



**KİRİŞLERDE EĞİLME YÜKLEMESİ ETKİSİNDE ŞEKİL DEĞİŞTİRME  
SERTLEŞMESİ GÖSTEREN ÇİMENTO BAĞLAYICILI  
KOMPOZİTLERİN KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞME  
PERFORMANSLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**Nurullah ÖKSÜZER**

**DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKİM 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.

Nurullah ÖKSÜZER

11/10/2021

**KİRİŞLERDE EĞİLME YÜKLEMESİ ETKİSİNDE ŞEKİL DEĞİŞTİRME  
SERTLEŞMESİ GÖSTEREN ÇİMENTO BAĞLAYICILI KOMPOZİTLERİN  
KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞME PERFORMANSLARININ DENEYSEL OLARAK  
İNCELENMESİ**

(Doktora Tezi)

Nurullah ÖKSÜZER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2021

**ÖZET**

Tez çalışması kapsamında, yaygın olarak bir kompozit olan ve şekil değiştirme sertleşmesi sergileyen çimento esaslı kompozitler iri agregalı şekilde daha ekonomik olarak üretilerek, nano malzeme katkısıyla birlikte performansları iyileştirilmiştir. Karışımlarda farklı malzeme oranları kullanılarak daha ekonomik üretimlerdeki performanslar karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda iki farklı Uçucu kül/Portland Çimentosu ( $UK/PC = 0,20$  ve  $0,70$ ), iki farklı agrega/bağlayıcı ( $A/B = 1,0$  ve  $2,0$ ), üç farklı lif tipi (Naylon, Polivinil alkol, Çelik lif) kullanılmıştır. Ayrıca nano malzeme türünün etkisinin de incelenmesi için iki farklı nano malzeme (Nano silis, Nano alümin) eklenmiştir. Karışımlarda boyut etkisinin irdelenmesi amacıyla iki farklı boyutta kiriş numuneleri hazırlanmıştır. 128 adet yapısal boyutta kiriş ( $100 \times 150 \times 1000$  mm), 84 adet küçük ölçekli kiriş ( $80 \times 75 \times 400$  mm) ve basınç dayanımları için 42 adet küp numune ( $100 \times 100 \times 100$  mm) olmak üzere toplam 254 adet numune test edilmek üzere hazırlanmıştır. Hazırlanan kiriş numuneleri 28 gün sonunda farklı kesme açıklığı/ faydalı yükseklik ( $a/d$ ) oranlarında 4 noktalı eğilme deneyi testine tabii tutulmuştur. Farklı hâkim davranışların incelenmesi amacıyla 28 gün sonunda yapısal boyuttaki kirişler için 4 farklı  $a/d$  oranında ( $0,67, 1,11, 2,22, 2,96$ ), küçük boyuttaki kirişler için 3 farklı  $a/d$  oranında ( $0,67, 1,11, 2,00$ ) yükleme yapılarak mekanik davranışlar elde edilmiştir. Ayrıca üretilen hem küçük hem de yapısal ölçekteki kirişler 28 gün sonunda aynı  $a/d$  oranlarında ön yükleme uygulanarak ilk çatlak gelişimleri elde edilmiştir. Oluşan çatlak genişlikleri el mikroskobu yardımıyla ölçülerek 30 gün boyunca doygun ortamda kürlenmiştir. 28 gün sonundaki kiriş numunelerinin mekanik performansları ile 28+30 gün sonundaki numunelerin performansları incelenmiştir. Her iki boyuttaki numunelerde de kendiliğinden iyileşme meydana gelmiştir. Küçük boyutlu kirişlerin kendiliğinden iyileşme performansları yapısal boyutlu kirişlere göre daha iyidir. İyileşme ürünleri olarak numunelerin bazılarında C-S-H oluşumu ile çatlak kapanması görülürken, bazı numunelerde  $CaCO_3$  oluşumundan kaynaklı çatlak kapanmaları olduğu belirlenmiştir. C-S-H jeli oluşumuyla elde edilen çatlak iyileşmelerinin genelinde iyileşme sonrası performanslarının da arttığı gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 91130

Anahtar Kelimeler : Kendiliğinden iyileşme, Kaba agrega, Nano malzeme, Şekil değiştirme sertleşmesi

Sayfa Adedi : 128

Danışman : Prof. Dr. Özgür ANIL

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CEMENTITIOUS COMPOSITES EXHIBIT  
STRAIN HARDENING BEAM ELEMENTS SHOWING SELF-HEALING  
PERFORMANCES UNDER BENDING LOADING

(Ph. D. Thesis)

Nurullah ÖKSÜZER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2021

ABSTRACT

Within the scope of the thesis, cement-based composites, which are commonly a composite and exhibit strain hardening, were produced more economically with coarse aggregates and their performance was improved with the addition of nanomaterials. The performances in more economical productions were compared by using different material ratios in the mixtures. In this context, two different fly ash/portland cement (FA/PC = 0.20 and 0.70), two different aggregate/binder (A/B = 1.0 and 2.0), three different fiber types (nylon, polyvinyl alcohol, steel fiber) were used. Furthermore, two different nano materials (nano silica and nano alumina) were used to investigate the influence of nanomaterial type. In order to examine the size effect in mixtures, beam specimens of two different sizes were prepared. A total of 254 specimens were prepared for testing, including 128 structural beams (100×150×1000 mm), 84 small-scale beams (80×75×400 mm), and 42 compressive strength cube specimens (100×100×100 mm). The prepared beam specimens were subjected to 4-point bending test at different shear span/effective height (a/d) ratios at the end of 28 days. In order to examine the different dominant behaviors at the end of 28 days, 4 different a/d ratios (0.67, 1.11, 2.22, 2.96) for structural size beams and 3 different a/d ratios (0.67, 1.11, 2.00) for small size beams were loaded and mechanical behaviors were obtained. In addition, both small and structural size beams produced were preloaded at the same a/d ratios at the end of 28 days and the first crack propagation was obtained. The crack widths formed were measured with the help of a hand microscope and cured in a saturated medium for 30 days. The mechanical performances of the beam specimens after 28 days and 28+30 days were examined. Self-healing occurred in specimens in both sizes. The self-healing performance of small size beams is better than structural size beams. As healing products, crack closure was observed in some of the specimens with the formation of C-S-H, while in some specimens due to the formation of CaCO<sub>3</sub>. The post-healing performance of the crack healing attained with the creation of C-S-H gel has also improved.

Science Code : 91130

Key Words : Self-healing, Coarse Aggregate, Nano Materials, Strain Hardening

Page Number : 128

Supervisor : Prof. Dr. Özgür ANIL

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her anında bilgi, beceri ve tecrübelerini esirgmeden paylaşan, akademik anlamda hayatıma yeni bir bakış açısı kazandıran saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Özgür ANIL'a teşekkür, saygı ve şükranlarımı sunarım. Deney çalışmalarının tamamlanmasında Hacettepe Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarlarının kapılarını sonuna kadar açan, saygıdeğer hocam Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN'a ayrıca teşekkürü bir borç bilirim.

Bu teze değerli katkılarını sunan saygıdeğer jüri üyelerim Prof. Dr. İlhami DEMİR, Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN, Prof. Dr. Kurtuluş SOYLUK ve Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Cem YILMAZ hocalarıma teşekkür ederim.

Numunelerin hazırlanması ve deney aşamalarında bizi yönlendiren Doç. Dr. Gürkan YILDIRIM ve Doç. Dr. Alper ALDEMİR'e, beton dökümlerinde değerli vakitlerini benim için ayıran Arş. Gör. Anıl KUL'a, Yük. İnş. Müh. Mohammad Hatam BALAV'a, Arş. Gör. Behlül Furkan ÖZEL'e, Yük. İnş. Müh. Emircan ÖZÇELİKÇİ'ye, Yük. İnş. Müh. Samed BAY'a, Yük. İnş. Müh. Muhammed Faruk GÜNAL'a ve Sertaç UÇAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım sırasında yardımlarını ve akademik anlamda katkılarını esirgemeyen Doç. Dr. H. Süleyman GÖKÇE'ye, yıllardır aynı odayı paylaştığım Arş. Gör. Bilal TAYFUR'a, değerli arkadaşım Yük. Harita Müh. Kadir ALĞAN'a, göreve başladığım günden bugüne kadar Bayburt Üniversitesi içerisinde bir aile sıcaklığı yaşatan değerli mesai arkadaşlarıma teşekkürlerimi bildiririm.

Haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim annem ve babam ile eğitim hayatım süresince desteklerini her zaman yanımda hissettiğim değerli kardeşlerim ve müstakbel eşim Merve ÇOBAN'a ayrı ayrı teşekkürlerimi iletirim.

Bu çalışma, “FBA-2018-15404” proje numarası ve “Sürdürülebilir Kalkınma İçin Nano Malzemelerle İyileştirilmiş Ekonomik Şekil Değiştirme Sertleşmesi Davranışı Sergileyen Çimento Bağlayıcılı Kompozitler” proje başlığı ile Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından finanse edilerek desteklenmiştir. Büyük katkısından dolayı Hacettepe Üniversitesi kurumuna teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

|                                                            | Sayfa |
|------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                 | iv    |
| ABSTRACT.....                                              | v     |
| TEŞEKKÜR.....                                              | vi    |
| İÇİNDEKİLER .....                                          | vii   |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....                                  | x     |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....                                   | xi    |
| RESİMLERİN LİSTESİ .....                                   | xiv   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                               | xvi   |
| 1. GİRİŞ.....                                              | 1     |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....                             | 5     |
| 2.1. Çimento Teknolojisi.....                              | 5     |
| 2.2. Lif Teknolojisi.....                                  | 6     |
| 2.2.1. Lif tipleri .....                                   | 7     |
| 2.2.2. Lif geometrisi .....                                | 8     |
| 2.3. Lifli Betonlar .....                                  | 8     |
| 2.4. Betonlarda Oluşan veya Oluşabilecek Kusurlar .....    | 11    |
| 2.4.1. Homojen dağılım.....                                | 11    |
| 2.4.2. Çatlak .....                                        | 12    |
| 2.4.3. Ara yüzey çatlakları .....                          | 13    |
| 2.5. Çatlakların İyileşmesi (Kendiliğinden İyileşme) ..... | 14    |
| 2.5.1. Otojen kendiliğinden iyileşme .....                 | 15    |
| 2.5.2. Otonom iyileşme .....                               | 17    |
| 2.6. Nano Malzemeler ve Gelişimi .....                     | 17    |
| 2.6.1. Nano malzemelerin betonda kullanımı .....           | 18    |

|                                                                                        | <b>Sayfa</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 2.6.2. Nano malzemelerin kendiliğinden iyileşme performansına etkisi .....             | 21           |
| 2.7. Eğilme Deneyi.....                                                                | 22           |
| 2.7.1. Eğilme performansına boyut etkisi .....                                         | 22           |
| 2.8. Kesme Açıklığı/Faydalı Yükseklik (a/d) .....                                      | 23           |
| <b>3. DENEYSEL PROGRAM .....</b>                                                       | <b>27</b>    |
| 3.1. Malzemeler.....                                                                   | 27           |
| 3.1.1. Portland çimentosu (PC) .....                                                   | 27           |
| 3.1.2. Uçucu kül (UK).....                                                             | 27           |
| 3.1.3. Silis dumanı (SD).....                                                          | 28           |
| 3.1.4. Nano malzemeler.....                                                            | 29           |
| 3.1.5. Agregası .....                                                                  | 30           |
| 3.1.6. Lif.....                                                                        | 31           |
| 3.1.7. Kimyasal katkı (süper akışkanlaştırıcı) .....                                   | 32           |
| 3.2. Yöntem.....                                                                       | 33           |
| 3.2.1. Sertleşmiş beton deneyleri .....                                                | 38           |
| <b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....</b>                                                    | <b>42</b>    |
| 4.1. Basınç Dayanımı .....                                                             | 42           |
| 4.2. Eğilme Performansı.....                                                           | 45           |
| 4.3. Kendiliğinden İyileşme Performansı.....                                           | 79           |
| 4.4. A/d Oranının İyileşme Performansına Etkisi .....                                  | 86           |
| 4.5. Kendiliğinden İyileşme Performansı Sonrası Eğilme Yükleme<br>Performansları ..... | 88           |
| <b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>                                                      | <b>113</b>   |
| 5.1. Çalışma Özeti.....                                                                | 113          |
| 5.2. Sonuç.....                                                                        | 114          |
| 5.3. Öneriler .....                                                                    | 116          |

**Sayfa**

|                 |     |
|-----------------|-----|
| KAYNAKLAR ..... | 117 |
| ÖZGEÇMİŞ .....  | 127 |



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                                                                                                                                                                               | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 2.1. Farklı boyutlardaki kiriş numuneleri üzerinde yapılan eğilme deneyi sonuçları.....                                                                                                                                                       | 22    |
| Çizelge 3.1. Karışım içerisindeki toz malzemelerin kimyasal içerikleri ve fiziksel özellikleri .....                                                                                                                                                  | 28    |
| Çizelge 3.2. Tez çalışmasında kullanılan liflerin fiziksel özellikleri.....                                                                                                                                                                           | 32    |
| Çizelge 3.3. Süper akışkanlaştırıcı katkının teknik özellikleri .....                                                                                                                                                                                 | 33    |
| Çizelge 3.4. Karışımlarda kullanılan malzeme miktarları .....                                                                                                                                                                                         | 34    |
| Çizelge 3.5. Numunelerin üretilmesinde kullanılan kalıplar ve boyutları .....                                                                                                                                                                         | 37    |
| Çizelge 4.1. Basınç dayanımının belirlenmesinde kullanılan numuneler ve ortalamaları .....                                                                                                                                                            | 42    |
| Çizelge 4.2. Küçük ölçekli numunelerin akma noktası ve maksimum yükleme noktasındaki 28 gün ve 28+30 günlük (kendiliğinden iyileşme sonrası) yük taşıma kapasiteleri (kN) ve deplasman ( [mm] ) sonuçları .....                                       | 59    |
| Çizelge 4.3. Büyük ölçekli numunelerin akma noktası ve maksimum yükleme noktasındaki 28 gün ve 28+30 günlük (kendiliğinden iyileşme sonrası) yük taşıma kapasiteleri (kN) ve deplasman ([mm]) sonuçları (E: Eğilme kırılması, K:Kesme kırılması)..... | 73    |
| Çizelge 4.4. Büyük ölçekli kirişlerin yapısal parametreleri.....                                                                                                                                                                                      | 75    |
| Çizelge 4.5. Küçük ölçekli kirişlerde kendiliğinden iyileşme öncesi ve sonrası mikro çatlakların karakterizasyonu .....                                                                                                                               | 81    |
| Çizelge 4.6. Yapısal ölçekli kirişlerde kendiliğinden iyileşme öncesi ve sonrası mikro çatlakların karakterizasyonu .....                                                                                                                             | 82    |
| Çizelge 4.7. Farklı a/d oranlarında elde edilen çatlakların iyileşme oranları .....                                                                                                                                                                   | 87    |
| Çizelge 4.8. Kendiliğinden iyileşme sonrası kırılan numunelerin yük taşıma kapasitelerin değişim oranları.....                                                                                                                                        | 104   |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                                                                                                                                   | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Yıllara göre çimento üretimi [33] .....                                                                                                                                                                      | 5     |
| Şekil 2.2. Çelik lif şekilleri [50].....                                                                                                                                                                                | 7     |
| Şekil 2.3. Hibrit-Elyaf Betonun temel prensibi: a) Kısa ince elyafın mikro çatlakların köprülenmesi ve çekme mukavemetinin artması üzerindeki etkisi; b) uzun kalın lifler ile makro çatlakların köprülenmesi [73]..... | 10    |
| Şekil 2.4. Agrega ve matris arasındaki termal uyumsuzluk [76].....                                                                                                                                                      | 11    |
| Şekil 2.5. Numunelerin bilgisayarlı tomografi görüntüleri a)referans b)mikro lif c)makro lif d) mikro ve makro lif katkılı [77].....                                                                                    | 12    |
| Şekil 2.6. Betonda kendiliğinden iyileşme performansı inceleme teknikleri [85].....                                                                                                                                     | 15    |
| Şekil 2.7. Kendiliğinden iyileşme mekanizması (a) otojen iyileşme (b) Bakteriyle otonom iyileşme (c) Kapsül ile otonom iyileşme [93] .....                                                                              | 17    |
| Şekil 2.8. Beton teknolojisindeki tane boyutu ve özgül yüzey alanı ilişkisi [98].....                                                                                                                                   | 19    |
| Şekil 2.9. Farklı a/d oranlarındaki yüklemelerde çatlakların oluşma durumları [121]...                                                                                                                                  | 24    |
| Şekil 3.1. Karışım malzemelerinin tane boyut analiz sonuçları.....                                                                                                                                                      | 29    |
| Şekil 3.2. Karışım aşamaları ve görüntüleri.....                                                                                                                                                                        | 36    |
| Şekil 3.3. a) Büyük kırıışlerin yükleme ve donatı detaylandırması b) küçük kırıışlerin yükleme detayı (bütün ölçü birimleri mm'dir).....                                                                                | 39    |
| Şekil 3.4. Akma noktası, kırılma noktası, ötelenme oranı ve enerji yutma kapasitesi belirlenmesi .....                                                                                                                  | 40    |
| Şekil 4.1. Basınç dayanımı test sonuçları a) 0,20 UK içerikli numuneler b) 0,70 UK içerikli numuneler c) Nano katkılı malzeme ve referans numunesi .....                                                                | 43    |
| Şekil 4.2. Agrega hacminin çatlak yolu üzerindeki etkisi .....                                                                                                                                                          | 43    |
| Şekil 4.3. Küçük ölçekli P0S0N0_0,20_1,0 ve P0S0N0_0,70_1,0 referans numunelerinin yük-deplasman eğrileri.....                                                                                                          | 46    |
| Şekil 4.4. Küçük ölçekli P0S1N0_0,20_1,0 ve P0S1N0_0,70_1,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri .....                                                                                                              | 47    |
| Şekil 4.5. Küçük ölçekli P0S1N1_0,20_1,0 ve P0S1N1_0,70_1,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri .....                                                                                                              | 48    |
| Şekil 4.6. Küçük ölçekli P0S1N1_0,20_2,0 ve P0S1N1_0,70_2,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri .....                                                                                                              | 49    |

| <b>Şekil</b>                                                                                                                                     | <b>Sayfa</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 4.7. Küçük ölçekli P1S1N0_0,20_1,0 ve P1S1N0_0,70_1,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri .....                                       | 50           |
| Şekil 4.8. Küçük ölçekli P1S1N0_0,20_2,0 ve P1S1N0_0,70_2,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri .....                                       | 51           |
| Şekil 4.9. Küçük ölçekli NA-P1S1N0_0,70_1,0 ve NS-P1S1N0_0,70_1,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri .....                                 | 52           |
| Şekil 4.10. Büyük ölçekli P0S0N0_0,20_1,0 ve P0S0N0_0,70_1,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri .....                                      | 62           |
| Şekil 4.11. Büyük ölçekli P0S1N0_0,20_1,0 ve P0S1N0_0,70_1,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri .....                                      | 63           |
| Şekil 4.12. Büyük ölçekli P0S1N1_0,20_1,0 ve P0S1N1_0,70_1,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri .....                                      | 64           |
| Şekil 4.13. Büyük ölçekli P0S1N1_0,20_2,0 ve P0S1N1_0,70_2,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri .....                                      | 65           |
| Şekil 4.14. Büyük ölçekli P1S1N0_0,20_1,0 ve P1S1N0_0,70_1,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri .....                                      | 66           |
| Şekil 4.15. Büyük ölçekli P1S1N0_0,20_2,0 ve P1S1N0_0,70_2,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri .....                                      | 67           |
| Şekil 4.16. Büyük ölçekli çelik donatılı D1P0S0N0_0,20_1,0 ve D1P0S0N0_0,70_1,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri .....                   | 68           |
| Şekil 4.17. Büyük ölçekli NS-P1S1N0_0,70_1,0 ve NA-P1S1N0_0,70_1,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri .....                                | 69           |
| Şekil 4.18. Küçük ölçekli P0S1N0_0,20_1,0 ve P0S1N0_0,70_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması .....    | 89           |
| Şekil 4.19. Küçük ölçekli P0S1N1_0,20_1,0 ve P0S1N1_0,70_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması .....    | 90           |
| Şekil 4.20. Küçük ölçekli P0S1N1_0,20_2,0 ve P0S1N1_0,70_2,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması .....    | 91           |
| Şekil 4.21. Küçük ölçekli P1S1N0_0,20_1,0 ve P1S1N0_0,70_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması .....    | 92           |
| Şekil 4.22. Küçük ölçekli P1S1N0_0,20_2,0 ve P1S1N0_0,70_2,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması .....    | 93           |
| Şekil 4.23. Küçük ölçekli NS-P1S1N0_0,70_1,0 ve NA-P1S1N0_0,70_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması .. | 94           |

| Şekil                                                                                                                                                         | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 4.24. Büyük ölçekli P0S1N0_0,20_1,0 ve P0S1N0_0,70_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması.....                  | 96    |
| Şekil 4.25. Büyük ölçekli P0S1N1_0,20_1,0 ve P0S1N1_0,70_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması.....                  | 97    |
| Şekil 4.26. Büyük ölçekli P0S1N1_0,20_2,0 ve P0S1N1_0,70_2,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması.....                  | 98    |
| Şekil 4.27. Büyük ölçekli P1S1N0_0,20_1,0 ve P1S1N0_0,70_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması.....                  | 99    |
| Şekil 4.28. Büyük ölçekli P1S1N0_0,20_2,0 ve P1S1N0_0,70_2,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması.....                  | 100   |
| Şekil 4.29. Büyük ölçekli ve donatılı D1P0S0N0_0,20_1,0 ve D1P0S0N0_0,70_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması ..... | 101   |
| Şekil 4.30. Büyük ölçekli NS-P1S1N0_0,70_1,0 ve NA-P1S1N0_0,70_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması...              | 102   |
| Şekil 4.31. 0,67 a/d oranında küçük boyutlu ve büyük boyutlu kirişlerin iyileşmeleri arasındaki ilişki.....                                                   | 108   |
| Şekil 4.32. 1,11 a/d oranında küçük boyutlu ve büyük boyutlu kirişlerin iyileşmeleri arasındaki ilişki .....                                                  | 109   |
| Şekil 4.33. 2,00-2,22 a/d oranında küçük boyutlu ve büyük boyutlu kirişlerin iyileşmeleri arasındaki ilişki .....                                             | 110   |
| Şekil 4.34. Küçük ölçekli kirişler için kendiliğinden iyileşme sonrası eğilme performanslarının değişimi.....                                                 | 111   |
| Şekil 4.35. Büyük ölçekli kirişler için kendiliğinden iyileşme sonrası eğilme performanslarının değişimi.....                                                 | 112   |

## RESİMLERİN LİSTESİ

| Resim                                                                                                                           | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Resim 2.1. Yaygın olarak kullanılan lif örnekleri [51].....                                                                     | 7     |
| Resim 2.2. a) Gevrek davranış sergileyen lif katkısız beton örneği b) Sünek davranış sergileyen lif katkılı numune örneği ..... | 8     |
| Resim 2.3. Matris-agrega arayüzü elektron mikroskobu görüntüsü (SEM) [78] .....                                                 | 13    |
| Resim 3.1. Karışım içerisinde kullanılan a)ince agrega b)kaba agrega .....                                                      | 30    |
| Resim 3.2. Modifiye edilmiş şantiye tipi beton mikseri .....                                                                    | 36    |
| Resim 3.3. Numunelerin kürlenmesi ve nemli bez yardımıyla nem kaybının önlenmesi.....                                           | 38    |
| Resim 3.4. El mikroskobuyla yapılan ölçüm ve mikroskop görüntüsü .....                                                          | 41    |
| Resim 4.1. POS1N0_0,70_1,0 kodlu numunenin 0,67 a/d oranındaki kırılma çatlağı görüntüsü .....                                  | 53    |
| Resim 4.2. POS1N0_0,70_1,0 kodlu numunenin 1,11 a/d oranındaki kırılma çatlağı görüntüsü .....                                  | 53    |
| Resim 4.3. POS1N0_0,70_1,0 kodlu numunenin 2,00 a/d oranındaki kırılma çatlağı görüntüsü .....                                  | 54    |
| Resim 4.4. POS1N1_0,20_2,0 kodlu numunenin 0,67 a/d oranındaki kırılma çatlağı görüntüsü .....                                  | 55    |
| Resim 4.5. POS1N1_0,20_2,0 kodlu numunenin 1,11 a/d oranındaki kırılma çatlağı görüntüsü .....                                  | 55    |
| Resim 4.6. POS1N1_0,20_2,0 kodlu numunenin 2,00 a/d oranındaki kırılma çatlağı görüntüsü .....                                  | 56    |
| Resim 4.7. P1S1N0_0,70_1,0 kodlu numunenin 0,67 a/d oranındaki kırılma çatlağı görüntüsü.....                                   | 57    |
| Resim 4.8. P1S1N0_0,70_1,0 kodlu numunenin 1,11 a/d oranındaki kırılma çatlağı görüntüsü .....                                  | 57    |
| Resim 4.9. P1S1N0_0,70_1,0 kodlu numunenin 2,00 a/d oranındaki kırılma çatlağı görüntüsü .....                                  | 58    |
| Resim 4.10. POS0N0_0,70_1,0 numunesinin 0,67a/d oranındaki 28 günlük göçme görüntüsü .....                                      | 70    |
| Resim 4.11. POS1N0_0,70_1,0 numunesinin 0,67a/d oranındaki 28 günlük göçme görüntüsü .....                                      | 70    |

| <b>Resim</b>                                                                                                                                                                                     | <b>Sayfa</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Resim 4.12. P0S1N1_0,70_1,0 numunesinin 0,67a/d oranındaki 28 günlük göçme görüntüsü .....                                                                                                       | 71           |
| Resim 4.13. P1S1N0_0,70_1,0 numunesinin 0,67a/d oranındaki 28 günlük göçme görüntüsü .....                                                                                                       | 71           |
| Resim 4.14. D1P0S0N0_0,70_1,0 numunesinin 0,67a/d oranındaki 28 günlük göçme görüntüsü .....                                                                                                     | 72           |
| Resim 4.15. NA-P1S1N0_0,70_1,0 numunesinin 0,67a/d oranındaki 28 günlük göçme görüntüsü .....                                                                                                    | 72           |
| Resim 4.16. Kiriş numunelerinin çatlak oluşumu ve iyileşme sonrası bazı görüntü örnekleri.....                                                                                                   | 84           |
| Resim 4.17. Kendiliğinden iyileşme sonrası küçük kırışların kırılma görüntüleri<br>a) 3 ve 4. seri b) 5 ve 6. seri c) 7 ve 8. seri d) 9 ve 10. seri<br>e) 11 ve 12. seri f) 15 ve 16. seri ..... | 95           |
| Resim 4.18. P0S1N0_0,20_1,0 kodlu ve P0S1N0_0,70_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası kırılma şekilleri.....                                                                     | 105          |
| Resim 4.19. P0S1N1_0,20_2,0 kodlu ve P0S1N1_0,70_2,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası kırılma şekilleri.....                                                                     | 106          |
| Resim 4.20. NS-P1S1N0_0,70_1,0 kodlu ve NA-P1S1N0_0,70_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası kırılma şekilleri.....                                                               | 107          |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

### Simgeler

### Açıklamalar

|           |            |
|-----------|------------|
| <b>dk</b> | Dakika     |
| <b>kg</b> | Kilogram   |
| <b>L</b>  | Litre      |
| <b>m</b>  | Metre      |
| <b>m²</b> | Metrekare  |
| <b>m³</b> | Metreküp   |
| <b>µm</b> | Mikrometre |
| <b>mm</b> | Milimetre  |
| <b>sa</b> | Saat       |
| <b>s</b>  | Saniye     |

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

|                         |                                    |
|-------------------------|------------------------------------|
| <b>A/B</b>              | Agrega / bağlayıcı                 |
| <b>A/D</b>              | Kesme açıklığı / faydalı yükseklik |
| <b>BET</b>              | Yüzey alanı tayini                 |
| <b>CaCO<sub>3</sub></b> | Kalsiyum karbonat                  |
| <b>CaOH</b>             | Kalsiyum hidroksit                 |
| <b>CO<sub>2</sub></b>   | Karbondioksit                      |
| <b>ÇG</b>               | Çatlak genişliği                   |
| <b>GPa</b>              | Gigapascal                         |
| <b>ITZ</b>              | Ara yüzey geçiş bölgesi            |
| <b>kN</b>               | Kilo newton                        |
| <b>MPa</b>              | Megapascal                         |
| <b>N</b>                | Naylonmono lif                     |
| <b>NA</b>               | Nano alümin                        |

**Kısaltmalar****Açıklamalar****NS**

Nano silis

**P**

Polivinil alkol lif

**PC**

Portland çimentosu

**PVA**

Polivinil alkol

**S**

Çelik lif

**SD**

Silis dumanı

**SEM**

Taramalı elektron mikroskobu

**UK**

Uçucu kül

**YOSA**

Yüksek oranda su azaltıcı

**YPB**

Yüksek performanslı beton

**YPLDÇK**

Yüksek performanslı lif donatılı çimentolu kompozit

## 1. GİRİŞ

Betonun dünyada sudan sonra en fazla tüketilen malzeme olduğu günümüzün önemli konularındandır. Artmaya devam eden dünya nüfusu ve sanayileşme ile birlikte betonun kullanımının da artması öngörülebilmektedir. Yaygın bir kullanım alanına sahip olan beton, üretim kolaylığı ve yüksek dayanımından dolayı oldukça yüksek bir tercih edilebilirliğe sahiptir[1,2]. Bu tercih edilebilirliğin yüksekliği ve saha şartlarındaki uygulama kolaylığı dolayısıyla günümüz araştırmalarının önemli malzemeleri arasında yer almaya devam etmektedir[3,4]. Her ne kadar beton bu kadar yaygın kullanılsa da, bir kompozit olduğundan farklı durumlarda farklı davranışlar sergileyebilmektedir. Örneğin basınç yükleri altında çok iyi bir performans sergilerken, çekme yüklerinde aynı performans elde edilememektedir. Betonun çekme performansını artırmak üzere günümüzde donatı çeliği kullanılmaktadır. Geleneksel beton içerisinde kullanılan çelik, betonun çekme dayanımına katkıda bulunsa da, gevrek bir yapıya sahip olan betonun çatlak oluşturmaya engel olamamaktadır. Oluşan bu çatlaklar durabilite problemlerine ve servis ömrünün kısılmasına sebep olmaktadır. Yapılan ve yapılmakta olan çalışmalar özellikle betonun gevrek davranışının iyileştirilmesi, üretim maliyetinin azaltılması, servis ömrünün artırılması ve çevreye daha duyarlı bir malzeme elde edilmesine yöneliktir [5,6].

Betonun gevrek bir kompozit malzeme olduğu ve süneklik kazandırılması adına mikro ve makro boyuttaki liflerin eklenmesi yaygın bir yöntemdir. Geleneksel betonda lif katkısının kullanılmasında önemli iki parametre vardır. Bunlar: 1) Liflerin matris içerisinde homojen dağıtılması ve lif parametreleri [7–9] 2) Matris için ideal lif miktarı[10,11]. Bu parametrelerin ideal olarak seçilmesi durumunda, beton içerisinde en yüksek düzeyde performans iyileşmeleri elde edilebilmektedir. Lif katkıları beton içerisindeki oluşan çatlaklarda köprüleme (tutma) görevi yaparak çatlak ilerlemesini geciktirir veya engeller. Bunlara ek olarak lif katkısı, betona kazandırdığı sünek davranış sayesinde tokluk ve enerji yutma kapasitesi gibi parametreleri de iyileştirmektedir [8,12]. Lifler matris içerisinde mikro boyutta oluşan çatlakların, makro boyutlara ulaşmasını engellemektedir. Matris içerisindeki mikro çatlaklar sayı ve büyüklük olarak bir sorun teşkil etmese de [13] taşıyıcı eleman üzerindeki yükler ve çevresel etkilerle birlikte mikro çatlaklar sayısal olarak artma yönelimindedirler. Bu düşünceyle beton içerisinde oluşan mikro çatlakların, makro çatlığa dönüşmeden önce onarılması, yapının sağlığı ve ömrü açısından önem teşkil etmektedir.

Araştırmacılar bu çatlakların onarılması ile ilgili en etkili çözüm yöntemlerinden birisinin kendiliğinden iyileşme olduğunu düşünmüştür [14–16].

Çimento esaslı kompozitlerde kendiliğinden iyileşme; fiziksel ve mekanik özelliklerden kayıp vermeksizin, çatlakların kendiliğinden kapanması olarak tanımlanabilir [17,18]. Çatlakların kendiliğinden onarılması çok eskilere dayansa da çimentolu kompozitlerin kendi kendine iyileşmesi ile ilgili çalışmalar son yirmi yılda oldukça artmıştır[17,19]. Dışarıdan herhangi bir müdahale olmadan, üretilen betonun kendi içyapısındaki kimyasal bileşimlerle kendini iyileştirmesine otojen iyileşme adı verilmektedir[20]. Kendiliğinden iyileşme performansı, elde edilen çatlakların boyutları ve yapıları ile ilişkilidir. Şöyle ki, oluşan çatlak boyutlarının büyük olmasıyla birlikte, iyileşme ürünleri için alan fazlalığı ve iyileşme ürünlerinin çatlak içerisine daha kolay nüfuz edebilmesinin kolaylaşacağından iyileşme hızının artabileceği düşünülebilmektedir. Her ne kadar iyileşme hızının arttığı düşünülse de büyük bir çatlağın kapatılması için daha fazla iyileşme ürünü gerektiğinden, çatlağın tamamen kapanmaması durumunda kalıcılık ve mekanik özelliklerdeki geri kazanım elde edilemeyecektir. İdeal kapanabilecek en büyük çatlak genişliği ile ilgili araştırmacılar, Jacobsen ve arkadaşları [21] 5-10  $\mu\text{m}$ , Şahmaran ve Yaman [22] 200  $\mu\text{m}$ , Clear [23] ise araştırmasında 300  $\mu\text{m}$  olarak belirtmiştir. Bu çalışmalardan da anlaşılabileceği gibi kendiliğinden iyileşme performansında elde edilen çatlağın genişliği önem arz etmektedir.

Geleneksel beton davranışında çatlakların kontrol altına alınması yani belirli boyutlarda çatlakların üretilmesi gevrek davranış sebebiyle mümkün değildir. Çatlakların kontrol edilebildiği Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimentolu Kompozitler (YPLDÇK) üretilmesi ile çatlak büyüklükleri kontrol altına alınmıştır. Geleneksel betonda çatlak oluşumuyla birlikte çatlak noktasında kırılma gerçekleşir. Lif katkılı betonlarda şekil değiştirme yumuşaması adı verilen, yük taşıma kapasitesine ulaşıktan sonraki ani düşüşler simgelemektedir. YPLDÇK 'da ise şekil değiştirme sertleşmesi olarak bilinen, liflerin fazla yükü matrise aktarmasıyla birlikte tek bir büyük çatlak yerine mikro boyutlarda birçok çatlak oluşumu görülebilmektedir. İlk çatlak oluşumu sonrasındaki liflerin yükü matrise aktarmasıyla birlikte çatlak boyutları dar genişliklerde oluşmakta ve beton yük altında daha fazla şekil değiştirebilmektedir[24,25].

Şekil değiştirme sertleşmesi gösteren YPLDÇK 'ların küçük ölçekli laboratuvar ortamlarındaki malzeme deneyleri yaygın bir şekilde yapılmaktadır. İlerleyen yıllarda inşaat

uygulamalarında kullanılması beklenen bu yeni nesil malzemenin büyük ölçekli numunelerde yapılan çalışmaları oldukça sınırlıdır. Bununla birlikte yapısal davranışları hakkında yapılan çalışmalar kısıtlı sayıda kalmıştır [26]. Yapılar üzerinde farklı yükleme koşulları altında farklı tepkiler alınabilmektedir. Gerçek hayatta hem eğilme hem de kesme yüklerinin etkisiyle farklı çatlak türleri ortaya çıkabilmektedir[27]. Eğilme veya kesme çatlakları yüklemenin farklı noktalardan gelmesi durumunda görülmektedir. Bu davranış kesme açıklığı / faydalı yükseklik olarak bilinen  $a/d$  oranıyla belirlenebilmektedir. Beton ve betonarme yapılarda  $a/d$  oranı değiştirilerek, farklı çatlak tipleri ve kırılma türleri incelenebilmektedir [28–31].

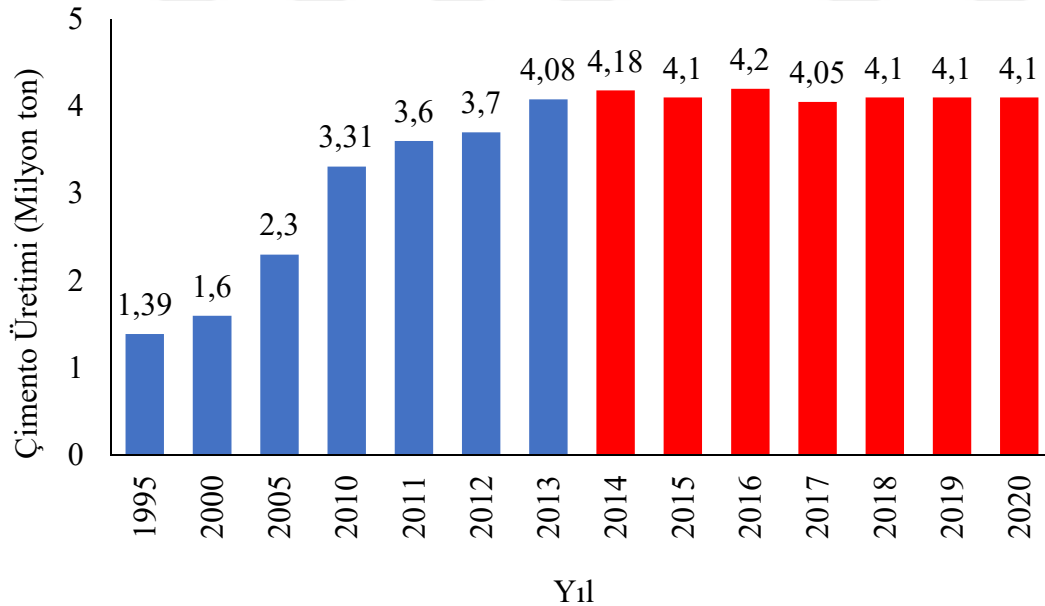
Bu tez çalışmasında ise, yukarıda özetle bahsedilmiş olan beton türünün farklı oranda karışımlar üretilmiş; küp numuneler ile yapısal ve küçük boyutlarda kiriş numunelerinde, 28 günlük performansları ve 28 gün sonrasında 30 günlük kendiliğinden iyileşme performansları toplamda 254 adet numune üzerinden irdelenmiştir. Karışım içeriğinde iki farklı UK/PC oranı, iki farklı Agregat/Bağlayıcı oranı ve üç farklı lif parametresi değişken olarak kullanılmıştır. Lif parametresiyle kıyaslama yapılabilmesi adına referans (lifsiz) ve çelik donatı ile güçlendirilmiş numunelerde üretilmiştir. Bunun yanında seçilen bir karışım içerisine iki farklı nano malzeme eklenerek sadece o karışım için nano malzemelerin etkisi de irdelenmiştir. Üretilen küçük ölçekli numuneler 3 farklı  $a/d$  oranında, yapısal ölçekli numuneler ise 4 farklı  $a/d$  oranında test edilmiştir. Üretilen numuneler öncelikle 28 gün sonunda doğrudan eğilme yüklemesine tabii tutularak verileri kaydedilmiştir. Kaydedilen veriler incelendikten sonra aynı karışımlardaki test edilmemiş olan sağlam numuneler akma noktasına kadar ön yükleme yapılarak mikro boyutta çatlak oluşturulması sağlanmıştır. Oluşturulan bu çatlakların genişlikleri el mikroskobu yardımıyla ölçülerek ölçüm yapılan nokta işaretlenmiştir. Sonrasında numuneler 30 gün boyunca ıslanma-kuruma kurlenmesi yapılarak kendiliğinden iyileşmesi ve çatlakların kapanması gözlemlenmiştir. 58 gün sonunda numunelerin işaretlenen çatlak genişlikleri tekrar ölçülerek, ön yükleme yapılmış olduğu aynı  $a/d$  oranında tekrardan eğilme yüklemesine tabii tutulmuştur. Kendiliğinden iyileşme performanslarının incelenmesinin ardından 28 gün sonunda doğrudan kırılan numuneler ile 58 gün sonunda ön yükleme sonrası iyileştirilen numunelerin eğilme performansları da karşılaştırılmıştır.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1. Çimento Teknolojisi

Yıllar geçtikçe çimento endüstrisinde sürdürülebilirliğin yanında maliyet ve enerji kavramlarına odaklanma da oldukça artmıştır. Uzun yıllardır enerji verimliliği ve CO<sub>2</sub> salınımının azaltılması adına yapılan çalışmaların sonuçları son yıllarda bir ilerleme kaydedildiğini göstermektedir. Araştırmacılar 2013 yılından sonraki üretimde miktarındaki sabitleşmenin 2020 yılından sonra olmasını beklerken [32], beklenenden daha erken olduğu Şekil 2.1’de görülmektedir. Çimento üretiminin düzenlenmesinin yanı sıra enerji ve CO<sub>2</sub> salınımlarının azaltılmasında önemli bir faktör de klinker içermeyen hammaddelerle çimento üretimi yapmak veya çimento yerine kullanmaktır. Bu malzemeler çimento içerisine üretimi sırasında eklenerek çimento içerisindeki klinker miktarını da azaltabilmektedir. Genel tabiriyle puzolan olarak adlandırılan bu malzemelerin eklenmesiyle puzolan katkılı çimentolar üretilmektedir. Bu sayede maliyet azaltılması ve CO<sub>2</sub> salınımının azaltılması gibi olumlu sonuçlar elde edilebilmektedir.



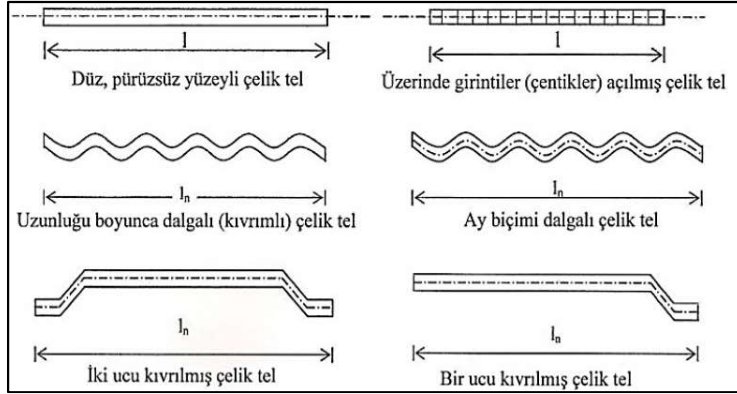
Şekil 2.1. Yıllara göre çimento üretimi [33]

Puzolanlar tek başlarına bağlayıcılık özellikleri olmayan, kireç ve su ile birlikte bağlayıcılık özelliği kazanan doğal veya yapay malzemeler olarak bilinmektedir. Son yıllarda maliyet ve sürdürülebilirlik açısından kazanım sağladığından çimento teknolojisinde oldukça önemli

bir malzeme haline gelmiştir [34–38]. Uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve volkanik tüfler en yaygın olarak bilinen ve araştırmalarda kullanılan puzolan türleridir. Yapılan çalışmalar neticesinde puzolanların erken yaşlarda mekanik ve kalıcılık özelliklerine önemli bir katkısı bulunamazken, nihai yaşlarda mekanik ve kalıcılık özelliklerine olumlu etkileri olduğu belirtilmiştir [39,40]. Puzolanların bu olumlu etkilerinin yanında maliyeti azaltması, hidrasyon ısını düşürmesi ve kalıcılık özelliklerini iyileştirmesi gibi olumlu etkileriyle birlikte çevreye daha duyarlı bir malzeme üretilebilmesi için çalışmalar yaygın bir şekilde devam etmektedir [38,41,42].

## 2.2. Lif Teknolojisi

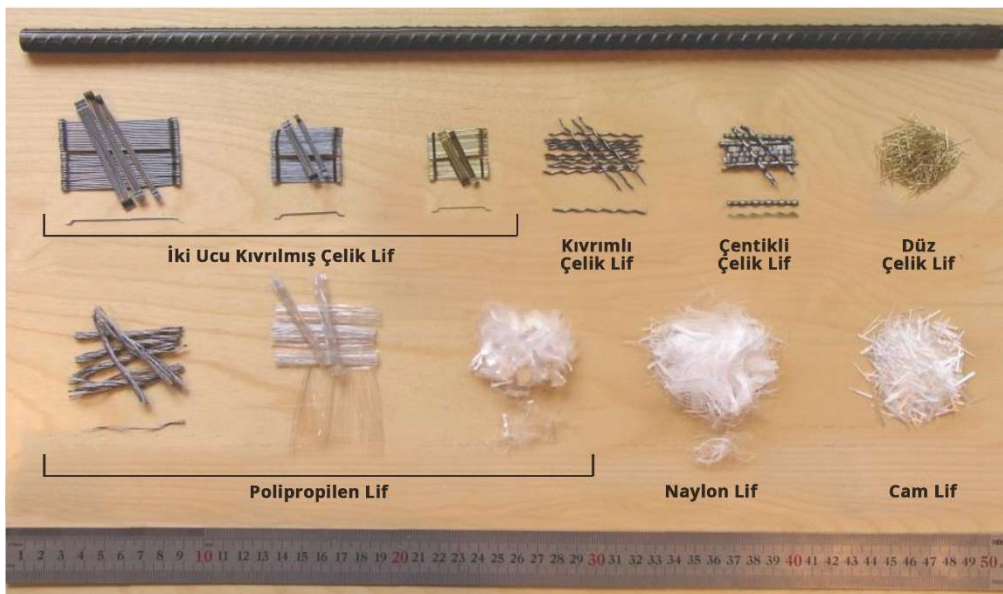
Lifler ilk kullanımından bu zamana kadar araştırılıp geliştirilerek kompozit malzemeler içerisinde kullanılmaya devam edilmektedir. Saman ve hayvan kılları ile başlayan teknoloji günümüzde yerini çelik lif, karbon lif, polipropilen, poli etilen, naylon ve PVA gibi liflere bırakmıştır. Çelik lifler günümüzde hazır betonlar içerisinde yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir [43]. Araştırmacılar çelik lifin eksik kaldığı durumlarda veya daha iyi performans sergilemeleri amacıyla sentetik lifler üzerindeki çalışmalara daha fazla yoğunlaşmıştır [44,45]. Çelik liflerin daha fazla kullanılmasının nedenleri arasında ekonomi, üretim tesisleri ve çevre koşullarına karşı direnç gibi faktörler yer almaktadır [46]. Matris içerisinde kullanılan lifin verimliliği, kullanılan lifin özelliklerine, lif hacmine, lifin geometrisine ve beton karışımındaki lifin yönü gibi faktörlere bağlıdır[47–49]. Bir kompozit malzemenin performansını kontrol eden ana faktörler şunlardır: (1) liflerin ve matrisin fiziksel özellikleri; (2) lifler ile matris arasındaki güç ve bağ; (3) liflerin miktarı (hacim oranı), dağılımı ve yönü. Günümüzde yaygın olarak kullanılan çelik liflerin şekillerine ait örnekler Şekil 2.2’de sunulmuştur.



Şekil 2.2. Çelik lif şekilleri [50]

### 2.2.1. Lif tipleri

Beton ve çimentolu kompozitlerin tokluğunu ve diğer özelliklerini iyileştirmek için kullanılabilecek çok çeşitli lifler vardır. Çelik lifler uzun bir süredir kullanılmakta fakat modern lifler daha yüksek narinliğe ve daha karmaşık bir geometriye sahiptir. Dahası sentetik lifler çelik liflere kıyasla daha iyi performans sağladıklarından daha çekici hale gelmektedir. Ticari olarak elde edilebilecek farklı liflerin bazıları Resim 2.1’de sunulmuştur. Liflerin hem mekanik hem de geometrik özelliklerinden dolayı betonun özellikleri üzerindeki etkisi önemli ölçüde değişmektedir. Bazı lifler esas olarak tokluğu artırmak ve çatlak genişliğini düşürmek için kullanılırken bazıları da plastik büzülme çatlakları ve yangın etkisini azaltmak için kullanılabilmektedir.



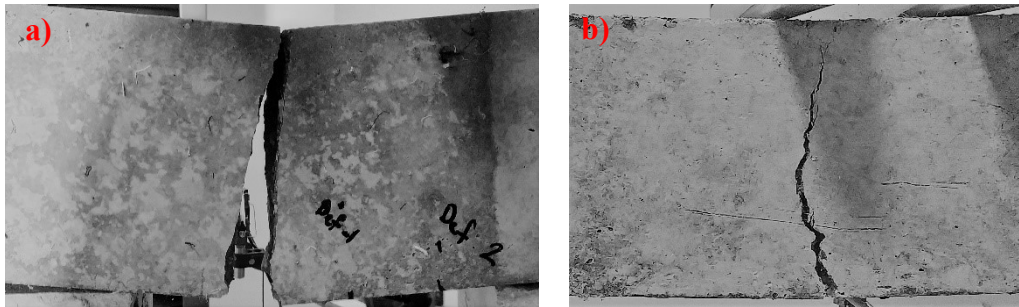
Resim 2.1. Yaygın olarak kullanılan lif örnekleri [51]

### 2.2.2. Lif geometrisi

Yapılan deneyler ve analitik çalışmalara göre liflerin çimentolu matrislerde etkili olabilmesi için şu özelliklere sahip olmaları gerektiği belirlenmiştir [52]. (1) matrizen çok fazla bir çekme dayanımına sahip olması (2) matris matrisin çekme dayanımından daha yüksek bir bağ kuvveti oluşması (3) matrizen 3 kattan daha fazla bir elastik modülüne sahip olması (4) liflerin eğilme anında kopmadan yeterli süneklik sağlaması. Bunlara ek olarak poisson oranı ve termal genişleme katsayılarının da matrisinkine yakın olması istenmektedir. Lifin poisson oranının matrisinkinden çok büyük olması durumunda matrizen sıyrılma görülebilmektedir. Bir lifin enine kesiti dairesel, dikdörtgen, kare, üçgen veya çokgen olabilmektedir. Bağ kuvveti bir lifin yüzeyi pürüzlendirilerek veya uzunluk boyunca şekil değişimi yapılarak artırılabilir. Bu nedenle lifler düz, girintili, kıvrımlı, bükülmüş veya ucu kıvrılmış şekilde üretilmektedir. (Bkz. Şekil 2.2)

### 2.3. Lifli Betonlar

Sudan sonra en fazla tüketilen malzeme olarak bilinen, dünya çapında yaygın bir şekilde kullanılmaya ve geliştirilmeye çalışılan bir yapı malzemesi olan betonun en büyük problemlerinden birisi gevrek davranışdır. Bu kadar yaygın kullanılan bir yapı malzemesinin gevrekliğinin azaltılarak sünek davranışının artırılması bir ihtiyaç haline gelmiştir. Yüzyıllar öncesinden gelen bir teknik olan karışımlar içerisinde lif kullanımı [53] da bu sorunun çözümünde en yaygın kullanılan yöntemdir. Lifler beton içerisinde homojen bir şekilde dağılarak, oluşan çatlakların ilerlemesini engellemektedir. Bu özelliği sayesinde betonun sünekliğini artırmakla beraber tokluk ve kırılma enerjisini de geliştirmektedir.

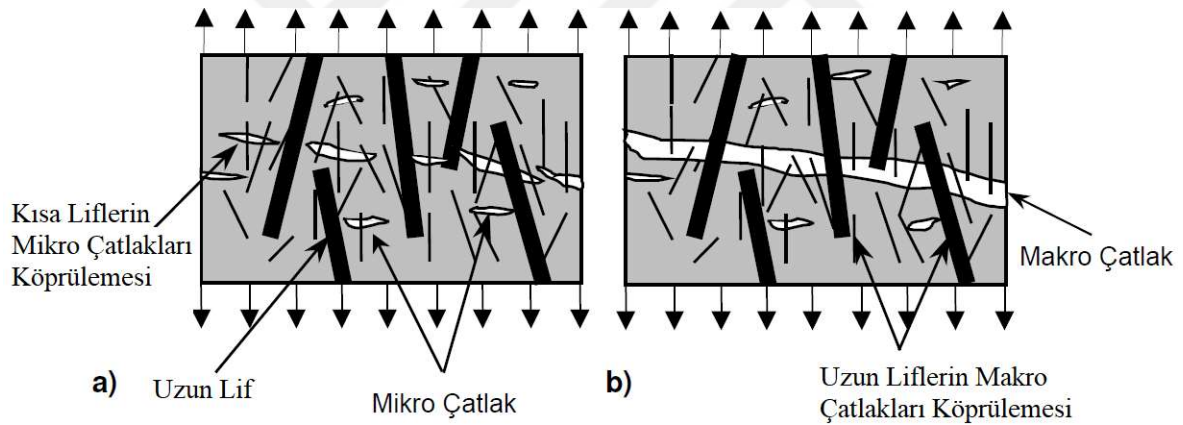


Resim 2.2. a) Gevrek davranış sergileyen lif katkısız beton örneği b) Sünek davranış sergileyen lif katkılı numune örneği

Betonun bu gevrek davranışının yanı sıra betona daha iyi bir performans ve dayanıklılık kazandırmak adına Yüksek Performanslı Beton (YPB) üzerine çalışmalar yapılmaktadır [54,55]. YPB ‘i normal yollardan elde edilen betonların ötesinde daha yüksek mukavemet ve dayanıklılığa sahip beton olarak tanımlamak mümkündür. YPB’lerin kullanımı giderek daha yaygın hale gelmektedir [56]. YPB, çevresel koşullara daha dayanıklı olduğundan köprü, yüksek binalar, tünel ve kaldırım inşaatlarında kullanılan yüksek mukavemetli bir kompozit malzemedir[57,58]. Bu yüzden YPB karışımlarında mineral katkılara ihtiyaç duyulmaktadır[59]. Mineral katkıların betona katılmasının çok fazla avantajı bulunmaktadır. Bu katkılar çimentoya ikame olarak katıldığından ve genel olarak atık ürün olarak ortaya çıktığından ekonomi açısından oldukça önemlidir. Bunun yanı sıra puzolanik reaksiyonlar sağlayacaklarından betonun nihai basınç dayanımında olumlu etki yaratacaktır [34,60–62]. YPB ’ler içerisine lif eklenerek mekanik ve dayanıklılık performanslarında iyileşmeler görülebilmektedir. Lif katkısı YPB ’lerin eğilmede çekme dayanımı üzerinde önemli bir artış sağlamaktadır[63–65]. Eğilmede çekme dayanımındaki iyileşmenin sebebi, oluşan ilk çatlak sonrasında çatlakların ilerlemesinin lifler sayesinde engellenmesidir. Bunun bir sonucu olarak da Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimentolu Kompozitlerin yük taşıma kapasitelerinde önemli artışlar görülmektedir[66,67]. YPLDÇK ’ların içeriğine iki farklı lif katılmasıyla birlikte daha cazip bir beton karışımı olan hibrit katkılı betonlar elde edilebilmektedir[4,68].

Hibrit donatılı terimi birden fazla lifin farklı özelliklerine sahip malzemelerin bir arada kullanılmasından oluşur. Birden fazla lif kullanılması betondaki eksikliklerin giderilmesine yardımcı olur. Farklı malzeme özelliklerinin kombinasyonu ile kompozit bir birleşim oluşturmak için kullanılan sistemlere hibrit karışımlar adı verilir[69]. Hibrit lif takviyesi, çatlaklara dayanıklılık özelliğinden dolayı son yıllarda ikincil donatı olarak geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Her iki lifin de olumlu yönlerini sergileyen çimento bazlı kompozitlerin üretiminde hem organik hem de inorganik lifler kullanılabilir. Naylon ve polipropilen liflerin kullanılmasıyla birlikte de uzun süreli bir darbe dayanımı elde edilebilmektedir[39,70]. Geçmişte yapılmış çalışmalarda tek bir matris içerisinde birden fazla lifin hibrit bir şekilde karıştırılması sonucunda iki fiberinde olumlu yönlerinin tek bir karışım içerisinde görülebileceği, bu şekilde kompozitin daha faydalı bir hale geleceği belirlenmiştir[8,44,71].

Hibrit lif kompozisyonlarında karışım sonrasında oluşan performans genel olarak liflerin tek tek kullanılması durumundaki performanstan daha iyi sonuçlar vermektedir. Araştırmacılar bu durumu sinerji olarak adlandırmış ve lifler arasında pozitif bir etkileşim olduğunu vurgulamışlardır[8,12,72]. Hibrit lif karışımlarında lifler, liflerin yapısal özelliklerinden faydalanılarak, liflerin uzunluklarından faydalanılarak ve liflerin fonksiyonlarından faydalanılarak üç farklı şekilde birbirini tamamlayabilmektedir. Yapısal olarak farklı olan liflerden bir tür lif, daha sert olduğu için ilk çatlak yükünü alıp nihai dayanımı artırırken diğer lif daha sünek bir davranış sağlamaya yardımcı olarak çatlama sonrası sünekliliği artırabilmektedir. Farklı uzunluklardaki lifler kullanılarak, daha kısa lifler makro çatlakların oluşmasını kontrol ederken, uzun lifler kompozitin dayanıklılığına katkıda bulunabilmektedir. Farklı fonksiyonlara sahip liflerde ise birincil tür lif büzülme davranışını engelleyebilirken, bir diğer lifin mukavemet ve tokluk özelliklerine katkıda bulunabileceğini saptanmıştır[69].



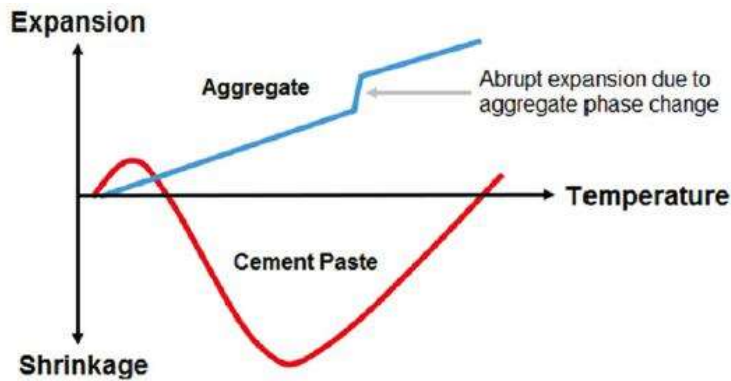
Şekil 2.3. Hibrit-Elyaf Betonun temel prensibi: a) Kısa ince elyafın mikro çatlakların köprülenmesi ve çekme mukavemetinin artması üzerindeki etkisi; b) uzun kalın lifler ile makro çatlakların köprülenmesi [73]

Lifli betonlarda lif kullanım oranı %2-4 oranında kullanımının beton performansını olumlu yönde etkilediği bilinmektedir. Bu oran lifin türü ve lifin kullanılma amacına göre değişiklik gösterebilmektedir. Genel olarak kullanılan lif türlerinden çelik lifler eğilme performansı ve tokluk performanslarının iyileşmesinde etkin rol oynamaktadır. Bunun yanında sentetik liflerin mikro çatlakların köprülenmesi ve durabilite problemlerinin engellenmesinde önemli olduğu da bilinmektedir. Yoo ve arkadaşları [74] 4 farklı oranda çelik lif kullandıkları çalışmalarında en yüksek basınç dayanımı sonuçlarına 207,2 MPa olarak %3 lif içerikli numunede ulaşmıştır. Kaikea ve arkadaşları [75] yüksek performanslı

betonlarda iki farklı oranda çelik lif ekleyerek beton performansını incelemiştir. En iyi mekanik ve durabilite özelliklerine sahip betonların %2 oranında çelik lif eklenen beton olduğunu belirtmiştir.

#### 2.4. Betonlarda Oluşan veya Oluşabilecek Kusurlar

Beton karışımı içerdiği malzemelerden, çevre koşullarından veya işçilik hatalarından dolayı birçok kusur içerebilmektedir. Beton kompozit bir karışım olmasından, yani farklı özelliklere sahip malzemeleri bir arada barındırdığından, farklı davranışlar sergileyebilmektedir. İçerdiği malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri farklılık gösterebilmektedir. Bundan dolayı farklı çevre koşullarında farklı davranışlar sergileyebilmektedir. Farklı davranış sergileyen içeriklerden dolayı zamanla beton üzerinde kusurlar oluşmaktadır. Örneğin; farklı ısı genleşme özelliklerine sahip agrega ve matris olduğu varsayımından, farklı sıcaklıklarda farklı genleşmeler görülebilmektedir. Bunun sonucunda matris içerisinde çatlaklar veya boşluklar oluşmakta ve kusur haline dönüşerek, betonun ömrünü kısaltmaktadır. Şekil 2.4'de agrega ile beton arasındaki genleşme ve büzülme davranışının sıcaklık ile değişimi gösterilmiştir.

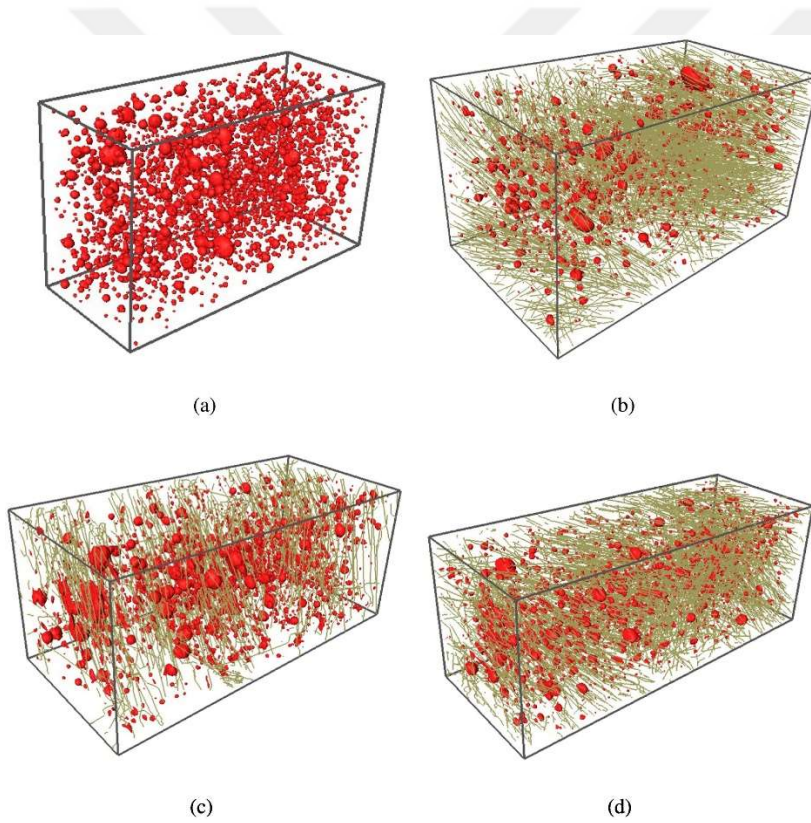


Şekil 2.4. Agrega ve matris arasındaki termal uyumsuzluk [76]

##### 2.4.1. Homojen dağılım

Bir önceki başlıkta da bahsedildiği üzere farklı yoğunluk ve farklı geometrilere sahip olan birden çok malzemenin karıştırılmasıyla oluşturulan beton, heterojen kompozit bir malzemedir. Heterojen bir karışım olan betonun içeriğinin homojen bir şekilde karıştırılması istenmektedir. Bu sayede beton karışımının tamamında benzer performans elde edilerek, zayıf nokta kaynaklı bir göçmenin önüne geçildiği düşünülmektedir. Homojenite problemi

farklı boyutlardaki taneciklerin farklı davranmasından da kaynaklanabilmektedir. Konvansiyonel beton karışımlarındaki homojen bir dağılımın elde edilmesi lifli betonlara nispeten daha zordur. Çünkü ideal lif oranıyla birlikte beton karışımının içerisindeki boşluk oranı azalmakta ve daha homojen karışmış bir beton elde edilmektedir. Rios ve arkadaşları [77] mikro ve makro liflerin matris yapısında bulunan farklı büyüklüklerdeki boşluklara etkisini incelemiştir. İki farklı boyuttaki lifleri, ayrı ayrı ve birlikte kullandıkları çalışmalarında bilgisayarlı tomografi yardımıyla boşluk dağılımlarını göstermiştir. Lif katkısı bulunmayan numunelerdeki boşluk çapı ve boşluk miktarı fazlayken, lif eklenmesiyle birlikte boşluk büyüklükleri ve boşluk hacminin azaldığını vurgulamıştır. Boşlukların dağılımını gösteren bilgisayarlı tomografi görselleri Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Numunelerin bilgisayarlı tomografi görüntüleri a)referans b)mikro lif c)makro lif d) mikro ve makro lif katkılı [77]

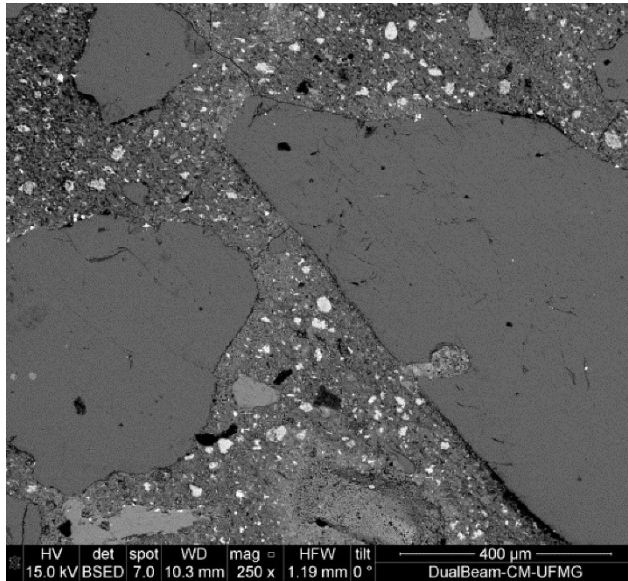
#### 2.4.2. Çatlak

Betonlarda çeşitli nedenlerden dolayı makro ve mikro çatlaklar oluşabilmektedir. Makro boyutlardaki yapısal çatlaklar ve uygulamadan meydana gelen çatlaklar olarak iki ana başlıkta toplanması mümkündür. Mikro çatlaklar ise genellikle göz ile tespit edilmesi zor olan, mikroskop yardımıyla görülebilecek düzeydeki ara yüzey çatlakları gibi çatlaklardır.

Bu çatlakların oluşma nedenleri ise betonun kırılgan yapısı, ortamın nem düzeyi, sıcaklık büzülme ve işçilik hataları gibi sebepler olabilmektedir. Çatlakların oluşmasını engellemek veya azaltmak amacıyla lifler kullanılsa da bazı çatlakların oluşmasına engel olunamamaktadır.

### 2.4.3. Ara yüzey çatlakları

Beton içerisinde genellikle herhangi bir yük altında kalmadan, kendi içerisinde oluşan reaksiyonlar veya çevresel koşullar sebebiyle agregâ ile çimento arasındaki ara yüzeyde çatlaklar oluşabilmektedir. Bu çatlaklar mikro düzeyde olup, betonun mekanik özelliklerini etkileyecek niteliktedir. Söz konusu çatlakların çoğu harcın ayrılması, büzülmesi veya ısı genleşmeden kaynaklanmaktadır. Agregâ ve matris yüzeyi arasındaki rijitlik farkından dolayı bu ara yüzey sistem içerisinde en zayıf bölge olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu zayıf yüzey varlığı ve mikro çatlakların oluşmasıyla yükleme altında betonun düşük bir çekme dayanımı göstermesine sebebiyet vermektedir. Genel olarak çimento esaslı malzemelerin düşük bir çekme dayanımına ve kırılgan bir yapıya sahip olmaları, betonda çatlakların kaçınılmaz bir sonuç olarak ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Şekil 2.4'te görüleceği üzere matris ve agregâ arasında kalan ara yüzeyde bir geçiş yüzeyi (zayıflık) olduğu görülebilmektedir.



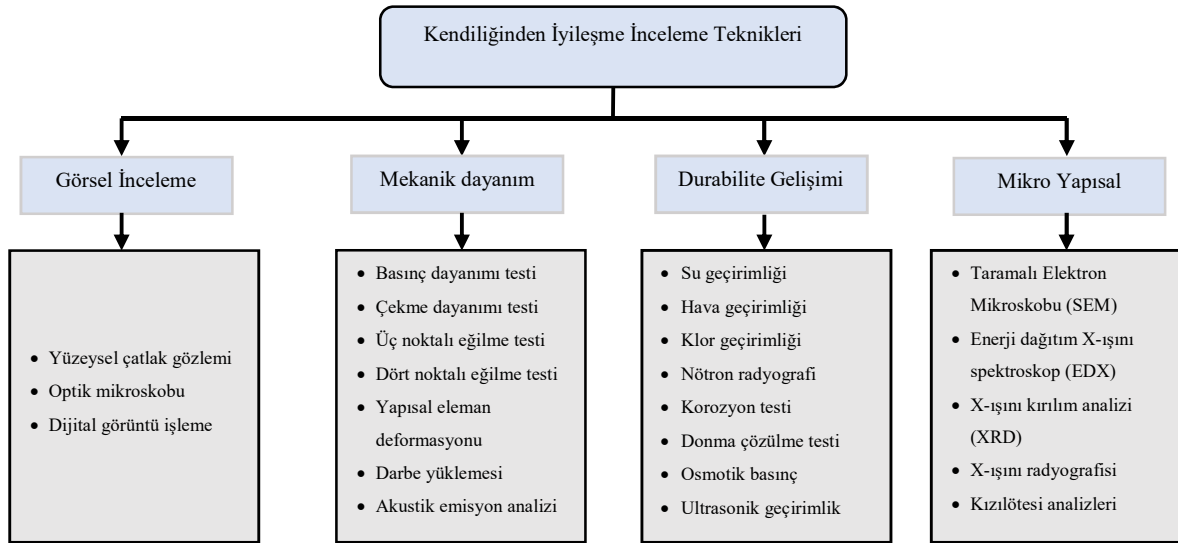
Resim 2.3. Matris-agrega arayüzü elektron mikroskobu görüntüsü (SEM) [78]

Genel olarak liflerin birincil etkisinin çekme mukavemetinden ziyade kırılma sonrasındaki davranışı yani matris çatlamasından sonra oluşan gerilmeleri ve tokluğu artırmak olduğu kabul edilmektedir[79,80]. Yapılan ilk çalışmalarda lifler boşluğa ne kadar yakınsa liflerin mikro çatlakların genişlemesini geciktirdiğinden çekme mukavemetinin artabileceği düşünülmekteydi [81]. Fakat kullanılan liflerin matris içerisinde bulunan kusurdan büyük olduğundan ve karışım içerisine eklenebilecek lif hacmi belirli bir limit içerisinde kaldığından dayanıma etkide bulunma olasılığı düşük kalacaktır[51].

## **2.5. Çatlakların İyileşmesi (Kendiliğinden İyileşme)**

Kendiliğinden iyileşme (self-healing) adı verilen mekanizma, çatlakların kendi kendine kapanması, yani fiziksel ve mekanik performansların geri kazanılması olarak tanımlanır [17,18]. Betonda kendiliğinden iyileşme sistemleri otojen ve otonom olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleşmektedir. Çatlak yüzeyinde kalan hidrate olmamış susuz çimentonun rehidrasyon yaparak, dışarıdan herhangi bir malzeme eklenmeden kapanan çatlaklara otojen iyileşme adı verilir. Bunun aksine karışım içerisinde kullanılmayan bileşenlerin çatlak kapatılması için sonradan dâhil edilmesi şeklinde kendiliğinden iyileşmesine ise otonom kendiliğinden iyileşme adı verilmektedir[82].

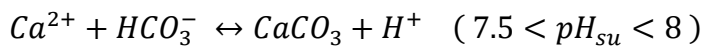
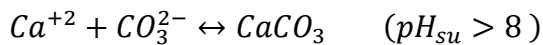
Betonda kendiliğinden iyileşme performansı, mekanik dayanımın geri kazanılması, geçirgenlik, dayanıklılık, mikro yapısal inceleme ve gözlem değerlendirmesi kullanılarak incelenir. Kendiliğinden iyileşme değerlendirmelerinde üç temel faktör incelenir: (1) Görsel çatlak geçirgenliği (2) Dayanıklılık performansı (3) Mekanik mukavemetlerin geri kazanımı [83,84]. Mekanik dayanımın geri kazanılması kendiliğinden iyileşme durumunda oldukça güçtür. Bu nedenle kendiliğinden iyileşme performansını incelemek adına gözlem veya geçirgenlik testlerinin uygulanması daha doğru olacaktır. Kendiliğinden iyileşme performanslarının belirlenmesi için kullanılan yöntemler Şekil 2.6’da belirtilmiştir.



Şekil 2.6. Betonda kendiliğinden iyileşme performansı inceleme teknikleri [85]

### 2.5.1. Otojen kendiliğinden iyileşme

Betondaki çatlakların kendiliğinden iyileşmesinin (kapanmasının) nedenleri olarak; çözünme, sürekli hidrasyon, çökeltme ve kristalleşme olduğu saptanmıştır[86]. Otojen iyileşmenin betonun geçirgenliğini azalttığı [87] ve betonun otojen iyileşmesinin bir süreç içerisinde gerçekleştiği belirlenmiştir. Çatlaklar içerisindeki  $\text{CaCO}_3$  oluşumunun betondaki otojen iyileşmenin temel mekanizması olduğu ortaya çıkarılmıştır. Su taşıyan çatlakların olduğu bölgede kalsit oluşması şu şekilde formülize edilebilir[88].



Genel olarak otojen iyileşme zamana bağlı bir durumdur ve otojen iyileşmeyi etkileyen birkaç önemli parametre mevcuttur. Erken yaşlarda devam eden hidrasyon ve sonrasında oluşan kalsiyum karbonatın otojen üzerindeki etkisi büyüktür. Ayrıca kendi kendine iyileşme söz konusu olduğunda çevresel koşulların ve sıcaklığın etkisi de göz ardı edilemez[89]. Çatlakların geometrisi, ürün oluşumu nedeniyle çatlak kapanma oranını etkilemektedir. Çatlak ne kadar genişse iyileştiren ürünlerin oluşumu için daha fazla bir alan ve daha kolay bir karbondioksit erişimi olduğundan kapanmaların o kadar da hızlı olacağı düşünülmektedir[90]. Bununla birlikte çatlakların genel olarak kapanmasının küçük çatlaklar için daha kolay olduğu bilinmektedir. 300  $\mu\text{m}$ 'den daha büyük çatlaklarda sadece

%20 oranlarında iyileşmeler belirlenmiştir[90]. Çatlak büyüklüğü dışında karışım içerisinde bulunan diğer parametrelerin de otojen iyileşme performansını etkilediği bilinmektedir. Su/bağlayıcı oranının azalması ile birlikte hidrate olmayan çimento tanelerinin sayısı artacağından sonrasında daha iyi bir kendiliğinden iyileşme performansı oluşturacaktır. Karışım içerisine çimento yerine puzolan eklenmesiyle de uzun zamanlı hidratasyon artacağından, otojen kendiliğinden iyileşme performansına katkıda bulunacaktır. Otojen iyileşmenin çalışma prensibini gösteren mekanizma Şekil 2.7a'da gösterilmiştir.

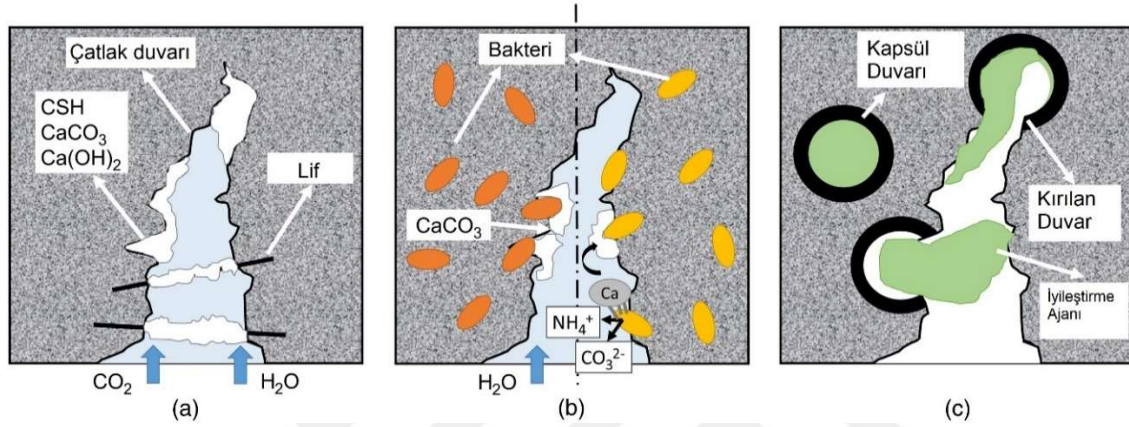
Şahmaran vd. [91] kendiliğinden yerleşen betonun kendiliğinden iyileşme kapasitelerini inceledikleri çalışmalarında %35 ve %55 olarak UK/Bağlayıcı oranını değiştirerek incelemede bulunmuştur. Çalışmalarında ön yüklemenin ardından 30 günlük kendiliğinden iyileşme süreci uygulanmıştır. Uçucu kül miktarı yüksek olan numunelerin iyileşme sonrası mekanik performanslarındaki kayıp %27'den %7'ye düşerken, uçucu kül içermeyen numunelerde bu değer %19'dan %13'e düşmüştür. İyileşmenin sebebi olarak hidratasyona geç dâhil olan uçucu kül taneciklerinin C-S-H jeli oluşturarak çatlakların kapanması şeklinde yorumlamıştır.

Termkhajornkit vd. [92] çalışmalarında çimento pastasında oluşan çatlakların kendiliğinden iyileşebilme performanslarını incelemiştir. Çalışmada çimentoya ikame olarak hacimce %15, %25 ve %50 oranlarında uçucu kül ilave etmiştir. Uçucu kül içeriğinin artmasıyla birlikte toplam gözeneklilik miktarının azaldığını ve uçucu küllü sistemlerin kendiliğinden iyileşme yeteneğine sahip olduklarını vurgulamıştır. Aynı zamanda 91, 182 ve 364 gün sonunda uçucu kül miktarı %50 olan numunelerde C-S-H jeli oluşum miktarının daha fazla olduğunu belirtmiştir.

Hung ve Su [92] tasarlanmış çimentolu kompozitlerin kendiliğinden iyileşme performanslarını inceledikleri çalışmalarında üç farklı UK/PC oranı (1,2, 1,6 ve 2,0) kullanmıştır. 7, 28 ve 90 gün sonunda yaptıkları incelemelerde tasarlanmış çimentolu kompozitlerin orta vadeli kendiliğinden iyileşme performansına sahip olduğu ve ortamda su bulunduğu sürece mekanik özelliklerini de kısmen geri kazanabileceğini belirtmiştir.

### 2.5.2. Otonom iyileşme

Otonom kendi kendini iyileştirme sistemlerinde, beton veya kompozitin içerisine aktif iyileştirici olan kapsüller veya iyileştirme yardımcısı olan bakteriler sistem içerisine enjekte edilir. Otonom iyileştirme sistemlerinde yaygın olarak kullanılan yöntemlere ait çalışma mekanizması Şekil 2.7b ve Şekil 2.7c'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Kendiliğinden iyileşme mekanizması (a) otojen iyileşme (b) Bakteriyle otonom iyileşme (c) Kapsül ile otonom iyileşme [93]

Kalsiyum kaynaklı bakteriler karışım esnasında betona katılır. Betonda bir çatlak oluşması durumunda kalsiyum karbonata çökelirler ve bu çatlakları kapatırlar. Bu sayede bakteriyel bir betonun mukavemeti standart bir betondan daha fazla olmaktadır[94]. Bakterilerle iyileştirme sonucu kalsiyum karbonat boşlukları doldurarak çatlaklarda iyileşmeler elde edilir. (bkz. Şekil 2.7b) Bir diğer metot olan ve yaygın olarak kullanılan mikro kapsüllerdir [83,95]. Kullanılan bu mikro kapsüller matriste bulunan çatlakların yayılmasından dolayı kapsül kabuklarına uygulanan kuvvet sonucu kırılarak içerisinde bulunan iyileştirme ajanını serbest bırakır. Açığa çıkan ajan çimentolu matris yüzeyiyle reaksiyona girerek boşluk ve çatlakları dolduran (iyileştiren) bileşikler meydana getirir. (Bkz. Şekil 2.7c)

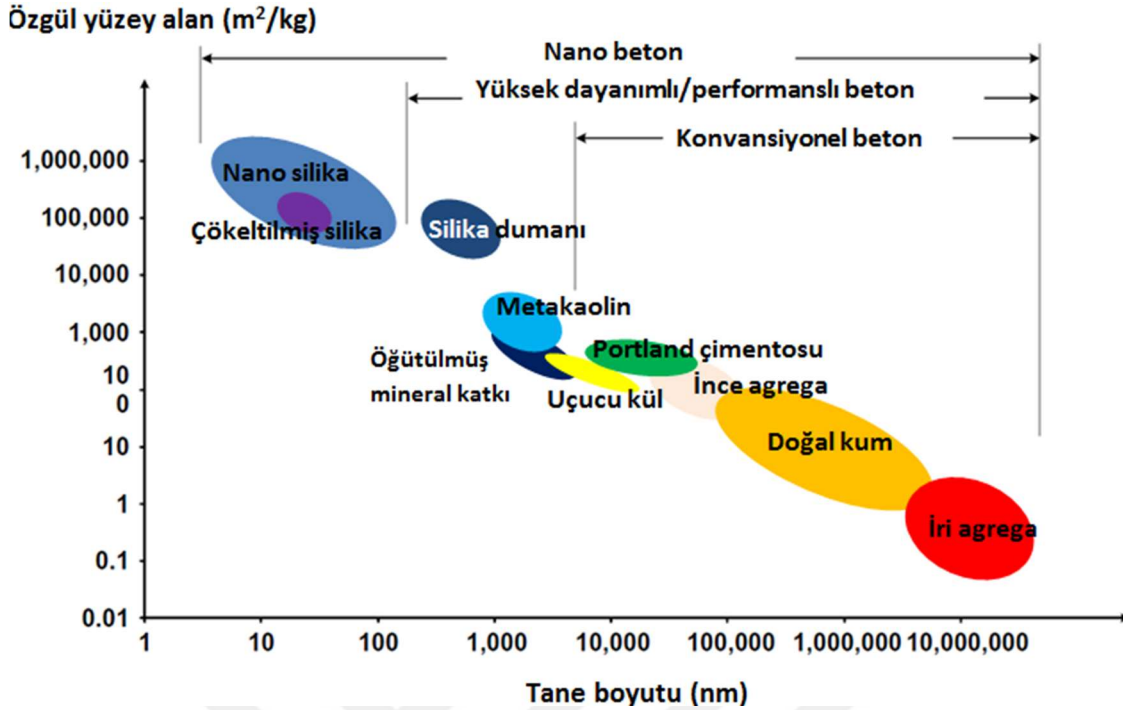
### 2.6. Nano Malzemeler ve Gelişimi

Nano teknoloji maddenin nano ölçekte kontrol edilmesiyle ilgilenen bilim dalıdır. Nano malzemelerin üretilmesiyle yeni uygulamalara olanak sağlanmaktadır. Nano büyüklüğü metrenin milyarda biri olarak kabul edilen ölçüdür. Nano ölçekler bilimde ve doğada yeni değildir. Nano boyutlardaki malzemeleri ölçeklendirmek ve test edebilmek amacıyla ölçüm

sistemlerindeki son gelişmeler farklı alanlarda nano malzemelerinin kullanılmasına öncü olmuştur. Bir malzeme boyutunun nano boyutlara indirgenmesiyle birlikte fiziksel, kimyasal veya biyolojik özelliklerinde farklılıklar görülebilmektedir. Malzemelerin boyutları değiştikçe kimyasal olarak daha reaktif hale gelebilir, ışığı daha iyi yansıtabilir veya renk değişimine uğrayabilirler. Yani nano teknoloji, boyutların küçülmesi anlamına gelmenin yanı sıra, malzemelerden elde edilecek farklı kimyasal, mekanik, optik özelliklerinden faydalanabilmesini sağlar. Nano katkıların beton teknolojisinde kullanılması yaygınlaşmaya başlamıştır. Beton malzemelerin mekanik davranışı büyük ölçüde mikro ve nano ölçekte etkili olan yapısal elemanlara ve olaylara bağlıdır. Çimentolu sistemlerde mukavemet ve diğer özelliklerden sorumlu birincil bileşen olan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) fazının boyutu, birkaç nanometre aralığında yer almaktadır. Bu, betonun performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir, çünkü bu yapı nem durumuna hassas davranmaktadır. Bu sebeple nano malzemelerin gelişimi betonda durabilite, mekanik performans ve sürdürülebilirlik açısından oldukça önemlidir [96,97].

### **2.6.1. Nano malzemelerin betonda kullanımı**

Beton teknolojisinde ve beton yapısında kullanılan malzemelerin tane boyutları ve özgül yüzey alanlarını gösteren farklılıklar Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Nano parçacıkların geleneksel betona eklenmesinin mekanik özellikleri iyileştireceğine inanılmaktadır. Nano malzemeler çimentoda ara yüzey bölgelerine nüfuz ederek daha boşluksuz ve yüksek yoğunluklu bir yapı elde edilmiştir. Bu malzemelerin bu kadar küçük boşlukları dolduruyor olması mükemmel bir dolgu etkisi yarattığının göstergesidir. Bu sayede mikro boşluklar, gözeneklilikten kaynaklanan bozulmalar ortadan kalkabilecektir. Ayrıca çimentodan daha ince tane boyutuna sahip bir parçacığın, yeni bir bağlayıcı olarak sistemin içerisine dâhil olması, matris sistemini daha da güçlü yapacaktır. Beton için özellikle önemli olan, nano ölçekte parçacıkların büyük ölçüde artan yüzey alanıdır. Bir malzemenin kütlesi başına yüzey alanı arttıkça, daha büyük miktarda malzeme çevreleyen malzemelerle temas edebilir ve böylece reaktiviteyi etkileyebilir [96]. Her ne kadar beton yapısında konvansiyonel betonun nano boyut içermediği düşüncesi oluşsa da beton yapısındaki C-S-H jeli, jel boşlukları gibi yapılar nano boyutlardadır.



Şekil 2.8. Beton teknolojisindeki tane boyutu ve özgül yüzey alanı ilişkisi [98]

Günümüzde Nano Silis[24,99], Nano Alümin[100,101], Titanyum oksit [100], Karbon nano tüp [102,103], nano grafenoksit [104,105] ve polikarboksilat [106] esaslı malzemeler yaygın olarak kullanılan nano malzemelere örnektir. Genel olarak nano parçacıkların yüzdesi, bağlayıcının hacmi veya kütlesiyle ilişkilendirilerek eklenir. Nanopartiküller, beton gözenekliliğini azaltarak bağlama matrisinin yoğunluğunu arttırmada ve agregalar ile çimento macunu arasındaki ara yüzey geçiş bölgesini (ITZ) iyileştirmede faydalı olabilir. Mikro ve nano ölçeklerdeki bu değişiklikler ve elde edilen iyileşmeler neticesinde betonun performansı değişerek hem mekanik hem durabilite özellikleri değişir. Yapılan çalışmaların genelinde nano malzemeler beton içerisinde boşluklarda dolgu görevi yaparak, beton karışımların mekanik ve durabilite özelliklerine katkıda bulunmuştur[99,107].

#### Nano silis (NS)

Günümüzde nano-SiO<sub>2</sub> olarak bilinen parçacıklar, nano katkıların beton içerisinde en yaygın kullanılan ve ilk çalışılan nano parçacıktır. Genellikle mikro silis taneciklerinden elde edilen NS reaksiyonları, silis dumanı reaksiyonları ve sonuçlarına benzer şekilde elde edilmektedir. Fakat yüzey alanı ve tane boyutları olarak farklı olduklarından NS katkılı numunelerden elde edilen sonuçların erken dayanımlarının daha yüksek olduğu görülmektedir. Silis dumanı ve NS katkısının karşılaştırmasında NS içerikli karışımlarda : (i) daha hızlı hidratasyon olduğu

(ii) daha yüksek basınç dayanımı (iii) daha iyi bir arayüzey performansı (iv) CaOH ile tepkimesinin daha hızlı oluşması gibi sonuçlar elde edilmiştir [108]. Silis kökenli olması nedeniyle beton yapısındaki CaOH tepkimeye girerek, çimentonun hidratasyonuna da katkıda bulunmaktadır. %4 NS kullanılması %19 hidratasyon sıcaklığında artış, 3 günlük basınç dayanımında ise %81 oranında bir artış görülmesi bu düşüncüyü destekler nitelikte sonuçlar vermiştir [109].

Genel olarak NS karışımlarının beton performansı ile ilgili çok fazla çalışma bulunmaktadır. Bu nano malzemenin genel etkisinin incelenmesi adına Abhilash ve arkadaşları [99] yaptıkları derleme çalışmasında 109 adet yayın inceleyerek özetlenmiş olarak aşağıdaki sonuçlara erişmiştir.

- Çimentolu karışım içerisine NS eklendikçe kıvam kaybı yaşandığı, yani su ve akışkanlaştırıcı ihtiyacı arttığı,
- Eklene NS etkilerinin, NS'nin yüzey alanına, tipine, dozajına göre değiştiğini
- Genel olarak incelenen çalışmalarda NS'nin %2 ile %3 aralığında eklenmesiyle olumlu etkisinin görüldüğü, %3 oranını aşması durumunda azalmalar olabileceği,
- NS'nin silis dumanına göre daha aktivitesinin daha yüksek olduğu ve bu yüzden daha iyi sonuçlar verdiği
- NS'nin mekanik ve durabilite özelliklerinin tamamında olumlu etkiler ortaya çıkarabildiği sonuçları çıkarılmıştır.

#### Nano alümin (NA)

Nano Alümin (NA) çimentolu matrislerde yaygın olarak kullanılan bir diğer nano parçacık olarak bilinmektedir. NS içerikli numunelere kıyasla mekanik özellikleri çok fazla geliştirmezken alümin içerikli olmasından dolayı priz süresi üzerinde daha baskın bir etkisi bulunmaktadır. Salim ve arkadaşları [110] NA katkılı numunelerin erken yaş dayanımlarında önemli farklılıklar bulamazken, hamur fazın mikro yapısında daha yoğun bir matris olduğunu belirtmiştir. Çimento matrisindeki CaOH ile tepkime vererek Kalsiyum Alüminat Hidrat (C-A-H) jelleri oluşturabilmektedir. Ayrıca Joshaghani ve arkadaşları [100] NA katkısının çok ince bir dolgu ajanı gibi görev yaparak ITZ'yi güçlendirdiğini ve bu sayede basınç dayanımında artış sağladığını vurgulamıştır.

NS ile kıyaslandığında NA kullanılarak yapılmış olan çalışma sayısı oldukça kısıtlıdır. Bunun nedeni, NA'nın mekanik özelliklere olan katkısının çok sınırlı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Her ne kadar durabilite özelliklerinde ve matris yoğunluğunda iyileşmelere katkı sunuyor olsa da, yapılan çalışmalar mekanik özelliklere katkısının sınırlı olduğunu göstermektedir[101,110,111].

### 2.6.2. Nano malzemelerin kendiliğinden iyileşme performansına etkisi

Mekanik ve sürdürülebilirliğin artırılmasında büyük önem taşıyan nano malzemelerin erken dayanımlar üzerinde oldukça etkili olduğuna bir önceki bölümde değinilmiştir. Nano malzemelerin tane boyutları küçük olduğundan ve yüzey alanları büyüklüğünden oldukça reaktif malzemelerdir. Bu sebeple erken yaşta oluşabilecek olan çatlakların iyileştirilmesinde önemli rol oynayacağı düşünülmektedir. Buna rağmen çimentolu kompozitlerde nano malzemenin kendiliğinden iyileşme performansına etkisini araştırma sayısı oldukça azdır. Bu konunun literatürde bir eksiklik ortaya çıkardığı, erken yaşlardaki tepkisi bilinmesine karşın, ileriki yaşlardaki etkisi araştırılmalıdır.

Tsampali ve Stefanidou [112] NS ve Nano-CaO (NC) parçacıklarının kendiliğinden iyileşme performansına etkilerini incelemiştir. NS ve NC'nin %1,5 oranlarında ayrı ayrı ve sırasıyla %1+%0,5 oranlarında ikisi birlikte eklendiğinde oluşan etkinin mekanik ve kendiliğinden iyileşme performansını karşılaştırmıştır. Araştırma sonucunda, bütün karışımlarda iyileşmeler elde edildiğini vurgulamıştır. Nano malzeme içeren karışımlarda referans karışımına göre daha iyi bir iyileşme sonucu elde ettiklerini geçirimsizlik testi sonucundaki verilerle desteklemiştir. Öyle ki referans karışımında 200µm genişliğinde bir çatlakta %85 civarında bir iyileşme görülmüşken, NS içerikli karışımında bu çatlak %100 oranında iyileşmiştir. NS ve NC içeren karışımında ise en yüksek çatlak genişliği <100µm olduğunu belirtmiştir. Daha küçük çatlak boyutunun elde edilmesiyle daha iyi bir iyileşme performansı oluştuğunu vurgulamıştır. Ayrıca konu ile ilgili eksiklerin giderilmesi adına çalışmaların genişletilmesi tavsiyesinde bulunmuştur. Cuenca ve arkadaşları [113] ise NA lif katkısının kendiliğinden iyileşebilme kapasitesi üzerine etkisini incelemiştir. NA katkısının kendiliğinden iyileşme sonrası mekanik ve kalıcılık özelliklerindeki kayıpları daha hızlı geri kazandırarak, bu özellikleri tekrardan artırdığını belirtmiştir. Bu etkinin sebebinin, NA'nın gecikmiş hidratasyon reaksiyonlarını aktifleştirmesinden kaynaklı olabileceği şeklinde yorumlamıştır.

## 2.7. Eğilme Deneyi

### 2.7.1. Eğilme performansına boyut etkisi

Küçük boyutlarda laboratuvar şartlarında üretilen numuneler test edilerek kullanıldığı veya kullanılacağı yapı içerisindeki genel performansı hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. Daha büyük ölçeklerdeki numunelerin üretimi hem işçilik hem de maliyet açısından zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Fakat her ne kadar küçük bir numunenin yapının tamamını temsil ettiği düşünülse de yapısal boyuttaki üretimlerde farklı problemler ortaya çıkabilmektedir. Bu sebeple araştırmacılar farklı boyutlarda numuneler üreterek, boyutlar arasındaki farklardan ortaya çıkabilecek olan farklılıkları göz önüne almışlardır. Basınç dayanımında boyut etkisi ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmışken, eğilme numunelerinde bu çalışma konusu kısıtlı sayıda kalmıştır. Ayrıca numune boyutlarının sabit olmaması, üç veya dört noktalı eğilme uygulanması ve çentikli-çentiksiz numune üretimleri gibi farklılıklardan dolayı durum daha karmaşık bir hal almaktadır [114]. Yapılan çalışmaların genelinde Bazant [115] teorisinde belirtildiği gibi numune boyutu arttıkça bir dayanım azalması gözlemlenmiştir. Awinda ve arkadaşları [116] 50, 100 ve 150mm yüksekliğe sahip 3 farklı boyuttaki kirişler üzerinde 3 noktalı eğilme deneyi uygulamıştır. Genel olarak numune boyutlarının artmasıyla birlikte eğilme dayanımlarında azalmalar görmüştür. Fladr ve Bily [114] yapmış oldukları çalışmada 100 ve 150mm yüksekliğe sahip iki farklı kiriş numunesi üzerinde dört noktalı eğilme deneyi uygulamışlardır. Elde edilen verilerde numune boyutu artmasıyla eğilme dayanımının azaldığı yönünde olmuştur. Farklı boyutlardaki kiriş numuneleri üzerinde yapılmış olan eğilme deneyi sonuçlarıyla ilgili literatür özeti kısaca Çizelge 2.1’ de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Farklı boyutlardaki kiriş numuneleri üzerinde yapılan eğilme deneyi sonuçları

| Yazar                   | Numune Boyutları (mm)<br>(Yükseklik × Genişlik × Uzunluk) | Eğilme Dayanımı<br>(MPa) |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------|
| Fladr ve Bily<br>[114]  | 100×100×400                                               | 13,80                    |
|                         | 150×150×700                                               | 11,50                    |
| Awinda ve ark.<br>[116] | 50×50×200                                                 | 19,83                    |
|                         | 100×50×350                                                | 15,70                    |
|                         | 150×50×550                                                | 14,67                    |

Çizelge 2.1. (devam) Farklı boyutlardaki kiriş numuneleri üzerinde yapılan eğilme deneyi sonuçları

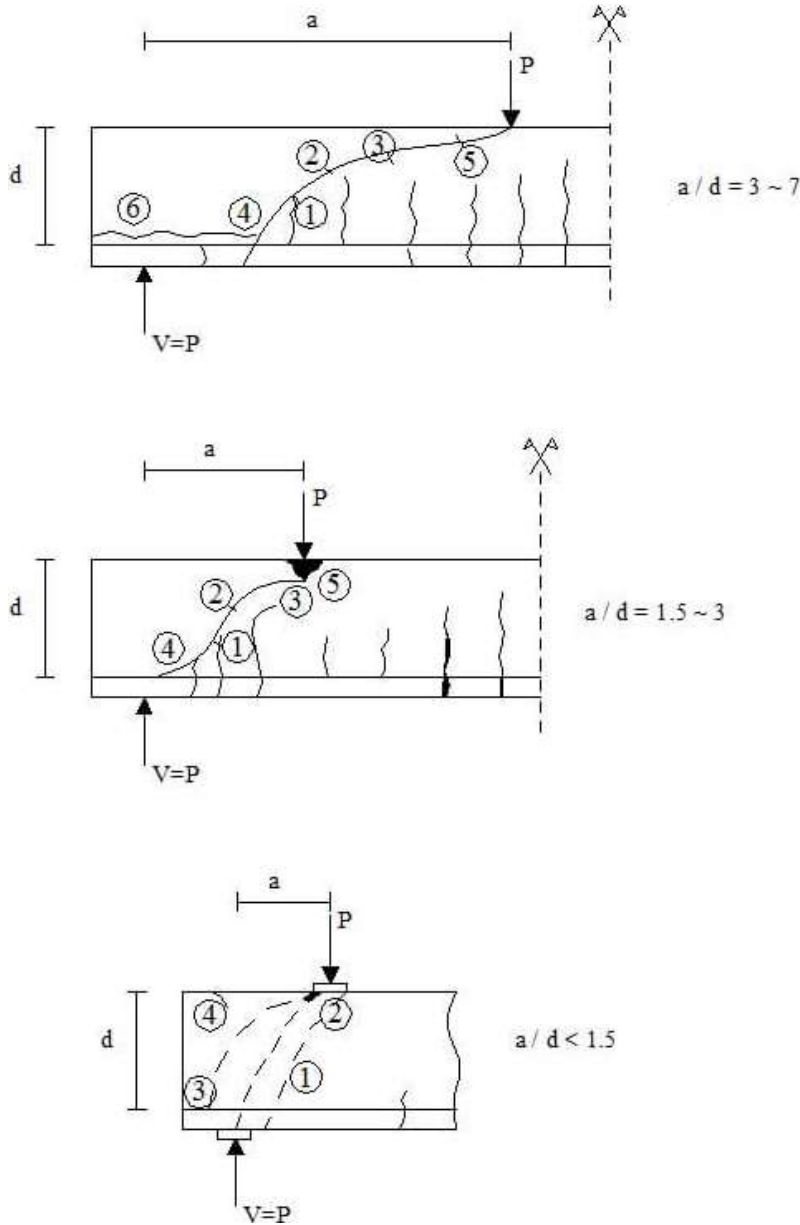
|                         |             |       |
|-------------------------|-------------|-------|
| Nguyen ve ark.<br>[117] | 50×50×150   | 13,19 |
|                         | 100×100×300 | 10,89 |
|                         | 150×150×450 | 7,88  |
| Zhou ve ark.[118]       | 50×100×300  | 3,43  |
|                         | 100×100×500 | 2,74  |
|                         | 200×100×840 | 2,19  |
| Zi ve ark. [119]        | 30×30×190   | 5,43  |
|                         | 48×48×244   | 4,41  |
|                         | 75×75×325   | 4,24  |
| Mahmud ve<br>ark.[120]  | 30×150×550  | 25,33 |
|                         | 60×150×550  | 20,27 |
|                         | 90×150×550  | 19,59 |
|                         | 120×150×550 | 20,37 |
|                         | 150×150×550 | 19,24 |

## 2.8. Kesme Açıklığı/Faydalı Yükseklik (a/d)

Yapılarda kullanılan kirişlerde yükleme noktası sadece orta noktadan olmamaktadır. Kiriş üzerine farklı noktalardan yükler gelebilmekte ve bu kirişler farklı yükleme koşullarında farklı performanslar sergileyebilmektedir. Farklı yükleme noktalarından alınan yükler sonucunda farklı çatlama ve kırılma şekilleri oluşmaktadır. Ersoy ve Özcebe [121] farklı a/d oranlarında kirişlerin kesme, eğilme veya kesmeli eğilme çatlağı oluşturduğunu belirtmiştir.  $a/d < 1,5$  oranında eğilme,  $1,5 < a/d < 3$  oranında kesmeli eğilme,  $3 < a/d < 7$  oranında ise eğilme kırılması oluştuğunu savunmuştur. Eğilme ve kesme çatlak oluşum şekillerinin görseli Şekil 2.9'de gösterilmiştir.

Eğilme deneyleri üzerinde kırılma şekilleri ve farklı kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranlarının etkileri yaygın bir şekilde test edilmeye devam edilmektedir. Kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranlarının lif katkılı betonların kesme dayanımları üzerinde önem arz ettiği daha önceki çalışmalarda incelenmiştir. Dinh [122] lif katkılı betonlarla yaptığı çalışmada kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranlarının kesme etkisi sınırının 3 olduğunu

belirtmiştir. Keskin ve arkadaşları [30] ise laboratuvar ortamında büyük boyutlu Tasarlanmış Çimentolu Kompozit (ECC) üretmişler. Ürettikleri ECC numunelerini farklı kesme açıklığı/faydalı yükseklik ( $a/d$ ) oranlarında eğilme testine tabii tutarak iyileşme eğilme çatlakları ve kesme çatlakları arasındaki iyileşme farkına değinmişler. Eğilme çatlaklarının kesme çatlaklarına oranla daha iyi sonuç verdiğini belirtmişler.



Şekil 2.9. Farklı  $a/d$  oranlarındaki yüklemelerde çatlakların oluşma durumları [121]

Kwak ve arkadaşları [123] da betonun mekanik özellikleri üzerinde çalışma yapmışlardır. Farklı lif katkılarında basınç dayanımı ve farklı  $a/d$  oranındaki nihai kesme dayanımı arasındaki ilişkiyi incelemişler. Basınç dayanımının artmasıyla birlikte kesme

kırılmasından eğilme kırılmasına doğru bir geçiş olduğunu vurgulamıştılar. Ayrıca lif oranlarının artmasıyla artan süneklilik ile birlikte eğilme çatlaklarına geçiş olduğunu belirtmişler.





### 3. DENEYSEL PROGRAM

#### 3.1. Malzemeler

##### 3.1.1. Portland çimentosu (PC)

Tez kapsamındaki deneysel çalışmalar için hazırlanan numunelerde Eskişehir ÇİMSA tarafından üretilen CEM I 42,5R tip çimento kullanılmıştır. TS EN 197-1 standartlarına uygun şekilde üretilen çimentonun kimyasal ve fiziksel özelliklerini içeren bilgiler Çizelge 3.1’de gösterilmiştir. Ayrıca çimentonun lazer kırınım metoduyla elde edilen tane büyüklüklerini gösteren grafiği de Şekil 3.1’de verilmiştir. Bu grafiğe göre deneysel çalışmalarda kullanılan çimentonun TS EN 196-6 ve TS EN 197-1 standartlarına uygun şekilde, tanecik boyutlarının %99 oranında 90 µm’den küçük olduğu görülebilmektedir.

##### 3.1.2. Uçucu kül (UK)

Uçucu kül (UK) enerji üretmek amacıyla kurulan termik santrallerde yakılan taş veya linyit kömürünün yüksek sıcaklıklarda yanmasıyla ortaya çıkan ve bacalarda bulunan filtreler yardımıyla tutulan atık bir malzemedir. Uçucu küller kendi başına bağlayıcılık özellikleri olmayan kalsiyum hidroksit ile kimyasal bir reaksiyon vererek bağlayıcılık özelliği kazanan ve betona katılması yaygın şekilde kullanılan bir katkı malzemesidir. Uçucu küllerde başlıca  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve  $\text{CaO}$  bileşenleri başlıca bulunmaktadır ve uçucu külün tipine göre miktarları değişmektedir. Uçucu küller F sınıfı ve C sınıfı olmak üzere iki ayrı şekilde sınıflandırılmaktadır. F sınıfı külleri, bitümlü kömürden elde edilen  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarı %70’in üzerinde olan uçucu küllerdir. F sınıfı uçucu küllerin bağlayıcı özelliği bulunmamasına rağmen, puzolanik özellik taşımaktadırlar. F sınıfı uçucu küller %10’dan daha az  $\text{CaO}$  içeriğine sahip olması nedeniyle düşük kireç içerikli uçucu küller olarak da bilinmektedirler. Belirtilen F sınıfı uçucu kül özelliklerini taşıyan, Sugözü Termik Santralindeki taş kömürünün yakılması sonucu elde edilen ve çalışma içerisinde kullanılan uçucu külün, kimyasal özellikleri Çizelge 3.1’de tane boyut analiz sonuçları ise Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Çizelge 3.1’deki kimyasal özellikleri incelendiğinde ASTM C 618 standardına uygun olarak,  $\text{CaO}$  oranının %10’dan daha az ve  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  oranının %70’den fazla olduğu görülebilmektedir. Şekil 3.1’deki sonuçlar incelendiğinde ise

çalışmada kullanılan uçucu külün TS EN 450 standardına uygun olarak 45 µm boyutundan küçük taneciklerin %75 oranında olduğu görülebilmektedir.

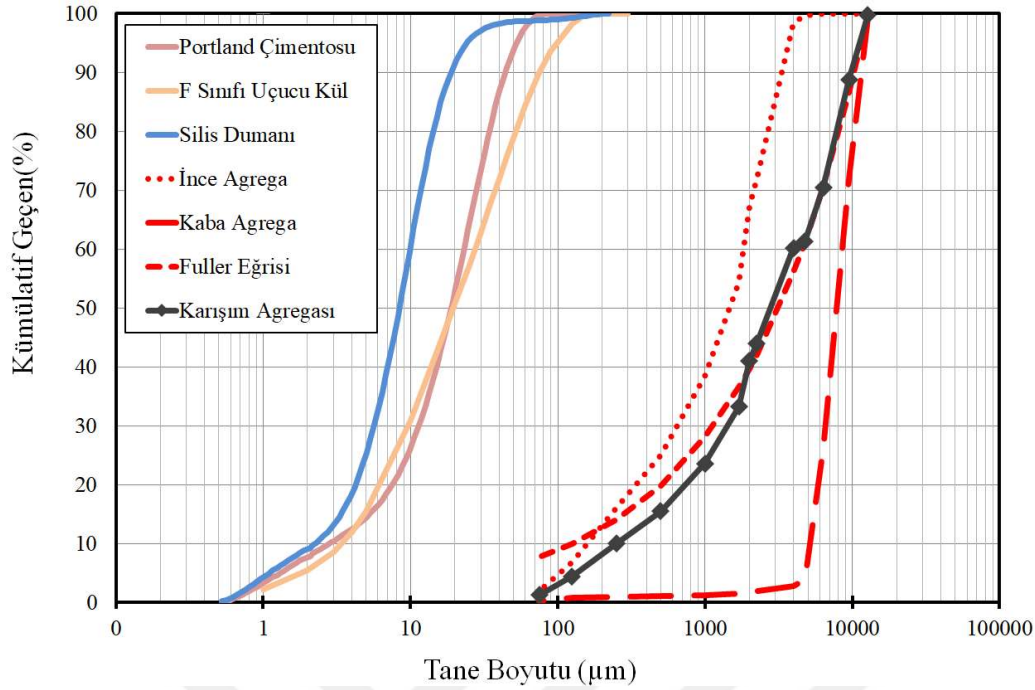
Çizelge 3.1. Karışım içerisindeki toz malzemelerin kimyasal içerikleri ve fiziksel özellikleri

| Kimyasal İçerik, %                    | Bağlayıcı Malzemeler |      |                    | Nano-Malzemeler  |                  |
|---------------------------------------|----------------------|------|--------------------|------------------|------------------|
|                                       | PC                   | UK   | SD                 | NA               | NS               |
| CaO                                   | 61,4                 | 9,78 | 0,62               | -                | -                |
| SiO <sub>2</sub>                      | 20,8                 | 57,0 | 92,0               | 0,10             | 99,0             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>        | 5,55                 | 21,0 | 1,20               | 98,5             | 0,38             |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>        | 3,35                 | 4,15 | 0,84               | 0,43             | 0,02             |
| MgO                                   | 2,49                 | 1,76 | 1,02               | 0,54             | 0,21             |
| SO <sub>3</sub>                       | 3,30                 | 0,32 | 0,22               | 0,06             | 0,21             |
| K <sub>2</sub> O                      | 0,77                 | 1,53 | 1,16               | -                | -                |
| Na <sub>2</sub> O                     | 0,19                 | 2,23 | 0,67               | 0,04             | 0,09             |
| Kızdırma Kaybı                        | 2,20                 | 1,25 | 1,86               | 0,35             | 9,20             |
| Fiziksel Özellikler                   |                      |      |                    |                  |                  |
| Özgül Ağırlık                         | 3,06                 | 2,02 | 0,60               | 3,60             | 2,40             |
| Özgül Yüzey alanı, m <sup>2</sup> /kg | 325*                 | 290* | 19080 <sup>+</sup> | 325 <sup>+</sup> | 300 <sup>+</sup> |

\*: Blaine hava geçirimlik testi ile belirlenmiştir, +: Brunauer–Emmett–Teller (BET) analizi ile belirlenmiştir

### 3.1.3. Silis dumanı (SD)

Silis dumanı, silisyum veya ferrosilisyum alaşımlarının ergimesi sırasında ortaya çıkan yüksek puzolanik özelliklere sahip bir yan ürün olmakla beraber yılda ortalama 500-1000 ton civarında üretilebilmektedir. Bir diğer adıyla mikro silika olarak da bilinen silis dumanı çimentolu karışımlarda betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin iyileştirilmesinin istendiği yerlerde kullanılmaktadır. Portland çimentosu ve uçucu küllere kıyasla çok daha ince tanelere sahip olan silis dumanı yüksek oranda puzolanik içerikli bir hammaddedir. Çok ince tane yapısına sahip olması sebebiyle kullanımı sırasında su ihtiyacı artabilmektedir. Mevcut çalışma içerisinde erken yaş dayanımlarını artırmak ve üretim maliyetini azaltılmak amacıyla karışımlar içerisine silis dumanı eklenmiştir. Kullanılan silis dumanına ait kimyasal özellikler Çizelge 3.1’de, tane boyut analiz sonucu Şekil 3.1’de sunulmuştur.



Şekil 3.1. Karışım malzemelerinin tane boyut analiz sonuçları

Beton karışımlarında bağlayıcı malzemeler ve agregalar bağıntısının daha iyi olabilmesi için agrega numunelerinin ince bir su tabakası ile kaplanması gerekmektedir. Karışım içerisinde ince agreganın veya kaba agreganın fazla bulunması durumunda farklı kalıcılık problemleri ortaya çıkmakta ve betonun kullanım ömrü azalmaktadır. Ekonomik ve uzun ömürlü bir betonun üretilebilmesi için ideal granülometri eğrisi oluşturularak, büyük boşlukların agrega taneleri ile doldurulması sağlanmalıdır. Şekil 3.1 içerisinde kullanılan agregaların tane boyut dağılımları ve karışım agregasının ideal eğri olarak kabul edilen Fuller eğrisine yakınlığı gösterilmiştir. Bu sayede karışım içerisindeki ideal agrega karışımının sağlandığı gösterilmiştir.

### 3.1.4. Nano malzemeler

#### Nano Silis (NS)

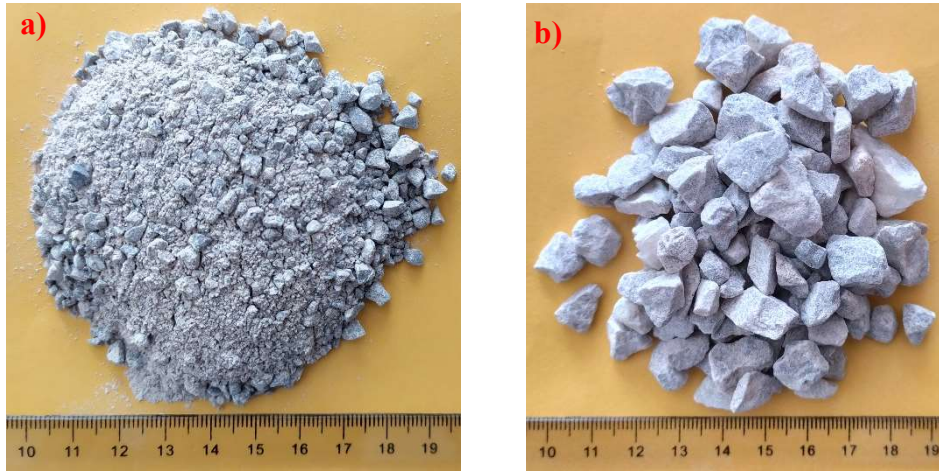
Grafen kimyasal endüstrisinden temin edilen, küresel bir şekli olan ve ortalama 15 nm tane boyutuna sahip nano silis karışımlarda kullanılmıştır. 300 m<sup>2</sup>/kg yüzey alanına sahip, %99,5 SiO<sub>2</sub> içeriğe sahip nano malzemenin kimyasal içerisi Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

### Nano Alumin (NA)

Ortalama tane boyutu 20 nm olarak belirtilmiş olan nano alümin Grafen kimyasal endüstrisinden temin edilmiştir. 325 m<sup>2</sup>/kg yüzey alanına sahip ve %99,9 oranında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriğe sahip olan nano alüminin kimyasal içeriği Çizelge 3.1’de belirtilmiştir.

#### **3.1.5. Agregat**

Şekil 3.1’de agregaların ve karışım eğrisinin tane dağılım grafiği görülebilmektedir. Kendiliğinden iyileşme performansı sergileyen ve çoklu çatlak oluşturabilen betonlardan farklı olarak bu karışımda ince ve iri agregalar birlikte kullanılmıştır. Ankara Baştaş beton santralinden temin edilen kireç taşı agregaları kullanılmıştır. Kireç taşından elde edilen ince agreganın incelik modülü 3,54, iri agreganın maksimum dane büyüklüğü 11,2 mm olarak belirlenmiştir. Sürekli gradasyonlu bir agregat karışımı elde edilebilmesi için 0,45 derecede Fuller eğrisinden faydalanılmıştır. İnce ve iri agregalar maksimum şekilde kullanılarak, betonun kalıcılık ve taze haldeki beton açısından oluşabilecek olumsuz durumları (rötre, işlenebilirlik vb.) kontrol altında tutulmuştur. Agregalardan maksimum şekilde verim elde edilebilmesi için %60 ince, %40 iri agregat kullanılarak Fuller eğrisine en yakın şekilde bir karışım eğrisi oluşturulmuştur.



Resim 3.1. Karışım içerisinde kullanılan a)ince agregat b)kaba agregat

### 3.1.6. Lif

Betonun yapısı gereği sergilediği gevrek davranışı minimize etmek için, en etkili yöntemlerden biri olan, lif katkıları oldukça etkilidir. Betonda içyapısında meydana gelen mikro çatlakların makro çatlaklara dönüşerek betonda göçmeye sebebiyet verdiği bilinmektedir. Lifler bu mikro çatlakların makro çatlaklara dönüşmesini engelleyerek, betonun çekme mukavemetini artırmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında 3 farklı lif tipi kullanılmıştır. Farklı boy uzunluklarına sahip bu lifler toplam hacmin %1'i oranında eklenmiştir. Toplam lif hacmi %2'yi geçmeyecek şekilde farklı kombinasyonlarla en ekonomik ve en iyi tasarım oluşturulmaya çalışılmıştır.

#### Çelik Lif (S)

Karışım içerisinde iki ucu kancalı 30 mm uzunluğunda Dramix firmasında temin edilmiş olan TS 10513 standardına göre üretilmiş 3D-40/30BG kodlu çelik lif kullanılmıştır. Çalışmanın tamamında çelik lif oranı %1 olarak sabit tutulmuştur. Tez çalışmasında kullanılan çelik lifin fiziksel özellikleri Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

#### Polivinilalkol lif (P)

Şekil değiştirme sertleşmesi gösteren beton karışımlarında özellikle tasarlanmış çimentolu kompozitlerde yaygın olarak kullanılan PVA lifler bu tez çalışmasında şekil değiştirme sertleşmesi performansının incelenmesi amacıyla kullanılmıştır. Lif oranı %1 olarak eklenmiş olup, kullanılan PVA lifinin fiziksel özellikleri Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

#### Naylon mono lif (N)

Çalışmada Naylon mono lif, PVA lif performansı almak amacıyla kullanılmıştır. Ülkemizde üretilmeyen PVA lifinin karışımlar içerisinde büyük bir maliyet oluşturmaktadır. Bu da karışımların yapısal ölçekte üretilebilirliğinin önüne geçmektedir. Tez çalışmasında PVA lif yerine aynı oranda Naylon lifi katılarak, aynı performansın elde edilmesi hedeflenmiştir. Kullanılmış olan Naylon lifinin fiziksel özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Tez çalışmasında kullanılan liflerin fiziksel özellikleri

| Lif Tipi              | Uzunluk (mm) | Çap (mm) | Çekme Dayanımı (MPa) | Elastisite Modülü (GPa) | Özgül Ağırlık | Lif Görüntüsü                                                                        |
|-----------------------|--------------|----------|----------------------|-------------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Polivinil-alkol (P)   | 6            | 0,20     | 1000                 | 29                      | 1,30          |   |
| Naylon (N)            | 19           | 0,05     | 966                  | 25                      | 1,14          |   |
| Kancalı Çelik Lif (S) | 30           | 0,75     | 1100                 | 200                     | 7,80          |  |

### 3.1.7. Kimyasal katkı (süper akışkanlaştırıcı)

Su/Bağlayıcı oranını artırmadan, yüksek performanslı özel beton karışımlarında, işlenebilirliği artırma gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Dayanımdan ödün vermeden, agreganın ayrışmasını ve liflerin topaklaşmasını engelleyerek, yerleştirilebilen ve işlenebilen bir karışım için en uygun çözüm, kimyasal katkılarla betonu desteklemektir. Karışımlarda BASF kimyasal firması tarafından üretilen polikarboksilik eter esaslı Master Glenium 51 kodlu süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Katkı oranı, ayrışma ve terleme olmaksızın ideal işlenebilirlik oranının yakalandığı orana kadar eklenmiştir. BASF firmasından temin edilen ve tez çalışmasında kullanılmış olan süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Süper akışkanlaştırıcı katkının teknik özellikleri

| Teknik Özellikler     |                             |
|-----------------------|-----------------------------|
| Malzemenin Yapısı     | Polikarboksilik Eter Esaslı |
| Görünüm               | Kahverengi - Sıvı           |
| Özgül Ağırlık         | 1,082 - 1,142 kg/lt         |
| pH değeri             | 6-7                         |
| Alkali İçeriği (%)    | ≤ 3,00 (ağırlıkça)          |
| Klor iyon içeriği (%) | ≤ 0,10 (ağırlıkça)          |

### 3.2. Yöntem

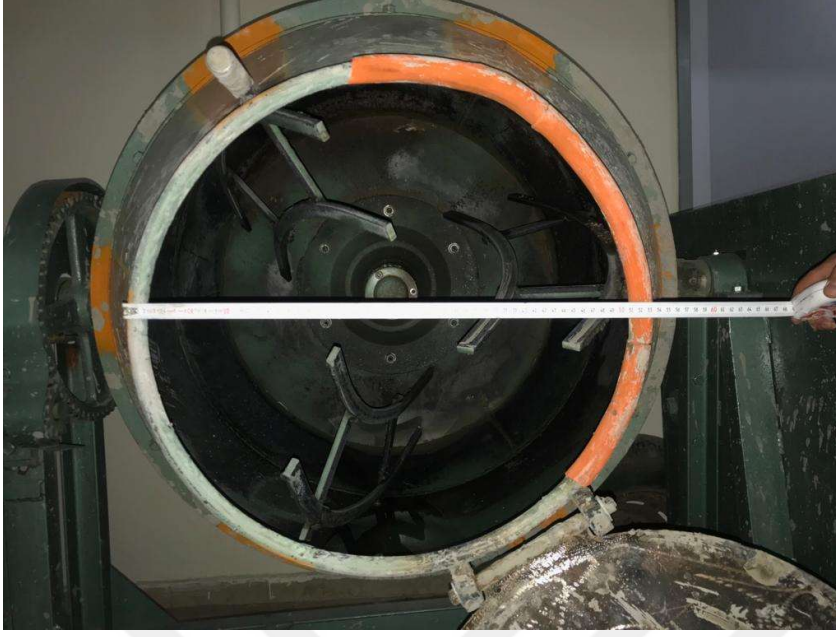
Tez çalışması kapsamında 16 farklı karışım tipi hazırlanmıştır. Karışımların tamamında silis dumanı (çimento ağırlıkça) ve su/çimento oranı sırasıyla, %7 ve 0,4 olarak sabit tutulmuştur. Karışımlardan ilk 2 tanesi referans karışımı olarak hazırlanmış olup, farklı uçucu kül oranlarının etkisinin incelendiği karışımlardır. İlk iki karışım referans karışımı olduğundan lif ve nano katkısı bulunmamaktadır. 10 farklı karışım türü ise farklı lif türlerinin etkisiyle birlikte, agrega miktarının ve uçucu kül oranlarının etkilerinin de incelendiği karışımlardır. Referans serisi haricindeki bütün karışımlar içerisine eğilme performansı ve tokluk artırılması amacıyla Çelik lif katkısı eklenmiş olup, hacimce %1 olarak sabit tutulmuştur. İki farklı Uçucu Kül/Bağlayıcı (0,20-0,70) oranı ve Agrega/Bağlayıcı (1,0-2,0) oranı kullanılmıştır. Ayrıca karışımlar içerisine mikro çatlakların köprülenmesi ve şekil değiştirme sertleşmesi oluşturması için sentetik lifler de çelik lif katkısına ek olarak %1 oranında eklenerek toplam lif oranı %2 olarak belirlenmiştir. Karışımların hazırlanmasında kullanılan malzeme miktarları Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Karışımlarda kullanılan malzeme miktarları

| No | Karışım Kodu       | Bağlayıcı Malzemeler<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |     |    |      |      |     | Agrega<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |    | Su<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |      | YOSA<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |   | Lif<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |        | Nano<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |   | Yoğunluk<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|----|--------------------|----------------------------------------------|-----|----|------|------|-----|--------------------------------|----|----------------------------|------|------------------------------|---|-----------------------------|--------|------------------------------|---|----------------------------------|
|    |                    | PC                                           | UK  | SD | İnce | Kaba |     |                                |    |                            |      | P                            | S | N                           | Alümin | Silis                        |   |                                  |
| 1  | P0S0N0_0,20_1,0    | 690                                          | 138 | 48 | 495  | 380  | 351 | -                              | -  | -                          | -    | -                            | - | -                           | -      | -                            | - | 2,26                             |
| 2  | P0S0N0_0,70_1,0    | 481                                          | 337 | 34 | 483  | 372  | 341 | -                              | -  | -                          | -    | -                            | - | -                           | -      | -                            | - | 2,14                             |
| 3  | P0S1N0_0,20_1,0    | 683                                          | 137 | 48 | 490  | 376  | 347 | 0,9                            | -  | 78                         | -    | -                            | - | -                           | -      | -                            | - | 2,21                             |
| 4  | P0S1N0_0,70_1,0    | 477                                          | 334 | 33 | 477  | 367  | 338 | 0,9                            | -  | 78                         | -    | -                            | - | -                           | -      | -                            | - | 2,19                             |
| 5  | P0S1N1_0,20_1,0    | 675                                          | 135 | 47 | 486  | 374  | 343 | 1                              | -  | 78                         | 11,4 | -                            | - | -                           | -      | -                            | - | 2,21                             |
| 6  | P0S1N1_0,70_1,0    | 472                                          | 330 | 33 | 472  | 363  | 334 | 0,74                           | -  | 78                         | 11,4 | -                            | - | -                           | -      | -                            | - | 2,14                             |
| 7  | P0S1N1_0,20_2,0    | 505                                          | 101 | 35 | 726  | 559  | 257 | 1,62                           | -  | 78                         | 11,4 | -                            | - | -                           | -      | -                            | - | 2,31                             |
| 8  | P0S1N1_0,70_2,0    | 356                                          | 249 | 25 | 711  | 547  | 252 | 1,56                           | -  | 78                         | 11,4 | -                            | - | -                           | -      | -                            | - | 2,32                             |
| 9  | P1S1N0_0,20_1,0    | 675                                          | 135 | 47 | 486  | 374  | 343 | 0,9                            | 13 | 78                         | -    | -                            | - | -                           | -      | -                            | - | 2,26                             |
| 10 | P1S1N0_0,70_1,0    | 472                                          | 330 | 33 | 472  | 363  | 334 | 0,5                            | 13 | 78                         | -    | -                            | - | -                           | -      | -                            | - | 2,10                             |
| 11 | P1S1N0_0,20_2,0    | 505                                          | 101 | 35 | 726  | 559  | 257 | 1,75                           | 13 | 78                         | -    | -                            | - | -                           | -      | -                            | - | 2,31                             |
| 12 | P1S1N0_0,70_2,0    | 356                                          | 249 | 25 | 711  | 547  | 252 | 1,56                           | 13 | 78                         | -    | -                            | - | -                           | -      | -                            | - | 2,21                             |
| 13 | DIP0S0N0_0,20_1,0  | 690                                          | 138 | 48 | 495  | 380  | 351 | -                              | -  | -                          | -    | -                            | - | -                           | -      | -                            | - | 2,13                             |
| 14 | DIP0S0N0_0,70_1,0  | 481                                          | 337 | 34 | 483  | 372  | 341 | -                              | -  | -                          | -    | -                            | - | -                           | -      | -                            | - | 2,09                             |
| 15 | NS-P1S1N0_0,70_1,0 | 472                                          | 330 | 33 | 472  | 363  | 334 | 3,2                            | 13 | 78                         | -    | 16,7                         | - | -                           | -      | -                            | - | 2,03                             |
| 16 | NA-P1S1N0_0,70_1,0 | 472                                          | 330 | 33 | 472  | 363  | 334 | 0,7                            | 13 | 78                         | -    | -                            | - | -                           | -      | -                            | - | 2,16                             |

Karışım miktarlarının verildiği Çizelge 3.4 incelendiğinde karışım miktarlarının daha kolay anlaşılabilmesi için harflendirme tekniği uygulanmıştır. Bu harflendirme incelendiğinde P1 kodu ile %1 PVA lifi, S1 kodu ile %1 çelik lifi, N1 kodu ile ise %1 oranında naylon lifi kullanıldığını belirtilmektedir. P0, S0 ve N0 kodlamaları ise ilgili lif katkısının kullanılmadığını göstermektedir. Sonrasında bulunan 0,20 ve 0,70 değişkeni ile UK/Bağlayıcı oranı, bir sonraki adımda 1,0 ve 2,0 kodlamasıyla ise agrega/bağlayıcı değişkeni tanımlanmaktadır. 13 ve 14 serilerinde bulunan D1 kodu ile donatılı numune anlamına gelen çelik donatılarla güçlendirildiği belirtilmektedir. NS ve NA kodlamalarını içeren 15 ve 16 nolu karışımlarda ise toplam bağlayıcı miktarının ağırlıkça %2'si kadar sırasıyla nano silis ve nano alümin içerdiği gösterilmektedir.

Karışımlar yatay ve düşey ekseninde 360° dönebilen, 250L kapasiteye sahip şantiye tipi (davul) mikser ile hazırlanmıştır. Lifli karışımlarda mikserin alt kısmındaki topaklaşmanın engellenebilmesi için ağız sızdırmaz bir kapak ile kapatılarak mikser modifiye edilmiştir. Modifiye edilmiş olan mikserin görüntüsü Resim 3.2'de gösterilmiştir. Karışım yöntemi şu şekildedir: Öncelikle ince ve iri agrega mikser içerisinde homojen olarak 2 dakika boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra çimento ve uçucu kül agregaların üzerine eklenerek 8 dakika boyunca agregaların tamamının bağlayıcı tanecikleriyle sarılması sağlanacak şekilde karıştırılmıştır. Farklı bir kap yardımıyla karışım suyu içerisine silis dumanı ve akışkanlaştırıcı malzeme homojen olarak karıştırılmıştır. Kuru karışım üzerine hazırlanan sıvı karışımı eklenerek 5 dakika süreyle karışıma devam edilmiştir. Mikser çevresinde ve tabanındaki yapışma ve topaklaşmaların engellenmesi için karışım süresince mikser düşey yönde hareket ettirilmiştir. Bu sürenin yarısında mikser durdurularak bir mala yardımıyla kenarlar ve mikser dibi karışıma dahil edilmiştir. 15 dakika sonunda ideal işlenebilirliğin elde edildiği kanaatine varıldığında çelik ve sentetik lifler karışım üzerine eklenerek 5 dakika süreyle karışıma devam edilmiştir. 15 ve 16 nolu karışımlarda (nano malzeme içeren) nano malzemenin matris içerisinde homojen dağılmasını sağlamak amacıyla sıvı karışım içerisinde 15 dakika boyunca karıştırma aparatı yardımıyla dağıtılmıştır. Karışım aşamalarını gösteren şema ve karışım görüntüleri Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Resim 3.2. Modifiye edilmiş şantiye tipi beton mikseri

| 1. Aşama                                      | 2. Aşama                                    | 3. Aşama                                           |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------|
|                                               |                                             |                                                    |
| PC+UK+Kaba Agregat +<br>İnce Agregat karışımı | Su +SD + Akışkanlaştırıcı<br>+ Nano Malzeme | Kuru ve yaş karışım<br>malzemelerin karıştırılması |
| 4. Aşama                                      | 5. Aşama                                    | 6. Aşama                                           |
|                                               |                                             |                                                    |
| Kuru ve yaş malzemenin<br>karışımı sonrası    | Çelik lif eklenmesi                         | Sentetik (PVA-Naylon) lif<br>Eklenmesi             |

Şekil 3.2. Karışım aşamaları ve görüntüleri

Hazırlanan beton karışımı basınç dayanımı, eğilme ve kendiliğinden iyileşme performansı için 100×100×100 mm küp kalıplarına, 80×75×400 mm ve 100×150×1000 mm boyutlarındaki kiriş kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıplara yerleştirilen betonlar nem kayıpları

engellenecek şekilde üzerleri kapatılarak 1 günlük priz alma süresinin tamamlanması beklenmiştir. Priz alma süresinin ardından numuneler kalıplardan çıkarılarak test gününe kadar nemli bir ortamda küre tabii tutulmuştur. Numunelerin kürlenme koşulları, saha şartlarındaki beton performansını yansıtabilmesi adına ıslak bir keçe yardımıyla nemli tutulmuştur. Kullanılan keçe günde bir ıslatılarak numunelerin 28 günlük kürlenmeleri tamamlanmıştır. (bkz. Resim 3.3) Deneyler için kullanılan numune kalıplarının ölçüleri, kalıp görselleri ve numunelere uygulanacak deney yöntemi Çizelge 3.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. Numunelerin üretilmesinde kullanılan kalıplar ve boyutları

| Deney Yöntemi                                                             | Numune Boyutları<br>Kalıp Görselleri                                                                   | Numune<br>Test Yaşı<br>(gün) |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Basınç Dayanımı                                                           | 100×100×100 mm<br>  | 28                           |
| Eğilmede Çekme Dayanımı<br>Kendiliğinden İyileşme                         | 80×75×400 mm<br>   | 28, 58                       |
| Eğilmede Çekme Dayanımı<br>Yapısal Parametreler<br>Kendiliğinden İyileşme | 100×150×1000mm<br> | 28, 58                       |



Resim 3.3. Numunelerin kürlenmesi ve nemli bez yardımıyla nem kaybının önlenmesi

### 3.2.1. Sertleşmiş beton deneyleri

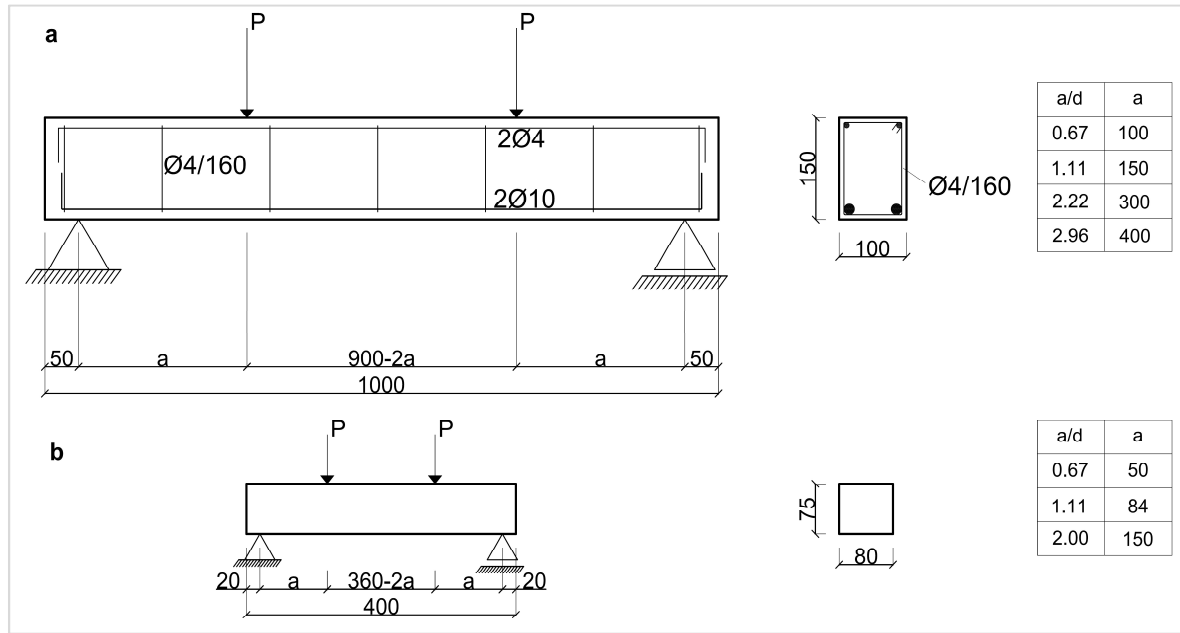
#### Basınç dayanımı

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar için 42 adet küp numunesi üretilmiştir. 13 ve 14 nolu karışımlar 1 ve 2 nolu karışımların donatılandırılmış hali olduğundan ayrıca basınç dayanımı numunesi üretilmemiştir. 14 karışım için üretilen 100x100x100 mm boyutlarındaki küp numuneleri 28 gün boyunca kiriş numuneleri ile birlikte nemli ortamda kürlenmiştir. Kür süresi sonunda numuneler 100 ton kapasiteli basınç cihazı kullanılarak, 0,9 kN/s yükleme hızıyla test edilmiştir. Her bir karışım serisinden 3 adet numune sonucunun ortalaması alınarak basınç dayanımları oluşturulmuştur.

#### Eğilme Parametreleri

İki farklı boyuttaki kiriş numuneleri BESMAK firma menşeli kapalı devre elektro manyetik deney cihazıyla deplasman kontrollü olarak yapılmıştır. Deney hızları lifli numuneler için

0,5mm/dk., lif içermeyen numuneler için 0,3mm/dk. olarak belirlenmiştir. Deneylerde yük ve orta açıklık deplasmanı verileri kayıt altına alınarak yük-deformasyon eğrileri oluşturulmuştur. 28 günlük kürleme sonunda, büyük boyuttaki kirişler 4 farklı a/d oranında, küçük boyuttaki kirişler 3 farklı a/d oranında yüklenerek kırılmıştır. Büyük boyuttaki kirişlere 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarında, küçük boyuttaki kirişlere 0,67 , 1,11 ve 2,00 a/d oranlarında yüklemeler uygulanmıştır. Şekil 3.3 'te büyük kirişlerin yükleme durumu ve donatı detayları ile küçük kirişlerin yükleme detayları verilmiştir.

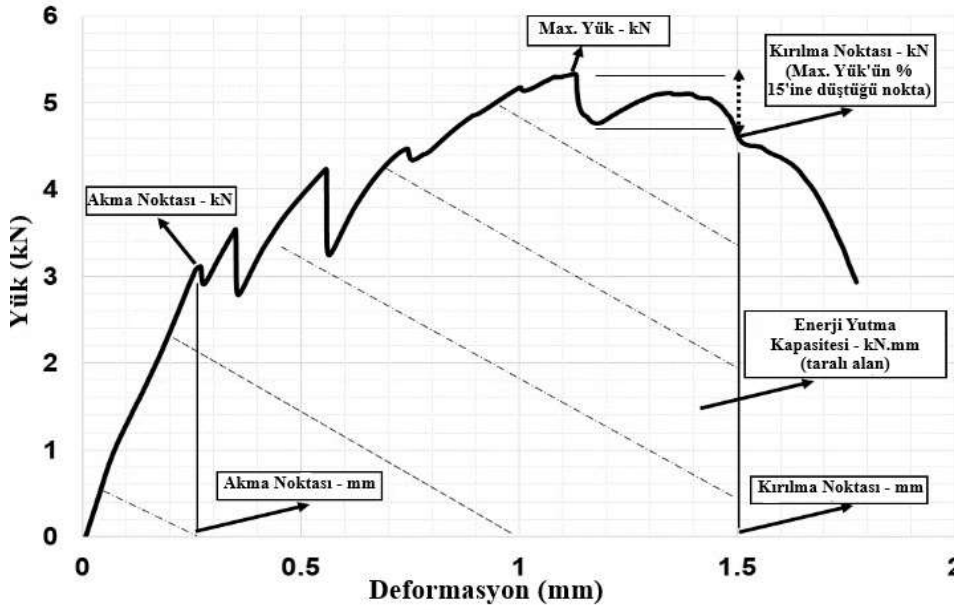


Şekil 3.3. a) Büyük kirişlerin yükleme ve donatı detaylandırması b) küçük kirişlerin yükleme detayı (bütün ölçü birimleri mm'dir)

### Eğilme Performansındaki Yapısal Parametreler

#### *Deplasman süneklik oranı (Displacement Ductility Ratio)*

Kırılma noktası, yükleme altında kirişin maksimum yüke ulaşması sonrasında, maksimum yükün %85'ine düştüğü nokta olarak belirlenmiştir. Büyük ölçekli kirişlerin yapısal performanslarının incelenebilmesi için yük-deformasyon eğrileri yardımıyla deplasman süneklik oranları belirlenmiştir. Deplasman süneklik oranlarının nasıl belirlendiğini gösteren şema ve kullanılan formül Şekil 3.4 'te gösterilmiştir.



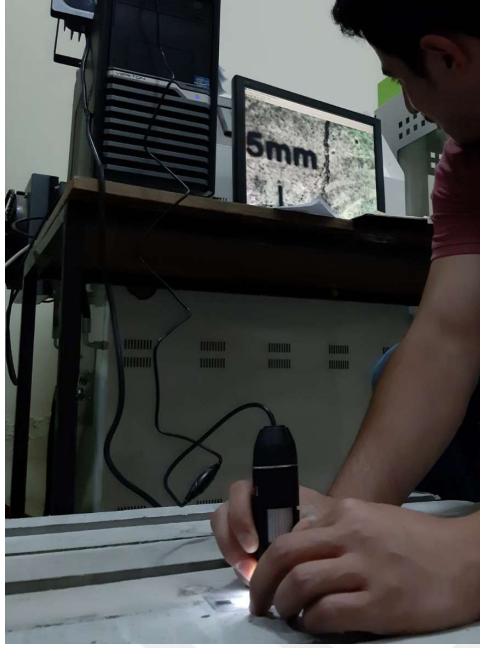
Şekil 3.4. Akma noktası, kırılma noktası, ötelenme oranı ve enerji yutma kapasitesi belirlenmesi

#### *Enerji yutma kapasitesi*

Enerji yutma kapasitesi yük-deformasyon eğrisinin altında kalan alanın hesaplanmasıyla elde edilmiştir. Alanın hesaplanmasında başlangıç noktası sıfır noktası olarak kabul edilmiş olup, bitiş noktası ise kırılma noktası olan maksimum yükün %85'ine indiği nokta olarak belirlenmiştir.

#### Çatlak oluşturulması

Kendiliğinden iyileşme performanslarının incelenebilmesi adına her iki boyutta da üretilen numunelere ön yükleme uygulanmıştır. 28 gün sonunda büyük kiriş numuneleri için 4 farklı a/d oranında, küçük kiriş numuneleri için ise 3 farklı a/d oranında ön yükleme uygulanmıştır. Ön yükleme noktası, olarak eğilme performansı için üretilen numunelerdeki akma noktası olarak belirlenmiştir. Bu nokta yük artış oranının azaldığı, deformasyonun arttığı nokta olarak tespit edilmiştir. Ön yükleme ardından oluşturulan çoklu çatlaklar içerisinde iyileştirme performansı incelenecek olan çatlak işaretlenmiştir. İşaretlenen çatlakın büyüklüğü el mikroskobu yardımıyla ölçülerek mikro boyuttaki fotoğrafı çekilmiştir. Ölçümü tamamlanan kiriş numunesi iyileşme prosesi için kür işlemine devam edilmiştir. Çatlak ölçümü ve el mikroskobunun örneği Resim 3.4 'te verilmiştir.



Resim 3.4. El mikroskobuyla yapılan ölçüm ve mikroskop görüntüsü

#### İyileşme performansı

30 günlük iyileşme kürlemesi sonrasında daha önce belirlenen çatlakların genişlikleri (ÇG) ölçülerek kendiliğinden iyileşme oranı belirlenmiştir. Çatlakların kapanmasında iki farklı yapı oluşması beklenmiştir. Bunlardan birincisi sistem içerisine katılan puzolanın reaksiyonlarının devam ederek C-S-H oluşması, ikincisi ise çimentonun bir hidratasyon ürünü olarak ortaya çıkan  $\text{Ca(OH)}_2$ 'nin  $\text{CaCO}_3$ 'e dönüşmesi olarak beklenmektedir. Bu iki oluşumun birbirinden ayırt edilebilmesi için kapanan çatlaktaki renk değişimi de gözlemlenmiştir. Ölçümler sonucunda kırışlerin kendiliğinden iyileşme oranları Eşitlik 3.1'e göre belirlenmiştir.

$$\text{Kendiliğinden iyileşme oranı, \%} = \left[ \left\{ \frac{(\text{ÇG}_{28+30 \text{ gün}} - \text{ÇG}_{28 \text{ gün}})}{(\text{ÇG}_{28 \text{ gün}})} \times 100 \right\} \right] \quad (\text{Eş. 3.1})$$

#### Kendiliğinden iyileşme sonrası eğilme performansı

Çatlakların kapanması (iyileşmesi) sonrasında kırış numunelerinin eğilme performansları test edilmiştir. Çatlak oluşturulmadan doğrudan kırılan numuneler ile çatlak oluşturulduktan sonra iyileştirilmiş olan kırış numunelerinin eğilme performansları karşılaştırılmıştır. Kırış numuneleri aynı yükleme hızıyla ve aynı a/d oranında cihaza yerleştirilerek kırılmıştır. Elde edilen yük-deformasyon verileri işlenerek ham numunelerle birlikte değerlendirilmiştir.

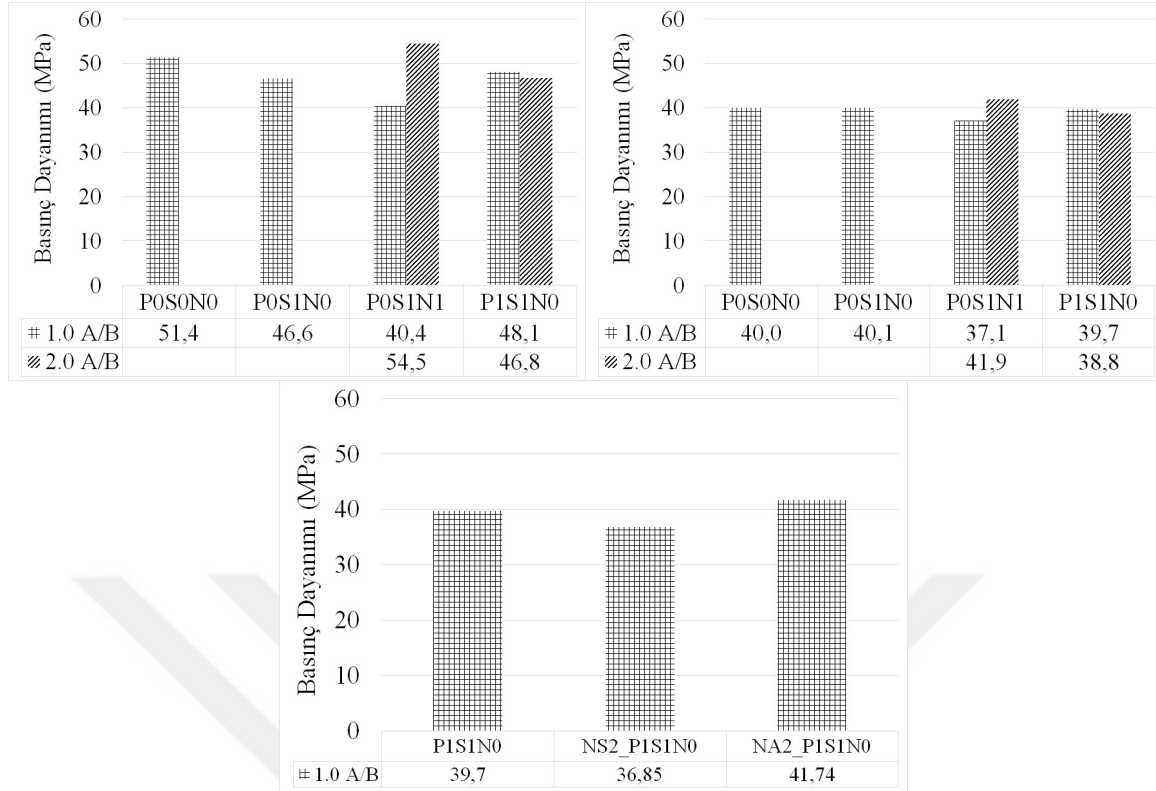
## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1. Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı testlerinden elde edilen ortalama basınç dayanım sonuçları Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Görülebileceği üzere farklı içeriklere sahip (UK/PC, A/B, Lif) numunelerde farklı basınç dayanımı sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca basınç dayanımlarının belirlenmesinde kullanılan numunelerin dayanım sonuçları, ortalamaları ve standart sapma değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Aynı malzeme içeriğine sahip ve sadece A/B oranının değişiminin basınç dayanımına etkisi Şekil 4.1a ve Şekil 4.1b’de görülmektedir. A/B oranının artmasıyla birlikte Naylon lif içerikli numunelerde basınç dayanımları artarken, PVA lif içerikli numunelerde çok belirgin olmayan azalmalar görülmüştür. Örneğin P0S1N1\_0,20\_1,0 ve P0S1N1\_0,20\_2,0 (bkz. Şekil 4.1a) karışımları incelendiğinde ortalama basınç dayanımı sonuçları sırasıyla 40,4 MPa ve 54,5 MPa olarak görülmektedir.

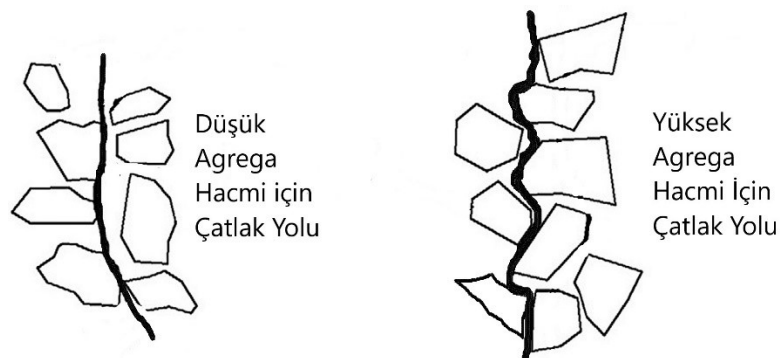
Çizelge 4.1. Basınç dayanımının belirlenmesinde kullanılan numuneler ve ortalamaları

| Karışım ID        | Basınç Dayanımı (MPa) |       |       |          |              |
|-------------------|-----------------------|-------|-------|----------|--------------|
|                   | Num-1                 | Num-2 | Num-3 | Ortalama | Stand. Sapm. |
| P0S0N0_0,2_1,0    | 50,1                  | 53,4  | 50,8  | 51,4     | 1,74         |
| P0S0N0_0,7_1,0    | 39,1                  | 41,9  | 39,0  | 40,0     | 1,65         |
| P0S1N0_0,2_1,0    | 47,4                  | 47,5  | 44,8  | 46,6     | 1,56         |
| P0S1N0_0,7_1,0    | 41,1                  | 39,0  | 40,1  | 40,1     | 1,05         |
| P0S1N1_0,2_1,0    | 39,6                  | 40,7  | 41,0  | 40,4     | 0,75         |
| P0S1N1_0,7_1,0    | 35,5                  | 38,2  | 37,5  | 37,1     | 1,37         |
| P0S1N1_0,2_2,0    | 53,9                  | 55,8  | 53,8  | 54,5     | 1,13         |
| P0S1N1_0,7_2,0    | 43,7                  | 41,1  | 40,9  | 41,9     | 1,56         |
| P1S1N0_0,2_1,0    | 45,0                  | 51,2  | 48,2  | 48,1     | 3,10         |
| P1S1N0_0,7_1,0    | 40,0                  | 39,2  | 39,9  | 39,7     | 0,45         |
| P1S1N0_0,2_2,0    | 47,0                  | 47,7  | 45,7  | 46,8     | 1,01         |
| P1S1N0_0,7_2,0    | 39,7                  | 37,4  | 39,3  | 38,8     | 1,25         |
| NS-P1S1N0_0,7_1,0 | 36,9                  | 37,0  | 36,7  | 36,9     | 0,15         |
| NA-P1S1N0_0,7_1,0 | 43,4                  | 40,2  | 41,6  | 41,7     | 1,58         |



Şekil 4.1. Basınç dayanımı test sonuçları a) 0,20 UK içerikli numuneler b) 0,70 UK içerikli numuneler c) Nano katkılı malzeme ve referans numunesi

Karışım içerisinde agrega hacminin artmasıyla birlikte birim hacimdeki matris azalmakta yani bağlayıcı miktarı düşmektedir. Bunun bir sonucu olarak basınç dayanımlarında düşüş beklentisi ortaya çıkmaktadır. Fakat basınç dayanımında artış gözlemlenen numunelerde, davranış olarak çatlak yolunun uzamasıyla birlikte (bkz. Şekil 4.2) numunenin daha fazla enerji yutma kapasitesinin artması ve bunun bir sonucu olarak dayanımların artması gözlemlenmektedir [39,44].



Şekil 4.2. Agrega hacminin çatlak yolu üzerindeki etkisi

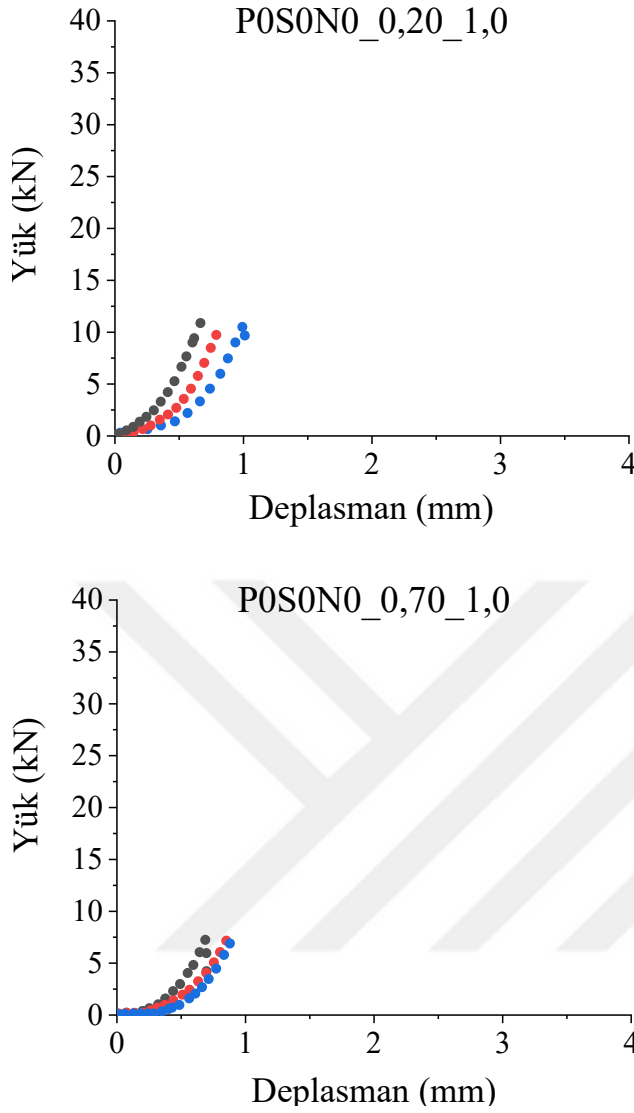
UK/PC oranının 0,20'den 0,70'e çıkmasıyla birlikte daha düşük basınç dayanımları elde edilmiştir. Şöyle ki Şekil 4.1a ve Şekil 4.1b grafikleri kıyaslandığında 1,0 A/B içerikli P0S0N0, P0S1N0, P0S1N1 ve P1S1N0 karışımlarında sırasıyla %23,1 , %14 , %8,3 ve %17,5 oranlarında basınç dayanımında azalmalar görülmüştür. Benzer şekilde 2,0 A/B içeren P0S1N1 ve P1S1N0 karışımlarında sırasıyla %23,1 ve %17,1 oranlarında azalmalar olduğu belirlenmiştir. Bu tespit, uçucu külün yüksek seviyedeki puzolanik davranışı ve erken basınç dayanımlarından ziyade geç dayanımları artırdığı düşünüldüğünde beklenen bir sonuçtur [39,124]. Bir diğer sebep olarak karışım içerisinde UK miktarının artmasıyla birlikte SD miktarındaki azalmalar olması muhtemeldir. Bunun sebebinin ise SD parçacıklarının UK'ye göre daha reaktif ve erken yaşlarda daha etkili olduğu söylenebilir [125,126]. Diğer parametreleri sabit olan bir karışım içerisine lif eklenmesiyle birlikte karışımın basınç dayanımındaki değişimler Şekil 4.1a ve Şekil 4.1b'de görülebilmektedir. Şekil 4.1a'da lif içermeyen P0S0N0 karışımına çelik lif eklenmesiyle birlikte (P0S1N1) basınç dayanımında %9,3 oranında azalma olmuştur. Benzer şekilde referans karışımına hibrit lif eklenmesiyle P0S1N1 ve P1S1N1 karışımlarındaki basınç dayanımlarında sırasıyla %21,4 ve %6,4 oranlarında azalmalar görülmüştür. Lif katkısının beton basınç dayanımı üzerinde olumsuz etkileri görülebilmektedir. Özellikle iri agrega ile oluşturulan beton sistemlerinde lif topaklaşması veya lif kümelenmesi sebebiyle belirli oranlarda dayanım kayıpları ortaya çıkmaktadır [8,127].

Nano malzemelerinin karışım içerisine eklenmesiyle birlikte basınç dayanımındaki değişimler Şekil 4.1c grafiğinde görülebilmektedir. P1S1N0\_0,70\_1,0 karışımına ayrı ayrı nano silis ve nano alümin malzemeleri %2 oranında eklenerek basınç dayanım değişimleri karşılaştırılmıştır. Nano silis eklenmesiyle birlikte basınç dayanımı 39,70 MPa'dan 36,85 MPa değerlerine kadar düşmüştür. Bu azalmanın önemli sebeplerinden birisi olarak aynı düzeyde işlenebilirlik elde edilebilmesi için fazla miktarda akışkanlaştırıcı katkısının eklenmesi olduğu düşünülmektedir. Büyük ölçekli bir üretim için büyük hacimde yapılan dökümlerde nano malzemelerin sistem içerisinde yeterince homojen dağıtılamaması da bir diğer önemli etki olabileceği düşünülmektedir. Nano alümin eklenmesiyle birlikte ise basınç dayanımı 39,70 MPa'dan 41,74 MPa seviyelerine yükselmiştir. Nano alümin ilavesiyle birlikte basınç dayanımı artışı %7,5 gibi düşük bir oranda kalmıştır. Bunun nedeni silis dumanı ve nano alüminin birlikte kullanılması olabilmektedir. SD'nin ince tanecikleri sayesinde betonda puzolanik reaksiyonlara ilk 24 saat içerisinde başladığı belirtilmiştir. Nano alüminin SD içeren karışımlarda birlikte kullanılmasıyla nano taneciklerinin SD

parçacıklarından daha küçük olmasından ve karışımın mikro yapısını daha ince hale getirmesinden SD 'lerin basınç dayanımına katkısını kısıtlayabilmektedir. Çizelge 3.4 incelendiğinde NA-P1S1N0\_0,70\_1,0 karışımı için kullanılan akışkanlaştırıcı miktarı, NS-P1S1N0\_0,70\_1,0 karışımıninkine kıyasla nispeten daha azdır. Ancak nano malzemeli karışımların referans karışımı olan P1S1N0\_0,70\_1,0 'dan  $0,20 \text{ kg/m}^3$  daha yüksektir. Bu nedenle nano katkısının olumlu etkilerinin, akışkanlaştırıcı miktarı uygun şekilde ayarlandığı takdirde daha iyi sonuçlar verebileceği anlaşılmaktadır. Nano malzemelerin varlığında basınç dayanımındaki artışlar şu üç parametreden dolayı olabilmektedir. (i) hidrasyon reaksiyonlarının hızlandırması ve karışımın puzolanik kapasitesinin artması [128,129] (ii) Fiziksel olarak çok küçük tane boyutuna sahip olduğundan çekirdeklenme etkisi yaratması [42,130] (iii) reaktif dolgu malzemesi olarak çalışması, terlemeyi azaltması, granülometriyi iyileştirmesi [128].

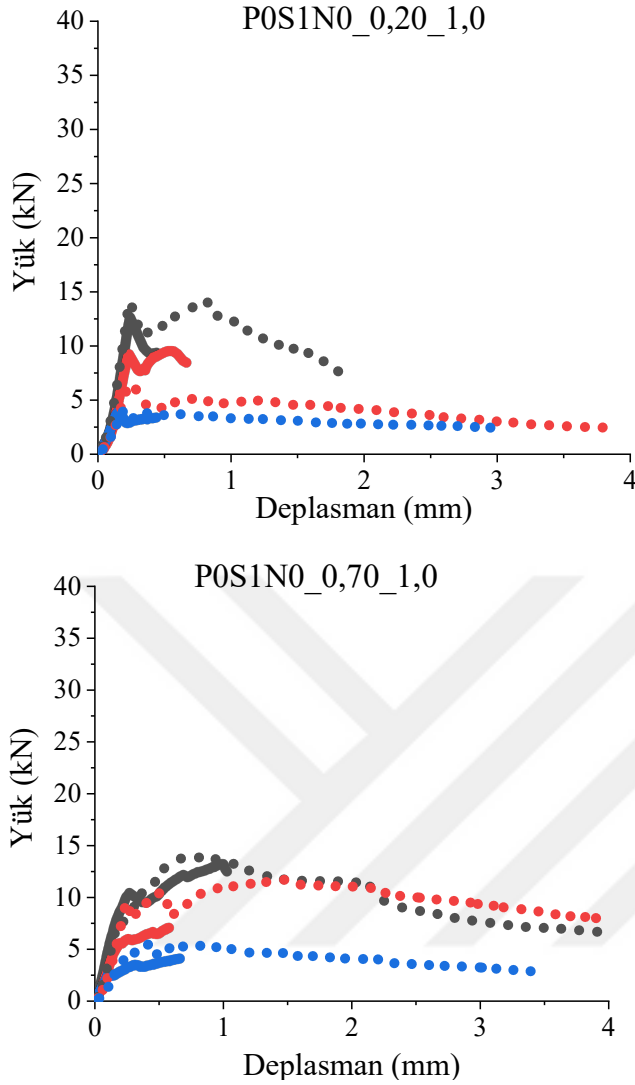
#### 4.2. Eğilme Performansı

Büyük ve küçük boyuttaki kiriş numuneleri ile farklı a/d oranlarında yapılan eğilme deneyi sonucunda elde edilen yük-deformasyon eğrileri aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Bu grafiklerdeki akma noktası ve maksimum yük anındaki veriler sayısal olarak belirlenerek Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3 'te verilmiştir. Grafiklerde renklendirme ve çizgi çeşitlerinin daha rahat karşılaştırılabilmesi adına sabit tutulmuştur. Şöyle ki; küçük kirişler için grafikler üzerinde bulunan renklendirmelerde Gri: 0,67 , Kırmızı: 1,11 , Mavi: 2,00 a/d oranı olarak belirlenmiştir. Çizgi türlerinde ise Noktalı çizgi: 28 gün ve Düz çizgi: ön yükleme için çatlak oluşumunu temsil etmektedir. Büyük ölçekli kirişlerde ise grafikler üzerinde bulunan renklendirmelerde Gri: 0,67 , Kırmızı: 1,11 , Mavi: 2,22 ve Yeşil:2,96 a/d oranı olarak belirtilmiştir. Çizgi tipleri küçük ölçekli kirişler ile büyük ölçekli kirişler için aynı olacak şekilde hazırlanmıştır.



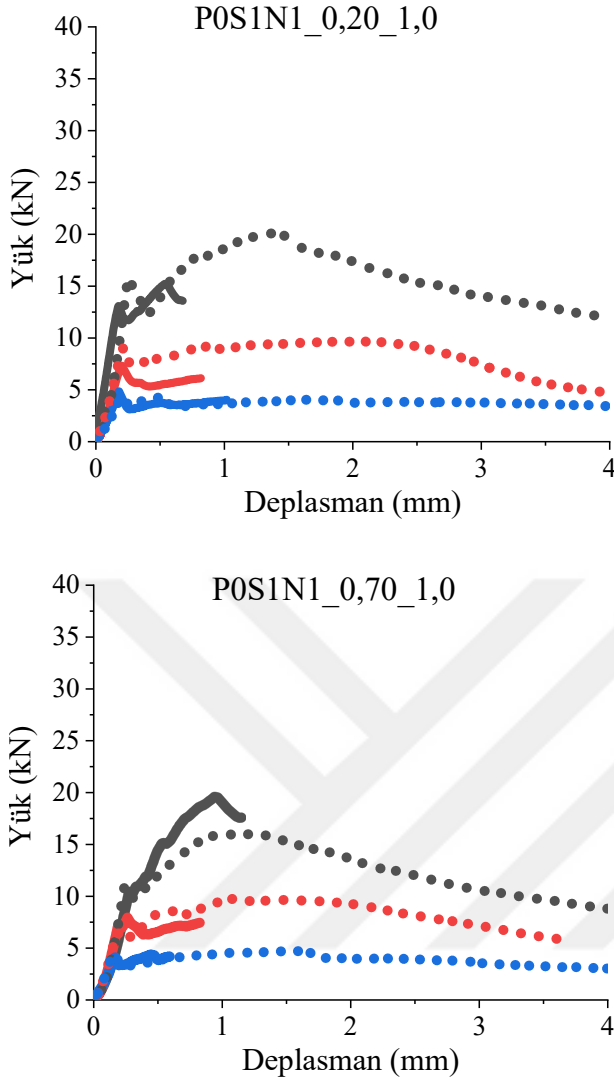
Şekil 4.3. Küçük ölçekli POS0N0\_0,20\_1,0 ve POS0N0\_0,70\_1,0 referans numunelerinin yük-deplasman eğrileri

POS0N0\_0,20\_1,0 ve POS0N0\_0,70\_1,0 kodlu referans numunelerinin üç farklı a/d oranındaki yük-deplasman eğrileri Şekil 4.3 'te verilmiştir. POS0N0\_0,20\_1,0 numunesi için 0,67, 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 11,9 kN, 10,9 kN ve 11,0 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 0,70 mm, 0,82 mm ve 1,01 mm olarak belirlenmiştir. POS0N0\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67, 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 7,5 kN, 7,6 kN ve 7,5 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 0,69 mm, 0,87 mm ve 0,90 mm olarak belirlenmiştir.



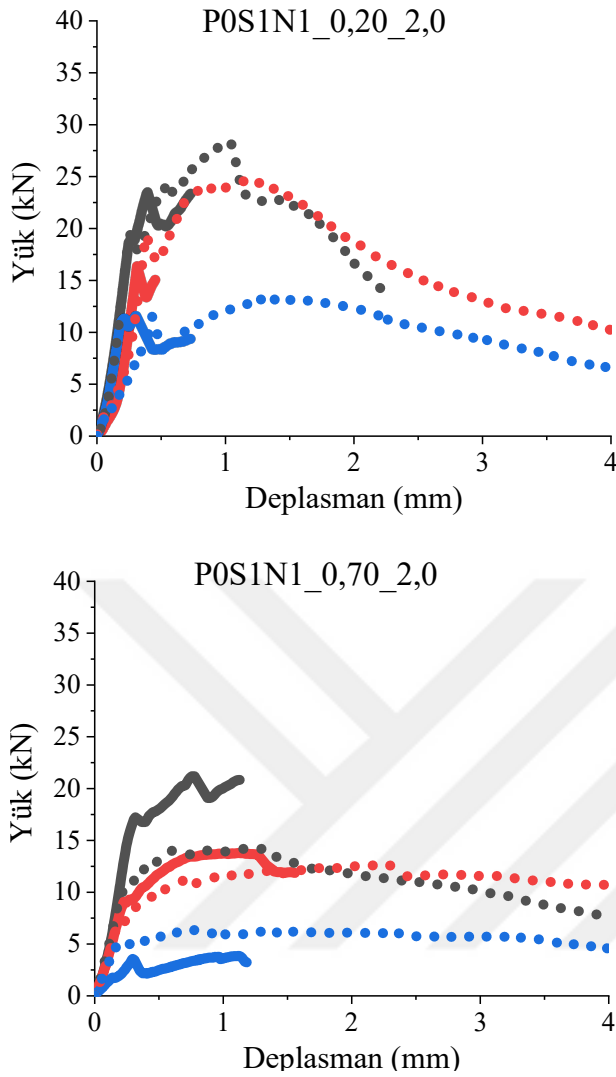
Şekil 4.4. Küçük ölçekli POS1N0\_0,20\_1,0 ve POS1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri

POS1N0\_0,20\_1,0 ve POS1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin üç farklı a/d oranındaki yük-deplasman eğrileri Şekil 4.4 'te verilmiştir. 28 gün sonunda doğrudan kırılan POS1N0\_0,20\_1,0 numunesi için 0,67, 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 14,1 kN, 6,6 kN ve 4,0 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 0,24 mm, 0,25 mm ve 0,20 mm olarak belirlenmiştir. POS1N0\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67, 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 13,9 kN, 11,8 kN ve 5,7 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 0,82 mm, 1,49 mm ve 0,45 mm olarak belirlenmiştir.



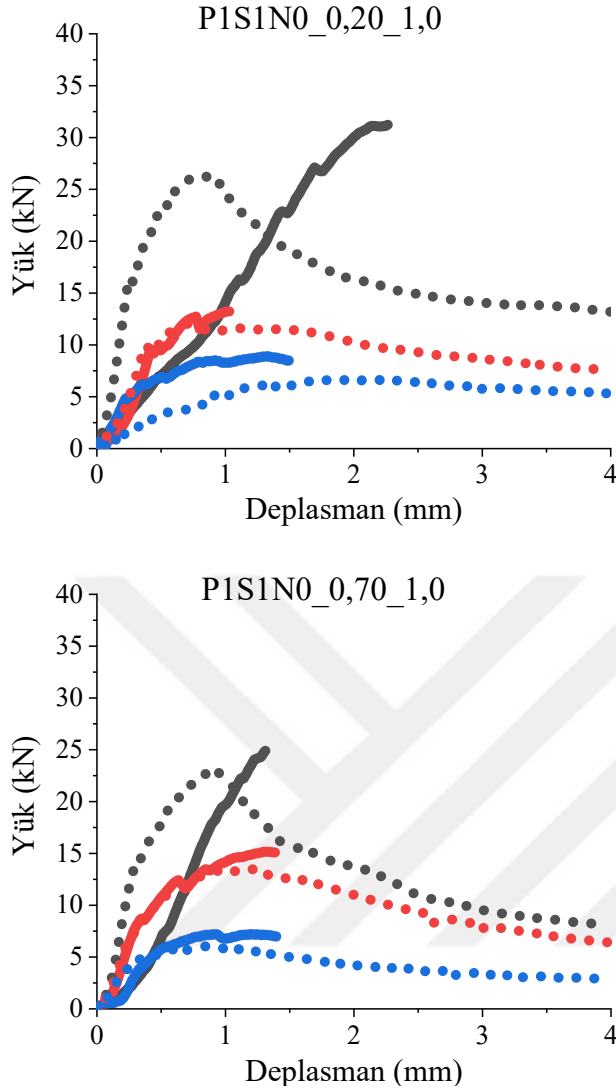
Şekil 4.5. Küçük ölçekli P0S1N1\_0,20\_1,0 ve P0S1N1\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri

P0S1N1\_0,20\_1,0 ve P0S1N1\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin üç farklı a/d oranındaki yük-deplasman eğrileri Şekil 4.5 'te verilmiştir. 28 gün sonunda doğrudan kırılan P0S1N1\_0,20\_1,0 numunesi için 0,67, 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 20,1 kN, 9,7 kN ve 4,3 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 1,74 mm, 2,02 mm ve 0,59 mm olarak belirlenmiştir. P0S1N1\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67, 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 16,1 kN, 9,7 kN ve 4,7 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 1,02 mm, 1,08 mm ve 1,49 mm olarak belirlenmiştir.



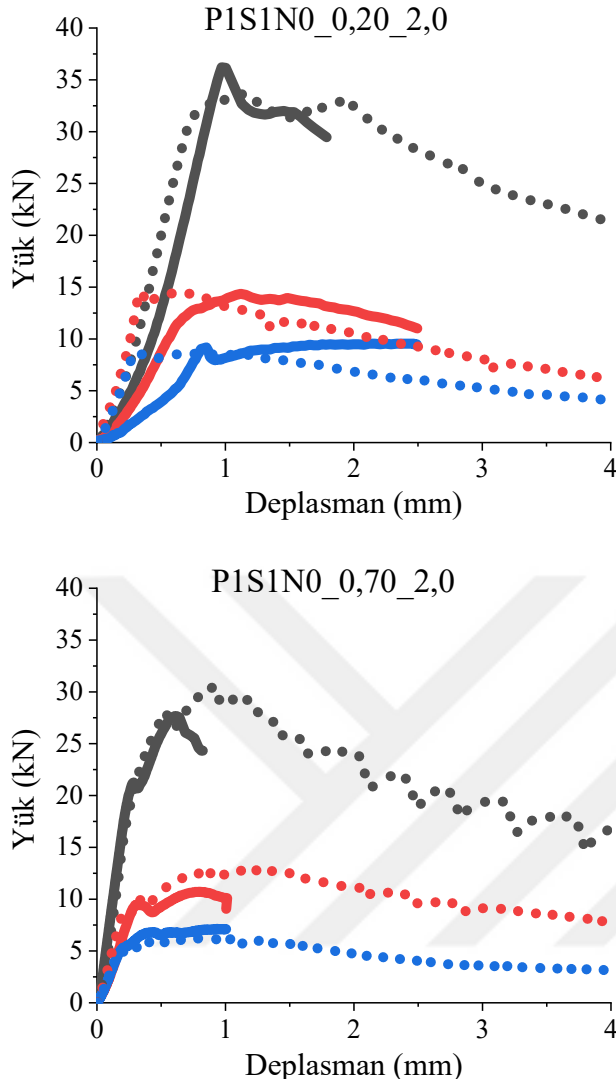
Şekil 4.6. Küçük ölçekli P0S1N1\_0,20\_2,0 ve P0S1N1\_0,70\_2,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri

P0S1N1\_0,20\_2,0 ve P0S1N1\_0,70\_2,0 kodlu numunelerin üç farklı a/d oranındaki yük-deplasman eğrileri Şekil 4.6 'da verilmiştir. 28 gün sonunda doğrudan kırılan P0S1N1\_0,20\_2,0 numunesi için 0,67, 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 28,2 kN, 13,3 kN ve 24,7 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 1,03 mm, 1,49 mm ve 1,37 mm olarak belirlenmiştir. P0S1N1\_0,70\_2,0 numunesi için 0,67, 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 14,2 kN, 12,6 kN ve 6,4 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 1,18 mm, 2,24 mm ve 0,78 mm olarak belirlenmiştir.



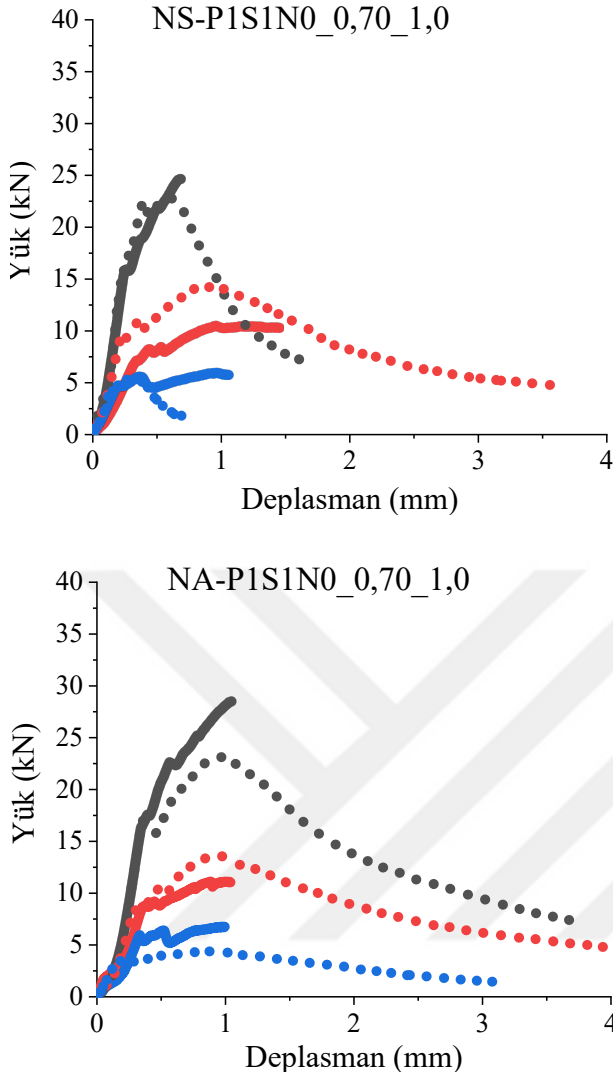
Şekil 4.7. Küçük ölçekli P1S1N0\_0,20\_1,0 ve P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri

P1S1N0\_0,20\_1,0 ve P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin üç farklı a/d oranındaki yük-deplasman eğrileri Şekil 4.7 'de verilmiştir. 28 gün sonunda doğrudan kırılan P1S1N0\_0,20\_1,0 numunesi için 0,67, 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 28,2 kN, 13,3 kN ve 24,7 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 1,03 mm, 1,49 mm ve 1,37 mm olarak belirlenmiştir. P1S1N0\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67, 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 14,2 kN, 12,6 kN ve 6,4 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 1,18 mm, 2,24 mm ve 0,78 mm olarak belirlenmiştir.



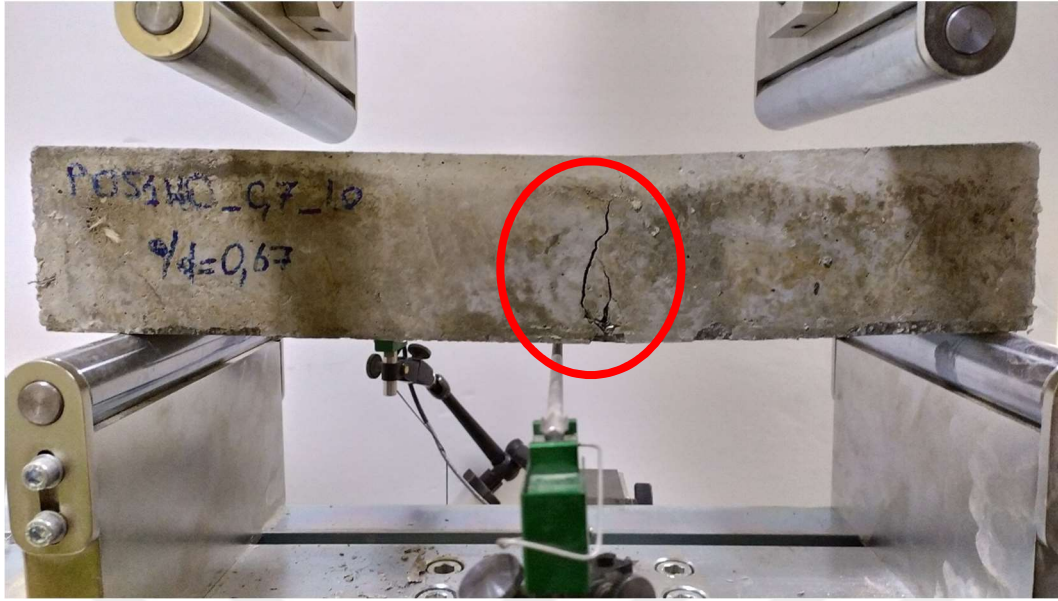
Şekil 4.8. Küçük ölçekli P1S1N0\_0,20\_2,0 ve P1S1N0\_0,70\_2,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri

P1S1N0\_0,20\_2,0 ve P1S1N0\_0,70\_2,0 kodlu numunelerin üç farklı a/d oranındaki yük-deplasman eğrileri Şekil 4.8 'de verilmiştir. 28 gün sonunda doğrudan kırılan P1S1N0\_0,20\_2,0 numunesi için 0,67, 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 33,7 kN, 14,5 kN ve 8,8 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 1,11 mm, 1,05 mm ve 0,90 mm olarak belirlenmiştir. P1S1N0\_0,70\_2,0 numunesi için 0,67, 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 30,6 kN, 12,8 kN ve 6,2 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 0,91 mm, 0,98 mm ve 0,75 mm olarak belirlenmiştir.



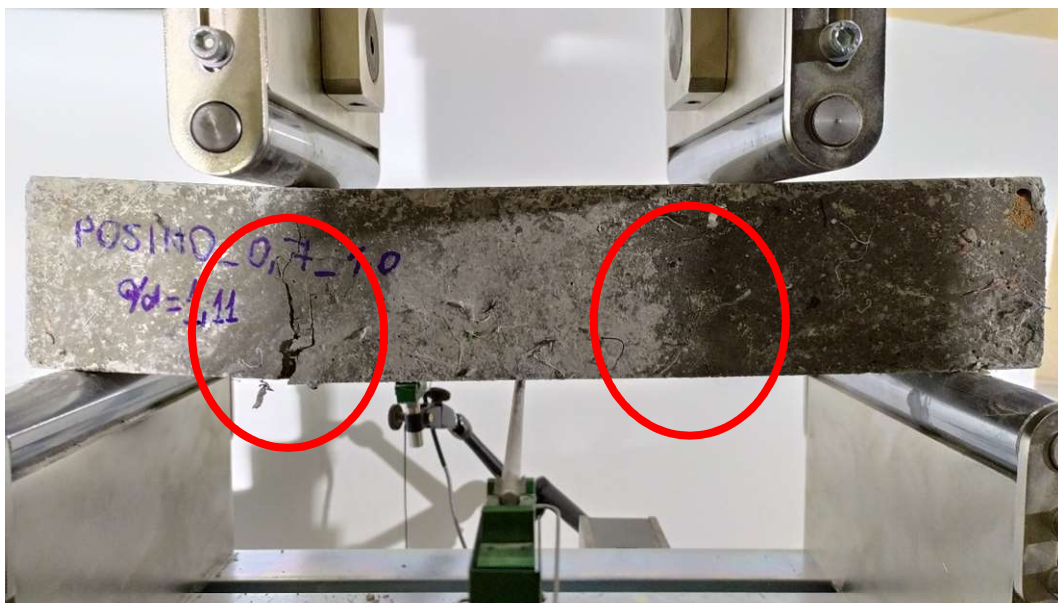
Şekil 4.9. Küçük ölçekli NA-P1S1N0\_0,70\_1,0 ve NS-P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri

NA-P1S1N0\_0,70\_1,0 ve NS-P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin üç farklı a/d oranındaki yük-deplasman eğrileri Şekil 4.9 'da verilmiştir. 28 gün sonunda doğrudan kırılan P1S1N0\_0,20\_2,0 numunesi için 0,67, 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 22,9 kN, 14,3kN ve 5,6 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 1,98 mm, 0,95 mm ve 1,51 mm olarak belirlenmiştir. P1S1N0\_0,70\_2,0 numunesi için 0,67, 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 23,3 kN, 13,7 kN ve 4,4 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 1,30 mm, 1,22 mm ve 0,81 mm olarak belirlenmiştir.



Resim 4.1. POS1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunenin 0,67 a/d oranındaki kırılma çatlak görüntüsü

POS1N0\_0,70\_1,0 numunesinin 0,67 a/d oranında yapılan dört noktalı eğilme yüklemesi sonrası oluşan kırılma çatlakının görüntüsü Resim 4.1 'de gösterilmiştir. Numunede oluşan kırılma çatlakının kesme hâkimiyetinin fazla olduğu yükleme durumunda kiriş numunesinin orta noktasında oluştuğu görülebilmektedir. Genel olarak numunelerde a/d oranının azalmasıyla birlikte kırılma çatlakları yükleme noktasına yakın bölgelerde oluşmaktadır. POS1N0\_0,70\_1,0 numunesinde ise orta noktaya yakın bölgede oluştuğu görülebilmektedir.



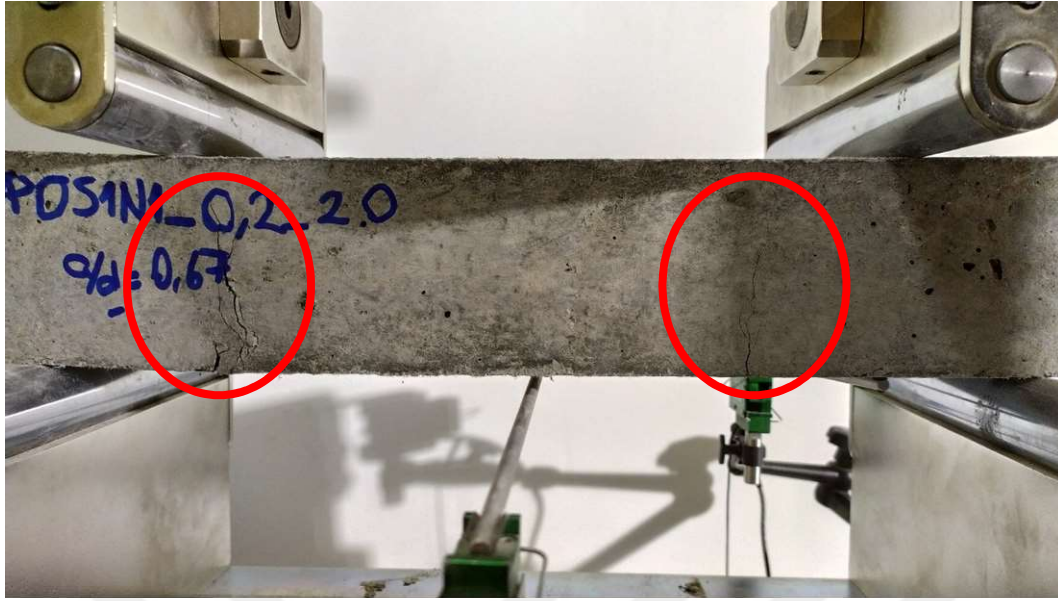
Resim 4.2. POS1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunenin 1,11 a/d oranındaki kırılma çatlak görüntüsü

POS1N0\_0,70\_1,0 numunesinin 1,11 a/d oranında yapılan dört noktalı eğilme yüklemesi sonrası oluşan kırılma çatlaklarının görüntüsü Resim 4.2'de gösterilmiştir. Kesme hâkimiyetinin olduğu yükleme durumunda oluşan kırılma çatlaklarının yükleme noktasına yakın bölgede oluştuğu görülebilmektedir. Numune de oluşan çatlakın tam olarak yükleme noktasının altında oluştuğu ve kiriş eksenine dik bir biçimde eğilme çatlakları şeklinde meydana geldiği görülmüştür.



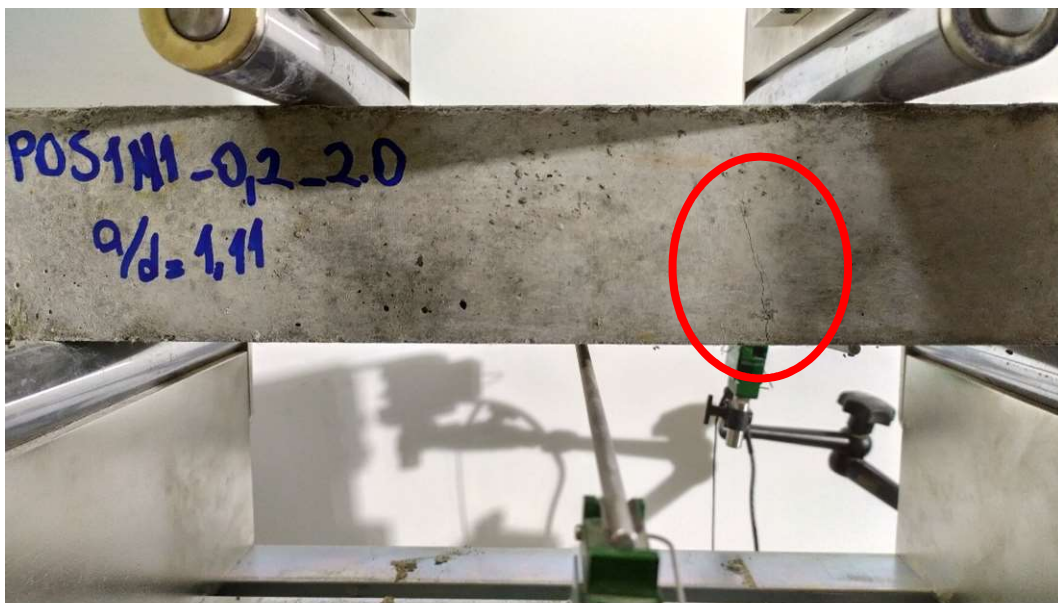
Resim 4.3. POS1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunenin 2,00 a/d oranındaki kırılma çatlakları görüntüsü

POS1N0\_0,70\_1,0 numunesinin 2,00 a/d oranında yapılan dört noktalı eğilme yüklemesi sonrası oluşan kırılma çatlaklarının görüntüsü Resim 4.3'de gösterilmiştir. A/d oranı 2,00 olsa dahi ( $<3,00$ ) yapılan yükleme numunenin orta noktasına tekabül etmektedir. Yükleme sonucu oluşan çatlaklar yükleme noktaları arasında oluştuğu görülmektedir. Oluşan çatlakların kiriş eksenine dik şekilde oluştuğu belirlenmiştir.



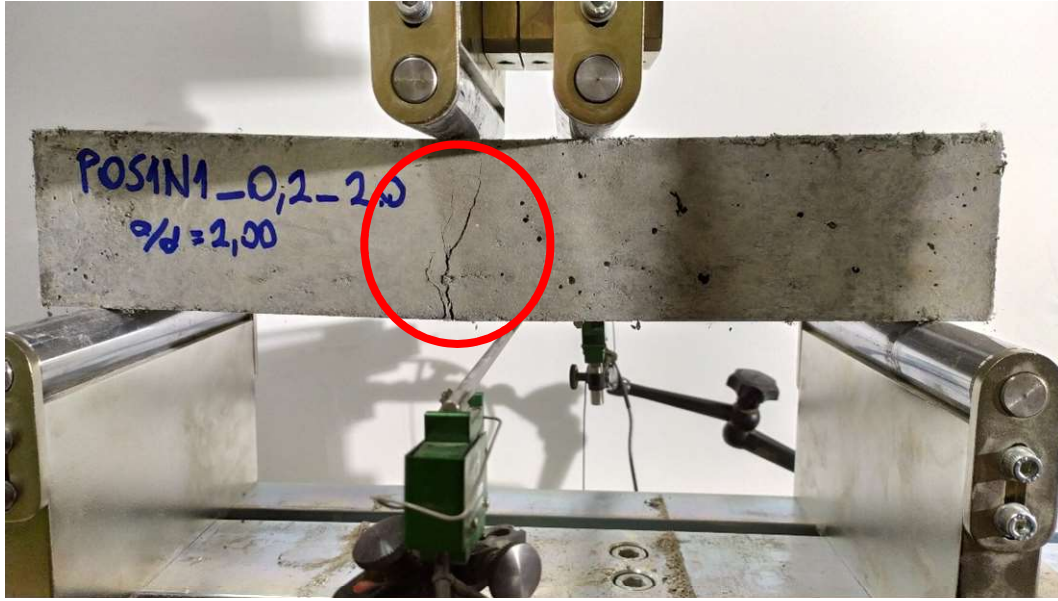
Resim 4.4. POS1N1\_0,20\_2,0 kodlu numunenin 0,67 a/d oranındaki kırılma çatlağı görüntüsü

POS1N1\_0,20\_2,0 numunesinin 0,67 a/d oranında yapılan dört noktalı eğilme yüklemesi sonrası oluşan kırılma çatlağının görüntüsü Resim 4.4'de gösterilmiştir. Kesme kırılması davranışının hâkim olduğu 0,67 a/d oranında yükleme noktalarının altında ve yakın çevresinde kırılmalar olduğu gözlemlenmiştir. Farklı noktalarda oluşan bu çatlakların giriş eksenine dik biçimde ilerlediği ve kırılma türünün eğilme kırılması şeklinde meydana geldiği belirlenmiştir.



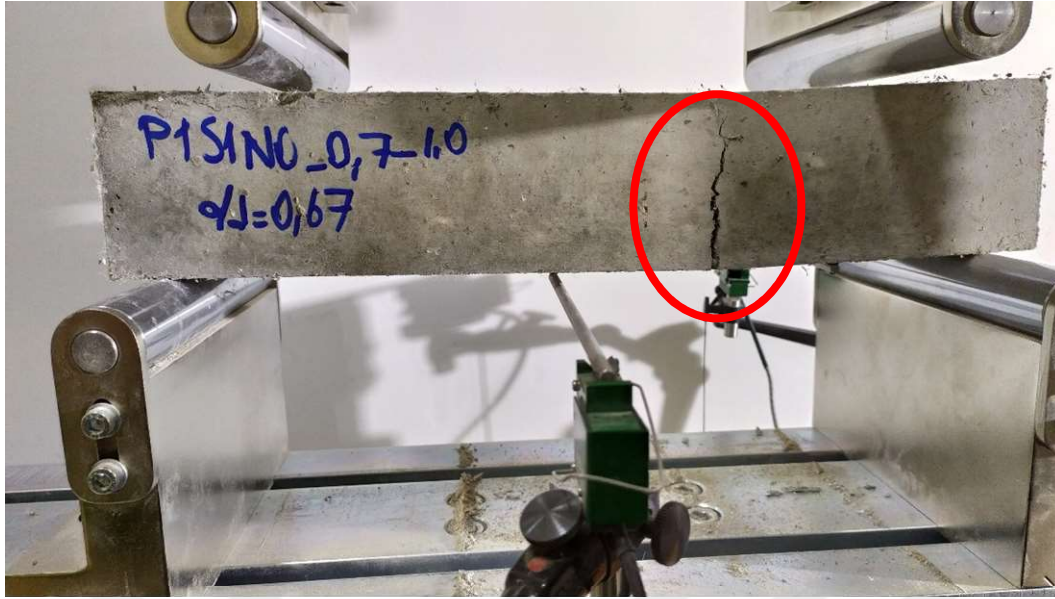
Resim 4.5. POS1N1\_0,20\_2,0 kodlu numunenin 1,11 a/d oranındaki kırılma çatlağı görüntüsü

P0S1N1\_0,20\_2,0 numunesinin 1,11 a/d oranında yapılan dört noktalı eğilme yüklemesi sonrası oluşan kırılma çatlağının görüntüsü Resim 4.5’de gösterilmiştir. Kesme kırılması davranışının hâkim olduğu 1,11 a/d oranında yükleme noktalarının yakın çevresinde kırılmalar olduğu gözlemlenmiştir. Farklı noktalarda oluşan bu çatlakların kiriş eksenine dik biçimde ilerlediği ve kırılma türünün eğilme kırılması şeklinde meydana geldiği belirlenmiştir.



Resim 4.6. P0S1N1\_0,20\_2,0 kodlu numunenin 2,00 a/d oranındaki kırılma çatlağı görüntüsü

P0S1N1\_0,20\_2,0 numunesinin 2,00 a/d oranında yapılan dört noktalı eğilme yüklemesi sonrası oluşan kırılma çatlağının görüntüsü Resim 4.6’da gösterilmiştir. 2,00 a/d oranında yükleme noktalarının orta kısmında çatlaklar oluşarak kırılmanın kiriş numunesinin ortasında birden fazla çatlak olduğu gözlemlenmiştir.



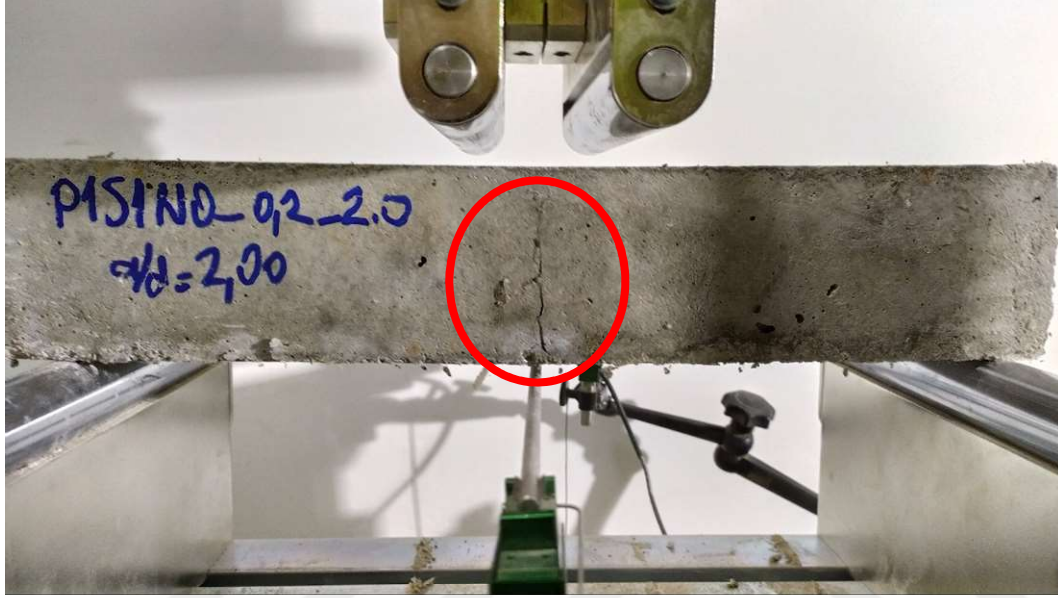
Resim 4.7. P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunenin 0,67 a/d oranındaki kırılma çatlağı görüntüsü

P1S1N0\_0,70\_1,0 numunesinin 0,67 a/d oranında yapılan dört noktalı eğilme yüklemesi sonrası oluşan kırılma çatlağının görüntüsü Resim 4.7’de gösterilmiştir. Kesme kırılması davranışının hâkim olduğu 0,67 a/d oranında yükleme noktalarının yakın çevresinde kırılmalar olduğu gözlemlenmiştir. Farklı noktalarda oluşan bu çatlakların kiriş eksenine dik biçimde ilerlediği ve kırılma türünün eğilme kırılması şeklinde meydana geldiği belirlenmiştir.



Resim 4.8. P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunenin 1,11 a/d oranındaki kırılma çatlağı görüntüsü

P1S1N0\_0,70\_1,0 numunesinin 1,11 a/d oranında yapılan dört noktalı eğilme yüklemesi sonrası oluşan kırılma çatlağının görüntüsü Resim 4.8'de gösterilmiştir. 1,11 a/d oranında çatlak oluşumunun yükleme noktalarının yakın çevresinden başladığı ve kırılmaların bu noktalarda olduğu gözlemlenmiştir. Oluşan bu çatlakların kiriş eksenine dik biçimde ilerlediği ve kırılma türünün eğilme kırılması şeklinde meydana geldiği belirlenmiştir.



Resim 4.9. P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunenin 2,00 a/d oranındaki kırılma çatlağı görüntüsü

P1S1N0\_0,70\_1,0 numunesinin 2,00 a/d oranında yapılan dört noktalı eğilme yüklemesi sonrası oluşan kırılma çatlağının görüntüsü Resim 4.9'da gösterilmiştir. 2,00 a/d oranında çatlak oluşumunun yükleme noktalarının ortasında yani kiriş numunesinin orta kısmında olduğu ve kırılmaların bu noktalarda olduğu gözlemlenmiştir. Çatlakların kiriş eksenine dik biçimde ilerlediği ve kırılma türünün eğilme kırılması şeklinde meydana geldiği belirlenmiştir.

Çizelge 4.2. Küçük ölçekli numunelerin akma noktası ve maksimum yükleme noktasındaki 28 gün ve 28+30 günlük (kendiliğinden iyileşme sonrası) yük taşıma kapasiteleri (kN) ve deplasman ( [mm] ) sonuçları

| Karışım | 28 Gün             |                |                |                |                |                | 28+30 Gün (Kendiliğinden iyileşme sonrası) |                 |                |               |                |                |               |
|---------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------------------------------|-----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
|         | Akma Noktası       |                |                | Maksimum Yük   |                |                | Akma Noktası                               |                 |                | Maksimum Yük  |                |                |               |
| #       | ID.                | 0,67           | 1,11           | 2,00           | 0,67           | 1,11           | 2,00                                       | 0,67            | 1,11           | 2,00          | 0,67           | 1,11           | 2,00          |
| 1       | POS0N0_0,20_1,0    | 11,9<br>[0,70] | 10,9<br>[0,82] | 11,0<br>[1,01] | 11,9<br>[0,70] | 10,9<br>[0,82] | 11,0<br>[1,01]                             | -               | -              | -             | -              | -              | -             |
| 2       | POS0N0_0,70_1,0    | 7,5<br>[0,69]  | 7,6<br>[0,87]  | 7,5<br>[0,90]  | 7,5<br>[0,69]  | 7,6<br>[0,87]  | 7,5<br>[0,90]                              | -               | -              | -             | -              | -              | -             |
| 3       | POS1N0_0,20_1,0    | 14,0<br>[0,24] | 6,6<br>[0,25]  | 4,0<br>[0,20]  | 14,1<br>[0,24] | 6,6<br>[0,25]  | 4,0<br>[0,20]                              | 11,4<br>[0,43]  | 8,2<br>[0,76]  | 4,1<br>[0,57] | 11,4<br>[0,43] | 8,2<br>[0,76]  | 4,1<br>[0,57] |
| 4       | POS1N0_0,70_1,0    | 7,7<br>[0,19]  | 9,7<br>[0,25]  | 3,9<br>[0,22]  | 13,9<br>[0,82] | 11,8<br>[1,49] | 5,7<br>[0,45]                              | 14,8<br>[0,95]  | 7,7<br>[0,53]  | 4,7<br>[0,51] | 17,2<br>[2,22] | 7,7<br>[0,53]  | 5,1<br>[0,92] |
| 5       | POS1N1_0,20_1,0    | 15,8<br>[0,57] | 9,1<br>[0,22]  | 4,2<br>[0,30]  | 20,1<br>[1,74] | 9,7<br>[2,02]  | 4,3<br>[0,59]                              | 13,0<br>[0,54]  | 5,9<br>[0,65]  | 3,8<br>[0,60] | 14,4<br>[0,82] | 6,5<br>[1,06]  | 4,1<br>[0,76] |
| 6       | POS1N1_0,70_1,0    | 11,0<br>[0,24] | 6,4<br>[0,19]  | 4,4<br>[0,16]  | 16,1<br>[1,02] | 9,7<br>[1,08]  | 4,7<br>[1,49]                              | 15,0<br>[0,76]  | 8,1<br>[0,61]  | 4,2<br>[0,35] | 15,6<br>[1,13] | 8,8<br>[0,91]  | 5,1<br>[1,34] |
| 7       | POS1N1_0,20_2,0    | 19,5<br>[0,26] | 19,3<br>[0,58] | 11,5<br>[0,58] | 28,2<br>[1,03] | 24,7<br>[1,49] | 13,3<br>[1,37]                             | 16,6<br>[0,41]  | 8,7<br>[0,53]  | 8,1<br>[0,34] | 17,6<br>[0,61] | 8,9<br>[0,62]  | 8,1<br>[0,34] |
| 8       | POS1N1_0,70_2,0    | 10,0<br>[0,21] | 6,5<br>[0,17]  | 4,7<br>[0,16]  | 14,2<br>[1,18] | 12,6<br>[2,24] | 6,4<br>[0,78]                              | 22,3<br>[0,77]  | 10,6<br>[0,77] | 4,0<br>[0,61] | 22,8<br>[1,06] | 12,3<br>[1,44] | 4,2<br>[1,04] |
| 9       | P1S1N0_0,20_1,0    | 16,3<br>[0,25] | 9,8<br>[0,38]  | 3,59<br>[0,61] | 26,4<br>[0,78] | 12,1<br>[0,66] | 6,7<br>[2,38]                              | 28,5<br>[1,01]  | 13,4<br>[0,83] | 8,5<br>[1,09] | 28,5<br>[1,01] | 13,4<br>[0,83] | 8,5<br>[1,09] |
| 10      | P1S1N0_0,70_1,0    | 13,9<br>[0,31] | 6,2<br>[0,23]  | 3,6<br>[0,20]  | 23,0<br>[0,90] | 13,5<br>[1,15] | 6,1<br>[0,80]                              | 26,3<br>[0,96]  | 15,1<br>[0,93] | 7,3<br>[0,78] | 26,3<br>[0,96] | 15,1<br>[0,93] | 7,3<br>[0,78] |
| 11      | P1S1N0_0,20_2,0    | 32,7<br>[0,82] | 14,5<br>[1,01] | 8,8<br>[0,90]  | 33,7<br>[1,11] | 14,5<br>[1,05] | 8,8<br>[0,90]                              | 27,4<br>[0,42]  | 10,8<br>[0,57] | 7,3<br>[0,61] | 27,4<br>[0,42] | 10,8<br>[0,57] | 7,3<br>[0,61] |
| 12      | P1S1N0_0,70_2,0    | 28,1<br>[0,53] | 8,5<br>[0,20]  | 4,9<br>[0,19]  | 30,6<br>[0,91] | 12,8<br>[0,98] | 6,2<br>[0,75]                              | 22,7<br>[0,93]  | 9,1<br>[0,66]  | 6,5<br>[0,37] | 23,0<br>[1,02] | 9,2<br>[0,75]  | 7,0<br>[0,59] |
| 15      | NS-P1S1N0_0,70_1,0 | 13,3<br>[0,89] | 9,8<br>[0,23]  | 4,6<br>[0,71]  | 22,9<br>[1,98] | 14,3<br>[0,95] | 5,6<br>[1,51]                              | 22,17<br>[0,62] | 10,8<br>[1,10] | 5,8<br>[0,70] | 24,6<br>[1,05] | 11,1<br>[1,26] | 5,8<br>[0,70] |
| 16      | NA-P1S1N0_0,70_1,0 | 17,0<br>[0,74] | 8,4<br>[0,59]  | 3,7<br>[0,16]  | 23,3<br>[1,30] | 13,7<br>[1,22] | 4,4<br>[0,81]                              | 27,2<br>[1,16]  | 10,8<br>[0,83] | 5,7<br>[0,58] | 27,2<br>[1,16] | 10,8<br>[0,83] | 5,7<br>[0,58] |

Şekil 4.3-Şekil 4.9 grafiklerden ve Çizelge 4.2'deki verilerden de anlaşılacağı üzere a/d oranının 0,67'den 2,00'a artmasıyla birlikte numunelerin yük taşıma kapasitelerinde bir azalma görülmektedir. A/d oranlarına karşılık gelen yer değiştirme sonuçlarında daha yüksek değişimler görülmelerine rağmen, a/d oranının artmasıyla birlikte benzer bir azalma görülmüştür. Burada liflerle üretilmiş olan bütün küçük ölçekli kirişlerin eğilme kırılması gösterdiği, lifsiz karışımların ise gevrek kesme kırılması sergilediği görülmüştür. A/d oranlarının artmasıyla birlikte, numunelerde kesme kırılmasının oluşma ihtimali azalmakta ve daha az yük taşınması oluşmasına neden olmaktadır. Bu görülen etki literatürde daha önceki ilgili çalışmalarla benzer şekildedir [30,131].

Benzer numuneler üzerinde (diğer parametreleri sabit) UK/PÇ oranının 0,20'den 0,70'e artırıldığında yük taşıma kapasitesinde belirgin bir azalma olduğu görülmektedir. Artan UK ile birlikte yük taşıma kapasitesindeki azalmalar, yüksek UK oranı içeren numunelerin basınç dayanımındaki azalmalar ile benzer şekilde olmaktadır. Basınç dayanımının azalması ile birlikte yük taşıma kapasitelerinin de azalması beklenmektedir [40,132]. Eğilme sonucunda deplasman sonuçlarında UK/PÇ oranındaki değişikliklerde sürekli bir değişim görülememiştir. Uçucu kül tanelerinin küresel yapısından dolayı liflerin homojen dağılımına yardımcı olacağı ve eğilme durumunda deplasman kapasitesini artıracığı beklenmektedir. Bu beklenmedik davranış ise şekil değiştirme sertleşmesi sergilemesi üzerinde etkili olan karmaşık malzeme parametrelerinin davranışlarından kaynaklandığı düşünülmektedir [40,132].

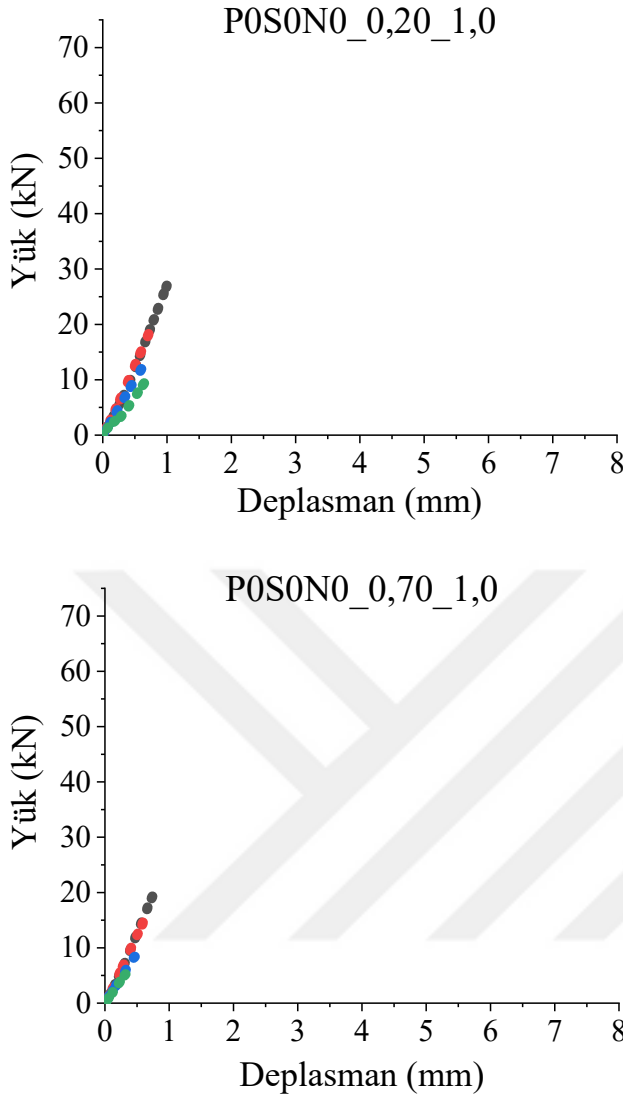
Sabit malzeme içeriğinde A/B oranının 1,0'dan 2,0'a çıkarılmasıyla birlikte yük taşıma kapasitelerinde artışlar görülürken, yukarıda belirtilmiş olan karmaşık malzeme özelliğinden dolayı deplasman sonuçlarında net bir değişim görülememiştir. Daha yüksek A/B oranında elde edilen daha yüksek yük taşıma kapasitesi, kırılma anına kadar oluşan çatlama yolunun artmasından kaynaklı enerji yutma kapasitenin artması şeklinde yorumlanabilir.

Liflerin karışıma eklenmesinden sonra eğilme davranışlarında iyileşmeler olduğu görülmektedir. Karışımların gevrek davranıştan ziyade daha sünek bir davranış sergilediği anlaşılmaktadır. İlk çatlak yükü sonrasında, taşıma yükünün bu çatlak yükünün üzerinde oluşmaya devam etmesine şekil değiştirme sertleşmesi olarak tanımlanmaktadır. İlk çatlak yükünün oluştuğu deplasman noktası ile daha sonraki tepe yük noktasındaki deplasman arasındaki fark arttıkça, şekil değiştirme sertleşmesi davranışının daha belirgin olarak

görülmesi mümkündür [40]. Şekil 4.5’den de anlaşılabileceği üzere neredeyse bütün lif takviyeli numunelerin tamamında şekil değiştirme sertleşmesi görülebilmektedir. Bu sonuç şekil değiştirme sertleşmesi davranışının iri agrega içeren karışımlarda dahi elde edilebildiğini gösterdiğinden oldukça önemlidir. Sadece çelik lif katkısı içeren numunelerde bile şekil değiştirme sertleşmesi görülmüştür fakat çelik lifin yanına sentetik liflerin eklenmesiyle birlikte şekil değiştirme sertleşmesi daha belirgin hale gelmiştir. P+S ve N+S liflerinin birbirleriyle eğilme yönünden karşılaştırmak gerekirse, Şekil 4.5’den anlaşılabileceği gibi davranışları benzer çıkmıştır. Buda PVA lifinin yerine naylon liflerinin kullanılabileceğini göstermektedir. Bunun bir sonucu olarak üretim maliyetinin önemli ölçüde azaltılmış olması ortaya çıkmaktadır. PVA lifinin ülkemizde üretilmiyorken, Naylon liflerinin ise ülkemiz sınırları içerisinde üretilbilir olması bu lifin daha ucuz olmasının bir göstergesidir.

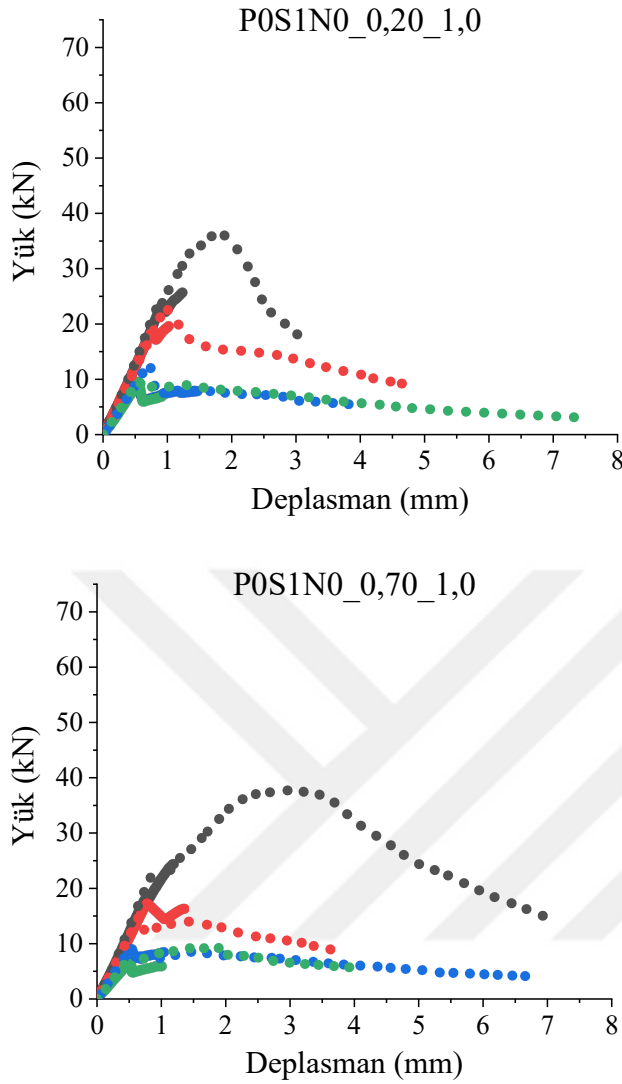
Farklı nano malzemeleri eklendiğinde performans değişimleri P1S1N0\_0,70\_1,0 karışımının sonuçları NS-P1S1N0\_0,70\_1,0 ve NA-P1S1N0\_0,70\_1,0 ile karşılaştırılarak görülebilmektedir. Lifler ile takviyelenmiş çimento esaslı kompozitlerin eğilme parametrelerindeki gelişmeler, genellikle ayırık lifler ve matris ara yüzeyinin özellikleri ile doğrudan bir bağlantı içerisinde [130,133]. Bu nedenle nano malzeme eklenmesiyle birlikte eğilme davranışının iyileşmesinin bir sebebi olarak fiber matris ara yüzeyinin nano sayesinde iyileşmesine atfedilebilir. Farklı literatür çalışmalarına benzer şekilde burada da geniş bir özgül yüzeye sahip olan nano malzemelerinin hidrasyonu hızlandırma ve çekirdeklenme etkisi sayesinde lif-matris ara yüzeyini iyileştirerek performansa katkıda bulunduğu görülebilmektedir [133,134]. Aynı zamanda nano malzemelerin kaba agrega kullanımından dolayı oluşabilecek agrega-matris ara yüzey problemlerinde de yardımcı olabileceği düşünülmektedir.

P0S0N0\_0,20\_1,0 ve P0S0N0\_0,70\_1,0 kodlu büyük ölçekli numunelerin dört farklı a/d oranındaki yük-deplasman eğrileri Şekil 4.10’da verilmiştir. 28 gün sonunda doğrudan kırılan P0S0N0\_0,20\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 27,1 kN, 19,9 kN, 13,3 kN ve 10,0 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 1,00 mm , 0,78 mm , 0,67 mm ve 0,69 mm olarak belirlenmiştir. P0S0N0\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 19,9 kN, 15,0 kN, 8,5 kN ve 6,2 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 0,77 mm, 0,62 mm, 0,46 mm ve 0,39 mm olarak belirlenmiştir.



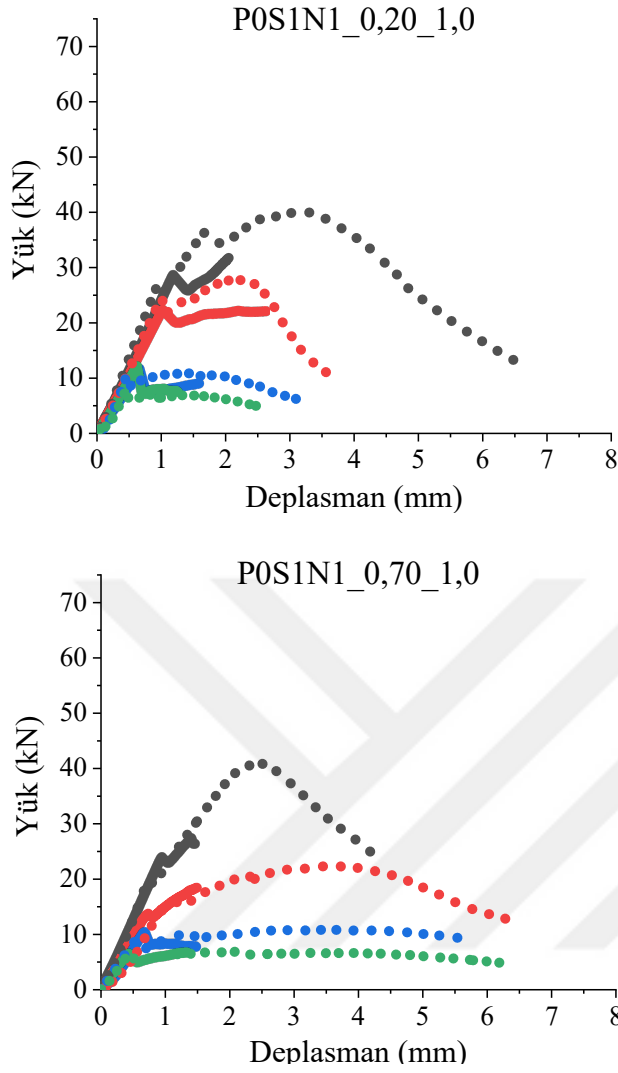
Şekil 4.10. Büyük ölçekli POS0N0\_0,20\_1,0 ve POS0N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri

POS1N0\_0,20\_1,0 ve POS1N0\_0,70\_1,0 kodlu büyük ölçekli numunelerin dört farklı a/d oranındaki yük-deplasman eğrileri Şekil 4.11 'de verilmiştir. 28 gün sonunda doğrudan kırılan POS1N0\_0,20\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 36,1 kN, 23,0 kN, 13,1 kN ve 10,1 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 1,76 mm, 0,97 mm, 0,72 mm ve 0,57 mm olarak belirlenmiştir. POS1N0\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 37,7kN, 15,1 kN, 8,7 kN ve 9,3 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 2,95 mm, 0,66 mm, 0,80 mm ve 1,78 mm olarak belirlenmiştir. Bütün numunelerde eğilme çatlağı sonucunda eğilme kırılması şeklinde göçme belirlenmiştir.



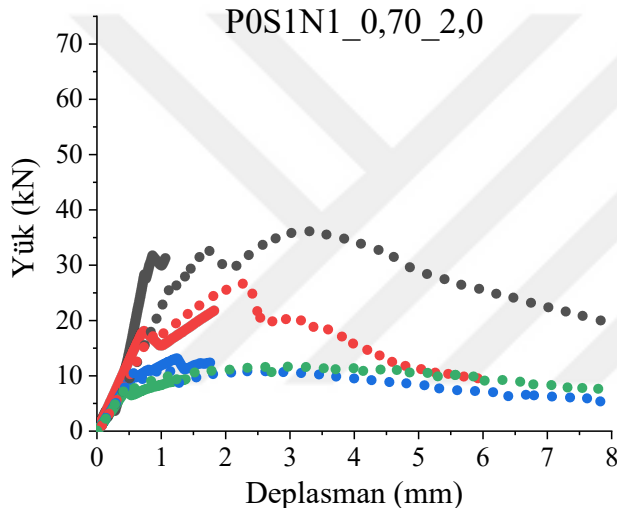
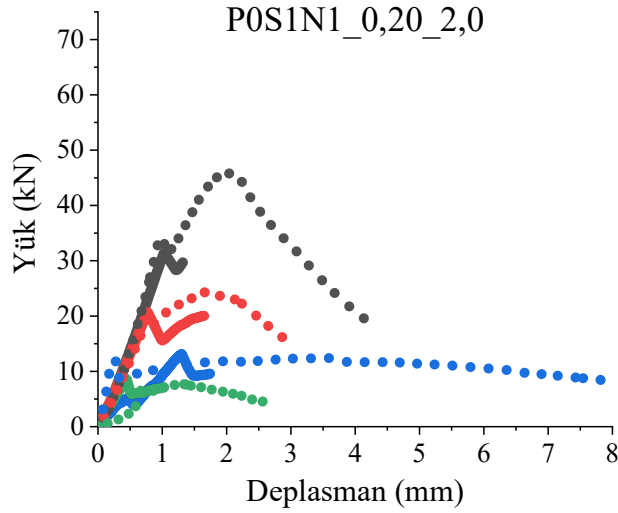
Şekil 4.11. Büyük ölçekli P0S1N0\_0,20\_1,0 ve P0S1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri

P0S1N1\_0,20\_1,0 ve P0S1N1\_0,70\_1,0 kodlu büyük ölçekli numunelerin dört farklı a/d oranındaki yük-deplasman eğrileri Şekil 4.12 'de verilmiştir. 28 gün sonunda doğrudan kırılan P0S1N1\_0,20\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 40,0 kN, 27,8 kN, 11,0 kN ve 8,0 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 3,24 mm, 2,13 mm, 1,40 mm ve 0,45 mm olarak belirlenmiştir. P0S1N1\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 41,0 kN, 22,4 kN, 10,9 kN ve 6,9 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 2,42 mm, 3,57 mm, 3,47 mm ve 0,47 mm olarak belirlenmiştir. Bütün numunelerde eğilme çatlağı sonucunda eğilme kırılması şeklinde göçme belirlenmiştir.



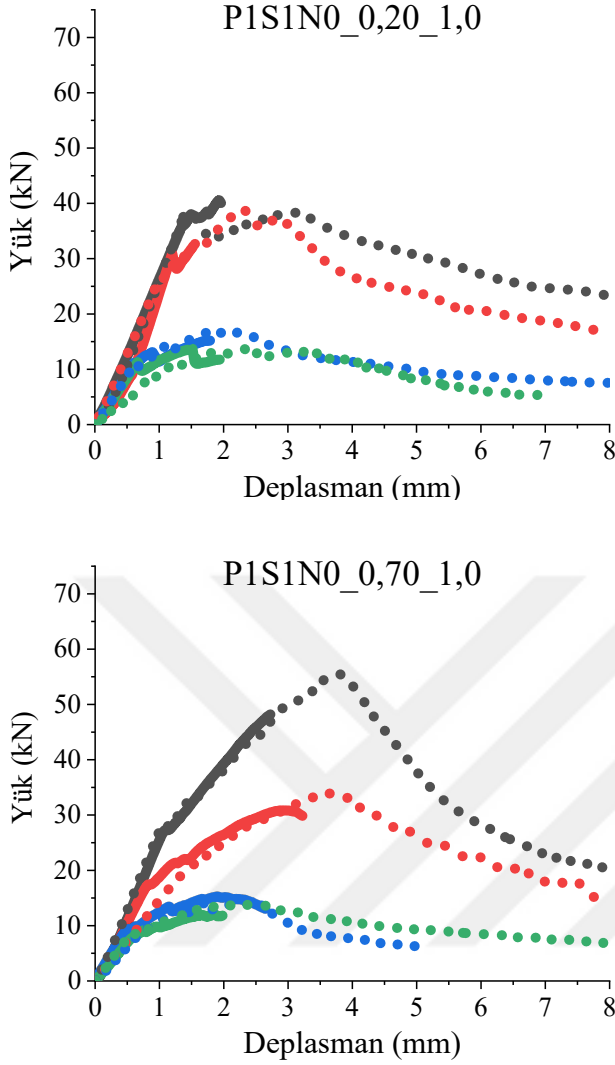
Şekil 4.12. Büyük ölçekli P0S1N1\_0,20\_1,0 ve P0S1N1\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri

P0S1N1\_0,20\_2,0 ve P0S1N1\_0,70\_2,0 kodlu büyük ölçekli numunelerin dört farklı a/d oranındaki yük-deplasman eğrileri Şekil 4.13 'te verilmiştir. 28 gün sonunda doğrudan kırılan P0S1N1\_0,20\_2,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 45,8 kN, 24,2 kN, 12,0 kN ve 7,7 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 2,04 mm, 1,68 mm, 0,25 mm ve 0,70 mm olarak belirlenmiştir. P0S1N1\_0,70\_2,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 36,2 kN, 26,9 kN, 11,8 kN ve 11,7 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 3,23 mm, 2,36 mm, 1,11 mm ve 3,06mm olarak belirlenmiştir. Bütün numunelerde eğilme çatlağı sonucunda eğilme kırılması şeklinde göçme belirlenmiştir.



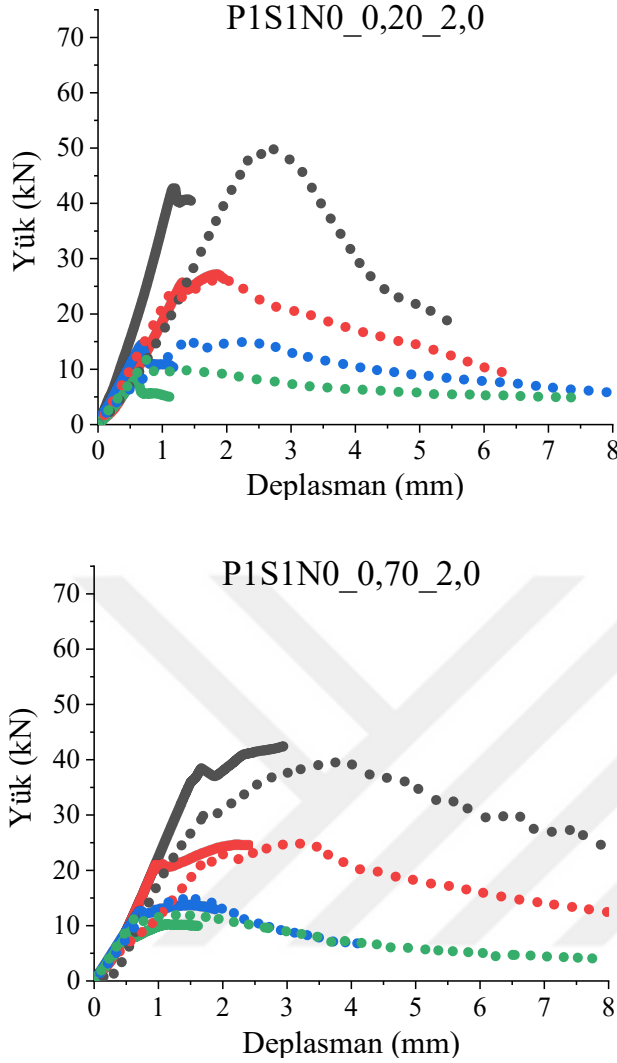
Şekil 4.13. Büyük ölçekli P0S1N1\_0,20\_2,0 ve P0S1N1\_0,70\_2,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri

P1S1N0\_0,20\_1,0 ve P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu büyük ölçekli numunelerin dört farklı a/d oranındaki yük-deplasman eğrileri Şekil 4.14 'te verilmiştir. 28 gün sonunda doğrudan kırılan P1S1N0\_0,20\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 38,4 kN, 38,7 kN, 16,9 kN ve 13,7 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 3,05 mm, 2,33 mm, 1,84 mm ve 2,30 mm olarak belirlenmiştir. P1S1N0\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 55,6 kN, 34,0 kN, 14,3 kN ve 13,8 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 3,78 mm, 3,62 mm, 1,73 mm ve 2,51 mm olarak belirlenmiştir.



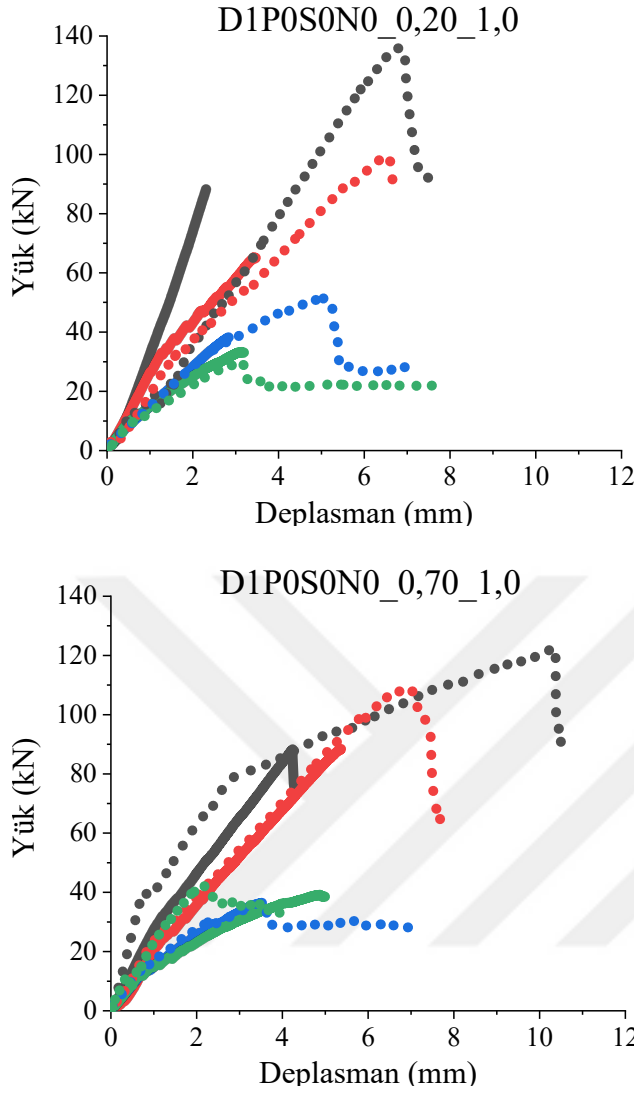
Şekil 4.14. Büyük ölçekli P1S1N0\_0,20\_1,0 ve P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri

P1S1N0\_0,20\_2,0 ve P1S1N0\_0,70\_2,0 kodlu büyük ölçekli numunelerin dört farklı a/d oranındaki yük-deplasman eğrileri Şekil 4.15 'te verilmiştir. 28 gün sonunda doğrudan kırılan P1S1N0\_0,20\_2,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 50,1 kN, 26,4 kN, 16,0 kN ve 12,1 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 2,66 mm, 1,91 mm, 1,43 mm ve 0,79 mm olarak belirlenmiştir. P1S1N0\_0,70\_2,0 numunesi için 0,67, 1,11, 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 39,6 kN, 24,9 kN, 15,1 kN ve 12,0 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 3,81 mm, 3,09 mm, 1,55 mm ve 1,28 mm olarak belirlenmiştir. Bütün numunelerde eğilme çatlağı sonucunda eğilme kırılması şeklinde göçme belirlenmiştir.



Şekil 4.15. Büyük ölçekli P1S1N0\_0,20\_2,0 ve P1S1N0\_0,70\_2,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri

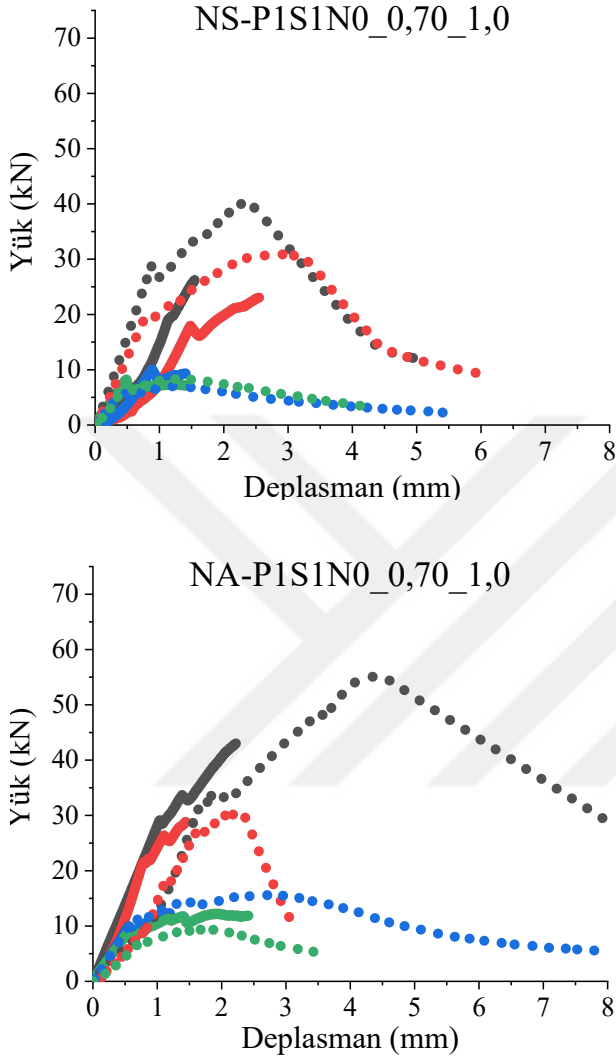
D1P0S0N0\_0,20\_1,0 ve D1P0S0N0\_0,70\_1,0 kodlu büyük ölçekli numunelerin dört farklı a/d oranındaki yük-deplasman eğrileri Şekil 4.16 'da verilmiştir. 28 gün sonunda doğrudan kırılan D1P0S0N0\_0,20\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 136,3 kN, 99,8 kN, 51,7 kN ve 29,9 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 6,86 mm, 6,54 mm, 5,11 mm ve 3,11 mm olarak belirlenmiştir. D1P0S0N0\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 122,9 kN, 108,7 kN, 37,0 kN ve 42,3 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 10,30 mm, 6,80 mm, 3,54 mm ve 2,22 mm olarak belirlenmiştir. 0,67 , 1,11 ve 2,22 a/d oranlarında kesme çatlağı sonucunda kesme kırılması şeklinde göçme belirlenirken, 2,96 a/d oranında kesmeli eğilme çatlaklarıyla birlikte, kesme göçmesi gözlemlenmiştir.



Şekil 4.16. Büyük ölçekli çelik donatılı D1P0S0N0\_0,20\_1,0 ve D1P0S0N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri

NS-P1S1N0\_0,70\_1,0 ve NA-P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu büyük ölçekli numunelerin dört farklı a/d oranındaki yük-deplasman eğrileri Şekil 4.17 'de verilmiştir. 28 gün sonunda doğrudan kırılan NS-P1S1N0\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 40,1 kN, 30,9 kN, 7,1 kN ve 8,4 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 2,31 mm, 2,93 mm, 1,23 mm ve 1,22mm olarak belirlenmiştir. NA-P1S1N0\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 55,2 kN, 30,8 kN, 15,7 kN ve 9,4 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 4,25 mm, 6,83 mm, 2,83 mm ve 1,69 mm olarak belirlenmiştir. Bütün numunelerde eğilme çatlakları sonucunda eğilme kırılması şeklinde göçme belirlenmiştir. Büyük ölçekli

numunelerden kesme kırılmasının en fazla hâkim olduğu 0,67 a/d oranındaki kırılma görüntülerinden örnekler Resim 4.10-Resim 4.15 arasında verilmiştir.



Şekil 4.17. Büyük ölçekli NS-P1S1N0\_0,70\_1,0 ve NA-P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin yük-deplasman eğrileri



Resim 4.10. P0S0N0\_0,70\_1,0 numunesinin 0,67a/d oranındaki 28 günlük göçme görüntüsü

P0S0N0\_0,70\_1,0 numunesinin 0,67 a/d oranında dört noktalı eğilme yüklemesi altındaki kırılma görüntüsü Resim 4.10'de gösterilmiştir. Lif katkısı içermeyen yapısal kiriş boyutlarındaki numunelerinin ilk çatlak oluşum noktası yükleme noktasının altında oluşmuştur. Numunelerin gevrek ve ani bir kırılma sergilediği gözlemlenmiştir.



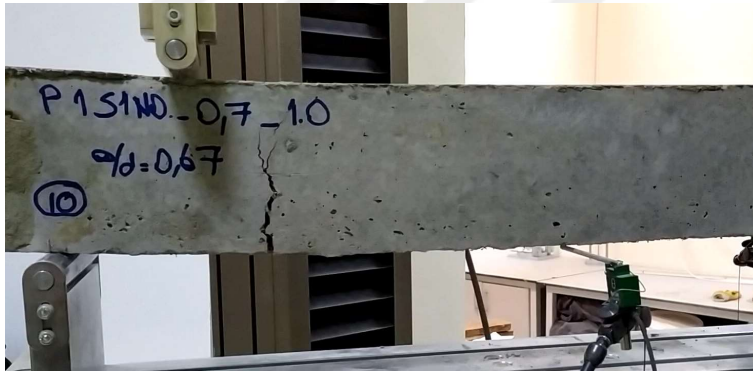
Resim 4.11. P0S1N0\_0,70\_1,0 numunesinin 0,67a/d oranındaki 28 günlük göçme görüntüsü

P0S1N0\_0,70\_1,0 numunesinin 0,67 a/d oranında dört noktalı eğilme yüklemesi altındaki kırılma görüntüsü Resim 4.11'de gösterilmiştir. Çelik lif içeren yapısal kiriş boyutlarındaki numunelerinin ilk çatlak oluşumu yükleme noktalarının arasında ve yükleme noktalarına yakın yerlerde oluşmuştur. Sadece çelik lif içeren numunelerdeki kırılmalarda şekil değiştirme sertleşmesi gözlemlenmeden kırılmalar ilk çatlak oluşum noktasında belirlenmiştir.



Resim 4.12. P0S1N1\_0,70\_1,0 numunesinin 0,67a/d oranındaki 28 günlük göçme görüntüsü

P0S1N1\_0,70\_1,0 numunesinin 0,67 a/d oranında dört noktalı eğilme yüklemesi altındaki kırılma görüntüsü Resim 4.12’de gösterilmiştir. Naylon lif ve çelik lif içeren yapısal kiriş boyutlarındaki numunelerinin ilk çatlak oluşumu yükleme noktalarının arasında ve yükleme noktalarına yakın yerlerde gözlemlenmiştir. 28 gün sonunda eğilme yüklemesi altında numunelerde çoklu çatlak gözlemlenmiş olup, kırılma zayıf noktadan devam ederek çatlak genişliğinin artmasıyla birlikte göçme gözlemlenmiştir.



Resim 4.13. P1S1N0\_0,70\_1,0 numunesinin 0,67a/d oranındaki 28 günlük göçme görüntüsü

P01S1N0\_0,70\_1,0 numunesinin 0,67 a/d oranında dört noktalı eğilme yüklemesi altındaki kırılma görüntüsü Resim 4.13’de gösterilmiştir. PVA lif ve çelik lif içeren yapısal kiriş boyutlarındaki numunelerinin ilk çatlak oluşumu yükleme noktalarının arasında ve yükleme noktalarına yakın yerlerde gözlemlenmiştir. 28 gün sonunda eğilme yüklemesi altında numunelerde çoklu çatlak gözlemlenmiş olup, kırılma zayıf noktadan devam ederek çatlak genişliğinin artmasıyla birlikte göçme gözlemlenmiştir.



Resim 4.14. D1P0S0N0\_0,70\_1,0 numunesinin 0,67a/d oranındaki 28 günlük göçme görüntüsü

D1P0S0N0\_0,70\_1,0 numunesinin 0,67 a/d oranında dört noktalı eğilme yüklemesi altındaki kırılma görüntüsü Resim 4.14’de gösterilmiştir. Donatı ile güçlendirilmiş yapısal kiriş boyutlarındaki numunelerinin ilk çatlak oluşumu yüklemeye noktası ile mesnet arasında oluşmuştur. Mesnetten yüklemeye noktasına doğru ilerleyen bu kesme çatlağında gevrek ve ani kırılmalar elde edilmiştir. Ayrıca numune üzerindeki kısımlarda basınç ezilmelerinden kaynaklı kopmalar gözlemlenmiştir.



Resim 4.15. NA-P1S1N0\_0,70\_1,0 numunesinin 0,67a/d oranındaki 28 günlük göçme görüntüsü

NAP10S1N0\_0,70\_1,0 numunesinin 0,67 a/d oranında dört noktalı eğilme yüklemesi altındaki kırılma görüntüsü Resim 4.15’de gösterilmiştir. Nano malzemenin eklenmesiyle birlikte numunelerin çatlak oluşum noktaları kiriş orta noktasına doğru ilerlediği belirlenmiştir.

Çizelge 4.3. Büyük ölçekli numunelerin akma noktası ve maksimum yükleme noktasındaki 28 gün ve 28+30 günlük (kendiliğinden iyileşme sonrası) yük taşıma kapasiteleri (kN) ve deplasman ([mm]) sonuçları (E: Eğilme kırılması, K: Kesme kırılması)

| #  | Karışım           | 28 Gün         |                |                |                |                 |                 | 28+30 Gün (Kendiliğinden iyileşme sonrası) |           |                |                 |                |                |
|----|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------------|-----------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
|    |                   | Akma Noktası   |                |                | Maksimum Yük   |                 |                 | Akma Noktası                               |           |                | Maksimum Yük    |                |                |
|    |                   | 0,67           | 1,11           | 2,22           | 2,96           | 0,67            | 1,11            | 2,22                                       | 2,96      | 0,67           | 1,11            | 2,22           | 2,96           |
| 1  | P0S0N0_0,20_1,0   | -              | -              | -              | -              | 27,1<br>[1,00]  | 19,9<br>[0,78]  | 13,3<br>E                                  | 10,0<br>E | -              | -               | -              | -              |
| 2  | P0S0N0_0,70_1,0   | -              | -              | -              | -              | 19,9<br>[0,77]  | 15,0<br>[0,62]  | 8,5<br>E                                   | 6,2<br>E  | -              | -               | -              | -              |
| 3  | P0S1N0_0,20_1,0   | 33,1<br>[1,39] | 23,0<br>[0,97] | 13,1<br>[0,72] | 10,1<br>[0,57] | 36,1<br>[1,76]  | 23,0<br>[0,97]  | 13,1<br>E                                  | 10,1<br>E | 26,6<br>[1,11] | 24,9<br>[1,37]  | 8,8<br>[1,32]  | 8,3<br>[1,04]  |
| 4  | P0S1N0_0,70_1,0   | 23,0<br>[0,88] | 15,1<br>[0,66] | 7,4<br>[0,42]  | 6,9<br>[0,47]  | 37,7<br>[2,95]  | 15,1<br>[0,66]  | 8,7<br>E                                   | 9,3<br>E  | 36,0<br>[1,97] | 16,5<br>[1,05]  | 10,4<br>[0,95] | 7,1<br>[0,91]  |
| 5  | P0S1N1_0,20_1,0   | 26,8<br>[0,95] | 24,5<br>[1,00] | 9,9<br>[0,44]  | 8,0<br>[0,45]  | 40,0<br>[3,24]  | 27,8<br>[2,13]  | 11,0<br>E                                  | 8,0<br>E  | 23,6<br>[1,42] | 20,3<br>[1,93]  | 8,9<br>[1,07]  | 6,8<br>[0,77]  |
| 6  | P0S1N1_0,70_1,0   | 19,1<br>[0,71] | 14,5<br>[0,96] | 9,1<br>[0,56]  | 6,9<br>[0,47]  | 41,0<br>[2,42]  | 22,4<br>[3,57]  | 10,9<br>E                                  | 6,9<br>E  | 37,0<br>[1,84] | 17,7<br>[1,17]  | 8,4<br>[1,33]  | 7,4<br>[1,02]  |
| 7  | P0S1N1_0,20_2,0   | 33,2<br>[0,94] | 19,7<br>[0,78] | 12,0<br>[0,25] | 7,7<br>[0,70]  | 45,8<br>[2,04]  | 24,2<br>[1,68]  | 12,0<br>E                                  | 7,7<br>E  | 26,3<br>[0,90] | 15,4<br>[0,97]  | 9,5<br>[1,37]  | 7,6<br>[0,82]  |
| 8  | P0S1N1_0,70_2,0   | 27,3<br>[1,19] | 17,3<br>[0,85] | 10,6<br>[0,58] | 8,6<br>[0,51]  | 36,2<br>[3,23]  | 26,9<br>[2,36]  | 11,8<br>E                                  | 11,7<br>E | 34,6<br>[1,56] | 21,2<br>[1,74]  | 12,4<br>[1,21] | 9,5<br>[0,98]  |
| 9  | P1S1N0_0,20_1,0   | 38,2<br>[1,40] | 26,4<br>[1,01] | 11,4<br>[0,63] | 8,5<br>[0,84]  | 38,4<br>[3,05]  | 38,7<br>[2,33]  | 16,9<br>E                                  | 13,7<br>E | 33,1<br>[1,75] | 31,1<br>[1,79]  | 16,1<br>[1,66] | 13,6<br>[1,56] |
| 10 | P1S1N0_0,70_1,0   | 26,8<br>[0,99] | 20,3<br>[1,44] | 13,4<br>[1,35] | 8,2<br>[0,54]  | 55,6<br>[3,78]  | 34,0<br>[3,62]  | 14,3<br>E                                  | 13,8<br>E | 39,9<br>[2,03] | 35,2<br>[1,72]  | 14,9<br>[0,86] | 12,2<br>[0,75] |
| 11 | P1S1N0_0,20_2,0   | 47,9<br>[2,34] | 23,6<br>[1,12] | 16,0<br>[1,43] | 12,1<br>[0,79] | 50,1<br>[2,66]  | 26,4<br>[1,91]  | 16,0<br>E                                  | 12,1<br>E | 30,0<br>[1,06] | 20,2<br>[0,73]  | 7,3<br>[0,35]  | 4,5<br>[0,29]  |
| 12 | P1S1N0_0,70_2,0   | 30,3<br>[1,71] | 22,0<br>[1,75] | 12,8<br>[0,82] | 11,4<br>[0,63] | 39,6<br>[3,81]  | 24,9<br>[3,09]  | 15,1<br>E                                  | 12,0<br>E | 34,3<br>[1,96] | 23,0<br>[1,68]  | 13,0<br>[1,45] | 9,12<br>[1,00] |
| 13 | D1P0S0N0_0,20_1,0 | 13,3<br>[0,60] | 29,4<br>[1,45] | 32,2<br>[2,30] | 9,7<br>[0,62]  | 136,3<br>[6,86] | 99,8<br>[6,54]  | 51,7<br>K                                  | 29,9<br>K | 64,5<br>[2,82] | 100,6<br>[6,04] | 40,3<br>[3,77] | 36,7<br>[3,64] |
| 14 | D1P0S0N0_0,70_1,0 | 36,5<br>[0,67] | 27,0<br>[1,18] | 15,4<br>[0,80] | 12,7<br>[0,45] | 122,9<br>[10,3] | 108,7<br>[6,80] | 37,0<br>K                                  | 42,3<br>K | 76,4<br>[3,83] | 85,6<br>[5,28]  | 33,8<br>[3,20] | 37,3<br>[4,72] |
| 15 | NS-               | 29,0           | 19,8           | 5,6            | 8,1            | 40,1            | 30,9            | 7,1                                        | 8,4       | 31,6           | 23,9            | 11,6           | 7,3            |
| 16 | P1S1N0_0,70_1,0   | 31,0           | 27,2           | 11,1           | 7,1            | 55,2            | 30,8            | 15,7                                       | 9,4       | 39,4           | 28,1            | 15,9           | 12,3           |
|    | P1S1N0_0,70_1,0   | [1,63]         | [1,63]         | [0,61]         | [0,83]         | [4,25]          | [6,83]          | [2,83]                                     | [1,69]    | [2,10]         | [2,03]          | [1,58]         | [1,90]         |

Büyük ölçekte üretilmiş olan kirişlerin eğilme performansları, Şekil 4.10-Şekil 4.17 ve grafiklerden elde edilen veriler Çizelge 4.3 'te gösterilmiştir. Genel olarak benzer içeriklere sahip numunelerde, yapısal ölçekteki kirişlerin performansları, küçük ölçekli kirişlerin performanslarıyla benzer sonuç sergilemiştir. Küçük ölçekli kirişlerdeki yorumların benzerleri oluşacağından, yapısal ölçekteki kirişler için sadece ek yorumlara yer verilmiştir.

Çelik donatılarla güçlendirilmiş olan numunelerin performansları ile lif katkılı numunelerle üretilmiş olan kirişlerin performanslarının karşılaştırılması mümkündür. Şekil 4.10-Şekil 4.17'den anlaşılabileceği üzere, çelik donatı eklenmesiyle birlikte hem yük taşıma kapasitelerinde hem de deplasman değerlerinde artışlar gözlemlenmiştir. UK/PÇ oranının 0,20'den 0,70'e çıkarılması çelik donatı katkılı numunelerin deplasman değerlerinde kayda değer bir artış oluşturmıştır. Bunun nedeni olarak UK'nin, işlenebilirliğe olan katkısı nedeniyle daha iyi bir kalıba yerleşme ortaya çıkması ve puzolan katkıların nihai dayanımlara olan olumlu etkileri olabileceği düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre en önemli noktalardan birisi ise çelik donatı ile üretilen numunelerin elyaf ve nano malzeme katkılı kirişlerin performanslarıyla benzer elde edilebilmesidir. Çizelge 4.3 'ten görülebileceği üzere 1,11 a/d oranındaki D1P0S0N0\_0,70\_1,0 ve NA-P1S1N0\_0,70\_1,0 karışımlarının maksimum eğilme yükü noktasındaki deplasman değerleri sırasıyla 6,80 mm ve 6,83 mm olarak bulunmuştur. Çimento esaslı kompozitlerde çelik donatı kullanımını azaltarak, bir alternatif olarak, daha sünek bir sonuç alınacak şekilde, doğru optimizasyonla nano malzeme ve hibrit lif katkısı kullanılabilir.

D1P0S0N0\_0,20\_1,0 ve D1P0S0N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerde bütün a/d oranlarında kesme hâkimiyetinden kaynaklı kırılmalar görülmüştür. Lif katkılı numunelerin ise tamamında Eğilme çatlaklarından başlayan göçme ve eğilme kırılması şeklinde oluşan göçme elde edilmiştir. Bunun bir sonucu olarak yükleme şartları değiştiğinde, kritik yükleme ve kırılma şekli olarak bilinen kesme hâkimiyetinin olduğu yükleme koşullarında bile lif katkılı numunelerin ani kesme kırılması göstermeyip, öncesinde çatlak oluşumu daha sünek ve yavaş bir kırılma oluşturduğu belirlenmiştir. Bu tür bir yapı malzemesinin yapı içerisinde kullanılması durumunda, kritik ve ani yüklemeler altında ani kırılma göstermeyip, kırılma öncesinde bir alarm niteliğinde çoklu çatlak oluşumuyla başlayarak sonrasında çatlak genişliğinin artmasıyla bir can kaybına mahal vermeden tedbir alınabilecek vakit oluşmasına olanak sağlayacağı düşünülmektedir.



Çizelge 4.3’de büyük ölçekli kirişlerin akma kapasiteleri verilmiştir. Buna göre 1 ve 2 numaralı örnekler (referans karışımları) lif ve donatı bulunmadığından akma davranışı sergilemeden doğrudan gevrek kırılma sergilemiştir. Akma noktasında yük taşıma kapasitesi ve orta açıklık yer değiştirmeleri en yüksek P1S1N0\_0,20\_2,0 kodlu (11. örnek) numunede 47,88 kN ve 2,34 mm olarak ölçülmüştür. Bu değer referans numunelerinin (1. örnek) maksimum yük noktasına göre %77,07 oranında bir artış olarak gözlemlenmiştir. Akma noktası sonrasında çelik lif katkılı serilerde (3 ve 4. örnek) akma davranışının ardından sünek bir davranış göstererek yük taşıma kapasitelerine kadar erişilmiştir. 3 numaralı çelik lif katkılı serilerde, 0,67 a/d oranından 2,96 a/d oranına kadar akma kapasitelerinde sırasıyla %0,43, %43,07 ve %56,28 oranlarında azalmalar görülmüştür. Benzer şekilde POS1N0\_0,70\_1,0 kodlu 4 nolu çelik lif katkılı numunelerde ise 0,67 a/d oranından 2,96 a/d oranına kadar akma kapasiteleri sırasıyla %34,38 , %67,90 ve %69,86 oranlarında azaldığı belirlenmiştir. Çelik lif katkılı numunelere (3. örnek) naylon liflerin eklenmesi sonucunda (5. örnek) akma noktasındaki yük değerleri 0,67 ve 1,11 a/d oranlarında sırasıyla %16,4 ve %6,09 oranında artarken, 2,22 ve 2,96 a/d oranlarında sırasıyla %24,75 ve %20,82 oranında azalmalar belirlenmiştir. Buna karşılık, 4 ve 6 numaralı karışımlarda ise ters biçimde sergilenmiştir. Naylon lif katılmasıyla (6. örnek) 0,67 ve 1,11 a/d oranlarında sırasıyla %16,67 ve %4,09 oranında azalmalar görülürken, 2,22 ve 2,96 a/d oranlarında ise sırasıyla %22,68 ve %0,08 oranında artışlar gözlemlenmiştir. Naylon lifin matrise eklenmesiyle numunelerin farklı yük noktalarında farklı davranışlar sergileyebileceği görülmektedir. Daha düşük uçucu kül oranına sahip numunelerde Naylon lif katkısıyla kesme kırılması davranışının daha fazla hâkim olduğu oranlarda akma noktasındaki taşıma gücü artarken, eğilmeli-kesme davranışı sergileyen daha büyük a/d oranlarında akma noktasındaki taşıma gücünün azaldığı sonucu çıkarılabilir. Uçucu kül miktarının az olduğu PVA lifi içeren (9. ve 10. örnek) numunelerde de Naylon lifli numunelere benzer bir davranış görülmüştür. Sadece çelik lif içeren numunelere kıyasen, UK oranının 0,20 olduğu (9. örnek) kirişlerde 0,67 ve 1,11 a/d oranında akma noktasındaki taşıma gücü sırasıyla %65,96 ve %14,22 oranlarında artışlar görülürken, 2,22 ve 2,96 a/d oranlarında ise %13,31 ve %15,35 miktarında azalmalar belirlenmiştir. Uçucu kül miktarının daha fazla olduğu (10. örnek) 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarında ise çelik lifli numunelere kıyasla sırasıyla %16,75 , %34,93 , %81,84 ve %18,09 oranlarında artışlar belirlenmiştir. Bu sonuçlar neticesinde uçucu kül miktarının düşük olduğu ve kesme kırılmasının daha hâkim olduğu a/d oranlarında çelik lif katkısı üzerine sentetik lifin eklenmesiyle birlikte akma noktasındaki taşıma gücü kapasiteleri olumlu yönde etkilendiği sonucu çıkarılabilir.

Akma noktasındaki taşıma gücünün yanında yapısal boyutlardaki numunelerde önemli bir diğer parametre ise nihai taşıma gücü olarak belirlenmiştir. YPLDÇK karışımlarında en yüksek taşıma gücü kapasitelerine çelik donatılı numunelerde 0,20 UK oranında ulaşılmıştır. D1P0S0N0\_0,20\_1,0 kodlu (13. örnek) kirişlerin maksimum yük kapasitesi 136,3 kN olarak belirlenmiş olup referans numunesine kıyasla (1. örnek) yaklaşık 5 kat daha fazla bir yük taşıma kapasitesi belirlenmiştir. Referans numunelerle lif katkılı numuneler karşılaştırıldığında düşük a/d oranlarında (0,67 ve 1,11) naylon lif ve PVA lif katkılı numunelerin her ikisinde de daha yüksek yük taşıma kapasiteleri elde edilmiştir. Düşük UK içeriğine sahip numunelerde, kullanılan agrega miktarının artmasıyla birlikte 0,67 a/d oranında çelik lifli numunelere Naylon ve PVA lif katkısı eklenince sırasıyla %14,35 ve %30,52 oranlarında artmalar gözlemlenmiştir. Diğer parametreleri sabit kalmak koşuluyla, numunelerin yüksek UK oranına sahip karışımlarında ise sırasıyla %11,75 ve %28,75 oranında düşüşler gözlemlenmiştir. Agrega hacminin artmasıyla birlikte düşük UK içerikli (5 ve 9. örnek) 2,96 a/d oranında Naylon ve PVA lif katkılı (7 ve 11. örnek) numunelerde sırasıyla %3,41 ve %11,44 oranlarında maksimum yük taşıma miktarları artmıştır. Diğer parametreleri sabit yüksek UK içeren numunelerde ve aynı a/d oranında naylon lifli numunelerin yük taşıma kapasitesi %69,08 artarken, PVA lif içeren numunelerin yük taşıma kapasitesi %13,37 oranında azaldığı belirlenmiştir. Nano malzeme içeren karışımlarda ise (15 ve 16. örnekler) referans karışımına (10. örnek) göre maksimum yük taşıma kapasitelerinde genel olarak azalmalar olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, büyük ölçekli numunelerde agrega hacminin artmasıyla bazı numunelerde taşıma kapasitesi artarken, bazı numunelerde azalmalar olduğu görülmüştür. Düşük a/d oranlarında naylon lif ve PVA lifin taşıma kapasitesini olumlu etkilediği görülmüştür. A/d oranının artmasıyla birlikte naylon lif katkılı numunelerin taşıma kapasitelerinde azalmalar belirlenirken, PVA lif katkılı karışımlarda referans numuneye kıyasla artma devam etmiştir. Karışıma nano malzemelerin eklenmesi de genel olarak maksimum yük taşıma kapasitelerinde azalmalara sebep olmuştur. Bu azalmaların sebebi olarak basınç dayanımı performansındaki azalmaların sebebiyet verdiği düşünülmektedir.

Kirişlerin eğilme yüklemesi sonucunda elde edilen enerji yutma kapasiteleri Çizelge 4.4 'te bütün numuneler için hesaplanmıştır. Çizelge 4.4 'ten de anlaşılacağı üzere lif katkısı ve donatı eklenmesiyle numunelerin tamamında bu değerin arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek enerji yutma kapasitesine D1P0S0N0\_0,70\_1,0 kodlu (14. örnek) numuneler de en düşük a/d oranı olan 0,67 a/d oranlarında elde edilmiştir. 0,67 a/d oranında en yüksek ölçülen bu

değerin referans numunesinden (2. örnek) yaklaşık 80 kat daha büyük elde edildiği görülmektedir. Referans numunelerine (1 ve 2. örnekler) çelik lif eklenmesiyle (3 ve 4. örnekler) 0,67 a/d oranında sırasıyla enerji yutma kapasitelerinin 5 kat ve 15 kat arttığı gözlemlenmiştir. 1,11 a/d oranındaki yüklemede ise referans karışımı olan 1. ve 2. Seriler sırasıyla 2,5 ve 5 kat artma belirlenmiştir. Benzer durum 2,22 ve 2,96 a/d oranlarında da gözlemlenmiştir. Çelik lifli karışımlara naylon lif eklenmesiyle birlikte enerji yutma kapasitelerinde de artışlar olmuştur. Çelik lif katkılı düşük UK içerikli numunelerde (3. örnek) naylon katkılı numunelere göre (5. örnek) 0,67 a/d oranında enerji yutma kapasitesi %105,26 oranında artmıştır. Bütün parametreleri sabitken aynı karışımın 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranında sırasıyla %184,3 , %611,8 ve %106,56 oranlarında artmalar olduğu belirlenmiştir. Yüksek UK içeren naylon lif katkılı karışımlarda (6. örnek) sadece çelik lif içeren referans karışımlarına göre (4. örnek) 0,67 a/d oranında %22,5 azalma görülürken, 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarında sırasıyla %281,4 , %172,2 ve %105,23 oranlarında arttığı belirlenmiştir. Düşük UK içeren karışımlarda PVA lifinin naylon lif yerine aynı oranda eklenmesiyle birlikte referans numunelere kıyasla 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarında sırasıyla %107,44 , %365,64 , %504,5 ve %261,83 oranında arttığı görülmüştür. Yüksek UK içeren karışımlarda ise sırasıyla %48,26 , %367,59 , %46,8 ve %124,6 oranlarında arttığı belirlenmiştir. Enerji yutma kapasitesi genel olarak lif katkısının artmasıyla hemen hemen bütün a/d artmıştır. Liflerin eklenmesi kırış numunelerinin yük altında daha sünek davranmasını sağlamasının yanında enerji yutma kapasitesi değerlerinde artışlara sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Karışımlarda agrega miktarının artmasıyla beraber PVA lif içeren numunelerin tamamında, naylon lifli numunelerin de birçoğunda enerji yutma kapasitesinin düştüğü belirlenmiştir. Kırış numunelerinde agrega oranının artmasıyla birlikte davranışın daha gevrek olduğu ve bu sebepten de enerji yutma kapasitesinin azaldığı görülmüştür. Bu tez çalışmasının önemli bir parametresi ise nano malzemelerin karışıma eklenerek kıyaslanmasıdır. Nano silisin eklenmesiyle bütün a/d oranlarındaki enerji yutma kapasitelerinde azalmalar görülmüştür. Nano alüminin enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkisinde ise genel olarak artış olduğu belirlenmiştir. Nano alümin içeren karışımlarda (16. örnek) referans numunesi ile kıyaslandığında (10. örnek) 0,67 , 1,11 ve 2,22 a/d oranlarında sırasıyla %59,64 , %27,36 ve %71,1 oranlarında artmalar olduğu görülmüştür. Aynı numunelerin 2,96 a/d ise %49,89 oranında azaldığı ölçülmüştür. Nano malzemeler genel olarak incelendiğinde; nano silis eklenmesinin kesme davranışı veya kesmeli eğilme davranışı ile ilgili olumlu bir etkisi belirlenememiştir. Nano alümin eklenmesiyle kesme kırılmalarının daha belirgin olduğu düşük a/d oranlarında enerji yutma kapasitesinde artışlar

görülürken, eğilme davranışına daha yakın olan yüksek a/d oranında olumlu bir etkisi oluşmamıştır. Lif ve donatı katkısı içermeyen referans karışımları (1 ve 2. örnekler) çatlak gelişimi görülmeden doğrudan kırılmıştır. Referans karışımlara çelik lif eklenmesiyle birlikte numunelerde sünek davranış gözlemlenmiştir. Çelik lif katkılı numunelerde a/d değeri küçüldükçe (daha kritik yükler altında) çatlak oluşumları mesnet ve yük noktalarına daha yakın bölgelerde görülmüştür. Çelik lif içeren karışımlarda her ne kadar mesnet bölgelerine yakın noktalarda çatlaklar oluşmuş olsa da göçme kırılmaları eğilme çatlaklarından oluştuğu belirlenmiştir. Lif katkılı numunelerin tamamında kesme çatlakları olarak adlandırılan mesnet noktasından yük noktasına doğru ilerleyen kesme çatlakları oluşmamıştır. Sentetik liflerin karışımlara eklenmesiyle de eğilme çatlaklarından kaynaklı göçmeler oluştuğu belirlenmiştir. Sentetik liflerin sadece çelik lif içeren karışımlara eklenmesiyle oluşan çatlakların genişliklerinin de azaldığı belirlenmiştir. Bu da sentetik liflerin eklenmesinin kırılmayı daha sünek hale getirdiğini göstermektedir. Nano alümin eklenmesiyle birlikte numuneler üzerindeki kırılma, nano içermeyen numunelere göre daha sünek olarak gerçekleşmiştir. Öyle ki tez içerisindeki en kritik yükleme noktası olan 0,67 a/d oranındaki yükleme durumunda dahi kırılmalar kirişlerin orta noktalarında oluşmuştur. Yapılan çalışmalardaki verilerle benzer şekilde çelik donatı içeren (13 ve 14. örnek) kirişlerde 0,67 , 1,11 ve 2,22 a/d oranlarında doğrudan kesme kırılmasından kaynaklı göçme görülmüştür. Çelik donatı içeren numunelerde 2,96 a/d oranındaki kirişlerde kesme kırılmasının etkin olduğu görülürken, eğilme çatlaklarının da oluştuğu belirlenmiştir. Çelik donatı ile güçlendirilmiş olan kirişlerde bütün a/d oranlarında kesme çatlaklarından kaynaklı göçmeler oluşurken, lif içeren numunelerde oluşan göçmelerin tamamı eğilme çatlaklarından dolayı oluşmuştur. Çelik donatı içeren numunelerle kıyaslandığında lif içeren numunelerin daha sünek bir davranış sergilendiği belirlenmiştir.

#### 4.3. Kendiliğinden İyileşme Performansı

Ön yükleme sonrasında küçük ölçekli ve büyük ölçekli kiriş numunelerinin çatlak özellikleri sırasıyla Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6 'da gösterilmiştir. Bu tablolarda maksimum çatlak genişliği, toplam çatlak genişliği, iyileşme sonrası çatlak genişliği gibi parametreler dikkate alınarak oluşturulmuştur. Mikro çatlaklar ön yüklemenin geri çekilmesinin hemen ardından çatlak oluşan bölgelerden rastgele seçilmiştir. Ön yüklemenin geri çekilmesinin ardından her bir mikro çatlakta küçük veya orta dereceli kapanmalar meydana gelmiştir. Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6 oluşturulurken, küçük ölçekli ve yapısal ölçekli kirişlerde oluşturulan çatlakların

ölçümleri, a/d oranlarına bakılmaksızın ilgili karışıma ait veriler toplam şeklinde gösterilmiştir. Bu karışım, otojen kendiliğinden iyileşme yeteneği üzerindeki etkisi hakkında daha iyi anlaşılmasına yardımcı olacaktır. İyileşme oranları hesaplanırken Eşitlik 3.1 'de belirtilen denklem kullanılmıştır. Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6 'dan anlaşılabileceği gibi otojen kendiliğinden iyileşmenin olduğu hem küçük ölçekli numunelerde hem de yapısal ölçekli kırımlerde görülebilmektedir. Genel olarak 100 µm genişliğe kadar olan mikro çatlakların 30 günlük kürlenmesi sonucunda hemen hemen bütün karışımlarda iyileştiği görülmektedir. Bunun haricinde daha büyük çatlak genişliklerinin de iyileştiği belirlenmiştir. P1S1N0\_0.70\_1.0 karışımında küçük ölçekli kırımlerde 246 µm ölçülen çatlak genişliğinin kendiliğinden iyileştiği görülmüştür. Büyük ölçekli kırımler de kendiliğinden iyileşebilme çatlak genişliği, küçük ölçekli kırımlere göre daha düşük seviyelerde kalmıştır. Büyük ölçekli kırımlerde kendiliğinden iyileşebilen maksimum çatlak genişliği P0S1N1\_0.70\_2.0 karışımında 138 µm olarak bulunmuştur. Bu etkinin kaynağının nem olduğu düşünülmektedir. Nem kendiliğinden iyileşme performansları üzerinde önemli bir rol oynar ve otojen kendiliğinden iyileşme için yok sayılamayacak bir unsurdur [17,135,136]. Büyük ölçekteki kırımlerin küçük ölçekli kırımlerden daha küçük maksimum genişlikteki çatlakları iyileştirmesinin nedeni olarak geniş yüzeylerdeki ısıtılan suyun daha hızlı buharlaşması olabileceği düşünülmektedir. Reaktifliği yüksek olan ve kendiliğinden iyileşme inceleme süresi sonunda çimentolu matriste reaksiyona girmemiş çimento tanelerinin azalmasına sebep olan silis dumanı varlığında mikro çatlak genişliğinin yüksek olması oldukça önemlidir. Otojen olarak iyileşebilir maksimum çatlak genişliği, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6 'dan görüleceği gibi 30 gün sonrasında ortalama iyileşme oranları küçük ve yapısal kırımler için benzerdir. Büyük ölçekli kırımlerde %78 oranında iyileşmeyle toplam çatlak genişliğini 1240 µm 'den 146 µm 'ye (P1S1N0\_0,20\_2,0 karışımı) düşürmüştür. Küçük ölçekli kırımlerde %68 iyileşme oranıyla toplam çatlak genişliğini 463 um 'den 140 um 'ye (P0S1N0\_0,70\_1,0 karışımı) düşüğü görülmüştür. Bu kendi kendini iyileştirmenin, küçük numunelerde sınırlı olmasında ziyade, (numune boyutundan bağımsız) belirli bir karışımla üretilen bir numunenin geniş alanlarına yayıldığını göstermektedir.

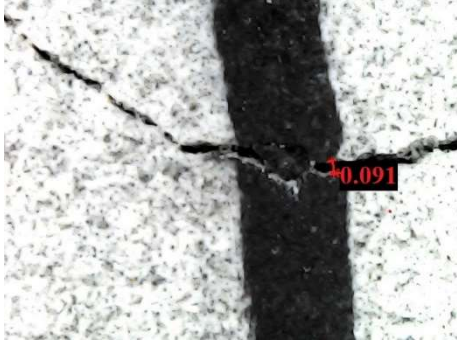
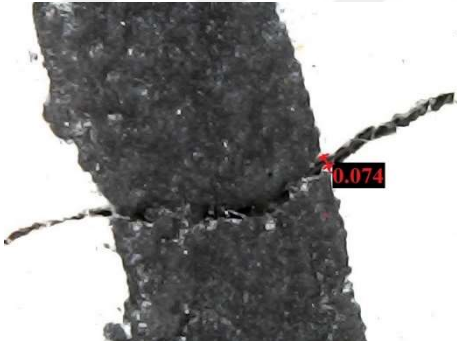
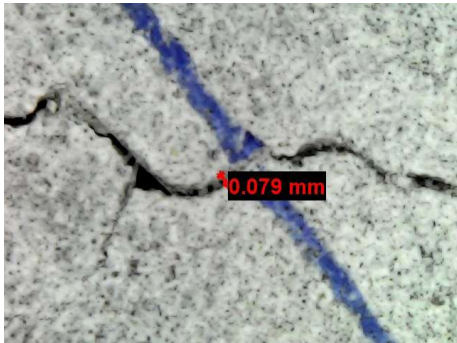
Çizelge 4.5. Küçük ölçekli kırışlerde kendiliğinden iyileşme öncesi ve sonrası mikro çatlakların karakterizasyonu

| Karışım |                    | Test edilen numunelerde oluşan toplam çatlak sayısı |  | Ortalama ilk ÇG (µm) | Max. ÇG (µm) | 30g sonunda kapanan Max. ÇG (µm) | 30g sonunda ortalama ÇG (µm) | Ortalama kendiliğinden iyileşme oranı 30g. (%) | Toplam ÇG (µm) | 30g. Toplam ÇG (µm) |
|---------|--------------------|-----------------------------------------------------|--|----------------------|--------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------|----------------|---------------------|
| #       | ID.                |                                                     |  |                      |              |                                  |                              |                                                |                |                     |
| 3       | P0S1N0_0,20_1,0    | 6                                                   |  | 92                   | 167          | 23                               | 76                           | 26                                             | 552            | 456                 |
| 4       | P0S1N0_0,70_1,0    | 8                                                   |  | 58                   | 106          | 106                              | 18                           | 68                                             | 463            | 140                 |
| 5       | P0S1N1_0,20_1,0    | 6                                                   |  | 114                  | 167          | 32                               | 98                           | 16                                             | 686            | 585                 |
| 6       | P0S1N1_0,70_1,0    | 6                                                   |  | 54                   | 86           | 52                               | 33                           | 50                                             | 323            | 166                 |
| 7       | P0S1N1_0,20_2,0    | 5                                                   |  | 58                   | 111          | 43                               | 38                           | 42                                             | 288            | 188                 |
| 8       | P0S1N1_0,70_2,0    | 8                                                   |  | 130                  | 249          | 117                              | 73                           | 41                                             | 1042           | 584                 |
| 9       | P1S1N0_0,20_1,0    | 5                                                   |  | 154                  | 222          | 83                               | 106                          | 35                                             | 770            | 530                 |
| 10      | P1S1N0_0,70_1,0    | 6                                                   |  | 182                  | 336          | 246                              | 119                          | 31                                             | 1092           | 711                 |
| 11      | P1S1N0_0,20_2,0    | 3                                                   |  | 265                  | 319          | 99                               | 215                          | 18                                             | 795            | 644                 |
| 12      | P1S1N0_0,70_2,0    | 4                                                   |  | 140                  | 352          | 110                              | 90                           | 40                                             | 561            | 360                 |
| 13      | D1P0S0N0_0,20_1,0  | -                                                   |  | -                    | -            | -                                | -                            | -                                              | -              | -                   |
| 14      | D1P0S0N0_0,70_1,0  | -                                                   |  | -                    | -            | -                                | -                            | -                                              | -              | -                   |
| 15      | NS-P1S1N0_0,70_1,0 | 6                                                   |  | 118                  | 205          | 111                              | 70                           | 43                                             | 709            | 422                 |
| 16      | NA-P1S1N0_0,70_1,0 | 6                                                   |  | 117                  | 199          | 29                               | 100                          | 26                                             | 700            | 600                 |

Çizelge 4.6. Yapısal ölçekli kirişlerde kendiliğinden iyileşme öncesi ve sonrası mikro çatlakların karakterizasyonu

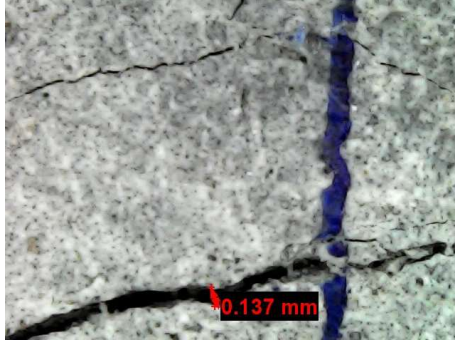
| Karışım |                    | Test edilen numunelerde oluşan toplam çatlak sayısı |  | Ortalama ilk ÇG (µm) | Max. ÇG (µm) | 30g sonunda kapanan Max. ÇG (µm) | 30g sonunda ortalama ÇG (µm) | Ortalama kendiliğinden iyileşme oranı 30g. (%) | Toplam ÇG (µm) | 30g. Toplam ÇG (µm) |
|---------|--------------------|-----------------------------------------------------|--|----------------------|--------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------|----------------|---------------------|
| #       | ID                 |                                                     |  |                      |              |                                  |                              |                                                |                |                     |
| 3       | POS1N0_0,20_1,0    | 8                                                   |  | 108                  | 150          | 49                               | 82                           | 26                                             | 867            | 657                 |
| 4       | POS1N0_0,70_1,0    | 9                                                   |  | 62                   | 119          | 92                               | 36                           | 50                                             | 559            | 328                 |
| 5       | POS1N1_0,20_1,0    | 8                                                   |  | 131                  | 256          | 93                               | 93                           | 32                                             | 1047           | 742                 |
| 6       | POS1N1_0,70_1,0    | 9                                                   |  | 90                   | 160          | 145                              | 46                           | 44                                             | 809            | 416                 |
| 7       | POS1N1_0,20_2,0    | 6                                                   |  | 120                  | 205          | 105                              | 59                           | 61                                             | 719            | 352                 |
| 8       | POS1N1_0,70_2,0    | 4                                                   |  | 145                  | 234          | 138                              | 88                           | 34                                             | 578            | 353                 |
| 9       | P1S1N0_0,20_1,0    | 3                                                   |  | 119                  | 122          | 95                               | 66                           | 44                                             | 358            | 199                 |
| 10      | P1S1N0_0,70_1,0    | 10                                                  |  | 249                  | 950          | 95                               | 79                           | 63                                             | 2494           | 794                 |
| 11      | P1S1N0_0,20_2,0    | 4                                                   |  | 310                  | 604          | 21                               | 49                           | 78                                             | 1240           | 146                 |
| 12      | P1S1N0_0,70_2,0    | 3                                                   |  | 409                  | 519          | 65                               | 365                          | 13                                             | 1227           | 1094                |
| 13      | D1P0S0N0_0,20_1,0  | 4                                                   |  | 117                  | 274          | 69                               | 75                           | 45                                             | 467            | 301                 |
| 14      | D1P0S0N0_0,70_1,0  | 4                                                   |  | 86                   | 120          | 54                               | 45                           | 52                                             | 342            | 178                 |
| 15      | NS-P1S1N0_0,70_1,0 | 9                                                   |  | 123                  | 310          | 174                              | 58                           | 53                                             | 1106           | 523                 |
| 16      | NA-P1S1N0_0,70_1,0 | 8                                                   |  | 55                   | 123          | 98                               | 27                           | 43                                             | 439            | 217                 |

30 günlük kür sonrasında iyileşebilir çatlak genişliğinin seviyesi, dayanıklılık açısından oldukça önemlidir. Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6 'de gösterildiği üzere başlangıçta oluşan çatlakların bazıları tamamen kendiliğinden iyileşmesine rağmen bazıları iyileşememiştir. Tamamen iyileşemeyen mikro çatlaklar ise kısmen iyileşmiş olsa da başlangıçta olduğu çatlak genişliğinden daha küçük seviyelere düşmüştür. Bu sayede yapısal olarak kullanımı durumunda genel hizmet verilebilirliğini zararlı kabul edilmeyen seviyelere düşmüştür. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki ağır çevresel maruziyet koşulları altında hizmet veren betonarme yapıların izin verilen maksimum çatlak genişlikleri 100 ile 330  $\mu\text{m}$  arasındadır [45]. Başka bir deyişle belirli bir betonarme elemanın yüzeyde oluşan çatlak genişlikleri bu sınırlar içerisinde kaldığı sürece, bu elemanın bütünlüğünü koruması ve beklenen hizmet ömrünü tamamlaması mümkündür. 30 günlük yapılan kendiliğinden iyileşme kürlemesi sonrasında mikro çatlak genişliklerinin karışımların çoğu için 100  $\mu\text{m}$  'nin çok altında olduğu görülmektedir. Belirli karışımlarda bu genel eğilimden sapma görülse de ortalama çatlak genişliği betonarme yapılar için verilen sınırlar dışarısında kalan bir tek P1S1N0\_0,70\_2,0 kodlu karışımda 365  $\mu\text{m}$  olarak görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmadaki karışımlarla inşa edilen yapıların, otojen kendiliğinden iyileşme kabiliyetinin yardımıyla ciddi bir hasar aldıklarında dahi, çok daha uzun süre dayanıklı kalabileceğinin bir göstergesidir. Ayrıca bu çalışmadaki numunelerin kendiliğinden iyileşme durumunda nem açısından zengin ortamlara daha uzun süre maruz kalmaları durumunda iyileşebilme ihtimalinin artması durumu da söz konusudur. Resim 4.16 'de farklı karışımlara ait mikro çatlaklar ve iyileşme sonrası durumlarını anlatan fotoğraflar gösterilmiştir. Mikro çatlaklar içindeki kendi kendini iyileştiren ürünlerin doğası ayrıntılı bir şekilde belirlenemese de, fotoğraflardaki çatlak açıklıklarını dolduran beyaz renklerin kalsiyum karbonat olduğu düşünülmektedir. Ayrıca beyaz kapatma haricinde matrise benzer şekilde farklı bir renklenme olmadan da kapanma şekilleri görülmüştür. Bu kapatan ürünün kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ürünleri olduğu düşünülmektedir. Kendiliğinden iyileşme performansında seçilen karışımların tamamında UK/PÇ, A/B ve nano malzeme varlığından bağımsız olarak bütün karışımlarda belirli miktarlarda iyileşmeler görülmüştür. Bu çalışmada üretilen karışımların ana kendi kendini iyileştiren ürünlerinin, karışım bileşimlerinden bağımsız ve esas olarak C-S-H jelleri ile birlikte kalsiyum karbonat kristalleri olduğunu göstermiştir.

| ID              | Ön yükleme                                                                          | Kendiliğinden iyileşme sonrası                                                       | a/d  |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------|
| POS1N0_0,70_1,0 |    |    | 1,11 |
| POS1N0_0,70_1,0 |   |   | 2,22 |
| POS1N1_0,20_2,0 |  |  | 2,22 |
| POS1N1_0,70_2,0 |  |  | 0,67 |

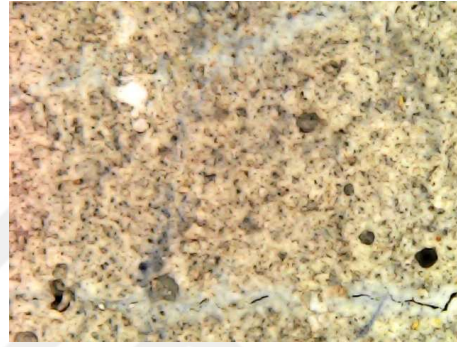
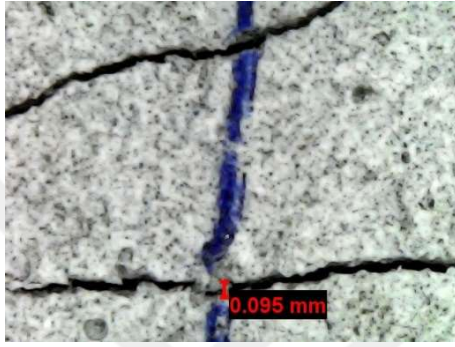
Resim 4.16. Kiriş numunelerinin çatlak oluşumu ve iyileşme sonrası bazı görüntü örnekleri

P1S1N0\_0,20\_1,0



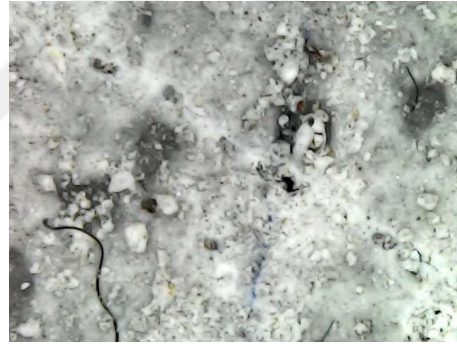
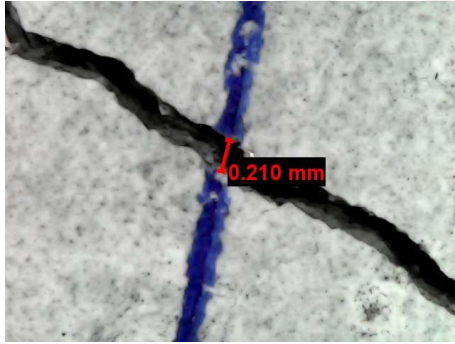
0,67

P1S1N0\_0,70\_1,0



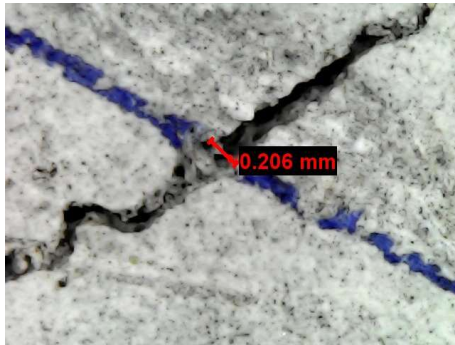
2,96

P1S1N0\_0,20\_2,0



2,22

P1S1N0\_0,20\_2,0



2,96

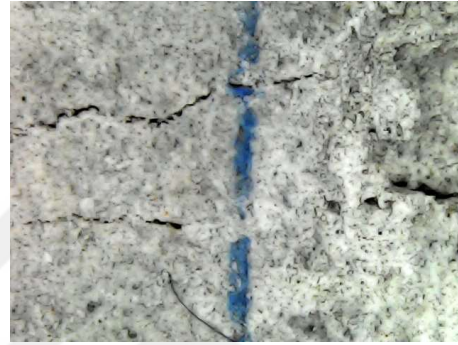
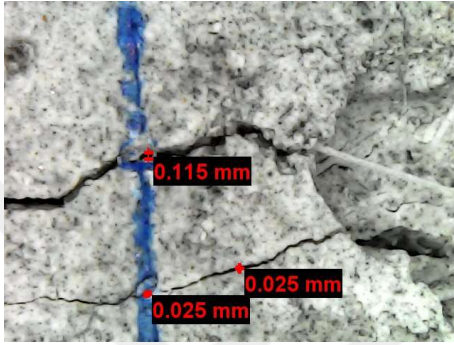
Resim 4.16. (devam) Kiriş numunelerinin çatlak oluşumu ve iyileşme sonrası bazı görüntü örnekleri

P1S1N0\_0,70\_2,0



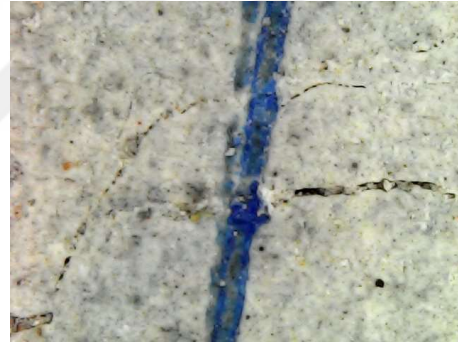
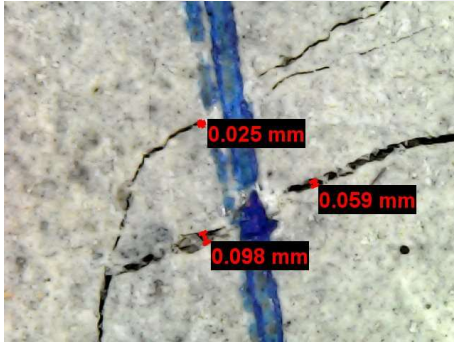
0,67

NS-P1S1N0\_0,70\_1,0



2,96

NA-P1S1N0\_0,70\_1,0



2,96

Resim 4.16. (devam) Kiriş numunelerinin çatlak oluşumu ve iyileşme sonrası bazı görüntü örnekleri

#### 4.4. A/d Oranının İyileşme Performansına Etkisi

Farklı a/d oranlarında ön yükleme sonucunda oluşan çatlakların, ön yükleme sonrasındaki toplam çatlak genişlikleri ve kendiliğinden iyileşme sonrasındaki toplam çatlak genişlikleri arasındaki oran iyileşme oranı olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu iyileşme oranı sonuçları büyük ölçekli ve küçük ölçekli kirişler için ayrı ayrı Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Farklı a/d oranlarında elde edilen çatlakların iyileşme oranları

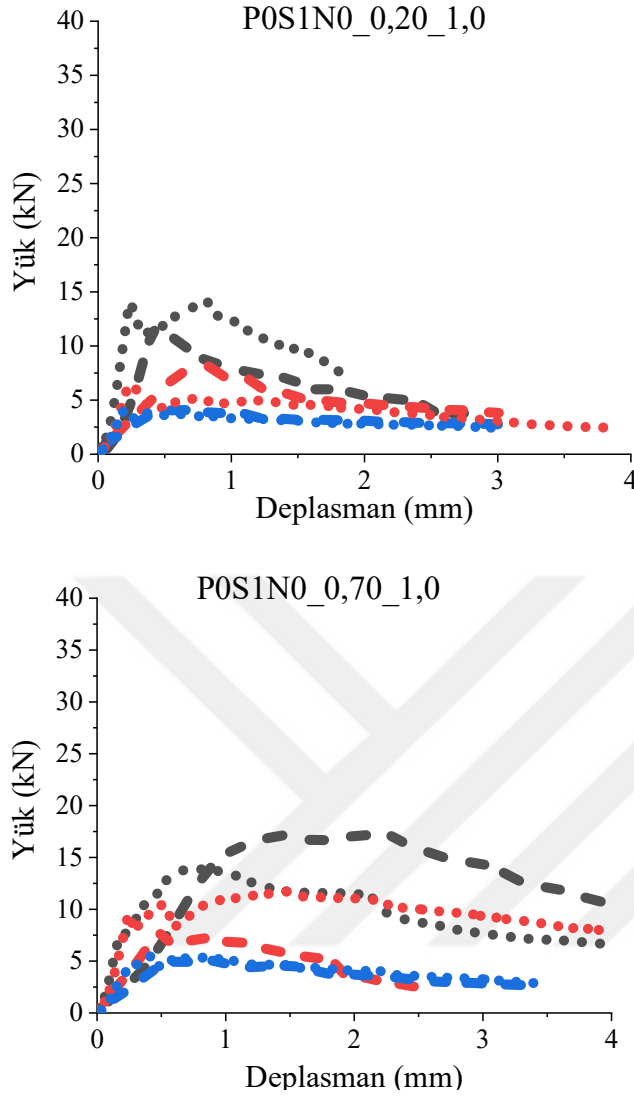
| Karışım ID         | Küçük Ölçekli Kiriş |        |        | Büyük Ölçekli Kiriş |         |         |         |
|--------------------|---------------------|--------|--------|---------------------|---------|---------|---------|
|                    | 0,67                | 1,11   | 2,00   | 0,67                | 1,11    | 2,22    | 2,96    |
| P0S1N0_0,20_1,0    | 11,80%              | 15,57% | 42,50% | 30,72%              | 21,00%  | 24,83%  | 14,80%  |
| P0S1N0_0,70_1,0    | 69,51%              | 76,07% | 84,23% | 1,03%               | 21,79%  | 54,24%  | 100,00% |
| P0S1N1_0,20_1,0    | 4,19%               | 3,94%  | 16,54% | 53,37%              | 7,67%   | 30,87%  | 35,05%  |
| P0S1N1_0,70_1,0    | 33,33%              | 19,63% | 40,00% | 27,61%              | 3,27%   | 100,00% | 86,05%  |
| P0S1N1_0,20_2,0    | 12,61%              | 1,27%  | 35,29% | 14,61%              | 39,51%  | 100,00% | 100,00% |
| P0S1N1_0,70_2,0    | 28,53%              | 31,99% | 65,16% | 13,92%              | 24,02%  | 38,37%  | 58,97%  |
| P1S1N0_0,20_1,0    | 56,99%              | 30,07% | 0,90%  | 44,54%              | 78,51%  | 26,09%  | 27,87%  |
| P1S1N0_0,70_1,0    | 50,99%              | 7,55%  | 12,32% | 22,69%              | 84,79%  | 85,07%  | 88,00%  |
| P1S1N0_0,20_2,0    | 7,37%               | 31,03% | 16,23% | 33,64%              | 100,00% | 100,00% | 100,00% |
| P1S1N0_0,70_2,0    | 31,25%              | 21,85% | 72,22% | 5,42%               | 8,48%   | 20,00%  | 26,83%  |
| D1P0S0N0_0,20_1,0  | -                   | -      | -      | 25,18%              | 46,59%  | 44,44%  | 62,75%  |
| D1P0S0N0_0,70_1,0  | -                   | -      | -      | 41,67%              | 73,68%  | 54,00%  | 39,17%  |
| NS-P1S1N0_0,70_1,0 | 31,95%              | 54,15% | 36,42% | 46,06%              | 57,78%  | 27,98%  | 90,71%  |
| NA-P1S1N0_0,70_1,0 | 7,63%               | 22,97% | 9,52%  | 27,27%              | 35,90%  | 41,98%  | 75,80%  |

Çizelge 4.7 incelendiğinde büyük ölçekli ve küçük ölçekli kirişler için iyileşme oranlarında doğrusal bir değişim görülememektedir. Küçük ölçekli numuneler incelendiğinde genellikle a/d oranı ile birlikte çatlak iyileşme oranında da artışlar görülmüştür. Bunun tam tersi görülen numunelerde ise oluşan çatlaklar genel olarak kiriş orta noktasına yakın bölgelerde oluşan çatlamalardan olduğu düşünülmektedir. Kiriş orta noktasında kürleme işleminin daha etkin olduğu, nemli ortamda kürlenme işleminde kurumanın köşelerden başlayarak orta noktaya doğru ilerlediği düşünüldüğünde orta noktaların daha fazla süreyle nemli kaldığı anlaşılabilmektedir. Bu yüzden iyileşme oranları orta noktalarda oluşan çatlaklarda daha etkin olmaktadır. Bunun yanı sıra her ne kadar kırılmalar sünek ve eğilme kırılması olsa da küçük a/d oranlarında yapılan yüklemelerde çatlak kontrolü oldukça zordur. Küçük a/d oranlarında belirli bir yük altında çatlak açılmaları ve ilerlemeleri, yüksek a/d oranlarındaki kirişlere kıyasla daha hızlı olmaktadır. Bu sebeple en fazla iyileşen numunede dahi, düşük a/d oranlarında elde edilen çatlak genişliklerinin iyileşme oranları %69 olurken, yüksek a/d oranlarında bu oran %84 olmuştur.

Büyük ölçekli kırıış numunelerin farklı a/d oranlarındaki iyileşme oranlarında değışimler yüzdesel olarak Çizelge 4.7’da gösterilmiştir. Küçük ölçekli kırıışlerin daha büyük çaptaki çatlakları iyileştirdiğı daha önceki başlıklarda tartışılarak, sebebinin büyük yüzey alanındaki büyük nem kaybı olabileceğine değinilmiştir. Büyük ölçekli numunelerdeki iyileşme oranlarının daha yüksek görülmesinin sebebi olarak, daha küçük çatlak genişliğine sahip olmasıdır. Ayrıca büyük ölçekli kırıışler incelendiğinde a/d oranının artmasıyla birlikte genel olarak iyileşme oranlarının da arttığı, bazı numunelerde bu oranların %100’e ulaşarak çatlakların tamamen kapandığı görülmektedir. Yüksek a/d oranlarında kırıışlerdeki maksimum sehimler daha düşük miktarlarda kaldığı Çizelge 4.3 ’ten görülebilmektedir. Daha düşük sehim seviyelerinde oluşan çatlak genişlikleri, daha küçük genişliklerde ve sayı olarak daha fazla oluşmaktadır. A/d oranı azalmasıyla birlikte sehim miktarı artarak, çatlak oluşum yeri yükleme noktasına yaklaşmaktadır. Orta noktadan uzaklaşan çatlaklardaki iyileşme oranı da ortamdaki nemin azalmasıyla birlikte düşmektedir. A/d oranının azalmasıyla birlikte düşen iyileşme oranının bir diğere sebebinin de bu azalma olduğu düşünölmektedir.

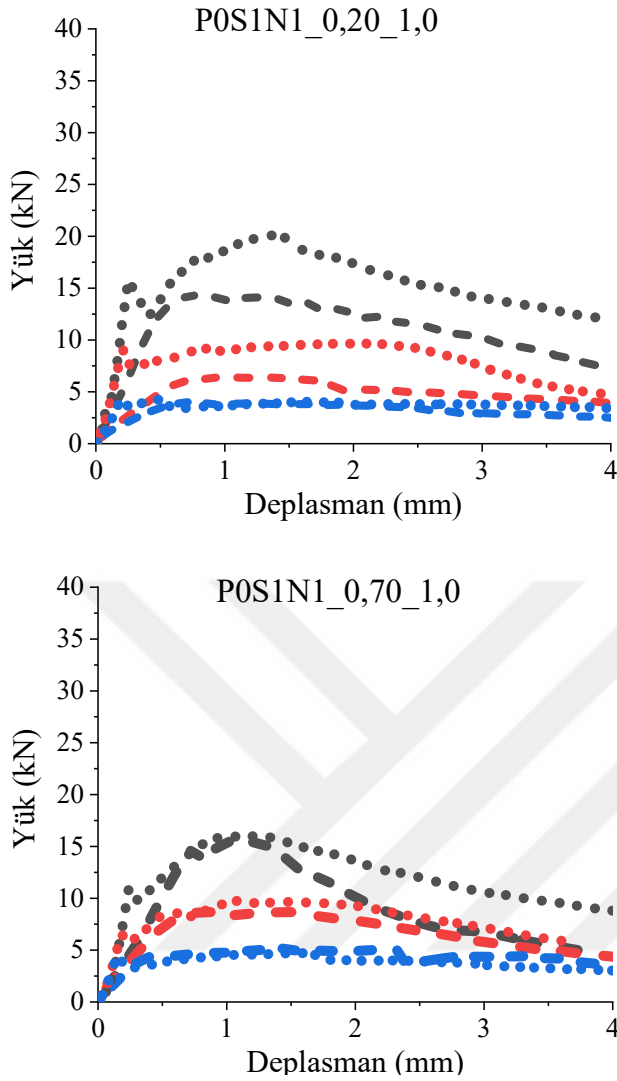
#### **4.5. Kendiliğinden İyileşme Performansı Sonrası Eğilme Yükleme Performansları**

Çalışma içerisinde farklı a/d oranlarındaki ön yüklemeler ardından oluşan çatlaklar ölçölmüş, 30 gün süreyle yapılan iyileşme sonrasında çatlakların nihai genişlikleri belirlenerek numuneler 58 gün sonunda aynı a/d oranında tekrardan eğilme yükleme altında kırılmıştır. 28 gün sonunda doğrudan kırılan numuneler ile iyileşme sonrasında kırılan numunelerin maksimum yük taşıma kapasiteleri kıyaslanmıştır. Bu sayede yapısal olarak şiddetli bir yükleme altında çatlak oluşumu sonrasında, kırıış numunelerin çatlaklarının kendiliğinden iyileşmesi sonucunda mevcut kırıışlerin yük taşıma kapasitelerindeki artışlar ve azalmalar belirlenmiştir. Şekil 4.18-Şekil 4.30 ‘da küçük ölçekli ve büyük ölçekli kırıışlerin performanslarının karşılaştırılması verilmiştir. Bu şekillere göre küçük kırıışler için grafikler üzerinde bulunan renklendirmelerde Gri:0,67 , Kırmızı:1,11 , Mavi:2,00 a/d oranı olarak belirlenmiştir. Çizgi türlerinde ise Noktalı çizgi: 28 gün, Kesikli çizgi: 28+30 gün kendiliğinden iyileşme sonrası yüklemeyi temsil etmektedir. Büyük ölçekli kırıışlerde ise grafikler üzerinde bulunan renklendirmelerde Gri:0,67 , Kırmızı:1,11 , Mavi:2,22 ve Yeşil:2,96 a/d oranı olarak belirtilmiştir. Çizgi tipleri küçük ölçekli kırıışler ile büyük ölçekli kırıışler için aynı olacak şekilde hazırlanmıştır.



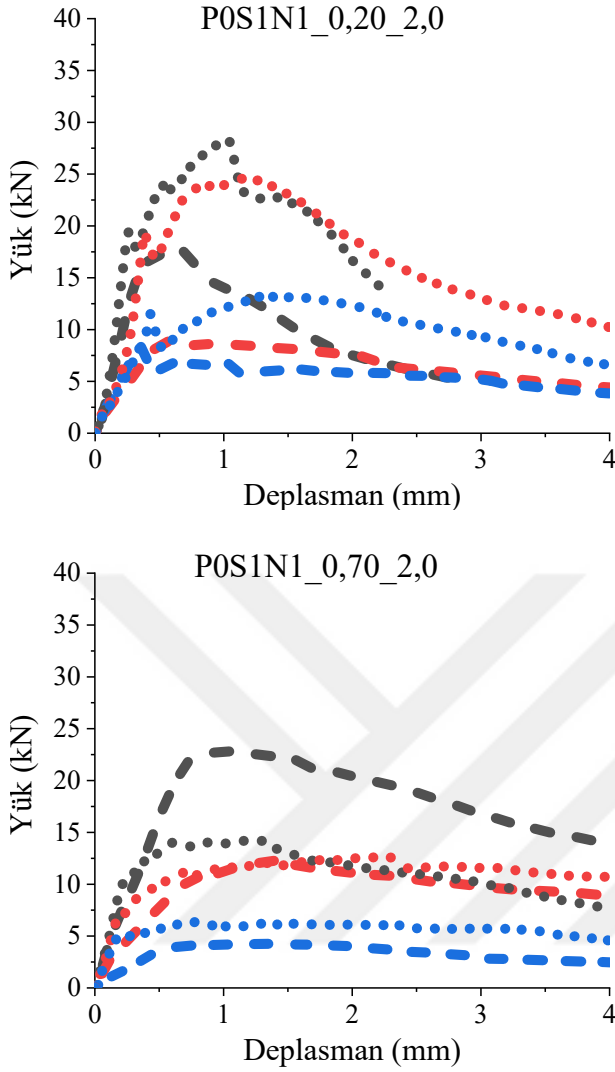
Şekil 4.18. Küçük ölçekli P0S1N0\_0,20\_1,0 ve P0S1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması

P0S1N0\_0,20\_1,0 ve P0S1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin üç farklı a/d oranındaki 28 günlük ve kendiliğinden iyileşme sonrası 58 günlük numunelerin yük-deplasman eğrileri Şekil 4.18 'de verilmiştir. 58 gün sonunda doğrudan kırılan P0S1N0\_0,20\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 11,4 kN, 8,2 kN ve 4,1 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 0,43 mm, 0,76 mm ve 0,57 mm olarak belirlenmiştir. P0S1N0\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67, 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 17,2 kN, 7,7 kN ve 5,1 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 2,22 mm, 0,53 mm ve 0,92 mm olarak belirlenmiştir.



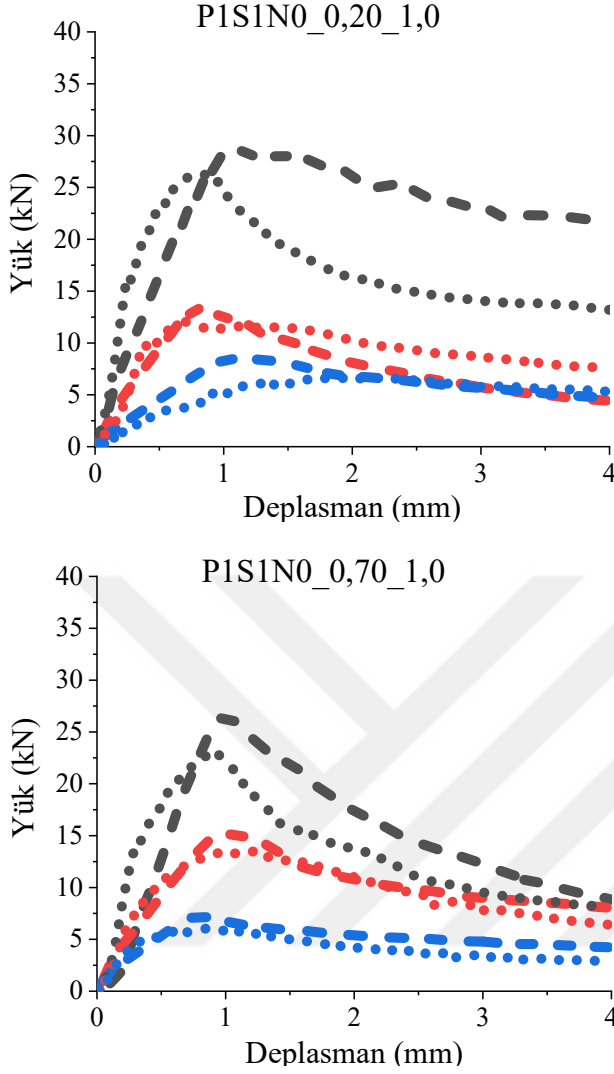
Şekil 4.19. Küçük ölçekli P0S1N1\_0,20\_1,0 ve P0S1N1\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması

P0S1N1\_0,20\_1,0 ve P0S1N1\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin üç farklı a/d oranındaki 28 günlük ve kendiliğinden iyileşme sonrası 58 günlük numunelerin yük-deplasman eğrileri Şekil 4.19 'da verilmiştir. 58 gün sonunda doğrudan kırılan P0S1N1\_0,20\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 14,4 kN, 6,5 kN ve 4,1 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 0,82 mm, 1,06 mm ve 0,76 mm olarak belirlenmiştir. P0S1N1\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67, 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 15,6 kN, 8,8 kN ve 5,1 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 1,13 mm, 0,91 mm ve 1,34 mm olarak belirlenmiştir.



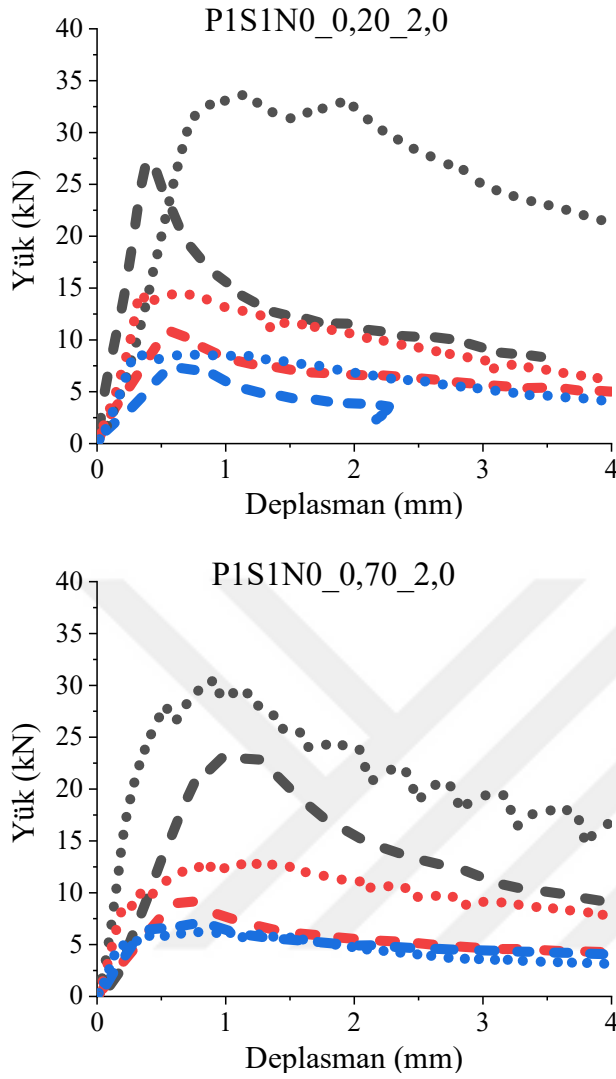
Şekil 4.20. Küçük ölçekli P0S1N1\_0,20\_2,0 ve P0S1N1\_0,70\_2,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması

P0S1N1\_0,20\_2,0 ve P0S1N1\_0,70\_2,0 kodlu numunelerin üç farklı a/d oranındaki 28 günlük ve kendiliğinden iyileşme sonrası 58 günlük numunelerin yük-deplasman eğrileri Şekil 4.20 'de verilmiştir. 58 gün sonunda doğrudan kırılan P0S1N1\_0,20\_2,0 numunesi için 0,67 , 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 17,6 kN, 8,9 kN ve 8,1 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 0,61 mm, 0,62 mm ve 0,34 mm olarak belirlenmiştir. P0S1N1\_0,70\_2,0 numunesi için 0,67, 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 22,8 kN, 12,3 kN ve 4,2 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 1,06 mm, 1,44 mm ve 1,04 mm olarak belirlenmiştir.



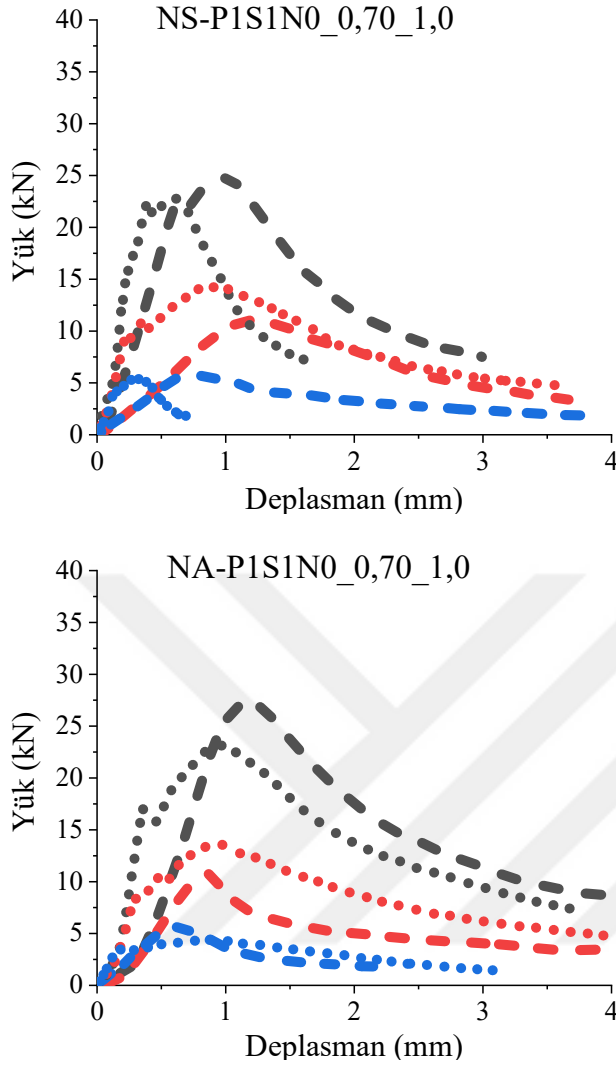
Şekil 4.21. Küçük ölçekli P1S1N0\_0,20\_1,0 ve P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması

P1S1N0\_0,20\_1,0 ve P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin üç farklı a/d oranındaki 28 günlük ve kendiliğinden iyileşme sonrası 58 günlük numunelerin yük-deplasman eğrileri Şekil 4.21 'de verilmiştir. 58 gün sonunda doğrudan kırılan P1S1N0\_0,20\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 28,5 kN, 13,4 kN ve 8,5 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 1,01 mm, 0,83 mm ve 1,09 mm olarak belirlenmiştir. P1S1N0\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67, 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 26,3 kN, 15,1 kN ve 7,3 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 0,96 mm, 0,93 mm ve 0,78 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.22. Küçük ölçekli P1S1N0\_0,20\_2,0 ve P1S1N0\_0,70\_2,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması

P1S1N0\_0,20\_2,0 ve P1S1N0\_0,70\_2,0 kodlu numunelerin üç farklı a/d oranındaki 28 günlük ve kendiliğinden iyileşme sonrası 58 günlük numunelerin yük-deplasman eğrileri Şekil 4.22 'de verilmiştir. 58 gün sonunda doğrudan kırılan P1S1N0\_0,20\_2,0 numunesi için 0,67 , 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 27,4 kN, 10,8 kN ve 7,3 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 0,42 mm, 0,57 mm ve 0,61mm olarak belirlenmiştir. P1S1N0\_0,70\_2,0 numunesi için 0,67, 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 23,0 kN, 9,2 kN ve 7,0 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 1,02 mm, 0,75 mm ve 0,59 mm olarak belirlenmiştir.

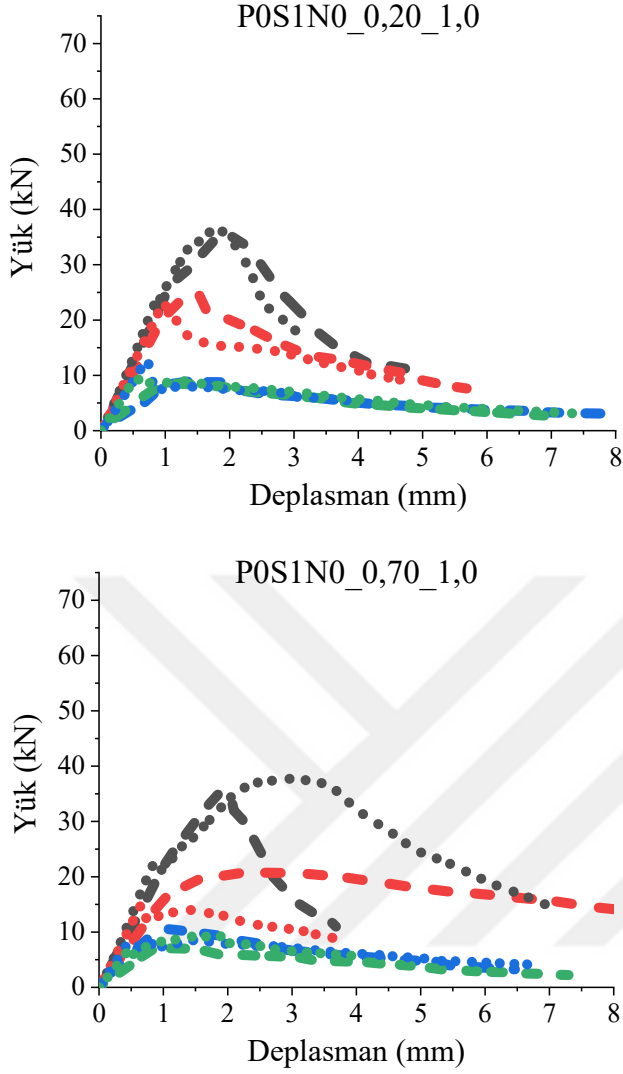


Şekil 4.23. Küçük ölçekli NS-P1S1N0\_0,70\_1,0 ve NA-P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması

NS-P1S1N0\_0,70\_1,0 ve NA-P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin üç farklı a/d oranındaki 28 günlük ve kendiliğinden iyileşme sonrası 58 günlük numunelerin yük-deplasman eğrileri Şekil 4.23 'te verilmiştir. 58 gün sonunda doğrudan kırılan NS-P1S1N0\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 24,6 kN, 11,1 kN ve 5,8 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 1,05 mm, 1,26 mm ve 0,70 mm olarak belirlenmiştir. NA-P1S1N0\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 ve 2,00 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 27,2 kN, 10,8 kN ve 5,7 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 1,16 mm, 0,83 mm ve 0,58 mm olarak belirlenmiştir.

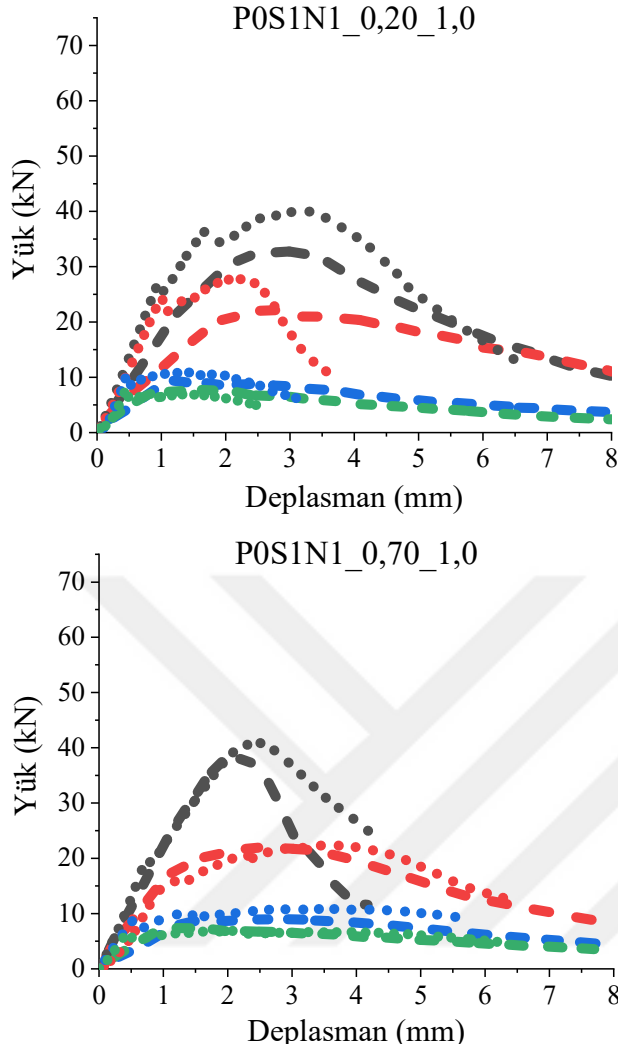


Resim 4.17. Kendiliğinden iyileşme sonrası küçük kırışların kırılma görüntüleri a) 3 ve 4. seri b) 5 ve 6. seri c) 7 ve 8. seri d) 9 ve 10. seri e) 11 ve 12. seri f) 15 ve 16. seri



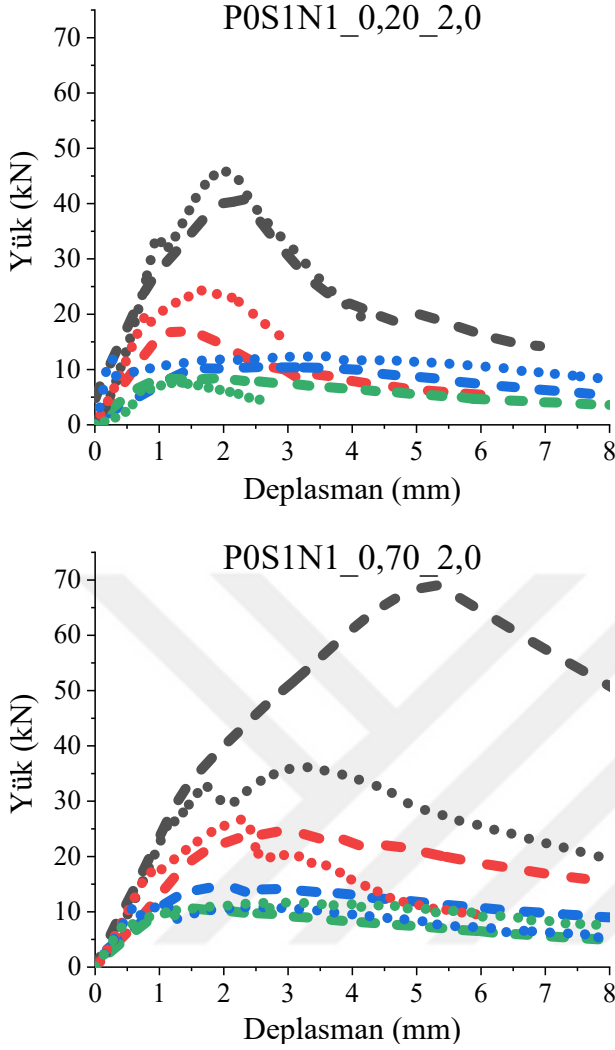
Şekil 4.24. Büyük ölçekli POS1N0\_0,20\_1,0 ve POS1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması

POS1N0\_0,20\_1,0 ve POS1N0\_0,70\_1,0 kodlu büyük ölçekli numunelerin dört farklı a/d oranındaki 28 günlük ve kendiliğinden iyileşme sonrası 58 günlük numunelerin yük-deplasman eğrileri Şekil 4.24 'te verilmiştir. 58 gün sonunda doğrudan kırılan POS1N0\_0,20\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 35,5 kN, 24,9 kN, 8,8 kN ve 8,3 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 1,94 mm, 1,37 mm, 1,32 mm ve 1,04 mm olarak belirlenmiştir. POS1N0\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 36,0 kN, 20,8 kN, 10,4 kN ve 7,1 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 1,97 mm, 2,44 mm, 0,95 mm ve 0,91 mm olarak belirlenmiştir.



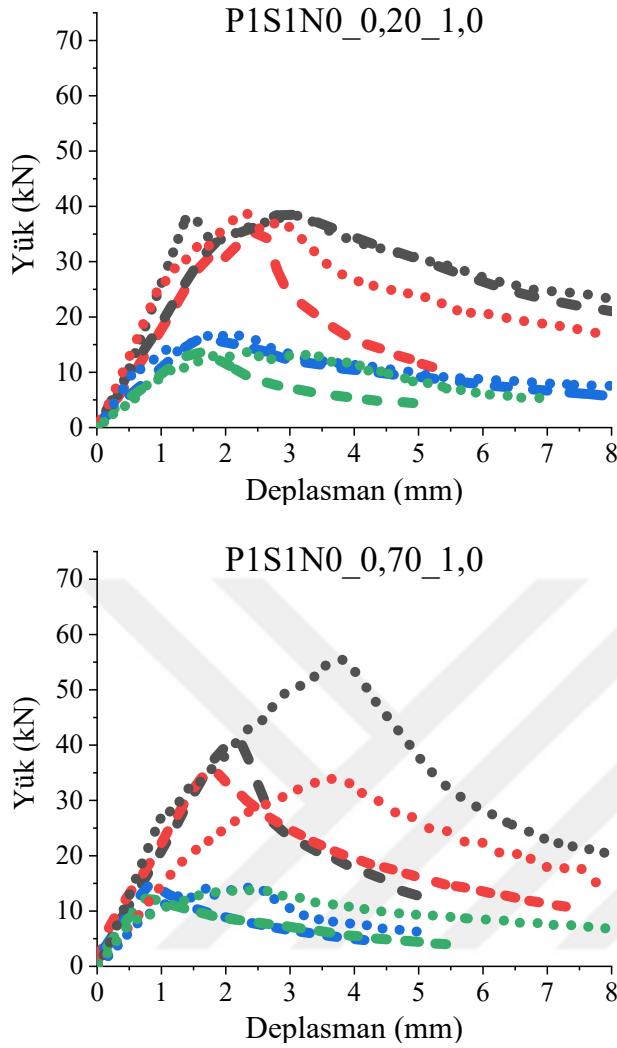
Şekil 4.25. Büyük ölçekli P0S1N1\_0,20\_1,0 ve P0S1N1\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması

P0S1N1\_0,20\_1,0 ve P0S1N1\_0,70\_1,0 kodlu büyük ölçekli numunelerin dört farklı a/d oranındaki 28 günlük ve kendiliğinden iyileşme sonrası 58 günlük numunelerin yük-deplasman eğrileri Şekil 4.25 'te verilmiştir. 58 gün sonunda doğrudan kırılan P0S1N1\_0,20\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 32,7 kN, 22,1 kN, 9,3 kN ve 7,5 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 2,83 mm, 2,79 mm, 1,25 mm ve 1,32 mm olarak belirlenmiştir. P0S1N1\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 38,1 kN, 22,1 kN, 8,7 kN ve 7,4 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 2,16 mm, 2,43 mm, 1,54 mm ve 1,23 mm olarak belirlenmiştir.



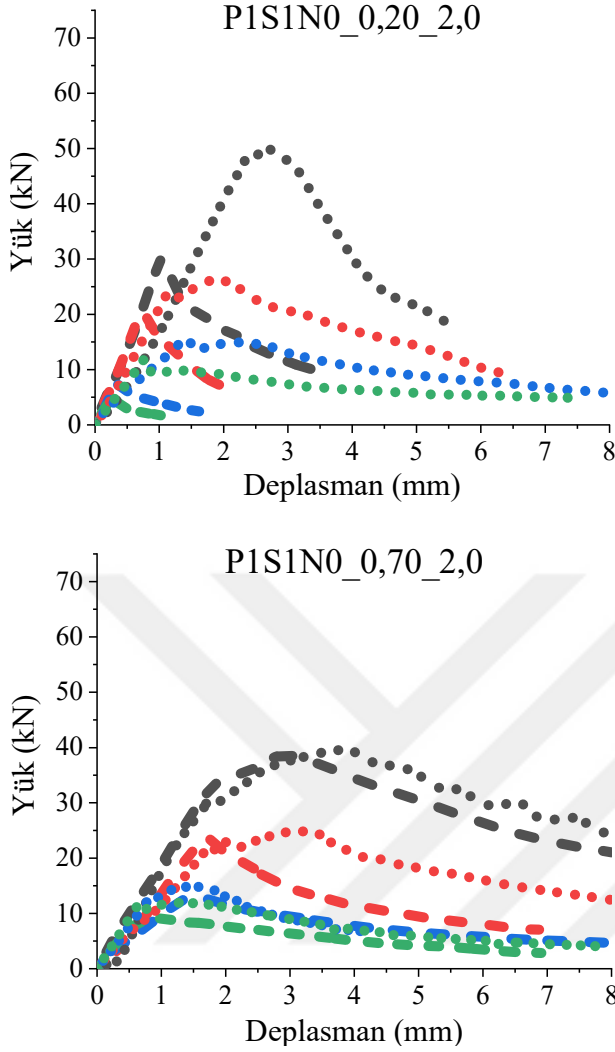
Şekil 4.26. Büyük ölçekli P0S1N1\_0,20\_2,0 ve P0S1N1\_0,70\_2,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması

P0S1N1\_0,20\_2,0 ve P0S1N1\_0,70\_2,0 kodlu büyük ölçekli numunelerin dört farklı a/d oranındaki 28 günlük ve kendiliğinden iyileşme sonrası 58 günlük numunelerin yük-deplasman eğrileri Şekil 4.26 'da verilmiştir. 58 gün sonunda doğrudan kırılan P0S1N1\_0,20\_2,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 41,0 kN, 17,4 kN, 10,2 kN ve 8,4 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 2,30 mm, 1,30 mm, 1,66 mm ve 1,19 mm olarak belirlenmiştir. P0S1N1\_0,70\_2,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 69,0 kN, 24,3 kN, 14,6 kN ve 10,6 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 5,28 mm, 2,46 mm, 1,96 mm ve 1,45 mm olarak belirlenmiştir.



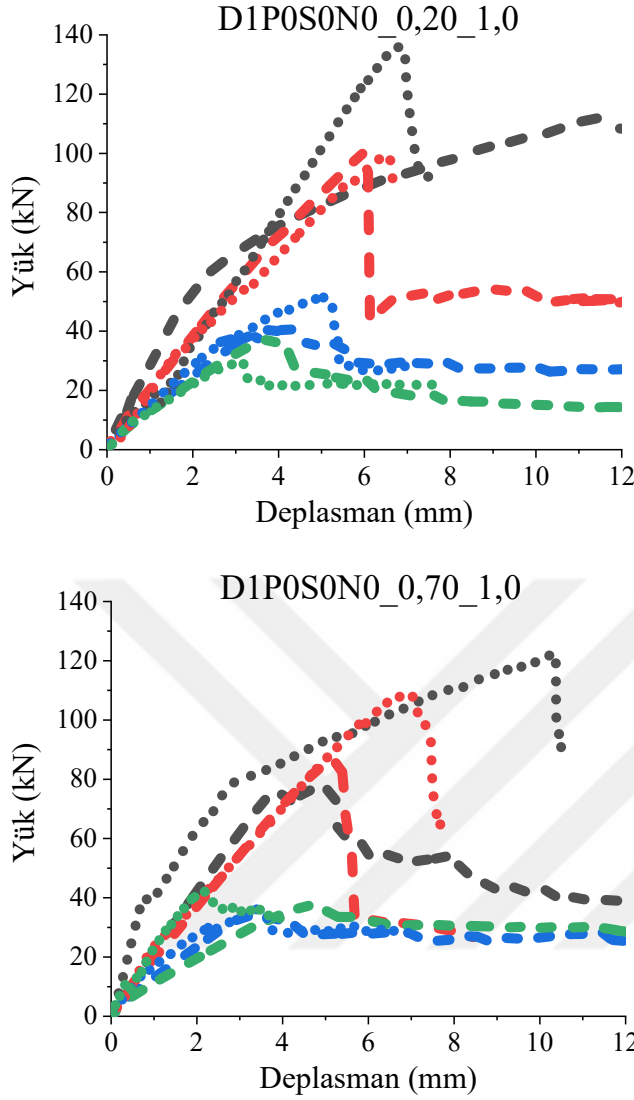
Şekil 4.27. Büyük ölçekli P1S1N0\_0,20\_1,0 ve P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması

P1S1N0\_0,20\_1,0 ve P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu büyük ölçekli numunelerin dört farklı a/d oranındaki 28 günlük ve kendiliğinden iyileşme sonrası 58 günlük numunelerin yük-deplasman eğrileri Şekil 4.27 'de verilmiştir. 58 gün sonunda doğrudan kırılan P1S1N0\_0,20\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 38,5 kN, 35,3 kN, 16,2 kN ve 13,7 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 2,92 mm, 2,53 mm, 1,74 mm ve 1,56 mm olarak belirlenmiştir. P1S1N0\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 41,0 kN, 35,2 kN, 14,9 kN ve 12,2 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 2,21 mm, 1,72 mm, 0,86 mm ve 0,75 mm olarak belirlenmiştir.



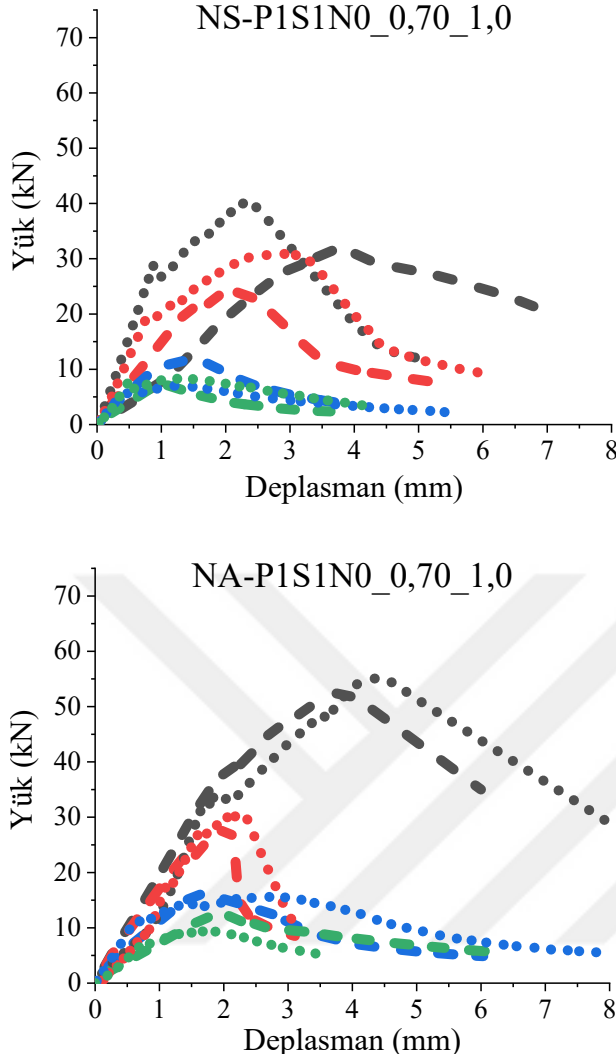
Şekil 4.28. Büyük ölçekli P1S1N0\_0,20\_2,0 ve P1S1N0\_0,70\_2,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması

P1S1N0\_0,20\_2,0 ve P1S1N0\_0,70\_2,0 kodlu büyük ölçekli numunelerin dört farklı a/d oranındaki 28 günlük ve kendiliğinden iyileşme sonrası 58 günlük numunelerin yük-deplasman eğrileri Şekil 4.28 'de verilmiştir. 58 gün sonunda doğrudan kırılan P1S1N0\_0,20\_2,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 30,0 kN, 20,2 kN, 7,3 kN ve 4,5 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 1,06 mm, 0,73 mm, 0,35 mm ve 0,29 mm olarak belirlenmiştir. P1S1N0\_0,70\_2,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 38,5 kN, 23,0 kN, 13,0 kN ve 9,12 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 2,92 mm, 1,68 mm, 1,45 mm ve 1,00 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.29. Büyük ölçekli ve donatılı D1P0S0N0\_0,20\_1,0 ve D1P0S0N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması

D1P0S0N0\_0,20\_1,0 ve D1P0S0N0\_0,70\_1,0 kodlu büyük ölçekli numunelerin dört farklı a/d oranındaki 28 günlük ve kendiliğinden iyileşme sonrası 58 günlük numunelerin yük-deplasman eğrileri Şekil 4.29 'da verilmiştir. 58 gün sonunda doğrudan kırılan D1P0S0N0\_0,20\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 64,5 kN, 100,6 kN, 40,3 kN ve 36,7 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 2,82 mm, 6,04 mm, 3,77 mm ve 3,64 mm olarak belirlenmiştir. D1P0S0N0\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 76,4 kN, 85,6 kN, 33,8 kN ve 37,3 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 3,83 mm, 5,28 mm, 3,20 mm ve 4,72 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.30. Büyük ölçekli NS-P1S1N0\_0,70\_1,0 ve NA-P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası yük-deplasman kıyaslaması

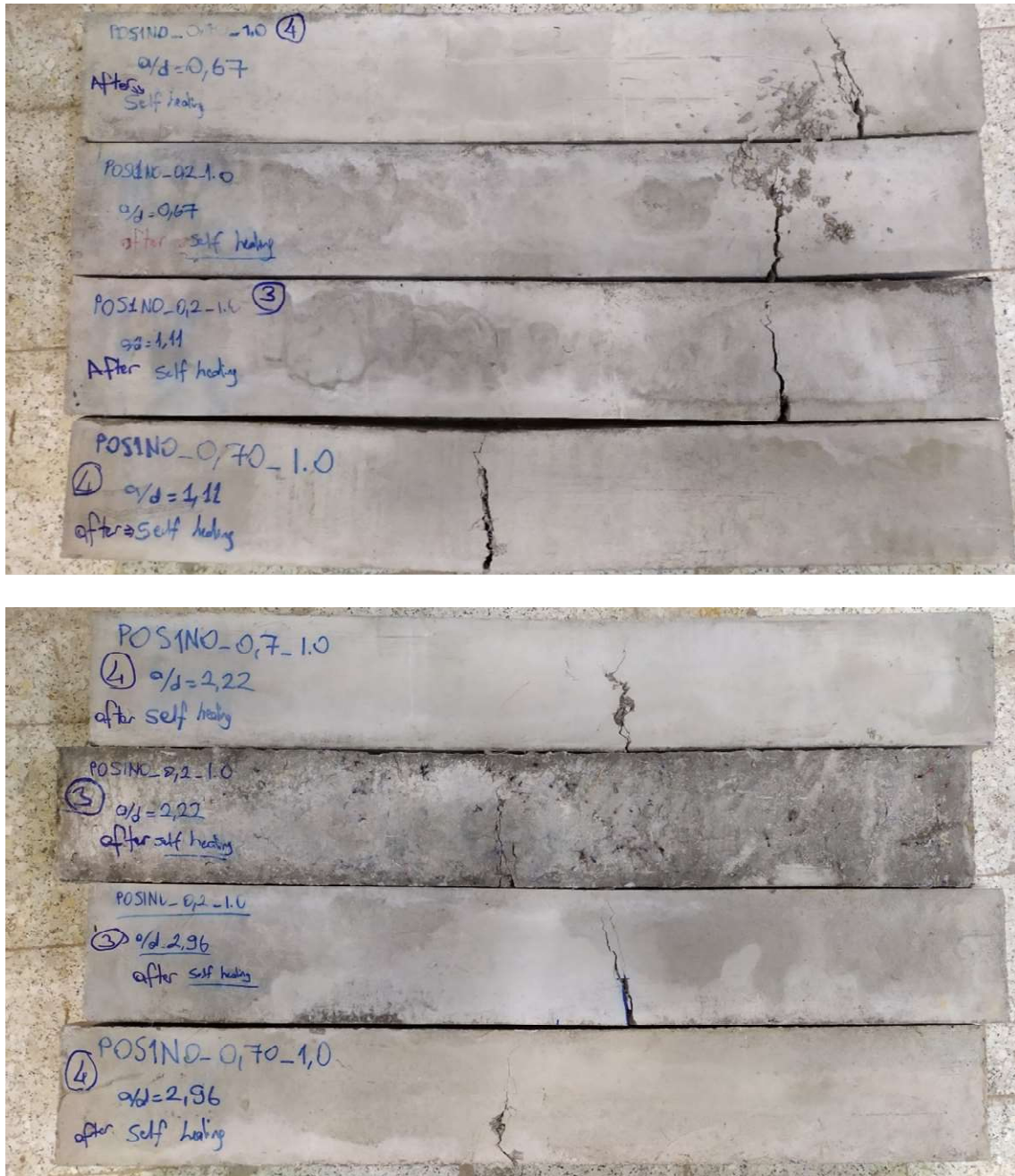
NS-P1S1N0\_0,70\_1,0 ve NA-P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu büyük ölçekli numunelerin dört farklı a/d oranındaki 28 günlük ve kendiliğinden iyileşme sonrası 58 günlük numunelerin yük-deplasman eğrileri Şekil 4.30 'da verilmiştir. 58 gün sonunda doğrudan kırılan NS-P1S1N0\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 31,6 kN, 24,0 kN, 11,6 kN ve 7,3 kN olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu yüklerdeki deplasman miktarı sırasıyla 3,70 mm, 2,17 mm, 1,38 mm ve 1,04 mm olarak belirlenmiştir. NA-P1S1N0\_0,70\_1,0 numunesi için 0,67 , 1,11 , 2,22 ve 2,96 a/d oranlarındaki maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 52,4 kN, 28,1 kN, 15,9 kN ve 12,3 kN olarak ölçülmüştür. Bu yükler altındaki deplasman miktarları sırasıyla 3,83 mm, 2,03 mm, 1,58 mm ve 1,90 mm olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.8 'de 28 günlük yüklemelere kıyasla 28+30 gün iyileşme sonrasında elde edilen yük taşıma kapasitelerinin küçük ve büyük ölçekli numuneler için ayrı ayrı artış ve azalış oranları gösterilmiştir. İyileşme sonrası yük taşıma kapasitelerinde en yüksek artışlara, küçük ölçekli ve büyük ölçekli numunelerde P0S1N1\_0,70\_2,0 oranında sırasıyla %160,56 ve %190,61 oranlarında belirlenmiştir. Yük taşıma kapasitelerindeki en fazla kayıplar ise küçük ve büyük numunelerde sırasıyla P0S1N1\_0,20\_2,0 ve P1S1N0\_0,20\_2,0 kodlu karışımlarda belirlenmiştir. Yük taşıma kapasitelerinde artış miktarının çok düşük olmasının sebebi, sistemde ileri yaşlarda daha etkin olarak çalışan UK katkısının az olması ve sistem içerisindeki agrega yoğunluğunun fazla olması düşünülebilir. Karışım içerisindeki agrega hacminin artmasıyla birlikte birim hacimdeki matris miktarında azalmaların olduğu, bu sebeple iyileşmeye yardımcı olan puzolan miktarlarının da az olduğu kanısına varılabilir. Bu oranlar genel olarak incelendiğinde yük taşıma kapasitelerindeki artış miktarlarının fazla olduğu ve azalma miktarlarının belirli sınırlar çerçevesinde kaldığı numuneler 0,70 oranında UK içeren karışımlar olmuştur. Ayrıca numune boyutunun etkisiyle birlikte iyileşme sonrası taşıma kapasitelerinde farklılıklar elde edilmiştir. Sonuç olarak, ideal olarak belirlenmiş bir karışımın 28 gün sonunda farklı yük çeşitlerinden kaynaklı oluşabilecek mikro çatlakların kapatılması sonrasında, statik olarak hesaplanan yük taşıma kapasitesine erişmesi veya bu kapasitenin üzerine çıkması mümkün olabileceği sonucuna varılabilmektedir.

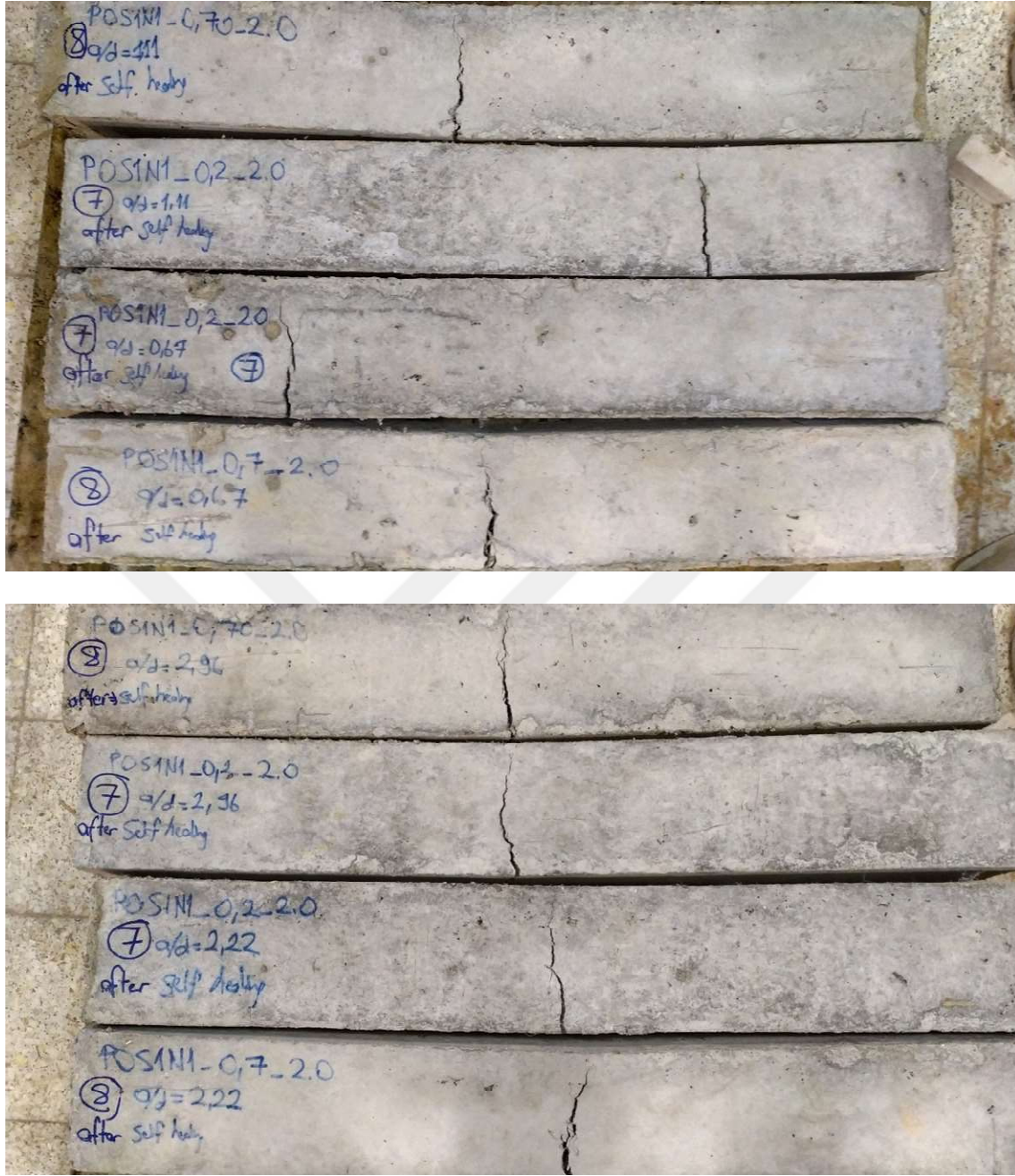
Çizelge 4.8. Kendiliğinden iyileşme sonrası kırılan numunelerin yük taşıma kapasitelerinin değişim oranları

| Karışım |                    | Küçük Ölçekli |         |           |         | Büyük Ölçekli |         |           |         |
|---------|--------------------|---------------|---------|-----------|---------|---------------|---------|-----------|---------|
|         |                    | 28 Gün        |         | 28+30 Gün |         | 28 Gün        |         | 28+30 Gün |         |
| #       | ID                 | 0,67          | 1,11    | 2,00      | 0,67    | 1,11          | 2,22    | 2,96      | 2,96    |
| 3       | POSİNO_0,20_1,0    | 100,00%       | 100,00% | 100,00%   | 80,85%  | 124,24%       | 102,50% | 100,00%   | 82,18%  |
| 4       | POSİNO_0,70_1,0    | 100,00%       | 100,00% | 100,00%   | 123,74% | 65,25%        | 89,47%  | 100,00%   | 76,34%  |
| 5       | POSİNI_0,20_1,0    | 100,00%       | 100,00% | 100,00%   | 71,64%  | 67,01%        | 95,35%  | 100,00%   | 93,75%  |
| 6       | POSİNI_0,70_1,0    | 100,00%       | 100,00% | 100,00%   | 96,89%  | 90,72%        | 108,51% | 100,00%   | 107,25% |
| 7       | POSİNI_0,20_2,0    | 100,00%       | 100,00% | 100,00%   | 62,41%  | 36,03%        | 60,90%  | 100,00%   | 109,09% |
| 8       | POSİNI_0,70_2,0    | 100,00%       | 100,00% | 100,00%   | 160,56% | 97,62%        | 65,63%  | 100,00%   | 90,60%  |
| 9       | PİSİNO_0,20_1,0    | 100,00%       | 100,00% | 100,00%   | 107,95% | 110,74%       | 126,87% | 100,00%   | 100,00% |
| 10      | PİSİNO_0,70_1,0    | 100,00%       | 100,00% | 100,00%   | 114,35% | 111,85%       | 119,67% | 100,00%   | 88,41%  |
| 11      | PİSİNO_0,20_2,0    | 100,00%       | 100,00% | 100,00%   | 81,31%  | 74,48%        | 82,95%  | 100,00%   | 37,19%  |
| 12      | PİSİNO_0,70_2,0    | 100,00%       | 100,00% | 100,00%   | 75,16%  | 71,88%        | 112,90% | 100,00%   | 76,00%  |
| 13      | DİPOSONO_0,20_1,0  | -             | -       | -         | -       | -             | -       | 100,00%   | 124,08% |
| 14      | DİPOSONO_0,70_1,0  | -             | -       | -         | -       | -             | -       | 100,00%   | 88,18%  |
| 15      | NS-PIŞİNO_0,70_1,0 | 100,00%       | 100,00% | 100,00%   | 107,42% | 77,62%        | 103,57% | 100,00%   | 86,90%  |
| 16      | NA-PIŞİNO_0,70_1,0 | 100,00%       | 100,00% | 100,00%   | 116,74% | 78,83%        | 129,55% | 100,00%   | 130,85% |

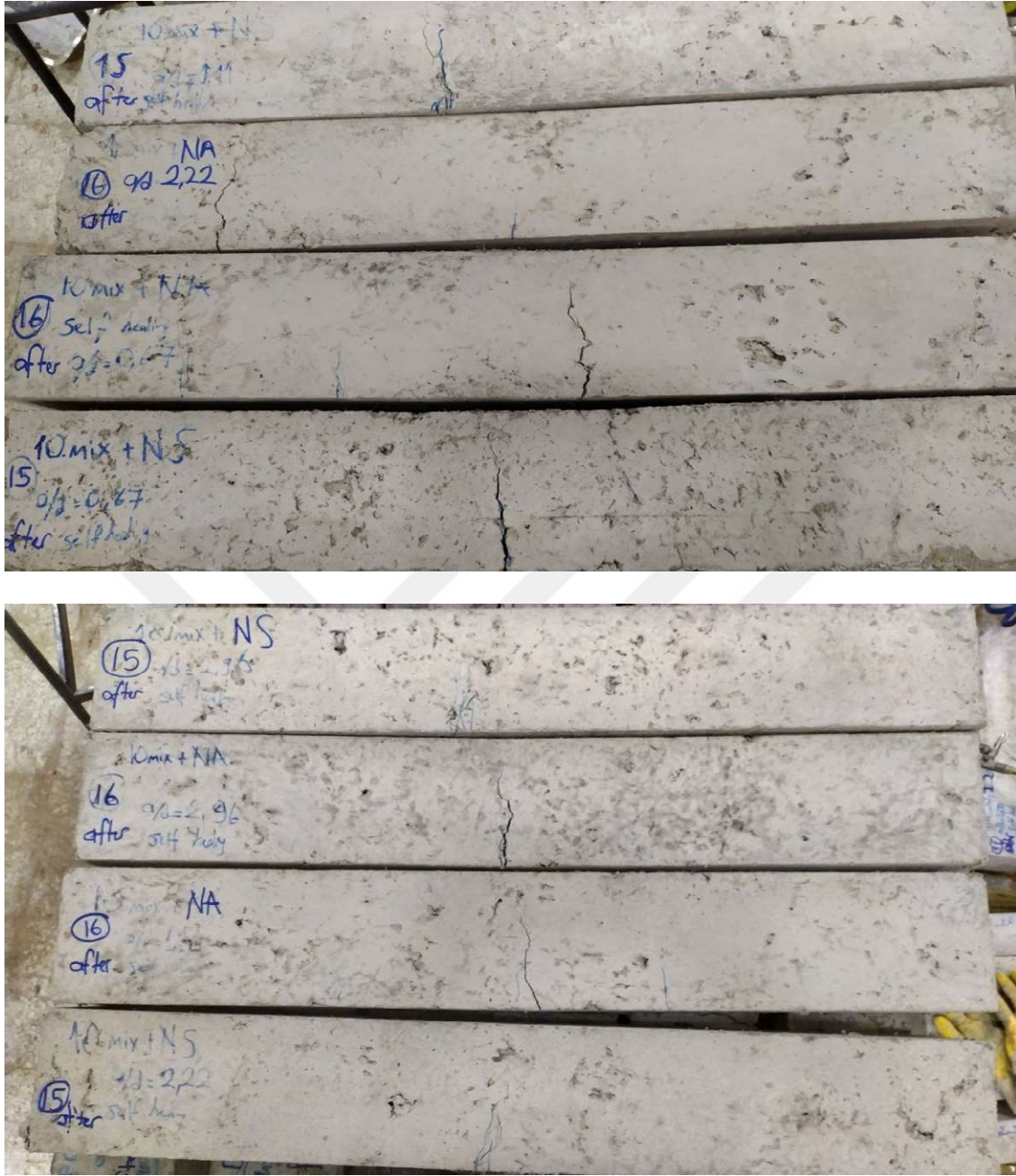
58 gün sonunda kırılan numunelere ait görsellere ait örnekler Resim 4.18-Resim 4.20 arasında verilmiştir. Görseller incelendiğinde kırılmaların genel olarak eğilme kırılması olduğu görülebilmektedir. Ayrıca kırılma noktalarının numunelerde ki ön yüklemelerde oluşturulan çatlak bölgesinde meydana geldiği de belirlenmiştir. Bu durum, her ne kadar kırışlerde oluşan çatlakların kapandığı veya iyileştiği görülse de oluşturulan noktanın kırış sürekliliğini etkilediği veya zayıf nokta oluşturduğundan kırılmaların o noktadan gerçekleştiği şeklinde yorumlanabilir.



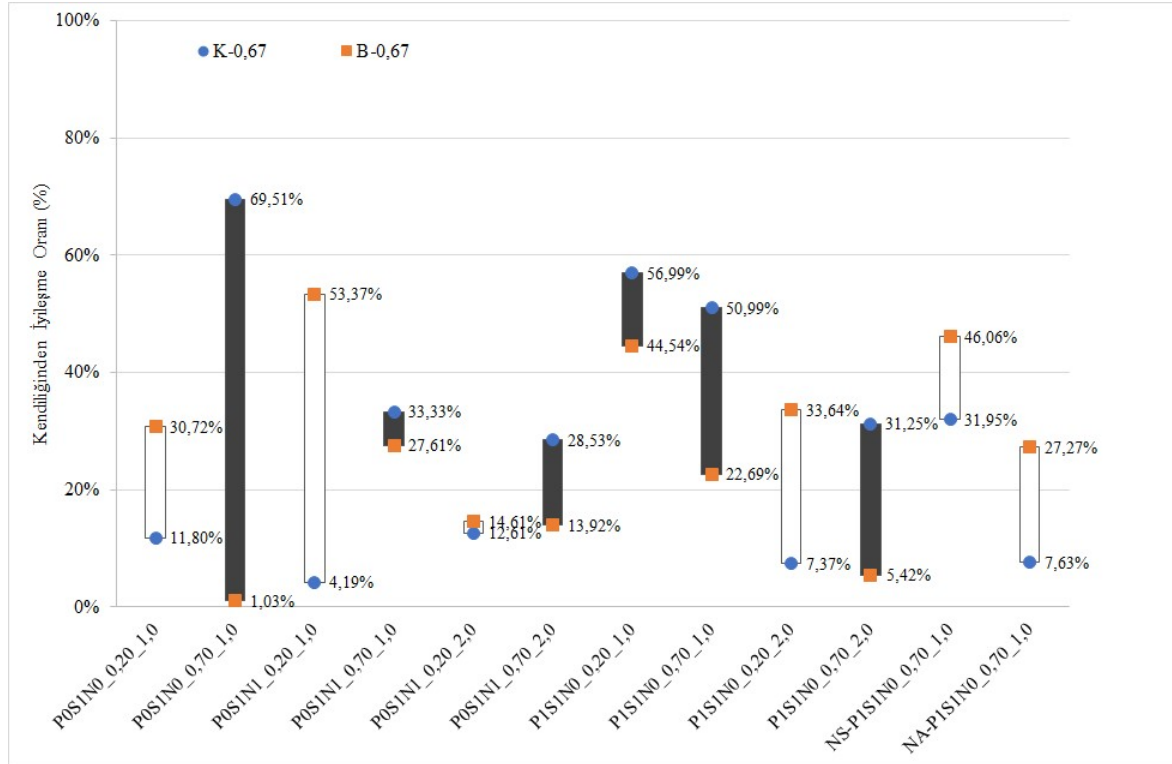
Resim 4.18. POS1N0\_0,20\_1,0 kodlu ve POS1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası kırılma şekilleri



Resim 4.19. POS1N1\_0,20\_2,0 kodlu ve POS1N1\_0,70\_2,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası kırılma şekilleri

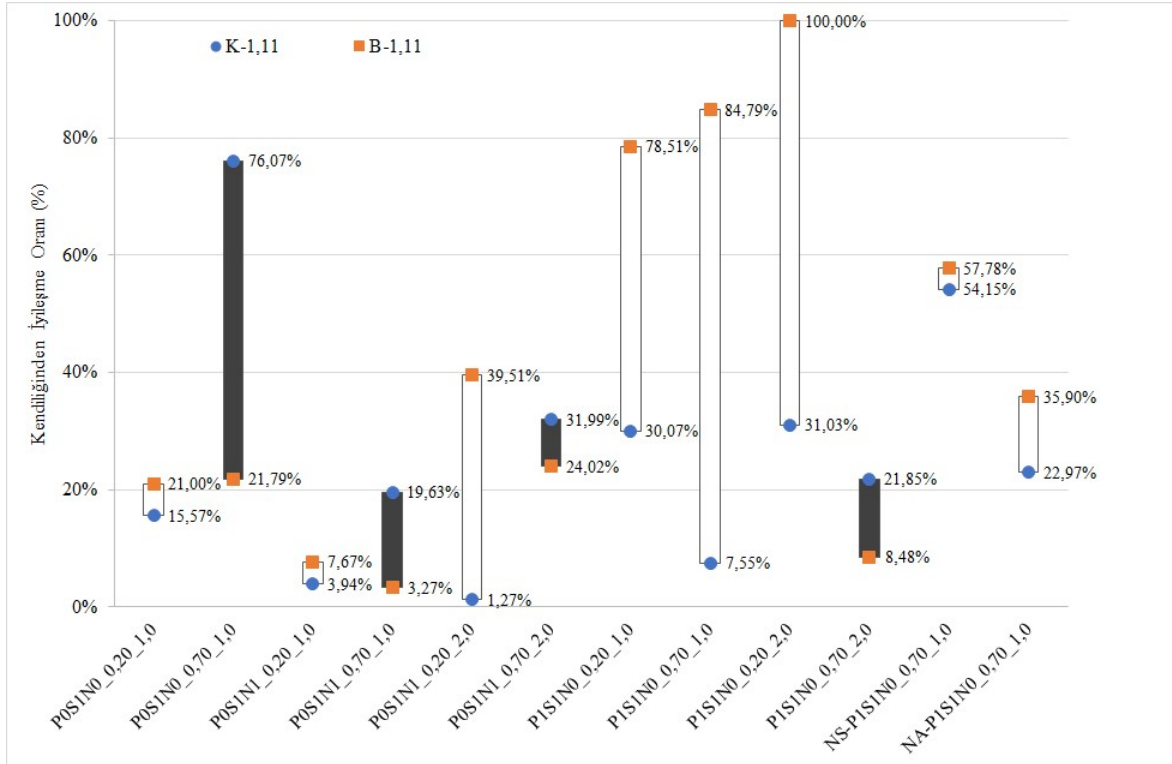


Resim 4.20. NS-P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu ve NA-P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu numunelerin kendiliğinden iyileşme sonrası kırılma şekilleri



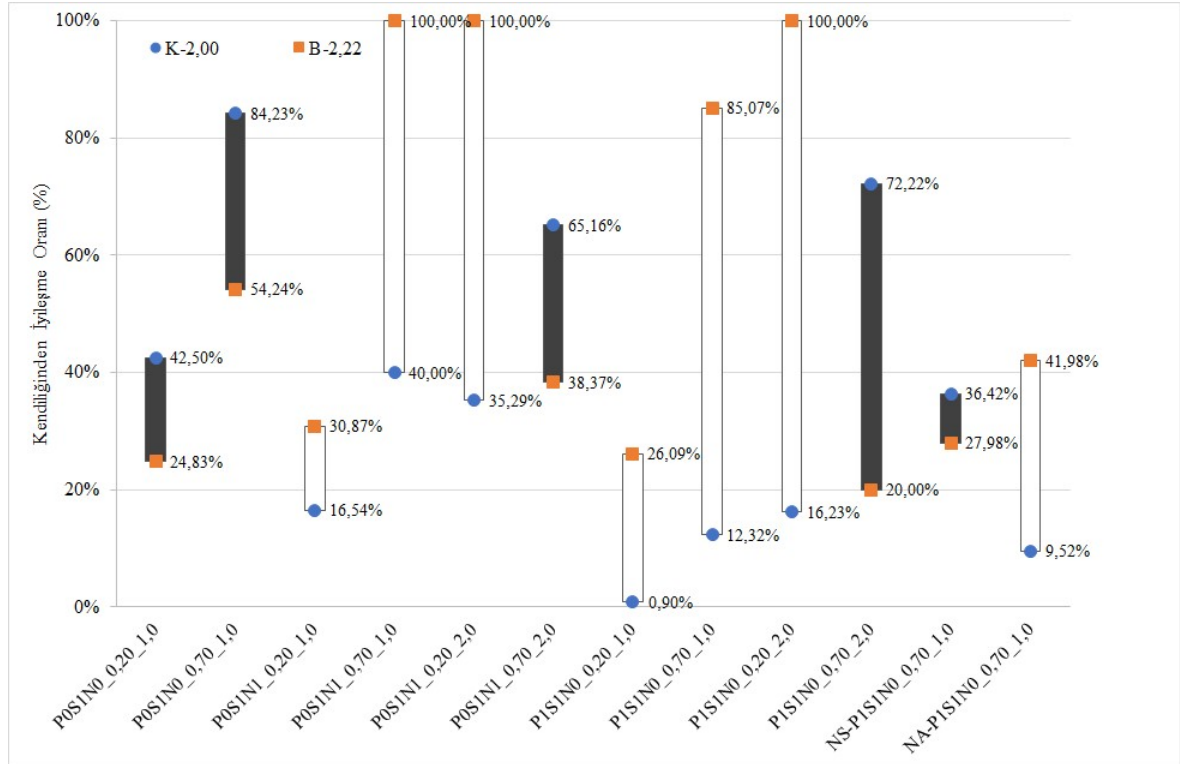
Şekil 4.31. 0,67 a/d oranında küçük boyutlu ve büyük boyutlu kırışlerin iyileşmeleri arasındaki ilişki

Büyük ve küçük boyutlu kırışlerde belirlenmiş olan çatlakların iyileşmeleri sonunda elde edilen 0,67 a/d oranında çatlak genişliklerinin değişim oranları ile ilgili kıyaslama Şekil 4.31’de grafiksel olarak gösterilmiştir. Şekil 4.31 incelendiğinde çatlak genişliğinden bağımsız olarak, karışım malzemeleri aynı olsa dahi farklı boyutlardaki kırışlerde oluşan çatlakların iyileşme oranlarının değiştiği görülebilmektedir. Buna göre puzolan miktarı fazla olan numunelerin tamamında küçük boyutlarda üretilmiş olan kırışlerin iyileşme oranları daha fazla olurken, puzolan miktarı az olan karışımlarda ise büyük boyutlardaki numunelerin iyileşmelerinin daha iyi olduğu görülmüştür. Kesme hakimiyetinin en fazla olduğu a/d oranı olan 0,67 a/d oranında iyileşme oranlarının kısıtlı seviyelerde kaldığı, oluşan çatlaklar kesme çatlağı olmasa dahi numunenin mesnet bölgelerine yakın bölgelerinde oluşan çatlakların iyileşme miktarlarının daha az olduğu da bu grafikten anlaşılabilmektedir.



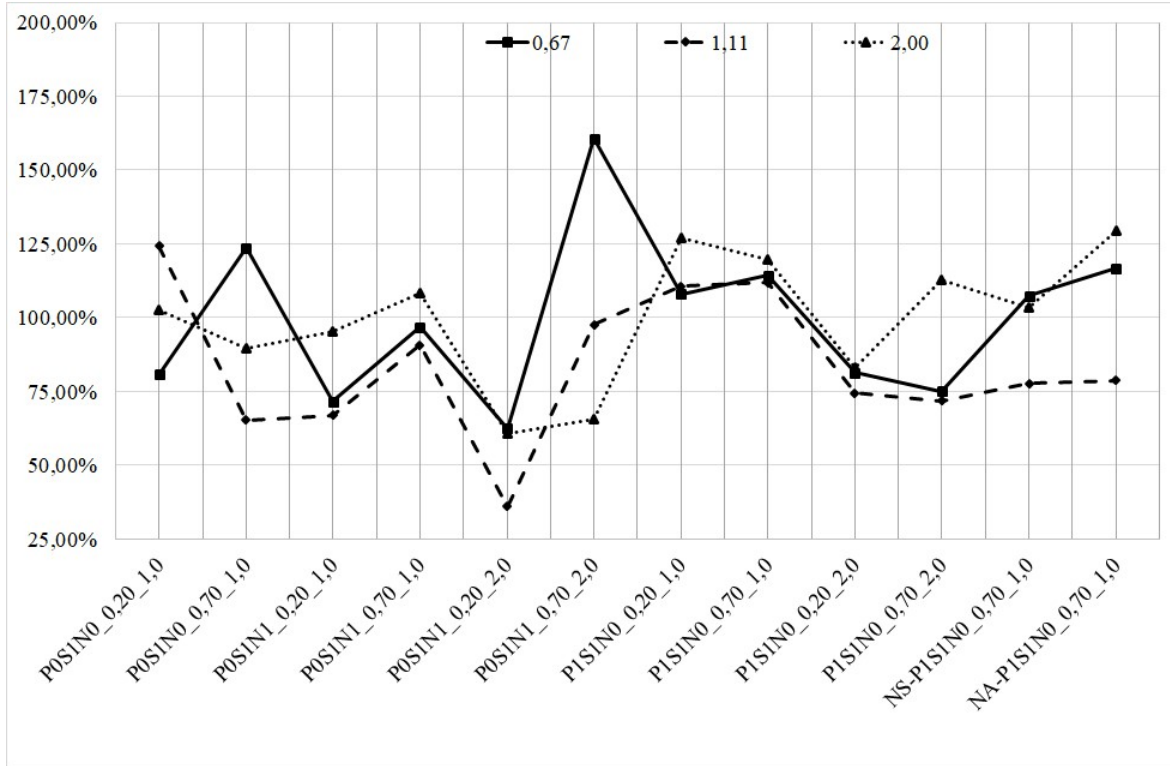
Şekil 4.32. 1,11 a/d oranında küçük boyutlu ve büyük boyutlu kirişlerin iyileşmeleri arasındaki ilişki

1,11 a/d oranında ön yükleme sonrasında oluşturulmuş olan çatlakların büyük ve küçük kiriş numunelerindeki iyileşme oranları Şekil 4.32’de grafiksel olarak gösterilmiştir. 0,67 a/d oranında elde edilen iyileşme farklılıkları 1,11 a/d oranında da elde edilmiştir. Karışım malzemeleri aynı olmasına rağmen numune boyutunun değişmesiyle birlikte iyileşme oranlarında da belirgin değişimler gözlemlenmiştir. Karışım içerisindeki uçucu kül oranının artmasıyla birlikte iyileşmeler küçük boyutlu numunelerde daha fazla olurken düşük uçucu kül içeren karışımlarda büyük numunelerdeki iyileşmelerin daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara istisna olarak PVA lif içeren P1S1N0\_0,70\_1,0 kodlu karışımda büyük boyutlu kirişlerde daha fazla iyileşmeler elde edilmiştir. Bu karışım içerisine nano malzeme eklenmesiyle birlikte küçük boyutlu kirişlerde nano silis ve nano alümin için sırasıyla %46,6 ve %15,42 oranında iyileşmelerin arttığı gözlemlenmiştir. Bunun aksine büyük boyutlu kirişlerde sırasıyla %27,01 ve %48,89 oranında iyileşmelerin azaldığı belirlenmiştir.



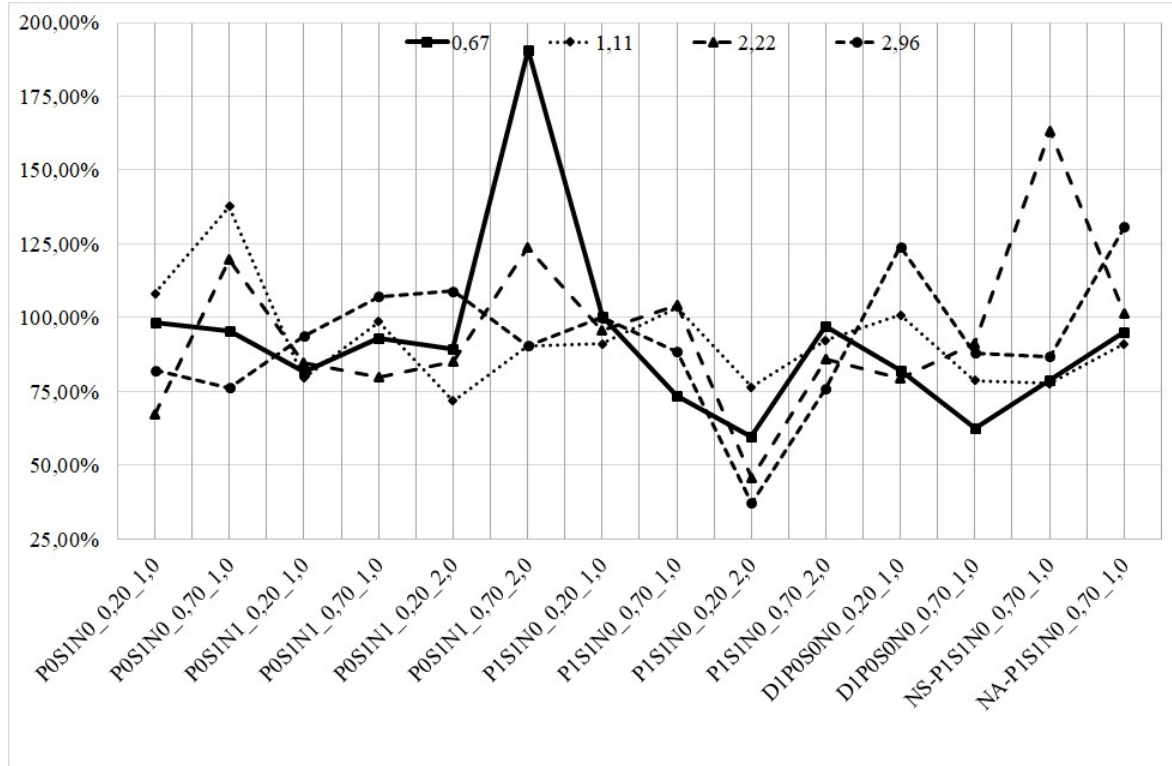
Şekil 4.33. 2,00-2,22 a/d oranında küçük boyutlu ve büyük boyutlu kirişlerin iyileşmeleri arasındaki ilişki

Küçük ve büyük kirişler için sırasıyla 2,00 ve 2,22 a/d oranında ön yükleme sonrası oluşturulan çatlakların iyileşme oranları Şekil 4.33’de grafiksel olarak gösterilmiştir. Şekil 4.33’den de anlaşılacağı üzere POS1N1\_0,70\_1,0 , POS1N1\_0,70\_2,0 ve P1S1N0\_0,20\_2,0 kodlu numunelerin büyük ölçekli kirişlerinde oluşan çatlaklar %100 oranında kapanmıştır. Ayrıca naylon lif içeren numuneler ile PVA lif içerikli numunelerin aynı boyutlarda benzer davranışlar sergilediği görülebilmektedir. Naylon lif içeren karışımlarda en düşük performanslar POS1N1\_0,20\_1,0 kodlu numunelerde, PVA lif içeren karışımlarda ise P1S1N0\_0,20\_1,0 kodlu numunelerde elde edilmiştir. Bu iki karışım kendiliğinden iyileşme performansı açısından kıyaslandığında ise naylon lif içeren karışımlar PVA lif içeren karışımlara göre büyük ve küçük ölçekli kirişler için sırasıyla %4,78 ve %15,64 oranında daha fazla iyileşme sergilediği görülmüştür.



Şekil 4.34. Küçük ölçekli kirişler için kendiliğinden iyileşme sonrası eğilme performanslarının değişimi

Küçük ölçekli kirişlerde kendiliğinden iyileşme sonrasında dört noktalı eğilme yüklemesi altında farklı a/d oranlarındaki eğilme performanslarının 28 günlük numunelere göre performanslarının değişimi Şekil 4.34’de gösterilmiştir. Performans değişimlerinde bütün a/d oranlarında en fazla kayıplar POS1N1\_0,20\_2,0 kodlu numunede elde edildiği yukarıdaki şekilden anlaşılabilmektedir. Kendiliğinden iyileşme sonrasında eğilme yüklemesindeki en yüksek performans 0,67 a/d oranında POS1N1\_0,70\_2,0 kodlu numunede erişilmiştir. Şekil 4.34’den de anlaşılabileceği üzere, aynı karışım malzemesi içeren numunelerin farklı a/d oranlarında oluşturulan çatlaklarının iyileşmeleri farklı olduğundan, iyileşme sonrası performanslarında da farklılıklar oluşmaktadır. POS1N1\_0,70\_2,0 kodlu karışımın performansı incelendiğinde 28 günlük günde kırılan numunenin taşıma yüküne kıyasla 0,67 a/d oranında %160, 1,11 a/d oranında %97 ve 2,00 a/d oranında ise %65 oranında performans değişimleri belirlenmiştir. Aynı karışım içerisinde farklı noktalarda oluşan çatlakların iyileşme sonrasında da farklı performanslar sergileyebileceği görülmüştür.



Şekil 4.35. Büyük ölçekli kirişler için kendiliğinden iyileşme sonrası eğilme performanslarının değişimi

Büyük ölçekli kirişlerde oluşturulan çatlakların kendiliğinden iyileşme sonrasında farklı a/d oranlarında eğilme yüklemesi performanslarının 28 günlük eğilme yüklemesi performanslarına göre değişimleri Şekil 4.35’de gösterilmiştir. 0,67, 2,22 ve 2,96 a/d oranlarında 58 günlük eğilme performanslarındaki en fazla kayıpların P1SIN0\_0,20\_2,0 kodlu numunede olduğu görülmektedir. Bunun önemli sebeplerinden birisinin numune içerisinde bulunan UK miktarının az olması ve hacim içerisinde agrega miktarının fazla olması söylenebilir. Küçük boyutlu numuneye benzer şekilde en yüksek artış performansına 0,67 a/d oranının POSIN1\_0,70\_2,0 kodlu numunesinde görülmüştür.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 5.1. Çalışma Özeti

Bu tez çalışmasında, farklı karışım ve numune parametrelerinin (lif tipi, agrega oranı, uçucu kül oranı ve boyut etkisi) şekil değiştirme sertleşmesi gösteren çimento bağlayıcılı kompozitlerin kendiliğinden iyileşme özelliklerine etkisi incelenmiştir. Karışımlar içerisinde üç farklı lif türü, iki farklı agrega/bağlayıcı oranı, iki farklı uçucu kül/çimento oranı ve iki farklı boyuttaki kirişler kullanılmıştır. Toplamda 128 adet büyük ölçekli kiriş ( $100 \times 150 \times 1000 \text{ mm}$ ), 84 adet küçük ölçekli kiriş ( $80 \times 75 \times 400 \text{ mm}$ ) ve 42 adet küp numunesi ( $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$ ) üretilmiştir. Büyük ölçekli kirişlerde dört farklı a/d oranında, küçük ölçekli kirişlerde ise üç farklı a/d oranında eğilme yüklemesi testi uygulanmıştır. Tez çalışmasında 28 günlük kürleme başlangıç performanslarının belirlenmesinde dikkate alınmıştır.

Büyük ölçekli kirişlere 0,67, 1,11, 2,22 ve 2,96 a/d oranlarında, küçük boyutlu kirişlere 0,67, 1,11 ve 2,00 a/d oranlarında eğilme yüklemesi uygulanmıştır. Kendiliğinden iyileşme performansının test edilmesi için doğrudan 28 gün sonunda kırılan numunelerin haricinde aynı a/d oranlarında iki farklı boyutlardaki kirişlere ön yükleme yapılmıştır. Ön yükleme uygulama sınırı 28 gün sonunda doğrudan kırılan numunelerin yük-deplasman grafikleri incelenerek, ilk çatlak oluşum noktaları belirlenmiştir. Ön yükleme sonrası oluşturulan çatlak genişlikleri el mikroskobu yardımıyla ölçülüp işaretlenerek kaydedilmiştir. Sonrasında numuneler 30 gün süreyle ıslanma-kuruma işlemini içeren kürleme ortamına bırakılmıştır.

58 gün sonunda kendiliğinden iyileşme performansları incelenen numunelerin işaretlenmiş olan çatlak genişlikleri ölçülerek, ilk çatlak genişliğiyle karşılaştırılmıştır. Daha sonra eğilme performansının değişiminin incelenmesi için kiriş numuneleri ön yükleme yapıldıkları a/d oranlarında tekrardan eğilme yüklemesine tabii tutulmuştur. Büyük ve küçük ölçekli kiriş numunelerinin 28 günlük performansları ve 58 günlük kendiliğinden iyileşme sonrası performansları karşılaştırılmıştır.

## 5.2. Sonuç

- Farklı parametreler optimize edilerek 28 günlük basınç dayanımı değerlerinde en düşük değer naylon ve çelik lif katkısı içeren yüksek UK ve düşük agrega içerikli numunelerde 37,1 MPa, en yüksek basınç dayanımı ise çelik ve naylon lif içeren düşük UK ve yüksek agregalı karışımlarda 54,5 MPa olarak belirlenmiştir. Karışımların tamamı yapısal üretimlerde ( $>30$  MPa) kullanılabileceği bu parametreyle de desteklenmiştir.
- Küçük ölçekli ( $80 \times 75 \times 400$  mm) kirişlerde en iyi kendiliğinden iyileşme performansı çelik lif katkılı, yüksek uçucu kül içerikli ve düşük agrega hacmine sahip numunenin 2,00 a/d oranında %84 olarak elde edilmiştir. Bu oran 0,67 a/d oranına kıyasla %15 daha fazla iyileşme olarak belirlenmiştir.
- Büyük ölçekli ( $100 \times 150 \times 1000$  mm) kirişlerde en iyi kendiliğinden iyileşme performansı PVA lif içerikli, düşük uçucu kül içeren ve yüksek agregalı karışımda 1,11, 2,22 ve 2,96 a/d oranlarında %100 olarak belirlenmiştir. A/d oranının 0,67'den 2,96'ya doğru arttıkça kendiliğinden iyileşme oranları da %66 oranında artmıştır. Numunelerin orta noktasında oluşan çatlakların uç kısımlarında oluşan çatlaklara göre daha kolay iyileştiği belirlenmiştir.
- A/d oranından bağımsız şekilde incelendiğinde küçük ölçekli numunelerde ortalama kendiliğinden iyileşme oranı en yüksek %68 olarak belirlenirken bu oran büyük ölçekli numunelerde %78 olarak belirlenmiştir.
- Kendiliğinden iyileşme sonrası performanslarda küçük ölçekli kirişlerde 28 güne kıyasla en yüksek performans 0,67 a/d oranında çelik ve naylon lifli numunelerin yüksek uçucu kül ve yüksek agrega hacmi içeren numunede %160,56 daha fazla yük taşıma performansının arttığı belirlenmiştir. 1,11 ve 2,00 a/d oranlarından sırasıyla %62,94 ve %94,93 daha fazla yük taşıdığı görülmüştür. Büyük ölçekli kirişlerde küçük ölçekli kirişlere benzer şekilde, aynı karışım türünde 28 güne kıyasla en yüksek performans artışı 0,67 a/d oranında %190,61'lik performans artışıyla çelik ve naylon lifli numunelerin yüksek uçucu kül ve yüksek agrega hacmi içeren karışımda belirlenmiştir.
- Genel olarak karışımlar incelendiğinde; UK/PC arttıkça, A/B oranı azaldıkça ve nano malzemeler eklendikçe kendiliğinden iyileşme performansının arttığı görülmüştür. Ayrıca lif katkısının da kendiliğinden iyileşme performansını genel olarak olumlu etkilediği görülmüştür.

- Ülkemizde üretilmeyen ve maliyeti fazla olan PVA lifine alternatif olarak daha ucuz olan Naylon lifler kullanılmasının mümkün olduğu görülmüştür. Doğru karışım tasarımı yapıldığı sürece naylon liflerin mekanik performanslarda kayıp oluşturmada, PVA lifi yerine kullanılabileceği gösterilmiştir. Tez çalışmasının hedeflerinden bir diğeri olan maliyet azaltılması gerçekleştirilmiş olup, benzer mekanik performansların elde edilebileceği PVA lifine alternatif bir lif tavsiyesi yapılmıştır.
- Üretilen farklı ölçekli kirişlerde kendiliğinden iyileşme performansının hem küçük hem de yapısal boyuttaki kirişler üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Her iki boyutta da üretilen kirişlerde meydana gelen mikro çatlakların iyileştiği, fakat küçük ölçekteki kirişlerde kendiliğinden iyileşme performansının daha etkin bir biçimde çalıştığı belirlenmiştir. Genel olarak kiriş numunelerinde kendiliğinden iyileşme sonrasında elde edilen çatlak genişlikleri ( $<365 \mu\text{m}$ ), yapısal risk olarak kabul edilen çatlak genişliğinin ( $400 \mu\text{m}$ ) altında kalmıştır.
- Karışım malzemesi aynı olsa dahi numune boyutunun kendiliğinden iyileşme performansı üzerindeki etkisinin değişken olduğu belirlenmiştir. Büyük ölçekli numunelerde gerek kontrollü çatlak oluşumunun zorluğu gerekse büyük yüzey alanı sebebiyle iyileşme zorluklarının olduğu belirlenmiştir. Lif takviyeli kirişler dışında çelik donatı ile üretilmiş olan yapısal boyuttaki kirişlerde de kalıcı şekil değişimleri haricinde oluşan çatlaklarda önemli kendiliğinden iyileşme performansları elde edilebileceği belirlenmiştir.
- Üretilen hibrit lif içerikli kirişlerin farklı a/d oranlarında kırılması sonucunda oluşan kırılma türlerinin tamamı eğilme kırılması şeklinde meydana gelmiştir. Öyle ki 0,67 a/d oranlarında dahi kırılmalar iki yük noktası arasında ve yükleme noktaları çevresinde oluşmuştur. Bu şekilde, yapılarda istenmeyen ani kesme kırılmasının önüne geçilmiştir.
- Kendiliğinden iyileşme sonrasında kiriş üzerinde yapılan yüklemeler sonucunda göçme çatlakları iyileştirilme yapılan noktadan meydana geldiği belirlenmiştir. Dış yüzeyden yapılan ölçümlerde çatlak kapanması veya iyileşmesi olduğu görülse de, yapının iç tarafında bu kısımlarda zayıf nokta olduğu veya tamamen iyileşmenin tamamlanamadığı belirlenmiştir.

### 5.3. Öneriler

Tez çalışması sonucunda elde edilen veriler ve tecrübeler neticesinde aşağıda bazı önerilerde bulunulmuştur:

- Hibrit lif takviyeli yüksek performanslı çimentolu kompozitlerin gerçek yapı elemanları dikkate alınarak 1:1 ölçekli numuneler üzerinde daha gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebilir.
- Üretilen hibrit lif katkılı çimentolu kompozitlerin çerçeve sistemler üzerinde kendiliğinden iyileşme performansları incelenebilir.
- Kullanılan lif türleri değiştirilerek, diğer sentetik liflerin performans karşılaştırması yapılabilir.
- Maksimum agrega boyutu büyütülerek, maliyet ve performans karşılaştırılması incelenebilir.
- Üretilen ve daha düşük maliyetli olan bu kompozitlerin ıslanma kuruma ve korozyon bakımlarından durabilite performansları incelenebilir.
- Kendiliğinden iyileşme performanslarının 90 gün ve daha ileri yaşlardaki performans etkileri incelenebilir.
- Üretilen kirişlerin performansları, bir sonlu elemanlar programı yardımıyla analitik olarak incelenip, deneysel verilerle karşılaştırılabilir.

## KAYNAKLAR

1. Tran, Y. T., Lee, J., Kumar, P., Kim, K. H., and Lee, S. S. (2019). Natural zeolite and its application in concrete composite production. *Composites Part B: Engineering*. 165, 354–364.
2. Congro, M., Sanchez, E. C. M., Roehl, D., and Marangon, E. (2019). Fracture modeling of fiber reinforced concrete in a multiscale approach. *Composites Part B: Engineering*. 174, 106958.
3. Song, P., and Hwang, S. (2004). Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 18(9), 669–673.
4. Yao, W., Li, J., and Wu, K. (2003). Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction. *Cement and Concrete Research*. 33(1), 27–30.
5. Öksüz, N., Anıl, Ö., Aldemir, A., and Şahmaran, M. (2021). Investigation of mechanical properties of high-performance hybrid fiber concretes adding nanomaterials using with coarse aggregate. *Structures*. 33, 2893–2902.
6. Öksüz, N., Anıl, Ö., Aldemir, A., ve Şahmaran, M. (2021). İri agrega kullanılarak üretilen yüksek performanslı hibrit lif katkılı betonlarda kesme açıklığı-faydalı yükseklik oranının kırılma modülü üzerindeki etkisinin araştırılması. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. 4(1), 53–64.
7. Makul, N. (2020). Modern sustainable cement and concrete composites : review of current status , challenges and guidelines. *Sustainable Materials and Technologies*. 25, e00155.
8. Bentur, A. and Mindess, S. (1990). *Fibre reinforced cementitious composites*. New York: Taylor & Francis Group.
9. Wang, Y., Wu, H. C., and Li, V.C. (2000). Concrete reinforcement with recycled fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 12(4), 314–319.
10. Ramesh, B. and Eswari, S. (2021). Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete: an experimental study. *Materials Today: Proceedings*. 43, 2317–2322.
11. Guo, H., Jiang, L., Tao, J., Chen, Y., Zheng, Z., and Jia, B. (2021). Influence of a hybrid combination of steel and polypropylene fibers on concrete toughness. *Construction and Building Materials*. 275, 122132.
12. Balaguru, P. N. and Shah, S. P. (1992). *Fiber-reinforced cement composites*. New York: McGraw-Hill.
13. Souradeep, G. and Kua, H. W. (2016). Encapsulation Technology and Techniques in Self-Healing Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 28(12), 04016165.
14. Yıldırım, G., Khiavi, A. H., Yeşilmen, S., and Şahmaran, M. (2018). Self-healing performance of aged cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*. 87, 172–186.

15. Yildirim, G., Alyousif, A., Şahmaran, M., and Lachemi, M. (2015). Assessing the self-healing capability of cementitious composites under increasing sustained loading. *Advances in Cement Research*. 27(10), 581–592.
16. Şahmaran, M., Yildirim, 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(1), 93-104.
17. Yildirim, G., Keskin, Ö. K., Keskin, S. B., Şahmaran, M., and Lachemi, M. (2015). A review of intrinsic self-healing capability of engineered cementitious composites: Recovery of transport and mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 101, 10–21.
18. Ghosh, S. K. (2009). *Self-healing materials fundamentals, design strategies, and applications*. Germany: John Wiley and Sons.
19. Van Tittelboom, K. and De Belie, N. (2013). Self-Healing in cementitious materials—A Review. *Materials*. 6(6), 2182–2217.
20. Li, V. C. and Herbert, E. (2012). Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 10(6), 207–218.
21. 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.
22. Şahmaran, M. and Yaman, İ. Ö. (2008). Influence of transverse crack width on reinforcement corrosion initiation and propagation in mortar beams. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 35(3), 236–245.
23. Clear, C. A. (1985). *The effects of autogenous healing upon the leakage of water through cracks in concrete*. UK Slough: Cement and Concrete Association.
24. Demirhan, S., Yildirim, G., Banyhussan, Q. S., Koca, K., Anıl, Ö., Erdem, R. T., et al. (2020). Impact behaviour of nanomodified deflection-hardening fibre-reinforced concretes. *Magazine of Concrete Research*. 72(17), 865–887.
25. Şahmaran, M., Al-Emam, M., Yildirim, G., Şimşek, Y. E., Erdem, T. K., and Lachemi, M. (2015). High-early-strength ductile cementitious composites with characteristics of low early-age shrinkage for repair of infrastructures. *Materials and Structures*. 48(5), 1389–1403.
26. Van Mullem, T., Gruyaert, E., Caspeele, R., and De Belie, N. (2020). First large scale application with self-healing concrete in Belgium: analysis of the laboratory control tests. *Materials*. 13(4), 997.
27. Sarwary, M.H., Yildirim, G., Al-Dahawi, A., Anıl, Ö., Khiavi, K. A., Toklu, K., et al. (2019). Self-sensing of flexural damage in large-scale steel-reinforced mortar beams. *ACI Materials Journal*. 116(4), 209-221.

28. Sanal, I. (2020). Effect of shear span-to-depth ratio on mechanical performance and cracking behavior of high strength steel fiber-reinforced concrete beams without conventional reinforcement. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 27(21), 1849–1864.
29. Šalna, R. and Marčiukaitis, G. (2007). The influence of shear span ratio on load capacity of fibre reinforced concrete elements with various steel fibre volumes. *Journal of Civil Engineering and Management*. 13(3), 209–215.
30. Keskin, S. B., Keskin, O. K., Anil, O., Şahmaran, M., Alyousif, A., Lachemi, M., et al. (2016). Self-healing capability of large-scale engineered cementitious composites beams. *Composites Part B: Engineering*. 101 1–13.
31. Alyousif, A., Anil, O., Sahmaran, M., Lachemi, M., Yildirim, G., and Ashour, A. F. (2016). Comparison of shear behaviour of engineered cementitious composite and normal concrete beams with different shear span lengths. *Magazine of Concrete Research*. 68(5), 217–228.
32. Schneider, M. (2015). Process technology for efficient and sustainable cement production. *Cement and Concrete Research*. 78, 14–23.
33. İnternet: Garside, M. (2021). Cement production worldwide from 1995 to 2020, <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/> adresinden 08.10.2021'de alınmıştır.
34. Harison, A., Srivastava, V., and Herbert, A. (2014). Effect of fly ash on compressive strength of portland pozzolona cement concrete. *Journal of Academia and Industrial Research*. 2(8), 476–479.
35. Yazıcı, H., Yiğiter, H., Karabulut, A. Ş., and Baradan, B. (2008). Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete. *Fuel*. 87(12), 2401–2407.
36. Ozbay, E., Sahmaran, M., Lachemi, M., and Yucel, H. E. (2013). Self-Healing of microcracks in high-volume fly-ash- incorporated engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*. 110(1), 32–42.
37. Lauer, K. R. and Slate, F. O. (1956). Autogenous healing of cement paste. *ACI Journal Proceedings*. 52(6), 1083–1098.
38. Zhang, P., Li, Q., Wang, J., Shi, Y., Zheng, Y., and Ling, Y. (2020). Effect of nano-particle on durability of polyvinyl alcohol fiber reinforced cementitious composite. *Science of Advanced Materials*. 12(2), 249–262.
39. Banyhussan, Q. S., Yıldırım, G., Anil, Ö., Erdem, R. T., Ashour, A., and Şahmaran, M. (2019). Impact resistance of deflection-hardening fiber reinforced concretes with different mixture parameters. *Structural Concrete*. 20(3), 1036–1050.
40. Erdem, T. K., Demirhan, S., Yıldırım, G., Banyhussan, Q. S., Sahin, O., Balav, M. H., et al. (2020). Effects of mixture design parameters on the mechanical behavior of high-performance fibre-reinforced concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 32(12), 04020368.

41. Wu, W., Wang, R., Zhu, C., and Meng, Q. (2018). The effect of fly ash and silica fume on mechanical properties and durability of coral aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 185, 69–78.
42. Al-Najjar, Y., Yeşilmen, S., Al-Dahawi, A. M., Şahmaran, M., Yıldırım, G., Lachemi, M., et al. (2016). Physical and chemical actions of nano-mineral additives on properties of high-volume fly ash engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*. 113(6), 791-801.
43. Dvorkin, L. and Dvorkin, O. (2006). *Basics of concrete science*. St-Petersburg, Russia: Stroi-Beton.
44. Banyhussan, Q. S., Yıldırım, G., Bayraktar, E., Demirhan, S., and Şahmaran, M. (2016). Deflection-hardening hybrid fiber reinforced concrete: the effect of aggregate content. *Construction and Building Materials*. 125, 41–52.
45. Yıldırım, G. (2019). Dimensional stability of deflection-hardening hybrid fiber reinforced concretes with coarse aggregate: Suppressing restrained shrinkage cracking. *Structural Concrete*. 20(2), 836–850.
46. Barros, J. A. O. and Cruz, J. S. (2001). Fracture energy of steel fiber-reinforced concrete. *Mechanics of Composite Materials and Structures*. 8(1), 29–45.
47. Sivakumar, A. and Santhanam, M. (2007). Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres. *Cement and Concrete Composites*. 29(8), 603–608.
48. Ahmed, S. F. U., Maalej, M., and Paramasivam, P. (2007). Flexural responses of hybrid steel–polyethylene fiber reinforced cement composites containing high volume fly ash. *Construction and Building Materials*. 21(5), 1088–1097.
49. Geng, Y. and Leung, C. K. Y. (1996). A microstructural study of fibre/mortar interfaces during fibre debonding and pull-out. *Journal of Materials Science*. 31(5), 1285–1294.
50. Türk Standartları Enstitüsü. (2006). *Lifler – Betonda kullanım için – Bölüm 1: Çelik lifler – Tarifler, özellikler ve uygunluk*. TS EN 14889-1, Ankara, Türkiye.
51. Löfgren, I. (2005). Fibre-reinforced concrete for industrial construction, Doctor of Philosophy Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden.
52. Naaman, A. E. (2003). Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 1(3), 241–252.
53. Johnston, C. D. (2010). *Fiber-Reinforced Cements and Concretes*. Alberta, Canada: Taylor & Francis Group.
54. Rashid, R. S. M., Salem, S. M., Azreen, N. M., Voo, Y. L., Haniza, M., Shukri, A. A., et al. (2020). Effect of elevated temperature to radiation shielding of ultra-high performance concrete with silica sand or magnetite. *Construction and Building Materials*. 262, 120567.

55. Cusson, D. and Paultre, P. (1994). High-strength concrete columns confined by rectangular ties. *Journal of Structural Engineering (United States)*. 120(3), 783–804.
56. Cornelissen, H. A. W. (1997). *Upgrading and Quality Improvement of PFA*. Arnhem, The Netherlands: Studies in Environmental Science, 289–300.
57. Hoang, N. D., Pham, A. D., Nguyen, Q. L., and Pham, Q. N. (2016). Estimating compressive strength of high performance concrete with gaussian process regression Model. *Advances in Civil Engineering*. 2016, 1–8.
58. Chou, J. S., Chiu, C. K., Farfoura, M., and Al-Taharwa, I. (2011). Optimizing the prediction accuracy of concrete compressive strength based on a comparison of data-mining techniques. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 25(3), 242–253.
59. Yeh, I. C. (1998). Modeling of strength of high-performance concrete using artificial neural networks. *Cement and Concrete Research*. 28(12), 1797–1808.
60. Ozbay, E., Sahmaran, M., Lachemi, M., and Yucel, H. E. (2013). Effect of microcracking on frost durability of high-volume-fly-ash- and slag-incorporated engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*. 110(3), 259–267.
61. Vejmelková, E., Pavlíková, M., Keršner, Z., Rovnaníková, P., Ondráček, M., Sedlmajer, M., et al. (2009). High performance concrete containing lower slag amount: a complex view of mechanical and durability properties. *Construction and Building Materials*. 23(6), 2237–2245.
62. Chen, B. and Liu, J. (2008). Experimental application of mineral admixtures in lightweight concrete with high strength and workability. *Construction and Building Materials*. 22(4), 655–659.
63. Naaman A. E. and Homrich, J. R. (1989). Tensile Stress-Strain Properties of Sifcon. *ACI Materials Journal*. 86(3), 244–251.
64. Walraven, J. C. (2009). High performance fiber reinforced concrete: progress in knowledge and design codes. *Materials and Structures*. 42(9), 1247.
65. Bandelt, M. J. and Billington, S. L. (2016). Bond behavior of steel reinforcement in high-performance fiber-reinforced cementitious composite flexural members. *Materials and Structures*. 49(1–2), 71–86.
66. Wang, J.-Y., Chia, K.-S., Liew, J.-Y.R., and Zhang, M.-H. (2013) Flexural performance of fiber-reinforced ultra lightweight cement composites with low fiber content. *Cement and Concrete Composites*. 43, 39–47.
67. Balaguru, P. and Najm, H. (2004). High-performance Fiber-reinforced concrete mixture proportions with high fiber volume fractions. *ACI Materials Journal*. 101(4), 281–286.
68. Yurtseven, A. E., Yaman, I. O., and Tokyay, M. (2006). *Mechanical properties of hybrid fiber reinforced concrete*. Netherlands: Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties-Springer, 207–214.

69. Singh, N. K. and Rai, B. (2018). A review of fiber synergy in hybrid fiber reinforced concrete. *Journal of Applied Engineering Sciences*. 8(2), 41–50.
70. Walton, P. L. and Majumdar, A. J. (1975). Cement-based composites with mixtures of different types of fibres. *Composites*. 6(5), 209–216.
71. Mobasher, B. and Cheng Yu, L. (1996). Mechanical Properties of Hybrid Cement-Based Composites. *ACI Materials Journal*. 93(3), 284–292.
72. Xu, G., Magnani, S., and Hannant, D. J. (1998). Durability of hybrid polypropylene-glass fibre cement corrugated sheets. *Cement and Concrete Composites*. 20(1), 79–84.
73. Markovic, I. (2006). *High-Performance Hybrid-Fibre Concrete*. Doctoral Thesis, Delft University Press, Netherlands.
74. Yoo, D. Y., Lee, J. H., and Yoon, Y. S. (2013). Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites. *Composite Structures*. 106, 742–753.
75. Kaïkea, A., Achoura, D., Duplan, F., and Rizzuti, L. (2014). Effect of mineral admixtures and steel fiber volume contents on the behavior of high performance fiber reinforced concrete. *Materials & Design*. 63, 493–499.
76. Fernandes, B., Gil, A. M., Bolina, F. L., and Tutikian, B. F. (2017). Microstructure of concrete subjected to elevated temperatures: physico-chemical changes and analysis techniques. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 10(4), 838–863.
77. Ríos, J. D., Leiva, C., Ariza, M. P., Seidl, S., and Cifuentes, H. (2019). Analysis of the tensile fracture properties of ultra-high-strength fiber-reinforced concrete with different types of steel fibers by X-ray tomography. *Materials & Design*. 165, 107582.
78. Abreu, G. B. de, Costa, S. M. M., Gumieri, A. G., Calixto, J. M. F., França, F. C., Silva, C., et al. (2017). Mechanical properties and microstructure of high performance concrete containing stabilized nano-silica. *Matéria (Rio de Janeiro)*. 22(2), e11824.
79. Li, V. C. and Maalej, M. (1996). Toughening in cement based composites. Part II: Fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*. 18(4), 239–249.
80. Shah, S. P. (1992). Do fibers increase the tensile strength of cement-based matrix? *ACI Materials Journal*. 88(6), 595–602.
81. Romualdi, J. P. and Batson, G. B. (1963). Mechanics of Crack Arrest in Concrete. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 89(3), 147–168.
82. Rooji, M., Tittelboom, K., Belie, N. and Schlangen, E. (2013). *Self-healing phenomena in cement-based materials*. Netherlands:Springer.
83. Qureshi, T. S. (2016). *The role of expansive minerals in the autogenous and autonomic self-healing of cement based materials*, Doctoral Thesis, University of Cambridge, United Kingdom.

84. Qureshi, T. S., Kanellopoulos, A., and Al-Tabbaa, A. (2016). Encapsulation of expansive powder minerals within a concentric glass capsule system for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*. 121, 629–643.
85. Qureshi, T. and Al-Tabbaa, A. (2020). *Self-Healing Concrete and Cementitious Materials*. IntechOpen:Advanced Functional Materials.
86. Hearn, N. and Morley, C. T. (1997). Self-sealing property of concrete experimental evidence. *Materials and Structures*. 30(7), 404–411.
87. Hearn, N. (1998). Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: what is the difference? *Materials and Structures*. 31(8), 563–567.
88. Edvardsen, C. (1999). Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Materials Journal*. 96(4), 448–454.
89. Huang, H., Ye, G., and Damidot, D. (2013). Characterization and quantification of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste. *Cement and Concrete Research*. 52, 71–81.
90. Gagné, 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.
91. Şahmaran, M., Keskin, S. B., Ozerkan, G., and Yaman, I. O. (2008). Self-healing of mechanically-loaded self consolidating concretes with high volumes of fly ash. *Cement and Concrete Composites*. 30(10), 872–879.
92. Termkhajornkit, P., Nawa, T., Yamashiro, Y., and Saito, T. (2009). Self-healing ability of fly ash–cement systems. *Cement and Concrete Composites*. 31(3), 195–203.
93. Rajczakowska, M., Habermehl-Cwirzen, K., Hedlund, H., and Cwirzen, A. (2019). Autogenous self-healing: a better solution for concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 31(9), 03119001.
94. Vijay, K., Murmu, M., and Deo, S. V. (2017). Bacteria based self healing concrete – a review. *Construction and Building Materials*. 152, 1008–1014.
95. Wang, J. Y., Soens, H., Verstraete, W., and De Belie, N. (2014). Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. *Cement and Concrete Research*. 56, 139–152.
96. Birgisson, B., Mukhopadhyay, A., Geary, G., Khan, M., and Sobolev, K. (2012) *Nanotechnology in Concrete Materials*. Washington: Transportation Research Board, 1-44.
97. Jennings, H. M., Thomas, J. J., Gevrenov, J. S., Constantinides, G., and Ulm, F. J. (2007). A multi-technique investigation of the nanoporosity of cement paste. *Cement and Concrete Research*. 37(3), 329–336.
98. Sobolev, K. and Ferrada Gutiérrez, M. (2014). *How Nanotechnology Can Change the Concrete World*. New Jersey:Prog. Nanotechnol., John Wiley & Sons Inc., 113–116.

99. Abhilash P. P., Nayak, D. K., Sangoju, B., Kumar, R., and Kumar, V. (2021). Effect of nano-silica in concrete; a review. *Construction and Building Materials*. 278, 122347.
100. Joshaghani, A., Balapour, M., Mashhadian, M., and Ozbakkaloglu, T. (2020). Effects of nano-TiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on rheology, mechanical and durability properties of self-consolidating concrete (SCC): An experimental study. *Construction and Building Materials*. 245, 118444.
101. Ismael, R., Silva, J.V., Carmo, R. N. F., Soldado, E., Lourenço, C., Costa, H., et al. (2016). Influence of nano-SiO<sub>2</sub> and nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> additions on steel-to-concrete bonding. *Construction and Building Materials*. 125, 1080–1092.
102. Yıldırım, G., Sarwary, M. H., Al-Dahawi, A., Öztürk, O., Anıl, Ö., and Şahmaran, M. (2018). Piezoresistive behavior of CF- and CNT-based reinforced concrete beams subjected to static flexural loading: Shear failure investigation. *Construction and Building Materials*. 168, 266–279.
103. Murali, G., Abid, S.R., Karthikeyan, K., Haridharan, M. K., Amran, M., and Siva, A. (2021). Low-velocity impact response of novel prepacked expanded clay aggregate fibrous concrete produced with carbon nano tube, glass fiber mesh and steel fiber. *Construction and Building Materials*. 284, 122749.
104. Wang, P., Qiao, G., Guo, Y., Zhang, Y., Hou, D., Jin, Z., et al. (2020). Molecular dynamics simulation of the interfacial bonding properties between graphene oxide and calcium silicate hydrate. *Construction and Building Materials*. 260, 119927.
105. Anand, A., Ghosh, S. K., Fulmali, A. O., and Prusty, R. K. (2021). Enhanced barrier, mechanical and viscoelastic properties of graphene oxide embedded glass fibre/epoxy composite for marine applications. *Construction and Building Materials*. 268, 121784.
106. Navarro-Blasco, I., Pérez-Nicolás, M., Fernández, J. M., Duran, A., Sirera, R., and Alvarez, J. I. (2014). Assessment of the interaction of polycarboxylate superplasticizers in hydrated lime pastes modified with nanosilica or metakaolin as pozzolanic reactives. *Construction and Building Materials*. 73, 1–12.
107. Sanchez, F. and Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete – a review. *Construction and Building Materials*. 24(11), 2060–2071.
108. Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K., and Rongshen, C. (2007). Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. *Construction and Building Materials*. 21(3), 539–545.
109. Li, H., Xiao, H., Yuan, J., and Ou, J. (2004). Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites Part B: Engineering*. 35(2), 185–189.
110. Barbhuiya, S., Mukherjee, S., and Nikraz, H. (2014). Effects of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on early-age microstructural properties of cement paste. *Construction and Building Materials*. 52, 189–193.

111. Mohseni, E., Miyandehi, B. M., Yang, J., and Yazdi, M. A. (2015). Single and combined effects of nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano-TiO<sub>2</sub> on the mechanical, rheological and durability properties of self-compacting mortar containing fly ash. *Construction and Building Materials*. 84, 331–340.
112. Evangelia, T. and Maria, S. (2021). Effect of nano-SiO<sub>2</sub> and nano-CaO in autogenous Self-healing efficiency. *Materials Today: Proceedings*. 37, 4071–4077.
113. Cuenca, E., D'Ambrosio, L., Lizunov, D., Tretjakov, A., Volobujeva, O., and Ferrara, L. (2021). Mechanical properties and self-healing capacity of ultra high performance fibre reinforced concrete with alumina nano-fibres: tailoring ultra High durability concrete for aggressive exposure scenarios. *Cement and Concrete Composites*. 118, 103956.
114. Fládr, J. and Bílý, P. (2018). Specimen size effect on compressive and flexural strength of high-strength fibre-reinforced concrete containing coarse aggregate. *Composites Part B: Engineering*. 138, 77–86.
115. Bažant, Z. P. (2000). Size effect. *International Journal of Solids and Structures*. 37(1–2), 69–80.
116. Awinda, K., Chen, J., and Barnett, S. J. (2016). Investigating geometrical size effect on the flexural strength of the ultra high performance fibre reinforced concrete using the cohesive crack model. *Construction and Building Materials*. 105, 123–131.
117. Nguyen, D. L., Kim, D. J., Ryu, G. S., and Koh, K. T. (2013). Size effect on flexural behavior of ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*. 45(1), 1104–1116.
118. Zhou, F., Balendran, R., and Jeary, A. (1998). Size effect on flexural, splitting tensile, and torsional strengths of high-strength concrete. *Cement and Concrete Research*. 28(12), 1725–1736.
119. Zi, G., Kim, J., and Bažant, Z. P. (2014). Size effect on biaxial flexural strength of concrete. *ACI Materials Journal*. 111(3), 319–326.
120. Mahmud, G. H., Yang, Z., and Hassan, A. M. T. (2013). Experimental and numerical studies of size effects of ultra high performance steel fibre reinforced concrete (UHPFRC) beams. *Construction and Building Materials*. 48, 1027–1034.
121. Ersoy, U. and Özbece, G. (2001). *Betonarme*. İstanbul: Evrim Yayınevi.
122. Dinh, H. H. (2009). *Shear behavior of steel fiber-reinforced concrete beams without stirrup reinforcement*, Doctoral Thesis, The University of Michigan, USA.
123. Kwak, Y. K., Eberhard, M. O., Kim, W. S., and Kim, J. (2002). Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrups. *ACI Structural Journal*. 99(4), 530–538.
124. Nath, P. and Sarker, P. (2011). Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete. *Procedia Engineering*. 14, 1149–1156.

125. Gökçe, H.S., Hatungimana, D., and Ramyar, K. (2019). Effect of fly ash and silica fume on hardened properties of foam concrete. *Construction and Building Materials*. 194, 1–11.
126. Bagheri, A., Zanganeh, H., Alizadeh, H., Shakerinia, M., and Marian, M. A. S. (2013). Comparing the performance of fine fly ash and silica fume in enhancing the properties of concretes containing fly ash. *Construction and Building Materials*. 47, 1402–1408.
127. Alhozaimy, A. M., Soroushian, P., and Mirza, F. (1996). Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials. *Cement and Concrete Composites*. 18(2), 85–92.
128. Yıldırım, G., Dündar, B., Alam, B., Yaman, İ. Ö., and Şahmaran, M. (2018). Role of nano-silica on the early-age performance of natural pozzolan-based blended cement. *ACI Materials Journal*. 115(6), 969–980.
129. Zhang, M. H. and Islam, J. (2012). Use of nano-silica to reduce setting time and increase early strength of concretes with high volumes of fly ash or slag. *Construction and Building Materials*. 29, 573–580.
130. Yeşilmen, S., Al-Najjar, Y., Balav, M. H., Şahmaran, M., Yıldırım, G., and Lachemi, M. (2015). Nano-modification to improve the ductility of cementitious composites. *Cement and Concrete Research*. 76, 170–179.
131. Alyousif, A., Anil, O., Sahmaran, M., Lachemi, M., Yıldırım, G., and Ashour, A. F. (2015). Tests of high-performance fiber-reinforced concrete beams with different shear span-to-depth ratios and main longitudinal reinforcement. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 34(18), 1491–1505.
132. Yoo, D. Y. and Banthia, N. (2016). Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*. 73, 267–280.
133. Wu, Z., Shi, C., and Khayat, K. H. (2018). Multi-scale investigation of microstructure, fiber pullout behavior, and mechanical properties of ultra-high performance concrete with nano-CaCO<sub>3</sub> particles. *Cement and Concrete Composites*. 86, 255–265.
134. Wu, Z., Khayat, K. H., and Shi, C. (2017). Effect of nano-SiO<sub>2</sub> particles and curing time on development of fiber-matrix bond properties and microstructure of ultra-high strength concrete. *Cement and Concrete Research*. 95, 247–256.
135. Sahmaran, 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.
136. Yıldırım, G., Sahmaran, M., Balcikanli, M., Ozbay, E., and Lachemi, M. (2015). Influence of cracking and healing on the gas permeability of cementitious composites. *Construction and Building Materials*. 85, 217–226.



*GAZİ GELECEKTİR..*