



**T.C.  
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**CAM LİFİ TAKVİYELİ BETONLARDA OLGUNLUK İNDEKSİ  
YÖNTEMİ İLE EĞİLME VE BASINÇ DAYANIMLARININ  
TAHMİN MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**MUHAMMED MARAŞLI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
KOMPOZİT MALZEME TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
PROF. DR. SERKAN SUBAŞI**

**DÜZCE, 2019**

**T.C.**  
**DÜZCE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**CAM LİFİ TAKVİYELİ BETONLARDA OLGUNLUK İNDEKSİ**  
**YÖNTEMİ İLE EĞİLME VE BASINÇ DAYANIMLARININ**  
**TAHMİN MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Muhammed MARAŞLI tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Kompozit Malzeme Teknolojileri** Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Prof. Dr. Serkan SUBAŞI  
Düzce Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Serkan SUBAŞI  
Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU  
Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Ahmet BEYÇİOĞLU  
Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 30/07/2019



## BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

30 Temmuz 2019

Muhammed MARAŞLI

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği sabır, her türlü destek ve yardımlarından dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Serkan SUBAŞI'na en içten dileklerle teşekkür ederim. Meslek yaşantımda ondan çok şey öğrendim ve öğrenmeye devam ediyorum.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili eşime, oğluma ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım ve yazımı boyunca bana destek olan Sefa GÜNTEPE'ye teşekkür ederim.

Bu tez çalışması yürütülmesi sırasında Fibrobeton Yapı A.Ş. AR-GE Merkezi altyapısı kullanılarak tüm deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda büyük desteklerini gördüğüm AR-GE Merkezindeki çalışma arkadaşlarım başta Volkan ÖZDAL, Yasemin HATİPOĞLU ve Ahmet SEVEN olmak üzere tüm AR-GE merkezindeki çalışma arkadaşlarıma destek ve yardımları için çok teşekkür ederim.

Bu çalışma Fibrobeton şirketinin desteği olmasa ortaya çıkamazdı. 30 yıla yakın, içinde bulunduğum ve bulunmaktan gurur duyduğum Fibrobeton ailesinin tüm fertlerine teşekkür ederim.

**30 Temmuz 2019**

**Muhammed MARAŞLI**

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa No

|                                                                    |      |
|--------------------------------------------------------------------|------|
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                 | viii |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                               | xi   |
| KISALTMALAR .....                                                  | xiii |
| SİMGELER .....                                                     | xv   |
| ÖZET.....                                                          | xvi  |
| ABSTRACT.....                                                      | xvii |
| 1. GİRİŞ.....                                                      | 1    |
| 2. KURUMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI ..                   | 4    |
| 2.1. BETON.....                                                    | 4    |
| 2.2. LİFLİ BETONLAR VE KULLANILAN LİF TÜRLERİ.....                 | 5    |
| 2.2.1. Lifli Betonlar .....                                        | 5    |
| 2.2.2. Lif Türleri.....                                            | 9    |
| 2.2.2.1. Doğal Lifler .....                                        | 10   |
| 2.2.2.2. Yapay Lifler .....                                        | 12   |
| 2.3. CAM LİF TAKVİYELİ BETON (GRC-CTB) .....                       | 26   |
| 2.3.1. GRC-CTB Bileşenleri.....                                    | 29   |
| 2.3.1.1. Bağlayıcılar .....                                        | 29   |
| 2.3.1.2. Agregalar.....                                            | 30   |
| 2.3.1.3. AR Cam Lifleri.....                                       | 31   |
| 2.3.1.4. Kimyasal Katkılar.....                                    | 33   |
| 2.3.1.5. Polimerler, Pigmentler ve Dolgu Malzemeleri.....          | 34   |
| 2.3.1.6. Puzolanik Katkılar .....                                  | 36   |
| 2.3.2. GRC-CTB Üretim Yöntemleri .....                             | 36   |
| 2.3.2.1. Harç Hazırlama.....                                       | 36   |
| 2.3.2.2. GRC-CTB Elemanların Üretilmesi İçin Kalıp Hazırlama ..... | 37   |
| 2.3.2.3. Püskürtme (Spray) Sistemi ile Üretim .....                | 40   |
| 2.3.2.4. Filament Sarma Yöntemleri.....                            | 43   |
| 2.3.2.5. Ekstrüzyon .....                                          | 44   |
| 2.3.2.6. Yapısal Güçlendirme İçin GRC-CTB Kullanımı .....          | 45   |
| 2.3.2.7. 3-B Yazıcılar ve GRC-CTB.....                             | 46   |
| 2.3.2.8. Kırılma .....                                             | 47   |
| 2.3.2.9. Yüzey Bitimleri.....                                      | 48   |
| 2.3.2.10. Taşıma, Nakliye, Depolama ve Tamir .....                 | 51   |
| 2.3.3. GRC-CTB Teknik Özellikleri .....                            | 53   |
| 2.3.3.1. Taze GRC-CTB'nin Özellikleri.....                         | 53   |
| 2.3.3.2. Sertleşmiş GRC-CTB'nin Özellikleri.....                   | 54   |
| 2.3.4. GRC-CTB Kullanım Alanları ve Uygulamaları.....              | 58   |
| 2.3.5. GRC-CTB Standartları ve Kalite .....                        | 62   |
| 2.4. YERİNDE BETON DAYANIM TAHMİN YÖNTEMLERİ.....                  | 66   |
| 2.4.1. Yüzey Sertliği Yöntemi (ASTM C 805) .....                   | 66   |
| 2.4.2. Ultrasonik Ses Hızı Yöntemi (ASTM C597) .....               | 67   |

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.4.3. Impact-Echo Test Yöntemi (ASTM 1383).....                                                    | 68  |
| 2.4.4. Pull-Out Test Yöntemi (ASTM C900) .....                                                      | 69  |
| 2.4.5. Betonun Doğrudan Çekme Dayanımı Tayini (Pull-off) .....                                      | 71  |
| 2.4.6. Break-Off Test Yöntemi.....                                                                  | 72  |
| 2.4.7. Drilled Core Yöntemi (ASTM C42).....                                                         | 73  |
| 2.4.8. Yerinde Döküm Silindir Beton Yöntemi (ASTM C873) .....                                       | 74  |
| 2.4.9. Penetrasyon Direnci Test Yöntemi (ASTM C803) .....                                           | 75  |
| 2.4.10. Windsor Probe Test Yöntemi.....                                                             | 75  |
| 2.5. BETONDA OLGUNLUK KAVRAMI.....                                                                  | 77  |
| 2.5.1. Sıcaklığın Dayanım Gelişimi Üzerine Etkisi .....                                             | 77  |
| 2.5.2. Olgunluk Kavramının Tarihsel Gelişimi.....                                                   | 79  |
| 2.5.3. Dayanım-Olgunluk İlişkisi.....                                                               | 86  |
| 2.5.3.1. Saul Yöntemi.....                                                                          | 86  |
| 2.5.3.2. Papadakis, Bresson, CEMIJ Laboratuvarı Yöntemleri .....                                    | 88  |
| 2.5.3.3. Hollandalı De Vree Yöntemi (Ağırlıklı Olgunluk Yöntemi ).....                              | 89  |
| 2.5.4. Olgunluk Yöntemi İçin Standartlar.....                                                       | 91  |
| 2.5.4.1. TS 13508 Olgunluk Yöntemi İle Beton Dayanımının Tahmini .....                              | 91  |
| 2.5.4.2. ASTM C-1074 Olgunluk Metodu İle Beton Dayanımının Tahminine İlişkin Standart Uygulama..... | 92  |
| 2.5.4.3. NEN 5970 Taze Beton Dayanımının Ağırlıklı Olgunluk Yöntemiyle Belirlenmesi .....           | 93  |
| 2.6. BETONDA OLGUNLUK ÜZERİNE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR.....                                              | 94  |
| 2.7. OLGUNLUK YÖNTEMİNİN UYGULAMA ALANLARI.....                                                     | 112 |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM .....                                                                         | 115 |
| 3.1. MATERYAL .....                                                                                 | 115 |
| 3.1.1. Çimento ve Özellikleri.....                                                                  | 115 |
| 3.1.2. Agrega ve Özellikleri.....                                                                   | 117 |
| 3.1.3. Metakaolin (MTK) ve Özellikleri.....                                                         | 118 |
| 3.1.4. AR Cam Lif ve Özellikleri .....                                                              | 119 |
| 3.1.5. Akışkanlaştırıcı ve Özellikleri .....                                                        | 120 |
| 3.1.6. Akrilik Polimer ve Özellikleri .....                                                         | 120 |
| 3.1.7. Su ve Özellikleri.....                                                                       | 121 |
| 3.2. YÖNTEM.....                                                                                    | 121 |
| 3.2.1. Deneysel Çalışma Planı .....                                                                 | 121 |
| 3.2.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması .....                                                       | 122 |
| 3.2.3. Slamp Testi.....                                                                             | 123 |
| 3.2.4. Yoğunluk Testi.....                                                                          | 124 |
| 3.2.5. LEEB Sertlik Deneyi .....                                                                    | 124 |
| 3.2.6. Basınç Dayanımı Deneyi .....                                                                 | 125 |
| 3.2.7. Eğilme Dayanımı Deneyi.....                                                                  | 126 |
| 3.2.8. Erken Yaş Büzülme Deneyi .....                                                               | 128 |
| 3.2.9. Olgunluk Deneyi .....                                                                        | 128 |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....                                                                     | 130 |
| 4.1. SLAMP TESTİ SONUÇLARI .....                                                                    | 130 |
| 4.2. YOĞUNLUK TAYİNİ.....                                                                           | 131 |
| 4.3. LEEB SERTLİK DENEYİ SONUÇLARI .....                                                            | 135 |
| 4.4. BASINÇ DAYANIMI DENEYİ SONUÇLARI .....                                                         | 140 |
| 4.5. EĞİLME DAYANIMI DENEYİ SONUÇLARI.....                                                          | 148 |
| 4.6. ERKEN YAŞ BÜZÜLME DENEYİ SONUÇLARI .....                                                       | 155 |
| 4.7. OLGUNLUK DENEYİ ÖLÇÜM SONUÇLARI .....                                                          | 156 |

|                                                         |            |
|---------------------------------------------------------|------------|
| <b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>                     | <b>168</b> |
| <b>6. KAYNAKLAR.....</b>                                | <b>170</b> |
| <b>7. EKLER .....</b>                                   | <b>186</b> |
| <b>7.1. EK 1: GRC-CTB İLE YAPILMIŞ UYGULAMALAR.....</b> | <b>186</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                    | <b>201</b> |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. Lif katkılı betonun lifsiz betona göre gerilme-şekil değiştirme grafiği. ....                                             | 7  |
| Şekil 2.2. Agreganın en büyük tane boyutunun lif dağılmasına etkisi.....                                                             | 8  |
| Şekil 2.3. Farklı tip selüloz lifler.....                                                                                            | 12 |
| Şekil 2.4. Farklı boyut ve geometride liflerdeki çelik lifler. ....                                                                  | 13 |
| Şekil 2.5. Farklı tip karbon ve bazalt lifler.....                                                                                   | 15 |
| Şekil 2.6. Farklı tip makro ve mikro sentetik lifler. ....                                                                           | 18 |
| Şekil 2.7. Farklı tip dokuma lif ve tekstiller.....                                                                                  | 19 |
| Şekil 2.8. İstanbul Yavuz Sultan Selim Köprüsü 3B lif takviyeli UHPGRC uygulaması. ....                                              | 20 |
| Şekil 2.9. CNF'lerin toz formda ve SEM görüntüsü (3µm aralık). ....                                                                  | 23 |
| Şekil 2.10. CNT ve CNF'lerin beton karışımlarına eklenmesi şematik gösterimi.....                                                    | 24 |
| Şekil 2.11. Betonda yüksek zirkonyumlu (%16 ≥) alkaliye dayanıklı cam lifi ile E-cam lifinin yaşlanma testi sonrasında durumu . .... | 27 |
| Şekil 2.12. AR Cam lifi takviyeli beton içinde liflerin dağılımı. ....                                                               | 29 |
| Şekil 2.13. Sürekli ve kırılmış AR cam lifleri.....                                                                                  | 32 |
| Şekil 2.14. Otomatik karıştırma istasyonunda püskürtme üretim için harç üretimi.....                                                 | 37 |
| Şekil 2.15. Polyester kalıbın tasarımı ve yapım aşamaları.....                                                                       | 38 |
| Şekil 2.16. Poliüretan kalıp dış destek ünitesi hazırlanması. ....                                                                   | 39 |
| Şekil 2.17. Ahşap eğrisel kalıp yapımı.....                                                                                          | 39 |
| Şekil 2.18. Birleşik püskürtme kafası ve pompası. ....                                                                               | 40 |
| Şekil 2.19. Sıkıştırma işleminde kullanılan rulolar ve rulolama. ....                                                                | 41 |
| Şekil 2.20. Buğu tabakası, püskürtme döküm işlemi ve rulolama ile sıkıştırma. ....                                                   | 41 |
| Şekil 2.21. Kalınlık ölçümü ve son kat düzeltme.....                                                                                 | 42 |
| Şekil 2.22. Filament sarma yöntemi ile düşey boru imalatı ve test edilmesi. ....                                                     | 44 |
| Şekil 2.23. Güçlendirme yöntemi üretim ve test çalışmaları. ....                                                                     | 45 |
| Şekil 2.24. Güçlendirilmiş ve kontrol numuneleri gerilme-şekil değiştirme ilişkileri....                                             | 46 |
| Şekil 2.25. 3B Yazıcı ile basılmış yapı elemanları. ....                                                                             | 47 |
| Şekil 2.26. Renkli yüzey bitimleri GRC-CTB ürünler.....                                                                              | 48 |
| Şekil 2.27. Tekstür yüzey bitimli GRC-CTB ürünler. ....                                                                              | 49 |
| Şekil 2.28. Yüzey korucuyu uygulama yapılmadan önce ve sonrası. ....                                                                 | 50 |
| Şekil 2.29. Kendini temizleyen yüzeyli GRC-CTB uygulaması TÜPRAŞ RUP binası Kocaeli. ....                                            | 51 |
| Şekil 2.30. GRC-CTB ürünlerin kalıptan sökümü. ....                                                                                  | 52 |
| Şekil 2.31. GRC-CTB ürünlerin kalıptan sökümü sonrası istifi. ....                                                                   | 52 |
| Şekil 2.32. GRC-CTB ürünlerin sandıklanması ve taşınması.....                                                                        | 53 |
| Şekil 2.33. GRC-CTB Yaşlanma etkileri. ....                                                                                          | 57 |
| Şekil 2.34. GRC-CTB Cephe panelleri ve uygulaması.....                                                                               | 58 |
| Şekil 2.35. GRC-CTB Dekoratif cephe elemanları kullanılmış bir yapı. ....                                                            | 59 |
| Şekil 2.36. GRC-CTB Ferfore ve bölücü elemanlar. ....                                                                                | 59 |
| Şekil 2.37. GRC-CTB Peyzaj ve şehir mobilyası olarak kullanımı. ....                                                                 | 60 |
| Şekil 2.38. GRC-CTB Modüler Yapı Malzemesi olarak kullanımı.....                                                                     | 60 |
| Şekil 2.39. GRC-CTB Kalıcı kalıp olarak kullanımı (Hong Kong).....                                                                   | 60 |
| Şekil 2.40. GRC-CTB Drenaj kanalı olarak kullanımı. ....                                                                             | 61 |

|                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 2.41. GRC-CTB Gürültü Bariyerleri (Avustralya ve Hong Kong).....                                                                                | 61  |
| Şekil 2.42. GRC-CTB Üretiminde Kalite için işbaşında eğitim çalışması. ....                                                                           | 63  |
| Şekil 2.43. Schmidt çekicine ait şematik görsel.....                                                                                                  | 66  |
| Şekil 2.44. Schmidt çekicine ait görsel. ....                                                                                                         | 67  |
| Şekil 2.45. Ultrasonik ses hızı test yöntemi şematik gösterimi (a) ve test numunesi<br>üzerinde uygulama örneği (b). ....                             | 68  |
| Şekil 2.46. Impact-echo metodu şematik gösterimi (a) ve test cihazı (b). ....                                                                         | 69  |
| Şekil 2.47. Pull-out test yönteminde kullanılan ekipmanlar. ....                                                                                      | 69  |
| Şekil 2.48. Cihazın kullanımına dair şematik gösterim. ....                                                                                           | 70  |
| Şekil 2.49. Beton bloklar üzerinde, yüzeyde kopma dayanımı deneyinin yapılışı. ....                                                                   | 70  |
| Şekil 2.50. Pull-out deney malzemeleri. ....                                                                                                          | 70  |
| Şekil 2.51. Doğrudan çekme dayanımı deneyi şematik görüntüsü. ....                                                                                    | 71  |
| Şekil 2.52. Doğrudan çekme dayanımı deneyi yapılışı.....                                                                                              | 71  |
| Şekil 2.53. Test aşamasında karşılaşılan hatalar. ....                                                                                                | 72  |
| Şekil 2.54. Break-off test cihazı.....                                                                                                                | 73  |
| Şekil 2.55. Drilled core testi.....                                                                                                                   | 74  |
| Şekil 2.56. Yerinde döküm silindir beton yöntemi şematik gösterimi.....                                                                               | 74  |
| Şekil 2.57. Penetrasyon direnci test yöntemi. ....                                                                                                    | 75  |
| Şekil 2.58. Test ekipmanları.....                                                                                                                     | 76  |
| Şekil 2.59. Erken yaşlardaki beton dayanımı ve ısı çıkışı ilişkisi. ....                                                                              | 78  |
| Şekil 2.60. Kür sıcaklığının beton basınç dayanımı üzerine etkisi. ....                                                                               | 78  |
| Şekil 2.61. Sıcaklık-zaman faktörü ile sıcaklık geçmişi arasındaki ilişki.....                                                                        | 80  |
| Şekil 2.62. Beton için 5 evrede tanımlayan genel hidratasyon eğrisi. ....                                                                             | 80  |
| Şekil 2.63. Basınç dayanımı – olgunluk ilişkisi.....                                                                                                  | 85  |
| Şekil 2.64. Saul'un sıcaklık-zaman faktörü kullanarak olgunluk kuralı. ....                                                                           | 87  |
| Şekil 2.65. Saul yöntemine göre farklı sıcaklıklardaki olgunluk gelişimi. ....                                                                        | 87  |
| Şekil 2.66. Papadakis ve Bresson yöntemine göre farklı sıcaklıklarda olgunluk<br>gelişimi. ....                                                       | 89  |
| Şekil 2.67. Direnç-olgunluk ilişkisi. ....                                                                                                            | 99  |
| Şekil 3.1. Kullanılan malzemeler; AR cam lifi (1), agrega (2), çimento (3),<br>metakaolin (4), akışkanlaştırıcı (5), akrilik polimer (6), su(7). .... | 115 |
| Şekil 3.2. Kullanılan çimentoya ait lazer tane dağılımı analizi sonuçları. ....                                                                       | 116 |
| Şekil 3.3. Agregaya ait lazer tane dağılımı analiz sonuçları. ....                                                                                    | 117 |
| Şekil 3.4. Kullanılan metakaoline ait lazer tane dağılımı analiz sonuçları. ....                                                                      | 118 |
| Şekil 3.5. AR cam lif bobini (a) ve kullanılan kırılmış lifler (b). ....                                                                              | 119 |
| Şekil 3.6. Deney numunelerinin hazırlık aşamaları. ....                                                                                               | 123 |
| Şekil 3.7. Slamp deneyinin yapılışına dair görseller.....                                                                                             | 124 |
| Şekil 3.8. LEEB sertlik deneyine ait görseller. ....                                                                                                  | 125 |
| Şekil 3.9. Basınç dayanımı deneyine dair görseller. ....                                                                                              | 125 |
| Şekil 3.10. Yapılan deneyin şematik gösterimi.....                                                                                                    | 126 |
| Şekil 3.11. Yük/sehim eğrisinin örneği.....                                                                                                           | 127 |
| Şekil 3.12. Eğilme dayanım deneyine ait görseller. ....                                                                                               | 127 |
| Şekil 3.13. Büzülme deney cihazı test aşaması.....                                                                                                    | 128 |
| Şekil 3.14. Olgunluk deneyine ait görseller. ....                                                                                                     | 129 |
| Şekil 4.1. Farklı lif oranlarına göre slump testi sonuçları. ....                                                                                     | 130 |
| Şekil 4.2. Ortalama yoğunluk değerlerine ait bar grafik.....                                                                                          | 132 |
| Şekil 4.3. Ortalama LEEB sertlik değerlerine ait bar grafik. ....                                                                                     | 137 |
| Şekil 4.4. Basınç dayanımı-LEEB sertlik değerleri arasındaki ilişki grafiği. ....                                                                     | 139 |
| Şekil 4.5. Beton numunelerine ait ortalama basınç dayanımı değerleri.....                                                                             | 142 |
| Şekil 4.6. Beton yaşı ile beton basınç dayanımı arasında ilişki grafiği.....                                                                          | 148 |

|                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.7. Beton numunelerine ait ortalama eğilme dayanımı değerleri. ....                               | 150 |
| Şekil 4.8. Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı değerleri arasındaki ilişki grafiği. ....                 | 154 |
| Şekil 4.9. Erken yaş büzülme değişim oranları (binde). ....                                              | 155 |
| Şekil 4.10. Lifli betonlara ait büzülme değerleri. ....                                                  | 155 |
| Şekil 4.11. Lifsiz beton karışımlarından elde edilen sıcaklık-zaman verileri. ....                       | 156 |
| Şekil 4.12. %1 lif takviyeli beton karışımlarından elde edilen sıcaklık-zaman verileri. ....             | 157 |
| Şekil 4.13. %2 lif takviyeli beton karışımlarından elde edilen sıcaklık-zaman verileri. ....             | 157 |
| Şekil 4.14. %3 lif takviyeli beton karışımlarından elde edilen sıcaklık-zaman verileri. ....             | 158 |
| Şekil 4.15. Ağırlıklı olgunluk-eğilme dayanımı ilişkisi. ....                                            | 159 |
| Şekil 4.16. Ağırlıklı olgunluk-basınç dayanımı ilişkisi. ....                                            | 159 |
| Şekil 4.17. Nurse-Seul olgunluk-eğilme dayanımı ilişki grafiği. ....                                     | 160 |
| Şekil 4.18. Nurse-Seul olgunluk-basınç dayanımı ilişki grafiği. ....                                     | 161 |
| Şekil 4.19. Lif miktarı ile eğilme dayanımı farkları arasındaki ilişki grafiği. ....                     | 163 |
| Şekil 4.20. Model-deneysel eğilme dayanımı ilişkisi. ....                                                | 164 |
| Şekil 4.21. Lif miktarı ile basınç dayanımı farkları arasındaki ilişki grafiği. ....                     | 166 |
| Şekil 7.1. GRC-CTB restorasyon uygulaması. ....                                                          | 186 |
| Şekil 7.2. GRC-CTB cephe kaplama uygulaması. ....                                                        | 187 |
| Şekil 7.3. GRC-CTB kendinden yalıtımlı panel kaplama uygulaması. ....                                    | 188 |
| Şekil 7.4. GRC-CTB çelik karkaslı büyük boyutlu panel uygulaması. ....                                   | 189 |
| Şekil 7.5. GRC-CTB çelik karkaslı büyük boyutlu panel uygulaması. ....                                   | 190 |
| Şekil 7.6. GRC-CTB dekoratif ve klasik cephe süsleme ve tekstürlü kaplamalar. ....                       | 191 |
| Şekil 7.7. GRC-CTB özel tekstürlü ve kendinden yalıtımlı cephe kaplaması (Fotoğraflar Cemal Emden). .... | 192 |
| Şekil 7.8. GRC-CTB kendinden yalıtımlı panel kaplama uygulaması. ....                                    | 193 |
| Şekil 7.9. GRC-CTB organik formlu kaplama uygulaması. ....                                               | 194 |
| Şekil 7.10. GRC-CTB kendinden renkli narin lamel uygulaması. ....                                        | 195 |
| Şekil 7.11. GRC-CTB eğrisel ve çift eğrilikli yüzey kaplamaları. ....                                    | 196 |
| Şekil 7.12. GRC-CTB kendinden yalıtımlı tekstürlü panel uygulaması (Fotoğraf Cemal Emden). ....          | 197 |
| Şekil 7.13. GRC-CTB çelik taşıyıcı sisteme monte edilen kaplamalar. ....                                 | 198 |
| Şekil 7.14. GRC-CTB özel geometrili ve eğrisel parapet kaplamaları (Fotoğraf Hacer Bozkurt). ....        | 199 |
| Şekil 7.15. GRC-CTB özel geometrili ve yüzeyli cephe kaplaması (Fotoğraf: Beni Kohen). ....              | 200 |



## ÇİZELGE LİSTESİ

|                                                                                                                                | <u>Sayfa No</u> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Çizelge 2.1. Beton güçlendirme yöntemleri. ....                                                                                | 5               |
| Çizelge 2.2. Lif takviyeli betonların bazı özelliklerinde lifsiz betonlara oranla beklenen artış aralıkları. ....              | 7               |
| Çizelge 2.3. Betonda yaygın kullanılan liflerin teknik özellikleri. ....                                                       | 10              |
| Çizelge 2.4. Betonda kullanımı araştırılan nano malzemeler. ....                                                               | 22              |
| Çizelge 2.5. Farklı cam tiplerinin özellikleri. ....                                                                           | 25              |
| Çizelge 2.6. Tipik bir bileşim. ....                                                                                           | 26              |
| Çizelge 2.7. GRC-CTB Ürünlerin sınıflarına göre tasarım oranları. ....                                                         | 55              |
| Çizelge 2.8. Cam lifi takviyeli betonun fiziksel özellikleri (28 Günlük). ....                                                 | 56              |
| Çizelge 2.9. GRC-CTB Üretimi kalite kontrol standart ilişkisi. ....                                                            | 64              |
| Çizelge 2.10. GRC-CTB Üretimi için teknik şartname önerisi. ....                                                               | 65              |
| Çizelge 2.11. Başlangıç sıcaklığına bağlı dayanım-yaş değerleri. ....                                                          | 82              |
| Çizelge 2.12. Plowman'ın denklemine göre bölgeleşmiş sabitler. ....                                                            | 85              |
| Çizelge 2.13. Ağırlıklı olgunluk hesap örneği. ....                                                                            | 92              |
| Çizelge 3.1. Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri. ....                                                                  | 116             |
| Çizelge 3.2. Kullanılan agreganın kimyasal özellikleri. ....                                                                   | 117             |
| Çizelge 3.3. Kullanılan metakaolinin kimyasal özellikleri. ....                                                                | 118             |
| Çizelge 3.4. AR cam lifinin fiziksel özellikleri. ....                                                                         | 119             |
| Çizelge 3.5. AR cam lifinin kimyasal özellikleri. ....                                                                         | 120             |
| Çizelge 3.6. Kullanılan akışkanlaştırıcının fiziksel özellikleri. ....                                                         | 120             |
| Çizelge 3.7. Kullanılan akrilik polimerin fiziksel özellikleri. ....                                                           | 121             |
| Çizelge 3.8. Kullanılan suya ait analiz sonuçları. ....                                                                        | 121             |
| Çizelge 3.9. Kullanılan karışım oranları tablosu. ....                                                                         | 122             |
| Çizelge 3.10. Deneysel çalışma planı. ....                                                                                     | 122             |
| Çizelge 4.1. Yoğunluk değerlerine ait açıklayıcı istatistikler. ....                                                           | 131             |
| Çizelge 4.2. Yoğunluk değerleri üzerinde beton yaşları arasında gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları. ....               | 132             |
| Çizelge 4.3. Betonların yoğunluk verileri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları. ....           | 133             |
| Çizelge 4.4. Her bir yaşta lif miktarına göre gruplar arasındaki Duncan testi sonuçları. ....                                  | 134             |
| Çizelge 4.5. LEEB sertlik değerlerine ait açıklayıcı istatistikler. ....                                                       | 136             |
| Çizelge 4.6. Cam lifi takviyeli beton numunelerine ait beton yaşları arasında gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları. .... | 137             |
| Çizelge 4.7. Betonların LEEB sertlik değerleri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları. ....      | 138             |
| Çizelge 4.8. Basınç dayanımı ile LEEB sertlik değerleri arasındaki regresyon analizi sonucu. ....                              | 140             |
| Çizelge 4.9. Basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler. ....                                                    | 141             |
| Çizelge 4.10. Basınç Dayanımı değerleri üzerinde beton yaşları arasında gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları. ....       | 143             |
| Çizelge 4.11. Cam lifi takviyeli beton numunelerine ait lif oranları arasında gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları. .... | 144             |

|                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Çizelge 4.12. Betonların basınç dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları. ....                | 145 |
| Çizelge 4.13. Betonların basınç dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları. ....                | 146 |
| Çizelge 4.14. Eğilme dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler. ....                                                                | 149 |
| Çizelge 4.15. Eğilme dayanımı değerleri üzerinde beton yaşları arasında gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları. ....                    | 151 |
| Çizelge 4.16. Cam lifi takviyeli beton numunelerine ait lif oranları arasında gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları. ....              | 151 |
| Çizelge 4.17. Beton yaşları arasında eğilme dayanımı değerlerine üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları. .... | 152 |
| Çizelge 4.18. Lif oranları arasında eğilme dayanımı değerlerine üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları. ....  | 153 |
| Çizelge 4.19. Modelden hesaplanan olgunluk değerlerine karşılık gelen eğilme dayanımı. ....                                                 | 162 |
| Çizelge 4.20. Modelden hesaplanan olgunluk değerlerine karşılık gelen basınç dayanımı değerleri. ....                                       | 165 |

## KISALTMALAR

|                                  |                                                                                                                       |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2B                               | İki boyut                                                                                                             |
| 3B                               | Üç boyut                                                                                                              |
| ACI                              | American concrete institute (amerikan beton enstitüsü)                                                                |
| AGC                              | Asahi glass co.                                                                                                       |
| ANSYS                            | Bilgisayar destekli mühendislik programı                                                                              |
| AR                               | Alkali resistant (alkaliye dirençli)                                                                                  |
| ASTM                             | American society for testing and materials                                                                            |
| CAC                              | Kalsiyum alüminat çimentoları                                                                                         |
| CEMIJ                            | Cement industrie ijmuiden                                                                                             |
| CEN                              | Comité Européen de normalisation (avrupa standartlar komitesi)                                                        |
| CNF                              | Karbon nanotüp                                                                                                        |
| CNT                              | Karbon nanolif                                                                                                        |
| CTB                              | Cam lif takviyeli beton                                                                                               |
| DWNT                             | Çift cidarlı nanotüp                                                                                                  |
| EN                               | European standards (avrupa standartları)                                                                              |
| FHP                              | Freiesleben Hansen ve Pedersen                                                                                        |
| FRP                              | Fiber reinforced plastics (lif takviyeli polimer)                                                                     |
| GRC                              | Glassfibre reinforced concrete (cam lif takviyeli beton)                                                              |
| GRCA                             | International glassfibre reinforced concrete association (uluslararası cam lif takviyeli beton derneği)               |
| GRP                              | Glass fibre reinforced plastics (cam lifi takviyeli kompozit plastikler)                                              |
| HAC                              | High alumina cement (yüksek alüminyum çimento)                                                                        |
| HDPE                             | High density polyethylene (yüksek moleküler ağırlıklı polietilen)                                                     |
| HPFRCC                           | High performance fibre reinforced cementitious composites (yüksek performanslı lif takviyeli çimento esaslı kompozit) |
| ISO                              | International Organization for Standardization                                                                        |
| LDH                              | Katmanlı çift hidroksitler                                                                                            |
| LOP                              | Limit of proportionality (orantılık sınırı)                                                                           |
| MDF                              | Medium density fiberboard (orta yoğunluklu lif levha)                                                                 |
| MMT                              | Montmorillonite killer                                                                                                |
| MOR                              | Modulus of rupture (kırılma katsayısı)                                                                                |
| MTK                              | Metakaolin                                                                                                            |
| MWNT                             | Çok cidarlı nanotüp                                                                                                   |
| n-Ag                             | Nano-gümüş                                                                                                            |
| n-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Nano-alumina                                                                                                          |
| NBS                              | National bureau of standards (ulusal standartlar bürosu)                                                              |
| NEG                              | Nippon electric glass                                                                                                 |
| NEN                              | Netherlands standardization institute (Hollanda standartları enstitüsü)                                               |
| NGP                              | Nanographene plakalar                                                                                                 |
| n-Mg(OH) <sub>2</sub>            | Nano- magnezyum hidroksit                                                                                             |
| NS                               | Nurse-Saul                                                                                                            |
| n-SiC                            | Nano-silikon karpit                                                                                                   |
| n-silica                         | Nano-silika                                                                                                           |
| n-TiO <sub>2</sub>               | Nano-titanyum dioksit                                                                                                 |
| n-ZnO                            | Nano-çinko oksit                                                                                                      |

|        |                                                                                                                    |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| OPC    | Ordinary Portland cement (normal Portland çimontosu)                                                               |
| OSHA   | The occupational safety and health administration (iş güvenliği ve sağlığı kurumu)                                 |
| PVA    | Polivinil asetat                                                                                                   |
| SCC    | Self compacting concrete (kendiliğinden yerleşen beton)                                                            |
| SD     | Silis dumanı                                                                                                       |
| SHCC   | Strain hardening cement-based composites (lif takviyeli çimento esaslı kompozitler)                                |
| SIC    | Strand in cement                                                                                                   |
| SSC    | Süpersülfat çimentolar                                                                                             |
| SWNT   | Tek cidarlı nanotüp                                                                                                |
| TDC    | Thermal diffusion coefficient (termal genleşme katsayısı)                                                          |
| TRC    | Textile reinforced concrete (tekstil lif takviyeli betonlar)                                                       |
| TS     | Türk standardı                                                                                                     |
| TSE    | Türk standartları enstitüsü                                                                                        |
| UHPFRC | Ultra high performance fibre reinforced composites (ultra yüksek performanslı lif takviyeli çimentolu kompozitler) |
| UK     | Uçucu kül                                                                                                          |
| WS     | Weaver ve Sadgrove                                                                                                 |
| XRF    | X-ışını floresans                                                                                                  |
| YFC    | Yüksek fırın cürufu                                                                                                |

## SİMGELER

|                    |                                                  |
|--------------------|--------------------------------------------------|
| $R_g$              | Ağırlıklı olgunluk                               |
| $\pm$              | Artı-eksi                                        |
| $T_0$              | Başlangıç sıcaklığı                              |
| $\%$               | Binde                                            |
| $M_w$              | Bir saatlik sürede hesaplanan ağırlıklı olgunluk |
| $\geq$             | Büyük eşittir                                    |
| C                  | Çimentoya özgü katsayı                           |
| dB                 | Desibel                                          |
| E                  | Elastisite modülü                                |
| $^{\circ}\text{F}$ | Fahrenhayt                                       |
| t                  | Geçen zaman                                      |
| R                  | Genel gaz sabiti                                 |
| GPa                | Gigapascal                                       |
| g                  | Gram                                             |
| $V_f$              | Hacim kesri (lif faktörü için)                   |
| Hz                 | Hertz                                            |
| inç                | İnç                                              |
| K                  | Kelvin                                           |
| kg                 | Kilogram                                         |
| kHz                | Kilohertz                                        |
| Kj                 | Kilojoule                                        |
| F                  | Kuvvet                                           |
| l                  | Lif boyu (lif faktörü için)                      |
| d                  | Lif çapı (lif faktörü için)                      |
| lt                 | Litre                                            |
| MPa                | Megapascal                                       |
| $\text{m}^3$       | Metre küp                                        |
| $\mu$              | Mikron                                           |
| mm                 | Milimetre                                        |
| nm                 | Nanometre                                        |
| N                  | Newton                                           |
| M                  | Olgunluk derecesi                                |
| $\pi$              | Pi                                               |
| pH                 | Power of hydrogen (hidrojen gücü)                |
| $^{\circ}\text{C}$ | Santigrat                                        |
| $\text{cm}^3$      | Santimetre küp                                   |
| T                  | Sıcaklık                                         |
| n                  | Sıcaklık değişimi etkisi katsayısı               |
| W                  | Watt                                             |
| %                  | Yüzde                                            |
| $\Delta t$         | Zaman aralığı                                    |

## ÖZET

### CAM LİFİ TAKVİYELİ BETONLARDA OLGUNLUK İNDEKSİ YÖNTEMİ İLE EĞİLME VE BASINÇ DAYANIMLARININ TAHMİN MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Muhammed MARAŞLI

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

Temmuz 2019, 200 sayfa

Cam lif takviyeli betonlar (GRC-CTB) yüksek mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olması nedeniyle inşaat sektöründe kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Normal betonlardan farklı olarak çok düşük kalınlıklarda kabuk elemanlar olarak üretilmekte bu yönüyle çevresel etkiler açısından da sürdürülebilirlik kriterlerine katkı sağlamaktadır. Ayrıca kabuk elemanların tasarımında basınç dayanımından daha çok eğilme ve çekme dayanımları ana kriterler olarak kullanılmaktadır. Betonun üretim sonrası kalıpta bekleme süreleri ile söküm sürelerinin doğru bir şekilde izlenmesi, doğru zamanda kalıptan çıkarma işleminin başlatılabilmesi çok önemlidir. Kalıptan söküm sürelerinin belirlenmesinde tahribatlı test yöntemleri ile dayanımların belirlenmesi erken yaş dayanımları için uygulanabilir değildir. Bu amaçla erken yaşlardaki dayanım gelişiminin izlenmesi için çeşitli yöntemler mevcuttur. Beton dayanım gelişimini tahmin eden tahribatsız yöntemlerden biri olan olgunluk metodu; zamanın ve sıcaklığın malzemenin özellikleri üzerindeki ortak etkisini inceleyen ve aynı olgunluğa ulaşmış aynı karışıma sahip betonların aynı özelliğe sahip olduğu varsayımına dayanan tahribatsız bir yöntemdir. Bu yöntemle özellikle betonun erken yaşlardaki dayanım gelişimi çevresel etkilerde göz önünde bulundurularak değerlendirmek mümkün olmakta ve kalıp alma süreleri de kontrol edilebilmektedir. Literatürde bu yöntemde olgunluk ve basınç dayanımı ilişkisi kullanılarak tüm bu parametreler kontrol edilmektedir. Lif takviyeli betonlarda ise kritik olan dayanım değeri basınç dayanımından daha çok eğilme dayanımı olmaktadır. Bu çalışmada; cam lifi takviyeli betonlarda olgunluk indeksi yöntemi ile eğilme ve basınç dayanımının tahmin modelinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda % 0, 1, 2 ve 3 oranlarında cam lif takviyeli betonlar üretilmiştir. Her tip betonun C değerlerinin belirlenmesi için Ağırlıklı Olgunluk Yöntemi kullanılmıştır. Devamında üretilen betonlardan hem basınç hem de eğilme örnekleri içerisine yerleştirilen sıcaklık sensörleri ile 1, 2, 3, 5, 7, 14, 28 ve 56. günlerde sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilerek olgunluk indeksi değerleri hesaplanmıştır. Aynı günlerde farklı oranlarda cam lifi takviye edilmiş örnekler üzerinde basınç ve eğilme dayanımı değerleri ile yoğunluk ve Leeb sertlik ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen veriler kullanılarak lif takviyeli betonlarda lif miktarına bağlı olgunluk-basınç dayanımı, olgunluk-eğilme dayanımı ilişkileri ortaya konulmuştur. Bu veriler ışığında cam lifi takviyeli betonlar için yeni bir olgunluk-dayanım ilişki modeli önerilmiştir.

**Anahtar sözcükler:** Olgunluk, Cam lifi, Beton, GRC, Basınç-eğilme dayanımı.

## ABSTRACT

### DEVELOPMENT OF PREDICTING MODEL OF BENDING AND COMPRESSIVE STRENGTH WITH MATURITY METHOD IN GLASS FIBER REINFORCED CONCRETE

Muhammed MARAŞLI

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences,

Department of Composite Materials Technologies

Master's Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Serkan SUBASI

July 2019, 200 pages

Glassfiber Reinforced Concretes (GRC-CTB) have high mechanical and physical properties and are therefore being widely used in the construction industry. They can be produced as very thin shell elements as opposed to Portland cements and are more sustainable if environmental impacts are considered. In the design of shell elements, bending and tensile strength are preferred as the main criteria instead of the compressive strength. Monitoring the resting period of the concrete in the mould and dismantling the final product is crucial for the correct timing of the dismantling process. Destructive test methods and strength measures are not applicable in the decision of dismantling time especially if we are considering early age dismantling. Various methods exist for monitoring the development of early age strength. One of the nondestructive methods to estimate the development of concrete strength is the maturity method. This nondestructive method analyzes the joint effect of time and temperature on the material and it presumes that, the concrete which have the same mixture and the same maturity also have the same character. This method enables the monitoring the development of the concrete's strength in early ages with regard to environmental conditions and the control of demolding. In the literature we see that by using this method, the relationship between maturity and compressive strength is used to control all the parameters. In concrete that are reinforced with glass fibers, the critical strength value is the value of bending strength and not the value of compressive strength. In this study, our aim is to develop a model for the estimation of the maturity index method and the bending and compressive strength for glass fiber reinforced concrete. For this purpose, we have produced concrete with 1, 2, 3% glass fibers respectively. We have used the method of the Weighted Maturity Model to determine the C value for each type of cement. We have further produced more examples with these ratios. We have then placed warmth sensors in both the compressive and the bending models and measured the heat on the 1st, 2nd, 3rd, 5th, 7th, 14th, 28th and 56th days to calculate the values of their maturity indices. On the same days, we have measured the values of compressive and bending indices and density and Leeb hardness on concrete examples with different glass fiber ratios. We have then calculated and shown the maturity-compressive strength and the maturity-bending strength relations in cements with different glass fiber ratios by using the data we got from these experiments. As a result, we propose a new maturity-strength relationship model for glass fiber reinforced concrete.

**Keywords:** Maturity, Glass fiber, Concrete, GRC, Compressive-bending strength.

## 1. GİRİŞ

Beton en basit tanımı ile hidrolik bağlayıcı, agrega ve suyun birleşimi ile oluşan kompozit bir malzemedir. Günümüzde hidrolik bağlayıcı olarak en yaygın kullanılan malzeme ise Portland çimentosudur. Çimentonun belirli bir miktar agrega ve su ile homojen olarak karıştırılması ile elde edilen akışkan karışım kalıplanarak belirli bir sürede sertleşerek form almaktadır. Bu hali ile neredeyse iki asırdır en çok kullanılan yapı malzemelerinden biri olmuştur. Betonun yapılarda kullanım yerlerine göre gerekli olan dayanım ve dayanıklılık değerleri farklılık göstermektedir. Sadece basınç yükleri altında beton oldukça yüksek performanslar gösterirken eğilme, çekme, burulma, darbe, titreşim gibi yüklerin tek tek veya birlikte etkidiği yerlerde ise performans açısından oldukça sıkıntılı durumdadır. Başlangıçta bu yüklere karşı betonu takviye etmek için çubuk çelik donatılar kullanılmaya başlanmış ve bu yolla yeni yapım teknolojileri geliştirilmiş oldukça karmaşık yapılar inşa edilebilmiştir. Ancak çubuk donatılarla elde edilen sonuçlar sınırlıdır. Betonun tüm bünyesine dağılmış şekilde kompozit yapıyla uyumlu bir bileşen ile bu özelliklerin geliştirilmesi ayrıca sertleşme esnasında betonda oluşan mikro ve makro çatlakların önlenmesi için lif kullanılması fikri betonun gelişimindeki en etkili aşamalardan birini oluşturmaktadır.

Liflerin yapı malzemelerinde kullanılması fikri değildir. Eski mısırdaki kil malzemelerin yapı bloklarına dönüştürülmesine saman kullanıldığı bilinen bir durumdur. Bitkisel ve hayvansal lifler farklı şekillerde yapı elemanı üretiminde çok eski çağlardan beri kullanılmaktadır.

Liflerle betonun güçlendirilmesi konusu elbette beton ve yapı endüstrisinin beton problemlerini çözmek için başvurduğu yollardan biri olduğu kadar lifli beton davranışı üzerine araştırmalar yaparak konunun akademik tarafının da geliştirilmesi ve lifli betonların özellikleri, faydaları, kullanım alanları ve kullanım modelleri oluşturulması konusunda çok geniş bir literatür oluşturmuştur.

Lif takviyeli betonların endüstride kullanımına baktığımızda özellikle mimari uygulamalar ve estetik kavramının öne çıktığı yapısal olmayan çalışmalarda son 40-50 yıldır alkali dayanımlı liflerle güçlendirilmiş ve premix ya da spray (püskürtme) yöntemi



ile üretilen Glassfibre Reinforced Concrete-Cam Lifi Takviyeli Beton (GRC-CTB) çok yaygın bir uygulama alanı bulmuştur. GRC-CTB kullanarak gerek klasik mimari formların kolayca yapılabilir olması gerekse 3B olarak tasarlanmış modern cephe kaplamalarının ön üretimli yöntemlerle istenen boyut ve formlarda yapılmasını sağlamıştır. Bu yönü ile GRC-CTB malzemesi hem mühendisler hem de tasarımcılar için çok tercih edilen bir yapım malzemesi haline gelmiştir.

GRC-CTB yaygınlaşırken çeşitli nedenlerle akademik çalışmalar tarafı diğer lifli betonlar kadar yaygınlaşmamıştır. Bunda GRC-CTB'nin laboratuvarında üretiminin zorlukları kadar endüstri-üniversite arası ilişkilerin yeterli düzeyde kurulamamasının da rolü vardır. Bu durum son 10 yıldır yapılan çalışmalarla değişmeye başlamıştır.

Bu çalışmanın ilgili bölümlerinde de açıklandığı gibi GRC-CTB üretimi çok fazla deneyim, çok sıkı bir kalite kontrol süreci ve takip gerektirmektedir. Üretimler eğer yeterli deneyim ve kontrol olmadan yapılır ise ortaya çok ciddi dayanım, dayanıklılık ve estetik problemleri çıkmaktadır. GRC-CTB ürünlerde erken yaş dayanımının (eğilme ve basınç) tam zamanlı olarak takip edilmesi ve bu takibe bağlı olarak ürünlerin montaj detayları, gömülü parçaların yerleştirilmesi, kalıp gevşetme ve sökme süreleri, istif ve nakliye süreçlerinin kontrolü, yüzey işlemlerinin (aşındırma, parlatma, kumlama, asitleme vs.) zaman planının yapılabilmesi çok önemlidir.

Yine bildiğimiz üzere betonda farklı bağlayıcı tipleri, katkı kullanımı, karışım bileşenlerinin sıcaklık değerleri, üretim ortamının sıcaklık ve rüzgar şartları, kullanılan kalıp türlerinin beton hidratasyonu sırasında ısı alışverişi ve geçirgen olup olmama durumları, üretilen elemanın yüzey alanı gibi etmenler erken yaş dayanımı üzerinde etkilidir. Beton erken yaş dayanım gelişimi üzerine çalışmalar çok eskiye dayanmakta olup yine bu çalışma içerisinde detaylı anlatılan olgunluk ve ağırlıklı olgunluk kavramları beton dayanım gelişiminin beton iç sıcaklığının bir fonksiyonu olarak anlık olarak takip edilip modellenebileceğini göstermiştir.

Tahribatsız bir metot olan ağırlıklı olgunluk kavramının GRC-CTB üretiminde kullanılarak ürünlerin erken yaş eğilme dayanımlarının tahminine yönelik bir model geliştirme fikri ve çalışması GRC-CTB üretiminde ürünlerin kalitesi açısından son derece yararlı olacaktır. Bu çalışmada ortaya konulan model ile erken yaş eğilme dayanımı gelişimleri anlık takip edilerek iç gerilmeler zamanında izlenebilecek ve gerilme çatlakları önlenebilecektir. Yine ürün söküm zamanları doğru takip edilerek erken söküm

ve bunun sonucu oluşacak kalite sorunları ve kusurların önüne geçilebilecektir.

Olgunluk kavramı literatürde genellikle basınç dayanım modelleri için ve çoğunlukla kabuk olmayan yapılar için çalışılmıştır. Lifli ve kabuk yapılar üzerine çalışmalar olmakla birlikte bunlar da genellikle basınç dayanımı üzerine yapılmış çalışmalardır.

GRC-CTB üretimi ve cephe kaplama malzemesi olarak kullanımı üzerinde 30 yıldan fazla süre tecrübe edilmiş ve bu süreçte özellikle püskürtme ve kabuk (12-20 mm) sistemlerin prekast (ön üretimli) olarak yapımında ortaya çıkan onlarca problem gözlemleme şansı oluşmuştur. Bu çalışmanın başlatılması konusunda yönlendirici olan temel noktaları kısaca tekrar gözden geçirmek çalışmanın önemini anlamak için yararlı olacaktır.

GRC-CTB üretimi erken yaşları olarak karıştırma ve püskürtme işleminin başlamasından itibaren kalıpta bekletme (8-24 saat), belli bir dayanım kazanınca söküm ve kontrollü istif sahasında bekletme (24-168 saat) süreçleri anlaşılmaktadır. Bu süreçlerde ürünün katmanlar olarak dökülmesi sırasında her katman arası istenilen aderansın sağlanması için harç çalışma süreçleri çok önemlidir. Gecikmeler çok ciddi kalite sorunlarına yol açmaktadır. Kabuk üretimi sonrası içerisine yerleştirilen gömülü ankraj elemanları ve taşıyıcı frame bağlantı noktalarının doğru zamanda ve gerekli aderansı sağlayacak şekilde priz başlamadan yerleştirilmesi ürünün dayanıklılık ve servis yükleri altında dayanımını etkileyen en önemli faktörlerden biridir.

Diğer önemli bir konu ürünün kalıp içinde hidrasyonu sürecinde ortaya çıkan kuruma büzülmesi ve ürün boyut ve geometrisine bağlı olarak oluşan çatlak riskleridir. Kuruma büzülmesinin malzeme kalıp içindeyken ortaya çıkması ve kalıp içinde oluşan gerilmeler istenmeyen çatlaklara yol açabilmektedir. Bu sürecin tanımlanması ve kontrol altında tutularak çözümler geliştirilmesinde olgunluk yönteminin kullanılabileceği öngörülmektedir.

Bu çalışmada farklı lif oranlarında (%0, 1, 2 ve 3) ve 15 mm kalınlıkta plakaların ağırlıklı olgunluk yöntemi kullanılarak erken yaş eğilme dayanımları tahmin edilmeye çalışılacak, bu tahmin çalışması sonucu bir matematiksel fonksiyon önerilecek ve GRC-CTB endüstrisi için son derece yararlı ve değerli bilgiler paylaşılacaktır. Bu çalışma literatüre yeni ve özgün bir katkı sunacaktır.

Bu tür çalışmaların yaygınlaşması ile birlikte GRC-CTB üretiminde erken yaş dayanımlarının anlık izlenmesi sonucu üretim kalitesini etkileyen birçok problem için çözüm metotları geliştirilebilecektir.

## **2. KURUMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI**

### **2.1. BETON**

Beton; çimento, agrega, su ve gerektiğinde katkı maddelerinin belirli oranlarda homojen olarak karıştırılması ile elde edilen, başlangıçta plastik kıvamda olup zamanla çimentonun hidratasyonu sebebiyle katılaşp, istenilen şekli alarak sertleşen kompozit bir yapı malzemesidir [1].

Beton keşfinden bu yana bir yapı malzemesi olarak uygarlığın gelişimine paralel olarak çok farklı alanlarda ve farklı özellikleri ön plana çıkararak kullanılmıştır. Konutlar, kamu yapıları, altyapı inşaatları, deniz yapıları gibi yapıların taşıyıcı kısımlarında kullanıldığı gibi, yol, baraj, havaalanı, spor tesisleri, tüneller, sulama kanalları, maden galerileri ve köprüler gibi teknolojik gelişmelere uygun yeni yapıların temel malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Yerinde döküm yöntemleri yanında ön üretim tekniklerinin gelişmesi ile endüstriyel tesislerde ürünler haline getirilerek de prefabrike yapım tekniklerinin gelişmesi ile birlikte köprü, sulama kanalları, cephe kaplamaları, mimari ürünler, ön üretilmiş konut ve endüstriyel yapıların kolon, döşeme ve duvar elemanları, kaldırım ve zemin elemanları, deniz yapıları, şehir mobilyaları, traversler ve hatta mobilyalar üretilmekte ve yaşamın her alanında yaygınlaşmaya devam etmektedir.

Bu çok farklı alanlarda betonun kullanımı için dayanım, dayanıklılık ve estetik özellikleri de çok ciddi farklılıklar göstermektedir. Yalın beton oldukça yüksek basınç yükleri taşıyabilmekte ancak eğilme, çekme, burulma ve titreşim gibi yüklere karşı ilave güçlendirmeye ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca betonun dayanım ve dayanıklılığını etkileyen, katılaşma aşamasında ve katılaşmasından sonra fiziksel, kimyasal, termal ve yapısal etkenler sonucunda oluşan çatlaklar ortaya çıkmaktadır [2].

Bu etmenlere karşı betonun güçlendirilmesi, donatı olarak adlandırılan sürekli, süreksiz veya her iki yöntemin birlikte kullanıldığı hibrit yöntemlerle sağlanmaktadır. Sürekli yöntemde güçlendirici malzemeler beton içerisinde kesintisiz bir şekilde, süreksiz yöntemde güçlendiriciler, beton boyutlarından daha kısa bir şekilde kullanılmaktadır. Hibrit yöntemde ise hem sürekli hem de süreksiz malzemeler birlikte kullanılmaktadır. Çizelge 2.1’de beton güçlendirme yöntemleri tablo olarak verilmiştir [2].

Çizelge 2.1. Beton güçlendirme yöntemleri [2].

| Beton Güçlendirme Yöntemleri   |                                                                                                          |                                                                         |                                                                             |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Sürekli Güçlendiriciler        |                                                                                                          | Süreksiz Güçlendiriciler                                                |                                                                             |
| Çelik                          | Lif ile Güçlendirilmiş                                                                                   | Doğal Lifler                                                            | Yapay Lifler                                                                |
| Çelik çubuklar,<br>çelik hasır | Çubuk şeklinde lif takviyeli polimer türleri (FRP), ipliksi yapılar, hasır şeklinde tekstil ve dokumalar | Mineraller (asbest, kaya yünü vb.) organik (selüloz, hint keneviri vb.) | Karbon, AR cam, Polimer Çelik, Titanyum, Polivinil Asetat (PVA), Kevlar vb. |

Yukarda anlatıldığı şekilde betonun daha etkin ve verimli olarak değişik alanlarda kullanma ihtiyacı, beton teknolojisinde yeni gelişmelerin oluşmasına sebep olmuştur. Beton teknolojisindeki en önemli gelişmelerden birisi de lif katkılı betonlardır [3].

Temel olarak liflerin beton içindeki davranış modeli aşağıda açıklandığı şekilde olmaktadır. Betonun fiziksel dayanımını zorlayan kuvvetler kırılma olan yapıyı çatlatmaya başladığında çatlak, beton içerisinde ilerlerken, çatlağın ilerlemesini sağlayan gerilme enerjisi liflere aktarılmakta ve lifler tarafından karşılanmaya başlanmaktadır. Lif bu enerjiyi karşılayamadığı anda lif türüne bağlı olarak ya kopmakta ya da betondan sıyrılmaktadır. Lif koptuktan ya da sıyrıldıktan sonra, gerilme enerjisi tekrar betona aktararak çatlağı devam ettirmektedir. Çatlak bir sonraki lifle karşılaşınca kadar ilerlemeye devam etmektedir. Bu durum yük alındıkça devam etmekte ve betonda paralel çatlaklar oluşmaktadır [2].

## 2.2. LİFLİ BETONLAR VE KULLANILAN LİF TÜRLERİ

### 2.2.1. Lifli Betonlar

Geleneksel beton, enerji yutma kapasitesi, deformasyon yeteneği; çekme, yorulma, kaviteasyon, kayma, çatlama sonrası yük taşıma dayanımları açısından zayıf bir performans göstermektedir [4].

Betonun zayıf özelliklerini olumlu yönde değiştirerek iyileştirilmesi ve güçlendirilmesi için beton içerisine çeşitli yöntemlerle değişik miktarlarda, belirli boy/çap (narinlik oranı) oranına sahip olan metalik, polimerik, mineral veya doğal yapıdaki lifler katılarak lifli betonlar üretilmiştir [3].

U.S Army Corps Engineers'e göre lif takviyeli beton (GRC-CTB), içerisinde rastgele dağılmış lifler bulunan ince veya iri agrega kullanılan, çimento hamurundan yapılmış kompozit bir malzemedir [5]. Betonda lifler mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Çatlakların ani olarak yayılmasını engelleyerek, betonun sünek davranış göstermesini sağlayan lifler, oluşan deformasyon altında yük taşıyabilmesini sağlamakta ve enerji yutma kapasitesini artırmaktadır [6]. Yine liflerin farklı oranlarda kullanılması yoluyla betonun eğilme, burulma, çekme ve darbe dayanımları da istenildiği şekilde iyileştirilebilmektedir.

Lifli betonlar; köprüler, endüstri yapıları, hidrolik yapılar, patlama etkisine karşı koyacak yapılar, güvenlik odaları, yaya kaldırımları, kanal kaplamaları, borular ve ince kaplamalar gibi birçok farklı uygulamada kullanılmaktadır [7].

Belirli bir oranda kullanılan ve beton içerisinde homojen bir şekilde dağılan lifler, oluşan çatlakları önlemekte ve çatlakların beton içerisindeki ilerlemesini yavaşlatarak betonu daha dayanıklı hale getirmektedir. Daha yüksek oranlarda ve farklı boyutlarda kullanımda ise çatlak önleme yanında dayanım artışı ve süneklik performansları da iyileştirilmektedir. Lif türüne bakılmaksızın tüm lif çeşitlerinin sağlaması gereken en önemli özellik ise lifin beton içerisinde homojen olarak dağılması ve beton karıştırıldıktan sonra da bu homojenliğin bozulmamasıdır [7].

Lifler beton içinde kullanıldığında, yüksek çekme mukavemetleri sayesinde, betondaki çatlakların başlangıcını, yayılmasını ve birleşmesini önlerler [8]. Yeterli miktarlarda ve amacına uygun olarak kullanılan lifler, betonda oluşabilecek çatlaklardaki gerilmeleri çatlak oluşmamış bölgelere iletirler. Lifler çatlak sonlarına bitişik olduklarından, matristeki gerilmelerin üzerlerinden geçmesini ve böylece, daha önce çatlamamış beton kesitlerinin de dayanımından yararlanılmasını sağlamaktadırlar [13]. Çatlakların oluştuğu bölgede bu şekilde taşıma gücü artırılarak, mühendislik özellikleri gelişmiş bir malzeme elde edilmektedir. Çizelge 2.2'de lif takviyeli betonların bazı özelliklerinde matris malzemesinin özelliklerine oranla beklenen artış aralıkları, Şekil 2.1'de ise lif etkisinin betonlarda gerilme şekil değiştirme bağıntısı üzerindeki etkisi görülmektedir.

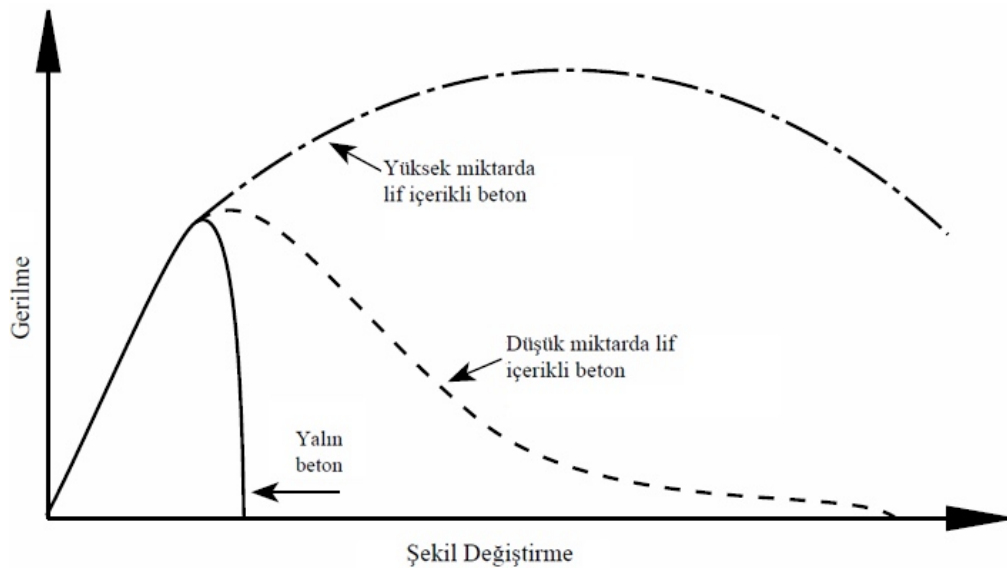
Liflerin betona verdiği katkılar kısaca şu şekilde özetlenebilir;

- Tokluğu ve çarpma direncini artırır,
- Taze betonda mikro ve makro çatlakların oluşmasını engeller,

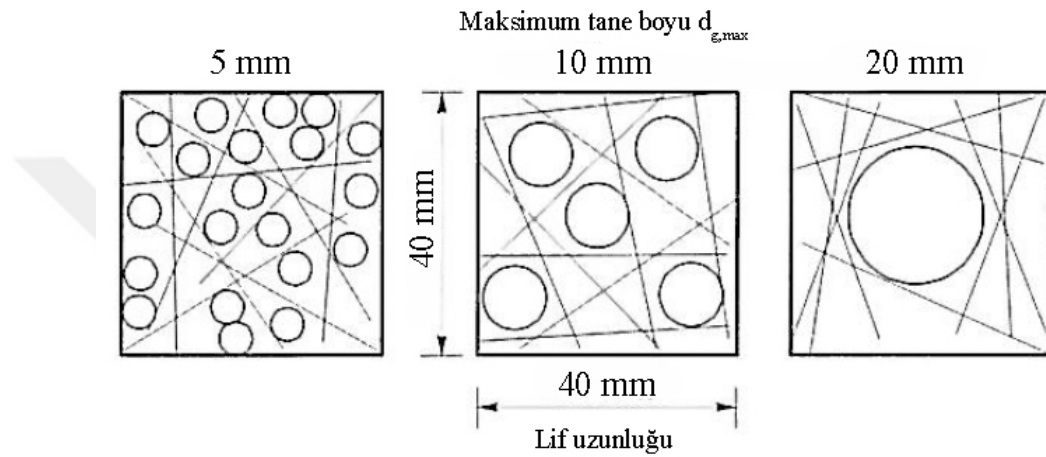
- Eğilme ve çekme dayanımlarını artırır,
- Gevrek kırılmayı engeller, enerji yutma kapasitesi artırır,
- Betonun uzun dönem dayanımını (dayanıklılığı) artırır [9],
- Bazı lif türleri ile basınç dayanımının artırılması sağlanabilir,
- Süneklik ve burulma direncini artırır,
- Aşınma dayanımını artırır ve tozumayı engeller [10],

Çizelge 2.2. Lif takviyeli betonların bazı özelliklerinde lifsiz betonlara oranla beklenen artış aralıkları [11].

| Özellik                      | Artık (%) |
|------------------------------|-----------|
| Basınç dayanımı              | ±25       |
| Elastisite modülü            | ±25       |
| Çekme dayanımı               | 25-100    |
| Eğilmede çekme dayanımı      | 25-200    |
| Tokluk                       | 100-1200  |
| Darbe dayanımı               | 100-1200  |
| İlk çatlak dayanımı          | 25-100    |
| Yorulma dayanımı             | 50-100    |
| Şekil değiştirme oranı       | 50-300    |
| Kavitasyon – erozyon direnci | 200-300   |



Liflerin yaygın olarak kullanılmasını engelleyen sorunlardan biri liflerin beton içindeki dağılımının rastgele olmasıdır. Yapılan araştırmalar liflerden elde edilen performansın lif dağılımı ile doğrudan bağlantılı olduğunu göstermiştir [13]. Liflerin homojen bir şekilde dağılmasını engelleyen etkenlerden biri de agregadır. Şekil 2.2’de de görüleceği gibi agreganın en büyük tane boyutunun artması lif dağılımını olumsuz olarak etkilemekte ve lif süreksizliğini arttırmaktadır [14]. Bu nedenle lifli betonlarda büyük tane boyutlu agregalar sınırlandırılarak küçük tane boyutlu agregalar ile çalışmak lif performansı açısından daha iyi sonuçlar vermektedir.



Şekil 2.2. Agreganın en büyük tane boyutunun lif dağılımına etkisi [15].

Beton ve lif arasındaki etkileşim lifli beton malzemelerin performansını etkileyen temel özelliktir. Bu etkileşimi açıklayabilmek için çok sayıda araştırmacı bu konuda çalışmıştır. Lif takviyeli beton özelliklerini etkileyen temel özellikler şu şekildedir [12]:

- Lifler matristen önemli ölçüde daha sert olmalıdır, yani matristen daha yüksek bir elastikiyet modülüne sahip olmalıdır,
- İyi bir lif-matris bağı olmalıdır,
- Lif geometrisi uygun olmalıdır,
- Lif uzunluğu yeterli olmalıdır,
- Lif tipi; çelik, polimer, mineral veya doğal lif olması durumu,
- Lif yüzeyinin özellikleri betona uygun olmalıdır,
- Liflerin yönlenmesi tüm yönlerde benzer olmalıdır,
- Hacimce lif içeriği yeterli olmalıdır,

- Yükleme hızı karışım yapmasına uygun olmalıdır,
- Karışımındaki liflerin durabilitesi ve uzun süreli etkisi araştırılmış olmalıdır [12].

Yukardaki parametreler arasında ilişkileri açıklayan, kullanılabilir teorik modeller oldukça sınırlıdır [16].

Yayınlanan bilgilerin yüksek hacimli lif konsantrasyonlarıyla ilgilenme eğiliminde olduğu belirtilmelidir. Bununla birlikte, ekonomik nedenlerden ötürü, uygulamadaki mevcut eğilim hacimsel olarak lif oranını en aza indirmektir. Bu durumda özelliklerdeki gelişmeler marjinal olabilir. Tipik olarak kullanılan lif miktarları için (çelik için hacimsel olarak %1'den az ve polipropilen için hacimce yaklaşık %0,1) liflerin, kompozitin elastikiyet modülü veya mukavemeti üzerinde önemli bir etkisi olmayacaktır. Bu nedenle yayınlanmış test verilerini ve üreticinin iddialarını dikkatlice değerlendirmek önemlidir. Bazı liflerin yüksek hacimli konsantrasyonlarının plastik betonu işlenemez hale getirebileceği de belirtilmelidir [12].

### 2.2.2. Lif Türleri

Bu bölümde, en çok kullanılan lif türlerinin her biri tartışılarak, liflerin üretimi, özellikleri, uygulamalardaki lif içeriği ve lif türünün beton ve harçlar üzerindeki etkileri hakkında bilgi verilmektedir.

Lifler; metaller, mineraller, bitkiler ve polimerler gibi farklı malzemelerden doğal ve sentetik olmak üzere iki grupta, farklı tip ve boyutlarda üretilmektedirler.

Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) komitesi bir lifi tanımlayan en iyi nümerik parametrenin lif boyunun eşdeğer lif çapına bölünmesiyle elde edilen “boy/çap” (aspect ratio) oranı olduğunu kabul eder.

Bu orandan yola çıkarak bir beton karışımına eklenen liflerin miktarı, hacim kesri ( $V_f$ ) olarak adlandırılan kompozitin (beton ve lifler toplamı) toplam hacminin yüzdesi olarak ölçülür. Liflerin narinliği ya da en boy oranı ise ( $l/d$ ), lif boyunun ( $l$ ) lif çapına ( $d$ ) bölünerek hesaplanan bir orandır. Farklı lif takviyeli betonların özelliklerini karakterize etmenin ve karşılaştırmanın bir başka yolu da “lif faktörü” olarak kullanmaktır. Lif faktörüne ilişkin denklem (2.1)’de belirtilmiştir [15].

$$\text{Lif faktörü} = V_f x (\text{en boy oranı} - \text{aspect ratio}) = V_f x (l/d) \quad (2.1)$$

Liflerin ince çaplı üretilmeleri ile büyük kütsel yapılar oranla daha az yapısal hata



içerirler. Bu nedenle aynı malzemenin lif formu mekanik olarak daha üstün özellikler göstermektedir [16]. Beton güçlendirmede kullanılan bazı lif çeşitlerinin tipik özellikleri Çizelge 2.3’de verilmektedir.

Çizelge 2.3. Betonda yaygın kullanılan liflerin teknik özellikleri [2], [3], [20], [21], [9], [10], [12], [13], [15], [17]–[19].

| No | Lif cinsi       | Özgül Ağırlık | Çekme dayanımı (MPa) | Elastisite modülü (GPa) | Maks. uzama (%) | Alkali direnci | Lif Çapı (µm) | Maks. sıcaklık (°C) |
|----|-----------------|---------------|----------------------|-------------------------|-----------------|----------------|---------------|---------------------|
| 1  | Normal Çelikler | 7,8           | 500-2600             | 200                     | 5-35            | Yüksek         | 100-500       | 1000                |
| 2  | Paslanmaz Çelik | 7,8           | 500-2600             | 200                     | 30              | Yüksek         | 50-100        | 1535                |
| 3  | AR Cam Lif      | 2,6           | 2000-4000            | 75                      | 20-35           | Orta           | 12-20         | 800                 |
| 4  | Karbon          | 1,60-1,91     | 1500-4000            | 200-480                 | 4-15            | Yüksek         | 8-15          | 500                 |
| 5  | Polipropilen    | 0,91-0,98     | 450-700              | 7,5-12                  | 60-90           | Yüksek         | 10-500        | 150                 |
| 6  | PVA             | 1,3           | 800-900              | 26-30                   | 50-75           | Yüksek         | 13-300        | 240                 |
| 7  | Polyester       | 1,4           | 800-1100             | 10-19                   | 8-20            | Orta           | 10-50         | 240                 |
| 8  | Aramid          | 1,42          | 700-3600             | 70-130                  | 21-40           | Orta           | 12            | 480                 |
| 9  | Akrilik         | 1,16-1,18     | 270-1000             | 14-19                   | 75-500          | Yüksek         | 13-104        | 220-235             |
| 10 | Polietilen      | 0,92-0,96     | 75-590               | 5                       | 30-800          | Yüksek         | 25-1000       | 130                 |
| 11 | HDPE            | 0,93-0,97     | 2800                 | 120                     | 50              | Yüksek         | 8-38          | -                   |
| 12 | Naylon          | 1,14          | 970                  | 5                       | 200             | Yüksek         | 23            | 200-220             |
| 13 | Bazalt          | 2,7-2,8       | 2800-4800            | 86-90                   | 30-35           | Yüksek         | 13-20         | 650                 |
| 14 | Selüloz         | 1,5           | 500                  | 60                      | -               | Yüksek         | 1,5           | -                   |
| 15 | Asbestler       | 3,2-3,5       | 552-966              | 83-138                  | 6               | Yüksek         | 0,02-3        | -                   |

Beton içerisinde yaygın olarak kullanılan lifler; cam, çelik, akrilik, aramid, karbon, naylon, polyester, polietilen, polipropilen, Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (HDPE), PVA ve bazalt gibi metal ve sentetik lifler yanında ağaç selülozu, hindistan cevizi, şeker kamışı küspesi, bambu, jüt, ağaç ve sebze lifleridir. Lifli betonlarda, bütün lif çeşitlerinin sağlanması gereken en önemli özelliklerden biri, liflerin homojen olarak beton içerisinde dağılması ve bu dağılımın karışım yapıldıktan sonra da bozulmamasıdır.

#### 2.2.2.1. Doğal Lifler

Yerel insan gücü ve teknolojiyi kullanarak düşük maliyetli ve düşük enerji seviyelerinde doğal takviye malzemeleri elde edilebilir. Doğal liflerin bir beton takviye formu olarak

kullanılması, geleneksel inşaat malzemelerinin çok fazla bulunamadığı ya da çok pahalı olduğu daha az gelişmiş bölgeler için özellikle önemlidir. Kiremit, oluklu levha, boru, silo ve tank yapımında sisal lifli betonarme kullanılmıştır. Fil otu takviyeli harç, düşük maliyetli konut projeleri için kullanılmıştır. Odun-selüloz-lif takviyeli çimento, yassı ve oluklu sac ve basınçlı boruların imalatında ticari uygulamalara sahiptir. Doğal liflerin tipik özellikleri Çizelge 2.3’de gösterilmektedir. Doğal lifler işlenmemiş veya işlenmiş olabilir.

#### *İşlenmemiş doğal lifler*

Şeker kamışı küspesi, Hindistan cevizi, bambu, sisal, jüt, ağaç ve sebze lifi gibi işlenmemiş doğal liflerden yapılan ürünler, birkaç ülkede test edilmiştir. İşlenmemiş doğal lifler kullanılarak yapılan betonun özellikleri, lifin tipi ve uzunluğu ile hacimsel kullanım oranını içeren bir dizi faktöre bağlıdır. Mekanik özelliklerde bir miktar iyileşme göstermek için, minimum lif içeriği hacimce %3 civarındadır.

#### *İşlenmiş doğal lifler*

Ağaç selülozu en sık kullanılan doğal liftir. Bu işlem odun yongalarının bir sodyum hidroksit, sodyum karbonat ve sodyum sülfür çözeltisi içerisinde pişirilmesini içerir. Üç ana bileşenden daha fazla veya daha az içeren selüloz, hemiselüloz ve ligna içeren farklı tiplerde ahşap-selüloz lifi ağartma yoluyla elde edilebilir. Ahşap selüloz lifi, polipropilen, polietilen, polyester ve akrilik gibi birçok yapay lifle karşılaştırıldığında nispeten iyi mekanik özelliklere sahiptir [18].

Hassaslaştırılmış selüloz lifi, seçilen ahşap sınıflarından yaklaşık 2 GPa'ya kadar çekme dayanımlarında ve uygun kağıt hamuru işlemleri kullanılarak üretilir. 500 MPa’lık lif çekme dayanımları, kimyasal bir hamurlama prosesi ve daha yaygın, daha ucuz, odun sınıfları kullanılarak rutin olarak elde edilebilir.

Geleneksel karıştırma teknikleri kullanılarak, düşük su muhtevasında çimento matrisine dahil edilebilecek lif miktarı, liflerin matris içine düzgün biçimde karıştırılma kapasitesi ile sınırlıdır. Bu nedenle, başlangıçta yüksek su muhtevasında ve daha sonra susuzlaştırma prosedürleri kullanılarak lifin matris ile karıştırılmasını içeren imalat teknikleri etkili ve yaygındır.

Lignini ayrıştırılmamış ahşap-selüloz lifi, çimento matrisinin kürlenmesini olumsuz yönde etkileyebilir. Bunun nedeni, şekerin ve diğer organik içeriklerinin çimento matrisine sızması, çimento prizini geciktirebilmesi veya tamamen engelleyebilmesidir.

Otoklavlanmış ahşap-selüloz çimento kompozitlerinden elde edilen sonuçlar, bu tür ürünlerin nem içeriğine duyarlı olabileceğini göstermektedir. Odun-selüloz lif kompozitlerin performansı hakkında yayınlanmış bilgiler çelişkilidir. Yoğun araştırma ve geliştirme çalışmaları sonucunda, selüloz hamuru lifleri artık bazı yerlerde çimento kompozitlerinde asbest yerine yaygın olarak Şekil 2.3'deki gibi kullanılmaktadır.



Şekil 2.3. Farklı tip selüloz lifler.

#### *Nanoselüloz lifler*

Selüloz gibi doğal liflerin esneklik, dayanıklılık gibi mekanik özellikleri nano boyutta değişmektedir. Selüloz nano taneciklerin keşfi, malzeme biliminde yeni bir süreç başlatmıştır. Nano boyutta özütü çıkartılan selüloz, ilk nesil selülozların yapısal düzeydeki hatalarını içermediğinden, selüloz bazlı kompozit malzemelerin gelişiminin önünü açmıştır.

Nanoselüloz; çapı 5-20 nm, boyu ise mikrometre cinsinden ölçülebilecek kadar küçük boyutlardaki selüloz lifleridir. Nanoselüloz, selüloz içeren doğal malzemelerin birçoğundan elde edilebilmektedir. Nanoselüloz kağıt ve kartonlardan yiyeceklere, hijyen ve kozmetik malzemelerinden elektronik sektörüne kadar çok yaygın alanlarda kullanıldığı gibi çok sayıda çalışmada kompozit malzemeler ve beton kompozitlerde de kullanılabilmektedir [2].

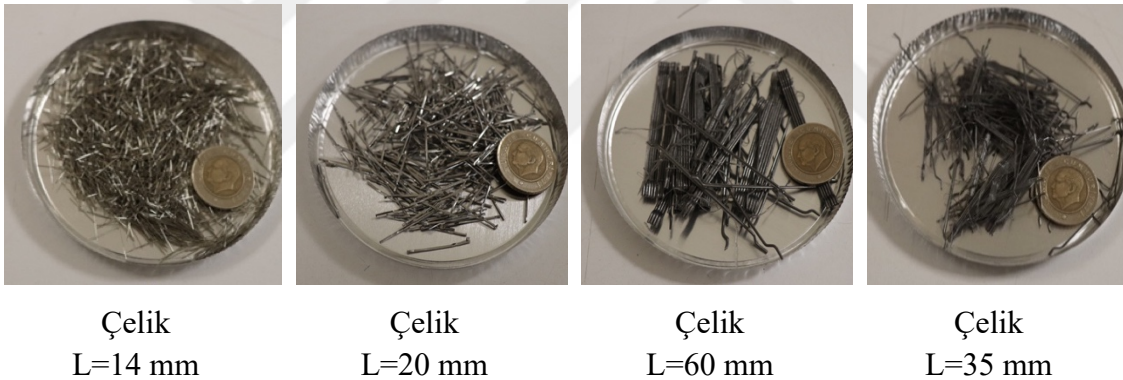
#### *2.2.2.2. Yapay Lifler*

##### *Çelik*

Çelik lifler, 1900'li yılların başından beri betonda kullanılmaktadır. Erken dönem lifler yuvarlak ve pürüzsüzdü ve tel istenen boyutta kesilerek kullanılmaktaydı. Günümüzde düz, pürüzsüz liflerin kullanımı büyük ölçüde ortadan kalkmıştır ve modern lifler ya pürüzlü yüzeylere, çengel uçlara sahiptir ya da uzunlukları boyunca kıvrımlı ya da dalgalıdır. Ticari olarak üretilen modern çelik lifler, çelik telden soğuk çekilerek, çelik

sacdan yarılarak veya sıcak çekme işlemiyle üretilir. Tipik olarak çelik lifler, 0,15 mm ila 2 mm arasında eşit çaplarda (kesit alanına göre) ve uzunlukları 7 ila 75 mm arasındadır. En boy oranları (aspect ratio) genellikle 20 ila 100 arasındadır. Yüksek sıcaklık uygulamaları için paslanmaz çelik lifler kullanılmıştır. Bazı lifler, kullanım ve karıştırmayı kolaylaştırmak için suda çözünür bir yapıştırıcı kullanarak demet halinde harmanlanır.

Çelik lifler; yüksek çekme dayanımına (0,5 - 2 GPa), elastisite modülüne (200 GPa), sünek/plastik gerilme-şekil değiştirme özelliğine ve düşük sünmeye sahiptir. Tipik olarak, çelik lif içeriği hacimce %0,25 ila %2,0 aralığındadır. Hacimce %2'den fazla lif içeriği genellikle düşük işlenebilirlik ve lif dağılımı ile sonuçlanır, ancak karışımın hamur içeriğinin arttırıldığı ve kaba agrega boyutunun yaklaşık 10 mm'den büyük olmadığı durumlarda başarıyla kullanılabilir. Hacimce %1,5'e kadar lif içeren çelik lif takviyeli beton, 125 ila 150 mm çapındaki boru hatları kullanılarak başarıyla pompalanmıştır. Beton içerisinde kullanılan farklı çelik lifler Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4. Farklı boyut ve geometride liflerdeki çelik lifler.

Hem ıslak hem de kuru yöntemler uygulanan püskürtme beton üretimlerinde hacimce %2'ye kadar çelik lif içeriği kullanılmıştır. Bulamaç emdirilmiş lifli betonlarda hacimce %25'e varan çelik lif içeriği elde edilmiştir.

Çelik lif içeren betonların, darbeye karşı büyük ölçüde geliştirilmiş dirence, basınç, eğilme ve burulma altında daha büyük sünekliğine sahip oldukları gösterilmiştir. Betonun yorulma direncinin %70'e kadar arttığı çalışmalarla gösterilmiştir. Çelik liflerin betona ek takviye olarak dahil edilmesinin, termal şok ve termal gradyanlar nedeniyle yayılmanın azaltılmasına yardımcı olabileceği düşünülmektedir. Normal çelik liflerin korozyon direncinin olmaması, dökülme ve yüzey lekelemesinin muhtemel olduğu açık beton durumlarında bir dezavantaj olabilir.

### *Sentetik lifler*

Sentetik lif, petrokimya ve tekstil endüstrisindeki araştırma ve geliştirmeden ortaya çıkan insan yapımı liflerdir. İki farklı fiziksel lif formu vardır: Monofilament lifler ve fibrillatlı banttardan üretilen lifler. Halen, uygulamada kullanılan iki farklı sentetik lif hacmi vardır, düşük hacim yüzdesi (hacimce %0,1 ila %0,3) ve yüksek hacim yüzdesi (hacimce %0,4 ila 0,8). Çoğu sentetik lif uygulaması hacimce %0,1'dir. Bu seviyede betonun dayanımı etkilenmemiş sayılır ve çatlak kontrol özellikleri ön plana çıkar. Çimento beton matrislerinde en fazla denenmiş lif tipleri şunlardır: Çelik (paslanmaz ve kaplamalı) akrilik, aramid, karbon, bazalt, naylon, polyester, polietilen, polipropilen, Alkali Resistant (AR) cam lifi, PVA, karbon nanolifler, selüloz ve nano-selülozlardır.

### *Akrilik*

Birçok lif takviyeli beton üründe asbest lifin yerine akrilik lif kullanılmıştır. Bu işlemde lifler başlangıçta seyreltik bir su ve çimento karışımı içinde dağıtılır. Plastik büzülme çatlamaasının etkilerini azaltmak için düşük hacimlerde geleneksel betona akrilik lifler eklenmiştir.

### *Aramid*

Aramid lifleri, birim kütle başına cam liflerin iki buçuk katı, çelik liflerinse beş katı güçlüdür. Bu liflerin nispeten yüksek maliyeti nedeniyle, aramid lif takviyeli beton, öncelikle bazı yüksek mukavemetli uygulamalarda asbestli çimento yerine kullanılmıştır.

### *Karbon*

Karbon lifi diğer lif türlerinden önemli ölçüde daha pahalıdır. Bu nedenle ticari kullanımı sınırlıdır. Karbon lifler, uygun organik materyallerin lifli formlarda yüksek sıcaklıklarda karbonize edilmesi ve daha sonra elde edilen grafit kristalitlerinin sıcak germe ile hizalanmasıyla üretilir. Lifler, Tip I (yüksek modül) veya Tip II (yüksek mukavemet) olarak üretilir ve fiziksel özellikleri için malzeme kaynağına ve sıcak esneme derecesine bağlıdır. Karbon lifler çeşitli formlarda mevcuttur ve asbestinkine benzer bir fibriller yapıya sahiptir.

Petrol ve kömürden yapılan karbon lifi, lifli malzemelerden yapılan geleneksel karbon liften daha ucuzdur. Petrol bazlı malzemeler dışındaki uygun organik malzemeleri karbonize ederek üretilen Tip I ve II karbon lifleri, 20 ila 40 kat daha güçlüdür ve zift bazlı karbon liflerden 100 kat daha büyük bir elastisite modülüne sahiptir. Karbon lif,

sürekli lifler halinde veya ayrı ayrı doğranmış lifler halinde bulunabilir. Sürekli iplikçikler normal olarak üretim sırasında optimum lif oryantasyonunu sağlamak için önceden yerleştirilir ve hizalanır. Kırpılmış lifler genellikle karıştırma işlemi sırasında harca dahil edilir ve bu nedenle karışım boyunca rastgele yönlendirilir.

Lifin geniş yüzey alanı nedeniyle kırılmış karbon lif ile çimento ve sudan oluşan doyurucu bir karışım elde etmek zordur. Araştırma, süreksiz düşük modüllü karbon liflerin düzgün bir şekilde dağılmasının bir omnimikseri ve katkı kullanılarak elde edildiğini göstermiştir. Karbon lif, yüksek çekme dayanımı ve elastikiyet modülü ve kırılma gerilme-şekil değiştirme özelliğine sahiptir. Karbon lif takviyeli betonun uygulanabilirliğini ekonomik olarak belirlemek için ek araştırmalara ihtiyaç vardır. Karbon lif kompozitlerin yangına dayanıklılık özellikleri değerlendirilmelidir, ancak maliyeti göz ardı edersek yapısal uygulamalar ümit verici görünmektedir (Şekil 2.5).



Bazalt ve Karbon Lifler  
(Bobin ve Kesilmiş Olarak)



Karbon  
L=20 mm



Bazalt  
L=6 mm



Bazalt  
L=25 mm



Bazalt  
L=6 mm



Karbon  
L=12 mm

Şekil 2.5. Farklı tip karbon ve bazalt lifler.

### *Bazalt*

Bazalt lifi, Lif Takviyeli Polimerlerde (FRP) ve yapısal kompozitlerde kullanımı göreceli olarak yenidir. Cam lifi ile benzer bir kimyasal bileşime sahiptir, ancak daha iyi dayanım özelliklerine sahiptir ve çoğu cam lifi aksine, alkali, asidik ve tuz saldırılarına karşı oldukça dirençlidir, bu da onu beton, köprü ve kıyı şeridi yapıları için iyi bir güçlendirme malzemesine aday yapmaktadır. Karbon life benzer şekilde hem kırılmış hem de dokuma formunda beton güçlendirmek için çalışmalar yapılmaktadır [17]. Bazalt lifli donatılar donatı çeliğine oranla daha yüksek dayanıma sahip ve üç kat daha hafiftir. Termal genleşme katsayısı beton termal genleşme katsayısına oldukça yakındır. Alkali reaksiyonlara karşı yüksek dirence sahiptir. Hem lif hem de reçinelerle emprenye edilerek değişik çaplarda çubuk formunda da üretilebilirler. Tüm bu üstün özellikleri ile birçok alanda çelik donatıya alternatif olma potansiyeli bulunmaktadır [22].

### *Naylon*

Naylon, polimer ailesini tanımlayan genel bir isimdir. Naylon lifin özellikleri, temel polimer tipinde, farklı seviyelerde katkı maddelerinin eklenmesi, üretim koşulları ve lif boyutlarıyla kazandırılır. Şu anda beton için sadece iki tip naylon lif pazarlanmaktadır. Naylon; ısıya dayanıklı, hidrofilik, nispeten inert ve çok çeşitli malzemelere karşı dayanıklıdır. Naylon özellikle darbe dayanımı ve eğilme tokluğu sağlamada ve ilk çatlağın ardından betonun yük taşıma kapasitesini sürdürme ve arttırmada etkilidir.

### *Polyester*

Polyester lifler monofilament formunda mevcuttur ve termoplastik polyester grubuna aittir. Sıcaklığa karşı hassastırlar ve normal servis sıcaklıklarının üstünde özellikleri değiştirilebilirler. Polyester lifler biraz hidrofobiktir. Betonda plastik büzülme çatlağını kontrol etmek için düşük oranda (hacimce %0,1) polyester lif kullanılmıştır.

### *Polietlen*

Polietlen, siğile benzer yüzey deformasyonları ile monofilament formunda beton için üretilmiştir. Pulpa formundaki polietlen, asbest liflerine alternatif olabilir. Polietlen liflerle hacimce %2 ila %4 oranında takviye edilmiş beton, ilk çatlağa kadar doğrusal bir eğilme yükü sapma davranışı sergiler, bunu takiben liflerin kopmasına kadar yükte bir miktar artışa izin veren bir yük aktarımı izler.

### *Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (HDPE) Lif*

HDPE lif 1950'lerde Ruhrchemie tarafından geliştirilmiş olup yüksek aşınma dayanımı, kimyasallara karşı dayanım, kopma dayanımı ve yüksek alkali dayanımları ile dikkat çekmektedir. Ancak ekonomik nedenler betonda kullanımı sınırlandırılmaktadır.

Silo, boru hatları, medikal ve spor ürünleri, dağ bisikletleri seramikler, dağcılık ekipmanları, balıkçılık ekipmanları, yelken ve zırhlı araçlar gibi çok geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Betonda kullanımı konusunda da literatürde örnekler vardır [10].

### *Polipropilen*

Polipropilen lif ilk olarak 1960'larda betonu güçlendirmek için kullanıldı. Polipropilen, malzemeyi bir kalıbın içinden ekstrüzyon işlemleri kullanılarak sıcak çekerek lifi yapılan sentetik bir hidrokarbon polimeridir. Polipropilen lifler, istenen uzunluklarda kesilebilen dairesel kesitli veya fibrillenmiş filmler veya bantlar ile sürekli dikdörtgen kesitli mono filamentler olarak üretilir.

Polipropilen lifler hidrofobiktir ve bu nedenle çimento matrisi; düşük erime noktası, yüksek yanıcılık ve nispeten düşük bir elastikiyet modülü ile zayıf bağ özelliklerinin dezavantajlarına sahiptir. Uzun polipropilen lifler, esnekliklerinden ve mikser bıçaklarının önde gelen kenarlarının etrafına sarılma eğiliminden dolayı karıştırılmaları zor olabilir. Polipropilen lifleri serttir ancak düşük çekme dayanımı ve elastikiyet modülüne sahiptirler.

Monofilament polipropilen lifleri, nispeten küçük spesifik yüzey alanlarından dolayı çimento matrisi ile doğal olarak zayıf bağa sahiptir. Fibrilatlanmış polipropilen lifler yarılr ve açık bir ağa genişletilir, böylece gelişmiş bağ özelliklerine sahip daha geniş bir spesifik yüzey alanı sunar. El-paketleme imalat teknikleriyle hacmen %12'ye kadar olan polipropilen lif içeriğinin başarılı bir şekilde kullanıldığı iddia edilmektedir, ancak betondaki %0,1'lik 50 mm'lik bir lifin betonda 75 mm'lik bir çökme kaybına neden olduğu rapor edilmiştir. Polipropilen liflerinin hacimce %0,1 ila 0,3 oranında kullanılması ile betonun kuruma büzülmesini azalttığı rapor edilmiştir.

Betonda yaygın kullanılan sentetik lifler Şekil 2.6'da gösterilmiştir.





AR Cam  
L=12 mm



Polipropilen  
L=40 mm



Naylon  
L=50 mm



Polipropilen  
L=12 mm



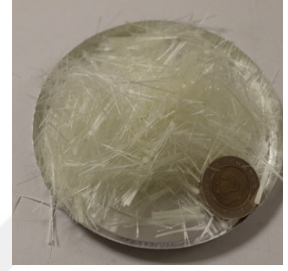
Naylon-Mikro  
L=6 mm



Naylon  
L=25 mm



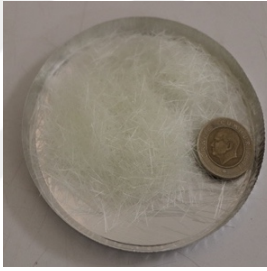
PVA  
L=13 mm



PVA  
L=12 mm



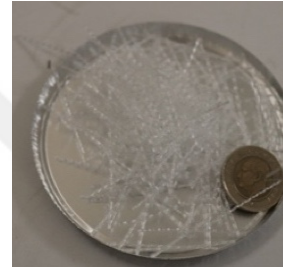
AR Cam  
L=32 mm



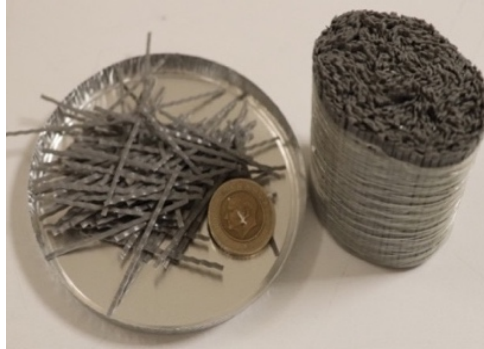
PVA  
L=12 mm



PVA  
L=12 mm



Naylon-Makro  
L=40 mm



Sentetik-Enduro 600  
L=60 mm



PVA  
L=30 mm

Şekil 2.6. Farklı tip makro ve mikro sentetik lifler.

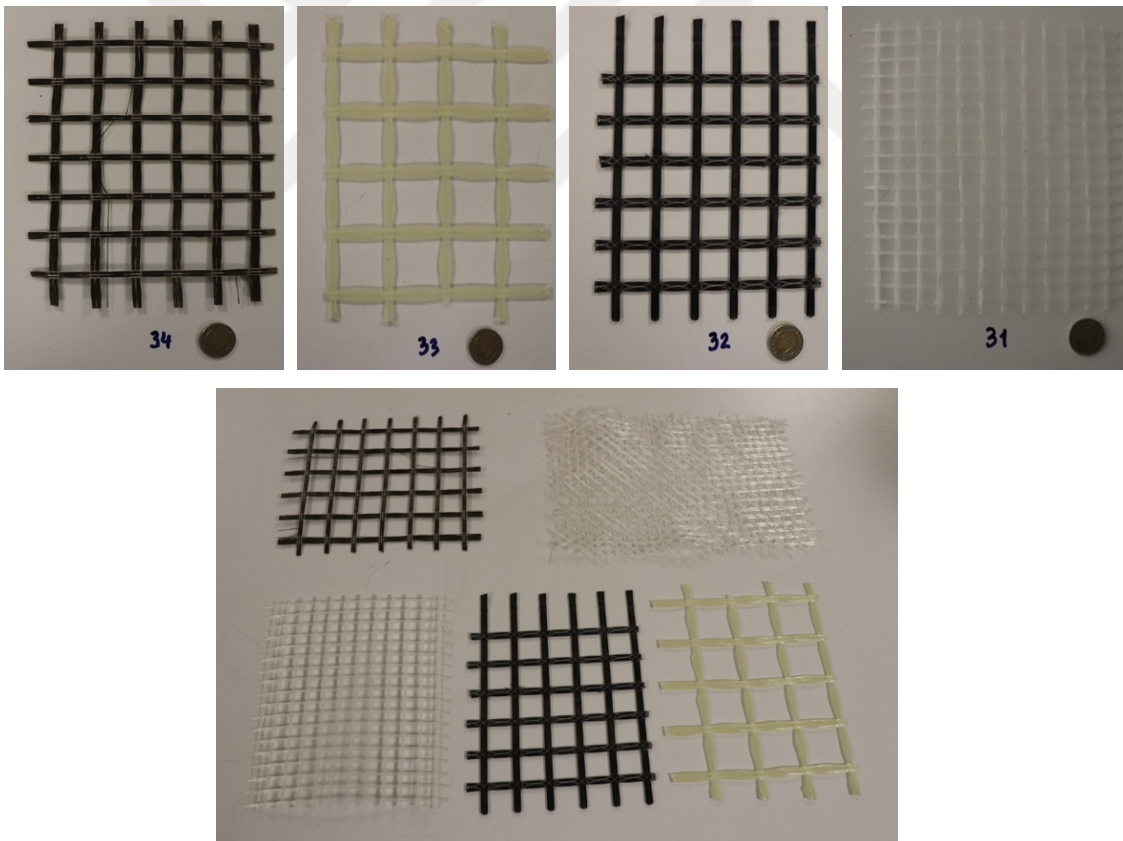
### *Tekstil ve 3B Tekstil*

Son yıllarda yapılan çalışmalarda değişik boylarda liflerin karışıma eklenmesi yanında AR cam lifi, karbon, bazalt gibi farklı malzemelerden yapılmış lifler kullanılarak

oluşturulan, değişik göz açıklıklarda dokuma yönteminin kullanılması ile yapılmış Tekstil Lif Takviyeli Betonlar (TRC) geliştirilmiştir [23]. Bu yolla kullanılan dokuma lif türlerine ve dokuma özelliklerine bağlı olarak çok daha yüksek performanslar gösterebilen yeni beton türleri elde edilmiştir [24]. Farklı tipteki lif ve tekstiller Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

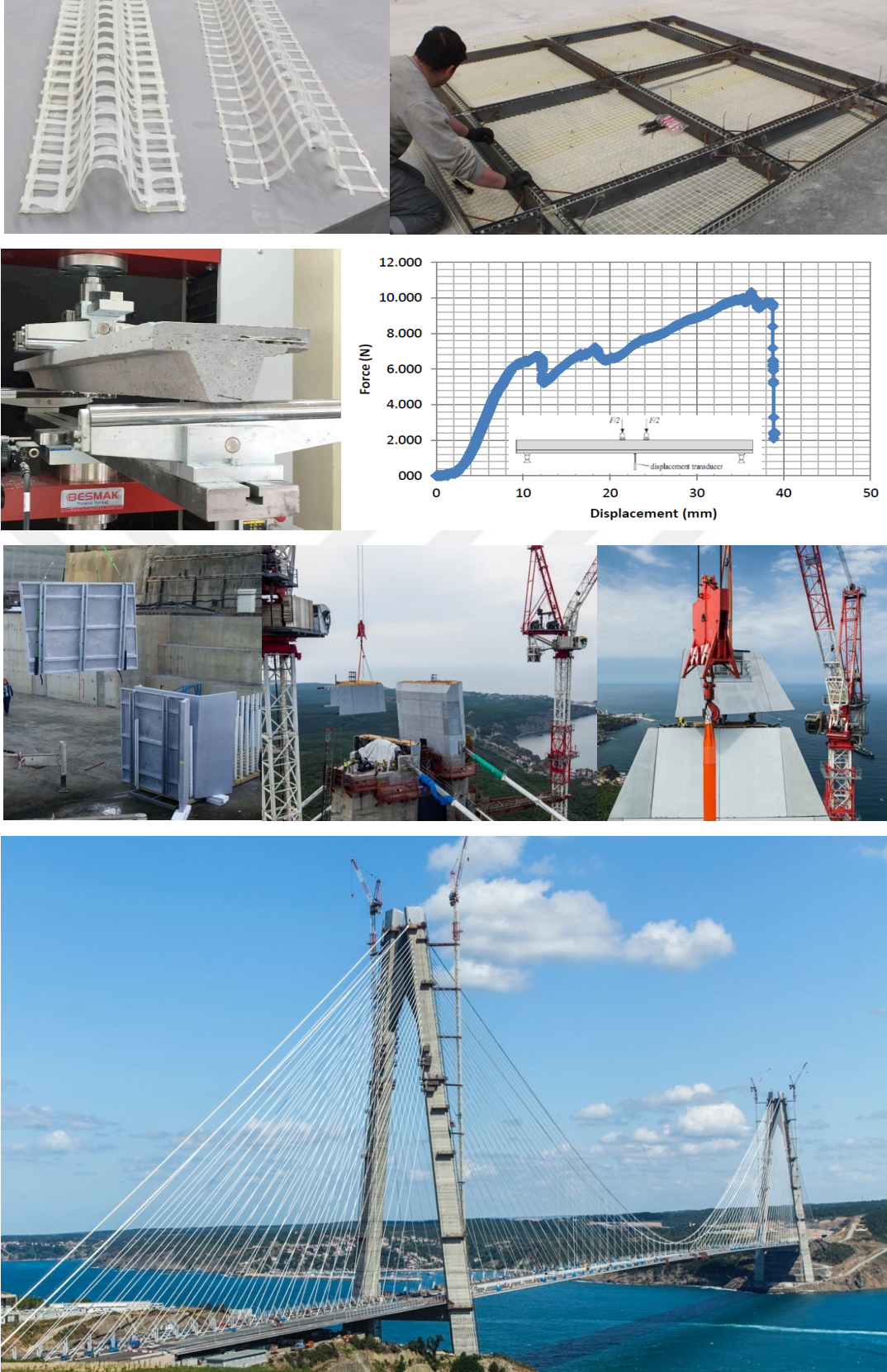
Tekstil ve farklı göz açıklıklarında tekstillerin emprenye edilerek daha rijit formlar haline getirilmesi ve bazı uygulamalarda da bunlara şekil verilmesi yolu ile beton içinde güçlendirme amaçlı kullanımları oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Bu tür uygulamalarda kullanılan tekstiller 3B (Üç boyutlu) tekstil uygulamaları olarak adlandırılmaktadır [24].

Şekil 2.8’de 3B Tekstil (3B Mesh) uygulamalarının en önemlilerinden biri olan İstanbul Yavuz Sultan Selim Köprüsü kulelerindeki uygulama görülmektedir. Bu proje kapsamında köprünün 4 kulesinde 290-320 mt arası bölümündeki kaplamalar 3B dokumalarla takviye edilmiş UHPGRC (Ultra Yüksek Dayanımlı GRC-CTB) olarak üretilmiştir [25].



Şekil 2.7. Farklı tip dokuma lif ve tekstiller.





Şekil 2.8. İstanbul Yavuz Sultan Selim Köprüsü 3B lif takviyeli UHPGRC uygulaması.

### *Yeni Gelişmeler*

Son birkaç on yılda yapılan çok sayıda çalışma ve araştırmaların sonucu olarak ortaya çıkan gelişmeler Yüksek Performanslı Lif Takviyeli Çimento Esaslı Kompozitlerin (HPFRCC) kullanımını arttırmaktadır. Bu, yakın zamanda Japonya'da bu malzemeler için ortaya atılan tasarım önerilerini ortaya çıkarmıştır. Bu çalışmalarla ortaya çıkan 2 yeni sınıf tanımlanmıştır; Ultra Yüksek Performanslı Çimentolu Kompozitler (UHPFRC) ve ısıyla sertleştirme işlemi sonucu oluşturulan Lif Takviyeli Çimento Esaslı Kompozitler (SHCC) [26].

Bu kompozitler, yüksek dayanım gereksiniminden yüksek süneklik gerekliliğine kadar değişen özel uygulamalar için tasarlanmıştır. Örneğin UHPFRC, 120 ila 180 MPa aralığında basınç dayanımı ve 20 ila 40 MPa aralığında eğilme dayanımı ile ince köprü gövdeleri veya köprü gövde kaplamaları için tasarlanmış ve uygulanmıştır. Öte yandan, depreme dayanıklı binalarda enerji sönümleme gerekliliği, Japonya'da yüksek katlı betonarme binaların çekirdek kavrama kirişlerinde yüksek oranda sünek SHCC kullanılmasına neden olmuştur. Bu uygulamanın bir diğer örneği, mevcut bir baraj yüzünün ince bir SHCC kaplamasıdır. Ayrıca ultra yüksek dayanımlı betonlarda çoğunlukla bu yapıya uyumlu olarak üretilen özel çelik ve PVA lifler kullanılmaktadır. Ultra yüksek performanslı betonlar hem akademik tarafın hem de bu konuda çalışan firmaların mimari ve yapısal uygulamalar üzerine araştırmaları için gözde bir alan konumundadır. Dolayısı ile son 5 yılda ortaya çıkan gelişmeler son 30-35 yıldakilerin kat ve kat üstündedir [12].

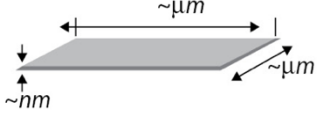
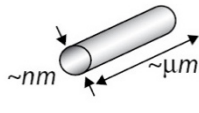
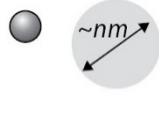
### *Karbon Nano Tüp ve Nano Lifler (CNT/CNF)*

Nano yunanca kökenli ve cüce anlamına gelen bir kelimedir ve bir büyüklüğün milyarda birine eşit bir büyüklüğü ifade etmek için kullanılır. 1 nanometre 1 metrenin milyarda birine eşit bir uzunluk birimini ifade eder. Örneğin saç telimizin kalınlığı 80 bin nanometre, DNA molekülü 2-2,5 nanometre boyutundadır. Madde veya malzemeler 1-100 nanometre boyutlarında normalde olduklarından daha farklı fiziksel, kimyasal ya da biyolojik özellikler gösterebilirler. Bu da yeni uygulamalar ve inovasyonların önünü açmaktadır. Nano teknoloji çimento, harç ve betonun malzeme özelliklerinin daha iyi anlaşılması ve dolayısı ile optimizasyonunun sağlanması için önemli katkılar sunmaktadır [27].

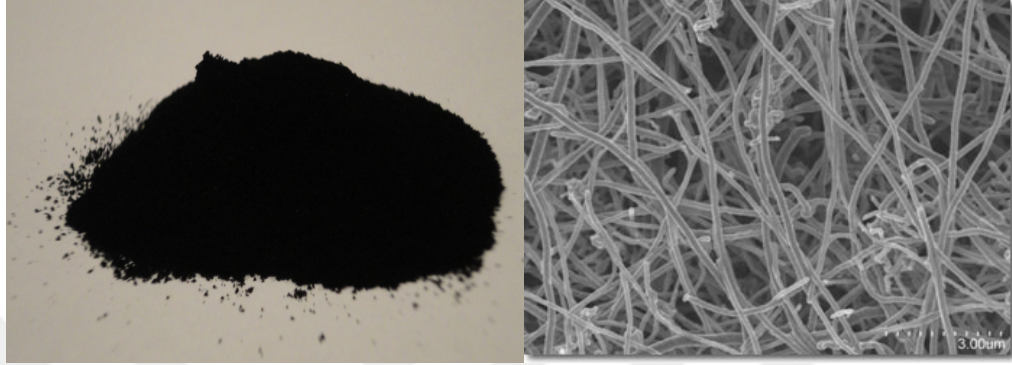
Son yıllarda teknolojik gelişmelere paralel olarak ortaya çıkan nanoparçacıklar ve nanomalzemeler çimento bazlı malzemelerin optimizasyonu için ilginç olanaklar sağlamaktadır. Çizelge 2.4’de çimento bazlı malzemelerde kullanımı araştırılan ve çimentolu kompozitlere yeni özellikler kazandırabilecek nano malzemelerin genel bir listesi verilmiştir.

Karbon nanotüpler/nano lifler (CNT’ler/CNF’ler) farklı tür betonlarda mekanik, fiziksel ve elektriksel özellikleri geliştirmede kullanılmak üzere potansiyel adaylardır. CNT’ler/CNF’ler, TeraPascal (TPa) seviyesinde elastikiyet modülleri (CNT’lerin elastikiyet modülü yaklaşık 1,8 TPa’dır [28] ve GigaPascal (GPa) aralığında gerilme dayanımı ile olağanüstü bir güç sergilerler ve benzersiz elektriksel ve kimyasal özelliklere sahiptirler. Dolayısıyla, CNT’ler/CNF’ler, çimento esaslı malzemelerin mekanik özelliklerini ve elektromanyetik alan koruyucu ve kendi kendine hassaslaştırma gibi yeni özellikler sağlarken, çatlak yayılmasına karşı dirençlerini arttırmak için en umut verici nano malzemeler arasında görünmektedir.

Çizelge 2.4. Betonda kullanımı araştırılan nano malzemeler [29].

| Nano Malzemeler                                                                                 |                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Plaka-levha<br>Tek nano ölçekli boyut                                                           | Lif<br>İki nano ölçekli boyut                                                                                                                             | Partikül<br>Üç nano ölçekli boyut                                                                                                                                                                                                                                        |
|              |                                                                        |                                                                                                                                                                                     |
| Montmorillonite Killer (MMT)<br>Nanographene Plakalar (NGP)<br>Katmanlı Çift Hidroksitler (LDH) | Karbon Nanolif(CNF)<br>Karbon Nanotüp (CNT),<br>(SWNT, DWNT, MWNT)<br>Halloysit Nanotüp (HNT)<br>Nikel Nanoiplik (NiN)<br>Alüminyum Oksit Nanolif (Nafen) | POSS®<br>Nano-Silika (n-silika)<br>Nano-Alumina (n-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )<br>Nano-Gümüş (n-Ag)<br>Nano-Titanyum Dioksit (n-TiO <sub>2</sub> )<br>Nano- Magnezyum Hidroksit (n-Mg(OH) <sub>2</sub> )<br>Nano-Silikon Karpit (n-SiC)<br>Nano-Çinko Oksit (n-ZnO) |

Karbon nanotüpler (CNT) tipik olarak 1-30 nanometre arasında lif çaplarına sahiptir [30]. Karbon nano lifleri ise (CNF'ler), ortalama çapı 70 ila 200 nanometre (nm) ve ortalama uzunluğu 50 ila 200 mikron olan, bardak, koni veya plaka şeklinde yapılmış grafen katmanları olan silindirik nanoyapılar olarak tanımlanır. Betonda yaygın kullanım oranları %0,1-%0,5 arasındadır [31].



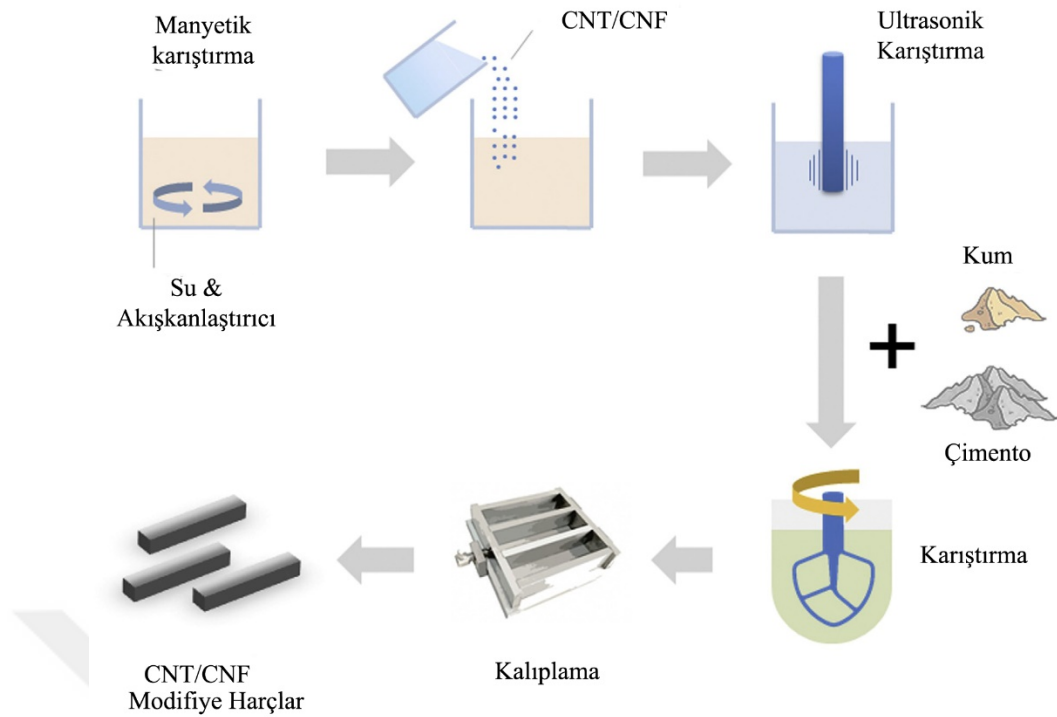
şekil 2.9. CNF'lerin toz formda ve SEM görüntüsü (3 m aralık) [31].

Tek cidarlı CNT'ler (SWCNT'ler), çok cidarlı CNT'ler (MWCNT'ler) ve CNF'ler, çok büyük boy oranlarına sahip (1000 veya daha fazla) ve çok yüksek yüzey alanlı, yüksek yapılandırılmış grafen halka bazlı malzemelerdir.

Diğer taraftan CNT'lerin aksine, CNF'ler, avantajlı kimyasal veya fiziksel etkileşim için potansiyel bölgeler oluşturan yüzey boyunca sayısız açık kenar düzlemi sunar. CNT'lerle karşılaştırıldığında, buharda büyütülen CNF'ler daha düşük üretim maliyetine (SWCNT'lerden yaklaşık 100 kat daha düşük) sahiptir ve seri üretime uygundur.

Betonda kullanım için başlıca sıkıntılardan biri, CNT/CNF'lerin, yüksek hidrofobik olmaları ve güçlü bir kendi kendine çekim oluşturmaları nedeniyle, harç içinde oluşabilecek dağılım zorluklarıdır. Beton içinde kullanıma yönelik çok sayıda araştırmacı tarafından farklı yöntemler önerilmiştir. Yüzey aktif malzemeler içeren sulu bir süspansiyon haline getirmek, arap sabunu ile  n karışım, aseton içinde  n dağılım gibi yöntemler kullanılmış ve özel bir karışım yöntemi ile karıştırarak betona karıştırılabilecek süspansiyonlar elde edilmiştir [32], [33]. CNT ve CNF'lerin betonda kullanımının karıştırma sorunları nedeniyle oluşan zorluklardan ve g vensizliklerden arındırılması 2010'lardan sonra yapılan çalışmalarla çözülmüştür [31]. şekil 2.10'da CNT ve CNF'lerin betona karıştırılma süreci şematik olarak gösterilmektedir.





Şekil 2.10. CNT ve CNF’lerin beton karışımlarına eklenmesi şematik gösterimi [34].

### Cam Lifi

Cam liflerin sertlik derecesi ve aşınma direnci oldukça yüksektir. Ayrıca çok reaktif ürünler de değildir. Bu üstün özellikleri yanında hafif, esnek ve ekonomik lifler olarak da karşımıza çıkar. Değişik özellikleri ile öne çıkar farklı sınıflarda tanımlanırlar. Tüm cam liflerinin elastisite modülleri benzer olmalarına karşın, farklı dayanım değerlerine sahiptir ve çevresel etkilere karşı dirençleri de farklıdır [11]. Cam lifinin esasını silis kumu ( $\text{SiO}_2$ ) oluşturmakla beraber değişik oranlarda sodyum, kalsiyum, alüminyum, bor ve demir gibi elementlerin oksitlerinden oluşur. Cam lifler, camların elektrik fırınında yaklaşık 1200-1500 °C de ergitilmesi ve ergiyen camların platin alaşımlı bir potanın tabanındaki binlerce delikten hızlı bir şekilde çekilerek ve soğutma bölgesinden geçirilerek üretilir. Daha sonra lifler üzerine kaplama uygulaması yapılarak ve demetler halinde makaralara sarılarak depolanırlar [35].

Genel anlamda beş farklı tipte cam lifinden bahsedilebilir. Bunları yüksek oranda alkali içeren A camı, kimyasal çözeltilere karşı dirençleri yüksek olan C camı; düşük oranda alkali içeren, yüksek mukavemetli E camı ve yüksek sıcaklıklarda iyi bir yorulma direnci olan, yüksek dayanımlı S camı ve AR cam lifi olarak sıralamak mümkündür. Farklı tip bu cam liflerinin tipik özellikleri Çizelge 2.5’de gösterilmiştir [36].

Çizelge 2.5. Farklı cam tiplerinin özellikleri [36]–[38].

| Özellik                                                         | Cam Tipi |      |      |      |           |
|-----------------------------------------------------------------|----------|------|------|------|-----------|
|                                                                 | A        | C    | E    | S    | AR-Cam    |
| Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )                              | 2,5      | 2,49 | 2,54 | 2,48 | 2,6-2,7   |
| Elastisite modülü (GPa)                                         | -        | 69,0 | 72,4 | 85,8 | 70-76     |
| Çekme dayanımı (MPa)                                            | 3033     | 3033 | 3448 | 4585 | 3000-3500 |
| Yumuşama sıcaklığı (°C)                                         | 727      | 749  | 841  | 970  | 800       |
| Bileşim (%)                                                     |          |      |      |      |           |
| SiO <sub>2</sub>                                                | 72       | 64,4 | 52,4 | 64,4 | 60-62     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,6      | 4,1  | 14,4 | 25   | 0,3-0,80  |
| CaO                                                             | 10       | 13,4 | 17,2 | -    | 0,5-5,6   |
| MgO                                                             | 2,5      | 3,3  | 4,6  | 10,3 | -         |
| Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O                             | 14,2     | 9,6  | 0,8  | 0,3  | 16-19     |
| B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                   | -        | 4,7  | 10,6 | -    | -         |
| BaO                                                             | -        | 0,9  | -    | -    | -         |
| ZrO <sub>2</sub>                                                | -        | -    | -    | -    | 16-20     |

Cam liflerin öne çıkan bazı özellikleri aşağıdaki gibidir [39].

- Çekme dayanımları yüksektir,
- Isıl dirençleri düşüktür,
- Yanmazlar ancak yüksek sıcaklıkta yumuşama eğilimindedirler,
- Kimyasallara karşı dirençlidirler,
- Nem emme özellikleri yoktur,
- Elektrik iletkenlikleri yoktur.

Ancak cam lifleri beton içinde kullanıma uygun olabilmeleri için betonun alkali yapısına dirençli olması gerekmektedir. Bu nedenle beton içinde kullanıma yönelik AR cam lifi geliştirilmiştir. AR cam lifleri, ciddi oranda zirkonyum dioksit (ZrO<sub>2</sub>) içeriğine sahip silikat camı temel almaktadır. Dayanıklı bir GRC-CTB üretimi için yeterli alkali direncine sahip lif üretmek için gerekli olan minimum ZrO<sub>2</sub> içeriği %16 olarak belirlenmiştir. Mevcut olan AR cam lifleri ise %16 ile %19 arasında ZrO<sub>2</sub> barındırmaktadır [23]. Tipik bir bileşim, Çizelge 2.6’de gösterilmiştir.



Çizelge 2.6. Tipik bir bileşim [23].

| Bileşen                        | Miktarı (%) |
|--------------------------------|-------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 60-62       |
| ZrO <sub>2</sub>               | 16-20       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,3-0,8     |
| CaO                            | 0,5-5,6     |
| K <sub>2</sub> O               | 0-2         |
| Na <sub>2</sub> O              | 14-17       |

### 2.3. CAM LİF TAKVİYELİ BETON (GRC-CTB)

GRC-CTB'nin temel bileşenleri hayli azdır ve bu bileşenler: çimento, su, ince agrega, isteğe bağlı olarak mineraller, kimyasal katkıları ve cam lifidir. Ancak bileşimin içyapısı, hava-uzay endüstrisinde kullanılan bileşenler gibi, yüksek teknolojik malzemelerinki kadar karmaşıktır. Ancak aynı zamanda GRC-CTB gibi yüksek performans sunan bir malzeme, görece basit ve ucuz işlemlerden geçerek güvenli bir şekilde üretilebilir.

Yüksek performanslı GRC-CTB kullanan uygulamalar, fazla karmaşık ve pahalı üretim tesisleri gerektirmez ancak çok sıkı bir üretim planı ve detaylı bir kalite kontrol sistemi gerektirir. Yeterli denetim seviyesi, yüksek performans, polimer temelli, lif takviyeli bileşimlerin üretimi için sıradan prekast beton üretimi için gerektiğinden daha fazlasını gerektirir.

İnşaat alanında kullanıma yönelik lif takviyeli kırılma-matris bileşimler yeni değildir. Asbestli çimentonun bulunuşu, 19. yüzyılın sonlarında gerçekleşmiştir.

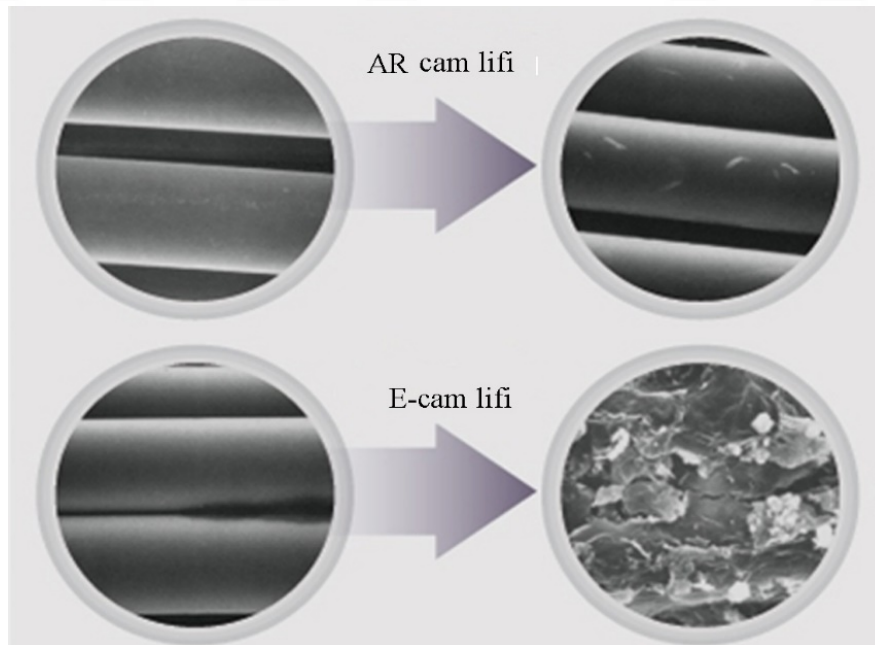
Yirminci yüzyılın başlamasıyla da cam lifi üretiminde özellikle de borosilikat türünde (E-cam) teknolojik gelişmeler yaşanmaya başlanmış ve yine aynı dönemde polimerler endüstriyel üretime ilk adımını atmıştır. Cam lifinin polimerlerle birlikte kullanımı yoluyla GRP (Cam Lifi Takviyeli Kompozit Plastikler) ortaya çıkmaya başlamıştır.

İkinci Dünya Savaşı'nın ardından farklı lif türlerinde büyük bir genişleme yaşanması, çimentosu matrisleri de bünyesinde barındıran yeni lif takviyeli bileşimlerin gelişimini teşvik etmiştir. Yine bu dönemde asbestin sağlık açısından zararlarının ortaya konmaya başlanması ile birlikte cam lifinin betonda kullanımı için ciddi bir neden ortaya çıkmış oldu.

1950'lerin sonuna gelindiğinde ise Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği içerisinde ilk modern anlamda Cam Lifi Takviyeli Beton (GRC-CTB) üretimi gerçekleştirilmiştir. Ancak kullanılan E-Cam lifi Portland çimentosu ile kullanmaya uygun değildi. Bu tür cam lifleri çimento içerisinde alkali korozyonuna maruz kalmaktaydı. Sonuç olarak bu erken GRC-CTB üretimi, bu sebeple sınırlı kalmıştı.

1960'ların başında Birleşik Krallık Bina Araştırma Kurumu'nda A.J. Majumdar ve başlıca Birleşik Krallık cam üretim şirketi olan Pilkington Glass Co.'da A. Tallentire liderliğinde bir ekip tarafından gerçekleştirilen ortak araştırma projesi, ticari olarak üretilen ve Cem-Fil lif olarak pazarlanan AR lifleri geliştirilmeye başlandı. Aynı zamanlarda Japon cam üreticileri yani Nippon Electric Glass Co. (NEG) ve Asahi Glass Co. (AGC),  $ZrO_2$  açısından zengin bir içeriğe sahip AR liflerin ticari üretimini geliştirdi.

Yeni bileşim hayli hızlı bir şekilde yaygınlaştı ve Cam Lifi Takviyeli Beton Üreticileri Derneği (uluslararası GRCA olarak bilinmektedir) 1975 yılında teknik bilgiler yaygınlaştırmak, deneyim ve yeni bilgi paylaşımında bulunmak ve inşaat endüstrisi ile nihai kullanıcılara kayda değer avantajlar sunan bir malzeme olarak GRC-CTB'yi teşvik etmek amacıyla küresel bir forum olarak kuruldu. AR cam lifinin çimentoda test edilmesi ve E-camı ile kıyaslanması Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Betonda yüksek zirkonyumlu ( $\geq 16\%$ ) alkaliye dayanıklı cam lifi ile E-cam lifinin yaşlanma testi sonrasında durumu [40].

GRC-CTB'nin benimsenmesinde yaşanan bu hızlı ilerleme, ilk pratik uygulama

safhalarında performansı ile ilgili sorunlar yaşanması ile geçici olarak düşüşe geçti. Genel olarak bunlar, beklendiğinden çok daha karmaşık olan GRC-CTB üretiminin daha ilk yıllarında kalite kontrolünün eksikliğinin doğrudan bir yansıması olarak ortaya çıktı. AR cam lif üreticileri, 1980'lerin başında farklı yüzey uygulamaları ile yeni jenerasyon lifler geliştirerek bu duruma yanıt verdiler. Yeni lifler, özellikle de nemli hizmet koşullarında yillanan sertleşmiş GRC-CTB'nin uzun vadeli performansını ciddi anlamda iyileştirdi. Ayrıca GRCA ile Avrupa Standartlar Komitesi (CEN) iş birliğinde ilk GRC-CTB standartları olan Avrupa Standardı (EN) 1169 ve EN 1170 standartları geliştirilmeye başlandı [41].

Cam lif takviyeli betonlar (GRC-CTB) yüksek mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olması nedeniyle inşaat sektöründe çok çeşitli alanlarda uygulanmıştır. Özellikle cephe kaplama ve mimari uygulamalar, ön üretimli yapı elemanları, tarihi binaların yenilenmesi, sulama kanalları, kalıcı kalıp uygulamaları, iç dekorasyon ve şehir mobilyaları gibi çok yaygın kullanım alanlarına sahiptir.

21. yüzyılın başına gelindiğinde, GRC-CTB üretiminde muazzam bir artış oldu. Amerika'dan Çin'e, Avrupa'dan Körfez kadar çok sayıda ülke ve çok geniş bir alanda GRC-CTB projelerde tercih edilmeye başlandı. Bu büyüme 2008 sonrası ekonomik krizi yüzünden geçici olarak duraksamaya geçti. Ancak endüstri yeniden canlandı ve böylece GRC-CTB, dünyanın önde gelen mimarlarının malzeme çantalarında yüksek teknolojik bir malzeme alternatifi olarak yerini aldı. Tasarımcılar, GRC-CTB alanındaki son gelişmelerden gittikçe daha da haberdar olmakta ve bunları büyük çaplı projelerde kullanmaktadır.

Ülkemizde ise ilk GRC-CTB üretimi ise 1987 yılında Fibrobeton A.Ş şirketinin kurulması ve GRCA derneğine üyeliği sonrası know-how transferi ile başlamıştır. Bu çalışmalar sonucu 1990'lardan itibaren çok sayıda projede GRC-CTB kaplama malzemesi olarak kullanılmış. Ülkemizde oluşan bilgi birikimleri sonucu yeni ticari şirketler kurulmuş, üniversitelerde araştırma projeleri ile ulusal literatür genişlemeye başlamıştır. Günümüzde ise çok sayıda ticari şirket ile üretim yapılmaktadır. Başta Fibrobeton A.Ş. olmak üzere yine azımsanmayacak sayıda şirket uluslararası projelerde çalışmaya başlamış ve GRC-CTB ülkemizin bir ihraç ürünü haline gelmiştir.

1990'lara gelinceye kadar cam lifi takviyeli betonlar üzerindeki araştırmalar çeşitli nedenlerle sınırlı kalmış bu döneme kadar daha çok diğer liflerle (çelik/metal, polimerik

lifler, karbon lifler, doğal lifler, vs.) devam etmiştir. Bu tarihten sonra hem üretimin yaygınlaşması hem de hammadde üreticilerinin araştırmalara destek vermesi ile birlikte akademik çalışmalar artmaya başlamıştır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. AR Cam lifi takviyeli beton içinde liflerin dağılımı.

GRC-CTB hem performans olarak hem de çeşit olarak gelişmeye devam etmektedir (Örnek olarak, Teskil Takviyeli Beton-TRC). GRC-CTB'nin spesifik yönlerine odaklanan çok sayıda bilimsel ve teknik çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların pek çoğu, her 2-3 yılda bir GRCA tarafından düzenlenen kongrelerde bir araya getirilip basılırken diğerleri de bilimsel ve teknik dergilerde yer almıştır. Yine hem GRC-CTB ürün üreticileri hem de hammadde sağlayıcıların üniversitelerle işbirliği içinde yaptığı ulusal ve uluslararası çok sayıda bilimsel çalışma, AR-GE projesi ve tezler ile literatür genişlemeye devam etmektedir. Bu genişlemelere örnek olarak [16], [42]–[44] gösterilebilir.

### 2.3.1. GRC-CTB Bileşenleri

#### 2.3.1.1. Bağlayıcılar

Bir hidrolik çimento türü, takviye olarak kullanılacak cam lifinin türü ile ne kadar uyumlu olduğuna bağlı olarak GRC bileşenlerine yönelik matrislerin üretiminde bağlayıcı olarak kullanılabilir. İnşaat sektöründe fazlaca kullanılan Portland çimentolarının yaygın türleri gibi (örn: Normal Portland Çimentosu – OPC) normal çimentolar, hidratasyonları sırasında alkalin üretirler. Bu tür çimentolardan üretilmiş olan sertleştirilmiş matrisler, aynı zamanda hizmet ömürleri süresince de büyük oranda alkalin olarak kalırlar. Bu tür matrisler, bu sebeple yalnızca AR cam liflerle kullanıldığında dayanıklılık garanti

edilebilir. Beyaz Portland çimentosu, daha çok açık renkli GRC-CTB yüzeylerinin gerekli olduğu yerlerde tercih edilir [23].

GRC-CTB matrisinin alkalın seviyesini azaltmaya yönelik bir diğer yaklaşım ise Silis Dumanı (SD), Uçucu Kül (UK), Yüksek Fırın Cürufu (YFC) ve Metakaolin (MTK) gibi puzolanik ilavelerin kullanımıdır. Bu tür ilaveler, sertleştirilmiş matrisin mikro yapısını ve özelliklerini değiştirdiği gibi aynı zamanda alkalın seviyelerini de önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca matris ve cam lifler arasındaki bağı da etkilemekte ve bileşimin kırılma mekanizmasını değiştirmektedir [23].

Yüksek Alüminyum Çimentoları (HAC), Kalsiyum Alüminat Çimentoları (CAC) ve Süpersülfat Çimentolar (SSC) gibi bağlayıcılar kullanılarak düşük alkalın veya alkalın olmayan matrisler üretilir. Ancak bu tarz çimentolar kullanarak elde edilen betonlar AR cam lifleri kullanılarak elde edilen GRC-CTB betonlardan daha ekonomik değildir. Dolayısı ile ticari uygulamalarda normal Portland çimentolarının AR cam lifleri ile birlikte kullanımı yaygınlaşarak gelişmeye devam etmiştir [23].

Cam liflerini OPC'nin alkali ortamında korumaya yönelik uygulamalardan biri de karışıma yüksek miktarda (çimentonun %10-15'i kadar) akrilik polimer eklenmesi olmuştur. Ancak bu çalışmalarda günümüzde sadece kürlenme amaçlı kullanılan (karışımın %5 civarında) akrilik polimer uygulamasına dönüşmüştür [23].

#### 2.3.1.2. Agregalar

GRC-CTB uygulamalarının ilk yıllarında karışımlar ya çok az agregaya içeren ya da hiç agregaya içermeyen sertleştirilmiş çimento karışımına dayalıydı. Bu sebeple bileşimin ilk versiyonu, cam lif takviyeli çimento olarak adlandırıldı. Ancak üzerinden çok zaman geçmeden, çok daha fazla miktarda iyi kalite agregaya eklenmesi durumunda matris maliyetinin azaltılabileceği ve sertleştirilmiş matrisin bazı özelliklerinin geliştirilebileceği anlaşıldı. Günümüze gelindiğinde yaygın uygulamalarda çimento/agregaya oranı 1:1 ve daha yüksek oranlardır.

Kaliteli agregaya; temiz olmalı, klor, sülfat içermemeli alkalın (toplam <%1) veya organik madde (yanma < %0,5 ile kayıp) oranı sınırları aşmamalı ve gerekli durumlarda yıkanabilir olmalıdır. SiO<sub>2</sub> içeriği >%96 olan silis kumları yaygın uygulama alanı bulmaktadır. Bunun yanında yine SiO<sub>2</sub> oranı yüksek kuvars agregaları da tercih edilebilir.

Partiküllerin maksimum boyutu ise genellikle 1,2 mm (püskürtme prosesi) ve 2,4 mm (premiक्स prosesi) ile sınırlıdır. Agreganın nem içeriği göz önünde bulundurulmalı ve

kontrol altında tutulmalıdır. Karışım tasarımları, genel olarak <%2 nem içeriğini baz alır. Karışım oranları, daha yüksek bir nem içeriği kullanılması durumunda yeniden düzenlenmelidir.

Özel agrega, özel mimari görünümün gerekli olması durumunda sadece yüzey katmanında kullanılabilir. Bu agregalar genellikle kırma taşlardan seçilerek betona uygunluğu denetlenip kullanılabilir.

#### 2.3.1.3. AR Cam Lifleri

GRC-CTB üretiminde gelişimin ilk yıllarında kullanılan farklı cam lifleri son yıllarda neredeyse tüm uygulamalarda yerini AR cam lifine bırakmıştır. Cam lifleri, birden fazla ipliğin aynı anda eritilmiş cam konteynerinden çekildiği bir süreç içerisinde yapılır. İplikler, derhal kaplanır ve ardından bir demet içerisinde bir araya getirilir. Bu sayede yeni çekilmiş olan iplikler, aşınmadan korunmuş olur ve demet/iplik teli içerisinde gevşekçe muhafaza edilebilirler [23].

Püskürtme veya premiks yöntem ile GRC-CTB üretime yönelik AR cam lifleri, püskürtme veya karıştırma gerçekleştirildiğinde iplik demetlerinin entegrasyonunu artırmak üzere tasarlanan bir kaplamaya sahiptir. Bunun yanında iplik tellerinin tek tek ayrışmasına yardımcı olan suda çözünabilir kaplama lifler daha az yaygındır. Bu, düşük lif içeriğinin kullanıldığı ve tek tek liflerin maksimum dağılımının arandığı uygulamalarda kullanılır. Bu tür GRC-CTB'lerin tipik amacı, kılcal çatlakları veya dekoratif karışımların ve kaplama karışımlarının yüzey çatlamasını azaltmaktır.

GRC-CTB içerisinde bulunan cam liflerinin oranı karakteristik olarak bileşimin toplam ağırlığının yüzdesi olarak verilir. GRC-CTB'ye yönelik karışım tasarımlarında yer alan diğer tüm bileşimler aksi öngörülmedikçe, genellikle çimento içeriğinin ağırlığına oranlanarak kullanılır.

Kullanılabilecek lif miktarı, üretim yöntemlerine ve performans ihtiyacına bağlı olarak değişebilir. Püskürtme veya püskürtme-premiks süreçleri, doğaları gereği lifleri çoğunlukla iki boyutlu (2B) katmanlara dağıtır ve bu katmanlar da lif demetleri için daha yüksek paketlenme yoğunluğunu ve yaklaşık %5 oranına kadar optimum cam lif içeriğini mümkün kılar. Premiks süreç ise genellikle yaklaşık %3 optimum lif içeriği ile demetlerin daha çok üç boyutlu (3B) olarak üretilmesini sağlar. Yukarıda bahsedilen her bir üretim sürecinin optimumdan daha yüksek lif içeriğine sahip olması, taze karışımın çalışabilirliğini azaltır çünkü söz konusu karışımın aşırı yoğunlaşması çalışmayı daha zor

bir hale getirir ve sertleştigi zaman performansı da azalır.

AR cam lifleri farklı üreticilerden farklı fiziksel özelliklerde tedarik edilebilir.

- Sürekli sarılmış bobin en çok kullanılan yöntemlerden biridir. 2500 tex lif demetlerinin 20 kg'a yakın bobinler olarak sarılması ve paketlenmesi ile elde edilir,
- Kırılmış demetler olarak 4-38 mm uzunluklarda kırılmış ve paketlenmiş olarak,
- Kırılmış demetlerin hafifçe kaplanması ile elde edilen düz hasır,
- İnce bezler, dokuma ve tekstiller.

#### *Alkali Direnci*

AR cam lifi, liflerin tipik olarak yüksek alkalın içeren ortamlarda ( $\text{pH} > 12,5$ ) uzun süre boyunca performans sağlaması beklendiği koşullarda çimento esaslı bileşimlerde kullanıma yönelik olarak geliştirilmiştir [23]. AR cam liflerine ait örnekler Şekil 2.13'da gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Sürekli ve kırılmış AR cam lifleri.

Taşıyıcı olmayan ürünler için harçta ve betonda güçlendirici olarak kullanılan AR cam

lifleri için gerekleri kapsayan ve bu gereklere uygun dayanıklılık testini tanımlayan 2 Avrupa standardı gelişmiştir. İlgili standartlar orijinal halleri ile Türk standardı olarak da kabul edilmiştir (TS EN 15422 ve TS EN 14649). Bu standartlar aynı zamanda, bu ürünlerden imal edilen ağlar ve keçeler gibi fitil, şerit veya kesilmiş lif biçiminde ve ilgili mamullerin sürekli filament şeklindeki cam lifi mamullerine de uygulanır [27], [28].

Bu standartlar farklı tip liflerin alkali dirençlerinin niteliksel değerlendirilmesini sağlamak amacıyla görece basit bir test olarak ‘strand in cement’ (çimentodaki demet) (SIC testi) testinin yapılışını anlatmaktadır. Bu standartlara göre test edilen ve uygunluk alan cam lifleri AR cam lifi olarak betonda kullanılabilir.

#### 2.3.1.4. Kimyasal Katkılar

Katkılar, çoğunlukla çimento ağırlığının %5’inden daha az olmak üzere küçük miktarlarda karışım tasarımı içerisine eklenen maddelerdir. Katkılar, aslında çimento teknolojisine yönelik olarak geliştirilmiş olup taze ve sertleştirilmiş matris özelliklerini değiştirmek için de kullanılmaktadır. Seçilen katkının nihai ürün performansı üzerindeki etkisinin ve birden fazla katkının kullanılması durumunda etkileşimleri konusunda hem katkı üreticilerinden bilgi alınmalı hem de gerekli deneylerle doğrulanmalıdır.

Tüm GRC-CTB ürünler için standart gereksinim su azaltıcı katkılardır [47]. Bunun yanında GRC-CTB içinde katkılar üretim aşamasında gerekli kıvamın ayarlanması, priz sürelerinin ve çalışma sürelerinin optimizasyonu, su oranının azaltılarak dayanım parametrelerinin iyileştirilmesi, beton içindeki hava içeriğinin kontrolü, dayanıklılık parametrelerinin geliştirilmesi gibi çok değişik amaçlarla kullanılabilir [23].

En yaygın kullanılan katkılar aşağıdaki gibidir;

- Akışkanlaştırıcı, süper ve hiper akışkanlaştırıcılar,
- Kıvam ayarlayıcı katkılar,
- Priz hızlandırıcı ve priz geciktiriciler, erken dayanım katkıları,
- Titanyum dioksit ve benzer dolgu malzemeleri,
- Pompalama kolaylaştırıcı katkılar,
- Hava atıcı ve hava sürükleyiciler.



### 2.3.1.5. *Polimerler, Pigmentler ve Dolgu Malzemeleri*

#### *Polimerler*

Çimento ile uyumlu polimer katkısı, hem taze hem de sertleşmiş GRC-CTB üzerinde olumlu etkilere sahiptir ve bu etkinin derecesi, kullanılan polimerin türüne, miktarına ve kürleme koşullarına bağlıdır. Taze karışımın kıvamını ve işlenebilirliği iyileştirir. Sertleşmiş GRC-CTB'nin özellikleri ise lifler ve matris arasındaki bağ ve matris elastisite modülü üzerindeki polimerlerin tip ve miktarından etkilenir. Matris elastisite modülünü ciddi oranda düşürür ve daha yüksek miktarlar (yaklaşık %8 veya daha fazla) eklenmesi durumunda ise bileşimin sünekliğini artırır. Sıradan GRC-CTB ile kıyaslandığında daha pürüzsüz ve düzgün yüzey finişleri mümkündür. GRC-CTB yoğunluğunda yaşanan artış, tüm dayanıklılığını iyileştirerek su geçirgenliğini daha da azaltır. Ancak polimer, karbon-esaslı bir bileşen olduğundan sertleşmiş GRC-CTB, artık tamamen alev almaz olarak kabul edilmeyecektir. Ancak diğer yanabilirliğe ilişkin özellikleri durumdan etkilenmeyecektir.

Akrilik polimerler, çimento matrisli GRC-CTB'lerde alkali ortamda kararlılık sergilediklerinden dolayı kullanılmaktadır. Genel olarak karıştırma işlemi sırasında su ile birlikte eklenirler. Polimerler normal şartlar altında yaklaşık %45-55 katı madde içeren sulu bir formda ve %90-100 katı madde içeriği ile toz formunda kullanılırlar. Tipik su bazlı polimer dağılımları, depolama sırasında buzlanmadan kaynaklı hasarlara karşı hassastır ve polimer dağılımının film oluşumu kapasitesini muhafaza etmek için üretim esnasında taze karışımın sıcaklığı, kullanılan spesifik polimere bağlı olmak üzere 7-12°C'den daha az olmamalıdır [23].

Akrilik polimerin sertleşmiş GRC-CTB üzerindeki etkisi, çoğunlukla kullanılan miktara bağlıdır. Çimento ağırlığının yaklaşık %1 dozuna denk düşen toz halindeki veya eşdeğer sulu dispersiyon ufak miktarda akrilik polimerler, katkı olarak sınıflandırılır ve çoğunlukla taze GRC-CTB'nin ıslak kürleme ihtiyacını ortadan kaldırmak için kullanılır. Bu miktardaki polimerler, sertleşmiş GRC-CTB'nin dayanıklılığı veya mekanik özellikleri üzerinde doğrudan güçlü bir etkiye sahip değildir. Ancak dolaylı olarak taze GRC-CTB'nin yeterince kürlenmesini sağlayarak, sertleşmiş bileşimin uzun süreli performans kalitesini iyileştirirler. Yukarıdaki şartlarda yer verilenlerden farklı özelliklere sahip olan polimerler, uygun test sonuçlarıyla desteklenerek ve satıcı ile mutabık kalınarak kullanılabilir.

### *Pigmentler*

Renkli GRC-CTB, normal şartlar altında tüm karışım olarak renklendirilir. Herhangi bir pigment türü, hem toz formunda hem de su-esaslı süspansiyon olarak, çimentolu matris ve alkali ortamı ile uyumlu olması şartıyla kullanılabilir. Nihai sertleşmiş GRC-CTB'nin renginin kesin olarak öngörülmesi çok zordur. Deneme karışımları ve prototip üretimi, renk üzerine mutabık kalmak ve ne kadar dalgalanmanın kabul edilebilir olduğuna karar vermek açısından önemlidir.

Renklendirme için kullanılan pigmentler genellikle inorganik malzemelerin çimentodan çok daha düşük (örneğin 4-6 mikron) tane boyutunda öğütülmesi yoluyla elde edilirler. Karışıma çimento ağırlığının %4'ünden daha fazla eklenmeleri karışım özelliklerini değiştirebilir.

Renkli GRC-CTB, üretim sürecinin özellikle yüksek seviyede korunmasını gerektirir ki bu sayede bileşim içerisinde pigment dağılımı eşit ve homojen olabilsin. Tekrar yüzeyin dıştan bakım ve boyanması, çok yüksek seviyede renk tutarlılığının gerekli olduğu durumlarda kullanılmak zorunda olabilir.

Çok koyu renkler çok fazla kullanılmaz. Koyu renk, güneş ışığının da etkisiyle ısıyı önemli ölçüde artırır ve yüzey sıcaklığı da 65°C'den daha da yükselebilir. Büyük panellerden oluşan GRC-CTB elemanlar, daha da ısınarak üstesinden gelebileceğinden daha fazla termal genişleme ve hareket geliştirir. Ek olarak çok koyu yüzeylerin daha düşük renk varyasyonları ile üretilmeleri çok daha zordur ve ıslak havaya maruz kalan erken dönem GRC-CTB oluşumunda ufalanma gösterme eğilimine sahiptir [23].

### *Mikrosilika*

Mikrosilika ya da SD esasen ferro-silisyum üretiminden elde edilen amorf silikaların çok küçük partikülleridir (<1 µm). Bu forma sahip silika, çimento matrisli GRC-CTB içerisinde kalsiyum hidroksite karşı tepkimeye sahiptir. Mikrosilika çimentonun %10'una kadar oranlarda çimento ile yer değiştirilerek kullanılır. Bu şekilde değiştirilen matris, bileşimin daha güçlü nitelikte olmasını ve dayanıklılığının artmasını sağlamıştır. Ancak mikrosilika ilavesi GRC-CTB üretimini karmaşılaştırır. Bu da neden genel GRC-CTB üretim uygulamasında mikrosilika kullanımının yaygınlaşmadığını gösterir [23].

#### 2.3.1.6. *Puzolanik Katkılar*

Çeşitli puzolanik malzemeler GRC-CTB üretiminde kullanılabilir. Bu konuda en yaygın olanlar UK, YFC ve MTK'dir. Hem UK hem de YFC, genellikle çimentodan tasarruf etmek amacıyla kullanılır. MTK ise GRC-CTB matrisindeki çimentonun hidratasyon sırasında ortaya çıkan kireç ile reaksiyona geçen aktif kil formudur, bu da çimentonun alkalın seviyesini azaltır.

Mimari uygulamalarda UK ve YFC renkleri sorun yaratabilir. Bu konuya dikkat etmek gerekir. Ayrıca puzolan tane boyutları doğru seçilerek kullanıldığında matrisin büzülme performansını iyileştirebilir.

Puzolan ilavesi konusunda yapılan çalışmalar göstermiştir ki GRC-CTB uzun dönem performanslarında ciddi iyileşmeler söz konusudur [23].

#### *Su*

Suyun kalitesi, normal beton üretimi için gerekli olan ile uyumlu olmalıdır. Su, temiz olmalı ve zararlı maddeler içermemelidir.

### **2.3.2. GRC-CTB Üretim Yöntemleri**

#### 2.3.2.1. *Harç Hazırlama*

GRC-CTB üretimi doğru şekilde karıştırılmış harç ile başlar. Karışıma giren hem katılar hem de sıvı malzemeler kalibrasyonu yapılmış tartı ve dozajlama cihazları ile doğru oranda ve sıra ile karıştırılmalıdır. Kullanılan malzemeler ağırlıkça %  $\pm 2$  hassasiyetle tartılmalıdır. Gerek manuel gerekse otomatik karışım istasyonlarında premix ya da spray sistemle üretime bağlı olarak karışıma lif eklenir ya da eklenmez.

Tipik karıştırıcılar özel bir karıştırma ucuna sahip hem yüksek yavaş devirli çalışabilen düşey mikserlerdir. Spray harçları sadece yüksek devirde çalıştırılır. Eğer premix harcı hazırlanıyorsa düşük devire alınarak istenen oranda lif homojen dağılacak şekilde eklenir.

Mikser kapasiteleri püskürtme işlemi için harcın çok fazla beklememesi için genellikle 10-20 dakika kullanıma yönelik düşük kapasiteli (60 lt) olur. Premix üretimler için daha büyük mikserler (120 lt) kullanılması mümkündür. Bunlar dışında farklı mikser tipleri de kullanılabilir ancak homojenlik ve kalite gerekli testlerle doğrulanmalıdır. Şekil 2.14'de karıştırma istasyonunda harç üretimi gösterilmektedir.



Şekil 2.14. Otomatik karıştırma istasyonunda püskürtme üretim için harç üretimi.

Karıştırma süresi genellikle 60 ila 120 saniye arasındadır. Daha uzun karıştırma süreleri işlenebilirliği daha fazla iyileştirmez ve havanın aşırı sürüklenmesine ve karışımın sıcaklığının artmasına neden olabilir.

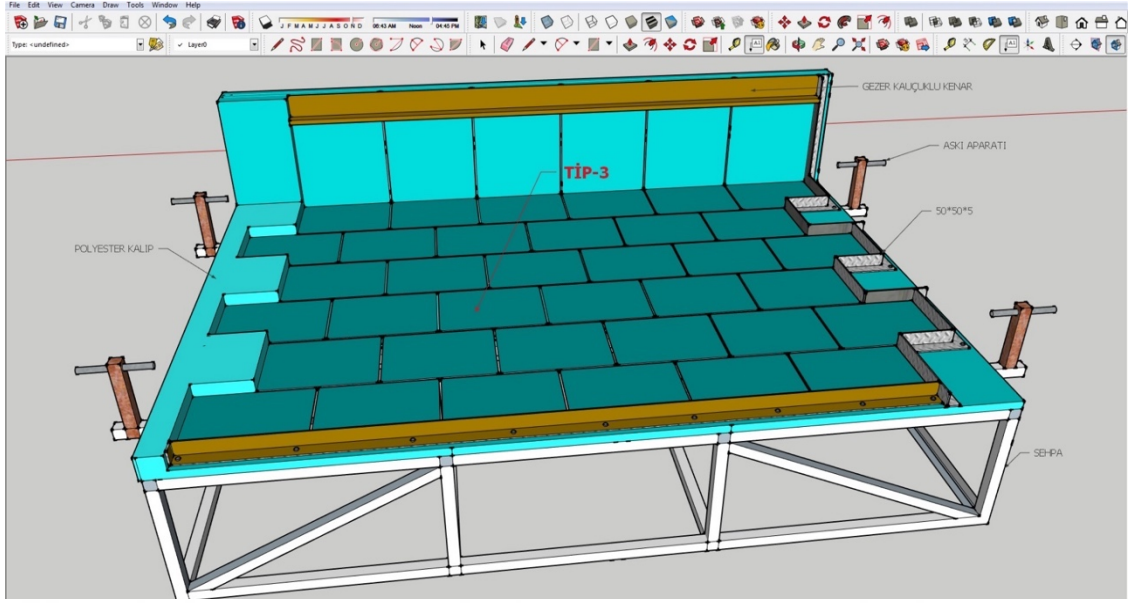
Yaygın olmamakla birlikte sürekli karıştırma yapan mikser tipleri de denenmiştir.

Harcın kıvamı üretilecek ürün tipine uygun şekilde deneylerle ve üretici tecrübesi ile ayarlanır. Belli standartta bir kıvam için slump deneyi yapılarak kontrol edilir [48].

#### 2.3.2.2. GRC-CTB Elemanların Üretilmesi İçin Kalıp Hazırlama

İstenen geometride bir ürün için iyi kalitede hazırlanmış ve geometriye göre doğru şekilde tasarlanmış bir kalıp kullanılır. Kalıplar döküm işleminin yapılması sırasında stabilitelerini koruyacak, malzemenin hidratasyonu ve sertleşmesi aşamasında iş gerilmeleri alacak sökülme sırasında gerekli açılara ve hareketli kenarlara sahip olacak şekilde tasarlanıp üretilmelidir.

Kalıplar çok farklı malzemeler kullanılarak yapılabilirler. Rijit kalıplarda çoğunlukla cam lifi takviyeli polyster, çelik ve Medium Denstiy Fiberboard (MDF) gibi malzemeler kullanılır. Söküm için ya kenarlarda açılır ya da kalıplar birden fazla parçaya sahip olarak üretilir. Esnek kalıplarda poliüretan veya silikon gibi esnek malzemeler kullanılır. Ayrıca esnek kalıbın geometrisini muhafaza etmesi için rijit bir desteğe ihtiyaç vardır. Kalıbın tasarım ve yapım aşamasına ait görseller Şekil 2.15’de görülmektedir.



Şekil 2.15. Polyester kalıbın tasarımı ve yapım aşamaları.

Kalıplar tasarlanırken kullanım sayıları, üretilecek elemanın karmaşıklığı, yüzeyde istenen efekt, eleman boyun ve geometrisi, üretim yöntemi, gömülü elemanların yerleşimi ve beton üretimine uygunluğu gibi kriterler dikkate alınır.

Kalıp tasarımında ürün toleranslarına uygun şekilde iyi bir boyutlandırma için azami dikkat gerekir. Ek yerleri sızdırmaz ve tekrar sayısına uygun olmalıdır.

GRC-CTB malzeme sertleşme esnasında, sıcaklık farkları ve nem altında boyutsal değişime uğrar. Büzülme ya da genleşme yapan ürünün kalıp içinde uğrayacağı gerilmeler ve sorunlar kalıp tasarımında dikkate alınmalıdır. Kenarlar da yuvarlama ya da pah gibi yumuşak geçişler düşünülmelidir.

Kalıbın döküm öncesi sökümü kolaylaştırmak ve yapışmayı önlemek amacı ile betonda da kullanılan kalıp ayırıcılar kullanılır. Uygun kalıp ayırıcı seçiminde kalıp malzemesi ve ürün yüzeyinde oluşabilecek etkileşimler dikkate alınmalıdır.

Şekil 2.16’de çok karmaşık poliüretan esnek bir kalıp için tasarlanmış dış destek kalıbının



poliüretan kalıp için hazırlanması aşaması görülmektedir. Kalıbın tasarlanması, model imalatı, polyester aşaması, çelik destek yerleştirilmesi ve kalıbın yüzey temizliği ve hareketli kenarların üretimi ile süreç tamamlanır.



Şekil 2.16. Poliüretan kalıp dış destek ünitesi hazırlanması.

GRC-CTB kalıpları çok karmaşık olabilmektedir. Bu tür kalıpların tasarım ve üretimleri çok yüksek tecrübe gerektirir. Şekil 2.17’de görüldüğü üzere eğrisel kalıplarda yapılabilmektedir.



Şekil 2.17. Ahşap eğrisel kalıp yapımı.

GRC-CTB ürünlerde kabuk üretimler söz konusu olduğundan kalıp yüzeylerine gelen basınçlar normal beton sistemlerde olduğu kadar yüksek değildir. Bu nedenle kalıp konusunda hem geometride hem de malzemede alternatifler daha çoktur.

#### 2.3.2.3. Püskürtme (Spray) Sistemi ile Üretim

En yaygın üretim yöntemlerinden biri püskürtme (spray) yöntemi, harcı bir pompa ve özel bir püskürtme kafası yardımı ile kalıba püskürtülerek uygulanır [40]. Bu yöntemde harç ile lif kafadan ayrı ayrı çıkar ve püskürme esnasında karışırlar. Lif yine püskürtme kafasında istenen boyda kesilerek karışıma eklenir. Yaygın kullanılan lif boyu 25-37 mm arasındadır. Püskürtmede kullanılan kafa ve pompa Şekil 2.18’de gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Birleşik püskürtme kafası ve pompası [40].

Kalıba her katman 3-5 mm kalınlıklarda homojen şekilde püskürtülür. Her püskürtme katmanı sonrası daha iyi bir ürün için rulolama işlemi Şekil 2.19’daki gibi uygulanır. Denenmiş kesitlere sahip rulolar yardımı ile çok iyi bir sıkıştırma işlemi yapmak ve bunu her kattan sonra püskürtme yönünde yapmak çok önemlidir.

Mimari uygulamalarda ilk kat olarak çok ince (1-2 mm) buğu tabakası ana karışım ile aynı veya özel olarak hazırlanmış bir karışım kullanılarak püskürtülür. Buğu tabakası ürünün estetik görünümü ve yüzeyin boşluksuz ve düzgün olması açısından önemlidir. Yüzeyde özel mimari bitişler isteniyorsa kullanılacak agrega boyutuna uygun olarak yüzey harçları yapılarak püskürme ya da mala ile yüzeye uygulanabilir. Devamında 3-4 kat püskürtme işlemi ile döküm Şekil 2.20’deki gibi tamamlanır.





Şekil 2.19. Sıkıştırma işleminde kullanılan rulolar ve rulolama [40].

Katmanlar arasında, katmanların aderansı açısından sorun yaratacak bir gecikme olmamalıdır. Katmanların uygulama süreleri kullanılan harcın priz sürelerine göre takip edilmelidir.



Şekil 2.20. Buğu tabakası, püskürtme döküm işlemi ve rulolama ile sıkıştırma.

Püskürtme yönteminde lif/harç oranını tutturmak çok önemlidir. Bu oranı sağlamak için püskürtme makinesi harç miktarı ve lif kesim miktarları günlük olarak kalibre edilmelidir. Bu amaçla kova ve torba testi kullanılır [49]. Püskürtme yönteminde istenilen dayanım



değerlerine uygun olarak %3,5-5 arasında lif oranı kullanılabilir. Lif boyu ve lif oranı optimizasyonu gerekli testlerle sağlanmalıdır.

Tipik panel kalınlığı minumun 12-15 civarındadır. Teknik hesaplara ve şartnamelere bağlı olarak 20-25 mm kalınlıkta uygulamalar da söz konusudur. Karmaşık şekillere sahip kalıpların köşelerinde ve kenarlarında GRC-CTB'nin yeterli bir kalınlıkta üretilmesini sağlamak için özen gösterilmelidir.

Her bir tabaka püskürtüldükten sonra, sıkışan havanın çıkmasını sağlamak ve cam liflerinin çimento harcına yapışmasına yardımcı olmak için bir rulo ile sıkıştırılır. Ürünün kalınlığı, son geçişin ardından Şekil 2.21'de bulunan derinlik aleti veya bir şablon kullanılarak kontrol edilmelidir. Arka yüz daha sonra, rulo veya bir mala ile gerektiği şekilde bitirilir.



Şekil 2.21. Kalınlık ölçümü ve son kat düzeltme.

Kalınlık öngörülen kalınlığın altında olmamalı ve toplam ağırlığın aşılmaması için de 4 mm'den daha fazla aşılmamalıdır. GRC-CTB üretiminde doğru ve etkin sıkıştırılmanın sağlanması esastır ve karmaşık şekillerdeki köşeler için özel dikkat gösterilmesi gerekir.

Premix GRC-CTB'nin sıkıştırılması genellikle karışımın elle doldurulması veya taze doldurulmuş bir kalıba malalanması ile elde edilir, bundan sonra tüm içerik ve kalıp titreşim uygulanarak sıkıştırılır. Çok yüksek oranda akıcı, kendiliğinden yerleşen bir karışım kullanıldığında, sıkıştırma gereksinimi ortadan kalkar.

#### *Premix Sistemi İle Üretim*

Bu işlemde ilk önce çimentolu bir matris üretilir (premix harcı) ve toplam karışıma %2 ila 4 oranında önceden kesilmiş AR cam lifi katılarak karıştırılır. Önceden kesilmiş lif genellikle 6 ila 12 mm aralığındadır. Ancak 18 ve 25 mm ve diğer uzunluklar da yapılmış

alışmalar mevcuttur. Püskürtme GRC-CTB işleminde olduğu gibi, matris maksimum işlenebilirliği elde etmek için genellikle yüksek hızlı bir karıştırıcıda üretilir ve kesilmiş lifler ikinci aşamada, genellikle düşük hızlı bir karıştırma hızında eklenir. Bu işlem, liflere en az zarar verecek ve dağılımı homojen yapacak şekilde tecrübe ve testler ile belirlenir.

Elde edilen lifli karışım önceden hazırlanmış kalıplara el ile ya da bir pompa yardımı ile yerleştirilir. Özel geliştirilmiş premix püskürtme tabancaları kullanarak lifli karışımları kalıplara püskürtme yolu ile de yerleştirmek mümkündür. Bu yönteme de püskürtme premix yöntemi adı verilir. Premix yöntem ile püskürtme yöntemi arasında farklar

2.3.3.GRC-CTB teknik özellikler bölümünde incelenecektir.

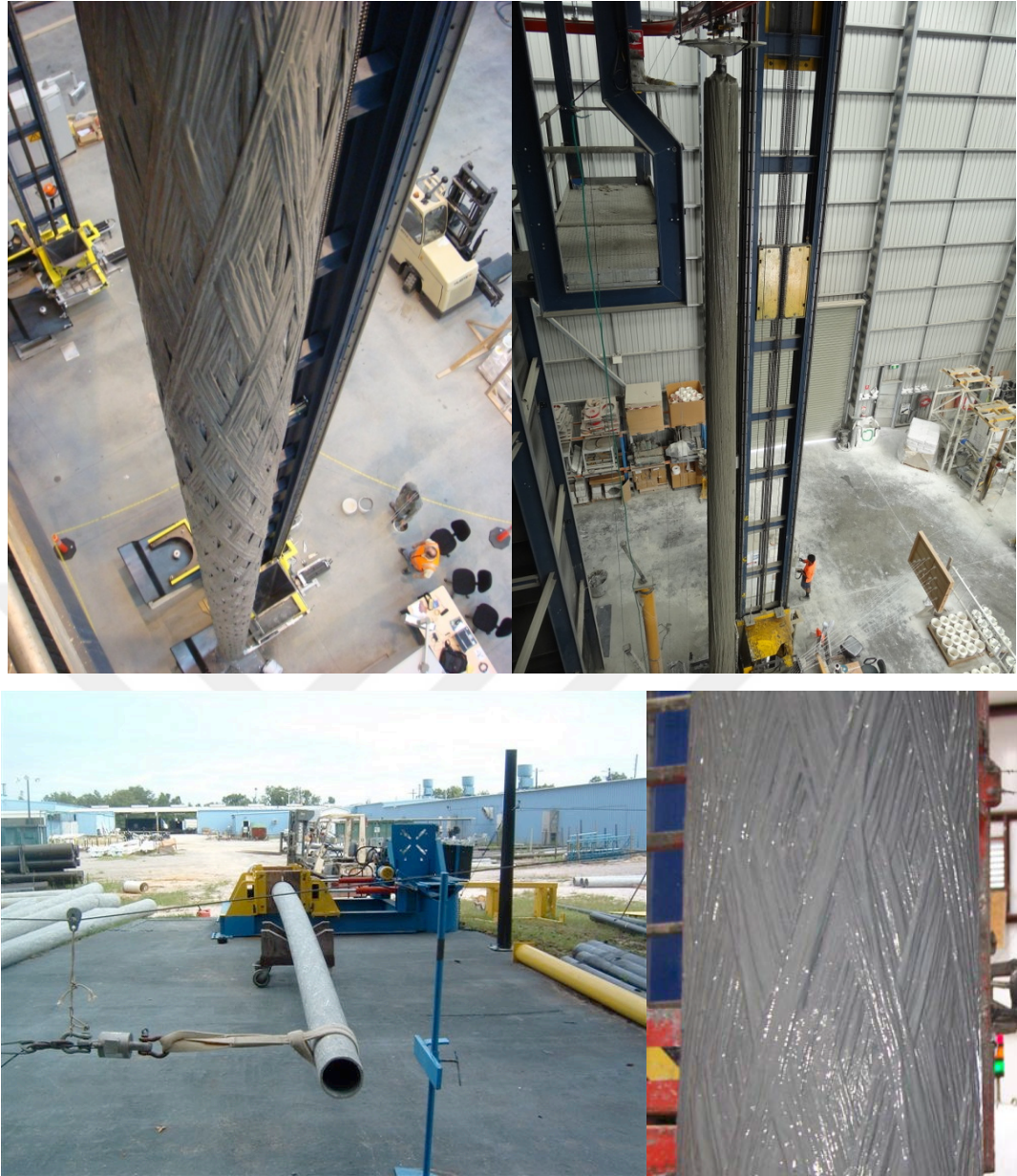
#### 2.3.2.4. *Filament Sarma Yöntemleri*

Filament sarımı, bitmiş ürünün son şeklini tanımlayan bir mandrel etrafına taze matris malzemesi ile kaplanmış, AR cam lif takviyesinin sarılmasından oluşur. Sürekli cam lif ipliklerinin emprenyesi, “tamamen ıslanana” kadar imento matrisinin banyosundan çekilerek yapılır. İşlemin doğası, yapılabilecek elementlerin şekil aralığını sınırlar, ancak içi boş boru biçimli ürünler için çok uygundur.

Son rnler çoğunlukla içi boşluklu olarak şekil 2.22’deki gibi üretilir. Bu sayede yüksek mukavemetli bir ürün elde edilir. Üretim süreci, cam lif takviyeli plastik endüstrisinde yaygın olarak kullanılabenzer. GRC-CTP direkleri ve borular için pratikte dikey bir filaman sarım işlemi kullanılmıştır. Elde edilen kompozit, sürekli AR cam liflerinin hacimce %12-18 oranında takviye edilmiş, yüksek oranda modifiye edilmiş bir Portland imentosu matrisinden oluşmaktadır. Dikey mandrel, eksenini üzerinde dönerken, gerekli takviye derecesini ve istenen performans özelliklerini elde etmek için mandrel üzerine çok sayıda lif teli/bandı yerleştirilerek sarılır. Sarım sonrası sıklaştırma ve 24 saat krleme ile işlem tamamlanarak ürün çıkartılır [50].

Bu işlem sonucu GRC-CTB eğilme dayanımı çok yüksek oranda arttırılabilir. Püskürtme standart bir üründe MOR (kırılma katsayısı) değeri tipik olarak 20-25 MPa civarında iken sarma yönteminde 100-200 MPa eğilme değerlerine sahip ürünler elde etmek mümkündür.

Bu yöntem günümüzde Amerika Birleşik Devletleri, Avustralya ve Yeni Zelanda’da elektrik dağıtımı, güneş direkleri, aydınlatma direkleri ve deniz dağıtım direklerinin ticari üretiminde kullanılmaktadır [23].



Şekil 2.22. Filament sarma yöntemi ile düşey boru imalatı ve test edilmesi [51].

#### 2.3.2.5. Ekstrüzyon

Yüzlerden birinin veya her ikisinin de pürüzsüz olması istenen paneller ve benzer elemanların çok yüksek tekrarlı çok sayıda gereken yerlerde ekstrüzyonla üretilebilir. Küçük ölçekli denemeler yapılmıştır, ancak genel GRC-CTB üretim uygulamasında yaygın olarak benimsenmemiştir. Temel nedenler ekipmanın maliyeti ve yeterli kullanımı alanı hakkındaki belirsizliklerdir.

Küçük ölçekli, esas olarak laboratuvar bazlı denemeler, GRC-CTB elemanlarının bir enjeksiyon kalıplama işlemi ile de üretilebileceğini göstermiştir [23].



Küçük ölçekte denenmiş olan ekstrüzyon işlemleri ayrıca doğal olarak GRC-CTB karışımındaki liflerin yönünü de etkiler. Beklendiği gibi, lifler esasen ekstrüzyon yolu boyunca hizalanmaktadır, bu şekilde üretilen sertleştirilmiş GRC-CTB'nin anizotropisi (farklı yön özellikleri), ekstrüzyonda kullanılan liflerin, genellikle püskürtme işleminden önemli ölçüde daha kısa olması nedeniyle püskürtülmüş GRC-CTB'ninkinden daha az olabilir. Ekstrüde GRC-CTB'deki liflerin uzunluğu üretilen GRC-CTB elemanının kalınlığından daha kısa olabilir, bu durum liflerin güçlendirme olarak verimliliğini düşürebilir [23].

Üretim yönteminin seçimi kullanılan liflerin boy ve yönelimini de etkilediğini bilmek önemlidir. Bu nedenle, GRC-CTB'nin iyi sıkıştırıldığından ve liflerin doğru ve homojen dağıldığından emin olmak için özen gösterilmelidir.

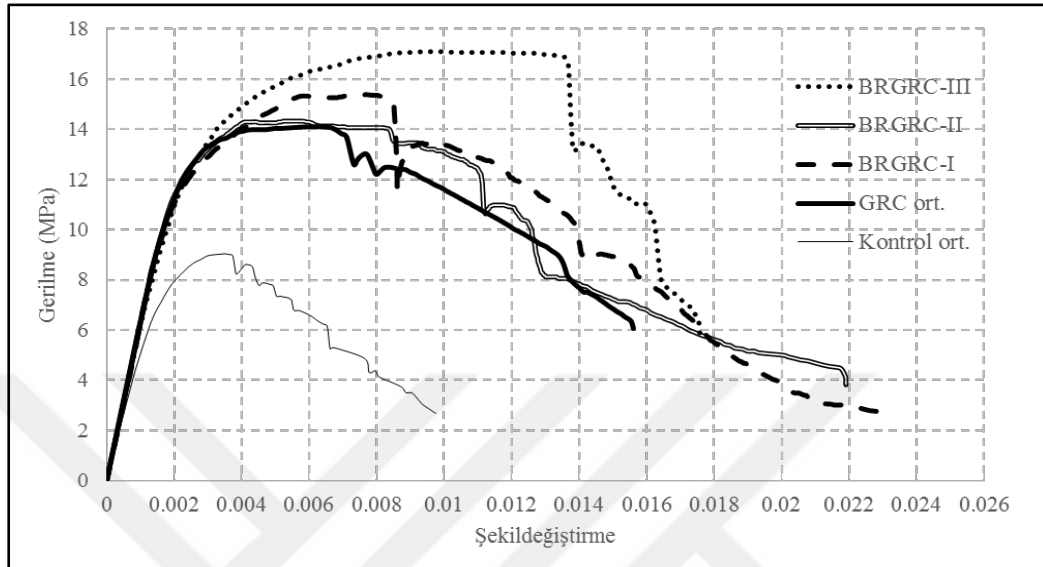
#### 2.3.2.6. Yapısal Güçlendirme İçin GRC-CTB Kullanımı

2013 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nden Prof. Dr. Alper İlki ve ekibi ile yazarın da içinde olduğu Fibrobeton A.Ş'nin yürüttüğü bir dizi çalışma sonucu GRC-CTB Püskürtme yöntemi ile hasarlı veya taşıma gücü düşük betonarme yapılarda güçlendirme malzemesi olarak kullanılabilirliği denenmiştir (Şekil 2.23). Bu çalışmalar sonucu 20-25 mm kalınlıkta sadece kesilmiş liflerden oluşan GRC-CTB malzemesi ve buna ek olarak ayrı bir çalışmada GRC-CTB matrisle birlikte dokuma ve tekstillerin kullanımı incelenmiştir. Hem kesilmiş lif hem de dokuma ile takviye edilmiş çalışmaların hasarlı ve taşıma gücü zayıf binalarda kolon kiriş ve duvar sistemlerini güçlendirebileceği ortaya konmuştur (Şekil 2.24).



Şekil 2.23. Güçlendirme yöntemi üretim ve test çalışmaları.

Bu konuda yapılmış çalışmalar sonucu patentli bir sistem ortaya çıkmış ve kullanım yöntemi olarak FRP kompozitlere alternatif olarak önerilmektedir. Özellikle FRP kompozitlere göre maliyet, yangın dayanımı, sağlık, buhar geçirgenliği ve uygulama kolaylığı gibi avantajları bulunmaktadır [42]–[44], [52]–[54].



Şekil 2.24. Güçlendirilmiş ve kontrol numuneleri gerilme-şekil değiştirme ilişkileri [52].

#### 2.3.2.7. 3-B Yazıcılar ve GRC-CTB

Üç boyutlu yazıcı teknolojisi ile günümüzde birçok alanda yenilikçi ürünlerin üretimi mümkün olmaktadır. Bu teknolojinin temeli, hammaddeyi katmanlar halinde ekleyerek üç boyutlu ürünlerin elde edilmesini kapsamaktadır.

3B yazıcı teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak Avrupa Ülkeleri ve Amerika'da yazdırılabilir beton ürünler üzerinde çeşitli firmaların girişimleri bulunmaktadır. Hollanda, Slovenya, Danimarka, Fransa, Çin ve Amerika'da lif takviyeli beton ile yazdırılabilir GRC-CTB ürünler üreten firmalar bulunmaktadır. Ayrıca çok sayıda uluslararası üniversitede de birbirinden bağımsız araştırmacılar bu konuları içeren çok sayıda çalışma yapmaya devam etmektedirler. Bu çalışmalar da ticari çalışmalara paralel olarak makaleler ve teknik yayınlar olarak izlenmektedir.

Çalışmaların bir kısmı akademik ortamda kalmakta ve fakat bir kısmı da gerek startup şirketler gerekse prekast beton üreten benzer şirketler vasıtası ile ürüne dönmektedir.

Özellikle Çin'de son zamanlarda WinSun Co.'nun öncülüğünde geliştirilen ve ince 3B elemanlarının 'basıldığı' ve daha sonra bir yapı oluşturmak için Şekil 2.25'de gözüktüğü gibi istiflenerek veya birleştirilerek oluşturulduğu bir aşamadır. Bu şekilde üretilen

bileşenler kullanarak komple binalar monte edilmiştir [55].



Şekil 2.25. 3B Yazıcı ile basılmış yapı elemanları [56].

#### 2.3.2.8. Kürleme

Kalıpta bekleme süresinin uzunluğu ve koşulları, sertleştirilmiş GRC-CTB'nin özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Temel gereksinimler, genel olarak beton teknolojisine benzer: temel olarak, su içeriği kaybının önlenmesi, yeni yapılan ürünün kuruması ve yeterli bir sıcaklığın korunması. Bununla birlikte, GRC-CTB'nin normal betondakinden daha yüksek bir çimento içeriğine sahip olduğu ve ince kesitli elemanlar düşünüldüğünde, GRC-CTB için uygulanan kür rejimi, normal betondan daha doğru bir şekilde kontrol edilmelidir [23].

Polimer kürleme uygulanıyor ise kür amaçlı olarak karışıma katılan polimerlerin film oluşma sıcaklığı dikkate alınarak ortam sıcaklığı ayarlanmalıdır. Kalıplarda arka yüzeylerden su kaybı olmaması için ortam yüksek hava akımından korunmalı ortam sıcaklıkları 18-30 °C'yi geçmemesine özen gösterilmelidir. Ayrıca kalıp yüzeylerinin

emici olmamasına ve taze beton suyunu bu yolla kaybetmemesine de dikkat edilmelidir.

Polimersiz üretimlerde kalıplar iyice sarılmalı, söküm sonrası ise 20 °C civarında sıcaklık ve %95 nemli ortamda ürüne 7 gün kür uygulanmalıdır.

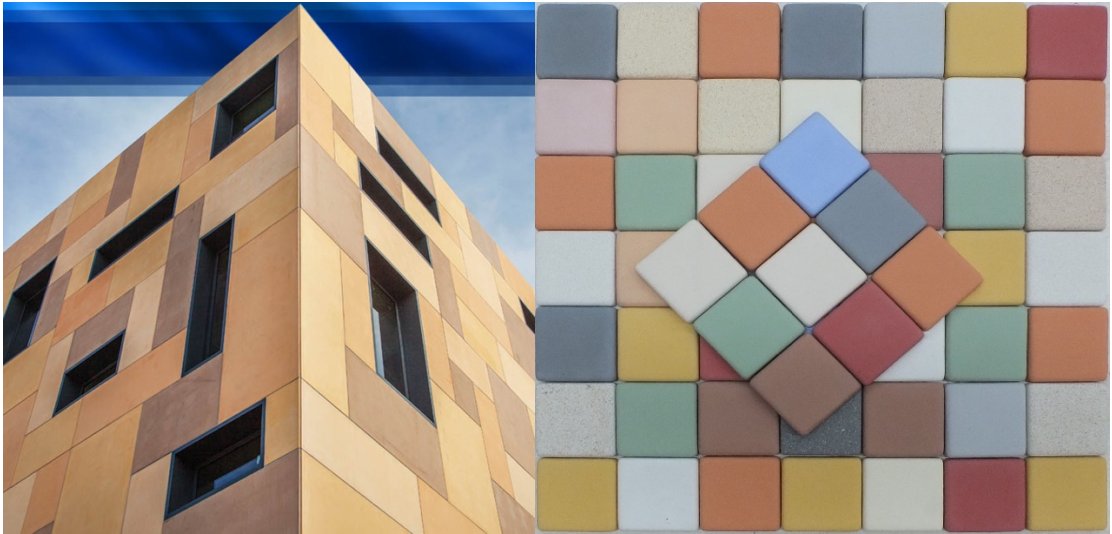
Kür süresi ve şartları iyi kontrol edilmesi kaliteli bir ürün için çok önemlidir.

#### 2.3.2.9. Yüzey Bitimleri

Genel olarak GRC-CTB ürünler üretildikleri alanlara göre değişik yüzey özelliklerine sahip olabilirler. Genelde kalıptan çıktığı gibi doğal renk ve kalıp dokusunda kullanımlar olabildiği gibi mimari isteklere ve beklentilere göre Şekil 2.26’de bulunan görseller gibi farklı yüzey bitimleri uygulanabilir.

En çok kullanılan yüzey bitirme şekilleri;

- Düz kalıp gören yüzeyli bitimler,
- Kendinden renkli bitimler,
- Asit ile yıkanmış agregalı bitimler,
- Kumlanmış yüzeyli bitimler,
- Yüzey geciktirici ile indirgenmiş yüzey bitimleri,
- Grafik membranlar ile yapılmış yüzey bitimleri,
- Tekstür kalıpları ile yapılmış tekstürlü yüzeyler,
- Aşındırılarak silinip parlatılmış yüzeyler.



Şekil 2.26. Renkli yüzey bitimleri GRC-CTB ürünler.



Farklı yüzey bitimleri ile ilgili olarak özellikle üreticilerin tecrübeleri ve bu teknikler için gerekli olan özel ekip ve ekipmanların üretilmesi ve yeterince tecrübe edilerek istenen yüzey ve teknik özellikler elde edilebilir. Özellikle asitleme, yüzey geciktirici, parlatma, grafik yüzey ve kumlama uygulamalarında teknikler kadar yüzey karışımı ve özel agrega kullanımı da önemlidir (Şekil 2.27).

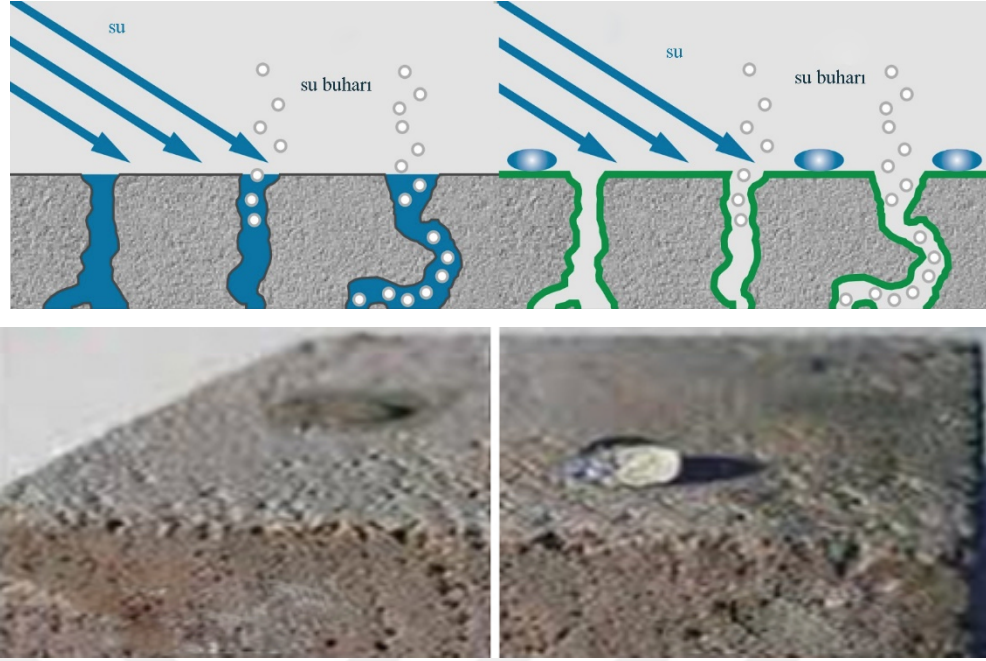


Şekil 2.27. Tekstür yüzey bitimli GRC-CTB ürünler.

Özel yüzey bitimleri yanında GRC-CTB ürünlerin atmosferik kirlenmelere karşı korunması amacıyla yüzey koruyucu uygulamaları yapmak Şekil 2.28'deki gibi mümkündür. Yüzey koruyucu olarak siloksan veya silikon esaslı malzemeler ve nano bazlı su itici kaplamalar kullanılabilir [47]. Bu işlemde kullanılan kaplama malzemesi yüzeyi hidrofobik hale getirerek atmosferik kirlenmelerin ürün içine nüfuz etmesini önler. Bu işlemde buhar difüzyonunu engellemeyen kaplamalar seçilmelidir.

Ayrıca GRC-CTB yüzeyleri mineral veya akrilik boyalar ile boyanarak hem renk hem de koruma işlemi bir arada yapılabilir. Buhar geçişine izin veren nefes alabilen boya tercihi önemlidir. Boya ve kaplamalar üreticiler tarafından gerekli yapışma ve ömür testleri yapılarak denenmeli ve teknik şartnameler oluşturularak kalite güvence altına alınmalıdır.





Şekil 2.28. Yüzey korucuyu uygulama yapılmadan önce ve sonrası.

#### *Kendini temizleyen beton yüzeyler*

Brüt betonun görüntüsü, beton yüzeyine yapışan ya da zamanla nüfuz eden organik bileşikler nedeniyle bozulmakta, rengi değişip kirlenmektedir. Betonun en çok maruz kaldığı organik kirleticiler hidrokarbonlar, aldehid, nitrojen ve sülfür içerikli bileşikler ve inorganik bileşiklerdir.  $TiO_2$  fotokatalitik süreçte bu ve benzer çok sayıda kirleticinin ışıqla bozulması için kullanılabilen en etkin katalizördür.

Fotokatalitik özelliğe sahip  $TiO_2$  çimentoya ya da beton karışımına katılmakta ve betonun estetik özelliklerini koruyarak, servis ömrü boyunca üzerine gelen organik kirleticiler ayrıştırılıp, betonun aynı renk ve dokuda kalması sağlanmaktadır. Ayrıştırma sonrası ortaya çıkan maddeler de yağmurla yüzeyden uzaklaşmaktadır. Kendi kendini temizleyen betonlar denilen bu teknolojiye fotokatalitik reaksiyonlar yüzeyi etkileyen nitrojen oksit vb. içeren kirletici maddelerin yüzeye kalıcı olarak yapışmasını engelleyip, ayrıştırılmaktadır [57].

Ülkemizde bu yönde ilk çalışmalar Çimsa-Fibrobeton iş birliğinde başlatılmıştır. İlk uygulama da 2015 yılında Şekil 2.29'daki görselde, Çimsa Çimento-Fibrobeton A.Ş. işbirliği ile TÜPRAŞ RUP binası inşaatında gerçekleştirilmiştir [58]. Kendini ve çevreyi temizleyen beyaz çimento, ISO-22197-1:2007(E) (International Organization for Standardization) standardına göre üretilmektedir.



Şekil 2.29. Kendini temizleyen yüzeyli GRC-CTB uygulaması TÜPRAŞ RUP binası Kocaeli [58].

#### 2.3.2.10. Taşıma, Nakliye, Depolama ve Tamir

GRC-CTB üretiminde ürünün kalıptan sökülmesi ile başlayan ve kullanılacağı yapıda montajına kadar olan süreç boyunca ürünler çok sayıda yatay ve düşey hareket ederler. Bu hareket ve taşıma süreçleri boyunca uygun şekilde kaldırılmalı, taşınmalı ve depolanmalıdır. Özellikle söküm aşmasında ürünler henüz nihai mukavemetine ulaşmadığından dikkat edilmez ise köşe kırıkları, eğilmeler, deformasyonlar olabilmekte ve ürün estetik ve yapısal olarak sorunlar yaşayabilmektedir (Şekil 2.30).

Hafif olması nedeniyle GRC-CTB ürünleri genellikle uzman üretim tesisleri ve inşaat sahaları arasındaki önemli mesafeler boyunca taşınır, düşük ağırlık prekast beton ve diğer sistemlere göre bir avantajdır (Şekil 2.31). Bununla birlikte, ince cidarlı GRC-CTB elemanlarda hasara yol açabilir ve herhangi bir titreşimi en aza indirmek ve nakliye sırasında hareketlerini sınırlandırmak için özen gösterilmelidir. Sandıklama, askılı raflar ve özel sehpalar gibi ürün geometrisine göre taşıma için gerekli önlemler alınmalıdır (Şekil 2.32).

GRC-CTB elemanlarındaki herhangi bir hasar, yapısal performans açısından değerlendirilmelidir. Yapısal olarak sorunlu değilse, eleman üretimi için kullanılan benzer taze GRC-CTB karışımı kullanılarak küçük hasarlar tamir edilebilir.



Şekil 2.30. GRC-CTB ürünlerin kalıptan sökümü.



Şekil 2.31. GRC-CTB ürünlerin kalıptan sökümü sonrası istif.

Söküm işlemi sonrasında yerine montaja kadar olan süreçte ürünlerin yüzeyleri lekelenmemesi veya çizilip zarar görmemesi için korunmalıdır. Kirleticilere bağlı olarak özel endüstriyel temizleyiciler kullanılarak bu lekelerin büyük kısmı temizlenebilir.





Şekil 2.32. GRC-CTB ürünlerin sandıklanması ve taşınması.

### 2.3.3. GRC-CTB Teknik Özellikleri

#### 2.3.3.1. Taze GRC-CTB'nin Özellikleri

Taze matris malzemenin işlenebilirliği seçilen üretim yöntemine uygun olmalıdır. Genel olarak, işlenebilirlik ne kadar yüksek olursa, üretim ve sıkıştırma o kadar kolay olur. Ancak yüksek işlenebilirlik, sertleştirilmiş GRC-CTB'nin beklenen dayanımından ödün vermemeli veya kabul edilemez bir segregasyona yol açmamalıdır. Bu nedenle ortak GRC-CTB matrislerinin karışım tasarımı, mukavemet azalması olmadan yüksek oranda uygulanabilir karışımların üretimine izin veren süper akışkanlaştırıcılar içerir. Kendiliğinden yerleşen beton için özel olarak geliştirilen katkılar ise kendiliğinden yerleşen premiks GRC-CTB'de de kullanılır [23].

İşlenebilirliği takip için slump testi kullanılır [48]. Dökülecek kalıp şekline, kalınlık, lif boy ve oranına uygun olarak harcın işlenebilirliği ayarlanır. Su çimento oranı düşük tutulmalıdır. Genel kabul gören karışımlar için bu oran %35'ten daha azdır.

Düşey kalıplara püskürtme yöntem ile döküm uygulamasında kıvamın özellikle düşük olması istenir. Özel kıvam gereken durumlarda kıvam ayarlayıcı katkıları ya da kıvam ayarlayıcı dolgu malzemeleri kullanılabilir.

#### 2.3.3.2. Sertleşmiş GRC-CTB'nin Özellikleri

Sertleşmiş GRC-CTB'nin özellikleri çok fazla faktöre bağlıdır;

- Matris içeriği ve oranları (su/çimento, çimento/agrega oranları, çimento tipi, agrega tipi ve granulometrisi, katkı ve diğer bileşenlerin durumu)
- Lif Özellikleri (narinlik, lif elastik modül, yüzey katmanı, filament sayısı ve lif boyu, lif oranı)
- Lif karıştırma ve sıkıştırma yöntemi, üretim yöntemi ve kütleme,
- Karışım granulometrisi ve boşluk oranları,
- Polimer oranı ve özellikleri,
- Üretim sürecindeki işçilik ve denetim kalitesi.

GFRC'nin erken (28 günlük) özellikleri tipik olarak uygun tasarım parametrelerini belirlemek ve üretim boyunca kalite kontrolünü izlemek için kullanılır. Yaşlanmamış GFRC nispeten güçlü, sert, kısmen sünek bir malzemedir [59].

Sertleşmiş GRC-CTB sınıflandırılması TS EN 15191 nolu Türk Standardında ve GRCA Derneğinin GRC-CTB üretim, Kütleme ve Test Kılavuzunda detaylı olarak verilmiştir.

Bu dokümanlara göre GRC-CTB ürünler 8, 8P, 10, 10P, 18 ve 18P olmak üzere 6 ana kalite grubunda sınıflandırılmış olup bu grupların LOP (orantılık sınırı) ve MOR dayanım değerleri ve bu değerleri sağlamak için hangi yöntemle üretileceği ve karışıma girecek kritik malzemeler listelenmiştir.

Çizelge 2.7 üreticilere başlangıç değerleri vermek için kullanılmalıdır. Ancak her üretici tecrübe ve denemelerle teknik olarak beklenen değerleri farklı oranlarda çalışabilir. Bu durumda üreticiler bu çalışmaları ve bu çalışmaların sonucunda elde ettikleri test sonuçlarını da idarelere sunmalıdır. Unutulmaması gereken en önemli husus GRC-CTB üretimi tecrübe, işçilik ve kontrol süreçlerine çok bağlıdır.

Çizelge 2.7. GRC-CTB Ürünlerin sınıflarına göre tasarım oranları [60], [61].

| Sınıflar                                  | Sınıf 8      | Sınıf 8P | Sınıf 10                                  | Sınıf 10P | Sınıf 18          | Sınıf 18P |
|-------------------------------------------|--------------|----------|-------------------------------------------|-----------|-------------------|-----------|
| Üretim Yöntemi                            | Genel Premix |          | Püskürtme Premix veya Yüksek Kalite Döküm |           | Püskürtme GRC-CTB |           |
| Agrega/Çimento Oranı                      | 0,5-1,5      | 0,5-1,5  | 0,5-1,5                                   | 0,5-1,5   | 0,5-1,5           | 0,5-1,5   |
| Su/Çimento Oranı                          | 0,3-0,4      | 0,3-0,4  | 0,3-0,38                                  | 0,3-0,38  | 0,3-0,38          | 0,3-0,38  |
| Cam Lifi İçeriği (Toplam Karışım %)       | 2,0-3,0      | 2,0-3,0  | 2,0-3,5                                   | 2,0-3,5   | 3,5-5,5           | 3,5-5,5   |
| Polimer Katı madde İçeriği %              | Sıfır        | 4-7      | Sıfır                                     | 4-7       | Sıfır             | 4-7       |
| Olağandışı Boyutsal Sapmalar mm/m         | 0,6-1,2      | 0,6-1,2  | 0,6-1,2                                   | 0,6-1,2   | 0,6-1,2           | 0,6-1,2   |
| Su Absorbsiyonu                           | %5-11        | %5-11    | %5-11                                     | %5-11     | %5-11             | %5-11     |
| Minimum Kuru Yoğunluğu kg/m <sup>3</sup>  | 1800         | 1800     | 1800                                      | 1800      | 1800              | 1800      |
| Minimum Islak Yoğunluğu kg/m <sup>3</sup> | 2000         | 2000     | 2000                                      | 2000      | 2000              | 2000      |

Karışım çimento/kum oranı, kumun granulometrisi ve fiziksel özellikleri, çimento tipi, polimer tipi ve kullanım oranları, lif içeriği ve yüzdesi, uzunluğu, lifin homojen dağılımı, karıştırma ve döküm proses ve işçilik kaliteleri gibi çok sayıda faktör GRC-CTB fiziksel özellikleri üzerinde etkilidir [59].

GRC-CTB için gereken (tasarım) kalınlığı tasarım mühendisi tarafından belirlenir. GRC-CTB nispeten ince bir malzeme olduğundan, küçük kalınlık değişimlerinin bile kabuk gerilmeleri üzerinde önemli etkileri olacaktır. Bu nedenle GRC-CTB kalınlıkları her zaman belirtilen kalınlık toleransları dahilinde olmalıdır.

Örnek olarak öngörülen kalınlıkta 2 incelme yönünde bir sapma eğilimde çekme gerilimi değerini 1,56 kat büyötmektedir [62].

GRC-CTB'nin temel bileşeni, özellikleri yaşla birlikte gelişen ve değişen çimento bazlı bir matristir. Bu nedenle yaş, sertleşmiş GRC-CTB'nin özelliklerini etkileyen kilit

faktörlerden biridir. Ancak, GRC-CTB ürünlerinin nispeten uzun hizmet ömürleri nedeniyle, etkilerini doğrudan sistematik bir şekilde değerlendirmek pratik değildir. Bu nedenle, hızlandırılmış yaşlanma testleri yapılarak 28 günlük değerlerin nasıl değiştiği konusunda öngörüler yapılmaktadır [23]. GRC-CTB'nin fiziksel özellikleri Çizelge 2.8'de tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 2.8. Cam lifi takviyeli betonun fiziksel özellikleri (28 Günlük) [23], [37], [40], [59], [62]–[64].

| Yöntem            |                                        |                      |                              | Püskürtme  | Premix    |
|-------------------|----------------------------------------|----------------------|------------------------------|------------|-----------|
| AR Cam Lifi Oranı |                                        | (Ağ. %)              |                              | 3.7-5.5    | 2.5-3.5   |
| Kuru Yoğunluk     |                                        | (g/cm <sup>3</sup> ) |                              | 1.8-2.2    | 1.7-2.1   |
| Basınç Dayanımı   |                                        | (MPa)                |                              | 40-80      | 40-80     |
| Poisson Oranı     |                                        | -                    |                              | 0,24-0,25  | 0,24-0,25 |
| Genleşme sınırı   |                                        | ‰                    |                              | 0.6-1.2    | 0.6-1.2   |
| Dayanım           | Eğilme                                 | MOR                  | (MPa)                        | 18-30      | 8-20      |
|                   |                                        | LOP                  | (MPa)                        | 7-13       | 5-10      |
|                   |                                        | Elastisite Modülü    | (GPa)                        | 12-25      | 10-21     |
|                   | Çekme                                  | UTS                  | (MPa)                        | 10-15      | 4-7       |
|                   |                                        | BOP                  | (MPa)                        | 5-7        | 3-5       |
|                   | Kesme                                  | Düzlem dışı          | (MPa)                        | 20-30      | 4-6       |
|                   |                                        | Düzlem içi           | (MPa)                        | 7-12       | 4-6       |
|                   |                                        | Tabakalar Arası      | (MPa)                        | 2-4        | 4-6       |
|                   | Darbe Dayanımı                         |                      | Kj/m <sup>2</sup>            | 15-25      | 7-12      |
|                   |                                        |                      |                              |            |           |
| Su                | Su Absorbsiyonu                        |                      | (%)                          | 8-13       | 8-13      |
|                   | Kuruma Büzülmesi                       |                      | (%)                          | 0.1-0.2    | 0.1-0.2   |
| Isı               | Isı İletkenliği                        |                      | (W/m·K)                      | 0.9-1.5    | 0.9-1.5   |
|                   | Isıl Genleşme Katsayısı                |                      | (x10 <sup>-6</sup> / her °C) | 10-20      | 10-20     |
| Yangın            | Yanmazlık sınıfı                       |                      |                              | A1 veya A2 |           |
| Ses               | İletim Kaybı (dB)<br>(Kalınlık: 15 mm) |                      | 125 Hz                       | 27         |           |
|                   |                                        |                      | 250 Hz                       | 30         |           |
|                   |                                        |                      | 500 Hz                       | 35         |           |
|                   |                                        |                      | 1000 Hz                      | 39         |           |
|                   |                                        |                      | 2000 Hz                      | 40         |           |

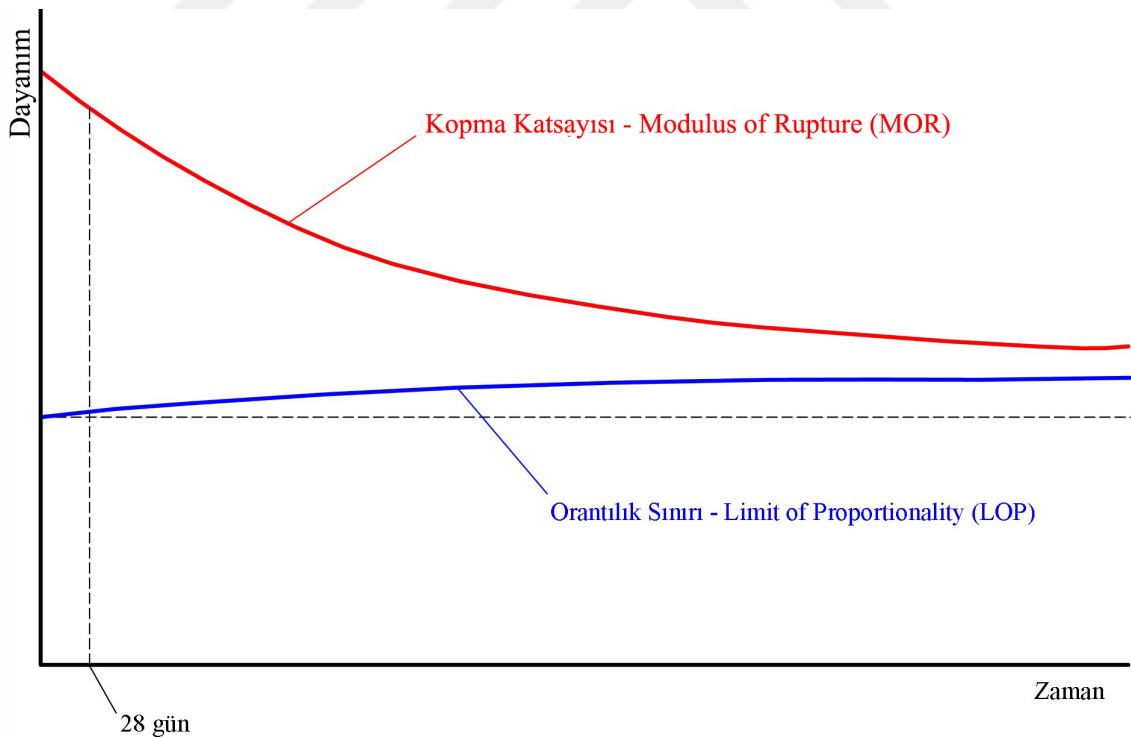


GRC-CTB'nin uzun dönem performansı bu amaçla geliştirilmiş hızlandırılmış yaşlandırma testleri ile değerlendirilmektedir. Yaygın hızlandırılmış yaşlandırma testinde, GRC-CTB numuneleri yükseltilmiş sıcaklık seviyelerinde korunmuş kirece doygun suda saklanır. Yükseltilmiş sıcaklık seviyeleri yaşlanma sürecini hızlandırır.

Örneğin, numunenin 50 °C'de korunmuş, kirece doygun suya bir gün batırılmasının, İngiltere'de (yıllık ortalama sıcaklık 10,4 °C) 100 gün doğal hava şartlarına maruz kalmaya eşdeğer olduğunu göstermiştir. Genellikle, su havuzlarında saklanan test numuneleri dayanım ve süneklikteki değişimleri belirlemek için çekme ya da eğilme durumlarında, çeşitli aralıklarla (1 yıl boyunca haftalık olarak) test edilir [47].

Hızlandırılmış ve doğal yaşlandırma süreçlerinin karşılaştırması ve değerlendirilmesi çeşitli aşamalarındaki MOR (kopma modülü) değerleri kullanılır.

GRC-CTB yaşlanma etkilerini gösteren grafik Şekil 2.33'da gösterilmiştir. MOR değerindeki zamana bağlı değişkenlik polimer ve/veya MTK gibi mineral kullanımı ile azaltılmaktadır. Şekilde Polimer ve mineral kullanılmamış tipik bir GRC-CTB yaşlanma grafiği verilmiştir [65].



Şekil 2.33. GRC-CTB Yaşlanma etkileri [63].

#### 2.3.4. GRC-CTB Kullanım Alanları ve Uygulamaları

GRC-CTB erken üretimlerin başladığı 1960'lerden beri daima çok yönlü olarak farklı alanlarda ve farklı çözümler için kullanılmıştır. Bu yelpazenin bir ucunda basit ve karmaşık olmayan dekoratif tasarımlar (saksılar, su kanalları, pencere söveleri, kablo kanalları vs) bulunur. Diğer uçta ise yapısal, çok karmaşık geometrilerde ve tasarımcıların hayal güçlerini gerçeğe dönüştüren büyük ölçekli, yüksek teknoloji içeren projeler için üretilmiş ürünler (çok eğrilikli cephe kaplamaları, büyük cephe panelleri vs.) bulunur.

Özellikle dünya çapında mimarların tasarımlarında GRC-CTB kullanmaya başlaması ile GRC-CTB'nin tasarımlarda ne kadar uçlara gidebileceği anlaşılmaya başlanmış ve uygulama çeşitliliği son yıllarda çok büyük hızla artmaya başlamıştır.

GRC-CTB modern tasarımlar yanında geleneksel tarihi yapılarda da kullanılabilir. Boyanabilir, agrega bitişli, kendinden renkli veya brüt beton görünümlü üretilbildiği gibi sonradan boyanabilir. Hafiftir, binaya çok daha az yük getirir çevre dostu ve sürdürülebilir bir malzemedir [47].

Bu kısımda GRC-CTB genel kullanım alanları verilecek ve uygulamalarla ilgili olarak Ek-1 de geniş bir resimli kaynak sunulacaktır.

GRC-CTB ürünlerin kullanım alanlarına kısaca göz gezdirelim.

- Cephe kaplaması uygulamaları; GRC-CTB çok çeşitli formlarda kabuk panel üretiminde yaygın kullanılmaktadır. Püskürtme yöntem ile üretim yapılmakta, nervürlü veya çelik karkaslı büyük kaplama panelleri üretilbilmektedir (Şekil 2.34).



Şekil 2.34. GRC-CTB Cephe panelleri ve uygulaması.

- Yüzey bitiş elemanları ve Silmeler, Kornişler gibi cephe dekorasyon malzemesi olarak kullanımı yaygındır. Mimari cephe elemanı olarak cephelerin estetik olarak tasarlanmasında yararlanılan bir malzemedir. İstenilen formun verilebilmesi, hafiflik ve yangın dayanım özellikleri, kolay taşıma ve montaj özellikleri ile bu alanda yaygın bir kullanıma sahiptir (Şekil 2.35).



Şekil 2.35. GRC-CTB Dekoratif cephe elemanları kullanılmış bir yapı.

- Ferfore ve bölücü elemanlar olarak kullanım (Şekil 2.36);



Şekil 2.36. GRC-CTB Ferfore ve bölücü elemanlar.

- Yarı taşıyıcı sistemlerde kullanım;
- Yangına karşı koruyucu kalkan olarak kullanım,
- Dekoratif cephe elemanları olarak kullanım (Şekil 7.6);
- Yenileme amaçlı malzeme olarak kullanım (Şekil 7.1);



- Peyzaj ve şehir mobilyası olarak kullanım (Şekil 2.37);



Şekil 2.37. GRC-CTB Peyzaj ve şehir mobilyası olarak kullanımı.

- Modüler yapılarda kullanım (Şekil 2.37);



Şekil 2.38. GRC-CTB Modüler Yapı Malzemesi olarak kullanımı [66].

- Kalıcı kalıp olarak kullanım (Şekil 2.39);



Şekil 2.39. GRC-CTB Kalıcı kalıp olarak kullanımı (Hong Kong) [67].

- Alt yapı malzemesi olarak (kanal, boru) kullanım (Şekil 2.40);



Şekil 2.40. GRC-CTB Drenaj kanalı olarak kullanımı [66].

- Akustik ve gürültü bariyeri olarak kullanım (Şekil 2.41),



(a)



(b)

Şekil 2.41. GRC-CTB Gürültü Bariyerleri (a) Avustralya ve (b) Hong Kong [68], [69].

- Güçlendirme malzemesi olarak kullanım (Şekil 2.23);
- Elektrik ve aydınlatma direkleri olarak kullanım (Şekil 2.22);
- Balistik amaçlı olarak kullanım;

### 2.3.5. GRC-CTB Standartları ve Kalite

Cam lifi takviyeli beton (GRC-CTB) için Avrupa standartları, 229 Nolu CEN "Prekast Beton Ürünler" komitesi tarafından 1980'li yılların sonunda çalışılmaya başlanmıştır. 1991'in sonunda da "Cam lifi Takviyeli Beton çalışma gurubu" oluşturulmuştur.

Standartların birinci amacı malzemelerin test edilebilmesi ve böylece üreticinin kalite kontrolü yapabilmesidir. Standartların ikinci amacı da malzemenin sınıflandırılmasıdır. Bu amaca yönelik olarak, gerekli bilginin elde edilmesi için, 1993/94'te bir test süreci başlatılmış ve ön standartların her test regülasyonu için malzeme tanımlanmıştır. Bu bilgilere dayanarak 1994 sonunda sınıflandırma amacıyla bir ön standart oluşturulmuştur [62].

Standartlar testlerin yapılacağı şartları belirleyerek tüm üreticiler için eşit şartlarda karşılaştırma olanağı oluşturur. Bu amaç aşağıdaki standartlarla sağlanmalıdır.

GRC-CTB Cam lifi takviyeli betonlar ile ilgili Türk Standartları aşağıdadır. Yapı malzemesi ile ilgili Türk standartları Ülkemizin Avrupa Birliği ile yaptığı mevzuat uyumlaştırması çalışmalarında ilk çalışılan grubu oluşturmaktadır. Bu nedenle TS EN ile başlayan Türk standartları ilgili Avrupa standartlarının tam karşılığıdır.

- TS EN 1169 GRC-CTB Fabrika imalat kontrolü için genel kurallar
- TS EN 1170-1, GRC-CTB Matris kıvamının ölçülmesi 'slamp deneyi' metodu,
- TS EN 1170-2, GRC-CTB lif içeriğinin ölçülmesi 'yıkama deneyi' metodu,
- TS EN 1170-3, GRC-CTB püskürtme yönteminde lif içeriğinin ölçülmesi,
- TS EN 1170-4, GRC-CTB eğilme dayanımı tayini, basit eğilme deneyi metodu,
- TS EN 1170-5, GRC-CTB eğilme dayanımı tayini tam eğilme deneyi metodu,
- TS EN 1170-6, GRC-CTB daldırma yoluyla su emme ve kuru yoğunluk tayini,
- TS EN 1170-7, GRC-CTB rutubet nedeniyle en büyük boyutsal değişimlerin ölçülmesi,
- TS EN 1170-8, GRC-CTB tekrarlı hava şartlarında yıpranma tip deneyi,
- TS EN 15191 GRC-CTB performansının sınıflandırılması,
- TS EN 14649 Çimento ve beton bünyesindeki cam liflerde dayanım kalıcılığının tayini (SIC test),



- TS EN 15422 GRC-CTB’de kullanılan cam lifi takviye malzemeye ait özellikler,
- TS EN 12467 GRC-CTB Düz levhalar-Lif takviyeli çimento kullanılarak imal edilmiş–Mamul özellikleri ve deney metotları, (GRC-CTB malzemeler için zorunlu standart)
- Cam Lif Takviyeli Betonun Üretim, Kırılma ve Test için Kılavuz Spesifikasyon (GRCA Yayını 2017)
- AMS-GRCA Üretim Sertifikasyonu (Onaylı Üretici Belgesi), ilgili dokümanları ve diğer GRCA yayınları,

Yukardaki Avrupa standartlarının ve spesifikasyonunun yanında yaygın olarak kullanılan ve oldukça detaylı bir üretim tanımlaması yapan American Society for Testing and Materials (ASTM) standartları ASTM C 947, ASTM C 948, ASTM C 1228, ASTM C 1229, ASTM C 1230, ASTM C 1560, ASTM C 1666, ASTM C 1186 ve PCI (Precast Concrete Institute) Amerika Prekast üreticileri birliğinin MNL 128 ve MNL 130-9 GRC-CTB Üretim Kalite Kontrol dokümanları da bulunmaktadır (Şekil 2.42).



Şekil 2.42. GRC-CTB Üretiminde Kalite için işbaşında eğitim çalışması.

Kaliteli bir üretimin ilk şartı ilgili standartlara göre test yapmak ve buna göre asgari kalite değerleri belirlemektir. Asgari kalite değerleri ilgili ürünler için teknik şartnameler yolu ile üreticilere önerilir. Üretim süreçlerinde teknik şartnamelerde istenen değerlerin sağlandığı bu standartlara uygun yapılan testlerle kayıt altına alınıp istendiğinde işverene sunulmalıdır. Aşağıdaki Çizelge 2.9’de Türk Standartlarına göre bir üretim sürecinde nasıl testler yapılacağı, hangi sıklıkta yapılacağı açıklanmıştır.



Çizelge 2.9. GRC-CTB Üretimi kalite kontrol standart ilişkisi.

| Özellik                                 | Lif takviyeli püskürtme beton (GRC-CTB) | Lif takviyeli premix (GRC-CTB) | Test metodu (TS EN)          | TS EN 1169'a göre kontrol                                                                             |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Basınç dayanımı (MPa)                   | 50-80                                   | 50-80                          | -                            | Müşteri isteği ve formül ayarı ve her 10 ton üretimde                                                 |
| Eğilme dayanımı 28 gün (LOP) MPa        | 8±2                                     | 7±2                            | TS EN 1170-4<br>TS EN 1170-5 | 4 Nolu test her 10 ton veya haftada en az bir kez,<br><br>5 Nolu test başlangıç ve yılda en az 2 kez, |
| Eğilme dayanımı 28 gün (MOR) MPa        | 20±5                                    | 9±3                            |                              |                                                                                                       |
| Şekil değiştirme (% MOR)                | 0.8±0.2                                 | ≥0.1                           |                              |                                                                                                       |
| MOR (50 çevrim ıslanma kuruma testi)    | 16±4                                    | 8±2                            | TS EN 1170-8                 | Formül ayarı ve değişik formüller ve kalite takibi,                                                   |
| Su emme (24 saat daldırma yöntemi)      | 11±3                                    | 11±3                           | TS EN 1170-6                 | Formül ayarı ve her 10 ton ya da haftada 1 kez,                                                       |
| Büzülme/şişme değeri (mm/m)             | 1.2±0.3                                 | 1.2±0.3                        | TS EN 1170-7                 | Formül ayarı ve değişik formüller ve kalite takibi,                                                   |
| Elastisite modülü E (GPa)               | 10-20                                   | 15-25                          | -                            | Her formül için ve müşteri istediğinde                                                                |
| Teze beton lif oranı (toplam ağırlıkça) | 4-5.5                                   | 2-3.5                          | TS EN 1170-2<br>Yıkama testi | Formül ayarı ve her 10 ton ya da haftada 1 kez,                                                       |
| Slamp testi                             |                                         |                                | TS EN 1170-1                 | Her karıştırıcı günde 1 kez                                                                           |
| Kova torba testi                        |                                         |                                | TS EN 1170-2<br>TS EN 1170-3 | Günde en az 1 defa her bir pompa için                                                                 |
| Yoğunluk (kg/m³)                        | 1900+300-200                            | 1900+300-200                   | TS EN 1170-6                 | Formül ayarı ve her 10 ton ya da haftada 1 kez,                                                       |

Bu süreçlerin ve teknik şartnamelere uygunlukların üretim süreçlerinde denetlenmesi amacı ile üretimin tüm safhalarında üreticilerin doğru şekilde hazırlanmış check-list'ler kullanması ve bu dokümanları gerekli şekilde muhafaza ederek işverene sunması önerilir.

GRC-CTB ürünlerin projelere özel olarak üretilmesi ve projeye özel gerekleri

karşılayabilmesi amacı ile teknik şartnameler yayınlanır. İyi hazırlanmış bir teknik şartname işin aşağıda temel bir kılavuz önerilmiştir. Bu kılavuza uygun yayınlanan ve güncel standartları ve yönetmelikleri kullanarak hazırlanmış bir teknik şartname ve bu şartnameye göre denetimi doğru şekilde yapılarak üretilmiş bir ürün açısından kalite garanti altına alınmış demektir.

Bu çalışmada önerilen ağırlıklı olgunluk kavramının GRC-CTB üretiminde kullanılması çalışmasının ortaya koyacağı sonuçlar Çizelge 2.10'daki şartname şablonu kullanılarak özellikle bu şartnamenin ilgili bölümlerinde (örneğin 10.bölüm olan fabrikasyon) kaliteyi geliştirici öneriler yapılabilecektir.

Çizelge 2.10. GRC-CTB Üretimi için teknik şartname önerisi.

| Cam Lifi Takviyeli Beton (GRC-CTB) Teknik Şartname                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                      |                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| İlgili yönetmeliklere ve kanunlara uygun, yürürlükteki standartlara atıf yapan, istenen özel ve genel şartları içeren, mimari istekleri karşılayan, ürün üretim, nakliye ve montaj şartlarını içeren, varsa özel testleri refere eden, üretim ve montaj toleranslarının verildiği temel doküman. |                                                                                                                                      |                                                                                                                      |
| 1. Tanım                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 6. Garanti                                                                                                                           | 12. İstif, Nakliye<br>Yükleme Boşaltma                                                                               |
| 2. İlgili Bölümler                                                                                                                                                                                                                                                                               | 7. GRC-CTB Hammadde ve Özellikleri                                                                                                   | i. Fabrika şartları<br>ii. Şantiye şartları                                                                          |
| 3. Referans Standart ve Yayınlar                                                                                                                                                                                                                                                                 | 8. Çelik Karkas Malzeme ve Özellikleri                                                                                               |                                                                                                                      |
| 4. Kalite Güvence Sistemi                                                                                                                                                                                                                                                                        | 9. GRC-CTB Ürün Özellikleri                                                                                                          | 13. Montaj                                                                                                           |
| i. Hammadde giriş kontrolleri<br>ii. Dizayn kriterleri<br>iii. Üretici nitelikleri, sertifikalar<br>iv. Kabul edilebilir üreticiler<br>v. Montajcı nitelikleri<br>vi. Testler<br>vii. Toleranslar                                                                                                | i. Karışım<br>ii. 28 Gündeki mekanik özellikler<br>iii. Dış yüzey özellikleri ve karışımı                                            | i. Yatay ve düşey taşıma<br>ii. Ankraj ve tespit noktaları<br>iii. Montaj toleransları<br>iv. Derz ve derz dolguları |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 10. Fabrikasyon                                                                                                                      | 14. Tamir Temizlik ve Bakım                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | i. Kalıplar<br>ii. Karışım oranları<br>iii. Kabuk üretimi kriterleri<br>iv. Gömülü parçalar ve ankrajlar                             |                                                                                                                      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | v. Çelik karkas yerleşimi<br>vi. Toleranslar<br>vii. Bitimler<br>viii. Kırılma<br>ix. Etiketleme ve tanımlama<br>x. Kabul kriterleri | 15. İşlerin Korunması                                                                                                |
| 5. Sunumlar                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 11. Mock-Up Uygulaması                                                                                                               |                                                                                                                      |
| i. Detay çizimleri ve içerikler<br>ii. Numuneler<br>iii. Karışım tasarımı<br>iv. Mühendislik hesaplamaları<br>v. Test kayıtları<br>vi. Sertifikalar<br>vii. Tamir ve temizlik<br>viii. Gerçek ölçekte numune (Mock-up)                                                                           | i. Mock-up uygulama esasları                                                                                                         |                                                                                                                      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                      | 16. Kontrol ve Kabul Kriterleri                                                                                      |

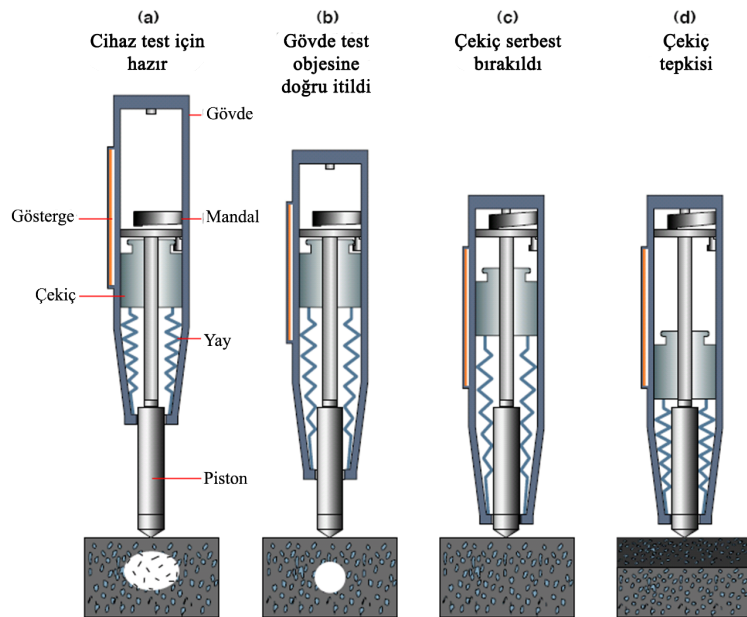
## 2.4. YERİNDE BETON DAYANIM TAHMİN YÖNTEMLERİ

Beton eğilme basınç gibi dayanım özelliklerinin geleneksel tahribatlı test yöntemleri ile yapılması yaygın uygulanan bir yöntem olsa da bazı sakıncalar içermektedir. Bunlardan biri test için numune hazırlanarak kırılması ve bu kırılan numune dayanımının diğer ürünleri temsil ettiğini varsaymaktır. Ayrıca beton için 1, 7, 28 gün sonra kırılan numunelerin özellikle erken yaşlarda anlık değerleri öngörmeye sıkıntılar içerdiği aşikardır. Yine yerinde beton dayanımı için karot ya da benzer yöntemlerle numune almak bütüne zarar vermektedir. Ayrıca tahribatlı yöntemler maliyetlidir.

Bu sıkıntıların ortadan kaldırılması amacı ile beton erken yaş ve sertleşmiş beton dayanımlarını tahmin için çok sayıda tahribatsız yöntem geliştirilmiştir. Aşağıda bu yöntemlerden en fazla uygulama alanı bulmuş olanlar kısaca anlatılacak ve devamında bu çalışmada yararlanılan olgunluk ve ağırlıklı olgunluk yöntemi ile beton erken yaş ve geriye dönük dayanım tahmini metodu detaylı olarak anlatılacaktır.

### 2.4.1. Yüzey Sertliği Yöntemi (ASTM C 805)

İsviçreli mühendis Ernst Schmidt, 1940'ların sonlarında uygulanabilir bir geri tepme testi çekici geliştirdi ve modern versiyonlar buna dayanıyordu. Şekil 2.43'de 2 kg'dan daha hafif olan ve yaklaşık 2.2 Nm'lik bir darbe enerjisine sahip olan tipik N tipi bir çekicin temel özelliklerini göstermektedir [70]. Schmidt çekicine ait görsel ise Şekil 2.44'da gösterilmiştir.



Şekil 2.43. Schmidt çekicine ait şematik görsel [71].



Şekil 2.44. Schmidt çekicine ait görsel [72].

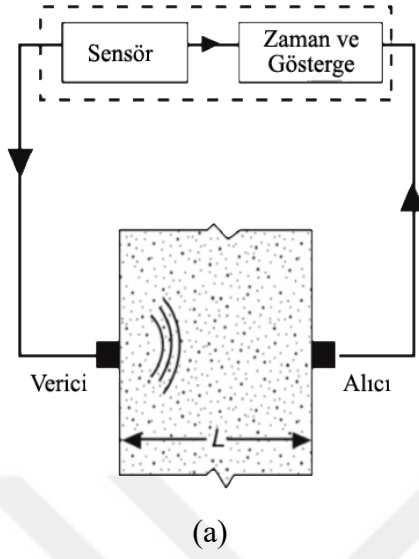
Yay kontrollü çekiç kütlesi, boru şeklindeki bir mahfazanın içindeki bir pistonun üzerinde kayar. Piston, beton yüzeye bastırıldığında bir yaya geri çekilir ve bu yay tamamen 10 katlandığında otomatik olarak serbest bırakılır, bu da çekiç kütlesinin pistondan betona çarpmasına neden olur. Yay kontrollü kütle geri döndüğünde, beraberinde ölçek boyunca kayan ve kasanın kenarındaki küçük bir pencereden görülebilen bir sürücü alır. Sürücü, kilitleme düğmesine basılarak tartıdaki pozisyonunda tutulabilir. Cihazın kullanımı oldukça basittir, yukarı veya aşağı doğru yatay ya da dikey olarak çalıştırılabilir [70].

#### 2.4.2. Ultrasonik Ses Hızı Yöntemi (ASTM C597)

Bu test şekli, modern ultrasonik yöntemle, 20-150 kHz frekans aralığında, elektronik devreler tarafından üretilen ve kaydedilen darbeler kullanılarak geliştirilmiştir. Metallerin ultrasonik testi genellikle çok daha yüksek frekanslarda yansıtıcı bir darbe tekniği kullanır, ancak bu matris/agrega ara yüzlerinde ve mikro çatlaklarda meydana gelen yüksek saçılma nedeniyle kolayca betona uygulanamaz. Dolayısıyla beton testi şu anda büyük ölçüde aktarım teknikleri kullanılarak atım hızı ölçümlerine dayanmaktadır. Metot dünya çapında yaygın bir şekilde kabul görmüştür ve sahaya uygun ve laboratuvar kullanımına uygun ticari olarak üretilmiş dayanıklı hafif ekipman hali hazırda mevcuttur [70].

Ultrasonik darbe hızı yöntemi, titreşimli enerji darbesinin beton içerisinden yayılma hızını belirler (Şekil 2.45). Darbe hızı, elastik modülle ve betonun yoğunluğu ile ilişkilendirilebilir. Elastik modül ve kuvvet doğrusal olarak ilişkili olmadığından, korelasyon doğrusal olarak bağımlı değildir. Bu teknik, donatı, agregası ve nem varlığından

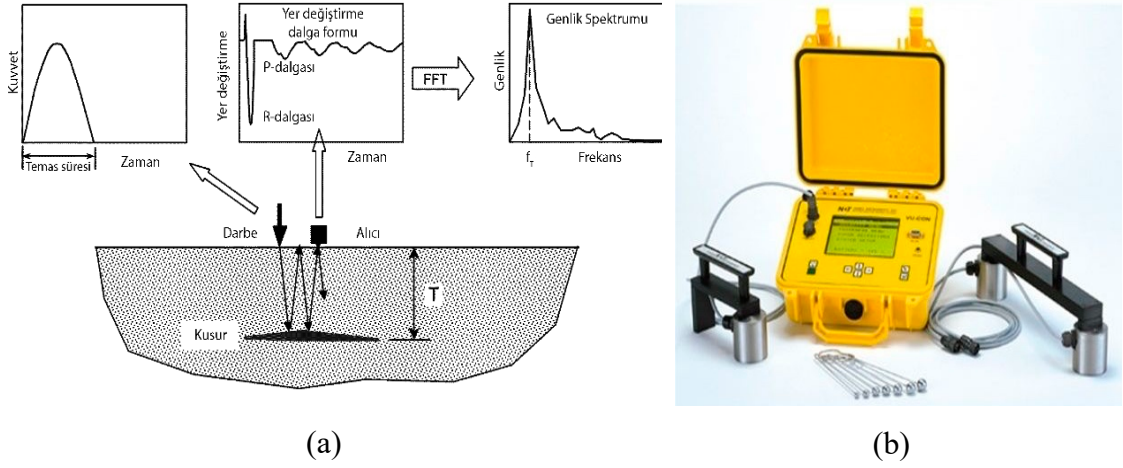
oldukça etkilenir. Bu yöntem aynı zamanda betonun kalitesini ve homojenliğini, ayrıca çatlak ve boşlukların mevcudiyetini değerlendirmek için de uygulanabilir [73].



Şekil 2.45. Ultrasonik ses hızı test yöntemi şematik gösterimi (a) ve test numunesi üzerinde uygulama örneği (b) [74], [75].

#### 2.4.3. Impact-Echo Test Yöntemi (ASTM 1383)

Şekil 2.46'de, stres dalgaları üretmek için kısa süreli mekanik bir etki ve doğrudan ve yansıyan stres dalgalarının varlığından dolayı yüzey yer değiştirmesini izlemek için bir dönüştürücü kullanan temel etki eko yönteminin şemasıdır. Mekanik darbenin kullanımı, bir elektrik dönüştürücüyle mümkün olandan çok daha yüksek miktarda enerji elde etmek için çok yönlü bir yöntem sağlar. Etki, yarım döngü sinüs eğrisi olarak tahmin edilebilecek bir güç-zaman geçmişi oluşturur. Etkinin süresi temas süresi olarak adlandırılır ve dikkatlice seçilmesi gerekir. Alıcı, yüzeye normal olarak yer değiştirmeyi ölçmekte ve yer değiştirme geçmişi, Şekil 2.46'in en üst merkezinde gösterildiği gibi, bir zaman bölgesi dalga formu olarak kaydedilmekte ve depolanmaktadır. Açıklanacağı gibi, darbeden gelen enerji, test elemanının titreşmesine neden olmaktadır. Karakteristik bir frekansta veya frekanslarda ve bu frekanslar elemanın bütünlüğü hakkında bilgi sağlar. Veri analizi yönteminin önemli bir özelliği, zaman alanı dalga biçiminin hızlı Fourier dönüşümü (FFT) kullanarak genlik spektrumuna dönüştürülmesidir. Şekil 2.46'ün sağ üst köşesinde gösterilen genlik spektrumu, dalga biçimine gömülmüş baskın frekansları belirtir. Kullanıcı bu frekansları nasıl yorumlayacağını anlamalıdır [76].



Şekil 2.46. Impact-echo metodu şematik gösterimi (a) ve test cihazı (b) [76], [77].

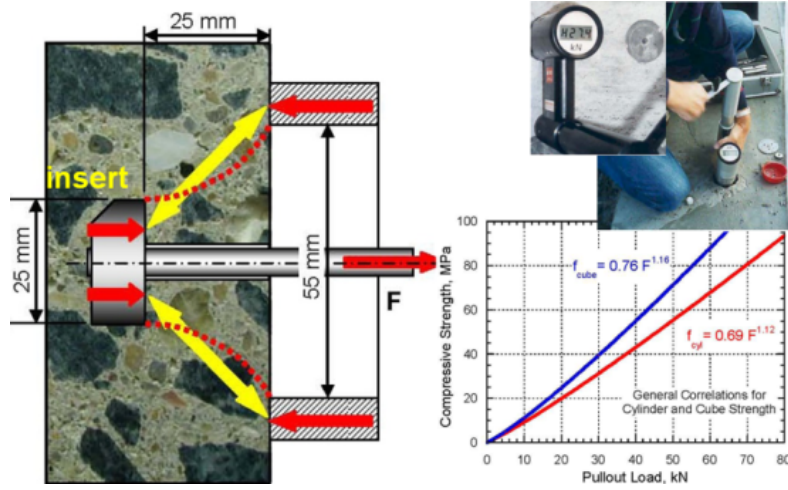
#### 2.4.4. Pull-Out Test Yöntemi (ASTM C900)

Beton dökülmeden önce kalıp yüzeylerine yerleştirilen disklerin beton sertleştikten sonra çekip-çıkarılarak beton basınç dayanımlarının belirlenmesine dayanan bir test yöntemidir. Deney standardı olarak ASTM C900-99 “Standart Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete” kullanılmaktadır [78]. Deneyde kullanılan ekipmanlar Şekil 2.47’de, cihazın kullanımına dair şematik görsel Şekil 2.48’de ve deneyin yapıışa dair görsel ise Şekil 2.49’da verilmiştir.



Şekil 2.47. Pull-out test yönteminde kullanılan ekipmanlar [79].





Şekil 2.48. Cihazın kullanımına dair şematik gösterim [79].



Şekil 2.49. Beton bloklar üzerinde, yüzeyde kopma dayanımı deneyinin yapılışı [80].

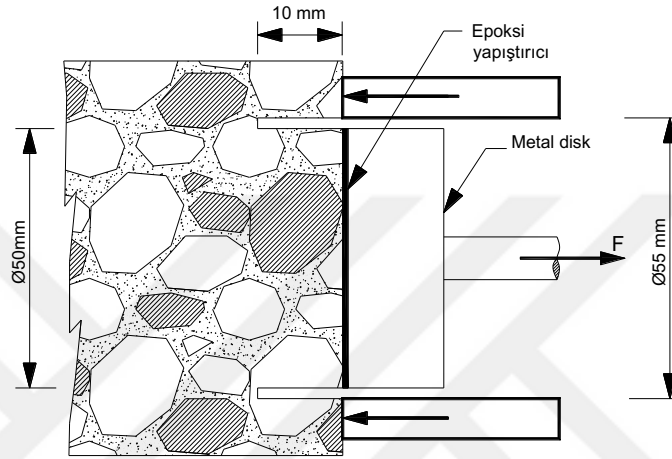
Beton basınç dayanımının belirlenmesinde kullanılan insertler döküm öncesinde kalıp yüzeylerine yerleştirilmediği durumda ise daha sonradan beton delinerekten pull-out deneyi gerçekleştirilebilir. Bu deney yöntemi sertleşmiş haledaki betondan kısmi tahribatlı bir şekilde basınç dayanımının belirlenmesi imkânı vermektedir [80]. Deneyde kullanılan malzemeler Şekil 2.50’de gösterilmiştir.



Şekil 2.50. Pull-out deney malzemeleri [81].

#### 2.4.5. Betonun Doğrudan Çekme Dayanımı Tayini (Pull-off)

Betonun doğrudan çekme dayanımı Şekil 2.51'deki gibi beton yüzeyine epoksi ile yapıştırılan metal diskin çekilmesi ile belirlenmektedir. Çekme dayanımı ASTM C1583-04 “Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method)” standardına göre belirlenmektedir [82]. Deneyin yapılışı, Şekil 2.52'de açıklanmıştır.



Şekil 2.51. Doğrudan çekme dayanımı deneyi şematik görüntüsü [80].



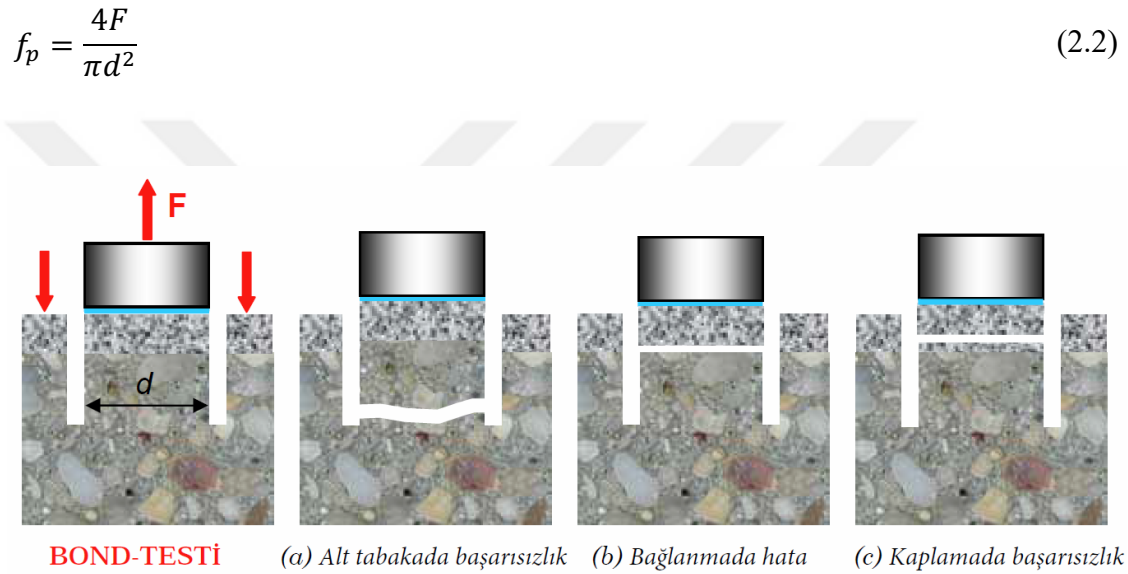
Şekil 2.52. Doğrudan çekme dayanımı deneyi yapılışı [80].

BOND-Testi, ASTM C1583, “Beton Yüzeylerin Çekme Dayanımı ve Direkt Gerginlik ile Beton Kaplamaların Dayanma Dayanımı veya Çekme Dayanımı (Çekme Yöntemi) ile Yapışma Dayanımı veya Çekme Dayanımı Testi Yöntemi” ne göre bir çekme testi yapmak için kullanılır. Elde edilen çekme kuvveti aşağıdaki amaçlar için kullanılabilir [83]:

- Onarım yerleşimi ve alt tabaka arasındaki yerinde yapışma kuvvetini değerlendirmek,
- Beton veya diğer malzemelerin yerinde çekme dayanımını değerlendirmek,

- Bir tamir malzemesi veya kaplaması uygulamadan önce yüzey hazırlama prosedürlerinin alt tabakanın gerilme dayanımı üzerindeki etkisini değerlendirmek.

BOND-TEST'te, hazırlanan bir test yüzeyine bir disk yapıştırılır ve disk etrafındaki kısmi bir çekirdek kesildikten sonra disk çekilir (aşağıdaki şekilde soldaki görsel). Çekme kuvveti  $F$ ,  $d$ 'nin kısmi çekirdeğin çapı olduğu çekme kuvvetini elde etmek için kısmi çekirdeğin kesit alanı ile bölünür [83]. Test yapımı sırasında karşılaşılabilecek sorunlar Şekil 2.53'de gösterilmiştir.



Şekil 2.53. Test aşamasında karşılaşılan hatalar [83].

#### 2.4.6. Break-Off Test Yöntemi

Break-off yöntemi, yerinde bir betonun silindirik bir örneğinin kırılmasına dayanır. Test örneği 55 mm çapa ve 70 mm yüksekliğe sahiptir. Test örneği, betonda, taze betona dökülmüş ve daha sonra planlanan test sırasında çıkarılmış tek kullanımlık boru şeklindeki plastik bir manşon vasıtasıyla oluşturulur veya sertleştirilmiş betonun Break-off zamanında delinmesiyle. Yöntemde boru biçimli plastik manşonlar ve bir matkap ucu kullanılmaktadır. Hem manşon hem de matkap ucu, yük hücresinin oturtulması için test numunesinin üstünde, 9.5 mm genişliğinde bir oluk oluşturur. Manuel bir hidrolik pompa vasıtasıyla yük hücresine bir kuvvet uygulanır. Bir manşon yerleştirerek veya bir göbeği delerek elde edilen beton silindirik numune, ayrıca uygulanan yükün Break-off test numunesidir. Temel olarak, yük konfigürasyonu, serbest ucunda konsantre bir yüke maruz kalan, dairesel kesitli bir konsol kirişi ile aynıdır. Bir test numunesini parçalamak

için gereken kuvvet mekanik bir manometre ile ölçülür [84]. Deneyde kullanılan ekipman Şekil 2.54’da gösterilmiştir. Break-Off stresi şöyle hesaplanabilir:

$$\begin{aligned} Break\ Off &= \frac{M}{S} \\ M &= PB.O.* h \\ h &= 65,3\ mm \\ PB.O. &= Break - Off\ force\ at\ the\ top \\ S &= \frac{d^3}{32} \\ d &= 55\ mm \end{aligned} \tag{2.3}$$



Şekil 2.54. Break-off test cihazı [85].

#### 2.4.7. Drilled Core Yöntemi (ASTM C42)

Delme göbekleri, mevcut inşaat veya tarla kürlenmiş numunelerden elde edilen sonuçlarla ilgili şüpheler olduğunda betonun yerinde kuvvetini ölçmek için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Sahada işlem görmüş numunelere göre daha doğru sonuç verebilir çünkü yerinde betonun gerçek termal geçmişine tabidir. Bununla birlikte, çalışma (Şekil 2.55), zaman ve basınç dayanımı testi için laboratuvarların kullanılmasını gerektiren yıkıcı bir tekniktir [86].



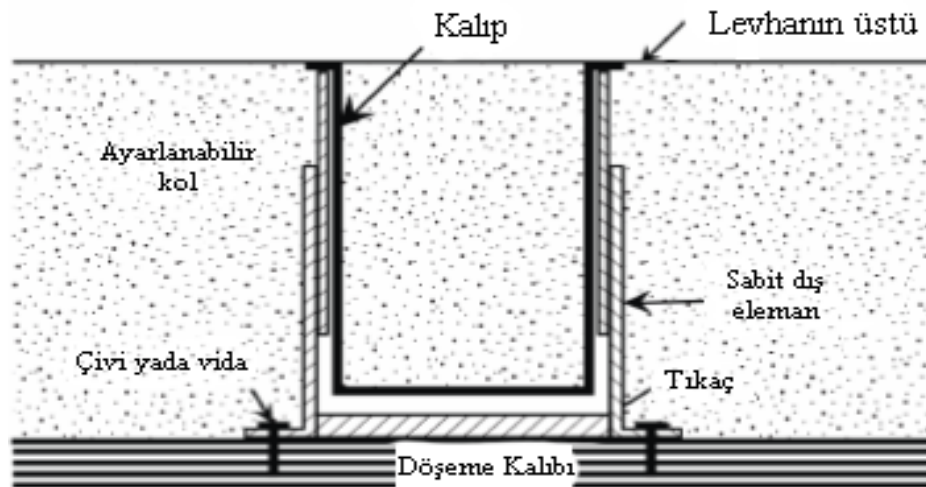


Şekil 2.55. Drilled core testi [87].

#### 2.4.8. Yerinde Döküm Silindir Beton Yöntemi (ASTM C873)

Yerinde silindir dökümü, manşonun kalıba sabitlendiği bir kalıp gerektiren, kullanımı kolay bir yöntemdir (

Şekil 2.56). Yerleştirme sırasında taze beton her zamanki gibi dökülür ve silindir kalıbı doldurulur ve sıkıştırılır. Bu teknik, beton uygulanmış numunelere kıyasla betonun gerçek yerinde kuvvetini daha fazla temsil eder, çünkü yapısal eleman ile aynı sıcaklık ve sertleştirme koşullarına maruz kalır. Ancak yine de aynı sınırlamalar ortaya çıkmaktadır.

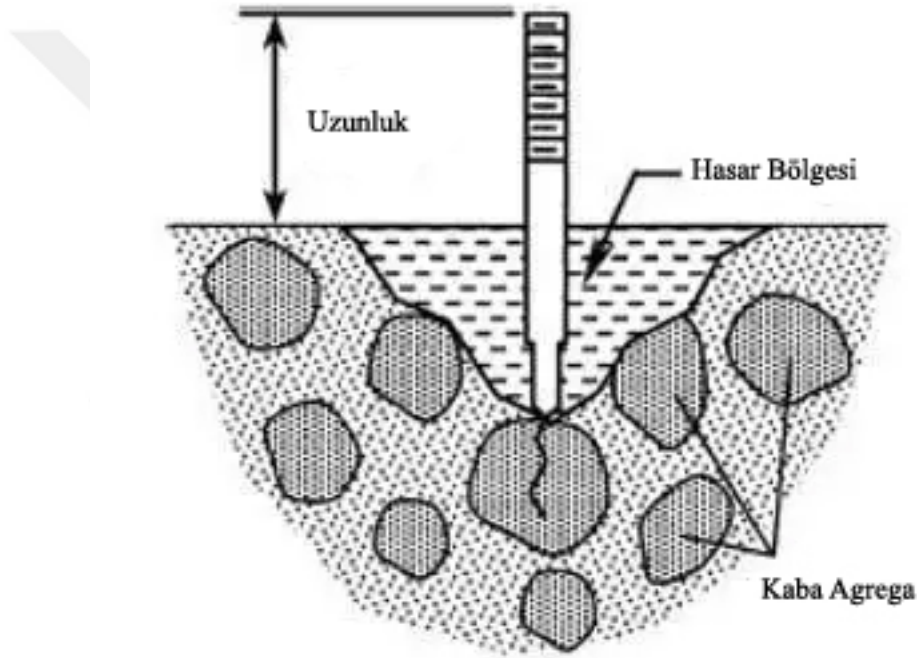


Şekil 2.56. Yerinde döküm silindir beton yöntemi şematik gösterimi [74].

Özellikle, silindirlerin beton tarafından hedef kuvvetine ulaşana kadar laboratuvar tarafından farklı zamanlarda test edilmesi gerekir. Ayrıca, bu yöntem yalnızca 125 mm ila 300 mm kalınlığındaki plakalara uygulanabilir. Silindir çıkarıldıktan sonra, zaman zaman zor olabilen, levhadaki kalan delik yamalı olmalıdır [88].

#### 2.4.9. Penetrasyon Direnci Test Yöntemi (ASTM C803)

Bir penetrasyon direnci testini tamamlamak için beton yüzeyi betonda sürülen küçük bir atıcıya maruz bırakılır (Şekil 2.57). Atıcının nüfuzu veya deliğin derinliği önceden belirlenmiş bir ilişki kullanarak yerinde beton dayanımı ile ilişkilendirilebilir. Bu yöntem, yüzey koşullarından, kullanılan formun türünden, agrega türünden etkilenir [89].



Şekil 2.57. Penetrasyon direnci test yöntemi [74].

#### 2.4.10. Windsor Probe Test Yöntemi

Windsor probe penetrasyon test metodu ile beton basınç dayanımı, özenle idare edilen patlayıcı yükle çelik bir sondanın, betonun yüzeyinden içeri girmesi ve girme miktarının ölçülmesi ile belirlenir. Sonda, yüzeyden ne kadar az içeri girerse, beton o kadar iyi demektir [90], [91].

Windsor probe uygulanacak yer, bazı temel hatlarla belirlenebilir. Örneğin; En az beton dayanımı, bir kolonun üst üçte birlik kısmından, düz veya asma döşemeden ya da beton test silindir kalıbından çıkarılan numuneden elde edilebilir. Asma tavanlar test edilecekse,



asma tavanın üst yüzeyi test edilmelidir. Çünkü üst yüzey, yapı elemanının sıkışma tarafıdır. Öngerme halatlarını germek ve yeterli dayanımı belirlemek için başlık kenarlarının ve elemanın yaklaşık merkezinin test edilmesi gerekir. Kolon ve duvarlar en üstten, ortadan ve en alttan test edilmelidir. Sonuç genellikle ortalama ile belirlenir. Test edilecek alandan, hassas sonuçlar alabilmek için yüzeyin düzgün olmasına dikkat edilmelidir. Kaba yüzeyli yapıları test etmek için, öncelikle test alanının yüzeyi düzgün hale getirilmelidir [90]. Deneyde kullanılan ekipmanlar Şekil 2.58’de gösterilmiştir.



Şekil 2.58. Test ekipmanları [92].

## 2.5. BETONDA OLGUNLUK KAVRAMI

Olgunluk kavramı betonun dayanım kazanmasında rol oynayan faktörlerden ısı zaman ilişkisinin tanımlanmasına yönelik bir yöntemdir. Olgunluk yöntemi; yerine yerleştirilmiş betonun erken yaş dayanım gelişimi takip edilerek gelecekteki dayanımı hakkında güvenilir bir tahmin yapabilmemizi sağlamaktadır. Bu yöntemin temeli 1940'lı yılların sonunda ve 1950'li yılların başında İngiltere’de uygulanan buhar kürü uygulamasına dayanmaktadır [93].

Betonun dayanım kazanmasını etkileyen faktörler arasında zaman ve sıcaklık önemli bir yer tutmaktadır. Bu faktörlerin yanında su-çimento oranı, çimento türü, miktarı, kalıp türü ve özellikleri, ortam nemi ve sıcaklığı gibi faktörler de dikkate alınmalıdır. İkincil faktörlerin sabit tutulduğu veya ihmal edildiği bir durumda dayanım gelişimine ölçüt olarak zaman ve sıcaklığı değişken kabul eden büyüklük “Olgunluk Derecesi” olarak tanımlanmaktadır [94], [95].

Betonun dayanım gelişimini, sıcaklık ve zamana bağlı matematiksel fonksiyonlarla, mekanik ve kalorimetrik deneyler vasıtasıyla doğru bir biçimde tahmin etmek mümkündür [96].

Olgunluk derecesi, dayanım tahmininde kullanılan tahribatsız bir kontrol yöntemidir. Betonun dayanım kazanması zaman ve sıcaklığın bir fonksiyonu olduğu göz önünde tutularak (diğer değişkenlerin belirli aralıklarında veya belirli sabitler olarak kullanılmasıyla) dayanım tahmini için bu iki parametreyi içeren çok sayıda “Olgunluk Fonksiyonu” önerilmiştir [97], [98].

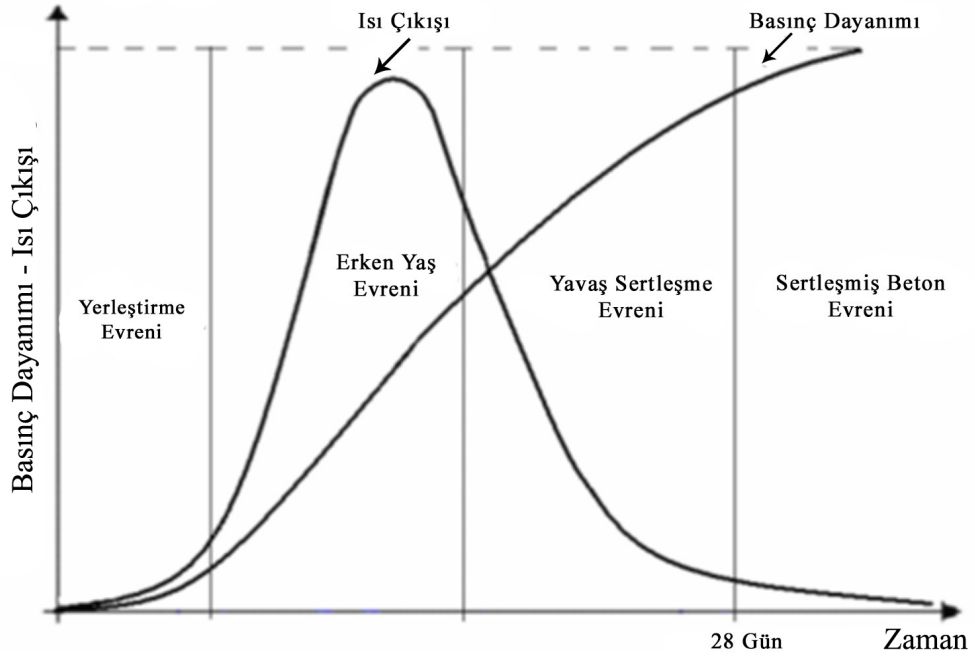
### 2.5.1. Sıcaklığın Dayanım Gelişimi Üzerine Etkisi

Çimentoyu meydana getiren klinker bileşikler kimyasal olarak aktif durumdadır. Bunlar, su ile reaksiyona girerek çözünür ve hidroliz reaksiyonları meydana gelir. Çimentonun su ile oluşturduğu reaksiyonlara “hidratasyon reaksiyonları” denir [99].

Betonun heterojen bir yapıya sahip oluşu nedeniyle ısı iletim katsayısı da düşük olmaktadır. Bu sebeple hidratasyon reaksiyonu boyunca açığa çıkan ısı, kısa süre içerisinde dışarı atılamaz ve beton içerisinde sıcaklık artışı meydana getirir. Bunun doğal bir sonucu olarak beton yapısında termal genleşmeler hatta çatlamalar oluşabilir [99].

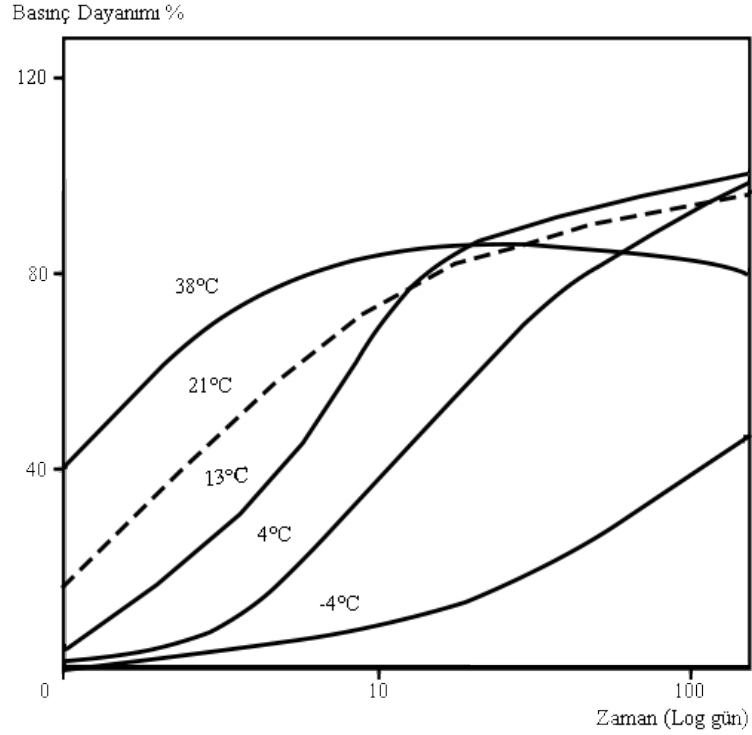
Şekil 2.59’de görüldüğü gibi hidratasyon aşamasında betonda ısı çıkışı erken yaş evresinde en üst seviyeye ulaştığından dolayı, çimentonun (hidrolik bağlayıcıların) ısı

duyarlılığı ile ilgili özelliklerinin belirlenmesinde bu evre temel alınmaktadır [100].



Şekil 2.59. Erken yaşlardaki beton dayanımı ve ısı çıkışı ilişkisi [41].

Kür sıcaklığı betonun erken yaş dayanımının gelişimi üzerinde etkili faktörlerden biridir. Farklı kür sıcaklıklarına bağlı olarak hidrasyon reaksiyonunun gelişimini gösteren Şekil 2.60'dan da görüleceği üzere farklı ortam sıcaklıkları dayanım gelişimini etkilemektedir.



Şekil 2.60. Kür sıcaklığının beton basınç dayanımı üzerine etkisi [41].

### 2.5.2. Olgunluk Kavramının Tarihsel Gelişimi

Mc Daniel 1915 yılında yaptığı bir çalışmada -3, 1,5, 22 ve 33 °C'de 2 gün sakladığı numuneleri dondurmuş daha sonra 3, 7, 10, 14 ve 28. günlerde dondan çözölmüş olarak deneye tabi tutmuştur. Wiley, Timms ve Whitey yaptığı çalışmaları zaman ve sıcaklık faktörlerini dikkate almışlardır. Mc Intosh elektrik akımı ile betonu ısıtmak problemini ele aldığında ilk defa "Basic Age" sözcüğü kullanılmıştır. Bu temel yaş kavramında başlangıç sıcaklığı yaklaşık olarak 0 °C (30 °F) olarak gösterilmekte ve esas yaş (°FxSaat) olarak ifade edilmektedir. Tüm bu fikirler en çok kullanılan olgunluk fonksiyonu olan Nurse-Saul olgunluk fonksiyonuna ışık tuttu [101].

$$M = \sum_{i=0}^t (T - T_0) \Delta t \quad (2.4)$$

Bu denklemde;

M = olgunluk derecesi, °C-saat ya da °C-gün,

T =  $\Delta t$  zaman aralığında ortalama beton sıcaklığı (°C),

T<sub>0</sub> = başlangıç sıcaklığı (genellikle -10 °C olarak alınır),

t = geçen zaman (gün yada saat) ve

$\Delta t$  = zaman aralığı (gün ya da saat) olarak tanımlanmıştır [102].

Burada (2.4) numaralı denklem ile hesaplanan değer olgunluk olarak adlandırılmış, bununla beraber günümüzde terminolojik olarak sıcaklık-zaman faktörü olarak da anılmaktadır [103]. Şekil 2.61'de sıcaklık geçmişi ile (2.4) numaralı denklemden elde edilen sıcaklık-zaman faktörü arasındaki ilişki görölmektedir. Sıcaklık-zaman faktörü çeşitli t\* yaşında başlangıç sıcaklığı ve sıcaklık eğrisinin altındaki alana eşittir. Başlangıç sıcaklığı betonun dayanım kazanmasının bittiği sıcaklık olarak önerilmiştir. Kabul edilen bu sıcaklık -10 °C'dir [104].

Olgunluk değerinin kullanılarak dayanım değerinin hesaplandığı en çok kullanılan bağıntı 1950'lerde Plowman tarafından önerilen aşağıdaki bağıntıdır.

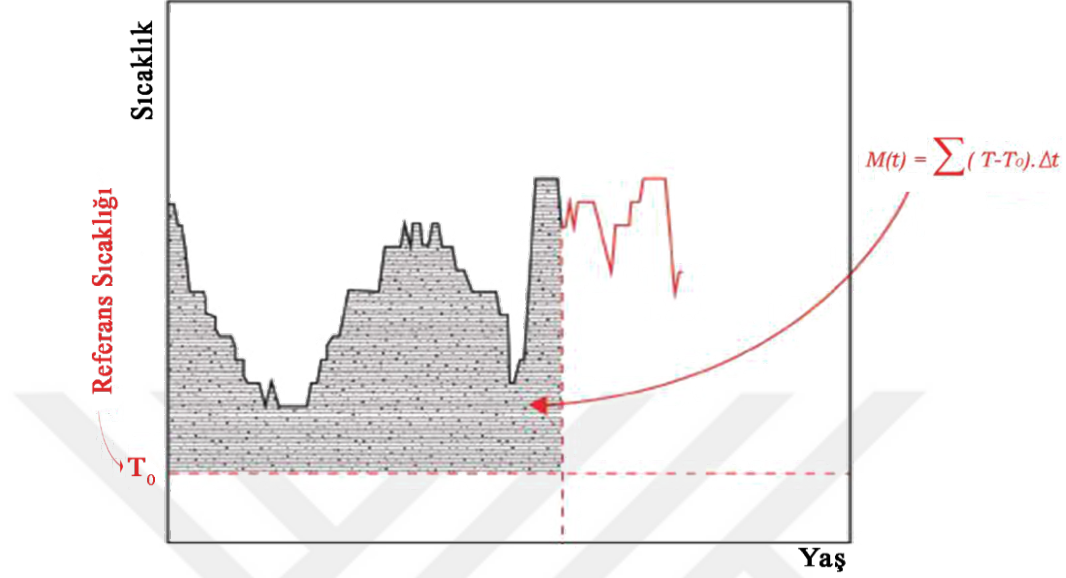
$$S = a + b \log(M) \quad (2.5)$$

Bu denklemde;

S = Basınç dayanımı (MPa)

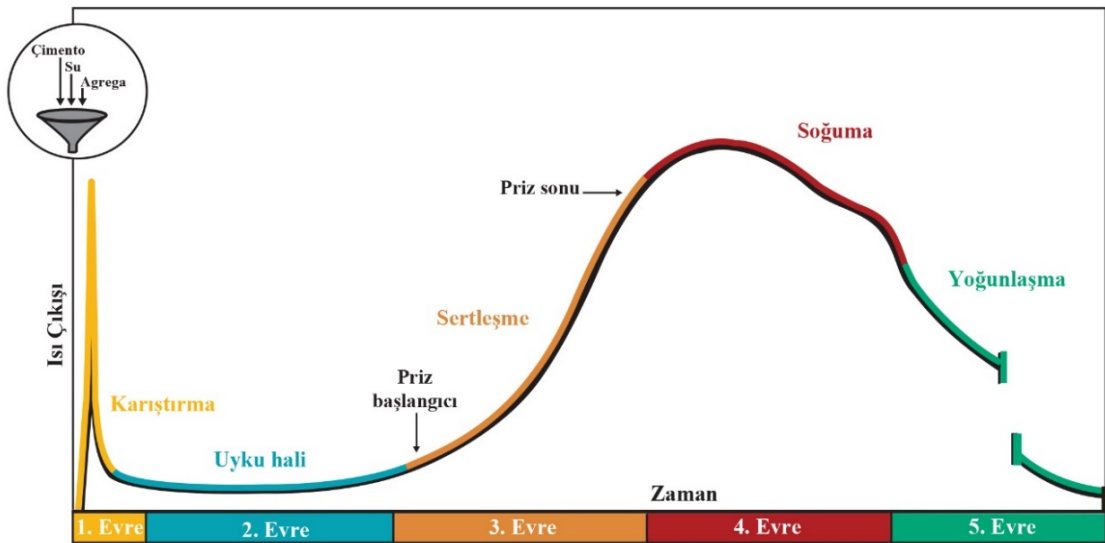
M = Olgunluk indeksi (°C saat ya da °C gün olarak)

a, b = Parametrelerdir.



Şekil 2.61. Sıcaklık-zaman faktörü ile sıcaklık geçmişi arasındaki ilişki [105].

Aşağıda Şekil 2.62’de ise hidratasyon süreçlerinde betondan ısı çıkışı gösterilmektedir. Çimentonun hidratasyonu boyunca ortaya çıkan ısı; kür şartları, ortam ve kalıpla ilgili özellikler ve karışımdaki bağlayıcının hidratasyon reaksiyonu sırasındaki davranışları gibi faktörlerden etkilenecek farklı olgunluk seviyeleri göstermektedir. İnşaat aşamasında bu farklı olgunluk seviyelerinin takibi ve buna uygun önlem alınması çok önemlidir.



Şekil 2.62. Beton için 5 evrede tanımlayan genel hidratasyon eğrisi [106].

Amerika Birleşik Devletlerinde 2 Mart 1973 tarihinde Fairfax'da inşa edilen çok katlı yapının bir bölümü inşaat sırasında yıkılmış, bu elim kaza sonucunda 34 inşaat işçisi yaralanmış, 14 inşaat işçisi ise hayatını kaybetmiştir. Aynı şekilde Willow Island, WV' de inşa edilen bir havalandırma kulesinde önemli bir inşaat kazası meydana gelmiş, bu olay sonucunda yapının iskelet sistemine bağlanmış olan iskelede çalışan 51 işçi hayatını kaybetmiştir. Bu kazalar üzerine Ulusal Standartlar Bürosu (NBS), İş Güvenliği ve Sağlığı Kurumu'ndan (OSHA) binada oluşan yıkımın teknik nedeninin bulunması için yardım istemiş, yapılan incelemeler sonucunda NBS raporunda binanın olası çökme nedeni olarak zamanından önce betona taşıtılan dış yükler olduğu belirlenmiştir. Yıkım olayının gerçekleştiği anda döşeme plağındaki betonun yaşının sadece 4 gün olduğu saptanmıştır. Ayrıca bu süreç içerisinde betonun döküldüğü inşaatın yakınında bulunan bir havaalanında ölçülen ortam sıcaklığı ise ortalama olarak 7 °C olarak araştırmalardan bulunmuştur. NBS müfettişleri araştırma sırasında inşaatte kullanılan betonun yıkılması sırasındaki yaşında dayanımının belirlenmesi konusunda yeterli veri bulamama sıkıntısı çekmişlerdir. Kaza sonrasındaki bu sıkıntı, yerine yerleştirilmiş betonun değişken sıcaklıklar altında dayanım kazanmasının incelenmesi üzerine yapılacak çalışmalar için başlangıç olmuştur [107].

Amerika Birleşik Devletlerinde NBS tarafından yapılan ilk araştırmalar sonucunda, olgunluk yönteminin farklı ortam sıcaklıkları altındaki betonun basınç dayanımının gelişim süreci ve diğer mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla uygulanabileceğini belirtilmiştir [108]. Yoğun bir çalışma içerisine giren araştırmacılar böylece olgunluk yönteminin standardı olan ASTM C 1074'e temel olacak çalışmalar yapmışlardır.

Volz'ın çalışmalarında olgunluk derecesi-dayanım bağıntısında ilk 7 saatlik saklamanın önemini ele almaktadır. Araştırmacılar esas olarak (2.4) numaralı denklemi kullanmaktadırlar. Ancak bu denklemin ilk saatleri dikkate almaması nedeniyle yetersiz kaldığı sonucuna varılmıştır. Yapılan bu çalışmanın ilk bölümünde Erken Yaş kavramının ne olduğu araştırılmıştır. Bunun için aynı karışımdan üretilen betonlar -1 °C (30 °F), 21 °C (70 °F) ve 43 °C (100 °F) sıcaklıklarda saklanmıştır. Bir bölümü sürekli bu sıcaklıklarda tutulmakla beraber, bir bölümü de 6, 18, 30 ve 48 saat sonra 21 °C (70 °F) sıcaklığa alınmış ve 1, 3, 5, 7 ve 28. günlerde basınç deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlardan numunelerin 6, 18, 30 ve 48 saat sonra normal sıcaklıkta tutulmaları veya sürekli ilk sıcaklıkta tutulmaları sonunda elde edilen olgunluk-dayanım bağıntısının değişmediği gözlenmiştir. Başlangıç kür sıcaklığına bağlı olarak eğriler kendi içlerinde



bir bütün oluşturmuştur. Buna göre başlangıç kür sıcaklığının 6 saat sürmesi olgunluk-dayanım eğrisinin gidişini etkilemeye yetmektedir. Numunelerin iç sıcaklıkları 21 °C'lik ortalama alınmalarına rağmen ancak 16 saat sonunda dengelenmekte ve çevre sıcaklığı 21 °C' den yukarıda 31 °C'de birleşmektedir. Yani 0 °C'lik numunelerde 31 °C'ye varmaktadır. Bu durum çimentonun hidratasyon ısısı sonucu oluşmaktadır [109].

Çizelge 2.11. Başlangıç sıcaklığına bağlı dayanım-yaş değerleri [110].

| Yaş<br>(Gün) | Küp Basınç Dayanımı, MPa |     |                |     |                |     |                |     |
|--------------|--------------------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|
|              | 4 °C                     |     | 18 °C          |     | 31 °C          |     | 55 °C          |     |
|              | f <sub>c</sub>           | %   | f <sub>c</sub> | %   | f <sub>c</sub> | %   | f <sub>c</sub> | %   |
| 1            | -                        | 0   | 7.1            | 100 | 10.2           | 144 | 15.5           | 218 |
| 2            | 9.1                      | 70  | 13.0           | 100 | 14.7           | 113 | 15.5           | 119 |
| 7            | 26.9                     | 103 | 26.1           | 100 | 26.0           | 100 | 18.3           | 70  |
| 28           | 36.2                     | 105 | 34.4           | 100 | 32.6           | 95  | 23.1           | 67  |
| 90           | 45.0                     | 103 | 43.9           | 100 | 41.7           | 95  | 32.2           | 73  |
| 232          | 50.3                     | 101 | 49.8           | 100 | 46.2           | 95  | 40.3           | 82  |

Volz ve arkadaşları yaptıkları çalışmada erken sıcaklıkların hesaba katılmasının gerekli olduğunu, bu etkinin ilk 24 saat olarak dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu süredeki sıcaklık kalıp alma süresinin güvenliği yönünden önemlidir. 29 °C sıcaklıkta üretilen ve 0 °C çevre sıcaklığında bekletilen bir beton için erken sıcaklık evresi 7 saatten öncesi olarak ortaya çıkmaktadır. Plowman'ın olgunluk-basınç dayanımı ifadesi erken sıcaklık etkisini dikkate almadığından bu konunun dışında tutulmalıdır.

Olgunluk kavramı üzerine 1954 yılında Rastup (R) tarafından eşdeğer yaş kavramı alternatif bir yaklaşım olarak ortaya atılmış ve aşağıdaki denklem önerilmiştir [111]:

$$t_R = \sum 2^{\frac{T-T_r}{10}} \Delta t \quad (2.6)$$

Yukarıdaki denklemde;

t<sub>R</sub> = Referans sıcaklıktaki (saat olarak) eşdeğer yaştır.

T<sub>r</sub> = Referans sıcaklığıdır (°C), Referans sıcaklık T<sub>r</sub> 20 °C olarak kabul edilmiştir.

Δt = Zaman (saat olarak) aralığıdır.

Nurs-Saul (NS) olgunluk fonksiyonu denklem (2.4) de eşdeğer bir yaş faktörü geliştirmek için kullanılabilir. Nurs-Saul tarafından önerilen referans sıcaklıktaki eşdeğer yaş,  $t_{NS}$  olarak türetilir.

$$t_{NS} = \sum \left[ \frac{T - T_0}{T_r - T_0} \right] \Delta t \quad (2.7)$$

1971'de Weaver ve Sadgrove (WS) 20 °C referans sıcaklığında eşdeğer yaş ( $t_{WS}$ ) için aşağıdaki formülü önermiştir [111]:

$$t_{WS} = \sum \frac{(T + 16)^2}{1296} \Delta t \quad (2.8)$$

Betonun kaydedilen sıcaklık geçmişinden olgunluk derecesini hesaplamak amacıyla 1977 yılında Freiesleben Hansen ve Pedersen (FHP) yeni bir fonksiyon önermişlerdir. Bu fonksiyon, sıcaklığın kimyasal reaksiyona olan etkisinin açıklanması amacıyla kullanılan Arrhenius denklemi temel alınarak önerilmiştir [112]. İlk olarak 1888'de Svante Arrhenius tarafından önerilen aktivasyon enerjisi, bir reaksiyonun gerçekleşmesi için gereken minimum enerji olarak tanımlanır [111].

$$t_{FHP} = \sum_0^t e^{\frac{-E}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)} \Delta t \quad (2.9)$$

Bu denklemde;

$t_{FHP}$  = ilgili sıcaklıktaki eşdeğer yaş,

E = belirli aktivasyon enerjisi, J/mol,

R = genel gaz sabiti, 8. 314 J/mol-K,

T =  $\Delta t$  zaman aralığındaki Kelvin cinsinden ortalama kesin beton sıcaklığı ve

$T_r$  = Kelvin cinsinden mutlak sıcaklık olarak tanımlanmıştır.

Carino ve Tank(CT) ise eşdeğer yaş için aşağıdaki formülü önermiştir;

$$t_{CT} = \sum e^{\frac{B}{T - T_r}} \Delta t \quad (2.10)$$

Burada B sıcaklık duyarlılığı faktörü olan 1/°C'dir. Bu çalışmalarda sıcaklık duyarlılığı faktörünün (B)'nin görünür aktivasyon enerjisinden daha fazla fiziksel öneme sahip

olduğu öne sürülmektedir. Sıcaklık duyarlılığı faktörü görünür aktivasyon enerjisine benzer ve daha basittir.

Bu denklemlerin kullanılması ile betonun dayanım kazanma sürecinde ve ilgili sıcaklıkta betonun gerçek yaşı onun eşdeğer yaşı haline dönüştürülmektedir. Avrupa'da yapılan çalışmalarda referans sıcaklık genellikle 20 °C olarak alınmış olup, Kuzey Amerika'da yapılan çalışmalarda ise bu sıcaklık 23 °C olarak alınmıştır. Bu fonksiyonların geliştirilmesi ile Nurse-Saul fonksiyonunun başlıca sınırlaması ortadan kalkmıştır, çünkü bu fonksiyonlar birincil dayanım gelişimi ile kür sıcaklığı arasında doğrusal olmayan bir ilişkinin kurulabilmesine olanak vermektedir.

FHP denklemi özelinde ise sıcaklığın olgunluk ile bağılılığı belirli aktivasyon enerjisi değeri E ile ifade edilmiştir. Karşılaştırmalı çalışmalar sonucunda bu yeni olgunluk fonksiyonunun Nurse-Saul fonksiyonundan daha üstün olduğunu gösterilmiştir. FHP tarafından önerilen (2.9) numaralı denklem ile farklı başlangıç sıcaklıklarında dayanım-olgunluk ilişkisiyle ilgili çelişkiler büyük ölçüde ortadan kalkmıştır. Ancak bu yeni fonksiyonun erken yaştaki beton sıcaklığının ileri yaşlardaki beton dayanımına olan etkilerinin hesabında kullanımı mümkün olamamıştır [113].

Olgunluk ve eşdeğer yaş kavramlarının dayanım ile ilişkilendirilmesi burada yapılan tüm çalışmaların temel amaçlarından birisidir. Betonun dayanımının önceden belirlenmesi amacıyla yapılmış olan çeşitli çalışmalar içinde en tanınmış olanı Plowman'ın betonun basınç dayanımının gelişimi ile betonun olgunluğu arasında kurduğu ilişkidir. Plowman, bu çalışmasında tip 1 cinsi normal çimentolarla üretilmiş olan betonların bilinen olgunluğu ile 28 günlük basınç dayanımı arasında aşağıdaki ilişkinin var olduğunu açıklamıştır [114].

$$\frac{f_e}{f_{28}} = A + B \cdot \log \frac{M}{1000} \quad (2.11)$$

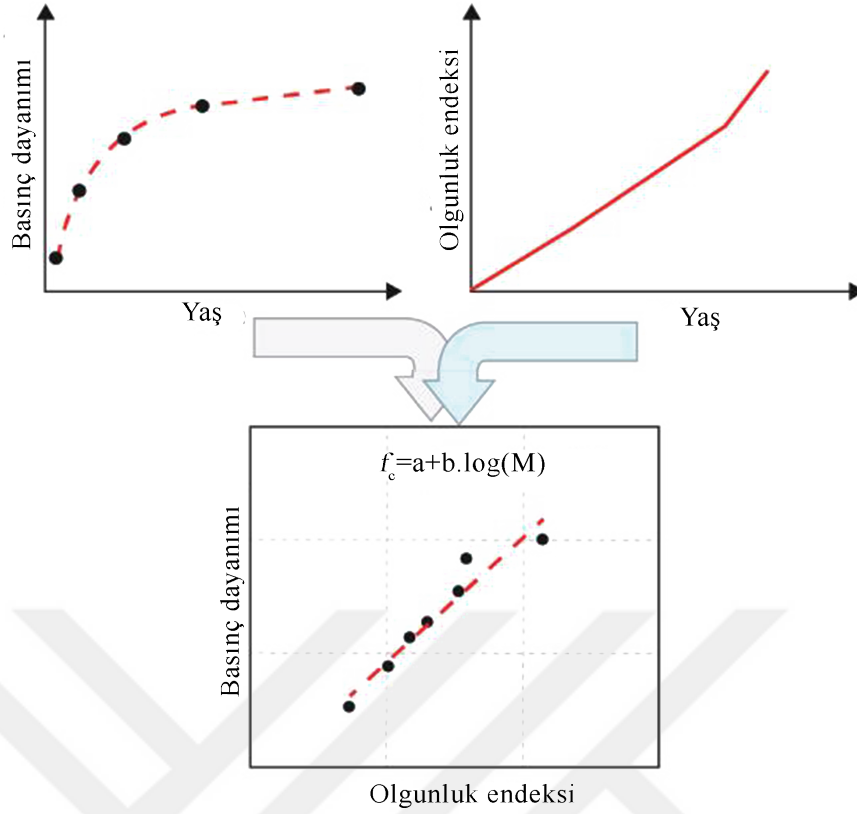
Bu denklemde;

A ve B = sabit değerler,

M =betonun °F-saat cinsinden olgunluğu,

$f_e$  = betonun M olgunluk değerindeki basınç dayanımı ve

$f_{28}$  =ise betonun 28 günlük basınç dayanımını ifade etmektedir.



Şekil 2.63. Basmaç dayanımı – olgunluk ilişkisi [105].

Plowman'ın (2.11) numaralı denklemi olgunluk kavramı temeli üzerine oluşturulmuştur. Bu denklem sürekli olarak 38 °C sıcaklık altında kür uygulanmış betonlarda uygulanabilir. Marshall ve Klieger ise betonun dayanımını önceden tahmin etmek için kullanılan olgunluk kavramının 38 °C'den daha fazla sıcaklıklar için uygulanabilir olmayacağını belirtmişlerdir. Bu denklemde A ve B sabitleri Plowman tarafından  $f_c/f_{28}$ 'e karşılık gelen olgunluğun logaritmasının regresyonu ile belirlenmiş ve bu değerler ile sınırladığı bölgeler Çizelge 2.12'de verilmiştir.

Çizelge 2.12. Plowman'ın denkleminde bölgeleştirilmiş sabitler [115].

| Olgunluk<br>°C-saat     | Basmaç Dayanımı, MPa |           |           |           |           | Sabitler |    | Bölge |
|-------------------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----|-------|
|                         | 245.5                | 184       | 123       | 61.5      | 26        | A        | B  |       |
| 18 °C<br>yaş,<br>günler | 28                   | 21        | 14        | 7         | 3         |          |    |       |
|                         | 0-2500               | 0-230     | 0-2000    | 0-1600    | 0-1000    | -7       | 68 | I     |
|                         | 2500-5000            | 2300-4800 | 2000-4000 | 1600-3200 | 1000-2200 | 6        | 61 | II    |
|                         | 5000-7500            | 4800-7100 | 4000-6300 | 3200-5200 | 2200-3800 | 18       | 54 | III   |
|                         | 7500-10000           | 7100-9300 | 6300-8500 | 5200-7000 | 3800-6000 | 30       | 47 | IV    |

Özellikle erken yaşlarda Plowman'ın denkleminde gözlenen eksiklikler betonun önceden dayanımının belirlenebilmesi için bu denklemde bazı düzenlemelerin yapılması gerektiğini gündeme getirdi. Bu amaçla bazı araştırmacılar Plowman'ın denklemine benzeyen bazı denklemler türettiriler. Ancak yine özellikle iki günün altındaki yaşlar için tam sonuçlar elde edilemedi [115].

S. Akman yaptığı çalışmada erken sıcaklık kavramı ile olgunluk derecesinin hesap yönteminde bir değişiklik yapmaya gerek olmadığını belirtmiştir. Ancak erken dayanım tahminlerine olanak sağlayan veya hasarsız yolla yapıdaki dayanımı tahmin etmeye olanak veren olgunluk-dayanım formüllerinde erken sıcaklığı da göz önüne alan bir çarpanın denkleme eklenmesinin yararlı olacağını düşünerek Plowman'ın denklemine benzer bir denklem olan (2.12) numaralı ifadeyi önermiştir [114].

$$f_e = A + B \cdot \log M^n \quad (2.12)$$

Bu denklemde; ilk 24 saat normal sıcaklıkta kalan betonlar için  $n=1$ , ilk 24 saat yüksek sıcaklıkta kalan ve  $(t > 7)$  günlük betonlar için  $(n < 1)$  ve ilk 24 saat  $5^\circ\text{C}$  altında kalan ve  $(t > 7)$  günlük betonlar için  $(n > 1)$  alınması önerilmiştir [109].

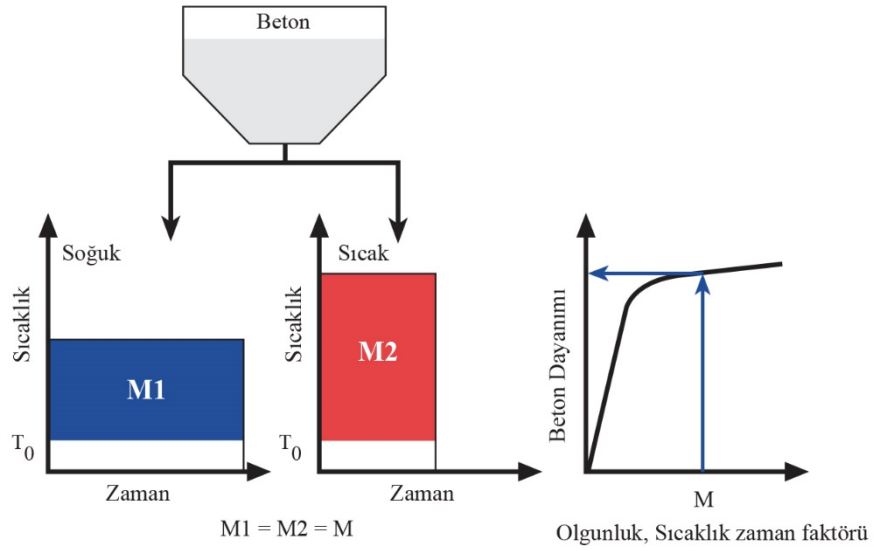
### 2.5.3. Dayanım-Olgunluk İlişkisi

#### 2.5.3.1. Saul Yöntemi

1950'lerin başında, Saul [116] olgunluğu sertleşme sıcaklığı ve zamanın bir ürünü olarak tanımladı. Bununla birlikte, Saul sertleştirme sıcaklığının ve çeşitli çimento türlerinin etkilerini çok basitleştirdiğinden, metodun pratik bir anlamı yoktu. 1973 yılında Papadakis ve Bresson, çimentonun sıcaklık hassasiyetini dikkate alan bir faktör ekleyerek uygulandığı bir yöntem ortaya koymuştur [117] (Şekil 2.64).

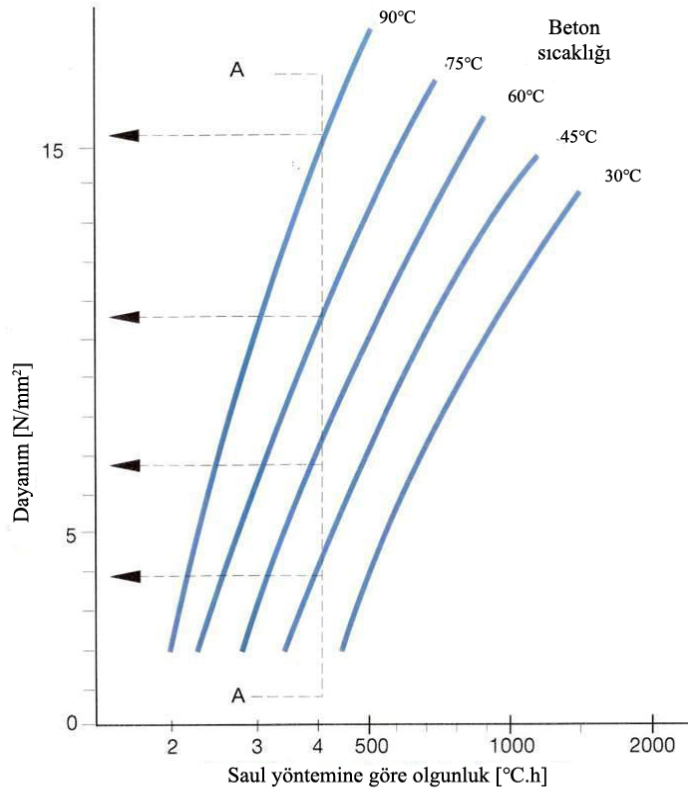
$$R = \sum [\Delta t_i \cdot (T_i + 10)] \quad (2.13)$$

Saul'un sıcaklık zaman faktörünü kullanıldığında farklı sıcaklıklarda kürlenene ve sıcaklık zaman diyagramında gösterilen 2 ayrı olgunluk süreci yaşayan betonların Şekil 2.64'daki alanları eşit olması olgunluklarının eşit olduğunu ve dolayısıyla basınç dayanımının eşit olduğunu gösterir. Ancak daha sonraki uygulamalar, Saul yönteminin çok basit olduğunu ve diğer değişkenlerin (ortam sıcaklığı, kalıp tipi, bağlayıcı tipleri vs.) durumuna bağlı olarak her zaman uygun olmadığını göstermiştir [118].



Şekil 2.64. Saul'un sıcaklık-zaman faktörü kullanarak olgunluk kuralı [119].

Bu konu için, Hollanda'daki CEMIJ laboratuvarında bir çalışma gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.65). Bu çalışmada aynı olgunluk farklı sıcaklıklarda farklı dayanım gösterir. Bu uygulamalar gösterir ki Saul yöntemi (klasik olgunluk yöntemi) betonun dayanımının tayini için yeterli bir yöntem değildir [118].



Şekil 2.65. Saul yöntemine göre farklı sıcaklıklardaki olgunluk gelişimi [120].



Örnek: 400 °C\*h olgunluk

45 °C sıcaklıkta, 4 N/mm<sup>2</sup>

60 °C sıcaklıkta, 6,8 N/mm<sup>2</sup>,

75 °C sıcaklıkta, 10,5 N/mm<sup>2</sup>,

90 °C sıcaklıkta, 15,3 N/mm<sup>2</sup>.

#### 2.5.3.2. Papadakis, Bresson, CEMIJ Laboratuvarı Yöntemleri

Saul yönteminin eksiklikleri birçok araştırmacı tarafından belirlenmiş ve bu eksiklikleri giderici çalışmalar ortaya konmuştur. Bu sorun üzerinde farklı zamanlarda ve farklı coğrafyalarda beton araştırmacıları tarafından birçok çabanın sonucunda olgunluk yöntemi ile betonun dayanımının tayini için daha kullanışlı bir bağıntı önerilmiştir [118].

Fransız araştırmacılar Papadakis ve Bresson ve Hollanda'daki araştırmacı CEMIJ laboratuvarı çalışmalarının sonucunda çimentonun sıcaklığa hassasiyetin hesaba alarak farklı bir olgunluk kavramı ve formül tanımladılar [118].

$$Rg = \left( \sum t \right) \cdot T \cdot C^n \quad (2.14)$$

Rg: Ağırlıklı olgunluk

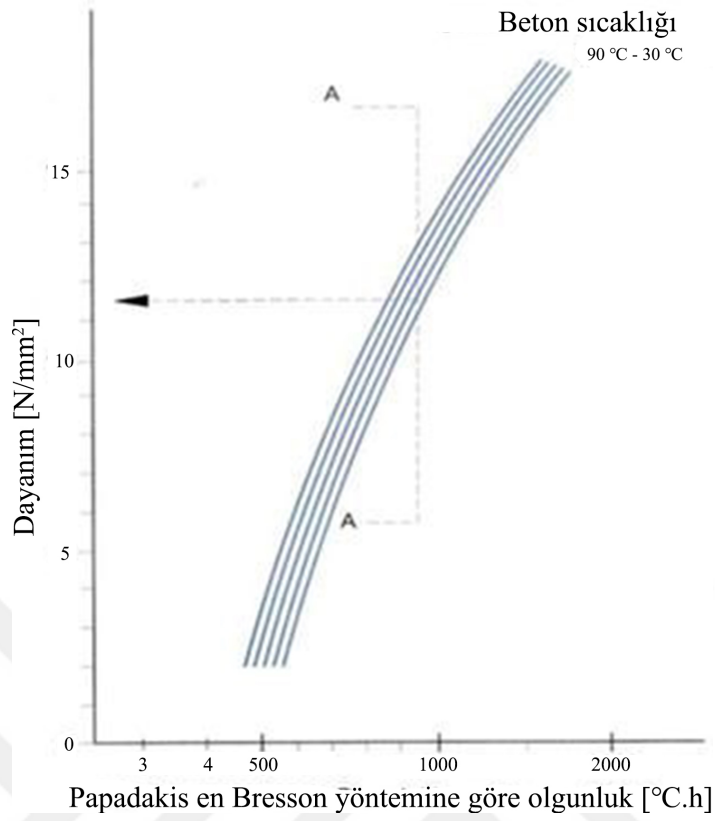
t: Sertleştirme zamanı

T: Sertleştirme sıcaklığı

C: Uygulamalı çimento C değeri

n: Sıcaklığa bağımlı değişken

Bu formül ile hesaplanan olgunlukta, çimentonun sıcaklık hassasiyeti bir ağırlıklandırma faktörü olarak betonun dayanımı üzerine eklenir ve bu neden ile bu formül ile hesaplanan olgunluk, ağırlıklı olgunluk olarak adlandırılır. Bu formülün üzerinden hesaplanan olgunlukta, aşağıdaki denklem temel bir gerçeklik haline gelmiştir (Şekil 2.66) [118].



Şekil 2.66. Papadakis ve Bresson yöntemine göre farklı sıcaklıklarda olgunluk gelişimi [120].

#### 2.5.3.3. Hollandalı De Vree Yöntemi (Ağırlıklı Olgunluk Yöntemi)

De Vree 1979 yılında ağırlıklı olgunluk yöntemi ile betonun dayanım tayininde en son ve en gelişmiş adımı atmıştır [121]. De Vree yerindeki betonun sürekli değişen iç sıcaklığının dayanım üzerine etkisini daha dikkatli kontrol altına almak için, sıcaklık kaydını periyodun en küçük zamanının ( $\Delta t$ ) göze alarak başka bir formül geliştirir [118].

$$M_w = \sum t \cdot T \cdot C^n \quad (2.15)$$

Burada;

$M_w$ : Bir saatlik sürede hesaplanan ağırlıklı olgunluk (°C - saat olarak),

$T$ : İlgili saatteki ortalama beton sıcaklığı (°C),

$C$ : 20 ve 65°C izotermal dayanım testleri için ağırlıklı olgunluk eğrilerinin çakıştığı, çimentoya özgü bir sabittir.

$t$ : Beton yaşı (saat veya gün),

n: Sıcaklığa bağlı parametre.

Bu formülde Saul'un olgunluk endeksindeki, yetersizliklerinin üstesinden gelmek için iki ek parametre daha ortaya atılmıştır. Bunlar: (a) çimentoya özgü "C" değeridir ve farklı çimentoların mukavemetine bağlı olarak farklı değerler kullanılabilir, fakat aynı zamanda ilavelerin kullanılmasına izin verir (ikame çimentolu malzemeler olarak da bilinir). (b) Sıcaklığın dayanım gelişimi üzerinde doğrusal olmayan bir etkisine izin veren "n" değeri. Bu sıcaklığa bağlıdır ve aşağıdaki denklemden hesaplanabilir [122]:

$$n = 0,1.T - 1,245 \quad (2.16)$$

C<sup>n</sup> olarak birleştirilen "C" ve "n" değerleri, bir değerden büyük olan C değerleri için 12.45 °C üzerindeki sıcaklıklarda neredeyse üssel olarak artan "ağırlıklı faktörünü" oluşturur. "C" için farklı çimento türlerinde tespit edilen bazı değerler [120], [123];

CEMI 32.5R, 52.5, 52.5R ve CEM II/B-V için C = 1.25, CEMIII/B 42.5 LH HS için C = 1.65, CEMII/B 42.5 LH HS plus için C = 1.60, CEMIII/A 52.5 ve CEMV/A 42.5 için C = 1.0

Değerler ayrıca on adet 150 mm beton veya 40 mm harç küpü dökerek belirlenebilir (her ikisi de 0.5 su/çimento oranına sahip) ve dayanım gelişimlerinin 20 °C ve 65 °C'de belirlenmesiyle C değeri deneme-yanılma ile belirlenir, böylece basınç dayanımları ağırlıklı olgunluk örtüşmesine karşı aşılır [62]. Bu eşitlikte (2.19) De Vree, C değerinin eklenmesi ve sıcaklığın devamlı kayıt edilmesi koşuluyla ağırlıklı olgunluk formülünü ortaya atmıştır. Ağırlıklı olgunluk aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir.

$$M_W = \sum \Delta M_w \cdot t \quad (2.17)$$

Buradan;

$$\Delta M_W = \Delta t \cdot \int_{-10}^T C^{0.1T-1.245} \cdot dT \quad (2.18)$$

ve

$$\Delta M_W = 10[C^{(0.1T-1.245)} - C^{(-2.245)}]/\ln C \quad (2.19)$$

Yukarıdakiler, yaş dönüşüm faktörünün şöyle olduğunu gösterir:

$$\beta = \frac{C^{0.1T-1.245} - C^{0.1T-2.245}}{C^{0.1T_r-1.245} - C^{0.1T-2.245}} \quad (2.20)$$

Yöntemin en büyük avantajı, ölçümlerin doğrudan beton elemanın içinde gerçekleşmesidir. Sensörlerin (thermocouple) iyi düşünülmüş bir şekilde beton içine yerleştirilmesi ile sıcaklık yapıdaki herhangi bir yerden kolayca ölçülebilir. Ek olarak, sıcaklığın sürekli olarak her noktada sabit bir şekilde kaydedilmesi, ağırlıklı olgunluğun artışı ve dolaylı olarak dayanımın geliştirilmesini sağlar [124].

#### 2.5.4. Olgunluk Yöntemi İçin Standartlar

Beton dayanımının olgunluk yöntemleri ile tayini için bu çalışmada 3 standarttan bahsedilecektir. ASTM C-1074, Hollanda Standartları Enstitüsü (NEN) 5970 ve TS 13508 standartları ve temel bilgileri kısaca anlatılacaktır.

##### 2.5.4.1. TS 13508 Olgunluk Yöntemi İle Beton Dayanımının Tahmini

TS 13508 [125] olgunluk yöntemi ile beton dayanımının tahmininde kullanılan olgunluk fonksiyonları ve ağırlıklı olgunluk hesap örneği aşağıda belirtilmiştir. TS Standardı hazırlanmasında hem ASTM C 1074 hem de NEN 5970 standartları baz alınmıştır.

Standartta göre betonun ölçülmüş sıcaklık geçmişine göre hesaplanan olgunluk indeksi için üç alternatif fonksiyon da kullanılmaktadır. Sıcaklık-zaman faktörünün hesaplanması için (2.4) nolu denklem kullanılır. Belirlenen bir sıcaklıktaki eşdeğer yaş faktörünün hesaplanması için (2.9) nolu denklem kullanılır. Ağırlıklı olgunluğun hesaplanması için ise (2.19) nolu denklem kullanılmaktadır. Standartta belirtilen hesap örneği Çizelge 2.13'de belirtilmiştir.

Ayrıca ağırlıklı olgunluk yönteminin diğer yöntemlerden temel farkı olan; her bir bağlayıcı türü için bağlayıcı maddenin sıcaklık hassasiyeti etkisi olarak da tanımlanan ve ölçülen C katsayısının nasıl hesaplanacağı yine standardın EK C kısmında anlatılmaktadır. Bu standart kullanılarak;

- Olgunluk fonksiyonlarından biri olan sıcaklık-zaman faktörü hesaplanabilir,
- Diğer bir olgunluk fonksiyonu olan belirli bir olgunluktaki betonun eşdeğer yaşı hesaplanabilir,
- Eklerde verilen yöntem ile bağlayıcı malzemenin sıcaklık hassasiyetini tanımlayan C katsayısı hesaplanabilir,

- Ağırlıklı olgunluk bağıntısında C katsayısı yerine konularak kullanılan bağlayıcı türüne uygun olarak ağırlıklı olgunluk hesaplanabilir.

Çizelge 2.13. Ağırlıklı olgunluk hesap örneği [125].

| Ölçüm | Ölçüm aralığı (saat) | Yaş (saat) | Ortalama beton sıcaklığı °C | Ağırlıklı olgunluk °C saat |                 |        |
|-------|----------------------|------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------|--------|
|       |                      |            |                             | 1/Saat                     | 1/Ölçüm aralığı | Toplam |
| 1     | 0,5                  | 0,5        | 10                          | 11,6                       | 5,8             | 6      |
| 2     | 0,5                  | 1,0        | 15                          | 16,6                       | 8,3             | 14     |
| 3     | 0,5                  | 1,5        | 19                          | 21,5                       | 10,8            | 25     |
| 4     | 0,5                  | 2,0        | 22                          | 25,9                       | 13,0            | 38     |
| 5     | 0,5                  | 2,5        | 24                          | 29,2                       | 14,6            | 53     |
| 6     | 0,5                  | 3,0        | 25                          | 31,0                       | 15,5            | 68     |
| 7     | 0,5                  | 3,5        | 25                          | 31,0                       | 15,5            | 84     |
| 8     | 0,5                  | 4,0        | 26                          | 32,8                       | 16,4            | 100    |
| 9     | 0,5                  | 4,5        | 26                          | 32,8                       | 16,4            | 116    |
| 10    | 0,5                  | 5,0        | 26                          | 32,8                       | 16,4            | 133    |

Bu hesaplamalar sonucu elde edilen olgunluk değerlerinden yararlanılarak basınç dayanımı-olgunluk ilişkisi kurulup belirli olgunluktaki betonun dayanımı hesaplanabilir.

Olgunluk ölçümü için sıcaklık zaman ilişkisini hesaplayan olgunluk bilgisayarlarından yararlanılır. Bu bilgisayarlar yardımı ile gerekli sayıda numuneden veriş alınarak beton iç sıcaklığının zamana bağlı değişimi elde edilir [125].

#### 2.5.4.2. ASTM C-1074 Olgunluk Metodu İle Beton Dayanımının Tahminine İlişkin Standart Uygulama

Bu standart kullanılarak;

- Kullanılan beton karışımı için laboratuvar deneyleri ile bir dayanım-olgunluk ilişkisi grafiği hazırlanır,
- Dayanımı tahmin edilecek saha beton için sıcaklık geçmiş beton dökümünden itibaren dayanımın tahmini istendiği ana kadar kayıt altına alınır. Bunun için bir olgunluk bilgisayarı kullanılır,
- Kayıt altına alınan sıcaklık geçmiş sahada kullanılan betonun olgunluk indeksinin hesabı için kullanılır,

- Hesaplanan olgunluk indeksi ve dayanım-olgunluk ilişkisi kullanılarak sahada kullanılan betonun dayanımı tahmin edilir.

Bu standartta hem basınç hem de eğilme dayanımı-olgunluk ilişkisi deney ve hesaplamaları için yöntemler verilmektedir. Ağırlıklı olgunluk hesabı için önerilen farklı bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetlerini gösteren C katsayısı ve ağırlıklı olgunluk hesaplaması bu standartta verilmemiştir [103].

Bu yönleri ile bakıldığında TS 13508 hem ASTM C 1074 hem de NEN 5970 standartlarında verilen 2 farklı ağırlıklı olgunluk yönteminin birlikte hesaplanması üzerine hazırlanmıştır. İhtiyaca göre bu standartlar içinde önerilen olgunluk fonksiyonlarından biri ya da diğeri kullanılarak beton erken yaş dayanımları tahmin edilebilir. Bazı araştırmacılar özellikle erken dayanım kazanan karışımlar ve geç olgunlaşan karışımlar için yeni olgunluk fonksiyonları önerme yoluna gitmişlerdir.

#### 2.5.4.3. *NEN 5970 Taze Beton Dayanımının Ağırlıklı Olgunluk Yöntemiyle Belirlenmesi*

Bu standart içeriğinde taze betonlar için basınç dayanımlarının saptanması üzerine bir metot verilmektedir. Ayrıca standardın ekleri kullanılan bağlayıcıların C değerinin saptanması yöntemini ve beton karışımına ait kalibrasyon eğrisini de kapsamaktadır.

Bir olgunluk bilgisayar yardımı ile zaman ve sıcaklık olgunluğa dönüştürülmektedir. Bağlayıcı madde C değeri ise aynı olgunlukta aynı basınç dayanımına karşılık gelmektedir. Standart ağırlıklı olgunluk için önerilen (2.16) nolu denklem kullanılarak betonlar için erken yaş dayanımları hesaplanmaktadır [120].

Bu standart kullanılarak;

- Eklerde verilen yöntem ile bağlayıcı malzemenin sıcaklık hassasiyetini tanımlayan C katsayısı hesaplanabilir,
- Ağırlıklı olgunluk bağıntısında C katsayısı yerine konularak kullanılan bağlayıcı türüne uygun olarak ağırlıklı olgunluk hesaplanabilir.

Ölçülmüş ağırlıklı olgunluğa karşılık gelen basınç dayanımı kalibrasyon grafiğinden saptanır. Bu standart içinde taze beton için yaş tanımı yapılmamıştır ve eşdeğer yaş hesabı yoktur.

## 2.6. BETONDA OLGUNLUK ÜZERİNE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Wan Jo ve arkadaşları [126], Weibull dağılım modeli kullanılarak nano-çimento (nano-çimento betonu, partikül büyüklüğü 500 nm'den az olan bir çimentodan yapılan beton) esaslı betonun olgunluk değerlerini elde etmek için kür süresinin optimizasyonunu incelemiştir. Bu çalışmada, nano-çimento esaslı betonun olgunluk değerleri üzerinde kür yönteminin etkisi araştırılmıştır. Nano silika ve hidratlı alümina kullanılarak sol-gel yöntemi ile nano-çimento sentezlemiştir. Bu çimentoyu kullanılarak beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Beton basınç dayanımı ve olgunluk ölçümleri yapılmıştır. Weibull dağılım analizine dayanarak, nano-çimento bazlı betonun belirli bir olgunluğa ulaşması için gereken zamanın 20 gün olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca nano-çimento esaslı betonun tam olgunluğunu elde etmek için gerekli kür süresi (basınç değişim oranının sıfır olduğu süre) 21 gün olarak hesaplanmıştır. Normal Portland çimentolu beton için ise, kürleme süresindeki artışa paralel olarak bu süre minimum 28 gündür. Bu nedenle, nano-çimentonun Portland çimentosu yerine birincil bağlayıcı madde olarak kullanılması halinde bina inşaatı için gerekli sürenin azaltılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Wan Jo ve arkadaşları [127] yukardaki çalışmanın devamı olarak bu çalışmada, nano-çimento esaslı beton (NCC) ile normal Portland çimentolu betonun (OPCC) karşılaştırma verilerini içeren bir çalışma yapmışlardır. Beton örnekleri (OPCC), on farklı karışım tasarımı kullanılarak üretilmiş ve karakterizasyon verileri buradan sağlanmıştır. Weibull dağılım modeli kullanılarak kür süresinin optimizasyonu, OPCC'nin basınç dayanımındaki değişim oranı analiz edilerek yapılmıştır. İlk olarak, OPCC örneklerinin basınç dayanımı, istenen dört sertleşme süresinin tamamlanmasından sonra ölçülmüştür. Daha sonra, sertleşme süresinde belirli bir değişim oranını elde etmek için gerekli sertleşme süresi, Weibull dağılım modeli kullanılarak (%99,99 güven seviyesinde) sertleşme süresinin optimizasyonundan önce, sertleşme dayanımı değişim oranından türetilen denklemden yararlanılarak tahmin edilmiştir. Bu makale “Weibull dağılım modeli kullanılarak nano-çimento esaslı betonun olgunluğunu elde etmek için kür süresinin tahmini” başlıklı araştırma makalesini tamamlamaktadır.

Ji Jin ve arkadaşları [128], olgunluk yöntemiyle epoksi reçine betonun erken yaş basınç dayanımının tahmini konusunu incelemiştir. Bu çalışmada, erken yaştaki bisfenol F tipi epoksi reçine betonun basınç dayanımının tahminini, olgunluk yöntemi kullanılarak araştırmıştır. Epoksi reçine betonun basınç dayanımını test ederken, mukavemet gelişimi



0° C'lik bir sıcaklıkta 20 saatlik bir yaştan başlamıştır. 6 saat basınç dayanımları ile 168 saat basınç dayanımları arasındaki fark daha yüksek bir kür sıcaklığında belirgin şekilde azalmaktadır. Böylece, bisfenol F-tipi epoksi reçine betonunun kür sıcaklığından büyük ölçüde etkilendiği görülmüştür.

Polimer betonlar daha hızlı mukavemet geliştirme eğilimi gösterdikleri ve 24 saat içinde özellikle yüksek bir mukavemet geliştirme oranına sahip oldukları için, portland çimento betonlarının olgunluk indeksinin hesaplanmasında kullanılan  $\Delta t$ 'nin etkisini azaltmak gerekir. Gün yerine saatler yaş birimi olarak kullanılmalıdır. Buna ek olarak, portland çimento betonunda  $n=1$  olarak uygulanan katsayı, polimer betonun daha hızlı mukavemet gelişimine uygun olarak daha küçük bir değerin kullanılmasını gerektirir. Denklemden polimer reçineler için  $\Delta t$ 'nin katsayısı  $n$ 'nin uygun değerinin 0.4 olduğu öngörülmüştür. En çok kullanılan olgunluk fonksiyonu olan Nurse-Saul olgunluk fonksiyonunu polimer bağlayıcılar için bu şekilde yazarsak;

$$M = \sum_{i=0}^t (T - T_0) \Delta t^n \quad (2.21)$$

Bu denklemde;

$M$  = olgunluk derecesi, °C-saat ya da °C-gün,

$T = \Delta t$  zaman aralığında ortalama beton sıcaklığı (°C),

$T_0$  = başlangıç sıcaklığı (genellikle -10 °C olarak alınır),

$t$  = geçen zaman (gün yada saat) ve

$\Delta t$  = zaman aralığı (gün ya da saat) olarak tanımlanmıştır,

$n$  = sıcaklık değişim etkisini gösteren sabit bir katsayıdır.

Bu çalışma sonucu olarak dayanım gelişiminde 72 saatlik verilerin yeterli olduğu görülmüştür. Olgunlaşma endeksi, kürlenme yaşına göre kür sıcaklığından daha fazla etkilendirilmiştir ve sertleştirici tipine bağlı olarak daha az farklılıklar vardır. Sertleşme sıcaklığının etkisinin daha yüksek olma nedeni  $n$  katsayısının 0.4 olarak uygulanması olmuştur. Çalışmada ortaya çıkarılan tahmin modelini kullanarak, bisfenol F tipi epoksi reçine betonun erken yaş basınç dayanımını kolayca tahmin etmek ve olgunluk yönteminin yerinde uygulamalar için faydalı tahribatsız bir test olduğunu kanıtlamak

mümkün olmuştur.

Teixeira ve arkadaşları [129], dikey elemanların kalıplarının sökülmesi konusunda olgunluk fonksiyonlarının uygulanabilirliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, birçok standardın saha koşullarına bağlı olarak farklı minimum kalıp sökme sürelerini önerdiğini belirtmiştir. Minimum kalıptan çıkarma süresinin belirlenmesinde farklı parametreler dikkate alınır, ancak her zaman dikkate alınan tek şey beton sıcaklığıdır. Bu nedenle, olgunluk fonksiyonlarına dayanan, Kendiliğinden Yerleşen Betonun (SCC) dikey elemanlarının minimum kalıptan çıkarma sürelerini belirlemek için bir metodoloji üzerinde çalışılmaktadır.

Olgunluk fonksiyonları, olgunluk ve yerinde direnç arasında bir ilişki kurar. Zaman içinde sıcaklık ölçülerek olgunluk ölçülebilirken, yerinde direnci belirlemek için farklı bir seçenek vardır ve bu nedenle bu çalışma erken yaşlarda direnç ölçüm yöntemleri üzerinde odaklanmıştır.

Direnç-olgunlaşma eğrisinin belirlenmesinde yerinde direnci belirlemek için hangi yöntemin en uygun olduğu deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, her yöntemin uygunluğu ve tutarlılığı incelenmiştir.

Ayrıca, bir inşaat sahasında test edilen 11 kolona kalıp sökme metodolojisinin uygulandığı, deneysel bir doğrulama gerçekleştirilmiştir. Doğrulama, iki farklı SCC ve farklı kalıp türleri ile gerçekleştirilmiştir.

Galobardes ve arkadaşları [130], püskürtme beton özelliklerinin gelişimini öngörmek için olgunluk yönteminin kullanımını araştırmıştır. Bu çalışmada araştırmacılar, olgunluk yönteminin betonun mukavemet değişimini değerlendirmek için basit bir yaklaşım sağladığını belirtirler. Bu tür betonlar, püskürtme işlemine bağlı olarak ve çimento hidratasyonunun kinetiğini değiştiren hızlandırıcıların kullanılmasından dolayı özel durumlar oluşturur. Sonuç olarak, mekanik özelliklerin ve olgunluk endeksinin değişimini ilişkilendiren geleneksel denklemler bu durumda geçerli olmayabilir. Bu çalışmanın amacı, olgunluk yöntemini püskürtülen betona uyarlamaktır. Laboratuvarda püskürtme işlemi gerçekleştirilmiş, 24 beton karışımı ile deneysel bir program yapılmış; sıcaklık ve basınç dayanımının değişimi için test edilmiştir. Püskürtme betonlarda ilk 12 saatlik dayanım gelişimi çok önemlidir. Olgunluk değerleri ile dayanım karşılaştırılmış ve Plowman (2.12) denklemi ile 0,81 ila 0,69 gibi kötü bir uyum elde edilmiştir. Olgunluk endeksi ve mekanik özellikleri ilişkilendirmek için alternatif bir denklem önerilmiştir.

Deneyle birlikte FEM kullanarak termal analizlerde yapılmış ANSYS (bilgisayar destekli mühendislik programı) modeli geliştirilmiştir. ANSYS'te ısı transferini modellemek için aşağıdaki Fick yayılım yasası eşitliğinden yararlanılmıştır.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \left( \frac{K}{c * p} \right) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (2.22)$$

Bu denklem, (T) zamanındaki sıcaklığın (t) evrimi, malzemenin (D) difüzyon katsayısı için çarpılan belirlenmiş bir konumdaki (x) sıcaklıkla ilişkilendirir. Bu parametre, iletkenliğe (K), özgül ısıya (c) ve çalışılan malzemenin yoğunluğuna (p) bağlıdır.

Olgunluğun dayanım ile ilişkilendirilmesinde önerilen bu denkleme göre ilk 12 saatlik dayanım gelişimi açısından 0,99 uyum yakalanmıştır. Olgunluk değeri kimyasal katkı ve priz hızlandırıcılar, hızlandırıcı dozajı ve bağlayıcı tipinden etkilendiğinden her farklı karışım tipi için farklı bir olgunluk eğrisi tanımlanmalıdır.

Boubekeur ve arkadaşları [131], olgunlaşma yöntemiyle harçların farklı kür sıcaklıklarında basınç dayanımını incelediler. Bu çalışmada, ileri yaşlardaki basınç dayanımı ile olgunluk arasındaki ilişkiyi doğrulamak için üç mineral katkılı iki harç seti yaptılar. Birinci set, buhar odasında, 20, 30, 40 ve 50 °C sabit sıcaklıkta sertleştirilmiş ve ikinci set değişken sıcaklık altında kürlenmiştir. 350 °C Gün'e kadar olan olgunluklar için korelasyonun iyi sonuç verdiği, bu olgunluğun üzerinde değerler için sapmalar olduğu tespit edilmiştir. Bu kritik değerlerin üzerinde eşdeğer bir olgunluk fonksiyonu tanımlanmış ve bu değere kadar olan olgunlukla ilişkili bir bağıntı önerilmiştir.

$$\begin{aligned} M_e &= M \cdot k_c \cdot k_T \cdot k_t \\ K_c &= f(\text{çimento tipi}) \\ k_T &= e^{-0.03T} \\ k_t &= e^{-0.015t} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Olgunluk dayanım ilişkisi için ise aşağıdaki bağıntılar önerilmiştir.

$$\begin{aligned} S &= a + b \ln M & M \leq 350 \\ S &= a + b \ln M_e & M > 350 \end{aligned} \quad (2.24)$$

Yeni önerilen olgunluk endeksi, daha ileri yaşlarda mukavemet ve olgunluk arasında daha

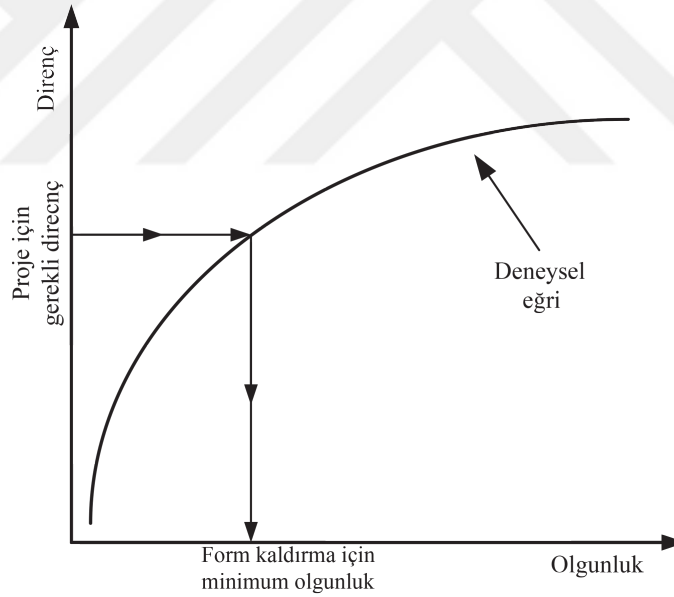
iyi bir korelasyona izin vermekte ve sıcaklık artışı ile mikro yapının bozulmasını dikkate almaktadır. İleri yaş dayanımının, erken yaştaki mukavemet-olgunluk arasındaki ilişki kullanılarak 0,89'dan 0,98'e kadar değişen korelasyon katsayısı ile tahmin edilebilir olduğunu tespit edilmiştir.

P. Rossi [132], lif geometrisi ve matris olgunluğunun ultra yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik performansına etkisini incelemiştir. Bu çalışmada, en uzun çelik lifin geometrisinin ve matris olgunluğunun, ultra yüksek performanslı çok ölçekli lif takviyeli çimento esaslı kompozitin mekanik davranışı üzerindeki etkisinin deneysel bir çalışması ele alınmaktadır. Isıl işlem uygulamasına rağmen, çok düşük su/bağlayıcı oranına sahip ultra yüksek performanslı çimento matrisi zamanla olgunlaşmaya ve yoğunlaşmaya devam eder. Bu eğilim, malzemenin yaşı 1 aydan 10 aya kadar ilerledikçe (bu çalışmada incelenen maksimum 14 ay ile) kırılma modülünde önemli bir artışa (% 20) yol açar. Çok yoğun bir matriste, toplam lif sayısı ve lifin spesifik yüzeyi, lif uçlarındaki kancaların olmasından veya olmamasından daha önemli parametrelerdir. Bükülmüş çelik lifler, uçlarında kancalar bulunan çelik liflerden daha iyi bir mekanik performans göstermiştir.

L. Ferreira ve arkadaşları [133], olgunluk yöntemiyle alkali aktif bağlayıcıların karakterizasyonunu incelemiştir. Yenilikçi ve eko-verimli çimentolu malzemelerin geliştirilmesi, çevrenin sürdürülebilirliğini sağlamak için yaygın bir motivasyon kaynağıdır. Bu çalışmada, normal Portland çimentosunun tamamen veya en azından kısmen endüstriyel yan ürünlerle yer değiştirdiği, alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılar kullanılmış, eko döngü ve sürdürülebilirlik açısından umut verici bir öneri ortaya konmuştur. Uçucu kül gibi alüminosilikat malzemelerin alkali aktivasyonu, ikinciye bir alkalın solüsyonunun eklenmesi ve daha sonra belirtilen sıcaklıkta kürlenmeye tabi tutulması, tazedden sertleştirilmiş duruma geçişe yardımcı olur. Bu parametrenin önemli etkisinden dolayı, olgunluk metodunu kullanmak etkili olabilir. Arrhenius denklemine göre, basınç dayanımı değişiminin, zaman ve sıcaklık fonksiyonu olarak izlenmesi ve tahmin edilmesi mümkün olacaktır. Çalışmada birkaç çeşit alkali aktif harç ile prekast cephe panelleri üretilmiş ve bu üretimde olgunluk yöntemi ile dayanım gelişimleri takip edilmiştir. Prekast üretimi esnasında 50, 70 ve 90 °C'lerde kürlenerek alkali aktif harçların yaşı ile beraber basınç dayanımları da takip edilmiş, 3 farklı alkali karışım ile üretilen alkali aktif uçucu kül harçlarına ASTM C 1074'e uygun şekilde olgunluk yöntemi uygulanmış, elde edilen sonuçlar hem Nurse-Seul hem de Arrhenius denklemleri ile

denenmiştir. Elde edilen verilere göre eşdeğer yaş olgunluğu, dayanımı %20 yaklaşımla tahmin ederken bu çalışma sonunda olgunluk yönteminin, hem Alkali Aktive Harçların (AAM) hem de Alkali Aktif Betonun (AAC) izlenmesi için kullanılabileceği gösterilmiştir.

N. Rudeli ve arkadaşları [134], olgunluk yöntemiyle düşey kalıplar içindeki alkali aktif bağlayıcıların karakterizasyonunu incelemiştir. Bu çalışmada, beton dökümü ile oluşan yanal basıncın hidratasyon sürecinde azalarak nihayet sıfıra inmesi ve betonun kalıp olmadan kendi stabilitesini koruyacak hale gelmesi aşamaları incelenmiştir. Bu çalışmada verilen metodoloji ile inşaat sahasında olgunluk endeksini sürekli olarak ölçerek, betonun türünden bağımsız olarak minimum kalıp sökme süresini tahmin etmek mümkündür. Farklı standartlar ve farklı araştırmacılar tarafından düşey kalıpların sökümü için önerilen dayanım değerleri arasında çok büyük farklar vardır. Çalışmada bu konuda önerilen değerlerin geniş bir özeti tablo olarak verilmiştir. Şekil 2.67’de ise olgunluğa bağlı olarak dayanımın belirlenebileceği bir grafik önerilmektedir.



Şekil 2.67. Direnç-olgunluk ilişkisi [127].

Kalıbın bekleme maliyeti ve sökümde oluşabilecek riskler dikkate alındığında bu aralıklar maliyet/güvenlik arasında karar verilecek noktanın daha net belirlenmesini zorunlu kılmaktadır. Olgunluk yönteminin kullanılması ile böyle bir optimum nokta yakalamak ve hem de güvenlikten taviz vermeden ekonomik fayda elde etmek mümkündür. Olgunluk yöntemi kullanılarak çevresel sıcaklıklar ve karışım özellikleri dikkate alınarak kalıp söküm zamanlarını tablolaştırmak ve uygulamak mümkündür. Bu çalışma sonunda

kalıp sökümü için 2 MPa dayanımın yeterli olduğu ortaya konmuştur.

M. Benaicha ve arkadaşları [135], betonun erken yaşlarında basınç dayanımı-olgunluk ilişkisini incelemiştir. Bu çalışmada, HPC, HPSFRC, HPMFRC ve SCC olmak üzere 4 tip beton türü deneysel olarak incelenmiştir. Beton mukavemetinin gerekliliklerine uyularak, olgunluk yöntemi ile inşaat faaliyetlerinin hızlı ve güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesinin nasıl sağlanabileceği araştırılmıştır. Bu yöntem, gerçek zamanda, yerinde betonun sıcaklık geçişini bir dayanıma dönüştürür. Bu çalışmanın amaçları: (1) Kendiliğinden Yerleşen Beton (SCC), Yüksek Performanslı Beton (HPC) ve Yüksek Performanslı Sentetik (HPSFRC) veya Metalik Lif Takviyeli Beton (HPMFRC) gibi dört tip betonun sıcaklık değişiminin incelemesi ve (2) yaşlanma sertleşmesine ve kürlenme sıcaklığına bağlı olarak mekanik mukavemet değişimini incelenmesidir. Nihai amaç, çalışılan bu dört beton tipinin 20 ° C'de mekanik mukavemet referans eğrisine dayanarak, beton dökümünden sonraki 5 saatlik eşdeğer yaşının bir fonksiyonu olarak tanımlanmasıdır. Çalışmada 5 saat sonunda HPC, HPSFRC, HPMFRC 10 MPa'dan daha yüksek basınca ulaşırken SCC için ise 7.30 saat beklemek gerekmiştir.

T. A. Yıkıcı ve arkadaşları [136], kütle betonunun erken yaş basınç dayanımının tahmini için olgunluk yönteminin kullanılmasını incelemiştir. Bu çalışmada, büyük ölçekli beton dökümlerinde yerinde mukavemeti tahmin etmek için olgunluk yöntemi kullanılmıştır. Dört ayrı yerde dört adet 1,8 m<sup>3</sup> beton blok inşa edilmiş ve bu beton karışımları için mukavemet geliştirme eğrileri, şantiyeden alınan 150 x 300 mm silindir numuneleri kullanılarak oluşturulmuştur. Beton karışımları için aktivasyon enerji değerleri laboratuvarında belirlenmiş ve eşdeğer yaş hesaplamaları için kullanılmıştır. Beton küplerin derinliği boyunca gömülü sıcaklık sensörleri, 28 güne kadar belirli yerlerde sıcaklık geçmişlerini izlemek için kullanılmıştır. Toplanan sıcaklık değerlerine göre yerinde beton mukavemetini tahmin etmek için eşdeğer yaş denklemi kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Küplerin dökümünden 4, 28 ve 56 gün sonra küplerden 1.8 m uzunluğunda 10 cm çaplı karot numunesi alınmış ve dayanımları test edilmiştir. Bu dayanımlar olgunluk denklemi kullanılarak tahmin edilen dayanımlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar tahmin edilen yerinde beton dayanımının her zaman üst yüzeylere göre gerçek dayanımdan daha yüksek olduğunu göstermektedir. Üç farklı küpten elde edilen sonuçlar, orta kesitin basınç dayanımının, tahmin edilen değerlerin  $\pm 0\%15$ 'i içinde olduğunu ve alt kısımdan elde edilen sonuçlarının genellikle tahmin edilen değerlerden daha yüksek olduğunu göstermektedir.

P. Turcry ve arkadaşları [137], olgunluk yöntemi kullanarak, erken yaş çimento hamurunun otojen büzülmesini ve termal deformasyonunu incelemiştir. Bu çalışmada, sıcaklığın çimento hamurunun otojen büzülmesi üzerindeki etkisi Arrhenius yasasına dayanan olgunluk yaklaşımı kullanılarak incelenmiştir. Bu yasanın uygulanabilmesi için çimento tipine uygun olarak aktivasyon enerjisinin bilinmesi gerekir. Aktivasyon enerjisi, “priz süresi yöntemi” ile belirlenmiştir. Çimento hamurunun dış hacim değişimi hidrostatik tartım ile ölçülmüştür. Termal ve otojen deformasyonları ayırmak için, Termal Genleşme Katsayısı (TDC), hem 20 hem de 30 ° C'de belirlenmiştir. TDC sadece 20 ila 30 C arasında hidrasyon derecesine bağlıdır. TDC hesaplanması için aşağıdaki bağıntı önerilmiştir.

$$TDC(t_{equ}) = 137. \exp(1.44 - t_{equ}) + 28 \quad (2.25)$$

Olgunluk kavramı, izotermal büzülme ölçerek, 10 ila 40 ° C arasındaki ısı koşulları için otojen deformasyon genliğini tahmin etmeyi sağlar. Bu sıcaklık aralığının dışında, hesaplanan otojen deformasyon ve ölçülen izotermal büzülme oldukça farklıdır ve sonuç olarak, otojen büzülmenin hidrasyon ilerlemesinden daha fazla değişkene bağlı olduğu görülmektedir.

Q. Li ve arkadaşları [138], eşdeğer olgunluk kavramı kullanarak yerinde döküm baraj betonunun kırılma parametreleri üzerindeki ortam sıcaklığı etkisini incelemiştir. Süper yüksek kemer barajının bulunduğu bir inşaat sahasındaki mikser sistemi sayesinde, maksimum tane boyutu 150 mm olan numuneler sırasıyla yaz ve kış mevsiminde dökülerek hazırlanmıştır. Farklı yaşlarda yapılan deneyler ile elde edilen kırılma parametrelerinin varyasyonları ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlar, yaz ve kış aylarında dökülen baraj betonlarının 28 günlük kırılma karakteristiklerinde çok fazla farklılık olduğunu göstermiştir. Ancak yaş artışı ile birlikte, kırılma davranışındaki farklılık azalmıştır ve 180 günde neredeyse sıfırdır. Bunun üzerine, eşdeğer olgunluk kavramı kullanılarak, yerinde döküm baraj betonunun kırılma parametreleri ile eşdeğer olgunluk arasındaki ilişkiler elde edilmiştir.

Olgunluğa bağlı olarak artan beton dayanımındaki değişim eğilimine benzer şekilde, betonun kırılma parametreleri de artan olgunluk ile artmıştır. Nurse-Saul ve Freiesleben'in formülleri temel olarak betonun mekanik özelliklerini incelemek için kullanılır. Bu nedenle, bu iki formülün kırılma parametreleri ile 28-180 günlük yaşlarda şantiye baraj betonunun olgunluğu arasındaki ilişkiyi analiz etmek için kullanıldığında



ideal sonuçlar alınamamıştır.  $R^2$  regresyon eğrisinin korelasyon katsayısı, 0.60 gibi düşük bir oranda kalmıştır. Bu nedenle, burada eşdeğer olgunluk  $M_e$  kavramı önerilmiştir

$$M_e = \sum_0^t T_e \Delta t \quad (2.26)$$

Yukarıdaki denklemde  $M_e$  eşdeğer olgunluğu ( $^{\circ}\text{Cxd}$  (gün)),  $T_e$  eşdeğer sıcaklığı,  $t$  zamanı (d gün) ve  $\Delta t$  ise kürlenme süresini (d gün) belirtir.

Farklı yaşlardaki şantiyede dökülen beton örneklerinin kırılma testi sonuçları ile birlikte, şantiyede dökülen beton için kırılma parametreleri-eşdeğer olgunluk ilişkisi oluşturulmuştur. Bu ilişki, saha betonunun kırılma parametrelerinin sıcaklık ve yaştaki değişikliklerle nasıl değiştiğini açıkça yansıtmaktadır. Bu çalışma sonunda, eşdeğer sıcaklık ve yaştan ürün olarak eşdeğer olgunluk önerilmiştir.

M.N. Soutsos ve arkadaşları [139], hafif kendiliğinden yerleşen ve titreşimle sıkıştırılan beton karışımlarının erken dönem dayanım gelişimi üzerindeki sıcaklığın etkisini incelemiştir. Yeni karışımlar Yüksek Hacimli Tozlaştırılmış Yakıt Külü (PFA), Öğütülmüş Granül Fırın Cürufu (GGBS) ve Kireçtaşı Tozu (LSP) içermektedir. Aktivatör olarak sodyum sülfat, PFA ve GGBS ile orantılı olan titreşimle yerleştirilen beton karışımlarının erken yaş mukavemetini geliştirmek için kullanılmıştır. Bu düşük enerjili, hafif, kendiliğinden yerleşen ve titreşimle sıkıştırılan beton karışımlarının izotermal olmayan, yani adiyabatik kütleme altında dayanım gelişimini tahmin etmek için olgunluk yöntemlerinin uygunluğu değerlendirilmiştir.

Bu çalışma hafif agregaların olgunluk yöntemi ile erken yaş dayanım gelişimi üzerine yapılmış ilk çalışmalardan biridir. Çalışmada gösterildiği gibi hafif agregalı betonlar için de erken yaş dayanım gelişimleri normal betonlarla benzer şekilde olgunluk yöntemi ile tahmin edilebilmektedir. Özellikle prekast fabrikalarında dayanım gelişimini öngörebilmek için eşdeğer yaşların belirlenmesi mümkün olabilmektedir. Sıcaklık geçmiş ölçümünün, olgunluk fonksiyonları ile birlikte, standart laboratuvar koşullarında elde edilen dayanım gelişim verilerine dayanarak yerinde dayanım tahmininde de kullanılabileceği önerilmektedir.

Thomas Voigt ve arkadaşları [140], harçların erken yaş basınç dayanımının değerlendirilmesinde ultrasonik dalga yansıtma yöntemi ile olgunluk yönteminin karşılaştırılması üzerine çalışmıştır. Bu çalışma, Portland çimentosu harçlarının basınç

dayanımını değerlendirmek için ultrasonik dalga yansıtma yöntemi ile yaygın olarak bilinen olgunluk yöntemi arasındaki karşılaştırmaya odaklanmaktadır. Deneyler, farklı su-çimento oranlarına (0,35, 0,5 ve 0,6) sahip ve farklı izotermal ve izotermal olmayan koşullar altında (15 °C, 25 °C, 35 °C ve 15–35 °C) kürlenmiş çimento harçları üzerinde laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlar, doğru dayanım yargısı için olgunluk yönteminin uygulanmasının, özel kürlenme koşulları için karışımın sınır dayanım bilgisini gerektirdiğini göstermektedir. Kalibrasyon testlerinden elde edilen sınır dayanım değerleri bu tahmin için yeterli değildir.

Yansıma kaybı ve basınç dayanımı arasındaki ilişkinin kür sıcaklığından bağımsız olduğu bulunmuştur. Bu bulgu, çimento bazlı materyallerde erken yaş mukavemetini tahmin etmek için ultrasonik dalga yansıtma yöntemini tahribatsız bir yöntem olarak önermenin önemli bir adımıdır. Çalışmada dayanım ile yansıma kaybı arasında kürlenme sıcaklıklarından bağımsız olarak aşağıdaki bağıntı önerilmiştir.

$$S = 4.224 \cdot R_L^{1,9158} \quad (2.27)$$

Yukarıdaki denklemde; S basınç dayanımı,  $R_L$  ise ölçülen yansıma kaybıdır. Bu tür bir ilişki dökümden 9 saat sonrası ile 3,5 gün arasındaki süreç için önerilmektedir.

Yine basınç dayanımı ve yansıma kaybı arasındaki ilişki su-çimento oranından nispeten bağımsızdır. Farklı su-çimento oranları arasındaki ilişkiler arasında bazı farklılıklar olsa da eşdeğer yaş ilişkisine karşı nispi dayanım için gözlenenlerden çok daha az önemli olduğu değerlendirilmiştir.

M. Lachemi ve arkadaşları [111], kayar kalıp yöntemi ile beton dökümünde olgunluk yönteminin uygulanması ve farklı olgunluk fonksiyonlarının geçerliliğini incelemiştir. Bu çalışmada, Nurse-Saul (NS), Rastrup (R), Weaver ve Sadgrove (WS), Freiesleben Hansen ve Pederson (FHP) ve Carino and Tank (CT) dahil olmak üzere çeşitli olgunluk fonksiyonları dikkate alınmıştır. Fonksiyonların performansları kayar kalıp işlemlerinde uygulanacak en uygun operasyon zamanlarını belirlemek için geniş çeşitlilikteki beton karışımlarının laboratuvar ve saha verilerini kullanarak priz başlangıç zamanının öngörülmesine dayanılarak karşılaştırılmıştır. Freiesleben Hansen ve Pederson (FHP) ile Carino ve Tank (CT) fonksiyonlarının priz sürelerini diğer fonksiyonlara göre tahmin etmede daha iyi sonuçlar vermiştir.

FHP ve CT olgunluk fonksiyonlarıyla ilişkili görünen aktivasyon enerjisi ve sıcaklık duyarlılığı faktörü, geciktirici dozajı değiştirmekten veya priz zamanı ölçme yöntemini değiştirmekten etkilenmez. Öte yandan, olgunluk fonksiyonlarının performansı priz süresi ölçme yöntemine bağlıdır. Bu çalışmada, priz süresi ölçümünde iki yöntem göz önünde bulundurulmuştur: ASTM C 403'e göre penetrasyon direnci (PR) yöntemi ve 2 ° C sıcaklık (2C) artış yöntemi. Ayrıca CT olgunluk fonksiyonunun kayar kalıp operasyonlarında PR veya 2C yöntemleriyle etkin bir şekilde kullanılabileceği de doğrulanmıştır. Bununla birlikte, PR tabanlı tahminler içeren CT fonksiyonu (CT-PR), 2C tabanlı tahminli (CT-2C) CT fonksiyonundan daha etkilidir.

Sonuç olarak beton priz sürelerinin tahmini ve dolayısı ile kayar kalıp operasyonlarının planlanmasında olgunluk yönteminin bir araç olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

Jieying Zhang ve arkadaşları [141], yüksek performanslı betonların mekanik özelliklerinin gelişimini öngörmek için olgunluk yönteminin kullanımını incelemiştir. Bu çalışma, olgunluk yönteminin gelişim sürecinde aktivasyon enerjisinin ve varsayımların incelenmesi ile yeni ve mevcut deneysel kanıtlarla desteklenen olgunluk yönteminin yeterlilik ve sınırlamalarını daha iyi anlamak için sunulmuştur.

Daha sonra, tahminler ve deneysel veriler arasındaki hatayı en aza indirerek aktivasyon enerjisinin matematiksel olarak belirlendiği pratik bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşım aynı olgunluğun, aynı betonun farklı örneklerinin, farklı kür sıcaklıkları altında belirli bir özellik seviyesine ulaşmasıyla tanımlandığı yeni bir konsepte dayanmaktadır. Bu kavram, farklı beton karışım formülasyonlarına ve farklı özellik türlerine uygulanacak olgunluk yaklaşımını daha sağlam ve daha genel hale getirmektedir. Önerilen yaklaşımın doğruluğu ve uygulanabilirliği deneysel çalışmalarla kanıtlanmıştır.

Çalışmada Uygun (best-fit) Olgunluk Endeksi kavramı ortaya atılarak geleneksel olgunluk kavramından (Geleneksel olgunluk kavramında, farklı sıcaklık geçmişleri altında kürlenmiş belirli bir betonun örneklerinin, aynı olgunluğa ulaşmaları durumunda aynı dayanıma ulaşacağı varsayılmaktadır.) tamamen farklı bir yaklaşım ortaya konmaktadır. Bu amaçla öngörülen değerler ile ölçülen değerler arasındaki farkı, üç farklı sıcaklıkta kürlenmiş test numunelerinden yararlanarak en aza indiren bir  $E_a$  değeri elde etmek için kullanılan bir prosedür önerilmektedir.

Bu çalışmaya göre;

i) Belirli bir beton için farklı özellikler farklı aktivasyon enerjisine ( $E_a$ ) değerlerine sahip

olabilir;

ii) Farklı betonlar, belirli bir özellik için farklı  $E_a$  değerlerine sahip olabilir; ve

iii) Belirli bir değerin farklı gelişim aşamasında farklı  $E_a$  olabilir.

Özet olarak, beton veya farklı beton karışımlarının tüm özellikleri için tek bir aktivasyon enerjisi değeri yoktur. Seçilen karışımdaki olgunluk kontrol parametresinin değeri matematiksel olarak ayarlanarak, olgunluk yönteminin uygulanmasına yönelik yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşımda, olgunluk maddi bir özellik olarak kabul edilmemekte, sıcaklık geçmişinden bağımsız olarak, ilgilenilen özellik ile en iyi korelasyonu sağlayan parametre olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmanın yeni çalışmalarla desteklenmesi halinde olgunluk kavramı tüm beton formülasyonları için çok daha etkin kullanılabilir duruma gelecektir.

V. Waller ve arkadaşları [142], olgunluk yönteminin Avrupa'da 20 yıllık kullanım geçmişindeki uygulamaları incelemiştir. Bu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemini kullanan programlardan da yararlanarak erken yaşlardaki beton çatlak kontrolünde olgunluk yönteminin kullanılması araştırılmıştır. Arrhenius yasasına dayanan olgunluk yöntemi, betonun basınç dayanımının gelişimini 20 °C karakterizasyonuna dayanarak tahmin etmeyi mümkün kılar. Fransız ulusal projesi CALIBE adı ile teknikte 20 yıllık iyileştirmeyi sentezleyen ve olgunluk yöntemini, betonun yerinde basınç dayanımını öngörmek için koruyucu bir şekilde kullanmanın yolunu gösteren bir el kitabı hazırladı.

Bu proje kapsamında gösterildiği gibi, sonlu elemanlar programı CESAR-LCPC gibi sayısal araçlar çimento esaslı malzemelerde çatlama riskini kontrol etmek için gereken özellikleri (young modülü, çekme dayanımı ve ısıl katsayısı) tahmin etmek için başarıyla uygulanabilir.

Yahia A. Abdel-Jawad ve arkadaşları [143], Nurse-Seul olgunluk yönteminin beton mukavemetini tahminini iyileştirmek için modifikasyonlar üzerine çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmada, farklı sıcaklıklarda kürleşen betonun basınç dayanımı hakkında daha iyi tahminler yapabilmek için Nursu Saul'un olgunluk fonksiyonu için iki değişiklik önerilmiştir. Değişiklikler, W/C oranının ve dayanım gelişiminin sıcaklığa bağlılığı ile sertleşme sıcaklığının uzun vadeli dayanım üzerindeki etkisine ilişkindir. Öngörülen değişikliklerin, Nurse-Saul olgunluk fonksiyonunu kullanarak beton mukavemetinin tahmini üzerindeki etkisi, iki farklı baz sıcaklık ve değiştirilmemiş Nurse-Saul denklemi kullanılarak yapılan tahmin ile karşılaştırılmıştır ( $T_0 = -10$  ° C ve  $T_0 = 0$  °C). Sonuçlar,

özellikle daha sonraki yaşlarda, önerilen modifikasyonların uygulanmasının farklı sertleştirme sıcaklıklarında beton dayanım tahmininin doğruluğunu arttırdığını göstermektedir.

Çalışmada eşdeğer yaş için W/C oranının etkisinin de hesaba katıldığı aşağıdaki eşitlik önerilmektedir.

$$t_e = \sum \left( \frac{T_a - T_0}{T_s - T_0} \right)^n \cdot \Delta t \quad (2.28)$$

$T_a$  belirli bir süre ( $t_1$ ) başka bir sıcaklıkta kürlenен betonun aynı dayanımını elde etmek için referans sıcaklıktaki ( $T_s$ ) eşdeğer yaşıdır. Burada  $n$  katsayısı W/C oranının etkisini aktarmak için kullanılan katsayıdır.

$$n = \frac{1}{1 - w/c^2} \quad (2.29)$$

Belirli bir kürlenme sıcaklığında ( $T_a$ ) belirli bir yaşta ( $t$ ) beton için elde edilen gerçek dayanım ( $T_a$ ) ile referans sıcaklık ( $T_s$ ) için önerilen yukardaki denklemi kullanılarak tahmin edilen dayanım arasındaki oran yapılan çalışmalardan yararlanılarak;

$$\frac{f_c(t, T_a)}{f_c(t_e, T_s)} = 1 - k \frac{T_a - T_s}{T_s} \quad (2.30)$$

Şeklinde verilmiştir. Buradaki  $k$  katsayısı için ise eşdeğer yaşa bağlı olarak;

$$k = 0.14(1 - e^{-0.1t_e}) \quad (2.31)$$

Eşitliği önerilmektedir. Tüm öneriler yapılan testlerden ve çalışmalardan elde edilen grafikler üzerinden önerilmiştir. Önerilen modifikasyonlar, çok çeşitli kürlenme sıcaklıkları için (5÷50 °C) farklı yaşlarda dayanımı tahmin etme doğruluğunu büyük ölçüde geliştirmektedir.

İ. B. Topçu ve arkadaşları [144], yukarda geniş özeti verilen Yahia a. Abdel-Jawad'ın “olgunluk metodu: daha sonraki yaşlarda beton mukavemetinin kestirimini iyileştirecek modifikasyonlar” konulu çalışmasını genişletmek ve önerilen modifikasyonlar üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, Nurse-Saul olgunluk fonksiyonu için farklı sıcaklıklarda kürlenен betonun basınç dayanımının daha iyi tahminlerini elde etmek için önerilen değişiklikler teyit edilmiştir. Modifikasyonlar, su/çimento oranının mukavemet

gelişiminin sıcaklığa bağlılığı ve küreme sıcaklığının olgunluk dayanımı üzerindeki etkisine ilişkindir. Bu tartışma, farklı sıcaklıklarda kürlen betonların mukavemet geliştirme davranışına odaklanmaktadır. Çimento esaslı malzemelerin mukavemet gelişimini anlayabilmek için literatürdeki harç ve beton numuneleri ile ilgili deneysel çalışmalar değerlendirilmiştir.

İ. B. Topçu ve arkadaşları [97], diğer çalışmalarında ince agrega kullanılması ve küreme sıcaklığının beton olgunluğuna etkisi üzerine eğilmiştir. Bu çalışma, yüksek sıcaklıkla küreme ile betonun erken dayanım kazanması ve kalıp söküm süresinin kısaltılması üzerinedir. Hızlandırılmış küreme sıcaklığı ve ince agreganın erken dayanım üzerindeki etkileri ile erken dayanım, 28 günlük dayanım ve dayanım-olgunluk arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Numune gruplarının her biri farklı periyotlarda (6 veya 18 saat) farklı sıcaklıklarda kürlenmiş, küremenin sonunda ve 28. günde küp basınç dayanımları belirlenmiş ve 28 günlük dayanımı önceden makul bir doğrulukla tahmin etmenin mümkün olduğu gösterilmiştir.

İ.B. Topçu ve C. Karakurt [145], farklı çimentolarla üretilen betonlarda olgunluk kavramını incelemiştir. Bu çalışmada deneysel çalışmalar ASTM C1074 standardına uygun olarak yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda ortam sıcaklığının betonun dayanım kazanma hızını doğrudan etkilediği gözlenmiş, farklı çimentolarda ise dayanım kazanma hızlarının farklı olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında beton numunelerinin yüksek sıcaklıklarda kürlenmesi halinde hızlı bir dayanım gelişimi gösterdiği ancak bu betonların nihai dayanımlarının normal koşullarda saklanan betonlara oranla daha düşük kaldığı görülmüştür. Olgunluk yöntemi kullanılarak benzer karışımlara sahip betonların kullanılacağı inşaatlarda, yerine yerleşmiş olan betonun hava koşullarına bağlı olarak nasıl bir dayanım gelişimi göstereceği belirlenebilecektir. Böylece kötü hava koşullarına maruz kalan betonların kalıp alma süreleri de bu yöntem sayesinde belirlenebilecek ve erken kalıp alınması nedeniyle ortaya çıkabilecek tehlikeli yapısal hasarların da önüne geçilmiş olacaktır.

Tahribatsız olarak beton dayanım tahmini yapılabilen bu yöntem ile 28 güne kadar betonların dayanımları hakkında da bilgi sahibi olmamız mümkün olmaktadır. Yapıda yerine yerleşmiş betonu hasarsız bir biçimde denetleme olanağını sağlayan olgunluk yönteminin kullanımında bazı sınırlama ve eksikliklere de dikkat edilmelidir. Günümüzde Olgunluk geçmişini takip etmemizi sağlayan olgunluk bilgisayarları ile yapıdaki betonun sıcaklık geçmişini kayıt altına alabildiğimiz gibi, cihazın bünyesinde

bulundurduğu olgunluk fonksiyonu ile de doğrudan dayanım tahmini yapılabilir. Ancak bu cihazların kullanımında yapıda kullanılmış beton ile cihazın kullandığı olgunluk fonksiyonu arasındaki karakteristik uyuma dikkat edilmelidir.

Wei-Chong Liao ve arkadaşları [146], betonun erken yaş dayanım tahmini için ortam bağıl nemini de dikkate alan bir olgunluk fonksiyonu konusunu incelemiştir. Bu çalışmada, betonun erken yaş dayanım gelişiminin yalnızca beton numunelerinin içinde ölçülen sıcaklığa bağlı olarak değil, aynı zamanda çevrenin bağıl nemini de dikkate alan, bir olgunluk yöntemiyle belirlenmesi önerilmektedir. Değişken yaş ve nem koşulları altında kürlenmiş beton silindirlerin erken yaşta basınç dayanımı kazancını tahmin etmek için, neme göre ayarlanmış bir sabit oran modeli ve neme göre ayarlanmış eşdeğer yaş geliştirilmiştir. Kalibrasyon testinde, beton örnekleri üç farklı sıcaklıkta ve dört farklı nemde kürlenmiştir. Aynı sıcaklıkta, ancak farklı nemlerde sertleşen beton silindirlerin sabit oranları karşılaştırılarak nem faktörü ölçülmüştür. Tahmin modelinin uygulanabilirliğini belirlemek için doğrulama programları (programlanmış sıcaklıkta ve bağıl nemde kürlenmiş, su banyolarına batırılmış, açık havada kurutulmuş ve açık havada hava ile kurutulan beton silindirler dahil) kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, bu yeni olgunluk fonksiyonunun, erken yaşlarda normal beton silindirlerin dayanım gelişimini, maksimum %10'luk bir farkla tahmin edebildiğini göstermektedir.

Min-Cheol Han ve arkadaşları [147], süper geciktirici katkı içeren betonun priz süresini tahmin etmek için olgunluk yöntemlerinin kullanılmasını incelemiştir. Bu çalışmada, çeşitli kür sıcaklıkları altında Süper Geciktirici Katkı (SRA) içeren betonun priz süresini belirleme yöntemi incelenmiştir. Priz süresini tahmin etmek için Pinto ve arkadaşlarının önerdiği görünür aktivasyon enerjisi ( $E_a$ ) kullanan eşdeğer yaş metodu uygulanmıştır. Arrhenius fonksiyonu kullanılarak elde edilen ilk ve son priz zamanlarındaki  $E_a$  değerleri farklı karışımlar için farklıdır. SRA içeriğine göre  $E_a$  Freisleben-Hansen ve Pedersen'in eşdeğer yaş fonksiyonu denkleminde uygulanmış ve eşdeğer yaşın kürlenme sıcaklığına bakılmaksızın neredeyse sabit olduğu gösterilmiştir. Bu makalede, SRA içeriğine ve kürlenme sıcaklığına göre eşdeğer yaş kullanılarak tahmin edilen priz süresi sunulmuştur. Tahmin edilen priz süresi ile ölçülen priz süresi arasında iyi bir uyum gözlemlenmiştir. Bu nedenle Pinto ve arkadaşları tarafından priz süresinin tahmin edilmesi için önerilen yöntem, SRA içeren betona uygulanabilir.

Geert De Schutter [148], erken yaşta betonun termo visko elastik davranışı için hidratasyon derecesi kavramı ve olgunluk yönteminin uygulanabilirliğini incelemiştir. Bu



çalışmasında, hidrasyon konsepti ve olgunluk yöntemi, erken yaşta betonun özelliklerini anlamak için genellikle iki rekabetçi yaklaşım olarak değerlendirilse de her iki yöntemin de esas olarak aynı sonuçları verdiği gösterilmiştir. Ayrıca, her iki yöntemin de erken yaştaki betonun gecikmeli mekanik davranışları için uygulanabilirliği (temel sünme ve gevşeme) de ana hatlarıyla açıklanmıştır. Bu şekilde, dayanım ve sertlik gelişimi için uygulanabilirlik ile birlikte, her iki yöntem de erken yaştaki betonun toplam termo-visko-elastik davranışının modellenmesi için geçerli araçlar olarak kabul edilebilir.

Volz, Charles K. ve arkadaşları [149], beton dayanımında olgunluk etkileri konusunu incelemiştir. Bu çalışmada, 30 °F (−1 °C), 70 °F (21 °C) ve 110 °F (43 °C) sıcaklıklardaki çeşitli kombinasyonlarda kürlemeye tabi tutulan beton için dayanım-olgunluk ilişkileri karşılaştırılmıştır. Olgunluk, sıcaklığı zamana göre bütünleyen popüler bir olgunluk denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Bu denklemin sonraki dayanımlar üzerine eklendikten sonra yaklaşık yedi saat içinde meydana gelen sıcaklıkların etkilerini düzgün bir şekilde hesaba katmadığı ortaya konmuş ve olgunluk denklemi eksiklikleri gösterilmiştir.

G. Turu'allo [150], farklı kür sıcaklıkları altındaki GGBS betonun erken yaş dayanım gelişimini incelemiştir. Bu çalışmada, Öğütülmüş Granüllü Yüksek Fırın Cürufu (GGBS) içeren beton karışımlarının, hızlı inşaat yapımında popülerlik kazanmamasının nedeninin, standart kür sıcaklığı altında erken yaş dayanımının yavaş gelişmesi olduğuna inanılmaktadır. GGBS'yi ekonomik, sürdürülebilirlik ve dayanıklılık gibi konularda kullanırken elde edilen faydalar tartışılmaktadır. Sadece Portland çimentosu betonuna dayalı olarak geliştirilen mevcut olgunluk yöntemlerinin doğruluğu, bu çalışmada incelenen GGBS betonun dayanımını tahmin etmek için değerlendirilmiştir. Modifiye Nurse-Saul (MNS) yöntemi olarak adlandırılan yeni bir yöntem, bu çalışmada betonun dayanım gelişimini tahmin etmek için yakın zamanda geliştirilmiştir. Bu yöntem hem Portland çimentosu hem de GGBS betonlarının dayanım gelişimini öngörmek ve eşdeğer karışım harçlarının ısı çıktısını tahmin etmek için kullanılabilir.

Subaşı [151], geçirgen kalıp kullanımının beton olgunlaşma sürelerine olan etkisini incelemiştir. Bu amaçla geçirgen ve geçirgen olmayan dört farklı yüzey özelliğinde perde duvar kalıbı kullanılmış ve C30 betonu dökülmüştür. Kalıplara dökülen betonlar ile laboratuvar ortamında kürlen betonların olgunluk indeksi değerlerindeki değişim 28 gün boyunca kaydedilmiştir. Betonların 1, 3, 7, 14 ve 28. günlerdeki basınç dayanımları ve olgunluk indeksleri belirlenerek geçirgen kalıp kullanımından dolayı beton olgunluk

indeksi ve basınç dayanımlarındaki değişim incelenmiştir.

Aynı beton karışımı kullanılmasına ve aynı şartlara maruz kalmasına rağmen kalıp farklılığından dolayı beton iç sıcaklıklarının değiştiği, kür havuzunda olgunlaştırılan referans numunelerin olgunlaşma değerlerine göre atmosfer şartlarında olgunlaşan betonların olgunluk indekslerinin daha düşük olduğu, geçirgen kalıplardaki betonların diğer kalıplara göre daha büyük olgunluk indekslerine sahip olduğu, geçirgen olmayan kalıpların olgunluk değerlerinin referans numuneye göre 7. günde ortalama %47, 28. günde %31 oranında daha küçük olduğu, geçirgen kalıplarda ise bu oranın geçirgen olmayan kalıplara göre %21 oranında daha küçük olduğu tespit edilmiştir.

Basınç dayanımı ve olgunluk indeksi belirlenmiş olan referans beton numune verileri kullanılarak yapılan regresyon analizi ile elde edilen denklem kullanılarak kalıplardaki betonların basınç dayanımları hesaplanmıştır. Yapılan değerlendirmelerde; zamana bağlı olarak beton basınç dayanımı değerlerindeki gelişimin farklı kalıplardaki betonlarda birbirinden farklı olduğu, geçirgen olmayan kalıplardaki betonların kür havuzunda olgunlaştırılan referans numuneye göre 1. günde ortalama %6, 14. günde %11, 28. günde %7 oranında küçük, geçirgen kalıpların ise 1. günde ortalama %2, 14. günde %7. günde ise %5 oranında küçük basınç dayanımı değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Zemdrain astarlı geçirgen kalıbın en büyük basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Özellikle betonarme yapı imalatını hızlandıran kalıp alma sürelerinin de geçirgen kalıp kullanımı ile kısaltmanın mümkün olduğu, böylece daha hızlı yapı imalatının gerçekleştirilebileceği öngörülmüştür.

Qi-ling Luo ve arkadaşları [152], ağırlıklı olgunluk teorisine dayalı çimento dayanımı için hızlandırılmış test yöntemi üzerine çalışmıştır. Bu çalışmada, ağırlıklı olgunluk teorisine dayanan standart test ekipmanı kullanılarak, 28 günlük çimento dayanımının tespiti için çimento sıcaklığı ve sertleşme yaşına göre yeni bir hızlandırılmış test yöntemi geliştirilmiştir. Sonuçlar, yeni yöntemin 28 günlük çimento dayanımını doğru bir şekilde tahmin edebileceğini göstermektedir (tahmin edilen değer) / (ölçülen dayanım) ortalaması 0,98'dir.

Bu çalışma kapsamında, ağırlıklı olgunluk yöntemi kullanılarak öngörülen dayanım değeri, mevcut hızlandırılmış test yöntemi olan JC/T 738-2004 yöntemine göre biraz daha iyidir. Test süresi sadece 48 saat olduğundan, yeni yapılan saha laboratuvarları için yerinde kalite kontrol aracı olarak geçmiş verileri olmadan kullanılabilir.

A.M. Kaburu ve arkadaşları [153], Kenya’da yaptıkları bir çalışmada beton kalite kontrolünde olgunluk yöntemi uygulamasını incelemiştir. Yöntemin İngiliz standartlarına (BS) göre hazırlanmış betona uygulanabilirliğini araştırmış ve ayrıca bir akışkanlaştırıcı katkının betonun dayanımı ve olgunluğu üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Biri Amerikan standartlarına göre (karışım A), ikisi de İngiliz standartlarına göre (karışım B ve C) üç karışım hazırlanmıştır. C karışımının işlenebilirliğini arttırmak için modifiye lignosülfonat kullanılmıştır, ancak İngiliz standartlarına göre oranlanan beton karışımı, Amerikan standartlarından ( $2342 \text{ kg/m}^3$ ), daha yoğun bir karışım ( $2400 \text{ kg/m}^3$ ) ile sonuçlanmıştır. Yapılan testler sonucunda betonun iç sıcaklığı (ve dolayısıyla hesaplanan olgunluğu) tüm karışımlar için aynı bulunmuştur. Bir akışkanlaştırıcı katkının eklenmesi veya farklı standartların kullanılmasının etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Bu bulgular şunları göstermektedir: Aynı W/C oranlarına sahip beton karışımları, bileşimden bağımsız olarak aynı dayanımı sağlar: ASTM C 1074, betonun Amerikan standartlarına göre ve katkıları olmadan hazırlandığı varsayımına dayanmasına rağmen, olgunluk yöntemi, İngiliz standartlarına göre hazırlanan beton ve bir katkının kullanılmasıyla hazırlanan betonun dayanımının yeterli bir doğrulukla tahminine olanak tanır.

Bu çalışmaya dayanarak Kenya'daki inşaat profesyonellerinin olgunluk yöntemini somut kalite kontrol aracı olarak kullanmalarını gerektiren bir politikanın oluşturulması önerilmektedir.

M. Soutsos ve arkadaşları [122], Nurse-Saul (NS), Rastrup(R), Weaver ve Sadgrove (WS), Freiesleben Hansen ve Pedersen (FHP) ve Hollanda Ağırlıklı Olgunluk (WM) fonksiyonlarının dayanım tahminlerini incelemiştir. Sahada kürlenene beton bloklar ile,  $50^\circ\text{C}$ 'de adyabatik ve izotermik sıcaklıklar kullanılarak kürlenene ve sertleşene betonların dayanımları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, 28 günlük nominal küp basınç dayanımı  $50 \text{ MPa}$  olan üç beton karışımı incelenmiştir. Birincisi standart bir Portland çimentosu karışımı, diğerleri ise uçucu kül ve öğütölmüş granül yüksek fırın cürufunun sırasıyla %30 ve %50 çimento yerine ikamesi ile oluşturulan betonlardır. Adyabatik veya izotermal testlerde meydana gelenler gibi yüksek erken yaş sıcaklıklarının dayanım tahminlerini olumsuz yönde etkilediği ve bunun, yüksek sertleşme sıcaklıklarının çok erken yaşlardan itibaren dayanım üzerindeki zararlı etkisine bağlı olduğu düşünülebilir.

Çeşitli olgunluk fonksiyonlarında dayanım tahminlerindeki farklılıkların temel nedeni, her birinde içsel kabul edilen yaş dönüşüm faktörüdür. Nurse-Saul, Weaver-Sadgrove ve Rastrup fonksiyonları karışımdan bağımsızdır. Sadece Arrhenius ve Hollanda ağırlıklı

olgunluk fonksiyonları karışıma özgü olgunluk yöntemleridir. Birinci grup, görünür aktivasyon enerjilerinin belirlenmesini gerektirirken, ikinci grup ağırlık faktörü C'nin belirlenmesini gerektirir.

Olgunluk fonksiyonlarının hiçbirisi, yüksek sertleşme sıcaklıklarının sonraki yaş dayanımı üzerindeki zararlı etkilerini açıklamamaktadır. Bu nedenle bu fonksiyonların tümü, sonraki yaş dayanım miktarını fazla abartmaktadır. Olgunluk fonksiyonlarında bu zararlı etkinin dikkate alınmasının hem erken hem de ileri yaşlarda dayanıklılık tahminlerini iyileştireceği düşünülmektedir.

M. Soutsos ve arkadaşları [154], yüksek kürlenme sıcaklıklarında iyileştirilmiş dayanım tahminleri için değiştirilmiş Nurse-Saul (MNS) olgunluk fonksiyonu önerisi üzerine çalışmıştır. Sertleşme sıcaklığı, harç karışımlarının basınç dayanımı gelişimini önemli ölçüde etkiler. Yüksek kürlenme sıcaklıkları çimento hidratasyonunu ve dolayısıyla erken yaşta basınç dayanımı gelişimini hızlandırır. Bununla birlikte, olgunluk fonksiyonlarındaki yaş dönüştürme faktörleri, özellikle Nurse-Saul fonksiyonununki gibi, bu ivmeyi hesaba katmak için yeterli değildir ve bu nedenle ek bir hızlanma faktörü gereklidir.

Hızlanma, belirli bir miktarda hidratasyon veya dayanım gelişimi yüzdesini daha küçük bir zaman aralığına sıkıştırır. Hidratasyonun hızlandırılması sonucunda dayanım gelişim oranı artmaktadır. Hızlanma faktörü sıkıştırma faktörüne eşit değildi. Bu nedenle, yüksek sıcaklıktaki reaksiyon, düşük sıcaklıktaki reaksiyondan daha fazla sıkıştırma kuvvetine katkıda bulunmada daha az etkili olmuştur. Somut dayanıklılık ile hızlanma ve sıcaklık verimliliği faktörleri ile birleştirilen Nurse-Saul olgunluk endeksi arasındaki ilişki, standart 20 °C kürlenme sıcaklığı dışındaki dayanım gelişimini tahmin etmek için yinelemeli bir prosedürde kullanılmıştır.

## **2.7. OLGUNLUK YÖNTEMİNİN UYGULAMA ALANLARI**

Olgunluk yöntemi kalıpların alınması, öngerme elemanına artgerme işlemi uygulanması, soğuk hava korumasının bitirilmesi, taşıt yollarının trafiğe açılması gibi kritik yapıım aktivitelerinin gerçekleştirildiği durumlarda betonun yerindeki dayanımının belirlenmesinde kullanılır. Standart olmayan sıcaklık koşulları altında saklanan laboratuvar numunelerinin dayanımlarının belirlenmesinde bu yöntemden yararlanılır. Olgunluk yönteminin sınırları bulunmaktadır. Bunlar;

- i. Beton, çimento hidratasyonunun gerçekleşebileceği koşullarda korunmalıdır,
- ii. Olgunluk yöntemi, erken yaştaki beton sıcaklığının uzun süreli son dayanım üzerine etkilerinin hesaplanmasında kullanılamamaktadır,
- iii. Bu yöntemde, beton karışımlarının potansiyel dayanımları diğer parametrelerle birlikte kullanılmalıdır [110].

Mayers, Amerika Birleşik Devletleri Texas eyaletinde Houston ve San Angelo kentlerinde, 249 numaralı devlet yolunda inşa edilen iki viyadükte kullanılan yüksek kaliteli betonların dayanım gelişimini, olgunluk yöntemiyle inceleyen bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada olgunluk ölçer cihazın termokopulları betonarme elemanların kritik noktalarına yerleştirilmiştir. Yüksek kaliteli betonunun çimento oranı fazla olduğundan viyadük elemanlarında yer yer çimentonun hidratasyonu nedeniyle 67 °C'ye varan ısı artışları gözlenmiştir. Çalışmada ASTM C 1074 standardında belirtilen kriterler ışığında laboratuvar deneyleri yapılmış ve olgunluk fonksiyonu kullanılarak betonun dayanım tahmini yapılmıştır. Mayers yaptığı deneyler sonunda  $\pm 10$  yaklaşıklıkta olgunluk yöntemiyle beton dayanımının tahmin edilebildiğini belirterek olgunluk yönteminin otoyol inşaatlarında kullanılabileceğini söylemiştir [155]. Olgunluk yöntemi inşaatlarda kullanılarak şu avantajlar sağlanır:

- i. İnşaat işlemlerinin hızlı bir dizi halinde yapılması,
- ii. Çevre için oluşabilecek güvenlik risklerinin azaltılması,
- iii. Kamuya daha az rahatsızlık verilmesi,
- iv. Azaltılmış inşaat kontrol giderleri,
- v. Çabuk dayanım kazanan beton karışımlarına olan gereksinimin azalması [156].

Bunun yanında çok sayıda literatür göz önüne alındığında olgunluk yöntemi ısı ile sertleşen hidrolik bağlayıcılar ve bunlarla birlikte polimer beton kompozitlerin de erken yaş dayanım gelişmelerini modellemek için kullanılmaktadır. Kompozit matrisin aktivasyonu sonucu ortaya çıkan ısıнын gelişmiş elektronik teknikler ile izlenmesi sonucu dayanım gelişim modelleri ortaya konabilmektedir. Bu modellemeler ortaya çıkan ısı ve bu ıyı etkileyen çok sayıda değişken nedeniyle görüldüğünden çok daha karmaşıktır. Bu karmaşık yapı modern teknoloji ile anlaşılır modellere dönüştürülebilmektedir. Böylece yeni hidrolik bağlayıcılar geliştirmek, kimyasal katkıların erken dayanım ve eşdeğer yaş üzerine etkilerini araştırmak, sahadaki uygulamalarda beton dayanımlarını kontrol ederek

teorik modeller ile gerçek uygulamaları çakıştırmak amaçlı olarak olgunluk kavramından yararlanmak mümkündür.

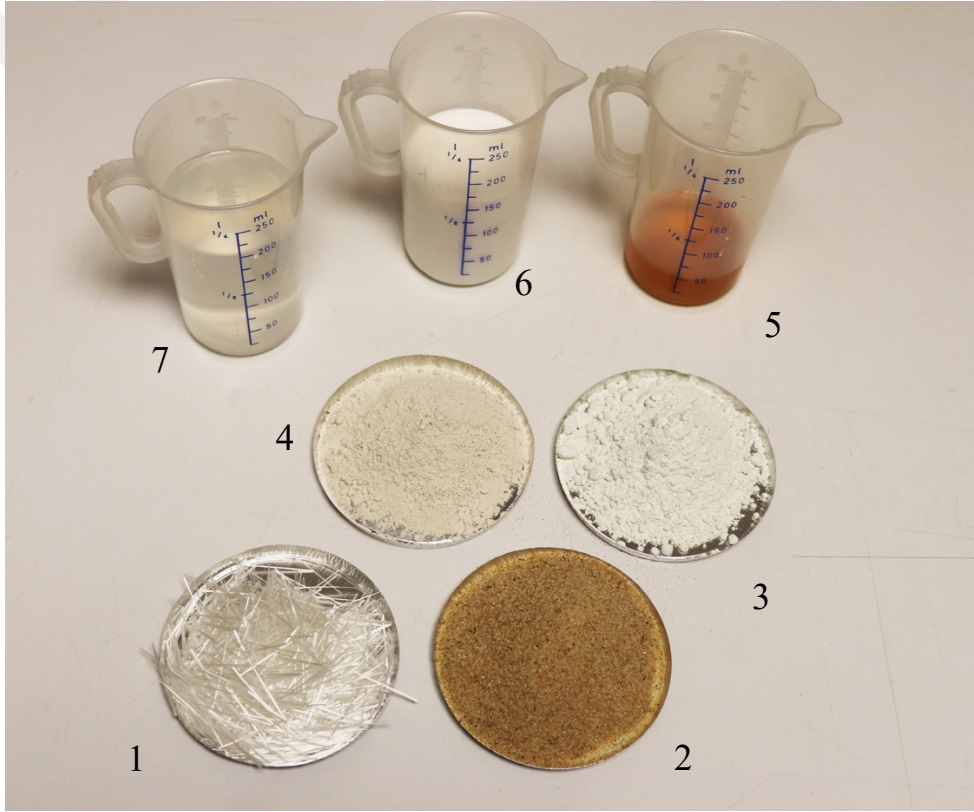
Erken yaş dayanımlarının gelişimi yanında hidratasyon sırasında oluşan büzülme zamanının takip edilmesi ve bu zamanın anlık takibi ile bzlmeye bağlı gelişebilecek çatlakların ve zararlı gerilmelerin yönetilmesi mümkün olabilecektir. Özellikle prekast sektöründe bu yönde çalışmaların arttırılması ile karmaşık geometrili ürünlerin beton kompozit olarak üretilmesi esnasında kalıp içinde oluşan büzülme kaynaklı gerilmeler için önlem almak mümkündür. Olgunluk-büzülme ilişkisi üzerine çalışmalar yaparak bu konunun incelenmesi önemli yararlar sağlayacaktır.



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. MATERYAL

Bu çalışmada deneye tabi tutulan GRC-CTB numuneler için kullanılan karışım Premix GRC-CTB olarak üretilmiştir. GRC-CTB özelliklerinin belirleneceği deney numuneleri üretimi konusunda detaylı açıklama yöntem bölümünde verilmiştir. Premix GRC-CTB üretiminde kullanılan çimento, agrega (silis kumu), mineral (metekaolin) AR cam lifi (12 mm kesilmiş), akrilik polimer, hiper akışkanlaştırıcı katkı ve su ile ilgili teknik bilgiler ve analiz çalışmaları aşağıda detaylı olarak anlatılmaktadır. Kullanılan malzemelere ait görsel Şekil 3.1’de sunulmuştur.



Şekil 3.1. Kullanılan malzemeler; AR cam lifi (1), agrega (2), çimento (3), metakaolin (4), akışkanlaştırıcı (5), akrilik polimer (6), su(7).

##### 3.1.1. Çimento ve Özellikleri

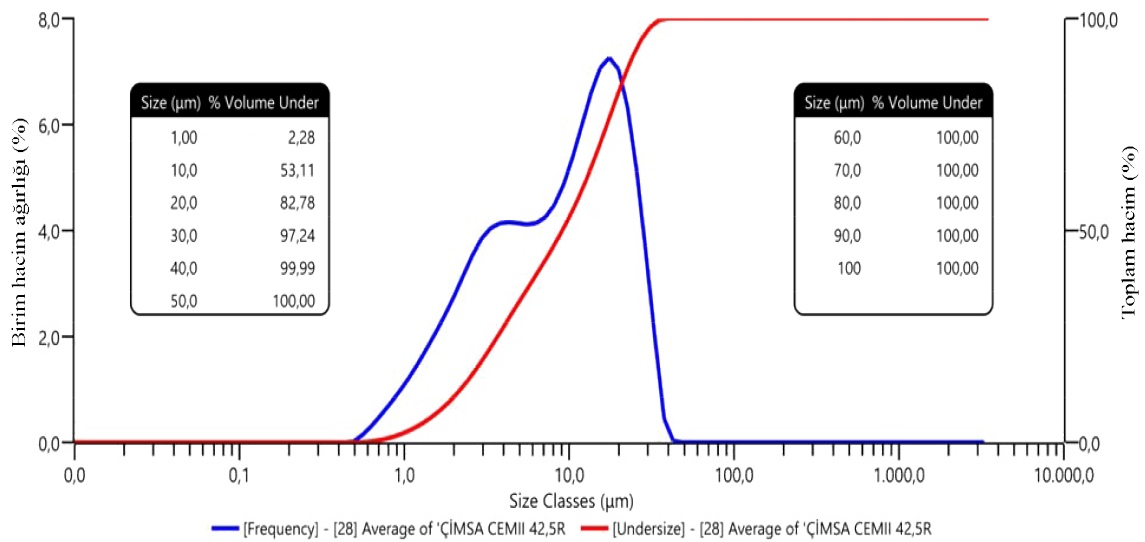
Bu çalışmada TS EN 197-1 ile uyumlu CEM II/B-L 42,5R Beyaz Portland Kalkerli Çimento kullanılmıştır. Çimsa Çimento San. A.Ş. tarafından üretilen çimento, cam lifi takviyeli beton üretimi için uygundur. Çimentoya ait kimyasal analiz sonuçları Eskişehir



Çimsa Çimento San. A.Ş.'de yer alan, X-Işını Floresans (XRF) cihazı ile belirlenmiş olup Çizelge 3.1'de verilmiştir. Lazer tane dağılımı analizleri Fibrobeton A.Ş.'de yer alan Laser Particle Sizer cihazı ile belirlenmiştir. Lazer tane dağılımı analizi sonuçları Şekil 3.2'de, çimentoya ait görsel ise Şekil 3.1'de verilmiştir. Kullanılan malzeme Fibrobeton A.Ş.'den temin edilmiştir.

Çizelge 3.1. Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri.

| Bileşen                        | Miktarı (%) |
|--------------------------------|-------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 17.46       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.27        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.21        |
| CaO                            | 63.04       |
| MgO                            | 1.67        |
| K <sub>2</sub> O               | 0.34        |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.30        |
| SO <sub>3</sub>                | 3.02        |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.04        |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.09        |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.0021      |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.0042      |
| Kızdırma Kaybı                 | 11.00       |



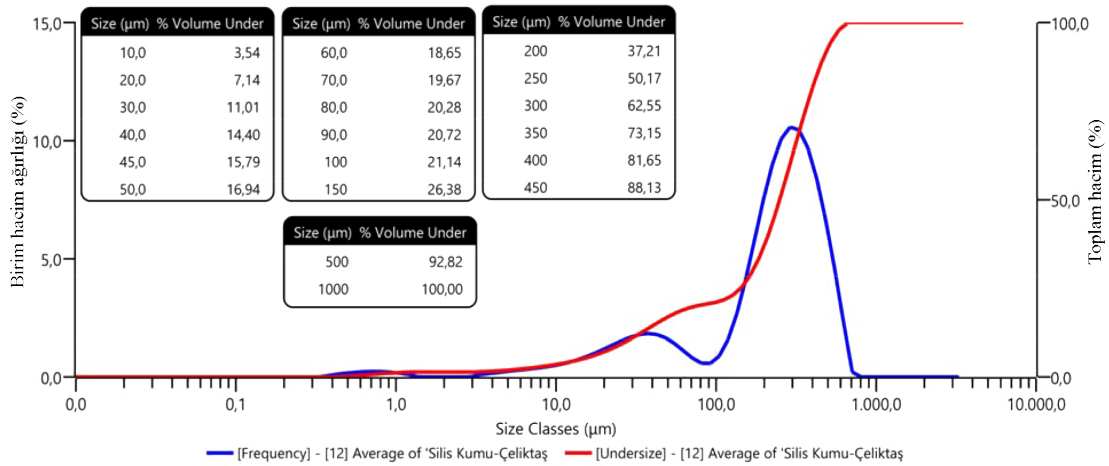
Şekil 3.2. Kullanılan çimentoya ait lazer tane dağılımı analizi sonuçları.

### 3.1.2. Agregaya ve Özellikleri

Bu çalışmada agregaya olarak GRC-CTB üretimine uygun silis kumu kullanılmıştır. Kullanılan agregalar Çeliktaş A.Ş. 'den temin edilmiştir. Agregaya ait kimyasal analiz sonuçları Eskişehir Çimsa Çimento San. A.Ş.'de yer alan, XRF cihazı ile belirlenmiş olup Çizelge 3.2'dedir. Agreganın lazer tane dağılımı analizleri Fibrobeton A.Ş.'de bulunan Laser Particle Sizer cihazı ile belirlenmiştir. Analiz sonuçları Şekil 3.3'de, agregaya ait görseller ise Şekil 3.1'de görülmektedir.

Çizelge 3.2. Kullanılan agreganın kimyasal özellikleri.

| Bileşen                        | Miktarı (%) |
|--------------------------------|-------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 98.57       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.00        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.17        |
| CaO                            | 0.29        |
| MgO                            | 0.00        |
| K <sub>2</sub> O               | 0.16        |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.00        |
| SO <sub>3</sub>                | 0.00        |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.01        |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.12        |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.0137      |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,0029      |
| Kızdırma Kaybı                 | 0,39        |



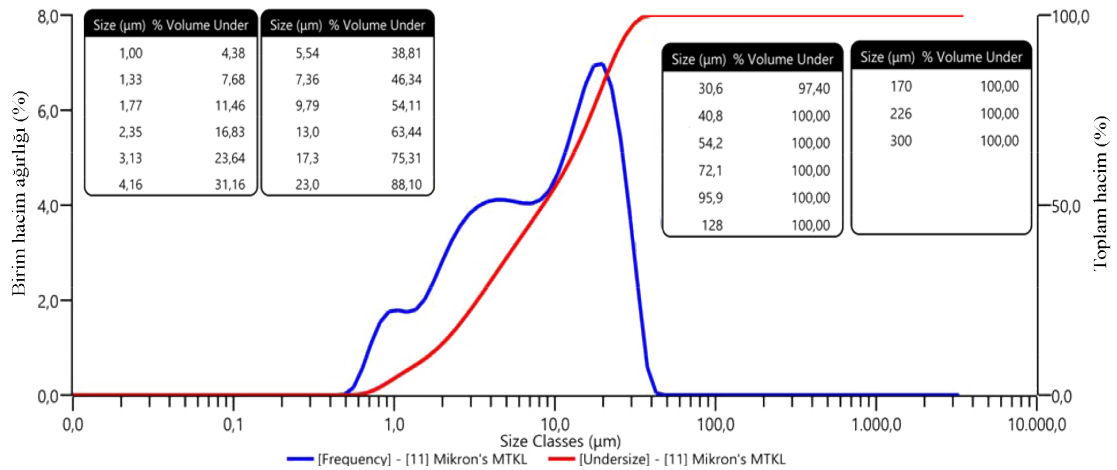
Şekil 3.3. Agregaya ait lazer tane dağılımı analiz sonuçları.

### 3.1.3. Metakaolin (MTK) ve Özellikleri

Bu çalışmada GRC-CTB üretiminde kullanıma uygun Metakaolin (MTK) kullanılmıştır. Kullanılan malzeme Fibrobeton Düzce tesislerinden temin edilmiştir. Metakaoline ait kimyasal analiz sonuçları Eskişehir Çimsa Çimento San. A.Ş.'de yer alan, XRF cihazı ile belirlenmiş olup Çizelge 3.3'dedir. MTK'nın lazer tane dağılım analizleri Fibrobeton A.Ş.'de yer alan Laser Particle Sizer cihazı ile belirlenmiş ve sonuçları Şekil 3.4'dedir. Metakaoline ait görsel ise Şekil 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Kullanılan metakaolinin kimyasal özellikleri.

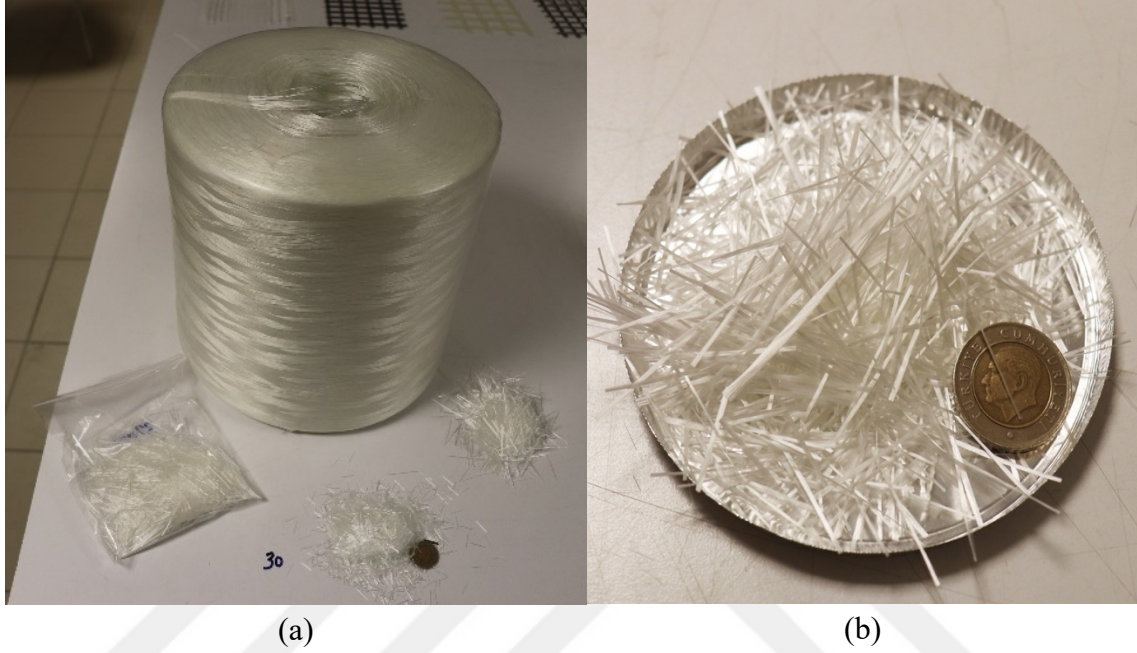
| Bileşen                        | Miktarı (%) |
|--------------------------------|-------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 59.78       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10.23       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.44        |
| CaO                            | 9.91        |
| MgO                            | 1.59        |
| K <sub>2</sub> O               | 0.90        |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.05        |
| SO <sub>3</sub>                | 1.25        |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.04        |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.15        |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.0186      |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.0077      |
| Kızdırma Kaybı                 | 16.24       |



Şekil 3.4. Kullanılan metakaoline ait lazer tane dağılımı analiz sonuçları.

### 3.1.4. AR Cam Lif ve Özellikleri

Kullanılan Alkali Dürençli (AR) cam lifleri Nippon firmasına ait olup Fibrobeton A.Ş.'den tedarik edilmiştir. Kullanılan liflere ait görseller Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Liflerin fiziksel özellikleri Çizelge 3.4'te kimyasal özellikleri ise Çizelge 3.5'te belirtilmiştir.



Şekil 3.5. AR cam lif bobini (a) ve kullanılan kırılmış lifler (b).

Çizelge 3.4. AR cam lifinin fiziksel özellikleri [38].

|                        |                                    |
|------------------------|------------------------------------|
| Görünüm                | Beyaz cam lifi, katı               |
| Koku                   | Kokusuz                            |
| Erime noktası          | (Yumuşama noktası) Yaklaşık, 820°C |
| Sudaki çözünürlük      | Çözünmez                           |
| Spesifik yoğunluk      | 2.8 kg/lt                          |
| Stabilite              | Normal koşullarda kararlı          |
| Tex Sayısı             | 2543 (2500±250)                    |
| Nem içeriği            | %0.04 (max 0.5)                    |
| Gerilme direnci        | 0.494 N/tex (min 0.245)            |
| Kızdırma kaybı         | %1.22 (1.2±0.3)                    |
| ZrO <sub>2</sub> oranı | %17.2 (min 16.0)                   |

Çizelge 3.5. AR cam lifinin kimyasal özellikleri [38].

| Bileşen                                                                 | Miktarı (w%) |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------|
| SiO <sub>2</sub>                                                        | 54-65        |
| ZrO <sub>2</sub>                                                        | 16-24        |
| RO (MgO+CaO)                                                            | 0-10         |
| MgO                                                                     | -            |
| CaO                                                                     | -            |
| TiO <sub>2</sub>                                                        | 1-7          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                          | 0-2          |
| R <sub>2</sub> O (Li <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O) | 10-30        |
| Li <sub>2</sub> O                                                       | -            |
| Na <sub>2</sub> O                                                       | -            |
| K <sub>2</sub> O                                                        | -            |

### 3.1.5. Akışkanlaştırıcı ve Özellikleri

Kullanılan polikarboksilat eter esaslı akışkanlaştırıcı katkı Fibrobeton A.Ş.'den tedarik edilmiştir. Akışkanlaştırıcının fiziksel özellikleri Çizelge 3.6'da görseli ise Şekil 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.6. Kullanılan akışkanlaştırıcının fiziksel özellikleri [157].

| Görünüm                   | Açık kahverengi sıvı          |
|---------------------------|-------------------------------|
| Koku                      | Karakteristik                 |
| Toplam katı madde içeriği | %55 (w/w), yaklaşık           |
| pH (seyreltilmemiş)       | 2.5                           |
| Spesifik yoğunluk         | 1.11 g/cm <sup>3</sup> (25°C) |
| Viskozite                 | 500 cps (25 °C)               |
| Erime noktası             | -10 °C                        |

### 3.1.6. Akrilik Polimer ve Özellikleri

Kullanılan Vinil akrilik kopolimer sulu çözeltisi Fibrobeton A.Ş.'den tedarik edilmiştir. Akrilik Polimerin fiziksel özellikleri Çizelge 3.7'de görseli ise Şekil 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Kullanılan akrilik polimerin fiziksel özellikleri [158].

|                  |                                    |
|------------------|------------------------------------|
| Görünüm          | Sıvı                               |
| Renk             | Beyaz                              |
| Koku             | Karakteristik                      |
| Kaynama noktası  | 100 °C                             |
| Parlama noktası  | 60 °C                              |
| 20°C’de yoğunluk | Yaklaşık 1.0-1.1 g/cm <sup>3</sup> |
| Suda çözünürlük  | Ürün suda çözünür                  |
| 20°C’de pH       | 5-7                                |
| Katı madde oranı | %40-45                             |

### 3.1.7. Su ve Özellikleri

Deneylerde kullanılan su, Düzce havzasında toplanan kuyu suyudur. Kullanılan suya ait analizler Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezinde yapılmış olup sonuçları Çizelge 3.8’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.8. Kullanılan suya ait analiz sonuçları.

|                          | Numune değerleri | Birim | Analiz metodu     |
|--------------------------|------------------|-------|-------------------|
| Çinko                    | 0.025            | mg/L  | ISO 17294-1/2     |
| Fosfat                   | 11.11            | mg/L  | TS EN ISO 10304-1 |
| Klorür                   | 6.88             | mg/L  | TS EN ISO 10304-1 |
| Kurşun                   | 0.029            | mg/L  | ISO 17294-1/2     |
| Nitrat                   | 0.53             | mg/L  | TS EN ISO 10304-1 |
| PH                       | 8.04             |       | TS EN ISO 10523   |
| Sülfat                   | 0.07             | mg/l  | TS EN ISO 10304-1 |
| Toplam askıda katı madde | 2.0              | mg/L  | Gravimetric       |
| Organik madde            | 0.5              | mg/L  | Titration         |

## 3.2. YÖNTEM

### 3.2.1. Deneysel Çalışma Planı

Deneylerde kullanılan 4 karışımda da yukarıda özellikleri verilen malzemeler aşağıdaki

tabloya uygun şekilde hazırlanmıştır. Karışımlarda sadece lif oranları farklıdır. % 0, 1, 2, 3 oranlarda lif, 12 mm boyunda kesilmiş olarak kullanılmıştır. Metakaolin tüm karışımlarda çimento yerine ikame olarak kullanılmıştır. Çimento %10 azaltılarak yerine aynı oranda MTK eklenmiştir. Kullanılan karışım oranları Çizelge 3.9’da, deneysel çalışma planı ise Çizelge 3.10’da tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 3.9. Kullanılan karışım oranları tablosu.

|                               | N1    |       | N2    |       | N3    |       | N4    |       |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                               | kg    | %     | kg    | %     | kg    | %     | kg    | %     |
| Çimento                       | 9,00  | 38,30 | 9,00  | 37,91 | 9,00  | 37,53 | 9,00  | 37,16 |
| Metakaolin                    | 1,00  | 4,26  | 1,00  | 4,21  | 1,00  | 4,17  | 1,00  | 4,13  |
| Silis kumu                    | 10,00 | 42,55 | 10,00 | 42,12 | 10,00 | 41,70 | 10,00 | 41,29 |
| Hiper akışkanlaştırıcı (g)(%) | 0,032 | 0,136 | 0,032 | 0,134 | 0,042 | 0,175 | 0,042 | 0,173 |
| Akrilik polimer               | 0,30  | 1,28  | 0,30  | 1,26  | 0,30  | 1,25  | 0,30  | 1,24  |
| Su                            | 3,20  | 13,62 | 3,20  | 13,48 | 3,20  | 13,34 | 3,20  | 13,21 |
| AR Cam lifi miktarı           | 0,00  | 0,00  | 0,24  | 1,01  | 0,48  | 2,00  | 0,72  | 2,97  |
| AR Cam lifi oranı (Ağırlıkça) | %0    |       | %1    |       | %2    |       | %3    |       |
| Su çimento oranı              | %33   |       | %33   |       | %33   |       | %33   |       |

Çizelge 3.10. Deneysel çalışma planı ve üretilen numune adetleri.

| Lif türü | Lif oranları | Yayılma | Büzülme | 0,5,1,1,5, 2,3,5,7,14 ve 28. Günler | 1,2,3,5,7 14,28 ve 56. Günler | 1,2,3,5,7 14,28 ve 56. Günler | 28. Gün sonrası alınan numuneler |
|----------|--------------|---------|---------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
|          |              |         |         | 50x50x50                            | 20x50x325                     | 40x40x160                     | 50x50x50                         |
|          |              |         |         | Basınç                              | Eğilme                        | LEEB Sertliği                 | Yoğunluk                         |
| Lifsiz   | %0           | 3       | 1       | 30                                  | 48                            | 6                             | 3                                |
| AR-Cam   | %1           | 3       | 1       | 30                                  | 48                            | 6                             | 3                                |
|          | %2           | 3       | 1       | 30                                  | 48                            | 6                             | 3                                |
|          | %3           | 3       | 1       | 30                                  | 48                            | 6                             | 3                                |

### 3.2.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney numuneleri deney planına uygun olarak, karışım listesindeki oranlara göre



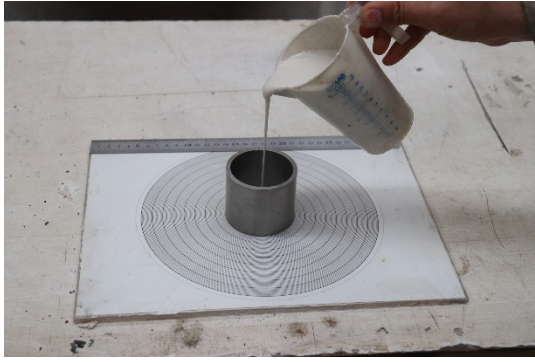
Fibrobeton A.Ş. Düzce laboratuvarında hazırlanmıştır. Tüm numuneler üretim talimatları ve ilgili standartlara uygun şekilde kontrollü olarak kalıplara dökülmüş ve kürlenmiştir. Şekil 3.6’da deney numunelerinin hazırlanması ve kürlenme aşamaları görünmektedir.



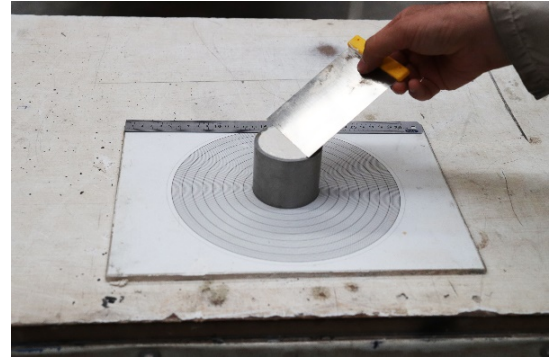
Şekil 3.6. Deney numunelerinin hazırlık aşamaları.

### 3.2.3. Slamp Testi

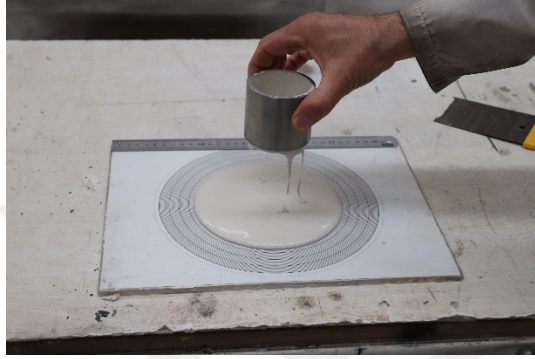
Slamp testi, TS EN 1170-1 Ön Yapımlı Beton Mamuller-Cam Lif Takviyeli Çimento (CTÇ) Deney Metodu-Bölüm 1: Matriks Kıvamının Ölçülmesi, “Slamp Deneyi” Metodu’na [48] göre taze haldeki betonun kıvam ve işlenebilirliği hakkında bilgi kazanmak amacıyla yapılmıştır. Slamp deneyi standarda uygun olarak yapılmış, içi boş silindir şeklindeki çelikten üretilmiş slamp halkası slamp okuma tahtasının ortasına yerleştirilerek hazırlanan taze betonla doldurulmuştur. Doldurma sonrasında üst kısmı ıspatula yardımı ile düzeltilmiş ve fazlalık beton sıyrılmıştır. Slamp halkası yukarı yönde dik bir açı ile kaldırılarak betonun kendi ağırlığıyla yayılması sonrasında okuma yapılmış harcın kıvamı hakkında bilgi elde edilmiştir. Deney görselleri Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



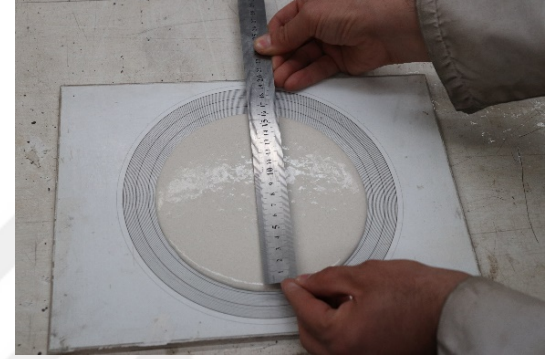
(a) Slamp halkasının doldurulması.



(b) Halkanın üst yüzeyinin düzeltilmesi.



(c) Halkanın kaldırılması.



(d) Yayılma çapının ölçülmesi.

Şekil 3.7. Slamp deneyinin yapılışına dair görseller.

### 3.2.4. Yoğunluk Testi

Yoğunluklar, TS EN 1170-6 Ön Yapımlı Beton Mamuller-Cam Lif Takviyeli Çimento (CTÇ) Deney Metodu-Bölüm 6: Suyu Daldırma Yoluyla Su Emme Ve Kuru Yoğunluk Tayini'ne [159] göre belirlenmiştir. Her numunenin boyutu standarda uygun olarak ölçülüp hacimler (V) hesaplanmıştır. Numune suyun içine daldırılıp yaklaşık 7 gün suda bekletilmiştir. Daha sonra fırının içinde 110 °C sıcaklıkla sabit ağırlığa ulaşana kadar 7 gün boyunca ısıtılmıştır. Fırından alınıp oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra ağırlığını ölçülmüştür ( $m_d$ ). Devamında numunelerin denklem (3.1)'deki gibi kuru kütle yoğunluğu ( $\rho$ ) g/cm<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır.

$$\rho = \frac{m_d}{V} \cdot 1000 \quad (3.1)$$

### 3.2.5. LEEB Sertlik Deneyi

GRC-CTB ürünlerde normal betonlarda kullanılanlardan daha düşük enerjili bir sertlik ölçüm yöntemine ihtiyaç olduğu değerlendirilmiş ve bu nedenle GRC-CTB kabuklar için daha düşük darbe enerjisine sahip olan ancak genelde metalik malzemelerin sertlik



ölçümünde kullanılan LEEB sertlik ölçüm cihazının kullanılmasına karar verilmiştir. Numunelerin sertlik değerleri ASTM-A956 Çelik Ürünleri için Leeb Sertlik Testi Standart Test Yöntemi'ne [160] göre tespit edilmiştir. 40x40x160 mm boyutlarındaki numunelerin zamanla göstereceği sertlik artışları için 1, 2, 3, 5, 7, 14, 28 ve 56 günlük dayanımları Şekil 3.8'deki gibi Fibrobeton A.Ş. tesislerinde ölçülmüştür.



(a) Deney cihazı.



(b) Test numunesi (40x40x160 mm).



(c) Testin numune üzerinde uygulanması.

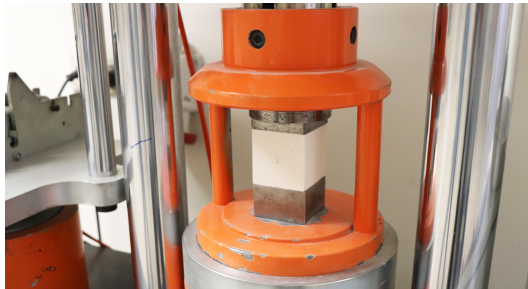


(d) Test Sonucu.

Şekil 3.8. LEEB sertlik deneyine ait görseller.

### 3.2.6. Basınç Dayanımı Deneyi

Deney numuneleri TS EN 196-1 Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım Tayini [161] standardına göre yapılmıştır. Her bir karışımın basınç dayanımının tayini için 50×50×50 mm'lik küp numuneler üretilmiştir. Numunelerin zamanla göstereceği dayanım artışları için 0,5, 1, 1.5, 2, 3, 5, 7, 14 ve 28 günlük dayanımları Fibrobeton A.Ş.'de ölçülmüştür. Yapılan basınç dayanım deneylerine dair görseller Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



(a) Deney cihazı.



(b) Testin numune üzerinde uygulanması.

Şekil 3.9. Basınç dayanımı deneyine dair görseller.



(c) Testin numune üzerinde uygulanması. (d) Testin numune üzerinde uygulanması.

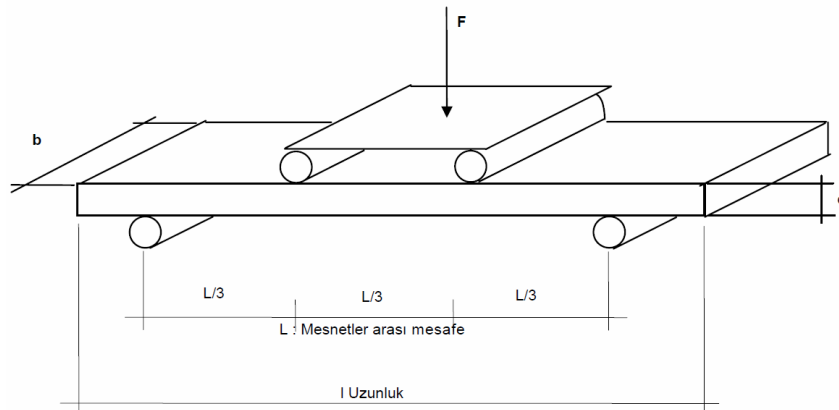
Şekil 3.9. (devam) Basınç dayanımı deneyine dair görseller.

### 3.2.7. Eğilme Dayanımı Deneyi

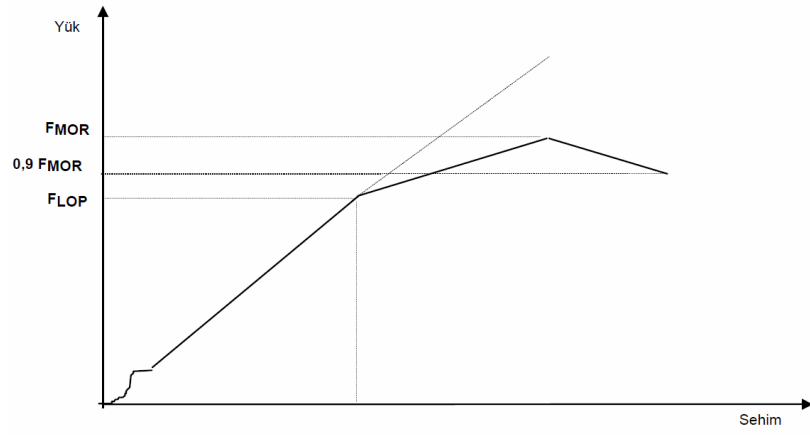
Numunelerin eğilme dayanımları TS EN 1170-4 Ön Yapımlı Beton Mamuller-Cam Lif Takviyeli Çimento (CTÇ) Deney Metodu-Bölüm 4: Eğilme Dayanımı Tayini "Basit Eğilme Deneyi" Metodu'na [162] göre tespit edilmiştir. Numunelerin zamanla göstereceği dayanım artışları için 1, 2, 3, 5, 7, 14, 28 ve 56 günlük dayanımları Fibrobeton A.Ş.'de Şekil 3.12'deki gibi ölçülmüştür. Deneyin sonucunun hesaplanmasında (3.2) ve (3.3) denklemleri kullanılmıştır [163]. Deneyin yapılışına ait şematik görsel Şekil 3.10'da, örnek yük/sehim eğrisi ise Şekil 3.11'de belirtilmiştir.

$$\sigma_{LOP} = \frac{F_{LOP} \cdot L}{b \cdot d^2} \quad (3.2)$$

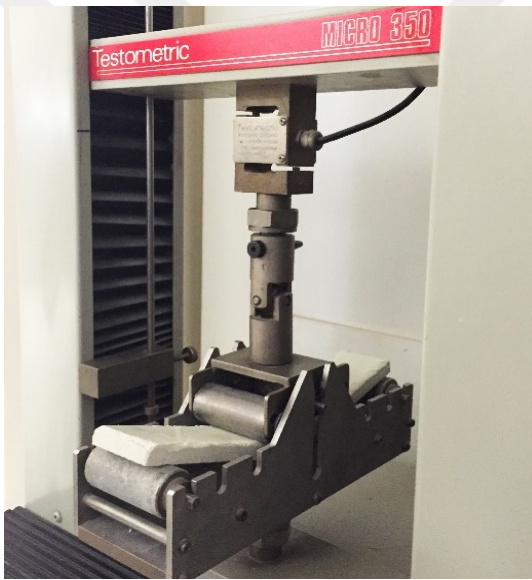
$$\sigma_{MOR} = \frac{F_{MOR} \cdot L}{b \cdot d^2} \quad (3.3)$$



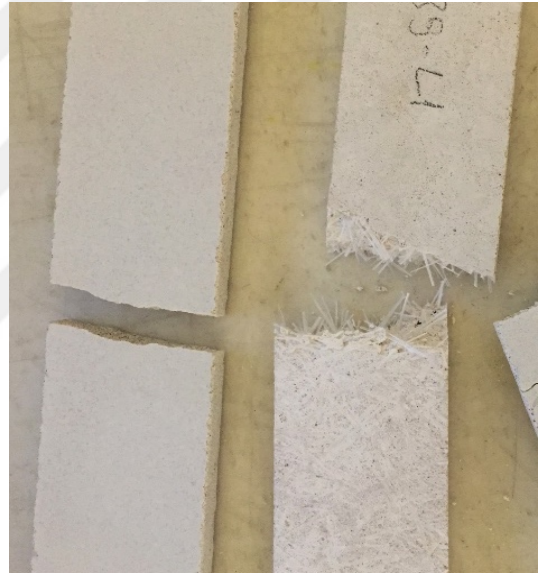
Şekil 3.10. Yapılan deneyin şematik gösterimi [163].



Şekil 3.11. Yük/sehim eğrisinin örneği [163].



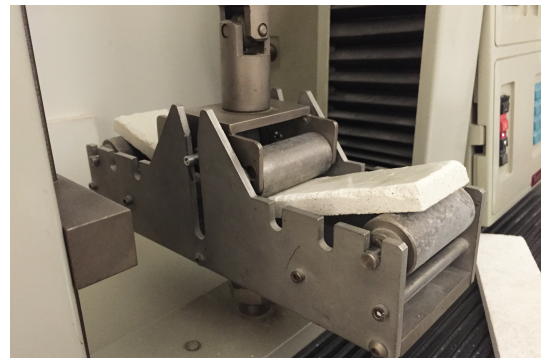
(a) Deney cihazı.



(b) Deney sonrası numuneler.



(c) Testin numune üzerinde uygulanması.



(d) Testin numune üzerinde uygulanması.

Şekil 3.12. Eğilme dayanım deneyine ait görseller.



### 3.2.8. Erken Yaş Büzülme Deneyi

Büzülme testi, ASTM D 2732 Unrestrained Linear Thermal Shrinkage of Plastic Film and Sheeting [164] metoduna uygun olarak yapılmıştır. Ölçümler iki gün boyunca yapılarak erken yaş değerler elde edilmiştir. Her iki yöndeki büzülme oranı (3.4)'de verilen denkleme göre her farklı lif oranı için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Deney Fibrobeton A.Ş.'de yer alan büzülme cihazında yapılmıştır. Deneyin yapılaşa dair görsel Şekil 3.13'de verilmiştir.

$$\text{Büzülme Oranı (\%)} = \frac{L_0 - L_f}{L_0} \cdot 100 \quad (3.4)$$

Formülde:

$L_0$  = İlk uzunluk

$L_f$  = Büzülme sonrası uzunluğu, ifade etmektedir.



Şekil 3.13. Büzülme deney cihazı test aşaması.

### 3.2.9. Olgunluk Deneyi

Deney numuneleri NEN-5970 Taze Beton Dayanımının Olgunluk Yöntemi ile Belirlenmesi [120] standardına göre yapılmıştır. Her bir karışımın olgunluk değeri tayini içi numuneler üretilmiştir. Numunelerin zamanla göstereceği dayanım artışları farklı günlük dayanımları ölçülmüştür. Yapılan olgunluk testleri Fibrobeton A.Ş.'de yer alan olgunluk cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3.14). Cihaza ait yazılım aşağıdaki (3.5) nolu denklem ile ağırlıklı olgunluk hesaplanmasına imkan sağlar. Cihaza ait olan 4 adet sensör ile bir projenin farklı zamanda, farklı yerlerinden farklı derinliklerde sıcaklık, ağırlıklı olgunluk ve betonun basınç dayanımı otomatik olarak hesaplanır.

$$R_g = \frac{10(C^{(0,1T-1,245)} - C^{(-2,245)})}{\ln C} \quad (3.5)$$

Formülde;

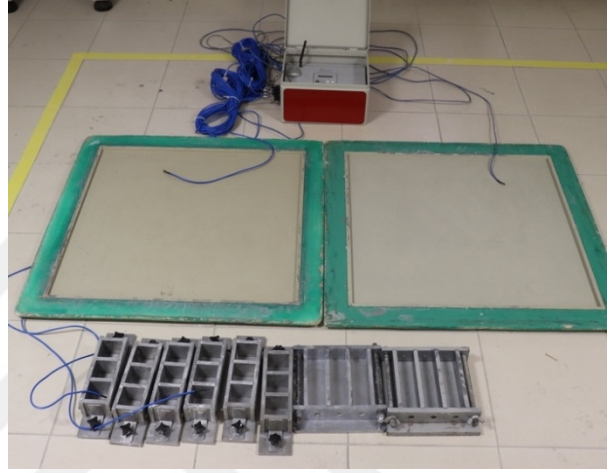
$R_g$ : 1 saatlik sürede hesaplanan ağırlıklı olgunluk ( $^{\circ}\text{C}$ -saat olarak),

$T$ : İlgili saatteki ortalama beton sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$  olarak),

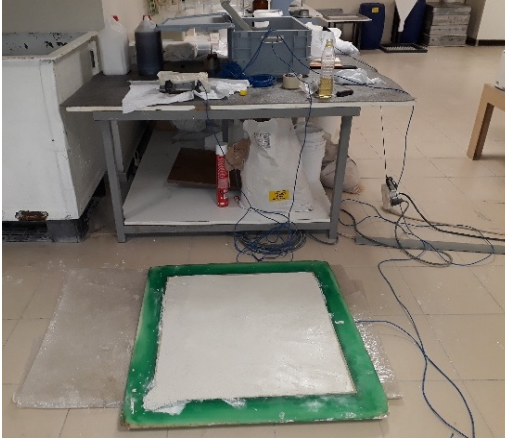
$C$ : Kullanılan bağlayıcı malzemenin  $C$  değeri, ifade etmektedir.



(a) Deney cihazı.



(b) Test için numunelerin hazırlanması.



(c) Deneyin uygulanması.



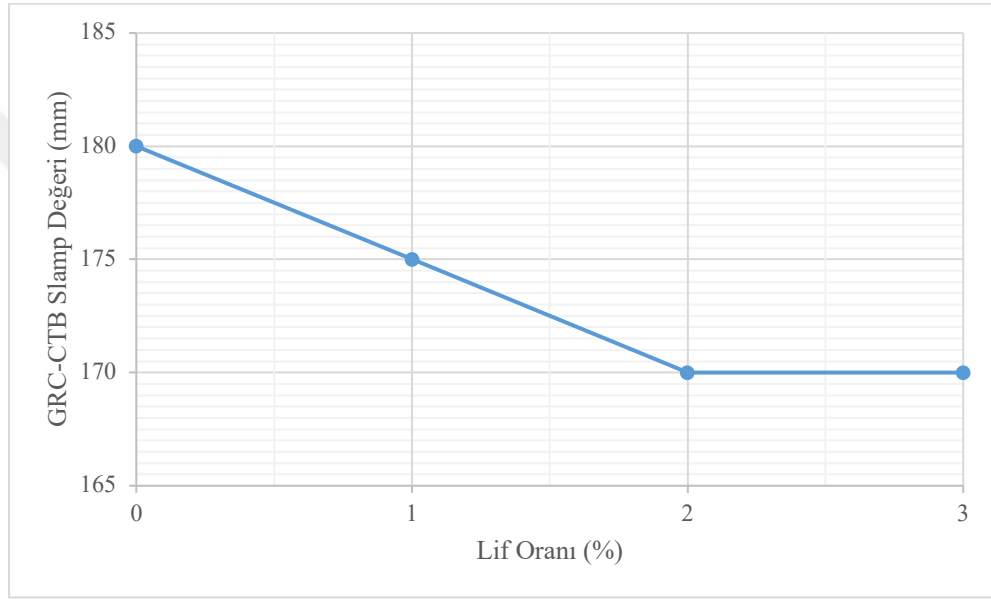
(d) Şantiyede olgunluk deneyinin yapılışı.

Şekil 3.14. Olgunluk deneyine ait görseller.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

### 4.1. SLAMP TESTİ SONUÇLARI

%0, 1, 2 ve 3 olmak üzere dört farklı lif oranında hazırlanan GRC-CTB karışımlarının işlenebilirliğini belirlemek amacıyla TS EN 1170-1 standardına göre yapılan slamp testi sonuçlarına ait grafik Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Farklı lif oranlarına göre slamp testi sonuçları.

Deney sonuçları değerlendirildiğinde karışım içerisindeki lif miktarı arttıkça slamp değerlerinin azaldığı, dolayısıyla işlenebilirlikte azalmaların gözlemlendiği görülmüştür. Lif takviyesiz karışımda, slamp testi sonucundaki yayılma çapı ortalama 180 mm olarak okunurken %1, 2 ve 3 oranında lif takviyeli betonlarda lifsiz karışıma göre slamp değerlerinin sırasıyla %3, %6 ve %6 oranında azalma gösterdiği tespit edilmiştir. Literatürde; Wafa [165], Rao ve Kumar [166], Mocekis ve ark. [167], Abe ve ark. [168] yapmış olduğu çalışmalarda da lif miktarı artışıyla ters orantılı olarak işlenebilirlikte azalmaların olduğu görülmektedir. Deneysel çalışmalar sırasında %2’lik lif oranı katıldığında slamp değerlerinde aşırı düşme olduğundan karışım içerisinde kullanılan hiper akışkanlaştırıcı miktarı %0,13’ten %0,17’ye yükseltilerek slamp değeri 170 mm de sabitlenmiştir.

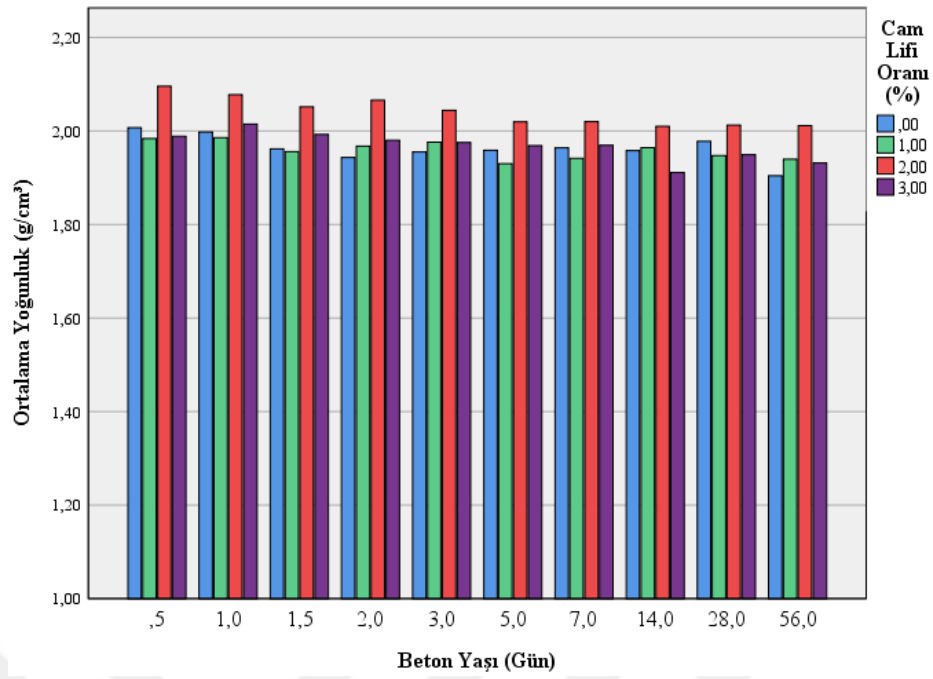


## 4.2. YOĞUNLUK TAYİNİ

Farklı oranlarda cam lifi ile takviye edilerek hazırlanan beton numuneleri üzerinde 0,5, 1, 1,5, 2, 3, 5, 7, 14, 28 ve 56. günlerde yapılan basınç dayanımı deneyleri öncesinde tüm numunelerin yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen yoğunluk değerlerine ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Ayrıca ortalama yoğunluk değerlerini gösteren bar grafik Şekil 4.2’de görülmektedir.

Çizelge 4.1. Yoğunluk değerlerine ait açıklayıcı istatistikler.

| Lif oranı (%) | Beton yaşı (gün) | N | Ortalama yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | Std. Sapma | Std. Hata | %95 Güven aralığında ortalamanın |            | Minimum | Maksimum |
|---------------|------------------|---|----------------------------------------|------------|-----------|----------------------------------|------------|---------|----------|
|               |                  |   |                                        |            |           | Alt Sınırı                       | Üst sınırı |         |          |
| 0             | 0,5              | 3 | 2,01                                   | 0,0207     | 0,0119    | 1,96                             | 2,06       | 1,99    | 2,03     |
|               | 1,0              | 3 | 2,00                                   | 0,0124     | 0,0072    | 1,97                             | 2,03       | 1,99    | 2,01     |
|               | 1,5              | 3 | 1,96                                   | 0,0075     | 0,0043    | 1,94                             | 1,98       | 1,96    | 1,97     |
|               | 2,0              | 3 | 1,94                                   | 0,0256     | 0,0148    | 1,88                             | 2,01       | 1,92    | 1,97     |
|               | 3,0              | 3 | 1,96                                   | 0,0286     | 0,0165    | 1,88                             | 2,03       | 1,93    | 1,99     |
|               | 5,0              | 3 | 1,96                                   | 0,0181     | 0,0105    | 1,91                             | 2,00       | 1,94    | 1,97     |
|               | 7,0              | 3 | 1,96                                   | 0,0172     | 0,0099    | 1,92                             | 2,01       | 1,95    | 1,98     |
|               | 14,0             | 3 | 1,96                                   | 0,0025     | 0,0014    | 1,95                             | 1,96       | 1,96    | 1,96     |
|               | 28,0             | 3 | 1,98                                   | 0,0080     | 0,0046    | 1,96                             | 2,00       | 1,97    | 1,99     |
| 1             | 56,0             | 3 | 1,90                                   | 0,0165     | 0,0095    | 1,86                             | 1,95       | 1,89    | 1,92     |
|               | 0,5              | 3 | 1,98                                   | 0,0186     | 0,0107    | 1,94                             | 2,03       | 1,97    | 2        |
|               | 1,0              | 3 | 1,99                                   | 0,0108     | 0,0062    | 1,96                             | 2,01       | 1,98    | 2        |
|               | 1,5              | 3 | 1,96                                   | 0,0071     | 0,0041    | 1,94                             | 1,97       | 1,95    | 1,96     |
|               | 2,0              | 3 | 1,97                                   | 0,0131     | 0,0076    | 1,94                             | 2,00       | 1,96    | 1,98     |
|               | 3,0              | 3 | 1,98                                   | 0,0105     | 0,0061    | 1,95                             | 2,00       | 1,97    | 1,99     |
|               | 5,0              | 3 | 1,93                                   | 0,0086     | 0,0050    | 1,91                             | 1,95       | 1,92    | 1,94     |
|               | 7,0              | 3 | 1,94                                   | 0,0273     | 0,0158    | 1,87                             | 2,01       | 1,92    | 1,97     |
|               | 14,0             | 3 | 1,96                                   | 0,0007     | 0,0004    | 1,96                             | 1,97       | 1,96    | 1,96     |
| 2             | 28,0             | 3 | 1,95                                   | 0,0044     | 0,0025    | 1,94                             | 1,96       | 1,94    | 1,95     |
|               | 56,0             | 3 | 1,94                                   | 0,0059     | 0,0034    | 1,93                             | 1,95       | 1,94    | 1,95     |
|               | 0,5              | 3 | 2,10                                   | 0,0226     | 0,0130    | 2,04                             | 2,15       | 2,07    | 2,12     |
|               | 1,0              | 3 | 2,08                                   | 0,0052     | 0,0030    | 2,06                             | 2,09       | 2,07    | 2,08     |
|               | 1,5              | 3 | 2,05                                   | 0,0010     | 0,0006    | 2,05                             | 2,05       | 2,05    | 2,05     |
|               | 2,0              | 3 | 2,07                                   | 0,0125     | 0,0072    | 2,03                             | 2,10       | 2,06    | 2,08     |
|               | 3,0              | 3 | 2,04                                   | 0,0027     | 0,0016    | 2,04                             | 2,05       | 2,04    | 2,05     |
|               | 5,0              | 3 | 2,02                                   | 0,0226     | 0,0130    | 1,96                             | 2,08       | 2       | 2,04     |
|               | 7,0              | 3 | 2,02                                   | 0,0041     | 0,0024    | 2,01                             | 2,03       | 2,02    | 2,02     |
| 3             | 14,0             | 3 | 2,01                                   | 0,0007     | 0,0004    | 2,01                             | 2,01       | 2,01    | 2,01     |
|               | 28,0             | 3 | 2,01                                   | 0,0027     | 0,0016    | 2,01                             | 2,02       | 2,01    | 2,02     |
|               | 56,0             | 3 | 2,01                                   | 0,0038     | 0,0022    | 2,00                             | 2,02       | 2,01    | 2,02     |
|               | 0,5              | 3 | 1,99                                   | 0,0022     | 0,0013    | 1,98                             | 1,99       | 1,99    | 1,99     |
|               | 1,0              | 3 | 2,01                                   | 0,0382     | 0,0221    | 1,92                             | 2,11       | 1,99    | 2,06     |
|               | 1,5              | 3 | 1,99                                   | 0,0023     | 0,0013    | 1,99                             | 2,00       | 1,99    | 2        |
|               | 2,0              | 3 | 1,98                                   | 0,0033     | 0,0019    | 1,97                             | 1,99       | 1,98    | 1,98     |
|               | 3,0              | 3 | 1,98                                   | 0,0022     | 0,0013    | 1,97                             | 1,98       | 1,97    | 1,98     |
|               | 5,0              | 3 | 1,97                                   | 0,0021     | 0,0012    | 1,96                             | 1,97       | 1,97    | 1,97     |
|               | 7,0              | 3 | 1,97                                   | 0,0143     | 0,0082    | 1,93                             | 2,00       | 1,95    | 1,98     |
|               | 14,0             | 3 | 1,91                                   | 0,0239     | 0,0138    | 1,85                             | 1,97       | 1,9     | 1,94     |
|               | 28,0             | 3 | 1,95                                   | 0,0144     | 0,0083    | 1,91                             | 1,98       | 1,93    | 1,96     |
|               | 56,0             | 3 | 1,93                                   | 0,0126     | 0,0073    | 1,90                             | 1,96       | 1,92    | 1,94     |



Şekil 4.2. Ortalama yoğunluk değerlerine ait bar grafik.

Yoğunluk değerlerinin beton yaşına bağlı olarak değişimini belirlemek amacıyla yapılan varyans analizi sonucu Çizelge 4.2’de verilmiştir. Varyans analizi sonucunda yoğunluk değerlerinin beton yaşına bağlı olarak önemli miktarda değişim gösterdiği tespit edilmiştir.

Çizelge 4.2. Yoğunluk değerleri üzerinde beton yaşları arasında gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları.

| Cam lifli miktarı (%) | Varyansın kaynağı | Kareler toplamı | Serbestlik derecesi | Kareler ortalaması | F-testi | Anlamlılık düzeyi $P \leq 0,05$ |
|-----------------------|-------------------|-----------------|---------------------|--------------------|---------|---------------------------------|
| 0                     | Gruplar arası     | 0,022           | 9                   | 0,002              | 7,89    | 0,0                             |
|                       | Gruplar içi       | 0,006           | 20                  | 0,000              |         |                                 |
|                       | Toplam            | 0,028           | 29                  |                    |         |                                 |
| 1                     | Gruplar arası     | 0,010           | 9                   | 0,001              | 6,74    | 0,0                             |
|                       | Gruplar içi       | 0,003           | 20                  | 0,000              |         |                                 |
|                       | Toplam            | 0,013           | 29                  |                    |         |                                 |
| 2                     | Gruplar arası     | 0,026           | 9                   | 0,003              | 23,00   | 0,0                             |
|                       | Gruplar içi       | 0,003           | 20                  | 0,000              |         |                                 |
|                       | Toplam            | 0,028           | 29                  |                    |         |                                 |
| 3                     | Gruplar arası     | 0,025           | 9                   | 0,003              | 10,57   | 0,0                             |
|                       | Gruplar içi       | 0,005           | 20                  | 0,000              |         |                                 |
|                       | Toplam            | 0,030           | 29                  |                    |         |                                 |

Beton yaşları arasında yoğunluk değerlerindeki değişimin hangi gruplardan kaynaklandığını tespit edebilmek amacıyla Duncan çoklu karşılaştırma testi gerçekleştirilmiştir. Duncan testi sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir. Ayrıca her bir yaşta lif miktarına göre gruplar arasındaki farklılıkları kontrol etmek için gerçekleştirilen Duncan testi sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Betonların yoğunluk verileri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.

| Cam lifi miktarı (%) | Beton yaşı (gün) | N | Farklı olan gruplar $p \leq 0,05$ |       |       |       |       |       |
|----------------------|------------------|---|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                      |                  |   | 1                                 | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| 0                    | 56,0             | 3 | 1,904                             |       |       |       |       |       |
|                      | 2,0              | 3 |                                   | 1,943 |       |       |       |       |
|                      | 3,0              | 3 |                                   | 1,955 | 1,955 |       |       |       |
|                      | 14,0             | 3 |                                   | 1,958 | 1,958 |       |       |       |
|                      | 5,0              | 3 |                                   | 1,959 | 1,959 |       |       |       |
|                      | 1,5              | 3 |                                   | 1,962 | 1,962 |       |       |       |
|                      | 7,0              | 3 |                                   | 1,964 | 1,964 |       |       |       |
|                      | 28,0             | 3 |                                   |       | 1,978 | 1,978 |       |       |
|                      | 1,0              | 3 |                                   |       |       | 1,998 |       |       |
|                      | 0,5              | 3 |                                   |       |       | 2,007 |       |       |
| 1                    | 5,0              | 3 | 1,930                             |       |       |       |       |       |
|                      | 56,0             | 3 | 1,940                             | 1,940 |       |       |       |       |
|                      | 7,0              | 3 | 1,942                             | 1,942 | 1,942 |       |       |       |
|                      | 28,0             | 3 | 1,947                             | 1,947 | 1,947 | 1,947 |       |       |
|                      | 1,5              | 3 |                                   | 1,956 | 1,956 | 1,956 | 1,956 |       |
|                      | 14,0             | 3 |                                   |       | 1,964 | 1,964 | 1,964 | 1,964 |
|                      | 2,0              | 3 |                                   |       |       | 1,968 | 1,968 | 1,968 |
|                      | 3,0              | 3 |                                   |       |       |       | 1,976 | 1,976 |
|                      | 0,5              | 3 |                                   |       |       |       |       | 1,984 |
|                      | 1,0              | 3 |                                   |       |       |       |       | 1,986 |
| 2                    | 14,0             | 3 | 2,010                             |       |       |       |       |       |
|                      | 56,0             | 3 | 2,011                             |       |       |       |       |       |
|                      | 28,0             | 3 | 2,013                             |       |       |       |       |       |
|                      | 5,0              | 3 | 2,019                             |       |       |       |       |       |
|                      | 7,0              | 3 | 2,020                             |       |       |       |       |       |
|                      | 3,0              | 3 |                                   | 2,044 |       |       |       |       |
|                      | 1,5              | 3 |                                   | 2,052 | 2,052 |       |       |       |
|                      | 2,0              | 3 |                                   |       | 2,066 | 2,066 |       |       |
|                      | 1,0              | 3 |                                   |       |       | 2,078 | 2,078 |       |
|                      | 0,5              | 3 |                                   |       |       |       | 2,096 |       |
| 3                    | 14,0             | 3 | 1,911                             |       |       |       |       |       |
|                      | 56,0             | 3 | 1,932                             | 1,932 |       |       |       |       |
|                      | 28,0             | 3 |                                   | 1,949 | 1,949 |       |       |       |
|                      | 5,0              | 3 |                                   |       | 1,969 | 1,969 |       |       |
|                      | 7,0              | 3 |                                   |       | 1,969 | 1,969 |       |       |
|                      | 3,0              | 3 |                                   |       | 1,976 | 1,976 |       |       |
|                      | 2,0              | 3 |                                   |       |       | 1,980 |       |       |
|                      | 0,5              | 3 |                                   |       |       | 1,989 | 1,989 |       |
|                      | 1,5              | 3 |                                   |       |       | 1,993 | 1,993 |       |
|                      | 1,0              | 3 |                                   |       |       |       | 2,015 |       |

Her bir lif miktarında beton yaşları arasında gerçekleştirilen Duncan sonuçlarına göre tüm lif gruplarında beton yaşlarına göre yoğunluk değerlerinde önemli değişimlerin olduğu görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde genellikle ileri yaşlardaki betonlarda yoğunluk değerlerinde bir azalma gözlenmiştir. En büyük yoğunluk değerleri ise genel olarak erken yaşlardaki betonlarda görülmüştür. Bu durumun çimento hidratasyonu ve beton boşluklarında bulunan suların tüketilmesine bağlı olarak gerçekleştiği değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.4. Her bir yaşta lif miktarına göre gruplar arasındaki Duncan testi sonuçları.

| Beton Yaşı (gün) | Cam Lifi Miktarı (%) | N | Farklı Olan Gruplar $P \leq 0,05$ |      |      |
|------------------|----------------------|---|-----------------------------------|------|------|
|                  |                      |   | 1                                 | 2    | 3    |
| 0,5              | 1                    | 3 | 1,98                              |      |      |
|                  | 3                    | 3 | 1,99                              |      |      |
|                  | 0                    | 3 | 2,01                              |      |      |
|                  | 2                    | 3 |                                   | 2,10 |      |
| 1                | 1                    | 3 | 1,99                              |      |      |
|                  | 0                    | 3 | 2,00                              |      |      |
|                  | 3                    | 3 | 2,01                              |      |      |
|                  | 2                    | 3 |                                   | 2,08 |      |
| 1,5              | 1                    | 3 | 1,96                              |      |      |
|                  | 0                    | 3 | 1,96                              |      |      |
|                  | 3                    | 3 |                                   | 1,99 |      |
|                  | 2                    | 3 |                                   |      | 2,05 |
| 2                | 0                    | 3 | 1,94                              |      |      |
|                  | 1                    | 3 | 1,97                              | 1,97 |      |
|                  | 3                    | 3 |                                   | 1,98 |      |
|                  | 2                    | 3 |                                   |      | 2,07 |
| 3                | 0                    | 3 | 1,96                              |      |      |
|                  | 3                    | 3 | 1,98                              |      |      |
|                  | 1                    | 3 | 1,98                              |      |      |
|                  | 2                    | 3 |                                   | 2,04 |      |
| 5                | 1                    | 3 | 1,93                              |      |      |
|                  | 0                    | 3 | 1,96                              | 1,96 |      |
|                  | 3                    | 3 |                                   | 1,97 |      |
|                  | 2                    | 3 |                                   |      | 2,02 |
| 7                | 1                    | 3 | 1,94                              |      |      |
|                  | 0                    | 3 | 1,96                              |      |      |
|                  | 3                    | 3 | 1,97                              |      |      |
|                  | 2                    | 3 |                                   | 2,02 |      |
| 14               | 3                    | 3 | 1,91                              |      |      |
|                  | 0                    | 3 |                                   | 1,96 |      |
|                  | 1                    | 3 |                                   | 1,96 |      |
|                  | 2                    | 3 |                                   |      | 2,01 |
| 28               | 1                    | 3 | 1,95                              |      |      |
|                  | 3                    | 3 | 1,95                              |      |      |
|                  | 0                    | 3 |                                   | 1,98 |      |
|                  | 2                    | 3 |                                   |      | 2,01 |
| 56               | 0                    | 3 | 1,90                              |      |      |
|                  | 3                    | 3 |                                   | 1,93 |      |
|                  | 1                    | 3 |                                   | 1,94 |      |
|                  | 2                    | 3 |                                   |      | 2,01 |

Her bir yaşıta lif miktarına göre gruplar arasındaki Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları değerlendirildiğinde gruplar arasındaki farklılığın hangi gruplardan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda;

- ✓ Tüm yaşlarda lif miktarına bağlı olarak yoğunluk değerlerinde önemli değişimlerin olduğu,
- ✓ Tüm yaşlarda %2 lif miktarına sahip betonlarda en büyük yoğunluk değerlerinin elde edildiği,
- ✓ 14. ve 56. gündeki numuneler hariç diğer tüm yaş gruplarında en küçük yoğunluk değerinin %1 lif miktarına sahip betonlarda olduğu,
- ✓ Bütün gruplarda beton yoğunluk değerlerinin 1,9-2,1 g/cm<sup>3</sup> arasında değişkenlik gösterdiği ve bu değerlerin genel GRC-CTB literatürüne uygun olduğu ve bu konudaki çalışmalarla tam olarak örtüştüğü [61], [66],
- ✓ Gruplar arasında farklılıklar gözlenmekle beraber yoğunluk değerlerinde lif miktarına bağlı olarak en fazla %9 oranında değişkenlik gösterdiği,
- ✓ 28. Gündeki betonlarda %1 lifli betonların 1,95 g/cm<sup>3</sup> ile en küçük, %2 lifli betonların ise 2,01 g/cm<sup>3</sup> ile en büyük yoğunluk değerlerine sahip olduğu,
- ✓ Bu iki lif miktarı arasındaki yoğunluk farkının %3 oranında olduğu tespit edilmiştir.

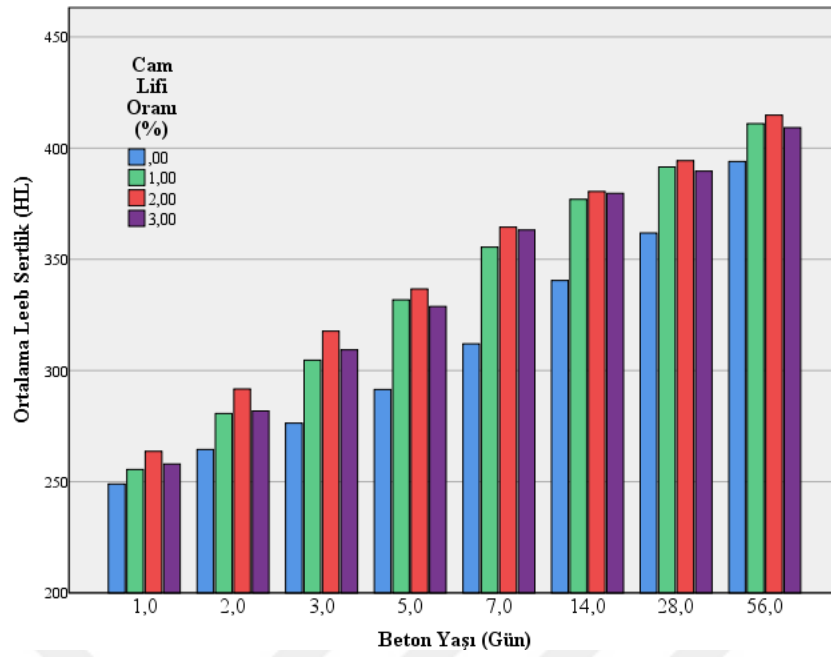
#### 4.3. LEEB SERTLİK DENEYİ SONUÇLARI

Farklı oranlarda cam lifi ile takviye edilerek hazırlanan beton numuneleri üzerinde 1, 2, 3, 5, 7, 14, 28 ve 56. günlerde yapılan basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmeden önce LEEB sertlik cihazı ile yüzey sertliği okumaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sertlik değerlerine ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.5’de verilmiştir. Ayrıca ortalama sertlik değerlerini gösteren bar grafik Şekil 4.3’de görülmektedir.

Çizelge 4.5. LEEB sertlik değerlerine ait açıklayıcı istatistikler.

| Lif oranı (%) | Beton yaşı (gün) | N | Ortalama yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | Std. Sapma | Std. Hata | %95 güven aralığında ortalamanın |            | Minimum | Maksimum |
|---------------|------------------|---|----------------------------------------|------------|-----------|----------------------------------|------------|---------|----------|
|               |                  |   |                                        |            |           | Alt sınırı                       | Üst sınırı |         |          |
| 0             | 1                | 6 | 249,00                                 | 6,10       | 2,49      | 242,60                           | 255,40     | 239     | 255      |
|               | 2                | 6 | 264,50                                 | 4,04       | 1,65      | 260,26                           | 268,74     | 259     | 270      |
|               | 3                | 6 | 276,33                                 | 3,98       | 1,63      | 272,15                           | 280,51     | 271     | 281      |
|               | 5                | 6 | 291,50                                 | 7,71       | 3,15      | 283,41                           | 299,60     | 282     | 303      |
|               | 7                | 6 | 312,00                                 | 3,94       | 1,76      | 307,11                           | 316,89     | 306     | 316      |
|               | 14               | 6 | 340,50                                 | 6,35       | 2,59      | 333,84                           | 347,16     | 333     | 350      |
|               | 28               | 6 | 361,83                                 | 6,37       | 2,60      | 355,15                           | 368,52     | 357     | 373      |
|               | 56               | 6 | 394,00                                 | 14,09      | 5,75      | 379,22                           | 408,78     | 373     | 407      |
| 1             | 1                | 6 | 255,50                                 | 9,95       | 4,06      | 245,05                           | 265,95     | 238     | 264      |
|               | 2                | 6 | 280,67                                 | 8,78       | 3,58      | 271,45                           | 289,88     | 270     | 290      |
|               | 3                | 6 | 304,67                                 | 7,53       | 3,07      | 296,77                           | 312,57     | 295     | 314      |
|               | 5                | 6 | 331,80                                 | 2,77       | 1,24      | 328,35                           | 335,25     | 328     | 335      |
|               | 7                | 6 | 355,50                                 | 12,63      | 5,16      | 342,25                           | 368,75     | 341     | 371      |
|               | 14               | 6 | 377,00                                 | 2,65       | 1,53      | 370,43                           | 383,57     | 375     | 380      |
|               | 28               | 6 | 391,50                                 | 1,29       | 0,65      | 389,45                           | 393,55     | 390     | 393      |
|               | 56               | 6 | 411,00                                 | 1,83       | 0,91      | 408,09                           | 413,91     | 409     | 413      |
| 2             | 1                | 6 | 263,67                                 | 9,93       | 4,06      | 253,24                           | 274,09     | 248     | 274      |
|               | 2                | 6 | 291,67                                 | 3,83       | 1,56      | 287,65                           | 295,69     | 288     | 297      |
|               | 3                | 6 | 317,67                                 | 8,69       | 3,55      | 308,55                           | 326,78     | 303     | 324      |
|               | 5                | 6 | 336,67                                 | 6,62       | 2,70      | 329,72                           | 343,62     | 330     | 346      |
|               | 7                | 6 | 364,50                                 | 8,41       | 3,43      | 355,68                           | 373,32     | 352     | 373      |
|               | 14               | 6 | 380,50                                 | 4,09       | 1,67      | 376,21                           | 384,79     | 375     | 385      |
|               | 28               | 6 | 394,33                                 | 4,13       | 1,69      | 390,00                           | 398,67     | 389     | 400      |
|               | 56               | 6 | 414,83                                 | 3,87       | 1,58      | 410,77                           | 418,89     | 409     | 420      |
| 3             | 1                | 6 | 258,00                                 | 4,00       | 1,79      | 253,03                           | 262,97     | 251     | 261      |
|               | 2                | 6 | 281,83                                 | 10,57      | 4,32      | 270,74                           | 292,93     | 269     | 298      |
|               | 3                | 6 | 309,33                                 | 6,65       | 2,72      | 302,35                           | 316,32     | 299     | 319      |
|               | 5                | 6 | 328,80                                 | 4,76       | 2,13      | 322,88                           | 334,72     | 321     | 334      |
|               | 7                | 6 | 363,17                                 | 7,41       | 3,03      | 355,39                           | 370,95     | 353     | 371      |
|               | 14               | 6 | 379,67                                 | 8,29       | 3,38      | 370,97                           | 388,36     | 372     | 393      |
|               | 28               | 6 | 389,67                                 | 1,51       | 0,61      | 388,09                           | 391,25     | 387     | 391      |
|               | 56               | 6 | 409,17                                 | 2,48       | 1,01      | 406,56                           | 411,77     | 405     | 412      |

GRC-CTB betonlardan elde edilen LEEB sertlik değerleri incelendiğinde beton yaşı ilerledikçe dayanımlardaki gelişmelere doğru orantılı olarak sertlik değerlerinde de bir artışın olduğu, en büyük sertlik değerlerinin 56. gündeki betonlarda olduğu, en küçük sertlik değerlerinin ise 1. gündeki betonlarda meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca tüm cam lifi takviye oranlarında beton yaşı ilerledikçe sertlik değerlerinde de benzer artışın olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.3. Ortalama LEEB sertlik değerlerine ait bar grafik.

Tüm lif oranlarında, beton yaşlarına bağlı olarak sertlik değerlerinde meydana gelen değişimin istatistiksel olarak önemli olup olmadığını test etmek amacıyla elde edilen sertlik verileri üzerinde varyans analizi gerçekleştirilerek gruplar arasındaki farklar incelenmiştir. Basınç dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Cam lifli takviyeli beton numunelerine ait beton yaşları arasında gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları.

| Cam lifli miktarı (%) | Varyansın kaynağı | Kareler toplamı | Serbestlik derecesi | Kareler ortalaması | F-testi | Anlamlılık düzeyi $P \leq 0,05$ |
|-----------------------|-------------------|-----------------|---------------------|--------------------|---------|---------------------------------|
| 0                     | Gruplar arası     | 107592,610      | 7                   | 15370,373          | 285,088 | 0,000                           |
|                       | Gruplar içi       | 2102,667        | 39                  | 53,915             |         |                                 |
|                       | Toplam            | 109695,277      | 46                  |                    |         |                                 |
| 1                     | Gruplar arası     | 103660,433      | 7                   | 14808,633          | 234,422 | 0,000                           |
|                       | Gruplar içi       | 2021,467        | 32                  | 63,171             |         |                                 |
|                       | Toplam            | 105681,900      | 39                  |                    |         |                                 |
| 2                     | Gruplar arası     | 115351,479      | 7                   | 16478,783          | 374,411 | 0,000                           |
|                       | Gruplar içi       | 1760,500        | 40                  | 44,013             |         |                                 |
|                       | Toplam            | 117111,979      | 47                  |                    |         |                                 |
| 3                     | Gruplar arası     | 116175,678      | 7                   | 16596,525          | 395,329 | 0,000                           |
|                       | Gruplar içi       | 1595,300        | 38                  | 41,982             |         |                                 |
|                       | Toplam            | 117770,978      | 45                  |                    |         |                                 |



Gerçekleştirilen varyans analizi sonuçlarına göre tüm lif oranlarında beton yaşına bağlı olarak sertlik değerlerinde istatistiki anlamda önemli farkların olduğu tespit edilmiştir. Diğer bir ifade ile beton yaşına bağlı olarak sertlik değerleri önemli miktarda değişmektedir. Bu farklılıkların hangi gruplardan kaynaklandığını tespit etmek amacıyla gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları Çizelge 4.7’de verilmiştir. Ayrıca her bir beton yaşında lif miktarlarına bağlı olarak sertlik değerlerindeki değişimi kontrol etmek amacıyla varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Varyans analizi sonucunda tüm yaş gruplarında, lif miktarına bağlı olarak sertlik değerlerinde önemli bir değişimin olduğu tespit edilmiştir. Lifsiz olan karışımlar en küçük sertlik değerleri verirken, %2 oranındaki lifli betonların ise en büyük sertlik değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

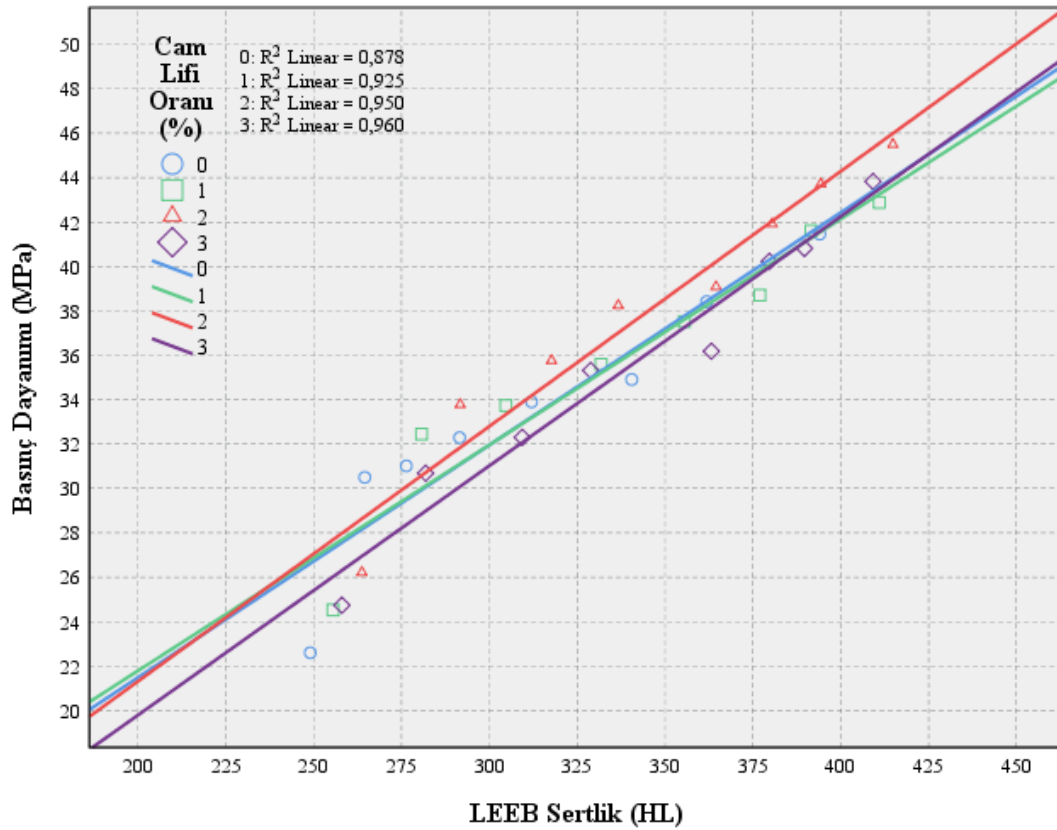
Çizelge 4.7. Betonların LEEB sertlik değerleri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.

| Cam lifi miktarı (%) | Beton yaşı (gün) | N | Farklı olan gruplar<br>P≤0,05 |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------|------------------|---|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                      |                  |   | 1                             | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| 0                    | 1                | 6 | 249,0                         |       |       |       |       |       |       |       |
|                      | 2                | 6 |                               | 264,5 |       |       |       |       |       |       |
|                      | 3                | 6 |                               |       | 276,3 |       |       |       |       |       |
|                      | 5                | 6 |                               |       |       | 291,5 |       |       |       |       |
|                      | 7                | 6 |                               |       |       |       | 312,0 |       |       |       |
|                      | 14               | 6 |                               |       |       |       |       | 340,5 |       |       |
|                      | 28               | 6 |                               |       |       |       |       |       | 361,8 |       |
|                      | 56               | 6 |                               |       |       |       |       |       |       | 394,0 |
| 1                    | 1                | 6 | 255,5                         |       |       |       |       |       |       |       |
|                      | 2                | 6 |                               | 280,7 |       |       |       |       |       |       |
|                      | 3                | 6 |                               |       | 304,7 |       |       |       |       |       |
|                      | 5                | 6 |                               |       |       | 331,8 |       |       |       |       |
|                      | 7                | 6 |                               |       |       |       | 355,5 |       |       |       |
|                      | 14               | 6 |                               |       |       |       |       | 377,0 |       |       |
|                      | 28               | 6 |                               |       |       |       |       |       | 391,5 |       |
|                      | 56               | 6 |                               |       |       |       |       |       |       | 411,0 |
| 2                    | 1                | 6 | 263,7                         |       |       |       |       |       |       |       |
|                      | 2                | 6 |                               | 291,7 |       |       |       |       |       |       |
|                      | 3                | 6 |                               |       | 317,7 |       |       |       |       |       |
|                      | 5                | 6 |                               |       |       | 336,7 |       |       |       |       |
|                      | 7                | 6 |                               |       |       |       | 364,5 |       |       |       |
|                      | 14               | 6 |                               |       |       |       |       | 380,5 |       |       |
|                      | 28               | 6 |                               |       |       |       |       |       | 394,3 |       |
|                      | 56               | 6 |                               |       |       |       |       |       |       | 414,8 |
| 3                    | 1                | 6 | 258,0                         |       |       |       |       |       |       |       |
|                      | 2                | 6 |                               | 281,8 |       |       |       |       |       |       |
|                      | 3                | 6 |                               |       | 309,3 |       |       |       |       |       |
|                      | 5                | 6 |                               |       |       | 328,8 |       |       |       |       |
|                      | 7                | 6 |                               |       |       |       | 363,2 |       |       |       |
|                      | 14               | 6 |                               |       |       |       |       | 379,7 |       |       |
|                      | 28               | 6 |                               |       |       |       |       |       | 389,7 |       |
|                      | 56               | 6 |                               |       |       |       |       |       |       | 409,2 |

Tüm lif oranlarında, beton yaşların arasında gerçekleştirilen Duncan testi sonuçları incelendiğinde; ölçüm yapılan tüm yaşlardaki sertlik değerlerinin birbirinden istatistiki olarak önemli farklılıklar gösterdiği, 1. gündeki betonların en küçük, 56. gündeki betonların ise en büyük sertlik değerlerine sahip olduğu, tüm lif oranlarında betonlardaki sertliklerin 1. günde göre 56. günde yaklaşık %60 oranında artış gösterdiği görülmektedir.

Lifsiz betonlarda 28. gündeki sertlik ile 56. gündeki sertlik değerleri arasında %9 oranında sertlik artışı olurken, diğer lifli betonlarda ise bu oran yaklaşık %5 artış gösterdiği tespit edilmiştir. Buna göre lifsiz betonlardaki sertlik artışının liflilere göre daha fazla olduğunu göstermektedir.

Tüm lif oranlarında beton yaşına bağlı olarak sertlik değerlerinin basınç dayanımı değerlerine paralel olarak arttığı görüldüğünden basınç dayanımı ile LEEB sertlik verileri arasındaki ilişki modellenmeye çalışılmıştır. Basınç dayanımı-LEEB sertlik arasındaki ilişki grafiği Şekil 4.4'de görülmektedir. Ayrıca ilişkiyi modelleyebilmek amacıyla gerçekleştirilen regresyon analizi sonuçları da Çizelge 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Basınç dayanımı-LEEB sertlik değerleri arasındaki ilişki grafiği.

Çizelge 4.8. Basınç dayanımı ile LEEB sertlik değerleri arasındaki regresyon analizi sonucu.

| Lif miktarı (%) | Model  | Model özeti    |         |     |     |                             | Tahmin parametreleri |       |
|-----------------|--------|----------------|---------|-----|-----|-----------------------------|----------------------|-------|
|                 |        | R <sup>2</sup> | F       | df1 | df2 | Anlamlılık düzeyi<br>P≤0,05 | a                    | b     |
| 0               | Y=a+bX | 0,878          | 43,138  | 1   | 6   | 0,001                       | 0,547                | 0,105 |
| 1               | Y=a+bX | 0,925          | 74,213  | 1   | 6   | 0,000                       | 1,445                | 0,102 |
| 2               | Y=a+bX | 0,950          | 113,159 | 1   | 6   | 0,000                       | -1,658               | 0,115 |
| 3               | Y=a+bX | 0,960          | 145,027 | 1   | 6   | 0,000                       | -2,665               | 0,112 |

İlişki grafiği ve regresyon analizi sonuçları incelendiğinde LEEB sertlik ile basınç dayanımı arasında güçlü bir ilişkinin olduğu, bu ilişkinin “Y=a+bX” model denklemi ile ifade edilebilen 1. dereceden bir denklem ile ifade edilebileceği görülmektedir. Oluşturulan ilişki modelleri ile, lifsiz betonlar için beton basınç dayanımı değerlerinin %12 hata ile, %1 oranındaki lifli betonlar için %8 hata ile, %2 oranındaki betonlar için %5 hata ile, %3 oranındaki lifli betonlar için ise %4 hata ile LEEB sertlik değerlerinden yola çıkarak tahmin edilebileceği görülmektedir.

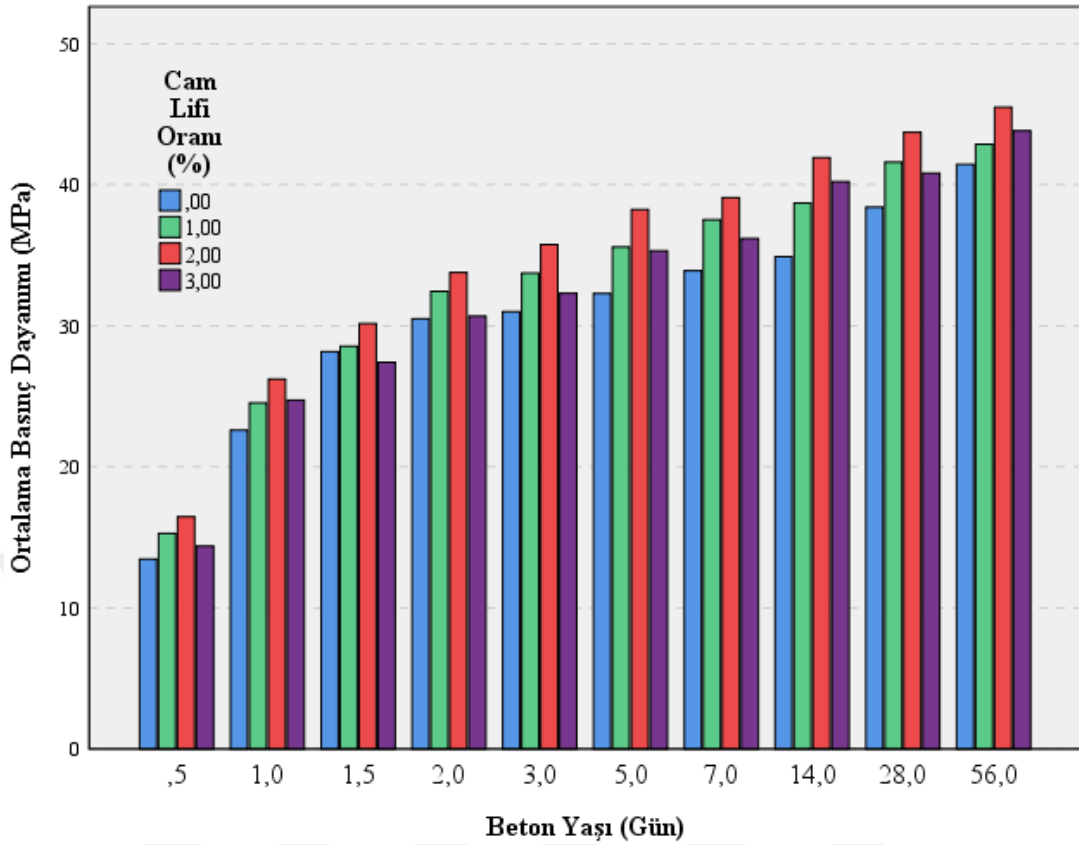
Özellikle lif takviyeli kabuk betonlar için hali hazırda kullanılan Schmidt çekicinin darbe enerjisi yüksek olduğu için sağlıklı veriler alınamadığı düşünüldüğünde LEEB sertlik yönteminin Lifli veya lifsiz kabuk betonlarda sertlik ölçüm yöntemi olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

#### 4.4. BASINÇ DAYANIMI DENEYİ SONUÇLARI

Farklı oranlarda cam lifi ile takviye edilerek hazırlanan beton numuneleri üzerinde 0,5, 1, 1,5, 2, 3, 5, 7, 14, 28 ve 56. günlerde yapılan basınç dayanımı deneyleri sonucunda her bir gruba ait basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Elde edilen basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.9’de verilmiştir. Ayrıca ortalama basınç dayanımı değerlerini gösteren bar grafik Şekil 4.5’de görülmektedir.

Çizelge 4.9. Basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler.

| Lif oranı (%) | Beton yaşı (gün) | N | Ortalama basınç dayanımı (MPa) | Std. Sapma | Std. Hata | %95 güven aralığında ortalamanın |            | Minimum | Maksimum |
|---------------|------------------|---|--------------------------------|------------|-----------|----------------------------------|------------|---------|----------|
|               |                  |   |                                |            |           | Alt sınırı                       | Üst sınırı |         |          |
| 0             | 0,5              | 3 | 13,47                          | 0,38       | 0,22      | 12,53                            | 14,41      | 13,20   | 13,90    |
|               | 1,0              | 3 | 22,60                          | 1,01       | 0,59      | 20,08                            | 25,12      | 21,50   | 23,50    |
|               | 1,5              | 3 | 28,17                          | 2,34       | 1,35      | 22,34                            | 33,99      | 25,50   | 29,90    |
|               | 2,0              | 3 | 30,50                          | 0,95       | 0,55      | 28,13                            | 32,87      | 29,60   | 31,50    |
|               | 3,0              | 3 | 31,01                          | 4,73       | 2,73      | 19,26                            | 42,77      | 25,55   | 33,77    |
|               | 5,0              | 3 | 32,29                          | 1,45       | 0,84      | 28,69                            | 35,89      | 31,00   | 33,86    |
|               | 7,0              | 3 | 33,90                          | 0,35       | 0,20      | 33,04                            | 34,76      | 33,68   | 34,30    |
|               | 14,0             | 3 | 34,91                          | 0,99       | 0,57      | 32,44                            | 37,37      | 33,76   | 35,49    |
|               | 28,0             | 3 | 38,41                          | 2,62       | 1,51      | 31,91                            | 44,91      | 36,77   | 41,43    |
|               | 56,0             | 3 | 41,46                          | 1,15       | 0,66      | 38,61                            | 44,31      | 40,48   | 42,72    |
| 1             | 0,5              | 3 | 15,29                          | 1,00       | 0,58      | 12,80                            | 17,78      | 14,32   | 16,32    |
|               | 1,0              | 3 | 24,53                          | 0,80       | 0,46      | 22,54                            | 26,52      | 24,01   | 25,45    |
|               | 1,5              | 3 | 28,56                          | 0,59       | 0,34      | 27,09                            | 30,03      | 28,12   | 29,23    |
|               | 2,0              | 3 | 32,45                          | 0,59       | 0,34      | 30,99                            | 33,91      | 32,01   | 33,12    |
|               | 3,0              | 3 | 33,74                          | 0,68       | 0,39      | 32,05                            | 35,42      | 33,25   | 34,51    |
|               | 5,0              | 3 | 35,59                          | 0,76       | 0,44      | 33,71                            | 37,48      | 35,01   | 36,45    |
|               | 7,0              | 3 | 37,52                          | 0,51       | 0,29      | 36,25                            | 38,79      | 37,01   | 38,03    |
|               | 14,0             | 3 | 38,71                          | 0,84       | 0,49      | 36,61                            | 40,81      | 38,02   | 39,65    |
|               | 28,0             | 3 | 41,61                          | 0,57       | 0,33      | 40,20                            | 43,01      | 41,02   | 42,15    |
|               | 56,0             | 3 | 42,88                          | 0,88       | 0,51      | 40,69                            | 45,08      | 42,12   | 43,85    |
| 2             | 0,5              | 3 | 16,47                          | 0,93       | 0,54      | 14,16                            | 18,77      | 15,40   | 17,10    |
|               | 1,0              | 3 | 26,22                          | 1,07       | 0,62      | 23,56                            | 28,88      | 25,21   | 27,34    |
|               | 1,5              | 3 | 30,16                          | 0,96       | 0,55      | 27,79                            | 32,54      | 29,15   | 31,05    |
|               | 2,0              | 3 | 33,78                          | 0,78       | 0,45      | 31,85                            | 35,71      | 32,94   | 34,47    |
|               | 3,0              | 3 | 35,76                          | 1,31       | 0,76      | 32,50                            | 39,03      | 34,25   | 36,60    |
|               | 5,0              | 3 | 38,24                          | 0,13       | 0,07      | 37,92                            | 38,56      | 38,10   | 38,35    |
|               | 7,0              | 3 | 39,08                          | 0,91       | 0,53      | 36,82                            | 41,34      | 38,18   | 40,00    |
|               | 14,0             | 3 | 41,92                          | 0,75       | 0,43      | 40,06                            | 43,78      | 41,25   | 42,73    |
|               | 28,0             | 3 | 43,72                          | 1,82       | 1,05      | 39,18                            | 48,25      | 42,25   | 45,76    |
|               | 56,0             | 3 | 45,50                          | 2,23       | 1,29      | 39,95                            | 51,05      | 43,43   | 47,87    |
| 3             | 0,5              | 3 | 14,39                          | 0,42       | 0,24      | 13,35                            | 15,42      | 13,91   | 14,69    |
|               | 1,0              | 3 | 24,74                          | 0,50       | 0,29      | 23,51                            | 25,97      | 24,26   | 25,25    |
|               | 1,5              | 3 | 27,41                          | 1,02       | 0,59      | 24,88                            | 29,94      | 26,30   | 28,30    |
|               | 2,0              | 3 | 30,69                          | 0,93       | 0,54      | 28,37                            | 33,00      | 29,70   | 31,55    |
|               | 3,0              | 3 | 32,30                          | 0,24       | 0,14      | 31,71                            | 32,89      | 32,05   | 32,52    |
|               | 5,0              | 3 | 35,32                          | 0,34       | 0,20      | 34,47                            | 36,16      | 35,12   | 35,71    |
|               | 7,0              | 3 | 36,18                          | 0,40       | 0,23      | 35,19                            | 37,18      | 35,89   | 36,64    |
|               | 14,0             | 3 | 40,23                          | 0,83       | 0,48      | 38,16                            | 42,30      | 39,44   | 41,10    |
|               | 28,0             | 3 | 40,82                          | 0,04       | 0,02      | 40,73                            | 40,90      | 40,78   | 40,85    |
|               | 56,0             | 3 | 43,83                          | 1,14       | 0,66      | 40,99                            | 46,67      | 42,60   | 44,86    |



Şekil 4.5. Beton numunelerine ait ortalama basınç dayanımı değerleri.

Deneyler sonucunda elde edilen ortalama basınç dayanımı değerleri incelendiğinde beton basınç dayanımlarının beton yaşı ilerledikçe bir artış gösterdiği, bu artışın özellikle 12 saat ile 24 saat aralığında diğer yaşlardaki artışa nazaran daha fazla olduğu, karışım içerisinde kullanılan MTK puzolanı nedeniyle 28. günden sonra da dayanım değerlerinde artışın devam ettiği görülmüştür.

Lif oranları arasında basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, lif miktarına bağlı olarak basınç dayanımı değerlerinde değişimin olduğu, %2 oranında lifli betonların tüm yaşlarda en büyük basınç dayanımı değerlerine sahip olduğu, %3 oranında lifli betonlarda ise basınç dayanımı değerlerinin düşüş gösterdiği, en küçük basınç dayanımı değerlerinin lifsiz betonlarda olduğu görülmektedir.

Tüm lif oranlarında, beton yaşları arasında basınç dayanımı değerlerinde meydana gelen değişimin istatistiksel anlamda önemli olup olmadığını test etmek amacıyla elde edilen basınç dayanımı verileri üzerinde varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları Çizelge 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Basınç Dayanımı değerleri üzerinde beton yaşları arasında gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları.

| Cam lifi miktarı (%) | Varyansın kaynağı | Kareler toplamı | Serbestlik derecesi | Kareler ortalaması | F-testi | Anlamlılık düzeyi $P \leq 0,05$ |
|----------------------|-------------------|-----------------|---------------------|--------------------|---------|---------------------------------|
| 0                    | Gruplar arası     | 1724,433        | 9                   | 191,604            | 46,356  | ,000                            |
|                      | Gruplar içi       | 82,666          | 20                  | 4,133              |         |                                 |
|                      | Toplam            | 1807,099        | 29                  |                    |         |                                 |
| 1                    | Gruplar arası     | 1912,280        | 9                   | 212,476            | 390,066 | ,000                            |
|                      | Gruplar içi       | 10,894          | 20                  | ,545               |         |                                 |
|                      | Toplam            | 1923,175        | 29                  |                    |         |                                 |
| 2                    | Gruplar arası     | 2121,965        | 9                   | 235,774            | 157,429 | ,000                            |
|                      | Gruplar içi       | 29,953          | 20                  | 1,498              |         |                                 |
|                      | Toplam            | 2151,918        | 29                  |                    |         |                                 |
| 3                    | Gruplar arası     | 2088,656        | 9                   | 232,073            | 497,943 | ,000                            |
|                      | Gruplar içi       | 9,321           | 20                  | ,466               |         |                                 |
|                      | Toplam            | 2097,977        | 29                  |                    |         |                                 |

Varyans analizi sonucunda tüm lif oranlarında, beton yaşına göre basınç dayanımı değerlerinin istatistiksel olarak önemli miktarda değişim gösterdiği görülmüştür. Beton yaşına göre basınç dayanımı değerleri önemli miktarda değişmektedir. Ayrıca tüm beton yaşlarında lif miktarlarına bağlı olarak basınç dayanımı değerleri arasındaki değişimi tespit etmek için de varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Lif oranları arasındaki varyans analizi sonuçları da Çizelge 4.11’de verilmiştir.

1,5. ve 3. gün hariç tüm beton yaşlarında, lif miktarlarına bağlı olarak basınç dayanımı değerlerinde istatistiki olarak önemli değişimlerin meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre lif miktarının basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Ancak basınç dayanımı değerlerindeki değişimin beton yaşlarındaki kadar belirgin olmadığı bazı beton yaşlarında ise lif miktarının basınç dayanımı değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir.

Gruplar arasındaki bu değişimin hangi gruplardan kaynaklandığını tespit etmek amacıyla Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır. Duncan testi sonuçları ise Çizelge 4.12 Çizelge 4.13’de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Cam lifi takviyeli beton numunelerine ait lif oranları arasında gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları.

| Beton yaşı<br>(gün) | Varyansın<br>kaynağı | Kareler toplamı | Serbestlik<br>derecesi | Kareler<br>ortalaması | F-testi | Anlamlılık<br>düzeyi<br>$P \leq 0,05$ |
|---------------------|----------------------|-----------------|------------------------|-----------------------|---------|---------------------------------------|
| 0,5                 | Gruplar arası        | 14,773          | 3                      | 4,924                 | 9,019   | 0,006                                 |
|                     | Gruplar içi          | 4,368           | 8                      | 0,546                 |         |                                       |
|                     | Toplam               | 19,141          | 11                     |                       |         |                                       |
| 1                   | Gruplar arası        | 19,875          | 3                      | 6,625                 | 8,656   | 0,007                                 |
|                     | Gruplar içi          | 6,123           | 8                      | 0,765                 |         |                                       |
|                     | Toplam               | 25,997          | 11                     |                       |         |                                       |
| 1,5                 | Gruplar arası        | 12,118          | 3                      | 4,039                 | 2,072   | 0,182                                 |
|                     | Gruplar içi          | 15,593          | 8                      | 1,949                 |         |                                       |
|                     | Toplam               | 27,711          | 11                     |                       |         |                                       |
| 2                   | Gruplar arası        | 21,794          | 3                      | 7,265                 | 10,665  | 0,004                                 |
|                     | Gruplar içi          | 5,449           | 8                      | 0,681                 |         |                                       |
|                     | Toplam               | 27,243          | 11                     |                       |         |                                       |
| 3                   | Gruplar arası        | 37,332          | 3                      | 12,444                | 2,021   | 0,190                                 |
|                     | Gruplar içi          | 49,251          | 8                      | 6,156                 |         |                                       |
|                     | Toplam               | 86,583          | 11                     |                       |         |                                       |
| 5                   | Gruplar arası        | 53,327          | 3                      | 17,776                | 25,299  | 0,000                                 |
|                     | Gruplar içi          | 5,621           | 8                      | 0,703                 |         |                                       |
|                     | Toplam               | 58,948          | 11                     |                       |         |                                       |
| 7                   | Gruplar arası        | 43,369          | 3                      | 14,456                | 42,228  | 0,000                                 |
|                     | Gruplar içi          | 2,739           | 8                      | 0,342                 |         |                                       |
|                     | Toplam               | 46,108          | 11                     |                       |         |                                       |
| 14                  | Gruplar arası        | 80,600          | 3                      | 26,867                | 36,357  | 0,000                                 |
|                     | Gruplar içi          | 5,912           | 8                      | 0,739                 |         |                                       |
|                     | Toplam               | 86,512          | 11                     |                       |         |                                       |
| 28                  | Gruplar arası        | 43,189          | 3                      | 14,396                | 5,487   | 0,024                                 |
|                     | Gruplar içi          | 20,989          | 8                      | 2,624                 |         |                                       |
|                     | Toplam               | 64,178          | 11                     |                       |         |                                       |
| 56                  | Gruplar arası        | 25,953          | 3                      | 8,651                 | 4,122   | 0,048                                 |
|                     | Gruplar içi          | 16,790          | 8                      | 2,099                 |         |                                       |
|                     | Toplam               | 42,743          | 11                     |                       |         |                                       |



Çizelge 4.12. Betonların basınç dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.

| Cam lifi miktarı (%) | Beton yaşı (gün) | N | Farklı olan gruplar $P \leq 0,05$ |       |       |       |       |       |       |       |       |    |
|----------------------|------------------|---|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
|                      |                  |   | 1                                 | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10 |
| 0                    | 0,5              | 3 | 13,47                             |       |       |       |       |       |       |       |       |    |
|                      | 1,0              | 3 |                                   | 22,60 |       |       |       |       |       |       |       |    |
|                      | 1,5              | 3 |                                   |       | 28,17 |       |       |       |       |       |       |    |
|                      | 2,0              | 3 |                                   |       | 30,50 | 30,50 |       |       |       |       |       |    |
|                      | 3,0              | 3 |                                   |       | 31,01 | 31,01 |       |       |       |       |       |    |
|                      | 5,0              | 3 |                                   |       |       | 32,29 | 32,29 |       |       |       |       |    |
|                      | 7,0              | 3 |                                   |       |       | 33,90 | 33,90 |       |       |       |       |    |
|                      | 14,0             | 3 |                                   |       |       |       | 34,91 |       |       |       |       |    |
|                      | 28,0             | 3 |                                   |       |       |       |       | 38,41 |       |       |       |    |
|                      | 56,0             | 3 |                                   |       |       |       |       | 41,46 |       |       |       |    |
| 1                    | 0,5              | 3 | 15,29                             |       |       |       |       |       |       |       |       |    |
|                      | 1,0              | 3 |                                   | 24,53 |       |       |       |       |       |       |       |    |
|                      | 1,5              | 3 |                                   |       | 28,56 |       |       |       |       |       |       |    |
|                      | 2,0              | 3 |                                   |       |       | 32,45 |       |       |       |       |       |    |
|                      | 3,0              | 3 |                                   |       |       |       | 33,74 |       |       |       |       |    |
|                      | 5,0              | 3 |                                   |       |       |       |       | 35,59 |       |       |       |    |
|                      | 7,0              | 3 |                                   |       |       |       |       |       | 37,52 |       |       |    |
|                      | 14,0             | 3 |                                   |       |       |       |       |       | 38,71 |       |       |    |
|                      | 28,0             | 3 |                                   |       |       |       |       |       |       | 41,61 |       |    |
|                      | 56,0             | 3 |                                   |       |       |       |       |       |       |       | 42,88 |    |
| 2                    | 0,5              | 3 | 16,47                             |       |       |       |       |       |       |       |       |    |
|                      | 1,0              | 3 |                                   | 26,22 |       |       |       |       |       |       |       |    |
|                      | 1,5              | 3 |                                   |       | 30,16 |       |       |       |       |       |       |    |
|                      | 2,0              | 3 |                                   |       |       | 33,78 |       |       |       |       |       |    |
|                      | 3,0              | 3 |                                   |       |       | 35,76 |       |       |       |       |       |    |
|                      | 5,0              | 3 |                                   |       |       |       | 38,24 |       |       |       |       |    |
|                      | 7,0              | 3 |                                   |       |       |       | 39,08 |       |       |       |       |    |
|                      | 14,0             | 3 |                                   |       |       |       |       | 41,92 |       |       |       |    |
|                      | 28,0             | 3 |                                   |       |       |       |       | 43,72 | 43,72 |       |       |    |
|                      | 56,0             | 3 |                                   |       |       |       |       |       | 45,50 |       |       |    |
| 3                    | 0,5              | 3 | 14,39                             |       |       |       |       |       |       |       |       |    |
|                      | 1,0              | 3 |                                   | 24,74 |       |       |       |       |       |       |       |    |
|                      | 1,5              | 3 |                                   |       | 27,41 |       |       |       |       |       |       |    |
|                      | 2,0              | 3 |                                   |       |       | 30,69 |       |       |       |       |       |    |
|                      | 3,0              | 3 |                                   |       |       |       | 32,30 |       |       |       |       |    |
|                      | 7,0              | 3 |                                   |       |       |       |       | 35,32 |       |       |       |    |
|                      | 5,0              | 3 |                                   |       |       |       |       | 36,18 |       |       |       |    |
|                      | 28,0             | 3 |                                   |       |       |       |       |       | 40,23 |       |       |    |
|                      | 14,0             | 3 |                                   |       |       |       |       |       | 40,82 |       |       |    |
|                      | 56,0             | 3 |                                   |       |       |       |       |       |       | 43,83 |       |    |

Farklı lif oranlarında beton yaşına bağlı olarak değişimin test edildiği Duncan testi sonuçları incelendiğinde;

- ✓ Tüm lif oranlarında en küçük basınç dayanımının 0,5 günlük numunelerde meydana geldiği, en büyük basınç dayanımının ise 56 günlük betonlarda meydana geldiği,
- ✓ Lifsiz betonlarda 0,5. gün ile 56. gün arasında beton basınç dayanımının %69

oranında arttığı,

- ✓ Bu artışın %1 lifli betonlarda %66 oranında, %2 lifli betonlarda %65 oranında, %3 lifli betonlarda ise %69 oranında olduğu,
- ✓ En büyük basınç dayanımı değerinin 45,5 MPa ile %2 oranında lifli betonun 56. gününde meydana geldiği görülmüştür.

Çizelge 4.13. Betonların basınç dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.

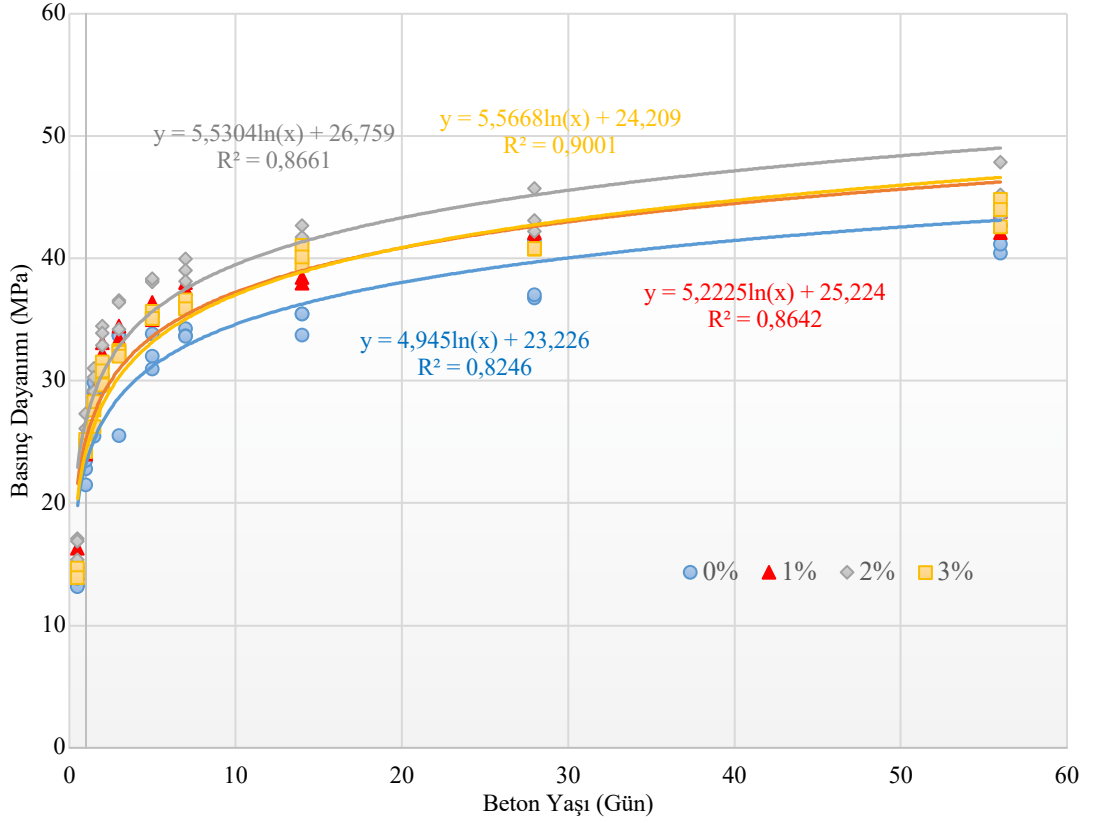
| Beton yaşı | Cam lifli miktarı (%) | N | Farklı olan gruplar $p \leq 0,05$ |       |       |       |
|------------|-----------------------|---|-----------------------------------|-------|-------|-------|
|            |                       |   | 1                                 | 2     | 3     | 4     |
| 0,5        | 0                     | 3 | 13,47                             |       |       |       |
|            | 3                     | 3 | 14,39                             | 14,39 |       |       |
|            | 1                     | 3 |                                   | 15,29 | 15,29 |       |
|            | 2                     | 3 |                                   |       | 16,47 |       |
| 1          | 0                     | 3 | 22,60                             |       |       |       |
|            | 1                     | 3 |                                   | 24,53 |       |       |
|            | 3                     | 3 |                                   | 24,74 |       |       |
|            | 2                     | 3 |                                   | 26,22 |       |       |
| 1,5        | 3                     | 3 | 27,41                             |       |       |       |
|            | 0                     | 3 | 28,17                             |       |       |       |
|            | 1                     | 3 | 28,56                             |       |       |       |
|            | 2                     | 3 | 30,16                             |       |       |       |
| 2          | 0                     | 3 | 30,50                             |       |       |       |
|            | 3                     | 3 | 30,69                             |       |       |       |
|            | 1                     | 3 |                                   | 32,45 |       |       |
|            | 2                     | 3 |                                   | 33,78 |       |       |
| 3          | 0                     | 3 | 31,01                             |       |       |       |
|            | 3                     | 3 | 32,30                             |       |       |       |
|            | 1                     | 3 | 33,74                             |       |       |       |
|            | 2                     | 3 | 35,76                             |       |       |       |
| 5          | 0                     | 3 | 32,29                             |       |       |       |
|            | 3                     | 3 |                                   | 35,32 |       |       |
|            | 1                     | 3 |                                   | 35,59 |       |       |
|            | 2                     | 3 |                                   |       | 38,24 |       |
| 7          | 0                     | 3 | 33,90                             |       |       |       |
|            | 3                     | 3 |                                   | 36,18 |       |       |
|            | 1                     | 3 |                                   |       | 37,52 |       |
|            | 2                     | 3 |                                   |       |       | 39,08 |
| 14         | 0                     | 3 | 34,91                             |       |       |       |
|            | 1                     | 3 |                                   | 38,71 |       |       |
|            | 3                     | 3 |                                   | 40,23 |       |       |
|            | 2                     | 3 |                                   |       | 41,92 |       |
| 28         | 0                     | 3 | 38,41                             |       |       |       |
|            | 3                     | 3 | 40,82                             | 40,82 |       |       |
|            | 1                     | 3 |                                   | 41,61 |       |       |
|            | 2                     | 3 |                                   | 43,72 |       |       |
| 56         | 0                     | 3 | 41,46                             |       |       |       |
|            | 1                     | 3 | 42,88                             | 42,88 |       |       |
|            | 3                     | 3 | 43,83                             | 43,83 |       |       |
|            | 2                     | 3 |                                   | 45,50 |       |       |

Farklı beton yaşlarında, lif oranlarına bağlı olarak basınç dayanımı değerlerindeki değişimin test edildiği Duncan testi sonuçları incelendiğinde;

- ✓ Tüm beton yaşlarında lif miktarına bağlı olarak basınç dayanımı değerlerinin değiştiği,
- ✓ Tüm beton yaşlarında en küçük basınç dayanımı değerinin lifsiz betonlarda, en büyük basınç dayanımlarının ise %2 oranında lifli betonlarda meydana geldiği,
- ✓ 28 günlük betonlarda 38,41 MPa ile en küçük basınç dayanımı değerinin lifsiz betona ait olduğu,
- ✓ En büyük basınç dayanımı değerinin ise 43,72 MPa ile %2 lifli betonlarda olduğu,
- ✓ 28 günlük betonlarda lifsiz betona göre %2 lifli beton basınç dayanımı değerlerinin %13 oranında daha büyük olduğu,
- ✓ Tüm beton yaşlarında, lif oranlarına bağlı olarak basınç dayanımı değerleri %9-19 arasında değişim gösterdiği,
- ✓ Tüm beton yaşlarında ise %3 oranındaki lifli betonların basınç dayanımı değerlerini %2 ye göre %4-%13 arasında daha düşüş meydana geldiği görülmektedir.

Beton yaşı ile beton basınç dayanımı değerleri arasındaki ilişkiyi modelleyebilmek amacıyla regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Basınç Dayanımı-Beton Yaşı arasındaki ilişki grafiği Şekil 4.6’da görülmektedir. Gerçekleştirilen regresyon analizi sonucunda Basınç Dayanımı-Beton Yaşı arasındaki ilişkinin “ $Y = A \cdot \ln(X) + B$ ” model denklemi ile ifade edilebilen bir ilişkinin olduğu, oluşturulan model denklemlerin lifli betonlarda farklı lif oranları için basınç dayanımını tahmin etmek amacıyla kullanılabileceği ve modellerin  $R^2$  değerlerinin lif oranı sırasıyla 0.82, 0.86, 0.86 ve 0.90 olduğu tespit edilmiştir.

Literatürde; Yıldız [6], İskender ve Karasu [169], Peter ve Crocker’ın [170] yapmış olduğu çalışmalarda da lif miktarı artışıyla belirli bir lif oranına kadar basınç dayanımının artış gösterdiği, optimum orandan itibaren basınç dayanımlarında düşüş olduğu görülmüştür.



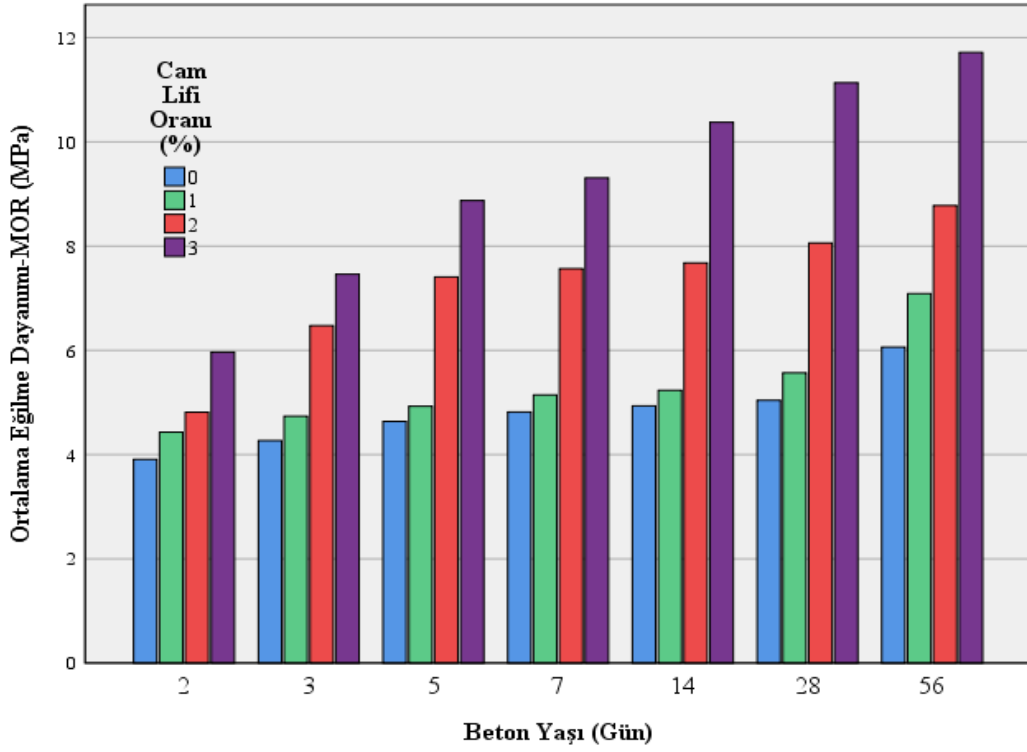
Şekil 4.6. Beton yaşı ile beton basınç dayanımı arasında ilişki grafiği.

#### 4.5. EĞİLME DAYANIMI DENEYİ SONUÇLARI

Farklı oranlarda cam lifi ile takviye edilerek hazırlanan beton numuneleri üzerinde 2, 3, 5, 7, 14, 28 ve 56. günlerde yapılan deneyler sonucunda eğilme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Elde edilen eğilme dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.14’de verilmiştir. Ayrıca ortalama eğilme dayanımı değerlerini gösteren bar grafik Şekil 4.7’de görülmektedir.

Çizelge 4.14. Eğilme dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler.

| Lif oranı (%) | Beton yaşı (gün) | N | Ortalama eğilme dayanımı (MPa) | Std. Sapma | Std. Hata | %95 güven aralığında ortalamanın |            | Minimum | Maksimum |
|---------------|------------------|---|--------------------------------|------------|-----------|----------------------------------|------------|---------|----------|
|               |                  |   |                                |            |           | Alt sınırı                       | Üst sınırı |         |          |
| 0             | 2                | 6 | 3,91                           | 0,29       | 0,12      | 3,60                             | 4,22       | 3,44    | 4,23     |
|               | 3                | 6 | 4,27                           | 0,29       | 0,12      | 3,97                             | 4,57       | 3,87    | 4,63     |
|               | 5                | 6 | 4,64                           | 1,63       | 0,67      | 2,93                             | 6,35       | 3,47    | 7,86     |
|               | 7                | 6 | 4,82                           | 0,33       | 0,14      | 4,47                             | 5,16       | 4,25    | 5,10     |
|               | 14               | 6 | 4,93                           | 0,27       | 0,11      | 4,65                             | 5,22       | 4,43    | 5,20     |
|               | 28               | 6 | 5,04                           | 0,13       | 0,06      | 4,90                             | 5,18       | 4,80    | 5,16     |
|               | 56               | 6 | 6,06                           | 0,20       | 0,08      | 5,85                             | 6,28       | 5,76    | 6,27     |
| 1             | 2                | 6 | 4,43                           | 0,38       | 0,15      | 4,03                             | 4,83       | 4,03    | 4,85     |
|               | 3                | 6 | 4,74                           | 0,62       | 0,25      | 4,09                             | 5,39       | 4,04    | 5,78     |
|               | 5                | 6 | 4,93                           | 0,52       | 0,21      | 4,39                             | 5,47       | 4,08    | 5,42     |
|               | 7                | 6 | 5,14                           | 0,28       | 0,12      | 4,85                             | 5,44       | 4,78    | 5,45     |
|               | 14               | 6 | 5,23                           | 0,14       | 0,06      | 5,09                             | 5,37       | 5,10    | 5,43     |
|               | 28               | 6 | 5,57                           | 0,33       | 0,14      | 5,22                             | 5,92       | 5,20    | 6,10     |
|               | 56               | 6 | 7,09                           | 0,32       | 0,13      | 6,75                             | 7,42       | 6,56    | 7,40     |
| 2             | 2                | 6 | 4,81                           | 0,58       | 0,24      | 4,20                             | 5,42       | 4,10    | 5,68     |
|               | 3                | 6 | 6,47                           | 1,50       | 0,61      | 4,90                             | 8,05       | 5,09    | 8,47     |
|               | 5                | 6 | 7,41                           | 0,70       | 0,29      | 6,67                             | 8,15       | 6,21    | 8,37     |
|               | 7                | 6 | 7,57                           | 0,43       | 0,18      | 7,11                             | 8,02       | 7,00    | 8,20     |
|               | 14               | 6 | 7,68                           | 0,24       | 0,10      | 7,43                             | 7,93       | 7,37    | 8,07     |
|               | 28               | 6 | 8,06                           | 0,39       | 0,16      | 7,65                             | 8,47       | 7,42    | 8,56     |
|               | 56               | 6 | 8,78                           | 0,89       | 0,36      | 7,85                             | 9,71       | 7,24    | 9,95     |
| 3             | 2                | 6 | 5,97                           | 0,98       | 0,40      | 4,94                             | 6,99       | 5,48    | 7,94     |
|               | 3                | 6 | 7,46                           | 0,85       | 0,35      | 6,57                             | 8,35       | 6,44    | 8,48     |
|               | 5                | 6 | 8,87                           | 0,53       | 0,22      | 8,32                             | 9,43       | 8,37    | 9,85     |
|               | 7                | 6 | 9,31                           | 0,33       | 0,14      | 8,96                             | 9,65       | 8,85    | 9,60     |
|               | 14               | 6 | 10,37                          | 0,46       | 0,19      | 9,89                             | 10,86      | 9,87    | 10,89    |
|               | 28               | 6 | 11,13                          | 1,01       | 0,41      | 10,07                            | 12,19      | 10,16   | 12,50    |
|               | 56               | 6 | 11,72                          | 0,27       | 0,11      | 11,44                            | 12,00      | 11,25   | 12,01    |



Şekil 4.7. Beton numunelerine ait ortalama eğilme dayanımı değerleri.

Cam lifli takviyeli betonlardan elde edilen eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde lif miktarına göre eğilme dayanımı değerlerinde değişimlerin olduğu, en yüksek eğilme dayanımı değerlerinin %3 cam lifli takviyeli karışımlarda elde edildiği görülmektedir. Ayrıca tüm cam lifli takviye oranlarında beton yaşı ilerledikçe eğilme dayanımı değerlerinde de bir artışın olduğu tespit edilmiştir.

Cam lifli takviye miktarı ve beton yaşına bağlı olarak eğilme dayanımı değerlerinde meydana gelen değişimin istatistiksel anlamda önemli olup olmadığını test etmek amacıyla elde edilen veriler üzerinde varyans analizi gerçekleştirilerek gruplar arasındaki farklar incelenmiştir. Eğilme dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları Çizelge 4.15’de ve Çizelge 4.16’da verilmiştir.

Çizelge 4.15. Eğilme dayanımı değerleri üzerinde beton yaşları arasında gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları.

| Cam lifi miktarı (%) | Varyansın kaynağı | Kareler toplamı | Serbestlik derecesi | Kareler ortalaması | F-testi | Anlamlılık düzeyi $P \leq 0,05$ |
|----------------------|-------------------|-----------------|---------------------|--------------------|---------|---------------------------------|
| 0                    | Gruplar arası     | 16,639          | 6                   | 2,773              | 6,325   | 0,000                           |
|                      | Gruplar içi       | 15,346          | 35                  | 0,438              |         |                                 |
|                      | Toplam            | 31,985          | 41                  |                    |         |                                 |
| 1                    | Gruplar arası     | 27,047          | 6                   | 4,508              | 28,723  | 0,000                           |
|                      | Gruplar içi       | 5,493           | 35                  | 0,157              |         |                                 |
|                      | Toplam            | 32,539          | 41                  |                    |         |                                 |
| 2                    | Gruplar arası     | 59,106          | 6                   | 9,851              | 16,146  | 0,000                           |
|                      | Gruplar içi       | 21,354          | 35                  | 0,610              |         |                                 |
|                      | Toplam            | 80,460          | 41                  |                    |         |                                 |
| 3                    | Gruplar arası     | 150,103         | 6                   | 25,017             | 52,144  | 0,000                           |
|                      | Gruplar içi       | 16,792          | 35                  | 0,480              |         |                                 |
|                      | Toplam            | 166,895         | 41                  |                    |         |                                 |

Çizelge 4.16. Cam lifi takviyeli beton numunelerine ait lif oranları arasında gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları.

| Beton yaşı (gün) | Varyansın kaynağı | Kareler toplamı | Serbestlik derecesi | Kareler ortalaması | F-testi | Anlamlılık düzeyi $P \leq 0,05$ |
|------------------|-------------------|-----------------|---------------------|--------------------|---------|---------------------------------|
| 2                | Gruplar arası     | 13,742          | 3                   | 4,581              | 12,100  | 0,000                           |
|                  | Gruplar içi       | 7,571           | 20                  | 0,379              |         |                                 |
|                  | Toplam            | 21,313          | 23                  |                    |         |                                 |
| 3                | Gruplar arası     | 39,972          | 3                   | 13,324             | 15,502  | 0,000                           |
|                  | Gruplar içi       | 17,190          | 20                  | 0,860              |         |                                 |
|                  | Toplam            | 57,162          | 23                  |                    |         |                                 |
| 5                | Gruplar arası     | 74,316          | 3                   | 24,772             | 26,774  | 0,000                           |
|                  | Gruplar içi       | 18,505          | 20                  | 0,925              |         |                                 |
|                  | Toplam            | 92,820          | 23                  |                    |         |                                 |
| 7                | Gruplar arası     | 81,069          | 3                   | 27,023             | 223,649 | 0,000                           |
|                  | Gruplar içi       | 2,417           | 20                  | 0,121              |         |                                 |
|                  | Toplam            | 83,486          | 23                  |                    |         |                                 |
| 14               | Gruplar arası     | 115,362         | 3                   | 38,454             | 425,149 | 0,000                           |
|                  | Gruplar içi       | 1,809           | 20                  | 0,090              |         |                                 |
|                  | Toplam            | 117,171         | 23                  |                    |         |                                 |
| 28               | Gruplar arası     | 139,656         | 3                   | 46,552             | 142,970 | 0,000                           |
|                  | Gruplar içi       | 6,512           | 20                  | 0,326              |         |                                 |
|                  | Toplam            | 146,168         | 23                  |                    |         |                                 |
| 56               | Gruplar arası     | 109,921         | 3                   | 36,640             | 147,114 | 0,000                           |
|                  | Gruplar içi       | 4,981           | 20                  | 0,249              |         |                                 |
|                  | Toplam            | 114,902         | 23                  |                    |         |                                 |

Gerçekleştirilen varyans analizi sonuçlarına göre beton yaşları ve lif oranlarına bağlı olarak eğilme dayanımı değerlerinin istatistiki olarak önemli miktarda değişim gösterdiği



görülmüştür. Bu sonuçlar beton yaşı ve lif miktarının eğilme dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Eğilme dayanımı değerlerindeki değişimin hangi gruplardan kaynaklandığını tespit etmek amacıyla hem beton yaşları hem de lif miktarlarına bağlı olarak Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır. Beton yaşları arasında gerçekleştirilen Duncan testi sonuçları Çizelge 4.17’de, lif oranları arasında gerçekleştirilen Duncan Testi sonuçları ise Çizelge 4.18’de verilmiştir.

Çizelge 4.17. Beton yaşları arasında eğilme dayanımı değerlerine üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.

| Cam lifi miktarı (%) | Beton yaşı (gün) | N | Farklı olan gruplar $p \leq 0,05$ |      |      |       |       |
|----------------------|------------------|---|-----------------------------------|------|------|-------|-------|
|                      |                  |   | 1                                 | 2    | 3    | 4     | 5     |
| 0                    | 2                | 6 | 3,91                              |      |      |       |       |
|                      | 3                | 6 | 4,27                              | 4,27 |      |       |       |
|                      | 5                | 6 | 4,64                              | 4,64 |      |       |       |
|                      | 7                | 6 |                                   | 4,82 |      |       |       |
|                      | 14               | 6 |                                   | 4,93 |      |       |       |
|                      | 28               | 6 |                                   | 5,04 |      |       |       |
|                      | 56               | 6 |                                   |      | 6,06 |       |       |
| 1                    | 2                | 6 | 4,81                              |      |      |       |       |
|                      | 3                | 6 |                                   | 6,47 |      |       |       |
|                      | 5                | 6 |                                   |      | 7,41 |       |       |
|                      | 7                | 6 |                                   |      | 7,57 |       |       |
|                      | 14               | 6 |                                   |      | 7,68 |       |       |
|                      | 28               | 6 |                                   |      | 8,06 | 8,06  |       |
|                      | 56               | 6 |                                   |      |      | 8,78  |       |
| 2                    | 2                | 6 | 4,81                              |      |      |       |       |
|                      | 3                | 6 |                                   | 6,47 |      |       |       |
|                      | 5                | 6 |                                   |      | 7,41 |       |       |
|                      | 7                | 6 |                                   |      | 7,57 |       |       |
|                      | 14               | 6 |                                   |      | 7,68 |       |       |
|                      | 28               | 6 |                                   |      | 8,06 | 8,06  |       |
|                      | 56               | 6 |                                   |      |      | 8,78  |       |
| 3                    | 2                | 6 | 5,97                              |      |      |       |       |
|                      | 3                | 6 |                                   | 7,46 |      |       |       |
|                      | 5                | 6 |                                   |      | 8,87 |       |       |
|                      | 7                | 6 |                                   |      | 9,31 |       |       |
|                      | 14               | 6 |                                   |      |      | 10,37 |       |
|                      | 28               | 6 |                                   |      |      | 11,13 | 11,13 |
|                      | 56               | 6 |                                   |      |      |       | 11,72 |

Beton yaşları arasında eğilme dayanımı değerleri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre;

- ✓ Tüm lif oranlarında 2 günlük eğilme dayanımlarının en küçük, 56 günlük eğilme dayanımlarının ise en büyük değerlere sahip olduğu,

- ✓ Tüm lif oranlarında beton yaşı ilerledikçe eğilme dayanımı değerlerinin de arttığı,
- ✓ %0, 1, 2 ve 3 oranında lifli betonlarda 2 günlük beton ile 56 günlük beton arasındaki eğilme dayanımı değerlerinin sırasıyla %36, %45, %46, %50 oranlarında artış gösterdiği,
- ✓ %0, 1, 2 ve 3 oranında lifli betonlarda 28 günlük beton ile 56 günlük beton arasındaki eğilme dayanımı değerlerinin sırasıyla %17, %10, %9, %6 oranlarında artış gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 4.18. Lif oranları arasında eğilme dayanımı değerlerine üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.

| Beton yaşı | Cam lifi miktarı (%) | N | Farklı olan gruplar $p \leq 0,05$ |      |       |       |
|------------|----------------------|---|-----------------------------------|------|-------|-------|
|            |                      |   | 1                                 | 2    | 3     | 4     |
| 2 günlük   | 0                    | 6 | 3,91                              |      |       |       |
|            | 1                    | 6 | 4,43                              | 4,43 |       |       |
|            | 2                    | 6 |                                   | 4,81 |       |       |
|            | 3                    | 6 |                                   |      | 5,97  |       |
| 3 günlük   | 0                    | 6 | 4,27                              |      |       |       |
|            | 1                    | 6 | 4,74                              |      |       |       |
|            | 2                    | 6 |                                   | 6,47 |       |       |
|            | 3                    | 6 |                                   | 7,46 |       |       |
| 5 günlük   | 0                    | 6 | 4,64                              |      |       |       |
|            | 1                    | 6 | 4,93                              |      |       |       |
|            | 2                    | 6 |                                   | 7,41 |       |       |
|            | 3                    | 6 |                                   |      | 8,87  |       |
| 7 günlük   | 0                    | 6 | 4,82                              |      |       |       |
|            | 1                    | 6 | 5,14                              |      |       |       |
|            | 2                    | 6 |                                   | 7,57 |       |       |
|            | 3                    | 6 |                                   |      | 9,31  |       |
| 14 günlük  | 0                    | 6 | 4,93                              |      |       |       |
|            | 1                    | 6 | 5,23                              |      |       |       |
|            | 2                    | 6 |                                   | 7,68 |       |       |
|            | 3                    | 6 |                                   |      | 10,37 |       |
| 28 günlük  | 0                    | 6 | 5,04                              |      |       |       |
|            | 1                    | 6 | 5,57                              |      |       |       |
|            | 2                    | 6 |                                   | 8,06 |       |       |
|            | 3                    | 6 |                                   |      | 11,13 |       |
| 56 günlük  | 0                    | 6 | 6,06                              |      |       |       |
|            | 1                    | 6 |                                   | 7,09 |       |       |
|            | 2                    | 6 |                                   |      | 8,78  |       |
|            | 3                    | 6 |                                   |      |       | 11,72 |

Lif oranları arasında eğilme dayanımı değerleri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre;

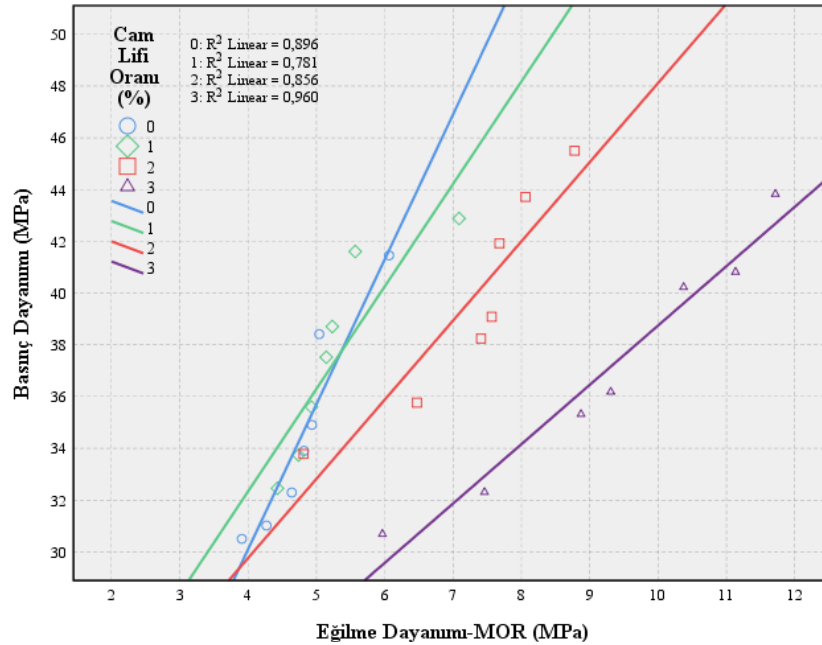
- ✓ Tüm beton yaşlarında lifsiz betonların eğilme dayanımlarının en küçük, %3 lifli

betonların eğilme dayanımlarının ise en büyük değerlere sahip olduğu,

- ✓ Tüm beton yaşlarında lif miktarı arttıkça eğilme dayanımı değerlerinin de arttığı,
- ✓ 2, 3, 5, 7, 14, 28 ve 56 günlük betonlarda lifsiz betona göre %3 lifli betonun eğilme dayanımı değerlerinin sırasıyla %34, %44, %49, %49, %53, %56 ve %49 oranlarında artış gösterdiği,
- ✓ Tüm beton yaşlarında genellikle lifsiz ve %1 lifli betonların eğilme dayanımlarının birbirinden farksız olduğu, ancak %2 ve %3 lif kullanılan betonların eğilme dayanımlarının diğer lifli betonlardan eğilme dayanımlarının önemli bir artışın olduğu görülmektedir.

Peter ve ark. [170], Camacho ve ark. [171] ve Peter [172], yapmış olduğu çalışmada cam liflerinin eğilme dayanımı değerleri üzerinde olumlu bir sonuç gösterdiği, lif oranlarının artması ile bu eğilme dayanım değerlerinde artış olduğu belirtilmiştir.

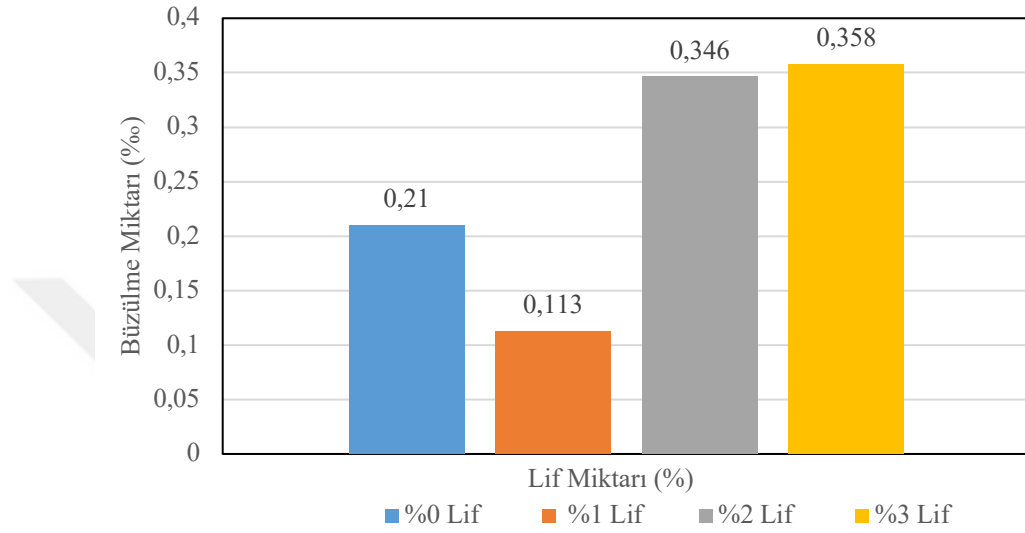
Üretilen lifli betonlarda eğilme dayanımı ile basınç dayanımı değerleri arasındaki ilişkiyi modelleyebilmek amacıyla regresyon analizi gerçekleştirilmiş olup, analiz sonucunda eğilme ve basınç dayanımı değerleri arasında doğrusal bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir. Oluşturulan model denklemlerin lifli betonlarda farklı lif oranları için basınç dayanımını ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki modellerin  $R^2$  değerlerinin lif oranı sırasıyla 0,89, 0,78, 0,85 ve 0,96 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.8).



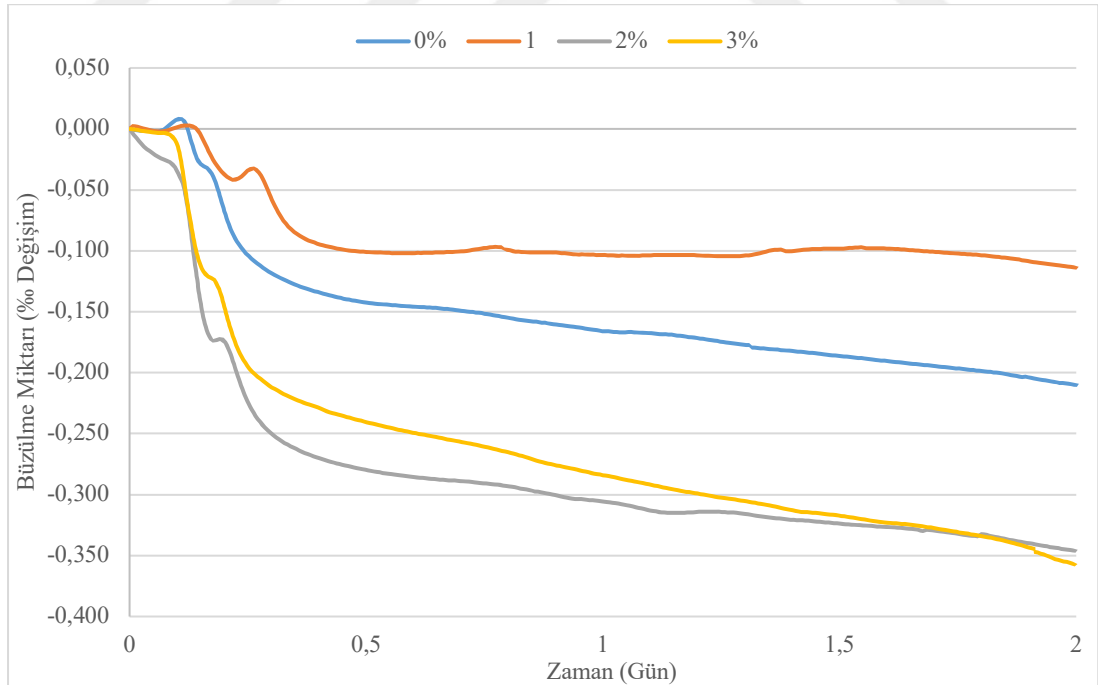
Şekil 4.8. Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı değerleri arasındaki ilişki grafiği.

#### 4.6. ERKEN YAŞ BÜZÜLME DENEYİ SONUÇLARI

Lif takviyeli beton örneklerin büzülme değerlerinin ölçümü büzülme test cihazında gerçekleştirilmiş olup elde edilen deney sonuçlarına ait veriler Şekil 4.9’da verilmiştir. Ayrıca zamana bağlı olarak lif takviyeli betonun büzülme değerlerini gösteren grafik Şekil 4.10’de görülmektedir.



Şekil 4.9. Erken yaş büzülme değişim oranları (binde).



Şekil 4.10. Lifli betonlara ait büzülme değerleri.

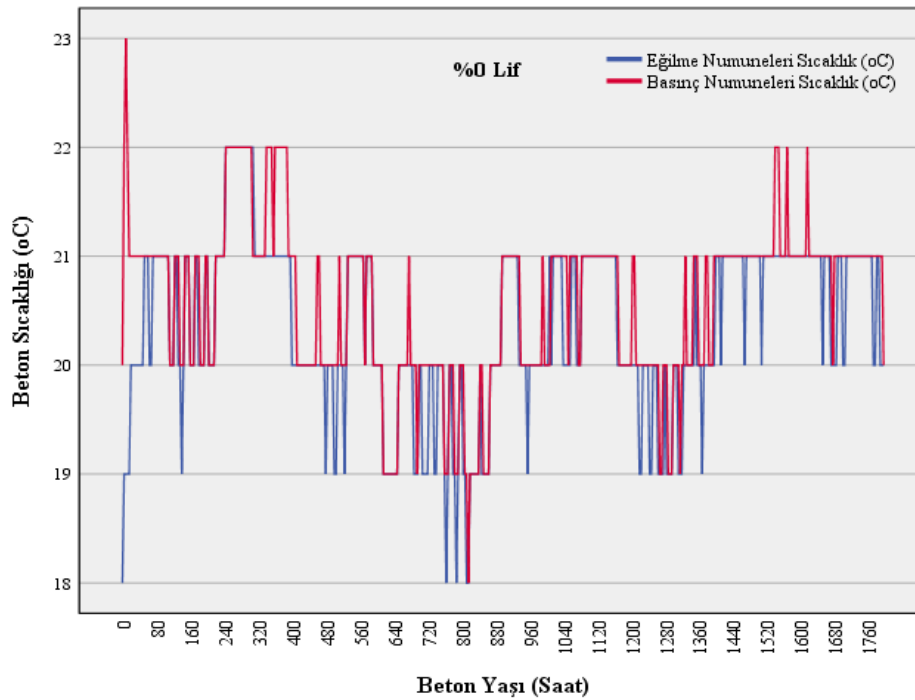
Büzülme değerleri incelendiğinde en düşük büzülme değerine %1 oranında lif takviyeli betonlarda görüldüğü, en büyük büzülme değerinin ise %3 oranında lif takviyeli

betonlarda olduğu tespit edilmiştir. %1 oranında lif takviyeli betonun lifsiz betona göre 48 saat sonra %47 oranında daha düşük büzülme değerlerine sahip olduğu, %2 ve %3 oranında lifli betonların ise birbirine yakın büzülme değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Büzülme deneyi 48 saat gibi erken yaştaki beton karışımları üzerinde uygulanmasından dolayı ileri yaşlardaki büzülme davranışı açısından bir değerlendirme yapılamamıştır. Ancak literatür bilgileri incelendiğinde hazırlanan tüm karışımların lifli betonlar için kabul edilebilir büzülme değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

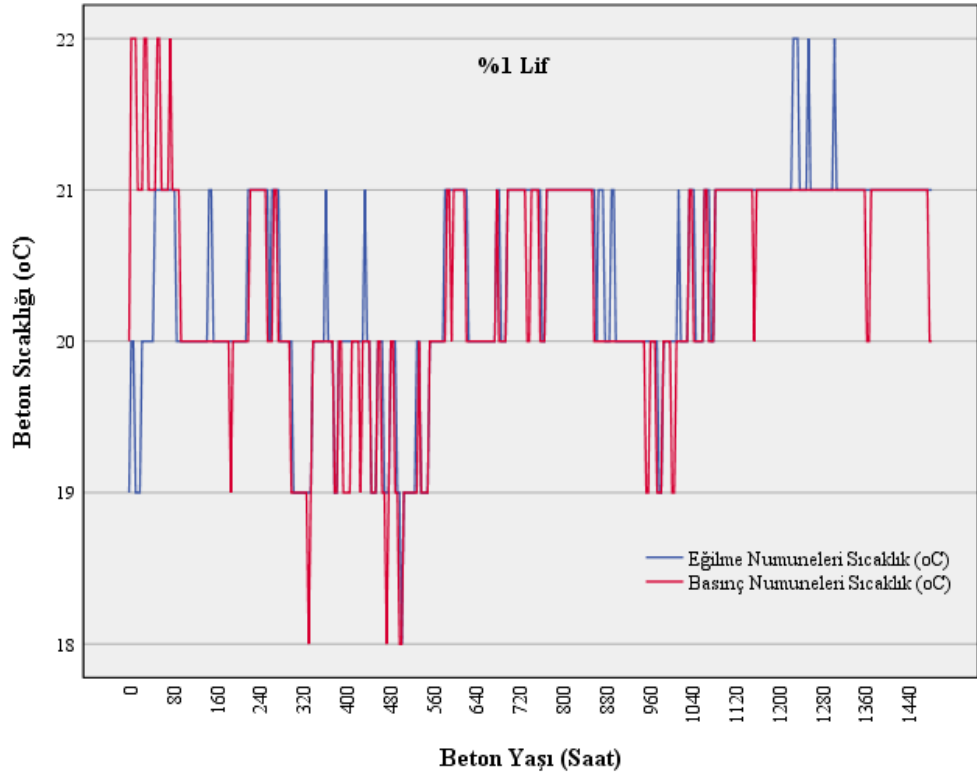
Bu çalışmada GRC-CTB numunelerde sadece erken yaş büzülme bakılmıştır. Ancak GRC-CTB üzerindeki tecrübelerimiz büzülmenin 28 gün sonuna kadar devam ettiğini ve bu çalışmada kullanılan karışımlara benzer MTK içerikli karışımlarda 28 günlük büzülmenin % 1’er mertebesinde olduğunu göstermektedir.

#### 4.7. OLGUNLUK DENEYİ ÖLÇÜM SONUÇLARI

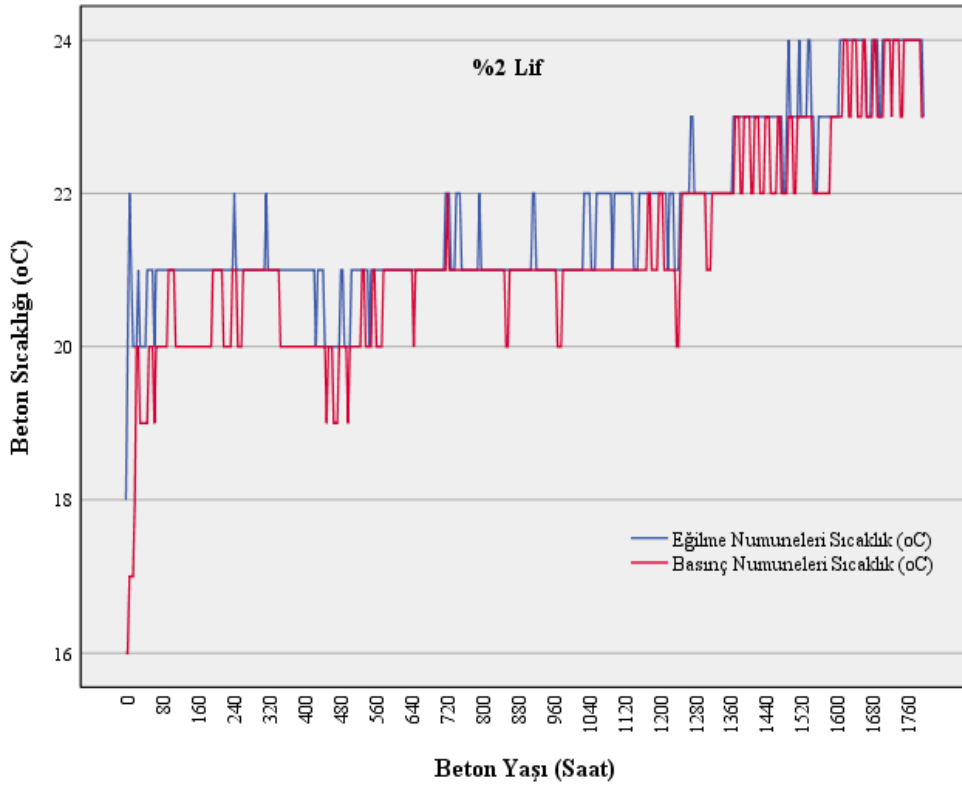
Dört farklı lif oranında hazırlanan eğilme ve basınç dayanımı deneyleri için hazırlanan beton numuneleri üzerinde olgunluk ölçer cihaz yardımı ile sıcaklık ve zaman verileri elde edilmiştir. Her bir lif oranında betonlardan 4 saat aralıklarla yapılan ölçümlerden elde edilen sıcaklık değerlerini gösteren grafikler Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’te görülmektedir.



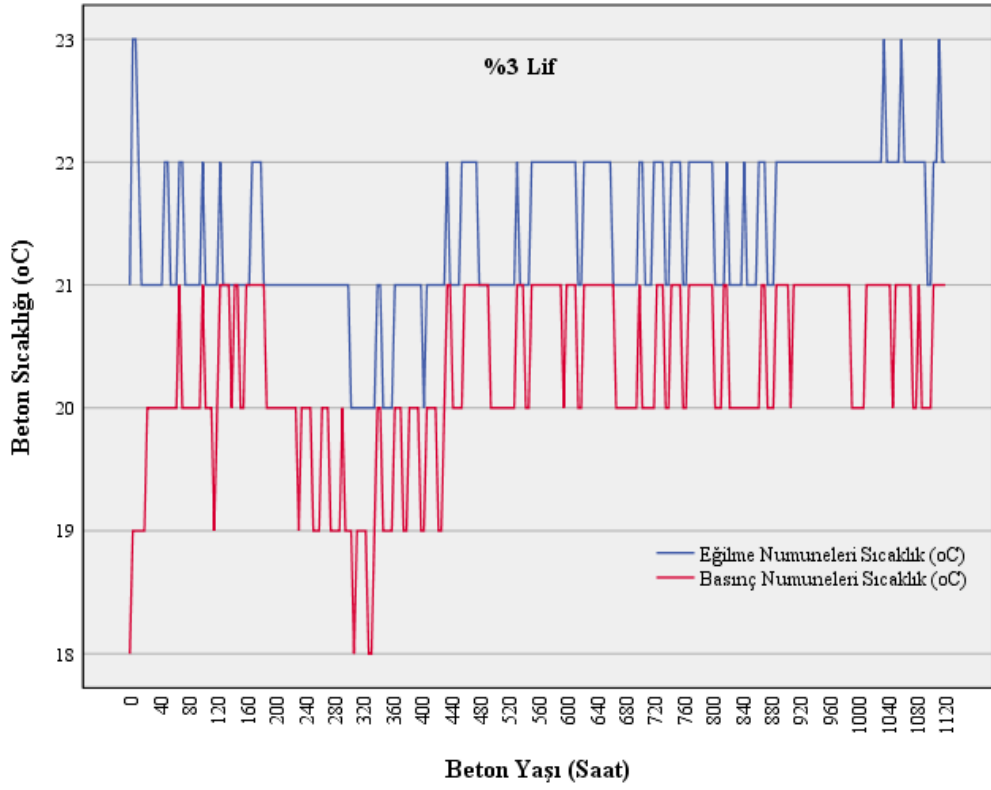
Şekil 4.11. Lifsiz beton karışımlarından elde edilen sıcaklık-zaman verileri.



Şekil 4.12. %1 lif takviyeli beton karışımlarından elde edilen sıcaklık-zaman verileri.



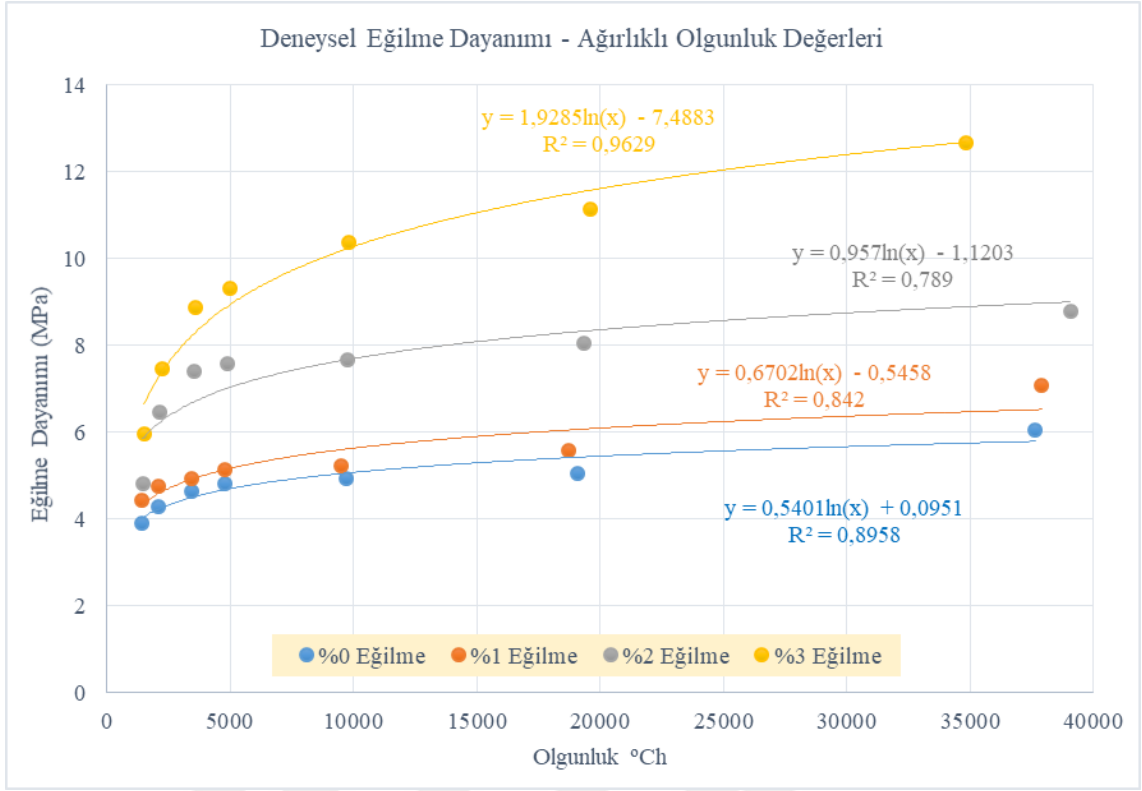
Şekil 4.13. %2 lif takviyeli beton karışımlarından elde edilen sıcaklık-zaman verileri.



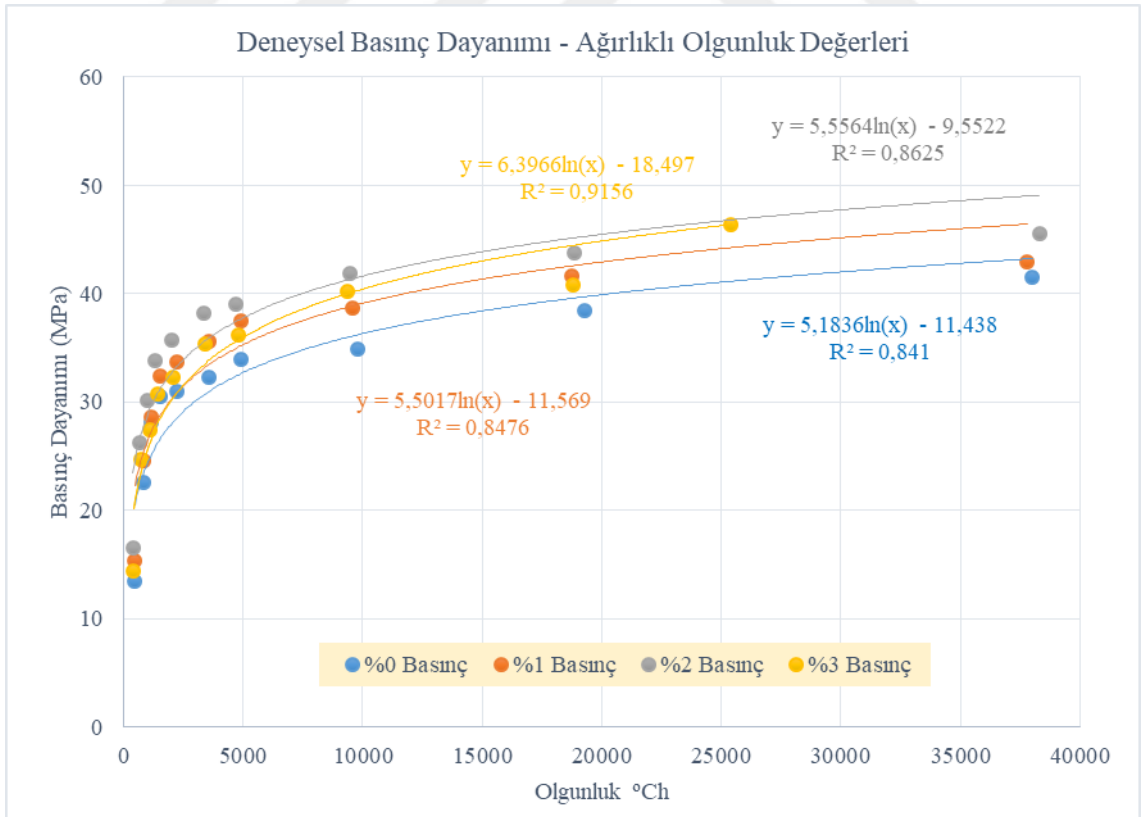
Şekil 4.14. %3 lif takviyeli beton karışımlarından elde edilen sıcaklık-zaman verileri.

Elde edilen sıcaklık değişimleri incelendiğinde beton sıcaklıklarının ölçüm süreci boyunca 18-24 °C aralığında sıcaklık değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Eğilme ve basınç dayanımı için hazırlanan numunelerden sıcaklık verileri 4 saat aralıklarda yaklaşık 56 gün boyunca ölçülmüştür. Genel olarak tüm beton türlerindeki sıcaklık değişim oranı %25 olarak belirlenmiştir.

Elde edilen sıcaklık ve zaman verileri kullanılarak NEN-5970 standardında belirtilen yöntem ve hesaplamalar kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen olgunluk değerleri ile dayanım olgunluk ilişki grafikleri oluşturulmuştur. Ayrıca grafikler üzerinde eş olgunluk değerlerinde deneysel olarak belirlenen dayanım değerleri ile olgunluk ilişki grafikleri de işlenmiştir. Farklı lif oranlarındaki betonlarda, eğilme ve basınç dayanımı değerleri için ağırlıklı olgunluk yöntemiyle hesaplanan dayanım olgunluk ilişki grafikleri Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da görülmektedir.



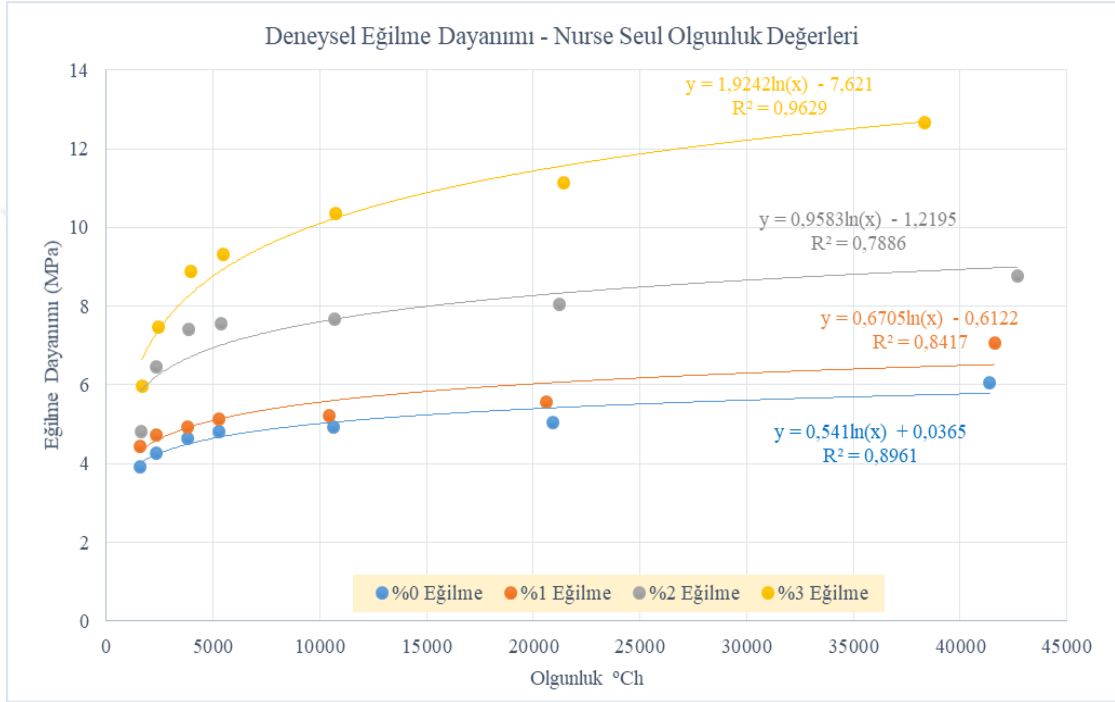
Şekil 4.15. Ağırlıklı olgunluk-eğilme dayanımı ilişkisi.



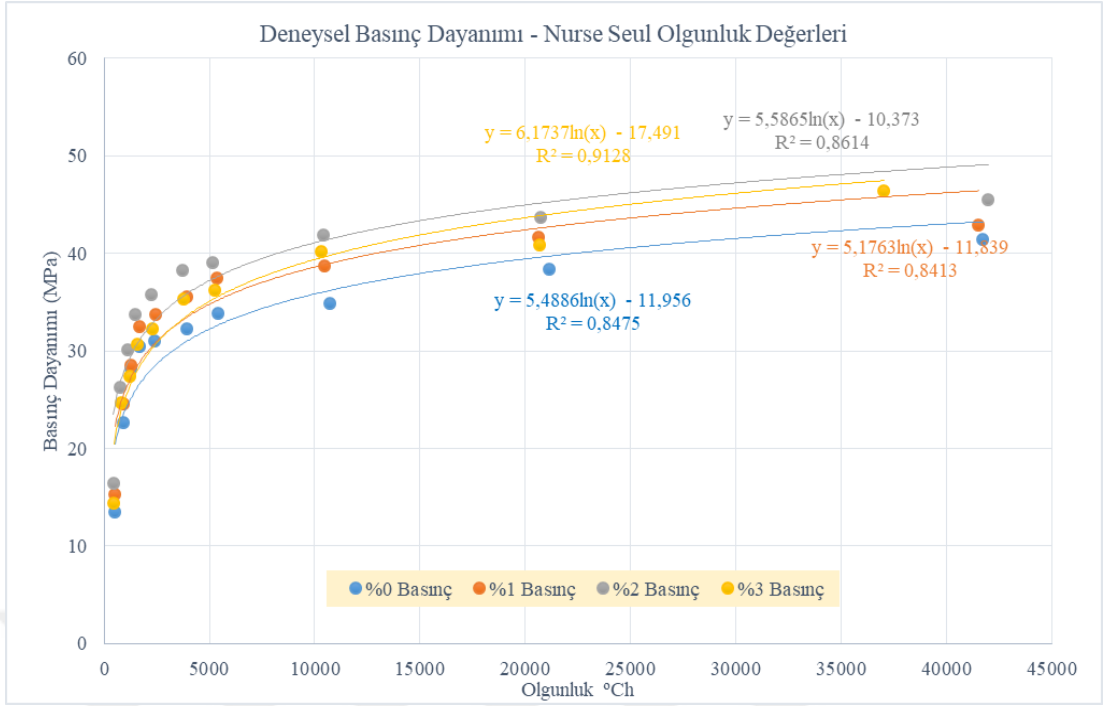
Şekil 4.16. Ağırlıklı olgunluk-basınç dayanımı ilişkisi.



Ayrıca elde edilen sıcaklık ve zaman verileri kullanılarak Nurse-Seul olgunluk fonksiyonu ile olgunluk değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen olgunluk değerleri ile dayanım olgunluk ilişki grafikleri oluşturulmuştur. Ayrıca grafikler üzerinde eş olgunluk değerlerinde deneysel olarak belirlenen dayanım değerleri ile olgunluk ilişki grafikleri de işlenmiştir. Farklı lif oranlarındaki betonlarda, eğilme ve basınç dayanımı değerleri için Nurse-Seul olgunluk fonksiyonu ile hesaplanan dayanım olgunluk ilişki grafikleri Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de görülmektedir.



Şekil 4.17. Nurse-Seul olgunluk-eğilme dayanımı ilişki grafiği.



Şekil 4.18. Nurse-Seul olgunluk-basınç dayanımı ilişki grafiği.

Dayanım-Olgunluk ilişkileri incelendiğinde hem ağırlıklı olgunluk yöntemi hem de Nurse-Seul fonksiyonu ile yapılan olgunluk hesaplamasından elde edilen olgunluk değerleri ile eğilme dayanımı tahmininde lifsiz betonlar için kullanılabilir değerlerin elde edildiği, ancak lif takviyeli betonlar için dayanım tahminlerinde önemli farklılıkların ortaya çıktığı görülmektedir.

Ağırlıklı olgunluk değerleri ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki denklemleri kullanılarak her bir lif oranı için 5000, 1000, 15000, 20000, 25000, 30000 ve 35000 olgunluk değerlerine karşılık gelen eğilme dayanımları hesaplanmıştır. Belirlenen olgunluk değerlerine karşılık gelen eğilme dayanımı değerlerinin lifsiz beton dayanım değerlerinden çıkarılarak farkları belirlenmiştir. Elde edilen veriler Çizelge 4.19’da verilmiştir.

Çizelge 4.19. Modelden hesaplanan olgunluk değerlerine karşılık gelen eğilme dayanımı.

| Lif Oranı (%) | Eğilme Dayanımı (MPa) | Ağırlıklı Olgunluk (°Ch) | Eğilme Dayanım Farkı (MPa) |
|---------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|
| 0             | 4,695236              | 5000                     | 0                          |
| 1             | 5,162423              | 5000                     | 0,467187                   |
| 2             | 7,030654              | 5000                     | 2,335418                   |
| 3             | 8,937107              | 5000                     | 4,241871                   |
| 0             | 5,069605              | 10000                    | 0                          |
| 1             | 5,62697               | 10000                    | 0,557365                   |
| 2             | 7,693996              | 10000                    | 2,624391                   |
| 3             | 10,27384              | 10000                    | 5,204237                   |
| 0             | 5,288597              | 15000                    | 0                          |
| 1             | 5,898713              | 15000                    | 0,610116                   |
| 2             | 8,082026              | 15000                    | 2,793429                   |
| 3             | 11,05578              | 15000                    | 5,767184                   |
| 0             | 5,443974              | 20000                    | 0                          |
| 1             | 6,091517              | 20000                    | 0,647544                   |
| 2             | 8,357338              | 20000                    | 2,913364                   |
| 3             | 11,61058              | 20000                    | 6,166602                   |
| 0             | 5,564493              | 25000                    | 0                          |
| 1             | 6,241068              | 25000                    | 0,676575                   |
| 2             | 8,570886              | 25000                    | 3,006393                   |
| 3             | 12,04091              | 25000                    | 6,476415                   |
| 0             | 5,662965              | 30000                    | 0                          |
| 1             | 6,36326               | 30000                    | 0,700295                   |
| 2             | 8,745368              | 30000                    | 3,082402                   |
| 3             | 12,39252              | 30000                    | 6,72955                    |
| 0             | 5,746222              | 35000                    | 0                          |
| 1             | 6,466572              | 35000                    | 0,72035                    |
| 2             | 8,89289               | 35000                    | 3,146668                   |
| 3             | 12,68979              | 35000                    | 6,943573                   |

Lifsiz betona göre, lifli betonların dayanım farkları kullanılarak gerçekleştirilen regresyon analizinde lif miktarı ile eğilme dayanımı değerleri arasında exponansiyel bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.19). Lif miktarı ile eğilme dayanımı farkları arasında Sigma Plot programı kullanılarak bir model oluşturulmuştur. Yapılan analizler sonucunda exponansiyel büyüyen tek parametrelili bir model aşağıda verilmiştir.

Bu model maksimum %3 lif oranına kadar incelenmiştir. Bu oranın üzerindeki lif oranlarının eğilme dayanım farkları incelenerek modelin sınırları genişletilebilir.

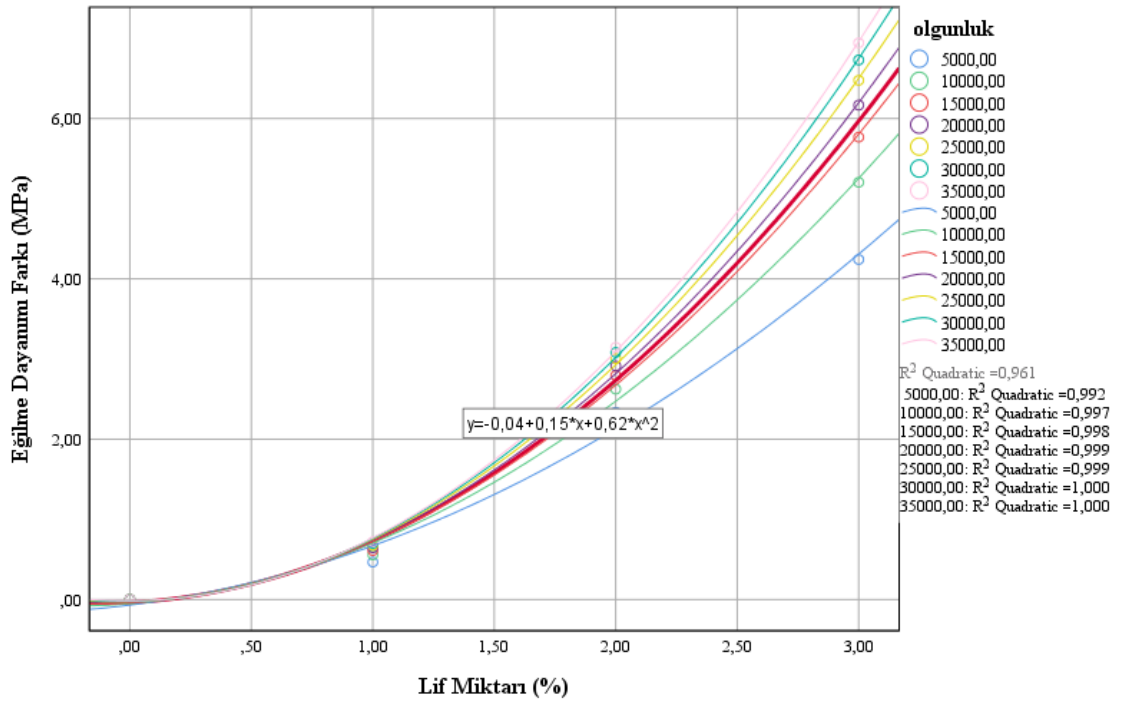
Tasarlanan model;

$$\Delta\sigma_f = (e^{0,5792.F} - 1) \quad (4.1)$$

Formülde;

$\Delta\sigma_f$  = Eğilme dayanımı farkı (MPa)

$F$  = Cam lif oranı, kütlece (%) ifade etmektedir.



Şekil 4.19. Lif miktarı ile eğilme dayanımı farkları arasındaki ilişki grafiği.

Tüm bu analizler sonunda lifsiz betonlar için ağırlıklı olgunluk yönteminden elde edilen verilerle deneysel olarak elde edilen eğilme dayanımı verileri arasında bulunan model aşağıda verilmiştir.

$$\sigma_f = 0,5401.\ln(M) + 0,0951 \quad (4.2)$$

Formülde;

$\sigma_f$  = Lifsiz betonlar için eğilme dayanımını (MPa)

$M$  = Ağırlıklı olgunluk, °C.h

ifade etmektedir.

Elde edilen modeller kullanılarak olgunluk değerlerini kullanarak cam lifi takviyeli betonlarda lif miktarına bağlı olarak eğilme dayanımını tahmin edebileceğimiz aşağıda belirtilen model geliştirilmiştir.

$$\sigma_f = 0,0951 + 0,5401 \cdot \ln(M) + (e^{0,5792 \cdot F} - 1) \quad (4.3)$$

Formülde;

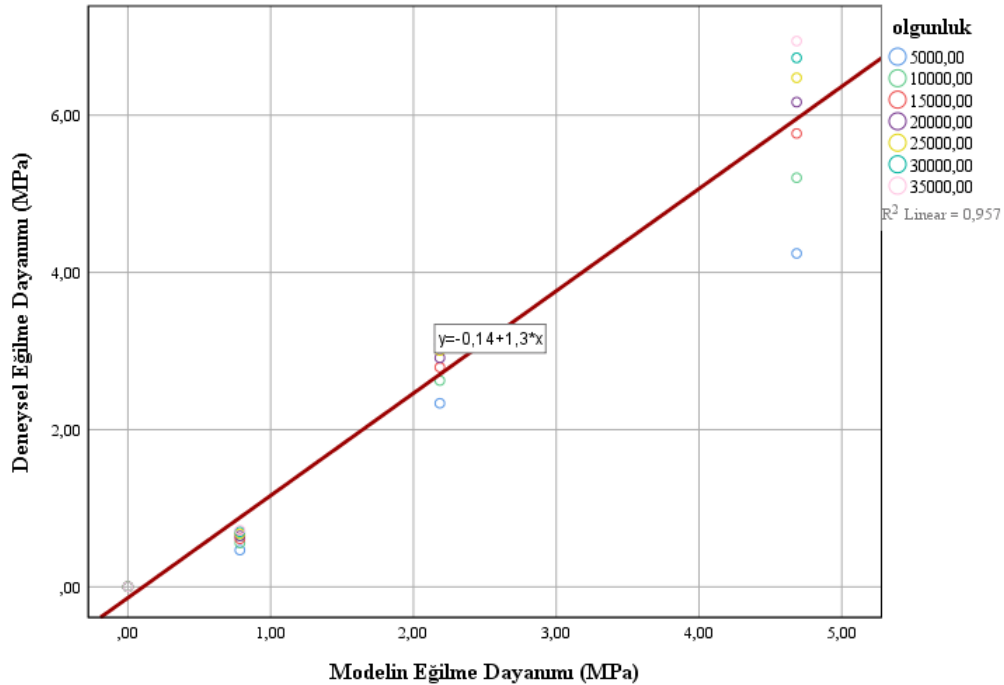
$\sigma_f$ = Lifsiz betonlar için eğilme dayanımını (MPa)

$M$ = Ağırlıklı olgunluk, °C.h

$F$ = Cam lif oranı, kütlece (%)

ifade etmektedir.

Lifli betonların eğilme dayanımlarını tahmin etmek için geliştirilen olgunluk modeli kullanılarak modelin tahmin gücünü belirlemek amacıyla hesaplamalar yapılmış ve gerçek deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deneysel eğilme dayanımı-Model eğilme dayanımı değerlerine ait ilişki grafiği Şekil 4.20’de görülmektedir. Modelin tahmin etmiş olduğu eğilme dayanımı değerlerinin %96 doğruluk oranı ile deneysel eğilme dayanımı verilerini tahmin edebildiği görülmüştür.



Şekil 4.20. Model-deneysel eğilme dayanımı ilişkisi.

Ayrıca ağırlıklı olgunluk değerleri ile basınç dayanımı arasındaki ilişki denklemleri kullanılarak her bir lif oranı için 5000, 1000, 15000, 20000, 25000, 30000 ve 35000 olgunluk değerlerine karşılık gelen basınç dayanımları hesaplanmıştır. Belirlenen olgunluk değerlerine karşılık gelen basınç dayanımı değerlerinin lifsiz beton dayanım değerlerinden çıkarılarak farkları belirlenmiştir. Elde edilen veriler Çizelge 4.20’de verilmiştir.

Çizelge 4.20. Modelden hesaplanan olgunluk değerlerine karşılık gelen basınç dayanımı değerleri.

| Lif Oranı (%) | Basınç Dayanımı (MPa) | Ağırlıklı Olgunluk (°Ch) | Basınç Dayanım Farkı (MPa) |
|---------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|
| 0             | 32,71                 | 5000                     | 0,00                       |
| 1             | 35,29                 | 5000                     | 2,58                       |
| 2             | 37,77                 | 5000                     | 5,06                       |
| 3             | 35,98                 | 5000                     | 3,27                       |
| 0             | 36,30                 | 10000                    | 0,00                       |
| 1             | 39,10                 | 10000                    | 2,80                       |
| 2             | 41,62                 | 10000                    | 5,32                       |
| 3             | 40,42                 | 10000                    | 4,11                       |
| 0             | 38,41                 | 15000                    | 0,00                       |
| 1             | 41,33                 | 15000                    | 2,93                       |
| 2             | 43,88                 | 15000                    | 5,47                       |
| 3             | 43,01                 | 15000                    | 4,61                       |
| 0             | 39,90                 | 20000                    | 0,00                       |
| 1             | 42,92                 | 20000                    | 3,02                       |
| 2             | 45,48                 | 20000                    | 5,58                       |
| 3             | 44,85                 | 20000                    | 4,95                       |
| 0             | 41,05                 | 25000                    | 0,00                       |
| 1             | 44,14                 | 25000                    | 3,09                       |
| 2             | 46,72                 | 25000                    | 5,66                       |
| 3             | 46,28                 | 25000                    | 5,23                       |
| 0             | 42,00                 | 30000                    | 0,00                       |
| 1             | 45,15                 | 30000                    | 3,15                       |
| 2             | 47,73                 | 30000                    | 5,73                       |
| 3             | 47,45                 | 30000                    | 5,45                       |
| 0             | 42,80                 | 35000                    | 0,00                       |
| 1             | 46,00                 | 35000                    | 3,20                       |
| 2             | 48,58                 | 35000                    | 5,79                       |
| 3             | 48,43                 | 35000                    | 5,63                       |

Gerçekleştirilen regresyon analizinde lif miktarı ile basınç dayanımı değerleri arasında ikinci dereceden eğrisel bir ilişkinin olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.21). Lif miktarı ile basınç dayanımı farkları arasında Sigma Plot programı kullanılarak bir model oluşturulmuştur. Yapılan analizler sonucunda aşağıda bulunan model elde edilmiştir.

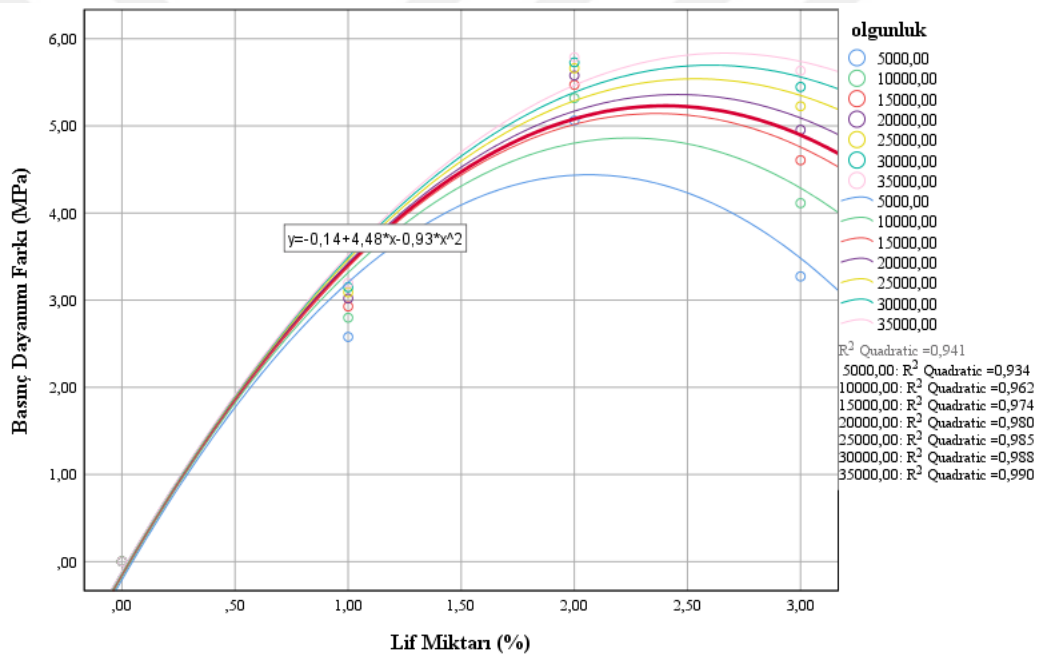
Hazırlanan model;

$$\Delta\sigma_c = -0,14 + 4,48.F + 0,93.F^2 \quad (4.4)$$

Formülde;

$\Delta\sigma_c$  = Basınç dayanımı farkı, (MPa)

$F$  = Cam lif oranı, kütlece (%) ifade etmektedir.



Şekil 4.21. Lif miktarı ile basınç dayanımı farkları arasındaki ilişki grafiği.

Lifsiz betonlar için ağırlıklı olgunluk yönteminden elde edilen verilerle deneysel olarak elde edilen basınç dayanımı verileri arasındaki ilişki için geliştirilen model ise aşağıda verilmiştir.

$$\sigma_c = 5,1836.\ln(M) - 11,438 \quad (4.5)$$

Formülde;

$\sigma_c$  = Lifsiz betonlar için basınç dayanımını, (MPa)

$M$ = Ağırlıklı olgunluk, °C.h

ifade etmektedir.

Elde edilen modeller kullanılarak olgunluk değerlerini kullanarak cam lifi takviyeli betonlarda lif miktarına bağlı olarak basınç dayanımını tahmin edebileceğimiz aşağıda belirtilen model geliştirilmiştir.

$$\sigma_c = 5,1836.\ln(M) - 11,452 + 4,48.F + 0,93.F^2 \quad (4.6)$$

Formülde;

$\sigma_c$ = Lifsiz betonlar için eğilme dayanımını (MPa)

$M$ = Ağırlıklı olgunluk, °C.h

$F$ = Cam lif oranı, kütlece (%)

ifade etmektedir.



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Cam lifi takviyeli betonlarda olgunluk indeksi yöntemi ile eğilme ve basınç dayanımının tahmin modelinin geliştirilmesi amacıyla % 0, 1, 2 ve 3 oranlarında cam lif takviyeli betonlar hazırlanmıştır. Hazırlanan betonlardan basınç ve eğilme dayanımı örnekleri içerisine yerleştirilen sıcaklık sensörleri ile 0,5, 1, 1,5, 2, 3, 5, 7, 14, 28 ve 56. günlerde sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilerek olgunluk indeksi değerleri hesaplanmıştır. Aynı günlerde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yoğunluk ve LEEB sertlik deneyleri gerçekleştirilmiş olan cam lifi takviyeli betonlardan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre;

- ✓ Beton içerisindeki lif miktarı arttıkça slump değerlerinin azaldığı,
- ✓ Beton yoğunluk değerlerinin beton yaşına bağlı olarak önemli miktarda değişim gösterdiği, %2 lif miktarına sahip betonlarda en büyük yoğunluk değerlerine sahip olduğu,
- ✓ LEEB sertlik değerlerinin beton yaşına bağlı olarak basınç dayanımı gelişmesiyle doğru orantılı olarak arttığı,
- ✓ LEEB sertlik ile, basınç dayanımı arasında güçlü bir ilişkinin olduğu, oluşturulan ilişki modelleri ile (yeterli sayıda ölçüm yapmak kaydıyla) lifsiz betonlar için beton basınç dayanımı değerlerinin %12 hata ile, %1 oranındaki lifli betonlar için %8 hata ile, %2 oranındaki betonlar için %5 hata ile, %3 oranındaki lifli betonlar için ise %4 hata ile LEEB sertlik değerlerinden kullanılarak tahmin edilebileceği,
- ✓ Beton basınç dayanımlarının beton yaşı ilerledikçe artış gösterdiği, lif miktarına bağlı olarak basınç dayanımı değerlerinin değiştiği, %2 oranında cam lifi takviye edilen betonların en büyük basınç dayanımına sahip olduğu, ancak %3 oranında cam lifi takviyeli betonların basınç dayanımı değerlerinde azalmaların olduğu,
- ✓ Eğilme dayanımı değerleri (MOR) incelendiğinde lif miktarına göre eğilme dayanımı değerlerinde değişimlerin olduğu, en yüksek eğilme dayanımı değerlerinin %3 cam lifi takviyeli karışımlarda elde edildiği, 28 günlük lifli betonun lifsiz betona göre eğilme dayanımı değerlerinin %55 oranında arttığı, betonların beton yaşı ilerledikçe eğilme dayanımı değerlerinde de bir artışın

olduğu,

- ✓ Lif miktarına bağlı olarak erken yaş büzülme (shrinkage) değerlerinde değişimler olduğu, en düşük büzülme değerine %1 oranında lif takviyeli betonlarda görüldüğü, %1 lifli betonun lifsiz betona göre 48 saat sonra %47 oranında daha düşük büzülme değerlerine sahip olduğu, %2 ve %3 oranında lifli betonların ise birbirine yakın büzülme değerlerin ölçüldüğü,
- ✓ Olgunluk değerleri ile beton basınç ve eğilme dayanımları arasında güçlü bir ilişkinin olduğu, ancak özellikle lifli betonlar ve eğilme dayanımı tahmininde bu yöntemin birtakım belirsizliklerinin olduğu, geliştirilen tahmin modelleri sayesinde lif takviyeli betonlarda lif miktarı ve olgunluk değerinin fonksiyonu olarak eğilme ve basınç dayanımı değerlerinin tahmin edilebileceği görülmüş,
- ✓ Lifli betonlar için eğilme ve basınç dayanımı ilişkisini gösteren (4.3) ve (4.6) nolu denklemler önerilmiştir.

Cam lifi takviyeli betonlar üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmaların farklı lif türleri ve miktarlarının yanında, gelişen nano teknolojik uygulamalar ışığında nano katkıların kullanılmış olduğu betonlarda olgunluk metodu ile mekanik özelliklerin tahminine yönelik çalışmaların beton teknolojisi alanında önemli kazanımlar sağlayacağı düşünülmektedir.

Ayrıca GRC-CTB özelinde de olgunluk yöntemi ile lif oranı dışındaki ilişkiler üzerinde de çalışmalar yapılması erken yaş GRC-CTB özelliklerinin çok daha iyi anlaşılması için çok yararlı olacaktır. GRC-CTB erken yaş özellikleri konusunda çalışmalar arttıkça GRC-CTB uzun dönem dayanım parametrelerinin kontrol altında tutularak ürün kalitelerinin artırılması ve üretim sürecinden itibaren ortaya çıkabilecek kalite problemlerinin önlenmesi mümkün olacaktır.

Yapılan bu çalışmaların genişletilerek GRC-CTB üretiminde temel kalite kontrol parametreleri haline getirilmesi hedefi doğru ve yararlı bir hedef olacaktır. Bu nedenle bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla birleştirilerek ürün özelliklerinin geliştirilmesi ve kalite parametrelerinin iyileştirilmesinde kullanılabilecektir.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] B. Baradan, *Yapı Malzemesi II*. İzmir, Türkiye: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 2004.
- [2] A. Cengiz, “İnşaat Endüstrisine Yönelik Doğal Elyaf Katkılı Kompozit Malzemelerin Hazırlanması”, Yüksek Lisans Tezi, Kimya Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2015.
- [3] M. Kozak, “Çelik Lifli Betonlar ve Kullanım Alanlarının Araştırılması”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Teknoloji Bilim Dergisi*, c. 3, s. 5, ss. 26–35, 2013.
- [4] M. Açıkgenç, U. Arazsu, ve K. E. Alyamaç, “Farklı Karışım Oranlarına Sahip Polipropilen Lifli Betonların Dayanım Ve Durabilite Özellikleri”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Uluslararası Teknoloji Dergisi*, c. 4, s. 3, ss. 41–54, 2012.
- [5] B. Durmaz, “Bölgesel Basınca Maruz Lifli Betonlarda Yatak Mukavemeti”, Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2007.
- [6] S. Yıldız ve Z. Ç. Ulucan, “Beton Borularda Cam Lif Katkısının Tepe Yük Dayanımına Etkisinin Araştırılması”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 23, s. 2, ss. 267–271, 2008.
- [7] O. Ünal, T. Uygunoğlu, ve O. Gençel, “Çelik Liflerin Beton Basınç ve Eğilme Özelliklerine Etkisi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilim Dergisi*, c. 13, s. 1, ss. 23–30, 2007.
- [8] M. Sahmaran, A. Yurtseven, ve I. Ozgur Yaman, “Workability Of Hybrid Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete”, *Build. Environ.*, c. 40, sayı 12, ss. 1672–1677, 2005.
- [9] B. Z. Michel Pigeon ve J. Marchand, *Advanced Concrete Technology*. London, UK: Elsevier LTD., 2003.
- [10] M. T. Yıldırım, “Lif Donatılı Çimentolu İnce Kompozitler - Mimaride Kullanımı”, Yüksek lisans tezi, Mimarlık Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2014.

- [11] M. Sarı, “Farklı Tipteki Liflerin Betonun Mekanik Davranışlarına Etkisi”, Yüksek lisans tezi, Yapı Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2013.
- [12] The Concrete Institute, (2019, 1 Mayıs). Fibre Reinforced Concrete, 2016. [Online].Erişim: [https://docs.wixstatic.com/ugd/5586b6\\_5cd366fc92e540b6827faf7b62e7c2db.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/5586b6_5cd366fc92e540b6827faf7b62e7c2db.pdf)
- [13] N. Özyurt, M. A. Taşdemir, ve S. P. Shah, “Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitlerde, Lif Dağılımının Elektriksel Bir Yöntem İle Tahratsız Ölçümü”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, c. 5, s. 4, ss. 119–130, 2006.
- [14] B. Baradan vd., *Beton*. İzmir, Türkiye: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 2012.
- [15] M. B. Eide ve J. M. Hisdal, “Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) – State of Art. COIN Project report 44”, Oslo, Norway, 2012.
- [16] C. Çakır, “Makrosentetik ve Çelik Lif Donatılı Betonların Mekanik Davranışı”, Yüksek lisans tezi, Yapı Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2013.
- [17] Prince Engineering, (2019, 6 May). Bazalt Fiber Özellikleri. [Online]. Available: <https://www.build-on-prince.com/basalt-fiber.html>.
- [18] N. Buch, O. M. Rehman, ve J. E. Hiller, “Impact of Processed Cellulose Fibers on Portland Cement Concrete Properties”, *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, c. 1668, sayı 1, ss. 72–80, 2007.
- [19] J. I. Daniel vd., “Report on Fiber Reinforced Concrete Reported by ACI Committee 544”, Michigan, ABD, 2002.
- [20] F. Türkmenoğlu ve O. O. Varol, “Lifli Beton Türleri ve Kullanım Alanları”, *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016)*, 2017, ss. 3792–3795.
- [21] B. Lauke, C.-Y. Yue, X. Hu, S.-Y. Fu, ve E. Mäder, “Tensile Properties Of Short-Glass-Fiber- And Short-Carbon-Fiber-Reinforced Polypropylene Composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, c. 31, sayı 10, ss. 1117–1125, 2002.

- [22] N. G. Araz, A. Aksoy, E. İskender, ve A. Sayın, “Beton Üretiminde Bazalt Fiber Kullanımının Değerlendirilmesi”, 9. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, Adana, Türkiye, 2018, ss. 298–309.
- [23] P. J. M. Bartos, *Glassfibre Reinforced Concrete Principles, Production, Properties and Applications.*, 1. Baskı. Dunbeath Mill, UK: Whittles Publishing, 2017.
- [24] Anonim. (2019, 06 May). Solidian. [Online]. Available: [www.solidian.com](http://www.solidian.com).
- [25] Fibrobeton. (2019, 4 Temmuz). Fibrobeton Yapı Elemanları. [Online]. Erişim: [www.fibrobeton.com.tr](http://www.fibrobeton.com.tr).
- [26] V. Afroughsabet, L. Biolzi, ve T. Ozbakkaloglu, “High-Performance Fiber-Reinforced Concrete: A Review”, *Journal of Materials Science*, c. 51, sayı 14, ss. 6517–6551, Tem. 2016.
- [27] B. Candemir, B. Beyhan, ve S. Karaata, “İnşaat Sektöründe Sürdürülebilirlik: Yeşil Binalar ve Nanoteknoloji Stratejileri”, İMSAD, Ankara, Türkiye, 2012.
- [28] O. Öztürk, “Farklı Tür Karbon Esaslı Malzemelerin Çimento Bağlayıcılı Kompozitlerin Elektriksel Özelliklerine Etkileri”, Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2015.
- [29] J. Koo, “An Overview of Nanomaterials”, *Fundamentals, Properties, and Applications of Polymer Nanocomposites*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2016, ss. 22–108.
- [30] Anonim. (2019, 1 July). Pyrograf Product. [Online]. Available: <http://pyrografproducts.com>.
- [31] N. Yazdani ve E. Brown, “Carbon Nanofibers in Cement Composites”, *Innovative Developments of Advanced Multifunctional Nanocomposites in Civil and Structural Engineering*, Elsevier, 2016, ss. 47–58.
- [32] K. Rashid, R. Al, ve T. Bryan M, “Assessment the Potential of Using Carbon Nanotubes Reinforcements for Improving the Tensile/Flexural Strength and Fracture Toughness of Portland Cement Paste for Damage Resistant Concrete Transportation Infrastructures”, c. 7, sayı 2, 2010.
- [33] F. Sanchez ve K. Sobolev, “Nanotechnology in concrete – A review”, *Construction*

*and Building Materials*, c. 24, sayı 11, ss. 2060–2071, Kas. 2010.

- [34] P. T. Dalla, K. G. Dassios, I. K. Tragazikis, D. A. Exarchos, ve T. E. Matikas, “Carbon Nanotubes And Nanofibers As Strain And Damage Sensors For Smart Cement”, *Materials Today Communications*, c. 8, ss. 196–204, 2016.
- [35] Y. Şahin, *Kompozit Malzemelere Giriş*, 3. Baskı. Ankara, Türkiye: Seçkin Yayıncılık, 2015.
- [36] M. Bağcı, “Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Erozyon Aşınma Davranışının İncelenmesi”, Doktora tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye, 2010.
- [37] Owens Corning. (2019, 20 May). Cem-FIL® Glass fiber Reinforced Concrete (GRC). [Online]. Available: <http://www.ocvreinforcements.com/CemFIL/pro-grc.aspx?lg=en#appData>.
- [38] Nippon Electric Glass. (2019, 25 April). AR Cam Lif. [Online]. Available: [https://www.neg.co.jp/en/product/fiber/a-chopped\\_strand](https://www.neg.co.jp/en/product/fiber/a-chopped_strand).
- [39] D. Asi, “Cam Elyaf Katkılı Kompozit Malzemelerin Aşınma Performansının İncelenmesi”, Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye, 2008.
- [40] Anonim. (2019, 10 May). Power Spray. [Online]. Available: [www.power-spray.com](http://www.power-spray.com).
- [41] A. Bentur, “Early Age Cracking in Cementitious Systems: Report of RILEM Technical Committee TC 181-EAS”, RILEM, Bagneux, France, 2002.
- [42] N. B. Yıldız, “Cam Elyaf Takviyeli Beton (GFRC) Cephe Panelleri İçin Yaşam Döngü Değerlendirilmesi (YDD) Yöntemiyle Bir Sürdürülebilirlik Çerçevesi Geliştirilmesi”, Doktora tezi, Disiplinlerarası Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2014.
- [43] M. Ç. Çınar, “Kentsel Yenileme Yöntemiyle Oluşturulan Konut Yapılarında Cam Elyaf Katkılı Beton Esaslı Prekast Cephe Sisteminin Değerlendirilmesi”, Yüksek lisans tezi, Mimarlık Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2018.

- [44] Y. O. Hetemoğlu, “Effect Of Test Methods On The Fiber Reinforced Of Fiber Reinforced Concrete With Different Dosages And Matrices”, Degree Of Master, Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Türkiye, 2018.
- [45] *Öndökümlü Beton Mamuller - Harç ve Betonlarda Kullanılan Cam Elyaf Takviye Malzemesine Ait Özellikler*, Türk Standardları Enstitüsü TS EN 15422, T, 2009.
- [46] *Ön dökümlü Beton Mamuller - Deney Metodu - Çimento ve Beton Bünyesindeki Cam Elyafalarda Dayanım Kalıcılığının Tayini*, Türk Standardları Enstitüsü TS EN 14649 (sıc test), 2006.
- [47] Ş. Tuna, “Dış Cephe Kullarılan Cam Elyaf Takviyeli Beton Panellerin Durabilitesi”, Yüksek lisans tezi, Mimarlık Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2010.
- [48] *Ön Yapımlı Beton Mamuller-Cam Elyaf Takviyeli Çimento (CTÇ) Deney Metodu-Bölüm 1: Matriks Kıvamının Ölçülmesi, ‘Slamp Deneyi’ Metodu*, Türk Standardları Enstitüsü TS EN 1170-1, 2000)
- [49] *Ön Yapımlı Beton Mamuller - Cam Elyaf Takviyeli Çimento (CTÇ) Deney Metodu - Bölüm 2: Taze CTÇ’ De Lif İçeriğinin Ölçülmesi Yıkama Deneyi*, Türk Standardları Enstitüsü TS EN 1170-2, 1999.
- [50] J. R. Mott ve G. T. Gilbert, “4 Filament Winding as A GFRC Production Method”, *GRC 2003: Proceedings of 12th Congress of the GRCA*, 2003, sayı October.
- [51] Anonim. (2019, 21 May). Dulhunty Poles. [Online]. Available: <http://dulhuntypoles.com>.
- [52] M. Maraşlı, A. O. Ates, E. Tore, ve A. İlki, “Hasarlı Betonarme Kolonların Bazalt Tekstil Donatılı Cam Lifli Püskürtme Beton İle Güçlendirilmesi”, *İstanbul Yapı Mekaniği Laboratuvarları 5. Toplantısı*, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [53] E. Töre, M. Maraşlı, M. Cömert, C. Demir, ve A. İlki, “Seismic Retrofit of Columns Using Basalt Mesh Reinforced Sprayed GRC Jacket”, *GRC2015 Dubai*, sayı April, ss. 1–7, 2015.
- [54] A. O. Ates, S. Khoshkholghi, E. Tore, M. Marasli, ve A. İlki, “Sprayed Glass Fiber-Reinforced Mortar with or without Basalt Textile Reinforcement for Jacketing of Low-Strength Concrete Prisms”, *Journal of Composites for Construction*, c. 23, sayı 2, Nis. 2019.

- [55] M. Y. Che Y, “A Brief Introduction to 3D Printing Technology”, *Glassfiber Reinforced Concrete 2015 Dubai*, 2015, s. 4.
- [56] Anonim. (2019, 21 May). “Winsun 3D”. [Online]. Available: <http://www.winsun3d.com>.
- [57] F. . Ş. K. Yüksel ve M. E. Karagüler, “Kendini Temizleyen Betonlar”, *Hazır Beton Kongresi*, 2011, ss. 470–480.
- [58] T. Delibas, C. Cement, ve M. Maraşlı, “Self-Cleaning and Air Purifying Cement Based GRC Panels Used in TÜPRAŞ Rub Project”, *GRC 2015 Dubai*, 2015.
- [59] GFRC, *PCI MNL-128 (GFRC - Recommended Practice For Glass Fiber Reinforced Concrete)*. 2001.
- [60] *Öndökümlü beton mamuller - Cam elyaf takviyeli beton performansının sınıflandırılması*, Türk Standardları Enstitüsü TS EN 15191, 2010.
- [61] “Cam Elyaf Takviyeli Beton (GRC) için Kılavuz Test Yöntemleri”, *Uluslararası Cam Elyaf Tak. Bet. Derneği*, c. Ekim, Eki. 2017.
- [62] H. N, “Advanced Testing of Cement-Based Materials during Setting and Hardening - Final Report of RILEM TC 185-ATC”, Berlin, Germany, 2005.
- [63] Cem-FIL, “Cem-FIL GRC Technical Data”, 1998.
- [64] G. Jones, I. Morrison, C. Billington, ve P. J. M. Bartos, *Practical Design Guide for Glass Reinforced Concrete*. London, UK: International GRCA Technical Committee, 2005.
- [65] GRC Industry Group, “A Recommended Practice Design , Manufacture And Installation Of Glass Reinforced Concrete (GRC)”, *National Precast Concrete Association Australia*, sayı August, ss. 1–92, 2006.
- [66] Anonim. (2019, 4 July). GRCA. [Online]. Available: <https://grca.org.uk>.
- [67] T. Gregory, “15 GRC – The Next Generation – Future Manufacturing Developments”, *Glass Reinforced Concert 2011*, 2011.
- [68] Anonim. (2019, 4 July). CEMOTEC. [Online]. Available: <https://cemcotec.com/>.
- [69] P. J. Ridd, “29 Opportunities For GRC Noise Barriers”, *GRC 2003: Proceedings of 12th Congress of the GRCA*, 2003, sayı October, ss. 1–11.



- [70] J. H. Bungey, S. G. Millard, ve M. G. Grantham, *Testing of Concrete in Structures*. London, UK: Spon Press, Taylor & Francis, 2006.
- [71] Engineers Daily. (2019, 24 April). “Rebound Hammer Test”, 2019. [Online]. Available: <http://www.engineersdaily.com/2011/04/rebound-hammer-test.html>.
- [72] Lamda-Teknik. (2019, 24 Nisan). Beton Test Çekici. [Online]. Erişim: <http://www.lamda-teknik.com/urun/proceq-beton-test-cekici-schmidt-rebound-hammer/>.
- [73] Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM Int. ASTM C597-16, 2016.
- [74] ACI Committee 228.2R-13, “Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures”, Farmington Hills, Michigan, 2013.
- [75] Hammond Concrete Services. (2019, 24 Nisan). Ultrasonic Pulse Echo Non-Destructive Testing. [Online]. Available: <http://www.pundithire.co.uk>.
- [76] N. J. Carino, “Impact Echo : The Fundamentals Principles of Impact-Echo Method”, in *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, Berlin, Germanys, 2015, s. 1–18.
- [77] Direct Industry. (2019, 25 Nisan). Echo-Impact Testing Device. [Online]. Available: <http://www.directindustry.com/prod/james-instruments/product-58286-871939.html>.
- [78] Standard Test Method for Pullout Strenght of Hardened Concrete, ASTM C900-99, American Society for Testing and Materials, 1999.
- [79] Anonim. (2019, 29 Mart). Germann Instruments Test Smart - Build Right. [Online]. Available: <http://germann.org/products-by-application/category-1/lok-test>.
- [80] S. Subaşı, “Farklı Yüzey Astarları ile Kaplanmış Drenaj Özelliği Bulunan Kalıpların Betonun Bazı Fiziksel Özellikleri Üzerine Etkileri”, Doktora tezi, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara,, Türkiye, 2005.
- [81] Anonim. (2019, 10 July). Germann Instruments Test Smart - Build Right. [Online]. Available: <http://germann.org/products-by-application/category-1/capo-test>.

- [82] Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension ( Pull-off Method), ASTM C1583-04, American Society for Testing and Materials, 2013.
- [83] C. Ndt, “Germann Instruments-Catalog NDT 2014”, Berlin, Germany, 2014.
- [84] T. R. Naik, “The Break-Off Test Method”, Milwaukee, 1990.
- [85] Nanyang Technological University. (2019, 25 Nisan), [Online]. Available: <http://www3.ntu.edu.sg/home/cchtui/webequip.htm>.
- [86] Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete, ASTM C42/C42M-04, American Society for Testing and Materials, 2018.
- [87] Anonim. (2019, 29 March). Compressive Strength Test on Concrete Core- Calculation and Results. The constructor. [Online]. Available: <https://theconstructor.org/practical-guide/compressive-strength-test-on-concrete-core/7581/>.
- [88] Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete Cylinders Cast in Place in Cylindrical Molds, ASTM 873/C873M-15, ASTM Int., 2015.
- [89] Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete, ASTM C803/C803M-17, ASTM Int., 2017.
- [90] Anonim, “WPS 500 Windsor Probe Test Sistemi Kullanım Kılavuzu”, *Non Destructive Testing Windsor Systems Inc.* Chiacago, U.S.A., 1900.
- [91] D. V. Mallick ve A. Ben-Zeitum, “UPV Method of Testing in-situ Concrete”, in *Proceedings of The First International Conference on Concrete Technology for Devolving Countries*, Amman, Libya, 1983.
- [92] Anonim. (2019, 2 March), Windsor HP Probe. [Online]. Available: <http://www.worldoftest.com/windsor-hp-probe>.
- [93] R. L. Dilly ve W. B. Ledbetter, “Concrete Strength Based on Maturity and Pullout”, *Journal of Structural Engineering*, c. 110, sayı 2, ss. 354–365, 1984.
- [94] A. M. Neville, “Properties of Concrete”, *Longman Group UK Ltd.*, London, UK, ss. 303–306, 391–394, 504–505, 581–585, 605–609, 610–6, 2002.

- [95] T. Y. Erdoğan, *Beton*. Ankara, Türkiye: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, 2003.
- [96] Ö. Kasap ve M. Tokyay, “Betonun Eşdeğer Yaşının Çimento Hidratasyon Isısıyla Tahmini İçin Bir Yöntem”, *İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi*, c. 215, ss. 3215–3227, 2004.
- [97] İ. B. Topçu ve M. U. Toprak, “Fine Aggregate and Curing Temperature Effect on Concrete Maturity”, *Cement Concrete Research.*, c. 35, s. 4, ss. 758–762, 2005.
- [98] N. J. Delatte, M. S. Williamson, ve W. F. Fowler, “Bond Strength Development with Maturity of High-Early-Strength Bonded Concrete Overlays”, *The American Concrete Institute Materials Journal*, c. 97, sayı 2, ss. 201–207, 2000.
- [99] H. Yalçın ve M. Gürü, *Çimento ve Beton*. Ankara, Türkiye: Palme Yayıncılık, 2006.
- [100] A. S. Güneş, “Sertleşmekte Olan Betonun Görünen Aktivasyon Enerjisinin Belirlenmesi”, Yüksek lisans tezi, Yapı Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2008.
- [101] J. D. McIntosh, “Electrical Curing of Concrete”, *Magazine of Concrete Research* c. 2, ss. 79–88, 1949.
- [102] A. G. A. Saul, “Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure”, *Magazine of Concrete Research*, c. 2, sayı 6, ss. 127–140, 2012.
- [103] Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, A. C1074, Annual Book of ASTM Standards, 1987.
- [104] N. J. Delatte, M. Scott Williamson, ve D. W. Fowler, “Bond Strength Development with Maturity of High-Early-Strength Bonded Concrete Overlays”, *The American Concrete Institute Structural Journal*, c. 97, sayı 2, ss. 201–207, 2000.
- [105] S. De Careful, A. Fahim, P. Ghods, ve A. Alizadeh, *Concrete Maturity - From Theory to Application*, c. 39, sayı 3. 2018.
- [106] FHWA HIF - 07 - 004, “Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State of the Practice Manual”, 2007.
- [107] N. J. Carino ve H. S. Lew, “The Maturity Method: From Theory to Application”,

in *Reprinted from the Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition*, 2001, Washington, D.C., USA, ss. 1–19.

- [108] H. S. Lew ve R. T.W, “Mechanical Properties of Concrete at Early Ages”, *Journal The American Concrete Institute*, c. 75, sayı 10, ss. 533–542, 1978.
- [109] S. M. Akman, “Olgunluk Derecesi Kavramı ve Uygulamasında Yenilikler”, *İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Malzeme Seminerleri*, 1983, İstanbul, Türkiye, ss. 67–77.
- [110] S. M. Akman, “Farklı Çimentolu Harçlarda Olgunluk Kavramı ve Kalıp Sökme Sürelerinin Belirlenmesi”, Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2001.
- [111] M. Lachemi, K. M. A. Hossain, C. Anagnostopoulos, ve A. R. Sabouni, “Application of Maturity Method to Slipforming Operations: Performance Validation”, *Cement and Concrete Composites*, c. 29, sayı 4, ss. 290–299, 2007.
- [112] P. Freiesleben Hansen *at al.*, “Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete”, *Nord Betong*, c. 21, sayı 1, ss. 19–34, 1977.
- [113] R. C. Tank ve N. J. Carino, “Rate Constant Functions for Strength Development of Concrete”, *American Concrete Institute Materials Journal*, c. 88, sayı 1, ss. 74–83, 1991.
- [114] C. Karakurt, “Farklı Çimentolu Betonlarda Olgunluk Kavramı”, Osmangazi Üniversitesi, Yüksek lisans, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye, 2002.
- [115] F. A. Oluolam, E. G. Burdette, ve J. H. Deatherage, “Early - Age Concrete Strength Prediction by Maturity-Another Look”, *American Concrete Institute Materials Journal*, c. 87, sayı 6, ss. 565–572, 1990.
- [116] A. G. A. Saul, “Principles Underlining the Steam Curing of Concrete in Atmospheric Pressure”, *Magazine of Concrete Research*, c. 2, sayı 6, ss. 127–140, 1951.
- [117] M. Papadakis ve J. Bresson, “Contribution a l' Etude du Facteur de Maturite des Liants Hydrauliques”, *Matériaux et Construction*, c. 678, sayı 3, 1973.
- [118] S. Naser ve Aydın Sağlık, “Betonda Ağırlıklı Olgunluk Yöntemi İle Yerinde Beton

- Dayanımının Ve Yaş Düzeltme Faktörünün Belirlenmesi”. Beton Olgunluk Merkezi, Ankara, Türkiye, ss. 1–11.
- [119] R. J. Kehl, C. A. Constantino, ve R. Carrasquillo, “Project Summary Report 1714-S Investigation of Match-Cure Technology and the Maturity Concept as New Quality Control / Quality Assurance Measures for Concrete Match-Cure and Maturity : What We Did, What We Found”, ss. 1–4, Ağu. 1998.
- [120] Determination of strength of fresh concrete with the method of weighted maturity, NEN 5970:2001, Netherlands ”.
- [121] Anonim. ( 2019, 15 April). Beton Olgunluk Merkezi. [Online]. Available: <http://www.betonolgunklukmerkezi.com>.
- [122] M. Soutsos, F. Kanavaris, ve A. Hatzitheodorou, “Critical Analysis of Strength Estimates From Maturity Functions”, *Case Studies in Construction Materials*, c. 9, ss. 1–19, 2018.
- [123] “Determining The Strength Of Young Concrete On The Bases Of Weighted Maturity”, *The Dutch Centre for Civil Engineering, Codes and Specifications*. Gouda, The Netherlands, 1986.
- [124] R. A. Tegelaar, “Weighted Maturity of Concrete”, *Concrete Plant International*, sayı 4, ss. 154–156, 2000.
- [125] Olgunluk Yöntemi İle Beton Dayanımının Tahmini, TS 13508, Türk Standartları, Ankara,Türkiye, 2012.
- [126] B. W. Jo, S. Chakraborty, ve H. Kim, “Prediction of the Curing Time to Achieve Maturity of the Nano-Cement Based Concrete Using the Weibull Distribution Model”, *Construction and Building Materials*, c. 84, ss. 307–314, 2015.
- [127] B. W. Jo, S. Chakraborty, ve H. Kim, “Prediction of the Curing Time to Achieve Maturity of the Nano-Cement Based Concrete Using the Weibull Distribution Model: A Complementary Data Set”, *Construction and Building Materials*, c. 4, ss. 285–291, 2015.
- [128] N. J. Jin, I. Seung, Y. S. Choi, ve J. Yeon, “Prediction of Early-Age Compressive Strength of Epoxy Resin Concrete Using the Maturity Method”, *Construction and Building Materials*, c. 152, ss. 990–998, 2017.

- [129] S. Teixeira, A. Santilli, ve I. Puente, “Demoulding Vertical Elements: Recommendations for Apply Maturity Functions”, *Construction and Building Materials*, c. 145, ss. 392–401, 2017.
- [130] I. Galobardes, S. H. Cavalaro, C. I. Goodier, S. Austin, ve Á. Rueda, “Maturity Method to Predict the Evolution of the Properties of Sprayed Concrete”, *Construction and Building Materials*, c. 79, ss. 357–369, 2015.
- [131] T. Boubekur, K. Ezziane, ve E. H. Kadri, “Estimation of Mortars Compressive Strength at Different Curing Temperature by the Maturity Method”, *Computers & Chemical Engineering*, c. 71, ss. 299–307, 2014.
- [132] P. Rossi, “Influence of Fibre Geometry and Matrix Maturity on the Mechanical Performance of Ultra High-Performance Cement-Based Composites”, *Cement and Concrete Composites*, c. 37, sayı 1, ss. 246–248, 2013.
- [133] E. Júlio, P. Maranha, F. G. Branco, L. Ferreira, ve H. S. S. Costa, “Characterization of Alkali-Activated Binders Using the Maturity Method”, *Construction and Building Materials*, c. 95, ss. 337–344, 2015.
- [134] N. Rudeli, A. Santilli, ve F. Arrambide, “Striking of Vertical Concrete Elements: An Analysis Using the Maturity Method”, *Engineering Structures*, c. 95, ss. 40–48, 2015.
- [135] M. Benaicha, Y. Burtschell, ve A. H. Alaoui, “Prediction of Compressive Strength at Early Age of Concrete - Application of Maturity”, *Journal of Building Engineering*, c. 6, ss. 119–125, 2016.
- [136] T. A. Yıkıcı ve H. L. Chen, “Use of Maturity Method to Estimate Compressive Strength of Mass Concrete”, *Construction and Building Materials*, c. 95, ss. 802–812, 2015.
- [137] P. Turcry, A. Loukili, L. Barcelo, ve J. Michel, “Can the Maturity Conept be Used to Separate the Autogeneous Shringe and Thermal Deformation of a Cement Paste at Early Age?”, *Cement and Concrete Research*, c. 32, ss. 1443–1450, 2002.
- [138] Q. Li, J. Guan, Z. Wu, W. Dong, ve S. Zhou, “Equivalent Maturity for Ambient Temperature Effect on Fracture Parameters of Site-Casting Dam Concrete”, *Construction and Building Materials*, c. 120, ss. 293–308, 2016.
- [139] M. N. Soutsos, G. Turu’Allo, K. Owens, J. Kwasny, S. J. Barnett, ve P. A. M.

- Basheer, “Maturity Testing of Lightweight Self-Compacting and Vibrated Concretes”, *Construction and Building Materials*, c. 47, ss. 118–125, 2013.
- [140] T. Voigt, Z. Sun, ve S. P. Shah, “Comparison of Ultrasonic Wave Reflection Method and Maturity Method in Evaluating Early-Age Compressive Strength of Mortar”, *Cement and Concrete Composites*, c. 28, sayı 4, ss. 307–316, 2006.
- [141] J. Zhang, D. Cusson, P. Monteiro, ve J. Harvey, “New Perspectives on Maturity Method and Approach for High Performance Concrete Applications”, *Cement and Concrete Research*, c. 38, sayı 12, ss. 1438–1446, 2008.
- [142] V. Waller, L. D’Aloia, F. Cussigh, ve S. Lecrux, “Using the Maturity Method in Concrete Cracking Control at Early Ages”, *Cement and Concrete Composites*, c. 26, sayı 5, ss. 589–599, 2004.
- [143] Y. A. Abdel-Jawad, “The maturity method: Modifications to improve estimation of concrete strength at later ages”, *Construction and Building Materials*, c. 20, sayı 10, ss. 893–900, 2006.
- [144] I. B. Topçu ve M. U. Toprak, “A Discussion of the Paper ‘The Maturity Method: Modifications to Improve Estimation of Concrete Strength at Later Age’ by Yahia A. Abdel-Jawad”, *Construction and Building Materials*, c. 21, sayı 5, ss. 1144–1148, 2007.
- [145] İ. B. Topçu ve C. Karakurt, “Farklı Çimentolar ile Üretilen Betonlarda Olgunluk Kavramı”, *ECAS 2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu*, 2002, İstanbul, Türkiye, ss. 477–484.
- [146] W. C. Liao, B. J. Lee, ve C. W. Kang, “A Humidity-Adjusted Maturity Function for the Early Age Strength Prediction of Concrete”, *Cement and Concrete Composites*, c. 30, sayı 6, ss. 515–523, 2008.
- [147] M. C. Han ve C. G. Han, “Use of Maturity Methods to Estimate the Setting Time of Concrete Containing Super Retarding Agents”, *Cement and Concrete Composites*, c. 32, sayı 2, ss. 164–172, 2010.
- [148] G. De Schutter, “Applicability of Degree of Hydration Concept and Maturity Method for Thermo-Visco-Elastic Behaviour of Early Age Concrete”, *Cement and Concrete Composites*, c. 26, sayı 5, ss. 437–443, 2004.
- [149] C. K. Volz, R. L. Tucker, N. H. Burns, ve H. S. Lew, “Maturity effects on concrete

- strength”, *Cement and Concrete Research*, c. 11, sayı 1, ss. 41–50, Oca. 1981.
- [150] G. Turu’allo, “Early Age Strength Development of GGBS Concrete Cured under Different Temperatures”, Doctor Thesis, University of Liverpool, 2013.
- [151] S. Subaşı, “Geçirgen Kalıp Kullanımının Beton Olgunlaşma Süresine Olan Etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 24, s 4, ss. 725–734, 2009.
- [152] Q. L. Luo ve W. L. Wang, “Accelerated Test Method for Cement Strength Based on the Weighted Maturity Theory”, *Appl Mech Mater*, c. 105–107, ss. 897–901, 2011.
- [153] A. M. Kaburu, J. W. Kaluli, ve C. K. Kabubo, “Application of the Maturity Method for Concrete Quality Control”, *Journal of Sustainable Metallurgy*, c. 2, sayı 4, ss. 127–138, 2015.
- [154] M. Soutsos ve F. Kanavaris, “The modified nurse-saul (MNS) maturity function for improved strength estimates at elevated curing temperatures”, *Case Studies in Construction Materials*, c. 9, s. e00206, 2018.
- [155] J. J. Mayers, “The Use of Maturity Methods as a Quality Control Tool for High Performance Concrete Bridge Decks”, in *PCI I FHW A / FIB International Symposium on High Performance Concrete*.
- [156] C. Solberg, “Concrete Pavement Maturity Testing”, *A.PWA Wisconsin Chapter News*, ss. 1–3, 2000.
- [157] NOPCO. (2019, 25 April). Buildent WR-780. [Online]. Available: [https://nopcokorea.gobizkorea.com/user/goods/frontGoodsDetail.do?goods\\_no=GS20180317181919](https://nopcokorea.gobizkorea.com/user/goods/frontGoodsDetail.do?goods_no=GS20180317181919).
- [158] Beton Yapı Kimyasalları. (22019, 20 Nisan) “Bettolatex”. [Online]. Available: <http://betton.com.tr/harc-katkilari/bettolatex.html>.
- [159] Ön Yapımlı Beton Mamuller-Cam Elyaf Takviyeli Çimento (CTÇ) Deney Metodu-Bölüm 6: Suyu Daldırma Yoluyla Su Emme Ve Kuru Yoğunluk Tayini, TS EN 1170-6, Türk Standardları Enstitüsü,
- [160] Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products, ASTM A956, 2012.



- [161] Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım Tayini, TS EN 196-1, Türk Standardları Enstitüsü, 2006.
- [162] Ön Yapımlı Beton Mamuller-Cam Elyaf Takviyeli Çimento (CTÇ) Deney Metodu-Bölüm 4: Eğilme Dayanımı Tayini ‘Basit Eğilme Deneyi’ Metodu, TS EN 1170-4, Türk Standardları Enstitüsü, 1999.
- [163] Ön Yapımlı Beton Mamuller-Cam Elyaf Takviyeli Çimento (CTÇ) Deney Metodu-Bölüm 5 : Eğilme Dayanımı Tayini ‘Tam Eğilme Deneyi’ Metodu, TS EN 1170-5, Türk Standardları Enstitüsü, 1999.
- [164] Standard Test Method for Unrestrained Linear Thermal Shrinkage of Plastic Film and sheeting, ASTM D 2732, American Society for Testing Materials, 1989.
- [165] F. F. Wafa, “Properties and Applications of Fiber Reinforced Concrete”, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, c. 2, sayı September, ss. 49–63, 1990.
- [166] K. B. Rao ve C. V. Kumar, “Effect Of Fiber Reinforced Concrete On Strenght Parameters Of M30 Concrete”, *International Research Journal of Engineering and Technology*, c. 03, sayı 09, s. 1388, 2016.
- [167] R. Moceikis, E. Karpova, A. Kicaite, ve G. Skripkiunas, “Effect of Aggregates on the Technological and Mechanical Properties of Glass and Basalt Fibres Reinforced Concrete”, *Institute of Physics Conference Series: Materials Science and Engineering*, c. 471, sayı 3, 2019.
- [168] J. Abe, Y. Takeuchi, Y. Ogata, ve K. Imai, “Development of Self-Compacting Premix GRC”, *GRC 2011*, s. 12, 2011.
- [169] M. İskender ve B. Karasu, “Glass Fibre Reinforced Concrete (GFRC)”, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, c. 5, s. 1, ss. 136–162, 2018.
- [170] I. D. Peter ve I. Crocker, “Further Investigations into Premix GRC”, in *GRCA 2015*, Dubai, ABE, 2015, ss. 1–14.
- [171] R. S. Camacho ve P. C. Almenara, “25 Effect Of the Content And Length of Alkali-Resistant Chopped Glassfibre Strands on Premix GRC”, in *GRC 2003: Proceedings of 12th Congress of the GRCA*, 2003, sayı October, ss. 1–7.
- [172] I. D. Peter, “Advances in Premix GRC”, in *GRC 2003: Proceedings of 12th*

*Congress of the GRCA*, 2003, say<sup>1</sup> October, ss. 1–12.

[173] GRCA, “Glass Reinforced Concrete”, in *GRCA 2001*, Dublin, Ireland, 2001.

[174] D. Yetisener ve N. Ugur, “Fibrobeton Catches the Speed of Formula 1”, in *GRCA 2005*, Hong Kong, 2005, ss. 145–150.



## 7. EKLER

### 7.1. EK 1: GRC-CTB İLE YAPILMIŞ UYGULAMALAR



Şekil 7.1. GRC-CTB restorasyon uygulaması.

Marmara Belediyeler Birliği Binası Eminönü İstanbul, uygulama yılı 1988. Bu yapı Türkiye’de ilk GRC-CTB uygulamalarından birisidir. Fibrobeton A.Ş. tarafından üretim ve montajı yapılmıştır.



Şekil 7.2. GRC-CTB cephe kaplama uygulaması.

İstanbul Esenler Otogarı, yapım yılı 1992. Toplam 22.000 m<sup>2</sup> GRC-CTB çelik karkaslı panel uygulaması. Proje ülkemizde uygulanmış ilk çelik karkaslı büyük ölçekli panel uygulamasıdır. Fibrobeton A.Ş. tarafından üretim ve montajı yapılmıştır.





Şekil 7.3. GRC-CTB kendinden yalıtımlı panel kaplama uygulaması.

Metrocity AVM ve Konut Projesi, yapım yılı 1999. Türkiye’de GRC-CTB olarak kaplanmış ilk yüksek katlı bina uygulamasıdır. Standart beyaz çimento rengine üretilip montaj sonrası boyanmıştır. Proje 3 bloktan oluşmaktadır. Bina yüksekliği 135 metredir. Fibrobeton A.Ş. tarafından üretim ve montajı yapılmıştır [173].





Şekil 7.4. GRC-CTB çelik karkaslı büyük boyutlu panel uygulaması.

İstanbul Park Formula 1 Pist ve Binaları, yapım yılı 2004. Proje kapsamında uzunlukları 8 metreyi bulan paneller üretilmiştir. Toplamda 10.000 m<sup>2</sup> GRC-CTB brüt beton görünümlü kaplama kullanılmıştır [174].





Şekil 7.5. GRC-CTB  elik karkaslı büyük boyutlu panel uygulaması.

Ankara Yenimahalle Belediyesi Kültür Merkezi, yapım yılı 2007. Ülkemizde uygulanmış en büyük boyutlu GRC-CTB uygulamalarından birisi. Projede tek parça olarak 50 m<sup>2</sup> ortalama alanı olan paneller kullanıldı. Tipik panel boyutu 12 m x 4,2 m boyutlarında üretildi. Fibrobeton A. . tarafından üretim ve montajı yapılmıştır.





Şekil 7.6. GRC-CTB dekoratif ve klasik cephe süsleme ve tekstürlü kaplamalar.

Mardan Palace Antalya Otel, yapım yılı 2008. Projede 1000 den fazla özel kalıp ile 55,000 parçanın üzerinde GRC-CTB mimari form, süsleme, kolon kaplama ve tekstürlü kaplama kullanılmıştır. Projenin tüm cephelerinde İstanbul saray ve yalılarında ve tarihi binalarından esinlenilerek cepheler üretilip monte edilmiştir.





Şekil 7.7. GRC-CTB özel tekstürlü ve kendinden yalıtımlı cephe kaplaması (Fotoğraflar Cemal Emden).

Pendorya AVM Pendik, yapım yılı 2009. Dijital olarak tasarlanmış özel tekstürler CNC ile elde edilen kalıplarda ve tekstüre özel derzleme ile üretilmiştir. Tipik paneller 3 m x 9 m boyutundadır.





Şekil 7.8. GRC-CTB kendinden yalıtımlı panel kaplama uygulaması.

Ant Hill Bomonti Konut Projesi, yapım yılı 2010. Türkiye’de GRC-CTB olarak kaplanmış en yüksek bina uygulamasıdır. Standart beyaz çimento renginde üretilip montaj sonrası boyanmıştır. Proje 2 bloktan oluşmaktadır. Bina yüksekliği 210 metredir. Toplam 70.000 m<sup>2</sup> kendinden yalıtımlı panel Fibrobeton A.Ş. tarafından üretim ve montajı yapılmıştır.





Şekil 7.9. GRC-CTB organik formlu kaplama uygulaması.

Ant Hill Özel Konut Moskova Rusya, yapım yılı 2011. Parametrik olarak tasarlanan yapının dış kabuğunun tamamı tekrarlamayan organik yüzeylerden oluşmuştur. Yaklaşık 3000 m<sup>2</sup> yüzeyin tümü farklı geometride özel CNC kalıplarda üretilmiştir. Fibrobeton A.Ş. tarafından üretim ve montajı yapılmıştır.





Şekil 7.10. GRC-CTB kendinden renkli narin lamel uygulaması.

Tarsus Amerikan Koleji Tarsus Mersin Türkiye, yapım yılı 2013. GRC-CTB Narin düşey lamel ve kendinden renkli cephe kaplama uygulaması yapılmıştır.





Şekil 7.11. GRC-CTB eğrisel ve çift eğrilikli yüzey kaplamaları.

Bulvar 216 İş Merkezi Ataşehir İstanbul, yapım yılı 2013. Eğrisel ve Çift Eğrilikli yüzeyler olarak tasarlanan cephe için tamamen özel kalıplama teknikleri ile çözülmüş mekanik montajlı cephe kaplamaları olarak yapılmıştır.





Şekil 7.12. GRC-CTB kendinden yalıtımlı tekstürlü panel uygulaması (Fotoğraf Cemal Emden).

Prime Mall Alışveriş Merkezi Gaziantep, yapım yılı 2014. Tekstürlü ve renkli brüt beton yüzeyli paneller tekstüre uygun baklava dilimli olarak üretilmiştir. Fibrobeton A.Ş. tarafından üretim ve montajı yapılmıştır.





Şekil 7.13. GRC-CTB çelik taşıyıcı sisteme monte edilen kaplamalar.

Marmara İlahiyat Cami Altunizade İstanbul, yapım yılı 2015. Çelik taşıyıcı sisteme sahip olan cami cepheleri iç ve dış olarak komple kaplanmıştır.

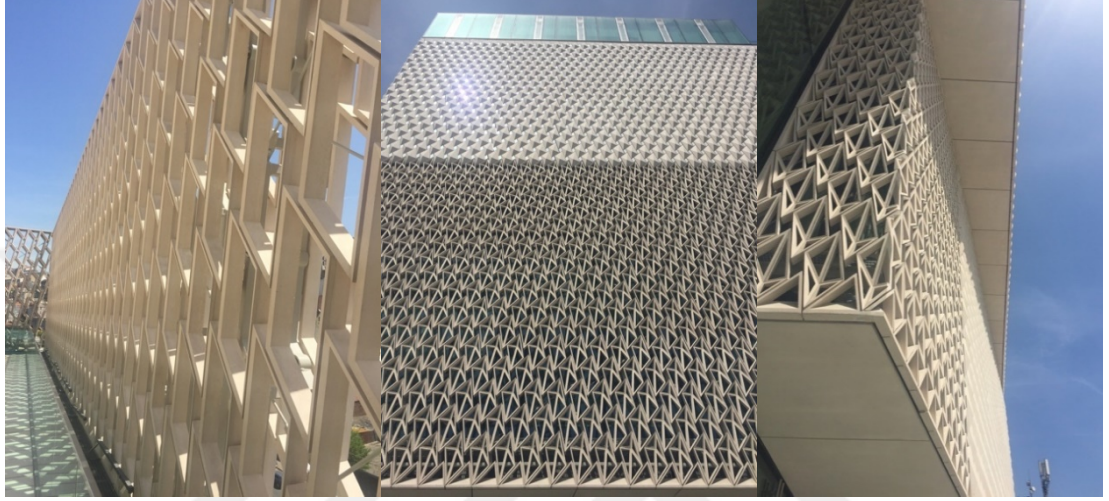




Şekil 7.14. GRC-CTB özel geometrili ve eğrisel parapet kaplamaları (Fotoğraf Hacer Bozkurt).

DAP İnşaat İstmarina Yaşam Merkezi, yapım yılı 2017. 3 Blok cephelerinde eğrisel parapet kaplamaları tamamı projeye özel üretim ve montajı yapılmıştır.





Şekil 7.15. GRC-CTB özel geometrili ve yüzeyli cephe kaplaması (Fotoğraf: Beni Kohen).

Arter Vehbi Koç Vakfı Çağdaş Sanat Müzesi Dolapdere İstanbul, yapım yılı 2018. Cephede özel geometrili kapmaları yanında modern tasarımlı boşluklu cephe kaplamaları kullanılmıştır.

# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Muhammed MARAŞLI  
Doğum Tarihi ve Yeri : 28.01.1967 ORDU  
Yabancı Dili : İngilizce  
E-posta : muhammed@fibrobeton.com.tr

## ÖĞRENİM DURUMU

| Derece    | Alan                   | Okul/Üniversite              | Mezuniyet Yılı |
|-----------|------------------------|------------------------------|----------------|
| Y. Lisans | Kompozit Teknolojileri | Düzce Üniversitesi           | 2019           |
| Lisans    | Uçak Mühendisliği      | İstanbul Teknik Üniversitesi | 1991           |
| Lise      |                        | Denizli Cumhuriyet Lisesi    | 1983           |

## YAYINLAR

M. Maraşlı, A. O. Ates, E. Tore, ve A. İlki, “Hasarlı Betonarme Kolonların Bazalt Tekstil Donatılı Cam Lifli Püskürtme Beton İle Güçlendirilmesi”, İstanbul Yapı Mekaniği Laboratuvarları 5. Toplantısı, 2015.

M. Maraşlı ve ark., “Seismic Retrofit of Sub-Standard RC Columns Through Basalt Mesh Reinforced Sprayed GFRC Jacketing”, FRC 2014 Joint ACI-FIB International Workshop, 2014, ss. 1–28.

M. Ispir, K. D. Dalgic, S. Hajihosseini, A. İlki, ve M. Maraşlı, “Long Term Deformation Monitoring of GRC Facade Panels Under Ambient Conditions”, 17th Int. Congr. GRCA, 2015.

E. Töre, M. Maraşlı, M. Cömert, C. Demir, ve A. İlki, “Seismic Retrofit of Columns Using Basalt Mesh Reinforced Sprayed GRC Jacket”, GRC2015 Dubai, sayı Nisan, ss. 1–7, 2015.

T. Delibas, C. Cement, ve M. Maraşlı, “Self-Cleaning and Air Purifying Cement Based GRC Panels Used in TÜPRAŞ Rub Project”, GRC2015 Dubai, 2015.

M. Maraşlı, A. Erkal, H. Y. Gr'eş, ve H. Bakış, Güvenli Yapılar Yol Haritası-1 "Güvenli, Sürdürülebilir, Çağdaş Yapılar ve Kentsel Dönüşüm", 1. Baskı. İstanbul: İMSAD, 2013.

A. Aydoğmuş, B. Boydak, M. Maraşlı, M. Ispir, ve A. İlki, "Deformations of precast Glassfibre Reinforced Concrete Exterior Wall Panels Under Ambient Conditions – a pilot study", International Glassfibre Reinforced Concrete Association Congress Papers, 2011.

M. Maraşlı ve S. Subaşı, "Fibrobeton-Düzce Üniversitesi İşbirliği Uygulama rneği", SİMP 2013 VI. Ulusal Kongresi, "niversite – Sanayi İşbirliğinin Toplumsal Yararı", 2013.

D. Yetişener, M. Maraşlı, ve N. Müftüoğlu, "Fibrobeton, Quarter Century in the GRC Industry", International Glassfibre Reinforced Concrete Association Congress, 2011.

E. Bilim, V. zdal, M. Maraşlı, ve S. Subaşı, "Hibrit Lif Katkısının Betonun Basınç Ve Çekme Dayanımı zerindeki Etkileri", II. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, 2013.

V. zdal, M. Maraşlı, ve S. Subaşı, "Karma Puzolan Kullanarak retilen GRC Betonun Mekanik zellikleri", KompEge, 2013.

M. Maraşlı, A. O. Ates, S. Khoshkholghi, E. Tore, ve A. İlki, "Sprayed Glass Fiber–Reinforced Mortar with or without Basalt Textile Reinforcement for Jacketing of Low-Strength Concrete Prisms", J. Compos. Constr., c. 23, sayı 2, s. 04019003, 2019.