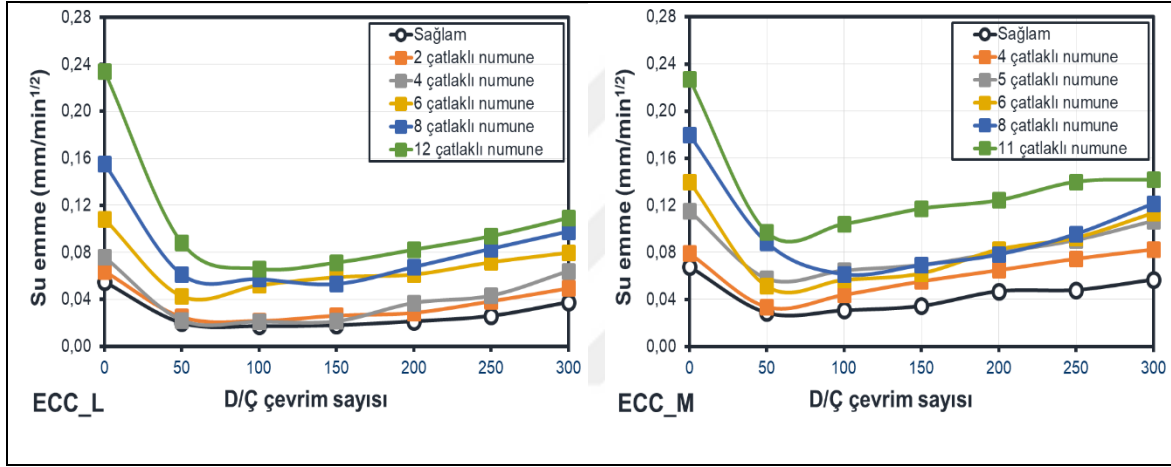
### 2.2.6. Su emme

Genel olarak beton yapılar, çoğu durumda rüzgâr ve güneşin varlığı nedeniyle kuru ya da kısmen kuru koşullardadır. Geçirgenlik ve difüzyona göre kuru ya da kısmen kuru halde olan ana taşıma mekanizması, çeşitli ortamlarda kılcal emme mekanizmasından kaynaklanmaktadır. Farklı miktarlarda F-sınıfı uçucu kül ile üretilen ve ön yükleme uygulanarak çatlak oluşturulmuş ECC numunelerinin su emme özellikleri Şahmaran ve Li (2009a) tarafından çalışılmıştır. Aynı araştırmacılar, önceden ECC-M45 numunelerinin su emme özellikleri üzerine su itici katkı kullanmanın etkilerini de incelemişlerdir (Şahmaran ve Li, 2009b). Yazarlar, her iki çalışma için de önceden çatlak oluşmuş ECC numunelerinin su emme derecesinin, gerçek yapılardaki su emme derecesinin üst sınırlarını temsil ettiği sonucuna varmışlardır. Bunun nedeni nemli ortamda yapılan su emme testlerinin sadece 6 saat sürmesidir. Bu sınırlı test süresi boyunca, mikro çatlakların kendi kendine iyileşmesi olası değildir ve deneylerin gerçek sonuçlardan daha yüksek su emme değerleri göstermesi muhtemeldir.

Zhang ve diğerleri (2014) yapmış oldukları çalışmada, farklı F sınıfı uçucu kül içeren, hasarlı ECC numuneler üzerindeki mikro çatlakların kendiliğinden iyileşmesini değerlendirmiştir. Bu amaçla su emme testleri gerçekleştirmişlerdir. Numunelerin daha fazla su ile kürlenmesinden sonra, mikro çatlakların kendiliğinden iyileşmesinin bir sonucu olarak, su emme ölçümlerinde büyük düşüşlerin kaydedildiği bildirilmiştir. Kendiliğinden iyileşme, çimento esaslı partiküllerin devam eden hidrasyonu ve uçucu külün puzolanik reaksiyonları ile ilişkilendirilmiştir.

Alyousif ve diğerleri (2015), su emme ölçümleri bakımından çok çeşitli kimyasal bileşimlere sahip mineral katkılarla üretilen 7, 28 ve 90 günlük mikro çatlaklı çimento esaslı kompozitlerin kendiliğinden iyileşme kabiliyetini değerlendirmiştir. Bulguları, uygun mineral katkı tipinin seçimine, kür yaşına ve ECC numunelerinin ilave kür süresine bağlı olarak kendiliğinden iyileşme derecesinin değiştiğini göstermektedir. Araştırma sonuçlarında mikro çatlaklı numunelerin su emme sonuçlarının, otojen kendiliğinden iyileşme sayesinde %92'ye kadar geri kazanılabileceği gösterilmiştir. Ayrıca, bu iyileşme seviyesinin daha çok 7 günlük kür yaşlarında meydana geldiği bildirilmiştir.

Başka bir çalışmada Alyousif ve diğerleri (2016), çevrimsel donma ve çözülme (D/Ç) etkisi altında suyun, dört farklı tipte mineral katkı ile üretilen mikro çatlaklı çimento esaslı kompozitlere hareketini, bir dizi su emme ölçüm testleri ile incelemiştir. Deneysel sonuçlara göre, ECC üretiminde kullanılan mineral karışımının tipine ve numuneler üzerindeki mikro çatlakların sayısına bağlı olarak, çimento esaslı kompozitlerin toplam 300 D/Ç çevrimi olmak üzere 100 ve/veya 150'sinin sonuna kadar su emme derecesinde önemli düşüşler olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 2.4). Bu nedenle, çevrimsel donma maruziyetlerinin çözülme aşamasında, numunelerin mikro çatlaklarının iyileştiği ve kendiliğinden iyileşmenin avantajlarının don etkisinin kötü etkilerini baskıladığı öne sürülmüştür.



Şekil 2.4. D/Ç çevrimleri ile sağlam ve mikro çatlaklı ECC numunelerinin su emme ölçümlerindeki değişiklikler (ECC\_L ve ECC\_M, F Sınıfı uçucu kül ile karışımları temsil eder) (Alyousif ve diğerleri, 2016)

### 2.2.7. Tek eksenli çekme testi

Literatürde aşağıda verilen çalışmalarda, tek eksenli çekme testi parametrelerinde kaydedilen geri kazanımlarla ECC'nin kendiliğinden iyileşme etkinliği değerlendirilmiştir. Tek eksenli çekme testi üzerinden yapılan kendiliğinden iyileşme araştırmaları ile ilgili olarak bu çalışmaların özetleri sunulmuştur.

Yang ve diğerleri (2009), ileri yaş (6 aylık) ECC numunelerinin kendiliğinden iyileşme kabiliyetlerini %0,3-3'e kadar şekil değiştirmiş olan kupon numuneler üzerinde test etmiştir. Şekil değiştirmiş numunelerin kendiliğinden iyileşmesi için farklı tip döngüsel ıslanma ve kuruma koşulları uygulanmıştır. Sonuçlar, kür koşullarından bağımsız olarak, hasar verilmiş numunelerin tek eksenli gerilme altında rijitliklerini önemli ölçüde geri kazanabildiklerini

göstermiştir. Ciddi şekilde hasar görmüş numuneler için dahi (%3'üne kadar şekil değiştirmeye maruz kalmış), kür uygulamasından sonra, sağlam numunelerin çekme yükleri altındaki deformasyon kapasitesine benzer özelliklerde geri kazanım sağlandığı gözlemlenmiştir. Yang ve diğerleri (2011) ayrıca, 3 ve 90 günlük ön yüklenmiş ECC numunelerinin kendi kendini iyileştirme yeteneğini, farklı kür rejimlerine tabi tuttukten sonra, numuneleri mekanik geri kazanımları açısından test etmişlerdir. Kür sonrasında, numunelerde meydana gelen mekanik geri kazanımlar, mikro çatlakların kendiliğinden iyileşmesine atfedilmiştir. Ayrıca, çatlakların ileri yaştaki numunelerde erken yaştaki numunelere kıyasla daha yüksek iyileşme oranları gösterdiği rapor edilmiştir.

Şahmaran ve Li (2008), 28 günlük numuneleri sağlam ve ön yüklenmiş halde (şekil değiştirme kapasitesinin %1 ve %2'si kadar) test etmiştir. Numuneler dayanıklılıklarının test edilmesi için maksimum 90 günlük bir süre boyunca yüksek alkali ortamda bekletilmiştir. Bu çalışma, çok tehlikeli derecede yüksek alkali ortamlara maruz kalsa bile, ağır hasar almış numunelerin mühendislik özelliklerindeki geri kazanımların, şekil değiştirme kapasitelerindeki belirli kayıplara rağmen, mikro çatlakların kendiliğinden iyileşmesi sonucu mümkün olduğunu göstermiştir. ECC'nin kendi kendini iyileştirme kabiliyeti, mikro yapısal gözlemler sayesinde de doğrulanmıştır. Çalışma sonunda, yüksek alkali ortamlara sınırlı bir süre daha maruz kaldıktan sonra bile kendiliğinden iyileşme ürünlerinin, numunelerin ilave çekme gerilme yüklerinin taşınmasına ve şekil değiştirme kapasitesinin hasarsız özelliklere yaklaşmasına yardımcı olduğu tespit edilmiştir.

Şahmaran ve Li (2007), donma ve çözülme (D/Ç) çevrimi ve buz çözücü tuzların birleşik zararlı etkileri altında, farklı miktarlarda F sınıfı uçucu kül ve hava sürükleyici ajanlar olmadan üretilen ECC'nin dayanıklılık özelliklerini test etmişlerdir. 28 günlük sağlam ve ön yüklenmiş (%1 ve %2'lik şekil değiştirme seviyelerine kadar) numuneler, buz çözücü tuzların varlığında 25 ve 50 D/Ç çevrimlerine maruz bırakılmıştır. Numunelerin kendiliğinden iyileşme sonucunda geri kazanımlarını incelemek için tek eksenli çekme yüklemesi altında yeniden yükleme yapılmıştır. Başlangıçtaki şekil değiştirme seviyesinden bağımsız olarak, mikro çatlaklı numuneler, donmanın ardından çözülme sırasında mikro çatlakların iyileşmesine bağlı olarak önemli seviyede bir geri kazanım sergilemiştir.

### 2.2.8. Eğilme testi

Çimento esaslı kompozitlerin şekil değiştirme sertleşmesine karar vermede en doğru test yöntemi tek eksenli çekme testi olarak kabul edilir. Bununla birlikte, tek eksenli çekme testleri altında yapılan şekil değiştirme ölçümlerinin, test edilen kompozitler sertleşirme kabiliyetine sahip olduğu sürece, farklı eğilme testleri altında yapılan yer değiştirme ölçümleriyle ilişkili olabileceği rapor edilmiştir (Qian ve Li, 2008). Literatürde gerçekleştirilen birçok çalışma, ECC'de kendi kendini iyileştirme oluşumuyla eğilme testi neticesinde saptanan mekanik özelliklere dair parametrelerin geri kazanılmasına odaklanmıştır (Qian ve diğerleri, 2009; Qian ve diğerleri, 2010; Özbay ve diğerleri, 2013a; Yıldırım ve diğerleri, 2015d). Aşağıdaki paragraflarda, seçilen çalışmalardan bazıları kısaca özetlenmiştir.

Qian ve diğerleri (2009) tarafından, şekil değiştirme sertleşmesi sergileyen çimento esaslı kompozitler (Strain Hardening Cementitious Composites [SHCC]) (burada belirtilen ECC'ye birçok yönden çok benzer malzemelerdir) dört noktadan eğilme testine maruz bırakılmıştır. Numunelerin hasar verilmiş halde sehim kapasitesindeki geri kazanımları kendi kendini iyileştirme etkisinden sonra kaydedilmiştir. Karışımlarda, F sınıfı uçucu kül, kalker tozu ve cüruf gibi çeşitli puzolanik malzemeler farklı kombinasyonlarda kullanılmıştır. Başlangıçta 2,4 mm'lik sehim seviyesinde hasar verilen kiriş numuneleri, dört noktadan eğilme yüklemesi altında numunelerin kırılmaya kadar tekrar test edilmesini gerçekleştirmeden önce kendiliğinden iyileşme için sürekli su veya hava altında kür edilmiştir. Sonuçlar, kendiliğinden iyileşme oranları için suyun varlığının gerekli olduğunu göstermiştir. Böylece sürekli su ile kürlenmiş numuneler %65-105 aralığında eğilme dayanımını iyileştirebilirken, sürekli hava ile kürlenmiş numuneler de bu oran %40-62 aralığında kalmıştır. Sürekli olarak hava ile kürlenmiş numunelere kıyasla, sürekli olarak su ile kürlenmiş numunelerin, başlangıçtaki özelliklerinin önemli ölçüde iyileştirildiği bildirilmiştir.

Yıldırım ve diğerleri (2015d), ECC malzemelerinin olası en kötü senaryolardan birinde hala kendiliğinden iyileşme yeteneğine sahip olup olmadığını görmek için, sürekli artan eğilme yüklemesi altında farklı mineral katkılarla üretilen 180 günlük ECC karışımlarını test etmiştir. Mikro çatlaklar oluşturmak için kiriş numuneleri, numunelerin toplam sehim kapasitesinin %75'ine kadar dört noktalı eğilme yüklemesi altında yüklemeye maruz

birakılmıştır. Ardından, koşulları daha da kötüleştirmek için kiriş numuneleri, Resim 2.3'te gösterilen özel bir ekipman kullanılarak numunelerin nihai sehim kapasitesinin %40'ına ayarlanmış şekilde sürekli yüklemeye maruz bırakılmıştır. Toplam 330 günlük kuruma süresine ulaşmak için 150 gün daha fazla kürlenme tamamlanıncaya kadar, sürekli yükleme seviyesi, numunelerin nihai sehim kapasitesinin %80'ine ulaşana kadar bir tork anahtarı yardımı ile her ay %10 arttırılmıştır. Resim 2.3'te gösterilen özel teçhizatlı kiriş örnekleri, kendi kendine iyileşmeyi sağlamak için sürekli olarak su altında kürlenmiştir. Sonuç olarak, numunelerin farklı eğilme parametrelerinde geri kazanımlar açısından kendi kendini iyileştirme değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışma sonucunda, sürekli yükleme aşamalı olarak arttığında bile, numunelerin sağlam numunelerinkinden daha yüksek eğilme dayanımı sonuçlarına ulaşmasını mümkün kılmıştır. Bununla birlikte, sehim ile ilgili olarak, artan sürekli yükleme ile sonuçlardaki düşüşler kaydedilmiş olmasına rağmen, farklı numunelerde, kaydedilen en düşük sehim sonucu bile (yaklaşık 1,6 mm), geleneksel sağlam beton karışımlarında kaydedilenlerden çok daha fazla meydana gelmiştir.

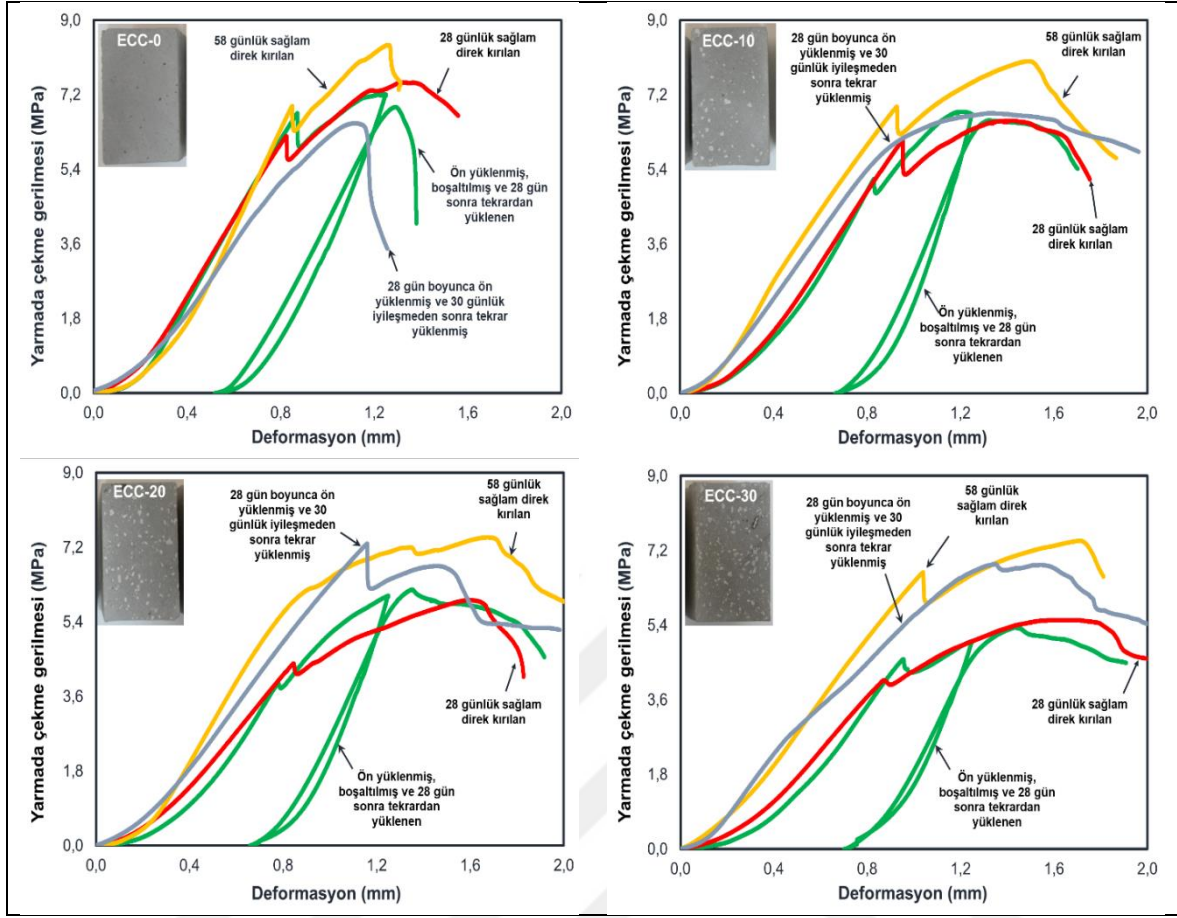


Resim 2.3. (a) Hasarlı numunelerde sürekli yükleme uygulaması için ekipman, (b) tork anahtarı ile sürekli yükleme seviyesinin artırılması, (c) kür için hazır durumda olan numuneler, (d) kendiliğinden iyileşme için suya konmuş numuneler (Yıldırım ve diğerleri, 2015d)

### 2.2.9. Yarmada çekme testi

Yarmada çekme testi ECC'nin kendini iyileştirme yeteneğini karakterize etmek için alternatif bir yöntem olarak kullanılmıştır. Özbay ve diğerleri (2013b) yapmış olduğu çalışmada, farklı oranlarda F sınıfı uçucu kül ile üretilen 28 günlük ECC numuneleri, mikro çatlak oluşumu için 1,25 mm'lik bir deformasyon seviyesine ulaşana kadar yarmada çekme yükü altında yükledikten sonra kendi kendilerini iyileştirme kabiliyetleri için test etmişlerdir. Kendiliğinden iyileşmeyi sağlamak için mikro çatlaklı numuneler, sürekli hava, sürekli su ve döngüsel ıslanma ve kuruma koşulları altında 60 gün boyunca ilave olarak kür edilmiştir. Ardından farklı özelliklerin geri kazanım derecelerinin değerlendirilmesi amacıyla yarmada çekme yükleri altında mühendislik özellikleri tasarlanmış çimento esaslı kompozitler tekrar test edilmiştir. Tüm farklı karışım numuneleri için, su bakımından zengin koşullar altında daha fazla kür işlemi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin kendiliğinden iyileşme dereceleri yük taşıma kapasitesi açısından irdelenmiştir. Ardından, sehim ve tokluk dereceleri de incelenmiş ve geniş kapsamda bir kendiliğinden iyileşme analizi ortaya konmuştur.

Şahmaran ve diğerleri (2014), suya doygun hafif agregaların, ECC numuneleri üzerinde kendiliğinden iyileşme kabiliyeti etkisini araştırmıştır. Hafif agregalar sadece fazla su tutan malzemeler olarak değil aynı zamanda matris kırılma tokluğunu azaltmak, numunelerin esnekliğini arttırmak ve daha dar genişliğe sahip mikro çatlakları elde etmek için de kullanılmıştır. Suya doygun hafif agregaların kullanıldığı dört farklı ECC karışımı, ağırlıkça %0, %10, %20 ve %30 (ECC-0, ECC-10, ECC-20 ve ECC-30) seviyelerinde ince silis kumu ile yer değiştirilmiştir. Hasar oluşturmak için 28 günlük silindirik numuneler 1,25 mm'lik deformasyon seviyesine ulaşana kadar yarma çekme yükü altında önceden yüklenmiştir. 30 gün boyunca sürekli hava altında kürlenmiş numuneler üzerinde kendi kendine iyileşme gözlenmiştir. 28+30 gün sonra çekme özelliklerindeki geri kazanım sağlam numunelerle karşılaştırılmıştır (Şekil 2.5). ECC numunelerinin yarmada çekme dayanımlarındaki ciddi azalmalar, numunelerinin ilk ön yüklenmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte 30 günlük sürekli hava kürü, yarma çekme dayanımı, deformasyon ve rijitliğin önemli ölçüde iyileşmesine neden olmuştur. Bu çalışmanın sonuçları, suya doymuş hafif agregaların sağladığı iç su kürlenmesi sayesinde ECC numunelerinin, yarmada çekme özelliklerinde önemli geri kazanım oranlarının doğrudan havaya maruz kaldıklarında bile elde edilebileceğini göstermiştir.



Şekil 2.5. Farklı deformasyon derecelerindeki ECC karışımlarına ait numunelerin sağlam ve çatlaklı haldeki yarmada çekme gerilmesi-deformasyon grafikleri (Şahmaran ve diğerleri, 2014)

## 2.2.10. Kendiliğinden algılama

Kendini algılayan ECC'nin gelişimi, 2000'li yılların başlarına kadar uzanır (Hou ve Lynch, 2006). Prensip olarak, bu işlev ECC'nin yarı iletken yapısından yararlanır ve yükleme uygulandığında mikro yapısal hasara karşı hassasiyet oluşumuna izin verir. ECC, çekme yüklemesi koşullarında, hasara karşı yüksek tolerans gösteren doğası sayesinde hali hazırda kendini algılama kabiliyetine sahip bir malzemedir. Hasar oluşumunun tetiklediği elektriksel ölçümlerdeki değişikliklerin daha yakından ve daha hassas bir şekilde izlenmesi sağlanır (Ranade ve diğerleri, 2014). Bununla birlikte, hidrasyon/puzolanik reaksiyonlar, suyun mevcudiyeti ve gözenek çözeltisinin kimyasal/iyonik durumu gibi birçok parametre, toplu olarak elektriksel direnci ve dolayısıyla ECC'nin kendini algılama davranışını etkiler. Hasar oluşumunu izlerken elektriksel özelliklerdeki büyük dalgalanmalar, istenmeyen bir durumdur. Bu anlamda, ECC üretiminde genellikle yüksek elektrik iletkenliği sağlamak ve tutarlı algılama sonuçları elde etmek için bazı iletken malzemeler kullanılmaktadır. Kendi

kendini algılayan ECC'nin literatürde ilk defa yer almasından bu yana, ECC'nin kendi kendini iyileştirme çalışmalarına kıyasla sınırlı olmasına rağmen, doğrudan elektriksel özellikler ve malzemelerin hasar izleme yeteneği ile ilgili çalışmalar sayıca artmıştır (Yıldırım ve diğerleri, 2018a; Ranade ve diğerleri, 2014; Şahmaran ve diğerleri, 2017; Yıldırım ve diğerleri, 2018a; Al-Dahawi ve diğerleri, 2016a; Al-Dahawi ve diğerleri, 2016b; Al-Dahawi ve diğerleri, 2017). Aşağıdaki bölümler, yazarların ECC harçlarının ve kompozitlerin, nano ve mikro boyutta karbon esaslı materyallerin varlığında kendi kendini algılama yeteneğine dair yaptığı son araştırmaların detaylandırılmasına ayrılmıştır.

#### ECC matrislerinde karbon esaslı malzemelerin homojen dağılımı

Çeşitli yükleme koşullarında, kendini algılama kabiliyetini sağlamak için, çimento esaslı malzemeler mümkün olduğunca elektriksel olarak iletken olmalıdır. Bu amaca hizmet etmek için, tamamlayıcı bazı malzemeleri çimento esaslı karışımlara dahil etmek yaygın bir uygulamadır. Genel olarak, çimento esaslı karışımları kendi kendine algılayan özelliğe kavuşturmak için, demir ve/veya karbon bazlı malzemeler gibi doğal olarak elektriksel iletken malzemeler kullanılmaktadır. Bununla birlikte çoğu durumda, bu iletken malzemeler mikro hatta nano ölçektedir, yani çok büyük yüzey alanları ile karakterize edilirler ve dağılıma problemi yaratmaktadırlar. Bu nedenle, bu tür elektriksel olarak iletken malzemelerin ECC'nin yoğun matrislerinde düzgün bir şekilde dağılması sorunu daha gelişmiş bir elektriksel özellik için çözüm getirilmesi gereken bir konudur.

Al-Dahawi ve diğerleri (2016a), ECC-M45 harçlarında elyafsız farklı mikro ve nano ölçekli karbon esaslı malzemelerin düzgün dağılımı için farklı karıştırma yöntemleri hakkında kapsamlı bir çalışma yürütmüştür. Gelecekte kendi kendini algılama çalışmalarının temelini oluşturmak için çok önemli bir girdi sağlayan çalışmada, nano ölçekli çok duvarlı karbon nanotüpler (KNT) ve 6 mm (KF6) ve 12 mm (KF12) uzunluğunda mikro ölçekli karbon esaslı elektriksel iletkenliğe sahip ve doğranmış karbon fiberler (KF) ve nano ölçekli endüstriyel grafit nano-trombositler (grafitten yapılmış yeni tip nano partiküller [GNP]) kullanılmıştır. Nano ölçekli karbon esaslı malzemeler için sekiz, mikro ölçekli karbon esaslı malzemeler için ise iki farklı homojen dağılım yöntemi önerilmiştir. Karbon bazlı malzemelerin homojen dağılımının etkinliği, ilk kürlemeden 1, 7, 28, 60, 90 ve 180 gün sonra Ø100×80-mm silindirlerde yapılan tek eksenli elektriksel direnç testleriyle ve ilk kürlemeden 28 gün sonra kübik numunelerde yapılan basınç dayanımı testleriyle

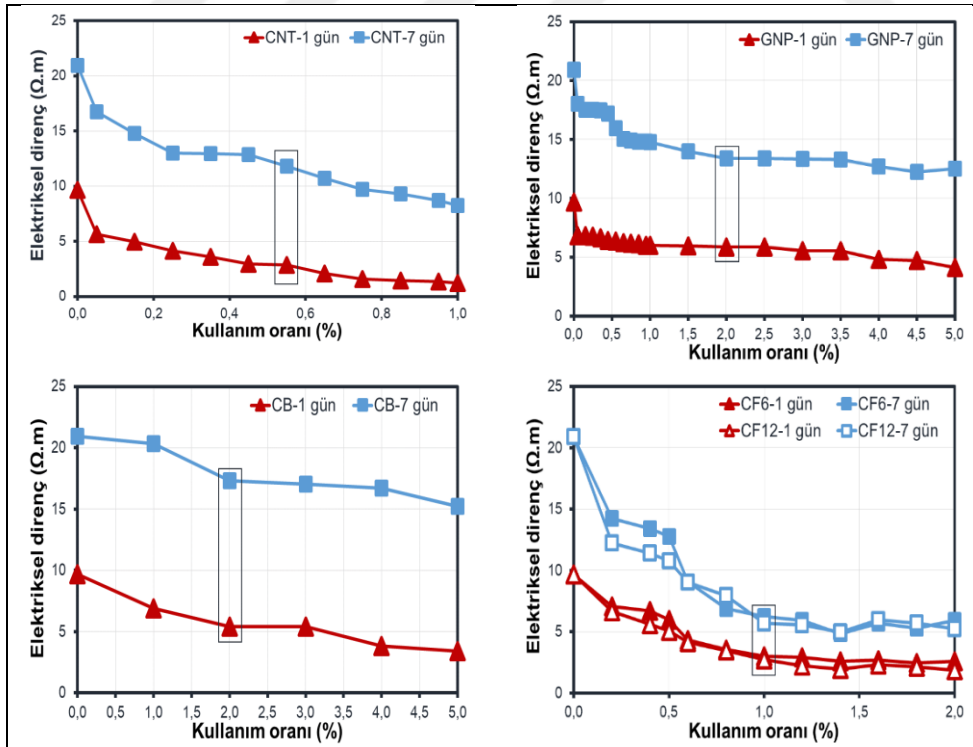
ölçülmüştür. Bu çalışma, elektriksel direnç ve basınç dayanımı ölçümleri açısından, mikro ve nano ölçekli karbon bazlı malzemelerin doğrudan mekanik karışımını içeren geleneksel yöntemlerin, iletken materyaller olmadan referans örneklerle kıyasla daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Tüm farklı karıştırma yöntemleri göz önüne alındığında, GNP ve KF12 sırasıyla nano ve mikro ölçekte diğer karbon bazlı malzemelerden daha iyi performans göstermiştir. Bununla birlikte nano-ölçekli karbon bazlı malzemelerin, seçilmiş geleneksel karıştırma yöntemleri için KNT taşıyan numunelerin, her test yaşının sonunda GNP taşıyan benzerlerinden daha düşük elektriksel dirençli (yüksek iletkenlik) sonuçlara yol açması dikkat çekicidir.

#### ECC matrislerinde karbon esaslı malzemelerin kritik kullanım sınırı

Çimento esaslı kompozitlerde kendini algılama duyarlılığını arttırmak için, genellikle elektriksel olarak iletken malzemeler kullanılır. Bununla birlikte, bu malzemeler, çoğunlukla çimentolu malzemelerin geleneksel bileşenlerinden nispeten daha maliyetlidir. Bu nedenle, ECC sistemlerinde kullanılan bu tür iletken malzemelerin miktarını, elektriksel iletkenlik seviyesinden ve nihai malzemelerin mekanik özelliklerinden ödün vermeksizin optimize etmek gerekir. Bu bağlamda, “elektriksel sızıntı eşiği” terimi kritik oranda kullanılacak malzemeye karar vermek için önemli bir parametredir. Bazı karbon esaslı malzemelere sahip çimentolu kompozitler için elektriksel sızıntı eşiği, bir kompozitin elektrik iletkenliğinde belirgin artışlar görülmeyen minimum karbon bazlı materyal içeriği olarak açıklanabilir. Bu olgu hem maliyet optimizasyonu hem de kompozit malzemenin kendini algılama yeteneği açısından kritik olarak kabul edilebilir. Al-Dahawi ve diğerleri (2016b) tarafından, literatürde ilk kez, standart ECC karışımının matrisleri için farklı nano ve mikro ölçekli karbon bazlı malzemelerin sızıntı eşikleri belirlenmiştir. Al-Dahawi ve diğerleri (2016a) tarafından yapılan çalışmada kullanılan KNT ve GNP partiküllerine ilaveten farklı nano ölçekli karbon bazlı malzemeler olarak, karbon siyahı (KS) kullanılmıştır. Mikro ölçekli karbon bazlı malzemeler olarak, ECC harçlarının hazırlanmasında çalışmada ayrıntıları verilen KF6 ve KF12 kullanılmıştır (Al-Dahawi ve diğerleri, 2016a). İlk kürlenmeden 1, 7, 28, 60, 90 ve 180 gün sonra nano ve mikro ölçekte karbon esaslı malzemelerin sızıntı eşiklerine karar vermek için, karbon bazlı malzemelerin farklı kullanım oranlarına göre Ø100 x 80 mm silindirlerin elektriksel direnç ölçümlerinde değişikliklere dikkat edilmiştir. Yapılan literatür taramasından sonra, ECC harç sistemlerindeki farklı karbon bazlı malzemelerin kritik kullanım oranlarına karar vermek için, KF6 ve KF12'nin karışımlarda

hacimsel olarak %0,2 ila %2 arasında kullanılmasına karar verilmiştir. Bununla birlikte, KNT, GNP ve KS kullanım oranları, çimentolu bileşenlerin toplam ağırlığının sırasıyla %0,05-1'i, %0,05-5'i ve %1-5'i arasında değişmiştir. ECC harçları içerisinde nano ve mikro ölçekli karbon bazlı malzemelerin düzgün dağılmasını sağlamak için çalışmada belirtilen seçilmiş karıştırma yöntemleri kullanılmıştır (Al-Dahawi ve diğerleri, 2016a).

Şekil 2.6'da farklı nano ve mikro ölçekli karbon bazlı malzemeler içeren numuneler için 1 ve 7 günlük ECC harçlarının elektriksel direnç ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Söz konusu grafikler incelendiğinde, belirli miktarda karbon bazlı malzeme kullanımından sonra, numunelerin elektriksel direnç ölçümlerinde, bu tür iletken malzemelerle doyurulduklarını ve kendi sızıntı eşiklerine ulaştığını ifade eden elektriksel direnç değişim oranının minimum seviyeye ulaştığı veya değişimin göz ardı edilebilir seviyelere düştüğü sınır değerler açıkça görülmektedir. Gözlenen davranışın, önerilen tüm ilk kürlenme yaşları için de geçerli olduğu bildirilmiştir. Sonuç olarak, KNT, GNP ve KS süzülme eşik değerlerinin çimentolu malzemelerin toplam ağırlığının %0,55; %2 ve %2'sinde, KF6 ve KF12 için aynı eşik karışımların toplam hacminin %1'i olduğu tespit edilmiştir.

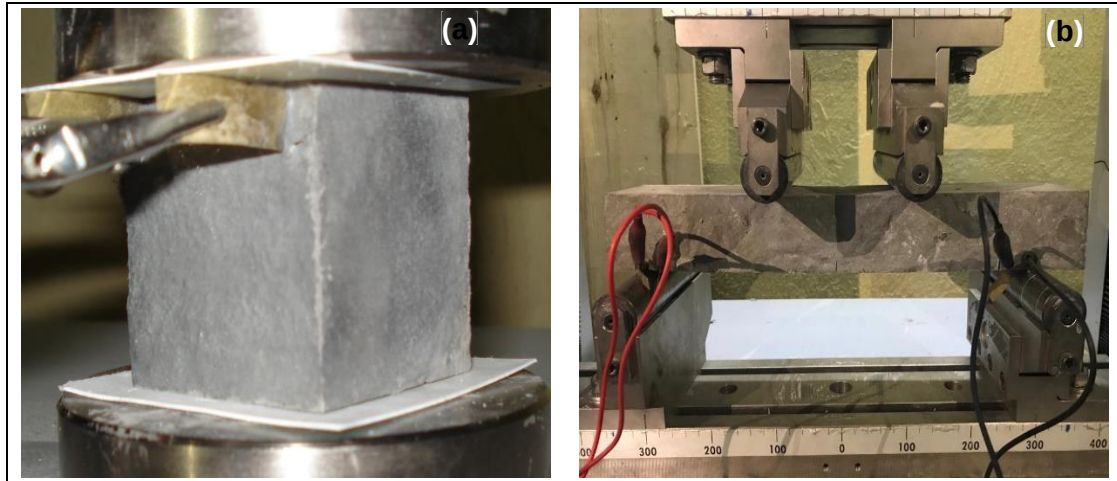


Şekil 2.6. Farklı kullanım oranlarında kullanılan farklı karbon esaslı malzemelerle 1 ve 7 günlük ECC harçlarının elektriksel direnç değerlerindeki değişiklikler (kutuların içindeki değerler kritik sınırları temsil etmektedir) (Al-Dahawi ve diğerleri, 2016b)

### 2.2.11. Farklı koşullarda hasar tespiti

ECC numunelerini kullanan kendini algılama çalışmalarının çoğunluğu, tek eksenli çekme yükleme koşulları altında kendiliğinden algılama davranışı üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu tür deneysel çalışmaların sonuçları aşağıdaki bölümlerde özetlenmiştir.

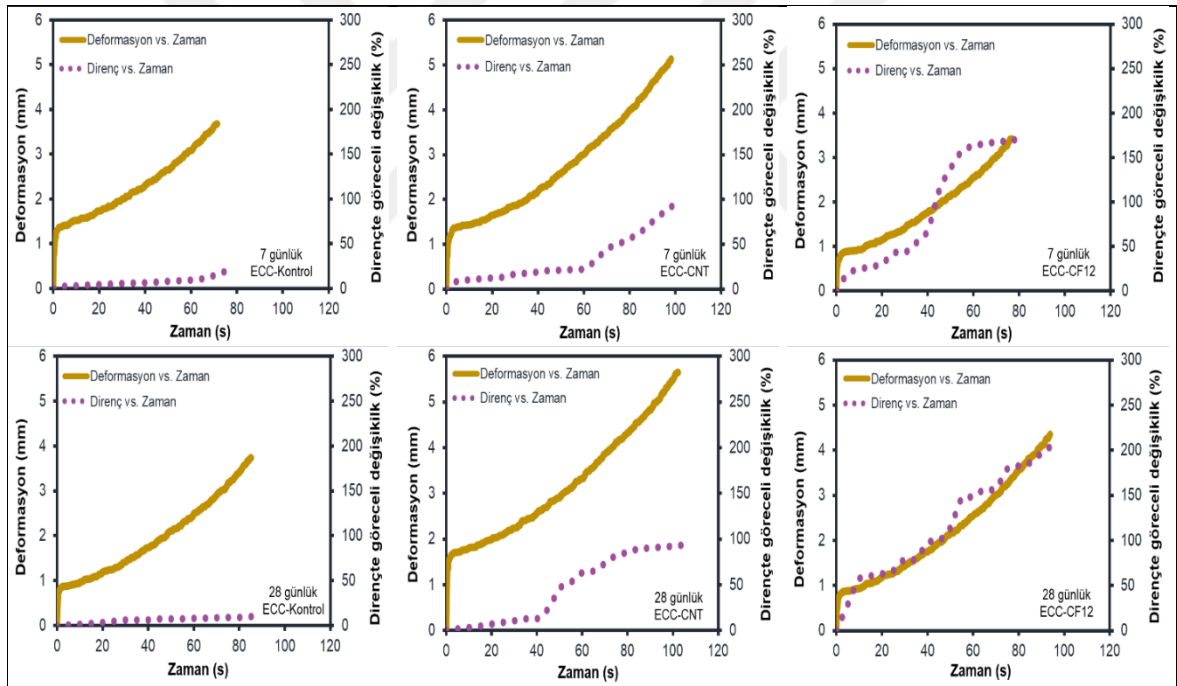
Al-Dahawi ve diğerleri (2016b), nano (KNT, GNP and KS) ve mikro ölçekte (KF12) karbon esaslı malzemeler içeren ve içermeyen ECC'nin kendini algılama kabiliyetini, 5 cm ölçekli 7 ve 28 günlük kübik numuneler için tek eksenli basınç yükü altında incelemiştir. Elektriksel ölçümler kaydedilirken, taze halde numunelerin üst kısımlarından 5 mm gömülü kalacak şekilde yerleştirilen pirinç elektrotlardan yararlanılmıştır (Resim 2.4). Deneylerde pirinç elektrotların kullanılma sebebi yerleştirilmelerinin kolay olması ve elektrot olarak denen diğer malzemelerle karşılaştırıldığında daha hassas sonuçlar vermesidir. Basınç yüklemesinden sonra elektriksel direnç sonuçları, alternatif akım (AC) kullanan 2 probu bir beton direnç ölçer kullanılarak kaydedilmiştir. Kullanılan elektrotların boyutları ve gömme yerleri önerilen test kurulumu çerçevesinde direnç ölçer vasıtasıyla gerçekleştirilen ön deneyler neticesinde elde edilen en iyi hasar algılama sonuçları dikkate alınarak belirlenmiştir.



Resim 2.4. Pirinç elektrot gömülü numunelerin a) basınç b) dört noktalı eğilme altında kendiliğinden algılama değerlendirilmesi (Al-Dahawi ve diğerleri, 2016b; Al-Dahawi ve diğerleri, 2017)

Bu çalışmanın bulguları, kendini algılama değerlendirilmesi için önerilen test kurulumunun başarılı olduğunu ve hatta başlangıçtaki kür süresine bakılmaksızın, kontrol numunelerinin

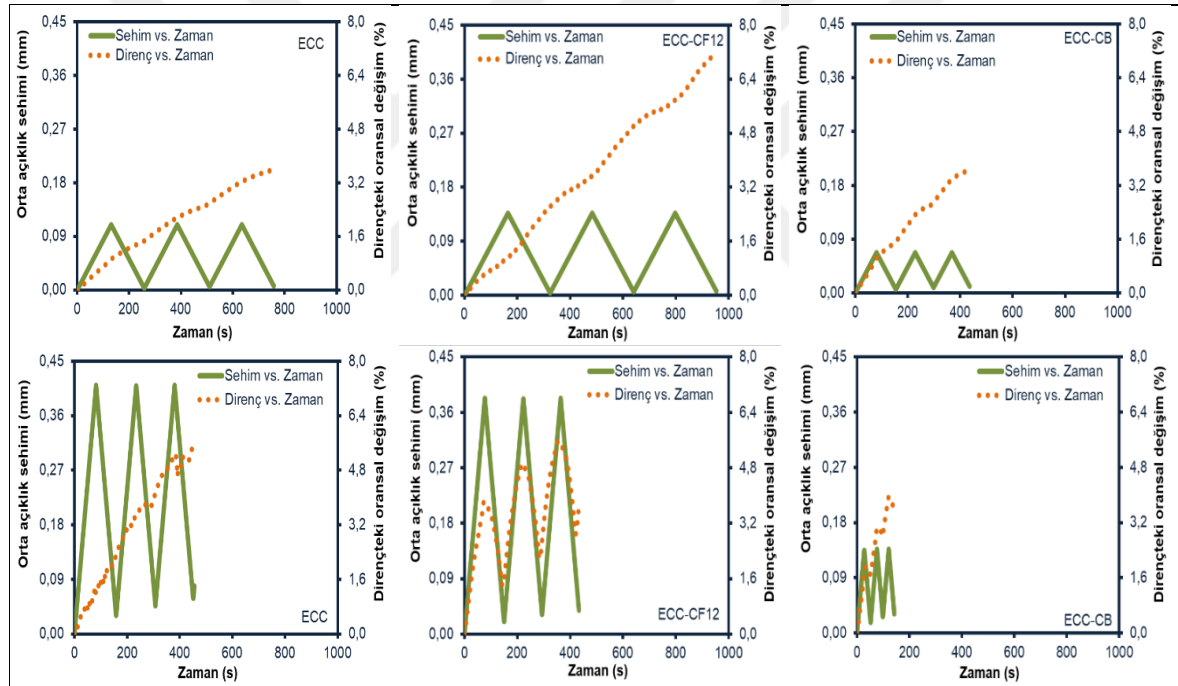
bile basınç yüklemesine duyarlı olduğunu, ancak kontrol numunelerinin bu davranışını izlemek için yüksek deformasyon seviyelerinin gerekli olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, farklı karbon bazlı malzemelerin ECC sistemlerine eklenmesi, kendini algılama özelliğini önemli ölçüde daha belirgin hale getirmiştir (Şekil 2.7). İlk kür süresi ne olursa olsun, KF12 ile üretilen ECC örneklerinden en iyi kendini algılama performansı elde edilmiştir. KF12-bazlı numuneler için, basınç hasarının algılanması, yüklemenin başlangıcından itibaren başlamıştır. KF12 tabanlı ECC örneklerinin performansını KNT, KS ve GNP ile üretilenler takip etmiştir. KS ve KNT bazlı ECC'nin algılama performanslarının, KS bazlı numunelerin algılama sonuçlarının küre karşı daha duyarlı olmasına rağmen karşılaştırılabilir olduğu not edilmelidir. Aşağıda Şekil 2.7’de seçilen ECC karışımlarından elde edilen sonuçların bazıları gösterilmiştir.



Şekil 2.7. ECC numunelerinin 7 ve 28 günlük kür süresi sonrasında sürekli basınç yüklemesi altında kendini algılama davranışı (Al-Dahawi ve diğerleri, 2016b)

Al-Dahawi ve diğerleri (2017) 28 günlük ECC kirişlerinin kendi kendini algılama yeteneğini elastik ve plastik dört noktalı eğilme yükleme aralıklarında test etmişlerdir. Yazarın diğer çalışmalarına benzer şekilde, bu çalışma için ECC karışımları KNT, GNP, KS ve KF12 ile birlikte daha önce (Al-Dahawi ve diğerleri, 2016a)'de belirtilen karıştırma yöntemlerini kullanarak sızıntı eşik seviyelerinde (Al-Dahawi ve diğerleri, 2016b) üretilmiştir. Karşılaştırma için herhangi bir karbon bazlı materyal içermeyen düz ECC karışımları da

üretimiştir. Kendini algılama değeriendirmeleri yapmak için, gömülü piriñ elektrotlarla 360 x 75 x 50 mm ölçülerindeki kiriş örnekleri üretilmiştir. Elektrotların miktarına ve yerleştirme yerlerine ve ölçüm kurulumuna karar vermeden önce, birkaç deneme testi yapılmıştır. Daha makul algılama sonuçları nedeniyle, Resim 2.4'te gösterilen test kurulumuna karar verilmiştir. Numunelerin kenarları ile elektrotlar arasında 25 mm boşluk bırakılmış ve doğru akım (DC) kullanan 4 problu bir beton, direnç ölçer yardımıyla elektriksel ölçümler kaydedilmiştir. Elastik aralık içinde, kirişlere nihai mukavemet kapasitelerinin %30'una kadar üç kez tekrarlı yükleme yapılmış ve boşaltılmıştır. Plastik aralık içinde numunelerin nihai mukavemetinin %70'ine kadar aynı sayıda yükleme ve boşaltma uygulanmıştır.



Şekil 2.8. ECC numunelerinin elastik aralıkta (üstte) ve plastik aralıkta (altta) tekrarlanan eğilme yükü altında kendiliğinden algılama davranışı (Al-Dahawi ve diğerleri, 2017)

Seçilen ECC karışımlarından elde edilen sonuçların bazıları, Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Deneysel bulgular, özellikle elastik aralık içinde tekrarlanan eğilme yükleme boşaltma işlemi için geçerli olmasa da tüm ECC karışımlarında tekrarlanan eğilme yükleme uygulamaları için, önerilen test düzeneği ile hem elastik hem de plastik aralıklar içinde kendi kendini algılamanın mümkün olduğunu göstermiştir. KF12 bazlı karışımlar hem elastik hem de plastik aralıklarda yükleme ve boşaltma algılamasında en iyi performansı sergilemiştir.

Farklı karışımlar arasında performans karşılaştırması yapıldığında, KF12 bazlı ECC karışımları sırasıyla KNT, GNP ve KS tabanlı karışımlar tarafından takip edilmiştir.

Son zamanlarda yapılan bir araştırmada (Yıldırım ve diğerleri, 2018a), büyük ölçekli ECC harç elemanlarının kesmedeki hasar oluşumlarını algılayabilme kabiliyeti dört noktalı eğilme yükü altında değerlendirilmiştir. Kompozit numunelerden ziyade, bu çalışmada harçlar kullanılmıştır. Her ne kadar kendi kendini algılama verilerin daha yakından izlenmesine olanak sağlayan üstün deforme olabilirliği sayesinde kompozit malzemelerden daha iyi performanslar beklense de büyük ölçekli ECC harç elemanlarından da umut verici sonuçlar alınmıştır. Bu çalışmada, karbon esaslı malzemeler olan KNT ve KF12 ile 100 x 150 x 1000 mm ölçülerinde büyük ölçekli çelik takviyeli harç kiriş elemanları üretilmiştir. Farklı karbon bazlı malzemelerin miktarı ve karışım prosedürlerine karar verirken, araştırmacıların önceki çalışmalarından (Al-Dahawi ve diğerleri, 2016a; Al-Dahawi ve diğerleri, 2016b) yararlanılmıştır. Kesme hasarının olasılığını arttırmak için, kiriş elemanları yetersiz etriye ve yüksek kesme açıklığı-etkili derinlik oranı ile üretilmiştir. AC akımı kullanan beton direnç ölçer kullanılarak kiriş elemanlarının kesme bölgesinde gömülü pirinç elektrotlar yardımıyla elektriksel ölçümleri kaydedilmiştir. Bu çalışmadan, büyük ölçekli harçlardaki kayma (kesme) hasarının, önerilen test kurulumuyla başarılı bir şekilde izlenebileceği, ancak kayma hasarının kendi kendini algılamasındaki performans farklılıklarının KNT ve KF12 içeren kirişler için dikkate alındığı sonucuna varılmıştır. Çalışma, KF12-bazlı numunelerin, elektriksel direnç değişimlerinin belirgin şekilde yüksek olduğu, yükleme uygulamasının başlamasından hemen sonra kayma hasarını algılamada KNT-bazlı numunelerden daha etkili olduğu sonucuna varmıştır. Öte yandan, KNT'li elektrik ileten kiriş ağının uyarılması için daha yüksek seviyelerde yükleme yapılması gerekmektedir. Genel olarak, üretim maliyeti ve karıştırılabilirlik kolaylığı dikkate alınarak büyük ölçekli elemanlarda kayma hasarının kendini algılaması için KNT parçacıkları yerine KF12 önerilmiştir.

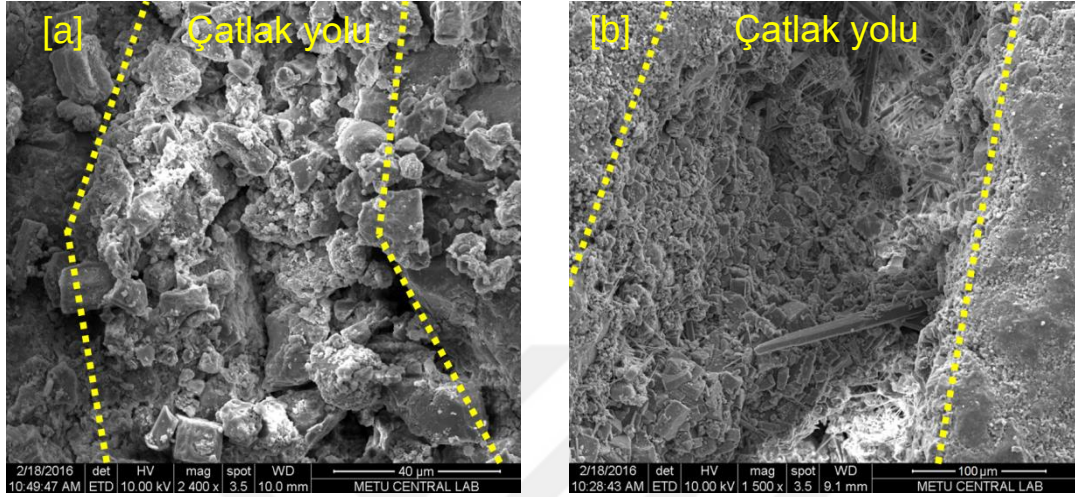
### **2.3. Kendiliğinden İyileşme ve Kendiliğinden Algılama Özellikleri**

ECC'nin faydalarını, çimento esaslı bir malzemenin geliştirilmesi lehine arttırmak için, Siad ve diğerleri (2018) tarafından, kendi kendini iyileştirme ve kendini algılama yeteneklerinin eşzamanlı başarılmasının ilk kez hedeflendiği bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada ECC karışımları farklı oranlarda karbon fiber ve karbon nano tüplerle üretilmiştir. Kombine

edilmiş kendi kendini iyileştirme ve kendini algılama özellikleri, numunelerin farklı nem hallerinde (kuru, kısmen doymuş ve doymuş) ve olgun yaşlarında elektriksel direncindeki kısmi değişiklikler ölçülerek değerlendirilmiştir. Ayrıca, ECC karışımlarının kendi kendini iyileştirme kabiliyeti önceden yüklenmiş numunelerin eğilme parametrelerinde geri kazanımlar ve mikroyapısal analizler de dahil olmak üzere ek testlerle değerlendirilmiştir. Çalışmanın amaçları doğrultusunda, her bir karışımdan 28 günlük prizmatik numuneler üretilmiştir. Mikro çatlak oluşumu için nihai deformasyon kapasitelerinin %60'ına kadar dört noktalı eğilme yüklemesi altında önceden yüklenmiştir. Bu numuneler, sağlam olanlar ile birlikte, 90 gün tamamlanıncaya kadar su içinde kürlenmiş ve belirli zaman aralıklarında tekrar test edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, ECC karışımlarının hem iletkenlik (yani kendi kendini algılama) hem de kendi kendini iyileştirme yeteneklerinin, herhangi bir karbon bazlı malzeme içermeyen kontrol ECC karışımlarına göre geliştirilebileceğini açıkça göstermiştir. Bununla birlikte, önerilen ECC karışımları için, kendi kendini iyileştirme ve kendi kendini algılama özelliklerinin eşzamanlı olarak başarılmasının, yalnızca KNT parçacıklarının karbon bazlı malzeme olarak kullanıldığına mümkün olduğu belirtilmiştir.

Bir başka çalışmada seçkin nano materyallerle karışımlar üretilerek ECC'nin kendini iyileştirme ve kendini algılama yeteneklerini geliştirmek için daha ileri araştırmalar yapılmıştır. Siad ve diğerleri (2018), bu çalışmada, nano-silika (NS, ECC-NS), çok duvarlı karbon nano tüpler (KNT, ECC-KNT) ve NS ve KNT'nin ikili kullanımı (ECC-NS/KNT) ile ECC karışımları üretmiştir. NS kullanımının amacı, otojen kendi kendine iyileşmeyi teşvik etmesiyken, KNT kullanımının amacı ise, ECC karışımlarının kendini algılama özelliğini arttırmasıdır. Her iki nano materyali bir araya getirerek, aynı zamanda kendini iyileştirme ve kendini algılama özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Nano modifiye ECC karışımlarının sonuçları, nano materyal içermeyen ECC-Kontrol karışımı ile de karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, farklı karışımların kombine kendi kendini iyileştirme ve kendi kendini algılama yetenekleri, ön yükleme öncesi ve sonrasında ve kendi kendini iyileştirme aşaması sırasında sağlam ve önceden yüklenmiş olan numunelerin doğrudan elektriksel direnç ölçümleri yardımıyla değerlendirilmiştir. Ayrıca, karışımların kendi kendini iyileştirme performansı, video mikroskop gözlemler, termo-gravimetrik analiz (TGA/DTG), taramalı elektron mikroskopisi ile enerji dağılımlı spektroskopi (SEM/EDX) dahil olmak üzere mikro yapısal incelemeler yardımıyla analiz edilmiştir. Her bir karışımdan 360 x 75 x 50 mm ölçülerindeki kiriş örnekleri üretilmiştir ve ilk olarak 7 gün süresince kür edilmiştir. 7. günde, tüm farklı ECC karışımlarından gelen sağlam numuneler, çatlak

oluşumu için ağır derecede ön yüklemeye tabi tutulmuştur. Elektriksel direnç ölçümleri, Resim 2.4'te gösterilen ölçüm tekniğine benzer deneysel bir kurulum aracılığıyla gömülü pirinç elektrotlar yardımıyla kaydedilmiştir.



Resim 2.5. (a) ECC-Kontrol, (b) ECC-NS/KNT numunelerin 90 gün sürekli su küründen sonra oluşan kendiliğinden iyileşme ürünlerini gösteren temsili SEM görüntüleri

Deneysel bulgular, nano-modifiye edilmiş ECC numunelerinin ECC-Kontrol karışımına kıyasla çok sınırlı bir sürede çok daha büyük çatlakları iyileştirebildiğini göstermiştir. Örneğin, 7 günlük önceden yüklenmiş ECC-Kontrol numuneleri için, 100 µm'ye kadar genişliğe sahip mikro çatlaklar, 90 günlük sürekli su küründen sonra tamamen kendiliğinden iyileşebilmektedir. Su kürünün önemi ve derecesi nano-modifiye edilmiş ECC için önemli ölçüde daha düşük olmuştur. Sadece NS ve KNT, ECC sistemlerinde birleştirildiğinde, 300 µm'ye kadar genişliğe sahip olan mikro açıklıklar sadece 7 günün ardından rahatlıkla kapanabilmektedir. Dahası, mikro yapısal analizler ECC-NS/KNT numunelerinin kendiliğinden iyileşme ürünlerinin ECC-Kontrol'den daha fazla miktarda ve daha yoğun olduğunu göstermiştir (Resim 2.5). İkili NS ve KNT parçacıklarının varlığında artabilen mikro çatlak genişliğinin seviyesi, literatürdeki çalışmaların çoğundan önemli ölçüde daha yüksektir. Kendi kendini algılama özelliği ile ilgili olarak, ECC-KNT örnekleri daha iyi bir kendini algılama tepkisi sunan ilk ön yüklemeye en duyarlı olan karışım olmuştur. Eğilme hasarının algılanmasında ECC-KNT numunelerini sırasıyla ECC-NS/KNT, ECC-NS ve ECC-Kontrol karışımları takip etmiştir. Bu nedenle, devam eden bu araştırmanın bulguları, ECC karışımlarının bileşenlerinin (yani, nano materyallerin) uygun bir şekilde seçilmesiyle, geleneksel ECC karışımlarına kıyasla, birleşik ve önemli ölçüde geliştirilmiş kendi kendini iyileştirme ve kendi kendini algılama yeteneklerinin elde edilebileceğini açıkça göstermiştir.

Literatür çalışmaları genel olarak değerlendirildiğinde, geleneksel betonun fonksiyonel ve daha üstün performanslı olarak tasarlanmasının pek çok kritik yapıda fayda sağlayabileceği görülmektedir. Geleneksel beton kırılğan bir malzemedir ve çok düşük çekme gerilimi seviyelerinde bile kolayca çatlar. Çatlamadan sonra, potansiyel olarak zararlı maddelerin girişi hızla gerçekleşebilir ve bu da malzemenin içsel bozulmasının ardından yapısal ölçekte daha ciddi problemlerin ortaya çıkmasına neden olur. Kendine özgü mikro çatlama davranışı ve üstün sünekliği sayesinde ECC, farklı kökenlere sahip birçok bozulma mekanizmasıyla karşı karşıyadır. Bununla birlikte, gerçekten sürdürülebilir altyapı gelişiminin gerçekleşmesi için ECC'nin yüksek performans özellikleri çok işlevli, akıllı özelliklerle desteklenmelidir. Bu bölümde sunulan son bulgular, uygun tasarımıyla ECC kullanımının faydalarının, kendi kendini iyileştirme ve kendini algılamanın çok işlevli akıllı yeteneklerinin malzemeye bireysel ve/veya birleştirilmiş entegrasyonu ile artırılabilirliğini göstermektedir. ECC malzeme bileşimlerinin akıllı yollarla geliştirilmesinin, bu malzemelerin pratikte daha geniş bir şekilde uygulanmasının iyileştirilmesine ve dünya genelinde hızlı bozulan altyapıların acil ihtiyaçlarına cevap vermesine yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalarda görülmektedir ki geçtiğimiz yıllarda dünya çapında mühendisler, yapılarda çimento bağlayıcılı malzemelerin sürdürülebilirliğini geliştirmek için oldukça önemli çabalar sarf etmektedir (Şahmaran ve Li, 2009a). ECC gerçek sürdürülebilirlik adına son yıllarda geliştirilen en önemli kompozit malzemelerden biridir. Kendiliğinden algılayan çok fonksiyonlu çimento bağlayıcılı kompozitleri de ECC ile üretmek mümkündür. Bu tip malzemeleri kullanarak bütün yapıyı hem yapısal olarak hem de sensör olarak kullanmak mümkündür. Geleneksel beton ve lif takviyeli beton ile karşılaştırıldığında çekme dayanımları açısından bazı durumlarda 300 kat daha iyi performans gösteren ECC, şekil değiştirme sertleşmesi göstermesi nedeni ile oldukça sünek bir malzemedir. Şekil değiştirme sertleşmesi kompozitin tokluk ve lif-matris dayanımı ile ilişkili olup, çoklu çatlak oluşumu ile mümkün hale gelmektedir. Genellikle 100 µm'dan daha dar oluşan çoklu çatlaklar ile kompozitler büyük plastik deformasyonlar yapabilmektedir. Basınç dayanımı her ne kadar yüksek performanslı betonun basınç dayanımına eşdeğer olsa da basınç gerilmeleri altında kompozitin şekil değiştirme kapasitesi yüksektir. Daha önce bahsedildiği gibi ECC'ler lif takviyeli ve geleneksel olarak üretilen betonda kullanılan malzemeler ile üretilmektedir. ECC'leri kendi şekil değiştirme ve hasarlarını algılayabilecek hale getirmenin yolu ise bu tip kompozitlerin içerisinde elektriksel olarak iletken malzemeler kullanmaktır. ECC'ler üzerinde elektriksel iletken

malzemeler kullanılarak daha önce sözü edilen farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Betonun elektriksel iletken olarak çok düşük performans sergilemesi ve içerisinde lif olarak kullanılan pek çok polimer esaslı lif tiplerinin elektriği iletmemesi nedeniyle yapısal malzemelerin kendiliğinden algılama özelliklerini sağlamanın birinci koşulu karışımlar içerisinde iletken malzeme kullanma gerekliliğidir. Çimento esaslı kompozitleri elektriksel olarak iletken hale getirmek için demir içeren agregalar, karbon lifler, çelik lifler, grafit tozları, karbon nanotüp, karbon nano lifler vb. gibi elektriksel açıdan oldukça iletken malzemeler kullanılmaktadır (Al-Dahawi ve diğerleri, 2016a).

Kullanılan malzemelerin karbon ailesinden olması kompozitlerin kendiliğinden sensör olmasını sağladığı gibi iyi bir mekanik performansı da garanti etmektedir. Yüksek oranda karbon esaslı malzeme oranının üretim maliyeti betonu oluşturan diğer malzemelere kıyasla oldukça yüksek olacağından seçilen elektriksel olarak iletken malzemenin hem yüksek derecede iletken hem de kompozitin mekanik özelliklerine negatif bir etki getirmeyecek şekilde optimize edilmesi gerekmektedir (Al-Dahawi ve diğerleri, 2016b). Geliştirilen kompozitlerin mekanik performansından ödün vermeyecek şekilde piezo-dirençli fonksiyon göstermesi sağlanmıştır (Al-Dahawi ve diğerleri, 2016b). Özellikle karışım içerisinde yeterli miktarda iletken malzeme kullanımı ile her bir iletken malzemenin komşu diğer iletken parçacıkla etkileşimi sonucu doğrusal olarak bir iletken yol mümkün hale gelmektedir.

Gerinim ölçerler ile karşılaştırıldığında, kendiliğinden algılayan kompozit üretimi ekonomik açıdan daha makul bir tasarım imkânı sağlamaktadır. Ayrıca gerinim ölçerlerin tam olarak şekil değiştirmeyi algılama hassaslığı kompozitin piezo-dirençli haline göre daha düşüktür (Çelebi ve diğerleri, 2002). Kendiliğinden algılama, şekil değiştirmenin elektriksel direnç değerlerini artırması ile meydana gelmektedir (Al-Dahawi ve diğerleri, 2017). Kendiliğinden algılayan kompozitlerin geliştirilmesinin asıl amacı gerçek ölçekli inşaat yapılarında bu fonksiyondaki malzemeleri kullanmaktır. İçerisindeki gerilme, şekil değiştirme, çatlak ve hasarı algılaması ile kendiliğinden algılayan betonlar (self-sensing concrete) endüstriyel anlamda büyük bir uygulama potansiyeline sahiptir. Kendiliğinden algılama davranışı temel olarak dış yük ile elektriksel değişikliklerin arasındaki ilişkidir. Kendiliğinden algılama ölçütlerinde hassaslık oldukça önemli bir parametredir ve elektriksel direnç değişikliklerinin değeri ( $|\Delta\rho/\rho_0|$ ), kuvvet hassasiyet katsayısı  $((\Delta\rho/\rho_0)/F)$ , gerilme hassasiyet katsayısı  $((\Delta\rho/\rho_0)/\sigma)$  ya da şekil değiştirme katsayısı  $((\Delta\rho/\rho_0)/\epsilon)$  gibi bir takım değerlere bağlıdır (Chung, 1998).

Gerilme ve şekil değiştirme değerleri elastik bölgede birbirine oranlı (birbiriyle orantılı) durumdadır. Elastik olmayan bölgede ise şekil değiştirme ile gerilme arasındaki ilişki tersinir veya tersinir olmayan bir davranış göstermektedir. Elastik olmayan bölgede yeteri kadar yüksek gerilme değerleri meydana gelirse hasar oluşmaktadır. Hasarın nedenini öğrenmek amacıyla gerilme şekil değiştirme değerlerini ve malzemenin hasar oluşmadan önceki yapısal geçmişini bilmek oldukça faydalı olmaktadır. Hem hasarı hem de gerilme ve şekil değiştirmeleri tespit etmek özellikle gerilme-şekil değiştirme-hasar ilişkisini daha iyi bir korelasyonla belirlemeye yardımcı olmaktadır. Her ne kadar akustik emisyon hasarı tespit etmeye yarasa da hasarın oluşumu anında gerilme/şekil değiştirme değişikliklerinin algılanmasını sağlayamamaktadır (Desa ve diğerleri, 2018). Aynı şekilde ultrasonik yöntemler de çatlakları algılamada yardımcı olsa da gerilme/şekil değiştirme yönünden eksik kalmaktadır (Han ve diğerleri, 2014). Buna karşılık elektriksel direnç hesaplama yöntemi anlık olarak bu değerlendirmelerin yapılabilmesini mümkün kılmaktadır. Çünkü hasar ve gerilme/şekil değiştirme oluşumlarının elektriksel direnç üzerinde farklı etkileri bulunmaktadır. Kısaca çimento esaslı kompozitler karbon esaslı malzemeler ile hazırlanarak kendi şekil değiştirme gelişimlerini algılayabilen kompozitler olarak üretilmektedirler (Chen ve diğerleri, 1993). “Akıllı beton” fikri ilk olarak Japonyalı araştırmacılar tarafından 1980 yıllarının sonlarına doğru ortaya konulmuştur. 1992 yılında Tokyo’da Yanagida Üniversitesi “kendiliğinden test olan betonu” (self-test concrete) cam ve karbon liflerle üretmiştir. Fu ve Chung isimli araştırmacılar ise 1993’te normal çimentonun yanı sıra karbon lif-çimento etkileşimini inceleyerek şekil değiştirme hassaslıklarını arttırmaya çalışmışlardır. Günümüze kadar yapmış oldukları çalışmalarda yükleme altında çimento esaslı sensörlerin, yük ve elektriksel direnç değişimlerinde oldukça iyi bir korelasyon sergilediği sonucuna varmışlardır (Chen ve diğerleri, 1996).



### 3. DENEYSEL PROGRAM

#### 3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

##### 3.1.1. Portland çimentosu (PÇ)

Çalışmaların tamamında TS EN-197-1 (2012) ve ASTM C150 (2007) çimento standartlarına uygun CEM I 52,5R tipi beyaz Portland çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Portland çimentosunun özgül ağırlığı 3,15; Blaine inceliği (özgül yüzey) ise 465 m<sup>2</sup>/kg'dir. Çalışmalar süresince kullanılması kararlaştırılan Portland çimentosunun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de, taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope-SEM) altında elde edilen mikroyapısal görüntüleri ise Resim 3.1'de gösterilmektedir. PÇ'nin lazer kırınım yöntemiyle elde edilen tanecik boyut dağılım grafiği ise Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Resim 3.1. CEM I 52,5 R Beyaz portland çimentosu dijital kamera görüntüsü (sağda), SEM görüntüsü (solda)

##### 3.1.2. Yüksek kızdırma kaybına sahip F-sınıfı uçucu kül (UK-H)

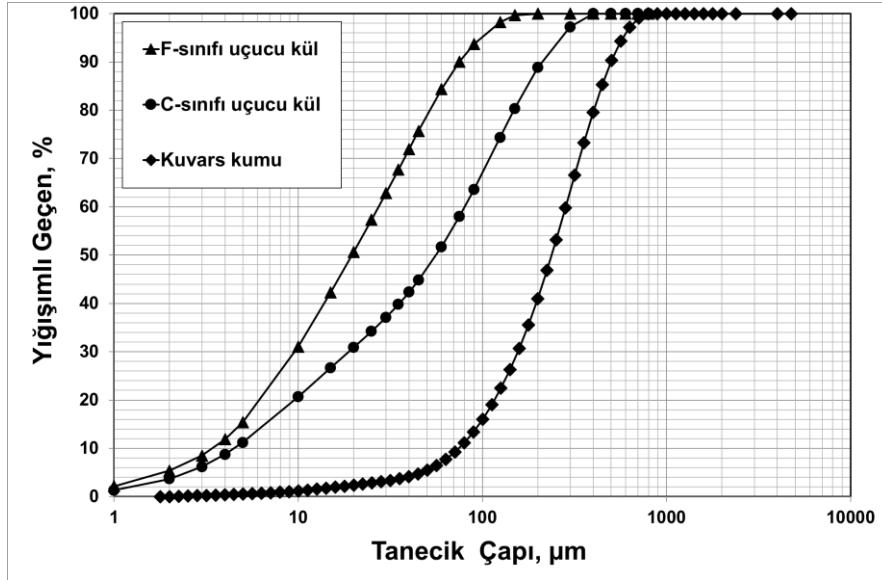
Uçucu küller hakkında genel bir bilgi verilmeden önce, tez kapsamında yapılan çalışmalarda kızdırma kaybının etkisini de görmek adına F ve C sınıfı uçucu küllerin, kızdırma kaybı oranına göre sırasıyla “UK-H” ve “UK-L” olarak tanımlandığı görülmektedir.

ASTM C618 (2003) standardı uyarınca uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılmaktadır. F sınıfına, bitümlü kömürden elde edilen ve toplam  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küller girmektedir. Bu tip küller CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için aynı zamanda düşük kireçli uçucu küller olarak da adlandırılmaktadır. F-sınıfı uçucu küller puzolanik özelliğe sahiptirler. C-sınıfı uçucu küller ise linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  yüzdesi %50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, C-sınıfı uçucu küllerde CaO yüzdesi %10'un üstünde olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu küller olarak da adlandırılabilirler. C-sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptir.

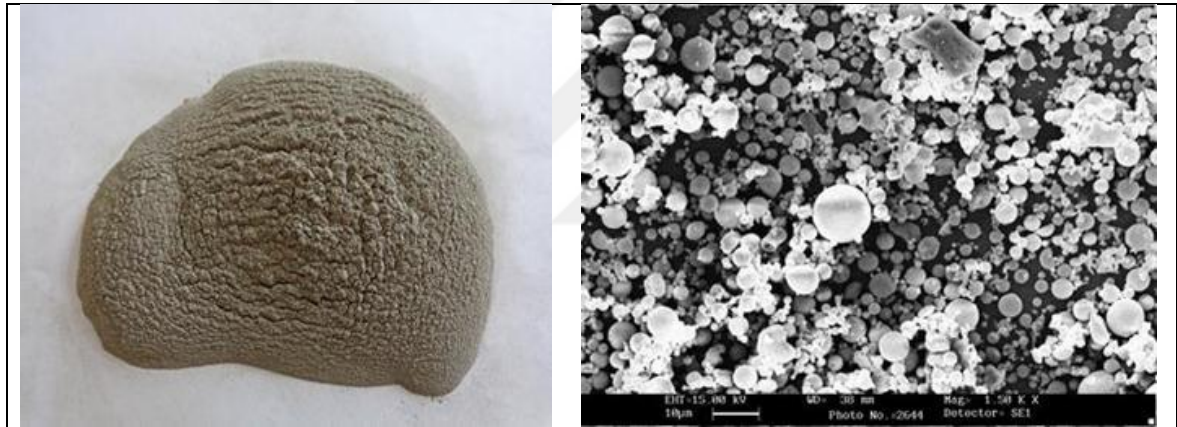
ASTM C618 (2003) standardıyla uyumlu olacak şekilde çalışmalarda kullanılmak üzere tercih edilen F-sınıfı uçucu kül (UK-H) %7,98 kireç oranına sahiptir ve Su gözü Termik Santrali'nden elde edilmiştir. UK-H'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de gösterilmektedir. Resim 3.2'de ise sırasıyla UK-H taneciklerinin dijital kamera ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) altındaki görüntüleri sunulmaktadır. Resim 3.2'den açıkça görülebileceği üzere UK-H tanecikleri oldukça pürüzsüz dairesel yüzeylere sahiptir.

Çizelge 3.1. CEM I 52,5R beyaz portland çimentosu ve puzolanik malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri

| Kimyasal Kompozisyon, %                                        | PÇ    | UK-H  | UK-L  | Kuvars kumu |
|----------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------------|
| $\text{SiO}_2$                                                 | 21,39 | 52,22 | 46,97 | 99,79       |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$                                        | 3,37  | 16,58 | 11,86 | 0,06        |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$                                        | 4,89  | 6,60  | 7,98  | 0,02        |
| MgO                                                            | 2,39  | 2,10  | 6,51  | 0,01        |
| CaO                                                            | 62,60 | 7,98  | 15,50 | 0,02        |
| $\text{Na}_2\text{O}$                                          | 0,19  | 0,86  | 2,33  | 0,02        |
| $\text{K}_2\text{O}$                                           | 0,77  | 1,53  | 3,23  | 0,01        |
| Kızdırma Kaybı                                                 | 3,10  | 10,36 | 0,45  | 0,07        |
| $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ | 29,65 | 75,40 | 66,81 | 99,87       |
| Fiziksel Özellikler                                            |       |       |       |             |
| Özgül Ağırlık                                                  | 3,15  | 2,10  | 2,27  | 2,60        |
| Blaine İnceliği ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )                     | 465   | 269   | 306   | -           |



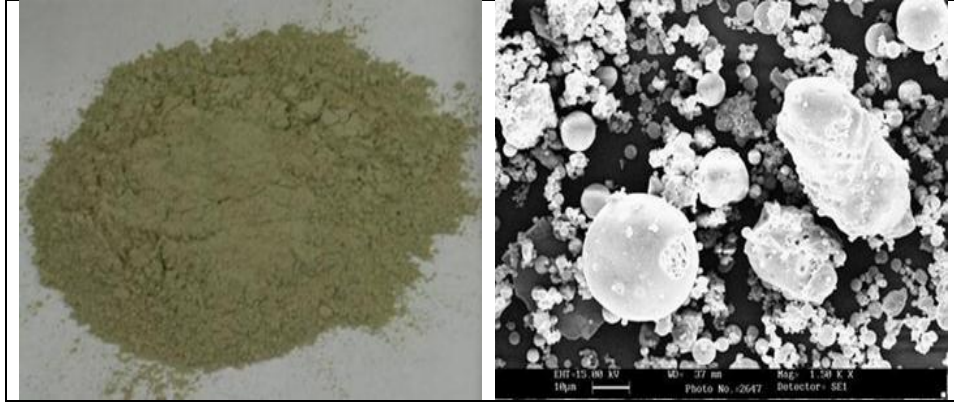
Şekil 3.1. Çalışmalar sırasında kullanılan katı malzemelerin tanecik boyut dağılımları



Resim 3.2. UK-H taneciklerinin dijital kamera (sol) ve SEM görüntüsü (sağ)

### 3.1.3. Düşük kızdırma kaybına sahip C-sınıfı uçucu kül (UK-L)

Deneysel program kapsamında kullanılan uçucu kül (UK-L) Batıçim Çimento Fabrikası aracılığıyla Soma Termik Santrali'nden temin edilmiştir. Özgül ağırlığı 2,27; Blaine inceliği 306 m<sup>2</sup>/kg olan UK-C kimyasal kompozisyonunda toplam SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarının %50'yi aşması itibarıyla ASTM C618 (2003) standardına uygun özellik sergilemektedir. UK-L'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de gösterilirken, tanecik yapısı hakkında bilgi veren SEM görüntüleri Resim 3.3'te gösterilmektedir.



Resim 3.3. UK-L taneciklerinin dijital kamera (sol) ve SEM görüntüsü (sağ)

#### 3.1.4. Kuvars kumu

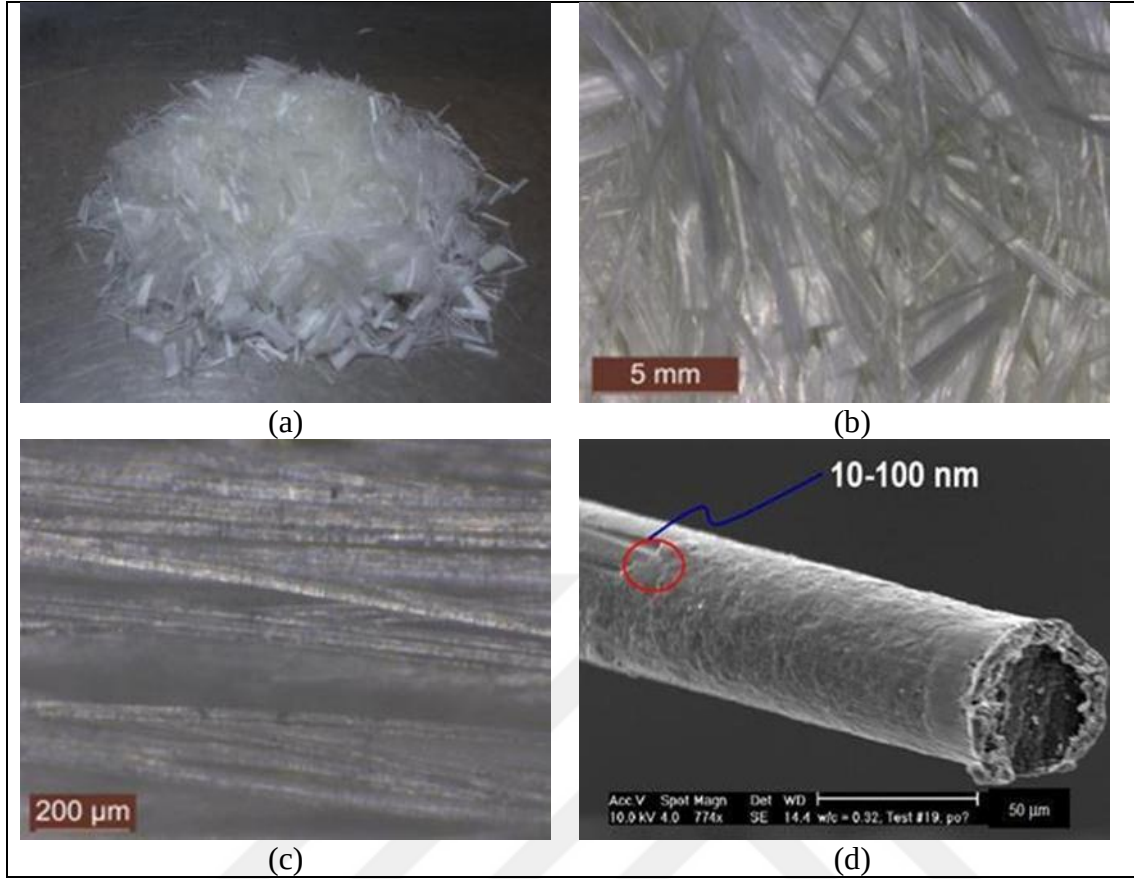
ECC'nin mikromekanik tabanlı tasarımına göre, kompozit malzemenin çoklu mikro çatlaklar oluşturmak suretiyle şekil değiştirme sertleşmesi ve sünek davranış sergileyebilmesi için matris kırılma tokluğunun düşük seviyelerde olması gerekmektedir. Karışımlarda kum tane boyutu ve kullanım miktarının artması ile matris kırılma tokluğu değerlerinin önemli ölçüde artması sebebiyle, ECC karışım tasarımlarında kullanılması gereken kumun tane boyutunda ve miktarında kısıtlamalar yapılmaktadır. Bu sebepten, ECC şu ana kadar ortalama tane büyüklüğü yaklaşık 110  $\mu\text{m}$  ve maksimum tane boyutu 250  $\mu\text{m}$  olan özel bir kum kullanılarak ve kum-bağlayıcı malzeme oranı 0,36 seçilerek başarılı bir şekilde üretilmiştir. Şahmaran ve diğerleri (2009) tarafından yapılan çalışmalarda yüksek hacimlerde uçucu kül gibi endüstriyel yan ürünlerin kullanılmasının matris kırılma tokluğu değerlerini azaltmada etkili olduğu, kum boyutu ve kullanım oranlarının değiştirilmesinde özgürlük sağladığı gösterilmiştir. Bu sebeple çalışmalar sırasında ECC üretiminde kullanılmak üzere ortalama tane büyüklüğü yaklaşık 200  $\mu\text{m}$ , en büyük tane büyüklüğü ise 400  $\mu\text{m}$  olan köşeli ince mikro-kuvars kumu tercih edilmiştir (Resim 3.4). Mikro-kuvars kumunun su emme kapasitesi %0,3; özgül ağırlığı ise 2,60'tır. Kuvars kumunun üretici firma tarafından sağlanan kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.1'de, tanecik boyut dağılım eğrisi ise Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Resim 3.4. Mikro-kuvars kumunun görüntüsü

### 3.1.5. Polivinil-alkol (PVA) lifleri

ECC'nin gösterdiği yüksek sünekliğin esas sebebi, mikro-mekanik tabanlı tasarımı sayesinde, ilk çatlak oluşumundan sonra şekil değiştirme sertleşmesi özelliği sergilemesidir. Mikro-mekanik modellerle kompozitin mikro yapısı, istenen mekanik özelliklerin elde edilebilmesi için en uygun hale getirilmektedir. Bu şekilde, lif, matris ve ara yüz etkileşiminin kontrolü ile yüksek performanslı kompozitler elde edilmektedir. Mikro-mekanik tasarım aşamasında lifin mekanik ve fiziksel özellikleri gibi parametreler kullanılmaktadır. Tez çalışmaları kapsamında, ECC üretiminde literatürdeki çalışmalarda başarılı bir şekilde kullanılmış ve mikro-mekanik tabanlı tasarım sonucu geliştirilmiş polivinil-alkol (PVA) lifleri (Li ve diğerleri, 2002) kullanılmıştır (Resim 3.5-a, b, c).



Resim 3.5. ECC karışımlarının üretiminde kullanılan (a, b, c) PVA liflerinin ve (d) lif yüzeylerindeki su itici kaplamanın taramalı elektron mikroskobu (SEM) altındaki görüntüsü

Çizelge 3.2. ECC üretiminde kullanılan PVA lifinin mekanik ve geometrik özellikleri

| Özellikler        | Birim                | Değer |
|-------------------|----------------------|-------|
| Nominal Dayanım   | (MPa)                | 1620  |
| Görünen Dayanım   | (MPa)                | 1092  |
| Çap               | (µm)                 | 39    |
| Boy               | (mm)                 | 8     |
| Elastisite Modülü | (GPa)                | 42,8  |
| Kopma-Uzama Oranı | (%)                  | 6,0   |
| Özgül Ağırlık     | (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,3   |

Bu liflerin en önemli özelliklerinden bir tanesi de yüzeylerinin ağırlıkça %1,2 oranında özel bir hidrofobik (su itici) yağ ile kaplanmış olmasıdır (Şekil 3.5-d). Bu özellik sayesinde, matris (lifsiz ECC) ve lif arasında yer alan ara yüzeyden optimum özellikler elde

edilmektedir. Tez çalışmaları sırasında kullanılan PVA lifinin mekanik ve geometrik özellikleri Çizelge 3.2’de detaylı olarak gösterilmektedir.

### 3.1.6. Karbon fiber (KF) lifler

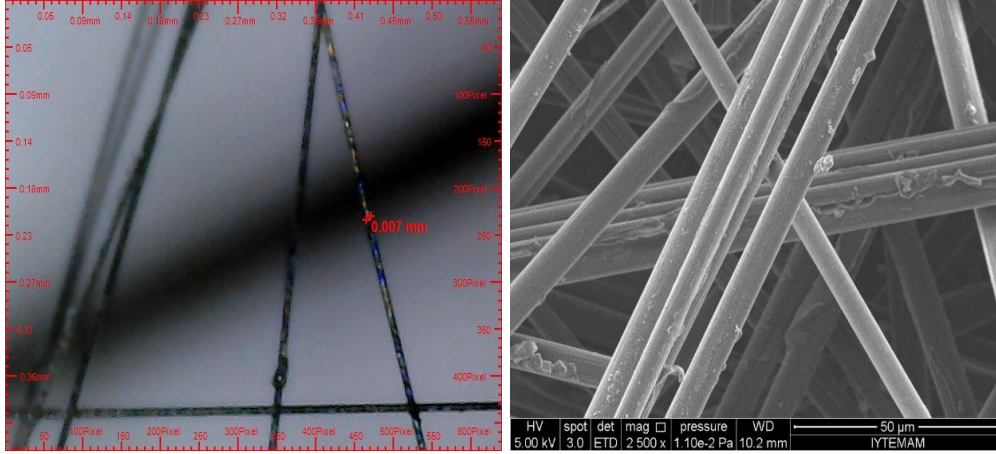
KF-takviyeli çimento esaslı kompozitlerin üretimi sırasında, uzunluğu 12 mm ve en boy oranı 1600 olan, demet halinde birbirinden ayrılarak karbon esaslı elektriksel iletken elyaflar kullanılmıştır. KF'ler, İngiltere'deki ELG Carbon Fiber Ltd.'den temin edilmiştir. Lifin özellikleri Çizelge 3.3'te görülebilen, dijital kamera, dijital mikroskop ve SEM görüntülerine Resim 3.6 ve 3.7'de yer verilmektedir.

Çizelge 3.3. Karbon lifin tipik özellikleri, (12 mm uzunluk)

| Tipik Özellikler                 | Birim           | Değer       |
|----------------------------------|-----------------|-------------|
| Karbon lif içeriği               | %               | 100         |
| Lif çapı                         | $\mu\text{m}$   | 7           |
| Lifin birim ağırlığı             | $\text{kg/m}^3$ | 1700        |
| Lif uzunluğu                     | mm              | 12          |
| Metal kontaminasyonu (kirliliği) | -               | <0,1g/1000g |
| Çekme dayanımı                   | MPa             | 4150        |
| Çekme modülü                     | GPa             | 252         |



Resim 3.6. Doğranmış karbon liflerinin görüntüsü

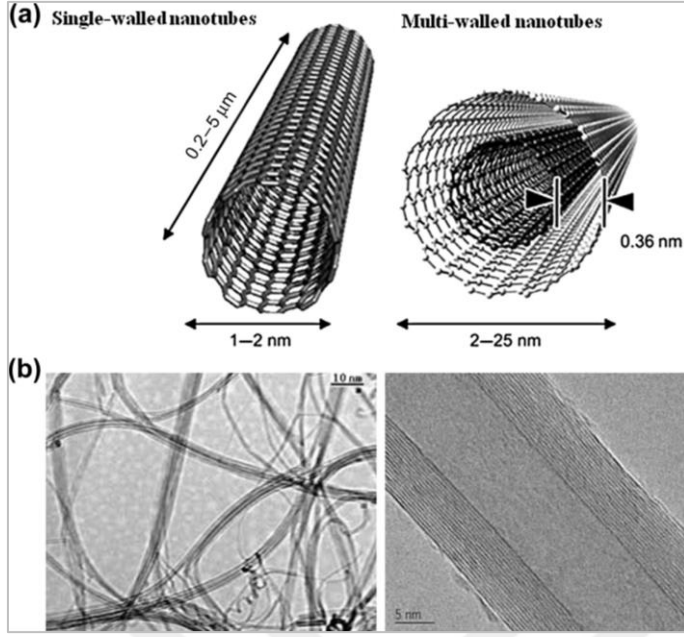


Resim 3.7. Doğranmış karbon liflerin mikroskop (solda) ve SEM (sağda) görüntüleri

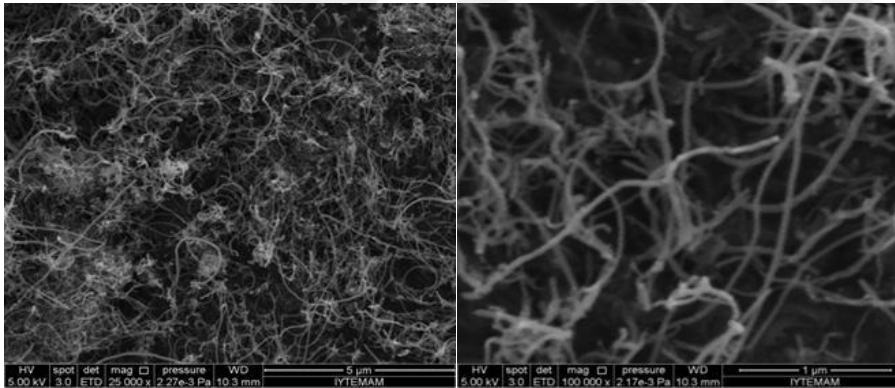
### 3.1.7. Karbon nano tüp (KNT)

Karbon nanotüp (KNT), silindirik nano yapı bir karbon allotropudur. Genellikle birkaç nanometre çapında ve birkaç mikrometre uzunluğundadır. KNT, atom katmanlarının sayısına bağlı olarak tek duvarlı KNT (Single-walled CNT, SWCNT) ve çok duvarlı KNT (Multi-walled CNT, MWCNT) olarak kategorize edilmektedir.

Son yıllarda KNT, yüksek mukavemet ve Young modülü gibi mükemmel mekanik özelliklerinden dolayı çeşitli alanlarda yaygın olarak uygulanmaktadır (çekme dayanımı ve Young modülü, sırasıyla karbon elyafın 20 katı ve 10 katıdır). Matris içerisinde yüksek bağlanma kuvveti açısından KNT ile güçlendirilmiş epoksi malzemelerin tabakalar arası kayma (kesme) dayanımı, KF ile güçlendirilmiş epoksi malzemelerin yaklaşık 10 katıdır. Büyük deformasyon ve yüksek süneklik özelliğine sahip KNT'nin kopma anında uzaması %18 mertebesindedir. KNT ayrıca mükemmel elektriksel iletkenliğe sahip malzemedir. Yüksek en boy oranı ve içi boş yapısı ve düşük yoğunluğu sayesinde ağırlıkça %0,05 kadar düşük bir KNT konsantrasyon seviyesinde dahi beton matris içinde iletkenlik ve mekanik özellik açısından güçlü bir ağ oluşturmayı kolaylaştırmaktadır. KNT ayrıca son derece yüksek piezo-dirençlilik özelliklerine sahiptir. Şekil 3.2'de KNT yapısına, Resim 3.8'de ise tez çalışmasında kullanılan KNT'lerin SEM görüntülerine yer verilmiştir.



Şekil 3.2. Karbon Nanotüp: (a) KNT yapısı (b) KNT SEM görüntüsü



Resim 3.8. Tez kapsamında kullanılan çok duvarlı karbon nanotüplerin SEM fotoğrafları

KNT kullanımı, yüksek dayanımlı C-S-H miktarını arttırarak ve boşluk oranını azaltarak, nano boyuttaki beton malzemelerini güçlendirmekte ve otojen büzülmenin azalmasını sağlamaktadır. Ayrıca, KNT'nin karışımlara eklenmesi nano boyut seviyesinde matris çatlaklarının oluşumunu da kontrol etmektedir. KNT kullanımında betonun çatlaklarının köprülendiği pek çok kez kanıtlanmıştır. Bunun yanında, liflerin sıyırılması ve çatlak genişliklerinin dar olması gibi ECC'nin karakteristik yapısına uygun davranış şekilleri de gözlemlenmiştir. Son yıllarda, KNT tabanlı kendi kendini algılayan beton üzerine araştırmalar için çok çaba harcanmıştır. KNT'ler mikro-ölçekteki agregalara kendi kendini bağlayabildikleri için, ayrışmalarını ve düzgün dağılımını sağlamak, KNT betonunu başarılı bir şekilde üretmek için ele alınması gereken kritik zorluklardan biridir. KNT'nin temas

noktalarının sayısı, yükün artmasıyla artar ve bu durum iletkenliğin artmasına neden olmaktadır.

Literatürdeki çalışmalarda, KNT'li betonun kendi kendini algılama özelliğinin, aşağıdaki nedenlerden kaynaklandığı belirtilmiştir:

1. KNT'nin içsel elektrik iletkenliğindeki değişiklik, dış kuvvet altında değişmektedir.
2. İletkenliğin artmasına neden olabilecek yükleme artışıyla KNT'nin temas noktalarının sayısı artmaktadır.
3. Bitişik haldeki KNT'lerin arasındaki ayrılma mesafesi, yükleme altında azalır ve bu durumda da elektriksel iletkenliğin artmasına neden olabilir.

Yukarıda belirtilen üç nedenin tümü, KNT'nin iç direncindeki ve bir diğer KNT ile arasındaki temas direncinde meydana gelen değişiklikler ile iki yönlü olarak özetlenebilir. Bununla birlikte, iki faktörün KNT betonunun algılama özelliğine tam olarak nasıl katkıda bulunduğu hala tam olarak anlaşılabilmiş değildir. KNT beton matrisinden çok daha yüksek bir elastik modüle sahiptir. Basınç yüklemesi altında, KNT çok deforme olmamaktadır. Bu nedenle, KNT'nin içsel elektrik direncindeki değişim, KNT betonunun değişimi ortaya koymak için daha küçük seviyede bir katkıda bulunan faktör olarak işlev görmektedir. Geleneksel beton genellikle, elektriksel olarak farklı dış yükler veya diğer çevre faktörleri ile az değişen veya hiç değişmeyen zayıf elektriksel iletken bir malzemedir. Bununla birlikte betonun KNT ile elektriksel direncinin basınç gerilmesine verdiği tepkinin tersinir ve hassas olduğu, yani KNT'li betonun kendiliğinden algılama kabiliyetine sahip olduğu literatürdeki pek çok araştırmadan görülmektedir.

### **3.1.8. Yüksek oranda su azaltıcı katkı (süperakışkanlaştırıcı)**

ECC karışımlarının işlenebilirliğini arttırmak için BASF Yapı Kimyasalları tarafından üretilmekte olan Glenium 51 isimli akrilik esaslı polikarboksilik eter tipi bir yüksek oranda su azaltıcı (YOSA) katkı (süperakışkanlaştırıcı) kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı, yaklaşık %40 oranında katı madde içeren ve özgül ağırlığı yaklaşık 1,1 olan sıvı halde bir katkıdır. Süperakışkanlaştırıcı katkı miktarı karışım sırasında katkının performansına, elde edilecek karışımların kıvamına, ayrışmaya karşı direncine ve liflerin matrise homojen olarak dağılmasına bağlı olarak ayarlanmıştır.

### 3.2. ECC Karışımlarının Üretimi

Tez çalışmaları sırasında gerçekleştirilen testlerde kullanılan numuneler küçük ebatlı elemanlar olduğundan ECC karışımlarının üretimi de küçük ölçeklerde gerçekleştirilmiştir. Küçük ölçekli karışımlar hazırlanırken 25 litre kapasiteli harç mikseri kullanılmıştır. ECC karışımlarının hazırlanması sırasında öncelikli olarak tüm katı malzemeler kuru şekilde (gerçekleştirilen çalışmaya göre UK-H/UK-L/PC ve kuvars kumu) PVA lifleri hariç olacak şekilde 100 devir/dakika hızda 1 dakika karıştırılmıştır. Ardından içilebilir musluk suyu ve süperakışkanlaştırıcı katkı eklenmiş ve 150 devir/dakika hızda 2 dakika süreyle karıştırılmıştır. Karışım akışkan hale geldikten sonra PVA lifleri matrise eklenmiş ve karıştırma işlemi mikserde 150 devir/dakika hızda fazladan 3 dakika daha devam etmiştir. Numunelerin tipine göre ise karbon esaslı malzemelerden karbon nanotüp ve karbon lifler ayrıca bu işlemlerin ardından ilave edilmiştir. Resim 3.9’da karbon esaslı malzemelerin karışımlara eklenmesinin görüntüleri verilmiştir. KNT’ler tüm karışım suyu ve YOSA ile birlikte çok yüksek hızda karıştırabilen el karıştırıcısı vasıtasıyla 3000 dd’de 15 dakika boyunca karıştırılmıştır. Bu işlemin tamamlanmasından önce, tüm kuru toz malzemeler harç mikserinde daha önce karıştırılarak hazırlanmış duruma getirilmiştir. Sonrasında, daha önceki aşamada hazırlanmış karışım kuru toz malzemelerin içerisine 10 saniye içerisinde yavaşça ilave edilmiş ve tüm malzemelerin harç mikseri içerisinde karıştırılmasına 300 dd’de 10 dakika boyunca devam edilmiştir. Bu yöntemde, KF lifleri kuru toz malzemelerle birlikte harç mikserinde 10 dakika boyunca 100 dd’de karıştırılmıştır. Mikser 100 dd’de çalışırken karışım suyunun tamamı daha önce karıştırılan malzemelerin üzerine 10 saniye içerisinde yavaşça dökülmüştür. Daha sonra harç mikserinin hızı 300 dd’ye çıkarılmış, YOSA miktarının tamamı 30 saniye içerisinde miksere eklenmiş ve tüm malzemelerin karıştırılmasına 300 dd’de 10 dakika boyunca devam edilmiştir.



Resim 3.9. (a) YOSA ilavesi, (b) yüksek frekansta karışımın hazırlanması, (c) KNT solüsyonunun esas karışıma aktarılması, (d) karışımların kalıplara dökülmesi

### 3.3. ECC Numunelerinin Üretimi ve Karışım Oranları

Tez kapsamında kullanılacak ECC karışımlarına ait detaylar Çizelge 3.4’te verilmiştir. Üretilen numuneler kalıplara yerleştirildikten sonra  $50 \pm 5$  bağıl nem ve  $23 \pm 2$  °C sıcaklığa sahip laboratuvar koşulları altında yüzeyleri örtülmüş halde kalıplar içerisinde 24 saat boyunca bekletilmiştir. 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  $23 \pm 2$  °C sıcaklıkta kür işlemleri devam etmiştir.

Çizelge 3.4. ECC karışım oranları

| Karışım Türü | Çimento | S/BM | Kum/BM | PVA<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | YOSA<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | UK*/PÇ | NM/BM<br>(%) |
|--------------|---------|------|--------|-----------------------------|------------------------------|--------|--------------|
| ECC-Kontrol  | 1       | 0,27 | 0,36   | 26                          | 5,1                          | 1,2    | -            |
| ECC-KF       | 1       | 0,27 | 0,36   | 26                          | 5,3                          | 1,2    | 1**          |
| ECC-KNT      | 1       | 0,27 | 0,36   | 26                          | 6,9                          | 1,2    | 0,55         |
| ECC-Kontrol  | 1       | 0,27 | 0,36   | 26                          | 4,8                          | 2,2    | -            |
| ECC-KF       | 1       | 0,27 | 0,36   | 26                          | 5,1                          | 2,2    | 1**          |
| ECC-KNT      | 1       | 0,27 | 0,36   | 26                          | 6,6                          | 2,2    | 0,55         |

\* Düşük veya yüksek kızdırma kaybına sahip 2 adet uçucu kül içeriği

\*\* Toplam karışım hacmine oranı

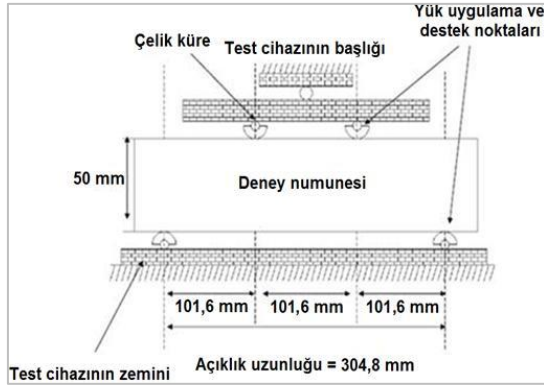
Çizelge 3.4'teki karışımlar ile kendiliğinden iyileşme ve algılama kabiliyetlerinin test edilmesi için uygulanacak deneysel yöntemlerin gerektirdiği prizmatik (360×50×75 mm), küp (50×50 mm) ve silindir (Ø100×200 mm) numuneler üretilmiştir. Farklı yaşlarda olmak üzere deneylerde kullanılacak, söz konusu boyutlarda (her bir karışım için düşük ve yüksek oranda kızdırma kaybına sahip uçucu kül kullanılarak) toplamda 12 karışıma ait numuneler üretilmiştir. Söz konusu numuneler sürekli su ve ıslanma-kuruma olmak üzere 2 ayrı kür koşulunda muhafaza edilmiş ve deneysel işlemlere tabi tutulmuştur.

### 3.4. Deneysel Yöntem

#### 3.4.1. Basınç dayanımı testi

ECC'de kendiliğinden iyileşme davranışının ve kendiliğinden algılama davranışının değerlendirilmesine başlamadan önce üretilen numunelerin öncelikle temel mekanik özellikleri belirlenmiştir. Temel mekanik özellikler başlığı altında gerçekleştirilen deneylerden birisi basınç dayanımı testidir. Basınç dayanımı testleri için her bir karışımdan 50 mm boyutlarında toplamda 6 adet küp numune üretilmiştir. Üretilen numunelerin kürü, sıcaklığı 23±2 °C ve nemi %50±5 olan laboratuvar ortamında yapılmıştır. İlk başta numuneler 24 saat boyunca yüzeyleri örtülü şekilde kalıplarında bekletilmiştir. 24 saatin ardından numuneler 23±2 °C sıcaklık ve %95±5 nem ortamında geçirimsiz plastik torbalar içinde 2 ve 27 günlük sürelerde muhafaza edilmiştir. Bu kür yönteminin seçilme amacı literatürde ECC ile ilgili üretilen numunelere benzer işlemlerin yapılmasıdır. Bu sayede tez çalışmaları kapsamında elde edilen deney sonuçları literatürde yayınlanmış çalışmalarda





Şekil 3.3. Dört noktalı eğilmede çekme testi için deney düzeneği

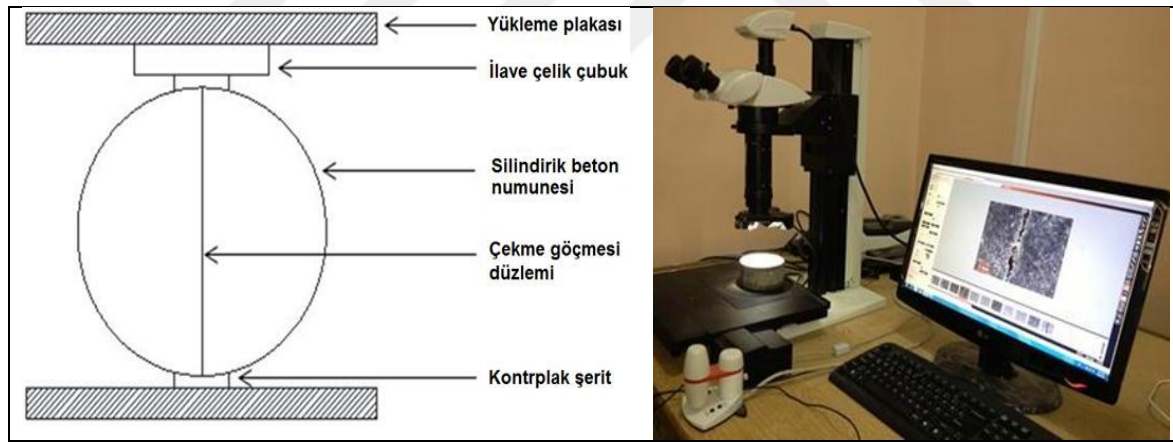


Resim 3.11. ECC numunesinin 4 noktalı eğilme deneyi

Elektriksel Direnç (ED) ve Hızlı Klorür İyonu Geçirimsizlik (HKİG) deneylerinde kullanılmak üzere  $\text{Ø}100 \times 200$  mm ebatlarında silindirik numuneler hazırlanmıştır. 24 saat boyunca  $23 \pm 2$  °C ve  $\%50 \pm 5$  bağıl nemde laboratuvar ortamında yüzeyleri örtülü şekilde kalıplar içerisinde bekletilen numuneler, kalıplardan çıkarıldıktan sonra  $23 \pm 2$  °C ve  $\%95 \pm 5$  bağıl nemde geçirimsiz plastik torbalar içerisinde 28 gün boyunca kür edilmiştir.  $\text{Ø}100 \times 200$  mm'lik silindirik numuneden elmas uçlu testere kullanılarak çıkarılmış toplamda her karışımdan dört adet  $\text{Ø}100 \times 50$  mm boyutlarında silindirik numune kullanılmıştır. Numune boyutlarının küçültülmesinin bir sebebi, malalanmış yüzeyler sebebiyle doğması muhtemel varyasyonların önüne geçmektir. Bir diğeri ise belirli bir numuneden elde edilecek sonuçların aşırı değişim gösterip göstermediğinin anlaşılabilmesi için numune sayısının artırılmasıdır.

### 3.4.3. Önyükleme ve kendiliğinden iyileşmenin değerlendirilmesinde kullanılan yöntemler

Ön yükleme amacıyla hazırlanan numunelerin yarmada çekme deformasyon kapasiteleri belirlenmiştir. Test sonuçları farklı karışımların nihai yarmada çekme deformasyon kapasitelerinin birbirine yakın olduğunu göstermiştir. Ön yükleme, numunelerin nihai çekme kapasitesinin %75'ine kadar gerçekleştirilmiştir. Önyüklemeye maruz bırakılan numunelere ek olarak karşılaştırma amacıyla bazı numuneler sağlam olarak kullanılmıştır. Yarmada çekme önyüklemesi universal test cihazı kullanılarak 0,005 mm/s hızda yapılmış ve yükleme sırasında numunelerin yükleme noktalarından çatlamasını engellemek amacıyla kontrplak şeritler kullanılmıştır. Önceden belirlenen önyükleme seviyelerine ulaşılmasının ardından, numuneler test cihazından alınmış ve yükün kaldırıldığı durumda en fazla 125X büyütme kapasitesine sahip optik mikroskop aracılığıyla çatlak özellikleri karakterize edilmiştir. Şekil 3.4'te ön yükleme test düzeneği (solda) ve kendiliğinden iyileşmeyi değerlendirmek amacıyla çatlakların mikroskop aracılığıyla analizi (sağda) gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Yarmada çekme deney düzeneği ve optik mikroskop

#### Elektriksel direnç testi

Elektriksel verilerin toplanmasında aksel konfigürasyona sahip iki problu beton direnç ölçer cihazı kullanılmıştır. Bu tipte beton direnç ölçerlerin konfigürasyonları standart olarak kullanılmaktadır. Kanada'da bulunan Giatec firmasından temin edilen RCON isimli elektriksel direnç ölçer Resim 3.12'de gösterilmiştir. Bu yöntem ile geliştirilen çimento bağlayıcılı kompozitlerin elektriksel direnç (ED) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Daha önce de bahsedildiği üzere öncelikle Ø100×200 mm boyutlarındaki silindirik numunelerden

Ø100×50 mm’lik silindirik numuneler çıkarılmıştır. Bu test yöntemi sırasında Ø100×50 mm’lik silindirik numuneler dikey şekilde birbirine paralel iki düz elektrot arasına yerleştirilmiş (Resim 3.12) ve yeterli elektriksel kontak için 10 mm yükseklik ve 150 mm çapa sahip önceden aynı miktarda suyla ıslanmış süngerler numune ile elektrotlar arasına konmuştur.



Resim 3.12. Eksenel konfigürasyona sahip iki problu elektriksel direnç ölçüm sistemi

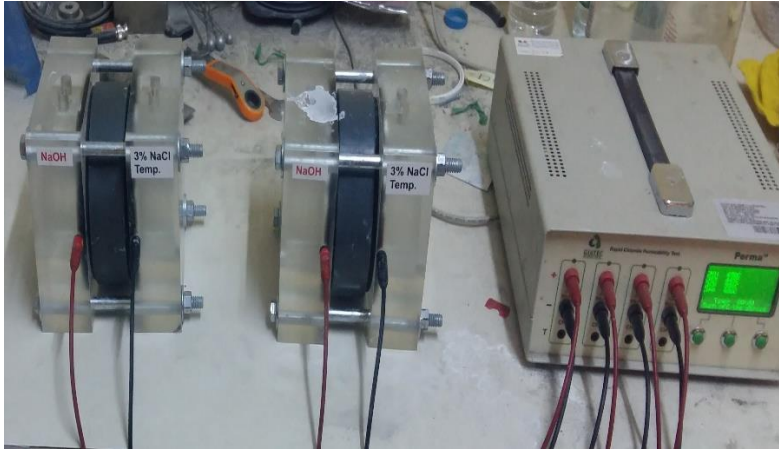
Çalışmalarımızda kullanılan RCON beton elektriksel direnç ölçüm cihazı, alternatif akım (AA) ile çalışan, sonuçları empedans cinsinden veren, 1 Hz ile 30 kHz arasında değişebilen frekans değerlerinde çalışabilen, 5 saniyeden daha kısa sürede sonuç verebilen ve 0 ile 180° arasında faz açısını tayin edebilen bir cihazdır. Literatürde yapılan çalışmalar, AA uygulamaları için en az 1 kHz’lik frekans seçilmesinin polarizasyon etkisini ortadan kaldıracığını belirtmiştir. Bu sebeple, geniş frekans yelpazesine rağmen, iki problu cihazın kullanıldığı çalışmalarımızda, test frekansı sabit olacak şekilde 1 kHz olarak belirlenmiştir (Hou, 2008). İki problu ED ölçüm cihazı, empedans ve faz açısı sonuçları vermektedir ve bu değerler aşağıdaki basit eşitlik kullanılarak geometrik faktörler aracılığıyla direnç değerlerine çevrilebilmektedir.

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

Bu eşitlikte  $\rho$ ,  $Z$ ,  $\theta$ ,  $A$  ve  $L$  değerleri sırasıyla, direnç ( $\Omega.m$ ), elektriksel empedans ( $\Omega$ ), faz açısı ( $^\circ$ ), en kesit alanı ( $m^2$ ) ve boy (m) değerlerine karşılık gelmektedir.

### Hızlı klor iyonu geçirirnililiği testi

ASTM C1202 standardına göre gerçekleştirilen hızlı klorür iyonu ger irirnililik (HK G) deneyi beton malzemesinin kalite kontrolü için kullanılabilen oldukça basit bir test yöntemidir. Bu test yönteminde aslında betonun ger irirnililiği değil, malzemenin içinden geçen elektrik akımına karşı uygulamış olduğu direnç ölçülmektedir. Bu direnç sayesinde boşluk yapısı, boşluk çözeltisinin kimyasal yapısı ve bunlara benzer çeşitli parametreler belirlenebilmektedir. Ancak HK G testi her ne kadar beton malzemesinin elektriksel iletkenliği hakkında bilgi veriyor olsa da, bu testlerden elde edilen sonuçların klorür iyon ger irirnililiği performansıyla ilişkili olduğu bilinmektedir. Kullanılabilirliğinin de kolay olması sebebiyle, ECC malzemesinde kendiliğinden iyileşme davranışının HK G testleri aracılığıyla değerlendirildiği bazı çalışmalar literatürde mevcuttur. Literatürdeki çalışmalara benzer şekilde tez kapsamında silindir numunelerin hızlı klor iyonu ger irirnililik deneyleri kendiliğinden iyileşme performansının ölçülmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Resim 3.13'te numunelerin test sırasındaki görüntüsü verilmiştir.



Resim 3.13. HK G testi

#### **3.4.4. Kendiliğinden algılama testi**

Kendiliğinden algılama davranışının değerlendirilebilmesi için kiriş numuneler dört noktalı eğilmede çekme yüklemeleri ile birlikte elektriksel ölçümleri yapılmıştır. Bu amaçla literatürde daha önce detayları paylaşılan ölçüm konfigürasyonları kullanılmıştır ( zt rk ve diğerleri, 2020). Deney yükleme hızları benzer şekilde eğilmede çekme testi için mekanik testlerde olduğu gibi uygulanmıştır. Deneylerden elde edilen veriler her beş saniyede bir

deney sistemine bağlı bilgisayara kaydedilmiş ve deneyler ilgili ASTM standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 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 yukarıda önceden belirtilmiş 3.1 ve aşağıda sunulan 3.2 numaralı eşitlikler kullanılarak sırasıyla elektriksel direnç ( $\Omega.m$ ) ve elektriksel direnç değerlerindeki oransal değişimler hesaplanmıştır.

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

Eşitlik 3.2'deki  $R_L$  eğilme yükleri ve yük boşaltmaları sırasında kaydedilen elektriksel direnç değerini,  $R_o$  ise başlangıç durumundaki elektriksel direnç değerini temsil etmektedir. Elektriksel ölçümlerin ve eğilme yüklemelerinin aynı anda yapıldığı bir numune Resim 3.14'te verilmiştir.



Resim 3.14. Aynı anda yapılan ED ve 4 noktalı eğilme testleri

### 3.4.5. Mikro yapısal karakterizasyon testleri

#### SEM-EDX

Kendiliğinden iyileşmiş prizmatik ve silindirik numunelerin yüzeyinden alınan numuneler ile SEM-EDX testleri yapılmıştır. Uygulanan ilave kür sonucunda mikro çatlaklarda gerçekleşen değişimler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılan gözlemler aracılığıyla değerlendirilmiştir. SEM gözlemleri ayrıca, farklı puzolanik malzemeler

bulunduran ECC karışımlarının oluşturduğu nihai kendiliğinden iyileşme ürünlerinin tanımlanmasında da kullanılmıştır.

### TGA

Kendiliğinden iyileşmiş prizmatik ve silindir numunelerin yüzeyinden alınan numuneler ile termogravimetrik analizler (TGA) gerçekleştirilmiştir. Kendiliğinden iyileşmiş ECC numunelerinden alınan örneklerin sıcaklık değişimlerine bağlı kütle değişimleri değerlendirilmiştir. TGA ölçümlerinin sonunda kütlenin zamana karşı grafik değerleri, TGA eğrileri olarak tanımlanmaktadır. TGA için yaklaşık 50 mg ağırlığındaki toz numuneler termal analizörde 10°C/dakika oranında 30°C'den 1050 °C'ye kadar yükselen sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Sıcaklığa maruz bırakma işlemi dakikada 100 ml nitrojen akışının olduğu karbondioksitsiz bir ortamda gerçekleştirilmiştir. TGA deneyleri 180 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

### X-Işını Kırınım (X-Ray Diffraction [XRD])

XRD, beton numunelerinin nicel ve nitel analizi için kullanılan önemli bir yöntemdir. Kendiliğinden iyileşmiş 180 günlük prizmatik ve silindir numunelerin yüzeyinden ince bir bıçak yardımıyla kazınarak alınan bir miktar numune ile XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Nihai kendiliğinden iyileşme ürünlerinin kristal yapıları ve varsa amorf oluşumları bu yöntem ile belirlenmiştir.

## 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Basınç Dayanımı Sonuçları

Tez çalışmalarında planlanan mekanik özelliklerin tespit edilmesi kapsamında farklı ECC numunelerinin basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Daha önce detaylı olarak aktarıldığı gibi deneylerde 50 mm boyutlarında küp numuneler üretilmiştir. Üretimlerin tamamlanmasından sonra, numuneler kalıplar içinde 24 saat boyunca  $50 \pm 5$  bağıl nemde ve  $23 \pm 2$  °C’ de kür edilmiştir. 24 saatin sona ermesinin ardından, numuneler kalıplarından çıkarılmıştır. Çıkarılan numuneler geçirimsiz plastik poşetler içine alınarak daha önceden belirlenen kür sürelerinin sonuna kadar  $95 \pm 5$  bağıl nemde ve  $23 \pm 2$  °C’de kür edilmiştir. Basınç testleri küp numunelerin 3 ve 28 gün yaşlarında gerçekleştirilmiştir. Farklı karışımlara sahip ECC numunelerinin mekanik özelliklerini karşılaştırmak amacıyla aynı sayıda, karbon lif ya da karbon nano tüp içermeyen kontrol amaçlı küp numuneler de üretilmiştir. Basınç dayanımı testleri ASTM C109 standardına uygun olarak 100 ton kapasiteli bir test cihazında gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında yükleme hızı 0,9 kN/saniye olarak uygulanmıştır. ECC karışımlarından ASTM C109 standardına göre elde edilen basınç test sonuçlarının tamamı Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çizelge 4.1’de toplam bağlayıcı oranının %60’ı oranında (UK/PÇ: 1,2) uçucu kül içeren ECC karışımlarının, Çizelge 4.2’de ise toplam bağlayıcı oranının %80’i (UK/PÇ: 2,2) oranında uçucu kül içeren ECC karışımlarının basınç test sonuçları verilmiştir. Sonuçların daha iyi irdelenmesi adına 3 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarının ortalama değerleri Şekil 4.1-Şekil 4.4’te ayrıca sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Toplam bağlayıcı malzeme oranınca %60 uçucu kül içeren ECC karışımlarının 3 ve 28 günlük basınç dayanımları (MPa)

| Numune        | 3.gün |      |      | 28.gün |      |      |
|---------------|-------|------|------|--------|------|------|
| ECC-1.2-L-K   | 38,9  | 40,4 | 39,8 | 50,7   | 54,5 | 52,9 |
| ECC-1.2-L-KF  | 40,3  | 44,2 | 42,9 | 59,3   | 59,8 | 59,4 |
| ECC-1.2-L-KNT | 45,3  | 43,9 | 41,8 | 62,1   | 65,8 | 61,9 |
| ECC-1.2-H-K   | 35,5  | 40,8 | 33,1 | 65,2   | 57,4 | 59,7 |
| ECC-1.2-H-KF  | 43,5  | 43,4 | 42,4 | 70,4   | 69,9 | 69,9 |
| ECC-1.2-H-KNT | 17,1  | 23,3 | 17,1 | 31,8   | 28,2 | 27,3 |

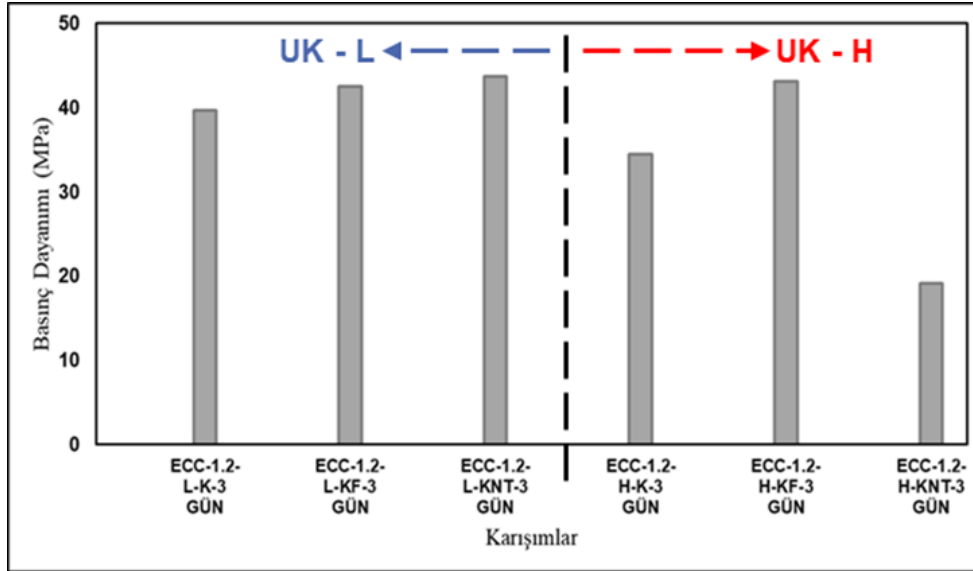
Çizelge 4.2. Toplam bağlayıcı malzeme oranınca %80 uçucu kül içeren ECC karışımlarının 3 ve 28 günlük basınç dayanımları (MPa)

| Numune        | 3.gün |      |      | 28.gün |      |      |
|---------------|-------|------|------|--------|------|------|
| ECC-2.2-L-K   | 26,9  | 27,0 | 26,8 | 49,9   | 49,7 | 39,9 |
| ECC-2.2-L-KF  | 27,5  | 27,1 | 27,7 | 51,9   | 50,1 | 50,5 |
| ECC-2.2-L-KNT | 26,6  | 19,8 | 19,7 | 40,2   | 38,0 | 38,3 |
| ECC-2.2-H-K   | 21,7  | 21,8 | 21,3 | 39,0   | 44,5 | 43,9 |
| ECC-2.2-H-KF  | 12,8  | 12,9 | 14,0 | 49,8   | 48,7 | 52,5 |
| ECC-2.2-H-KNT | 9,9   | 9,6  | 8,8  | 31,3   | 26,3 | 29,5 |

Çizelge 4.1 incelendiğinde %60 oranında uçucu kül içeren bütün ECC karışımlarına ait numuneler için basınç dayanımları beklenildiği üzere ilerleyen kür yaşları ile birlikte artmıştır. Bu durumu kısaca numunelerin artan olgunluk durumlarına bağlı olarak 28. güne kadar devam eden artan pozolanik ve hidrasyon reaksiyonları ile açıklamak mümkündür. Düşük oranda kızdırma kaybına sahip bağlayıcı malzeme oranınca %60 C-sınıfı uçucu kül (UK-L) içeren karışımlara ait numuneler 3. günde incelendiğinde ortalama basınç dayanımlarının, ECC-1.2-L-K, ECC-1.2-L-KF, ECC-1.2-L-KNT karışımları için sırasıyla 39,7; 42,5 ve 43,7 MPa olduğu görülecektir (Şekil 4.1). Düşük kızdırma kaybına sahip karışımların bu aşamadaki basınç dayanımlarına bakıldığında sonuçların kıyaslanabilir nitelikte olduğu görülecektir. Ancak ECC-1.2-L-KF ve ECC-1.2-L-KNT karışımlarına ait 3 günlük basınç dayanımlarının kontrol karışımına kıyasla sırasıyla %7 ve %10 artış göstermesi mikro ve nano ölçekte kullanılan karbon lif ve karbon nano tüp malzemelerinin basınç yükleri altında mikro/nano kusurları köprüleyerek kontrol karışımlara ait numunelere kıyasla daha fazla seviyede yük taşınmasını sağladığından söz edilebilir. Aynı kür yaşındaki (3 günlük) %80 oranında uçucu kül içeren ECC karışımlarına (ECC-2.2) bakıldığında, basınç dayanımlarında karışım tipinden bağımsız olmak üzere ECC-1.2 karışımlarına kıyasla düşüşler gözlemlenmiştir. Bu düşüşün en belirgin etkisi yüksek oranda kızdırma kaybı içeren F-Sınıfı uçucu kül (UK-H) ve mineral katkılarda yer alan CaO miktarı ile açıklanabilir (Çizelge 4.2).

Elde edilen sonuçlar uygun bir pozolanik malzeme seçiminde CaO miktarının çimentolaşma özelliği, SiO<sub>2</sub>'nin ise pozolanik reaksiyonların oluşumu bakımından ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. 3 günlük kür yaşında ECC-2.2 karışımlarına ait numunelerin kendi içerisindeki karşılaştırmasına bakıldığında; kontrol numunelerinin, karbon esaslı malzemelerle takviye edilmiş ECC karışımlarına kıyasla basınç dayanımı açısından daha

yüksek bir sonuç gösterdiği görülecektir (Şekil 4.3). Benzer sonuçlara ECC-1.2 karışımlarında rastlanmamış olması ve nano ölçekte karbon esaslı malzemelerin, kompozitlerin basınç dayanımını iyileştirmekten ziyade kötüleştirilmesi ancak yüksek oranda kızdırma kaybına sahip mineral katkılarla açıklanabilir. Bununla birlikte, kızdırma kaybının karbon içeriğinden gelmesi ve bu karbonun hidratasyonu yavaşlatması da sebep olarak belirtilebilir. Bu nedenle, özellikle konu ile ilgili olarak daha önce düşük kızdırma kaybına sahip F-sınıfı uçucu küllerin de yer aldığı nano malzeme takviyeli karışımlarla yapılan araştırmalar göz önüne alındığında (Al-Dahawi ve diğerleri, 2016a; Al-Dahawi ve diğerleri, 2016b) karbon esaslı malzemelerin (KNT) basınç dayanımını düşürmekten ziyade iyileştirdiği görülmüştür. Bu tez kapsamında ise kullanılan F-sınıfı uçucu küllerin çok yüksek oranda kızdırma kaybı içermesi (%10,36) karbon nano tüplerden beklenen mekanik katkının önünde engel oluşturmuş olabilir. Bu durum, kızdırma kaybında yer alan yanmamış karbonun gözenekli yapısı sayesinde suyu emerek hidratasyonu yavaşlattığını ve topaklanma eğilimi olan karbon nano tüplerin homojen olarak dağıtılması için kullanılan akışkanlaştırıcı miktarının arttığını dolayısıyla KNT içerikli karışımların mekanik özelliklerini olumsuz etkilediğini göstermektedir. Bu nedenle karbon nano tüplerin, yüksek kızdırma kaybına sahip mineral katkıları ile kullanıldığında, karışımların 3 günlük mekanik özelliklerini iyileştirmekten çok kötüleştirdiği görülmüştür. Örneğin ECC-1.2-H-KNT ve ECC-1.2-H-K karışımına ait numuneler karşılaştırıldığında KNT içeren numunelerin ortalama basınç dayanımı (19,2 MPa) kontrol karışımına kıyasla (36,5 MPa) %47,4 daha düşüktür. Benzer karşılaştırma KF lif içeren numuneler ile kontrol numuneleri arasında yapıldığında ECC-1.2-H-KF numunelerinin ortalama basınç dayanımının (43,1 MPa) ECC-1.2-H-K numunelerinin ortalama basınç dayanımından (36,5 MPa) % 18 daha yüksek olduğu görülecektir (Şekil 4.1). Bu sonuç aynı kür yaşında düşük oranda kızdırma kaybına sahip mineral katkıları ile üretilen ECC-1.2-L-KF numunelerine ait sonuçlarla benzerlik taşımaktadır. Bu noktada, kızdırma kaybının mikro ölçekte ve 12 mm uzunluğundaki karbon lif malzemesini etkilemekten ziyade, çok yüksek yüzey alanına sahip karbon nano tüplerin homojen olarak matris içerisine dağılarak ilave mekanik iyileştirmeler sağlamasını engellediğini destekler niteliktedir. Bunun yanında CaO miktarının F-sınıfı uçucu küllerle (UK-H) üretilen karışımlarda daha az olması hidratasyon reaksiyonlarının erken yaşlarda özellikle kontrol karışımları için daha sınırlı olmasına neden olarak, aynı yaştaki C-sınıfı uçucu küle (UK-L) sahip karışıma kıyasla (ECC-1.2-L-K) %8,8 daha az basınç dayanımı göstermiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. ECC-1.2 karışımlarına ait numunelerin ortalama basınç dayanımı (3.gün)

Çizelge 4.1’de verilen 28 günlük küp numunelere ait basınç dayanım değerlerine bakıldığında, 3 günlük numunelere kıyasla bütün numunelerde artış olduğu ve dayanım değerleri arasındaki ilişkinin 3 günlük numunelerle benzer bir yönelimde olduğu görülecektir. Örneğin, ECC-1.2-L-K, ECC-1.2-L-KF ve ECC-1.2-L-KNT karışımlarına ait ortalama basınç dayanımlarının sırasıyla 52,7 MPa, 59,5 MPa ve 63,3 MPa olduğu görülecektir. Bu noktada en yüksek basınç dayanım değerlerine karbon esaslı malzemelerle takviye edilmiş numunelerin sahip olduğunu belirtmekle beraber, ECC-1.2-L-KNT ve ECC-1.2-L-KF karışımları için kontrol karışımlarına kıyasla basınç dayanımı artışı sırasıyla %20,1 ve %12,9 oranında gerçekleşmiştir.

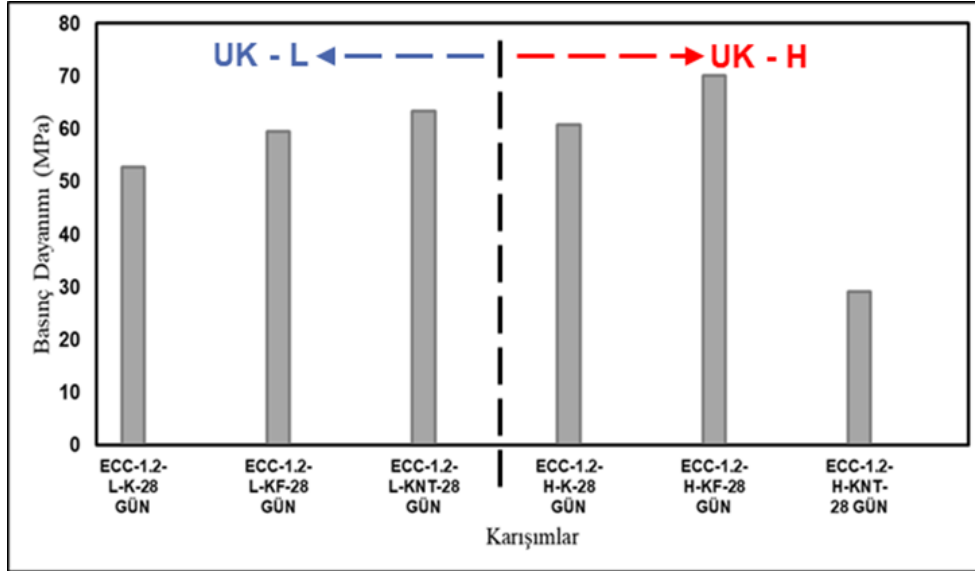
KF lif bulunduran numunelerde kontrol numunelerine kıyasla daha yüksek basınç dayanımı sonuçlarının elde edilmesi içsel donatı görevi gören daha uzun karbon liflerin (12 mm) kusur ve/veya boşlukları daha etkili bir şekilde köprüleyebilme ihtimalinin daha fazla olmasıyla ilişkilendirilmektedir. Basınç dayanımı açısından düşünüldüğünde sadece PVA liflerine sahip kontrol numunelerinin, PVA lifinden kaynaklı muhtemel köprüleme davranışının yükleme sınırının maksimum seviyeye ulaşmasından önce meydana gelen mikroçatlaklarda etkili olması, KF lifler kadar maksimum seviyenin sonrasında meydana gelecek mikroçatlak oluşumlarının karşılanabilmesinde istenilen seviyede başarılı olamaması ve bu durumun yük taşıma kapasitesinde görece düşüşlere sebep olması gibi nedenlerden ötürü, kontrol numunelerine kıyasla KF lif bulunduran numunelerde daha yüksek basınç dayanımı sonuçları elde edilmesine sebep olmuştur (Şekil 4.2).

Yukarıdaki açıklamalara ek olarak, kontrol numuneleri ile kıyaslandığında KF ilavesi ile üretilmiş numunelerin farklı yaşlardaki kararlı yüksek basınç dayanımı sonuçları KF liflerinin çatlakların oluşumunu yakalayabilme kabiliyeti ile ilişkilendirilmiştir. KF lifleri maksimum yük seviyesi öncesi ve sonrasında mikroçatlak oluşum davranışını değiştirmek suretiyle boşluk ve/veya mikroçatlakları köprüleyerek kontrol numunelerinden daha yüksek basınç dayanımı sonuçları elde edilmesini sağlamıştır.

KNT kullanılarak üretilen numunelerin matrislerinin ise karbon esaslı malzemelerin oldukça yüksek özgül yüzey alanları sebebiyle dayanım gelişimine katkı sağlayan (seeding effect) yeni oluşmuş hidratasyon ürünleri bakımından oldukça yoğun olması mekanik özellikler bakımından avantaj sağlamaktadır. Düşük kızdırma kaybı içeren mineral katkı ve KNT kullanılarak üretilmiş numunelerden elde edilen daha yüksek basınç dayanımı sonuçları (Şekil 4.2), KNT taneciklerinin fazladan çekirdeklenme bölgesi sağlayan oldukça yüksek özgül yüzey alanları, dolgu etkisi aracılığıyla matrislerin oldukça yoğun C-S-H jelleri ile kaplı bir hal alması, iyileşen tanecik boyut dağılımı ve nano ölçekte kusurların köprülenmesiyle ilişkilendirilebilir. ECC karışımlarında, KNT'lerin sağladığı çekirdeklenme mekanizmasını; C-S-H jel formunun komşu, henüz hidrate olmamış çimento tanelerinin olduğu noktada KNT yüzeyinde oluşması ile açıklamak mümkündür. Böylece KNT takviyeli karışımlarda (sadece düşük oranda kızdırma kaybı içeren karışımlarda) nano malzeme içermeyen kontrol karışımlarına kıyasla hidratasyonun devam edebileceği daha fazla bölge meydana gelmiş olabilir. Her iki karbon esaslı malzeme içeren karışımlara dikkat edildiğinde ise (ECC-1.2-L-KF ve ECC-1.2-L-KNT) KNT içeren numunelerin ortalama basınç dayanımının KF içeren karışımlara kıyasla az da olsa (%6) yüksek olması nano boyuttaki malzemelerin (burada KNT) yüksek yüzey alanlarının daha fazla çekirdeklenme bölgeleri yaratması ve sonuç olarak daha düşük porozite ve daha az bağlantısız boşluk kırımları ile sonuçlandığından söz edilebilir.

Şekil 4.2'de verilen yüksek oranda kızdırma kaybına sahip F-sınıfı uçucu küllerle (UK-H) üretilen ECC karışımlarına bakıldığında karbon lif içeren karışımların daha üst seviyede bir basınç dayanımı ortalamasına sahip olduğu görülecektir (70,1 MPa). ECC-1.2-H-KF numuneleri 28. gün sonunda yaklaşık olarak kontrol karışımlara ait numunelerin ortalama basınç dayanımından (60,8 MPa) %15,3 daha fazla basınç yüklerine karşı direnç göstermiştir. Ancak ECC-1.2-H-KNT numunelerinin aynı yaştaki basınç dayanımlarına bakıldığında 3 günlük testlerde elde edilen sonuçlara benzer şekilde kontrol ve KF takviyeli

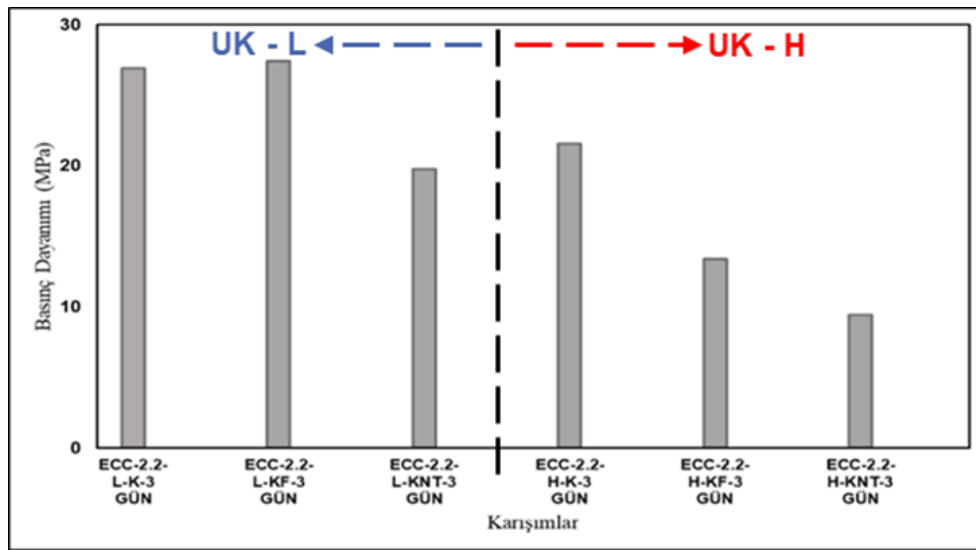
karışımlara kıyasla oldukça düşük basınç dayanımına sahip olduğu görülecektir. Bu durumun nedeni daha önce detaylı olarak aktarıldığından bu noktada tekrar bir yorum getirilmemiştir.



Şekil 4.2. ECC-1.2 karışımlarına ait numunelerin ortalama basınç dayanımı (28.gün)

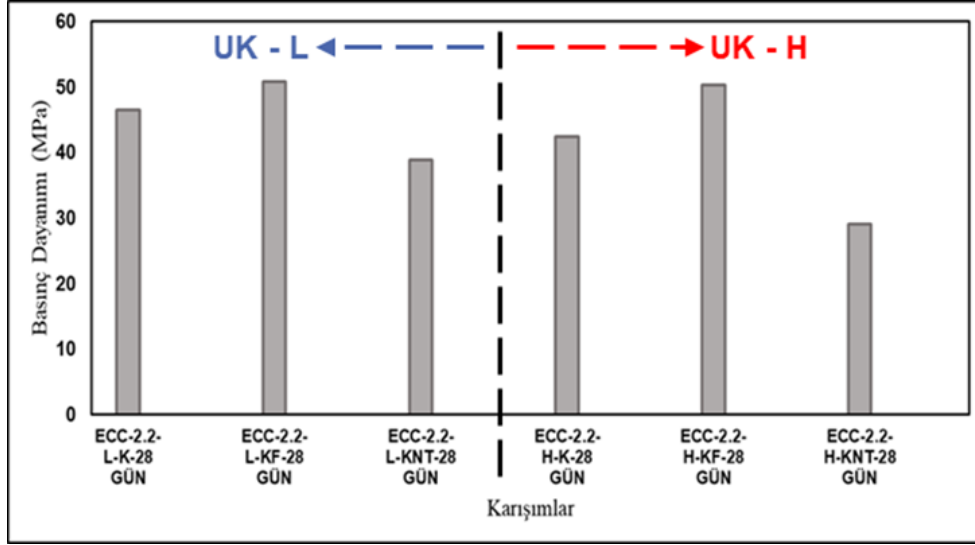
Şekil 4.3'te, Çizelge 4.2'de gösterilen her bir numuneye ait verilerin ortalama olarak gösterimi sütun grafiklerle verilmiştir. Düşük kızdırma kaybına sahip mineral katkılarla hazırlanmış (UK-L) 3 günlük numunelerin basınç dayanımlarına bakıldığında, ECC-2.2-L-K (26,9 MPa) ve ECC-2.2-L-KF (27,4 MPa) karışımlarının ortalama dayanımlarının karşılaştırılabilir düzeyde olduğu görülecektir. Ancak ECC-2.2-L-KNT numunelerinin ise kontrol karışıma kıyasla ortalama basınç dayanımı %18,2 daha düşük kaydedilmiştir. Bu sonuç düşük kızdırma kaybına sahip mineral katkılarla üretilen (bağlayıcı malzemenin % 60'ı oranında-ECC-1.2) Şekil 4.1 ve 4.2'de verilen sonuçlara kıyasla değişiklik göstermektedir. Bu noktada yüksek hacimdeki uçucu küllerin KNT'nin çekirdeklenme etkisini azalttığından ve buna bağlı olarak meydana gelen hidratasyon reaksiyonlarının KNT etkisinden çok CaO ve puzolanik reaksiyonlara bağlı olduğunu belirtmek gerekebilir. Benzer şekilde, yüksek kızdırma kaybına sahip numunelere dikkat edildiğinde (ECC-2.2-H) KNT'nin, uçucu külün içerdiği yüksek kızdırma kaybı muhtevasında daha önce bahsedilen homojen karışım yeteneğini etkilemesine ilaveten ortamdaki yüksek mineral katkı miktarının aynı şekilde KNT'nin çekirdeklenme reaksiyonlarını geciktirdiği anlaşılmaktadır. Bu iki etkinin aynı anda görülmesi kızdırma kaybının, homojen dağılımı etkilemesi ve yüksek hacimce mineral katkının [ECC-2.2] KNT'nin çekirdeklenme etkisini

sınırlaması sebebiyle basınç dayanımının 3. günde kontrol karışımına kıyasla, ECC-2.2-H-KNT numuneleri için %56,5 daha düşük sonuçlanmasına neden olmuştur. Bu aşamada, düşük kızdırma kaybı içeren numunelerin aksine, ECC-2.2-H-KF numunelerinin ortalama basınç dayanımları kontrol numunelerine ait sonuçların ortalamasından %38,9 daha düşük kaydedilmiştir. Bu noktada, yüksek mineral katkı ortamının kızdırma kaybından bağımsız olmak üzere, erken yaşlarda karbon esaslı malzeme takviyeli karışımların basınç dayanımını kötüleştirdiğinden söz edilebilir.



Şekil 4.3. ECC-2.2 karışımlarına ait numunelerin ortalama basınç dayanımı (3.gün)

Şekil 4.4'te söz konusu karışımların 28. gündeki ortalama basınç dayanımlarına bakıldığında ise ECC-2.2-L-KF karışımının ECC-2.2-L-K karışımına kıyasla %9,2 daha fazla basınç dayanımı sergilediği görülmektedir. Ancak benzer karışıma aynı yaşta KNT ilave edildiğinde ise basınç dayanımının %16,5 düştüğü tespit edilmiştir. Bu düşüş daha önce belirtildiği üzere ne kadar 3 günlük yaşta elde edilen düşüş kadar değilse de (%18,2), yüksek mineral katkı ortamında KNT'lerden mekanik iyileştirmenin elde edilmesinin mümkün olmadığını göstermektedir. Aynı şekilde yüksek hacimde bağlayıcı malzeme olarak yer alan UK-H içeren karışımlara bakıldığında (ECC-2.2-H) 28. günde KF içeren karışımların kontrol karışımına kıyasla ortalama %18,4 daha fazla basınç dayanımı gösterdiği anlaşılabacaktır. Ancak yüksek kızdırma kaybına sahip (%10,36) ve yüksek mineral katkı içeren bir ECC karışımında (bağlayıcı malzeme oranının %80'i) KNT'lerin, bütün basınç testleri sırasında mekanik özelliklerinin olumsuz etkilediğinden söz etmek mümkündür.



Şekil 4.4. ECC-2.2 karışımlarına ait numunelerin ortalama basınç dayanımı (28.gün)

Basınç dayanımı sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, beklenildiği gibi özellikle erken yaşlarda en önemli faktörün puzolanik malzeme miktarının çimento miktarına oranı olduğu görülecektir (UK-L/PÇ ya da UK-H/PÇ). Sonuçlardan görüldüğü üzere, genel olarak daha düşük basınç dayanımı değerleri yüksek mineral katkı (bağlayıcı malzemenin % 80'i oranında) numunelerde gözlemlenmiştir. Bu durum puzolanik malzeme-Portland çimentosu oranının 1,2'den 2,2'ye çıkmasının özellikle PÇ miktarındaki aşırı düşüş sebebiyle basınç dayanımını düşürdüğünü göstermektedir. Sonuçlarda, C-sınıfı uçucu kül (UK-L) taneciklerinin özellikle erken yaşlarda çimentolaşma ve puzolanik reaksiyon gösterme üzerindeki etkinliğinin daha fazla olduğu düşünülmektedir. Ancak, F-sınıfı uçucu kül (UK-H) taneciklerinin üstün puzolanik kapasitesi ileri yaşlarda kendini daha açık bir şekilde göstermeye başlamaktadır öyle ki, 28 günün sonunda UK-L içeren karışımlara kıyasla toplam bağlayıcı malzeme oranının %60'ı kadar mineral katkı kullanılan numunelerde basınç dayanımları daha yüksek elde edilmiştir (1.2 H-KNT hariç). UK-L tanecikleri, puzolanik kapasite ve çimentolaşma özelliklerinin ortak etkisi sayesinde basınç dayanımı sonuçlarını belirli seviyelere kadar iyileştirirken, yüksek puzolanik kapasiteye sahip UK-H tanecikleri benzer sonuçlar için daha uzun başlangıç kür süresine ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca mineral katkıları kendi içlerinde karşılaştırıldığında, UK-H ve UK-L'nin yüzey alanları arasındaki fark da basınç dayanımı üzerinde etkili olan bir diğer faktör olarak kabul edilebilir (sırasıyla 269 m<sup>2</sup>/kg ve 306 m<sup>2</sup>/kg). Yüzey alanının fazla olması, hidrasyon ve puzolanik reaksiyonlardaki ilerlemelerin ve dolgu etkisinin daha belirgin olmasına, bu sayede genel boşluk boyutlarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

Ayrıca UK oranı ve karışım tipine bakılmaksızın UK-L içerikli karışımlarda iyi basınç dayanımı performansı sergilemiştir. UK-H içerikli karışımlarda, KNT içerikli karışımların tamamında basınç dayanımında kayıplar gözlenmiştir. Bu durumun nedeni, kızdırma kaybında bulunan yanmamış karbonun gözenekli yapısı sayesinde hidratasyon için gerekli suyu emerek reaksiyonların yavaşlamasına neden olmasıdır. Bunun yanında KNT'nin matriste homojen dağılımı için gerekli katkı maddesi (süper akışkanlaştırıcı[SP]) ihtiyacının fazla olması dayanımı olumsuz etkilemiştir.

#### 4.2. Eğilme Dayanımı Sonuçları

3. Bölümde belirtildiği üzere dört noktalı eğilmede çekme deneyleri 28 ve 180 günlük kür sürelerinin ardından prizmatik kiriş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar dört farklı numuneye ait değerlerin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Her ne kadar sonuçların ortalaması alınsa da farklı karışımlara ait her bir numunenin performansı Şekil 4.5 ile Şekil 4.8 arasında ayrıca gösterilmiştir. Bilindiği üzere eğilmede çekme dayanımı, beton gibi gevrek bir malzeme için mekanik bir parametre olup malzemenin yük altında deformasyona (sehime) karşı koyabilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Altı farklı karışımda iki farklı karbon esaslı malzeme ile birlikte hazırlanan harç numunelerinin eğilmede çekme dayanımları ile orta açıklık deformasyon kapasiteleri tespit edilmiştir. Deneysel testler sonucu, farklı karbon esaslı malzemeler, farklı mineral katkı ve tiplerinin kullanımında lif-matris arayüz özelliklerinin istenen mertebede olup olmadığı hakkında önemli bulgular elde edilmiştir. Çizelge 4.3-4.4'te 28 günlük numunelerin mekanik test sonuçlarına dair ortalama değerler verilmiş olup, numunelerin tekil olarak gerilme-orta açıklık deformasyon grafikleri Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'dan takip edilebilir.

Çizelge 4.3. Bağlayıcı malzeme ağırlığınca %60 oranında UK içeren karışımların ortalama eğilme testi sonuçları (28 günlük)

|                               | ECC-1.2-L-K | ECC-1.2-L-KF | ECC-1.2-L-KNT | ECC-1.2-H-K | ECC-1.2-H-KF | ECC-1.2-H-KNT |
|-------------------------------|-------------|--------------|---------------|-------------|--------------|---------------|
| Eğilme dayanımı (MPa)         | 10,62       | 7,52         | 8,93          | 11,88       | 9,27         | 9,76          |
| Orta açıklık deformasyon (mm) | 2,00        | 0,72         | 1,16          | 2,94        | 0,91         | 2,53          |

Çizelge 4.4. Bağlayıcı malzeme ağırlığınca %80 oranında UK içeren karışımların ortalama eğilme testi sonuçları (28 günlük)

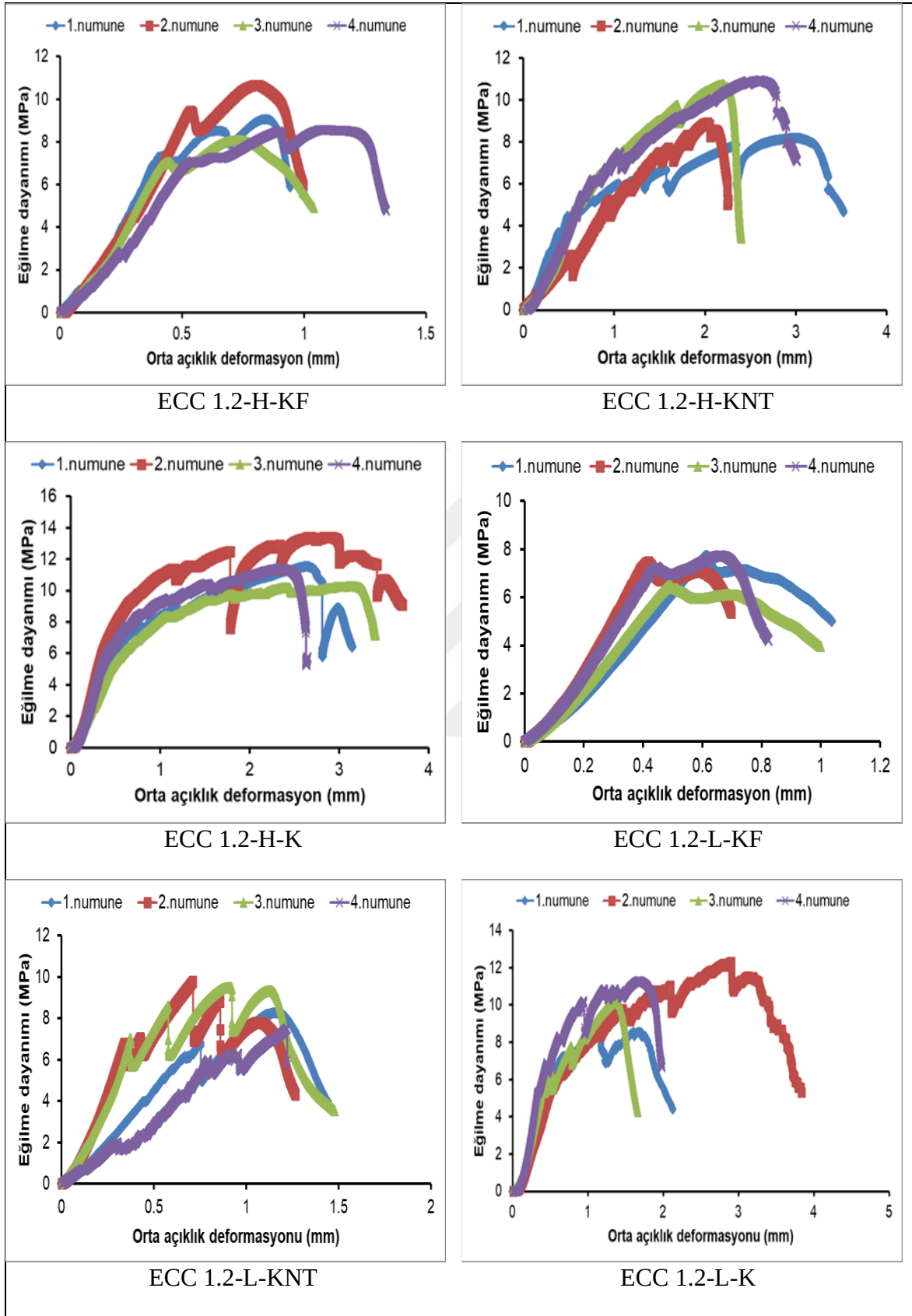
|                               | ECC-2.2-L-K | ECC-2.2-L-KF | ECC-2.2-L-KNT | ECC-2.2-H-K | ECC-2.2-H-KF | ECC-2.2-H-KNT |
|-------------------------------|-------------|--------------|---------------|-------------|--------------|---------------|
| Eğilme dayanımı (MPa)         | 9,84        | 6,37         | 10,05         | 9,62        | 8,81         | 8,89          |
| Orta açıklık deformasyon (mm) | 2,39        | 0,75         | 1,55          | 2,02        | 0,94         | 2,20          |

Çizelge 4.3'e bakıldığında kontrol karışımına ait numunelerin ortalama eğilme dayanımı, düşük kızdırma kaybı içeren UK (UK-L) karışımları için sırasıyla KF ve KNT karışımlarına kıyasla %41,2 ve %18,9 daha fazla olmuştur. Benzer sırayla bu artışlar yüksek kızdırma kaybına sahip (UK-H) karışımlarda %28,2 ve %21,7 olarak meydana gelmiştir. Toplam bağlayıcı malzeme oranınca %60 UK (ECC-1.2) ve karbon esaslı malzemeler içeren numunelerin kontrol numunelerine göre meydana gelen ortalama eğilme dayanımlarındaki düşüşler karbon esaslı malzemelerin tam olarak homojen dağıtılamaması ile ilişkilendirilebilir. Benzer değişim aynı karışımların orta açıklık deformasyon kapasiteleri içinde söylenebilir. Örneğin Çizelge 4.3'e bakıldığında kontrol karışımına ait numunelerin ortalama orta açıklık deformasyonu, düşük kızdırma kaybı içeren UK (UK-L) karışımları için sırasıyla KF ve KNT karışımlarına kıyasla %178 ve %72,4 daha fazla olmuştur. Aynı sırayla bu artışlar yüksek kızdırma kaybına sahip (UK-H) karışımlarda %223 ve %16,2 olarak meydana gelmiştir. Görüleceği gibi özellikle KF içeren karışımlar için, yüksek kızdırma kaybı içeren karışımlarda dayanım ve orta açıklık deformasyon kapasitesindeki azalışlar daha belirgin olmuştur. Karbon esaslı herhangi bir iletken malzeme bulundurmayan kontrol numunelerine KNT ve KF eklenmesiyle her ne kadar eğilme parametreleri sonuçlarında belirli artışlar beklense de numunelerin 0,27 S/BM oranında üretildiği düşünüldüğünde belirgin artışların olabilmesi için optimum bir S/BM oranı seçilmesi gerektiği işaret edilmektedir. Düşük S/BM oranı ile numunelerin mikroyapıları çok yoğun bir hal almaktadır. Bu durum özellikle KNT içeren karışımlara kıyasla KF içeren numunelerde yeni üretilen hidrasyon ürünleri için yeterli alan sağlayamamış olabilir. Meydana gelen hidrasyon ürünlerindeki daha düzensiz gelişim, mikro ölçekte ve inert bir malzeme olan KF malzemelerinin etrafında daha kusurlu bölgeler meydana getirmiş olabilir. Ayrıca daha önce değinildiği gibi, karbon esaslı malzemelerin topaklanma eğiliminde olmaları (özellikle KNT) bu topakların mikroyapısal düzeyde boşluk görevi görerek dayanım sonuçlarına herhangi bir katkı yapmadan öte daha da kötüleştirmeleriyle ilişkili

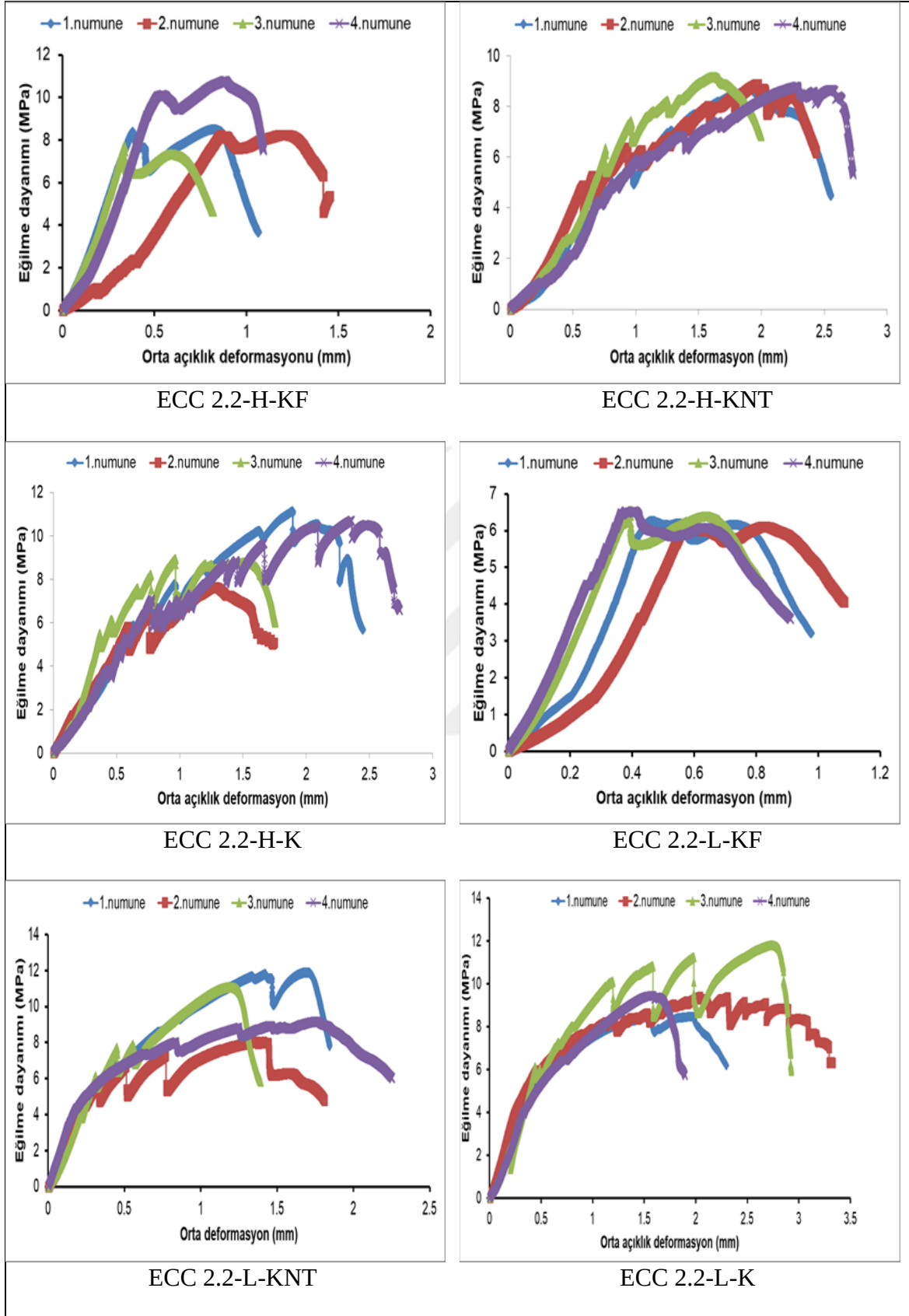
olarak elde edilen sonuçlara yansımış olabilir. Böyle bir durumda temel mekanik özelliklerin KNT ve KF'nin bireysel özelliklerinden çok karışımın diğer parametreleri ile belirlenmiş olduğu düşünülebilir.

Çizelge 4.4'e bakıldığında ise bağlayıcı malzeme ağırlığınca %80 oranında (2,2) uçucu kül içeren karışımlarda, %60 oranında (1,2) uçucu kül içeren karışımlara kıyasla sonuçların farklılık içerdiği görülecektir. Örneğin, düşük kızdırma kaybına sahip UK (UK-L) ve KF lif içeren karışıma ait numunelerin ortalama eğilme dayanımı, kontrol karışımına ait numunelere göre ortalama olarak %35,3 düşüş gösterirken, aynı tür karışımlarda KNT içeren numunelerin ortalama eğilme dayanımı kontrol numunelerine göre %2,1 artış göstermiştir. Aynı numunelerin (KF ve KNT içerikli) ortalama orta açıklık deformasyon kapasitelerine bakıldığında kontrol numunelerine göre aynı karışımlar için sırasıyla %68,6 ve %35,1 düşüşler gözlemlenmiştir. Aynı çizelgede (Çizelge 4.4), yüksek oranda kızdırma kaybı içeren (UK-H) numunelere bakıldığında ise ortalama eğilme dayanımı kontrol karışımına ait numunelere göre KF ve KNT karışımlarında sırasıyla %8,4 ve %7,6 ile sınırlı bir düşüş göstermiştir. Ancak aynı numunelerin ortalama orta açıklık deformasyon kapasitelerine bakıldığında kontrol karışımlarına göre KF içeren karışımların ortalama değeri %53,5 daha az olurken, KNT içeren numuneler ortalama %8,9 daha yüksek orta açıklık deformasyon kapasitesi göstermiştir. Çizelge 4.4'de KNT içeren numunelerden elde edilen görece daha iyi sonuçlar, KNT'lerin yüksek hacimlerdeki UK varlığında beklenen olumlu etkisini gösterdiğinden bahsedilebilir. Öyle ki yüksek oranda hidrate olmamış dairesel uçucu kül tanecikleri varlığında daha düşük lif/matris kimyasal bağına ve iki bileşen arasında daha yüksek sürtünme bağı oluşmasına sebep olarak KNT'ler liflerin yükleme sırasında tamamen kopması yerine matristen sıyrılarak çıkma şanslarını arttırmış olabilir. Bu durum özellikle yüksek kızdırma kaybına sahip olan karışımlarda daha yüksek inert malzeme ve gelişen tane boyut dağılımı etkisinde daha olumlu sonuçlanmış olabilir.

Ayrıca Şekil 4.5'teki eğilme dayanımı-orta açıklık deformasyon grafiğine bakıldığında eğimlerde farklılık görülmüştür (özellikle ECC-1.2 L-KNT). Bu durum numune hazırlanırken KNT gibi topaklanma riski fazla, homojen karışımı zor olan karbon esaslı malzemenin eğilme testinde varyasyona sebep olacağı ile ilişkilendirilmiştir.



Şekil 4.5. Bağlayıcı malzeme ağırlığınca %60 oranında UK içeren 28 günlük kiriş numunelerin eğilme testi sonuçları



Şekil 4.6. Bağlayıcı malzeme ağırlığınca %80 oranında UK içeren 28 günlük kiriş numunelerin eğilme testi sonuçları

Deneysel testler sonucu, farklı karbon esaslı malzemeler, farklı mineral katkı ve tiplerinin kullanımında ileriki yaşlarda (180 gün) lif-matris arayüz özelliklerinin istenen mertebede olup olmadığı hakkında da araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla üretilen numunelerin ortalama eğilme parametreleri Çizelge 4.5-4.6’da verilmiş olup, numunelerin tekil olarak gerilme-orta açıklık deformasyon grafikleri Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’den takip edilebilir.

Çizelge 4.5. Bağlayıcı malzeme ağırlığınca %60 oranında UK içeren karışımların ortalama eğilme testi sonuçları (180 günlük)

|                               | ECC-1.2-L-K | ECC-1.2-L-KF | ECC-1.2-L-KNT | ECC-1.2-H-K | ECC-1.2-H-KF | ECC-1.2-H-KNT |
|-------------------------------|-------------|--------------|---------------|-------------|--------------|---------------|
| Eğilme dayanım (MPa)          | 11,76       | 8,99         | 10,01         | 13,11       | 10,06        | 8,26          |
| Orta açıklık deformasyon (mm) | 1,52        | 0,84         | 1,44          | 2,08        | 0,66         | 1,93          |

Çizelge 4.6. Bağlayıcı malzeme ağırlığınca %80 oranında UK içeren karışımların ortalama eğilme testi sonuçları (180 günlük)

|                               | ECC-2.2-L-K | ECC-2.2-L-KF | ECC-2.2-L-KNT | ECC-2.2-H-K | ECC-2.2-H-KF | ECC-2.2-H-KNT |
|-------------------------------|-------------|--------------|---------------|-------------|--------------|---------------|
| Eğilme dayanım (MPa)          | 11,84       | 6,92         | 10,70         | 12,13       | 9,42         | 9,84          |
| Orta açıklık deformasyon (mm) | 2,71        | 0,71         | 1,90          | 2,10        | 0,84         | 1,87          |

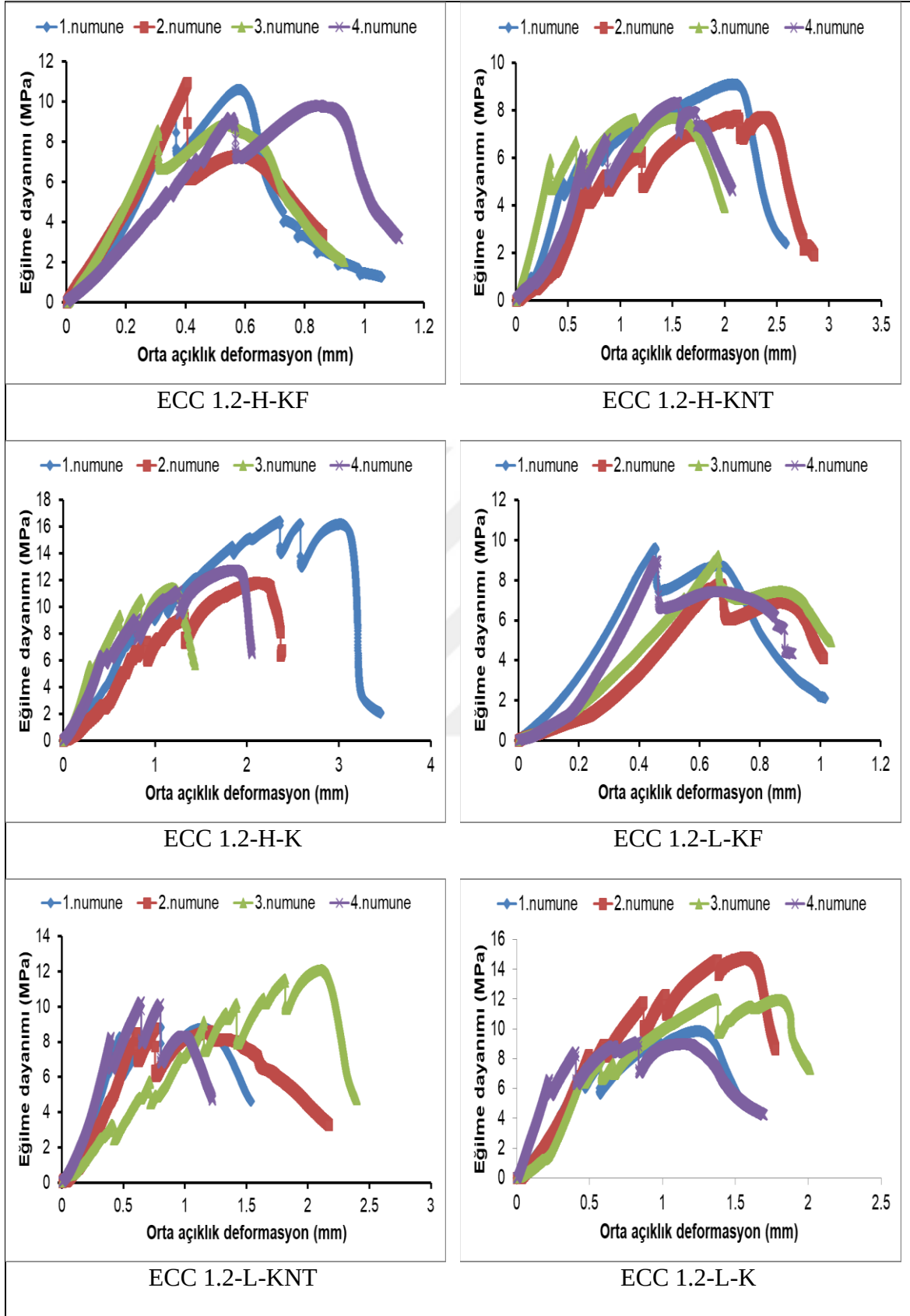
Çizelge 4.5’e bakıldığında kontrol karışımına ait numunelerin ortalama eğilme dayanımı, düşük kızdırma kaybı içeren UK (UK-L) karışımları için sırasıyla KF ve KNT karışımlarına kıyasla %30,8 ve %17,5 daha fazla olmuştur. Benzer sırayla bu artışlar yüksek kızdırma kaybına sahip karışımlarda (UK-H) %30,3 ve %58,7 olarak meydana gelmiştir. Toplam bağlayıcı malzeme oranınca %60 UK (ECC-1.2) ve karbon esaslı malzemeler içeren 180 günlük numunelerin kontrol numunelerine göre meydana gelen ortalama eğilme dayanımlarındaki düşüşler karışımlarda kullanılan karbon esaslı malzemelerin homojen karışım problemleri ile ilgili olabilir. Benzer değişimin aynı karışımların orta açıklık deformasyon kapasiteleri için de meydana geldiği söylenebilir. Bu durum özellikle KF içeren karışımlarda çok daha etkili olmuştur. Örneğin, Çizelge 4.5’e bakıldığında kontrol karışımına ait numunelerin ortalama orta açıklık deformasyonu, düşük kızdırma kaybı içeren UK-L karışımları için sırasıyla KF ve KNT karışımlarına kıyasla %81 ve %5,5 oranında

daha yüksek seviyelere ulaşmıştır. Aynı sırayla bu artışlar yüksek kızdırma kaybına sahip karışımlarda %215 ve %7,8 olarak meydana gelmiştir. Görüleceği gibi özellikle KF lif içerikli yüksek kızdırma kaybına sahip (UK-H içeren) karışımlarda dayanım ve orta açıklık deformasyon kapasitesindeki azalışlar tıpkı 28 günlük numunelerde olduğu gibi daha belirgin olmuştur. Karbon esaslı herhangi bir iletken malzeme bulundurmeyen kontrol numunelerine KNT ve KF eklenmesiyle her ne kadar eğilme parametreleri sonuçlarında belirli artışlar beklense de, karışım yönteminden ziyade karbon esaslı malzemelerin homojen dağılmasında ikinci önemli parametre olan su çimento oranı üzerinden sonuçlar yorumlanabilir. Düşük S/BM oranında üretilen karışımların (0,27) çok yoğun mikro yapıları özellikle KNT içeren karışımlara kıyasla KF içeren numunelerde yeni üretilen hidrasyon ürünlerinin yetersiz olmasına neden olabilir. Meydana gelen hidrasyon ürünlerindeki görece daha düzensiz gelişim KF içeren karışımlarda hem daha düşük eğilme dayanımı hem de daha az deformasyon kapasitesine neden olduğu düşünülmektedir. Her ikisi de inert malzeme olan KF ve KNT içeren karışımlarda özellikle mikro ölçekte kullanılan KF numunelerinin bu gelişimden daha kötü etkilenmiş olabileceği düşünülmektedir.

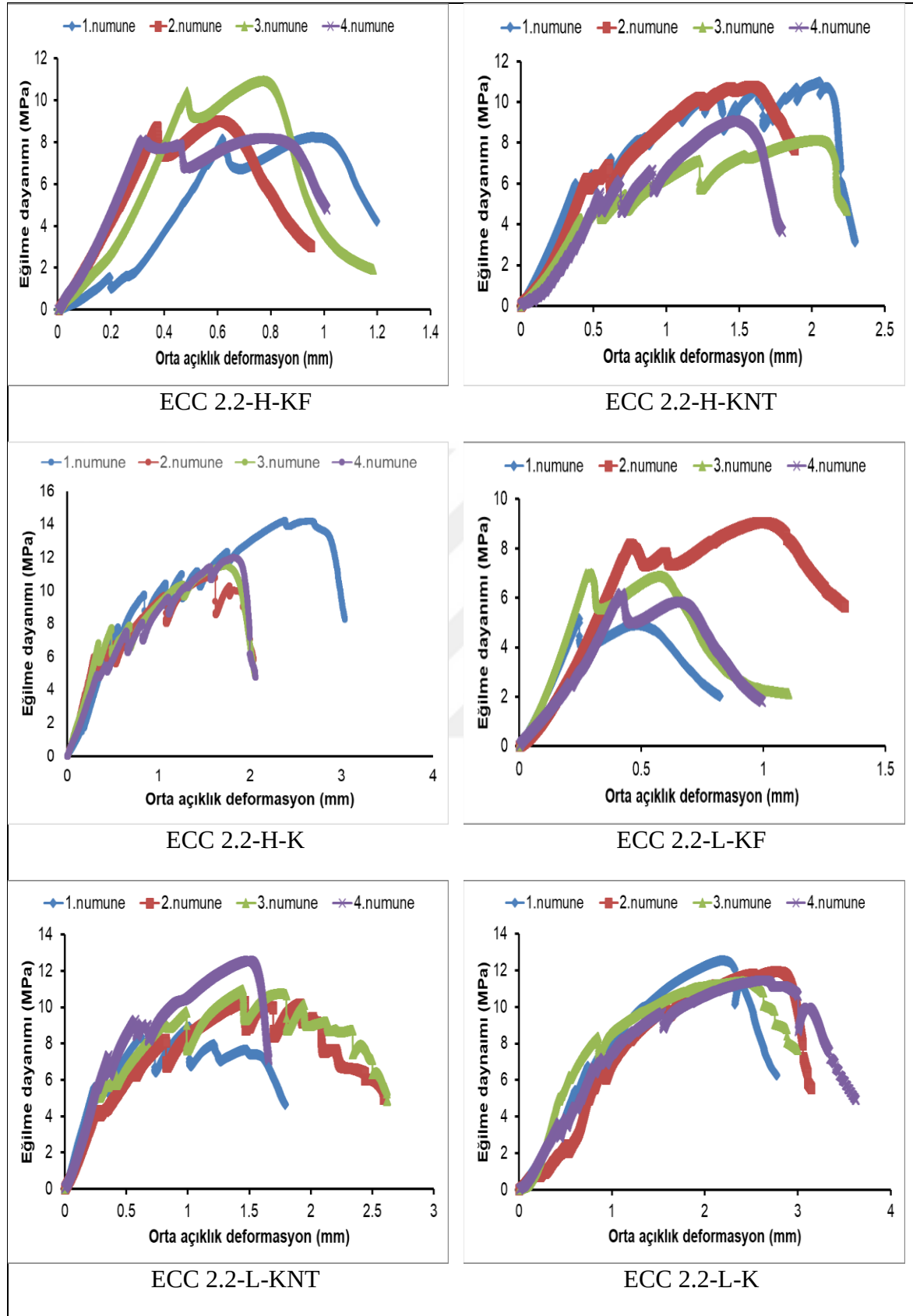
Çizelge 4.6'da daha yüksek oranda (2,2) uçucu kül içeren karışımlara bakıldığında, ortalama eğilme dayanımı düşük kızdırma kaybı içeren (UK-L) kontrol karışımına ait numunelere göre, KF ve KNT karışımları sırasıyla %41,6 ve %9,6 düşüş göstermiştir. Ancak aynı numunelerin ortalama orta açıklık deformasyon kapasitelerine bakıldığında; kontrol karışımlarının ortalama değeri KF içeren karışımlardan %281,7 daha fazla, KNT içeren numunelerden ise ortalama %42,6 daha fazla orta açıklık deformasyon kapasitesi göstermiştir. Bunun yanında, yüksek oranda kızdırma kaybına sahip uçucu kül (UK-H) içerikli karışımlara bakıldığında benzer düşüşler tekrar görülmüştür. Örneğin Çizelge 4.6'da yüksek kızdırma kaybı içeren kontrol karışımına ait numunelerde ortalama eğilme dayanımı KF ve KNT karışımlarından sırasıyla %28,8 ve %23,3 daha yüksektir. Kontrol numunelerinde, aynı sırayla ortalama orta açıklık deformasyon kapasitesinde %150 ve %12,3'lük daha yüksek sonuçlar kaydedilmiştir. Bu kısımda da önceki kısımlarda olduğu gibi özellikle KF takviyesinin geliştirilen çok fonksiyonlu kompozit malzemelerin temel mekanik özelliklerini kötüleştirdiğinden söz edilebilir.

Bu bölümde verilen sonuçlar içerisinde dikkat çekilmesi gereken bir başka nokta ise, özellikle 28 günlük numunelerde gözlemlenen yüksek kızdırma kaybı içeren (UK-H) numunelerin düşük kızdırma kaybına (UK-L) sahip numunelere kıyasla, karışım tipinden

bağımsız olmak üzere gösterdiği daha yüksek ortalama eğilme dayanımı ve orta açıklık deformasyon kapasitesidir. Bilindiği üzere kızdırma kaybı genellikle malzemenin içerisindeki geri kalan karbon maddesinin indikatörü olarak kullanılmaktadır. Tam olarak değerlendirildiğinde kızdırma kaybı esasen karbonun yanında karbonat ve kil minerallerinde yer alan bağlı suyu da barındırmaktadır (Atış, 2001). Ancak yine de, yanmış karbon içeriği meydana gelen kızdırma kaybında en büyük katkıya sahiptir (Atış, 2001). Her ne kadar izin verilebilir kızdırma kaybı oranı bazı yerel pratiklere bırakılmış olsa da, pek çok ülke kızdırma kaybı oranını daha çok %3'ten 6'ya değişen oranlardaki en üst limitlerle sınırlamaktadır (TÇMB, 2009). Çimento esaslı malzemelerde kullanılan uçucu külde dikkat edilen en önemli iki özellik uçucu külün inceliği ve kızdırma kaybı oranıdır (TÇMB, 2009). Bu iki parametre birbiri ile genelde yakından ilişkilidir. Çünkü uçucu kül içinde yer alan karbon parçacıkları daha iridir. Uçucu kül içerisinde kalmış olan karbon daha fazla suyu ve kimyasal katkıyı emerek kullanılan suyun ve kimyasal katkının etkisini azaltır (Ngo ve diğerleri, 2018). Ayrıca bazı durumlarda daha düşük inceliğe sahip karbon taneciklerinin uçucu külün pozolanik reaksiyonunun etkisini azalttığından bahsedilmektedir. Sonuç olarak betonun dayanımındaki gelişimine yüksek oranda kızdırma kaybı içeren uçucu küllerin kötü yönde etki ettiği bilinmektedir. Ancak bunun yanında karbon taneciklerinin hava boşluğu azaltıcı katkı olarak da yer aldığı ve bu durumun %12 oranında çok yüksek oranda uçucu kül içeren karışımlarda bile olumlu sonuçlandığından söz edilmektedir (Ngo ve diğerleri, 2018). Bu kapsamda literatürde yer alan bazı çalışmalar yüksek orandaki kızdırma kaybının betonun dayanım gelişimine etkisi ile ilgili olarak bazı standartların limitlerinden daha farklı sonuçlar elde edildiğini doğrulamaktadır (Ngo ve diğerleri, 2018). Tez kapsamında yapılan çalışmaların bu bölümü değerlendirildiğinde, özellikle 28 günlük yaşlarda daha belirgin olmak üzere, numunelerin daha yüksek kızdırma kaybında daha iyi eğilme parametreleri gösterdiğinden söz edilebilir. Sonuçlar, her ne kadar kızdırma kaybı içindeki karbon tanecikleri pozolanik reaksiyonu azaltmış olarak değerlendirilebilirse de, hidrate olmayan taneciklerin yarattığı ortamda daha yüksek lif-matris fiziksel bağ dayanımına bağlı olarak numunelerin deformasyon kapasitesini iyileştirmiş olabilir. Ayrıca UK-H ile UK-L'nin sırasıyla 269 m<sup>2</sup>/kg ve 306 m<sup>2</sup>/kg ile benzer yüzey alanlarına sahip olması bu sonucun daha belirgin olabileceğini doğrular niteliktedir.



Şekil 4.7. Bağlayıcı malzeme ağırlığınca %60 oranında UK içeren 180 günlük kiriş numunelerin eğilme testi sonuçları



Şekil 4.8. Bağlayıcı malzeme ağırlığınca %80 oranında UK içeren 180 günlük kiriş numunelerin eğilme testi sonuçları

### 4.3. Karbon Esaslı Malzemelerle Takviye Edilmiş ECC'lerin Kendiliğinden İyileşme Performansı

Karbon esaslı malzemelerle takviye edilmiş ECC numunelerinin temel mekanik özelliklerinin belirlenmesinin yanında bu bölümde kendiliğinden iyileşme performansına dair araştırma sonuçları gösterilmiştir. Daha önce bahsedildiği üzere kendiliğinden iyileşme testleri sırasında deneysel metotların gerektirdiği kiriş ( $360 \times 50 \times 75$  mm) ve silindir ( $\varnothing 100 \times 200$  mm) numuneler üretilmiştir. Tez amacına yönelik olarak numunelerin kendiliğinden iyileşme derecesi çatlaklı (ön yüklenmiş) numuneler üzerinden incelenmiştir. Bu şekilde bir yöntemin tercih edilmesinin nedeni laboratuvar çalışmalarında sağlam olan numunelerle yürütülen deneylerin gerçek uygulamalara kıyasla daha az benzerlik içermesidir. Çünkü gerçek uygulamalarda çimento esaslı malzemelerin çatlaksız durumu gerçekçi değildir. Bu nedenle tez kapsamında üretilen numunelerin kendiliğinden iyileşme performansları hasara uğramış numuneler üzerinden test edilmiş ve çatlaklı numunelerin geçirimsizlik ve mekanik özellikleri sağlam numune performansları ile kıyaslanarak incelenmiştir. Hasara uğratılan ECC numuneleri ile ilgili deneysel parametreler önceki bölümlerde detaylı olarak verilmiş olup bu noktada tekrar yer almasına gerek görülmemiştir. Çatlak büyüklüğünün belirli bir açıklığın altında olması durumunda çimento bağlayıcı kompozitlerin kendiliğinden iyileşme imkânı bulunmaktadır. Kendiliğinden iyileşme mekanizması ile çimento esaslı malzemeler, mevcut çatlaklarını hidrate olmamış bağlayıcıların hidrate olması, kalsit oluşumu ( $\text{CaCO}_3$ ), çatlak kenarlarında genleşme gibi farklı iyileşme yöntemleri ile kapatabilmektedir. Bu amaçla çatlaklardaki iyileşme ürünlerinin etkinliğinin özellikle hidratasyon gelişiminden bağımsız olarak görülmesi için numunelerin ileri yaşlardaki (28.günden sonra) kendiliğinden iyileşme performansının ölçülmesi bu tezin amaçlarından birisidir. Geleneksel betonun daha geniş çatlak açıklıklarında kendiliğinden iyileşmesini tetiklemek çok mümkün değil iken tez çalışmaları ile yüksek hasar toleranslı ve dar açıklıkta çoklu çatlak oluşturan, karbon esaslı malzeme takviyeli kompozitlerin kendiliğinden iyileşme ürünleri ile çatlak kapatma ve kaliteleri ile ilgili olarak araştırmalar yürütülmüştür. Tez çalışmasının bu bölümünde söz konusu deneysel araştırmalar betonun servis ömrünün tahmin edilmesinde en önemli üç parametre olan mekanik özellikler, geçirimsizlik (HKİG) ve elektriksel özellikler (ED) üzerinden ele alınmıştır.

#### 4.3.1. Elektriksel direnç yöntemiyle kendiliğinden iyileşmenin belirlenmesi

Kendiliğinden iyileşme ile ilgili özellikleri hassas, güvenilir ve pratik olarak uygulanabilir şekilde tespit etmek, geliştirilen karışımların farklı etkiler altındaki kendiliğinden iyileşme performanslarını belirlemek için oldukça önemlidir. Daha önceki bölümlerde bahsedildiği üzere tez kapsamında geliştirilen karışımların kendiliğinden iyileşme performansının belirlenmesinde kullanılan tekniklerden birisi de elektriksel direnç yöntemidir. Elektriksel direnç (ED) testi detayları daha önceki kısımlarda verilen parametrelere bağlı olarak, numunelerin 28+0 (başlangıç) ve 28+15, 28+30, 28+45, 28+60, 28+75, 28+90 günlük ve 180+0 (başlangıç) ve 180+15, 180+30, 180+45, 180+60, 180+75, 180+90 günlük yaşlarında test edilmiştir. Her karışımdan iki numune karşılaştırma yapmak amacıyla sağlam olarak test edilirken üç numuneye ise ön yükleme ile çatlak oluşturulduktan sonra kendiliğinden iyileşme performansları ED deneyleri ile araştırılmıştır. Araştırmalar sırasında her bir numunenin elektriksel özellikleri incelenmiş ve geliştirilen ECC karışımlarının çatlak kapanma performansı ile birlikte değerlendirilmiştir. Daha önceki kısımlarda verilen sonuçlar ve tartışmalar değerlendirildiğinde, karbon esaslı malzemelerle takviye edilmiş kompozitlerin matriste daha iyi tane dağılım özelliği sergilemesi ve yoğun mikro yapı oluşturması beklenmektedir. Bu noktada, %75 oranında (maksimum gerilmenin %75'i) ön yükleme ile elde edilmiş çatlakların dağılımı ve kapanma dereceleri oldukça önemlidir. Söz konusu çatlakların kapanma performansları daha çok numunelerin porozitesi, boşluk suyu ve boşluk dağılımları ile ilişkilidir. Böylece ED testi ile numunelerin kendiliğinden iyileşme etkinliği ile ilgili güvenilir bir fikir vermesi beklenmektedir. EK-1'de ham verilerin sunulduğu çizelgelerde sağlam ve çatlaklı (ön yüklenmiş) farklı ECC karışımlarına ait numunelerin farklı yaşlardaki elektriksel empedans test sonuçları ( $k\Omega$ ) verilmiştir. Sonuçlar, elektriksel direnç (R) ile incelenmek istenirse ECC numunelerine uygulanan alternatif akım (AC) neticesinde elde edilen empedans değerlerinin elektriksel direnç değerlerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Geometrik özellikleri özdeş olan numunelerin faz açısının dikkate alınması karşılaştırma yapmak açısından yeterli olacaktır. Ayrıca deneyler sırasında numunelerin empedans değerleri alınırken faz açısının en fazla  $15^\circ$  olarak belirlenmesi daha önce verilen elektriksel direnç dönüşüm formülünü kullanmayı gerektirmemiştir. Bu noktada  $15^\circ$ 'nin (cos) değerinin 0,966 olduğu belirtilmekle birlikte eşitlikteki empedans değeri doğrudan elektriksel direnç olarak kullanılabilir.

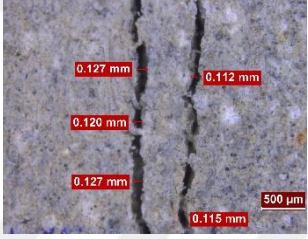
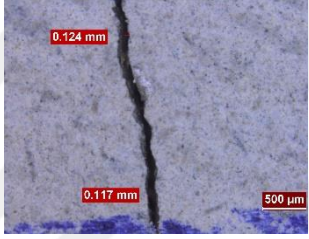
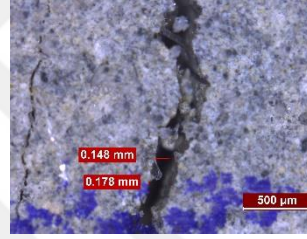
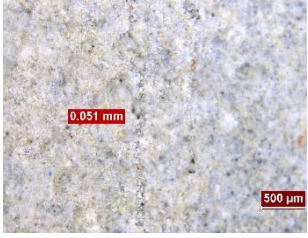
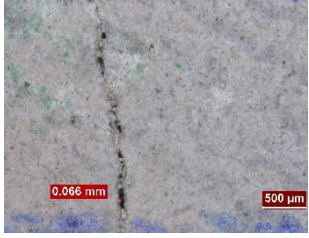
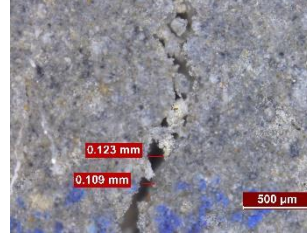
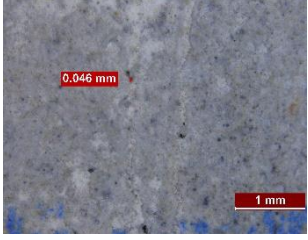
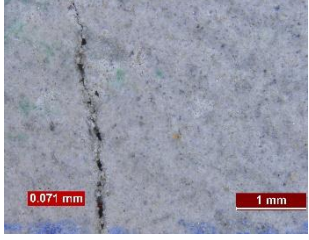
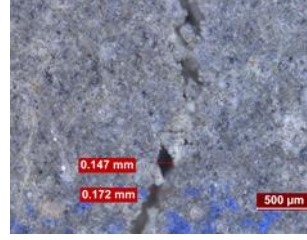
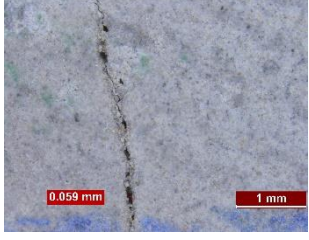
EK-1'deki ham veri ile gösterilen elektriksel direnç sonuçlarına ek olarak, sonuçların daha kolay anlaşılabilmesi ve karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla Resim 4.1'de 28 günlük numunelerin çatlak iyileşme performansları gösterilmiştir. Resimler polarize mikroskop yardımıyla belli oranda odak yapılarak kaydedilmiş olup, ölçeklerdeki değişiklik resimlerin yerleştirilmesi sırasında boyutundaki değişikliklerden kaynaklanmıştır. EK-1'deki çizelgelerden açıkça görüleceği üzere, karışım tipine bakılmaksızın, ED ölçümleri zamanla sürekli bir artış göstermiştir. Betonun elektriksel özellikleri genellikle porozite, boşluk çözeltisi ve boşluklu yapının kıvrımlılığı gibi mikro yapıya ait parametrelerle ilişkilendirilmektedir (Spragg ve diğerleri, 2013). Bu sebeple, söz konusu parametreleri etkileyen herhangi bir değişkenin aynı zamanda beton malzemesinin elektriksel direncini de değiştireceğinden söz edilebilir. Bu bağlamda, zaman içerisinde sürekli artış eğilimi gösteren elektriksel empedans ölçümleri, çimento bağlayıcı kompozitlerin zamanla mikro yapılarında meydana gelen değişimlerle açıklanabilir.

Deney sonuçlarındaki elektriksel empedans değerlerindeki artışın ana nedeni, numunelerde zaman içerisinde değişen boşluk çözeltisinin durumudur. Boşluk çözeltisindeki bu değişimi de iletkenliği yüksek  $Ca^{+2}$  ve  $OH^-$  iyonlarının azalması sonucunda pH değerinin azalması ile açıklamak mümkündür. Bunun sonucunda elektriksel dirençte artış olmaktadır. İletken iyonların taşındığı boşluk çözeltisinin zamanla azalması ve matris karışımlarının yoğunlaşması düşük dirence sahip boşluk yollarının sayısındaki azalışa neden olmuştur. Bu durum ilerleyen yaşlarda elektriksel empedans değerlerinin artmasına neden olmuştur. EK-1'deki çizelgelere bakıldığında, genel olarak farklı kür yaşlarının tamamında sağlam ECC-KNT karışımlarına ait numunelerin elektriksel empedans değerlerinin diğer karışımlara kıyasla daha düşük olduğu, çatlaklı numunelerde ise ECC-KF karışımları ile mukayese edilebilir durumda olduğu, hatta genel olarak ilk yüklemekten sonra özellikle kür süreleri arttıkça ECC-KF karışımlarının elektriksel empedans değerlerinin daha düşük olduğu görülmüştür. KF içeren karışımlara ait sağlam ve çatlaklı numunelerin hepsinin elektriksel empedans değerleri kontrol numunelerine kıyasla düşüktür. KNT ile modifiye edilen numunelerin (sağlam) daha düşük elektriksel empedans değerleri, KNT'lerin yüksek yüzey alanları ve elektriksel iletkenlikleri ( $10^2$ - $10^3$  siemens/cm) dikkate alındığında KF içerikli numunelerle kıyaslandığında (sağlam) beklenmeyen bir durum değildir. Ön yüklemekten sonra, KNT ile modifiye edilen çatlaklı numunelerin, KF ile modifiye edilenlere göre yüksek elektriksel empedans değerlerine sahip olması çatlak genişliği ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Çatlak genişliği ne kadar fazla ise elektrik iletimi düşük olacağından

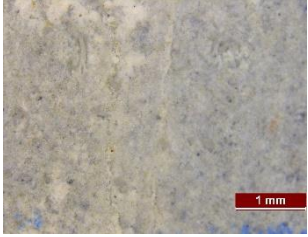
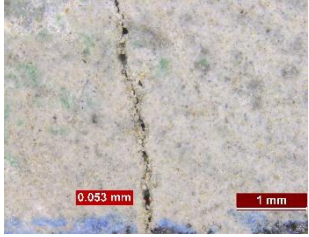
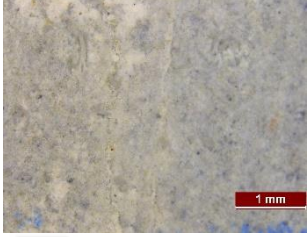
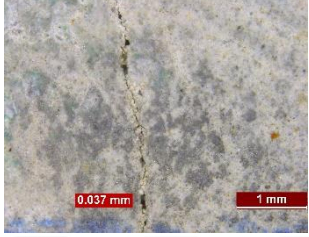
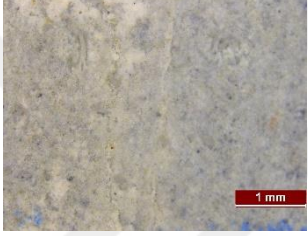
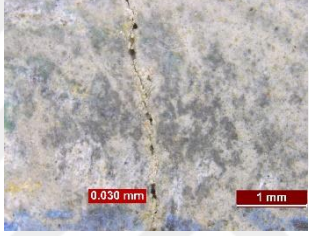
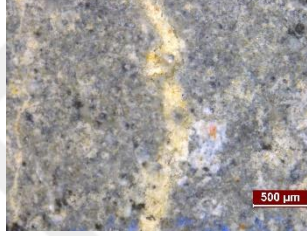
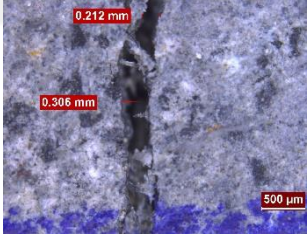
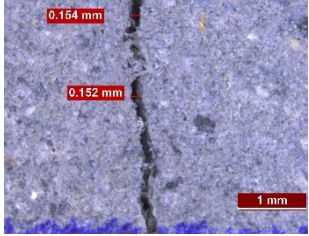
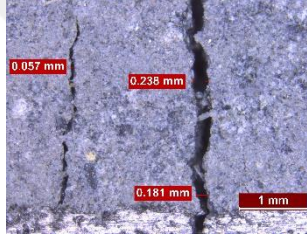
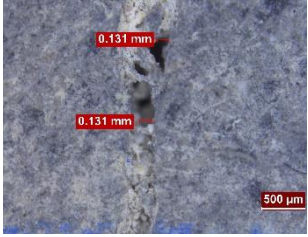
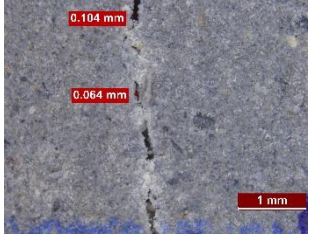
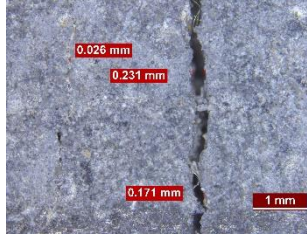
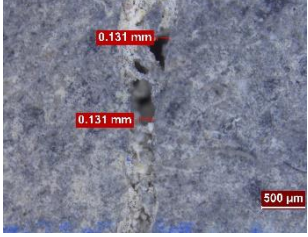
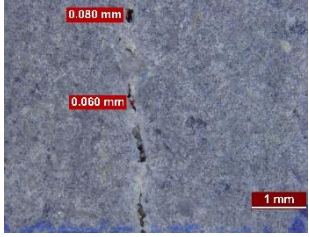
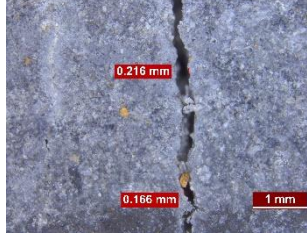
yüksek elektriksel empedans değerleri oluşacaktır. Bununla birlikte, elde edilen sonuçlara bakıldığında KNT içeren numunelerin KF ve kontrol karışımlarına kıyasla bütün kür yaşlarında ve farklı uçucu kül oranlarında ön yüklemenin ardından daha fazla elektriksel empedans değişimi gösterdiği görülmektedir. Literatür çalışmalarına bakıldığında, hidratasyon ürünlerinin daha çok KNT partikülleri üzerinde çekirdeklenme etkisiyle çimento hidratasyonunu hızlandırdığı anlaşılmaktadır (Makar ve Chan, 2009). Bu durumda KNT içeren ECC numunelerinden daha fazla elektriksel empedans değişimi elde edilmesinin nedeni bu mekanizma ile açıklanmaktadır. Bu aşamada, sağlam KNT içeren numunelerden elde edilen daha düşük elektriksel empedans sonuçları KNT'lerin matris içerisinde homojen dağıldığını da göstermektedir. Giriş bölümünde detaylı olarak bahsedildiği üzere nano malzemelerin üstün fiziksel özelliklerinden yararlanmanın birinci şartı bu tür malzemeleri homojen şekilde dağıtabilmektir. Bir diğer karbon esaslı malzeme olan KF ile hazırlanmış ECC karışımlarının elektriksel empedans değerlerine bakıldığında hem çatlaklı hem de sağlam numunelerde kontrol karışımına kıyasla elektriksel empedans artışı daha belirgin şekilde kaydedilmiştir. Yarı iletken bir özelliğe sahip kontrol numuneleri bahsedilen iki karışıma kıyasla çok daha yüksek elektriksel direnç sahip olmuştur. KNT'lerin ve KF'lerin ED değerlerini çok daha hassas hale getirmesi kendiliğinden iyileşme performansının ED testi ile belirlenmesini daha mümkün kılmıştır.

Her ne kadar ön yükleme derecesi aynı olsa da KNT içeren karışımlarda, ön yükleme sonucu gerçekleşen ED değerindeki artış oranı çok daha yüksek kaydedilmiştir. ECC numunelerinde KNT içeren karışımlarda kaydedilen söz konusu yüksek artışın nedeni ön yükleme durumunda numunelerde oluşan nano/mikro kusurların karbon nanotüpler tarafından köprülenme yeteneğinin değişmesidir. Bunun sonucunda, ED deneylerine karşı daha önce bahsedildiği üzere oldukça hassas hale gelen KNT içeren karışımlarda, ED artışı ön yükleme sonucunda en yüksek seviyede kaydedilmiştir. Karbon nano tüplerin üstün fiziksel özellikleri denildiğinde akla yüksek dayanım ve elastik modülü (KNT'lerin elastik modülleri yaklaşık 1,8 TPa'dır) gelmektedir (Meyyappan, 2005). Bunun yanında karışım ile yüksek kenetlenme, yüksek deformasyon kapasitesi ve sünek yapısı, mükemmel elektriksel iletkenlik özellikleri gibi pek çok nitelik de KNT'lerin özellikleri arasındadır. Bu nedenle, görece daha geniş mikro çatlaklardan ziyade, numune bünyesinde meydana gelen deformasyonu daha iyi olarak yakalama yeteneğine sahip KNT'ler, ön yükleme sonucunda daha iyi bir piezo-elektrik (gerilme altında ED değişimi) bir davranış göstermiştir. Başlangıçtaki ED değişimlerinden (28+0 ve 180+0 gün) sonra, ilerleyen zamanlarda ECC

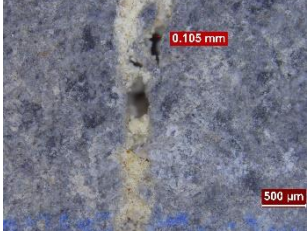
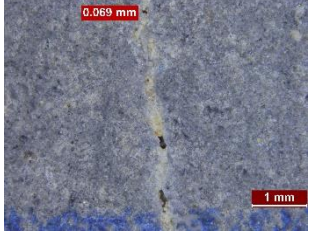
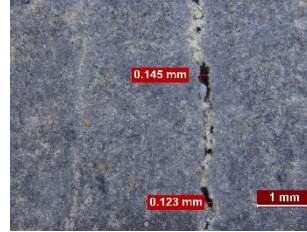
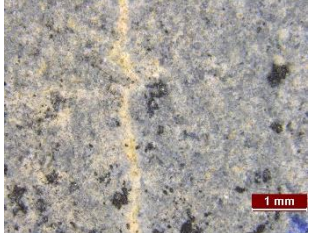
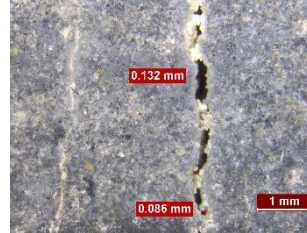
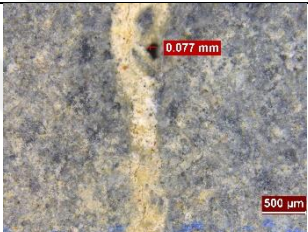
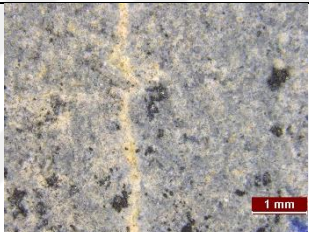
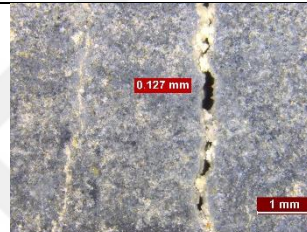
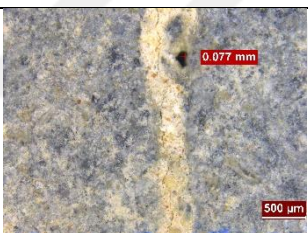
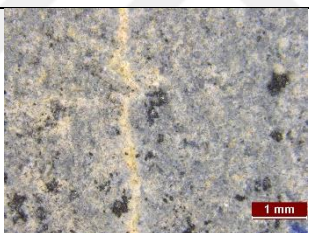
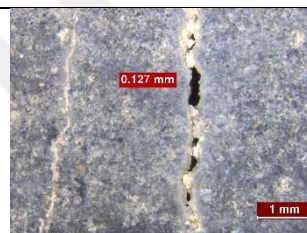
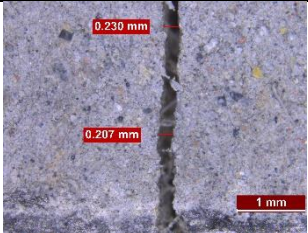
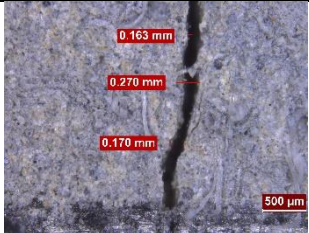
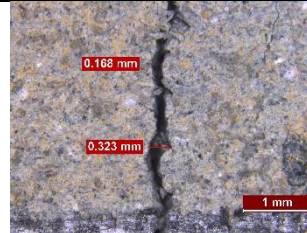
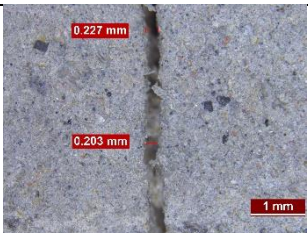
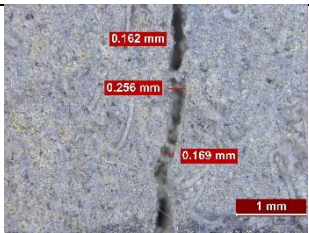
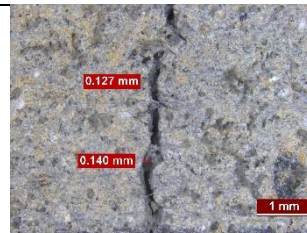
numunelerinin ED değerlerinin artması devam etmiştir. Numunelerin ED değerlerinde kaydedilen artışın nedeni ileri hidrasyon ve puzolanik reaksiyonlarının derecesinin zamanla artmasıdır. Su ile birlikte karıştığında çimento tanecikleri dikkate değer miktarlarda  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  ve  $\text{SO}_4^{2-}$  iyonlarını karışım suyuna aktarmaktadır. Prizin başlaması ile  $\text{Ca}^{2+}$  ve  $\text{SO}_4^{2-}$  iyonları her ne kadar zamanla azalsa da, boşluk suyunda çözünmüş alkali hidroksiller mevcuttur. 25 °C'deki bir sıvı ortamda,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$  iyonik iletkenliklerinin sırasıyla 50,1; 73,5 ve 198  $\text{cm}^2$  eşdeğerinde  $\Omega^{-1}$  olduğu düşünüldüğünde (Adamson, 1973),  $\text{OH}^-$  iyonlarının oldukça yüksek iletkenliğine sahip olduğu görülecektir. Uçucu küllerin varlığında puzolanik reaksiyonlar neticesinde kalsiyum hidroksitin hızlıca tüketilmesi, ileri yaşlarda ED değerlerinin artışındaki bir diğer neden olarak gösterilebilir.

|                                | ECC 1.2L-K                                                                          | ECC 1.2L-KF                                                                          | ECC 1.2-L-KNT                                                                         |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Hasar verildikten sonra (28+0) |   |   |   |
| 28+15                          |  |  |  |
| 28+30                          |  |  |  |
| 28+45                          |  |  |  |

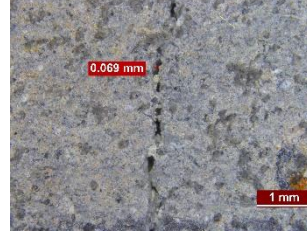
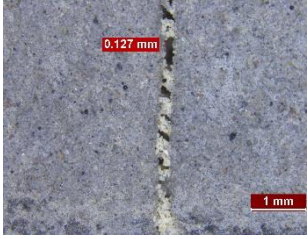
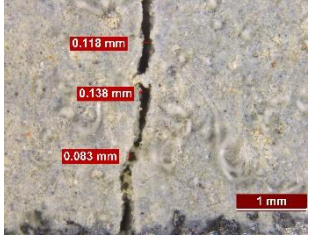
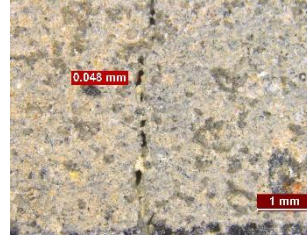
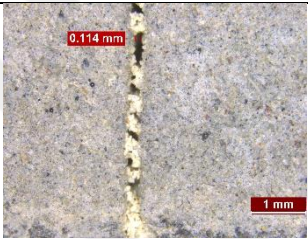
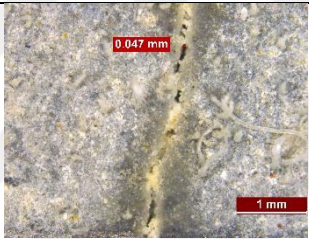
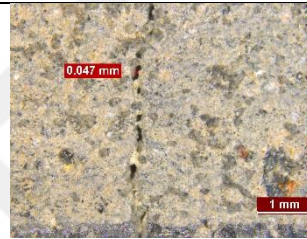
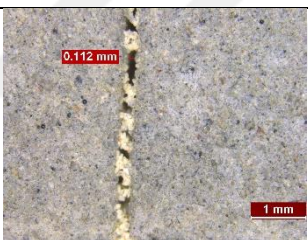
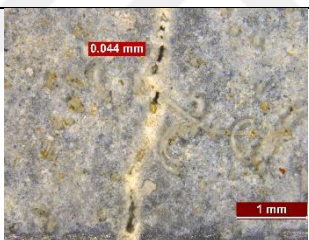
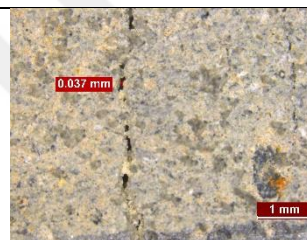
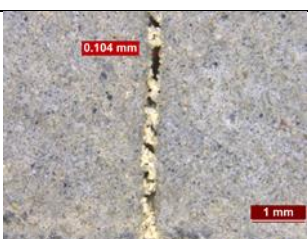
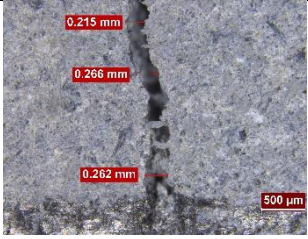
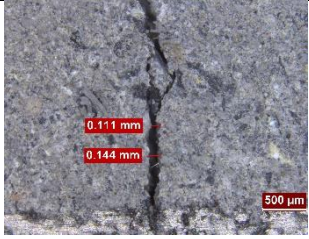
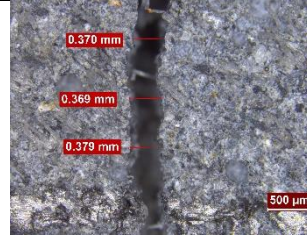
Resim 4.1. 28 günlük çatlaklı, kür edilmiş silindir numunelerin çatlak görüntüleri

|                                | ECC 1.2L-K                                                                          | ECC 1.2L-KF                                                                          | ECC 1.2-L-KNT                                                                         |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 28+60                          |    |    |    |
| 28+75                          |    |    |    |
| 28+90                          |   |   |   |
|                                | ECC 1.2H-K                                                                          | ECC 1.2H-KF                                                                          | ECC 1.2-H-KNT                                                                         |
| Hasar verildikten sonra (28+0) |  |  |  |
| 28+15                          |  |  |  |
| 28+30                          |  |  |  |

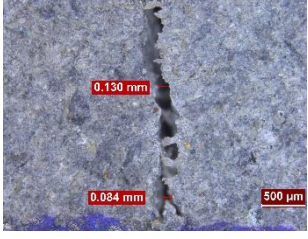
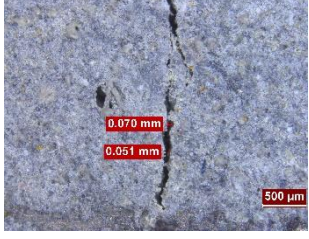
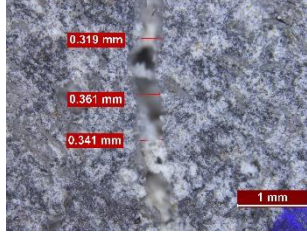
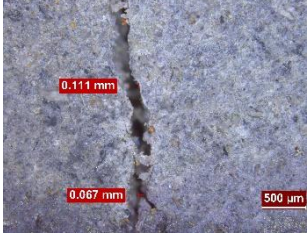
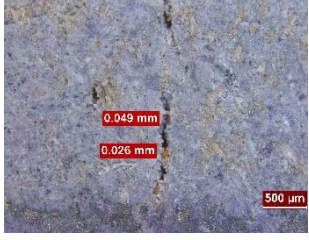
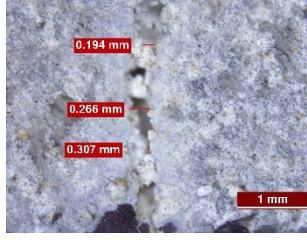
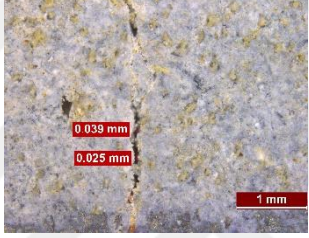
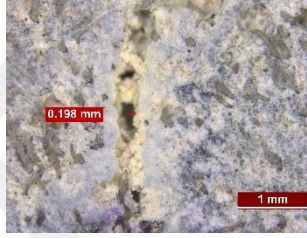
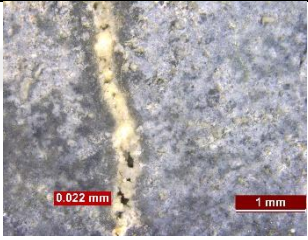
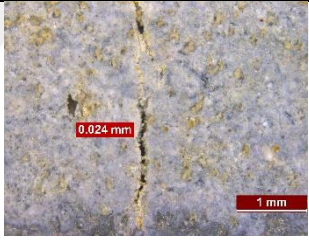
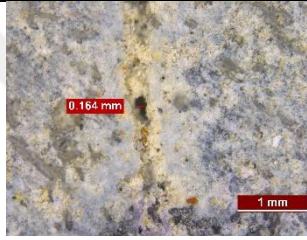
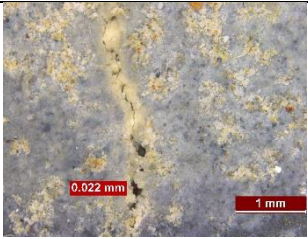
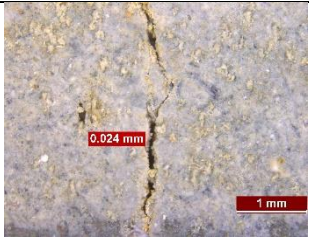
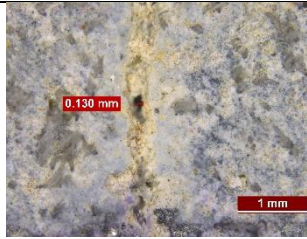
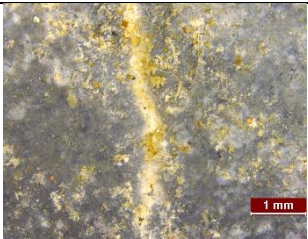
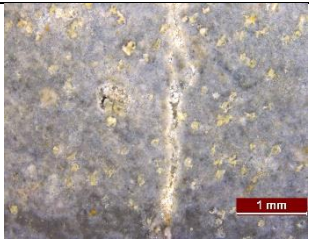
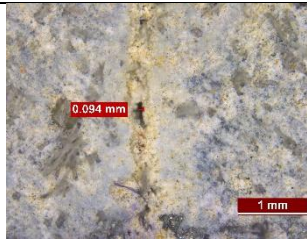
Resim 4.1. (devam) 28 günlük çatlaklı, kür edilmiş silindir numunelerin çatlak görüntüleri

|                                | ECC 1.2H-K                                                                          | ECC 1.2H-KF                                                                          | ECC 1.2-H-KNT                                                                         |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 28+45                          |    |    |    |
| 28+60                          |    |    |    |
| 28+75                          |   |   |   |
| 28+90                          |  |  |  |
|                                | ECC 2.2L-K                                                                          | ECC 2.2L-KF                                                                          | ECC 1.2-L-KNT                                                                         |
| Hasar verildikten sonra (28+0) |  |  |  |
| 28+15                          |  |  |  |

Resim 4.1. (devam) 28 günlük çatlaklı, kür edilmiş silindir numunelerin çatlak görüntüleri

|                                | ECC 2.2L-K                                                                          | ECC 2.2L-KF                                                                          | ECC 1.2-L-KNT                                                                         |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 28+30                          |    |    |    |
| 28+45                          |    |    |    |
| 28+60                          |   |   |   |
| 28+75                          |  |  |  |
| 28+90                          |  |  |  |
|                                | ECC 2.2H-K                                                                          | ECC 2.2H-KF                                                                          | ECC 2.2-H-KNT                                                                         |
| Hasar verildikten sonra (28+0) |  |  |  |

Resim 4.1. (devam) 28 günlük çatlaklı, kür edilmiş silindir numunelerin çatlak görüntüleri

|       | ECC 2.2H-K                                                                          | ECC 2.2H-KF                                                                          | ECC 2.2H-KNT                                                                          |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 28+15 |    |    |    |
| 28+30 |    |    |    |
| 28+45 |   |   |   |
| 28+60 |  |  |  |
| 28+75 |  |  |  |
| 28+90 |  |  |  |

Resim 4.1. (devam) 28 günlük çatlaklı, kür edilmiş silindir numunelerin çatlak görüntüleri

Ham verileri EK-1’de verilmiş 28 ve 180 günlük sağlam ve ön yüklenmiş silindir numunelerin ortalama elektriksel direnç sonuçları Çizelge 4.7 ve 4.8’de verilmiştir. Ön yüklenmiş numuneler için 3’er, sağlam numuneler için 2’şer numunenin ortalaması alınarak her bir karışım için değerler belirlenmiştir.

Önceden de belirtildiği üzere, betonun elektriksel direncindeki değişimler gözeneklilik, gözenek çözeltisi ve gözenek ağının kıvrımlılığı ile ilişkilendirilmektedir. ED sonuçlarındaki mukayese bu kriterlere bağlı olarak yapılmıştır.

Yapılan çalışmada UK/PC oranı 1,2 ve 2,2 olarak belirlenmiş, ayrıca uçucu kül tipi ve karışım malzemelerinin farklılıklarına göre çeşitli karışımlar oluşturulmuştur. Bununla birlikte sürekli su (SS) ve ıslanma-kuruma (IK) yöntemiyle 2 çeşit kür koşulu oluşturulmuştur. Bununla ilgili ayrıntılara önceki bölümlerde yer verilmiştir.

Çizelge 4.7’de görüldüğü üzere 28 günlük numunelerin 15 er günlük olmak üzere 90. güne kadar olan kür sürelerine göre ED sonuçları verilmiştir. Karışım tipi ve kür koşullarından bağımsız olarak sağlam numunelerin tamamının ED değerlerinde artış gözlenmiştir. Söz konusu durum erken yaşlarda kür altındaki numunelerde devam eden hidratasyon ve puzolanik reaksiyonlarla ilişkilendirilebilir. Buna ek olarak betonun matris kısmının yoğunluğunun artarak gözeneklerinin kapanması ve gözenek çözeltisinin azalması sonucu elektriksel iletkenliğin azalmasına bağlı olarak ED değerlerinin artması olarak da yorumlanabilir. Devam eden hidratasyon ve puzolanik reaksiyonlar, karışım içerisinde iletken iyonik parçacıkların (alkaliler) miktarını azaltarak daha az iletken kıvrımlara neden olabilir (Yıldırım ve diğerleri, 2015e). Ancak, ED sonuçları büyük oranda karışım tipine bağlıdır. 28 günlük numuneler için iki kür koşulunda da (SS ve IK), sağlam ECC-Kontrol numunelerinde KF ve KNT içerikli numunelere göre daha yüksek ED değerleri kaydedilmiştir. ECC-Kontrol karışımını genel olarak sırasıyla ECC-KNT, ECC-KF karışımları takip etmiştir. İleri yaşlarda da genel olarak (28+15 den 28+90 günlük kür sürelerine kadar) hemen hemen aynı şekilde davranış sergilenmiştir. ECC-KF numuneleri en düşük ED değerlerine sahip olmayı devam ettirmiş, dolayısıyla elektriksel iletkenlik derecelerinin en yüksek ECC-KF karışımlarına ait olmuştur. Bu sonuç karbon fiber liflerin matris içerisinde süreklilik gösteren iletken bir köprü görevi görmesi ile ilgili olabilir. KNT’nin KF’ye kıyasla daha yüksek ED değerlerine sahip olması da geniş yüzey alanının

olmasından dolayı matris içerisinde homojen dağılımının zor olması ve topaklanma riskinin bulunmasından kaynaklı olduğu düşünülebilir.

Sağlam numunelere benzer şekilde, kür yaşı ilerledikçe çatlaklı (ön yüklenmiş) numunelerin kür koşullarından bağımsız olarak ED değerleri de sürekli artmıştır. Bunun yanında çatlaklı numunelerin ED değerleri, aynı kür süresindeki sağlam numunelere göre daha yüksek gözlemlenmiştir. Bunun nedeni de hasar almış numunedeki elektrik akımının boş çatlaklardan geçememesi ve çatlakların kendilerinin akıma karşı direnç gibi davranması olarak kabul edilmiştir (Şahmaran ve diğerleri, 2017). Kür koşullarına baktığımızda özellikle çatlaklı numunelerde genellikle, sürekli suda kür edilen numunelerin ED değerlerinin ıslanma-kuruma yöntemiyle kür edilen numunelere göre daha yüksek olması şaşırtıcı bulunmuştur. Çünkü hem hava hem suda kür edilen numunelerde hidrasyon ve puzolanik reaksiyonların gerçekleşmesi için gerekli şartlar (nem, CO<sub>2</sub>) daha uygun olduğu düşünülmektedir. Ancak, sürekli su kür koşulları altında çatlak içindeki boşluklara hidrasyon için gerekli olan iyon taşınımının (Ca<sup>2+</sup>, OH<sup>-</sup> vb.) daha kolay olması ve reaksiyonların daha hızlı ve etkin şekilde olması, iyileşme ürününün daha yoğun olmasına sebep olabilir. Dolayısıyla SS kür koşulu, daha yoğun yalıtkan olan iyileşme ürünü sayesinde ED değerlerinin yüksek olmasına neden olabilir.

Çizelge 4.7. 28 günlük silindir numunelerin ortalama ED değerleri (kΩ cinsinden)

| Karışım              | Kür Yaşı (Gün) | Sürekli Su (SS) |              | Islanma/Kuruma (I/K) |              |
|----------------------|----------------|-----------------|--------------|----------------------|--------------|
|                      |                | Sağlam          | Ön Yüklenmiş | Sağlam               | Ön Yüklenmiş |
| ECC 1.2<br>L-Kontrol | 28             | 4,12            | 7,90         | 4,26                 | 7,87         |
|                      | 28+15          | 44,44           | 56,37        | 16,00                | 17,40        |
|                      | 28+30          | 53,59           | 64,00        | 20,50                | 26,55        |
|                      | 28+45          | 66,60           | 74,50        | 33,50                | 39,30        |
|                      | 28+60          | 77,14           | 82,67        | 42,00                | 71,35        |
|                      | 28+75          | 85,80           | 92,00        | 50,00                | 87,50        |
|                      | 28+90          | 98,10           | 105,20       | 59,50                | 93,65        |
| ECC 1.2<br>L-KF      | 28             | 0,72            | 0,78         | 0,61                 | 1,88         |
|                      | 28+15          | 4,77            | 5,45         | 2,73                 | 5,84         |
|                      | 28+30          | 6,03            | 7,27         | 5,99                 | 9,71         |
|                      | 28+45          | 7,40            | 7,67         | 8,30                 | 14,03        |
|                      | 28+60          | 7,92            | 8,20         | 12,95                | 18,40        |
|                      | 28+75          | 8,24            | 8,63         | 15,50                | 19,83        |
|                      | 28+90          | 8,99            | 10,37        | 18,50                | 25,73        |
| ECC 1.2<br>L-KNT     | 28             | 1,97            | 3,64         | 1,75                 | 4,24         |
|                      | 28+15          | 22,40           | 29,80        | 10,80                | 17,10        |
|                      | 28+30          | 36,85           | 37,05        | 15,55                | 23,00        |
|                      | 28+45          | 44,80           | 45,70        | 21,50                | 27,90        |
|                      | 28+60          | 52,30           | 57,75        | 27,00                | 32,50        |
|                      | 28+75          | 59,60           | 69,80        | 35,40                | 41,20        |
|                      | 28+90          | 68,63           | 78,45        | 44,95                | 52,30        |
| ECC 1.2<br>H-Kontrol | 28             | 2,43            | 4,12         | 2,33                 | 3,92         |
|                      | 28+15          | 14,95           | 29,53        | 8,95                 | 14,30        |
|                      | 28+30          | 24,50           | 33,47        | 14,60                | 20,10        |
|                      | 28+45          | 27,00           | 39,00        | 23,00                | 32,85        |
|                      | 28+60          | 35,50           | 44,67        | 26,50                | 39,75        |
|                      | 28+75          | 39,50           | 68,65        | 29,00                | 44,05        |
|                      | 28+90          | 44,00           | 92,55        | 33,75                | 50,95        |

Çizelge 4.7. (devam) 28 günlük silindir numunelerin ortalama ED değerleri (kΩ cinsinden)

| Karışım              | Kür Yaşı (Gün) | Sürekli Su (SS) |               | Islanma/Kuruma (I/K) |               |
|----------------------|----------------|-----------------|---------------|----------------------|---------------|
|                      |                | Sağlam          | Ön Yükleilmiş | Sağlam               | Ön Yükleilmiş |
| ECC 1.2<br>H-KF      | 28             | 0,99            | 1,03          | 0,92                 | 1,29          |
|                      | 28+15          | 1,70            | 4,61          | 3,63                 | 7,48          |
|                      | 28+30          | 3,28            | 5,05          | 4,75                 | 8,31          |
|                      | 28+45          | 5,30            | 14,37         | 5,45                 | 9,62          |
|                      | 28+60          | 15,40           | 32,00         | 6,80                 | 10,30         |
|                      | 28+75          | 18,80           | 38,00         | 7,95                 | 11,67         |
|                      | 28+90          | 31,25           | 45,67         | 9,82                 | 12,95         |
| ECC 1.2<br>H-KNT     | 28             | 1,92            | 3,73          | 1,56                 | 3,34          |
|                      | 28+15          | 6,35            | 13,23         | 12,50                | 15,75         |
|                      | 28+30          | 9,35            | 18,03         | 18,00                | 19,97         |
|                      | 28+45          | 13,25           | 21,07         | 22,50                | 25,90         |
|                      | 28+60          | 18,00           | 31,90         | 26,00                | 35,50         |
|                      | 28+75          | 22,50           | 40,53         | 34,50                | 42,60         |
|                      | 28+90          | 24,50           | 45,60         | 38,45                | 51,87         |
| ECC 2.2<br>L-Kontrol | 28             | 4,15            | 17,09         | 3,70                 | 7,15          |
|                      | 28+15          | 33,00           | 143,00        | 42,50                | 52,50         |
|                      | 28+30          | 46,00           | 210,00        | 82,50                | 175,00        |
|                      | 28+45          | 87,50           | 239,00        | 222,50               | 232,50        |
|                      | 28+60          | 138,00          | 324,00        | 247,50               | 252,00        |
|                      | 28+75          | 147,50          | 335,00        | 252,00               | 270,50        |
|                      | 28+90          | 194,50          | 342,00        | 268,45               | 288,50        |
| ECC 2.2<br>L-KF      | 28             | 1,24            | 2,70          | 1,30                 | 2,81          |
|                      | 28+15          | 10,10           | 19,70         | 2,95                 | 12,00         |
|                      | 28+30          | 22,30           | 27,50         | 5,20                 | 13,60         |
|                      | 28+45          | 36,50           | 37,30         | 16,50                | 18,18         |
|                      | 28+60          | 48,75           | 57,00         | 20,25                | 22,43         |
|                      | 28+75          | 59,70           | 78,90         | 22,20                | 25,10         |
|                      | 28+90          | 78,50           | 103,25        | 26,28                | 30,07         |
| ECC 2.2<br>L-KNT     | 28             | 1,01            | 8,13          | 1,05                 | 3,78          |
|                      | 28+15          | 16,00           | 34,50         | 11,00                | 16,83         |
|                      | 28+30          | 28,50           | 45,00         | 21,50                | 26,50         |
|                      | 28+45          | 51,00           | 72,33         | 34,00                | 36,00         |
|                      | 28+60          | 57,50           | 109,50        | 36,50                | 45,75         |
|                      | 28+75          | 75,50           | 188,50        | 44,50                | 58,50         |
|                      | 28+90          | 98,50           | 338,33        | 52,15                | 71,35         |
| ECC 2.2<br>H-Kontrol | 28             | 4,70            | 7,10          | 4,60                 | 6,94          |
|                      | 28+15          | 12,75           | 17,40         | 6,45                 | 18,90         |
|                      | 28+30          | 24,85           | 31,47         | 16,00                | 38,50         |
|                      | 28+45          | 43,00           | 55,67         | 25,00                | 61,50         |
|                      | 28+60          | 62,00           | 90,87         | 38,50                | 75,50         |
|                      | 28+75          | 90,25           | 121,67        | 75,00                | 106,60        |
|                      | 28+90          | 120,50          | 143,67        | 112,50               | 136,70        |
| ECC 2.2<br>H-KF      | 28             | 0,48            | 1,85          | 0,81                 | 0,92          |
|                      | 28+15          | 2,98            | 5,19          | 2,38                 | 2,84          |
|                      | 28+30          | 6,29            | 10,05         | 7,94                 | 11,87         |
|                      | 28+45          | 8,46            | 12,38         | 13,85                | 14,35         |
|                      | 28+60          | 15,65           | 16,77         | 18,35                | 19,23         |
|                      | 28+75          | 18,10           | 18,78         | 23,70                | 24,27         |
|                      | 28+90          | 25,65           | 27,71         | 25,28                | 34,97         |
| ECC 2.2<br>H-KNT     | 28             | 0,92            | 1,87          | 0,51                 | 1,85          |
|                      | 28+15          | 2,30            | 7,39          | 6,50                 | 9,80          |
|                      | 28+30          | 3,60            | 9,83          | 10,00                | 13,20         |
|                      | 28+45          | 6,30            | 14,20         | 12,00                | 21,65         |
|                      | 28+60          | 9,25            | 17,38         | 21,00                | 32,40         |
|                      | 28+75          | 11,70           | 20,23         | 22,85                | 37,89         |
|                      | 28+90          | 13,05           | 21,10         | 26,25                | 38,80         |

Çizelge 4.8. 180 günlük silindir numunelerin ortalama ED değerleri (kΩ cinsinden)

| Karışım              | Kür Yaşı (Gün) | Sürekli Su (SS) |               | Islanma/Kuruma (I/K) |               |
|----------------------|----------------|-----------------|---------------|----------------------|---------------|
|                      |                | Sağlam          | Ön Yükleilmiş | Sağlam               | Ön Yükleilmiş |
| ECC 1.2<br>L-Kontrol | 180            | 89,00           | 100,33        | 77,50                | 93,00         |
|                      | 180+15         | 107,50          | 139,30        | 87,50                | 130,70        |
|                      | 180+30         | 129,00          | 186,40        | 96,40                | 148,00        |
|                      | 180+45         | 188,50          | 256,30        | 103,60               | 178,30        |
|                      | 180+60         | 213,00          | 366,70        | 162,50               | 220,50        |
|                      | 180+75         | 301,50          | 410,00        | 195,00               | 255,50        |
| ECC 1.2<br>L-KF      | 180+90         | 358,00          | 444,50        | 258,10               | 280,00        |
|                      | 180            | 12,00           | 17,60         | 15,40                | 24,70         |
|                      | 180+15         | 13,50           | 23,33         | 18,30                | 31,10         |
|                      | 180+30         | 19,00           | 31,00         | 31,50                | 37,00         |
|                      | 180+45         | 21,00           | 37,66         | 37,00                | 65,00         |
|                      | 180+60         | 28,50           | 43,67         | 43,60                | 67,20         |
| ECC 1.2<br>L-KNT     | 180+75         | 39,50           | 52,60         | 55,00                | 73,00         |
|                      | 180+90         | 52,00           | 59,00         | 73,50                | 83,50         |
|                      | 180            | 11,50           | 22,30         | 21,40                | 39,00         |
|                      | 180+15         | 14,50           | 38,33         | 36,30                | 49,30         |
|                      | 180+30         | 30,60           | 47,70         | 46,00                | 55,70         |
|                      | 180+45         | 37,40           | 71,20         | 54,50                | 69,60         |
| ECC 1.2<br>H-Kontrol | 180+60         | 49,00           | 86,70         | 74,70                | 127,30        |
|                      | 180+75         | 75,30           | 116,60        | 121,50               | 153,30        |
|                      | 180+90         | 89,00           | 133,00        | 139,60               | 175,20        |
|                      | 180            | 53,50           | 58,00         | 58,70                | 68,30         |
|                      | 180+15         | 56,00           | 64,00         | 67,50                | 83,10         |
|                      | 180+30         | 58,50           | 73,00         | 81,40                | 99,20         |
| ECC 1.2<br>H-KF      | 180+45         | 64,00           | 81,00         | 86,00                | 115,00        |
|                      | 180+60         | 68,00           | 87,50         | 103,90               | 141,40        |
|                      | 180+75         | 71,40           | 88,60         | 113,20               | 152,90        |
|                      | 180+90         | 73,50           | 90,50         | 126,10               | 156,70        |
|                      | 180            | 14,50           | 23,60         | 13,10                | 17,70         |
|                      | 180+15         | 16,10           | 26,50         | 23,90                | 41,40         |
| ECC 1.2<br>H-KNT     | 180+30         | 20,50           | 34,70         | 29,50                | 45,90         |
|                      | 180+45         | 35,50           | 49,30         | 35,20                | 53,30         |
|                      | 180+60         | 42,00           | 59,00         | 42,40                | 63,50         |
|                      | 180+75         | 66,10           | 73,80         | 53,50                | 66,40         |
|                      | 180+90         | 87,90           | 91,20         | 60,00                | 71,00         |
|                      | 180            | 28,00           | 37,40         | 11,50                | 21,30         |
| ECC 1.2<br>H-KNT     | 180+15         | 37,00           | 55,10         | 15,40                | 32,70         |
|                      | 180+30         | 55,50           | 81,70         | 19,20                | 77,60         |
|                      | 180+45         | 63,20           | 110,60        | 23,30                | 88,10         |
|                      | 180+60         | 66,40           | 124,30        | 50,00                | 96,90         |
|                      | 180+75         | 72,50           | 130,00        | 72,40                | 101,60        |
|                      | 180+90         | 93,50           | 144,70        | 100,60               | 109,70        |
| ECC 2.2<br>L-Kontrol | 180            | 74,50           | 87,70         | 64,50                | 100,40        |
|                      | 180+15         | 86,00           | 122,10        | 79,50                | 122,30        |
|                      | 180+30         | 101,40          | 173,60        | 92,60                | 145,70        |
|                      | 180+45         | 159,90          | 225,70        | 101,10               | 147,10        |
|                      | 180+60         | 257,50          | 341,40        | 130,00               | 193,00        |
|                      | 180+75         | 383,30          | 491,80        | 143,90               | 225,50        |
| ECC 2.2<br>L-KF      | 180+90         | 520,50          | 615,30        | 191,20               | 266,90        |
|                      | 180            | 16,40           | 23,70         | 8,50                 | 17,00         |
|                      | 180+15         | 17,80           | 37,40         | 16,50                | 27,40         |
|                      | 180+30         | 22,60           | 47,00         | 21,10                | 29,60         |
|                      | 180+45         | 37,50           | 53,20         | 26,60                | 38,70         |
|                      | 180+60         | 55,00           | 62,60         | 31,40                | 43,80         |
| ECC 2.2<br>L-KNT     | 180+75         | 59,20           | 69,30         | 37,50                | 51,10         |
|                      | 180+90         | 70,10           | 78,90         | 43,00                | 61,30         |
|                      | 180            | 15,80           | 24,30         | 14,50                | 20,70         |
|                      | 180+15         | 19,50           | 30,60         | 25,50                | 41,10         |
|                      | 180+30         | 27,70           | 36,20         | 35,60                | 58,30         |
|                      | 180+45         | 31,10           | 39,70         | 57,40                | 63,60         |
| ECC 2.2<br>H-Kontrol | 180+60         | 33,60           | 45,80         | 63,90                | 76,10         |
|                      | 180+75         | 35,20           | 51,40         | 66,60                | 88,40         |
|                      | 180+90         | 37,10           | 53,80         | 92,70                | 94,00         |
|                      | 180            | 85,90           | 117,20        | 71,00                | 110,20        |
|                      | 180+15         | 103,60          | 171,30        | 122,50               | 129,30        |
|                      | 180+30         | 188,00          | 240,90        | 129,10               | 138,70        |
| ECC 2.2<br>H-KNT     | 180+45         | 300,40          | 374,70        | 135,10               | 152,10        |
|                      | 180+60         | 386,30          | 467,60        | 140,50               | 166,40        |
|                      | 180+75         | 528,50          | 583,10        | 148,50               | 191,10        |
|                      | 180+90         | 599,80          | 719,90        | 168,60               | 210,30        |

Çizelge 4.8. (devam) 180 günlük silindir numunelerin ortalama ED değerleri (k $\Omega$  cinsinden)

| Karışım          | Kür Yaşı (Gün) | Sürekli Su (SS) |             | Islanma/Kuruma (I/K) |             |
|------------------|----------------|-----------------|-------------|----------------------|-------------|
|                  |                | Sağlam          | Ön Yüklendi | Sağlam               | Ön Yüklendi |
| ECC 2.2<br>H-KF  | 180            | 11,50           | 19,00       | 7,50                 | 35,30       |
|                  | 180+15         | 17,60           | 20,20       | 34,50                | 46,00       |
|                  | 180+30         | 19,10           | 22,80       | 37,60                | 52,40       |
|                  | 180+45         | 21,00           | 24,90       | 43,40                | 55,30       |
|                  | 180+60         | 24,60           | 28,10       | 46,70                | 57,20       |
|                  | 180+75         | 26,00           | 29,50       | 49,10                | 61,60       |
|                  | 180+90         | 27,20           | 31,70       | 57,00                | 66,90       |
| ECC 2.2<br>H-KNT | 180            | 10,50           | 20,10       | 7,20                 | 25,90       |
|                  | 180+15         | 17,40           | 24,90       | 34,50                | 43,10       |
|                  | 180+30         | 19,60           | 27,40       | 47,10                | 58,40       |
|                  | 180+45         | 21,50           | 33,00       | 60,60                | 75,70       |
|                  | 180+60         | 32,10           | 38,30       | 63,50                | 85,60       |
|                  | 180+75         | 40,70           | 51,40       | 69,10                | 93,70       |
|                  | 180+90         | 46,90           | 53,30       | 72,50                | 96,10       |

Çizelge 4.8’de görüldüğü üzere 180 günlük numunelerin 15’er günlük olmak üzere 90. güne kadar olan kür sürelerine göre ED sonuçları verilmiştir. Karışım tipi ve kür koşullarından bağımsız olarak sağlam numunelerin tamamının ED değerlerinde artış gözlenmiştir. Söz konusu durum ileri yaşta betonun matris kısmının olgunluğuna bağlı olarak yoğunluğunun artarak gözeneklerinin kapanması ve gözenek çözeltisinin azalması sonucu elektriksel iletkenliğinin azalmasına bağlı olarak ED değerlerinin artması olarak yorumlanabilir. Ancak, ED sonuçları büyük oranda karışım tipine bağlıdır. İki kür koşulunda da (SS ve IK), sağlam ECC-Kontrol numunelerinde KF ve KNT içerikli numunelere göre daha yüksek ED değerleri kaydedilmiştir. ECC-Kontrol karışımını genel olarak sırasıyla ECC-KNT, ECC-KF karışımları takip etmiştir. İleri yaşlarda da genel olarak (180+15 den 180+90 günlük kür sürelerine kadar) hemen hemen aynı şekilde davranış sergilenmiştir. ECC-KF numuneleri en düşük ED değerlerine sahip olmayı devam ettirmiş, dolayısıyla elektriksel iletkenlik derecelerinin en yüksek ECC-KF karışımlarına ait olmuştur. Bu sonuç karbon fiber liflerin matris içerisinde süreklilik gösteren iletken bir köprü görevi görmesi ile ilgili olabilir. KNT’nin KF’ye kıyasla daha yüksek ED değerlerine sahip olması da geniş yüzey alanının olmasından dolayı matris içerisinde homojen dağılımının zor olması ve topaklanma riskinin bulunmasından kaynaklı olduğu düşünülebilir.

SS ve IK kür koşullarının uygulanması, farklı karışımlardan gelen sağlam ve önceden yüklenmiş örneklerin ED sonuçlarını sürekli olarak artırmıştır. Bu artan eğilim gözenek kısıtlaması, iletken gözenek ortamının tüketimi ve gözenek/çatlak kıvrımının artmasıyla ilişkili görünmektedir. Önceden yüklenmiş örnekler için sağlam olanlara göre elde edilen nispeten daha yüksek sonuçlar, ED testinin kendi kendini iyileştirme oluşumunu yeterince yakalayabildiğini göstermektedir.

Bununla birlikte, sağlam ve çatlaklı numunelerin ED artışları içerisinde özellikle nano malzeme içeren karışımlar özelinde farklılıklar vardır. Örneğin sağlam numunelerde, ED artışları daha çok matrisin olgunlaşmasına bağlı olarak artan kür yaşı ile ilgilidir. Çatlaklı numuneler için, matris olgunlaşması benzerlik taşısa da, çatlakların devam eden hidratasyon ve puzolanik reaksiyonlar sonucu kapanması mümkün olabilmektedir. Bu nedenle, kendiliğinden iyileşme ile ilgili yorum yapılabilmesi için sağlam numunelerin ED sonuçları ile çatlaklı numunelerin sonuçları üzerinden karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. Aşağıda verilen Şekil 4.9-10'da 28 günlük numunelerin ED değişimleri üzerinden kendiliğinden iyileşme performansları grafikte gösterilmiştir.

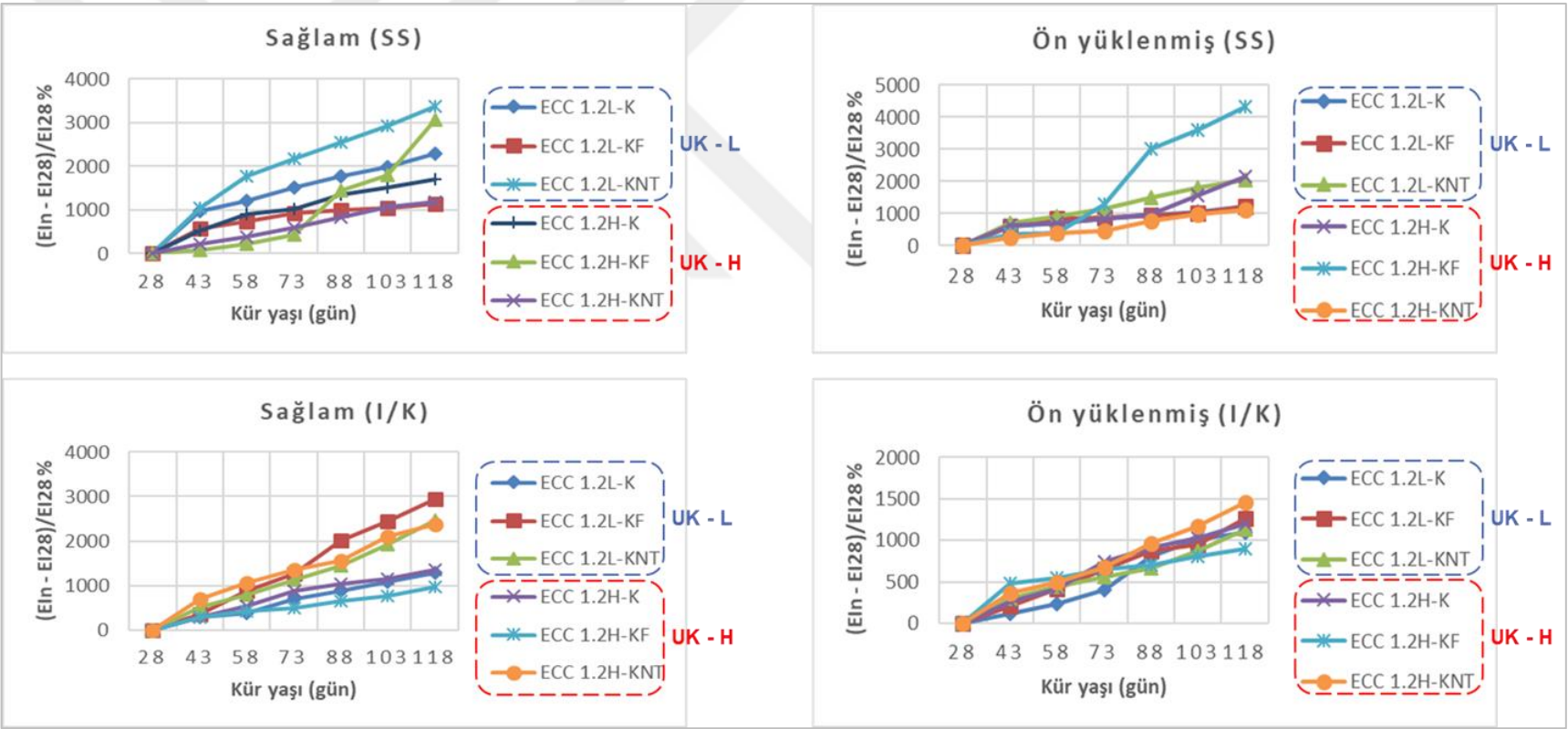
Şekil 4.9-10'da 28 günlük sağlam ve çatlaklı ECC numunelerinin SS ve IK kür koşullarında, zamana bağlı ED değişim oranları verilmiştir. UK/PÇ oranı 1,2 olan sağlam numunelerle ilgili olarak; SS ve IK kür koşullarında genellikle KF ve KNT içerikli numunelerin ED değişim oranları Kontrol numunelere göre daha yüksek bulunmuştur. Örneğin, SS kür koşulunda 90 günlük kür sonunda en yüksek ED değişimi %3384 ile ECC L-KNT serisinde gerçekleşmiştir. Bu seriyi %3057 ED değişim oranı ile ECC H-KF izlemiştir. IK kür koşulunda ise en yüksek ED değişimi %2933 ile ECC L-KF serisinde gerçekleşmiş olup, onu ECC L-KNT izlemiştir. UK/PÇ oranı 2,2 olan sağlam numunelerde ise, SS ve IK kür koşullarında benzer şekilde KNT ve KF içerikli numunelerin ED değişim oranı daha yüksek bulunmuştur. Sadece IK kür koşullarında ECC L-Kontrol serisinin ED değişim oranı diğerlerinden yüksek bulunmuştur. Bunun sebebi Kontrol numunelerindeki matris yoğunluğuna bağlı olarak düşük gözenekli yapısı olabilir. Yani elektrik iletimini sağlayan iyonların beton içinde taşınmasına imkan olmaması ED değerlerinde artışa neden olabilir.

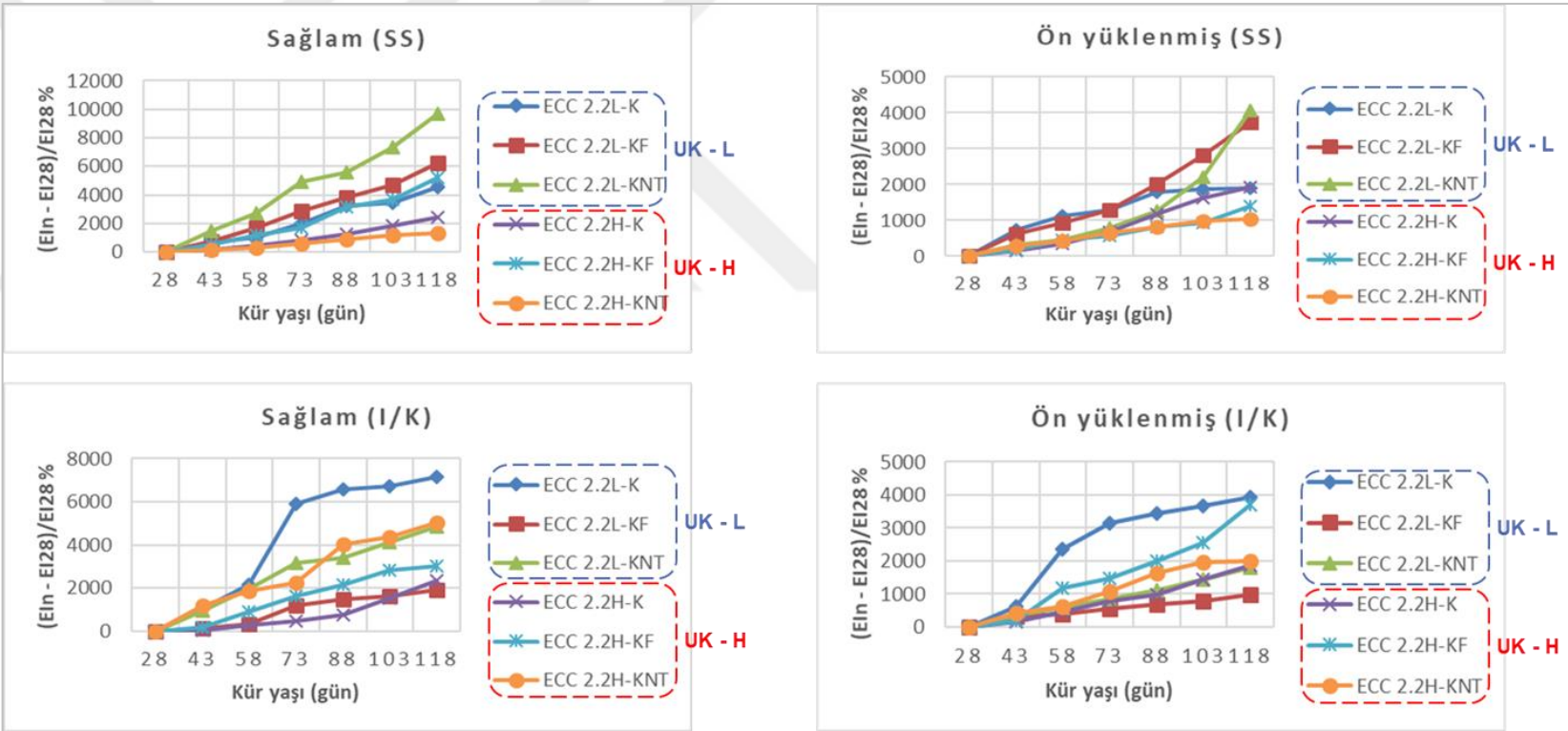
Ön yüklenmiş numuneler ile ilgili olarak, UK/PÇ oranı 1,2 olan numunelerde SS ve IK kür koşullarında genellikle KF ve KNT içerikli numunelerin ED değişim oranları Kontrol numunelere göre daha yüksek bulunmuştur. Örneğin, SS kür koşulunda 90 günlük kür sonunda en yüksek ED değişimi %4334 ile ECC H-KF serisinde gerçekleşmiştir. IK kür koşulunda ise en yüksek ED değişimi %1453 ile ECC H-KNT serisinde gerçekleşmiş olup, onu %1269 ED değişim oranı ile ECC L-KF izlemiştir. UK/PÇ oranı 2,2 olan numunelerde ise, SS ve IK kür koşullarında 90 günlük kür sonunda yine KNT ve KF içerikli numuneler kontrol numunelere göre daha yüksek ED değişim oranına sahip olmuştur. Sağlam numunelere benzer şekilde sadece IK kür koşullarında ECC L-Kontrol serisinin ED değişim oranı diğerlerinden yüksek bulunmuştur. Bunun sebebi ise çatlak genişliğine bağlı olabilir.

Bunun yanında kontrol numunelerinde çatlağa bağlı olarak yalıtkan PVA liflerinin etrafına iyileşme ürünlerinin toplanması ile elektrik iletiminin azalması olabilir.



Şekil 4.9. 28 günlük sağlam ve ön yüklenmiş ECC silindir numunelerinin sürekli su (SS) ve ıslama-kuruma (I/K) kür koşullarında, zamana bağlı ED değişim oranları (ECC-1.2)





Şekil 4.10. 28 günlük sağlam ve ön yüklenmiş ECC silindir numunelerinin sürekli su (SS) ve ıslama-kuruma (I/K) kür koşullarında, zamana bağlı ED değişim oranları (ECC-2.2)

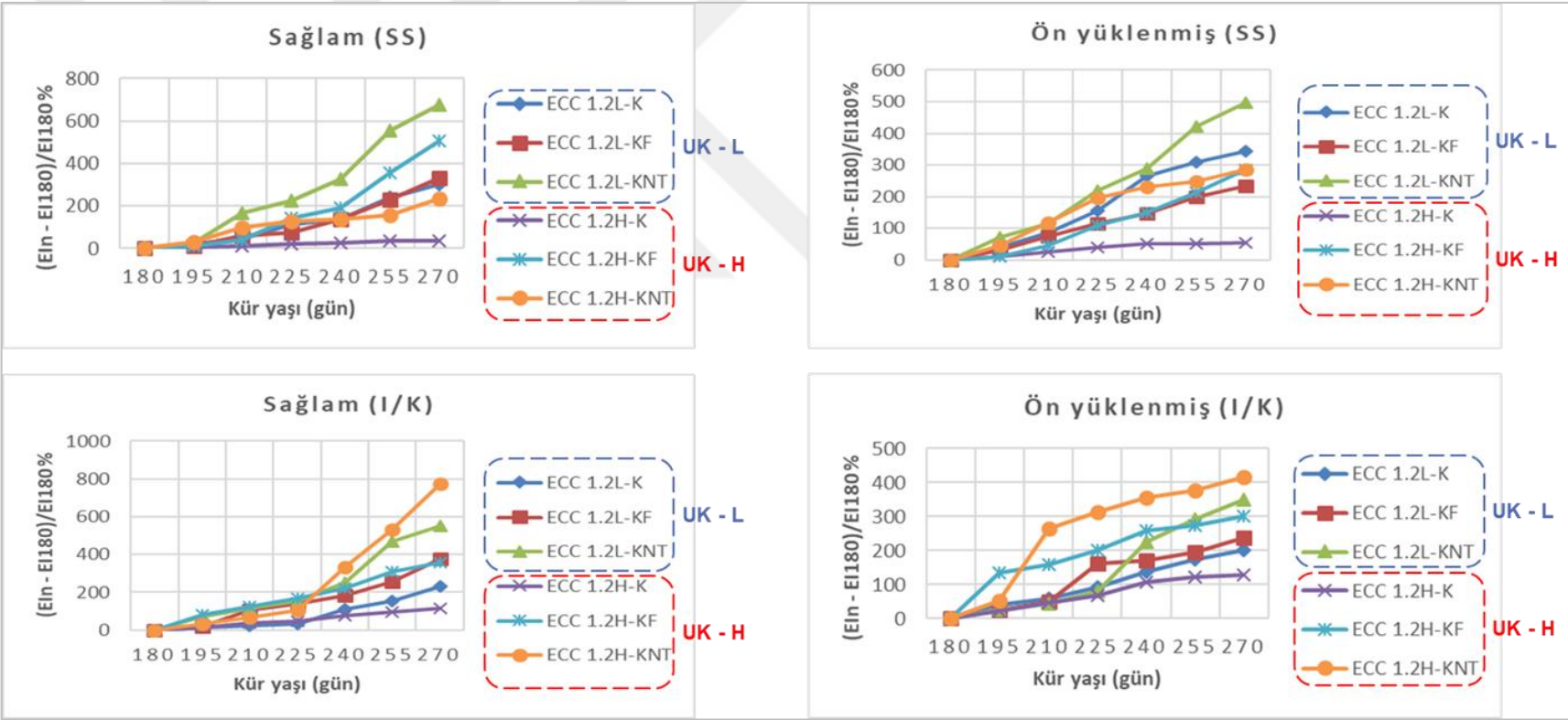
Şekil 4.11-12’de 180 günlük sağlam ve çatlaklı ECC numunelerinin SS ve IK kür koşullarında, zamana bağlı ED değişim oranları verilmiştir. UK/PÇ oranı 1,2 olan sağlam numunelerle ilgili olarak; her iki kür koşulunda genellikle KF ve KNT içerikli numunelerin ED değişim oranları Kontrol numunelere göre daha yüksek bulunmuştur. Örneğin, SS kür koşulunda 90 günlük kür sonunda en yüksek ED değişimi %674 ile ECC L-KNT serisinde gerçekleşmiştir. Bu seriyi %506 ED değişim oranı ile ECC H-KF izlemiştir. Bu sıralama 28 günlük sağlam numunelerde de aynı şekilde görülmüştür. IK kür koşulunda ise en yüksek ED değişimi %775 ile ECC H-KNT serisinde gerçekleşmiş olup, onu ECC L-KNT izlemiştir. Daha sonra sırasıyla ECC L-KF ve ECC H-KF gelmiş olup, en düşük ED değişim oranı kontrol numunelerinde bulunmuştur. UK/PÇ oranı 2,2 olan sağlam numunelerde ise, SS kür koşullarında, farklı olarak kontrol numunelerin ED değişim oranının yüksek olması dikkat çekicidir. Kontrol numunelerin ED değişim oranları yaklaşık %600 mertebelerinde iken KNT ve KF içerikli numunelerde ise ortalama olarak %350 seviyesinden daha düşük bulunmuştur. IK kür koşullarında ise ECC H-KNT serisinin ED değişim oranı diğerlerinden yüksek bulunmuştur. Bu oran %907 seviyesinde iken, bu seriyi %660 ile H-KF izlemiştir.

Ön yüklenmiş numuneler ile ilgili olarak, UK/PÇ oranı 1,2 olan numunelerde SS kür koşullarında Kontrol ve KNT içerikli numunelerin ED değişim oranları KF içerikli numunelere göre daha yüksek bulunmuştur. Örneğin, SS kür koşulunda 90 günlük kür sonunda en yüksek ED değişimi %496 ile ECC L-KNT serisinde gerçekleşmiştir. Daha sonra ise onu %343 ED değişim oranı ile ECC L-Kontrol serisi izlemiştir. IK kür koşulunda ise ED değişim oranı en yüksekten düşüğe doğru KNT, KF ve Kontrol serileri olarak sıralanmıştır. ECC H-KNT serisindeki oran %415 iken, en düşük oran %129 seviyesi ile ECC H-Kontrol serilerinde bulunmuştur. UK/PÇ oranı 2,2 olan numunelerde ise, SS kür koşullarında 90 günlük kür sonunda en yüksek ED değişimi sırasıyla %602 ve %514 ile ECC L-Kontrol ve ECC H-Kontrol serilerinde görülmüştür. KF ve KNT içerikli numunelerin ED değişimi oranları %67 ile %233 aralığında görülmüştür. IK kür koşullarında ise en yüksek ED değişimi KNT içerikli numunelerde görülmekte iken, daha sonra KF içerikli ve kontrol numuneleri gelmektedir.

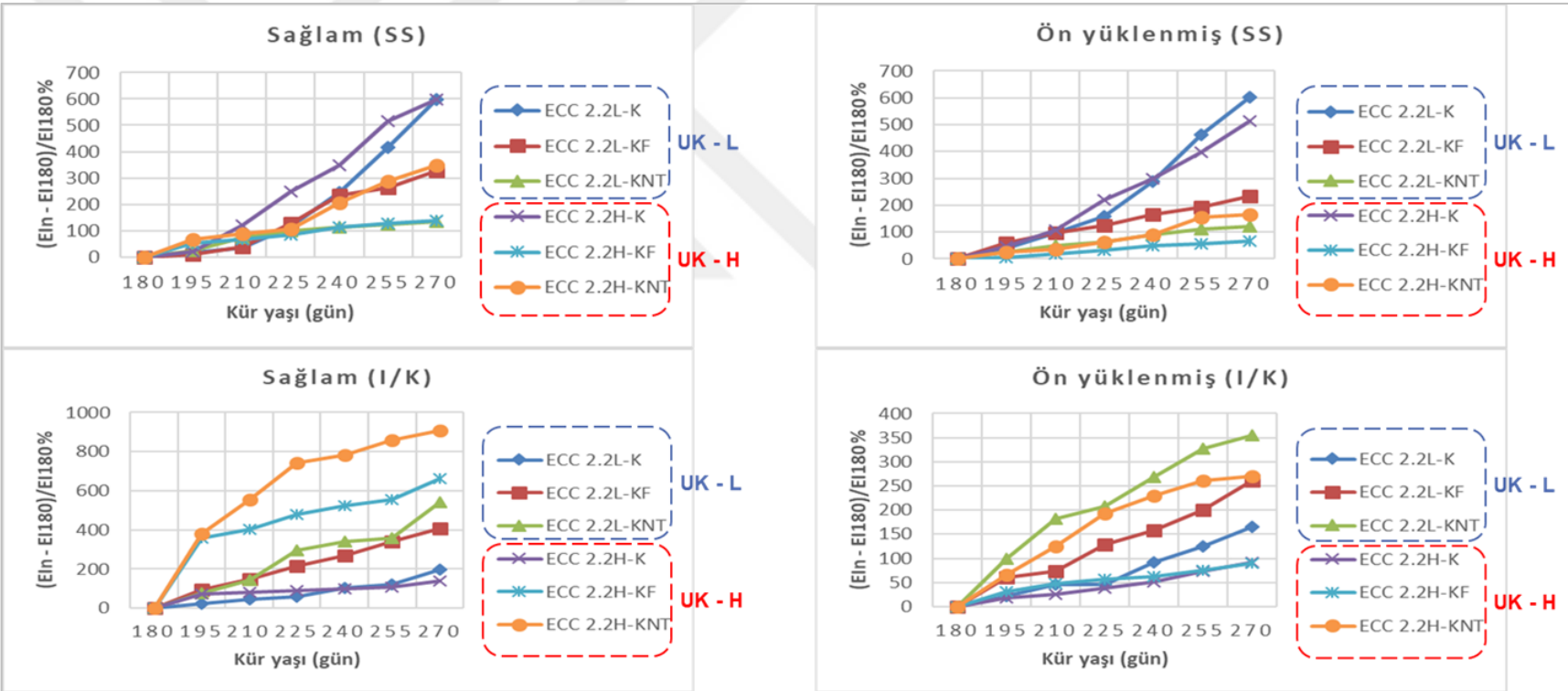
Yukarıdaki sonuçları özetlemek gerekirse, 28 ve 180 günlük sağlam ve ön yükleme ile hasar verilmiş silindir numunelerin sürekli su ve ıslanma-kuruma kür koşullarında ED değişimlerine bağlı iyileşme performansı değerlendirildiğinde, sonuçlarda varyasyon görülmektedir. Karışım tipi ve kür koşullarından bağımsız olarak hem sağlam hem hasarlı

numunelerde genel eğilimle uyumlu olarak KF veya KNT içerikli karışımların ED değişim oranlarında büyük değişimler yani kendiliğinden iyileşme görülmüştür. Bununla birlikte yer yer kontrol numunelerinde de ED değişimlerinde ciddi artışlar görülmüştür. Bu durumun nedeni her ne kadar numunelerde ED ölçümlerinden önce fırına konularak nem faktörü ortadan kaldırılmaya çalışılsa da, numunelerin içinde nem bulunma ihtimali, iyon yapısı ve konsantrasyonu gibi parametrelerin ED değişimini etkilemesi olarak düşünülebilir.





Şekil 4.11. 180 günlük sağlam ve ön yüklenmiş ECC silindir numunelerinin sürekli su (SS) ve ıslama-kuruma (I/K) kür koşullarında, zamana bağlı ED değişim oranları (ECC-1.2)



Şekil 4.12. 180 günlük sağlam ve ön yüklenmiş ECC silindir numunelerinin sürekli su (SS) ve ıslama-kuruma (I/K) kür koşullarında, zamana bağlı ED değişim oranları (ECC-2.2)

### Çatlakların kendiliğinden iyileşmesi

Ön yükleme sonucu hasar oluşturulmuş 28 ve 180 günlük silindir numunelere ait çatlak ölçümleri Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10’da ayrı ayrı gösterilmiştir. Çatlak değerleri her bir seri için sürekli su ve ıslanma-kuruma kür koşulları için 3’er silindir numunesinin çatlaklarının ortalaması alınarak belirlenmiştir. Çatlak sayıları da silindirlerin çatlak sayılarının toplamıdır. 28 günlük numunelerin çatlak ölçümleri, erken yaş dönemi olması ve hidrasyon reaksiyonlarının devam etmesinden dolayı 15-30-45-60-75-90 gün olarak, öte yandan 180 günlük olgun numunelerin çatlak ölçümleri ise 15-30-60-90 gün olarak belirlenmiştir. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, çatlakların iyileşmesi ile ilgili öncelikle 28 günlük, daha sonra 180 günlük numuneler için değerlendirme yapılacaktır.

Çizelge 4.9. 28 günlük silindir numunelerin ön yüklemeleri ardından ve ileri yaşlarda kaydedilen çatlak nitelikleri

| Karışım Adı      | Kür Koşulları | 28  |     | 28+15 |     | 28+30 |     | 28+45 |     | 28+60 |     | 28+75 |     | 28+90 |     |
|------------------|---------------|-----|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|
|                  |               | TÇS | ÇG  | TÇS   | ÇG  | TÇS   | ÇG  | TÇS   | ÇG  | TÇS   | ÇG  | TÇS   | ÇG  | TÇS   | ÇG  |
| ECC 1.2<br>L-K   | SS            | 5   | 121 | 3     | 92  | 2     | 65  | -     | -   | -     | -   | -     | -   | -     | -   |
|                  | I/K           | 5   | 76  | 5     | 39  | 3     | 35  | 2     | 35  | -     | -   | -     | -   | -     | -   |
| ECC 1.2<br>L-KF  | SS            | 6   | 70  | 4     | 62  | 4     | 49  | 1     | 48  | -     | -   | -     | -   | -     | -   |
|                  | I/K           | 6   | 84  | 6     | 30  | 5     | 27  | 5     | 26  | 2     | 25  | 2     | 25  | 1     | 20  |
| ECC 1.2<br>L-KNT | SS            | 6   | 94  | 4     | 84  | 2     | 56  | 1     | 37  | -     | -   | -     | -   | -     | -   |
|                  | I/K           | 6   | 114 | 5     | 96  | 5     | 82  | 2     | 73  | 2     | 54  | 2     | 44  | 2     | 40  |
| ECC 1.2<br>H-K   | SS            | 6   | 110 | 5     | 74  | 2     | 42  | 1     | 19  | -     | -   | -     | -   | -     | -   |
|                  | I/K           | 6   | 166 | 6     | 158 | 5     | 111 | 4     | 86  | 3     | 81  | 3     | 68  | 3     | 65  |
| ECC 1.2<br>H-KF  | SS            | 6   | 204 | 4     | 176 | 2     | 108 | -     | -   | -     | -   | -     | -   | -     | -   |
|                  | I/K           | 6   | 147 | 6     | 81  | 6     | 71  | 4     | 50  | 2     | 34  | 1     | 29  | 1     | 26  |
| ECC 1.2<br>H-KNT | SS            | 6   | 196 | 6     | 159 | 3     | 46  | -     | -   | -     | -   | -     | -   | -     | -   |
|                  | I/K           | 6   | 174 | 6     | 137 | 6     | 121 | 2     | 120 | 2     | 103 | 1     | 97  | 1     | 92  |
| ECC 2.2<br>L-K   | SS            | 6   | 140 | 6     | 109 | 6     | 92  | 4     | 87  | 3     | 81  | 2     | 75  | 1     | 69  |
|                  | I/K           | 6   | 204 | 6     | 182 | 5     | 168 | 5     | 117 | 5     | 92  | 4     | 87  | 3     | 78  |
| ECC 2.2<br>L-KF  | SS            | 6   | 209 | 6     | 130 | 6     | 112 | 6     | 77  | 5     | 72  | 4     | 71  | 3     | 63  |
|                  | I/K           | 6   | 228 | 6     | 107 | 4     | 83  | 4     | 69  | 4     | 65  | 4     | 60  | 4     | 56  |
| ECC 2.2<br>L-KNT | SS            | 6   | 218 | 4     | 159 | 1     | 112 | 1     | 108 | -     | -   | -     | -   | -     | -   |
|                  | I/K           | 6   | 259 | 6     | 162 | 6     | 141 | 6     | 131 | 5     | 123 | 5     | 118 | 5     | 110 |
| ECC 2.2<br>H-K   | SS            | 6   | 367 | 6     | 312 | 6     | 265 | 5     | 238 | 4     | 198 | 4     | 177 | 4     | 173 |
|                  | I/K           | 6   | 265 | 6     | 208 | 5     | 155 | 5     | 93  | 5     | 78  | 5     | 72  | 5     | 71  |
| ECC 2.2<br>H-KF  | SS            | 6   | 172 | 6     | 136 | 6     | 105 | 4     | 78  | 2     | 76  | 1     | 63  | 1     | 51  |
|                  | I/K           | 6   | 275 | 6     | 255 | 6     | 205 | 6     | 146 | 6     | 139 | 6     | 105 | 6     | 101 |
| ECC 2.2<br>H-KNT | SS            | 6   | 259 | 6     | 240 | 4     | 182 | 2     | 172 | 2     | 157 | 2     | 136 | 2     | 103 |
|                  | I/K           | 6   | 202 | 6     | 181 | 5     | 147 | 5     | 114 | 3     | 103 | 3     | 96  | 3     | 95  |

TÇS: Toplam Çatlak Sayısı, ÇG: Çatlak Genişliği (µm), SS: Sürekli Su, I/K: Islanma-Kuruma

Çizelge 4.9’da görüldüğü üzere 28 günlük numunelerde çatlakların ortalama genişliği 70 ile 367  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir. UK/PÇ oranı 1,2 olan sürekli suda kür edilmiş numunelerin tamamının iyileştiği, ancak ıslanma kuruma ile kür edilmiş numunelerin hemen hemen hiçbirinde tam iyileşme sağlanamadığı görülmüştür. Bunun aksine, UK/PÇ oranı 2,2 olan numunelerin genelinde ise iyileşme oranları aynı kür koşullarında birbirine yakın olup, UK/PÇ oranı 1,2 olan numuneler kadar belirgin bir fark bulunmamaktadır. Örneğin, ECC 2.2 de sürekli suda kürlen numunelerin çatlak iyileşme oranları ortalama olarak %67 iken, ıslanma kuruma kür koşullarında ise %63 mertebesindedir. Bu oran, ECC 1.2 numunelerinde ise, sırasıyla %100 ve %72’dir. Dolayısıyla UK/PÇ oranı 1,2 olan numunelerin çatlak iyileşme performansı 2,2 olanlara göre daha iyi olduğu anlaşılmıştır. Yukarıda değinilen sürekli suda kür edilen numunelerin iyileşme kabiliyetinin ıslanma-kuruma ile kür edilenlerden daha iyi olmasının sebebi su altındaki örneklerin belirgin kendi kendini iyileştirme kapasitesi, çatlak yüzeylerinin yakınında nemin sürekli bulunabilirliği ile ilgili olabilir. Çatlakların iyileşmesi için gerekli hidratasyon reaksiyonu ve  $\text{CaCO}_3$  çökmesi için çatlaklara nüfuz edecek sürekli nemin bulunması önemlidir.

Çatlakların iyileşmesi ile ilgili önemli parametrelerden birisi de çatlak genişliğidir. Çatlak genişliği ortalama 100  $\mu\text{m}$ ’a kadar olan numunelerin hemen hemen hepsinin iyileştiği, ancak ortalama olarak 100  $\mu\text{m}$  üzeri çatlakların belli oranda iyileştiği görülmektedir. Öte yandan sürekli suda kür edilen ECC 2.2 L-KNT ve ECC 1.2 H-KF numunelerinin tamamı iyileşmiş, ortalama çatlak genişlikleri ise sırasıyla 218 ve 204  $\mu\text{m}$  olarak gözlemlenmiştir.

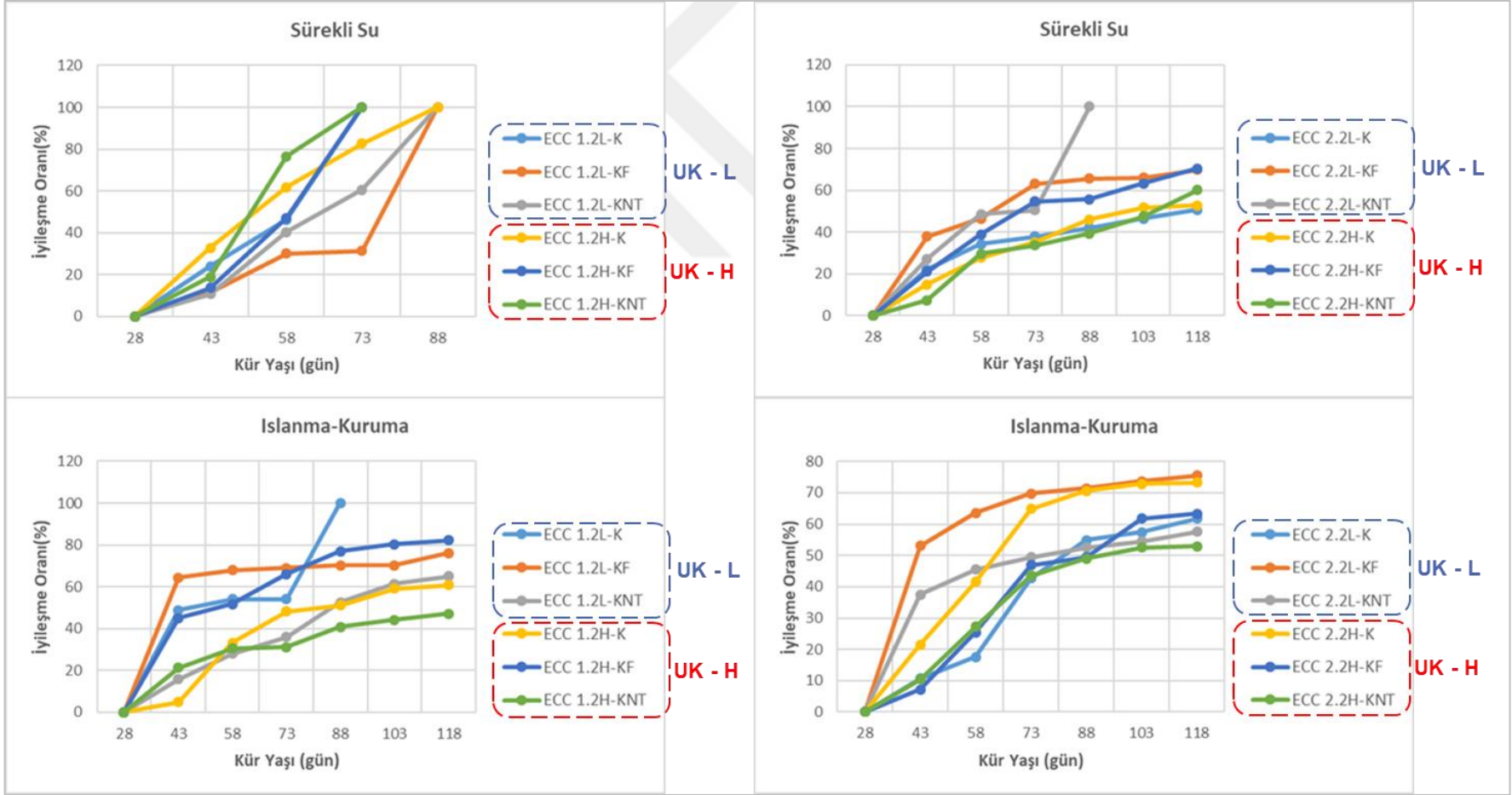
Resim 4.1’de Çizelge 4.9’da verilen numunelerin çatlak genişliklerine ait görüntüler yer almıştır. Bu görüntüler her bir karışımda iyileşmenin belirgin olarak görüldüğü çatlak görüntüleridir. Bu tez çalışmasının ana amaçlarından biri geniş çatlak açıklıklarının kendiliğinden iyileşmesidir. Buna bağlı olarak Şekil 4.13’te farklı karışımların en geniş çatlak genişliğinde kendiliğinden iyileşme kapasiteleri görülmektedir. Buna göre 90 günlük kür süresinin ardından ECC numunelerinin kaydedilen en geniş çatlak açıklıklarının kısmi ya da tam anlamıyla kendiliğinden iyileşme gösterdiği görülmüştür. Bunun yanında karışımların çatlak kapanma oranları (karışımların performans sıralaması) çatlak genişliği ile kür koşullarına bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Örneğin, ortalama çatlak genişliği 76  $\mu\text{m}$  olan ECC 1.2 L-Kontrol numunesi ıslanma-kuruma kür koşulunda tam olarak iyileşme gösterirken, aynı koşulda olan ECC 1.2 L-KNT numunesinde 114  $\mu\text{m}$  ortalama çatlak genişliğinin iyileşme oranı %65 mertebesindedir. Dolayısıyla çatlak genişliğinin 100  $\mu\text{m}$

üzerine çıkması iyileşme oranını büyük ölçüde etkilemektedir. Öte yandan, tamamen iyileşmiş en yüksek çatlak genişliği 533 µm olarak 90. gün ıslanma-kuruma kür koşulunda ECC 2.2 H-KF numunesinde kaydedilmiştir. Bunun yanında, sürekli suda kür edilen ECC 2.2 H-Kontrol numunesinin 509 µm seviyesindeki çatlağının 60. günde kapandığı, yine sürekli suda kür edilen ECC 1.2 H-KF numunesinin 436 µm seviyesindeki çatlağının yalnızca 30. günde kapandığı gözlenmiştir.

Kendiliğinden iyileşme oranı aşağıda eşitlik 4.1’de verilmiştir.

$$\text{Kendiliğinden İyileşme Oranı, \%} = \left( \frac{(\text{ÇG } 28.\text{gün} - \text{ÇG } i.\text{gün})}{\text{ÇG } 28.\text{gün}} \times 100 \right) \quad (4.1)$$

Şekil 4.13. 28 günlük ön yüklennmiş silindir numunelerin çatlak iyileşme oranları



Çizelge 4.10. 180 günlük silindir numunelerin ön yüklemeleri ve ileri yaşlarda kaydedilen çatlak nitelikleri

| Karışım Adı   | Kür Koşulları | 180  |         | 180+15 |         | 180+30 |         | 180+60 |         | 180+90 |         |
|---------------|---------------|------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
|               |               | TÇ S | ÇG (µm) | TÇ S   | ÇG (µm) | TÇ S   | ÇG (µm) | TÇ S   | ÇG (µm) | TÇ S   | ÇG (µm) |
| ECC 1.2 L-K   | SS            | 6    | 119     | 5      | 113     | 5      | 111     | 5      | 104     | 5      | 58      |
|               | I/K           | 6    | 123     | 6      | 116     | 5      | 102     | 5      | 89      | 3      | 69      |
| ECC 1.2 L-KF  | SS            | 6    | 120     | 2      | 61      | 2      | 50      | 2      | 35      | 1      | 22      |
|               | I/K           | 6    | 120     | 4      | 94      | 4      | 91      | 4      | 88      | 3      | 51      |
| ECC 1.2 L-KNT | SS            | 6    | 217     | 6      | 187     | 2      | 126     | 2      | 83      | 2      | 64      |
|               | I/K           | 6    | 189     | 6      | 140     | 5      | 136     | 5      | 125     | 4      | 113     |
| ECC 1.2 H-K   | SS            | 4    | 233     | 4      | 190     | 2      | 154     | 2      | 101     | 2      | 90      |
|               | I/K           | 4    | 185     | 4      | 153     | 4      | 130     | 4      | 115     | 3      | 99      |
| ECC 1.2 H-KF  | SS            | 6    | 462     | 5      | 265     | 5      | 252     | 5      | 235     | 4      | 129     |
|               | I/K           | 5    | 362     | 5      | 309     | 5      | 279     | 5      | 271     | 3      | 265     |
| ECC 1.2 H-KNT | SS            | 6    | 191     | 3      | 150     | 2      | 118     | 1      | 87      | 1      | 50      |
|               | I/K           | 6    | 271     | 5      | 184     | 5      | 167     | 5      | 138     | 3      | 91      |
| ECC 2.2 L-K   | SS            | 6    | 177     | 6      | 168     | 5      | 164     | 5      | 160     | 5      | 153     |
|               | I/K           | 6    | 198     | 6      | 188     | 6      | 180     | 6      | 162     | 6      | 140     |
| ECC 2.2 L-KF  | SS            | 6    | 164     | 6      | 137     | 4      | 122     | 4      | 119     | 4      | 91      |
|               | I/K           | 6    | 171     | 6      | 149     | 6      | 133     | 6      | 118     | 6      | 109     |
| ECC 2.2 L-KNT | SS            | 4    | 171     | 3      | 164     | 3      | 137     | 3      | 131     | 3      | 90      |
|               | I/K           | 4    | 351     | 4      | 324     | 4      | 289     | 4      | 267     | 4      | 250     |
| ECC 2.2 H-K   | SS            | 6    | 282     | 5      | 244     | 4      | 116     | 4      | 109     | 4      | 66      |
|               | I/K           | 6    | 235     | 5      | 223     | 5      | 202     | 5      | 200     | 5      | 173     |
| ECC 2.2 H-KF  | SS            | 6    | 241     | 6      | 186     | 6      | 156     | 6      | 154     | 5      | 143     |
|               | I/K           | 6    | 366     | 6      | 322     | 6      | 321     | 6      | 320     | 6      | 279     |
| ECC 2.2 H-KNT | SS            | 5    | 181     | 5      | 147     | 5      | 139     | 4      | 138     | 4      | 137     |
|               | I/K           | 6    | 207     | 6      | 174     | 6      | 169     | 6      | 144     | 6      | 134     |

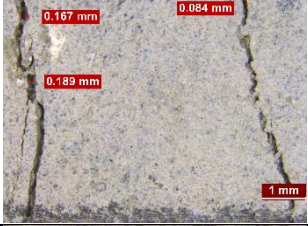
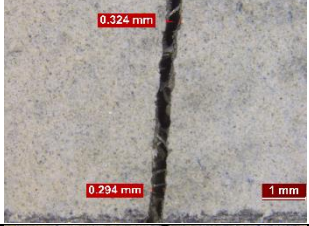
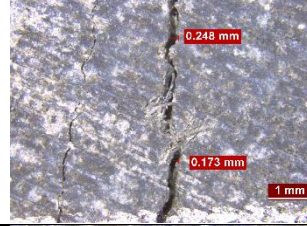
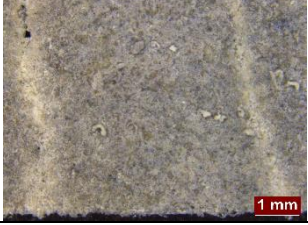
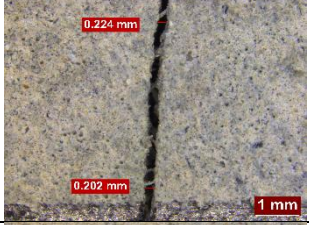
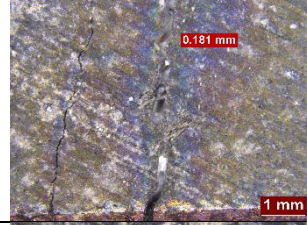
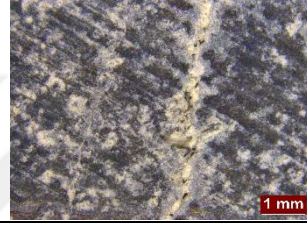
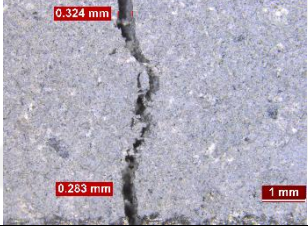
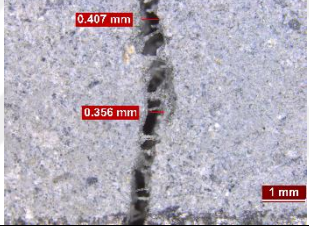
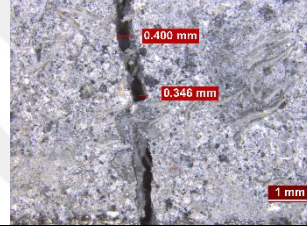
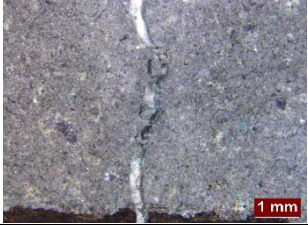
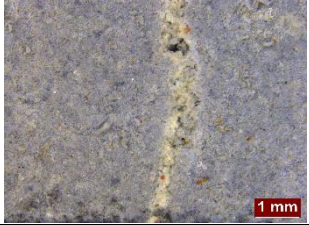
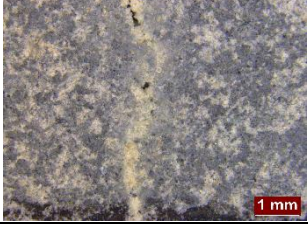
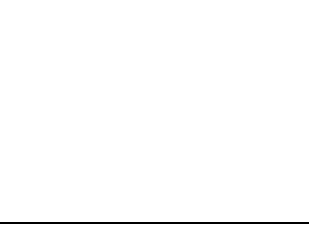
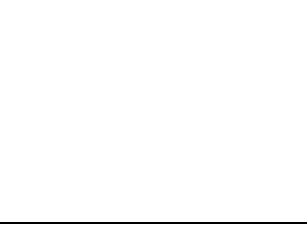
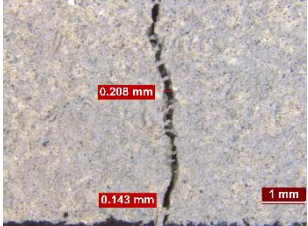
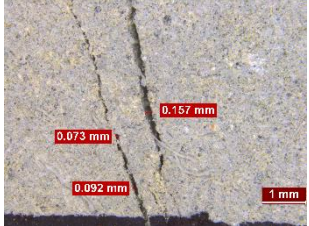
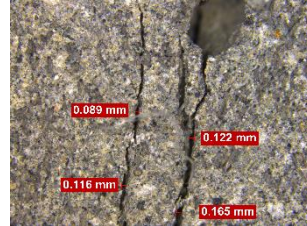
TÇS: Toplam Çatlak Sayısı, ÇG: Çatlak Genişliği, SS: Sürekli Su, I/K: Islanma-Kuruma

Çizelge 4.10'a göz atıldığında 180 günlük numunelerde çatlakların ortalama genişliği 119 ile 462 µm arasında değişmektedir. Çatlak ölçümleri daha önce de belirtildiği gibi sürekli su ve ıslanma-kuruma kür koşullarında bekletilen numunelerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Ortalama değerlere göre numunelerin hiçbiri kür koşulları ve karışım tipine bakılmaksızın tam olarak iyileşememiştir. Ancak bireysel olarak ECC 1.2 L-KF, ECC 1.2 L-KNT, ECC 1.2 H-KF, ECC 1.2 H-KNT ve ECC 2.2 L-Kontrol numunelerinden bazılarında tam olarak çatlak kapanması gözlemlenmiştir. Hemen hemen her seride 28 günlük numunelere benzer şekilde sürekli su kür koşulu ıslanma-kuruma kür koşuluna göre

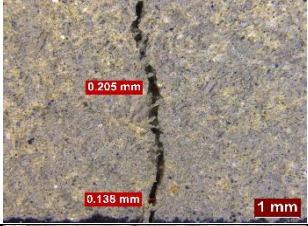
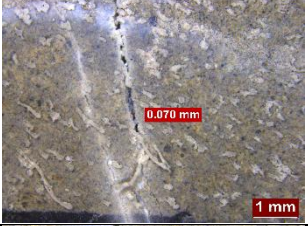
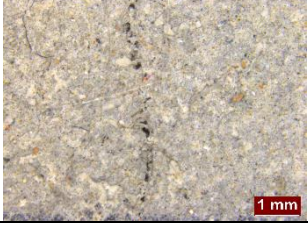
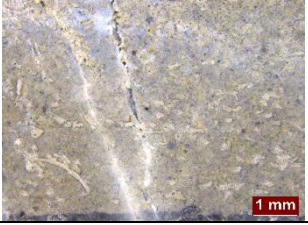
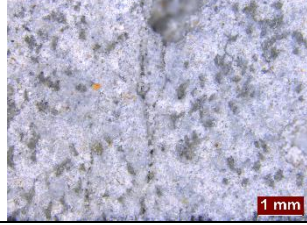
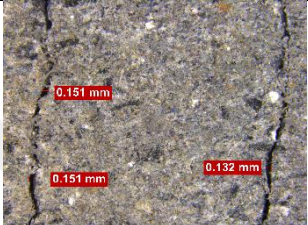
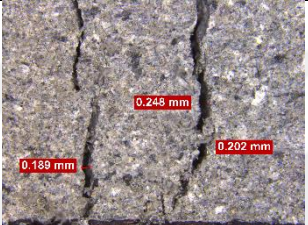
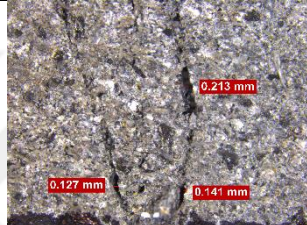
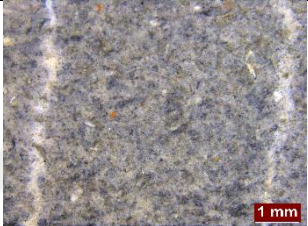
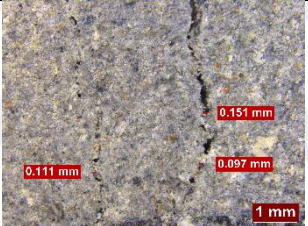
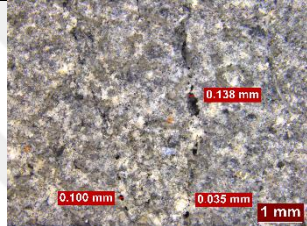
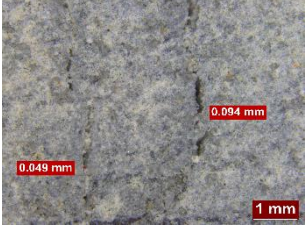
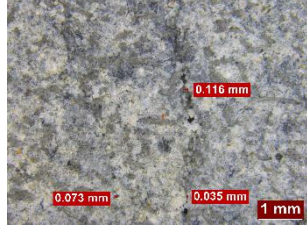
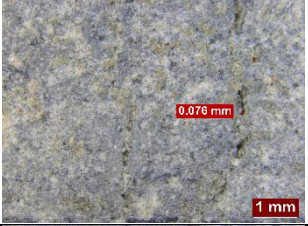
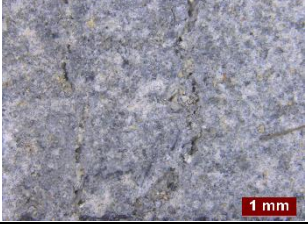
daha iyi çatlak kapama performansı sergilemiştir. UK/PÇ oranı 1,2 olan sürekli sudaki numunelerin iyileşme oranı %68 iken, aynı orandaki ıslanma-kuruma kür koşulunda iyileşmenin %47 seviyesinde kaldığı görülmektedir. Bunun yanında UK/PÇ oranı 2,2 olan sürekli sudaki numunelerin iyileşme oranı %41 iken, aynı orandaki numunelerin ıslanma-kuruma kür koşulundaki iyileşmesi %30 olarak gözlenmiştir. Bunun sebebi 28 günlük numunelerde açıklanan sebeple aynı olduğu düşünülmüştür. Yukarıdaki veriler doğrultusunda ayrıca UK/PÇ oranı 1,2 olan numunelerin çatlak kapanma oranının 2,2 olanlara göre daha yüksek olduğu anlaşılmıştır.

28 günlük numuneler ile 180 günlük numuneler kıyaslandığında, 28 günlük numunelere göre 180 günlük numunelerin iyileşme oranının daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak 28 günlük numunelerde hidrate olmamış numunelerin varlığı ile hidrasyon reaksiyonlarının devamlılığından söz edilebilmektedir. 180 günlük numunelerin matris olgunluğunun fazla olması ve hidrasyonu devam ettirecek yeterli ürünün bulunmaması çatlak iyileşmesini olumsuz etkileyen bir faktör olarak görülmektedir.

Resim 4.2’de, Çizelge 4.10’da verilen 180 günlük numunelerin çatlak genişliklerine ait görüntüler yer almıştır. Bu görüntüler her bir karışımdan iyileşmenin en belirgin olarak görüldüğü çatlak görüntüleridir. Çatlağın tam kapanma durumuna göre görüntülere yer verilmiş olup, bütün kür sürelerine yer verilmemiştir.

|         | ECC 1.2L-K                                                                          | ECC 1.2L-KF                                                                          | ECC 1.2-L-KNT                                                                         |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| (180+0) |    |    |    |
| 180+15  |    |    |    |
| 180+30  |    |    |    |
|         | ECC 1.2H-K                                                                          | ECC 1.2H-KF                                                                          | ECC 1.2-H-KNT                                                                         |
| (180+0) |   |   |   |
| 180+15  |  |  |  |
| 180+30  |  |  |  |
|         | ECC 2.2L-K                                                                          | ECC 2.2L-KF                                                                          | ECC 2.2-L-KNT                                                                         |
| (180+0) |  |  |  |

Resim 4.2. 180 günlük çatlaklı, kür edilmiş silindir numunelerin çatlak görüntüleri

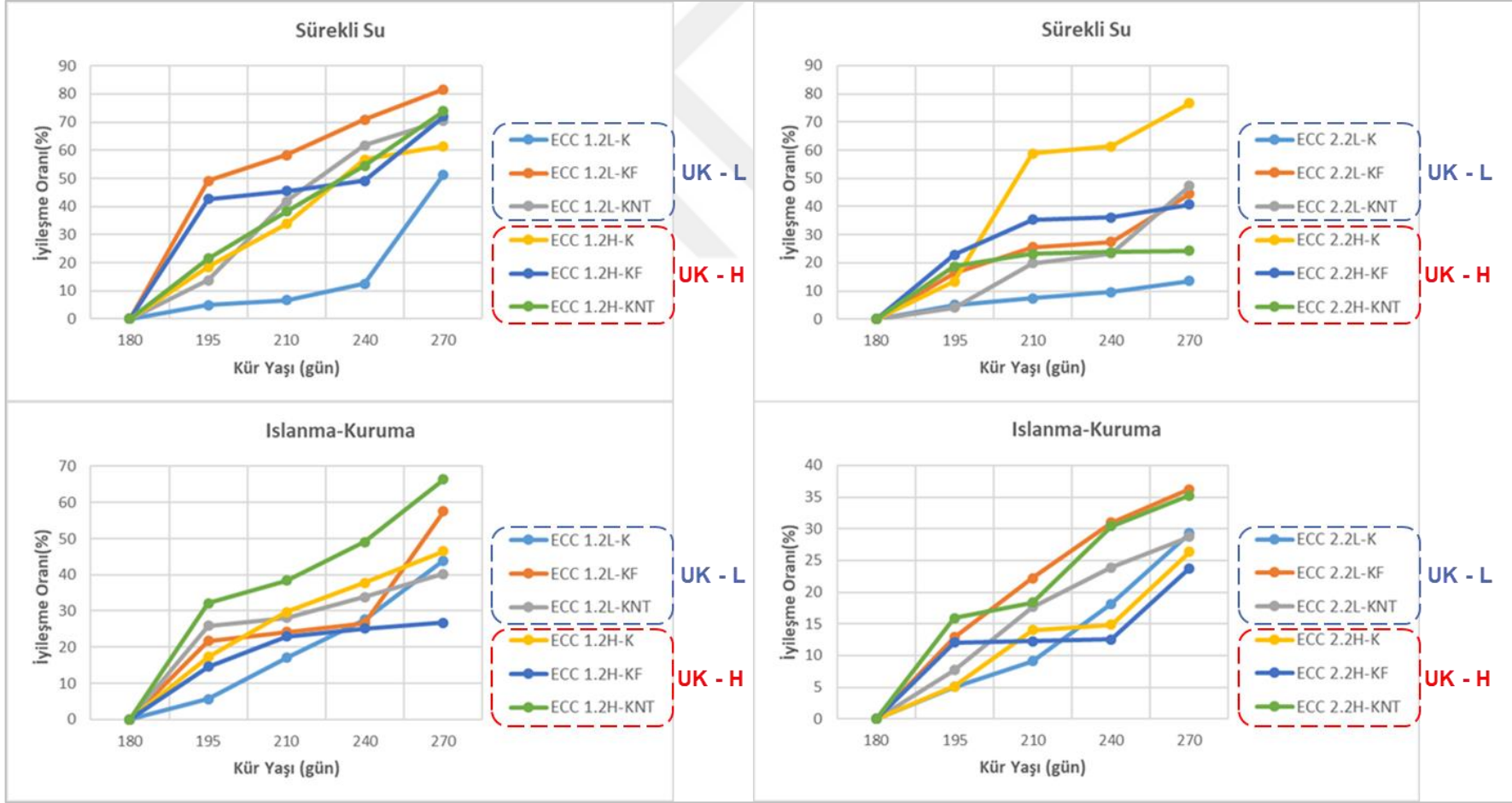
|         | ECC 2.2L-K                                                                         | ECC 2.2L-KF                                                                          | ECC 2.2-L-KNT                                                                         |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 180+15  |   |    |    |
| 180+30  |   |    |    |
|         | ECC 2.2H-K                                                                         | ECC 2.2H-KF                                                                          | ECC 2.2-H-KNT                                                                         |
| (180+0) |   |    |    |
| 180+15  |  |   |   |
| 180+30  |                                                                                    |  |  |
| 180+60  |                                                                                    |  |  |
| 180+90  |                                                                                    |  |                                                                                       |

Resim 4.2. (devam) 180 günlük çatlaklı, kür edilmiş silindir numunelerin çatlak görüntüleri

Şekil 4.14'te ise 180 günlük numunelerin bütün kür koşullarında iyileşme oranları grafiksel olarak verilmiştir. Grafikte yukarıda belirtildiği üzere sürekli suda iyileşme eğiliminin ıslanma-kuruma koşuluna göre daha fazla olduğu görülmüştür. Tez kapsamında dikkat çeken noktalardan bir tanesi, ECC 1.2 H-KF karışımına ait sürekli suda kür edilmiş bir numunenin 726  $\mu\text{m}$ 'lik bir çatlak genişliğinin 90 günde kapanmış olmasıdır.



Şekil 4.14. 28 günlük ön yüklennmiş silindirik numunelerin çatlak iyileşme oranları



#### 4.3.2. HKİG testi ile kendiliğinden iyileşmenin belirlenmesi

Daha önceki bölümlerde belirtildiği üzere literatürdeki mevcut çalışmalar incelendiğinde kendiliğinden iyileşme performansı ile ilgili çeşitli yöntemlerin mevcut olduğu görülecektir. Kendiliğinden iyileşme performansının hassas bir şekilde güvenilir ve pratik metotlar ile belirlenmesi son yıllarda daha önem kazanan bir konu haline gelmiştir. Bu yöntemlerden birisi de hızlı klor iyonu geçirimsizliği (HKİG) testidir. Bu tez kapsamında karışımların kendiliğinden iyileşme performansının belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden biri de HKİG deneyleridir. Daha önceki kısımlarda detayları verilen HKİG deneyi ile test edilen karışımların kür yaşları sırasıyla 28+0, 28+15, 28+30, 28+45, 28+60, 28+75 28+90 ve 180+0 180+15, 180+30, 180+60, 180+90 günlerdir. 180 günlük numunelerde daha az kür yaşının tercih edilmesinin sebebi, karışımların artan olgunluk yaşları ile doğru orantılı olarak HKİG değerlerindeki değişimlerin çok fazla meydana gelmemesidir. Söz konusu testlerde her karışım tipinden beşer adet numune hazırlanmıştır. Her karışıma ait iki numunede karşılaştırma yapmak amacıyla sağlam olarak test edilirken üç numuneye ise ön yükleme ile hasar verilmiştir. Ardından her iki çeşit numune tipi (çatlaklı: Ç ve sağlam: S) kendiliğinden iyileşmenin belirlenmesi için HKİG testi ile araştırılmıştır. Deneyler sırasında her karışıma ait numuneler teker teker ele alınarak incelenmiştir. Çatlaklı ve sağlam numunelere ait değerlerin ortalaması alınarak sonuca varılmıştır. Çizelge 4.11’de 28 günlük numunelerin HKİG testi sonuçları verilirken Çizelge 4.12’de ise 180 günlük numunelerin HKİG testi sonuçları gösterilmiştir. Ayrıca elektriksel direnç ölçümleri yapılan silindir numuneleri ile karışmaması için söz konusu numunelere numune numarası yanına “R” harfi eklenmiştir. Elde edilen sonuçlar Coulomb (C) cinsi değerindendir.

Çizelge 4.11. 28 günlük numunelerin HKİG testi sonuçları (C: Coulomb)

| Karışım   | Numune | 0.gün | 15.gün | 30.gün | 45.gün | 60.gün | 75.gün | 90.gün |
|-----------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1.2L-K    | 1-R(S) | 1039  | 564    | 409    | 283    | 269    | 158    | 119    |
|           | 2-R(S) | 1058  | 663    | 423    | 369    | 305    | 175    | 101    |
|           | 3-R(Ç) | 1401  | 950    | 796    | 656    | 584    | 433    | 314    |
|           | 4-R(Ç) | 1705  | 1680   | 1400   | 1372   | 1291   | 834    | 522    |
|           | 5-R(Ç) | 1817  | 1653   | 1467   | 1308   | 908    | 723    | 616    |
| 1.2 L-KF  | 1-R(S) | 1676  | 1575   | 967    | 897    | 750    | 617    | 169    |
|           | 2-R(S) | 1376  | 1472   | 1270   | 953    | 695    | 542    | 133    |
|           | 3-R(Ç) | 1813  | 1536   | 1445   | 1338   | 920    | 796    | 546    |
|           | 4-R(Ç) | 2033  | 1918   | 1648   | 1426   | 995    | 736    | 518    |
|           | 5-R(Ç) | 1863  | 1406   | 1344   | 1292   | 1200   | 703    | 466    |
| 1.2 L-KNT | 1-R(S) | 449   | 438    | 368    | 204    | 130    | 93     | 81     |
|           | 2-R(S) | 334   | 576    | 550    | 245    | 273    | 241    | 192    |
|           | 3-R(Ç) | 1253  | 950    | 858    | 765    | 312    | 259    | 216    |
|           | 4-R(Ç) | 1535  | 964    | 847    | 719    | 388    | 318    | 190    |
|           | 5-R(Ç) | 1324  | 916    | 859    | 707    | 319    | 222    | 170    |
| 1.2 H-K   | 1-R(S) | 1286  | 911    | 826    | 757    | 548    | 459    | 305    |
|           | 2-R(S) | 1058  | 1007   | 765    | 689    | 587    | 401    | 378    |
|           | 3-R(Ç) | 1912  | 1883   | 1728   | 1216   | 1033   | 920    | 821    |
|           | 4-R(Ç) | 1975  | 1813   | 1612   | 1378   | 1002   | 976    | 760    |
|           | 5-R(Ç) | 2950  | 2684   | 2425   | 1596   | 1201   | 1224   | 1176   |
| 1.2 H-KF  | 1-R(S) | 1001  | 901    | 844    | 725    | 695    | 642    | 461    |
|           | 2-R(S) | 1047  | 840    | 770    | 729    | 691    | 567    | 456    |
|           | 3-R(Ç) | 1423  | 1227   | 975    | 886    | 887    | 770    | 718    |
|           | 4-R(Ç) | 1498  | 1187   | 996    | 890    | 727    | 625    | 522    |
|           | 5-R(Ç) | 1798  | 1184   | 955    | 862    | 733    | 630    | 608    |
| 1.2 H-KNT | 1-R(S) | 462   | 428    | 369    | 367    | 357    | 333    | 317    |
|           | 2-R(S) | 304   | 270    | 263    | 250    | 234    | 222    | 215    |
|           | 3-R(Ç) | 1287  | 1132   | 829    | 735    | 626    | 523    | 450    |
|           | 4-R(Ç) | 920   | 834    | 774    | 678    | 599    | 487    | 338    |
|           | 5-R(Ç) | 1334  | 1261   | 920    | 807    | 718    | 625    | 427    |
| 2.2 L-K   | 1-R(S) | 896   | 742    | 632    | 581    | 456    | 365    | 212    |
|           | 2-R(S) | 946   | 642    | 578    | 531    | 414    | 344    | 225    |
|           | 3-R(Ç) | 1689  | 1579   | 1389   | 1113   | 974    | 631    | 514    |
|           | 4-R(Ç) | 1852  | 1560   | 1396   | 1318   | 968    | 669    | 450    |
|           | 5-R(Ç) | 1699  | 1537   | 1382   | 1320   | 824    | 735    | 454    |
| 2.2 L-KF  | 1-R(S) | 699   | 597    | 582    | 412    | 320    | 260    | 184    |
|           | 2-R(S) | 603   | 583    | 553    | 436    | 318    | 220    | 180    |
|           | 3-R(Ç) | 1410  | 1348   | 1260   | 1117   | 827    | 722    | 504    |
|           | 4-R(Ç) | 1225  | 1102   | 1002   | 912    | 904    | 764    | 588    |
|           | 5-R(Ç) | 1241  | 1042   | 944    | 861    | 728    | 686    | 515    |
| 2.2 L-KNT | 1-R(S) | 656   | 542    | 499    | 494    | 363    | 334    | 213    |
|           | 2-R(S) | 807   | 664    | 434    | 406    | 355    | 335    | 234    |
|           | 3-R(Ç) | 1485  | 905    | 800    | 431    | 315    | 231    | 110    |
|           | 4-R(Ç) | 1543  | 943    | 761    | 357    | 245    | 137    | 121    |
|           | 5-R(Ç) | 1692  | 910    | 525    | 241    | 135    | 94     | 79     |
| 2.2 H-K   | 1-R(S) | 1312  | 849    | 447    | 360    | 333    | 184    | 118    |
|           | 2-R(S) | 1374  | 674    | 552    | 386    | 253    | 152    | 116    |
|           | 3-R(Ç) | 3463  | 2733   | 2528   | 2336   | 1848   | 1236   | 819    |
|           | 4-R(Ç) | 3231  | 2887   | 2358   | 1942   | 1844   | 1220   | 731    |
|           | 5-R(Ç) | 2780  | 2394   | 2051   | 1878   | 1728   | 1187   | 856    |
| 2.2 H-KF  | 1-R(S) | 1475  | 1289   | 887    | 759    | 454    | 358    | 228    |
|           | 2-R(S) | 1201  | 1097   | 946    | 661    | 444    | 311    | 353    |
|           | 3-R(Ç) | 2054  | 1987   | 1457   | 1254   | 1077   | 874    | 605    |
|           | 4-R(Ç) | 2014  | 1756   | 1559   | 1362   | 1015   | 678    | 410    |
|           | 5-R(Ç) | 1874  | 1789   | 1458   | 1182   | 850    | 744    | 515    |
| 2.2 H-KNT | 1-R(S) | 299   | 208    | 184    | 116    | 107    | 91     | 95     |
|           | 2-R(S) | 228   | 219    | 155    | 112    | 102    | 95     | 91     |
|           | 3-R(Ç) | 1279  | 1104   | 1010   | 701    | 523    | 136    | 90     |
|           | 4-R(Ç) | 1417  | 1296   | 1005   | 789    | 523    | 143    | 98     |
|           | 5-R(Ç) | 1457  | 1239   | 1191   | 719    | 510    | 153    | 75     |

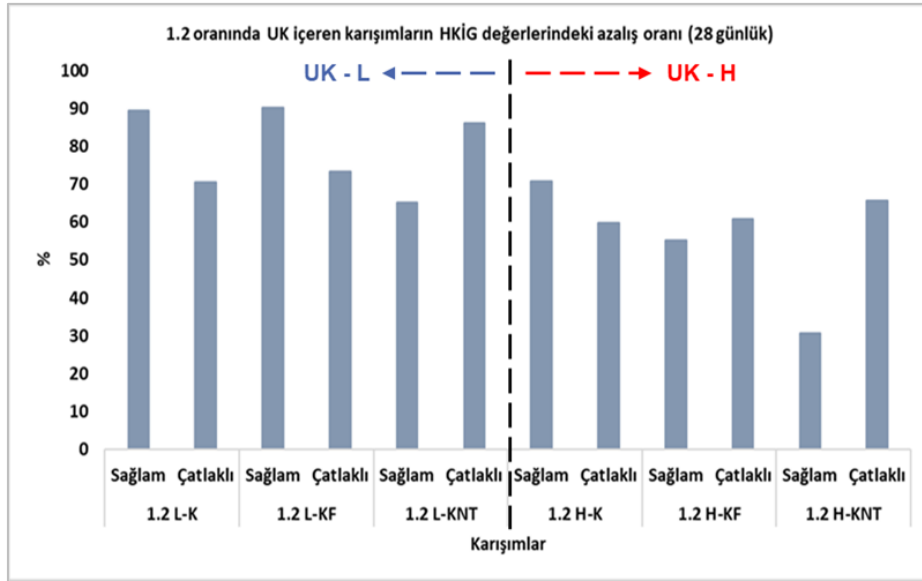
S: Sağlam, Ç: Çatlaklı (Ön yüklenmiş)

Çizelge 4.12. 180 günlük numunelerin HKİG testi sonuçları (C:Coulomb)

| Karışım   | Numune | 0.gün | 15.gün | 30.gün | 60.gün | 90.gün |
|-----------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 1.2 L-K   | 1-R(S) | 149   | 116    | 94     | 92     | 83     |
|           | 2-R(S) | 135   | 102    | 95     | 85     | 85     |
|           | 3-R(Ç) | 211   | 209    | 186    | 155    | 141    |
|           | 4-R(Ç) | 243   | 201    | 174    | 164    | 124    |
|           | 5-R(Ç) | 216   | 207    | 180    | 167    | 117    |
| 1.2 L-KF  | 1-R(S) | 136   | 97     | 93     | 82     | 75     |
|           | 2-R(S) | 128   | 94     | 86     | 79     | 70     |
|           | 3-R(Ç) | 278   | 155    | 117    | 108    | 95     |
|           | 4-R(Ç) | 296   | 198    | 136    | 100    | 95     |
|           | 5-R(Ç) | 199   | 122    | 99     | 85     | 81     |
| 1.2 L-KNT | 1-R(S) | 124   | 98     | 93     | 92     | 85     |
|           | 2-R(S) | 115   | 105    | 98     | 89     | 83     |
|           | 3-R(Ç) | 188   | 133    | 117    | 103    | 95     |
|           | 4-R(Ç) | 186   | 140    | 107    | 96     | 85     |
|           | 5-R(Ç) | 152   | 140    | 129    | 115    | 93     |
| 1.2 H-K   | 1-R(S) | 211   | 171    | 170    | 159    | 144    |
|           | 2-R(S) | 234   | 219    | 201    | 170    | 158    |
|           | 3-R(Ç) | 326   | 319    | 223    | 203    | 96     |
|           | 4-R(Ç) | 361   | 358    | 234    | 204    | 104    |
|           | 5-R(Ç) | 334   | 314    | 257    | 187    | 111    |
| 1.2 H-KF  | 1-R(S) | 221   | 203    | 182    | 176    | 156    |
|           | 2-R(S) | 207   | 198    | 157    | 147    | 137    |
|           | 3-R(Ç) | 387   | 271    | 223    | 178    | 124    |
|           | 4-R(Ç) | 320   | 252    | 242    | 161    | 128    |
|           | 5-R(Ç) | 479   | 357    | 245    | 143    | 122    |
| 1.2 H-KNT | 1-R(S) | 174   | 135    | 118    | 94     | 83     |
|           | 2-R(S) | 175   | 162    | 119    | 105    | 91     |
|           | 3-R(Ç) | 341   | 185    | 165    | 114    | 100    |
|           | 4-R(Ç) | 277   | 140    | 130    | 123    | 83     |
|           | 5-R(Ç) | 234   | 168    | 126    | 121    | 109    |
| 2.2 L-K   | 1-R(S) | 201   | 186    | 132    | 125    | 113    |
|           | 2-R(S) | 214   | 180    | 135    | 118    | 109    |
|           | 3-R(Ç) | 377   | 318    | 278    | 210    | 105    |
|           | 4-R(Ç) | 313   | 288    | 183    | 167    | 114    |
|           | 5-R(Ç) | 366   | 281    | 210    | 146    | 107    |
| 2.2 L-KF  | 1-R(S) | 258   | 211    | 205    | 197    | 131    |
|           | 2-R(S) | 241   | 195    | 187    | 145    | 126    |
|           | 3-R(Ç) | 357   | 340    | 280    | 245    | 117    |
|           | 4-R(Ç) | 331   | 278    | 214    | 158    | 119    |
|           | 5-R(Ç) | 378   | 314    | 210    | 110    | 86     |
| 2.2 L-KNT | 1-R(S) | 209   | 147    | 124    | 120    | 88     |
|           | 2-R(S) | 150   | 133    | 126    | 91     | 79     |
|           | 3-R(Ç) | 329   | 188    | 128    | 90     | 85     |
|           | 4-R(Ç) | 325   | 179    | 141    | 91     | 89     |
|           | 5-R(Ç) | 285   | 177    | 121    | 94     | 89     |
| 2.2 H-K   | 1-R(S) | 257   | 218    | 146    | 122    | 119    |
|           | 2-R(S) | 344   | 284    | 128    | 125    | 95     |
|           | 3-R(Ç) | 364   | 249    | 231    | 145    | 109    |
|           | 4-R(Ç) | 498   | 312    | 247    | 244    | 114    |
|           | 5-R(Ç) | 416   | 318    | 217    | 143    | 84     |
| 2.2 H-KF  | 1-R(S) | 422   | 425    | 319    | 220    | 123    |
|           | 2-R(S) | 421   | 367    | 281    | 225    | 128    |
|           | 3-R(Ç) | 577   | 350    | 323    | 226    | 235    |
|           | 4-R(Ç) | 574   | 388    | 380    | 233    | 228    |
|           | 5-R(Ç) | 541   | 314    | 260    | 175    | 121    |
| 2.2 H-KNT | 1-R(S) | 118   | 91     | 84     | 74     | 73     |
|           | 2-R(S) | 128   | 97     | 89     | 84     | 82     |
|           | 3-R(Ç) | 345   | 252    | 173    | 123    | 88     |
|           | 4-R(Ç) | 221   | 140    | 116    | 99     | 92     |
|           | 5-R(Ç) | 273   | 214    | 173    | 106    | 94     |

S: Sağlam, Ç: Çatlaklı (Ön yüklenmiş)

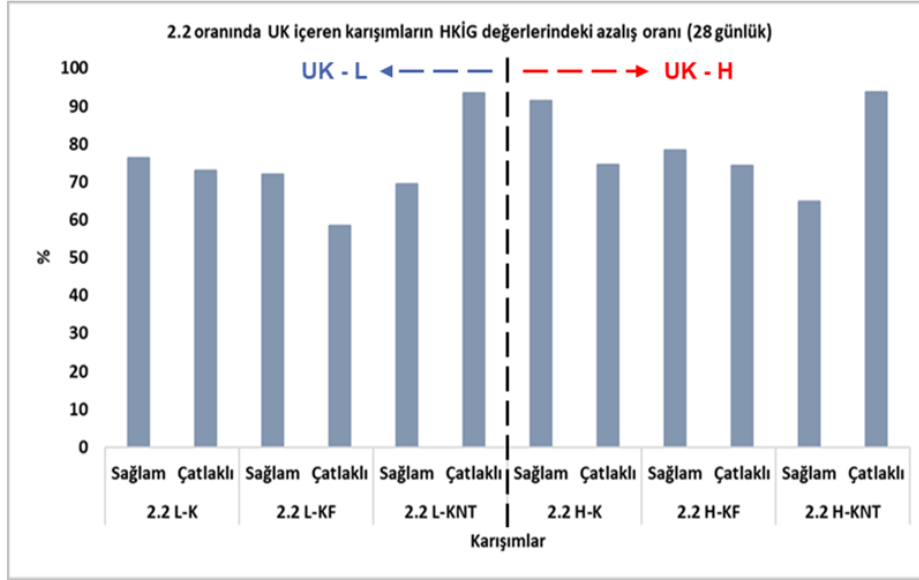
Çizelge 4.11’de 1,2 oranında ve düşük oranda kızdırma kaybı içeren uçucu kül karışımlarına ait numunelere (28 günlük) bakıldığında, sağlam haldeki ECC 1.2 L-K, ECC 1.2 L-KF ve ECC 1.2 L-KNT karışımları için sırasıyla ortalama değerler 1049, 1526 ve 392 Coulomb olarak kaydedilmiştir. Benzer şekilde bu durum 1,2 oranında ve yüksek oranda kızdırma kaybı içeren uçucu kül karışımlarında ise aynı karışım sırasıyla; 1172, 1024 ve 383 Coulomb olarak meydana gelmiştir. Çizelge 4.11’deki 1,2 oranında uçucu kül içeren karışımlara içerdiği kızdırma kaybından bağımsız olarak bakıldığı takdirde görülecektir ki KNT içeren numunelerin tamamı çok daha düşük HKİG değeri göstermiştir. Bu sonucu KNT malzemelerinin üstün fiziksel özellikleri ile açıklamak mümkündür. Her ne kadar inert bir malzeme de olsa KNT meydana getirdiği çekirdeklenme etkisi sayesinde yoğun bir mikro yapı oluşmasını diğer karışımlara kıyasla daha elverişli kılmıştır. Benzer sonuçlar aynı karışımların hasar verilmiş numunelerinin ortalama HKİG değerleri için de geçerlidir. Örneğin 1,2 oranında ve düşük oranda kızdırma kaybı içeren uçucu kül karışımlarına ait numunelere (28 günlük) bakıldığında, çatlatılmış haldeki ECC 1.2 L-K, ECC 1.2 L-KF ve ECC 1.2 L-KNT karışımları için sırasıyla ortalama değerler 1641, 1903 ve 1371 Coulomb olarak kaydedilmiştir. Benzer şekilde bu durum 1,2 oranında ve yüksek oranda kızdırma kaybı içeren uçucu küllü karışımlarda aynı karışım sırasıyla; 2279, 1573 ve 1180 Coulomb olarak gözlemlenmektedir. Çatlatılmış haldeki numunelerde de kızdırma kaybından bağımsız olarak KNT içeren numunelerin çatlaklı haldeki HKİG değerlerinin de daha düşük olduğunu görmek mümkündür (Çizelge 4.11). Çizelge 4.11’e ilave olarak karışımların HKİG değerlerine bağlı olarak kendiliğinden iyileşme performanslarını daha kolay irdelemek adına Şekil 4.15-16’da 28 günlük sağlam ve çatlaklı numunelerin yüzdesel olarak azalış oranları verilmiştir. Bu noktada karşılaştırma yapılırken çatlaklı numunelerin ortalama HKİG değerlerindeki düşüş oranının, sağlam numunelerin düşüş oranından daha fazla olmasını beklemek daha gerçekçi bir kendiliğinden iyileşme değerlendirmesi olacaktır. İlerleyen küre bağlı olarak nihai durumda (28+90 gün) ve başlangıçtaki (28+0 gün) HKİG değerleri karşılaştırıldığında farklı karışımların geçirimsizlik özellikleri üzerinden kendiliğinden iyileşme performansını gözlemlemek mümkündür. Örneğin Şekil 4.15’te kontrol ve KF içeren karışımlara ait ECC numunelerinin çatlaklı haldeki HKİG değerlerindeki azalış, aynı karışımların sağlam haldeki azalış oranlarından çok daha düşüktür (ECC-1.2H-KF hariç olmak üzere).



Şekil 4.15. 28 günlük sağlam ve çatlaklı numunelerin nihai durumda (28+90 gün) ve başlangıçtaki (28+0 gün) HKİG değerlerine göre azalış yüzdesi (ECC-1.2)

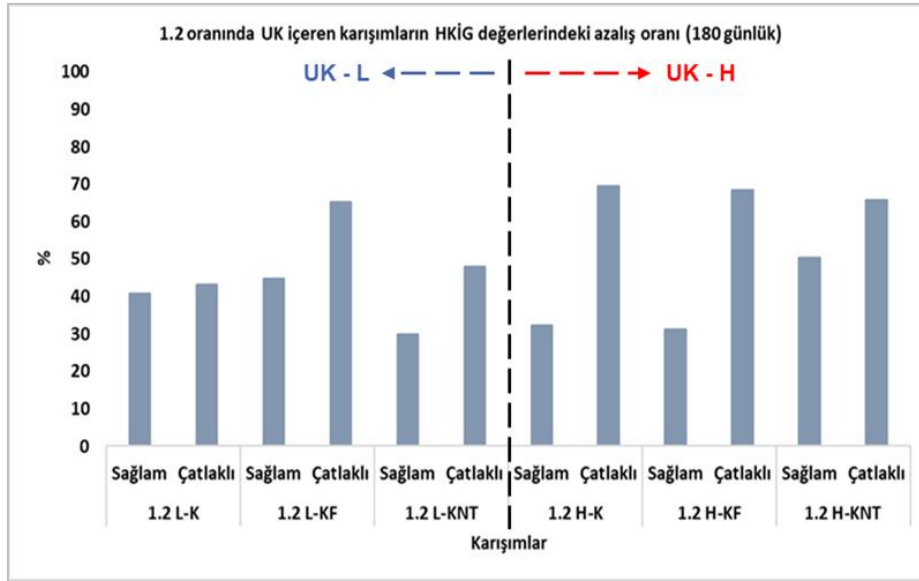
Ancak ECC-1.2 H-KNT karışımına ait numunelerin ortalama HKİG değerlerindeki düşüş göz önüne alındığında, kızdırma kaybı oranından bağımsız olmak üzere, KNT ihtiva eden çatlaklı numunelerin tamamı, aynı karışımların hasarsız haldeki (sağlam) HKİG değerlerinden daha yüksektir. Bu durum KNT içeren karışımların kendiliğinden iyileşme için daha olumlu koşullar yaratması ile açıklanabilir. Deney numunelerinde gözlemlenen KNT varlığında daha dar çatlakların oluştuğundan söz edilebilir. KNT tanecikleri, ECC karışımlarında kullanılan PVA liflerine aynı zamanda nano ve mikro ölçekte yardımcı olarak çatlak için gerekli olan enerji miktarını azaltmış ve bunun sonucunda daha dar açıklıklı çatlakların oluşmasına imkân sağlamıştır. Böylece gerek sağlam gerekse çatlaklı haldeki KNT içeren ECC numunelerinin HKİG değerlerindeki artış daha sınırlı seviyelerde meydana gelmiştir. Bu durum mevcut çatlakların kendiliğinden iyileşmesi için dar açıklıkta çok daha kolaylık sağlayarak çatlaklı haldeki KNT içeren numunelerin HKİG değerlerindeki düşüşün sağlam numunelere kıyasla çok daha belirgin şekilde meydana gelmesine neden olmuştur. Örneğin; düşük kızdırma kaybına sahip uçucu kül içeren sağlam haldeki ECC 1.2 L-KNT numunelerinin HKİG değerlerindeki düşüş %65 iken, çatlaklı halde düşüş %86'ya kadar çıkmıştır. Benzer şekilde bu durum yüksek oranda kızdırma kaybına sahip uçucu kül ve KNT içeren numunelerde sırasıyla %31 ve %66 olarak gerçekleşmiştir. Yüksek kızdırma kaybına sahip uçucu kül içeren numunelerdeki daha sınırlı kendiliğinden iyileşme performansı bu uçucu külü içeren karışımların daha az etkin olmasına bağlı olarak su ve nemin varlığında daha az katkı yapması ile ilişkilendirilebilir. Benzer şekilde karşılaştırma Şekil 4.16'da 2,2

oranında uçucu kül ihtiva eden ECC karışımlarına ait numuneler için verilmiştir. Bu karışımlarda da yukarıda bahsedilen benzer nedenlerden dolayı çatlaklı KNT içeren ECC numuneleri kızdırma kaybından bağımsız olmak üzere daha iyi bir kendiliğinden iyileşme performansı sağlamıştır.

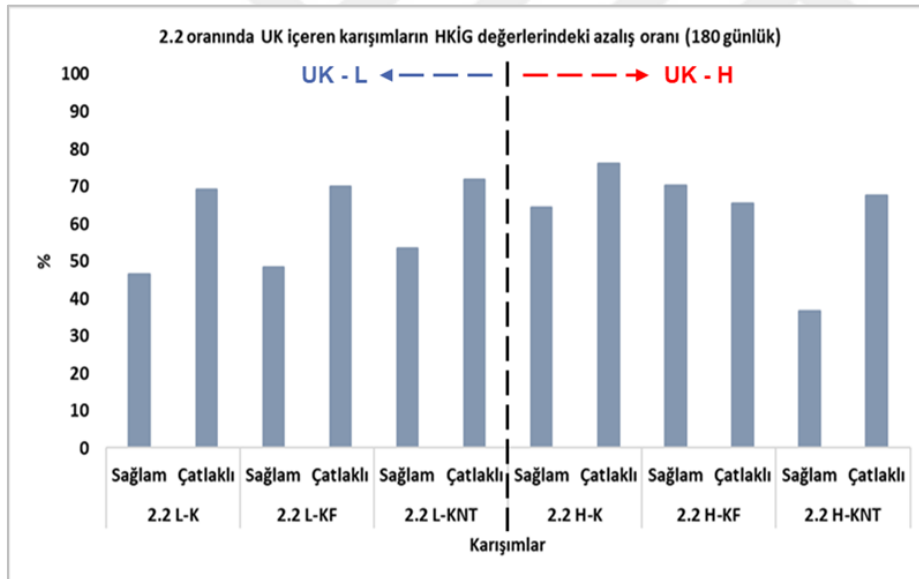


Şekil 4.16. 28 günlük sağlam ve çatlaklı numunelerin nihai durumda (28+90 gün) ve başlangıçtaki (28+0 gün) HKİG değerlerine göre azalış yüzdesi (ECC-2.2)

Daha ileri yaşlardaki ECC karışımlarının (180 günlük) HKİG değerlerine bağlı olarak (Çizelge 4.12), karışımların tamamında (ECC 2.2 H-KF hariç) çatlaklı haldeki numunelerin HKİG değerleri azalış oranı sağlam numunelerden daha yüksek meydana gelmiştir (Şekil 4.17-4.18). Bu sonuç daha ileri yaşlarda matrisin hidrasyon olgunluğunun tamamlanması ile sistemde kalan hidrate olmayan mevcut uçucu küllerin daha iyi bir kendiliğinden iyileşme ortamı hazırladığını işaret etmektedir. Özellikle bu durum daha yüksek oranda (ECC-2.2) uçucu kül ihtiva eden karışımlarda belirgin şekilde meydana gelmiştir. Bu durumun temel nedenini iki şekilde açıklamak mümkündür. İlk olarak daha yüksek hacimde kullanılan uçucu küller gözlemlendiği üzere ECC numunelerinin mikro çatlak genişliklerini azaltmaktadır. İkinci neden ise matriste uçucu kül oranının artmasına bağlı olarak, ilerleyen kür yaşlarında daha fazla hidrate olmamış uçucu kül taneciği varlığının bulunma ihtimalinden dolayı tane boyut dağılımı ile iyileşmiş daha doygun bir matris elde edilmiştir.



Şekil 4.17. 180 günlük sağlam ve çatlaklı numunelerin nihai durumda (180+90 gün) ve başlangıçtaki (180+0 gün) HKİG değerlerine göre azalış yüzdesi (ECC-1.2)



Şekil 4.18. 180 günlük sağlam ve çatlaklı numunelerin nihai durumda (180+90 gün) ve başlangıçtaki (180+0 gün) HKİG değerlerine göre azalış yüzdesi (ECC-2.2)

ECC karışımlarının tasarımlarında yüksek hacimlerde mineral katkı malzemesi kullanılmasıyla HKİG sonuçları açısından kendiliğinden iyileşmenin artış eğilimi sergilemesine benzer bir çalışma Şahmaran ve diğerleri (2013) tarafından da gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve literatürdeki çalışmalar göstermektedir ki daha yüksek hacimlerdeki uçucu kül kullanımı çatlak genişliklerini çok daha fazla azaltma imkânı sağlamaktadır (Yang ve diğerleri, 2007; Şahmaran ve Li, 2007). Bu durum yüksek

hacimlerde uçucu kül gibi endüstriyel yan ürünlerin kullanılmasının matris kırılma tokluğu değerlerini azaltmada etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca malzeme seçiminde kum boyutu ve kullanımı ile ilgili farklı oranların değiştirilmesinde daha fazla kolaylık sağlamaktadır. Yükleme altındaki dar çatlak genişliklerine sahip mikro çatlakların elde edilmesinin yanında otojen kendiliğinden iyileşme özelliğinin de tetiklenmesi mümkündür. Karışımlarda yüksek hacimlerde uçucu kül kullanılması, bu tip malzemelerin çimento esaslı sistemlerde daha uzun süre hidrate olmaması sayesinde kendiliğinden iyileşme davranışının daha iyi olmasına sebep olabilmektedir. Bu kısımdaki sonuçlara genel olarak bakıldığında özellikle her yaşta KNT içeren sağlam ECC numuneleri ile ileri yaşlardaki (180 günlük) ECC karışımlarında HKİG değerleri oldukça düşük kaydedilmiştir. Daha önceki kısımlarda aktarıldığı gibi HKİG testleri ASTM C 1202 (1997) standardına göre gerçekleştirilmiştir. İlgili standartta, farklı beton sınıflarına ait Coulomb değeri belirlenmiştir (Çizelge 4.13). Sonuçlar incelendiğinde çatlak haldeki KNT içeren numunelerin (ileri yaşlarda) dahi 100 Coulomb değerinden zaman zaman daha az değere sahip olması, polimer emdirilmiş betonlara benzer performans göstermesi açısından dikkat çekicidir.

Çizelge 4.13. ASTM C 1202 göre farklı betonlar için klorür geçirgenlik dereceleri

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

#### 4.3.3. Elektriksel direnç sonuçlarına göre kendiliğinden iyileşme ve kendiliğinden algılama performansı

Çizelge 4.14 ve 4.15'te 28 ve 180 günlük kırış numunelerinin sağlam ve ön yüklendikten sonra 15 günden 90 güne kadar (15'er günlük) sürekli su ve ıslanma-kuruma kür koşullarında ölçülen elektriksel direnç değerleri görülmektedir. Söz konusu değerler her kür koşulu için 4'er numunenin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

28 ve 180 günlük bütün numunelerde elektriksel direnç değerleri kür süresi boyunca artış göstermiştir. Hidratasyon/puzolanik reaksiyonlar sonucu oluşan C-S-H ve CH oluşumları, muhtemelen matris içindeki iletken yolların sayısını azaltarak daha yüksek öz direnç ile sonuçlanmıştır (Zhang ve diğerleri, 2007). KF ve KNT içeren numunelerin ED değerleri kontrol numunelerine göre daha düşük seyretmiştir. Bunun sebebi KF ve KNT'nin beton içindeki elektriksel iletkenliğini kolaylaştıracak iletken köprü görevi görmesi ve kontrol numunelerinde bulunan PVA liflerinin yalıtkan olmasından kaynaklı olduğu söylenebilir.

#### Ön yükleme sırasında kendiliğinden algılama performansı

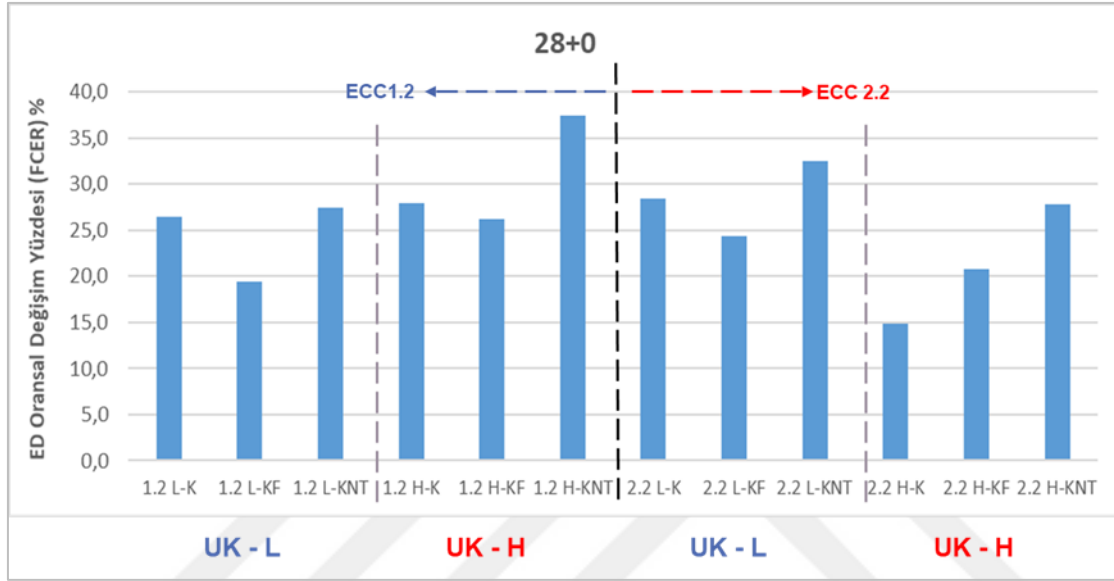
Bu bölümdeki ana hedef, elektriksel direnç ölçümleriyle kendi kendini algılama oranlarını niceliksel olarak değerlendirmektir. Kendini algılama verimliliğini değerlendirmek için, numunelerin ön yüklenmesinden önce ve sonra elektriksel direnç ölçümleri yapılmıştır. Nem durumunun etkisini ortadan kaldırmak için numuneler 24 saat boyunca 60°C sıcaklıkta tutulup ED ölçümü yapılmıştır. İlk ön çatlamadan önce nicel olarak kendi kendini algılaması, elektriksel dirençteki (FCER) oransal değişim yüzdesinin eşitlik 4.2'de belirtilen denklemle hesaplanmasıyla değerlendirilmiştir.

$$FCER = ((ED_0 - ED)/ED) \times 100 \quad (4.2)$$

Burada ED ve ED<sub>0</sub>, sırasıyla ön yüklemeden önce ve sonra sağlam ve önceden yüklenmiş numunelerin elektriksel dirençleridir.

28+0 günlük kırıntı numunelerin elektriksel direncindeki oransal değişim yüzdeleri (FCER) Şekil 4.19'da gösterilmektedir. Şekil 4.19'da görüldüğü üzere karışım türünden bağımsız olarak bütün numuneler, ön yükleme sonucunda oluşan hasar karşısında belli oranda algılama yeteneğine sahiptir. Karışımları UK oranı ve kızdırma kaybına bağlı olarak 3'erli gruplar halinde düşündüğümüzde, KNT içerikli karışımların FCER değerleri daha yüksek bulunmuştur. Yani hasar karşısında kendini algılama yeteneği ECC-KF ve ECC-Kontrol numunelerine göre daha hassastır. Karışımlar içerisinde en yüksek ED fraksiyonel değişimi %37,5 mertebelerindedir. KF-tabanlı ECC'ler daha yüksek piezoresistif davranışına sahip olsa da ilk ön yüklemeden sonra çatlak genişlikleri göz önüne alındığında (Çizelge 4.16), ön yüklemeden sonra (FCER) değerleri için ED tepkisinin KNT'den daha yüksek olması beklenmemektedir. Çünkü KNT içerikli numunelerin ortalama çatlak genişlikleri genel

olarak (ECC 1.2 L-KNT hariç) KF içeriklilerden daha yüksektir. Bunun yanında 12 mm uzunluğundaki KF'lerin kullanılması, muhtemelen açılmış mikro çatlakların içindeki lif-lif temasından dolayı yeni sürekli iletken yollar oluşturmuş ve bu da KNT-ECC'lere kıyasla mikro çatlak oluşumundan sonra fraksiyonel (oransal) değişiklikte daha düşük bir artışa yol açmış olabilir.

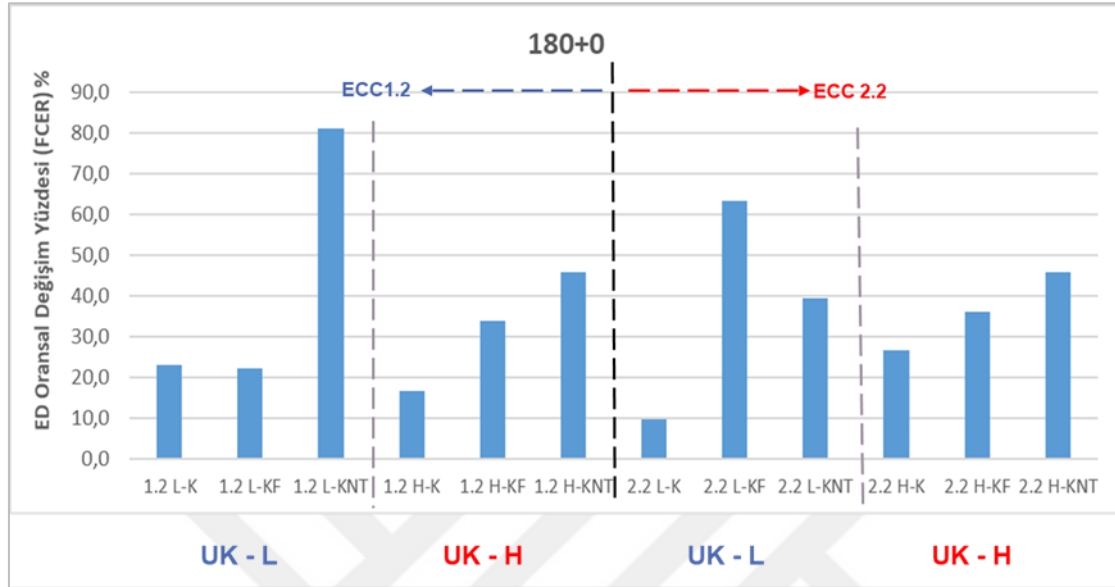


Şekil 4.19. 28 günlük karışımların elektriksel direncindeki oransal değişim yüzdeleri (FCER)

180 günlük numunelere göz atıldığında (Şekil 4.20), 28 günlük numunelerle benzer olarak ECC-KNT lerin (2.2 L-KNT hariç) daha yüksek FCER değerlerine sahip olduğu görülmektedir. En dikkat çeken değer ECC 1.2 L-KNT serisinde gözlemlenmiştir (%81,3). 28 günlük numunelerin aksine UK/PÇ oranı 2,2 olan 180 günlük numunelerde ECC 2.2 L-KF'nin performansı ECC-Kontrol ve ECC-KNT'lerden yüksek bulunmuştur. Bunun sebebi de yukarıda belirtildiği üzere KF-tabanlı ECC'lerin daha yüksek piezoresistif davranışı ve ilk ön yüklemeden sonra genel olarak daha büyük çatlak genişliklerine bağlanabilir (Çizelge 4.17). Çatlak genişliği artınca KF'nin matristen kopması iletken köprünün bozulması ile ED değerlerinin ani artmasına dolayısıyla FCER değerlerinin de artmasına neden olmuştur.

180 günlük numunelerde (özellikle karbon esaslı) kendini algılama performansı 28 günlük numunelere göre daha fazla görülmüştür. Bu durum ileri yaştaki numunelerin hidratasyon reaksiyonlarının da etkisi ile matris olgunluğuna bağlı kırılma tokluğunun fazla olmasına

bağlanabilir. Yani ileri yaşıta ön yükleme anında çatlakların matrisin tokluğuna bağlı olarak daha fazla açılması daha fazla ED değimi gözlenmesine neden olabilir.



Şekil 4.20. 180 günlük karışımların elektriksel direncindeki oransal değişim yüzdeleri (FCER)

Çizelge 4.14. 28 günlük kırış numunelerin ortalama ED sonuçları (Ω.m cinsindendir)

| Karışım   | Kür Koşulu | 28+0 Sağlamken | 28+0 Çatladıktan sonra | 28+15 | 28+30 | 28+45 | 28+60 | 28+75 | 28+90  |
|-----------|------------|----------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 1.2 L-K   | SS         | 33,6           | 42,6                   | 152,7 | 206,1 | 224,5 | 244,8 | 274,6 | 304,8  |
|           | I/K        | 35,1           | 44,3                   | 180,7 | 233,2 | 253,1 | 272,2 | 309,9 | 367,5  |
| 1.2 L-KF  | SS         | 3,6            | 4,4                    | 12,1  | 13,3  | 14,5  | 15,5  | 16,7  | 16,9   |
|           | I/K        | 3,9            | 4,6                    | 13,5  | 16,0  | 16,0  | 16,2  | 18,4  | 18,9   |
| 1.2 L-KNT | SS         | 17,4           | 21,8                   | 130,6 | 167,7 | 198,6 | 220,2 | 248,0 | 261,5  |
|           | I/K        | 19,4           | 25,2                   | 157,3 | 192,1 | 223,3 | 256,5 | 277,5 | 299,0  |
| 1.2 H-K   | SS         | 16,0           | 20,1                   | 109,4 | 118,1 | 152,2 | 186,0 | 199,1 | 205,9  |
|           | I/K        | 16,9           | 22,0                   | 131,4 | 140,3 | 192,6 | 202,0 | 212,7 | 224,3  |
| 1.2 H-KF  | SS         | 4,8            | 6,0                    | 14,3  | 16,2  | 20,3  | 21,5  | 24,2  | 26,1   |
|           | I/K        | 5,3            | 6,8                    | 16,9  | 21,0  | 22,5  | 25,6  | 27,3  | 30,0   |
| 1.2 H-KNT | SS         | 12,8           | 17,4                   | 51,0  | 71,9  | 91,7  | 95,8  | 102,8 | 122,4  |
|           | I/K        | 15,5           | 21,5                   | 81,0  | 91,5  | 105,0 | 127,0 | 159,4 | 172,7  |
| 2.2 L-K   | S.S        | 20,6           | 25,9                   | 481,5 | 597,6 | 687,1 | 798,4 | 798,4 | 914,5  |
|           | I/K        | 24,2           | 31,7                   | 580,6 | 723,4 | 793,5 | 846,8 | 955,6 | 1108,1 |
| 2.2 L-KF  | SS         | 1,2            | 1,5                    | 2,9   | 4,1   | 6,0   | 11,6  | 14,8  | 17,2   |
|           | I/K        | 1,7            | 2,2                    | 3,6   | 5,6   | 7,5   | 15,0  | 18,9  | 20,6   |
| 2.2 L-KNT | SS         | 25,6           | 32,4                   | 326,6 | 556,5 | 653,2 | 747,6 | 786,3 | 829,8  |
|           | I/K        | 31,5           | 43,5                   | 433,1 | 706,5 | 740,3 | 800,8 | 871,0 | 948,4  |
| 2.2 H-K   | SS         | 20,6           | 23,7                   | 114,0 | 275,8 | 316,9 | 353,2 | 382,3 | 418,5  |
|           | I/K        | 22,0           | 25,2                   | 136,0 | 333,9 | 379,8 | 411,3 | 447,6 | 476,6  |
| 2.2 H-KF  | SS         | 4,1            | 4,8                    | 14,3  | 20,8  | 29,8  | 31,5  | 35,1  | 37,3   |
|           | I/K        | 5,1            | 6,3                    | 18,4  | 30,2  | 36,5  | 41,1  | 48,4  | 55,6   |
| 2.2 H-KNT | SS         | 8,7            | 10,2                   | 37,5  | 54,4  | 70,6  | 84,0  | 95,1  | 100,4  |
|           | I/K        | 9,9            | 13,8                   | 58,3  | 76,7  | 93,1  | 102,8 | 108,9 | 121,0  |

Çizelge 4.15. 180 günlük kiriş numunelerinin ortalama ED sonuçları ( $\Omega$ .m cinsindendir)

| Karışım   | Kür Koşulu | 180+0<br>Sağlamken | 180+0<br>Çatladıktan<br>sonra | 180+15 | 180+30 | 180+45 | 180+60 | 180+75 | 180+90 |
|-----------|------------|--------------------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1.2 L-K   | SS         | 106,9              | 124,6                         | 177,6  | 239,3  | 247,7  | 256,5  | 275,8  | 295,8  |
|           | I/K        | 121,9              | 158,0                         | 194,8  | 302,4  | 305,1  | 313,3  | 321,8  | 329,8  |
| 1.2 L-KF  | SS         | 6,0                | 6,8                           | 8,5    | 12,6   | 13,3   | 13,5   | 14,8   | 16,7   |
|           | I/K        | 9,7                | 12,8                          | 15,5   | 19,6   | 20,1   | 18,1   | 22,7   | 26,1   |
| 1.2 L-KNT | SS         | 71,1               | 117,1                         | 132,3  | 154,6  | 157,7  | 164,3  | 165,2  | 170,6  |
|           | I/K        | 56,4               | 111,5                         | 133,3  | 150,5  | 149,0  | 144,7  | 151,2  | 156,8  |
| 1.2 H-K   | SS         | 46,2               | 52,0                          | 125,1  | 157,3  | 211,7  | 249,2  | 280,6  | 333,9  |
|           | I/K        | 58,1               | 70,2                          | 152,4  | 215,3  | 271,0  | 324,2  | 360,5  | 464,5  |
| 1.2 H-KF  | SS         | 6,8                | 8,0                           | 9,7    | 11,1   | 13,8   | 16,5   | 17,9   | 20,8   |
|           | I/K        | 7,3                | 10,9                          | 14,3   | 19,6   | 20,6   | 21,8   | 24,4   | 27,3   |
| 1.2 H-KNT | SS         | 47,4               | 60,5                          | 73,8   | 78,9   | 84,7   | 91,5   | 118,5  | 171,0  |
|           | I/K        | 60,5               | 99,2                          | 108,9  | 121,9  | 128,2  | 139,8  | 164,5  | 211,7  |
| 2.2 L-K   | SS         | 145,2              | 157,3                         | 203,2  | 244,4  | 263,7  | 304,8  | 346,0  | 452,4  |
|           | I/K        | 176,6              | 196,0                         | 225,0  | 273,4  | 302,4  | 341,1  | 384,7  | 481,5  |
| 2.2 L-KF  | SS         | 3,6                | 5,8                           | 6,8    | 8,5    | 10,2   | 13,5   | 16,9   | 23,2   |
|           | I/K        | 5,1                | 8,5                           | 9,9    | 11,9   | 14,8   | 20,6   | 26,6   | 31,7   |
| 2.2 L-KNT | SS         | 137,9              | 183,9                         | 217,7  | 234,7  | 256,5  | 271,0  | 285,5  | 297,6  |
|           | I/K        | 164,5              | 239,5                         | 254,0  | 273,4  | 292,7  | 302,4  | 316,9  | 350,8  |
| 2.2 H-K   | SS         | 118,5              | 137,9                         | 271,0  | 336,3  | 394,4  | 450,0  | 527,4  | 568,5  |
|           | I/K        | 123,4              | 169,4                         | 321,8  | 387,1  | 464,5  | 529,8  | 595,2  | 662,9  |
| 2.2 H-KF  | SS         | 3,1                | 4,1                           | 6,8    | 11,1   | 15,7   | 23,0   | 28,8   | 48,4   |
|           | I/K        | 4,1                | 5,8                           | 12,1   | 22,0   | 32,4   | 42,1   | 60,5   | 96,8   |
| 2.2 H-KNT | SS         | 19,4               | 27,1                          | 49,1   | 48,6   | 53,0   | 55,2   | 61,2   | 71,9   |
|           | I/K        | 22,5               | 34,1                          | 68,5   | 63,9   | 68,0   | 72,3   | 78,1   | 90,2   |

Çizelge 4.16. ECC kiriş numunelerinin yükleme anındaki (28+0) çatlak genişlikleri

| Karışım Adı   | Kür Koşulları | Çatlak Genişliği ( $\mu$ m) |          | Çatlak Sayısı |
|---------------|---------------|-----------------------------|----------|---------------|
|               |               | Ortalama                    | Maksimum |               |
| ECC 1.2 L-K   | SS            | 86                          | 294      | 9             |
|               | I/K           | 58                          | 202      | 9             |
| ECC 1.2 L-KF  | SS            | 131                         | 204      | 8             |
|               | I/K           | 138                         | 255      | 8             |
| ECC 1.2 L-KNT | SS            | 74                          | 124      | 7             |
|               | I/K           | 126                         | 182      | 7             |
| ECC 1.2 H-K   | SS            | 155                         | 570      | 15            |
|               | I/K           | 234                         | 674      | 9             |
| ECC 1.2 H-KF  | SS            | 262                         | 616      | 8             |
|               | I/K           | 109                         | 221      | 8             |
| ECC 1.2 H-KNT | SS            | 273                         | 409      | 7             |
|               | I/K           | 172                         | 235      | 8             |
| ECC 2.2 L-K   | SS            | 104                         | 275      | 19            |
|               | I/K           | 139                         | 247      | 13            |
| ECC 2.2 L-KF  | SS            | 186                         | 427      | 9             |
|               | I/K           | 161                         | 244      | 8             |
| ECC 2.2 L-KNT | SS            | 172                         | 520      | 11            |
|               | I/K           | 202                         | 1005     | 9             |
| ECC 2.2 H-K   | SS            | 243                         | 546      | 9             |
|               | I/K           | 286                         | 556      | 9             |
| ECC 2.2 H-KF  | SS            | 151                         | 254      | 9             |
|               | I/K           | 198                         | 318      | 9             |
| ECC 2.2 H-KNT | SS            | 313                         | 551      | 8             |
|               | I/K           | 349                         | 451      | 5             |

Çizelge 4.17. ECC kiriş numunelerin yükleme anındaki (180+0) çatlak genişlikleri

| Karışım Adı   | Kür Koşulları | Çatlak Genişliği (μm) |          | Çatlak Sayısı |
|---------------|---------------|-----------------------|----------|---------------|
|               |               | Ortalama              | Maksimum |               |
| ECC 1.2 L-K   | SS            | 126                   | 176      | 6             |
|               | I/K           | 137                   | 332      | 8             |
| ECC 1.2 L-KF  | SS            | 141                   | 194      | 8             |
|               | I/K           | 148                   | 194      | 8             |
| ECC 1.2 L-KNT | SS            | 149                   | 246      | 8             |
|               | I/K           | 252                   | 651      | 8             |
| ECC 1.2 H-K   | SS            | 185                   | 408      | 7             |
|               | I/K           | 195                   | 399      | 7             |
| ECC 1.2 H-KF  | SS            | 200                   | 327      | 8             |
|               | I/K           | 206                   | 507      | 8             |
| ECC 1.2 H-KNT | SS            | 116                   | 289      | 8             |
|               | I/K           | 175                   | 559      | 7             |
| ECC 2.2 L-K   | SS            | 170                   | 642      | 9             |
|               | I/K           | 124                   | 360      | 8             |
| ECC 2.2 L-KF  | SS            | 199                   | 507      | 8             |
|               | I/K           | 188                   | 294      | 8             |
| ECC 2.2 L-KNT | SS            | 174                   | 351      | 7             |
|               | I/K           | 176                   | 332      | 8             |
| ECC 2.2 H-K   | SS            | 229                   | 362      | 8             |
|               | I/K           | 212                   | 373      | 8             |
| ECC 2.2 H-KF  | SS            | 210                   | 305      | 8             |
|               | I/K           | 215                   | 305      | 8             |
| ECC 2.2 H-KNT | SS            | 273                   | 413      | 7             |
|               | I/K           | 303                   | 453      | 8             |

#### Ön yüklenmiş kiriş numunelerinin ED değerleri açısından kendiliğinden iyileşme performansı

Aynı anda kendiliğinden iyileşme ve kendiliğinden algılama özelliklerini izlemek için numunelerin elektriksel direnç değişimleri belirlenmiş ve ölçümler Çizelge 4.14 ve 4.15'te verilmiştir. Elektriksel dirence bağlı kendiliğinden iyileşme performansı, farklı kür yaşlarında elde edilen ED'lerin, ön yüklemeden sonra ölçülen ilk sonuçlarla karşılaştırılmasıyla hesaplanmıştır. Eşitlik 4.3'te ED direnç geri kazanım oranı hesabı görülmektedir.

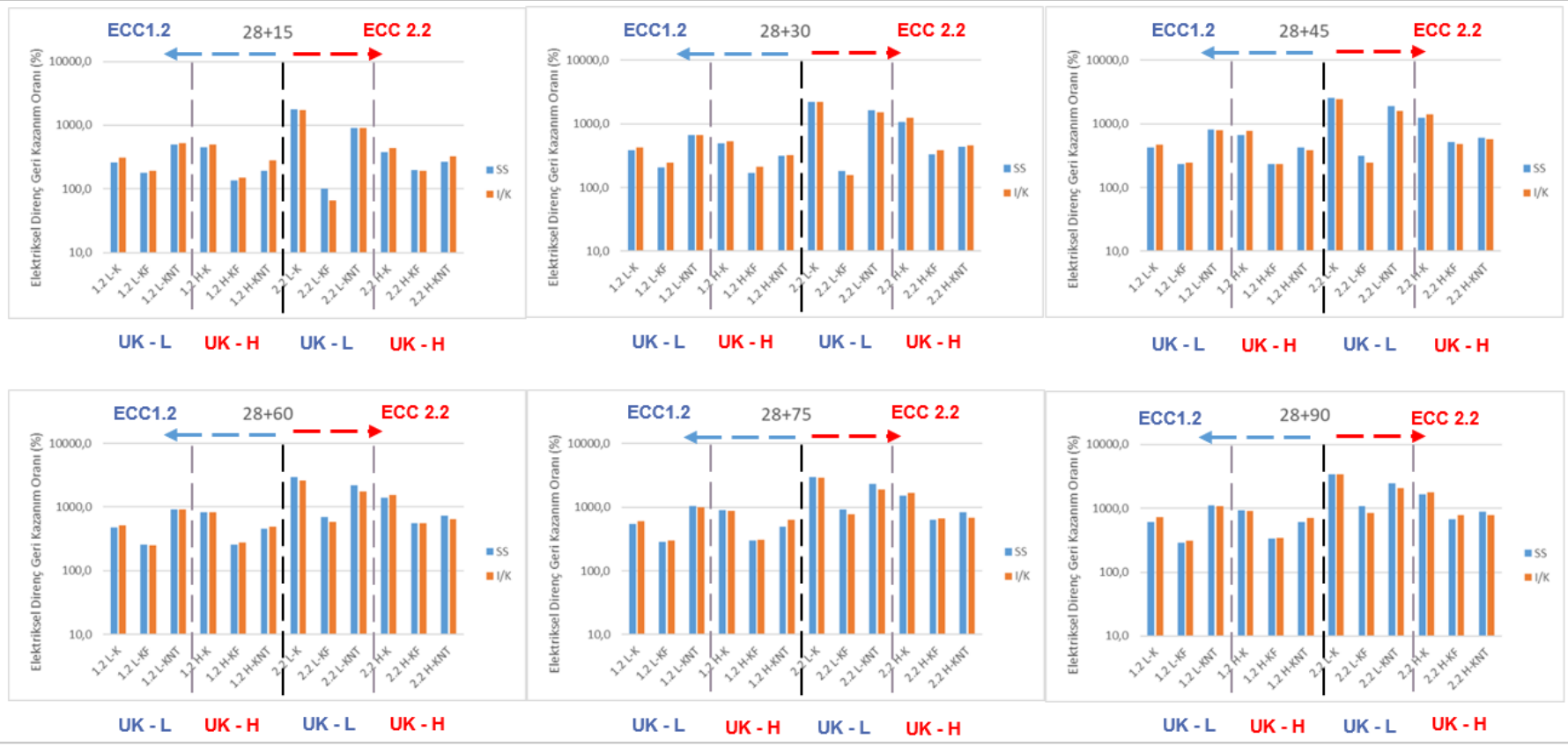
$$ED \text{ direnç geri kazanım} = ((ED_n - ED_0)/ED_0) \times 100 \quad (4.3)$$

Bu eşitlikte  $ED_n$  ve  $ED_0$  sırasıyla ön yüklenmiş numunelerin n. ve 0. gündeki ED değerleridir. Aşağıda Şekil 4.21 ve 4.22'de 28 ve 180 günlük numunelerin ortalama ED değerlerine göre elektriksel direnç geri kazanım oranı verilmiştir.

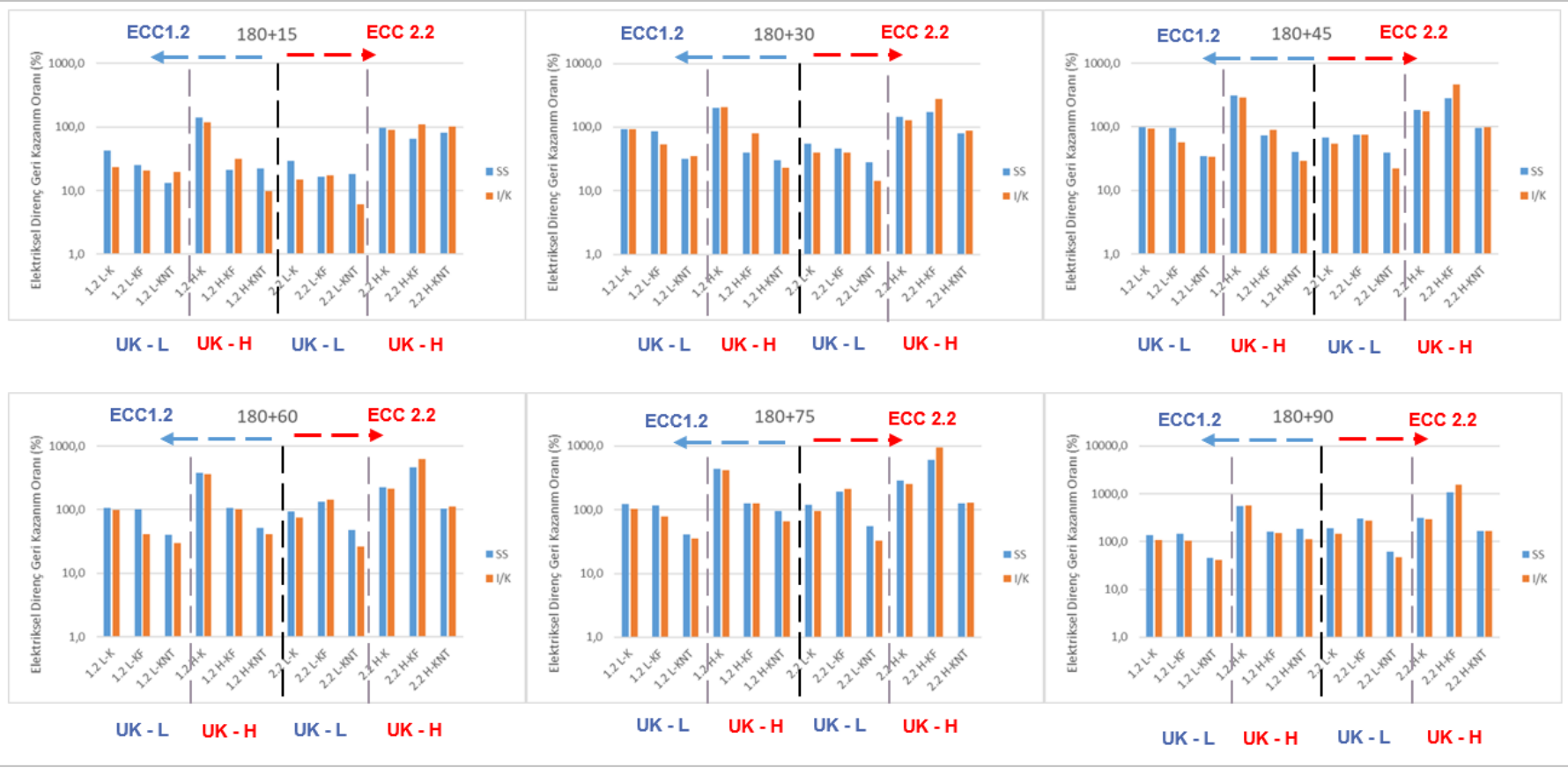
Şekil 4.21’de görüleceği üzere, 28 günlük numunelerde en yüksek ED geri kazanım oranı sürekli su ve ıslanma-kuruma kür koşullarında, 15 günlük kür süresi için (28+15) sırasıyla %1759,8 ve %1732,1, 90 günlük kür süresi için (28+90) sırasıyla %3432,7 ve %3396,2 ile ECC 2,2 L-Kontrol karışımında hesaplanmıştır. Daha sonra en yüksek oran ECC 2.2 L-KNT karışımında gözlemlenmiştir. 15 ve 90 günlük kür süresi için bu oran kür koşullarına göre sırasıyla %907,5; %894,4 ve %2459,7; %2077,8 mertebesindedir. Kontrol karışımı için bu oran 15 günden 90 güne kadar yaklaşık 2 katına çıkmışken, KNT karışımı için bu oran yaklaşık 2,5 kattır. Yani KNT içerikli ECC’lerdeki iyileşme, kür sürelerine göre oransal olarak kontrol numunelerine göre daha fazla artış göstermiştir. Ancak kontrol numunelerinin ED geri kazanım oranının (sayısal) KF ve KNT içerikli numunelere göre fazla olması şaşırtıcı bulunmuştur. Bunun nedeni kontrol numunelerin KF ve KNT içerikli numunelere göre daha dar çatlak açıklığı olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

180 günlük numunelerde ED geri kazanım oranına bakıldığında (Şekil 4.22), 28 günlük numunelere göre ciddi derecede düşük bulunmuştur. 180 günlük numunelerde 15 gün kür süresi için (180+15) en yüksek oran yaklaşık %140 (ECC 1.2 H-Kontrol), 90 gün kür süresi için (180+90) ise %1566 (ECC 2.2 H-KF) seviyesindedir. 28 günlük numunelerde (28+90) ise önceden bahsedildiği üzere bu oran yaklaşık olarak %3400 seviyelerini bulmuştur. Bunun nedeni erken yaşta devam eden hidrasyon/puzolanik reaksiyonların fazla olmasının iyileşmeye etkisi olduğu düşünülmektedir. Bu durum erken yaşta iyileşme oranının ileri yaşa göre daha fazla olacağını göstermektedir. Şekil 4.22’de grafikler üzerinden genel olarak KF içerikli ECC numuneleri KNT içeriklilere göre daha fazla iyileşme oranına sahiptir. Bununla birlikte, 15 günlük kür süresinde uçucu kül oranı düşük olan (1,2) ECC 1.2 H-Kontrol numunesinin iyileşme oranı sürekli su ve ıslanma-kuruma kür koşullarında %140,5 ve %117,2; 90 günde %514,9 ve %562,1 seviyesinde iken ECC 2.2 H-KF karışımında ise 15 günlük kür süresinde bu oran sırasıyla %64,7 ve %108,3; 90 gün için ise %1076,5 ve %1566,7’dir. Dolayısıyla KF içerikli söz konusu numunelerde iyileşme oranı ciddi derecede yüksek bulunmuştur. Ayrıca KF içerikli aynı numuneler ıslanma-kuruma kür koşulunda da daha yüksek mertebede iyileşme performansı göstermiştir.

Şekil 4.21. 28 günlük kırış numunelerinin elektriksel direnç geri kazanım oranı



Şekil 4.22. 180 günlük kirış numunelerin elektriksel direnç geri kazanım oranı



#### 4.3.4. Kendi kendine iyileşmenin eğilme performansı üzerine etkileri

Bu bölümde kendiliğinden iyileşme performansının değerlendirilmesinde; daha önceki bölümde sağlam prizmatik numunelerin dört noktalı eğilmede çekme deneylerindeki eğilme dayanımları ile orta açıklık deformasyon kapasitelerinin, %75 oranında (maksimum gerilmenin %75'i) ön yükleme ile hasar verilmiş 90 gün boyunca sürekli su ve ıslanma-kuruma kürü yapılmış ve tekrar teste tabi tutulmuş numunelerin eğilme dayanımları ile orta açıklık deformasyon kapasitelerine kıyas yapılması esas alınmıştır.

Çizelge 4.18-4.21'te 28 ve 180 günlük prizmatik numunelerin sağlam olarak, çatlak oluşturularak ve çatlakların 90 günlük kür (sürekli su, ıslanma-kuruma) süresi sonrasında tekrar test edilmesi ile oluşan eğilme dayanımı ve orta açıklık deformasyon kapasiteleri verilmiştir. Eğilmede çekme deneyi her bir karışım için 4 adet sağlam, çatlattırılmış numunelerde ise; 4 adet sürekli su, 4 adet de ıslanma-kuruma kür koşullarında bulundurulmuş numuneler için yapılmıştır. Çizelgedeki veriler ise numunelerin sonuçları arasındaki farkın çok büyük olması durumunda birbirine yakın olan değerlerin alınması ile 2 ila 4 numunenin verilerinin ortalaması dikkate alınarak elde edilmiştir. Başka bir deyişle, hata payını azaltmak için değerler arasında tutarsızlık olan bazı numuneler ihmal edilmiştir. Bu bölümde sağlam ve ön yüklenip kür edilmiş numunelerin eğilme dayanım sonuçlarının mukayesesine göre kendiliğinden iyileşmenin etkisi yorumlanmıştır.

Çizelge 4.18'e bakıldığında UK/PC oranı 1,2 olan düşük kızdırma kaybı içeren UK karışımları (UK-L) için sürekli su kür koşullarında; 28+90 günlük sürekli su küründeki numunelerin eğilme dayanımları 28 günlük sağlam numunelere göre, kontrol ve KNT içerikli karışımlar için sırasıyla %18,9 ve %37,3 artmışken, KF içerikli karışımlar için %17,4 azalma göstermiştir. Hasar verilip kür edildikten sonra sağlam numunelere göre; kontrol ve KNT içerikli numunelerin eğilme dayanımında iyileşme sağlanırken KF içerikli numunelerde aynı davranış saptanamaması dikkat çekmektedir. Esasen PVA liflerine (1600 MPa gerilme mukavemeti, 40 GPa elastik modülü) kıyasla KF'nin (4137 MPa ve 242 GPa) önemli ölçüde daha yüksek gerilme mukavemeti ve elastik modülü değeri olması KF nin daha fazla eğilme dayanımı sağlamasına neden olabileceği düşünülebilirdi. Ancak S/BM oranının 0,27 gibi düşük bir değer olması PVA liflerinin yanında KF liflerinin birlikte kullanılması betonun işlenebilirliğini azaltabileceği gibi homojen dağılmasına engel olabilir. Söz konusu durum beton matrisi ile lif arayüz bölgesinde kusurların olmasına neden

olabilmektedir. Bununla birlikte, meydana gelen hidrasyon ürünlerindeki daha düzensiz gelişim inert bir malzeme ve mikro ölçekte olan KF malzemelerinin etrafında daha kusurlu bölgeler meydana getirmiş olabilir. Bu sebeplerden dolayı KF içerikli numunelerde eğilme dayanımında azalma olabilmektedir. Bölüm 4.2'deki mekanik olarak testi yapılmış numunelerin eğilme dayanımı sonuçlarına baktığımızda da benzer şekilde KF içerikli numunelerin eğilme dayanımı değerleri kontrol numunelerine göre daha düşük çıkmıştır. Yüksek kızdırma kaybı içeren UK karışımları için (UK-H) sürekli su kür koşullarında; 28+90 günlük sürekli su küründeki numunelerin eğilme dayanımları 28 günlük sağlam numunelere göre, kontrol, KF ve KNT içerikli karışımlar için sırasıyla %24,7; %42,9 ve %10,3 azalma göstermiştir.

Sürekli su kür koşullarında bulunan numunelerin orta açıklık deformasyon kapasiteleri ile ilgili olarak, sağlam numunelere göre 28+90 günlük numunelerin deformasyon kapasiteleri, düşük kızdırma kaybı içeren UK-L'ye sahip kontrol ve KF içerikli karışımlar için sırasıyla %15,5 ve %20,7 azalmışken, KNT içerikli karışımlar için %20,8'lik artış göstermiştir. Sonuçlara göre, sadece KNT içerikli karışımlarda hem eğilme dayanımında hem de deformasyon kapasitesinde artış görülmüştür. Bu durum, KNT'nin hem dayanıma katkı sağladığını, hem de gerilme altında iyi bir sünek malzeme olduğunu kanıtlar niteliktedir. Bunun yanında yüksek kızdırma kaybı içeren UK-H karışımları için ise tüm karışımlar için eğilme dayanımındaki sonuçlara paralel olarak orta açıklık deformasyon kapasitelerinin azaldığı görülmüştür. Bu sonuç Siad ve diğerleri (2018)'nin yapmış olduğu çalışmada; benzer özellikteki kiriş numunelerinden elde edilen matrisin olgunlaşması ile eğilme dayanımının artışına bağlı olarak deformasyon kapasitesindeki düşüşlerle uyumlu değildir. Söz konusu numunelerde S/BM oranının düşük olması malzemelerin homojen dağılmasına engel olabileceği gibi, matriste meydana gelebilecek boşluklardan dolayı hem eğilme dayanımı hem de deformasyon kapasitesinin azalmasına da neden olabileceği düşünülmektedir.

Çizelge 4.18'de, ıslanma-kuruma kür koşullarında düşük kızdırma kaybı içeren UK-L karışımlarında eğilme dayanımı sürekli su kür koşullarındaki ile benzer davranışlar göstermiştir. Yani 28+90 günlük kürden sonra yapılan dört noktasal eğilme deneyinde kontrol ve KNT içerikli numunelerde sağlam numunelere göre %10'un üzerinde artışlar yaşanırken, KF içerikli numunelerin eğilme dayanımında yaklaşık %9 kayıp yaşanmıştır. Yüksek kızdırma kaybı içeren UK-H karışımlarında ise 28+90 günlük numunelerin eğilme

dayanımı sonuçları sağlam numunelere göre, kontrol ve KF içeren numuneler için sırasıyla, yaklaşık %5,8 ve %3,8 azalmışken, KNT içerikli numuneler için %17,9 artış gözlemlenmiştir. Islanma-kuruma kür koşullarında bulunan numunelerin orta açıklık deformasyon kapasiteleri ile ilgili olarak ise; sağlam numunelere göre kür edilmiş (28+90 günlük) genelinde eğilme dayanımı ile orantılı davranış gözlemlenmişken, (hem düşük hem de yüksek kızdırma kaybı içeren UK karışımlardan) KNT içerikli olanlarda, eğilme dayanımının artışına bağlı olarak orta açıklık deformasyon kapasitelerinde azalma gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.18. 28 günlük kiriş numunelerin ortalama eğilme dayanım- deformasyon sonuçları (ECC-1.2)

| Karışım       | Sürekli Su            |      |       |                  |      |       |
|---------------|-----------------------|------|-------|------------------|------|-------|
|               | Eğilme Dayanımı (MPa) |      |       | Deformasyon (mm) |      |       |
|               | 28                    | 28+0 | 28+90 | 28               | 28+0 | 28+90 |
| ECC 1.2 L-K   | 10,62                 | 7,97 | 12,63 | 2                | 1,13 | 1,69  |
| ECC 1.2 L-KF  | 7,52                  | 5,64 | 6,21  | 0,72             | 0,85 | 0,57  |
| ECC 1.2 L-KNT | 8,93                  | 6,70 | 12,26 | 1,16             | 0,91 | 1,4   |
| ECC 1.2 H-K   | 11,88                 | 8,91 | 8,95  | 2,94             | 2,32 | 0,87  |
| ECC 1.2 H-KF  | 9,27                  | 6,95 | 5,29  | 0,91             | 0,91 | 0,55  |
| ECC 1.2 H-KNT | 9,76                  | 7,32 | 8,75  | 2,53             | 1,61 | 1,16  |

| Karışım       | Islanma-Kuruma        |      |       |                  |      |       |
|---------------|-----------------------|------|-------|------------------|------|-------|
|               | Eğilme Dayanımı (MPa) |      |       | Deformasyon (mm) |      |       |
|               | 28                    | 28+0 | 28+90 | 28               | 28+0 | 28+90 |
| ECC 1.2 L-K   | 10,62                 | 7,56 | 11,79 | 2                | 1,21 | 1,98  |
| ECC 1.2 L-KF  | 7,52                  | 5,89 | 6,85  | 0,72             | 0,78 | 0,54  |
| ECC 1.2 L-KNT | 8,93                  | 6,48 | 11,02 | 1,16             | 1,31 | 0,98  |
| ECC 1.2 H-K   | 11,88                 | 9,03 | 11,19 | 2,94             | 1,9  | 0,9   |
| ECC 1.2 H-KF  | 9,27                  | 6,87 | 8,92  | 0,91             | 0,89 | 0,67  |
| ECC 1.2 H-KNT | 9,76                  | 7,36 | 11,51 | 2,53             | 1,84 | 1,08  |

■■■■■ 28 günlük nihai dayanım  
■■■■■ 28+0 günde ön yüklenmiş numune dayanımı  
■■■■■ 28+90 gün iyileşmiş numune dayanımı

Çizelge 4.19’da UK/PC oranı 2,2 olan numunelerin 2 farklı kür koşulundaki eğilme dayanımı-orta açıklık deformasyon kapasitelerine ait veriler bulunmaktadır. Sürekli su kür koşulunda kür edilmiş düşük kızdırma kaybı içeren UK-L karışımlarından 28+90 günlük eğilme dayanımı sonuçlarında, 28 günlük sağlam numunelere göre kontrol ve KF içerikli karışımlarda ciddi derecede (sırasıyla %45 ve %39) dayanım artışı sağlanırken, KNT içerikli karışımlarda ise ihmal edilebilecek (%2,6) kayıp gözlemlenmiştir. Öte yandan yüksek kızdırma kaybı içeren UK-H karışımlarının tamamında yaklaşık %13’e varan eğilme dayanım

kayıplarına rastlanmıştır. Orta açıklık deformasyon kapasiteleri ile ilgili olarak, sağlam numunelere göre 28+90 günlük numunelerin, düşük kızdırma kaybı içeren UK-L karışımları için Kontrol ve KF içerikli olanlarda eğilme dayanımı artarken deformasyon kapasitesi azalmakta, KNT içerikli numunelerde ise eğilme dayanımına eğilme dayanımı azalırken artış göstermektedir. Yüksek kızdırma kaybı içeren UK-H karışımları için ise, deformasyon kapasiteleri tüm karışımlar için; eğilme dayanımıyla doğru orantılı olarak azalış göstermiştir.

Islanma-kuruma kür koşullarında ise, düşük kızdırma kaybı içeren UK-L karışımlarından 28+90 günlük eğilme dayanımı sonuçlarında, sağlam olarak test edilen numunelere göre, kontrol ve KF içerikli karışımlarda sırasıyla %14,4 ve %28,4'lük artışlar, KNT içerikli karışımda ise %4,4 oranında azalma meydana gelmiştir. Bunun yanında yüksek kızdırma kaybı içeren UK-H karışımlarının tamamında eğilme dayanımında azalma gözlemlenmiştir. Orta açıklık deformasyon kapasiteleri ile ilgili olarak ise genel olarak UK-L içerikli olanlarda eğilme dayanımı ile ters orantılı; UK-H içerikli olanlarda ise eğilme dayanımı ile doğru orantılı değişiklikler gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.19. 28 günlük kiriş numunelerin ortalama eğilme dayanım-deformasyon sonuçları (ECC-2.2)

| Karışım       | Sürekli Su            |      |       |                  |      |       |
|---------------|-----------------------|------|-------|------------------|------|-------|
|               | Eğilme Dayanımı (MPa) |      |       | Deformasyon (mm) |      |       |
|               | 28                    | 28+0 | 28+90 | 28               | 28+0 | 28+90 |
| ECC 2.2 L-K   | 9,84                  | 7,38 | 14,27 | 2,39             | 1,67 | 2,08  |
| ECC 2.2 L-KF  | 6,37                  | 4,78 | 8,86  | 0,75             | 0,84 | 0,47  |
| ECC 2.2 L-KNT | 10,05                 | 7,54 | 9,79  | 1,55             | 3,11 | 1,74  |
| ECC 2.2 H-K   | 9,62                  | 7,22 | 8,43  | 2,02             | 2,48 | 1,06  |
| ECC 2.2 H-KF  | 8,81                  | 6,61 | 8,39  | 0,94             | 1    | 0,6   |
| ECC 2.2 H-KNT | 8,89                  | 6,67 | 7,78  | 2,2              | 3,53 | 1,71  |

| Karışım       | Islanma-Kuruma        |      |       |                  |      |       |
|---------------|-----------------------|------|-------|------------------|------|-------|
|               | Eğilme Dayanımı (MPa) |      |       | Deformasyon (mm) |      |       |
|               | 28                    | 28+0 | 28+90 | 28               | 28+0 | 28+90 |
| ECC 2.2 L-K   | 9,84                  | 7,14 | 11,26 | 2,39             | 1,61 | 2,17  |
| ECC 2.2 L-KF  | 6,37                  | 4,83 | 8,18  | 0,75             | 0,99 | 0,57  |
| ECC 2.2 L-KNT | 10,05                 | 7,29 | 9,61  | 1,55             | 2,39 | 1,54  |
| ECC 2.2 H-K   | 9,62                  | 7,18 | 9,19  | 2,02             | 2,28 | 1,35  |
| ECC 2.2 H-KF  | 8,81                  | 6,53 | 6,98  | 0,94             | 1,14 | 0,57  |
| ECC 2.2 H-KNT | 8,89                  | 6,71 | 7,74  | 2,2              | 2,56 | 1,39  |

■■■■■ 28 günlük nihai dayanım  
■■■■■ 28+0 günde ön yüklenmiş numune dayanımı  
■■■■■ 28+90 gün iyileşmiş numune dayanımı

Çizelge 4.20 ve 4.21’de 2 farklı kür koşullarında bulunan 180 günlük numunelerin eğilme dayanımı orta açıklık deformasyon kapasite verileri bulunmaktadır.

Çizelge 4.20’ye bakıldığında UK/PC oranı 1,2 olan düşük kızdırma kaybı içeren UK-L karışımları için sürekli su kür koşullarında; 180+90 günlük numunelerin eğilme dayanımları 180 günlük sağlam numunelere göre, sadece kontrol numuneleri için küçük bir miktar artış, (%2,3), KF ve KNT içerikli olanlarda ise azalış göstermiştir (sırasıyla %16,2 ve %1,5). Yüksek kızdırma kaybı içeren UK-H karışımları için ise; KNT içerikli numunelerin eğilme dayanımında %3,5 gibi küçük bir artış gözlemlenirken, KF içerikli numunelerde ise %41,6’lık ciddi kayıp yaşanmıştır. Kontrol numuneleri ise hemen hemen aynı değerlerde seyretmiştir. Orta açıklık deformasyon kapasiteleri genel olarak uçucu kül tipinden bağımsız olarak eğilme dayanım ile orantılı bir davranış sergilenmiştir.

Çizelge 4.20. 180 günlük kiriş numunelerin ortalama eğilme dayanım-deformasyon sonuçları (ECC-1.2)

| Karışım       | Sürekli Su            |       |        |                  |       |        |
|---------------|-----------------------|-------|--------|------------------|-------|--------|
|               | Eğilme Dayanımı (MPa) |       |        | Deformasyon (mm) |       |        |
|               | 180                   | 180+0 | 180+90 | 180              | 180+0 | 180+90 |
| ECC 1.2 L-K   | 11,76                 | 8,82  | 12,03  | 1,52             | 1,79  | 1,87   |
| ECC 1.2 L-KF  | 8,99                  | 6,74  | 7,53   | 0,84             | 0,82  | 0,61   |
| ECC 1.2 L-KNT | 10,01                 | 7,51  | 9,86   | 1,44             | 1,73  | 1,04   |
| ECC 1.2 H-K   | 13,11                 | 9,83  | 13,07  | 2,08             | 2,06  | 1,41   |
| ECC 1.2 H-KF  | 10,06                 | 7,55  | 5,88   | 0,66             | 0,73  | 0,48   |
| ECC 1.2 H-KNT | 8,26                  | 6,20  | 8,55   | 1,93             | 1,83  | 1,18   |

| Karışım       | Islanma-Kuruma        |       |        |                  |       |        |
|---------------|-----------------------|-------|--------|------------------|-------|--------|
|               | Eğilme Dayanımı (MPa) |       |        | Deformasyon (mm) |       |        |
|               | 180                   | 180+0 | 180+90 | 180              | 180+0 | 180+90 |
| ECC 1.2 L-K   | 11,76                 | 8,79  | 13,27  | 1,52             | 1,92  | 1,73   |
| ECC 1.2 L-KF  | 8,99                  | 6,83  | 6,34   | 0,84             | 0,89  | 0,51   |
| ECC 1.2 L-KNT | 10,01                 | 7,45  | 9,66   | 1,44             | 1,27  | 0,98   |
| ECC 1.2 H-K   | 13,11                 | 9,94  | 8,75   | 2,08             | 2,23  | 0,94   |
| ECC 1.2 H-KF  | 10,06                 | 7,51  | 7,46   | 0,66             | 0,86  | 0,48   |
| ECC 1.2 H-KNT | 8,26                  | 6,18  | 7,04   | 1,93             | 1,8   | 0,9    |

180 günlük nihai dayanım

180+0 günde ön yüklenmiş numune dayanımı

180+90 gün iyileşmiş numune dayanımı

Islanma-kuruma kür koşulları incelendiğinde, düşük kızdırma kaybı içeren UK-L karışımlarında sürekli sudakine benzer olarak kontrol numunelerinin eğilme dayanımında

artış, KF ve KNT içerikli numunelerde azalış gözlenmiştir. Yüksek kızdırma kaybı içeren UK-H karışımları için ise; bütün karışımların eğilme dayanımında düşüş gerçekleşmiştir. Orta açıklık deformasyon kapasiteleri ile ilgili olarak ise; düşük kızdırma kaybı içeren UK-L karışımların tamamında, eğilme dayanımı ile orantılı olarak deformasyon kapasitesi davranış göstermiştir. Yani kontrol karışımlarında eğilme dayanımı artışı ile birlikte deformasyon kapasitesi artarken, karbon esaslı malzeme içerenler numunelerde eğilme dayanımı azalışı ile birlikte deformasyon kapasitesi azalmıştır. Yüksek kızdırma kaybı içeren UK-H karışımları için ise; bütün karışımlar için eğilme dayanımında olduğu gibi deformasyon kapasiteleri de azalmıştır.

Çizelge 4.21’de UK/PÇ oranı 2,2 olan numunelerin 2 farklı kür koşulundaki eğilme dayanımı-orta açıklık deformasyon kapasitelerine ait veriler bulunmaktadır. Sürekli su kür koşulunda kür edilmiş düşük kızdırma kaybı içeren UK-L karışımlarından 180+90 günlük eğilme dayanımı sonuçlarında, 180 günlük sağlam numunelere göre kontrol ve KF içerikli karışımlarda artış sırasıyla %18,1 ve %24’tür. KF içerikli karışımlarındaki eğilme dayanımı artışı kontrol numunelere göre daha belirgindir. KNT içerikli karışımlarda ise eğilme dayanımı %19,8 oranında azalma göstermiştir. Öte yandan yüksek kızdırma kaybı içeren UK-H karışımlarının tamamında eğilme dayanımında azalma görülmektedir. En ciddi dayanım kaybı %38,9 ile KF içerikli karışımlarda saptanmıştır. Orta açıklık deformasyon kapasiteleri ile ilgili olarak ise; UK-L içeren karışımlarda eğilme dayanımı artarken deformasyon kapasitelerinde azalış gözlemlenmiştir. Sadece KNT içerikli olanlarda ise eğilme dayanımının azalışı ile orantılı olarak deformasyon kapasitesinde azalış görülmüştür. UK-H içeren karışımlarda ise deformasyon kapasitesi eğilme dayanımı ile orantılı olarak azalış göstermiştir.

Islanma-kuruma kür koşulları incelendiğinde, düşük kızdırma kaybı içeren UK-L karışımlarında sürekli sudakine benzer olarak kontrol ve KF içerikli numunelerde artış gözlenmiştir. En fazla artış KF içerikli numunelerde tespit edilmiştir (%27,2). Bunun yanında KNT içerikli olanlarda, eğilme dayanımı ise %20,6 oranında azalma göstermiştir. Yüksek kızdırma kaybı içeren UK-H karışımları için ise; bütün karışımlar için eğilme dayanımında düşüş gerçekleşmiştir. Kontrol numunelerindeki düşüş sınırlı olmuştur. Ancak KF ve KNT içerikli numunelerdeki eğilme dayanımı kaybı dramatik bir şekilde gerçekleşmiştir (sırasıyla %33 ve %37,8). Orta açıklık deformasyon kapasiteleri ile ilgili

olarak ise; tüm karışımlarda eğilme dayanımı ile doğru orantılı olarak deformasyon kapasitelerinde değişim gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.21. 180 günlük kiriş numunelerinin ortalama eğilme dayanım-deformasyon sonuçları (ECC-2.2)

| Karışım       | Sürekli Su            |       |        |                 |       |        |
|---------------|-----------------------|-------|--------|-----------------|-------|--------|
|               | Eğilme Dayanımı (MPa) |       |        | Deformasyon(mm) |       |        |
|               | 180                   | 180+0 | 180+90 | 180             | 180+0 | 180+90 |
| ECC 2.2 L-K   | 11,84                 | 8,88  | 13,98  | 2,71            | 2,36  | 1,82   |
| ECC 2.2 L-KF  | 6,92                  | 5,19  | 8,58   | 0,71            | 0,68  | 0,68   |
| ECC 2.2 L-KNT | 10,7                  | 8,03  | 8,59   | 1,9             | 2,01  | 1,07   |
| ECC 2.2 H-K   | 12,13                 | 9,10  | 11,88  | 2,1             | 2,35  | 1,18   |
| ECC 2.2 H-KF  | 9,42                  | 7,07  | 5,76   | 0,84            | 0,8   | 0,6    |
| ECC 2.2 H-KNT | 9,84                  | 7,38  | 7,79   | 1,87            | 1,75  | 1,22   |

| Karışım       | Islanma-Kuruma        |       |        |                  |       |        |
|---------------|-----------------------|-------|--------|------------------|-------|--------|
|               | Eğilme Dayanımı (MPa) |       |        | Deformasyon (mm) |       |        |
|               | 180                   | 180+0 | 180+90 | 180              | 180+0 | 180+90 |
| ECC 2.2 L-K   | 11,84                 | 8,79  | 13,63  | 2,71             | 1,89  | 1,89   |
| ECC 2.2 L-KF  | 6,92                  | 5,16  | 8,8    | 0,71             | 0,82  | 0,56   |
| ECC 2.2 L-KNT | 10,7                  | 8,08  | 8,5    | 1,9              | 2,2   | 1,22   |
| ECC 2.2 H-K   | 12,13                 | 9,06  | 11     | 2,1              | 2,15  | 1,12   |
| ECC 2.2 H-KF  | 9,42                  | 7,02  | 6,31   | 0,84             | 0,86  | 0,42   |
| ECC 2.2 H-KNT | 9,84                  | 7,43  | 6,12   | 1,87             | 2,21  | 0,87   |

■ ■ ■ ■ ■ 180 günlük nihai dayanım  
■ ■ ■ ■ ■ 180+0 günde ön yüklenmiş numune dayanımı  
■ ■ ■ ■ ■ 180+90 gün iyileşmiş numune dayanımı

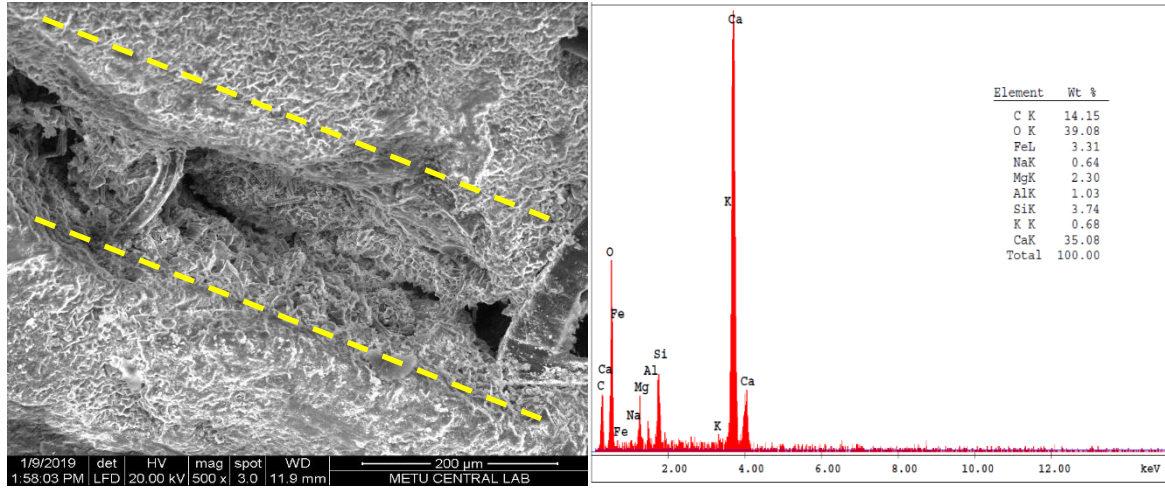
Yukarıdaki sonuçlara göre genel olarak; karbon esaslı herhangi bir iletken malzeme bulundurmayan kontrol numunelerine KNT ve KF eklenmesiyle her ne kadar eğilme parametreleri sonuçlarında belirli artışlar beklense de, karışım yönteminden ziyade karbon esaslı malzemelerin homojen dağılmasında ikinci önemli parametre olan su çimento oranı üzerinden sonuçlar yorumlanabilir. Düşük S/BM oranında üretilen karışımların (0,27) çok yoğun mikro yapıları özellikle KNT içeren karışımlara kıyasla KF içeren numunelerde yeni üretilen hidrasyon ürünlerinin yetersiz olmasına neden olabilir. Meydana gelen hidrasyon ürünlerindeki görece daha düzensiz gelişim KF içeren karışımlarda hem daha düşük eğilme dayanımı hem de daha az deformasyon kapasitesine neden olduğu düşünülmektedir. Her ikisi de inert malzeme olan KF ve KNT içeren karışımlarda özellikle mikro ölçekte kullanılan KF numunelerinin bu gelişimden daha kötü etkilenmiş olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca KF içerikli numunelerin diğer karışımlara göre daha düşük eğilme

dayanımı ve deformasyon kapasitesine sahip olmasının nedeni hacim olarak %1 oranında kullanılan KF'nin betonun işlenebilirliğini azaltması ve çimento matrisinde dağılımının homojen olmamasından dolayı matriste kaynaklanacak kusur ve boşluklardan olacağı düşünülmektedir. Wang ve diğerleri (2008) tarafından yapılan çalışmada KF'nin kötü dağılımı ile birlikte matris içerisindeki miktarı arttıkça mekanik özelliklerini (basınç ve eğilme dayanım) ve deformasyon miktarını azalttığı gözlemlenmiştir.

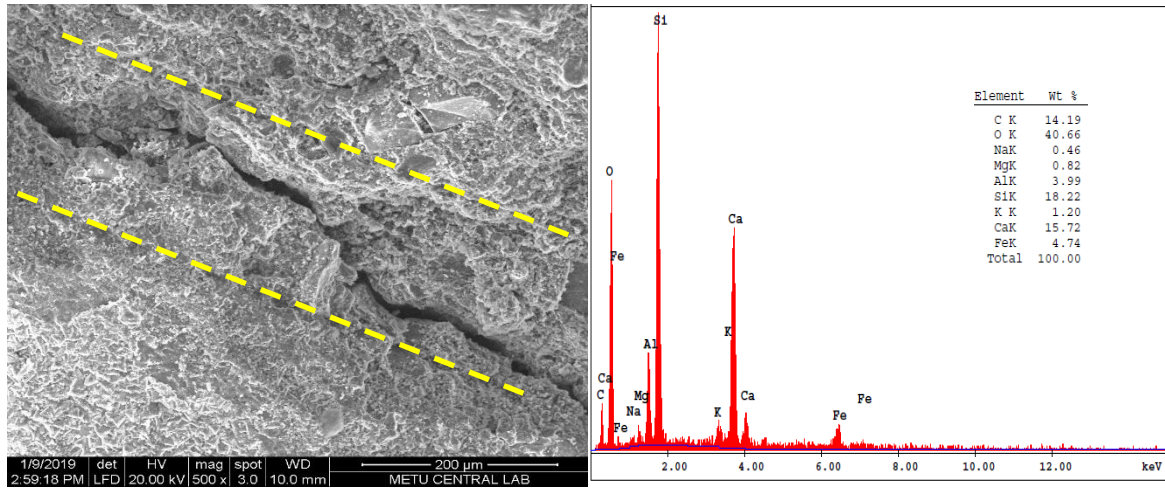
Bununla birlikte, genel olarak yüksek kızdırma kaybına sahip uçucu kül (UK-H) içeren numunelerde eğilme dayanımı daha kötü etkilenmiştir. Bunun nedenine tezin 4.2 bölümünde ayrıntılı olarak yer verildiğinden tekrar değinilmemekle birlikte, sonuç olarak betonun dayanımdaki gelişimine yüksek oranda kızdırma kaybı içeren uçucu küllerin kötü yönde etki ettiği bilinmektedir. Ayrıca sağlam numunelerin test sonuçlarına göre ön yükleme uygulanıp kür edilerek tekrar eğilme testine tabi tutulan numunelerin sonuçlarını mukayese ettiğimizde ön yüklenmiş numunelerin sonuçlarının yer yer iyi olduğu veya yakın seyrettiği görülmektedir. Bu durum kür edilmiş numunelerin mekanik olarak iyileştiğinin göstergesidir.

#### **4.4. Mikro Yapısal Karakterizasyon (Tanımlama)**

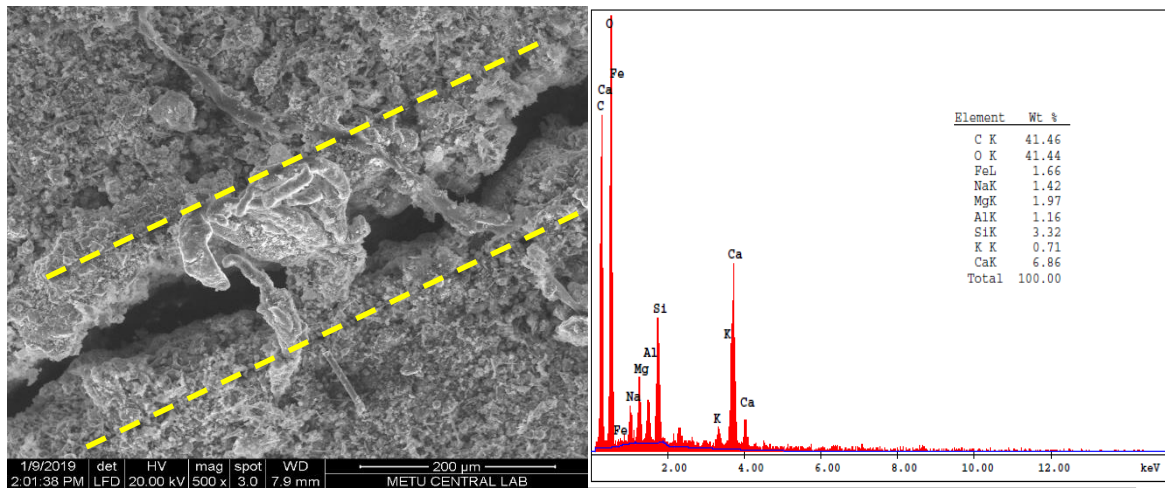
Bu çalışmada, mikro yapısal analizler taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile birlikte EDX dedektörü ve termogravimetrik (TG) analizler aracılığıyla yapılmıştır. Bu analizler kendiliğinden iyileşme ürünlerinin nicelik ve nitelik açıdan tanımlanması amacıyla gerçekleştirilmiştir. SEM/EDX analizleri için örnekler iyileşmiş kiriş ve silindir numunelerin doğrudan yüzeylerinden alınmış olup, TG analizleri için ise numune örnekleri de yine kendiliğinden iyileşmiş kiriş ve silindir numunelerin çatlaklarının yüzey kısmından kazınarak alınmıştır. Söz konusu analizler 180 günlük kiriş ve silindir numunelerinin 90 günlük kür edilmesinden sonra yapılmıştır. SEM/EDX ve TG analizlerine ait sonuçlar sırasıyla Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te sunulmuştur.



ECC 1.2 L-K

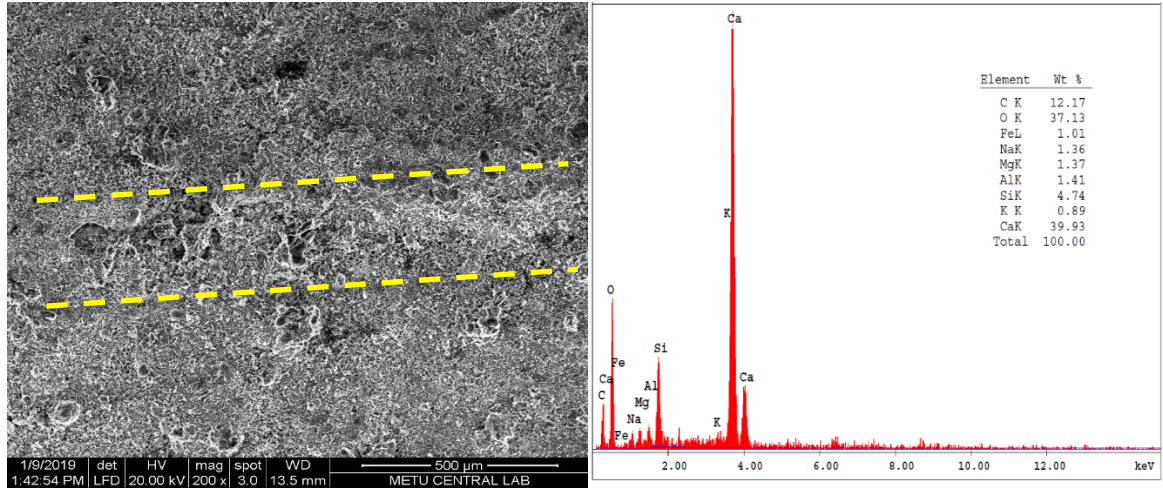


ECC 1.2 H-K

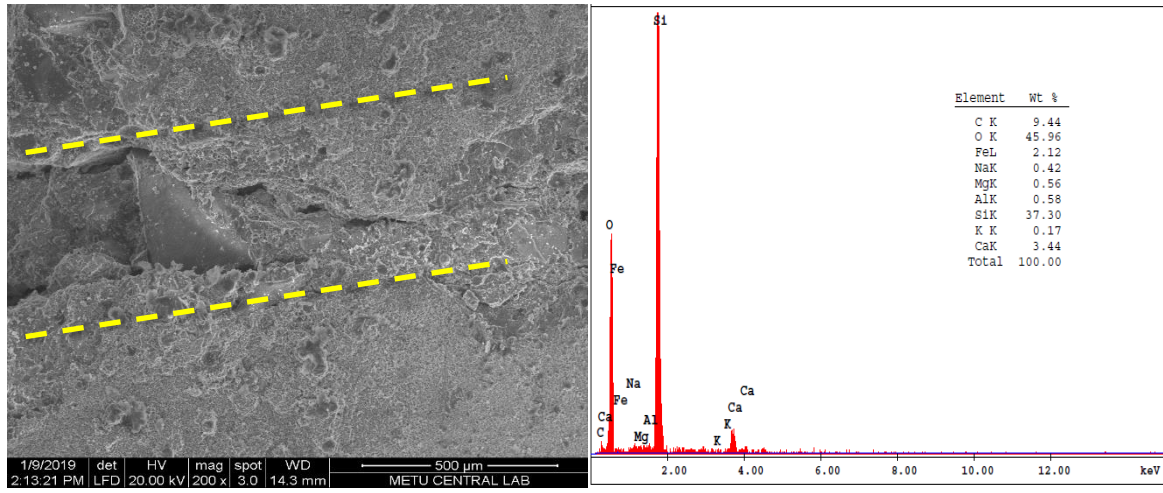


ECC 1.2 H-KF

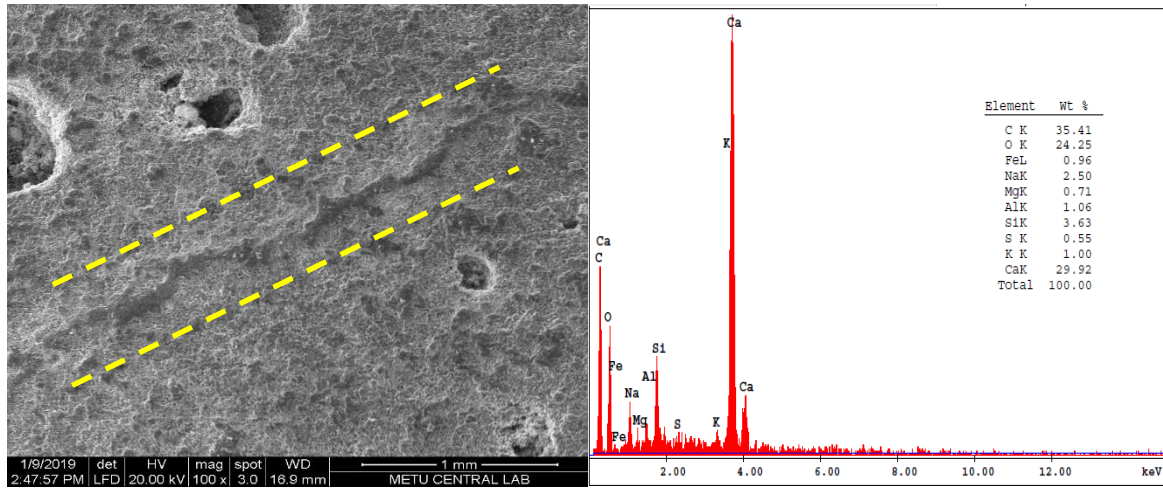
Şekil 4.23. Mikro çatlaklar yüzeyinden alınan iyileşme ürünlerinin EDX analizleri ve SEM görüntüleri



ECC 1.2 H-KNT

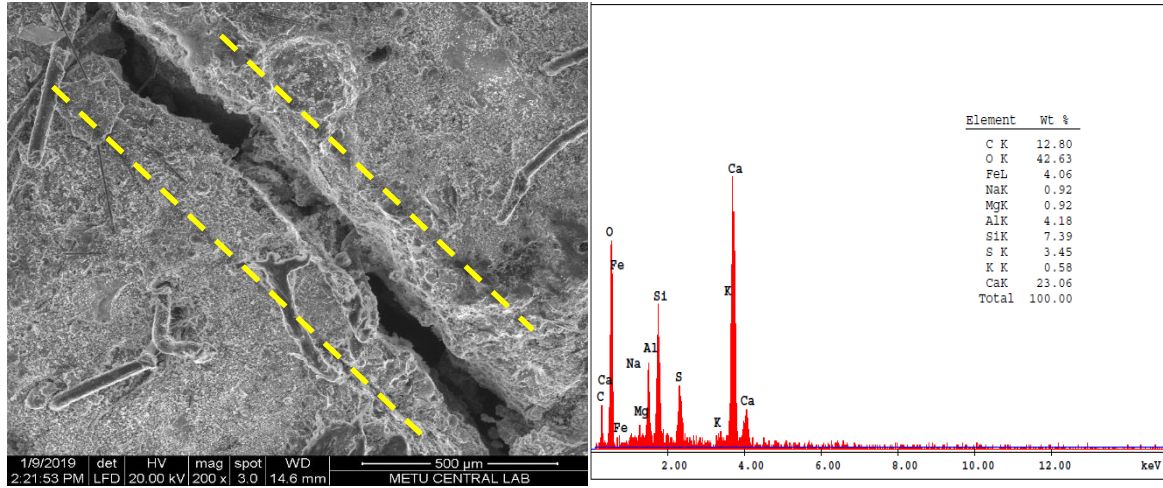


ECC 2.2 L-K



ECC 2.2 H-K

Şekil 4.23. (devam) Mikro çatlaklar yüzeyinden alınan iyileşme ürünlerinin EDX analizleri ve SEM görüntüleri



ECC 2.2 H-KF

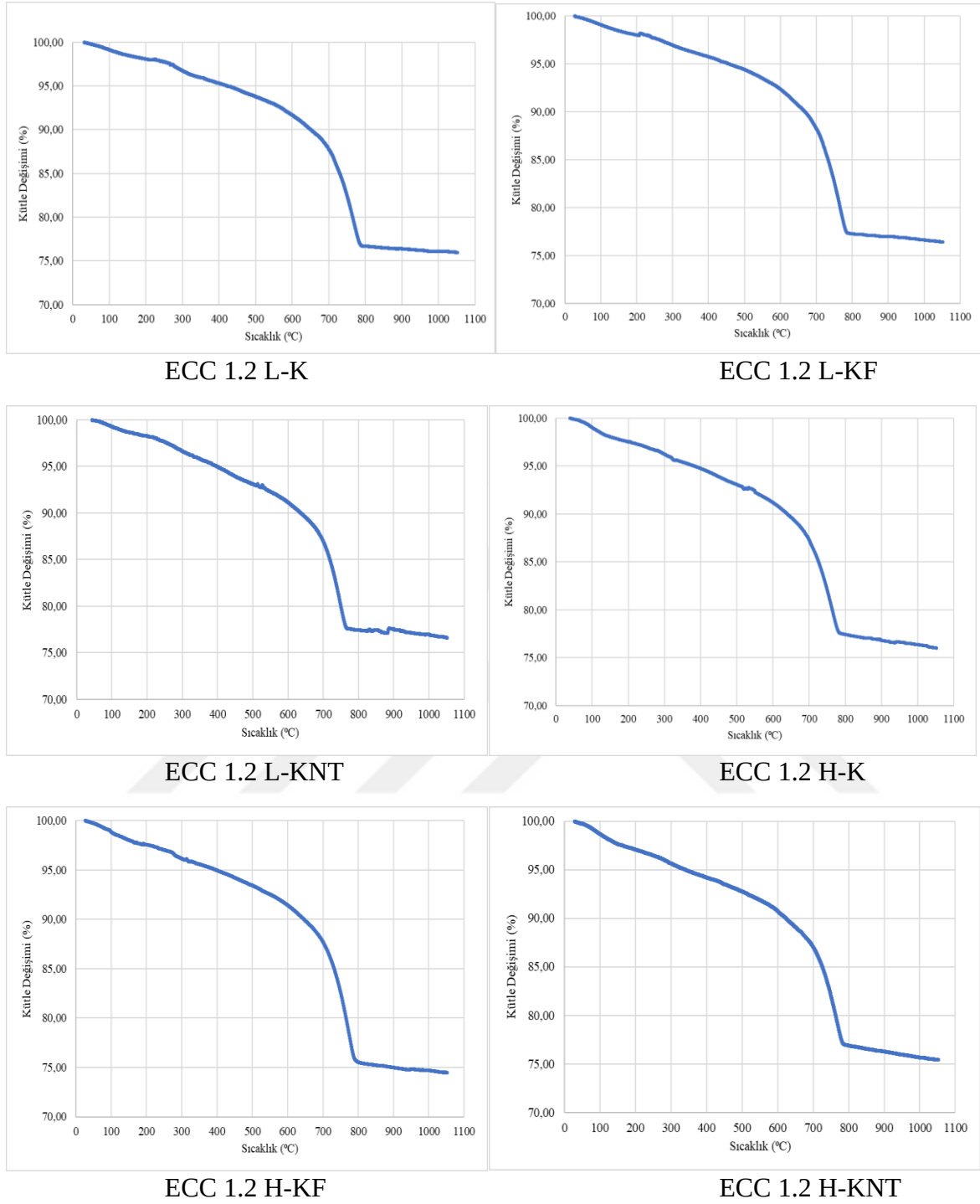
Şekil 4.23. (devam) Mikro çatlaklar yüzeyinden alınan iyileşme ürünlerinin EDX analizleri ve SEM görüntüleri

Şekil 4.23'teki SEM görüntüleri, önceden yüklenmiş tüm ECC örneklerinde mikro çatlakların kendi kendini kısmen veya tamamen iyileştirdiğini göstermektedir. Bununla birlikte, kontrol ve KNT içerikli numunelerin yüzeyindeki iyileşmiş çatlak çizgileri, KF içerikli numunelere göre daha kompakt ve daha az gözenekli kendi kendini iyileştirme ürünleriyle doldurulmuştur. Mikro çatlakların yüzeyindeki iyileşme ürünlerinin EDX verileri, tüm ECC karışımlarında yüksek miktarda oksijen (O), kalsiyum (Ca) ve karbon (C) ve daha az miktarda alüminyum (Al) ve demir (Fe) olduğunu göstermiştir. Bunun yanında yer yer silika (Si) zirveleri de yüksek seviyeye ulaşmıştır. Yüksek miktarda elde edilen Si ve Ca değerleri  $\text{CaCO}_3$  ile C-S-H'nin kendiliğinden iyileşme ürünleri olduğunu kanıtlar niteliktedir. EDX sonuçlarına göre ECC 1.2 L-Kontrol %35,08 kalsiyum (Ca), %3,74 silisyum (Si), %14,15 karbon (C) ve %39,08 oksijen (O) içermektedir. Atom ağırlıkları sırasıyla 40, 28, 12 ve 16 olduğu düşünüldüğünde kalsiyum karbonatın ( $\text{CaCO}_3$ ) %40 oranında kalsiyum, %12 oranında karbon ve %48 oranında oksijen içerdiği görülmekte ve ECC 1.2 L-Kontrol numunesinin büyük ölçüde kalsiyum karbonat içerdiği görülmektedir. ECC 1.2 H-Kontrol numunesinde ise mevcut kalsiyum, karbon ve oksijen bileşenlerine rağmen %18,22 silisyum içeriği kalsiyum karbonat oluşumunun yanında devam eden hidratasyonun C-S-H jeli oluşumuna sebep olduğunu göstermektedir. ECC 1.2 H-KF numunesinde ise %41,46 karbon, %41,44 oksijen varken %3,32 silisyum ve %6,86 kalsiyum varlığı karbonatlaşmanın öncesinde gerçekleşen ve aşağıdaki reaksiyonlarla verilen karbonik asit ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) oluşumuna işaret etmektedir.

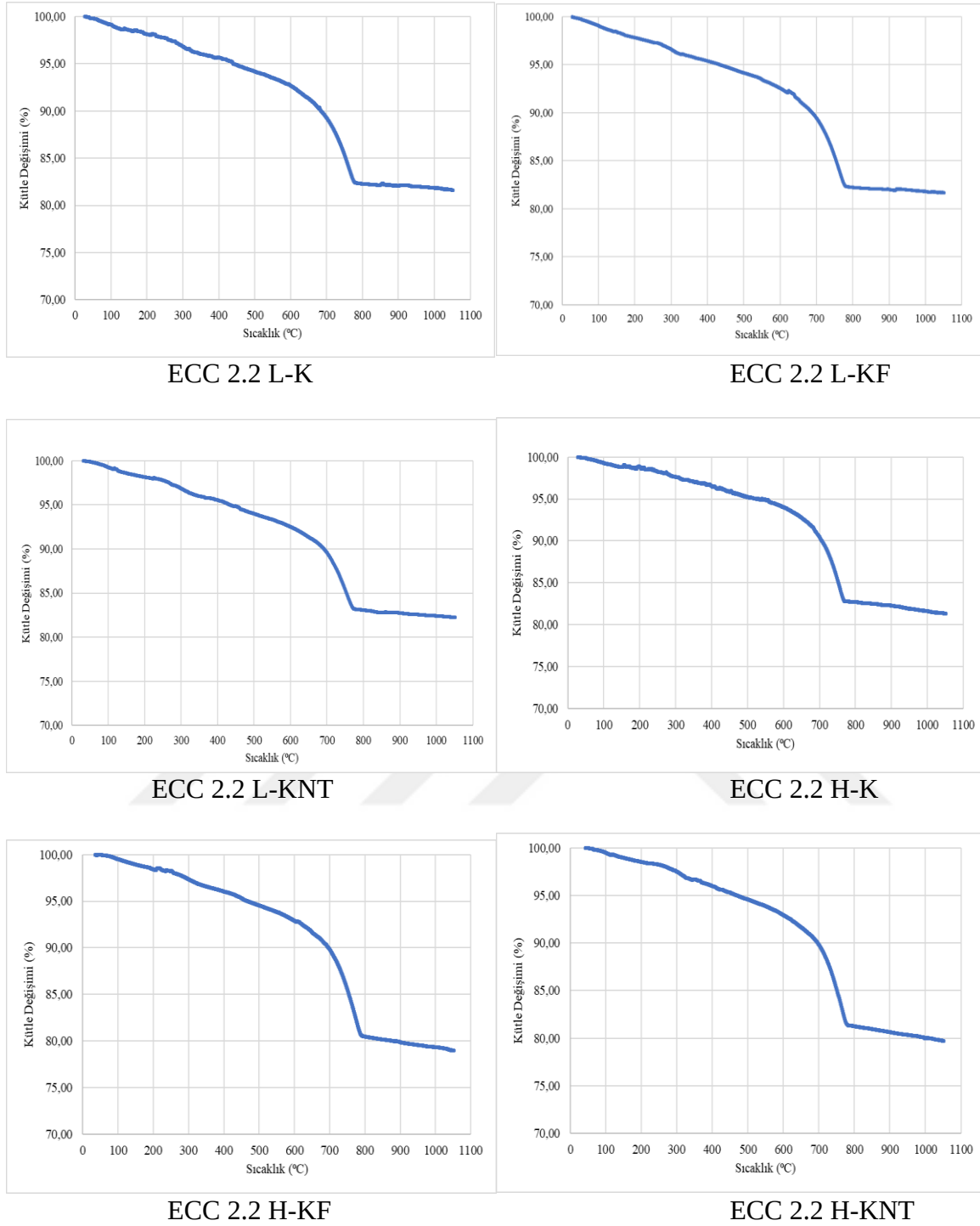


Buna göre ECC 1.2 H-KF numunesinde karbonatlaşma henüz tamamlanmamış olup hala devam etmektedir. ECC 1.2 H-KNT numunesindeyse ECC 1.2 L-Kontrolle benzer şekilde büyük ölçüde kalsiyum karbonat oluşumu %39,93 kalsiyum, %12,17 karbon ve %37,13 oksijen oranlarından açıkça görülmektedir. Aynı şekilde ECC 2.2 H-Kontrol ve ECC 2.2 H-KF numuneleri de kalsiyum karbonat oluşumunu işaret eden kalsiyum, karbon ve oksijen içeriklerine sahipken ECC 2.2 H-KF numunesinin %7,39 silisyum içeriği ve nispeten daha düşük karbon muhteviyatı (%12,80) bu numunede devam eden hidrasyonla oluşan ilave C-S-H jelinin varlığını da göstermektedir. ECC 2.2 L-Kontrol numunesinde ise %9,44 karbon, %45,96 oksijen, %37,30 silisyum ve %3,44 kalsiyum varlığı EDX alınan kısımda bir miktar reaksiyona girmemiş  $\text{SiO}_2$ 'e denk gelinmesinden kaynaklanmaktadır.

ECC karışımlarının kendi kendini iyileştirme mekanizmasının ürünü kalsiyum karbonattır ( $\text{CaCO}_3$ ). Bu nedenle mikro çatlak yüzeyleri üzerinde çökelen  $\text{CaCO}_3$ 'ü daha iyi değerlendirmek için TG analizi kullanılmıştır. Farklı karbonat seviyelerine sahip çimentolu kompozitler için vaterit, aragonit, kalsit ve amorf  $\text{CaCO}_3$  mevcudiyeti rapor edilmiştir (Black ve diğerleri, 2007).  $\text{CaCO}_3$  ayrışması esas olarak 500-900°C (Grattan-Bellew, 1996) aralığında meydana gelmektedir.



Şekil 4.24. ECC numunelerinin çatlak yüzeylerinden alınan iyileşme ürünlerinin TGA sonuçları



Şekil 4.24. (devam) ECCnumunelerinin çatlak yüzeylerinden alınan iyileşme ürünlerinin TGA sonuçları

Yukarıda verilen Şekil 4.24'teki grafiklerde belirli oranlarda (1,2 ve 2,2) uçucu kül içeren numunelerin termogravimetrik analize (TGA) göre kütle değişimleri gösterilmiştir. UK/PC oranı 1,2 olan numunelerin tamamının UK/PC oranı 2,2 olan numunelere göre kütle kayıplarının daha fazla olduğu görülmektedir. Ancak kendi içerisinde bu kayıplar arasında çok ciddi farklılıklar bulunmamaktadır. Bu sonuç Çizelge 4.22'de yer verilen  $\text{CaCO}_3$  kütle

kaybı yüzdesi ile benzer sonuç göstermektedir. 1,2 oranında UK içeren karışımların puzolanik reaksiyonlar ile  $\text{Ca(OH)}_2$ 'i bağlama kapasitesi 2,2 oranında UK içeren numunelerden daha azdır. Dolayısıyla 1,2 oranında UK içeren karışımların karbonatlaşma ile  $\text{CaCO}_3$  oluşturması daha muhtemeldir. Bunun sonucunda 1,2 oranında UK içeren numunelerin tamamında 650-800 °C sıcaklık aralığındaki kütle kaybı 2,2 oranında UK içeren numunelerin kütle kayıplarından daha fazladır. Bu durumun sebebi  $\text{CaCO}_3$ 'ün bu sıcaklık aralığında aşağıdaki eşitlikte görülen şekilde ayrışmasıdır.



Bununla birlikte 1,2 ve 2,2 oranında UK içeren numunelerin  $\text{Ca(OH)}_2$  kayıplarını karşılaştırmak açısından 400 °C civarındaki kütle kaybını incelemek gerekmektedir. Bu kayıplar incelendiği zaman UK miktarına göre ciddi bir değişim olmadığı görülmektedir. Her ne kadar 2,2 oranında UK içeren numuneler daha düşük çimento içeriği dolayısıyla daha düşük  $\text{Ca(OH)}_2$  oluştursa da bu az miktardaki  $\text{Ca(OH)}_2$  karbonatlaşmayla oldukça azalmaktadır. Ancak aynı şekilde 1,2 oranında UK içeren numunelerin oluşturduğu daha yüksek miktardaki  $\text{Ca(OH)}_2$  de karbonatlaşmaya uğramakta dolayısıyla matriste çok fazla  $\text{Ca(OH)}_2$  kalmamaktadır. Bu durum TGA eğrisinde 400 °C civarında herhangi bir düşme olmamasından da görülmektedir.

Grafiklere bakıldığında tüm numunelerde 25-100 °C aralığında ihmal edilebilir bir kütle kaybının olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi, üretilen numunelerin S/BM oranının çok düşük olması (0,27) ve numunelerin belli bir olgunlukta (180 günlük) olmasından dolayı kılcal gözeneklerde düşük miktarda boşluk suyunun olmasından kaynaklanabilmesidir. Bunun yanında bütün numunelerde sıcaklık arttıkça kütle kaybı yaşanmakla birlikte en dramatik düşüşün yaklaşık 650-800 °C arasında olduğu anlaşılmaktadır. Bu aralıktaki ciddi kütle kaybı  $\text{CaCO}_3$ 'ten karbondioksitin ayrışmasına bağlanabilir.

Çizelge 4.22'de 650-800 °C sıcaklıkları arasında farklı numunelerin mikro çatlaklarının yüzeyinden elde edilen  $\text{CaCO}_3$  kütle kayıpları yüzde cinsinden verilmiştir. Yukarıda önceden değinildiği üzere toplam kütle kaybında olduğu gibi,  $\text{CaCO}_3$  kütle kaybı oranı UK/PÇ oranı 1,2 olan karışımlarda 2,2 olanlara göre daha yüksek seyretmiştir. UK/PÇ oranı 1,2 olan karışımlardan düşük kızdırma kaybına sahip uçucu kül (UK-L) içeren Kontrol ve KF içerikli numunelerdeki  $\text{CaCO}_3$  kütle kaybı, KNT içerenlerden %10,8 daha fazladır.

Yüksek kızdırma kaybına sahip uçucu kül (UK-H) içeren KF içerikli numunelerde  $\text{CaCO}_3$  kütle kaybı, Kontrol ve KNT içerikli numunelere göre %17,2 daha fazladır. Bunun yanında UK/PÇ oranı 2,2 olan karışımlardan düşük kızdırma kaybına sahip uçucu kül (UK-L) içeren KF içerikli numunelerde  $\text{CaCO}_3$  kütle kaybı, Kontrol ve KNT içerenlere göre sırasıyla %2,2 ve %10,8 daha fazladır. Yüksek kızdırma kaybına sahip uçucu kül (UK-H) içeren KF içerikli numunelerde  $\text{CaCO}_3$  kütle kaybı, Kontrol ve KNT içerenlere göre sırasıyla %12 ve %7,7 daha fazladır.

Genel olarak baktığımızda uçucu kül cinsi ve oranından bağımsız olarak KF içerikli numunelerde  $\text{CaCO}_3$  üretim miktarı daha fazla görünmekte olup, diğer (kontrol ve KNT içerikli) numune türlerinden çok fazla değildir.

Çizelge 4.22. Kendiliğinden iyileşme ürünlerindeki toplam  $\text{CaCO}_3$  miktarı

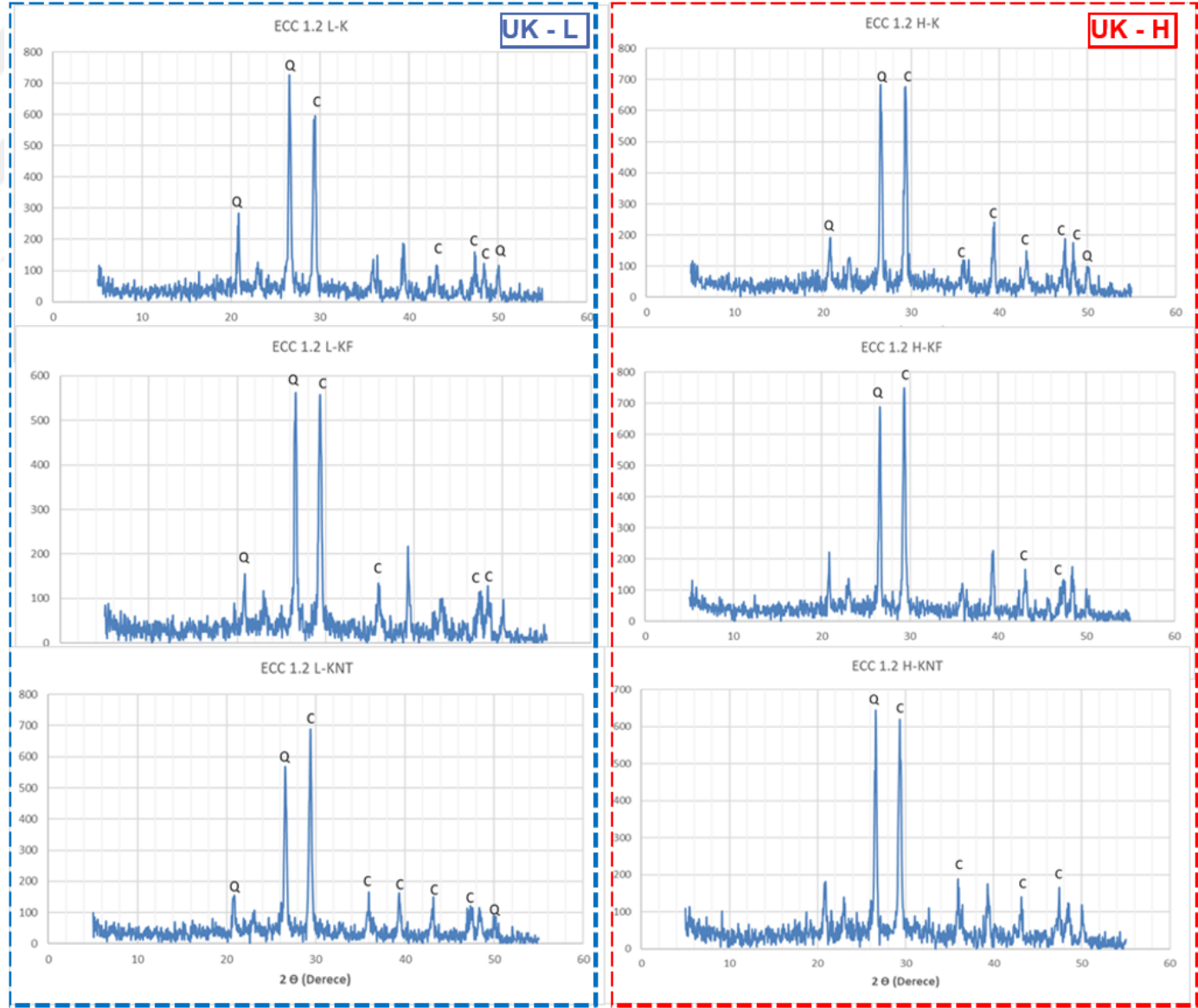
| Karışım Adı   | Toplam $\text{CaCO}_3$<br>Kütle Kaybı (%) |
|---------------|-------------------------------------------|
| ECC 1.2 L-K   | 13,4                                      |
| ECC 1.2 L-KF  | 13,4                                      |
| ECC 1.2 L-KNT | 12,1                                      |
| ECC 1.2 H-K   | 12,2                                      |
| ECC 1.2 H-KF  | 14,3                                      |
| ECC 1.2 H-KNT | 12,2                                      |
| ECC 2.2 L-K   | 9,0                                       |
| ECC 2.2 L-KF  | 9,2                                       |
| ECC 2.2 L-KNT | 8,3                                       |
| ECC 2.2 H-K   | 10,0                                      |
| ECC 2.2 H-KF  | 11,2                                      |
| ECC 2.2 H-KNT | 10,4                                      |

XRD analizi, betonun içinde bulunan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H), kalsiyum aliminosilikat hidrat (C-A-S-H), portlandit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), etrenjit gibi mineral bileşimlerini belirleyen test yöntemlerinden bir tanesidir (Zhang, Q, Ye, Guang, 2011). Aşağıdaki şekillerde önceden hasar verilmiş çeşitli karışım tiplerinde hazırlanan 180 günlük numunelerin 90 gün boyunca kür edilmesi (sürekli su, ıslanma-kuruma) ile birlikte iyileşme ürünlerinin çatlak yüzeyinden kazınarak, XRD analizi yapılması sonucunda oluşan grafikler verilmiştir. Analiz yapılırken kür koşullarına bakılmadan çatlak yüzeyinden numune kazınarak genel bir değerlendirme yapılmıştır.

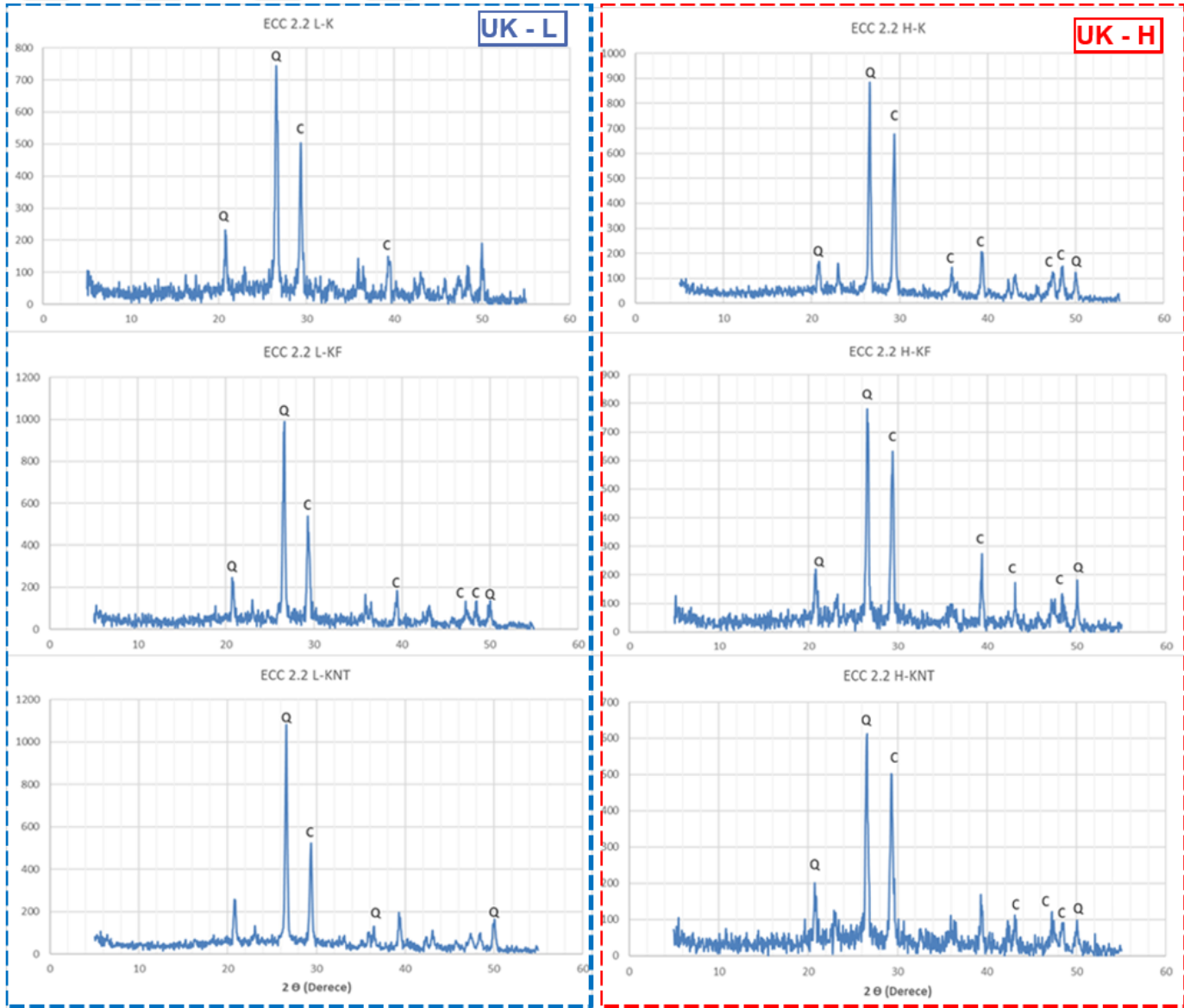
Şekil 4.25-26'ya bakıldığında, genel olarak en yüksek tepe noktaları kuvars (Q) tepe noktaları olmakla birlikte kalsit (C) için belirlenen tepe noktalarından önemli ölçüde daha belirgindir. Bu, büyük ölçüde numune hazırlama için kazıma sırasında elde edilen silis kumu mevcudiyetine ve bir miktar da mikro çatlaklar içinde C-S-H ve C-A-S-H jellerinin oluşumuna bağlanmıştır. Kuvars (Q) ile birlikte, XRD analizinde iyi tanımlanmış kalsit (C) zirveleri de gözlenmiştir. Bu durum ECC numunelerinin tamamında iyileşme ürünü olarak  $\text{CaCO}_3$  oluşumunun ciddi mertebelerde olduğuna işarettir.



Şekil 4.25. ECC-1.2 numunelerinin iyileşmiş çatlak yüzeyi XRD sonuçları (180+90 gün)



Şekil 4.26. ECC-2.2 numunelerinin iyileşmiş çatlak yüzeyi XRD sonuçları (180+90 gün)



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 5.1. Basınç Dayanımı Sonuçları

Basınç dayanımı sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, özellikle erken yaşlarda önemli faktörün pozolanik malzeme miktarının çimento miktarına oranı olduğu görülmektedir. Genel olarak daha düşük basınç dayanımı değerleri yüksek mineral katkı (ECC 2,2) numunelerde gözlemlenmiştir. Bu durum pozolanik malzeme-Portland çimentosu oranının 1,2'den 2,2'ye çıkmasının özellikle PÇ miktarındaki aşırı düşüş sebebiyle basınç dayanımını düşürdüğünü göstermiştir.

3 ve 28 günlük küp numuneleri, UK oranı ve karışım tipine bakılmaksızın UK-L içerikli karışımlarda iyi basınç dayanımı performansı sergilemiştir. UK-H içerikli karışımlarda, KNT içerikli karışımların tamamında basınç dayanımında kayıplar gözlenmiştir. Bu durumun nedeni, kızdırma kaybında bulunan yanmamış karbonun gözenekli yapısı sayesinde hidrasyon için gerekli suyu emerek reaksiyonların yavaşlamasına neden olmasıdır. Bunun yanında KNT'nin matriste homojen dağılımı için gerekli katkı maddesi (süper akışkanlaştırıcı [SP]) ihtiyacının fazla olması dayanımı olumsuz etkilemiştir. Ancak sonuçlara baktığımızda 28 günün sonunda basınç dayanımı olarak en düşük 30 MPa seviyesinin yakalandığı ve günlük koşullarda bu basınç değerine sahip yapı elemanlarının kullanılmasının mümkün olduğu görülmektedir.

### 5.2. Eğilme Dayanımı Sonuçları

28 günlük ve 180 günlük ECC numunelerinin eğilme dayanımı ile ilgili genel olarak; uçucu kül ve karışım tipine bakılmaksızın, kontrol karışımlarının eğilme dayanımı karbon esaslı malzeme içeren (KF ve KNT) karışımlara göre daha iyi eğilme dayanımı sergilediği görülmüştür. Bu durum karbon esaslı malzemelerin matris içerisinde homojen dağıtılması için SP miktarının artırılmasına bağlı dayanım kaybına neden olması ile ilişkilidir. Bunun yanında genel olarak, 180 günlük numunelerin eğilme dayanımının 28 günlük numunelere göre daha iyi olması ileri yaşlarda hidrasyon reaksiyonlarının tamamlanmasına bağlı matris olgunluğuna bağlıdır.

Deformasyon kapasiteleri ile ilgili olarak 28 ve 180 günlük numunelerde eğilme dayanımı ile benzer davranışlar görülmüştür. En düşük deformasyon kapasiteleri KF içerikli karışımlarda olmuştur. Bu durumun nedeni S/BM oranının düşüklüğüne bağlı betonun işlenebilirliğinin azalmasının yanında, %2 oranında PVA lifi ile birlikte %1 oranında KF lifin kullanılmasına bağlı matris içerisinde kusur ve/veya boşlukların bulunmasıdır. Söz konusu durum betonun sünekliğini olumsuz etkilemiştir.

### **5.3. Karbon Esaslı Malzemelerle Takviye Edilmiş ECC'lerin Kendiliğinden İyileşme Performansı**

#### Elektriksel direnç yöntemiyle kendiliğinden iyileşmenin belirlenmesi

28 ve 180 günlük sağlam ve ön yükleme ile hasar verilmiş silindir numunelerin sürekli su ve ıslanma-kuruma kür koşullarında ED değişimlerine bağlı iyileşme performansı değerlendirildiğinde, sonuçlarda varyasyon görülmektedir. Karışım tipi ve kür koşullarından bağımsız olarak hem sağlam hem hasarlı numunelerde genel eğilimle uyumlu olarak KF veya KNT içerikli karışımların ED değişim oranlarında büyük değişimler yani kendiliğinden iyileşme görülmüştür. Ancak, ED deneylerine göre KNT'nin KF'ye veya KF'nin KNT'ye göre daha iyi ED değişimi gösterdiğine dair net sonuç elde edilememiştir. Bununla birlikte yer yer kontrol numunelerinde de ED değişimlerinde ciddi artışlar görülmüştür. Bu durumun nedeni her ne kadar numunelerde ED ölçümlerinden önce fırına konularak nem faktörü ortadan kaldırılmaya çalışılsa da, numunelerin içinde nem bulunma ihtimali, iyon yapısı ve konsantrasyonu gibi parametrelerin ED değişimini etkilemesi olarak düşünülebilir.

Bununla birlikte 28 günlük numunelerin ED değişim oranına bağlı kendiliğinden iyileşme kabiliyeti 180 günlük ileri yaştaki numunelere göre daha iyi bulunmuştur. 28 günlük numunelerde daha iyi kendiliğinden iyileşme performansı gözlemlense de, hidrasyon reaksiyonları durma noktasına gelmiş 180 günlük numunelerde belli oranda iyileşme gözlemlenmiştir.

#### Çatlakların Kendiliğinden İyileşmesi

28 ve 180 günlük ön yükleme ile hasar verilmiş silindir numunelerin çatlaklarının kendiliğinden iyileşme performansına baktığımızda, genel olarak sürekli su kür koşulunda kendiliğinden iyileşmenin ıslanma-kuruma kür koşuluna göre daha iyi olduğu, çatlakların

daha fazla kapandığı gözlemlenmiştir. Kendiliğinden iyileşme için gerekli reaksiyonlar sürekli nemin varlığında daha belirgin olmuştur.

Bunun yanında çatlakların iyileşmesi ile ilgili önemli parametrelerden birisi de çatlak genişliğidir. Çatlak genişliği ortalama 100  $\mu\text{m}$ 'a kadar olan numunelerin hemen hemen hepsinin iyileştiği, ancak ortalama olarak 100  $\mu\text{m}$  üzeri çatlakların belli oranda iyileştiği görülmektedir.

#### HKİG testi ile kendiliğinden iyileşmenin belirlenmesi

Bu kısımdaki sonuçlara genel olarak bakıldığında özellikle her yaşta KNT içeren sağlam ECC numuneleri ile ileri yaşlardaki (180 günlük) ECC karışımlarının tamamında HKİG değerleri oldukça düşük bulunmuştur. Sonuçlar incelendiğinde çatlatılmış haldeki KNT içeren numuneler 180 günde (ileri yaşlarda) dahi 100 Coulomb değerinden zaman zaman daha az değere sahip olmuştur. Her ne kadar inert bir malzeme de olsa KNT meydana getirdiği çekirdeklenme etkisi sayesinde yoğun bir mikro yapı oluşmasına diğer karışımlara kıyasla daha elverişli kılmıştır. Bu durum KNT içeren numunelerin, ASTM C1202'ye göre polimer emdirilmiş betonlarla benzer performans gösterdiğini işaret etmiştir.

#### Elektriksel direnç sonuçlarına göre kendiliğinden iyileşme ve kendiliğinden algılama performansı

Ön yükleme sırasında kendiliğinden algılama performansı ile ilgili olarak;

28 ve 180 günlük numunelerin elektriksel direncindeki oransal değişim yüzdeleri (FCER) değerlendirildiğinde, genel olarak KNT içerikli numunelerin FCER değerleri daha yüksek bulunmuştur. Yani hasar karşısında kendini algılama yeteneği ECC-KF ve ECC-Kontrol numunelerine göre daha hassas olduğu gözlemlenmiştir.

Ön yüklenmiş kiriş numunelerin elektriksel direnç geri kazanım oranına bağlı kendiliğinden iyileşme performansı ile ilgili olarak, silindir numunelerindeki gibi sonuçlarda varyasyon görülmüştür. 28 ve 180 günlük kiriş numunelerin elektriksel direnç geri kazanım oranları incelendiğinde, genel olarak kontrol numunelerinin her iki kür koşulunda erken dönemlerde ED geri kazanım oranı KF ve KNT içerikli numunelere göre fazla olduğu görülmüştür. Ancak 90 gün kür sonunda karbon esaslı malzeme içeren numunelerde bu oranın belirgin

oranda artış sağladığı gözlemlenmiştir. Silindir numuneler ile uyumlu olarak kırış numunelerinde de kendiliğinden iyileşme etkisi erken yaşlarda daha fazla olmuştur. Ancak ileri yaşlarda dahi kendiliğinden iyileşmenin belirli seviyede mümkün olduğu saptanmıştır.

#### Kendi kendine iyileşmenin eğilme performansı üzerine etkileri

28 ve 180 günlük numunelerde genel olarak bütün kür koşullarında, sağlam numunelere ön yükleme yapıp hasar verildikten sonra kür edilen bütün ECC numunelerin 90 günlük kür süresi sonundaki eğilme dayanımı sağlam numunelerin eğilme dayanımı ile mukayese edilebilir seviyelerdedir. Bu durum hasarlı numunelerin kendiliğinden iyileşerek mekanik özelliklerini sağladığını göstermiştir.

#### **5.4. Mikro Yapısal Karakterizasyon**

SEM görüntüleri, önceden yüklenmiş tüm ECC örneklerinde mikro çatlakların kendi kendini kısmen veya tamamen iyileştirdiğini göstermiştir. Mikro çatlakların yüzeyindeki iyileşme ürünlerinin EDX verileri, tüm ECC karışımlarında yüksek miktarda oksijen (O), kalsiyum (Ca) ve karbon (C) olduğunu göstermiştir. Bunun yanında yer yer silika (Si) zirveleri de yüksek seviyeye ulaşmıştır. Bu durum ECC numunelerinde kendiliğinden iyileşme ürünü olarak  $\text{CaCO}_3$  ile birlikte C-S-H jellerinin varlığını ortaya koymaktadır. Ayrıca yapılmış olan TG analizi ve XRD deneyleri ile temel iyileşme ürününün  $\text{CaCO}_3$  olduğu ve hidratasyon ürünü olan C-S-H jelleri ile de çatlakların kapatıldığı desteklenmiştir.

#### **5.5. Öneriler**

Bundan sonra yapılacak çalışmalar ile ilgili;

Karbon esaslı malzemelerin kullanımında (özellikle KF için) kullanılan malzeme hacminde (KF ve PVA) mekanik ve piezorezistif performans özellikleri bazlı bir optimizasyonun gerçekleştirilmesi, KNT içeren karışımlarda da benzer bir optimizasyon yapılarak mekanik özelliklerin yeniden test edilmesi, ayrıca iyileşme ve algılama performansının da bu çalışma ile kıyaslanması tavsiyeye değer görülmüştür.

Ayrıca bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda, küçük ölçekli numuneler kullanılmıştır. Mekanik performansın değerlendirilmesinde (özellikle eğilme dayanımı) günümüz şartlarına uygun büyük ölçekli kiriş elemanlarının, bu çalışmada belirtilen dört noktalı eğilme testindeki aynı  $a/d$  oranı (kesme açıklığının faydalı derinliğe oranı) ile test edilerek mekanik performanslarının kıyaslanması,

Büyük ölçekli kiriş elemanların aynı şartlarda ön yükleme yapıldıktan sonra, sürekli su ve ıslanma-kuruma kür koşullarında bekletilerek kendiliğinden iyileşme ve algılama performanslarının küçük ölçekli numuneler ile korelasyonlarının saptanması tavsiye edilmiştir.

Son olarak; donatı içeren büyük boyutlu kirişler için karbon esaslı malzeme kullanılması ile çatlak oluşumu sonrasında belli kür koşullarında kür edilirken, söz konusu malzemelerin kendiliğinden iyileşmeye katkısının donatı korozyonuna etkisi ile ilgili çalışma yapılması da diğer bir öneri olarak görülmüştür.



## KAYNAKLAR

- Adamson, A.W. (1973). *Physical chemistry* (Second edition). Orlando: Academic Press.
- Al-Dahawi, A., Öztürk, O., Emami, F., Yıldırım, G., and Şahmaran, M. (2016a). Effect of mixing methods on the electrical properties of cementitious composites incorporating different carbon-based materials. *Construction and Building Materials*, 104, 160-168.
- Al-Dahawi, A., Sarwary, M. H., Öztürk, O., Yıldırım, G., Akın, A., Şahmaran, M., and Lachemi, M. (2016b). Electrical percolation threshold of cementitious composites possessing self-sensing functionality incorporating different carbon-based materials. *Smart Materials and Structures*, 25(10), 105005.
- Al-Dahawi, A., Yıldırım, G., Öztürk, O., and Şahmaran, M. (2017). Assessment of self-sensing capability of Engineered Cementitious Composites within the elastic and plastic ranges of cyclic flexural loading. *Construction and Building Materials*, 145, 1-10.
- Aldea, C. M., Song, W. J., Popovics, J. S., and 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., and Şahmaran, M. (2015). Effect of self-healing on the different transport properties of cementitious composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 13(3), 112-123.
- Alyousif, A., Lachemi, M., Yıldırım, G., Aras, G. H., and Şahmaran, M. (2016). Influence of cyclic frost deterioration on water sorptivity of microcracked cementitious composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(4), 04015159.
- Atış, C. D. (2001). Uçucu kül içeren, silindirle sıkıştırılabilen betonların özellikleri. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 25, 503-515.
- Black, L., Breen, C., Yarwood, J., Garbev, K., Stemmermann, P., and Gasharova, B. (2007). Structural features of C-S-H (I) and its carbonation in air-a Raman spectroscopic study. Part II: carbonated phases. *Journal of the American Ceramics Society*, 90(3), 908-917.
- Çelebi, M., Nishenko, S., Astill, C., and Chung, R. M. (2002). *Seismic Instrumentation of Federal Buildings; (with Emphasis on Federal Buildings)*, Technical Report No. 0-7460-68170, United States Geological Survey, Menlo Park, CA.
- Chen, P.W., and Chung, D.D.L. (1993). Carbon fiber reinforced concrete for smart structures capable of non-destructive flaw detection. *Smart Materials and Structures*, 2, 22-30.
- Chen, P.W., and Chung, D.D.L. (1996). Concrete as a new strain/stress sensor. *Composites: Part B*, 27, 11-23.
- Chung, D. D. L. (1998). Self-monitoring structural materials; Composite Materials Research Laboratory, State University of New York, *Materials Science and Engineering*, 22, 57-78.

- Clear, C. A. (1985). *The effects of autogenous healing upon the leakage of water through cracks in concrete*, Wexham Springs: Cement and Concrete Association.
- De Rooij, M., Van Tittelboom, K., De Belie, N., and Schlangen, E. (Eds.). (2013). *Self-healing Phenomena in Cement-based Materials: State-of-the-art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC*, Springer, Dordrecht, Netherlands.
- Desa, M. S. M., Ibrahim, M. H. W., Shahidan, S., Ghadzali, N. S., and Misri, Z. (2018). Fundamental and assessment of concrete structure monitoring by using acoustic emission technique testing: A review. *Earth and Environmental Science*, 140, 012142.
- Edwardsen C. (1999). Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Materials Journal*, 96(4), 448–455.
- Emmons, E., Vaysburd, A., and McDonald, J. (1993). A rational approach to durable concrete repairs. *Concrete International*, 15, 40-45.
- Emmons, P., and Vaysburd, A. (1995). Performance criteria for selection of repair materials, Phase I. Technical Report.
- Gagne, R., and Argouges, M. (2012). A study of the natural self-healing of mortars using air-flow measurements. *Materials and Structures*, 45(11), 1625-1638.
- Grattan-Bellew, P.E. (1996). Microstructural investigation of deteriorated Portland cement concretes. *Construction and Building Materials*, 10, 3-16.
- Han, B., Yu, X., Ou, J. (2014). *Self-sensing Concrete in Smart Structures* (First edition). Butterworth Heinemann, 398.
- Hou, T. C. (2008). *Wireless and electromechanical approaches for strain sensing and crack detection in FRC materials* (Doctoral dissertation, University of Michigan, 2008).
- Hou, T. C., and Lynch, J. P. (2006, 12-13 October). *Tomographic imaging of crack damage in cementitious structural components*, Proceedings of the 4th International Conference on Earthquake Engineering, Taipei, China, 162.
- Ismail, M., Toumi, A., Francois, R., and 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., and Hornain, H. (1995). SEM observations of the microstructure of frost deteriorated and self-healed concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(8), 1781-1790.
- Lauer, K. R. (1956). Autogenous healing of cement paste. *ACI Journal Proceedings*, 52(6), 1083-1098.
- Lauer, K. R., and Slate, F. O. (1956). Autogenous healing of cement paste. *ACI Journal Proceedings*, 52, 1083–1097.
- Lepech, M. D., and Li, V. C. (2009). Water permeability of engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 744-753.

- Li, M., and Li, V. C. (2009). Influence of material ductility on performance of concrete repair. *ACI Materials Journal*, 106(5), 419-428.
- Li, M., and Li, V. C. (2011). Cracking and healing of engineered cementitious composites under chloride environment. *ACI Materials Journal*, 108(3), 333-340.
- Li, M., Şahmaran, M., and Li, V. C. (2007). Effect of cracking and healing on durability of engineered cementitious composites under marine environment, *Proceedings of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, Stuttgart, Germany, 313-322.
- Li, V. C. (1993). From micromechanics to structural engineering – the design of cementitious composites for civil engineering applications. *JSCE Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, 10(2), 37-48.
- Li, V. C. (1997). *Engineered cementitious composites – tailored composites through micromechanical modeling. Proceedings of Fiber Reinforced Concrete: Present and Future*, Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, 64-97.
- Li, V. C. (1998). *ECC-tailored composites through micromechanical modeling*, in: Banthia N, (Eds.) *Proceeding fiber reinforced concrete: Present and the Future Conference*, Montreal: CSCE Press, 64-97.
- Li, V. C., and Herbert, E. (2012). Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(6), 207-218.
- Li, V. C., and Kanda, T. (1998). Innovations forum: engineered cementitious composites for structural applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(2), 66-69.
- Li, V. C., and Leung, C. K. Y. (1992). Theory of steady state and multiple cracking of random discontinuous fiber reinforced brittle matrix composites. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 118(11), 2246-2264.
- Li, V. C., and Stang, H. (2004). Elevating FRC material ductility to infrastructure durability. *Proceedings of BEFIB*, 171-186.
- Li, V. C., Wu, C., Wang, S., Ogawa, A., and Saito, T. (2002). Interface tailoring for strain-hardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (pva-ecc). *ACI Materials Journal*, 99(5), 463-472.
- Liu, H., Zhang, Q., Li, V. C., Su, H., and Gu, C. (2017). Durability study on engineered cementitious composites (ECC) under sulfate and chloride environment. *Construction and Building Materials*, 133, 171-181.
- Loving, M. W. (1936). Autogenous healing of concrete, *Bulletin, American Concrete Pipe Association* 13 3.
- Lv, Z., and Chen, D. (2014). Overview of recent work on self-healing in cementitious materials. *Materiales de Construcción*, 64(316), e034.
- Ma, H., Qian, S., and 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., and Chan, G. W. (2009). Growth of Cement Hydration Products on Single-Walled Carbon Nanotubes. *Journal of the American Ceramic Society*, 92(6), 1303-1310.
- Marshall, D. B., and Cox, B. N. (1988). A J-integral method for calculating steady-state matrix cracking stresses in composites. *Mechanics of Materials*, 7(2), 127-133.
- Mather, B., and Warner, J. (2003). Why do concrete repairs fail. Interview held at University of Wisconsin, Department of Engineering Professional Development, Wisconsin.
- Mehta, P. K. (1994). Concrete technology at the crossroads — problems and opportunities. *ACI Special Publication*, 144, 1-30.
- Meyyappan, M. (2005). *Carbon nanotubes: science and applications*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Miyazato, S., and Hiraishi, Y. (2005). *Transport properties and steel corrosion in ductile fiber reinforced cement composites*, Proceedings of 11th International Conference on Fracture, Turin, Italy, 20-25.
- Morgan, D. R. (1996). Compatibility of concrete repair materials and systems. *Construction and Building Materials*, 10(1), 57-67.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete*. Harlow: Longman.
- Neville, A. M. (2002). Autogenous healing – a concrete miracle. *Concrete International*, 24(11), 76–82.
- Ngo, S. H., Huynh, T. P., Le, T. T. T., and Mai, N. H. T. (2018). Effect of High Loss on Ignition-Fly Ash on Properties of Concrete Fully Immersed in Sulfate Solution. *Materials Science and Engineering*, 371, 012007.
- Nijland, T. G., Larbi, J. A., Van Hees, R. P., Lubelli, B., and De Rooij, M. (2007). Self healing phenomena in concretes and masonry mortars: a microscopic study. Proceedings of First International Conference on Self Healing Materials, 1-9.
- Özbay, E., Şahmaran, M., Lachemi, M., and Yücel, H. E. (2013b). Self-healing of microcracks in high volume fly ash incorporated engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 110, 33-44.
- Özbay, E., Şahmaran, M., Yücel, H. E., Erdem, T. K., Lachemi, M., and Li, V. C. (2013a). Effect of Sustained Flexural Loading on Self-Healing of Engineered Cementitious Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 11(5), 167-179.
- Öztürk, O., Yıldırım, G., Keskin, Ü. S., Siad, H. and Şahmaran, M. (2020). Nano-tailored multi-functional cementitious composites. *Composites Part B*, 182, 107670.
- Qi, H., Schulz, B., Vad, T., Liu, J., Mäder, E., Seide, G., and Gries, T. (2015). Novel carbon nanotube/cellulose composite fibers as multifunctional materials. *ACS Applied Materials Interfaces*, 7, 22404–22412.

- Qian, S., and 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., and 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.
- Qian, S., Zhou, J., De Rooij, M. R., Schlangen, E., Ye, G., and Van Breugel, K. (2009). Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials. *Cement and Concrete Composites*, 31(9), 613-621.
- Ranade, R., Zhang, J., Lynch, J. P., and Li, V. C. (2014). Influence of micro-cracking on the composite resistivity of engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, 58, 1-12.
- Reinhardt, H. W., and 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.
- Reinhardt, H. W., Jonkers, H., Van Tittelboom, K., Snoeck, D., De Belie, N., De Muynck, W., Verstraete, W., Wang, J., and Mechtcherine, V. (2013). *Self-healing phenomena in cement-based materials: Recovery against environmental action*, Springer, 65-117.
- Safiuddin, M., Gonzalez, M., Cao, J., and Tighe, S. L. (2014). State-of-the-art report on use of nano-materials in concrete. *International Journal of Pavement Engineering*, 15(10), 940-949.
- Şahmaran, M., and Li, V. C. (2007). De-icing salt scaling resistance of mechanically loaded engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, 37(7), 1035-1046.
- Şahmaran, M., and 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., and Li, V. C. (2009a). Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash. *Cement and Concrete Research*, 39(11), 1033-1043.
- Şahmaran, M., and Li, V. C. (2009b). Influence of microcracking on water absorption and sorptivity of ECC. *Materials and Structures*, 42(5), 593-603.
- Şahmaran, M., and Li, V. C. (2016). Suppressing Alkali-Silica Expansion. *Concrete International*, 38(5), 47-52.
- Şahmaran, M., Anıl, Ö., Lachemi, M., Yıldırım, G., Ashour, A. F., and Acar, F. (2015). Effect of corrosion on shear behavior of reinforced engineered cementitious composite beams. *ACI Structural Journal*, 112(6), 771-782.
- Şahmaran, M., Lachemi, M., Hossain, K. M., Ranade, R., and Li, V. C. (2009). Influence of aggregate type and size on ductility and mechanical properties of engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 106(3), 308-316.

- Şahmaran, M., Li, M., and Li, V. C. (2007). Transport properties of engineered cementitious composites under chloride exposure. *ACI Materials Journal*, 104(6), 604-611.
- Şahmaran, M., Yıldırım, G., and 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., Yıldırım, G., Aras, G. H., Keskin, S. B., Keskin, Ö. K., and Lachemi, M. (2017). Self-Healing of Cementitious Composites to Reduce High CO<sub>2</sub> Emissions. *ACI Materials Journal*, 114(01), 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. *Magazine of Concrete Research*, 66(8), 409-419.
- Şahmaran, M., Yücel, H. E., Demirhan, S., Arık, M. T., and Li, V. C. (2012). Combined effect of aggregate and mineral admixtures on tensile ductility of engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 109(6), 627-638.
- 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. *Construction and Building Materials*, 176, 313-322.
- 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.
- Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği. (2009). *Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri*. Ankara: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 112.
- Van Tittelboom, K., and De Belie, N. (2013). Self-healing in cementitious materials - a review. *Materials*, 6(6), 2182-2217.
- Vaysburd, A., and Emmons, P. H. (2004). Corrosion inhibitors and other protective systems in concrete repair: concepts or misconcepts. *Cement and Concrete Composites*, 26(3), 255-263.
- Vesely', V., Kone, P., Lehner, P., Pieszka, D., and Zídek, L. (2014). Electrical resistivity and ultrasonic measurements during sequential fracture test of cementitious composite. *Frattura ed Integrita Strutturale*, 30, 263-272.
- Wang, C., Li, K. Z., Li, H. J., Jiao, G. S., Lu, J., and Hou, D. S. (2008). Effect of carbon fiber dispersion on the mechanical properties of carbon fiber-reinforced cement-based composites. *Materials Science and Engineering A*, 487, 52-57.
- Wang, S., and Li, V. C. (2004). Tailoring of pre-existing flaws in ecc matrix for saturated strain hardening. Proceedings of FRAMCOS-5, Vail, 1005-1012.

- Wu, M., Johannesson, B., and 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.
- Yang, E. H., Yang, Y., and Li, V. C. (2007). Use of high volumes of fly ash to improve ecc mechanical properties and material greenness. *ACI Materials Journal*, 104(6), 620-628.
- Yang, Y., Lepech, M. D., Yang, E. H., and 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., and Li, V. C. (2011). Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age. *Cement and Concrete Research*, 41(2), 176-83.
- Yıldırım, G. (2018). Dimensional stability of deflection-hardening hybrid fiber reinforced concretes with coarse aggregate: Suppressing restrained shrinkage cracking. *Structural Concrete*, 1-15, doi.org/10.1002/suco.201800096.
- Yıldırım, G. (2020). Multifunctional smart nanoconcretes. In M. S. Liew, P. N. Tri, T. A. Nguyen and S. Kakooei (Eds.), *Smart nanoconcretes and cement-based materials*. Elsevier, pp. 419-445.
- Yıldırım, G., Alyousif, A., Şahmaran, M., and Lachemi, M. (2015d). Assessing the self-healing capability of cementitious composites under increasing sustained loading. *Advances in Cement Research*, 27(10), 581-592.
- Yıldırım, G., Aras, G. H., Banyhussan, Q. S., Şahmaran, M., and Lachemi, M. (2015e). Estimating the self-healing capability of cementitious composites through non-destructive electrical-based monitoring, *Ndt & E International* 76 26-37.
- Yıldırım, G., Keskin, Ö. K., Keskin, S. B., Şahmaran, M., and Lachemi, M. (2015a). A review of intrinsic self-healing capability of engineered cementitious composites: Recovery of transport and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 101, 10-21.
- Yıldırım, G., Khiavi, A. H., Yeşilmen, S., and Şahmaran, M. (2018b). Self-healing performance of aged cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 87, 172-186.
- Yıldırım, G., Şahmaran, M., and Ahmed, H. U. (2015b). Influence of hydrated lime addition on the self-healing capability of high-volume fly ash incorporated cementitious composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(6), 04014187.
- Yıldırım, G., Şahmaran, M., Balçıkanlı, M., Özbay, E., and Lachemi, M. (2015c). Influence of cracking and healing on the gas permeability of cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 85, 217-226.
- Yıldırım, G., Sarwary, M. H., Al-Dahawi, A., Öztürk, O., Anıl, Ö., and Şahmaran, M. (2018a). Piezoresistive behavior of CF-and CNT-based reinforced concrete beams subjected to static flexural loading: Shear failure investigation. *Construction and Building Materials*, 168, 266-279.

- Zhang, Q., and Ye, G. (2011). Microstructure analysis of heated portland cement paste. *Procedia Engineering*, 14, 830-836.
- Zhang, W., Dehghani-Sani, A.A., and Blackburn, R.S. (2007). Carbon based conductive polymer composites. *Journal of Materials Science*, 42(10), 3408–3418.
- Zhang, Z., and Zhang, Q. (2017). Self-healing ability of Engineered Cementitious Composites (ECC) under different exposure environments. *Construction and Building Materials*, 156, 142-151.
- Zhang, Z., Qian, S., and 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.





**EKLER**

EK-1. Belli kür koşullarında kür edilen ECC silindir numunelerinin elektriksel direnç test sonuçları

Çizelge E1.1. Sürekli su ile kür edilen 28 günlük silindir numunelerin (ECC-1.2 ve ECC-2.2) elektriksel direnç testi sonuçları (k $\Omega$ )

| Karışım       | Numune       | Sağlam | Ön yüklenmiş | 15.gün | 30.gün | 45.gün | 60.gün | 75.gün | 90.gün |
|---------------|--------------|--------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ECC 1.2-L-K   | sağlam (1)   | 4,06   | -            | 44,00  | 51,47  | 65,80  | 79,47  | 88,00  | 99,00  |
|               | sağlam (2)   | 4,18   | -            | 44,87  | 55,70  | 67,40  | 74,80  | 83,50  | 97,20  |
|               | çatlaklı (3) | 4,17   | 6,20         | 59,10  | 62,00  | 70,00  | 82,00  | 91,00  | 103,00 |
|               | çatlaklı (4) | 4,48   | 9,50         | 62,00  | 72,00  | 79,00  | 87,00  | 93,00  | 107,40 |
|               | çatlaklı (5) | 4,40   | 8,00         | 48,00  | 58,00  | 61,00  | 79,00  | 82,50  | 93,00  |
| ECC 1.2-L-KF  | sağlam (1)   | 0,75   | -            | 4,55   | 5,78   | 7,16   | 7,83   | 8,31   | 9,04   |
|               | sağlam (2)   | 0,69   | -            | 4,99   | 6,28   | 7,63   | 8,00   | 8,17   | 8,93   |
|               | çatlaklı (3) | 0,59   | 0,78         | 3,77   | 4,63   | 5,00   | 7,43   | 6,12   | 6,63   |
|               | çatlaklı (4) | 0,60   | 0,83         | 5,60   | 7,71   | 7,90   | 8,41   | 9,12   | 10,90  |
|               | çatlaklı (5) | 0,61   | 0,72         | 5,30   | 6,83   | 7,43   | 7,98   | 8,14   | 9,84   |
| ECC 1.2-L-KNT | sağlam (1)   | 0,55   | -            | 25,40  | 35,40  | 42,10  | 51,20  | 60,30  | 67,80  |
|               | sağlam (2)   | 0,38   | -            | 19,40  | 38,30  | 47,50  | 53,40  | 58,90  | 69,45  |
|               | çatlaklı (3) | 0,67   | 3,53         | 30,60  | 37,70  | 47,80  | 56,50  | 69,80  | 83,70  |
|               | çatlaklı (4) | 0,45   | 3,75         | 29,00  | 36,40  | 43,60  | 59,00  | 61,00  | 73,20  |
|               | çatlaklı (5) | 0,34   | 3,63         | 22,00  | 24,80  | 32,50  | 42,00  | 56,40  | 64,20  |
| ECC 1.2 H-K   | sağlam (1)   | 2,12   | -            | 15,80  | 26,00  | 29,00  | 34,00  | 38,00  | 45,00  |
|               | sağlam (2)   | 2,74   | -            | 14,10  | 23,00  | 25,00  | 37,00  | 41,00  | 43,00  |
|               | çatlaklı (3) | 2,50   | 3,80         | 27,00  | 34,00  | 36,00  | 42,00  | 51,40  | 54,20  |
|               | çatlaklı (4) | 2,65   | 4,03         | 32,00  | 32,40  | 42,00  | 52,00  | 74,30  | 96,30  |
|               | çatlaklı (5) | 2,96   | 4,52         | 29,60  | 34,00  | 39,00  | 40,00  | 63,00  | 88,80  |
| ECC 1.2-H-KF  | sağlam (1)   | 0,65   | -            | 1,20   | 3,10   | 4,80   | 14,40  | 18,10  | 29,00  |
|               | sağlam (2)   | 0,74   | -            | 2,20   | 3,45   | 5,80   | 16,40  | 19,50  | 33,50  |
|               | çatlaklı (3) | 0,56   | 0,77         | 4,80   | 4,90   | 20,30  | 36,00  | 41,00  | 43,00  |
|               | çatlaklı (4) | 0,53   | 0,97         | 4,42   | 5,20   | 16,00  | 28,00  | 35,00  | 45,00  |
|               | çatlaklı (5) | 0,72   | 1,34         | 1,55   | 2,44   | 6,80   | 15,00  | 29,00  | 49,00  |
| ECC 1.2-H-KNT | sağlam (1)   | 1,85   | -            | 5,80   | 8,70   | 12,70  | 17,00  | 22,00  | 25,00  |
|               | sağlam (2)   | 1,99   | -            | 6,90   | 10,00  | 13,80  | 19,00  | 23,00  | 24,00  |
|               | çatlaklı (3) | 1,96   | 4,87         | 13,00  | 23,00  | 26,90  | 42,00  | 47,00  | 50,40  |
|               | çatlaklı (4) | 1,67   | 3,25         | 13,90  | 15,20  | 17,80  | 27,80  | 41,80  | 42,20  |
|               | çatlaklı (5) | 1,55   | 3,08         | 12,80  | 15,90  | 18,50  | 25,90  | 32,80  | 44,20  |
| ECC 2.2-L-K   | sağlam (1)   | 4,10   | -            | 32,00  | 45,00  | 98,00  | 135,00 | 144,00 | 201,00 |
|               | sağlam (2)   | 4,20   | -            | 34,00  | 47,00  | 87,00  | 141,00 | 151,00 | 188,00 |
|               | çatlaklı (3) | 4,50   | 16,81        | 130,00 | 172,00 | 210,00 | 217,00 | 257,00 | 290,00 |
|               | çatlaklı (4) | 4,86   | 17,61        | 138,00 | 200,00 | 240,00 | 318,00 | 325,00 | 335,00 |
|               | çatlaklı (5) | 4,25   | 16,85        | 148,00 | 220,00 | 238,00 | 330,00 | 345,00 | 349,00 |

EK-1. (devam) Belli kür koşullarında kür edilen ECC silindir numunelerinin elektriksel direnç test sonuçları

Çizelge E1.1. (devam) Sürekli su ile kür edilen 28 günlük silindir numunelerin (ECC-1.2 ve ECC-2.2) elektriksel direnç testi sonuçları (k $\Omega$ )

| Karışım       | Numune       | Sağlam | Ön yüklenmiş | 15.gün | 30.gün | 45.gün | 60.gün | 75.gün | 90.gün |
|---------------|--------------|--------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ECC 2.2-L-KF  | sağlam (1)   | 0,61   | -            | 9,40   | 20,70  | 32,00  | 45,00  | 62,00  | 79,00  |
|               | sağlam (2)   | 0,66   | -            | 10,80  | 23,90  | 41,00  | 52,50  | 57,40  | 78,00  |
|               | çatlaklı (3) | 0,58   | 2,72         | 22,00  | 36,00  | 45,00  | 63,00  | 96,00  | 135,00 |
|               | çatlaklı (4) | 0,81   | 0,99         | 17,40  | 19,00  | 29,60  | 41,00  | 61,80  | 71,50  |
|               | çatlaklı (5) | 1,07   | 2,68         | 5,07   | 11,00  | 15,00  | 26,80  | 44,50  | 67,40  |
| ECC 2.2 L-KNT | sağlam (1)   | 0,50   | -            | 15,00  | 25,00  | 44,00  | 49,00  | 74,00  | 98,00  |
|               | sağlam (2)   | 0,80   | -            | 17,00  | 32,00  | 58,00  | 66,00  | 77,00  | 99,00  |
|               | çatlaklı (3) | 0,25   | 7,91         | 19,00  | 39,00  | 69,00  | 84,00  | 155,00 | 350,00 |
|               | çatlaklı (4) | 1,10   | 8,45         | 34,00  | 44,00  | 77,00  | 111,00 | 201,00 | 340,00 |
|               | çatlaklı (5) | 1,60   | 8,03         | 35,00  | 46,00  | 71,00  | 108,00 | 176,00 | 315,00 |
| ECC 2.2 H-K   | sağlam (1)   | 4,50   | -            | 13,70  | 23,70  | 39,00  | 69,00  | 89,50  | 119,00 |
|               | sağlam (2)   | 4,90   | -            | 11,80  | 26,00  | 47,00  | 55,00  | 91,00  | 122,00 |
|               | çatlaklı (3) | 5,18   | 6,46         | 18,50  | 30,30  | 55,00  | 88,00  | 110,00 | 130,00 |
|               | çatlaklı (4) | 6,68   | 8,58         | 10,70  | 31,10  | 57,00  | 95,00  | 121,00 | 151,00 |
|               | çatlaklı (5) | 4,76   | 6,27         | 16,30  | 33,00  | 55,00  | 89,60  | 134,00 | 150,00 |
| ECC 2.2 H-KF  | sağlam (1)   | 0,55   | -            | 2,40   | 5,80   | 7,80   | 15,40  | 18,40  | 24,40  |
|               | sağlam (2)   | 0,41   | -            | 3,55   | 6,77   | 9,12   | 15,90  | 17,80  | 26,90  |
|               | çatlaklı (3) | 0,78   | 1,56         | 2,36   | 4,89   | 6,26   | 14,54  | 18,16  | 25,32  |
|               | çatlaklı (4) | 0,62   | 1,63         | 2,81   | 3,04   | 5,60   | 9,28   | 12,24  | 22,57  |
|               | çatlaklı (5) | 1,37   | 2,37         | 10,40  | 15,20  | 18,50  | 19,00  | 19,40  | 30,10  |
| ECC 2.2 H-KNT | sağlam (1)   | 0,96   | -            | 2,10   | 3,50   | 6,10   | 8,80   | 12,00  | 12,40  |
|               | sağlam (2)   | 0,88   | -            | 2,50   | 3,70   | 6,50   | 9,70   | 11,40  | 13,70  |
|               | çatlaklı (3) | 0,54   | 1,63         | 7,01   | 11,87  | 12,70  | 14,67  | 15,91  | 16,90  |
|               | çatlaklı (4) | 0,64   | 1,92         | 7,25   | 9,02   | 16,59  | 18,35  | 20,56  | 21,40  |
|               | çatlaklı (5) | 0,61   | 2,07         | 7,90   | 8,60   | 13,30  | 16,40  | 19,90  | 20,80  |

EK-1. (devam) Belli kür koşullarında kür edilen ECC silindir numunelerinin elektriksel direnç test sonuçları

Çizelge E1.2. Islanma-kuruma ile kür edilen 28 günlük silindir numunelerin (ECC-1.2 ve ECC-2.2) elektriksel direnç testi sonuçları (k $\Omega$ )

| Karışım       | Numune       | Sağlam | Ön yüklenmiş | 15.gün | 30.gün | 45.gün | 60.gün | 75.gün | 90.gün |
|---------------|--------------|--------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ECC 1.2 L-K   | sağlam (1)   | 4,08   | -            | 14,00  | 19,00  | 28,00  | 37,00  | 44,00  | 51,00  |
|               | sağlam (2)   | 4,44   | -            | 18,00  | 22,00  | 39,00  | 47,00  | 56,00  | 68,00  |
|               | çatlaklı (3) | 4,06   | 6,80         | 17,70  | 25,10  | 36,00  | 45,10  | 68,00  | 77,30  |
|               | çatlaklı (4) | 4,26   | 7,80         | 17,10  | 28,00  | 42,60  | 97,60  | 107,00 | 110,00 |
|               | çatlaklı (5) | 4,42   | 9,00         | 10,00  | 15,00  | 22,50  | 42,10  | 56,00  | 75,30  |
| ECC 1.2 L-KF  | sağlam (1)   | 0,66   | -            | 2,47   | 5,88   | 8,90   | 14,50  | 17,00  | 21,00  |
|               | sağlam (2)   | 0,56   | -            | 2,99   | 6,10   | 7,70   | 11,40  | 14,00  | 16,00  |
|               | çatlaklı (3) | 0,80   | 1,96         | 8,00   | 12,20  | 15,20  | 16,50  | 19,65  | 28,00  |
|               | çatlaklı (4) | 0,77   | 1,99         | 4,10   | 8,20   | 10,00  | 13,00  | 14,00  | 15,00  |
|               | çatlaklı (5) | 0,60   | 1,70         | 5,43   | 8,73   | 16,88  | 25,70  | 25,83  | 34,20  |
| ECC 1.2 L-KNT | sağlam (1)   | 0,72   | -            | 12,00  | 17,20  | 23,00  | 29,00  | 34,50  | 44,00  |
|               | sağlam (2)   | 0,77   | -            | 9,60   | 13,90  | 20,00  | 25,00  | 36,30  | 45,90  |
|               | çatlaklı (3) | 0,82   | 3,74         | 10,40  | 14,50  | 22,00  | 23,00  | 28,20  | 54,00  |
|               | çatlaklı (4) | 0,98   | 4,34         | 17,40  | 27,50  | 29,50  | 33,00  | 40,60  | 50,60  |
|               | çatlaklı (5) | 0,68   | 4,65         | 16,80  | 18,50  | 26,30  | 32,00  | 41,80  | 48,00  |
| ECC 1.2 H-K   | sağlam (1)   | 2,54   | -            | 9,30   | 14,00  | 25,00  | 28,00  | 31,00  | 35,70  |
|               | sağlam (2)   | 2,11   | -            | 8,60   | 15,20  | 21,00  | 25,00  | 27,00  | 31,80  |
|               | çatlaklı (3) | 2,61   | 4,00         | 13,20  | 22,00  | 38,30  | 43,00  | 49,80  | 51,70  |
|               | çatlaklı (4) | 2,37   | 3,18         | 15,40  | 18,20  | 22,70  | 36,50  | 37,60  | 40,30  |
|               | çatlaklı (5) | 2,26   | 3,84         | 10,20  | 12,00  | 27,40  | 31,00  | 38,30  | 50,20  |
| ECC 1.2 H-KF  | sağlam (1)   | 0,87   | -            | 4,10   | 4,80   | 5,30   | 6,70   | 7,90   | 9,80   |
|               | sağlam (2)   | 0,96   | -            | 3,15   | 4,70   | 5,60   | 6,90   | 8,00   | 9,84   |
|               | çatlaklı (3) | 0,61   | 1,54         | 6,71   | 7,52   | 8,18   | 8,60   | 9,52   | 10,89  |
|               | çatlaklı (4) | 0,93   | 1,23         | 8,25   | 9,10   | 11,05  | 12,00  | 13,81  | 15,00  |
|               | çatlaklı (5) | 0,88   | 1,09         | 1,30   | 2,00   | 4,20   | 5,00   | 7,32   | 8,61   |
| ECC 1.2 H-KNT | sağlam (1)   | 0,54   | -            | 11,00  | 17,00  | 22,00  | 25,00  | 36,00  | 34,10  |
|               | sağlam (2)   | 0,58   | -            | 14,00  | 19,00  | 23,00  | 27,00  | 33,00  | 42,80  |
|               | çatlaklı (3) | 0,66   | 2,99         | 12,00  | 17,90  | 27,20  | 35,40  | 43,20  | 54,10  |
|               | çatlaklı (4) | 0,96   | 3,93         | 14,00  | 21,00  | 24,90  | 34,60  | 40,70  | 44,00  |
|               | çatlaklı (5) | 0,59   | 3,11         | 17,50  | 21,00  | 25,60  | 36,50  | 43,90  | 57,50  |
| ECC 2.2 L-K   | sağlam (1)   | 4,10   | -            | 41,00  | 68,00  | 201,00 | 230,00 | 235,00 | 237,50 |
|               | sağlam (2)   | 3,30   | -            | 44,00  | 97,00  | 244,00 | 265,00 | 269,00 | 299,40 |
|               | çatlaklı (3) | 4,48   | 6,80         | 20,00  | 190,00 | 250,00 | 263,00 | 283,00 | 300,00 |
|               | çatlaklı (4) | 5,00   | 7,49         | 50,00  | 120,00 | 160,00 | 178,00 | 204,00 | 234,00 |
|               | çatlaklı (5) | 4,85   | 5,50         | 55,00  | 160,00 | 215,00 | 241,00 | 258,00 | 277,00 |

EK-1. (devam) Belli kür koşullarında kür edilen ECC silindir numunelerinin elektriksel direnç test sonuçları

Çizelge E1.2. (devam) Islanma-kuruma ile kür edilen 28 günlük silindir numunelerin (ECC-1.2 ve ECC-2.2) elektriksel direnç testi sonuçları (k $\Omega$ )

| Karışım       | Numune       | Sağlam | Ön yüklenmiş | 15.gün | 30.gün | 45.gün | 60.gün | 75.gün | 90.gün |
|---------------|--------------|--------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ECC 2.2 L-KF  | sağlam (1)   | 1,50   | -            | 2,20   | 4,50   | 14,00  | 18,50  | 21,00  | 27,70  |
|               | sağlam (2)   | 1,10   | -            | 3,70   | 5,90   | 19,00  | 22,00  | 23,40  | 24,85  |
|               | çatlaklı (3) | 1,04   | 11,30        | 12,00  | 13,00  | 21,00  | 23,60  | 27,00  | 27,50  |
|               | çatlaklı (4) | 0,73   | 8,11         | 12,00  | 14,20  | 15,35  | 16,29  | 17,80  | 24,03  |
|               | çatlaklı (5) | 0,88   | 6,92         | 7,00   | 8,79   | 9,84   | 21,25  | 23,20  | 32,64  |
| ECC 2.2 L-KNT | sağlam (1)   | 0,90   | -            | 10,00  | 21,00  | 35,00  | 37,00  | 39,00  | 42,50  |
|               | sağlam (2)   | 1,20   | -            | 12,00  | 22,00  | 33,00  | 36,00  | 50,00  | 61,80  |
|               | çatlaklı (3) | 0,80   | 10,20        | 17,00  | 25,00  | 37,00  | 48,00  | 61,00  | 75,00  |
|               | çatlaklı (4) | 0,20   | 8,03         | 15,50  | 28,00  | 35,00  | 43,50  | 56,00  | 67,70  |
|               | çatlaklı (5) | 0,50   | 8,10         | 18,00  | 19,00  | 28,00  | 34,00  | 46,00  | 62,10  |
| ECC 2.2 H-K   | sağlam (1)   | 4,50   | -            | 5,80   | 14,00  | 24,00  | 36,00  | 73,00  | 110,00 |
|               | sağlam (2)   | 4,70   | -            | 7,10   | 18,00  | 26,00  | 41,00  | 77,00  | 115,00 |
|               | çatlaklı (3) | 5,00   | 6,62         | 17,90  | 31,00  | 52,00  | 63,00  | 98,00  | 140,00 |
|               | çatlaklı (4) | 5,02   | 7,20         | 12,10  | 36,00  | 62,00  | 88,00  | 106,00 | 150,00 |
|               | çatlaklı (5) | 4,48   | 6,99         | 19,90  | 46,00  | 71,00  | 101,00 | 116,00 | 120,00 |
| ECC 2.2 H-KF  | sağlam (1)   | 0,69   | -            | 2,00   | 7,87   | 13,00  | 19,30  | 22,40  | 24,98  |
|               | sağlam (2)   | 0,92   | -            | 2,75   | 8,00   | 14,70  | 17,40  | 25,00  | 25,57  |
|               | çatlaklı (3) | 0,71   | 0,94         | 1,99   | 16,30  | 18,10  | 20,60  | 33,90  | 34,00  |
|               | çatlaklı (4) | 0,47   | 0,99         | 2,90   | 3,77   | 7,82   | 10,76  | 25,79  | 38,02  |
|               | çatlaklı (5) | 0,69   | 0,83         | 2,78   | 7,44   | 10,60  | 17,85  | 22,75  | 32,90  |
| ECC 2.2 H-KNT | sağlam (1)   | 0,25   | -            | 4,00   | 7,00   | 9,00   | 23,00  | 23,70  | 24,70  |
|               | sağlam (2)   | 0,77   | -            | 9,00   | 13,00  | 15,00  | 19,00  | 22,00  | 27,80  |
|               | çatlaklı (3) | 0,36   | 1,96         | 7,64   | 10,90  | 19,23  | 19,60  | 29,65  | 30,70  |
|               | çatlaklı (4) | 0,58   | 1,90         | 11,30  | 15,50  | 23,30  | 34,50  | 35,80  | 36,60  |
|               | çatlaklı (5) | 0,44   | 1,70         | 8,29   | 9,00   | 20,00  | 30,30  | 39,98  | 41,00  |

EK-1. (devam) Belli kür koşullarında kür edilen ECC silindir numunelerinin elektriksel direnç test sonuçları

Çizelge E1.3. Sürekli su ile kür edilen 180 günlük silindir numunelerin (ECC-1.2 ve ECC-2.2) elektriksel direnç testi sonuçları (k $\Omega$ )

| Karışım       | Numune       | Sağlam | Ön yüklenmiş | 15.gün | 30.gün | 45.gün | 60.gün | 75.gün | 90.gün |
|---------------|--------------|--------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ECC 1.2 L-K   | sağlam (1)   | 88,00  | -            | 110,00 | 145,00 | 187,00 | 200,00 | 299,00 | 315,00 |
|               | sağlam (2)   | 90,00  | -            | 105,00 | 113,00 | 190,00 | 226,00 | 304,00 | 401,00 |
|               | çatlaklı (3) | 94,00  | 102,00       | 114,00 | 187,00 | 225,00 | 356,00 | 401,00 | 416,00 |
|               | çatlaklı (4) | 86,00  | 100,00       | 144,00 | 155,00 | 321,00 | 334,00 | 339,00 | 410,00 |
|               | çatlaklı (5) | 91,00  | 99,00        | 160,00 | 217,00 | 223,00 | 410,00 | 419,00 | 473,00 |
| ECC 1.2 L-KF  | sağlam (1)   | 11,00  | -            | 12,00  | 17,00  | 19,00  | 28,00  | 38,00  | 41,00  |
|               | sağlam (2)   | 13,00  | -            | 15,00  | 21,00  | 23,00  | 29,00  | 41,00  | 63,00  |
|               | çatlaklı (3) | 12,33  | 17,00        | 21,00  | 26,00  | 36,00  | 41,00  | 50,00  | 52,00  |
|               | çatlaklı (4) | 12,21  | 18,00        | 27,00  | 36,00  | 41,00  | 47,00  | 55,00  | 57,00  |
|               | çatlaklı (5) | 12,94  | 17,80        | 22,00  | 31,00  | 36,00  | 43,00  | 53,00  | 61,00  |
| ECC 1.2 L-KNT | sağlam (1)   | 10,00  | -            | 14,00  | 28,00  | 36,00  | 41,00  | 88,00  | 99,00  |
|               | sağlam (2)   | 13,00  | -            | 15,00  | 33,00  | 39,00  | 57,00  | 63,00  | 79,00  |
|               | çatlaklı (3) | 11,15  | 14,00        | 28,00  | 36,00  | 41,00  | 77,00  | 90,00  | 105,00 |
|               | çatlaklı (4) | 11,78  | 18,00        | 39,00  | 55,00  | 64,70  | 71,00  | 116,00 | 146,00 |
|               | çatlaklı (5) | 11,92  | 35,00        | 48,00  | 52,00  | 108,00 | 112,00 | 144,00 | 148,00 |
| ECC 1.2 H-K   | sağlam (1)   | 52,00  | -            | 53,00  | 56,00  | 65,00  | 71,00  | 75,00  | 78,00  |
|               | sağlam (2)   | 55,00  | -            | 59,00  | 61,00  | 63,00  | 65,00  | 67,80  | 69,00  |
|               | çatlaklı (3) | 48,40  | 49,00        | 52,00  | 63,00  | 79,00  | 83,00  | 84,00  | 84,80  |
|               | çatlaklı (4) | 49,80  | 55,00        | 57,00  | 66,00  | 71,00  | 87,00  | 88,00  | 89,30  |
|               | çatlaklı (5) | 51,70  | 61,00        | 71,00  | 80,00  | 83,00  | 88,00  | 89,00  | 91,70  |
| ECC 1.2 H-KF  | sağlam (1)   | 12,00  | -            | 14,00  | 19,00  | 36,00  | 41,00  | 55,00  | 80,00  |
|               | sağlam (2)   | 17,00  | -            | 18,20  | 22,00  | 35,00  | 43,00  | 77,00  | 96,00  |
|               | çatlaklı (3) | 13,64  | 21,00        | 22,00  | 29,00  | 41,00  | 49,00  | 77,00  | 84,00  |
|               | çatlaklı (4) | 13,95  | 25,00        | 26,00  | 36,00  | 66,00  | 69,00  | 71,00  | 98,00  |
|               | çatlaklı (5) | 15,18  | 25,00        | 27,00  | 39,00  | 41,00  | 44,00  | 66,00  | 79,00  |
| ECC 1.2 H-KNT | sağlam (1)   | 23,00  | -            | 33,00  | 45,00  | 51,00  | 55,00  | 66,00  | 99,00  |
|               | sağlam (2)   | 33,00  | -            | 41,00  | 66,00  | 75,00  | 77,00  | 79,00  | 88,00  |
|               | çatlaklı (3) | 19,00  | 32,00        | 33,00  | 86,00  | 102,00 | 119,00 | 120,00 | 121,00 |
|               | çatlaklı (4) | 23,00  | 44,00        | 66,00  | 96,00  | 117,00 | 136,00 | 149,00 | 188,00 |
|               | çatlaklı (5) | 15,00  | 36,00        | 44,00  | 63,00  | 113,00 | 118,00 | 121,00 | 125,00 |
| ECC 2.2 L-K   | sağlam (1)   | 63,00  | -            | 73,00  | 88,00  | 145,00 | 247,00 | 315,00 | 354,00 |
|               | sağlam (2)   | 86,00  | -            | 99,00  | 115,00 | 175,00 | 268,00 | 452,00 | 687,00 |
|               | çatlaklı (3) | 62,00  | 88,00        | 102,00 | 145,00 | 187,00 | 269,00 | 401,00 | 521,00 |
|               | çatlaklı (4) | 80,00  | 97,00        | 109,00 | 198,00 | 236,00 | 397,00 | 587,00 | 711,00 |
|               | çatlaklı (5) | 73,00  | 78,00        | 155,00 | 178,00 | 254,00 | 358,00 | 488,00 | 614,00 |

EK-1. (devam) Belli kür koşullarında kür edilen ECC silindir numunelerinin elektriksel direnç test sonuçları

Çizelge E1.3. (devam) Sürekli su ile kür edilen 180 günlük silindir numunelerin (ECC-1.2 ve ECC-2.2) elektriksel direnç testi sonuçları (k $\Omega$ )

| Karışım       | Numune       | Sağlam | Ön yüklenmiş | 15.gün | 30.gün | 45.gün | 60.gün | 75.gün | 90.gün |
|---------------|--------------|--------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ECC 2.2 L-KF  | sağlam (1)   | 12,00  | -            | 14,00  | 22,00  | 36,00  | 44,00  | 49,00  | 69,00  |
|               | sağlam (2)   | 21,00  | -            | 21,60  | 23,00  | 39,00  | 66,00  | 69,00  | 71,00  |
|               | çatlaklı (3) | 17,33  | 25,00        | 36,00  | 39,00  | 47,00  | 53,00  | 61,00  | 62,00  |
|               | çatlaklı (4) | 17,21  | 21,00        | 43,00  | 48,00  | 56,00  | 66,00  | 67,00  | 77,00  |
|               | çatlaklı (5) | 16,94  | 25,00        | 33,00  | 54,00  | 56,00  | 69,00  | 80,00  | 81,00  |
| ECC 2.2 L-KNT | sağlam (1)   | 12,00  | -            | 16,00  | 31,00  | 36,00  | 40,00  | 41,00  | 41,00  |
|               | sağlam (2)   | 22,00  | -            | 23,00  | 24,00  | 26,00  | 27,00  | 29,00  | 33,00  |
|               | çatlaklı (3) | 13,00  | 23,00        | 31,00  | 41,00  | 43,00  | 48,00  | 51,00  | 53,00  |
|               | çatlaklı (4) | 14,00  | 24,00        | 28,00  | 31,00  | 36,00  | 45,00  | 46,00  | 47,00  |
|               | çatlaklı (5) | 17,90  | 26,00        | 33,00  | 36,00  | 40,00  | 44,00  | 57,00  | 61,20  |
| ECC 2.2 H-K   | sağlam (1)   | 65,00  | -            | 83,00  | 187,00 | 236,00 | 358,00 | 568,00 | 643,00 |
|               | sağlam (2)   | 107,00 | -            | 124,00 | 189,00 | 365,00 | 415,00 | 489,00 | 557,00 |
|               | çatlaklı (3) | 76,00  | 88,00        | 141,00 | 189,00 | 368,00 | 498,00 | 563,00 | 777,00 |
|               | çatlaklı (4) | 119,00 | 136,00       | 175,00 | 202,00 | 298,00 | 336,00 | 587,00 | 752,00 |
|               | çatlaklı (5) | 89,00  | 127,00       | 198,00 | 332,00 | 458,00 | 569,00 | 599,00 | 631,00 |
| ECC 2.2 H-KF  | sağlam (1)   | 9,00   | -            | 17,00  | 19,00  | 22,00  | 28,00  | 31,00  | 33,00  |
|               | sağlam (2)   | 14,00  | -            | 18,00  | 19,00  | 20,00  | 21,00  | 21,00  | 21,00  |
|               | çatlaklı (3) | 11,00  | 17,00        | 18,00  | 25,00  | 29,00  | 30,00  | 31,00  | 34,00  |
|               | çatlaklı (4) | 11,00  | 19,00        | 20,00  | 20,40  | 20,70  | 21,00  | 21,70  | 22,00  |
|               | çatlaklı (5) | 16,00  | 21,00        | 22,00  | 23,00  | 25,00  | 26,00  | 27,00  | 29,50  |
| ECC 2.2 H-KNT | sağlam (1)   | 8,00   | -            | 17,00  | 20,00  | 23,00  | 33,00  | 41,00  | 51,00  |
|               | sağlam (2)   | 13,00  | -            | 18,00  | 19,00  | 20,00  | 31,00  | 40,00  | 43,00  |
|               | çatlaklı (3) | 7,00   | 17,00        | 23,00  | 26,00  | 35,00  | 39,00  | 41,00  | 44,00  |
|               | çatlaklı (4) | 9,00   | 21,00        | 25,00  | 29,00  | 31,00  | 41,00  | 48,00  | 49,00  |
|               | çatlaklı (5) | 11,00  | 22,00        | 27,00  | 28,00  | 33,00  | 36,00  | 65,00  | 67,00  |

EK-1. (devam) Belli kür koşullarında kür edilen ECC silindir numunelerinin elektriksel direnç test sonuçları

Çizelge E1.4. Islanma-kuruma ile kür edilen 180 günlük silindir numunelerin (ECC-1.2 ve ECC-2.2) elektriksel direnç testi sonuçları ( $k\Omega$ )

| Karışım       | Numune       | Ön yükleme öncesi | Ön yükleme sonrası | 15.gün | 30.gün | 45.gün | 60.gün | 75.gün | 90.gün |
|---------------|--------------|-------------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ECC 1.2 L-K   | sağlam (1)   | 77,00             | -                  | 88,00  | 97,00  | 105,00 | 157,00 | 188,00 | 250,00 |
|               | sağlam (2)   | 78,00             | -                  | 87,00  | 96,00  | 102,00 | 168,00 | 202,00 | 266,00 |
|               | çatlaklı (3) | 85,00             | 88,00              | 99,00  | 122,00 | 157,00 | 205,00 | 254,00 | 294,00 |
|               | çatlaklı (4) | 95,00             | 98,00              | 105,00 | 124,00 | 157,00 | 189,00 | 211,00 | 240,00 |
|               | çatlaklı (5) | 130,00            | 165,00             | 188,00 | 198,00 | 221,00 | 236,00 | 257,00 | 266,00 |
| ECC 1.2 L-KF  | sağlam (1)   | 14,00             | -                  | 18,00  | 38,00  | 47,00  | 55,00  | 56,00  | 69,00  |
|               | sağlam (2)   | 17,00             | -                  | 19,00  | 25,00  | 27,00  | 32,00  | 54,00  | 78,00  |
|               | çatlaklı (3) | 14,00             | 22,00              | 28,00  | 38,00  | 65,00  | 66,00  | 77,00  | 78,00  |
|               | çatlaklı (4) | 18,00             | 23,00              | 32,00  | 36,00  | 65,00  | 68,00  | 69,00  | 71,00  |
|               | çatlaklı (5) | 22,00             | 29,00              | 33,00  | 68,00  | 77,00  | 79,00  | 82,00  | 96,00  |
| ECC 1.2-L-KNT | sağlam (1)   | 21,00             | -                  | 30,00  | 45,00  | 56,00  | 78,00  | 118,00 | 144,00 |
|               | sağlam (2)   | 22,00             | -                  | 42,00  | 47,00  | 53,00  | 71,00  | 125,00 | 135,00 |
|               | çatlaklı (3) | 18,00             | 36,00              | 44,00  | 49,00  | 66,00  | 174,00 | 188,00 | 191,00 |
|               | çatlaklı (4) | 15,00             | 37,00              | 55,00  | 66,00  | 74,00  | 87,00  | 144,00 | 198,00 |
|               | çatlaklı (5) | 21,00             | 44,00              | 49,00  | 52,00  | 69,00  | 121,00 | 128,00 | 137,00 |
| ECC 1.2 H-K   | sağlam (1)   | 56,00             | -                  | 66,00  | 75,00  | 79,00  | 87,00  | 91,00  | 96,00  |
|               | sağlam (2)   | 61,00             | -                  | 69,00  | 88,00  | 93,00  | 121,00 | 135,00 | 156,00 |
|               | çatlaklı (3) | 45,00             | 71,00              | 88,00  | 96,00  | 102,00 | 114,00 | 119,00 | 128,00 |
|               | çatlaklı (4) | 52,00             | 65,00              | 78,00  | 102,00 | 111,00 | 178,00 | 205,00 | 206,00 |
|               | çatlaklı (5) | 66,00             | 69,00              | 125,00 | 126,00 | 128,00 | 131,00 | 135,00 | 136,00 |
| ECC 1.2 H-KF  | sağlam (1)   | 15,00             | -                  | 23,00  | 33,00  | 37,00  | 44,00  | 55,00  | 66,00  |
|               | sağlam (2)   | 11,00             | -                  | 25,00  | 26,00  | 33,00  | 41,00  | 52,00  | 54,00  |
|               | çatlaklı (3) | 14,00             | 18,00              | 32,00  | 36,00  | 39,00  | 45,00  | 56,00  | 73,00  |
|               | çatlaklı (4) | 12,00             | 19,00              | 42,00  | 52,00  | 58,00  | 61,00  | 65,00  | 66,00  |
|               | çatlaklı (5) | 14,00             | 16,00              | 51,00  | 56,00  | 62,00  | 66,00  | 68,00  | 69,00  |
| ECC 1.2 H-KNT | sağlam (1)   | 11,00             | -                  | 15,00  | 16,00  | 18,00  | 55,00  | 67,00  | 99,00  |
|               | sağlam (2)   | 12,00             | -                  | 16,00  | 22,00  | 29,00  | 45,00  | 78,00  | 102,00 |
|               | çatlaklı (3) | 14,00             | 22,00              | 29,00  | 69,00  | 78,00  | 88,00  | 96,00  | 118,00 |
|               | çatlaklı (4) | 15,00             | 23,00              | 33,00  | 85,00  | 99,00  | 104,00 | 110,00 | 111,00 |
|               | çatlaklı (5) | 13,40             | 19,00              | 36,00  | 79,00  | 87,00  | 99,00  | 99,00  | 100,00 |
| ECC 2.2-L-K   | sağlam (1)   | 68,00             | -                  | 78,00  | 87,00  | 102,00 | 135,00 | 149,00 | 188,00 |
|               | sağlam (2)   | 61,00             | -                  | 81,00  | 98,00  | 100,00 | 125,00 | 139,00 | 194,00 |
|               | çatlaklı (3) | 77,00             | 102,00             | 115,00 | 125,00 | 147,00 | 166,00 | 201,00 | 243,00 |
|               | çatlaklı (4) | 77,00             | 110,00             | 121,00 | 138,00 | 188,00 | 198,00 | 250,00 | 291,00 |
|               | çatlaklı (5) | 84,00             | 89,00              | 131,00 | 174,00 | 187,00 | 188,00 | 191,00 | 199,00 |

EK-1. (devam) Belli kür koşullarında kür edilen ECC silindir numunelerinin elektriksel direnç test sonuçları

Çizelge E1.4. (devam) Islanma-kuruma ile kür edilen 180 günlük silindir numunelerin (ECC-1.2 ve ECC-2.2) elektriksel direnç testi sonuçları (k $\Omega$ )

| Karışım       | Numune       | Ön yükleme öncesi | Ön yükleme sonrası | 15.gün | 30.gün | 45.gün | 60.gün | 75.gün | 90.gün |
|---------------|--------------|-------------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ECC 2.2 L-KF  | sağlam (1)   | 9,00              | -                  | 21,00  | 25,00  | 31,00  | 33,00  | 39,00  | 41,00  |
|               | sağlam (2)   | 8,00              | -                  | 12,00  | 17,00  | 22,00  | 32,00  | 36,00  | 45,00  |
|               | çatlaklı (3) | 11,00             | 18,00              | 33,00  | 36,00  | 38,00  | 39,00  | 41,00  | 44,00  |
|               | çatlaklı (4) | 10,00             | 17,00              | 22,00  | 23,00  | 39,00  | 45,00  | 56,00  | 66,00  |
|               | çatlaklı (5) | 8,00              | 16,00              | 19,00  | 22,00  | 39,00  | 47,00  | 56,00  | 74,00  |
| ECC 2.2 L-KNT | sağlam (1)   | 7,00              | -                  | 23,00  | 33,00  | 39,00  | 49,00  | 51,00  | 99,00  |
|               | sağlam (2)   | 9,00              | -                  | 28,00  | 38,00  | 76,00  | 79,00  | 82,00  | 86,00  |
|               | çatlaklı (3) | 9,00              | 19,00              | 33,00  | 64,00  | 69,00  | 79,00  | 91,00  | 96,00  |
|               | çatlaklı (4) | 8,00              | 21,00              | 45,00  | 58,00  | 61,00  | 81,00  | 100,00 | 101,00 |
|               | çatlaklı (5) | 12,00             | 22,00              | 45,00  | 53,00  | 61,00  | 68,00  | 74,00  | 85,00  |
| ECC 2.2-H-K   | sağlam (1)   | 74,00             | -                  | 132,00 | 139,00 | 142,00 | 148,00 | 153,00 | 159,00 |
|               | sağlam (2)   | 68,00             | -                  | 113,00 | 119,00 | 128,00 | 133,00 | 144,00 | 178,00 |
|               | çatlaklı (3) | 75,00             | 120,00             | 136,00 | 144,00 | 151,00 | 156,00 | 156,00 | 156,00 |
|               | çatlaklı (4) | 78,00             | 111,00             | 122,00 | 133,00 | 153,00 | 166,00 | 194,00 | 203,00 |
|               | çatlaklı (5) | 89,00             | 99,00              | 117,00 | 119,00 | 121,00 | 167,00 | 188,00 | 217,00 |
| ECC 2.2-H-KF  | sağlam (1)   | 6,00              | -                  | 38,00  | 39,00  | 41,00  | 45,00  | 47,00  | 59,00  |
|               | sağlam (2)   | 9,00              | -                  | 31,00  | 36,00  | 46,00  | 48,00  | 51,00  | 55,00  |
|               | çatlaklı (3) | 8,00              | 39,00              | 44,00  | 55,00  | 56,00  | 59,00  | 61,00  | 66,00  |
|               | çatlaklı (4) | 17,00             | 34,00              | 45,00  | 51,00  | 55,00  | 57,00  | 58,00  | 58,00  |
|               | çatlaklı (5) | 13,00             | 33,00              | 49,00  | 51,00  | 55,00  | 56,00  | 66,00  | 77,00  |
| ECC 2.2 H-KNT | sağlam (1)   | 6,00              | -                  | 36,00  | 58,00  | 66,00  | 69,00  | 72,00  | 77,00  |
|               | sağlam (2)   | 8,50              | -                  | 33,00  | 36,00  | 55,00  | 58,00  | 66,00  | 68,00  |
|               | çatlaklı (3) | 8,00              | 25,00              | 41,00  | 49,00  | 66,00  | 77,00  | 86,00  | 87,00  |
|               | çatlaklı (4) | 9,00              | 32,00              | 52,00  | 65,00  | 84,00  | 91,00  | 95,00  | 99,00  |
|               | çatlaklı (5) | 7,50              | 21,00              | 36,00  | 61,00  | 77,00  | 89,00  | 100,00 | 102,00 |



*GAZİ GELECEKTİR..*