

Donma/Çözülme ve Sıcaklığın BFRP Kompozitlerle Güçlendirilmiş Betonların Davranışlarına Etkisi

Zeynep YAMAN¹, İrfan Şehrullah ÖZTÜRK^{2*}, Mehmet EMİROĞLU³

¹Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Disiplinlerarası Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı, 81620, Düzce

^{2,3}Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 54050, Sakarya

¹<https://orcid.org/0000-0002-7043-1776>

²<https://orcid.org/0000-0002-2775-5433>

³<https://orcid.org/0000-0002-0214-4986>

*Sorumlu yazar: sehrullahozturk@sakarya.edu.tr

Araştırma Makalesi

ÖZ

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 06.10.2021

Kabul tarihi: 29.12.2021

Online Yayınlanma: 18.07.2022

Anahtar Kelimeler:

Bazalt elyaf

Donma/çözülme

Yanal güçlendirme

Polimer esaslı kompozitler

Sıcaklık etkisi

Bu çalışma kapsamında C16 ve C25 beton dayanım sınıflarında üretilmiş olan 100x200 mm ebatlarındaki silindir numuneler bazalt elyaf takviyeli polimerlerle yanal olarak güçlendirilmiş ve bu güçlendirilen numunelerin donma/çözülme ve sıcaklık etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Sıcaklık etkisinin inceleneceği silindir beton numuneler 25 °C, 60 °C, 100 °C ve 150 °C sıcaklıklara 12 saat süresince maruz bırakılmış ve daha sonra basınç dayanımları, bağıl kütleleri, rezonans frekansları ve dinamik elastisite modülleri üzerindeki değişimler referans numuneler ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Donma/çözülme etkisinin inceleneceği silindir beton numuneler ise 30, 60, 90 ve 120 çevrim donma/çözülme işlemine maruz bırakılmış ve numunelerin rezonans frekansları, dinamik elastisite modülleri, ultrases geçiş hızları ve basınç dayanımları üzerindeki değişimler referans numuneler ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sonuç olarak yanal güçlendirme uygulanmış her iki dayanım sınıfındaki numunelerin basınç dayanımlarında güçlendirme uygulanmamış numuneye oranla artış görülmüştür. Yanal güçlendirme uygulanmış numunelerin hem donma/çözülme çevrim sayısı arttıkça hem de maruz kaldıkları sıcaklık derecesi arttıkça performanslarında azalmalar gözlenmiştir. Bununla birlikte özellikle basınç dayanımı açısından kıyaslandığında, güçlendirme uygulanmış numunelerde 90 çevrim donma/çözülme veya 150 °C sıcaklık koşullarında dahi güçlendirilme uygulanmamış ve donma/çözülme ile sıcaklık etkisine maruz kalmamış numunelerin basınç dayanımı değerlerinden daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir.

Effect of Freezing/Thawing and Temperature on Behavior of Concretes Reinforced with BFRP Composites

Research Article

ABSTRACT

Article History:

Received: 06.10.2021

Accepted: 29.12.2021

Published online: 18.07.2022

Keywords:

Basalt fiber

Freeze/thaw

Lateral reinforcement

Polymer-based composites

Effect of temperature

Within the scope of this study, 100x200 mm cylindrical samples produced in C16 and C25 concrete strength classes were laterally reinforced with Basalt Fiber Reinforced Polymers (BFRP), and their performance under the freeze/thaw cycles and the elevated temperature was investigated. The cylindrical concrete samples were exposed to 25 °C, 60 °C, 100 °C, and 150 °C for 12 hours. Then the changes in their compressive strength, relative masses, resonance frequencies, and dynamic modulus of elasticity values were compared with the reference samples. When the freezing/thawing effect is examined, specimens were subjected to 30, 60, 90, and 120 cycles of freezing/thawing, and the changes on the resonance frequencies, dynamic modulus of elasticity, ultrasound pulse velocity, and compressive strength values of the samples were compared with the reference samples. As a result,

the compressive strength of the concrete samples laterally reinforced was increased compared to the sample without BFRP reinforcement. It was observed that the samples' performance with lateral reinforcement decreased while increasing the freeze/thaw cycles and temperature. However, the compressive strength values of the GFRP reinforced concrete samples, even under 90 cycle freezing/thawing or 150°C temperature conditions, were higher than those not reinforced with GFRP and not exposed to freezing/thawing and temperature.

To Cite: Yaman Z., Öztürk İŞ., Emiroğlu M. Donma/Çözülme ve Sıcaklığın BFRP Kompozitlerle Güçlendirilmiş Betonların Davranışlarına Etkisi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2022; 5(2): 551-569.

Giriş

Beton; agrega, çimento, su ve gerektiğinde mineral ve/veya kimyasal katkı maddelerinin belirli oranlarda bir araya getirilmesiyle elde edilen, başlangıçta plastik kıvamda olan ve çimentonun hidrasyonu ile zamanla sertleşerek mukavemet kazanan bir kompozit malzemedir (Baradan ve ark., 2012; Şimşek, 2016). Beton ile üretilen yapı ve yapı ürünlerinin mekanik ve çevresel etkilere karşı işlevlerini servis ömürleri boyunca deformasyona uğramadan yerine getirebilmesi durabilite olarak tanımlanmaktadır (Durmuş ve Kara, 2010; Baradan ve Aydın, 2013).

Servis ömürleri boyunca çevresel etkilere maruz kalan yapı ve yapı ürünlerinin bozulmalarına sebep olan faktörler fiziksel ve mekanik etkenler (aşırı yükleme, darbe, büzülme/şişme, sıcaklık, donma/çözülme vb.) ile kimyasal ve biyolojik etkenler (karbonatlaşma, asit etkileri, sülfat etkisi, alkali-agrega reaksiyonu, korozyon vb.) şeklinde sınıflandırılmaktadır (Baradan ve Aydın, 2013). Bu çevresel etkiler öncelikle yapı ve yapı ürünlerinin dış ortama açık olan kısımlarını etkileyerek; çatlama, kapak atma, dayanım/rijitlik kaybı gibi sorunlara sebep olmaktadır. Zamanla bu çevresel etkiler iç kısımlara doğru ilerleyerek yapı ve yapı ürünlerinin işlevlerini servis ömürlerini tamamlamadan kaybetmesine sebep olmaktadır (Baradan ve Aydın, 2013; Akın, 2019).

Betonun bozulmaya uğrayarak servis ömrünü tamamlamadan işlevini yitirmesine sebep olan temel faktörlerden bir tanesi donma/çözülme olayıdır (Güleryüz ve ark., 2020; Gönen ve Yazıcıoğlu, 2021). Suya doymun haldeki sertleşmiş betonun kılcal boşluklarındaki su, düşük sıcaklıklarda buz haline dönüşmekte ve hacmi yaklaşık olarak %8-9 oranında artmaktadır (Kaya ve ark., 2016; Güleryüz ve ark., 2020). Bu olayın sonucunda betonda çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Donma/çözülme olayına tekrarlı bir şekilde maruz kalan betonda çekme gerilmeleri gittikçe artmaktadır. Artan çekme gerilmelerinin betonun çekme direncini yenmesi sonucunda betonda çatlaklar oluşmaktadır. Çatlakların bir araya gelerek büyümesi sonucunda ise betonda parçalanmalar gözlenmektedir (Kaya ve ark., 2016; Güleryüz ve ark., 2020; Gönen ve Yazıcıoğlu, 2021).

Betonun yapısına zarar vererek servis ömrünü tamamlamadan işlevini yitirmesine sebep olan faktörlerden bir diğeri ise sıcaklık etkileridir. Betonda 105 °C üzerindeki sıcaklıklarda kapiler boşluklardaki ve kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jellerinin yapısındaki suyun buharlaşması sonucunda büzülme oluşmaktadır. Betonun iç yapısında oluşan çatlaklar sebebiyle çekme dayanımı azalmaktadır. Sıcaklık yaklaşık 300 – 400 °C'ye ulaştığında betonun içerisindeki alüminli ve demir oksitli bileşenler dehidratasyona uğramakta ve bunun sonucunda da basınç dayanımı düşmektedir. Ayrıca Ca(OH)₂

sıcaklığın etkisiyle kirece dönüşmekte ve yaklaşık olarak hacimce %30'luk bir büzülme meydana gelmektedir. 500 - 600 °C'de betonun ana bağlayıcı fazı olan C-S-H jellerinin büyük bir kısmı ayrılmaktadır. 800 °C'de ise betonu oluşturan bileşenlerin hemen hemen tamamı parçalanmaktadır. Bu sıcaklık derecesi betonun yaklaşık olarak %70 oranında dayanım kaybına ve önemli miktarda ağırlık kaybına yol açmaktadır (Dündar ve Çınar, 2020; Çınar ve ark., 2021).

Sıcaklık etkileri molekül yapılarında değişiklikler meydana getirmesi sebebiyle polimerleri de önemli ölçüde etkilemektedir. Sıcaklık değerleri polimerlerin camsı geçiş sıcaklık değerlerine ulaştığında polimerler yumuşamaya başlamaktadır. Polimerlerin camsı geçiş sıcaklığı değerlerinden sonra moleküler yapılarında meydana gelen değişiklikler sebebiyle elastisite modülleri önemli ölçüde azalmaktadır. Polimerlerin camsı geçiş sıcaklığı reçine tipine bağlı olmakla birlikte genellikle 65 °C ile 120 °C arasında değişmektedir. Özellikle FRP ile güçlendirilen yapı elemanlarında polimerin özellikleri yapı elemanı ile FRP arasında önemli bir etkidir. Çünkü sıcaklık etkileri camsı geçiş sıcaklığına yaklaştıkça polimerin mekanik özellikleri önemli derecede azalmakta ve bunun sonucunda da yapı elemanı ile FRP arasındaki aderans azalmaktadır. Geçmiş yıllarda 60 °C ile 124 °C arasında geçiş sıcaklığına sahip malzemeler üzerinde yapılan bir çalışmada sıcaklığın 200 °C'lere çıkması sonucunda aderans kuvvetinde %80 ila %90 arasında bir azalmanın yaşandığı sonucuna varılmıştır. Meydana gelen aderans kaybı sebebiyle yapı elemanından FRP'ye gerekli yük aktarımı gerçekleşmemekte ve güçlendirme işleminden beklenen iyileştirmeler sağlanamamaktadır. (Bulut, 2006)

Son yıllarda deprem, çevresel etkiler ve diğer çeşitli etkenler sebebiyle hasar gören veya görmesi muhtemel olan beton yapı elemanlarının onarım ve güçlendirmesinde FRP kompozitler yaygın olarak kullanılmaktadır. FRP kompozitlerin son derece hafif malzemeler olması (yapı ağırlığını arttırmaması), kolay ve hızlı bir şekilde uygulanması (zaman tasarrufu sağlaması) ve uygulanan malzemenin taşıma kapasitesini önemli ölçüde arttırması gibi avantajları onarım ve güçlendirme çalışmalarında tercih edilmesini sağlamaktadır (Sarıbyık, 2018; Maras, 2021). Onarım ve güçlendirme amacıyla kullanılan FRP'ler, yüksek fiziksel özelliklere sahip karbon, cam, aramid ve bazalt kumaşların epoksi reçinesi ile doyurulması sonucu plaka veya kumaş şeklinde farklı formlarda üretilmektedir (Akbalık, 2020). Yapılan çalışmalar sonucunda FRP kompozitler ile güçlendirilmiş beton yapı elemanlarının dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin önemli ölçüde arttığı görülmüştür (Sarıbyık, 2018; Ustabas ve ark., 2020; Maras, 2021).

Genel olarak günümüze kadar betonarme elemanların polimer takviyeli kompozitler ile güçlendirilmesi konusundaki çalışmalar incelendiğinde, güçlendirmenin betonarme elemanının mekanik performansına etkileri ile betonarme elemanda en iyi performans için polimer kompozitin hangi oranda ve hangi bölgede uygulanması gerektiği konularının detaylı çalışıldığı anlaşılmaktadır (İlki ve ark., 2008; Siddika ve ark., 2019; Khaloo ve ark., 2020; Siddika ve ark., 2020). Ancak çevresel koşullara maruz kalan bu elemanların durabilite özellikleri hakkında yeteri kadar çalışmanın bulunmadığı saptanmıştır. Bu çalışma kapsamında üretilmiş olan iki farklı beton sınıfındaki (C16 ve

C25) silindir numuneler bazalt lif takviyeli polimerler (BFRP) ile güçlendirilmiştir. Güçlendirilmiş olan bu numunelerin önemli çevresel faktörlerden olan donma/çözülme ve sıcaklık etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Farklı donma/çözülme çevrimleri ve farklı sıcaklık etkileri ayrı ayrı uygulandıktan sonra numunelerin rezonans frekansları, bağlı kütleleri, dinamik elastisite modülleri, ultrases geçiş hızları ve basınç dayanımları üzerindeki değişimler deneysel olarak incelenmiştir.

Materyal ve Metot

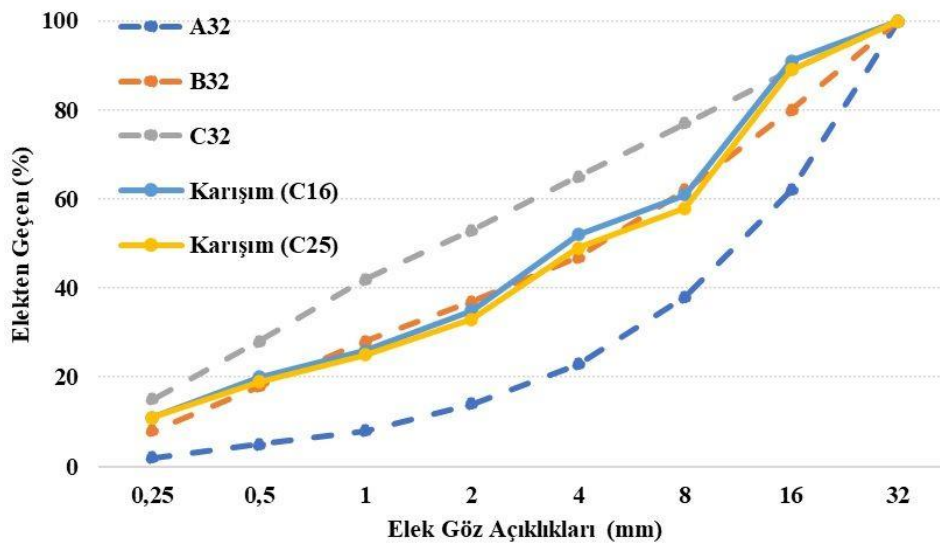
Materyal

BFRP ile güçlendirilmiş silindir numunelerin donma/çözülme ve sıcaklık etkisi altındaki davranışlarının incelendiği bu deneysel çalışmada, 30 adet C16 ve 30 adet C25 beton sınıfına sahip silindir numuneler üretilmiştir. Çalışmada kullanılan agregaların tane büyüklüğüne göre özgül ağırlıkları ve su emme oranları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Betonda kullanılan agregaya ait fiziksel özellikler

| Agrega Tane Büyüklüğü (mm) | 0-5 | 5-11 | 11-22 |
|----------------------------|------|------|-------|
| Özgül Ağırlık | 2,70 | 2,71 | 2,68 |
| Su Emme (%) | 0,80 | 0,57 | 0,40 |

Şekil 1’de agregalar için önerilmiş olan sınır değerlere ait granülometri eğrileri ve deneyde kullanılan agregalar için karışımlarına ait granülometri eğrileri verilmiştir. Deneyde kullanılan karışıma ait granülometri eğrileri standartlarda önerilmiş olan sınır değerler arasında yer almaktadır.



Şekil 1. Karışımlarda kullanılan agregaların granülometri eğrileri

Ayrıca silindir numunelerin üretilmesinde CEM I 42,5 R sınıfı çimento, kimyasal katkı olarak akışkanlaştırıcı katkı, karma ve kür suyu olarak şebeke suyu kullanılmıştır. İki farklı beton sınıfı için üretilen silindir numunelere ait karışım oranları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Beton üretiminde kullanılan karışım oranları (1 m³)

| Numune Kodu | C16/20 | C25/30 |
|---------------------------------|-------------|-------------|
| Taş Kumu (kg - %) | 1010 (%53) | 923 (%50) |
| I Numara Mıdır (kg - %) | 421 (%22) | 408 (%22) |
| II Numara Mıdır (kg - %) | 478 (%25) | 519 (%28) |
| Çimento (kg) | 280 | 350 |
| Su (kg) | 184,9 | 184,2 |
| Akışkanlaştırıcı Katkı (kg - %) | 3,08 (%1,1) | 3,85 (%1,1) |

C16 ve C25 beton sınıfında üretilen silindir numunelerin yanal olarak güçlendirilme işlemlerinde kullanılan BFRP kumaşın teknik özellikleri Tablo 3’te ve çalışmada kullanılan epoksi reçinesine (Sikadur 330) ait teknik özellikler ise Tablo 4’te verilmiştir

Tablo 3. BFRP Kumaşın Malzeme Özellikleri

| Özellik | Değer |
|-------------------------------|-----------|
| Yoğunluk (g/cm ³) | 2,70 |
| Desen | Tek Yönlü |
| Çekme Dayanımı | 2200 MPa |

Tablo 4. Epoksi Reçinesinin Malzeme Özellikleri

| Sikadur 330 | |
|---------------------------|---|
| Yoğunluk | 1,3 kg/l (+23 °C’de) |
| Çekme Dayanımı | 30 MPa (+23 °C’ de 7 günlük) |
| Elastisite Modülü | Eğilme: 3800 MPa Çekme: 4500 MPa |
| Karışım | A : B Bileşeni = 4 : 1 ağırlıkça |
| Termal Genleşme Katsayısı | $4,5 \times 10^{-5}$ 1/K (-10 °C ile +40 °C arasında) |
| Kopma Uzaması | %0,9 (+23 ⁰ C’de 7 Günlük) |

Metot

Bu çalışmada 30 adet C16 ve 30 adet C25 beton dayanım sınıfında olacak şekilde çapı 100 mm, boyu 200 mm ölçülerinde toplam 60 adet silindir numune üretilmiştir. Üretilen numuneler kür havuzunda 28 gün boyunca standart su küründe bekletilmiştir. Kür işlemi sonrası numuneler etüvde kurutulmuş ve

basıncılı hava yardımı ile yüzeyleri temizlenmiştir. Çalışmada referans olması için her iki beton sınıfından üçer adet numune üzerinde güçlendirme uygulamadan basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Geriye kalan ve yüzeyleri temizlenmiş olan numunelere (27+27) ise bazalt kumaş ile yanal güçlendirme uygulanmıştır.

Güçlendirme aşamasında ilk olarak, Sikadur-330 2-Bileşenli Epoksi Esaslı Doyurma (laminasyon) Reçinesi A-bileşeninden 80 gr, B-bileşeninden 20 gr alınarak el mikseri vasıtasıyla düzgün kıvamlı ve homojen hale gelene kadar ilk olarak düşük devirde daha sonra ise yüksek devirde karıştırılmıştır. Daha sonra hazırlanan bu epoksi reçinesi fırça yardımıyla tek kat olacak şekilde silindir numunelerin yanal yüzeylerine ve bazalt kumaş malzemesinin beton numunelere temas edecek yüzeylerine lif doğrultusuna paralel yönde (reçinenin lif demetleri arasından dışarı çıkması sağlanarak) metrekareye 1,20 kilogram olacak şekilde uygulanmıştır. Yanal güçlendirme uygulamasında tek yönlü bazalt kumaş malzemesi 3 cm bindirme payıyla numunelerin yanal yüzeylerine sarılmış ve tel rulo yardımıyla üzerlerinden geçilmiştir. Numunelerin güçlendirme aşamalarına ait görseller Şekil 2’de verilmiştir.

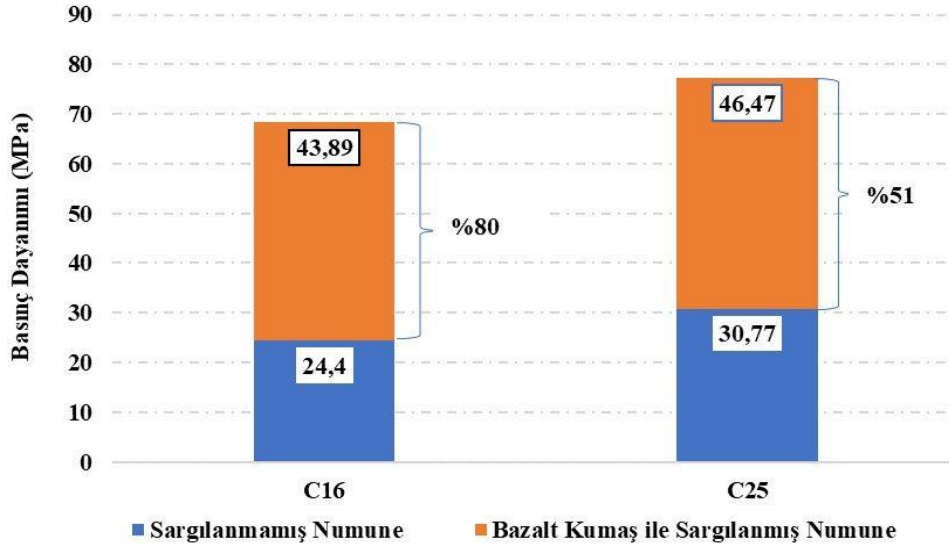


Şekil 2. Beton numunelerin BFRP ile yanal güçlendirilme aşamaları.

Yanal güçlendirme işlemi uygulanmış silindirik numuneler epoksi polimerinin yeterli dayanıma ulaşması amacıyla en az 7 gün süresince bekletilmiştir. Daha sonra bu silindirik numunelerin donma/çözülme ve sıcaklık etkisi altındaki davranışları incelenmiştir.

Bulgular ve Tartışma

Güçlendirilme uygulanmamış ve bazalt kumaş ile yanal olarak güçlendirilme uygulanmış C16 ve C25 beton dayanım sınıflarında üretilen silindir numunelere ait basınç deneyi sonucunda elde edilen basınç dayanımı değerleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Numunelerin basınç dayanımı değerleri

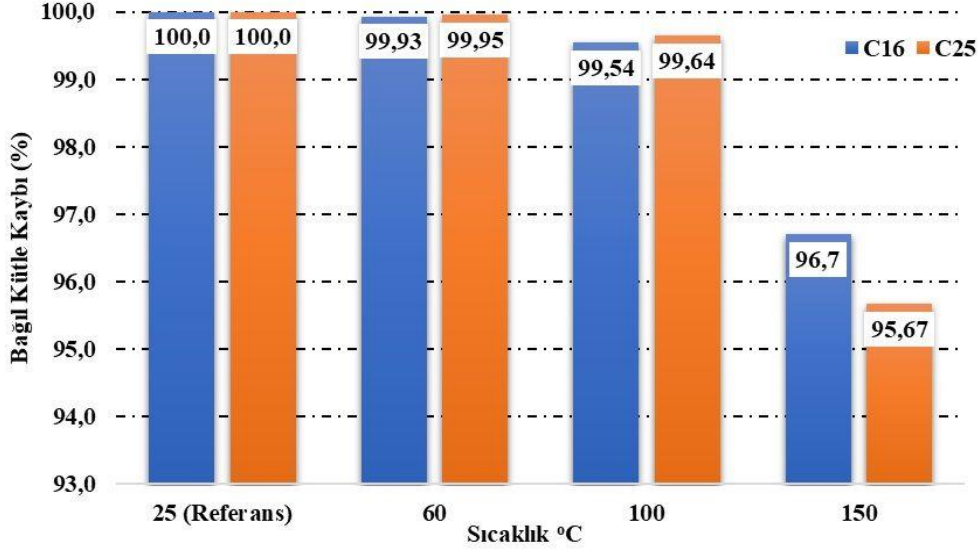
C16 beton sınıfında bazalt kumaş ile sargılanmış numunelerin basınç dayanımı sargılanmamış numunenin basınç dayanımına göre %80 oranında bir artış göstermiştir. C25 beton sınıfında basınç dayanımındaki artış oranı ise %51 oranındadır. Yanal güçlendirme uygulanmış numunelerde bazalt kumaş, betonun dağılmasını engelleyerek dayanımını arttırmıştır.

Yüksek Sıcaklığa Maruz Bırakılmış Numunelerin Deney Sonuçları

25°C, 60 °C, 100 °C ve 150 °C sıcaklıklara 12 saat süresince maruz bırakılan C16 ve C25 beton dayanım sınıfına sahip numunelerin basınç dayanımları, bağıl kütleleri, rezonans frekansları ve dinamik elastisite modülleri üzerindeki değişimlere ait deney sonuçları bu bölümde ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Burada 25 °C ifadesi, laboratuvar ortamında bekletilmiş ve güçlendirme uygulaması yapılmış referans numuneleri ifade etmektedir.

Yüksek Sıcaklığa Maruz Bırakılmış Numunelerin Bağıl Kütle Değerleri

Şekil 4'te C16 ve C25 beton dayanım sınıflarında üretilen ve yanal olarak güçlendirilmiş olan silindir numunelerin farklı sıcaklık derecelerine maruz bırakıldıktan sonra meydana gelen bağıl kütle kaybı değerleri verilmiştir.



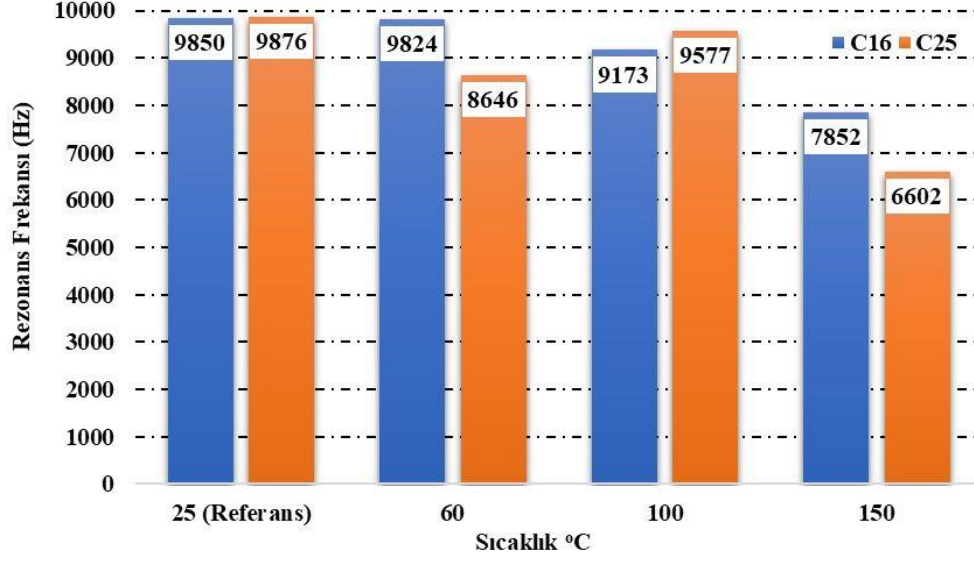
Şekil 4. Isıl işlem görmüş numunelerin bağlı kütle kaybı değerleri.

Şekil 4 incelendiğinde, 100 °C'ye kadar sıcaklıklara maruz betonların kütle kayıplarının referans numuneye (25 °C) göre çok düşük seviyelerde kaldığı gözlemlenmiştir. Bilindiği üzere betondaki asıl kütle kayıpları 105 °C üzerindeki sıcaklıklarda kapiler boşluklardaki ve kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jellerinin yapısındaki suyun buharlaşması sonucunda başlamaktadır. Mükemmel bir termal dirence sahip olan bazalt liflerinin mekanik mukavemetinin, cam liflerinin tamamen harap olduğu 700 °C sıcaklıkta bile yalnızca %50 azaldığı rapor edilmiştir (John ve Dharmar, 2021). Bazalt elyafın yüksek sıcaklığa dirençli bir malzeme olması sebebiyle 60 °C ve 100 °C sıcaklıklardaki kütle kayıplarının epoksi polimerden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, 60 °C ve 100 °C sıcaklıklarda epoksi polimerin kütle kayıplarının da düşük seviyelerde olduğu anlaşılmaktadır. 150 °C sıcaklığa maruz bırakılmış numuneler incelendiğinde ise kütle kaybı değerleri C16 ve C25 sınıfındaki betonlar için sırasıyla %3,30 ve %4,33 olarak ortaya çıkmıştır. Bunun sebebi olarak hem betonun kapiler boşluklardaki suyu kaybetmesi hem de epoksi polimerin bünyesinde meydana gelen kütle kayıpları sayılabilir. C16 ve C25 dayanım sınıflarına ait beton numunelerin maruz bırakıldıkları her bir sıcaklık değeri altındaki bağlı kütle değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Bu sonuç, beton dayanım sınıfının bağlı kütle kaybına belirgin bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

Yüksek Sıcaklığa Maruz Bırakılmış Numunelerin Rezonans Frekansı Değerleri

Şekil 5'te C16 ve C25 beton dayanım sınıflarında üretilen ve yanal olarak güçlendirilmiş olan silindir numunelerin rezonans frekansı değerleri verilmiştir. C16'da referans numuneye (25 °C) göre rezonans frekansı değerleri 60 °C, 100 °C ve 150 °C'de sırasıyla %0,3; %6,9 ve %20,3 oranında azalmıştır. C25'te ise referans numuneye (25 °C) göre rezonans frekansı değerleri 60 °C, 100 °C ve 150 °C'de sırasıyla %12,5; %3 ve %33,2 oranında azalmıştır. Rezonans frekansı değerleri hem C16 hem de C25 beton dayanım sınıfında kütle kaybı değerleri ile uyumlu bir biçimde sıcaklık arttıkça azalmıştır. 150 °C sıcaklıkta hem kullanılan epoksi polimerin yapısının bozulması hem de betonun boşluk oranının

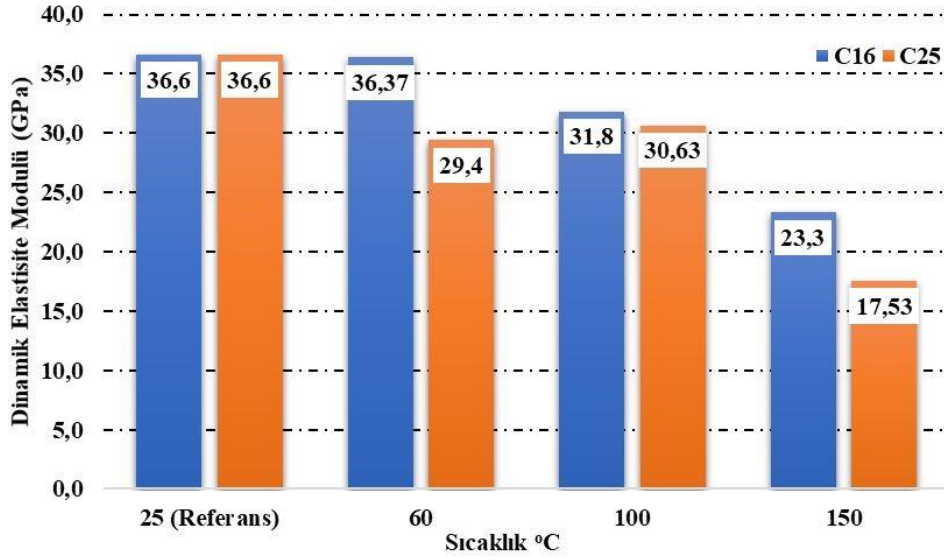
artması ile C16 ve C25 beton numunelerinin rezonans frekans değerleri azalmıştır. Benzer sonuçlar, betonun yüksek sıcaklıkta bozulmasının araştırıldığı ve dinamik elastisite modülü gibi tahribatsız yöntemlerin değerlendirilmede kullanıldığı çalışmada da raporlanmıştır (Dvořák ve ark., 2018).



Şekil 5. Numunelerin rezonans frekansı değerlerindeki değişimler.

Yüksek Sıcaklığa Maruz Bırakılmış Numunelerin Dinamik Elastisite Modülü Değerleri

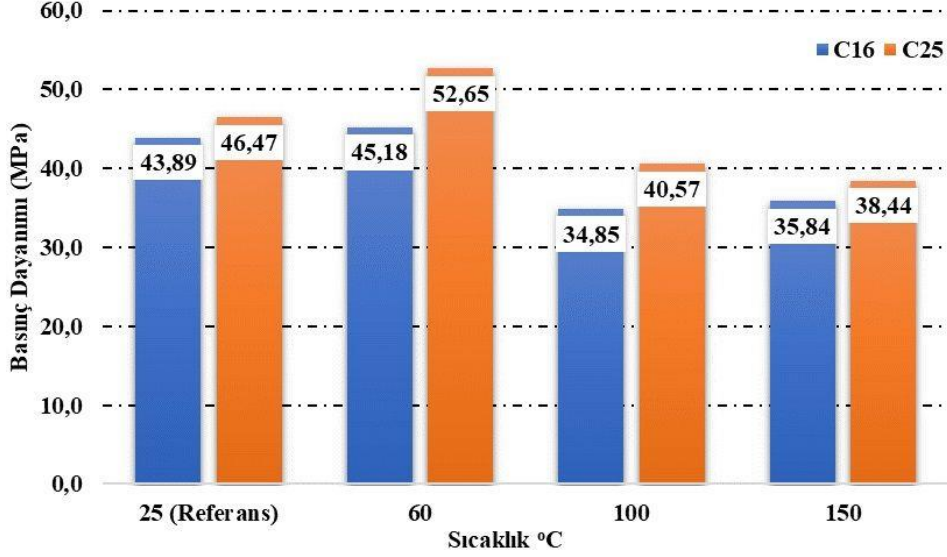
Şekil 6’da C16 ve C25 beton dayanım sınıflarında üretilen ve yanal olarak güçlendirilmiş olan silindir numunelerin dinamik elastisite modülü değerleri verilmiştir. C16’da referans numuneye (25 °C) göre dinamik elastisite modülü değerleri 60 °C, 100 °C ve 150 °C’de sırasıyla %0,7; %13,1 ve %36,3 oranında azalmıştır. C25’te ise referans numuneye (25 °C) göre dinamik elastisite modülü değerleri 60 °C, 100 °C ve 150 °C’de sırasıyla %19,7; %16,3 ve %52,1 oranında azalmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, sıcaklık işleminin ardından C25 sınıfı betonların dinamik elastisite modülündeki değişimlerin C16 sınıfındaki betonlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Düşük dayanımlı betonların daha yüksek boşluk oranına sahip olması sebebiyle sıcaklık etkisi sonrasındaki dinamik elastisite değerleri daha az etkilenmiştir. Bununla birlikte, her iki beton sınıfı için de sıcaklık değerlerinin artışı ile dinamik elastisite modülü değerlerinin azaldığı görülmüştür.



Şekil 6. Numunelerin dinamik elastisite modülü değerlerindeki değişimler.

Yüksek Sıcaklığa Maruz Bırakılmış Numunelerin Basınç Dayanım Değerleri

Şekil 7’de C16 ve C25 beton dayanım sınıflarında üretilen ve yanal olarak güçlendirilmiş olan silindirik numunelerin basınç dayanımı değerleri verilmiştir. C16’da referans numuneye (25 °C) göre basınç dayanımı değerleri 60 °C’de %2,8 oranında artmış, 100 °C ve 150 °C’de ise sırasıyla %20,6 ve %18,3 oranında azalmıştır. C25’te ise referans numuneye (25 °C) göre basınç dayanımı değerleri 60 °C’de %13,3 oranında artmış, 100 °C ve 150 °C’de ise sırasıyla %12,7 ve %17,3 oranında azalmıştır. Her iki dayanım sınıfı için 60 °C’de basınç dayanım değerleri referans numuneye göre artış göstermiştir. Bu durum, 60 °C sıcaklıkta epoksi polimerin çalışma sıcaklığının aşılmadığını ve güçlendirme etkisinin devam ettiğini göstermektedir. 100 °C ve 150 °C sıcaklıklarda ise her iki dayanım sınıfı için basınç dayanım değerleri referans numuneye göre azalış göstermiştir. Bu durum, 100 °C ve üzeri sıcaklıklarda epoksi polimerin yapısının bozulması ve güçlendirme etkisinin çalışmadığını göstermektedir. Bununla birlikte her iki dayanım sınıfı için güçlendirilme uygulanmamış numunelerin basınç dayanımı değerleri, güçlendirme uygulanmış ve aynı zamanda sıcaklık etkisine maruz kalmış olan numunelerin basınç dayanımı değerlerinden daha düşük sonuçlar göstermiştir. Sonuç olarak epoksi polimerin çalışma sıcaklıklarının üzerindeki sıcaklıklarda dahi basınç dayanımı üzerinde sargılama etkisi oluşmuştur.



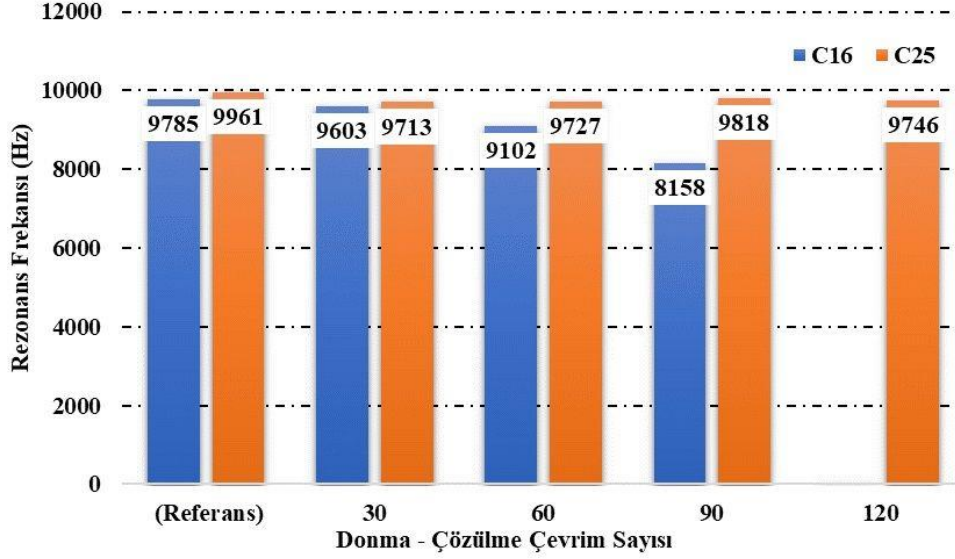
Şekil 7. Numunelerin basınç dayanımı değerlerindeki değişimler.

Donma- Çözülme Çevrimine Maruz Bırakılmış Numunelerin Deney Sonuçları

C16 ve C25 beton dayanım sınıflarında üretilen ve yanal olarak güçlendirilmiş olan silindir numuneler ASTM C666/C666M-15 standardına uygun olarak donma/çözülme çevrimlerine maruz bırakılmıştır. Bir donma/çözülme çevrimi 3 saat -20 °C havada donma ve 2 saat +20 °C suda çözülme çevriminden oluşmaktadır. 30, 60, 90 ve 120 donma/çözülme çevrimine maruz bırakılan C16 ve C25 beton dayanım sınıfına sahip numunelerin rezonans frekansları, dinamik elastisite modülleri, ultrases geçiş hızları ve basınç dayanımları üzerindeki değişimlere ait deney sonuçları bu bölümde ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Donma- Çözülme Çevrimine Maruz Bırakılmış Numunelerin Rezonans Frekansı Değerleri

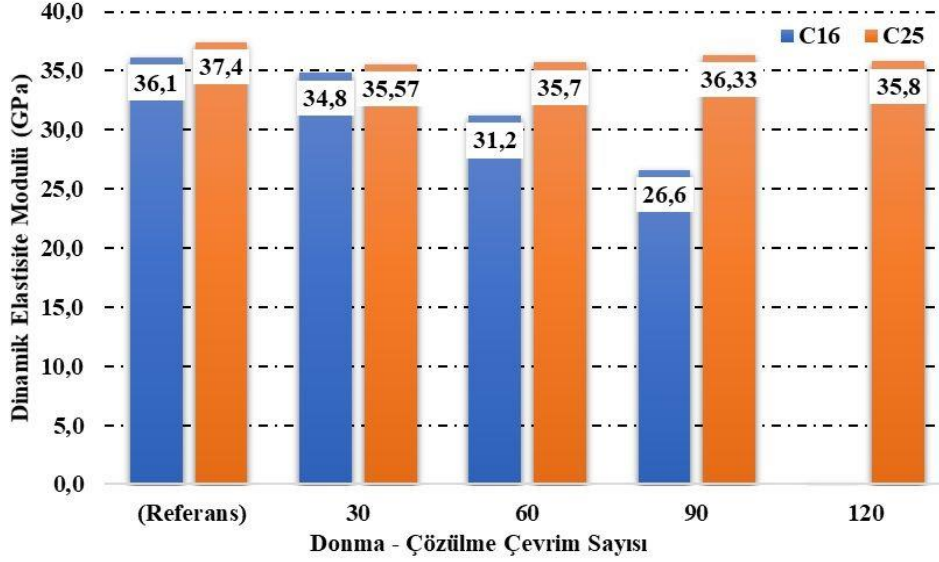
Şekil 8’de C16 ve C25 beton dayanım sınıflarında üretilen ve yanal olarak güçlendirilmiş olan silindir numunelerin rezonans frekansı değerleri verilmiştir. C16’da referans numuneye göre rezonans frekansı değerleri 30, 60 ve 90 donma/çözülme çevriminden sonra sırasıyla %1,9; %7,0 ve %16,6 oranında azalmıştır. 120 donma/çözülme çevriminden sonra ise numuneler bozulmaya başladığı için herhangi bir rezonans frekansı değeri tespit edilememiştir. C25’te ise referans numuneye göre rezonans frekansı değerleri 30, 60, 90 ve 120 donma/çözülme çevriminden sonra sırasıyla %2,5; %2,3; %1,4 ve %2,2 oranında azalmıştır. 30 ve 60 donma/çözülme çevrimine maruz bırakılmış numunelerin rezonans frekanslarındaki değişimlerin sınırlı kaldığı görülmüştür. Bununla birlikte hem C16 hem de C25 beton dayanım sınıfında donma/çözülme çevrim sayısı arttıkça rezonans frekansı değerleri azalmıştır.



Şekil 8. Numunelerin rezonans frekansı değerlerindeki değişimler

Donma- Çözülme Çevrimine Maruz Bırakılmış Numunelerin Dinamik Elastisite Modülü Değerleri

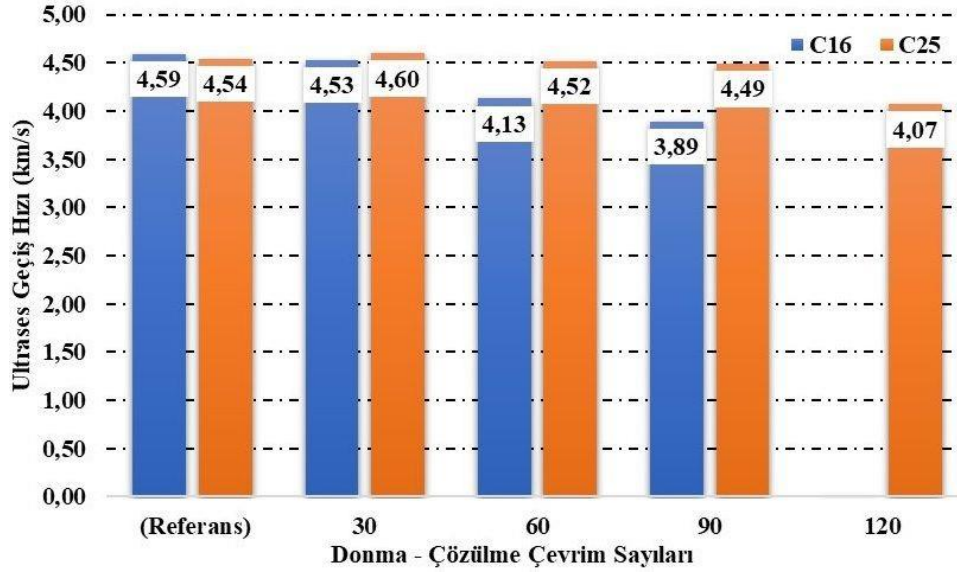
Şekil 9’da C16 ve C25 beton dayanım sınıflarında üretilen ve yanal olarak güçlendirilmiş olan silindir numunelerin dinamik elastisite modülü değerleri verilmiştir. C16’da referans numuneye göre dinamik elastisite modülü değerleri 30, 60 ve 90 donma/çözülme çevriminden sonra sırasıyla %3,6; %13,6 ve %26,3 oranında azalmıştır. 120 donma/çözülme çevriminden sonra ise numunelerdeki boşluk oranının artışından ve numuneler üzerinde çatlaklar oluşmasından kaynaklı herhangi bir dinamik elastisite modülü değeri tespit edilememiştir. C25’te ise referans numuneye göre dinamik elastisite modülü değerleri 30, 60, 90 ve 120 donma/çözülme çevriminden sonra sırasıyla %4,9; %4,5; %2,9 ve %4,3 oranında azalmıştır. Sonuçlara bakılarak donma/çözülme çevrimleri sonucunda C25 sınıfı betonların dinamik elastisite modülündeki değişimlerin C16 sınıfındaki betonlara göre daha düşük değerlerde gerçekleştiği görülmüştür. Yani yüksek dayanım sınıfındaki betonların donma/çözülme çevrimine karşı dirençleri daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 9. Numunelerin dinamik elastisite modülü değerlerindeki değişimler

Donma- Çözülme Çevrimine Maruz Bırakılmış Numunelerin Ultrases Geçiş Hızı Değerleri

Şekil 10'da C16 ve C25 beton dayanım sınıflarında üretilen ve yanal olarak güçlendirilmiş olan silindir numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri verilmiştir. Her iki beton sınıfındaki numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri donma/çözülme çevrim sayısı arttıkça genel olarak azalmaktadır. C16'da referans numuneye göre ultrases geçiş hızı değerleri 30, 60 ve 90 donma/çözülme çevriminden sonra sırasıyla %1,3; %10 ve %15,3 oranında azalmıştır. 120 donma/çözülme çevriminden sonra ise numunelerde ölçüm alınmayacak boyutta bir bozulma olması sebebiyle ölçüm alınamamıştır. C25'te ise referans numuneye göre ultrases geçiş hızı değerleri 30 donma/çözülme çevriminden sonra %1,3 oranında artış göstermiş iken 60, 90 ve 120 donma/çözülme çevriminden sonra ise sırasıyla %0,4; %1,1 ve %10,3 oranında azalmıştır. Porozite, esas olarak su kaybından kaynaklı mikroyapının önemli bir bileşenidir. 10 nm ile 10 μ m aralığında bulunan ve serbest su kaybından dolayı oluşan porozitenin mukavemet ve dayanıklılık üzerinde önemli bir etkisi olduğu bilinmektedir (Zongjin, 2011). Genel olarak, dayanım ile porozite arasında doğrusal olmayan negatif bir korelasyon bulunmaktadır, bir diğer deyişle düşük poroziteye sahip betonların dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin yüksek olduğu bilinmektedir (Lamond ve Pielert, 2006; Chen ve ark., 2013).

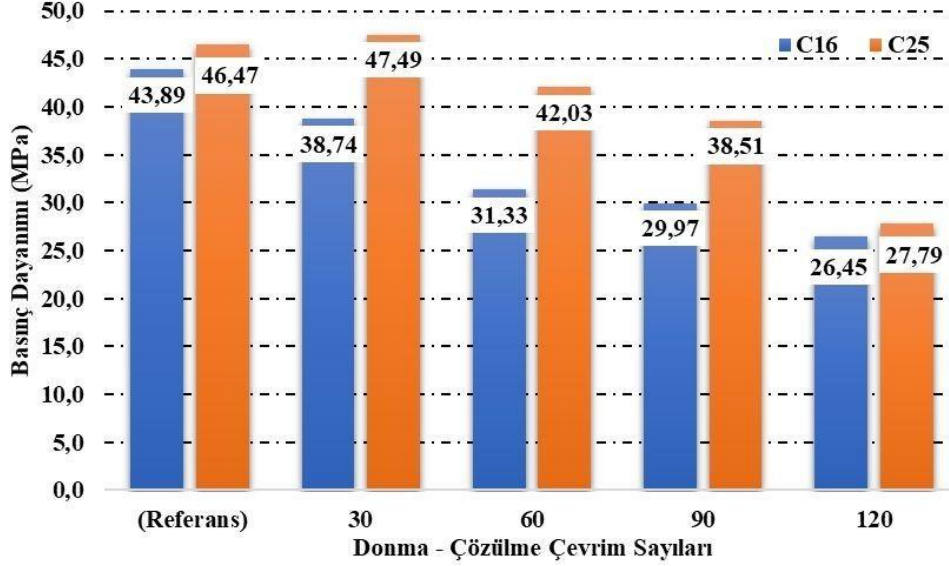


Şekil 10. Numunelerin ultrases geçiş hızındaki değerlerindeki değişimler.

Donma-Çözülme Çevrimine Maruz Bırakılmış Numunelerin Basınç Dayanımı Değerleri

Şekil 11’de C16 ve C25 beton dayanım sınıflarında üretilen ve yanal olarak güçlendirilmiş olan silindir numunelerin basınç dayanımı değerleri verilmiştir. Her iki beton sınıfındaki numunelerin basınç dayanımı değerleri donma/çözülme çevrim sayısı arttıkça genel olarak azalmaktadır. C16’da referans numuneye göre basınç dayanımı değerleri 30, 60, 90 ve 120 donma/çözülme çevriminden sonra sırasıyla %11,7; %28,6; %31,7 ve %39,7 oranında azalmıştır. 120 donma/çözülme çevriminin ardından bazalt kumaş ile yanal güçlendirme uygulanmış numunelerin basınç dayanımları (26,45 MPa) güçlendirme uygulanmamış numunelerin basınç dayanımına (24,4 MPa) benzer sonuçlar göstermiştir.

C25’te ise referans numuneye göre basınç dayanımı değerleri 30 donma/çözülme çevriminden sonra %2,2 oranında artış göstermiş iken 60, 90 ve 120 donma/çözülme çevriminden sonra ise sırasıyla %9,6; %17,1 ve %40,2 oranında azalmıştır. 30 donma/çözülme sonrası basınç dayanımında bir artış görülmüştür. Bu durum 30 donma/çözülme çevriminin C25 sınıfı betonların bozulması için yetersiz kaldığını göstermektedir. Bu artışa çözülme sürecinin suda çözülme olarak uygulanmasının da sebep olduğu söylenebilir. Donma/çözülme çevrimleri (60, 90 ve 120 donma/çözülme çevrimi) C25 sınıfı yanal güçlendirme uygulanmış betonların basınç dayanımı değerlerini olumsuz olarak etkilemektedir. 120 donma/çözülme çevriminin ardından bazalt kumaş ile yanal güçlendirme uygulanmış numunelerin basınç dayanımları (27,79 MPa) güçlendirme uygulanmamış numunelerin basınç dayanımına (30,77 MPa) göre %9,7 oranında azalmıştır. Sonuç olarak her iki beton sınıfı için donma/çözülme etkisinden kaynaklanan performans kaybının hem kullanılan epoksi reçinesinin hem de betonun bozulmasından kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 11. Numunelerin basınç dayanımı değerlerindeki değişimler.

Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, üretilmiş olan iki farklı beton sınıfındaki silindir numunelerin bazalt lif takviyeli polimerler (BFRP) ile güçlendirilmesi sonrasında önemli çevresel faktörlerden olan donma/çözülme ve sıcaklık etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Sıcaklık etkisinin inceleneceği silindir beton numuneler 25°C, 60 °C, 100 °C ve 150 °C sıcaklıklara 12 saat süresince maruz bırakılmış ve daha sonra basınç dayanımları, bağıl kütleleri, rezonans frekansları ve dinamik elastisite modülleri üzerindeki değişimler deneysel olarak incelenmiştir. Donma/çözülme etkisinin inceleneceği silindir beton numuneler ise 30, 60, 90 ve 120 donma/çözülme çevrimine maruz bırakılmış ve daha sonra numunelerin rezonans frekansları, dinamik elastisite modülleri, ultrases geçiş hızları ve basınç dayanımları üzerindeki değişimler deneysel olarak incelenmiştir. Tüm bu gerçekleştirilen deneyler yardımıyla aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Yanal olarak bazalt kumaş ile güçlendirilmiş numunelerin basınç dayanımı değerleri güçlendirilmemiş numunelerin basınç dayanımı değerlerine göre C16 dayanım sınıfında %80 oranında C25 dayanım sınıfında ise %51 oranında artış göstermiştir. Dolayısıyla yanal olarak güçlendirme uygulanmış numunelerin basınç dayanımları artış göstermektedir.
- Bazalt kumaş ile güçlendirme uygulanmış her iki dayanım sınıfındaki numunelerin bağıl kütle kayıpları sıcaklık artışıyla beraber artış göstermiş ve en yüksek kütle kayıpları da 150 °C sıcaklığa maruz bırakılmış numunelerde elde edilmiştir. C16 ve C25 sınıfındaki betonlar için 150 °C sıcaklıktaki kütle kayıpları sırasıyla %3,30 ve %4,33 oranındadır. Bununla birlikte her iki dayanım sınıfının maruz bırakıldıkları her bir sıcaklık değeri altındaki bağıl kütle değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Bu sonuç, beton dayanım sınıfının bağıl kütle kaybına belirgin bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

- Yanal olarak güçlendirilmiş olan silindir numunelerin referans numuneye göre rezonans frekansı değerleri sıcaklık artışıyla beraber C16 dayanım sınıfında %0,3 ila %20,3 arasında, C25 dayanım sınıfında ise %3 ila %33,2 arasında azalmıştır. Her iki dayanım sınıfında en düşük rezonans frekans değeri 150 °C sıcaklıkta elde edilmiştir. Bu sıcaklıkta hem kullanılan epoksi polimerin yapısının bozulması hem de betonun boşluk oranının artması buna sebep olmaktadır.
- Her iki beton sınıfı için de sıcaklık değerlerinin artışı ile dinamik elastisite modülü değerlerinin azaldığı görülmüştür. Referans numuneye göre azalma miktarları C16 dayanım sınıfında %0,7 ila %36,3 arasında, C25 dayanım sınıfında ise %19,7 ila %52,1 arasındadır. C25 sınıfı betonların dinamik elastisite modülündeki değişimlerin C16 sınıfındaki betonlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Yani düşük dayanımlı betonların daha yüksek boşluk oranına sahip olması sebebiyle sıcaklık etkisi sonrasındaki dinamik elastisite değerleri daha az etkilenmektedir.
- 60 °C sıcaklıklarda basınç dayanımı referans numuneye göre C16 dayanım sınıfında %2,8 oranında, C25 dayanım sınıfında ise %13,3 oranında artış göstermiştir. 100 °C ve 150 °C sıcaklıklarda ise her iki dayanım sınıfı için basınç dayanım değerleri referans numuneye göre %12,7 ila %20,6 oranında azalış göstermiştir. Bununla birlikte, her iki dayanım sınıfı için güçlendirilme uygulanmamış numunelerin basınç dayanımı değerleri, güçlendirme uygulanmış ve aynı zamanda sıcaklık etkisine maruz kalmış olan numunelerin basınç dayanımı değerlerinden daha düşük sonuçlar göstermiştir.
- Rezonans frekansı değerleri hem C16 hem de C25 beton dayanım sınıfında donma/çözülme çevrim sayısı arttıkça azalmıştır. Referans numuneye göre azalma miktarları C16 dayanım sınıfında %1,9 ila %16,6 arasında, C25 dayanım sınıfında ise %1,4 ila %2,5 arasındadır. Donma/çözülme çevrimine maruz kalan numunelerin dayanım sınıfı arttıkça rezonans frekansları artış göstermektedir.
- Dinamik elastisite modülü değerleri hem C16 hem de C25 beton dayanım sınıfında donma/çözülme çevrim sayısı arttıkça azalmıştır. Referans numuneye göre azalma miktarları C16 dayanım sınıfında %3,6 ila %23,6 arasında, C25 dayanım sınıfında ise %2,9 ila %4,9 arasındadır. C25 sınıfı betonların dinamik elastisite modülündeki değişimlerin C16 sınıfındaki betonlara göre daha düşük kaldığı görülmüştür. Yani yüksek dayanım sınıfındaki betonların donma/çözülme çevrimine karşı dirençleri daha yüksek çıkmıştır.
- Her iki beton sınıfındaki numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri donma/çözülme çevrim sayısı arttıkça genel olarak azalmaktadır. Referans numuneye göre azalma miktarları C16 dayanım sınıfında %1,3 ila %15,3 arasındadır. C25 dayanım sınıfında ise referans numuneye göre 30 donma/çözülme çevriminden sonra %1,3 oranında artış görülmüş iken 60, 90 ve 120 donma/çözülme çevriminden sonra sırasıyla %0,4; %1,1 ve %4,5 oranında azalma

görülmüştür. Dayanım sınıfı arttıkça donma/çözülme çevrimlerine karşı gösterilen direnç artmaktadır.

- Her iki beton sınıfındaki numunelerin basınç dayanımı değerleri ultrases geçiş hızlarına paralel olarak donma/çözülme çevrim sayısı arttıkça genel olarak azalmaktadır. Referans numuneye göre azalma miktarları C16 dayanım sınıfında %11,7 ile %39,7 arasındadır. C25 dayanım sınıfında ise referans numuneye göre 30 donma/çözülme çevriminden sonra %2,2 oranında artış görülmüş iken 60, 90 ve 120 donma/çözülme çevriminden sonra sırasıyla %9,6; %17,1 ve %40,2 oranında azalma görülmüştür. En düşük basınç dayanımı değerleri her iki basınç dayanımı sınıfında da 120 donma/çözülme çevrimi sonucunda elde edilmiştir.

Sonuç olarak yanal güçlendirme uygulanmış her iki dayanım sınıfındaki numunelerin basınç dayanımlarında güçlendirme uygulanmamış numuneye oranla artış görülmüştür. Yanal güçlendirme uygulanmış numunelerin hem donma/çözülme çevrim sayısı arttıkça hem de maruz kaldıkları sıcaklık derecesi arttıkça performanslarında azalmalar gözlenmiştir. Bununla birlikte özellikle basınç dayanımı açısından kıyaslandığında, güçlendirme uygulanmış numunelerde 90 çevrim donma/çözülme veya 150 °C sıcaklık koşullarında dahi güçlendirilme uygulanmamış (donma/çözülme ile sıcaklık etkisine maruz kalmamış) numunelerin basınç dayanımı değerlerinden daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum hem donma/çözülme hem de sıcaklık etkisi karşısında bazalt lif takviyeli kompozitin sargılama etkisinin devam ettiğini göstermektedir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, ıslanma-kuruma gibi çevresel koşulların elyaf takviyeli polimer güçlendirme elemanlarının sargılama performansları üzerine etkilerinin çalışılması önerilmektedir. Ayrıca donma/çözülme, yüksek sıcaklık veya ıslanma kuruma etkileri çalışılırken güçlendirme elemanlarının yüzeylerinin koruyucu sıvalarla kaplanarak çalışmanın devam ettirilmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Maddi desteklerinden dolayı Fibrobeton Yapı Elemanları San. ve İnşaat A.Ş' ye, Yapısoy Beton Hafr. İnş. Taah. San. ve Tic. Ltd. Şti.'ye, Beton Zemin ve Yapı Malz. Lab. Hiz. Ltd. Şti.'ye, SİKA Yapı Kimyasalları A.Ş' ye ve Spinteks Tekstil İnş. San. ve Tic. A.Ş.'ye teşekkürlerimizi sunarız.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Araştırmanın konusu üçüncü yazar tarafından belirlenmiştir. Birinci ve üçüncü yazar deneysel tasarımı planlayıp çalışmalarını birlikte yürütmüştür. Tüm yazarlar, makale yazımı ve görselleştirilmesine eşit oranda katkıda bulunmuştur.

Kaynaklar

- Akbalık HH. Bazalt FRP şerit ile beton arasındaki arayüzey bağlantısını etkileyen parametrelerin deneysel olarak araştırılması ve iyileştirilmesi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, Türkiye, 2020.
- Akın A. Nano silika kür uygulamasının çimento bağlayıcılı kompozitlerin donma-çözülme direnci üzerine etkisinin araştırılması. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2019; 8(2): 1032-1040.
- ASTM C666/C666M-15. Standart Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing. 2015.
- Baradan B., Yazıcı H., Aydın S. Beton. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları; 2012.
- Baradan, B., Aydın S. Betonun durabilitesi (Dayanıklılık, Kalıcılık). Hazır Beton Dergisi 2013; 54-68.
- Bulut E. FRP sargılı dikdörtgen kesitli betonarme kolonların yük taşıma kapasitelerinin farklı davranış modellerine göre irdelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye, 2006.
- Chen X., Wu S., Zhou J. Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar. Construction and Building Materials 2013; 40: 869-874.
- Çınar E., Dündar B., Uygunoğlu T. Geri dönüştürülmüş beton agregası kullanılarak üretilen harçlarda sıcaklık etkisinin araştırılması. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 2021; 9(1): 108-115.
- Durmuş G., Kara İB. Yüksek sıcaklığın ve farklı soğutma koşulunun kalker agregalı betonlar üzerindeki etkilerinin araştırılması. Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi 2010; 25(4): 741-748.
- Dündar B., Çınar E. Farklı mineral katkı harçların mekanik ve fiziksel özelliklerine yüksek sıcaklığın etkisi. Türk Doğa ve Fen Dergisi 2020; 9(2): 42-49.
- Dvořák R., Chobola Z., Kusák I. Acoustic non-destructive testing of high temperature degraded concrete with comparison of acoustic impedance. MATEC Web Conf. 2018; 219: 03003
- Gönen T., Yazıcıoğlu S. Pomza agregalı kendiliğinden yerleşen hafif betonların donma çözülme direncine mineral katkıların etkisi. El-Cezeri Journal of Science and Engineering 2021; 8(1): 94-101.
- Güleryüz E., Özen S., Mardani-Aghabaglou A. Mineral katkı kullanımının hava sürükleyici katkı çimentolu harçların taze ve sertleşmiş hal özelliklerine etkisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2020; 26(6): 1053-1061.
- İlki A., Peker O., Karamuk E., Demir C., Kumbasar N. FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular reinforced concrete columns. Journal of Materials in Civil Engineering 2008; 20(2): 169-188

- John VJ., Dharmar B. Influence of basalt fibers in the mechanical behavior of concrete -A review. *Structural Concrete* 2021; 22(1): 491-502
- Kaya T., Yazıcıoğlu S., Çerçevik AE. Kaplamalı beton basınç dayanımına donma-çözülme etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 2016; 4(2): 59-65.
- Khaloo A., Tabatabaeian M., Khaloo H. The axial and lateral behaviour of low strength concrete confined by GFRP wraps: An experimental investigation. *Structures* 2020; 27: 747-766.
- Lamond JF., Pielert JH. Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials. Philadelphia: ASTM STP169D-EB; 2006.
- Maras MM. Betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılan FRP kompozitin yapısal performansa etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2021; 23: 108-119.
- Sarıbıyık A. Effect of using FRP composites as hybrid in the strengthening of concretes. *Sakarya University Journal of Science* 2018; 22(2): 383-391.
- Siddika A., Mamun MAA., Alyousef R., Amran YHM. Strengthening of reinforced concrete beams by using fiber-reinforced polymer composites: A review. *Journal of Building Engineering* 2019; 25: 100798.
- Siddika A., Mamun MAA., Ferdous W., Alyousef R. Performances, challenges and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by using FRPs – A state-of-the-art review. *Engineering Failure Analysis* 2020; 111: 104480
- Şimşek O. Beton ve beton teknolojisi. 5. Baskı. Ankara: Seçkin Yayıncılık; 2016.
- Ustabaş İ., Gürbüz A., Kurt Z., Deşik F. Betonda CFRP sargı uygulamasının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 2020; 8(3): 921-930.
- Zongjin L. *Advanced Concrete Technology*. New Jersey: John Wiley&Sons, Inc; 2011.