



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 17.08.2022
Kabul Tarihi : 03.05.2023

Received Date : 17.08.2022
Accepted Date : 03.05.2023

GFRP DONATILI BETONARME BİR YAPININ PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRMALI İNCELENMESİ

COMPARATIVE INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF A GFRP REINFORCED CONCRETE STRUCTURE

Elif TOPLU^{*1} (ORCID: 0000-0001-8019-560X)
Şeymanur ARSLAN² (ORCID: 0000-0001-7012-3338)
Osman KIRTEL³ (ORCID: 0000-0001-6451-0323)
Ferhat AYDIN⁴ (ORCID: 0000-0001-9472-8366)

^{1,2,3,4} Kahramanmaraş Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Elif TOPLU, eliftoplu@subu.edu.tr

ÖZET

Son yıllarda liflerle güçlendirilmiş polimerler (FRP), inşaat alanında kullanılan yeni nesil yapı malzemelerinden biri olmuştur. FRP malzemelerin kimyasallara ve korozyona karşı dayanıklılığının yüksek olması nedeniyle çelik donatıya alternatif olarak kullanımı özellikle yurt dışında köprülerde, istinat duvarlarında ve korozyonun sorun teşkil ettiği uygulamalarda tercih edilmektedir. FRP malzemelerin yapı elemanlarında donatı olarak kullanımı ACI 440.1R-15 standartlarına göre yapılmaktadır. Ancak Türkiye’de henüz FRP donatılar ile ilgili bir standart geliştirilmemiştir. FRP türleri arasında ekonomik anlamda en çok tercih edilen donatı türü cam liflerle güçlendirilmiş polimer (GFRP) donatılardır. Bu çalışmada GFRP malzemenin bir yapıda donatı olarak kullanımının çelik donatılara göre yapısal performansı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada, zaman tanım alanında analiz ve statik itme analizi olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Analizlerde ETABS19 yazılımı kullanılmış ve TBDY2018 performans kriterleri hesaplamalarda dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda, çelik donatılı yapı ile GFRP donatılı yapının zaman tanım alanı analizi sonucunda hasar seviyelerinin benzer olmasına rağmen kesit elemanlarındaki dönme oranlarında ve statik itme analizi sonucunda göçme mekanizmalarında farklılıklar gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: GFRP, statik itme, zaman tanım alanında analiz, doğrusal olmayan analiz, etkin kesit rijitliği

ABSTRACT

Fiber-reinforced polymers (FRP) have recently become one of the most widely used building materials in construction. Due to the high resistance of FRP materials to chemicals and corrosion, its use as an alternative to steel reinforcement is preferred especially in bridges, retaining walls and applications where corrosion is a problem. The use of FRP materials as reinforcement in construction elements is built according to ACI 440.1R-15 standards. However, a standard has not yet been developed for FRP reinforcements in Türkiye. Glass fiber reinforced polymer (GFRP) is the most preferred type of reinforcement among FRP types due to its cost. In this study, the structural performance of the use of GFRP bar as reinforcement in a structure compared to steel reinforcement was evaluated comparatively. The study consists of two stages, namely time history analysis and pushover analysis. ETABS19 software was used in the analyzes and was taken into account in TBDY2018 performance measurements. As a result of the study, although the damage levels of the steel-reinforced structure and the GFRP-reinforced structure were similar as a result of the time history analysis, differences were observed in the rotation rates of the section members and in the failure mechanisms as a result of the static thrust analysis.

Keywords:

GFRP, pushover, time history, non-linear analysis, effective stiffness

GİRİŞ

İleri yapı malzemeleri son 20 yılda mühendislik toplulukları tarafından ilgiyle karşılanmıştır (Ashrafi et al., 2016; Shamsheer Bahadur Singh, 2015). İnşaat alanında kullanılan ileri yapı malzemelerinden biri de liflerle güçlendirilmiş polimerlerdir (FRP). FRP malzemelerin inşaat sektöründe kullanılmasının kirişler, duvarlar, kolonlar ve döşemeler gibi betonarme elemanların yapısal performansını iyileştirmek için etkili bir teknik olduğu kanıtlanmıştır (Zhang et al. 2016). FRP donatılar (Şekil 1); hafiflik, yüksek dayanım, korozyon direnci ve elektrik yalıtkanlığı gibi avantajlara sahip olmaları nedeniyle çelik donatılarla ilişkili dayanıklılık sorunlarının ortadan kaldırılması için ideal malzemeler olarak görülmüşlerdir (Aydın and Arslan, 2021; Bazli et al., 2016; Zhang et al., 2016; Garcia-Espinel et al., 2015; Feng et al., 2014; Alves, El-Ragaby and El-Salakawy, 2010; Aiello, Leone et al., 2007; Hao et al., 2006). FRP malzemeler genellikle bir matris elemandan bir de lif türünden meydana gelmekte ve isimleri kullanıldığı liflere göre belirlenmektedir. Günümüzde en çok kullanılan karbon FRP (CFRP), aramid FRP (AFRP), cam FRP (GFRP) ve bazalt FRP (BFRP), inşaat endüstrisinin temel FRP türleri olarak bilinmektedir (Ghomi and El-Salakawy, 2019). FRP malzemeler ihtiyaca göre farklı kalıplarda, farklı üretim yöntemleriyle istenilen özelliklerde üretilmektedir. İnşaat alanında kumaş, profil, donatı ve ankraj yapı elemanları halinde üretilmekte ve kullanılmaktadır. Türkiye’de genellikle kumaş şeklinde onarım ve güçlendirme malzemesi olarak tercih edilmektedir. FRP malzemelerin profil ve donatı halinde kullanılmasıyla ilgili yönetmelik olmamasına karşın Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Bölüm 15.10’da lifli polimerlerin kiriş ve kolonlarda güçlendirme elemanı olarak kullanımına yer verilmiştir (AFAD, 2018). Araştırmacılar FRP donatıların betonarme yapılarda çelik donatı yerine kullanımı konusunda birçok açıdan çalışma yapmışlardır. Özellikle Amerika ve Kanada’da FRP donatıların köprü ve oto yollarda kullanıldığı çok sayıda uygulama ilgili standartlar kullanılarak düzenlenmiştir (ACI, 2015; CAN/CSA-S806-02, 2009).

Türkiye etkin deprem bölgesinde yer alması nedeniyle yapılar sürekli depreme maruz kalmaktadır. Büyük depremler sonucunda yapılarda büyük hasarlar meydana gelmektedir. Bu tehditler karşısında sismik yeterlilikle ilgili araştırmalar ivme kazanmıştır (Zengin and Usta, 2021). Çok sayıda araştırmacı 1960’lardan beri, çeşitli parametrelerin betonarme kiriş-kolonların sismik davranışı üzerindeki etkisini araştırmaktadır (Le-Trung et al. 2013; Kim and LaFave, 2007; Ehsani and Wight, 1985; Paulay et al., 1978; Hanson and Connor, 1967). GFRP donatıların süneklik sorunu özellikle sismik alanlardaki birçok yapısal uygulamada kullanılmalarını sınırlamaktadır. FRP donatılı betonarme yapılar, çelik donatılı betonarme yapılara göre önemli ölçüde az süneklik ve düşük enerji kapasitesine sahiptir (Youssef et al., 2019). Sismik enerjiyi yeterince sönmüleyemediğinden dolayı, beton yapılarda FRP donatıların kullanımı sınırlıdır (Harris et al., 1998).



Şekil 1. Nervürlü GFRP Donatılar

FRP donatılı betonarme yapı elemanlarının performanslarının araştırıldığı birçok deneysel çalışma bulunmaktadır (Tablo 1). Yapıların dinamik davranışı konusundaki çalışmalar incelendiğinde GFRP’li betonarme yapılara ait yapı bazındaki çalışmalara az sayıda rastlanılmıştır (Wu et al., 2022; Goldston et al., 2016; Harajli and Abouniaj, 2010; Lau and Pam, 2010; Guadagnini et al., 2006). Mojtaba Aliasghar et al., GFRP donatılı yapıların davranışını statik itme analizi ile değerlendirmiştir (Aliasghar-Mamaghani et al., 2018). Çalışma sonucunda GFRP donatılı moment çerçevelerin az katlı yapılarda iyi performans gösterdiğini, çelik donatılı moment çerçevesine göre daha yüksek

mukavemet sağladığı ifade edilmiştir. Aliasghar et al., çalışmalarında zaman tanım alanında analizlere yer vermemiştir. GFRP donatının hafif yapıda olması nedeniyle, yapıya gelecek olan taban kesme kuvvetlerinin azaltılmasında tasarım esasları yerine getirildiği sürece olumlu etki yapacağı belirtilmiştir.

Tablo 1. Eksantrik Olarak Yüklenmiş Dikdörtgen Kolonda Kullanılan GFRP Verileri (Tarawneh and Majdalaweyh, 2020).

Referans	$b \times h$ veya Çap., mm	f'_c , (MPa)	FRP tipi	FRP elastisite modülü, E_f (GPa)	FRP donatı oranı, ρ_f %
Xue et al.(Xue, Peng, and Fang 2018)	300 × 300	39	GFRP	39	1.34
Afifi et al. (Afifi et al. 2013)	300	42.9	GFRP	55.4	1.1–3.2
Elchalakani ve Ma (Elchalakani and Ma 2017)	260 × 160	32.75	GFRP	46.3	1.83
Tobbi et al.(Tobbi, Farghaly, and Benmokrane 2012)	350 × 350	32.6	GFRP	47.6–48.2	1.87-1.95
Guérin (Guérin et al. 2018)	405 × 405	42.3	GFRP	48.2–53.3	1.1

Başka bir çalışmada (Remennikov et al., 2016) statik yükleme altındaki GFRP donatılı betonarme kirişler, GFRP donatı kopması veya beton ezilmesi şeklinde iki farklı göçme mekanizmasına sahip olduğu belirtilmiştir. Kesit tasarımında yetersiz GFRP kullanımı, eğilme çatlaklarının oluşumu ve GFRP donatıların kopması şeklinde davranış göstermektedir. Çekme boyuna donatı oranları %1 ve %2 olan GFRP betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesini artırmada, göçmenin betonun mukavemeti tarafından yönetilmesinden dolayı (beton örtüsünün ezilmesi), beton mukavemetinin daha etkili olduğu ifade edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. GFRP Donatılı Kirişin Eğilme Deneyi Sonucunda Oluşan Hasar (Remennikov et al., 2016)

Doğrusal analizin, yapının bir deprem altındaki gerçek tepkisini temsil etmediği belirtilmektedir. Bir deprem altındaki yapının davranışını benzetmek için en doğru yaklaşım, doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizidir. Ancak çevrimsel doğrusal olmayan tepki ve deprem yer hareketine ihtiyaç duyduğu için çok karmaşık ve zaman almaktadır (Bhandari et al., 2018; Krawinkler, 2006). Öte yandan, statik itme analizi (pushover analizi), binanın depreme karşı doğrusal olmayan davranışını tahmin edebilen daha basit bir yöntem sağlamaktadır (Suwondo et al., 2021; Salihovic and Ademovic, 2018; Fajfar, 2000). Statik itme analizi; modal itme, ardışık modsal itme, üst sınır itme, kütle orantılı itme ve uyarlanabilir itme gibi farklı stratejiler aracılığıyla uygulanabilmektedir (Poursha et al., 2009; Kim and Kurama, 2008; Jan et al., 2004; Aydınoğlu, 2003; Chopra and Goel, 2002)

TBDY 2018'e göre doğrusal olmayan davranış şekil değiştirmeye göre tasarım ve şekil değiştirmeye göre performans değerlendirilmesi şeklinde ikiye ayrılmaktadır. Bir yapının doğrusal olmayan davranışı belirlenirken kesit analizleri yapılarak moment eğrilik diyagramları üretilmektedir. Bir kesitin eğriliği birim dönmeye karşılık gelmektedir. Birim dönmeler ise TBDY 2018'e göre göçmenin önlenmesi kontrollü hasar ve sınırlı hasar seviyelerine göre kolon ve kirişlerin aldığı hasar oranlarına göre sınıflandırması yapılmaktadır (Şekil 3). Sınırlı hasar seviyesinde plastik dönmelere izin verilmezken, kontrollü hasar bölgesi sınırı göçmenin önlenmesi performans sınırının %75'i kadardır. Plastik dönme oranları göçme öncesi performans düzeyi için denklem 1 ile hesap edilmektedir.

$$\theta_p^{(GÖ)} = \frac{2}{3} [(\phi_u - \phi_y) L_P \left(1 - 0.5 \frac{L_P}{L_S}\right) + 4.5 \phi_u d_b] \quad (1)$$

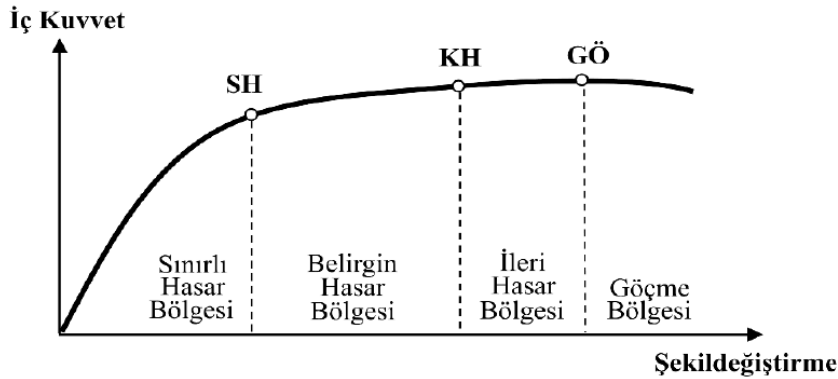
Denklem 1'de $\theta_p^{(GÖ)}$ göçmenin önlenmesi için izin verilen plastik dönme oranını, ϕ_u ve ϕ_y kesitin uzama ve akma eğriliğini, L_P plastik mafsalsal boyunu, L_S kesme açıklığını ve, d_b boyuna donatı çapını ifade etmektedir.

Doğrusal olmayan analizler sonucunda kesitlerde meydana gelen toplam dönmeler hesap edilmektedir. Bir kesitte meydana gelen toplam dönme ise akma dönmesi ile plastik dönmelerin toplamı şeklinde ifade edilmektedir (denklem 2). Bu nedenle TBDY 2018'e göre performans değerlendirme yapıldığında toplama dönme oranlarından akma dönme oranının çıkarılarak kontrol yapılması gerekmektedir.

$$\phi_t = \frac{\theta_t - \theta_y}{L_P} + \phi_Y \quad (2)$$

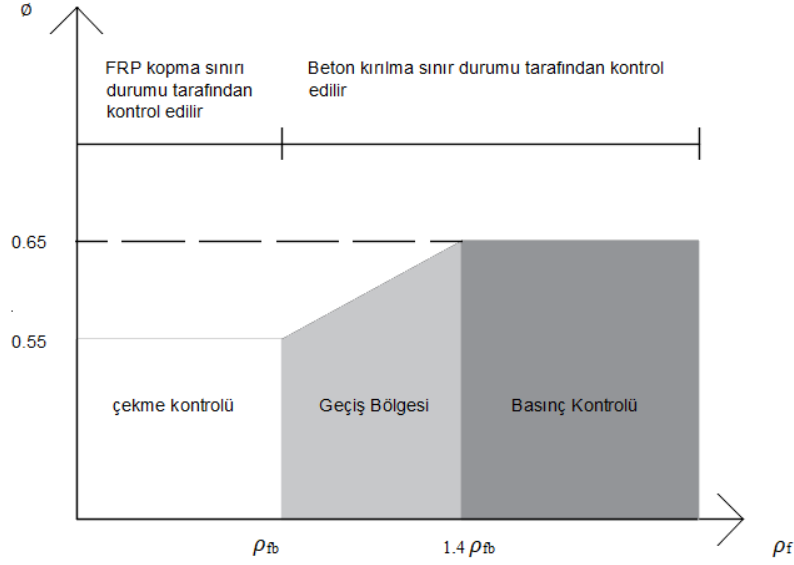
Denklem 2'de ϕ_t toplam eğrilik, ϕ_Y akma eğriliğini, θ_t toplam dönme oranını, θ_y akma dönme oranını ve L_P plastik mafsalsal boyunu ifade etmektedir.

Bir yapıda kirişlerin hasar durumuna bakıldığında sınırlı hasar durumunda kirişlerin en fazla %25'inin belirgin hasar bölgesine, kontrollü hasar durumunda kirişlerin en fazla %35'inin ileri hasar bölgesine göçmenin önlenmesi hasar durumunda ise kirişlerin en fazla %20'sinin göçme bölgesine geçmesine izin verilmektedir. Kolonlarda ise belirgin hasar, ileri hasar ya da göçme durumlarına göre kolonların kesme kuvveti katkı yüzdelere dayanarak farklı durumlara göre karar verilmektedir (TBDY, 2018).



Şekil 3. Hasar Bölgeleri.

ACI 440.1R-15'e (ACI, 2015) göre, FRP donatılarla güçlendirilmiş kirişlerin eğilme kapasitesi, betonun kırılması veya FRP kopması ile kontrol edilip edilmediğine bağlıdır. Kontrol sınır durumu, FRP donatı oranı ile dengeli donatı oranı karşılaştırılarak hesaplanır. ACI 440.1R-15'e göre Şekil 4'te donatı oranlarına göre kesit durumu kontrol edilmektedir.



Şekil 4. FRP Donatı Oranlarına Göre Dayanım Azaltma Kat Sayıları

Statik itme analizlerinde yapının her bir elemanı için kesir analizleri gerçekleştirilerek moment eğrilik ilişkileri tanımlanmaktadır. Statik itme analizinde doğrusal olmayan artımsal bir itme gerçekleştirilmektedir. Yapının kapasite eğrisinin tasarım spektrumu ile karşılaştırılarak doğrusal olmayan yer değiştirme talebi hesap edilebilmektedir. Bu çalışmada ise GFRP donatı ile çelik donatı karşılaştırılacağından sadece yapıların kapasite diyagramları karşılaştırmalı ele alınacaktır.

Deprem yüklerinin yapı modellerine etki ettirildiği analizler zaman tanım alanında analiz (Time History Analizi) olarak adlandırılmaktadır. TBDY 2018’de bu analiz yöntemleri doğrusal ya da doğrusal olmayan yöntemler, depremlerin ölçeklendirilmesi, depremin yönü gibi etkilere vb. etkilere göre kapsamlı bir şekilde ele alınmaktadır. Bu çalışmada ise depremin frekans içeriği ve yapı özellikleri dikkate alınarak tek bir deprem etkisi altında kesiti TBDY 2018’e göre tasarlanan çelik donatılı bir yapı ile ACI 440.1R-15 (ACI, 2015) kriterlerine göre tasarlanmış GFRP donatılı boyutları eşdeğer iki yapının performansının karşılaştırmalı değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiş, aynı zamanda yapının kapasitesinin belirlenmesi amacıyla statik itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Eleman uçlarında oluşan plastik mafsalları karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.

ÇERÇEVE MODELLEME VE DİZAYN PROSEDÜRÜ

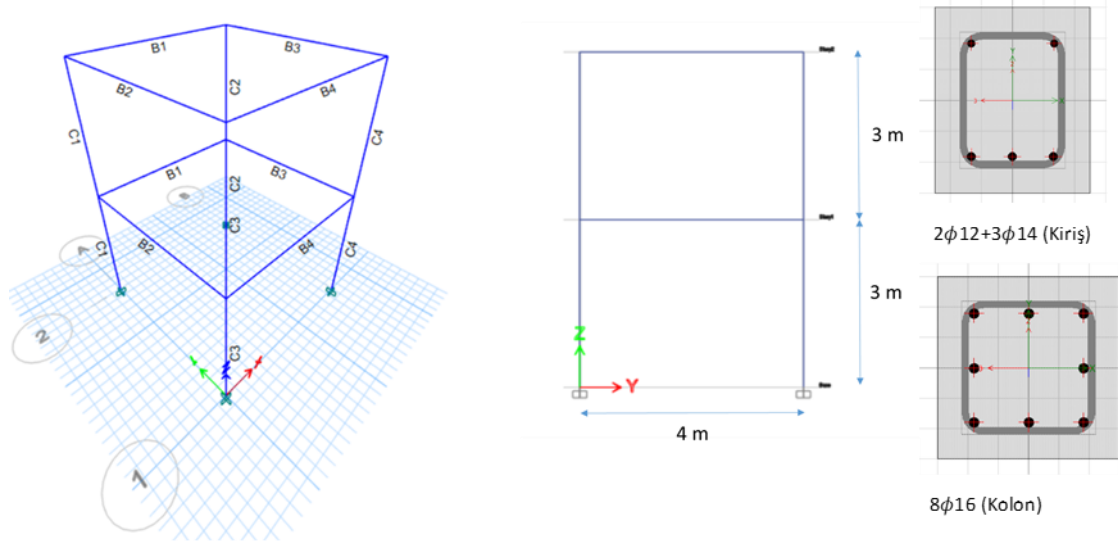
Çerçeve Modelleme

Çalışmada çelik ve GFRP donatılı betonarme yapılar kullanılmıştır. İki katlı ve tek açıklı olarak bir yapı modellemesi yapılmış olup kolon ve kiriş tasarımı Şekil 5’te gösterilmiştir. Beton sınıfı olarak C25 kullanılmıştır. Çelik donatı ve GFRP donatının mekanik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. GFRP donatılar yalnızca matris malzeme ve liflerin birleştirilerek sıcak bir kalıptan çekilmesi yöntemiyle (pultrüzyon yöntemi) üretildiği takdirde taşıyıcı elemanlarda malzeme olarak kullanılabilir. Bu nedenle GFRP donatıların, pultrüzyon yöntemiyle üretildiği kabul edilmiştir.

Tablo 2. Donatının Mekanik Özellikleri

Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	ϵ (%)
GFRP	-	940	42.5	$\epsilon_u = 2.1$
Çelik	420	550	210	$\epsilon_y = 10$

Çelik donatı sünek bir malzemedir ve akma dayanımına göre tasarım yapılır. Ancak GFRP donatı gevrek bir malzemedir ve akma göstermemektedir. Bu nedenle hesaplamalarda farklı dayanımlar esas alınmaktadır. Türkiye’de çelik donatılı betonarme için hesap ve tasarım standartları bulunmakta ancak FRP donatılarla yapılacak yapılarla ilgili herhangi bir tasarım standardı bulunmamaktadır.

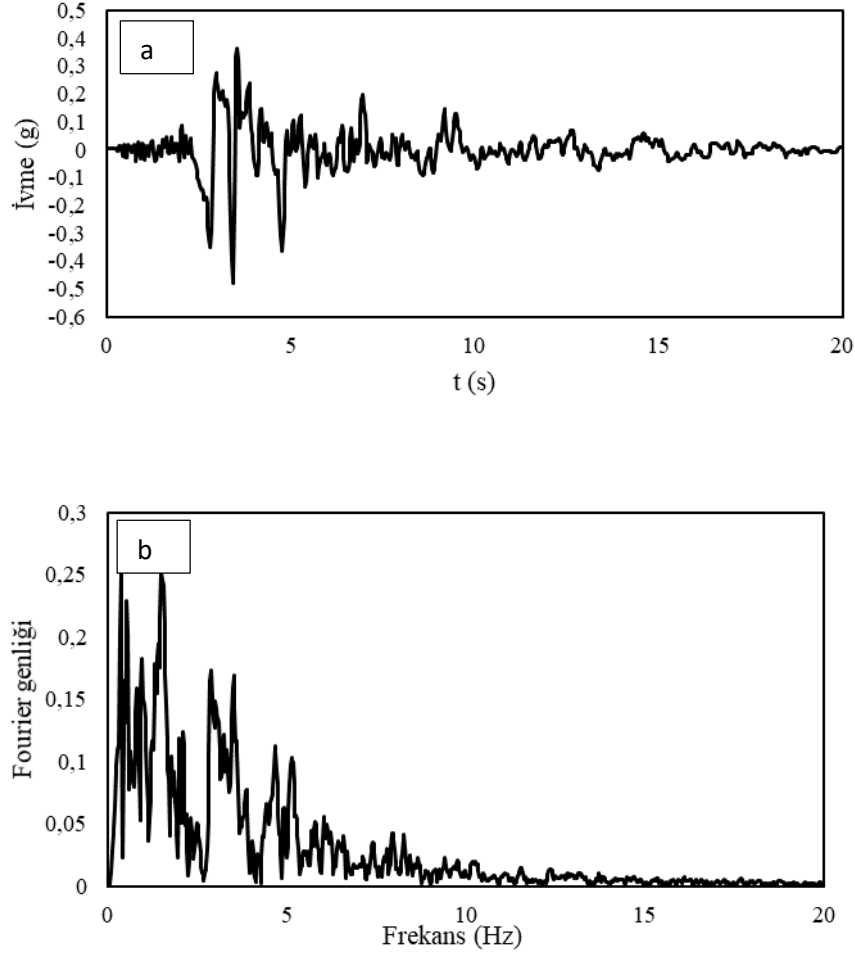


Şekil 5. Yapı ve Yapı Elemanlarının Boyutları ve İsimleri

Modal analiz sonucunda, her iki yapının da serbest titreşim periyodu X ve Y yönünde 0.175 s, burulma modu ise 0.156 s olarak hesap edilmiştir. Yapıların tasarımında, çatlamış kesit rijitliklerinin kullanımı yapının sahadaki gerçek davranışını temsil etmekte olup, yapı periyodunda artışa neden olmaktadır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018’de bu kavram ‘Etkin Kesit Rijitlikleri’ olarak ifade edilmektedir. Bu nedenle GFRP donatılı betonarme yapıda da mevcut durumu gözlemlemek amacıyla etkin kesit rijitlikleri; çerçeve kirişler için 0.35, çerçeve kolonlar için ise 0.70 olarak tanımlanmıştır. Yapılan modal analiz sonucunda çelik donatılı betonarme yapı için yapının hakim serbest titreşim periyodu ve burulma periyodu sırasıyla 0.247 s, 0.198 s; GFRP donatılı betonarme yapı için yapının serbest titreşim periyodu sırasıyla 0.248 s, 0.198 s olarak hesap edilmiştir.

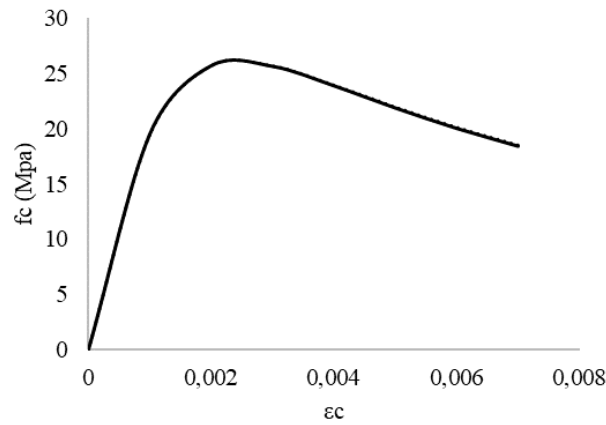
Dizayn Prosedürü

Yapıların dizaynı ETABS 19 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Aynı boyuttaki yapı elemanları tercih edilerek sadece donatı türünün farkının yapılarda meydana getirdiği etkiler incelenmiştir. Kolonların boyutları 300x300 mm², kiriş boyutları 250x300 mm² seçilmiştir. Tasarımda TBDY 2018 kullanılmış ve zaman tanım alanı analizleri için 1992 yılında meydana gelen Erzincan depremi yapılara etki ettirilmiştir. Erzincan depremi, ülkemizde meydana gelen kayda geçmiş yıkıcı depremlerden biri olması ve bu çalışma için de 0-5 Hz (0-0.2 s) aralığında frekans içeriğinin büyük genliğe sahip olması nedeniyle tercih edilmiştir. 1992 Erzincan depreminin ivme-zaman grafiği ve kaydın frekans içeriği Şekil 6’da verilmiştir.

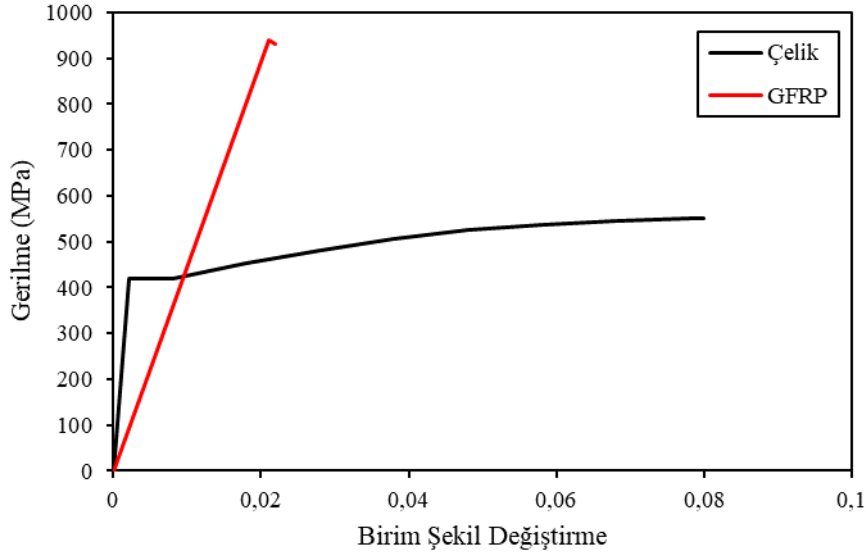


Şekil 6. a. 1992 Erzincan Depremi Doğu-Batı Bileşeni İvme Kaydı **b.** 1992 Erzincan Depremi Doğu-Batı Bileşeni İvme Kaydı Frekans İçeriği

25 MPa'lık serbest basınç dayanımı için Mander Beton Modeline (Mander et al., 1988) göre sargılı betonun gerilme-deformasyon eğrisi Şekil 7'de, çelik ve GFRP donatının gerilme-deformasyon grafiği Şekil 8'de verilmiştir.

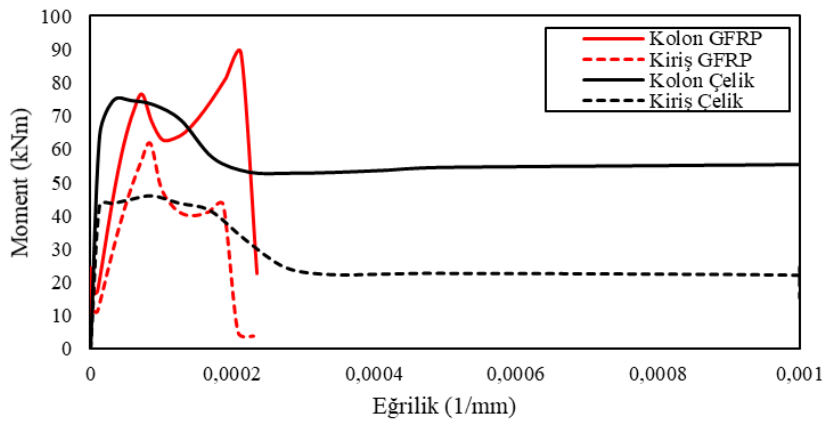


Şekil 7. Sargılı Beton Modeli.

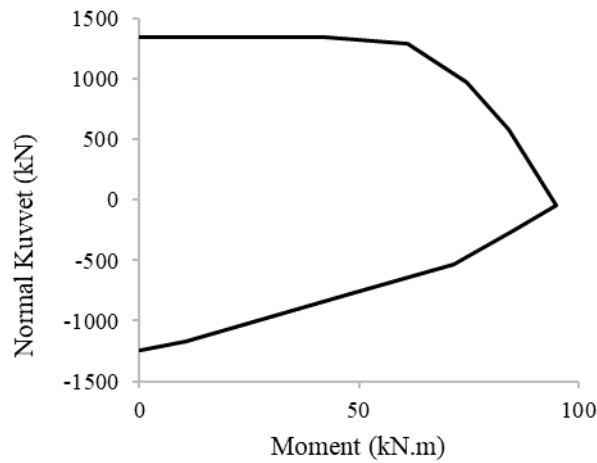


Şekil 8. GFRP Donatı ve Çelik Donatının Gerilme- Deformasyon Grafiği

Kolon ve kiriş kesitinde kullanılan donatı türüne göre moment eğrilik grafiğinde (Şekil 9) görüldüğü üzere çelik donatıya kıyasla GFRP donatılar kolon ve kiriş kesitlerinde hareket kabiliyetini kısıtlamakta ve momentin artmasına neden olmaktadır.



Şekil 9. Kolon ve Kirişlerin Moment-Eğrilik Grafiği

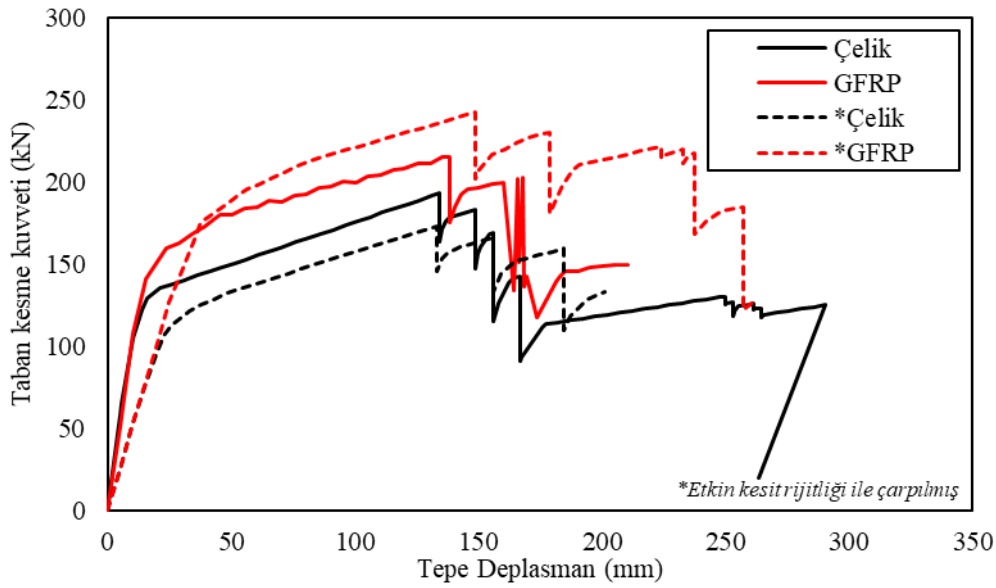


Şekil 10. Normal Kuvvet-Moment Etkileşim Diyagramı

Kiriş kesitleri moment-eğrilik diyagramlarından, kolon kesitleri ise hem moment-eğrilik diyagramları hem de normal kuvvet-moment etkileşim diyagramlarından (Şekil 10) yararlanılarak analiz edilmiştir. Eğrilik, dönme ve plastik mafsallık uzunluğu arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Ayrıca plastik mafsallık uzunluğu, kesit yüksekliğinin yarısı olarak kabul edilmiştir (Youssef et al., 2017). ACI 440.1R-15 standardı donatı oranlarına göre kesit durumu kontrol edilmiş olup kesitler çekme kontrolü bölgesine göre hesaplanmıştır.

SAYISAL ÇALIŞMA

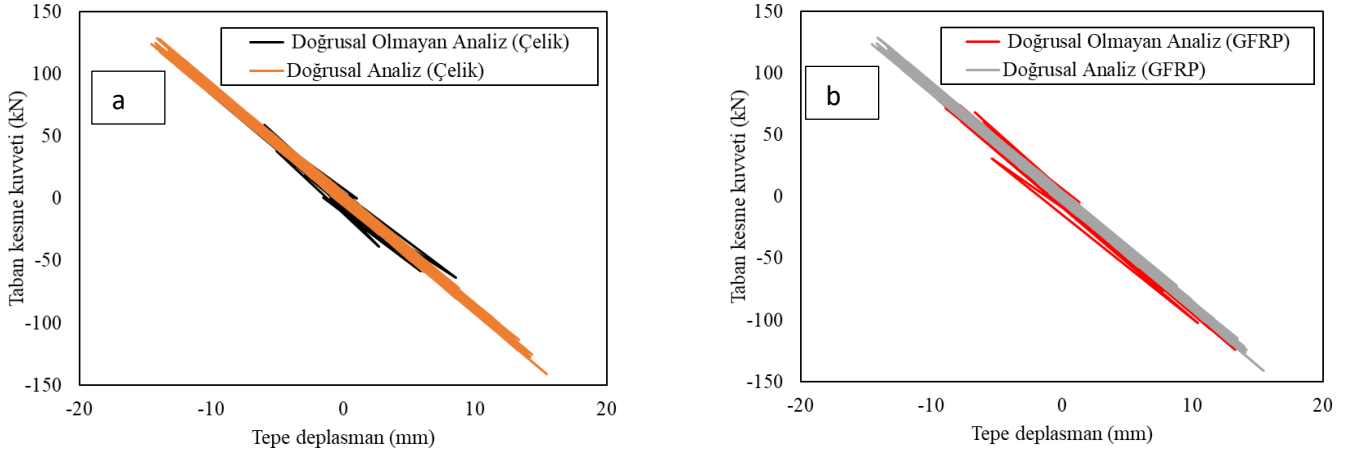
GFRP ve çelik donatılı betonarme elemanlara statik itme analizi uygulanmıştır (Şekil 11). GFRP donatılı betonarme yapının karşıladığı taban kesme kuvveti daha büyük iken gösterdiği deplasman kapasitesi daha azdır. Etkin kesit rijitliği çarpanlarının kullanımı GFRP donatılı betonarme yapıda taban kesme kuvvetlerinin çelik donatılı yapıya oranla daha fazla artmasına neden olmuştur.



Şekil 11. Statik itme Analiz Sonuçları.

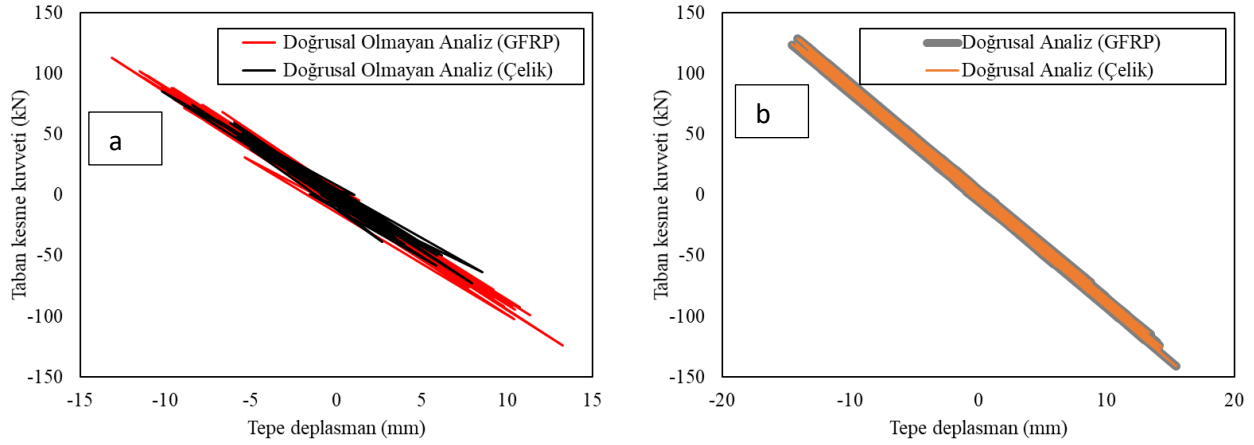
Şekil 12 ve 13’de zaman tanımlı analiz sonuçları doğrusal ve doğrusal olmayan şekilde verilerle donatı türleri ve analiz türleri birbiriyle kıyaslanmıştır. Analiz sonuçlarına bakıldığında GFRP donatılı betonarme yapılarda doğrusal ve doğrusal olmayan analiz değerleri daha yakın çıkmaktadır. Bunun nedeni GFRP donatıların gevrek bir malzeme olmasından ötürü doğrusal davranış göstermesidir. Çelik donatılı betonarme yapılarda doğrusal analiz ile doğrusal olmayan analiz arasındaki farklılıklar yapıda plastik şekil değiştirmeler olduğunu ifade etmektedir.

Analiz sonuçları karşılaştırıldığında yapı tepe deplasmanındaki farklar ihmal edilecek düzeydedir. Yapıların enerji yutma kapasitesi karşılaştırıldığında GFRP donatılı yapı çelik donatılı yapıya oranla 1.31 kat enerji yutma kapasitesine sahip olduğu hesap edilmiştir. Yapıların süneklikleri karşılaştırıldığında ise çelik donatılı yapıyı GFRP donatılı yapıya oranla 1.66 kat daha sünek olduğu hesap edilmiştir (Şekil 11).



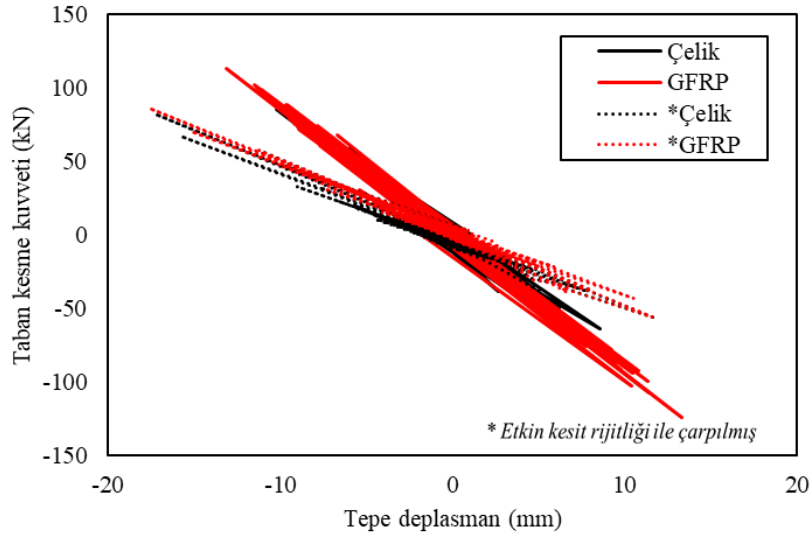
Şekil 12. Zaman Tanım Alanında Analizi Doğrusal Olmayan Analiz /Doğrusal Analiz Karşılaştırması a. Çelik b.

GFRP



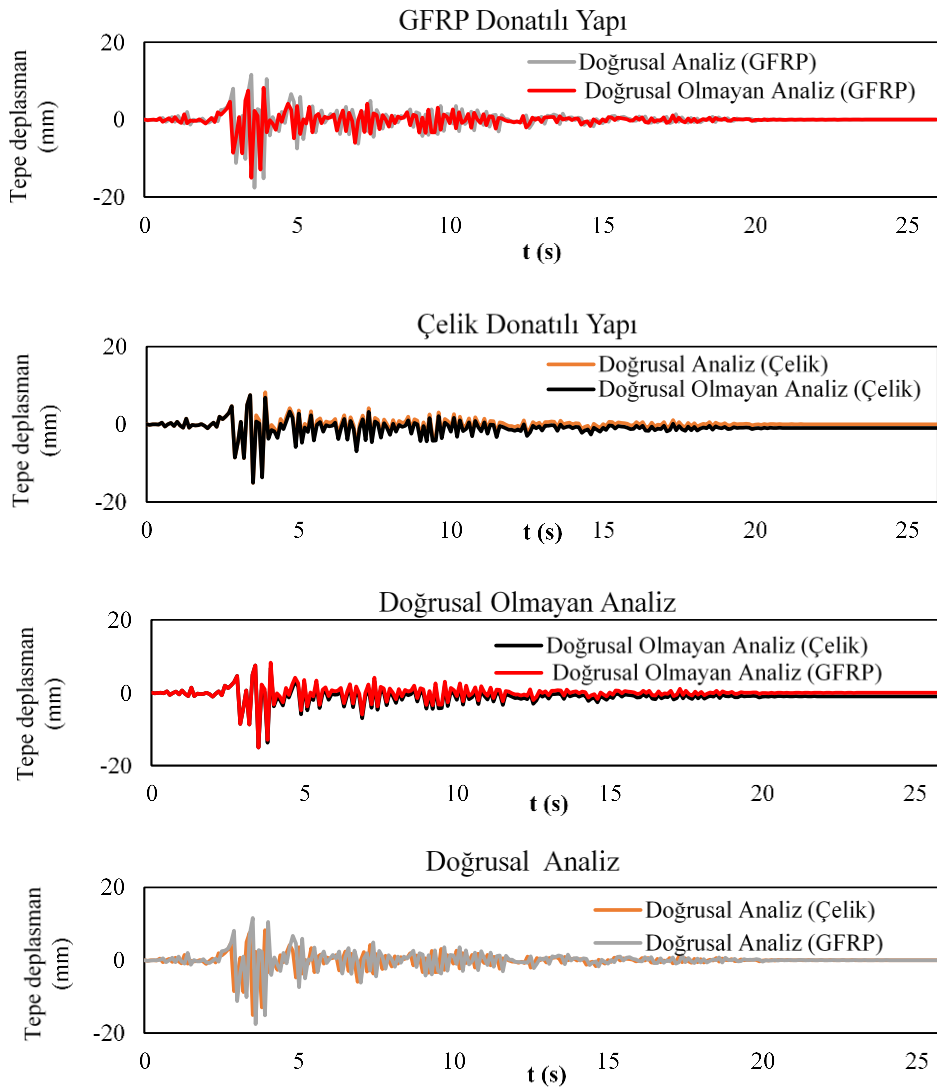
Şekil 13. Zaman Tanım Alanında Analizi Çelik/GFRP Karşılaştırması a. Doğrusal Olmayan Analiz b. Doğrusal Analiz

Etkin kesit rijitliği çarpanı yapıda çatlamış kesit rijitliğini ifade etmekte olup, rijitlik azaltılması sonucu deplasmanın kapasitesinde artışa ve beraberinde taban kesme kuvvetlerinde azalmaya neden olmaktadır (Şekil 14) . Zaman Tanım Alanında analiz sonucunda ise, deplasman kapasitesinde büyük bir farklılık gözlenmemiştir.



Şekil 14. Zaman Tanım Alanında Analizi Çelik/GFRP Etkin Kesit Rijitiği ile Çarpılmış Analiz Karşılaştırılması

Zamana bağlı yer değiştirmelerin karşılaştırmalı grafiği Şekil 15'te verilmiştir. İki yapı arasında zamana bağlı yer değiştirmeler arasında büyük bir farklılık görülmemiştir.



Şekil 15. Zaman Tanım Alanında Analiz Zamana Bağlı Tepe Deplasman

TBDY 2018'e göre performans sınırları dönme oranlarına göre ya da şekil değiştirme oranlarına göre hesap edilmektedir. Bu çalışmada çerçeve elemanlar yığılı plastik mafsallı yöntemiyle modellenmiştir. Bu nedenle performans sınırları dönme oranlarına göre hesap edilmiştir (Denklem 1). Tablo 3'te kolon ve kirişlerde TBDY 2018'e göre hasar sınırları donatı türüne göre verilmiştir.

Tablo 3. Kolon/Kiriş Performans Düzeyi Sınır Dönme Oranları

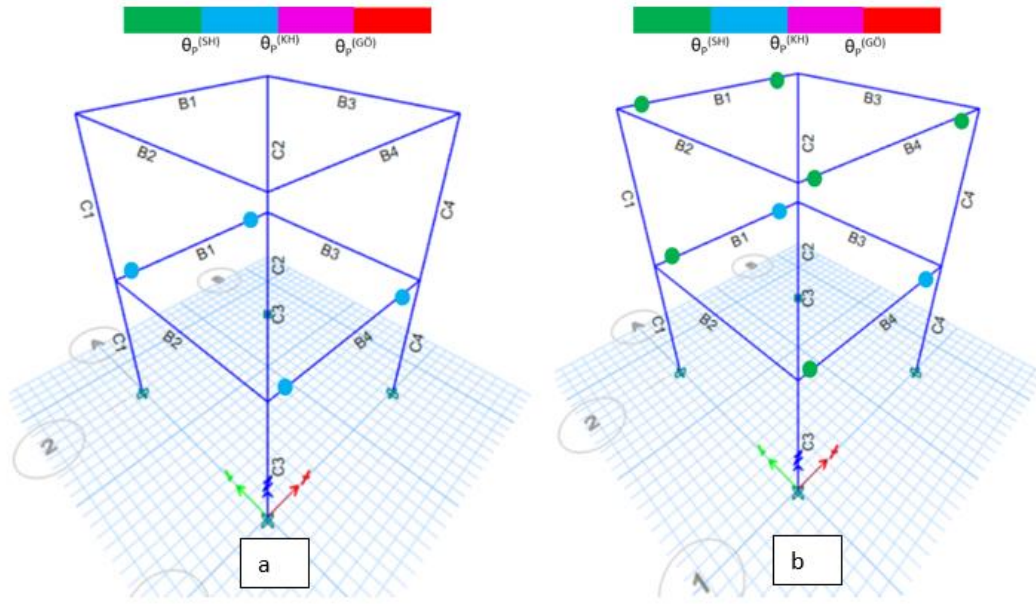
	$\theta_{g\check{c}}$ (rad) Göçme	θ_{kh} (rad) Kalıcı Hasar	θ_{sh} (rad) Sınırlı Hasar
Kolon Çelik	0.04800	0.03600	0
Kiriş Çelik	0.04200	0.03150	0
Kolon GFRP	0.01129	0.00847	0
Kiriş GFRP	0.00988	0.00741	0

Zaman Tanım Alanında analizi sonucunda ETABS yazılımından alınan θ değerleri toplam dönme oranları ifade ettiğinden kesit analizleri sonucunda elde edilen akma dönmesi oranları hesap edilip toplam dönme oranlarından çıkarılarak plastik dönme oranları hesap edilmiştir (Tablo 4-5).

Tablo 4. Zaman Tanım Alanında Analiz Sonuçları

Kat	Mafsallı bölgesi	GFRP Donatılı Yapı		Çelik Donatılı Yapı		
		θ_t (rad)	$\theta_p = \theta_t - \theta_y$ (rad)	θ_t (rad)	$\theta_p = \theta_t - \theta_y$ (rad)	
Kat 2	B1	Sol uç	0	0	0,00053	0
Kat 2	B1	Sağ uç	0	0	0,00054	0
Kat 2	B4	Sol uç	0	0	0,00053	0
Kat 2	B4	Sağ uç	0	0	0,00054	0
Kat 1	B1	Sol uç	0,00151	0.000685	0,00181	0
Kat 1	B1	Sağ uç	0,00134	0.000515	0,00196	8.8E-05
Kat 1	B4	Sol uç	0,00151	0.000685	0,00181	0
Kat 1	B4	Sağ uç	0,00134	0.000515	0,00195	7.8E-05

Hesap edilen plastik dönme oranları Tablo 3'te hesap edilmiş sınır birim dönme oranları ile karşılaştırılarak yapıların performans bölgeleri belirlenmiştir. Zaman tanım alanı sonucunda oluşan plastik dönmeler karşılaştırıldığında GFRP donatılı yapıda kirişlerin %50'sinin çelik donatılı yapıda, kirişlerin ise %25'inin belirgin hasar bölgesinde olduğu gözlenmiştir (Şekil 16). Bu durumda TBDY 2018 kriterlerine göre iki yapıda da ileri hasar bölgesine geçen yapı elemanı olmadığından, iki yapı da kontrollü hasar performans düzeyini sağlamaktadır.



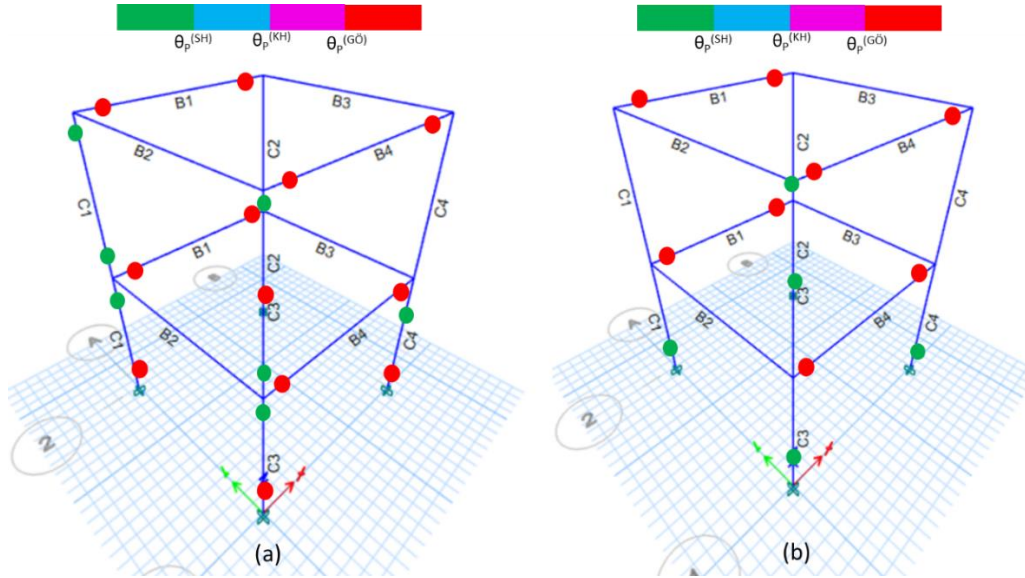
Şekil 16. Zaman Tanım Alanında Analizi Sonucu Meydana Gelen Hasarlar a. GFRP Donatılı Yapı, b. Çelik Donatılı Yapı

Yapıların artımsal yükler altında davranışını karşılaştırmak amacıyla statik itme analizi sonucunda da elde edilen plastik dönme oranları karşılaştırmalı değerlendirilmiştir (Tablo 5). Statik itme analizi yapı göçme duruma gelene kadar devam ettirilmiştir.

Tablo 5. GFRP ve Çelik Donatılı Yapıda Statik İtme Analizi Sonucu Meydana Gelen Dönmeler

Kat	İsim	Mafsalsal bölgesi	GFRP		Çelik	
			θ_{2p} (rad)	θ_{3p} (rad)	θ_{2p} (rad)	θ_{3p} (rad)
Kat 2	B1	Sol uç	0	0.026374	0	0.048128
Kat 2	B1	Sağ uç	0	0.043815	0	0.048288
Kat 2	B4	Sol uç	0	0.024809	0	0.048127
Kat 2	B4	Sağ uç	0	0.043795	0	0.048287
Kat 2	C1	Alt uç	0.00015	0	0	0
Kat 2	C1	Üst uç	0	0.007945	0	0
Kat 2	C3	Alt uç	0.000153	0	0	0
Kat 2	C3	Üst uç	0	0.007965	0	0
Kat 1	B1	Sol uç	0	0.044861	0	0.046172
Kat 1	B1	Sağ uç	0	0.044285	0	0.046588
Kat 1	B4	Sol uç	0	0.04487	0	0.046172
Kat 1	B4	Sağ uç	0	0.044285	0	0.046585
Kat 1	C1	Alt uç	0	0.033286	0	0.029315
Kat 1	C1	Üst uç	0.00049	0	0	0
Kat 1	C2	Alt uç	0	0.033748	0	0.029271
Kat 1	C2	Üst uç	0.00038	0	0	0
Kat 1	C3	Alt uç	0	0.033311	0	0.029314
Kat 1	C3	Üst uç	0.00042	0	0	0
Kat 1	C4	Alt uç	0	0.033767	0	0.02927
Kat 1	C4	Üst uç	0.00056	0	0	0

Şekil 17’de artımsal tek modlu statik itme analizinin son adımında, çelik donatılı yapı için tepe deplasman değeri 210 mm, GFRP donatılı yapı için 264 mm’ye karşılık gelen dönme oranları verilmiştir. Dönme oranları karşılaştırıldığında, GFRP donatılı yapıda birim dönmelerin daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum doğrusal bölgede GFRP donatılı betonarme yapının dayanımı arttırdığını ortaya koymaktadır. Ancak performans sınırları dikkate alındığında GFRP donatılı kesitlerin moment eğrilik ilişkisine dayanarak, çelik donatılı kesitlere oranla daha düşük dönme oranlarında göçme sınırına ulaştığı görülmektedir (Tablo 3).



Şekil 17. Statik itme Analizi Sonucu Meydana Gelen Hasarlar a. GFRP Donatılı Yapı b. Çelik Donatılı Yapı

Statik itme analizi sonucunda, çelik donatılı yapı GFRP donatılı yapıya oranla daha önce göçme kapasitesine ulaşmıştır. Ancak GFRP donatılı yapıda göçme bölgesinde olan eleman sayısı çelik yapıya oranla daha fazladır. Bu durumun sebebi çelik donatılı yapının GFRP donatılı yapıya oranla daha sünek olması, GFRP donatılı yapının ise enerji yutma kapasitesinin daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

Bu çalışma sonucunda GFRP donatılı yapı ile çelik donatılı yapılar karşılaştırılmıştır. Zaman tanım alanında analiz sonucunda GFRP donatılı yapıda eleman uçlarındaki dönme oranları çelik donatılı yapıya oranla daha düşük olmasına rağmen hasar sınırlarını karşılamamaktadır. Bu durum, GFRP donatılı kesitlerin akma ve uzama eğriliklerinin çelik yapıya oranla daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Zaman tanım alanında analiz sonucunda yapı performans düzeylerinin aynı çıkması ve statik itme analizleri sonucunda, GFRP donatılı yapının daha yüksek tepe deplasman değerlerinde göçme mekanizmasına ulaşmış olması, GFRP’nin yapılarda donatı olarak hasar sınırlarını sağladığı sürece gerekli alanlarda kullanılabileceğini göstermektedir. Çelik ve GFRP donatı dayanımları arasında bağıntılar geliştirilmesi buna bağlı olarak donatı çaplarının seçilmesi, böylece donatıların dayanımca eş değerliği sağlanabileceği düşünülmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Çelik ve GFRP donatılar kullanılarak tasarlanan benzer yapı özelliğindeki iki betonarme yapının statik itme analizi ve zaman tanım alanında analizi gerçekleştirilmiştir. Zaman tanım alanında analizi hem doğrusal hem doğrusal olmayan analiz olarak yapılmış birbiri ile karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda;

- Bu çalışma için çelik donatılı ve GFRP donatılı yapı zaman tanım alanında analiz sonucunda kontrollü hasar seviyesinde yer almaktadır. Yapı elemanlarındaki plastik dönmeler incelendiğinde çelik donatılı yapıda bazı bölgelerde meydana gelen dönmeler daha yüksektir. Her ne kadar eleman bazlı çalışmalar GFRP donatının dayanımı arttırdığını gösterse de GFRP donatının şekil değiştirme kapasitesinin düşük olması nedeniyle çelik donatılı yapıya oranla dönme oranları daha düşük hesap edilmiştir. Bununla birlikte TBDY 2018 hasar sınırlarına göre kesit özelliklerine dayanarak hesap edilen göçme öncesi hasar performans seviyeleri daha düşük seviyededir. Bunu nedeni GFRP donatılı kesitlerin dönme sınırlarının kesitlerin eğrilğine göre

belirlenmesidir. Bu çalışma için şekil değiştirmeler beton kırılma sınır durumu tarafından kontrol edildiği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle sadece eleman bazlı değerlendirmeler yetersizdir. Kesit davranışının yapısal bazda ele alınarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

- Etkin kesit rijitliği çarpanının kullanımı, GFRP donatılı yapıda çelik donatılı yapıya oranla daha fazla taban kesme kuvvetlerinin artmasına neden olmuştur. Bu durum, sahada oluşabilecek beton dayanımının normalden az olması, imalat hataları gibi riskli durumlara karşı önlem alınması amacıyla tasarımda GFRP donatılı kesitlere de etkin kesit rijitliklerinin tanımlanması önerilmektedir.
- GFRP donatılı kesitlerin yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olması nedeniyle alternatif bir malzeme olarak özellikle korozyonun sorun teşkil ettiği yerlerde, ilgili standartlar göz önünde bulundurularak kullanılması önerilmektedir.
- GFRP donatıların hafif olması yapı yükünü de hafifletmektedir. Ayrıca çekme dayanımının yüksek olması da karşıladığı yük miktarını da arttırmaktadır.
- FRP donatılar olarak karbon, bazalt, bor ve aramid lifli donatılarda aynı çalışma içerisinde yapılar birbiri ile kıyaslanabilir.
- GFRP donatılı betonarme yapıların sünekliliğinin artırılması amacıyla lifli betonlarla birlikte kullanımı araştırılabilir.

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.”
- AFAD. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*.
- Afifi, Mohammad Z., ; Hamdy, M. Mohamed, and Brahim Benmokrane. (2013). “Axial Capacity of Circular Concrete Columns Reinforced with GFRP Bars and Spirals.” doi: 10.1061/(ASCE).
- Aiello, Maria Antonietta, Marianovella Leone, and Marisa Pecce. (2007). “Bond Performances of FRP Rebars-Reinforced Concrete.” *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(3):205–13. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:3(205).
- Aliasghar-Mamaghani, Mojtaba, and Alireza Khaloo. (2018). Seismic Behavior of Concrete Moment Frame Reinforced with GFRP Bars. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.10.082.
- Alves, Juliana, Amr El-Ragaby, and Ehab El-Salakawy. (2010). Durability of GFRP Bars’ Bond to Concrete under Different Loading and Environmental Conditions. *Journal of Composites for Construction* 15(3):249–62. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000161.
- Ashrafi, Hamed, Milad Bazli, and Asghar Vatani Oskouei. (2016). Enhancement of Bond Characteristics of Ribbed-Surface GFRP Bars with Concrete by Using Carbon Fiber Mat Anchorage. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.083.
- Aydın, Ferhat, and Şeymanur Arslan. (2021). Investigation of the Durability Performance of FRP Bars in Different Environmental Conditions. *Advances in Concrete Construction* 12(4):295–302. doi: doi.org/10.12989/acc.2021.12.4.295.
- Aydinoğlu, M. N. (2003). An Incremental Response Spectrum Analysis Procedure Based on Inelastic Spectral Deformation for Multi-Mode Seismic Evaluation. *Bulletin of Earthquake Engineering* 1(1):3–36.
- Bazli, Milad, Hamed Ashrafi, and Asghar Vatani Oskouei. (2016). Effect of Harsh Environments on Mechanical Properties of GFRP Pultruded Profiles. doi: 10.1016/j.compositesb.2016.06.019.
- Bhandari, M., S. D. Bharti, M. K. Shrimali, and T. K. Datta. (2018). Assessment of Proposed Lateral Load Patterns in Pushover Analysis for Base-Isolated Frames. *Engineering Structures* 175:531–48. doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.08.080.
- CAN/CSA-S806-02. (2009). *Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers*.

- Chopra, A. K., and R. K. Goel. (2002). A Modal Pushover Analysis Procedure for Estimating Seismic Demands for Buildings. *Earthq Eng Struct Dyn* 31(3):561–82.
- Elchalakani, Mohamed, and Guowei Ma. (2017). Tests of Glass Fibre Reinforced Polymer Rectangular Concrete Columns Subjected to Concentric and Eccentric Axial Loading. *Engineering Structures* 151:93–104. doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2017.08.023.
- Fajfar, Peter. (2000). No Structural Analysis in Earthquake Engineering—a Breakthrough of Simplified Non-Linear Methods. Pp. 1–20 in *12th Eur. Conf. Earthq. Eng.*
- Feng, Peng, Jie Wang, Yi Wang, David Loughery, and Ditao Niu. (2014). Effects of Corrosive Environments on Properties of Pultruded GFRP Plates. *Composites Part B: Engineering* 67:427–33. doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2014.08.021.
- Garcia-Espinel, J. D., D. Castro-Fresno, P. Parbole Gayo, and F. Ballester-Muñoz. (2015). Effects of Sea Water Environment on Glass Fiber Reinforced Plastic Materials Used for Marine Civil Engineering Constructions. *Materials & Design (1980-2015)* 66(PA):46–50. doi: 10.1016/J.MATDES.2014.10.032.
- Ghomi, Shervin K., and Ehab El-Salakawy. (2019). Seismic Behavior of GFRP-Reinforced Concrete Interior Beam–Column–Slab Subassemblies. *Journal of Composites for Construction* 23(6):04019047. doi: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000980.
- Goldston, M., A. Remennikov, and M. Neaz Sheikh. (2016). Experimental Investigation of the Behaviour of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars under Static and Impact Loading. *Engineering Structures* 113:220–32. doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2016.01.044.
- Guadagnini, Maurizio, Kypros Pilakoutas, and Peter Waldron. (2006). Shear Resistance of FRP RC Beams: Experimental Study. *Journal of Composites for Construction* 10(6):464–73. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:6(464).
- Guérin, M., H. M. Mohamed, B. Benmokrane, C. K. Shield, and A. Nanni. (2018). Effect of Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement Ratio on Axial-Flexural Strength of Reinforced Concrete Columns. *Structural Journal* 115(4):1049–61. doi: 10.14359/51701279.
- Hao, Q. D., B. Wang, and J. P. Ou. (2006). Fiber Reinforced Polymer Rebar's Application to Civil Engineering. *Concrete* 9(1):38–40.
- Harajli, M., and M. Abouniaj. (2010). Bond Performance of GFRP Bars in Tension: Experimental Evaluation and Assessment of ACI 440 Guidelines. *Journal of Composites for Construction* 14(6):659–68. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000139.
- Harris, Harry G., Win Somboonsong, and Frank K. Ko. (1998). New Ductile Hybrid FRP Reinforcing Bar for Concrete Structures. *Journal of Composites for Construction* 2(1):28–37. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:1(28).
- Jan, Tysh Shang, Ming Wei Liu, and C. Kao Ying Chieh. (2004). An Upper-Bound Pushover Analysis Procedure for Estimating the Seismic Demands of High-Rise Buildings. *Engineering Structures* 26(1):117–28. doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2003.09.003.
- Kim, Sun Pil, and Yahya C. Kurama. (2008). An Alternative Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Displacement Demands. *Engineering Structures* 30(12):3793–3807. doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2008.07.008.
- Krawinkler, Helmut. (2006). Importance of Good Nonlinear Analysis. *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 15(5):515–31. doi: 10.1002/TAL.379.
- Lau, Denvid, and Hoat Joen Pam. (2010). Experimental Study of Hybrid FRP Reinforced Concrete Beams. *Engineering Structures* 32(12):3857–65. doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2010.08.028.
- Mander, J. B., M. J. Priestley, and R. Park. (1988). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering* 114(8):1804–26.
- Poursha, Mehdi, Faramarz Khoshnoudian, and A. S. Moghadam. (2009). A Consecutive Modal Pushover Procedure for Estimating the Seismic Demands of Tall Buildings. *Engineering Structures* 31(2):591–99. doi:

10.1016/J.ENGSTRUCT.2008.10.009.

Remennikov, Alex, Matthew W. Goldston, and M. Neaz Sheikh.(2016). Impact Resistance of Ultra-High Strength Concrete Beams with FRP Reinforcement. *Proceedings of the 8th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering, CICE 2016* (December):1374–80.

Salihovic, Amir, and Naida Ademovic. (2018). Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Frame under Lateral Load. *Coupled Systems Mechanics* 7(3):281–95. doi: 10.12989/csm.2018.7.3.281.

Shamsher Bahadur Singh. (2015). *Analysis and Design of FRP Reinforced-*. McGraw-Hill Education

Suwondo, Riza, Dave Mangindaan, Lee Cunningham, and Sohaib Alama. (2021). Non-Linear Analysis of Seismic Performance of Low-Rise Concrete Buildings in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 794(1):012024. doi: 10.1088/1755-1315/794/1/012024.

Tarawneh, Ahmad, and Sereen Majdalaweyh. (2020). Design and Reliability Analysis of FRP-Reinforced Concrete Columns. *Structures* 28:1580–88. doi: 10.1016/J.ISTRUC.2020.10.009.

Tobbi, Hany, Ahmed Sabry Farghaly, and Brahim Benmokrane. (2012). Concrete Columns Reinforced Longitudinally and Transversally with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars Seismic Behavior of GFRP-Reinforced Flat Plate Structures under Simulated Quasi-Static Cyclic Lateral Loads View Project Strength and Drift Capacity Desi. *ACI Structural Journal* 109(4).

Wu, Lili, Xiang Xu, Hui Wang, and Jia Qi Yang. (2022). Experimental Study on Bond Properties between GFRP Bars and Self-Compacting Concrete *Construction and Building Materials* 320:126186. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.126186.

Xue, Weichen, Fei Peng, and Zhiqing Fang. (2018). Behavior and Design of Slender Rectangular Concrete Columns Longitudinally Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. *ACI Structural Journal* 115(2):311–22. doi: 10.14359/51701131.

Youssef, M. A., M. E. Meshaly, and A. A. Elansary. (2019). Ductile Corrosion-Free Self-Centering Concrete Elements. *Engineering Structures* 184:52–60. doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.01.086.

Youssef, Maged A., Mohamed E. Meshaly, and Ahmed A. Elansary. (2017). Ductile Corrosion-Free GFRP-Stainless Steel Reinforced Concrete Elements. *Composite Structures* 182:124–31. doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2017.09.037.

Zhang, Dawei, Yuxi Zhao, Tamon Ueda, Xiangmin Li, and Qingfeng Xu. (2016). CFRP Strengthened RC Beams with Pre-Strengthening Non-Uniform Reinforcement Corrosion Subjected to Post-Strengthening Wetting/Drying Cycles. *Engineering Structures* 127:331–43. doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2016.08.051.