

Yüksek Sıcaklık Etkisindeki CFRP Donatılarının Dayanım Kayıplarının Matematiksel Yöntemlerle Tespiti

Şeymanur ARSLAN^{1*}, Ferhat AYDIN²

Öz

Liflerle güçlendirilmiş polimer (FRP) donatılar günümüzde çelik donatıya alternatif olarak kullanılmaktadır. Ancak FRP donatılar yüksek sıcaklıklara karşı hassas bir malzemedir. Bu nedenle bu malzemelerin yüksek sıcaklıklardaki çekme dayanımındaki değişimiyle alakalı tahmin modellerinin oluşturulması önem arz etmektedir. Bu çalışmada literatürdeki CFRP donatılarının yüksek sıcaklıklarda meydana gelen çekme dayanımındaki kayıpları araştırılmış ve literatürde üç araştırmacı tarafından sunulan matematiksel modellerle deneysel sonuçlar regresyon ve korelasyon analizleri yapılarak kıyaslanmıştır. Alternatif yeni bir model sunmak amacıyla literatürdeki CFRP (karbon fiber takviyeli polimer) donatılarının yüksek sıcaklıklardaki çekme dayanımındaki değişimlerinin deneysel verileri incelenerek analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda 60°C sıcaklık seviyesinin CFRP donatılarının mekanik ve fiziksel özelliklerinde zarar görmediği bu nedenle bu sıcaklık seviyesinin öncesinde dayanım kaybı olmadığı ve bu sıcaklık sonrasında parabolik bir değişimin olduğu kabulü yapılarak alternatif matematiksel model oluşturulmuştur. Sonuç olarak önerilen yeni modelin deneysel çalışmalarla uyumlu olduğu modelin yapısal uygulamalarda etkili bir tahmin aracı olabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek sıcaklık, CFRP donatı, matematiksel model, çekme dayanımı

Determination of Strength Loss of CFRP Bars Under High Temperature by Mathematical Methods

Abstract

Fiber reinforced polymer (FRP) bars are currently used as an alternative to steel reinforcement. However, FRP bars are sensitive to high temperatures. For this reason, it is important to establish prediction models related to the change in tensile strength of these materials at high temperatures. In this study, the tensile strength losses of CFRP bars at elevated temperatures were investigated and the mathematical models presented by three researchers in the literature were compared with the experimental results through regression and correlation analyses. In order to present a new alternative model, the experimental data of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) bars at high temperatures were analyzed. As a result of the study, an alternative mathematical model was created by assuming that the 60°C temperature level does not damage the mechanical and physical properties of CFRP reinforcements, therefore there is no strength loss before this temperature level and there is a parabolic change after this temperature. As a result, it is thought that the proposed new model is compatible with experimental studies and can be an effective prediction tool in structural applications.

Keywords: Elevated temperature, CFRP bar, Mathematical model, Tensile strength.

¹Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği, Sakarya, Türkiye, seymanurarslan@subu.edu.tr

²Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği, Sakarya, Türkiye, ferhata@subu.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0001-7012-3338>

²<https://orcid.org/0000-0001-9472-8366>

1. Giriş

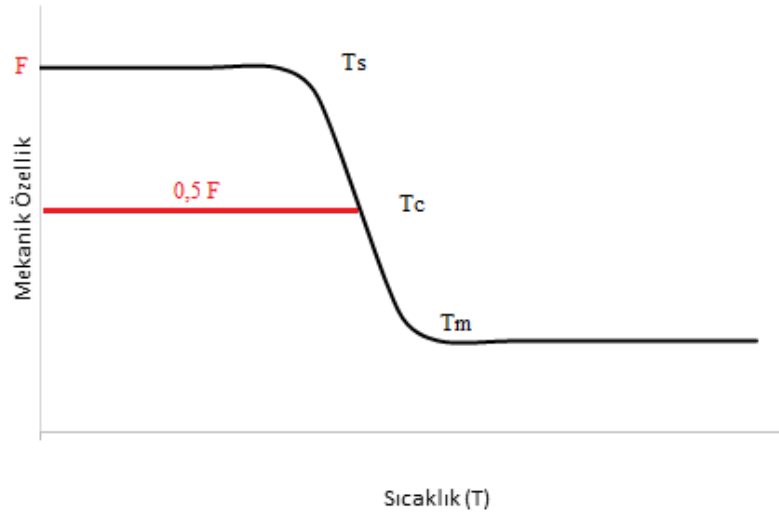
İnşaat mühendisliği alanında kullanılan yeni nesil yapı malzemelerinden biri olan liflerle güçlendirilmiş polimer (FRP) malzemelerin günümüzde kullanımı yaygınlaşarak hem taşıyıcı hem onarım ve güçlendirme malzemesi olarak tüm dünyada tercih edilmektedir. Kumaş, profil ve donatı gibi birçok şekilde üretilen bu malzemeler ihtiyaca göre farklı üretim teknikleri ile kalıplanarak istenen boyutta ve şekilde üretilmektedir. Özellikle hafiflik, yalıtkanlık, kimyasallara karşı dayanıklılık, korozyon performansı ve yüksek çekme dayanımı bu malzemelerin inşaat alanında tercih edilmesini arttırmaktadır (Aydın & Arslan, 2021). Betonarme yapılarda çelik donatıların korozyona uğrayarak taşıyıcı yapı elemanlarına hasar vermesi çelik donatıya alternatif malzeme arayışlarını ortaya çıkarmıştır. Özellikle FRP donatıların korozyona uğramaması, belirtilen diğer mekanik ve kimyasal özelliklerinin iyi olması bu malzemeleri çelik donatıya alternatif olarak sunmaktadır.

FRP donatılar matris malzemesi olarak polyester, vinilester ve epoksi gibi reçinelerden; takviye elemanı olarak cam, karbon, aramid ve bazalt gibi çekme dayanımları yüksek liflerden oluşmaktadır. Karbon lifler diğer liflere oranla daha yüksek mekanik ve fiziksel özellikler göstermektedir (S. J. Yoo et al., 2022). Karbon lifli FRP (CFRP) donatılar diğer lifli malzemelere göre birim fiyatları yüksek olduğundan inşaat alanında kullanımı özellikle cam lifli FRP'lere (GFRP) oranla sınırlıdır.

FRP donatıların çok sayıdaki avantajı olduğu kadar bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Sıcaklığa karşı olan hassasiyetleri bu dezavantajların başında gelmektedir. FRP donatıların mekanik özelliklerinin sıcaklıkla azalması, donatıların imal edildiği reçinenin yumuşamasından kaynaklanan bağ kaybı nedeniyle çelik donatıların yangın direncinden daha az olabilmektedir (ACI, 2015; Bisby & Kodur, 2007). Camsı geçiş sıcaklığına (T_g) yakın bir sıcaklıkta, polimerin mekanik özellikleri azalmaya başlamakta ve polimerin liflere gerilmeleri daha az aktarmasıyla bağ mukavemetinde önemli düşüslere neden olmaktadır. T_g değeri reçinenin tipine bağlı değişmekle birlikte çoğu FRP donatıda kullanılan reçineler için tipik olarak 93-120 °C aralığındadır. Genellikle cam lifler 880 °C ve karbon lifler 1600 °C erime noktasına sahip olduğundan reçineden daha iyi termal özellikler göstermektedirler. Çekme kuvveti ekseninde önemli miktarda yükü karşılamaya devam etmektedirler. Ancak, sıcaklık artışıyla lifler arasındaki bağ azaldığından donatıya gelen kuvvetlerin lifler arasında aktarımında azalma olmakta, böylece FRP kompozitinin dayanımı ve sertliği azalmaktadır (Chowdhury et al., 2011; Katz et al., 1999; Nigro et al., 2012).

Şekil 1'de FRP malzemelerin mekanik özellikleri ve sıcaklık arasındaki ideal ilişki gösterilmiştir. Kritik sıcaklık (T_c), FRP kompozitin mekanik dayanımının %50'sini kaybettiği sıcaklık olarak tanımlanmaktadır. T_s yumuşama sıcaklığına kadar FRP malzemelerde önemli bir mekanik özellik değişimi olmamaktadır. T_m erime sıcaklığından önce mekanik özellikler giderek

azalır (Bazli & Abolfazli, 2020). T_m sıcaklığından sonra lifler sıcaklıktan hasara uğrayana kadar bir miktar dayanım göstermeye devam etmektedir.



Şekil 1. FRP malzemelerin sıcaklık-mekanik özellik ilişkisi [8]

Literatürde yüksek sıcaklıklarla yapılan deneysel çalışmalar incelendiğinde, Kumahara ve diğerleri (Kumahara et al., 1993) tarafından yürütülen deneysel çalışma sonuçları T_g 'den çok daha yüksek olan 250 °C'lik sıcaklıkların, GFRP ve CFRP donatıların çekme dayanımını %20'nin üzerinde azalttığını göstermiştir. Hajiloo ve arkadaşları (Hajiloo et al., 2018) tarafından 3 farklı üreticiden alınan GFRP donatılar hem transient state hem de steady state olarak yüksek sıcaklıklara tabi tutulmuştur. Deneysel sonuçta 400 °C'ye ulaşan GFRP donatıların çekme dayanımlarının %25'ini koruyabildiği ifade edilmiştir. Yu ve Kodur (Yu & Kodur, 2014) tarafından yakın yüzeye monte edilmiş CFRP donatılar ve şeritlerin yüksek sıcaklığa (20-600 °C) maruz kaldığında mekanik özelliklerindeki değişimler araştırılmıştır. Deneysel sonuçta 200 °C'ye kadar CFRP donatıların elastisite modüllerini ve çekme dayanımlarını büyük oranda koruduğu, 300 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise önemli ölçüde azalmalar meydana geldiği tespit edilmiştir. Khaneghahi ve arkadaşları (Khaneghahi et al., 2018) tarafından GFRP ve CFRP donatıların yüzeyine yangın koruyucu şişen boya uygulanmış ve donatılar 80-350 °C ve 400-800 °C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Normalde aynı reçinedeki FRP donatılar yanma aşamasına 500 °C'de geçerken şişen boya ile kaplanan donatılar 800 °C'ye kadar performans gösterebildiği ifade edilmiştir. Rosa ve arkadaşları tarafından silindirik betona gömülmüş kum kaplı GFRP donatılar ile sıyrıma ve çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda artan sıcaklıkla birlikte, özellikle GFRP donatının T_g 'sine yaklaşıldığında ve aşıldığında, GFRP betonunun arayüzünün mukavemeti ve sertliği önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir (Rosa et al., 2019). Rafi ve arkadaşları tarafından dikdörtgen beton kirişlere gömülen FRP donatılara yüksek sıcaklıkların (20-500 °C) etkisinde dört

noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Yüksek sıcaklıklarda, GFRP ve çelik donatılı betonarme kirişlerdeki rijitlik kaybı temelde aynıydı ve donatı modülü veya yük seviyelerinden etkilenmedi. Diğer kirişlerle karşılaştırıldığında, CFRP donatılı kirişlerin daha iyi rijitlik özelliklerine sahip olduğu ifade edilmiştir (Rafi et al., 2011). Başka bir çalışmada 1-3 katlı CFRP levhalarla çember şeklinde sarmalanmış silindirik betonlar 20-400 °C maruz kalmış ve eş merkezli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Tg'yi aşan sıcaklıklarda FRP sargılarının gerilmesindeki ve daha da önemlisi bağ, kuvvet ve rijitliklerin azalmalardan ötürü sargılama yeteneklerinde önemli kayıplar meydana geldiği belirtilmiştir. FRP sarılı silindirlerin nihai yük kapasitesi, artan sıcaklıklarla azalmaya devam ettiği; bununla birlikte, FRP sargısının, Tg'nin oldukça üzerinde olan 400 °C'de bile, hem tek bir katman hem de üçlü bir katman için tüm maruz kalma sıcaklıklarında bir miktar sınırlama sağlamaya devam ettiği de çalışma sonucunda gözlemlenmiştir (Cerniauskas et al., 2020; Sharifianjazi et al., 2022). Nguyen ve arkadaşları tarafından, hasara yol açan maruz kalma sıcaklığını ve süresini belirlemek için hem yüksek sıcaklığa hem de mekanik yüklemeye maruz bırakılan elle üretilmiş CFRP'lerin performansı incelenmiştir. Çalışma yüklemenin arttıkça aynı performans gösterebileceği sıcaklığında azaldığını göstermektedir. Örneğin yük seviyesi 20 °C'deki dayanımının %50'sinden az olduğunda kopma sıcaklığı 636 °C'den 541 °C'ye düşmüştür. Kısacası sonuçlar, CFRP'nin maruz kalabileceği maksimum sıcaklığın artan çekme yükü ile azaldığını göstermiştir (Nguyen et al., 2019). Yoo ve Choo tarafından CFRP donatılı betonarme kolonların yüksek sıcaklıklarındaki davranışını gözlemek amacıyla CFRP donatıların önce 0-150-300-450 °C'lerde çekme dayanımındaki değişimleri test edilmiştir. Çalışma sonucunda çekme dayanımları sırasıyla 1999 MPa, 2253,8 MPa, 1275,1 MPa ve 1100,4 MPa olarak bulunmuştur. 150 °C ve 300°C arasında keskin bir düşüş olduğu görülmektedir (S. W. Yoo & Choo, 2022).

Bu çalışmada literatürde CFRP donatıların yüksek sıcaklıklarda dayanım kayıplarını araştıran deneysel ve matematiksel çalışmalar incelenerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarla daha doğru tahminler sunabilen yeni bir matematiksel model önerilmiştir.

2. Matematiksel Modeller

Literatürde FRP donatıların artan sıcaklıklarla birlikte meydana gelen dayanım kayıpları konusunda yeterince deneysel çalışma bulunmasına rağmen matematiksel modeller üzerine yapılan çalışmaların sayısı sınırlı sayıdadır. Bu bölümde literatürde bulunan FRP malzemelerin artan sıcaklıklardan dolayı meydana gelen dayanım kayıplarını inceleyen matematiksel model çalışmaları verilmiştir.

İlk olarak Saafi, Nadjai ve arkadaşları tarafından (Ashrafi et al., 2017; Nadjai et al., 2005; Saafi, 2002) CFRP malzemelerin çekme dayanımlarında meydana gelen değişimler Denklem 1'de

gösterilmiştir. Denklemden f_t ifadesi T sıcaklığında donatılarda kalan çekme dayanımını ve f_u oda sıcaklığındaki (koşullandırılmamış numunelerdeki) çekme dayanımını ifade etmektedir. Ancak önerilen denklemden görüldüğü gibi tek değişken parametre sıcaklıktır. Malzemede 100 °C'ye kadar herhangi bir değişim olmadığı kabul edilmiş ve dayanımdaki değişimin 0 olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni 100°C'nin ortalama camsı geçiş sıcaklığına denk gelmesinden kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Genelde camsı geçiş sıcaklığına kadar CFRP donatılarda önemli bir dayanım kaybı olmadığı düşünülmektedir. Ayrıca denklemden, 475 °C'den yüksek sıcaklıklarda CFRP donatılarda dayanım kalmadığı kabul edilmiştir.

$$\frac{f_t}{f_u} = \begin{cases} 1 & , & 0 \leq T < 100 \\ 1,267 - 0,00267T & , & 100 \leq T < 475 \\ 0 & , & 475 \leq T \end{cases} \quad (1)$$

Wang (K. Wang et al., 2011) paslanmaz çelikle yapılan yangın deneyleri sonucunda önerilen bir denklemi (Chen & Young, 2006) modifiye ederek CFRP malzemeler için uyarlamış ve Denklem 2'de vermiştir.

$$\frac{f_t}{f_u} = X - \frac{(T - Y)^a}{Z} \quad (2)$$

Her sıcaklık aralığı için X,Y,Z ve a katsayıları değişmektedir. Wang çalışmayı 3 bölgeye ayırmaktadır. İlk kısım 22-150 °C arasını, ikinci kısım 150-420 °C ve son kısım 420-706 °C arasını temsil etmektedir. Wang'ın deneysel çalışması CFRP levhalarla yapıldığından bu sıcaklık aralıklarını tercih ettiği düşünülmektedir. Farklı sıcaklıklara göre oluşan yeni denklem aşağıda (Denklem 3) verilmiştir.

$$\frac{f_t}{f_u} = \begin{cases} 22 \leq T(^{\circ}\text{C}) < 150 & , & 1 - \frac{(T-22)^{0,9}}{200} \\ 150 \leq T(^{\circ}\text{C}) < 420 & , & 0,59 - \frac{(T-150)^{0,7}}{490} \\ 420 \leq T(^{\circ}\text{C}) < 706 & , & 0,48 - \frac{(T-420)^{1,8}}{76000} \end{cases} \quad (3)$$

Son olarak Mouritz ve Gibson (Mouritz & Arthur, 2007) tarafından Denklem 4 önerilmiştir. Önerilen denklemden P(t) mekanik özelliği, Rⁿ güç kanunu faktörünü ifade etmektedir. Gerilme dayanımının esas olarak polimer reçinenin ayrışmasından sonra elyafların dayanımına bağlı olmasından dolayı çekme dayanımı için n=0 kabul edilmiştir.

$$P(T) = \left(\frac{Pu+Pr}{2} - \frac{Pu-Pr}{2} \tanh(k(T - T'g)) \right) R^n \quad (4)$$

Çalışmada Tg sıcaklığı mekanik dayanımın %50 azaldığı kritik sıcaklık, k gevşeme derecesini veren bir parametredir. Pu ve Pr sırasıyla bu özelliğin serbest (düşük sıcaklık) ve gevşek (yüksek sıcaklık) değerleridir. Denklem basitleştirilerek Denklem 5'teki halini almaktadır (Yu & Kodur, 2014).

$$F(T) = \left(\frac{1+\frac{Pr}{Pu}}{2} - \frac{1-\frac{Pr}{Pu}}{2} \tanh(k(T - T'g)) \right) \quad (5)$$

Görüldüğü gibi bu denklem sadece sıcaklığa bağlı değildir. Birçok parametreyi içerdiğinden her bir donatı için ayrı ayrı hesap edilmektedir.

3. CFRP Donatı Özellikleri

Bu çalışmada literatürde CFRP donatılarda yüksek sıcaklıklarda meydana gelen dayanım kayıplarının deneysel olarak araştıran 5 çalışmacının verileri kullanılarak matematiksel modelle kıyaslanmıştır. Parametre farklılıkları dikkate alınarak farklı özelliklerdeki donatılar tercih edilmiştir. Çıplak halde yüksek sıcaklıklara tabi tutulan numunelerin yanı sıra betonla birlikte yüksek sıcaklıklara tabi tutulan numuneler de tercih edilerek formülasyondaki analizlerin daha kapsayıcı olması istenmiştir. Çalışmalarda epoksi ve vinilester matris malzeme, farklı donatı çapları, farklı yüzey şekillendirmeleri bulunmaktadır. Lif oranları hacimce olarak verildiyse "h" harfiyle belirtilmiştir. Çalışmada kütlece veya hacimce olduğu ifade edilmemişse herhangi ifade konulmamıştır. Donatılar isimlendirilirken lif adı, matris adı ve çap uzunluğu dikkate alınmıştır. Eğer lif, matris ve çapları aynı ise yüzey şekillerinin baş harfi isimlendirmeye eklenmiştir. Beton içerisindeki donatıların sıcaklığa tabi tutulduğunu ifade etmek için başa "B" harfi eklenmiştir.

Yüksek sıcaklık çalışmaları genellikle transient state ve steady state olarak iki şekilde yapılmaktadır. Transient state deneylerinde yüksek sıcaklıklara tabi tutulan numuneler aynı zamanda yük etkisindedir. Steady state deneylerinde ise öncelikle sabit sıcaklık verilir daha sonra yüklemeye tabi tutulmaktadır. Bu çalışmada belirtilen bu ayırım dikkate alınmamıştır.

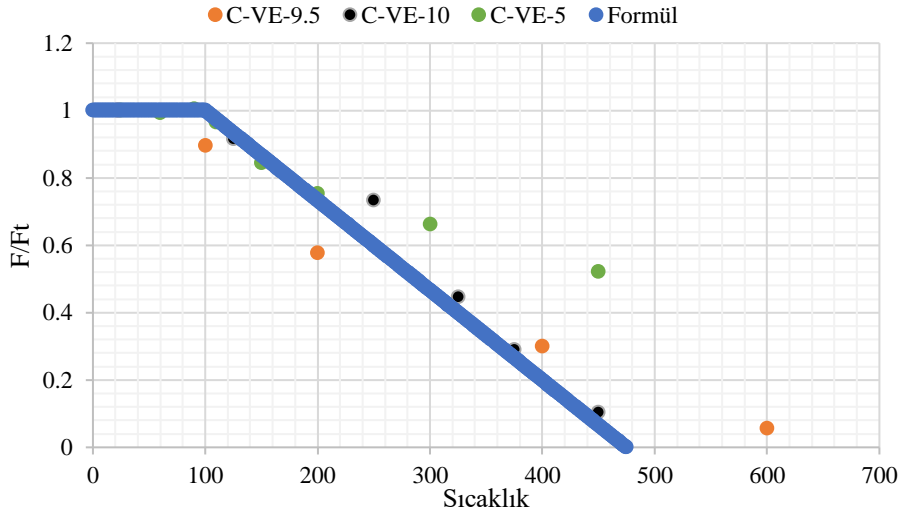
Tablo 1. CFRP donatıların fiziksel ve mekanik özellikleri

Referans	İsimlendirme	Lif	Matris	Çap (mm)	Çekme Dayanımı (O/S) (MPa)	Yüzey	Lif oranı %
(Ashrafi et al., 2017)	C-EP-5-S	Karbon	EP	5	2138	Sarmal sarılı	75(h)
(Ashrafi et al., 2017)	C-EP-5-Y	Karbon	EP	5	1905	Yivli	85(h)
(Ashrafi et al., 2017)	C-VE-5	Karbon	VE	5	1632	Yivli	85(h)
(Y. C. Wang et al., 2007)	C-VE-9,5	Karbon	VE	9,5	1270	Kum kaplama	58
(Rami Hamad et al., 2017)	C-VE-10	Karbon	VE	10	1572	Kum kaplama	70 (h)
(Yu & Kodur, 2014)	C-N-6,4	Karbon	-	6,4	1577	yok	60
(Najafabadi et al., 2019)*	B-C-EP-4	Karbon	EP	4	2015	Sarmal sarılı	75
(Najafabadi et al., 2019)*	B-C-EP-5	Karbon	EP	5	1945	Sarmal sarılı	75

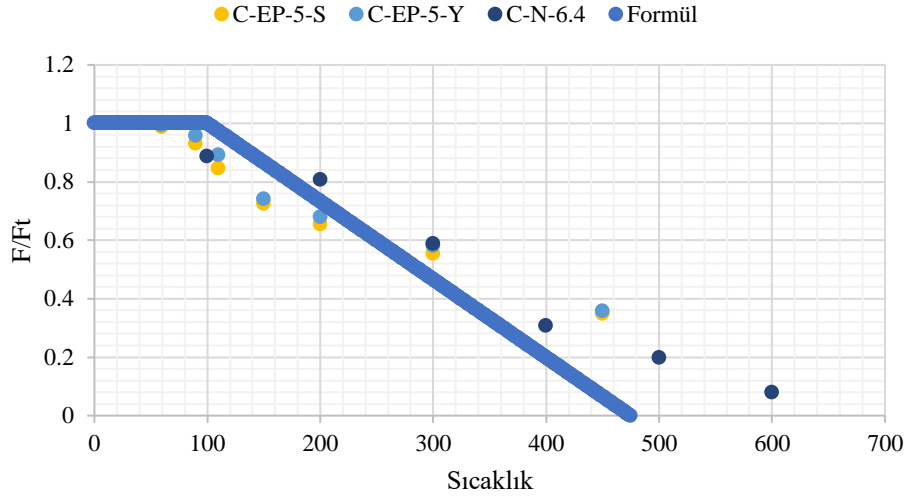
O/S: Oda sıcaklığındaki çekme dayanımı ,h: hacimce VE: Vinilester, EP: Epoksi, * Çevresi betonla kaplı donatılar

4. Model Sonuçları

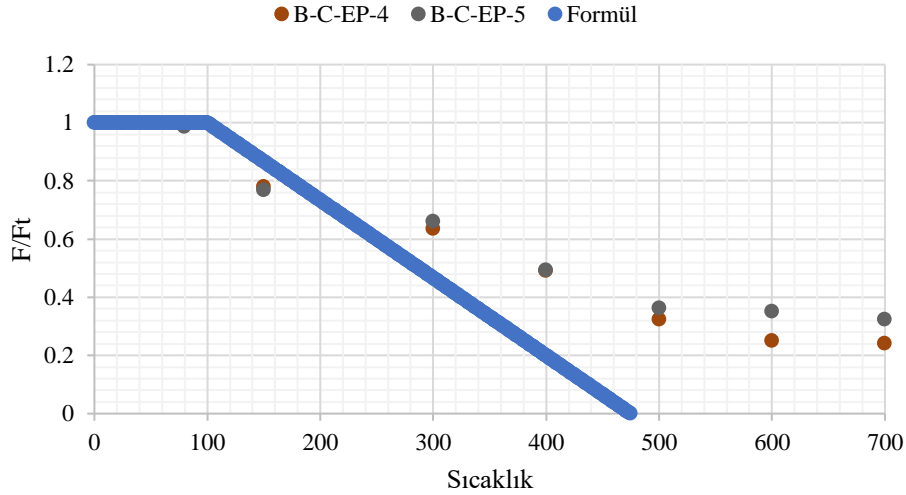
Saafi (Saafi, 2002)) tarafından önerilen Denklem 1'deki ifadeler dikkate alınarak oluşturulan f_t/f_u değerleri deneysel çalışmalarla karşılaştırılarak Şekil 2-4'te verilmiştir.



Şekil 2. Saafi'nin önerdiği denklemin vinilester matrisli ve çapları farklı donatıların deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması



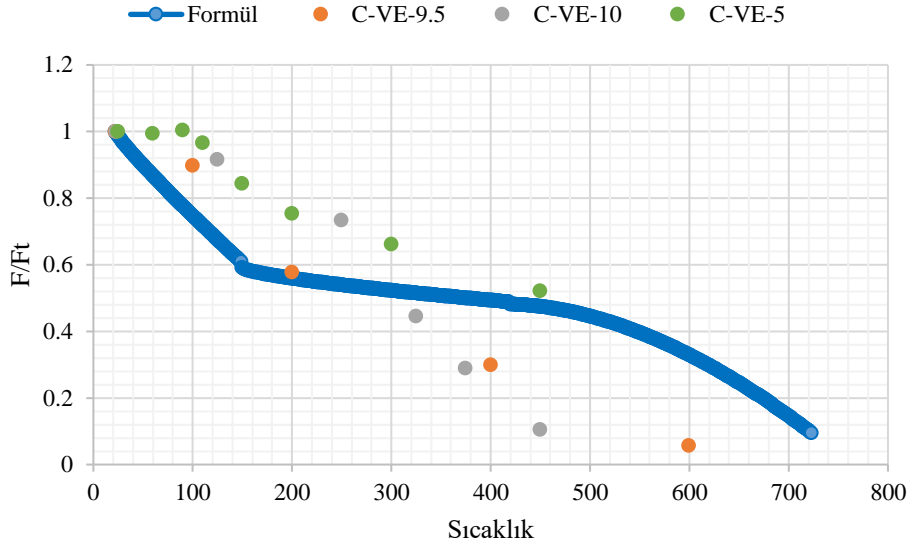
Şekil 3. Saafi'nin önerdiği denklemin epoksi matrisli ve farklı yüzeyli donatıların deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması



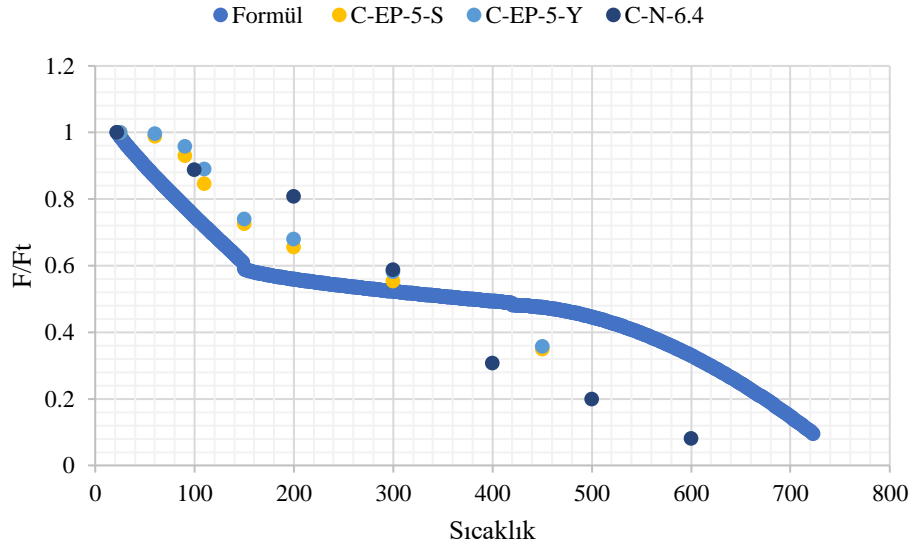
Şekil 4. Saafi'nin önerdiği denklemin epoksi matrisli ve beton içindeki donatıların deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması

100 °C öncesi ve 475°C sonrası sabit olup, ara değerler sıcaklıkla değiştiğinden dolayı denklem tek tip değişim senaryosu sunmaktadır. Bu senaryoya 100°C'ye kadar deneysel çalışmalar uyum göstermekle birlikte 100°C'den sonra denklem lineer olarak azaldığından deneysel çalışmalarla uyumu azalmaktadır. Bu denkleme en yakın değişimi C-VE-10 donatısı göstermektedir. Çalışmada uyumluluğun tespiti için regresyon ve korelasyon analizi yapılmış, regresyon sonuçları (R^2) 0,90-0,98 arasındayken, korelasyon sonuçları 0,95-0,99 aralığında değişmektedir.

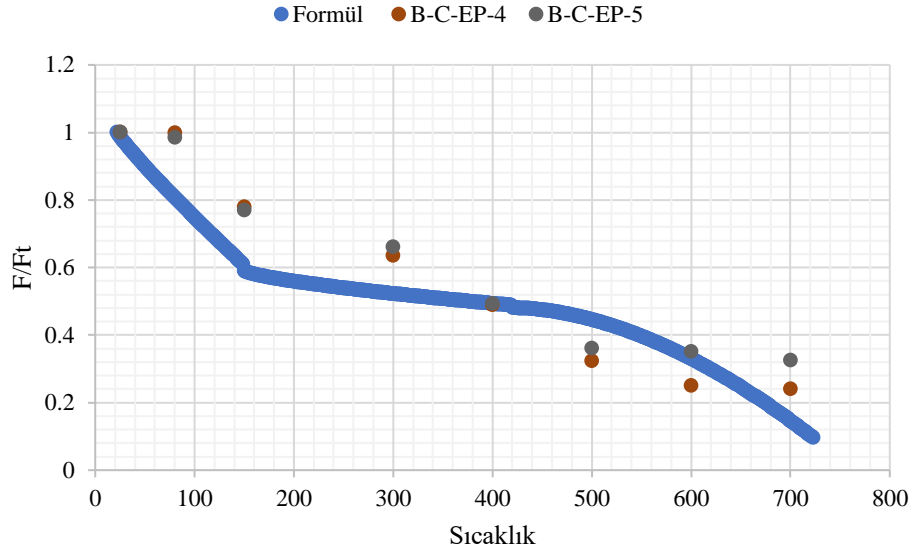
Wang (K. Wang et al., 2011) tarafından (Denklem 3) elde edilen denklemin literatür ile karşılaştırılması Şekil 5-7'de verilmiştir.



Şekil 5. Wang'ın önerdiği denklemin vinilester matrisli ve çapları farklı donatıların deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması



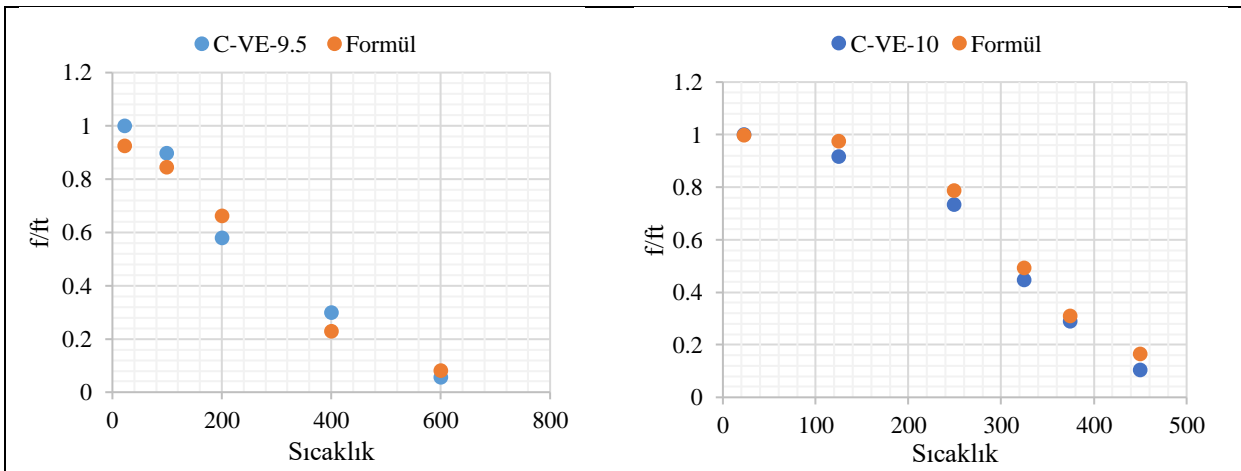
Şekil 6. Wang'ın önerdiği denklemin epoksi matrisli ve farklı yüzeyli donatıların deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması

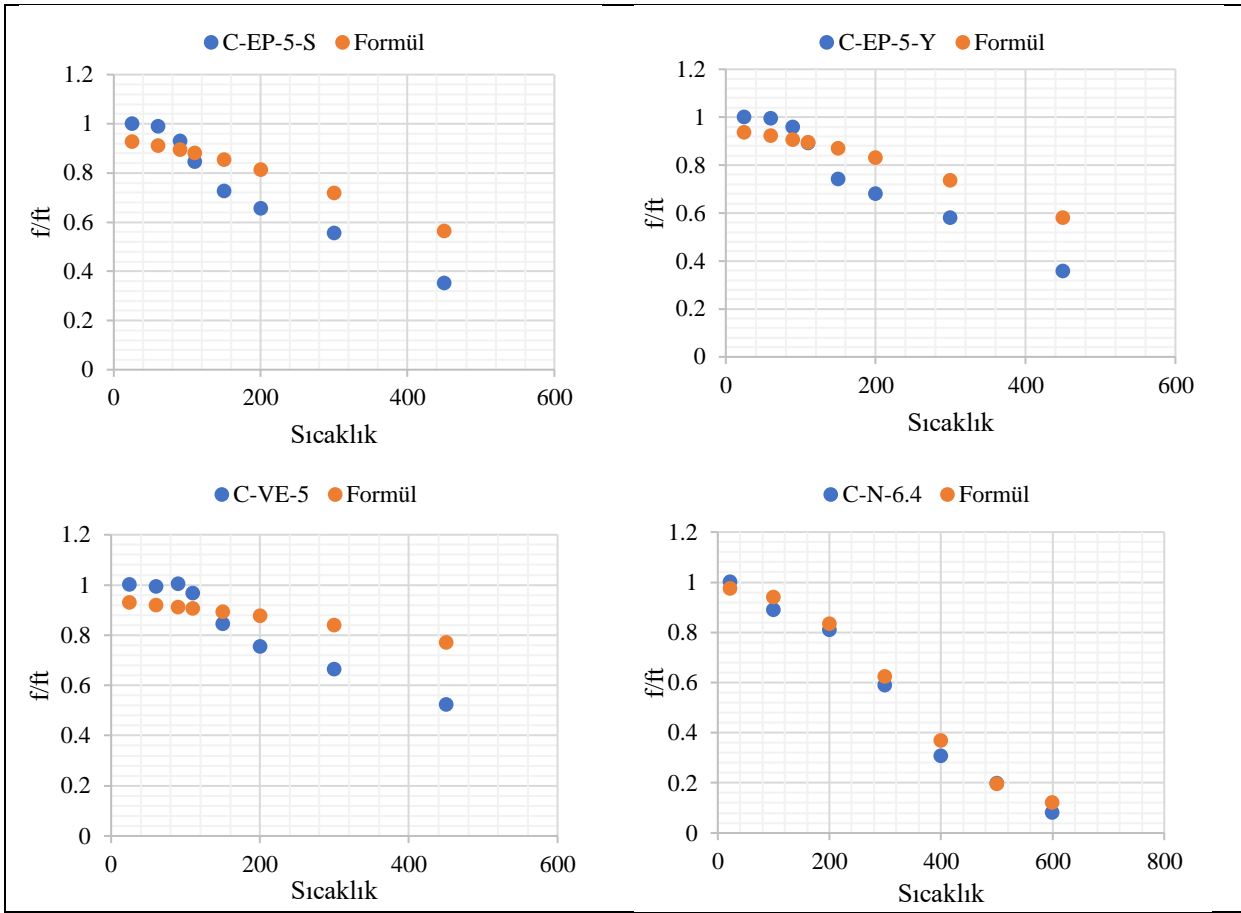


Şekil 7. Wang'ın önerdiği denklemin epoksi matrisli ve beton içindeki donatıların deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması

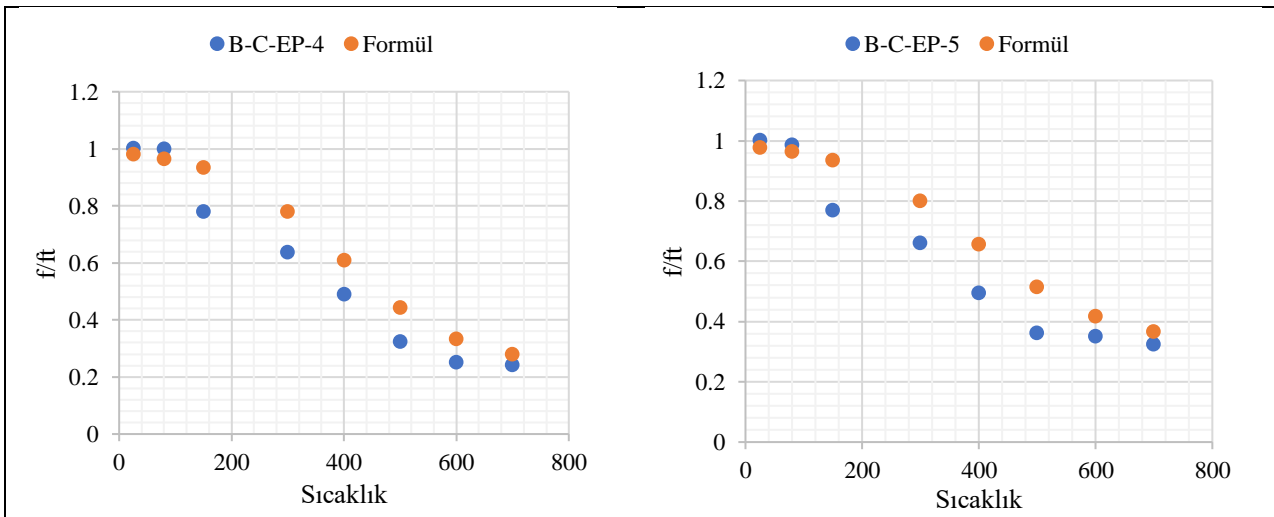
Oluşturulan grafikler sonucunda her bir donatı için regresyon ve korelasyon analizi yapılmıştır. R^2 değerleri 0,63 ve 0,91 arasında değişirken, korelasyon değerleri 0,79 ve 0,95 arasında değişmektedir. Bu çalışmaya en yakın değerleri C-VE-9,5 donatısının verdiği yapılan analiz sonucunda görülmüştür. Saafi'nin çalışması 475°C'den sonraki sıcaklık değişimlerini dikkate almaması yapılan çalışmanın eksikliğini ifade etmektedir. Yapılan deneyler sonuçlarından da görüldüğü gibi 475°C'den sonra da mekanik dayanımlarının bir kısmını korumaktadırlar.

Denklem 5'e göre elde edilen denklemin her bir literatürdeki çalışma için karşılaştırılması Şekil 8-9'da verilmiştir.





Şekil 8. Denklemler 5 sonuçları ile CFRP donatılarının deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması



Şekil 9. Denklemler 5 sonuçları ile betona gömülmüş CFRP donatılarının deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması

Şekil 8 ve 9'da görüldüğü gibi değerler birbirine çok büyük oranlarda örtüşmektedir. Bu denklem R^2 değerleri 0,92-1 arasında korelasyon değerleri ise 0,95-1 arasında değişkenlik göstermektedir. C-VE-10 ve C-N-6,5 donatıları çok büyük oranda örtüşmektedir. Ancak bu denklemde k katsayısı regresyon analizi yardımıyla elde edilmekte ve bu nedenle 5 numaralı denklem modeliyle elde edilen sonuçların korelasyon ve regresyon değerlerinin yüksek olması normal kabul

edilmiştir. Wang'ın çalışmasının güvenilirlik sınırının ($R^2=0,95$) kabulü düşünüldüğünde bu oranın çok daha altında kaldığı Saafi'nin çalışmasında ise 475°C 'den sonrasının hesaba katılmamış olması bu matematiksel denklemlerin kullanımlarını sorgulatmaktadır.

5. Yeni Matematiksel Denklem Önerisi

Bu bölümde, literatürdeki CFRP (karbon fiber takviyeli polimer) donatılarının yüksek sıcaklıklardaki çekme dayanımındaki değişimlerle ilgili yeni bir matematiksel model önerisi sunulmuştur. Model, deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin titiz bir analizine dayanmaktadır. Literatürdeki deneysel veriler, korelasyon ve regresyon analizleriyle incelenerek değerlendirilmiştir. Çalışmada, 60 dereceye kadar olan sıcaklık aralığında CFRP donatıların çekme dayanımlarında kayıp olmadığı kabul edilmiştir. Bu durum, literatürdeki deneysel bulgularla uyumludur, zira deneysel veriler de 60 dereceye kadar ihmal edilebilir bir dayanım kaybının olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, 60 dereceden sonraki sıcaklık aralığı için, deneysel çalışmaların sonuçları 2. dereceden polinom şeklinde bir eğim şeklinde bir azalma göstermiştir. Regresyon analizi sonuçlarından elde edilen katsayılar kullanılarak yeni bir formül geliştirilmiştir. Bu önerilen matematiksel model, yüksek sıcaklık altındaki CFRP donatıların çekme dayanımını daha yakın bir şekilde tahmin etme potansiyeline sahiptir ve inşaat mühendisliği alanında önemli uygulamalara katkı sağlayabilecek niteliktedir (denklem 6).

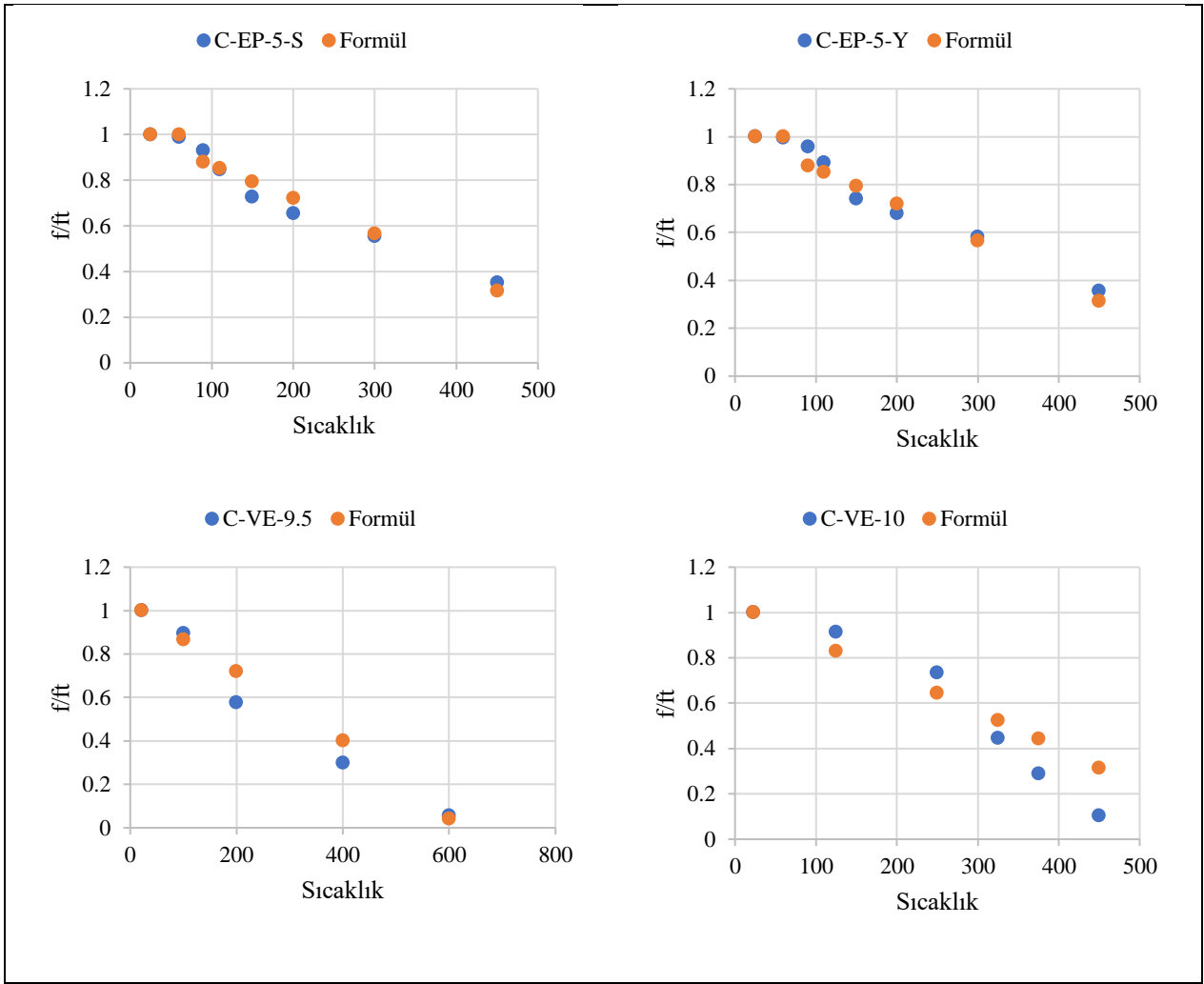
$$T \begin{cases} \leq 60^\circ\text{C} , & 1 \\ > 60^\circ\text{C} , & 1 - \alpha T^2 - \beta T \end{cases} \quad (6)$$

Denklemden α, β sabit katsayıları ve T Celsius cinsinden sıcaklığı ifade etmektedir. α, β sabit katsayılarının değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. α ve β sabit katsayılarının değerleri

	α	β
CFRP	5×10^{-7}	0,0013

Denklem 6 ile hesaplanan değerler ve deneysel çalışmalardan elde edilen değerlerin karşılaştırılmasının grafiksel ifadesi Şekil 10' da verilmiştir.



Şekil 10. Denklem 6 sonuçları ile CFRP donatıların deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması

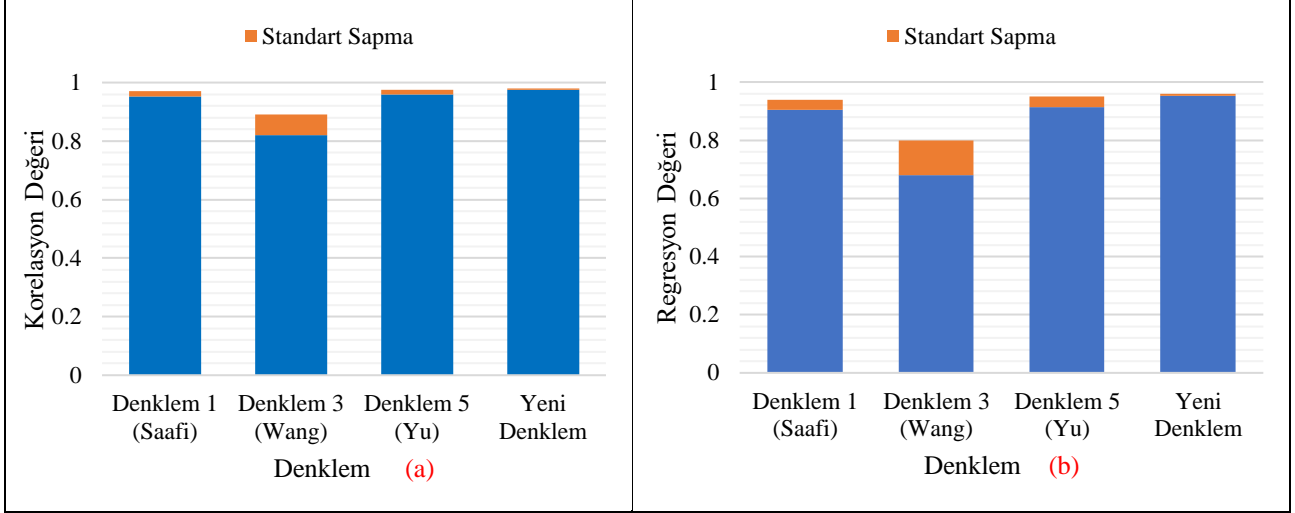
Çalışma sonucunda tüm hesaplamalar için korelasyon değeri 0,97-0,98, R^2 değeri ise C-VE-10 donatısı için 0,95 ,C-VE-9,5 C-EP-5-Y donatıları için 0,96 ve C-EP-5-S donatısı için 0,97 olduğu tespit edilmiştir. Bu değerlerin güvenlik sınırının üstünde kaldığı ve denklemin uygulanabilir olduğu görülmektedir.

Literatürde Ashrafi ve ark., 2017, Y. C. Wang ve ark., 2007, Rami Hamad ve ark., 2017 tarafından yapılan deneysel çalışmalar ile literatürdeki formüllerin ve yeni formülün uygunluğunu regresyon-korelasyon analizleriyle karşılaştırılmalı olarak Tablo 3'te ve Şekil 11'de verilmiştir.

Tablo 3. Regresyon ve korelasyon değerlerinin karşılaştırması

Regresyon (R^2)				
	Denklem 1 (Saafi)	Denklem 3 (Wang)	Denklem 5 (Yu)	Yeni Denklem
C-VE-9.5	0,96	0,91	0,97	0,96
C-VE-10	0,98	0,63	0,99	0,95
C-EP-5-S	0,9	0,85	0,92	0,97
C-EP-5-Y	0,92	0,82	0,92	0,96
Ortalama	0,94	0,8	0,95	0,96
Standart Sapma	0,036	0,121	0,035	0,008
Korelasyon				
C-VE-9.5	0,98	0,95	0,98	0,98

C-VE-10	0,99	0,79	0,99	0,97
C-EP-5-S	0,95	0,92	0,96	0,98
C-EP-5-Y	0,96	0,91	0,96	0,98
Ortalama	0,97	0,89	0,975	0,98
Standart Sapma	0,018	0,070	0,015	0,005



Şekil 11. Korelasyon (a) -regresyon (b) değerleri ve standart sapmaları

Denklemler 1 için elde edilen yüksek regresyon değeri 0,94 ve düşük standart sapma 0,036 ile bu denklemin deneysel verileri iyi açıkladığını göstermektedir. Benzer şekilde, Denklemler 5'te yüksek bir regresyon değeri 0,95 ve düşük standart sapma 0,035 ile dikkat çekerken Denklemler 3, regresyon değeri 0,8 ve standart sapma 0,121 açısından diğer denklemlere göre daha düşük bir doğruluk payına sahiptir. Bu bulgular, mevcut literatürdeki matematiksel modellerin deneysel verilerle karşılaştırılabilir olduğunu göstermektedir. Ancak, bu sonuçlar ışığında yeni bir matematiksel model önerilmiş ve bu model, literatürden alınan aynı deneysel verilerle karşılaştırıldığında daha yüksek bir regresyon değeri 0,96 ve düşük standart sapma 0,008 ile öne çıkmıştır. Bu sonuçlar, yeni denklemin mevcut literatürdeki modellere göre daha iyi bir uyum sağladığını ve gelecekteki çalışmalarda dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Bu bağlamda, araştırmanın bulguları, matematiksel modelleme alanında yeni bir perspektif sunmaktadır.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada literatürde deneysel olarak yapılan çalışma sonuçları ile literatürde bu konuda yapılan matematiksel model çalışmalarında önerilen denklemler kıyaslanarak alternatif bir denklemler önerisi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenerek verilmiştir:

- Sıcaklık arttıkça dayanımda düşüş meydana geldiği ve bu düşüşlerin parabolik olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle yeni denklem önerisinde bu parabolik azalma dikkate alınarak oluşturulmuştur.
- 60°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, çekme dayanımında nispeten az miktarda kayıp meydana gelmekte ve bu düşüşler, genellikle T_g sıcaklıklarına kadar (100-125°C) devam etmektedir. Ancak, bu sıcaklık eşiği geçildikten sonra, düşüş hızının arttığı tespit edilmiştir. Yapılan analizler, literatürde bulunan hızlandırılmış yaşlanma deneylerinin (accelerated aging) 60°C sıcaklığını kullanma tercihlerini de desteklemiştir. 60°C sıcaklık seviyesinin tercih edilmesinin temel nedenleri arasında, FRP donatıların mekanik ve fiziksel özelliklerine zarar vermemesi ve termal yüklemenin de yapılabildiği sınır sıcaklık olmasıdır.
- Bu malzemelerde diğer önemli nokta olan T_c kritik sıcaklığı, donatı dayanımının %50'sini kaybettiği sıcaklık, iki matris türü için de 300-400 °C arasında gerçekleştiği bu sıcaklık aralığının donatı için çok önemli olduğu görülmektedir.
- Literatürde bulunan üç denklem arasından Wang'ın denkleminin yeterlilik açısından tartışılır olduğu, Saafi'nin denkleminde ise 475 °C'den sonrasında dayanımın 0 kabul edilmesi deneysel çalışmalarla uymamaktadır.
- Gelecekteki çalışmalarda, GFRP donatılar için yeni bir denklem geliştirilebilir ve yüksek sıcaklıklarda GFRP donatılar incelenerek CFRP donatılarla kıyaslanabilir.
- Elde edilen sayısal sonuçlar, mevcut literatürdeki matematiksel modellerin deneysel verilere uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır. Denklem 1 ve Denklem 5, yüksek ortalama regresyon değerleri sırasıyla ortalama 0,94 ve 0,95 ve düşük standart sapmalar sırasıyla 0,036 ve 0,035 ile dikkat çekmektedir. Ancak, Denklem 3, ortalama regresyon değeri 0,8 ve standart sapma değeri 0,121 bakımından diğer denklemlere göre daha düşük bir doğruluk payına sahiptir.
- Denklem 1 ve Denklem 5, yüksek ortalama korelasyon değerleri sırasıyla 0,97 ve 0,975 ve düşük standart sapmalar sırasıyla 0,018 ve 0,015 ile dikkat çekmektedir. Ancak, Denklem 3, ortalama korelasyon değeri 0,89 ve standart sapma değeri 0,070 bakımından diğer denklemlere göre daha düşüktür.
- Bu sonuçlar ışığında, yeni bir matematiksel model önerilmiş ve bu model, literatürden alınan aynı deneysel verilerle karşılaştırıldığında daha yüksek bir ortalama regresyon değeri 0,96 ve düşük standart sapma 0,008 ; yüksek ortalama korelasyon değeri 0,98 ve düşük standart sapma 0,005 ile öne çıkmıştır. Bu, yeni denklemin mevcut literatürdeki modellere göre daha iyi bir uyum sağladığını göstermektedir.
- Bu bağlamda, gelecekteki çalışmalarda bu yeni matematiksel modelin daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesi ve kullanılması önerilmektedir. Bu model, matematiksel modelleme alanında önemli bir ilerleme sunmaktadır ve deneysel verileri daha etkili bir şekilde

açıklayabilir. Bu çalışma, matematiksel modelleme alanındaki araştırmacıların daha iyi sonuçlar elde etmelerine yardımcı olabilir.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- ACI. (2015). “(American Concrete Institute). *Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. ACI 440.1R-15. Farmington Hills, MI.*”
- Ashrafi, H., Bazli, M., Najafabadi, E. P., & Vatani Oskouei, A. (2017). The effect of mechanical and thermal properties of FRP bars on their tensile performance under elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 157, 1001–1010. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.09.160>
- Aydın, F., & Arslan, Ş. (2021). Investigation of the durability performance of FRP bars in different environmental conditions. *Advances in Concrete Construction*, 12(4), 295–302. <https://doi.org/10.12989/acc.2021.12.4.295>
- Bazli, M., & Abolfazli, M. (2020). Mechanical Properties of Fibre Reinforced Polymers under Elevated Temperatures: An Overview. *Polymers* 2020, Vol. 12, Page 2600, 12(11), 2600. <https://doi.org/10.3390/POLYM12112600>
- Bisby, L. A., & Kodur, V. K. R. (2007). Evaluating the fire endurance of concrete slabs reinforced with FRP bars: Considerations for a holistic approach. *Composites Part B: Engineering*, 38(5–6), 547–558. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2006.07.013>
- Cerniauskas, G., Tetta, Z., Bournas, D. A., & Bisby, L. A. (2020). Concrete confinement with TRM versus FRP jackets at elevated temperatures. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 53(3), 1–14. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01492-x>
- Chen, J., & Young, B. (2006). Stress–strain curves for stainless steel at elevated temperatures. *Engineering Structures*, 28(2), 229–239. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2005.07.005>
- Chowdhury, E. U., Eedson, R., Bisby, L. A., Green, M. F., & Benichou, N. (2011). Mechanical Characterization of Fibre Reinforced Polymers Materials at High Temperature. *Fire Technology*, 47(4), 1063–1080. <https://doi.org/10.1007/S10694-009-0116-6/FIGURES/13>
- Hajiloo, H., Green, M. F., & Gales, J. (2018). Mechanical properties of GFRP reinforcing bars at high temperatures. *Construction and Building Materials*, 162, 142–154. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.12.025>
- Katz, A., Berman, N., & Bank, L. C. (1999). Effect of high temperature on bond strength of FRP bars. *Journal of Composites for Construction*, 3(2), 73–81. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1999\)3:2\(73\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1999)3:2(73))
- Khaneghahi, M. H., Najafabadi, E. P., Shoaie, P., & Oskouei, A. V. (2018). Effect of intumescent paint coating on mechanical properties of FRP bars at elevated temperature. *Polymer Testing*, 71(May), 72–86.

<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.08.020>

- Kumahara, S., Masuda, Y., Tanano, H., & Shimizu, A. (1993). Tensile Strength of Continuous Fiber Bar Under High Temperature. *Special Publication*, 138, 731–742. <https://doi.org/10.14359/3954>
- Mouritz, A. P., & Arthur, G. G. (2007). *Fire properties of polymer composite materials*. Springer Science & Business Media.
- Nadjai, A., Talamona, D., & Ali, F. (2005). Fire performance of concrete beams reinforced with FRP bars. *Proceeding of the Int Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*, 401–410.
- Najafabadi, E. P., Oskouei, A. V., Khaneghahi, M. H., Shoaie, P., & Ozbakkaloglu, T. (2019). The tensile performance of FRP bars embedded in concrete under elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 211, 1138–1152. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.03.239>
- Nguyen, P. L., Hong Vu, X., & Ferrier, E. (2019). Thermo-mechanical performance of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), with and without fire protection material, under combined elevated temperature and mechanical loading conditions. *Composites Part B: Engineering*, 169(April 2018), 164–173. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.03.075>
- Nigro, E., Bilotta, A., Cefarelli, G., Manfredi, G., & Cosenza, E. (2012). Performance under Fire Situations of Concrete Members Reinforced with FRP Rods: Bond Models and Design Nomograms. *Article in Journal of Composites for Construction*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000279](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000279)
- Rafi, M. M., Nadjai, A., Ali, F., & O'Hare, P. (2011). Evaluation of Thermal Resistance of FRP Reinforced Concrete Beams in Fire. *Journal of Structural Fire Engineering*, 2(2), 91–107.
- Rami Hamad, J. A., Megat Johari, M. A., & Haddad, R. H. (2017). Mechanical properties and bond characteristics of different fiber reinforced polymer rebars at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 142, 521–535. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.03.113>
- Rosa, I. C., Firmo, J. P., Correia, J. R., & Barros, J. A. O. (2019). Bond behaviour of sand coated GFRP bars to concrete at elevated temperature – Definition of bond vs. slip relations. *Composites Part B: Engineering*, 160, 329–340. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.10.020>
- Saafi, M. (2002). Effect of fire on FRP reinforced concrete members. *Composite Structures*, 58(1), 11–20. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00045-4](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00045-4)
- Sharifianjazi, F., Zeydi, P., Bazli, M., Esmailkhanian, A., Rahmani, R., Bazli, L., & Khaksar, S. (2022). Fibre-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Members under Elevated Temperatures: A Review on Structural Performance. *Polymers*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/polym14030472>
- Wang, K., Young, B., & Smith, S. T. (2011). Mechanical properties of pultruded carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) plates at elevated temperatures. *Engineering Structures*, 33(7), 2154–2161. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2011.03.006>
- Wang, Y. C., Wong, P. M. H., & Kodur, V. (2007). An experimental study of the mechanical properties of fibre reinforced polymer (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures. *Composite Structures*, 80(1), 131–140. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2006.04.069>
- Yoo, S. J., Kim, Y. H., Yuan, T. F., & Yoon, Y. S. (2022). Evaluation of residual bond behavior of CFRP and steel bars embedded in UHPC after exposure to elevated temperature. *Journal of Building Engineering*, 56, 104768. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104768>
- Yoo, S. W., & Choo, J. F. (2022). Behavior of CFRP-reinforced concrete columns at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 358(October), 129425. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129425>
- Yu, B., & Kodur, V. (2014). Effect of temperature on strength and stiffness properties of near-surface mounted FRP reinforcement. *Composites Part B: Engineering*, 58, 510–517. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2013.10.055>