



Experimental Investigation of the Effects of Insulation Materials and Concrete Strength on Temperature Transitions in FRP Reinforced Structural Elements Under High Temperature

Şeymanur ARSLAN^{1,*}  Ferhat AYDIN² 

¹Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, 54050, Serdivan/SAKARYA

²Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, 54050, Serdivan/SAKARYA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 27.08.2022
Revision: 18.12.2022
Accepted: 31.12.2022

Highlights

- Effects of Insulation Materials and Concrete Strength on Temperature Transitions.
- To prevent FRP bar from reaching the glass transition temperature quickly.

Keywords

High temperature,
Reinforced concrete,
FRP bar,
Rock wool,
Glass wool,
Red drywall

In this study, the effects of different fire insulation materials and concrete strength on temperature transitions in FRP reinforced concrete structural elements were determined by experimental studies.

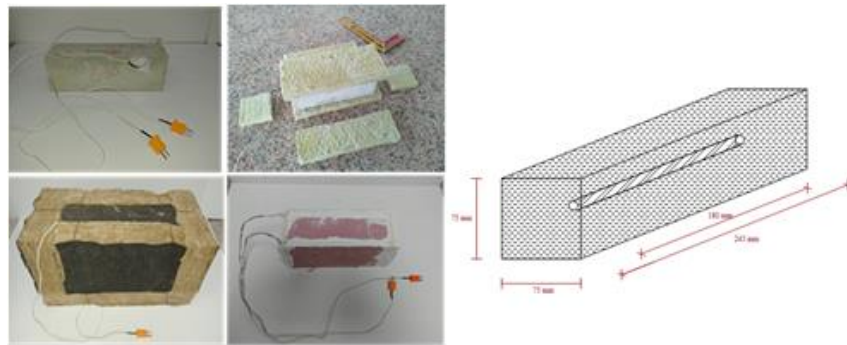


Figure A. Protection of FRP reinforced concrete specimens with different insulation materials

Purpose: FRP bars are sensitive to high temperatures. For this reason, it is to eliminate an obstacle in the use of FRP reinforced concrete elements by determining the best combination of insulation material and concrete strength to protect FRP reinforced concrete elements against high temperatures.

Theory and Methods: Thermometer probes were connected to the reinforced concrete samples and the FRP bar inside. Reinforced concrete elements were covered with insulation materials and kept in the furnace at an ambient temperature of 500 °C and the elapsed time was measured. In isolated samples kept at high temperature; the temperature of the environment, the surface temperature of the concrete and the temperature changes in the reinforcement were measured with the probes placed, and the elapsed time was recorded using a chronometer.

Results: The protection of reinforced concrete elements insulated with rock wool is higher than glass wool and red drywall. Rock wool provided only 13% heat transmission from the environment to the concrete. This ratio is 26% in red drywall, which has a thinner thickness compared to other insulation materials. The temperature reaching the FRP bars in the insulated reinforced concrete elements corresponds to 9% of the ambient temperature in rock wool, 15% in glass wool, and 20% in red drywall .

Conclusion: When the contribution of the insulation material and concrete class is evaluated separately, it has been observed that the role of the insulation material in the temperature transition is very important. It has been seen that the concrete strength is limited in protecting the reinforcement against heat.



Experimental Investigation of The Effects of Insulation Materials and Concrete Strength on Temperature Transitions in FRP Reinforced Structural Elements Under High Temperature

Şeymanur ARSLAN^{1,*} Ferhat AYDIN²

¹Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, 54050, Serdivan/SAKARYA

² Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, 54050, Serdivan/SAKARYA

Abstract

There are serious concerns about the preference of Fiber Reinforced Polymer (FRP) bars, which are widely used in buildings, in reinforced concrete structures due to their sensitivity to high temperatures. Especially in cases where the glass transition temperature of FRPs exceeds, losses occur in the mechanical and physical properties of FRP bars. Fire insulation materials used in reinforced concrete structures are of great importance in protecting the building elements against high temperatures. Insulation materials protect concrete and rebars against high temperatures and prevent strength reductions. In this study, the effects of different fire insulation materials and concrete strength on temperature transitions in FRP reinforced concrete structural elements were determined by experimental studies. The protection performances of the concrete and the rebars in the concrete against the effects of temperature were investigated. The study was carried out in 500 °C environments that can reach the glass transition temperature (80-110 °C) of FRP bars. Ambient temperatures, concrete surface temperatures and reinforcement surface temperatures in the concrete were measured depending on time with the experimental setup created. As a result of the study, it was determined that fire insulation materials are more effective than concrete strengths. In the effect of ambient temperature on the concrete surface, while the rock wool allowed a temperature transition of 13%, this value was 22% in glass wool and 26% in red drywall..

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 27.08.2022
Düzeltilme: 18.12.2022
Kabul: 31.12.2022

Keywords

High temperature,
Reinforced concrete,
FRP bar,
Rock wool,
Glass wool,
Red drywall

Anahtar Kelimeler

Yüksek sıcaklık,
Betonarme,
FRP donatı, taş yünü,
Cam yünü,
Kırmızı alçıpan

Yüksek Sıcaklık Etkisindeki FRP Donatılı Yapı Elemanlarında Yalıtım Malzemeleri ve Beton Dayanımlarının Sıcaklık Geçişlerine Etkilerinin Deneysel İncelenmesi

Öz

Yapılarda kullanımı yaygınlaşan Liflerle Güçlendirilmiş Polimer (FRP) donatıların yüksek sıcaklıklara karşı olan hassasiyeti sebebiyle betonarme yapılarda tercihi konusunda ciddi endişeler ortaya çıkmaktadır. Özellikle FRP'lerin camsı geçiş sıcaklığını aşan durumlarda FRP donatıların mekanik ve fiziksel özelliklerinde kayıplar meydana gelmektedir. Betonarme yapılarda kullanılan yangın yalıtım malzemeleri yapı elemanlarını yüksek sıcaklıklara karşı korumada büyük öneme sahiptir. Yalıtım malzemeleri yüksek sıcaklıklara karşı betonu ve donatıyı koruyarak dayanım azalmalarına engel olmaktadır. Bu çalışmada FRP donatılı betonarme yapı elemanlarında farklı yangın yalıtım malzemelerinin ve beton dayanımının sıcaklık geçişlerine etkileri deneysel çalışmalar ile belirlenmiştir. Beton ve beton içerisindeki donatıları sıcaklık etkilerine karşı koruma performansları incelenmiştir. Çalışmada deneyler FRP donatıların camsı geçiş sıcaklığına (80-110 °C) ulaşabilecek 500 °C ortamlarda gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan deney düzeneği ile ortam sıcaklıkları, beton yüzey sıcaklıkları ve beton içerisindeki donatı yüzey sıcaklıkları zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Çalışma sonucunda yangın yalıtım malzemelerinin beton dayanım değişimlerindeki durumlara göre daha etkili olduğu belirlenmiştir. Ortam sıcaklığının beton yüzeyine etkisinde taş yünü %13 oranında sıcaklık geçişine izin verirken bu değer cam yününde %22 ve kırmızı alçıpanda %26 oranında gerçekleşmiştir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Doğal ve doğal olmayan afetler insan hayatını büyük ölçüde tehdit etmektedir. Bu afetlerden biri de yangındır. Herhangi bir binanın hizmet ömrü boyunca yangın riski her zaman mevcut olması nedeniyle yapıların yangına maruz kaldıktan sonraki davranışlarının değerlendirilmesi, tasarım ve güçlendirme amaçları için çok önemlidir [1]. Günümüzde yapı stoğunun büyük bir çoğunluğunu betonarme ve çelik yapılar oluşturmakla birlikte yapılarda 1200 °C'lere çıkan sıcaklıklarda yangınlar ölçülmüştür. Yapı malzemelerinin bu sıcaklıklardaki davranışı karşılaştırıldığında çeliğin yumuşayarak dayanım kaybettiği, ahşabın yandığı ve betonun parçalanarak döküldüğü gözlemlenmiştir. Ancak betonun diğerlerine oranla daha iyi performans gösterdiği ifade edilebilir. Betonun yarı yalıtkan bir malzeme olması nedeniyle belirli kalınlıkta bir pas payı ile donatılar için belirli ölçüde ısı yalıtımı sağlamaktadır [2-3]. Ancak yangın, betonun yüzey kabarmasına neden olabileceği gibi betonun mekanik, ısıl ve deformasyon özelliklerini değiştirmede hayati bir role sahip olduğundan [4], betonarme elemanlarda donatının korunması kadar betonun da korunması önem arz etmektedir. Yangın yalıtım malzemeleri betonarme yapıyı yangına karşı korumada faydalanabilecek öncelikli tercihlerden birisidir.

Yalıtım malzemeleri kimyasal veya fiziksel yapılarına göre sınıflandırılabilir. En yaygın olarak kullanılan yalıtım malzemeleri; inorganik, organik, kombine edilmiş ve yeni teknoloji ürünü malzemeler şeklinde gruplara ayrılabilir [5]. Cam yünü, taş yünü, alçı paneller, geliştirilmiş polistren levhalar vb. malzemeler yalıtım malzemelerine örnek olarak verilebilir. Taş yünü binalarda ısı kayıplarını önlemek için kullanılan mineral lifli, hammaddesi bazalt olan bir yalıtım malzemesidir. Taş yününün erime sıcaklığı oldukça yüksek olduğundan yangına karşı koruyucu bir malzeme olarak kullanılabilir. Ayrıca taş yünü, su itici işlev sağlayan reçine bağlayıcılarla temsil edilen kısmi organik içeriğe sahip inorganik bir malzemedir. Lifli, açık gözenekli bir yapıya sahip olduğundan hem ısı yalıtımı hem de ses yalıtımına katkı sağlamaktadır [6–8]. Taş yünü üretilen başlıca tiptir, cam yünü ikinci sırada olup, taş yünü hacminin yaklaşık üçte birinden üretilir ve taş yünü gibi mineral yün ailesine girmektedir [9]. Cam yünü, taş yününe kıyasla, daha az CaO ve Al₂O₃ içermekte, daha yüksek SiO₂ ve Na₂O'ya sahip ve kimyasal bileşimi seramik üretiminde eritici ajan olarak kullanılan birçok atık cama benzemektedir [10–14]. Alçı kaplamalı hafif sistemler ise inşaatlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Çoğu durumda, alçı duvar düzenekleri ayırıcı elemanlar olarak pasif yangın koruması sağlamakta, yangın bölmeleri ve güvenli tahliyeyi sağlamak için kilit unsur olmaktadır. Yaygın bir tür olan hafif sistemler, alçıpan (GPB) duvarlardan yapılır. Bu duvarların yangın davranışı tartışmalı bir şekilde GPB'nin bütünlüğüne ve dolayısıyla GPB termo-mekanik özelliklerine bağlıdır. Genellikle yangınların sonraki aşamalarında yapının deformasyonları, alçı levhaların çatlaması ve düşmesi göçme sürelerini belirlemektedir [15]. Sayısal çalışmaların çoğu, esas olarak GPB'nin termal davranışına odaklanmakla [16–18] birlikte, GPB'nin yüksek sıcaklıklarda mekanik özellikleri hakkında yalnızca sınırlı sayıda çalışma vardır [19–21]. Alçıdan imal edilen iki tarafı kağıtla kaplı olan alçıpanların bir çeşidi olan kırmızı alçıpan yangına karşı dayanım istenen yerlerde kullanılmaktadır. Bu malzemenin hafif, yangına karşı dayanıklı, ses izolasyonu iyi ve kolay uygulanabilen bir malzeme olması tercih edilmesini arttırmaktadır.

Bu yalıtım malzemeleri üzerine literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, bir çalışmada cam ve taş yünü kullanılarak tuğla duvar ve gazbeton duvar modeline dıştan yalıtım olarak uygulanmıştır. Çalışma sonucunda taş yünü ve gazbeton kompozisyonunun en düşük yalıtım kalınlığı, cam yünü ve tuğla duvar kompozisyonunun ise en yüksek enerji tasarrufu sağladığı görülmüştür [22]. Diğer bir çalışmada taş yünü, cam yünü, EPS ve XPS; duvar modeli olarak tuğla ve bims kullanılmıştır. Çalışma sonucunda yakıt olarak kömür, yalıtım malzemesi olarak XPS ve duvar bileşeni olarak bims kompozisyonunun en düşük optimum yalıtım kalınlığına; cam yününün kullanıldığı doğalgazlı ve tuğlalı bir kompozisyonda ise en yüksek optimum kalınlık hesaplanmıştır [23].

Donatının yüzeyindeki polimerin özellikleri, FRP ile beton arasındaki bağın korunmasında esastır. Cam geçiş sıcaklığı olan T_g'ye yakın bir sıcaklıkta, polimerin mekanik özellikleri azalmaya başlar ve polimer, betondan liflere gerilmeleri daha az aktarabilir, bu da bağ mukavemetinde önemli düşümlere neden olur. T_g değeri reçinenin tipine bağlıdır, ancak beton için çoğu FRP donatıda kullanılan reçineler için tipik olarak 93 ila 120°C aralığındadır [24]. Bu nedenle sıcaklık FRP donatılar için önemli bir problemdir. Hamad [25] tarafından yapılan bir çalışma sonucunda FRP donatılarının, referans gerilme dayanımlarının yaklaşık %50-70'ini kaybettikleri 450 °C'ye varan aşırı sıcaklıklara maruz kaldıklarında nihai gerilme dayanımlarında

önemli düşüşler yaşadıkları bulunmuştur. Başka bir çalışmada, betona gömülmüş epoksi reçine matrisli cam ve karbon elyaf takviyeli polimer (FRP) donatılarının mekanik özellikleri, geniş bir yüksek sıcaklık aralığında araştırıldı. Sonuç olarak gömülü FRP donatılarının çekme dayanımının genellikle artan sıcaklıkla azaldığını gösterdiği ifade edilmiştir; ayrıca, beton kaplamanın doğrudan ısı ve oksijenin donatılara ulaşmasını engellediğini buna bağlı olarak, gömülü FRP donatının doğrudan ısıya maruz kalan çıplak donatılara kıyasla yüksek sıcaklıklarda daha iyi performansı sergilediği ifade edilmiştir [26]. Spagnuolo ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, GFRP donatılar 100-700 °C arasındaki sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Deneysel sonuçta donatıların elastisite modüllerinde ve çekme dayanımlarında düşüşler gözlemlenmiştir [27]. Yapılan bir çalışmada, beton yapılarında iç takviye olarak kullanılan FRP donatılarının yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerine ilişkin deneysel bir çalışmanın sonuçlarını sunmaktadır. Çalışmada karbon elyaf takviyeli polyester cam elyaf takviyeli polyester donatılar kullanılmıştır ve geleneksel çelik donatıyla karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmanın sonuçları, elastisite modülleri 300–400 °C'ye kadar neredeyse hiç değişmemiş, bu sıcaklıktan sonra ise keskin bir düşüş olduğu ifade edilmiştir [28]. Masmoudi ve arkadaşları tarafından beton örtü kalınlığının GFRP donatı çapına oranının, -30/+80 °C arasındaki termal yüklemeler altında beton ve FRP donatıda oluşan deformasyon dağılımına etkisini incelemişlerdir. FRP donatıların enine ve boyuna termal genleşme katsayıları arasında 4 katı kadar fark olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, beton örtü kalınlığı/donatı çapı oranı 1,5 veya daha az olan numunelerde, +50 ile +60°C arasında değişen sıcaklıklarda, yüksek sıcaklıktan kaynaklanan çatlaklar beton silindirelerin yüzeyinde gelişmeye başladığı gözlemlenmiştir. +80°C'ye kadar olan yüksek sıcaklıklarda betonun çatlamasını önlemek için beton örtü kalınlığının cam elyaf takviyeli polimerlere oranının 2,0'den büyük veya buna eşit olmasının yeterli olabileceği belirlenmiştir [29]. Başka bir çalışmada termotabilitesi yüksek olan Geopolimer beton türünün GFRP donatıyla yüksek sıcaklıklara karşı mekanik özelliklerinde meydana gelebilecek değişimler araştırılmıştır. Sonuçlar, çıplak GFRP donatıların çekme özelliklerinin 400 °C ila 600 °C sıcaklık aralığında önemli ölçüde azaldığını ve çekme dayanımı kaybı oranının %50-%90 gibi yüksek olduğunu gösterdiği belirtilmiştir. Geopolimer beton kaplama, yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra (400–600 °C) GFRP donatıların çekme dayanımı ve elastik modülündeki bozulmayı etkili bir şekilde yavaşlatabildiği ve azaltabildiği, ancak bu etki, maruz kalma sıcaklığı ve süresindeki artışın ardından zayıfladığı ifade edilmiştir [30]. Deneysel çalışmaların yanı sıra nümerik ve parametrik çalışmalar da yapılmıştır. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan FRP betonarme kirişlerin performansını analitik olarak incelenmiş, Belirli bir süre yangına maruz kalan FRP betonarme kirişlerin artık eğilme ve kesme dayanımlarını tahmin etmek için yöntemler geliştirilmiştir. Beton kaplamanın, yangına maruz kalma süresinin FRP sıcaklıkları ve betonarme kirişlerin kesme ve eğilme kapasiteleri üzerindeki etkisini incelemek için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Beton kaplamanın artmasıyla FRP sıcaklıklarının düştüğü ve FRP betonarme kirişlerin kesme ve eğilme dayanımlarında önemli derecede bozulma gösterdiği tespit edilmiştir. Son olarak çalışmada, FRP donatılı betonarme elemanın yangına dayanması için minimum 64 mm pas payı önermektedir [31]. Yangın sonucunda sıyrılma etkilerinin gözlemlenmesi ile alakalı yapılan bir çalışmada GFRP, BFRP, CFRP ve çelik donatılar kullanılarak dökülen kirişler 500°C sıcaklıkta 4 saat tutulmuştur. Çalışma sonucunda çelik donatılı kirişler, FRP donatılı benzer kirişlere kıyasla yüksek sayıda çatlak ve daha düşük ortalama çatlak boyutları ile birlikte, verilen sıcaklıktan önce ve sonra tamamen eğilme kırılması gösterdiği ifade edilmiştir. Ayrıca CFRP donatılı kirişler, önceki donatıların ısınmaya karşı daha yüksek direnci nedeniyle, yüksek sıcaklıklarda GFRP ve BFRP donatılara göre daha üstün eğilme davranışı sergilediği ifade edilmiştir. 90 dakika boyunca 500 °C'ye maruz kaldıktan sonra, FRP donatılı betonarme kirişler, donatıların çekme dayanımının bozulması ve FRP donatılar ile çevreleyen beton arasındaki bağ kaybı nedeniyle nispeten düşük yük seviyelerinde hasar aldığı gözlemlenmiştir [32]. Polat ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada çelik ve GFRP donatılar aşamalı olarak 800 °C'ye kadar sıcaklık etkisine maruz bırakılarak çekme deneyleri ve betonda pull out deneyleri yapılarak karşılaştırılmıştır. GFRP donatılar 500 °C'den sonraki sıcaklıklara maruz bırakıldığında tamamen yanarken çelik donatının akma dayanımının 800 °C'de %30 azaldığı görülmüştür. Beton ile aderansta iki donatı türü de benzer karakteristik eğriler gösterdiği, GFRP donatıların çelik donatıya yakın seviyede aderansta başarı gösterdiği ifade edilmiştir [33].

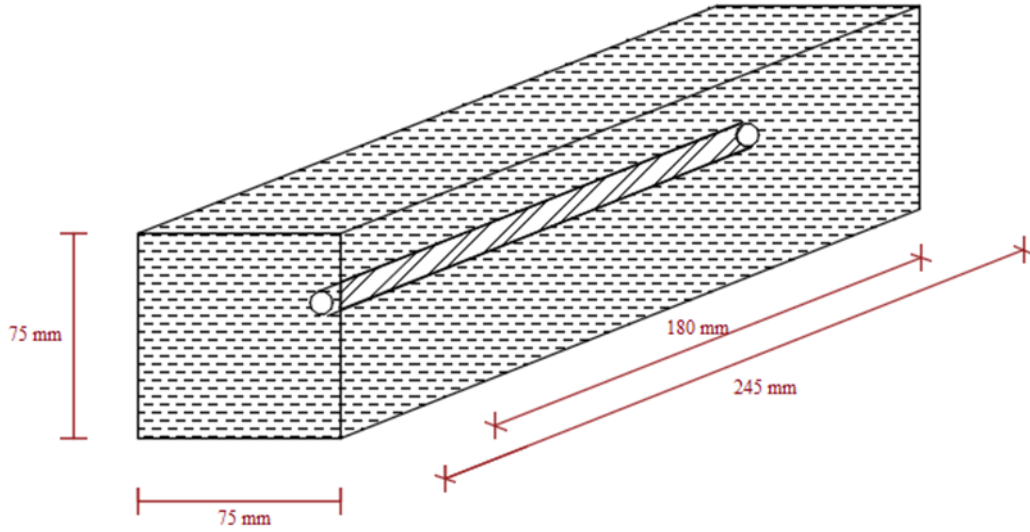
Bu çalışmada literatürden farklı olarak sıcaklık etkisine maruz FRP donatılı betonarme yapı elemanlarında yalıtım malzemesi türünün ve beton dayanımının ısı geçişine etkilerini belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Üç tip yangın yalıtım malzemesi kullanılarak FRP donatılı yapı elemanları yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. 500°C dereceye ulaşan ortam sıcaklığında beton yüzeyine ve FRP donatıya

ulaşan sıcaklıklar problar vasıtasıyla ölçülmüştür. Ayrıca FRP donatıyı koruyan beton dayanımının etkisini belirlemek amacıyla üç farklı dayanım sınıfında beton numuneler üretilerek betonarme elemanlar taş yünü ile izole edilerek deneyler tekrarlanmıştır.

2. MALZEME VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Malzeme (Material)

DeneySEL çalışmalarında, bir adet cam FRP donatı içeren 75x75x245 mm boyutlarında betonarme numuneler üretilerek deneyler tekrarlanmıştır. Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik'e göre [34] kolonlarda 40 mm, döşemelerde 25 mm pas payı kalınlığı önerilmektedir. Yapılan bu çalışmada pas payı kalınlığı 25-40 mm arasında olacak şekilde maksimum agrega boyutuna ($D_{max}=32$ mm) göre pas payı seçimi yapılmıştır. Cam lif takviyeli plastik (GFRP) donatılar nervürlü ve 10 mm çapında olup kalıp içerisine pas payı kalınlığı 32,5 mm olacak şekilde yerleştirilmiş, üç farklı dayanım sınıfında (Tablo 1) hazırlanan betonlar ile örtülmüştür (Şekil 1). Tablo 2'de farklı dayanımlardaki numunelerin boyutları verilmiştir.



Şekil 1. Betonarme numunelerin boyutları.

Tablo 1. Beton karışım değerleri

Malzemeler (dm ³)	C20	C30	C40
Su	210	208	170
Çimento	111	127	136
Katkı	-	-	2
1.Mıdır	160	157	172
2.Mıdır	180	176	193
Kum	339	332	327
Toplam	1000	1000	1000
Basınç Dayanımı (MPa)	26,80	40,92	51,50

Tablo 2. Betonarme numunenin özellikleri

Donatı türü	Donatı Çapı	Donatı Uzunluk	Betonarme Uzunluk	Betonarme Genişlik	Betonarme Yükseklik	Pas payı
FRP	10 mm	180 mm	245 mm	75 mm	75 mm	32,5 mm

Yangın yalıtım malzemesi olarak kırmızı alçıpan, taş yünü ve cam yünü kullanılmıştır (Tablo 3). Farklı kalınlıklara sahip yangın yalıtım malzemeleri uygulamalarda yapıldığı gibi mevcut kalınlıkları ile betonarme numunenin üzerine monte edilerek 1200 °C kapasiteye sahip fırında testler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. Yalıtım malzemelerinin özellikleri

Malzeme	Yoğunluk	Kalınlık	Sınıf	Katsayı
	kg/m³	mm		W/mk
Taş Yünü	150	50	A1	0,035
Cam Yünü	50	50	A1	0,04
Kırmızı Alçıpan	16,3	12	A2	0,25

2.2. Metot (Method)

Üç dayanım sınıfında üretilen betonarme numunelere ve içindeki FRP donatılara ısıölçer problar bağlanılmıştır. Betonarme elemanlara yalıtım malzemeleri kaplanıp fırında ortam sıcaklığı 500 °C'ye kadar bekletilmiş ve geçen zaman ölçülmüştür. Yüksek sıcaklıkta bekletilen yalıtılmış numunelerde; ortamın sıcaklığı, betonun yüzey sıcaklığı ve donatıda meydana gelen sıcaklık değişimleri yerleştirilen problarla ölçülmüş geçen zaman kronometre kullanılarak kayıt altına alınmıştır. Yalıtım malzemelerinin karşılaştırılmasında betonarme yapı elemanının beton sınıfı sabit tutularak testler gerçekleştirilmiştir (Şekil 2-3). Beton dayanım sınıfının etkisinin incelendiği deneysel çalışmalarda C20, C30 ve C40 betonları üretilmiştir.



Şekil 1. Betonarme numuneleri yalıtım malzemesiyle kaplanması



Şekil 2. Yangın yalıtımlı betonarme elemanlar

3. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

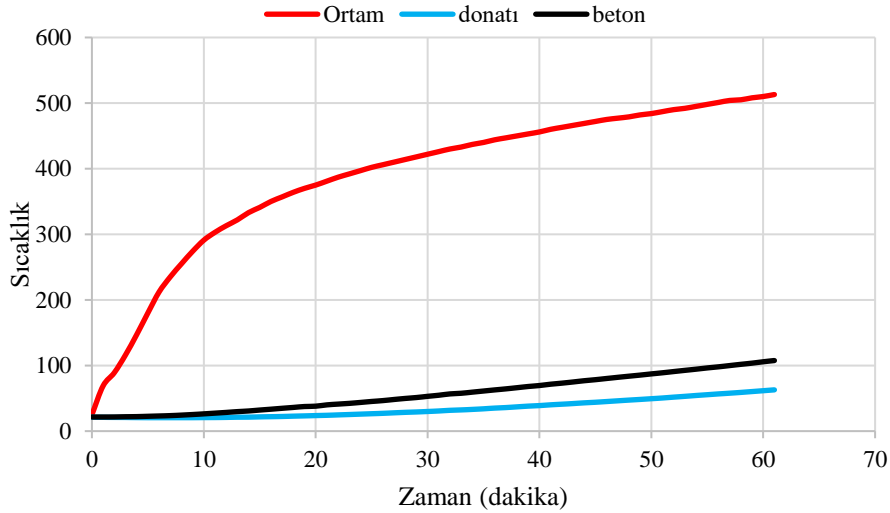
FRP donatılı yapı elemanlarında kullanılan yangın yalıtım malzeme türü ve beton dayanımının FRP donatıları sıcaklığa karşı koruma performansının değerlendirildiği bu çalışma sonuçları iki başlık altında incelenmiştir. İlk grupta yalıtım malzeme türünün etkileri değerlendirilmiş, ikinci grupta ise beton dayanım sınıfının artmasının etkileri yorumlanmıştır.

3.1. Yalıtım Malzeme Türünün Etkileri (Effects of Insulation Material Type)

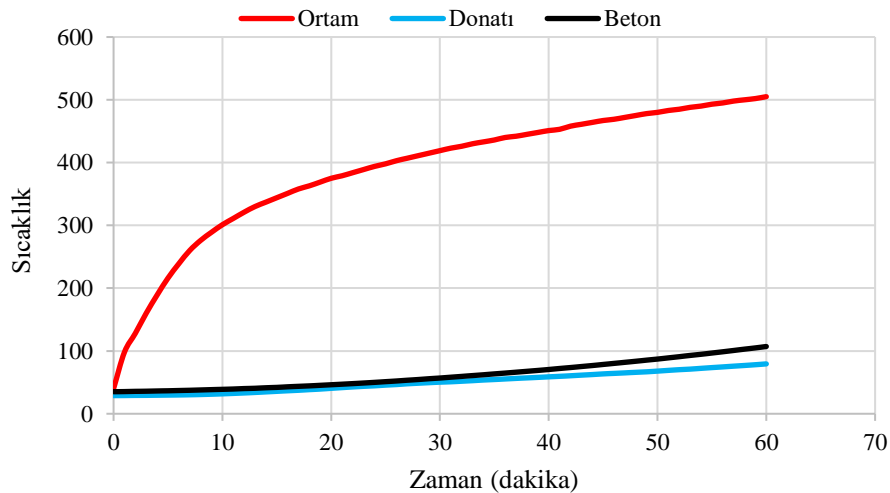
Farklı yalıtım malzemeleri ile korunan betonarme elemanların sıcaklık etkisinde betonda ve donatıda meydana gelen sıcaklık değişimleri grafikler halinde verilmiştir (Şekil 4-6). Ortam sıcaklığından betona ve donatıya ısı geçişler formül 1 ile hesaplanarak Tablo 4'te verilmiştir.

$$\frac{(\text{Ortam Sıcaklığı} - \text{Beton veya donatı sıcaklığı})}{\text{Beton sıcaklığı}} \times 100 \quad (1)$$

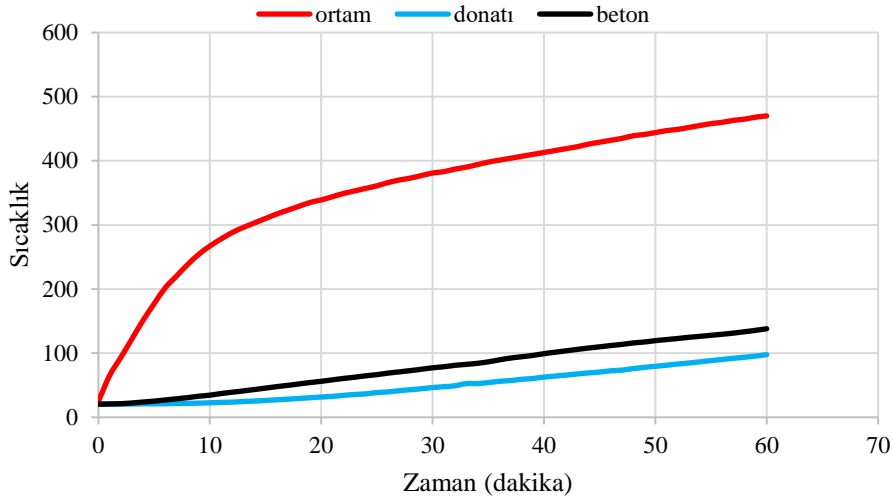
Taş yünü ısının %13'ünü betona iletirken cam yünü %22 oranında ve kırmızı alçıpan %26 oranında iletmiştir. Donatıya iletilen ısı oranları ise taş yününde %9, cam yününde %15 ve kırmızı alçıpanda %20 oranlarında meydana gelmiştir. Ortam sıcaklığı 500 °C'ye ulaştığında taş yünü, cam yünü ve kırmızı alçıpanda beton sıcaklığı ortalama sırasıyla 64 °C, 111,7 °C ve 130 °C dereceye ulaşmaktadır. Donatı ortalama sıcaklığı ise sırasıyla 45 °C, 73 °C ve 102 °C dereceye ulaşmaktadır.



Şekil 3. Taş yünü kullanılan betonarme elemanların sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 4. Cam yünü kullanılan betonarme elemanların sıcaklık-zaman grafiği

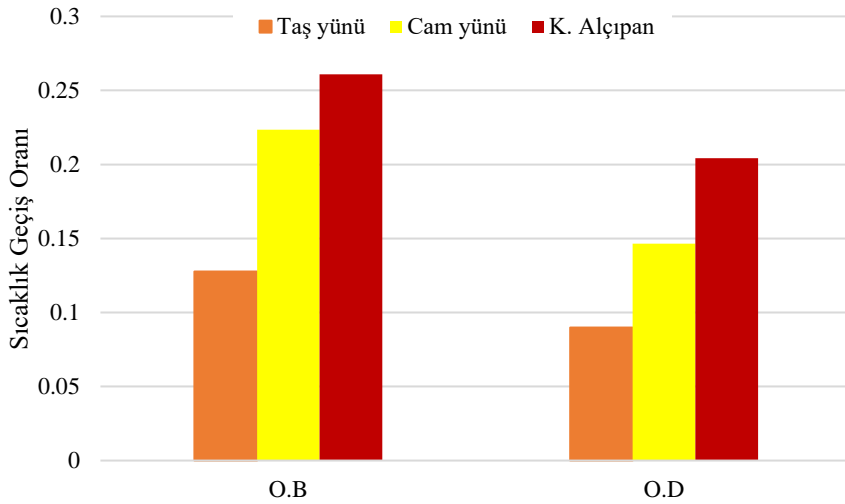


Şekil 5. Kırmızı alçıpan kullanılan betonarme elemanların sıcaklık-zaman grafiği

Tablo 4. Isı Geçiş Yüzdeleri

Yalıtım Malzemesi Türü	Ortamdan/ Betona ısı geçiş yüzdesi (%)	Ortamdan/Donatıya ısı geçiş yüzdesi (%)
Taş Yünü	13	9
Cam Yünü	22	15
Kırmızı Alçıpan	26	20

Şekil 7’de taş yünü ve kırmızı alçıpan arasında iki katı oranda geçiş farkı vardır. Beton yangına karşı FRP donatıdan daha iyi performans gösterdiği için FRP donatıya ulaşan sıcaklık değeri büyük önem taşımaktadır. Yalıtım malzemesi betonu korurken beton FRP donatıyı korumaktadır. Bu nedenle yalıtım malzemesinin yanı sıra betonun etkisi de göz önüne alınmalıdır.



Şekil 6. Yalıtım malzemelerinin sıcaklık geçiş oranı. (O.B: Ortamdan Betona, O.D: Ortamdan Donatıya geçiş)

Yüksek sıcaklık sonrasında fırından çıkarılan numunelerde meydana gelen görüntü değişimi Şekil 8’de verilmiştir. Taş yününde hasar gözlemlenmezken, kırmızı alçıpanında kararma ve dökülmeler görülmüştür. Cam yününde ise kısmi renk değişimleri meydana gelmiş olmasına karşın malzeme bütünlüğü korunmuştur.

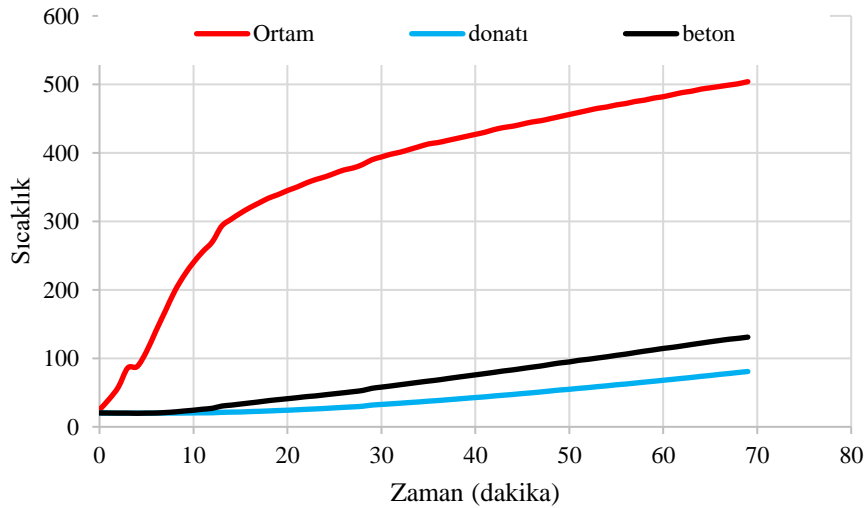


Şekil 7. Yüksek sıcaklık sonrası yalıtım malzemeleri

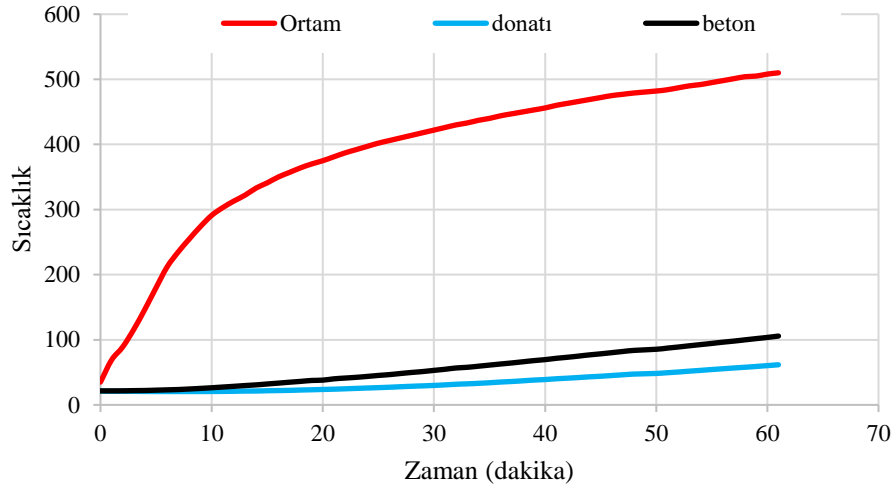
3.2. Beton Dayanımının Etkileri (Effects of Concrete Strength)

Beton içerisindeki donatıların sıcaklık yalıtımında beton dayanımının etkilerini incelemek amacıyla üç farklı dayanım sınıfında betonarme yapı elemanlar üretilerek 50 mm kalınlığında taş yünü ile kaplanarak testler yapılmıştır. Farklı dayanım sınıfındaki betonarme elemanların sıcaklık zaman grafikleri sırasıyla Şekil 9-10-11’de verilmiştir. Çalışmanın bu kısmında önemli olan durum sıcaklığın betondan donatıya geçişidir ve formül 2 ile sıcaklık geçiş yüzdeleri hesaplanarak Tablo 5’te verilmiştir.

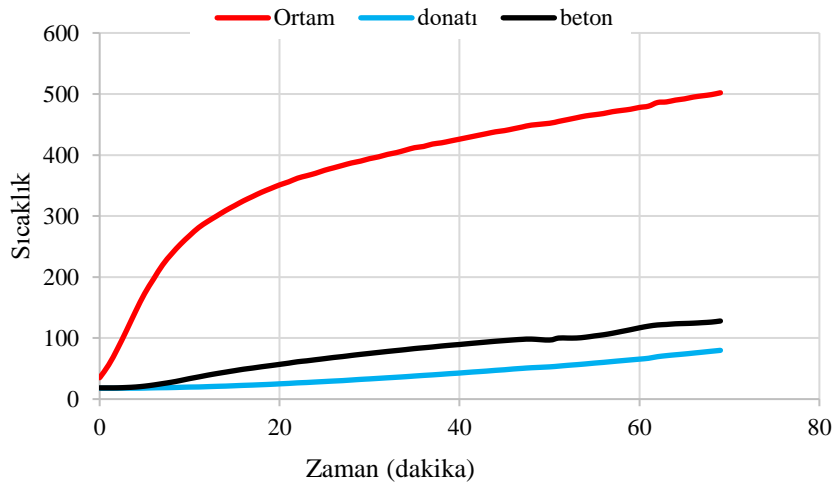
$$\frac{\text{Beton yüzeyindeki sıcaklık} - \text{donatıdaki sıcaklık}}{\text{beton yüzeyindeki sıcaklık}} \times 100 \quad (2)$$



Şekil 8. Yalıtılmış C20 betonunun sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 9. Yalıtılmış C30 betonunun sıcaklık-zaman grafiği



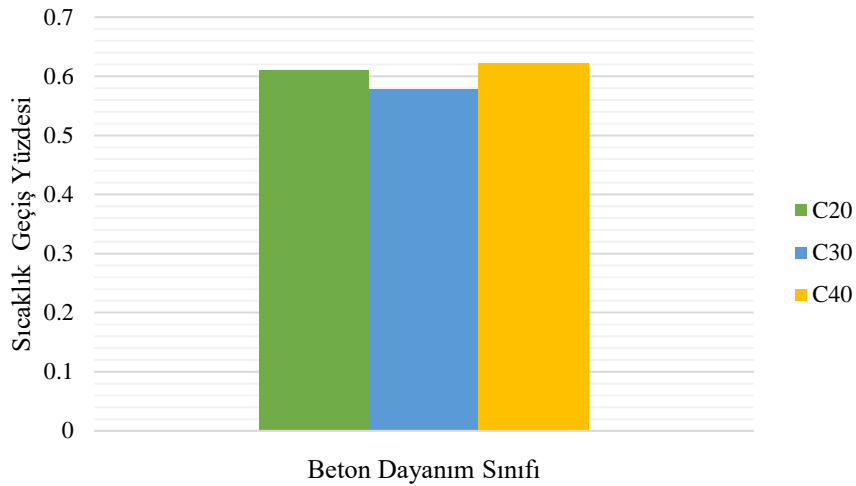
Şekil 10. Yalıtılmış C40 betonunun sıcaklık-zaman grafiği

İlgili şekillerde görüldüğü gibi tüm beton sınıflarında donatı ve beton sıcaklığındaki ısı geçişleri yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Sıcaklık geçiş oranlarına bakıldığında C30 betonun ortalama olarak C20 ve C40'a göre %3-4 daha az ısı geçişi sağlamıştır. Beton dayanımları arasındaki yakın değerler sıcaklık transferinde beton dayanım sınıfının etkisinin sınırlı oranda olduğunu göstermektedir.

Tablo 5. Yalıtım malzemesi ve beton sınıfına göre betondan donatıya geçen sıcaklık yüzdesi.

Beton Sınıfı	C20	C30	C40
%	61	58	62

Tüm beton sınıfları için betondan donatıya gelen sıcaklık transferinin ortalama yaklaşık %60 olduğu görülmektedir (Şekil 12). 128 °C ulaşan bir betonda donatıların sıcaklığının 78 °C'e ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu durumda asıl görevi üstlenen beton koruyan yalıtım malzemesi olduğu sonucu çıkarılabilir.



Şekil 11. Beton dayanım sınıflarına ve yalıtım malzemelerine göre sıcaklık geçiş oranları.

Yüksek sıcaklıklara GFRP donatıların çıplak halde bırakılarak mekanik özelliklerindeki değişimle alakalı literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Robert ve arkadaşları [35] tarafından yapılan bir çalışmada GFRP donatıları yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. 300 °C'ye maruz bırakılan donatılar oda sıcaklığındaki (25 °C) donatılara oranla çekme dayanımlarında %46 düşüş gözlemlenmiştir. Aydın [36] tarafından yapılan çalışmada GFRP donatılar 60°C'ye uzun süre maruz bırakılmıştır. Çalışma sonunda %5 oranında çekme dayanımında düşüş gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklıklar sadece mekanik mukavemetleri etkilemez ayrıca FRP donatı ve beton arasındaki aderansı da olumsuz etkilemektedir. Solyom [37] tarafından sıcaklık arttıkça bağ kuvveti azaldığını ifade edilmiştir. Özellikle, camsı geçiş sıcaklığına (T_g'ye) yakın sıcaklıklara maruz kalan numuneler için bağ mukavemetinin %30 kadar düştüğü, ayrıca 300 °C'de ise %10'un altına düştüğü ifade edilmiştir. Bağ performansındaki düşüş, nispeten düşük bir sıcaklık seviyesinde (80 °C) beton basınç dayanımındaki ve daha yüksek sıcaklıklarda GFRP donatının Elastisite modülündeki bir azalmadan etkilenmektedir. Literatürde yapılan bu çalışmalar sonucunda çıkarılan önemli sonuçlar göz önüne alındığında FRP donatıların sıcaklığa karşı korunması gerekmektedir. Bu çalışmadan çıkarılan sonuçlara göre beton dayanımının artması, donatıları sıcaklığa karşı koruma işlevini yeterli seviyede yapamadığı belirlenmiştir. Fakat yangın yalıtım malzemelerinin iyi oranda koruma sağlayabileceği sonucu çıkmaktadır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan FRP donatılı betonarme elemanların farklı yalıtım malzemesi ve farklı dayanım sınıfının betona ve donatıya geçen sıcaklık oranlarıyla ilgili deneysel araştırmanın sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- Taş yünü ile yalıtım yapılan betonarme elemanların koruyuculuğu cam yünü ve kırmızı alçıpana göre daha yüksektir. Taş yünü ortamdan betona sadece %13'lük sıcaklık iletimi sağlamıştır. Diğer yalıtım malzemelerine göre daha ince kalınlığa sahip olan kırmızı alçıpana bu oran %26'dır.
- Yüksek sıcaklıklarda farklı beton sınıflarının sıcaklık geçirimsizliğine etkisi sınırlı düzeyde kalmaktadır. Ortam sıcaklığı 500 °C'de yalıtımlı C20, C30 C40 beton sınıfındaki FRP donatılı betonarme elemanlarının beton yüzeyinden donatıya sıcaklık iletim oranları birbirine yakın ve %55'in üstünde gerçekleşmiştir.
- Yalıtımlı betonarme elemanların içerisindeki FRP donatılara ulaşan sıcaklık, taş yününde ortam sıcaklığının %9'u, cam yününde %15'i, kırmızı alçıpana %20'sine denk gelmektedir.

- Yalıtım malzemesi ve beton sınıfının katkısı ayrı ayrı değerlendirildiğinde, yalıtım malzemesinin sıcaklık geçişindeki rolünün çok önemli olduğu belirlenmiştir. Beton dayanımının ise donatıyı sıcaklığa karşı korumada sınırlı kaldığı tespit edilmiştir.
- Yüksek sıcaklıklarda kırmızı alçıpan yüzeyinde kararmalar ve kısmen dökülmeler görülmüştür. Cam yününün bazı bölgelerinde renk değişimleri görülürken, taş yününde önemli bir hasar gözlemlenmemiştir.
- Bu konuda yeni çalışmalar ile yalıtım malzemesinin ve beton paspayı kalınlığını etkileri birlikte değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Bahrami and M. Nematzadeh, "Bond behavior of lightweight concrete-filled steel tubes containing rock wool waste after exposure to high temperatures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 300, p. 124039, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124039.
- [2] C. Buzkan and E. Erten, "Yüksek Katlı Çelik ve Betonarme Taşıyıcı Sistemli Yapıların Yangın Davranışları Üzerine Bir Araştırma," *Ç.Ü. Fen ve Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 34, no. 2, 2016.
- [3] F. Kocataşkın, *Yapı Malzemesi Bilimi*. İstanbul: Birsen Yayınevi, 2000.
- [4] A. S. Abdulrahman and M. R. A. Kadir, "Behavior and flexural strength of fire damaged high strength reinforced rectangular concrete beams after strengthening with CFRP laminates," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 13, no. 6, p. 101767, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.ASEJ.2022.101767.
- [5] A. M. Papadopoulos, "State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments," *Energy Build.*, vol. 37, no. 1, pp. 77–86, Jan. 2005, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2004.05.006.
- [6] T. Vrána and K. Gudmundsson, "Comparison of fibrous insulations – Cellulose and stone wool in terms of moisture properties resulting from condensation and ice formation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 7, pp. 1151–1157, Jul. 2010, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2009.12.026.
- [7] X. Wu, J.-Y. Liu, X. Zhao, A.-H. Yi, and Y.-L. Wu, "Research on fire resistance performance of rock wool material element," *World Build. Mater.*, p. 6, 2011.
- [8] A. Yörükoğlu, F. Akkurt, and S. Çulha, "Investigation of boron usability in rock wool production," *Constr. Build. Mater.*, vol. 243, p. 118222, May 2020, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118222.
- [9] J. Yliniemi, O. Laitinen, P. Kinnunen, and M. Illikainen, "Pulverization of fibrous mineral wool waste," *J. Mater. Cycles Waste Manag. 2017 202*, vol. 20, no. 2, pp. 1248–1256, Dec. 2017, doi: 10.1007/S10163-017-0692-3.
- [10] J. Yliniemi, P. Kinnunen, P. Karinkanta, and M. Illikainen, "Utilization of Mineral Wools as Alkali-Activated Material Precursor," *Mater. 2016, Vol. 9, Page 312*, vol. 9, no. 5, p. 312, Apr. 2016, doi: 10.3390/MA9050312.
- [11] A. P. Luz and S. Ribeiro, "Use of glass waste as a raw material in porcelain stoneware tile mixtures," 2006, doi: 10.1016/j.ceramint.2006.01.001.
- [12] F. Matteucci, M. Dondi, and G. Guarini, "Effect of soda-lime glass on sintering and technological properties of porcelain stoneware tiles", Accessed: Jul. 14, 2022. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/ceramint
- [13] R. V Silva, J. De Brito, C. Q. Lye, and R. K. Dhir, "The role of glass waste in the production of ceramic-based products and other applications: A review," 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.185.

- [14]A. Tucci, L. Esposito, E. Rastelli, C. Palmonari, and E. Rambaldi, "Use of soda-lime scrap-glass as a fluxing agent in a porcelain stoneware tile mix", doi: 10.1016/S0955-2219(03)00121-3.
- [15]D. Norsk, A. Sauca, and K. Livkiss, "Fire resistance evaluation of gypsum plasterboard walls using machine learning method," *Fire Saf. J.*, vol. 130, p. 103597, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.FIRESAF.2022.103597.
- [16]J. R. Mehaffey, P. Cuerrier, and G. Carisse, "A model for predicting heat transfer through gypsum-board/wood-stud walls exposed to fire," *Fire Mater.*, vol. 18, no. 5, pp. 297–305, Sep. 1994, doi: 10.1002/FAM.810180505.
- [17]G. Thomas, "Thermal properties of gypsum plasterboard at high temperatures," *Fire Mater.*, vol. 26, no. 1, pp. 37–45, Jan. 2002, doi: 10.1002/FAM.786.
- [18]B. Andres, K. Livkiss, A. Bhargava, and P. van Hees, "Using Micro-Scale and Solid Material Data for Modelling Heat Transfer in Stone Wool Composites Under Heat Exposures," *Fire Technol.*, vol. 57, no. 4, pp. 1541–1567, Jul. 2021, doi: 10.1007/S10694-021-01122-0/TABLES/13.
- [19]B. Close Andres and P. van Hees, "Properties of Gypsum Plasterboard Exposed to Standard Fires."
- [20]S. Cramer, O. Friday, R. White, and G. Sriprutkiat, "Mechanical Properties of Gypsum Board at Elevated Temperatures, Fire and Materials 2003," in *8th International Conference*, 2003, pp. 33–42.
- [21]I. Rahmanian, "Thermal and Mechanical Properties of Gypsum Boards And Their Influences on Fire Resistance of Gypsum Board Based Systems," University of Manchester, 2011.
- [22]S. Yerel KANDEMİR, B. Şeyh Edebalı Üniversitesi, İ. Mühendisliği Bölümü, and M. Mühendisliği Bölümü, "Dıştan yalıtım uygulamalarında farklı duvar modelleri için optimum yalıtım kalınlıklarının belirlenmesi ve ekonomik analizleri Veli BEKTAŞ Emin AÇIKKALP," *DÜMF Mühendislik Derg.*, vol. 10, pp. 275–288, 2019, doi: 10.24012/dumf.401958.
- [23]B. E. Yüce, C. Acar, N. Ömer, H. Üniversitesi, M. Fakültesi, and M. M. Bölümü, "Bitlis İlinde Farklı Yakıtlar ve Duvar Bileşenleri İçin Optimum Yalıtım Kalınlığı ve Enerji Tasarrufunun Analizi Analysis of Optimum Insulation Thickness and Energy Saving for Different Fuels and Wall Components in Bitlis Province," *BEU J. Sci.*, vol. 10, no. 4, pp. 1426–1434, 2021, doi: 10.17798/bitlisfen.959930.
- [24] ACI, "(American Concrete Institute). Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. ACI 440.1R-15. Farmington Hills, MI," 2015.
- [25] H. Ashrafi, M. Bazli, E. P. Najafabadi, and A. Vatani Oskouei, "The effect of mechanical and thermal properties of FRP bars on their tensile performance under elevated temperatures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 157, pp. 1001–1010, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.09.160.
- [26] E. P. Najafabadi, A. V. Oskouei, M. H. Khaneghahi, P. Shoaie, and T. Ozbakkaloglu, "The tensile performance of FRP bars embedded in concrete under elevated temperatures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 211, pp. 1138–1152, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.03.239.
- [27] S. Spagnuolo, A. Meda, Z. Rinaldi, and A. Nanni, "Residual behaviour of glass FRP bars subjected to high temperatures," *Compos. Struct.*, vol. 203, pp. 886–893, Nov. 2018, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.07.077.
- [28] Y. C. Wang, P. M. H. Wong, and V. Kodur, "An experimental study of the mechanical properties of fibre reinforced polymer (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures," *Compos. Struct.*, vol. 80, no. 1, pp. 131–140, Sep. 2007, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2006.04.069.
- [29] R. Masmoudi, A. Zaidi, & P. Gérard, "Transverse thermal expansion of FRP bars embedded in concrete." *Journal of Composites for Construction*, 9(5), 377-387, 2005.

- [30] Z. Wang, K. Wang, J. Zhao, S. Wang, E. D. Shumuye, & Z. Yang. " The mechanical properties of GFRP bars embedded in geopolymer concrete after high temperature exposure." *Journal of Building Engineering*, 62, 105355 2022, [doi: 10.1016/j.jobbe.2022.105355](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105355).
- [31] M. Saafi, "Effect of fire on FRP reinforced concrete members," *Compos. Struct.*, vol. 58, no. 1, pp. 11–20, Oct. 2002, doi: 10.1016/S0263-8223(02)00045-4.
- [32] R. J. A. Hamad, M. A. Megat Johari, and R. H. Haddad, "Effects of bars slippage on the pre-and post-heating flexural behavior of FRP reinforced concrete beams: Experimental and theoretical investigations," *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 574–602, 2019.
- [33] M. Polat, M. Yağın, M. O. Öztürk, & F. M. Özkal, "GFRP ve Çelik Donatuların Yüksek Sıcaklık Etkileri Altında Aderans Kayıplarının İncelenmesi" II. In *International Conference on Advanced Engineering Technologie* (pp. 238-247) September 2017.
- [34] Yönetmelik, "Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik" *Resmi Gazete*, 19 Aralık 2007 Sayı: 26735., 9.
- [35] M. Robert and B. Benmokrane, "Behavior of GFRP Reinforcing Bars Subjected to Extreme Temperatures," *Artic. J. Compos. Constr.*, 2010, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000092.
- [36] F. Aydın and Ş. Arslan, "Investigation of the durability performance of FRP bars in different environmental conditions," *Adv. Concr. Constr.*, vol. 12, no. 4, pp. 295–302, 2021, doi: 10.12989/acc.2021.12.4.295.
- [37] S. Solyom, M. Di Benedetti, M. Guadagnini, and G. L. Balázs, "Effect of temperature on the bond behaviour of GFRP bars in concrete," *Compos. Part B Eng.*, vol. 183, p. 107602, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2019.107602.