



GFRP ile Güçlendirilen Yangına Maruz Kalmış Betonların Basınç Davranışının İncelenmesi

Onur Öztürk¹, Adnan Öner², Temel Temiz³, Kübra Çetintaş⁴

¹Kocaeli Üniversitesi; onur.ozturk@kocaeli.edu.tr; 0000-0003-4195-4364

²Kocaeli Üniversitesi; adnan@kocaeli.edu.tr; 0000-0002-7343-2563

³Yalova Üniversitesi; temel.temiz@yalova.edu.tr; 0000-0002-4013-7218

⁴Kocaeli Üniversitesi; kubracetintas@gmail.com; 0000-0001-8705-4113

Özet

Betonarme yapıların servis ömürleri boyunca karşılaşacakları doğal afetler sonrasında yapılarda meydana gelen hasarların belirlenmesi ve onarılması yapıların kullanılabilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Deprem, fırtına ve heyelan gibi birçok doğal afet etkisi kadar insan kaynaklı olarak meydana gelen yangınların da yapıların kullanılabilirliği üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Yangın etkisine maruz kalmış olan betonların basınç dayanımında maruz kalınan sıcaklık seviyesi ve süresine bağlı olarak önemli kayıplar olduğu bilinmektedir. Betonarme yapıların maruz kalacakları yangın etkisi sonrasında kaybettikleri performans seviyesine tekrar geri dönebilmesi için güçlendirmede lif takviyeli polimer (FRP) kullanımı son yıllarda oldukça yaygınlaşmıştır. Bu nedenle yangında hasar görmüş düşük dayanımlı betonların cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) ile sargılanarak güçlendirilmesi durumunda mekanik davranışlarının incelenmesi bu deneysel çalışma kapsamında amaçlanmıştır. Mevcut yapıların basınç dayanım değerlerini temsil etmesi amacıyla deneysel çalışmada yönetmeliklerde belirtilen minimum hazır beton dayanım sınıfının altında beton dayanımı seçilmiştir. Hazırlanan numunelerin yangın etkisini temsil etmesi amacıyla sabit 2 saat süre ile 300°C, 500°C ve 700°C sıcaklık değerlerine maruz bırakılarak hasar alması sağlanmıştır. Yangın hasarlı numuneler GFRP kullanılarak tek kat ve iki katlı sargılama işlemi ile güçlendirme uygulaması gerçekleştirilmiştir. Sargılanmış ve sargılanmamış numunelerde basınç dayanımı deneyleri yapılırken yanal ve eksenel deformasyon değişimleri de belirlenmiştir. Sargısız numunelerde basınç dayanımı kaybı 300°C sıcaklıkta beklenen numunelerde %10 iken 700°C'deki numunelerde %65 oranına kadar arttığı belirlenmiştir. İki kat GFRP sargılama sonrası 700°C'de sıcaklık etkisine maruz kalan numunelerin almış olduğu hasar sonrasında belirlenen basınç dayanımı değerine oranla yaklaşık olarak %375 oranında artış elde edilmiştir. Yangında alınan hasar seviyesi arttıkça basınç dayanımında önemli oranda düşüş meydana geldiği ve bunun sonucu olarak uygulanan GFRP sargılamanın etkinliğinin daha da arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yüksek sıcaklık, Basınç dayanımı, Güçlendirme, GFRP.

Investigation of Compressive Behavior of Concrete Exposed to Fire Strengthened with GFRP

Abstract

Determining and strengthening the damages that occur after natural disasters which reinforced concrete structures will encounter during their service life is of great importance in terms of the usability of the structures. As well as the effects of many natural disasters such as earthquakes, storms and landslides, fires caused by humans also have negative effects on the usability of structures. It is known that there is a significant reduction in the compressive strength of concrete exposed to fire depending on the temperature level and duration of exposure. The use of fiber-reinforced polymers (FRP) in strengthening has become very common in recent years so that reinforced concrete structures can gain the

performance level they lost after the fire effect they will be exposed to. For this reason, it is aimed to examine the mechanical behavior of fire-damaged low-strength concretes by wrapping them with glass fiber-reinforced polymer (GFRP) within the scope of this experimental study. Concrete strength below the minimum strength specified in the standards was selected in the experimental study in order to represent the compressive strength values of existing structures. The prepared samples were exposed to 300°C, 500°C, and 700°C temperatures for 2 hours to represent the fire effect, and they were damaged. Fire-damaged samples were strengthened by using GFRP with one and two-layer wrapping. Hoop and axial deformation changes were also determined while performing compressive strength tests on the wrapped and unwrapped samples. It was determined that the compressive strength loss in unwrapped samples was 10% in the samples exposed at 300°C, while it increased up to 65% in the samples at 700°C. An increase of approximately 375% was obtained after two layers of GFRP wrapping compared to the compressive strength value determined after the damage of the samples exposed to the effect of temperature at 700°C. It was observed that as the level of damage in the fire increased, there was a significant decrease in the compressive strength and as a result, the effectiveness of the applied GFRP wrapping increased even more.

Keywords: High temperature, Compressive strength, Strengthening, GFRP.

1. Giriş

Afet tanım olarak “insanlar ve insan yerleşmeleri üzerinde fiziksel, ekonomik, sosyal ve çevresel kayıplara neden olan, normal yaşamı ve insan faaliyetlerini durdurarak veya kesintiye uğratarak toplulukları etkileyen doğal, teknolojik ve insan kökenli olayların sonuçları” olarak tanımlanmıştır (Ergünay, 2007). Toplumlar üzerinde olumsuz yönde etki gösteren yangınlar, afet tanımında yer alan “insan kökenli” açıklamasına uyması nedeniyle afet olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca deprem, sel, fırtına ve toprak kayması gibi doğal afetlerden sonra da meydana gelmesi ihtimaliyle doğal afet sonrası oluşan hasarlar konusunda önemli bir rol de oynamaktadır (Öztürk vd., 2016).

Doğal afet sonrası meydana gelen yangınlara en önemli örnek 1923 yılında yaşanan Kanto-Japonya depremi sonrası meydana gelen yangınlar olarak gösterilebilir. Deprem sonrası Kanto ile birlikte Tokyo, Kanagawa, Saitama, Chiba, İbaraki, Shizuoka ve Yamanashi bölgelerinin tamamında deprem sonrası çıkan yangınlarda yapıların yaklaşık %40’ında hasar meydana gelmiştir (Imaizumi vd, 2012). Kocaeli 1999 depremi sonrasında Körfez rafinerisinde meydana gelen yangın da doğal afet sonrası meydana gelen yangınlara verilebilecek örnekler arasında yerini almıştır (Young vd, 2004). İstanbul’da insan kökenli meydana gelen yapısal yangınların (orman yangınları hariç) sayısının 2013-2017 yılları aralığında toplam 71,252 adet, Trabzon ilinde ise sadece 2018 yılında İtfaiye Daire Başkanlığında rapor edilen 588 yangın olduğu bilinmektedir. Bu yangınlar betonarme, çelik ve karma sistemlere sahip olan konut, fabrika ve diğer binalarda meydana gelmiş kayıtlı afetlerdir (Çelik vd., 2019; Bakırcı vd., 2019). Bu yangınların meydana gelmesi ve büyümesinin engellenmesinin yanı sıra afetler sonrası normal yaşamın devamlılığının sağlanması amacıyla da yangınların yapılarda neden olduğu hasarların uygun güçlendirme yöntemleri kullanılarak giderilmesi büyük önem arz etmektedir. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan çimento esaslı beton ve harçların dayanımını etkileyen faktörler malzeme özellikleri ve çevresel etkiler olarak iki ana başlık altında incelenebilir. Agrega özellikleri, çimento harcı, agrega-çimento harcı aderansı ve bu bileşenlerin termal uyumlulukları sıcaklık etkisinde dayanıma etki eden malzeme özellikleri olarak tanımlanabilir. Diğer taraftan sıcaklık, yangına maruz kalma süresi, soğuma hızı ve tipi ve nem durumu ısı dayanım üzerinde etkin olan çevresel etkilerdir. Malzeme özellikleri ve çevresel etkiler ile betonun yüksek sıcaklık direnci belirlense de çimento esaslı beton ve harçlarda sıcaklık değişimi ile meydana gelen içyapı değişimleri basınç dayanımı kaybının temel kaynağıdır (Aydın ve Baradan, 2007; Khoury, 1992). Sıcaklık 300°C’ye vardığında kalsiyum silika hidrat (CSH) ara katmanındaki su buharlaşır. Yaklaşık olarak bu sıcaklık seviyesinde kalsiyum hidroksit olduğu bölgelerde ilk mikro çatlaklar görülmeye başlanır. Bu çatlakları yaklaşık 400°C civarında hidrate olmamış çimento taneciklerinin olduğu bölgelerdeki çatlaklar izler. 400-600°C aralığındaki yüksek sıcaklık seviyelerinde sertleşmiş çimento harç fazında bir seri reaksiyonlar meydana gelir. Bu reaksiyonlar, gözenek sisteminin tamamen kuruması ile başlar, ardından hidrasyon ürünlerinin ayrışması ve CSH’nin yok edilmesi ile devam eder (Rostasy, 1980). Bu süreç çok ciddi çatlak oluşumu, bozunma ve basınç dayanımı kayıplarına neden olabilmektedir.

Yüksek sıcaklıkların çimento bazlı beton ve harçların basınç dayanımı üzerine etkileri birçok araştırmacı tarafından oldukça detaylı deneysel çalışmalar ile araştırılmıştır (Kodur, 2014; Tanhadoust vd., 2023). Literatürden elde edilen ortak bilgi, yüksek sıcaklığa maruz betonlarda basınç dayanımlarının büyük oranda kaybedildiğidir. Agrega özelliklerinin, puzolan kullanımının, yüksek dayanımlı betonların ve beton içerisinde kullanılan liflerin yüksek sıcaklık altına basınç dayanımı üzerine etkisi hakkında ayrıca literatürde yapılmış deneysel çalışmalar da bulunmaktadır (Chen vd., 2023; Türker vd., 2001; Algourdin vd., 2022; Turkey vd., 2022; Poon vd., 2001; Kodur ve Khaliq, 2011; Noumowe, 2005; Li vd., 2022). Literatürde bulunan bu çalışmaların amacı yeni yapılacak ve yüksek oranda yangın riskine maruz kalabilecek olan betonarme yapılarda kullanılan betonların yangın hasarlarının minimize edilmesi için tasarım kriterlerinin düzenlenmesi ve bu kriterler göz önünde bulundurularak yeni yapılacak yapıların güvenliğinin sağlanması esasına dayanmaktadır. 2007 yılında, ponza ve uçucu kül kullanılarak hazırlanan çimento esaslı harçların

yüksek sıcaklık davranışlarının belirlenmesi amacıyla Aydın ve Baradan tarafından gerçekleştirilmiş olan çalışmada; en iyi sıcaklık direnci gösteren numunelerinin referans numune (20°C) ile karşılaştırdıklarında dayanım kaybı olmadığını belirlemişlerdir. Yeni yapılacak yapılar için hazırlanacak beton karışımlarında literatürde yer alan karışım kriterleri kullanılarak yangın hasarlarının azaltılabileceği bilinse de bu durum yangın riski ile yüzyüze olan mevcut yapıların yangın hasarlarının önlenmesinde geçerli bir çözüm olmamaktadır. Yangın hasarı almış ve kapasite kaybına uğramış mevcut betonarme yapıların geçerli güçlendirme teknikleri uygulanarak güçlendirilmesi gerekmektedir.

Hızlı ve ekonomik olması nedeniyle mevcut yapıların güçlendirilmesinde lif takviyeli polimer (FRP) kullanımı son yıllarda oldukça yaygınlaşmıştır. Özellikle 1980'lerden itibaren cam ve karbon FRP ile gerçekleştirilen güçlendirme uygulamaları ile ilgili deneysel çalışmalar üzerinde oldukça durulmaktadır (Oliveira vd., 2018). Yangın hasarlarının giderilmesi amacıyla karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) ile güçlendirme yapılarak mekanik özellikler üzerindeki etkisinin araştırıldığı deneysel bir çalışma Bisby vd. tarafından 2011 yılında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada 20, 300, 500 ve 700°C sıcaklık değerlerine 2 ve 3 saat süre ile maruz bırakılan 30 MPa dayanımına sahip betonların basınç dayanımı, eksenel ve yanal deformasyon değişimleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda şiddetli yangın hasarına maruz kalan betonların CFRP ile güçlendirme sonrasında yük taşıma kapasitesinde çok önemli artış sağlandığı belirtilmiştir. Literatürde yer alan ve Abadel vd. tarafından 2022 yılında yapılan bir başka deneysel çalışmada ise ısıma ve soğutma etkisinde kalan lifli betonların GFRP kullanılarak güçlendirilmesinin araştırılması amaçlanmıştır. Bunun için 30 ve 60 MPa hedef dayanım değerine sahip çelik, polipropilen ve hibrit (çelik+polipropilen) lifli betonlar 400°C sıcaklık etkisine maruz bırakılarak hasar almaları sağlanmıştır. Yüksek sıcaklık hasarı alan beton numuneler GFRP sargılama yapılarak güçlendirilmiştir. Deney sonucunda havada soğumaya maruz kalan yüksek sıcaklık hasarı almış olan numunelerin basınç dayanımı kapasitelerinin %39-56 aralığında artış olduğu gözlenmiştir.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde ağırlıklı olarak normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlar ile lif takviyeli betonlar gibi yeni yapılacak betonarme yapıların yangın riski altında yük taşıma kapasitelerini koruyacak ve/veya güçlendirecek deneysel çalışmaların ağırlıkta olduğu görülmektedir. Ancak ülkemizdeki mevcut yapı stoğuna ait beton dayanım sınıflarının TBDY'de tanımlanmış olan minimum beton sınıfı değerleri (C25/30) düşük olması, düşük dayanımlı betonların yangın sonrasında kapasite değişimlerinin önemini ortaya koymaktadır. Beyaz ve Livaoglu tarafından Bursa ilinde 1954-2004 yılları arasında yapılmış olan 500 farklı betonarme binadan alınmış olan karot numune sonuçlarının değerlendirilmiş olduğu çalışma incelendiğinde en düşük ve en yüksek dayanım değerinin sırasıyla 3.99 ve 27.93 MPa olduğu, 500 adet binanın ortalama dayanım değerinin ise 12.71 MPa olduğu belirtilmiştir. Koçak tarafından Antalya bölgesi için yapılan benzer bir çalışmada 142 adet binadan alınan karot sonuçları üzerinde gerçekleştirilmiştir. 1962-1965, 1976-1998 yılları arasında ve 1998 sonrası yapılmış olan yapılardan alınan karot sonuçlarının sırasıyla C10, C12 ve C16 dayanım sınıflarını sağlamadığı belirtilmiştir.

Türkiye'de mevcut yapıların basınç dayanımlarının düşük olması ve son yıllarda FRP kullanılarak hızlı ve ekonomik güçlendirme uygulamalarının yaygınlaşması nedeniyle yangın hasarı alan düşük dayanımlı betonların GFRP kullanılarak güçlendirildikten sonraki gerilme-birim deformasyon ilişkilerinin incelenmesi amacıyla bu deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Yangın etkisini temsil etmesi amacıyla sabit 2 saat süre ile referans numuneler hariç tüm numuneler 300°C, 500°C ve 700°C sıcaklık değerlerine maruz bırakılarak hasar alması sağlanmıştır. Yüksek sıcaklık etkisiyle hasar alan numuneler GFRP kullanılarak tek kat ve iki katlı sargılama işlemi ile güçlendirme uygulaması gerçekleştirilmiştir. Sargılanmış ve sargılanmamış numunelerde basınç dayanımı deneyleri yapılırken yanal ve eksenel birim deformasyon değişimleri de belirlenmiştir.

2. Deneysel Çalışma

2.1 Kullanılan malzemeler

Deneysel çalışmada bağlayıcı olarak CEM I 42.5R Portland çimentosu kullanılmış ve çimentonun kimyasal bileşim ile fiziksel ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve 2'de verilmiştir. Agregası olarak kırmataş ve doğal kum kullanılmıştır. Kırmataş ve doğal kumun sırasıyla özgül ağırlıkları 2.68 ve 2.60 gr/cm³, maksimum dane çapı 14.3 ve 3.7 mm ve incelik modülleri ise 4.88 ve 2.28 olarak bulunmuştur.

Tablo 1 Çimentonun kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşim (%)									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O+0.658K ₂ O	Cl ⁻	KK	ÇK
19.30	4.33	3.77	63.95	1.72	2.90	0.48	0.0089	2.86	0.37

Tablo 2 Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Fiziksel Özellikler	
Özellikler	
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.16
Özgül Yüzey (cm ² /g)	4092
Hacim Sabitliği (mm)	1.00
Priz Başlangıcı (dak.)	126
Priz Sonu (dak.)	206
Mekanik Özellikler	
Basınç Dayanımı (MPa) (2 günlük)	32.4
Basınç Dayanımı (MPa) (7 günlük)	47.3
Basınç dayanımı (MPa) (28 günlük)	61.7

KK: Kızdırma Kaybı; ÇK: Çözünmeyen Kalıntı

Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonların güçlendirilmesi GFRP kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan GFRP'ye ait özellikler Tablo 3'te listelenmiştir. GFRP, epoksi bazlı iki bileşenli likit yapıştırıcı kullanılarak beton yüzeylerine uygulanmıştır.

Tablo 3 GFRP özellikleri

Özellikler	Değerler
Elastisite Modülü (GPa)	73
Çekme Mukavemeti (MPa)	3400
Yoğunluk (gr/m ³)	2.6
ϵ_u (%)	4.5
Kalınlık (mm)	0.154

2.2 Numunelerin hazırlanması

Çalışmada mevcut yapıların beton basınç dayanımı temsil etmesi amacıyla TBDY'de tanımlanmış olan minimum beton sınıfı değerinin (C25/30) altında dayanım değerine sahip beton numunelerinin hazırlanması amaçlanmıştır. Hedef basınç dayanımı olarak 20 MPa belirlenmiş ve yapılan ön dökümler sonrasında bu dayanımı veren karışım oranları (Tablo 4) belirlenmiştir. Türkiye mevcut yapı stoğunun ortalama basınç dayanımı değerinin daha düşük değerlerde olduğu (Beyaz ve Livaoğlu, 2019) bilinmesine karşın deneysel çalışma hazırlığında yapılmış olan ön deneylerde 20 MPa'dan daha düşük dayanım değerlerinde 500 ve 700°C sıcaklıklara maruz kalındığında büyük oranda parçalanma ve rijitlik kayıpları ile karşılaşmıştır. Bu numuneler yapısal bütünlüğünü koruyamadığı için deneyler gerçekleştirilememiş ve bu denemle deneysel çalışmada farklı sıcaklık değerleri altında basınç dayanımlarının karşılaştırılabilmesi için basınç dayanım 20 MPa olarak seçilmiştir.

Tablo 4 1 m³ Portland çimento betonu teorik karışım miktarları

Su/Çimento Oranı	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Doğal Kum (kg/m ³)	Kırmataş (kg/m ³)
0.68	290	197.2	718.67	1111.17

Deneysel çalışmada 100/200 (H/D) mm silindir numune kalıpları kullanılmıştır. Beton dökümleri yapıldıktan sonra 24 saat süre ile kalıp içerisinde bekletilen numuneler bu süre sonunda kalıptan çıkartılarak 28 gün boyunca kür havuzunda bekletilmiştir. Kür havuzundan çıkarılan numuneler yüksek sıcaklık fırınında patlamaması amacıyla 7 gün süre ile laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Referans numuneler (20°C) hariç diğer tüm numuneler bu süre sonunda programlanabilir yüksek sıcaklık fırını kullanılarak farklı sıcaklık derecelerinde yangın etkisine maruz bırakılmıştır. Numuneler 300, 500 ve 700°C olmak üzere 3 farklı sıcaklık değerinde toplam 2 saat süre ile bekletilmiştir. Yüksek sıcaklık fırını belirlenen maksimum sıcaklık seviyesine gelebileceği en kısa sürede gelmesi sağlanmış ve numunenin toplam ısıtma süresinin 120 dk olması ayarlanmıştır. Sıcaklık artışı 10±3°C/dk olacak şekilde fırın programlanmıştır. Fırından çıkarılan numunelerin laboratuvar ortamında kendiliğinden ortam sıcaklığına gelmesi sağlanmıştır. Numuneler fırından çıktıktan sonra deney zamanına kadar geçen süre beton basınç davranışı üzerinde oldukça etkindir (Naus, 2005). Bu nedenle fırından çıkarılan numunelerin tamamı 4-8. gün sonunda sargılanmış ve basınç dayanımı

deneyleri ise 13-17. gün sonunda gerçekleştirilmiştir. Tüm numunelerde bu zamanlamaya azami özen gösterilmiştir. Numunelere GFRP sargı uygulanmadan önce tüm numunelerin yüzey kontrolleri yapılarak lif takviyeli polimerlerde kesme etkisi yapabilecek beton parçaları tel fırça ve zımpara yardımıyla yok edilmiş ve yüzeyleri kompresör yardımıyla tozdan arındırılarak temizlenmiştir. Yangın etkisine maruz kalan numuneler GFRP kullanılarak güçlendirilmiştir. Güçlendirme uygulamasında lif takviyeli polimer çift komponentli epoksi kullanılarak numune yüzeylerine yapıştırılmıştır. Güçlendirme işleminde tüm numunelerde FRP'ler sürekli ve lif doğrultusu yanal doğrultuda çalışacak şekilde uygulanmıştır. Silindir numunelere yapılan GFP sargılama Şekil 1'de gösterilmiştir. Deneysel çalışmada GFRP hem tek hem de iki katlı olarak uygulanmıştır. Tek ve iki katlı FRP uygulamalarında FRP'lerde bindirme boyu, üretici firmanın belirtmiş olduğu bindirme boyu değeri olan 100 mm alınmıştır. Bu çalışmada numune isimlendirilmesinde ilk harfler numunenin sargı şekli ile ilgili bilgi vermektedir. Sargısız, tek kat sargılı ve iki kat sargılı olacak şekilde sırasıyla "U", "1W" ve "2W" notasyonları kullanılmıştır. Sargı tipini gösteren notasyondan sonra maruz kalınan sıcaklık derecesi yazılmıştır. Sıcaklık uygulanmayan numunelerde bu değer 20°C olarak gösterilmiştir. Her deney grubu için 3'er numune test edilmiştir ve isimlendirmede bu numuneler "A", "B" ve "C" harfleri ile temsil edilmiştir.



Şekil 1. GFRP ile silindir numune güçlendirmesi

2.3 Deney prosedürü

Deneysel çalışma kapsamında toplam sargılı ve sargısız toplam 34 adet silindir beton numunesi hazırlanmış ve basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 300 t kapasiteli hidrolik beton presi kullanılmıştır. Basınç deneyleri sırasında silindir numunelerde meydana gelen düşey deformasyonların belirlenmesi için elastisite modülü ölçüm deneylerinde kullanılan çelik kafes kullanılmıştır. Numune üzerinde sabitlenen çelik kafes üzerinde iki adet dail gauge takılmış ve numunedeki eksenel deformasyon miktarları bu iki saatin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Numunedeki sargı üzerinde meydana gelen yanal deformasyonların belirlenmesinde ise numunenin eksenel doğrultuda orta noktasına yapıştırılan strain gauge'ler kullanılmıştır. Numune üzerine sabitlenen çelik kafes ve ölçüm ekipmanları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Ölçüm ekipmanları

Deneyler ASTM C-39 ve ASTM C-469 standardına uygun olarak yapılmış ve yükleme hızı 0.35 MPa/sn olacak şekilde sabit tutulmuştur. Deneyler sırasında ölçüm aletlerinden ve yük hücresinden elde edilen tüm veriler 8 kanallı bir data logger kullanılarak bilgisayar tarafından kaydedilmiştir. Deneylerin gerçekleştirildiği deney düzeneği Şekil 3'te gösterilmiştir.

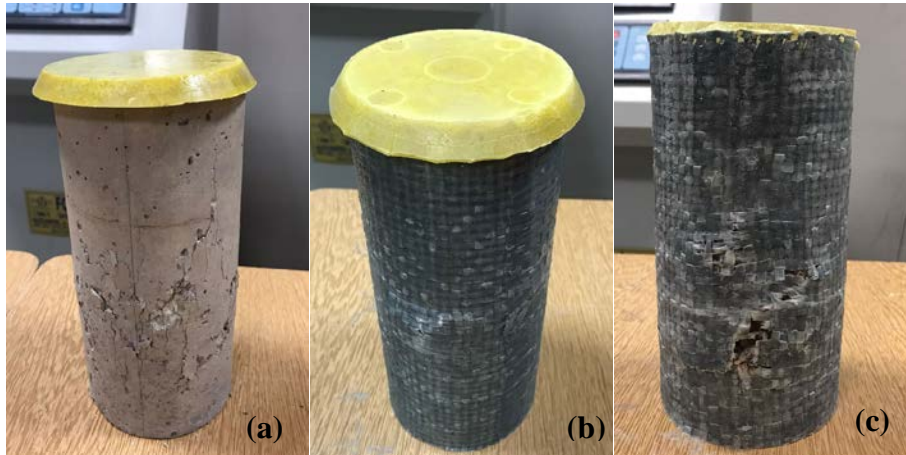


Şekil 3. Deney düzeneği

3. Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Deneylerden elde edilen basınç dayanımı, maksimum gerilme değeri anında meydana gelen yanal ve eksenel birim deformasyon değerlerine ait sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir. Deney sırasında strain gauge'in kopması ve kayıt alınamaması gibi nedenlerle bazı deney numunelerine ait deney sonuçları elde edilememiştir. Bu numuneler tabloda ölçüm alınamadı "ÖA" kısaltması ile temsil edilmiştir.

Sargılanmamış numunelerin göçme modu koni kırılma moduna uygun olarak düşey çatlaklar sonucu olmuştur. Sargılanmış numunelerde ise tüm göçmeler GFRP liflerinin kopması sonucu meydana gelmiştir ve bu göçme modunun oluşması seçilmiş olan sargı bindirme boyunun yeterli olduğunun bir göstergesidir. İki katlı sargılı numunelerde daha büyük gerilme değerlerinde göçme meydana geldiği için tek katlı numunelere göre daha ani ve sesli olarak göçme olduğu görülmüştür. Sargılanmamış, tek ve iki katı sargılı numunelere ait tipik kırılma modları Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Kırılma modları (a) Sargısız (b) Tek kat sargılı (c) İki kat sargılı

Tablo 5 Deneylerden elde edilen sonuçlar

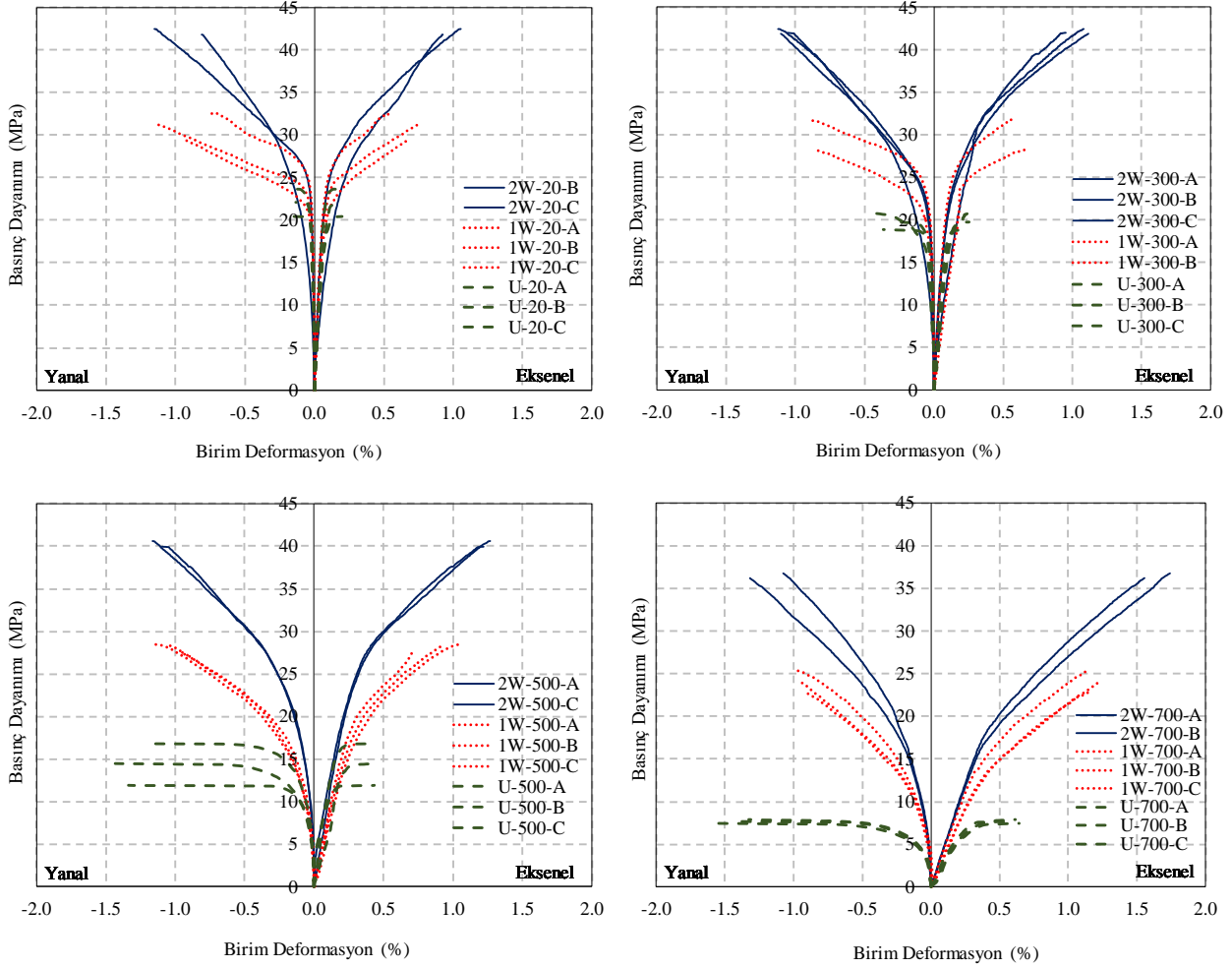
Numune	Basınç Dayanımı (MPa)		Eksenel Birim Deformasyon (%)		Yanal Birim Deformasyon (%)	
	Test	Ort.	Test	Ort.	Test	Ort.
20°C	U-20-A	23.65		0.16		0.15
	U-20-B	22.14	22.08	0.17	0.20	0.14
	U-20-C	20.46		0.20		0.16
	1W-20-A	32.67		0.56		0.76
	1W-20-B	29.39	31.07	0.69	0.66	0.93
	1W-20-C	31.14		0.75		1.12
	2W-20-A	ÖA*		ÖA*		ÖA*
	2W-20-B	42.48	41.12	1.05	0.99	1.15
	2W-20-C	41.77		0.93		0.81
300°C	U-300-A	18.83		0.25		0.37
	U-300-B	20.80	19.79	0.24	0.25	0.41
	U-300-C	19.75		0.25		0.27
	1W-300-A	28.27		0.67		0.87
	1W-300-B	31.83	30.05	0.57	0.62	0.91
	1W-300-C	ÖA*		ÖA*		ÖA*
	2W-300-A	41.90		1.12		1.11
	2W-300-B	42.40	42.11	1.08	1.05	1.13
	2W-300-C	42.02		0.95		1.05
500°C	U-500-A	11.91		0.43		1.34
	U-500-B	14.51	14.41	0.46	0.43	1.43
	U-500-C	16.81		0.39		1.20
	1W-500-A	28.41		1.05		1.14
	1W-500-B	27.59	28.14	0.72	0.90	0.97
	1W-500-C	28.42		0.94		1.07
	2W-500-A	40.55		1.27		1.16
	2W-500-B	ÖA*	40.27	ÖA*	1.24	ÖA*
	2W-500-C	39.99		1.22		1.10
700°C	U-700-A	7.51		0.64		1.56
	U-700-B	7.63	7.69	0.54	0.60	1.40
	U-700-C	7.94		0.61		1.32
	1W-700-A	24.00		1.24		0.95
	1W-700-B	22.83	24.09	1.17	1.19	0.93
	1W-700-C	25.44		1.15		0.97
	2W-700-A	36.76		1.74		1.08
	2W-700-B	36.33	36.54	1.59	1.66	1.35
	2W-700-C	ÖA*		ÖA*		ÖA*

ÖA*: Ölçüm alınmadı

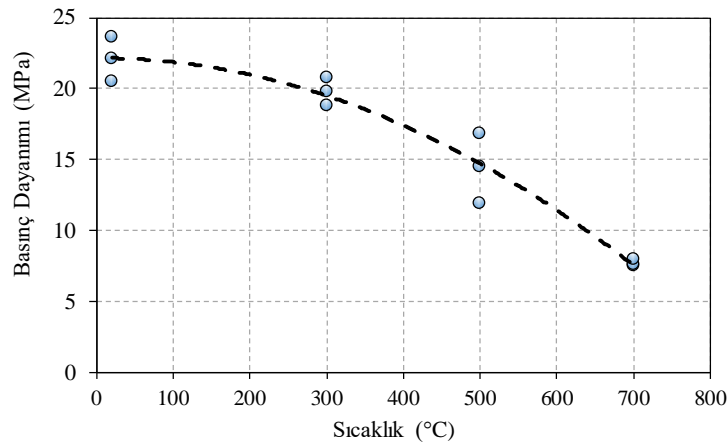
Deneylerden elde edilen gerilme-birim deformasyon grafikleri her bir numune için ayrı ayrı Şekil 5'te verilmiştir. Grafikler basınç dayanımı değerinin maksimum gerilme değerine ulaştığı ana kadar çizdirilmiştir. Sargılanmamış numunelerde sıcaklık artıkça basınç dayanımında düşüş meydana geldiği, eksenel ve yanal birim deformasyonda artış olduğu ayrıca da başlangıç eğimindeki azalmadan dolayı numunelerin elastisite modüllerinde (dolayısıyla rijitliklerinde) azalma olduğu belirlenmiştir. Sargılama ile betonun rijitliğinin geri kazanılmadığı ancak yük taşıma kapasitelerinin arttırabildiği anlaşılmıştır. GFRP sargılama ile tek katmanlı olsa dahi yangında hasar görmüş olan betonların başlangıç basınç dayanımı ve üzeri değerlerine geri dönebildiği görülmüştür.

Farklı sıcaklık değerleri etkisinde sargısız numunelerin basınç dayanımında meydana gelen azalmaya ait grafik Şekil 6'da verilmiştir. 20°C'den 120°C'ye kadar betonda mikro yapıda bulunan serbest su buharlaşır, 300°C'ye olan sıcaklık artışında ise yapıdaki serbest su tamamen kaybolur, çimento hamurunda büzülme meydana gelir ve dehidrasyon sonucu çatlak oluşur. Bu sıcaklık seviyesinde oluşan çatlaklar çok büyük boyutta olmasa da beton basınç dayanımında

azalmaya neden olur (Nous, 2005). Bu nedenle 300°C de bekletilen sargısız beton numunelerde basınç dayanımı kaybının %10 seviyesinde olduğu belirlenmiştir. 450-550°C aralığında kalsiyum hidroksitin yapısı bozulur ve çimento hamurundaki genişmeden dolayı önemli çatlaklar meydana gelir. 600°C üzerinde ise çimento hamuru tamamen dehidrate olur ve beton boşluklu, pullanmış ve oldukça kırılgan bir hal alarak basınç dayanımında çok büyük oranda düşüş meydana gelir (Nous, 2005). Oda sıcaklığında deneyleri yapılan referans numunelere (U-20) ait ortalama basınç dayanımı değeri 700°C sıcaklık etkisinde %65 oranında literatüre uygun olarak önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.



Şekil 5. Gerilme-birim deformasyon ilişkisi



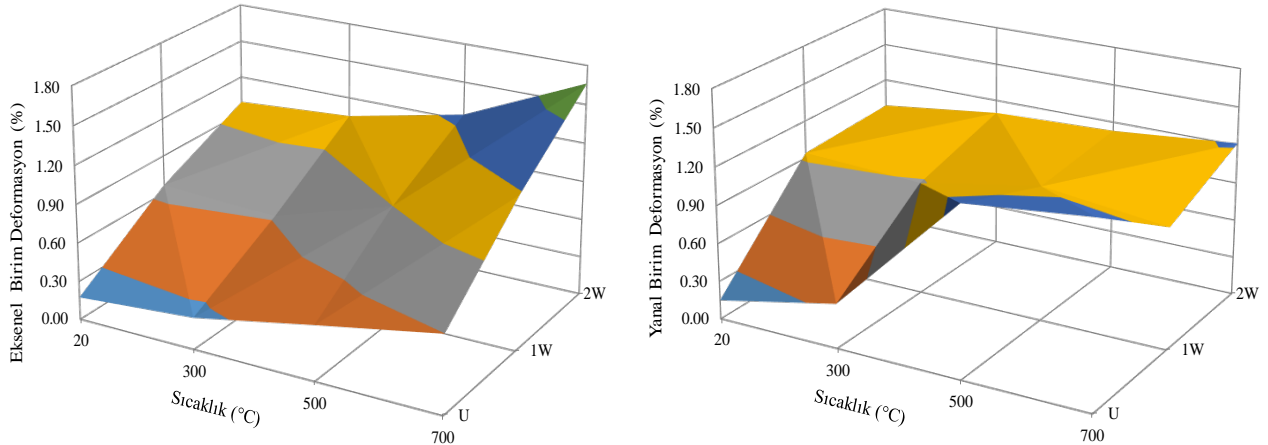
Şekil 6. Sıcaklık değişiminin sargısız numunelerin basınç dayanımı üzerindeki etkisi

Farklı sıcaklık değerleri etkisi altında uygulanan GFRP güçlendirme sargılamasının etkinliğinin incelenmesi amacıyla Şekil 7’de gösterilen grafik hazırlanmıştır. Herhangi bir sıcaklık etkisinde olmayan 20°C’de beton numuneye uygulanan tek katlı ve iki katlı sargılama altında rölatif basınç dayanımı artışının sırasıyla %41 ve %91 olduğu belirlenmiştir. Maruz kalınan sıcaklık etkisi arttıkça yani yangında alınan hasar seviyesi arttıkça basınç dayanımında meydana gelen düşüş ile beraber uygulanan sargılamasının etkinliğinin daha da arttığı açıkça görülmektedir. İki kat GFRP sargılama sonrası 700°C’de sıcaklık etkisine maruz kalan beton numunenin almış olduğu hasar sonrasında belirlenen basınç dayanımı değerine oranla yaklaşık olarak %375 oranında artış elde edilmiştir. Literatürde 20 MPa beton numune üzerinde 700°C sıcaklık etkisi sonrasında tek kat karbon lif takviyeli polimer kullanılarak yapılmış olan güçlendirme sonrasında rölatif basınç dayanımında %390 oranında artış olduğu belirtilmiştir (Lenwari vd, 2016).



Şekil 7. Sargı katman sayısının rölatif basınç dayanımı üzerine etkisi

Yüksek sıcaklık etkisinin sargılı ve sargısız beton silindir numunelerinin yanal ve eksenel deformasyonları üzerindeki etkisi Şekil 8’de gösterildiği gibidir. Sargılanmamış numunelerde sargılama etkisi ile eksenel deformasyon değerlerinin sıcaklık artışı ile %344 oranında artış yaparken tek ve iki kat sargılanmış numunelerde bu artışın sırasıyla %178 ve %168 olduğu belirlenmiştir. Sargılanmış ve sargılanmamış numunelerdeki eksenel basınç dayanımı artışı oranının her sıcaklık değerinde hemen hemen sabit olduğu grafikten görülmektedir. Sargılanmamış numunelerde sıcaklık artışıyla yanal deformasyon değerlerinin artışında belirli bir trend belirlenememiştir. Özellikle 300°C üzerinde sargılanmamış numunelerin yanal deformasyon değerlerinde önemli artış olduğu görülmüştür. Sargılanmış numunelerde sıcaklık artışı ile yanal deformasyon değerlerinin büyük oranlarda değişmediği hemen hemen sabit kaldığı belirlenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar literatürde yer alan lif takviyeli polimerler ile güçlendirilmiş deneysel çalışmalara paralel sonuçlar elde edilmiştir (Bisby vd, 2011; Lenwari vd, 2016).



Şekil 8. Sıcaklık değişiminin eksenel ve yanal birim deformasyon üzerindeki etkisi

4. Sonuçlar

Bu çalışmada yangında hasar görmüş düşük dayanımlı betonların GFRP sargılanarak güçlendirilmesi durumunda mekanik davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, hazırlanan bu numuneler sabit 2 saat süre ile 300°C, 500°C ve 700°C yüksek sıcaklık değerlerine maruz bırakılarak hasar alması sağlanmış ve sonra GFRP kullanılarak tek kat ve iki katlı sargılama işlemi ile güçlendirme uygulaması gerçekleştirilmiştir. Sargılanmış ve sargılanmamış numunelerde basınç dayanımı, yanal ve eksenel deformasyon değişimleri belirlenerek elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Sargısız numunelerde basınç dayanımı kaybı 300°C sıcaklıkta bekletilen numunelerde %10 iken 700°C'deki numunelerde %65 oranına kadar artmıştır. 300°C dereceden sonra betonun yapısındaki bozunmaların hızlanması nedeniyle bu dereceden daha yüksek sıcaklık değerlerinde basınç dayanımı kaybının önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir.
- Herhangi bir sıcaklık etkisinde olmayan 20°C'de beton numuneye uygulanan tek katlı ve iki katlı sargılama altında rölatif basınç dayanımı artışının sırasıyla %41 ve %91 olduğu belirlenmiştir. İki kat GFRP sargılama sonrası 700°C'de sıcaklık etkisine maruz kalan numunelerin almış olduğu hasar sonrasında belirlenen basınç dayanımı değerine oranla yaklaşık olarak %375 oranında artış elde edilmiştir. Maruz kalınan sıcaklık etkisi arttıkça yani yangında alınan hasar seviyesi arttıkça basınç dayanımında meydana gelen düşüş ile beraber uygulanan sargılamanın etkinliğinin daha da arttığı görülmüştür.
- Sargılanmamış numunelerde sargılama etkisi ile eksenel deformasyon değerleri sıcaklık artışı ile %344 oranında artış yaparken tek ve iki kat sargılanmış numunelerde bu artışın sırasıyla %178 ve %168 olduğu belirlenmiştir. Sargılanmış ve sargılanmamış numunelerdeki eksenel basınç dayanımı artışı oranının her sıcaklık değerinde hemen hemen sabit olduğu görülmüştür.
- Özellikle 300°C sıcaklık üzerinde sargılanmamış numunelerin yanal deformasyon değerlerinde önemli artış olduğu görülmüştür. Tek ve iki kat sargılanmış numunelerde sıcaklık artışı ile yanal deformasyon değerlerinin büyük oranlarda değişmediği hemen hemen sabit kaldığı belirlenmiştir

Etik Beyanı

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Yazar katkısı

O.Ö. deneysel çalışmalara katkıda bulunarak makalenin yazımını gerçekleştirmiştir. A.Ö. çalışma planını oluşturarak çalışmayı yönetmiştir. T.T. makale düzeni ve kontrolünü sağlamıştır. K.Ç. tüm deneysel çalışmaları gerçekleştirmiştir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar

- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (2018) Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği.
- Algourdin N., Pliya P., Beaucour A.L., Noumowe A., Coste D. (2022) Effect of fine and coarse recycled aggregates on high-temperature behaviour and residual properties of concrete. Construction and Building Materials. Vol. 341.
- ASTM C-39 (2018) Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.
- ASTM C-469 (2014) Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.
- Aydın S., Baradan B. (2007) Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of

- cement based mortars. Cement and Concrete Research. Vol.37.
- Bakırcı E., Karatop B., Bayındır S. (2019) Yangın Stratejilerinin Oluşturulması için İstatistik Veri Türlerinin Türkiye (İstanbul İli Örneğinde) ve Seçilmiş Ülkeler ile Karşılaştırılması. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi. Vol. 5(2).
- Beyaz A., Livaoglu R. (2019) Bursa İli Kentsel Dönüşüm Çalışmalarında Elde Edilen Beton Basınç Dayanımının Değerlendirilmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi. Vol. 24(1).
- Bisby L.A., Chent J.F., Li S.Q., Stratford T.J., Cueva N., Crossling K. (2011) Srenghthning fire-damaged concrete by confinement with fibre-reinforcement polmer wraps. Enginnering Structures. Vol.33.
- Chen J., Yuan Y., Zhu Q., Duan J. (2023) High-temperature resistance of high-strength concrete with iron tailing sand. Journal of Building Engineering. Vol. 63.
- Çelik M., Binler Ü., Osmanoglu E. (2019) Trabzon İlinde 2016 Ocak-2019 Ağustos Tarihleri Arasında AFAD tarafından Raporlanan Yangınlar Hakkında Çeşitli İstatistiksel Analizler. International Science and Engineering Applications Symposium on Hazards.
- Ergünay, O. (2007) Türkiye'nin afet profili. TMMOB Afet Sempozyumu, Ankara, Türkiye, Aralık 5-7, 1-14.
- Imaizumi A., Ito K., Okazaki T. (2012) Impact of natural disasters on industrial agglomeration: the case of the great kanto earthquake in 1923. Explorations in Economic History. Vol.60.
- Khoury G.A. (1992) Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassesment. Mag. Concr. Res. Vol. 44(161).
- Koçak A. Antalya Bölgesinde Yer Alan Mevcut Yapıların Beton Dayanımlarının Örnekleme Yöntemiyle Belirlenmesi. <https://eskisakarya.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/11140.pdf>
- Kodur V. (2014) Properties of Concrete at Elevated Temperatures. ISRN Civil Engineering. Vol.2014.
- Kodur V., Khaliq W. (2011) Effect of temperature on thermal properties of different types of high strength concrete. Journal of Materials in Civil Engineering. Vol. 23(6).
- Lenwari A., Rungamornrat J., Woonprasert S. (2016) Axial Compression Behavior of Fire-Damaged Concrete Cylinders Confined with CFRP Sheets. J. Compos. Constr. Vol. 20(5).
- Li L., Wang Z., Wu J., Du X., Wang H., Liu W. (2022) Comparative study on the dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced concrete at high temperatures and after high temperature cooling. Construction and Building Materials. Vol. 346.
- Naus D.J. (2005) The effect of elevated temperature on concrete materials and structures — a literature review. Oak Ridge (TN, USA): Oak Ridge National Laboratory.
- Noumowe A. (2005) Mechanical properties and microstructure of high strength concrete containing polypropylene fibres exposed to temperatures up to 200°C. Cement and Concrete Research. Vol. 34(6).
- Oliveira D.S., Raiz V., Carrazedo R. (2018) Experimental Study on Normal-Strength, High Strength and Ultrahigh-Strength Concrete Confined by Carbon and Glass FRP Laminates. J. Compos. Constr. Vol.23(1).
- Öztürk O., Engin S., Öner A., Baytekin Çiçek G. (2016) K Colemanit Katkılı Harçların Eğilme Dayanımına Yüksek Sıcaklığın Etkisi. Doğal Afet ve Afet Yönetimi Sempozyumu (DAAYS'16). Karabük. Türkiye.
- Poon C.S., Azhar S., Anson M., Wong Y.L. (2001) Comparison of the strength and durability performance of normal and high strength pozzolanic concretes at elevated temperatures. Cem. Concr. Res. Vol. 31(9)
- Turkey F.A., Beddu S.B., Ahmed A.N., Al-Hubboubi S.K. (2022) Effect of high temperatures on the properties of lightweight geopolymer concrete based fly ash and glass powder mixtures. Case Studies in Construction Materials. Vol. 17.
- Tanhadoust A., Yang T.Y., Dabbaghi F., Chai H.K., Mohseni M., Emadi S.B., Nasrollahpour S., Predicting stress-strain behavior of normal weight and lightweight aggregate concrete exposed to high temperature using LSTM recurrent neural network. Construction and Building Materials. Vol. 362.

- Türker P., Erdoğan K., Erdoğan B. (2001) Investigation of fire-exposed mortars with different types of aggregates. *Cem. Concr. World*. Vol.6(31).
- Young S., Balluz L., Malilay J. (2004) Natural and technologic hazardous material releases during and after natural disasters: a review. *Science of The Total Environment*. Vol.322(1-3).