



FRP LEVHA İLE GÜÇLENDİRMENİN YIĞMA BİR KEMER YAPISININ DEPREM DAVRANIŞINA OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Ali Ekber SEVER*¹

*¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta

Makale Bilgisi

Geliş tarihi:24.03.2023

Kabul Tarihi:20.06.2023

Yayın tarihi:29.06.2023

ÖZET

Bu çalışmada FRP levha (fiber reinforced polymer) ile güçlendirmenin yığma kemer yapılarının deprem davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla SAP2000 bilgisayar programında FRP levha ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş olmak üzere iki ayrı yığma kemer yapısının 3 boyutlu sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modeller üzerinde modal analiz ve Türkiye’de daha önce meydana gelen üç farklı depreme ait ivme kayıtları kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal analizler uygulanmıştır. Modal analiz sonucunda FRP levha ile güçlendirilmiş yığma kemer yapısının periyodunun azaldığı tespit edilmiştir. Zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda ise FRP levha ile güçlendirmeden sonra elde edilen yer değiştirme değerleri ile en büyük maksimum/minimum asal gerilme ve kayma gerilmesi değerlerinin azaldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler;

Deprem yükü, FRP, Kemer, Zaman tanım alanında analiz, Modal analiz

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF STRENGTHENING WITH FRP SHEET ON EARTHQUAKE BEHAVIOR OF A MASONRY ARCH STRUCTURE

Article Info

Received: 24.03.2023

Accepted:20.06.2023

Published:29.06.2023

ABSTRACT

In this study, the effects of strengthening with FRP sheet (fiber reinforced polymer) on the earthquake behavior of masonry arch structures were investigated. For this purpose, a 3-dimensional finite element model of two different masonry arch structures, reinforced with FRP sheet and non-reinforced, was created in the SAP2000 computer program. On these models, modal analysis and linear time history analyses were applied by using acceleration records of three different earthquakes that occurred before in Turkey. As a result of the modal analysis, it was determined that the period of the masonry arch structure strengthened with FRP sheet decreased. As a result of the analyzes made in the time history, it was seen that the displacement values and the biggest maximum/minimum principal stress and shear stress values decreased after the FRP reinforcement.

Keywords;

Earthquake load, FRP, Arch, Time history analysis, Modal analysis

1. Giriş

Yığma kemer türündeki yapılar (kemer köprü, su kemeri vb.) genellikle tarihi olup kültürel mirasın önemli bir parçasıdır. Deprem, sel gibi doğal afetler bu türdeki yapılara önemli ölçüde hasar verebilir veya tamamen yıkabilir. Bu sebeple yığma kemer formundaki yapıların bilgisayar programlarında

modellenecek sismik davranışının analiz edilmesi bu yapıların ayakta kalması için oldukça önemlidir. Literatürde yığma kemer yapılarının sismik davranışını araştıran birçok çalışma mevcuttur. Laterza vd. (2017), yaptıkları çalışmada mevcut bir tarihi kemer köprüünün sismik performansını araştırmışlardır. Bu amaçla çok açıklıklı tarihi köprüünün sonlu elemanlar modelini oluşturarak itme

analizi yapmışlardır. Yaptıkları analizler sonucunda tarihi köprünün kapasite spektrumu metodunun (ATC-40, 1996) talep ettiği yer değiştirme değerlerini sağladığını belirtmişlerdir. Akın vd. (2021) yığma bir köprünün sismik davranışını farklı sönüm oranlarını kullanarak analiz etmişlerdir. Bu amaçla SAP 2000 bilgisayar programında sonlu elemanlar metoduyla köprüyü modellemiş ve deprem ivme kayıtları ile köprünün davranışını analiz etmişlerdir. Bu çalışma sonucunda elde ettikleri gerilme ve yer değiştirmeleri değerlendirmişlerdir.

Sözen vd. (2020), yaptıkları çalışmada tarihi bir yığma kemer köprünün sismik davranışını analiz etmişlerdir. Çalışmada köprünün özgün formu ve değişime uğramış formlarını ANSYS bilgisayar programında modellemişlerdir. Bu modeller üzerinde statik ve zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilerek deformasyon ve gerilmeleri incelemişlerdir. Sonuç olarak köprü formunun değişmesiyle beraber rijitliğin arttığını belirtmişlerdir. Sakcalı vd. (2019), Bursa’da bulunan Irgandı Köprüsünü incelemişlerdir. Yığma bir kemer köprü olan bu köprünün sonlu elemanlar modelini oluşturmuş ve farklı deprem ivme kayıtları altında modal ve lineer dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma sonucunda en büyük yer değiştirmelerin köprünün üst kısmında ve en büyük asal gerilmelerinin mesnet bölgesinde oluştuğunu belirtmişlerdir.

Yığma yapıların güçlendirilmesinde FRP sıklıkla kullanılan bir malzemedir. FRP ile güçlendirme, yapının gerilme dayanımını arttırmaktadır (Lourenço vd., 2006; Lorenzis vd., 2007; Sivaraja vd., 2013). Şimdiye kadar yığma binalar, çan kulesi, kemer köprüsü vb. birçok yapı FRP teknikleri kullanılarak güçlendirilmiştir. Literatürde yığma yapıların FRP ile güçlendirmesini araştıran birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan bazılarında aşağıda değinilmiştir.

Anania vd. (2013), yaptıkları çalışmada kemer şeklindeki yığma yapılarda FRP ile güçlendirmenin etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda FRP ile güçlendirmenin yığma kemerin taşıma kapasitesini arttırdığını belirtmişlerdir.

Foraboschi (2004), yaptığı çalışmada kemer türündeki yığma yapıların iç ve dış yüzeylerini FRP ile güçlendirmiştir. Bu çalışma sonucunda FRP ile güçlendirmenin yapının yük taşıma kapasitesini arttırdığını tespit etmiştir.

Mahdikhani vd. (2016), yaptıkları çalışmada FRP ile güçlendirmenin yığma bir kemer yapısının deprem davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla tarihi bir kemer köprüyü ABAQUS programında modellemiş ve köprünün tüm yüzeylerine FRP ile güçlendirme uygulamışlardır. Bu çalışmanın sonucunda FRP ile güçlendirmenin yer değiştirmeleri azalttığını belirtmişlerdir. Liretatürde kemer köprülerin yanı sıra diğer yığma yapılarının FRP ile güçlendirmesini konu alan çalışmalar da mevcuttur (Türkeli, 2020; Karaca vd., 2015; Omar ve Tartoussi, 2019; Korkmaz, 2017; Landolfo vd., 2007; Altunışık, 2011).

Bu çalışmada FRP levha ile güçlendirmenin yığma bir kemer yapısının deprem davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla SAP2000 programında yığma bir kemer yapısının FRP levha ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modeller üzerinde modal analiz ve zaman tanım alanında doğrusal analizler yapılmıştır. Zaman tanım alanında yapılan analizlerde daha önce Türkiye’de meydana gelen 3 farklı depreme ait ivme kayıtları kullanılmıştır.

2. Kemer yapısının sonlu elemanlar modelinin oluşturulması

Çalışma kapsamında SAP2000 programında oluşturulan yığma kemer yapısının modeli Şekil 1’de gösterilmiştir. Buna göre kemer 2.5 m genişliğinde, 10 m yüksekliğinde ve 27 m uzunluğundadır. Kemer yapısının kesme taştan yapıldığı düşünülmüş ve kesme taşın malzeme özellikleri literatürdeki çalışmalardan elde edilmiştir (Işık ve Anteb, 2018). FRP ile güçlendirmenin kemer yapısının deprem davranışına olan etkisini görebilmek amacıyla kemer yapısının tüm yüzeylerine FRP güçlendirmesi tek yönde ve 0° açıyla (yatay doğrultuda) uygulanmıştır. Bu FRP güçlendirmesi, tek yönlü karbon levhalar olan Tyfo SCH-41-2X kullanılarak yapılmıştır (Karaca vd., 2015). Bu FRP levhanın kalınlığı 2 mm olarak seçilmiş ve 2 kat olarak tüm yüzeylere uygulanmıştır. Böylece toplam FRP kalınlığı 4 mm olmuştur.

FRP levha SAP2000 programında shell (kabuk) eleman olarak modellenmiştir. Solid eleman kullanılarak modellenen kesme taş ile uyumlu çalışabilmesi için kabuk eleman türü thin olarak seçilmiştir. FRP levha ile kesme taş arasında tam aderans olduğu varsayılmıştır. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan malzeme özellikleri.

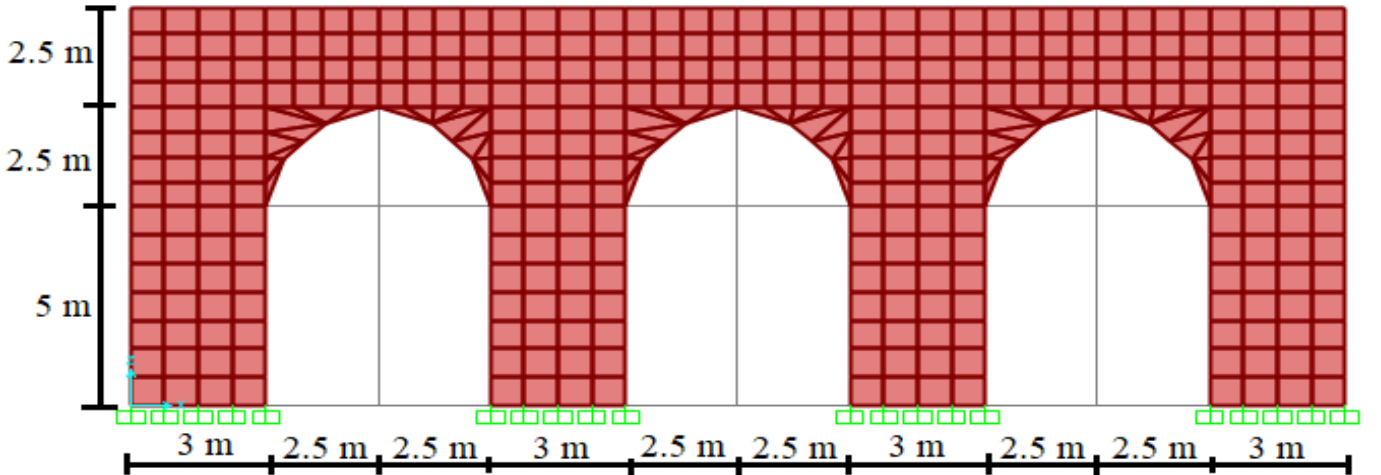
Malzeme	Elastisite Modülü (N/mm ²)	Poisson Oranı
Kesme taş	5000	0,2
CFRP	230000	0.3

Yığma yapıların sayısal modellenmesi için yapısal sistemin boyutuna ve doğruluk düzeyine bağlı olarak basitleştirilmiş mikro modelleme, detaylı mikro modelleme ve makro modelleme olarak adlandırılan üç ayrı modelleme yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır (Lourenco, 1996). Detaylı mikro modellemede, yığma birimlerin malzeme özellikleri ve harç ayrı ayrı değerlendirilmektedir. Basitleştirilmiş mikro modellemede yığma birimler harç tabakasının yarısı kadar genişletilir böylece harç ihmal edilir ve yığma birimler ara yüzey çizgileri ile birbirinden ayrılır. Makro modellemede yığma, birim ve harç ayrımı yapılmadan kompozit olarak kabul edilir. Büyük yapı sistemlerinin incelenmesinde çözüm süresini büyük ölçüde kısalttığından genellikle makro modelleme tekniği kullanılır. Bu çalışmada Makro modelleme metodu kullanılmıştır. Bu yöntemde harç ile yığma birim arasındaki ilişki ihmal edilir. Malzeme kompozit olarak ele alınır (Özmen ve Sayın, 2020). Şekil 2’de bu modelleme yöntemleri gösterilmektedir. Bu çalışmada homojenleştirme tekniği kullanılmamıştır. Bu çalışmada, bir yığma kemer yapısı, SAP2000 bilgisayar programı ile modellenerek modal analiz ve zaman tanım alanında analiz yapılmıştır. Bu analizlerde sınır koşulları önemli bir yer tutar. Kemer

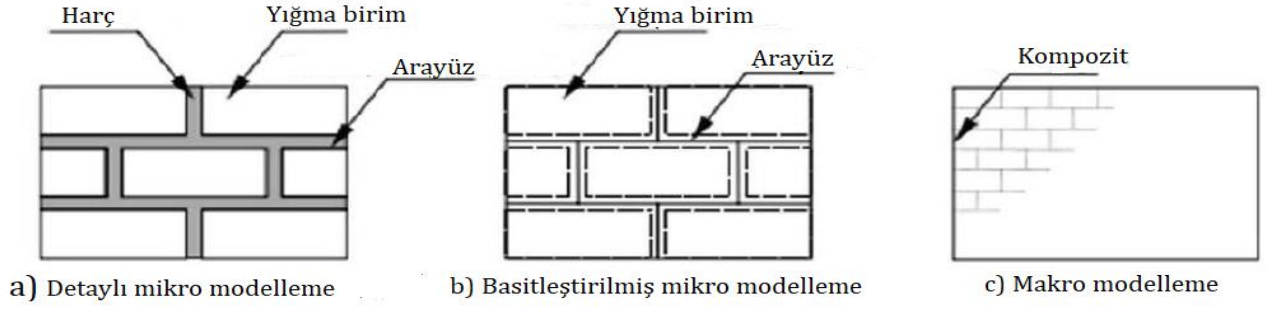
yapısının yere temas eden kısımlarında ankastre mesnet tanımlanmıştır. Kemer yapısı solid eleman kullanılarak modellenmiştir. Belirli bir mesh sayısından sonra sonuçların çok küçük oranlarda değişmesinden dolayı analiz süresini kısaltmak adına optimum mesh sayısı seçilmiştir. Şekil 3’te solid elemanda tanımlanan eksenler, gerilmeler ve solid eleman gösterilmiştir. Burada S11 1 eksen yönünde 1 nolu yüze etki eden gerilme, S22 2 eksen yönünde 2 nolu yüze etki eden gerilme S33 3 eksen yönünde 3 nolu yüze etki eden gerilme, S12 2 eksen yönünde 1 nolu yüze etki eden kayma gerilmesi, S13 3 eksen yönünde 1 nolu yüze etki eden kayma gerilmesi ve S23 ise 3 eksen yönünde 2 nolu yüze etki eden kayma gerilmesi olarak tanımlanmıştır (SAP2000).

3. Sismik parametrelerin belirlenmesi

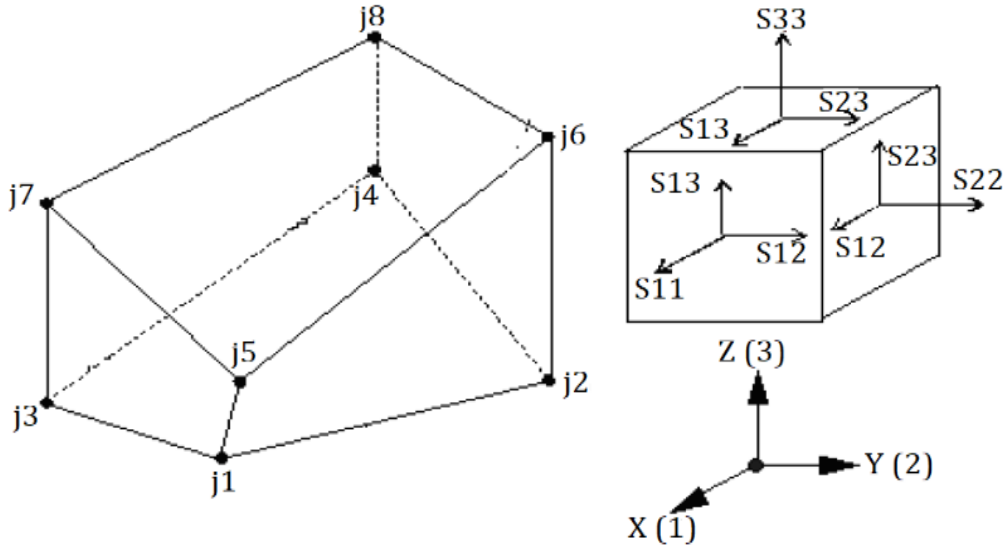
Kemer yapısının sismik davranışını belirlemek amacıyla Türkiye’de daha önce meydana gelen 3 farklı depreme ait ivme kayıtları kullanılmıştır. Yapının Bursa ili Osmangazi ilçesinde bulunduğu varsayılmış ve buna bağlı olarak Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018’de (TBDY, 2018) tanımlanan DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için deprem verileri Türkiye Deprem Tehlike Haritası interaktif web uygulamasından (AFAD) elde edilmiştir. Elde edilen deprem verileri Tablo 2’de gösterilmiştir. Tablo 3’te sismik analizde kullanılan depremlere ait bilgiler yer almaktadır. Bu tabloda PGA; en büyük yer ivmesi, PGV; en yüksek hız değeri, Mw ise moment büyüklüğüdür.



Şekil 1. Kemer yapısının geometrik özellikleri



Şekil 2. Yığma yapılar için kullanılan modelleme yöntemleri (Lourenco vd., 1996)



Şekil 3. Solid eleman ve solid elemandaki gerilmeler (SAP2000)

Seismo Match programı yardımıyla kemer yapısının bulunduğu bölge için eşleştirme işlemi yapılmıştır. Bu eşleştirme işlemi yapılırken max. periyot 2 s, min. periyot ise 0.1 s olarak alınmıştır. Spektrum eğrilerinin oluşturulmasında sönüm oranı %5 olarak alınmıştır.

Seismo Match programından elde edilen orijinal ve eşleştirilmiş tepki spektrumları Tablo 4'te, orijinal ve eşleştirilmiş ivme kayıtları ise Tablo 5'te verilmiştir. TBDY 2018'de DD2 deprem yer hareketi düzeyi standart tasarım deprem yer hareketi olarak verildiğinden dolayı sadece DD2 düzeyi için analiz yapılmıştır.

Şekil 4'te güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş modellere ait 1. mod periyotlarının eşleştirilmiş tepki spektrumunda hangi bölgede yer aldığı gösterilmiştir. Şekil 4'te görüldüğü üzere her iki modele ait 1. mod periyotları tepki spektrumunda aynı bölgede yer almaktadır.

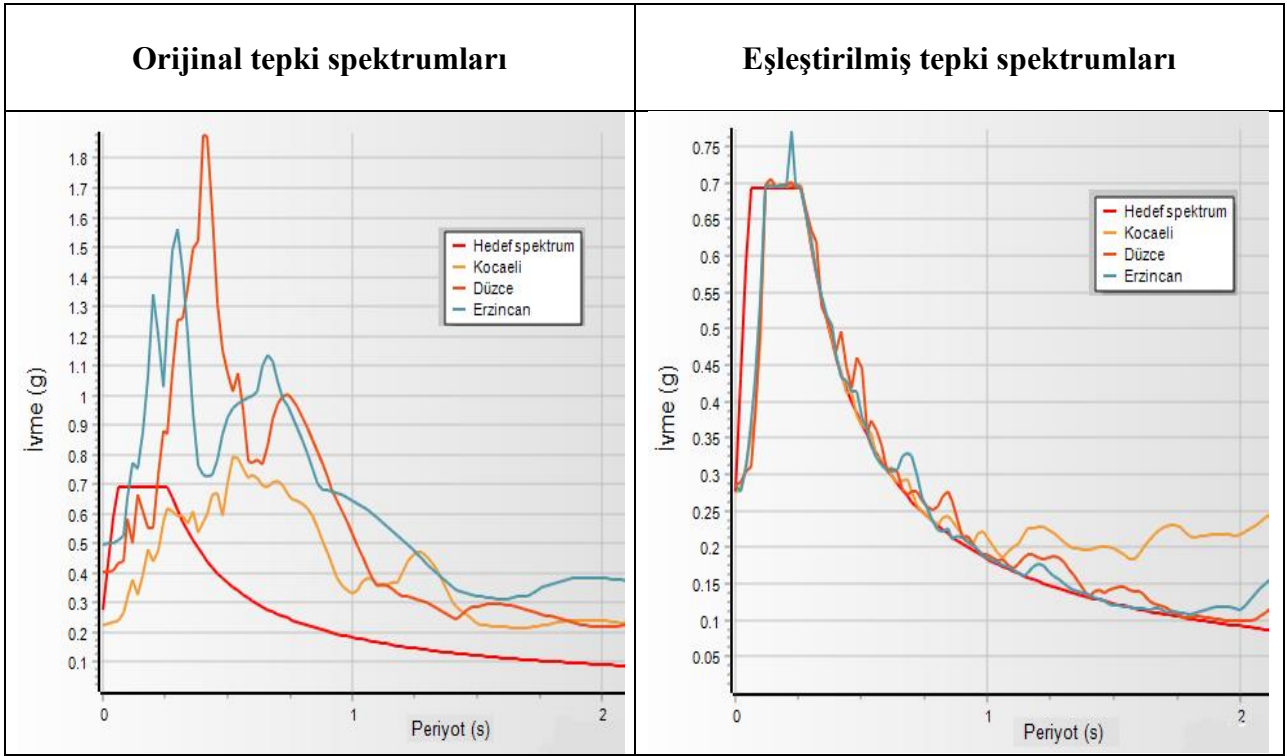
Tablo 2. Deprem verileri (AFAD)

Deprem yer hareketi düzeyi	Yerel zemin sınıfı	S _s	S ₁
DD2	ZA	0.866	0.230

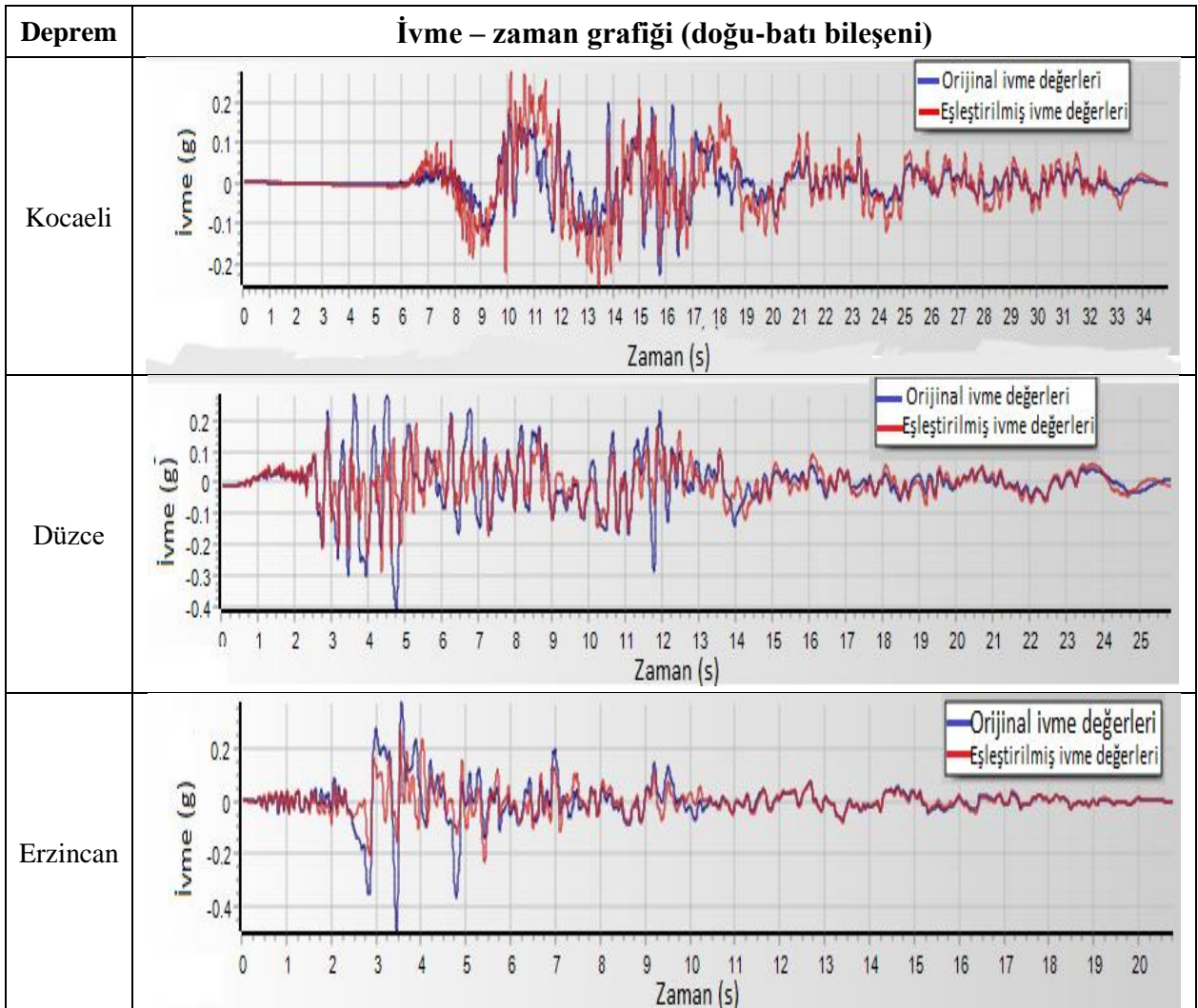
Tablo 3. Analizde kullanılan depremler (PEER)

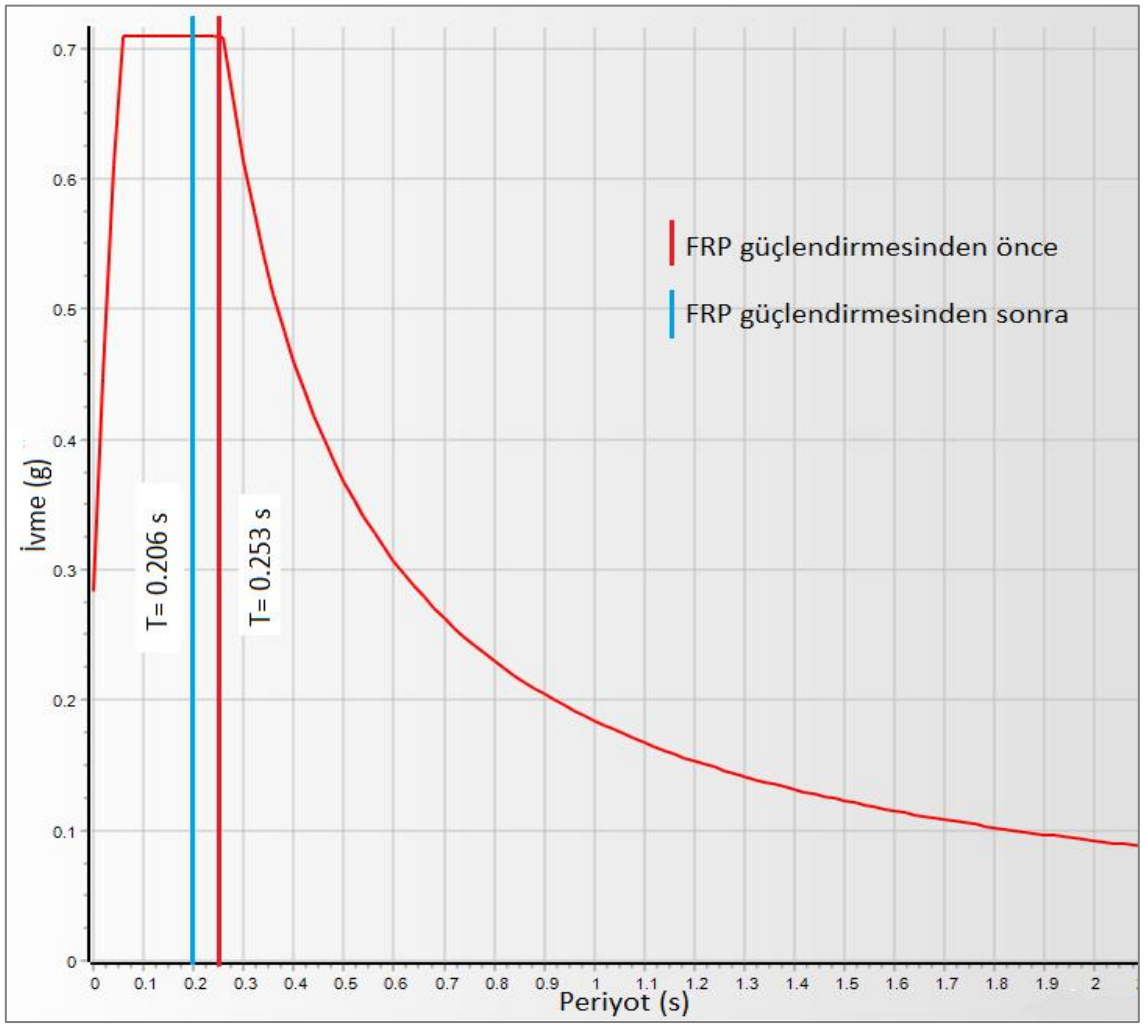
Deprem	İstasyon	M _w	PGA (g)	PGV (m/s)
Kocaeli (1999)	Yarımca	7.51	0.23	0.65
Düzce (1999)	Düzce	7.14	0.28	0.71
Erzincan (1992)	Erzincan	6.69	0.49	0.78

Tablo 4. Orijinal ve eşleştirilmiş tepki spektrumları (Seismomatch)



Tablo 5. Orijinal ve eşleştirilmiş ivme kayıtları (PEER; Seismo Match)





Şekil 4. 1. moda ait periyotların eşleştirilmiş tepki spektrumundaki yerleri

4. Bulgular ve Tartışma

4.1. Modal analiz

Modal analiz için toplamda 40 adet mod için çözüm yapılmıştır. 1. modda elde edilen, etkin kütlelerin binanın toplam kütlesine oranları (kütle katılım oranları) Tablo 6'da gösterilmiştir.

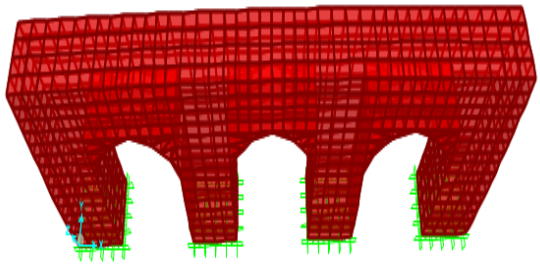
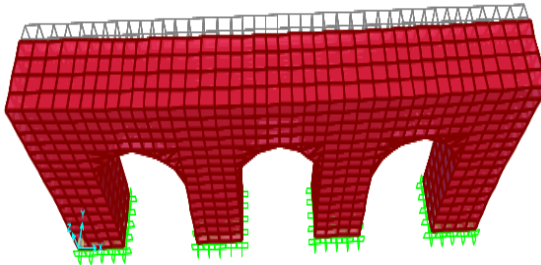
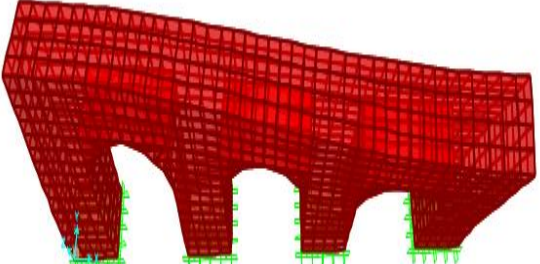
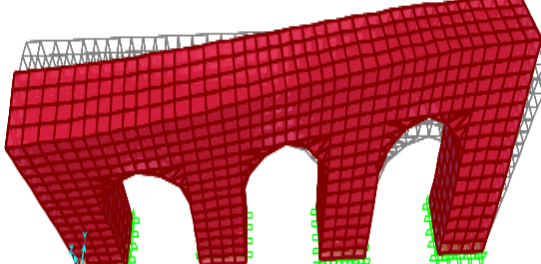
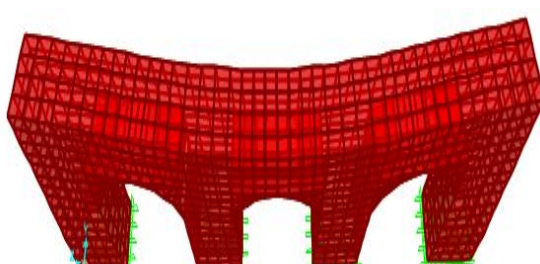
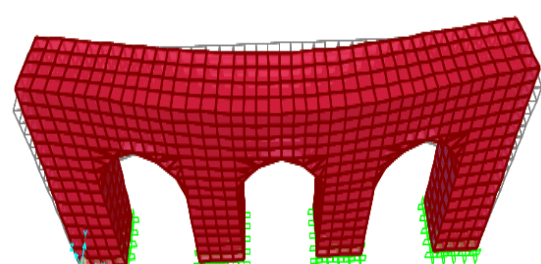
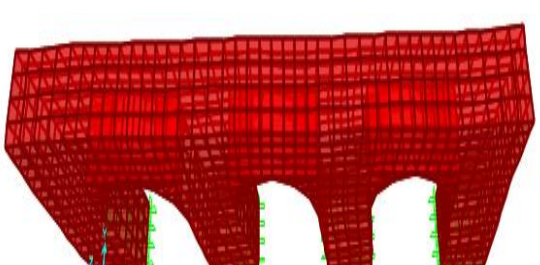
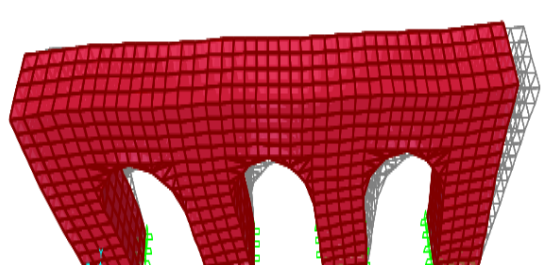
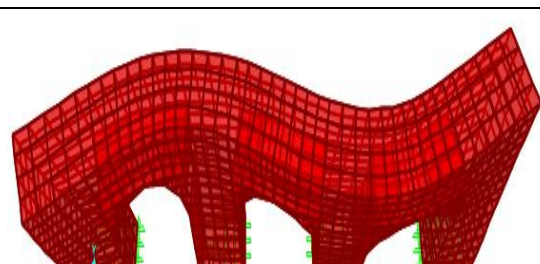
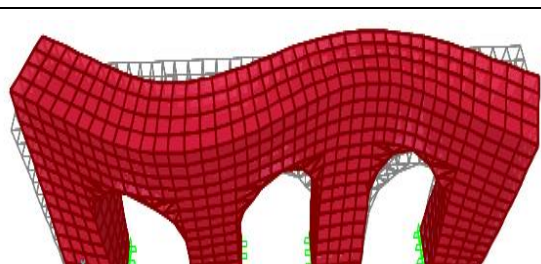
Yığma kemer türündeki yapıların davranışlarının belirlenmesinde mod şekilleri önemlidir. Modeller üzerinde yapılan modal analizler sonucunda elde edilen ilk beş mod şekilleri Tablo 7'de verilmiştir. Tablo 7'de görüldüğü üzere ilk beş mod şekli benzerlik göstermektedir bununla birlikte FRP güçlendirmesinden sonra periyot değerleri önemli ölçüde azalmıştır. Örneğin 1. modlara ait periyot değerleri karşılaştırıldığında FRP güçlendirmesinden sonra periyot %18.6 azalmıştır.

Bunun nedeni FRP güçlendirmesinden sonra yığma kemer yapısının rijitliğinin artmasıdır.

Tablo 6. Kütle katılım oranları

Mod	Model	Kütle katılım oranı		
		X yönünde	Y yönünde	Z yönünde
1	FRP ile güçlendirilmemiş	0.000	0.708	0.000
	FRP ile güçlendirilmiş	0.000	0.710	0.000

Tablo 7. Modal analiz sonucunda elde edilen mod şekilleri

Mod	FRP güçlendirilmemiş modele ait mod şekilleri	FRP güçlendirilmiş modele ait mod şekilleri	Mod davranışı
1	 <p>T1= 0.253 s</p>	 <p>T1= 0.206 s</p>	1. Akış yönünde eğilme modu
2	 <p>T2= 0.180 s</p>	 <p>T2= 0.148 s</p>	1. Asimetrik burulma
3	 <p>T3= 0.111 s</p>	 <p>T3= 0.092 s</p>	2. Akış yönünde eğilme modu
4	 <p>T4= 0.105 s</p>	 <p>T4= 0.091 s</p>	1. Akış yönüne dik eğilme modu
5	 <p>T5= 0.067 s</p>	 <p>T5= 0.055 s</p>	2. Asimetrik burulma modu

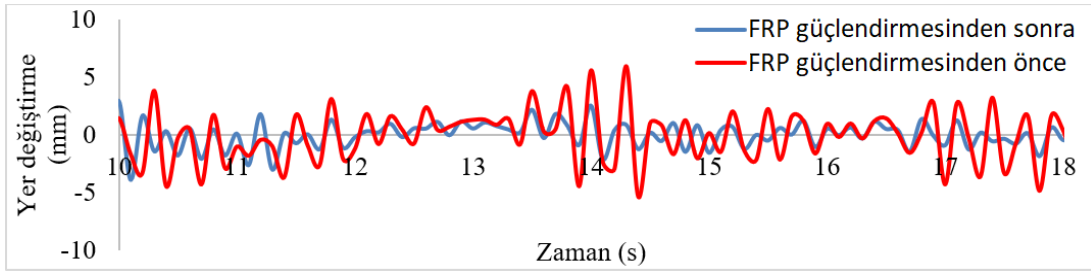
4.2.Zaman tanım alanında analiz

SAP2000 programında oluşturulan FRP ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş modeller üzerinde Tablo 5’te verilen depremlere ait ivme kayıtları kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal analizler yapılmıştır. Tablo 6’da gösterilen 1. moda ait kütle katılım oranlarına bakıldığında, y yönü,

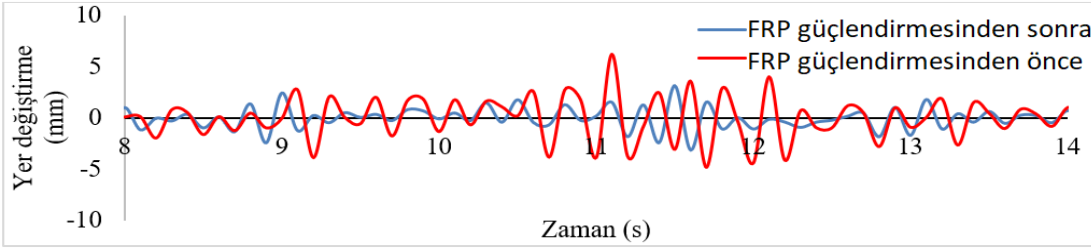
davranışa hakim olduğu için sadece y yönünde (dere akış yönünde) analiz yapılmıştır. Zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda elde edilen en büyük yer değiştirme değerleri Tablo 8’de, zamana bağlı olarak değişen yer değiştirmeler ise Şekil 5’te FRP güçlendirmesinden önce ve sonraki durumlar için gösterilmiştir. Şekil 5’te yer değiştirmelerin en büyük olduğu zaman dilimleri ele alınmıştır.

Tablo 8. En büyük yer değiştirme değerleri

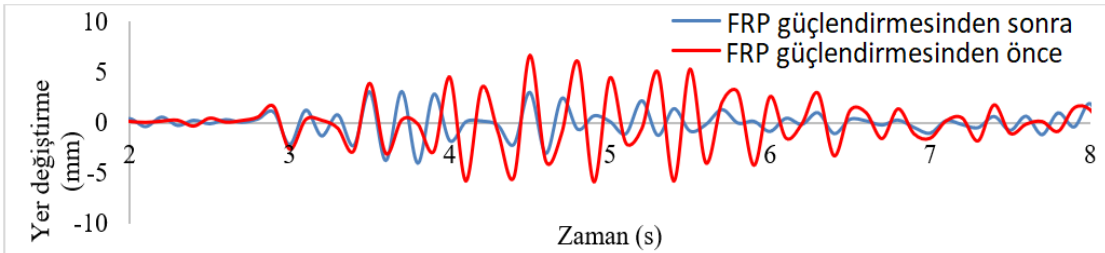
Deprem	En büyük yer değiştirme (mm)		Yer değiştirmedeki azalma (%)
	FRP güçlendirmesinden önce	FRP güçlendirmesinden sonra	
Kocaeli	5.9	2.9	50.8
Düzce	6.1	3.2	47.5
Erzincan	6.7	4	40.2



a) Kocaeli depremi



b) Düzce depremi



c) Erzincan depremi

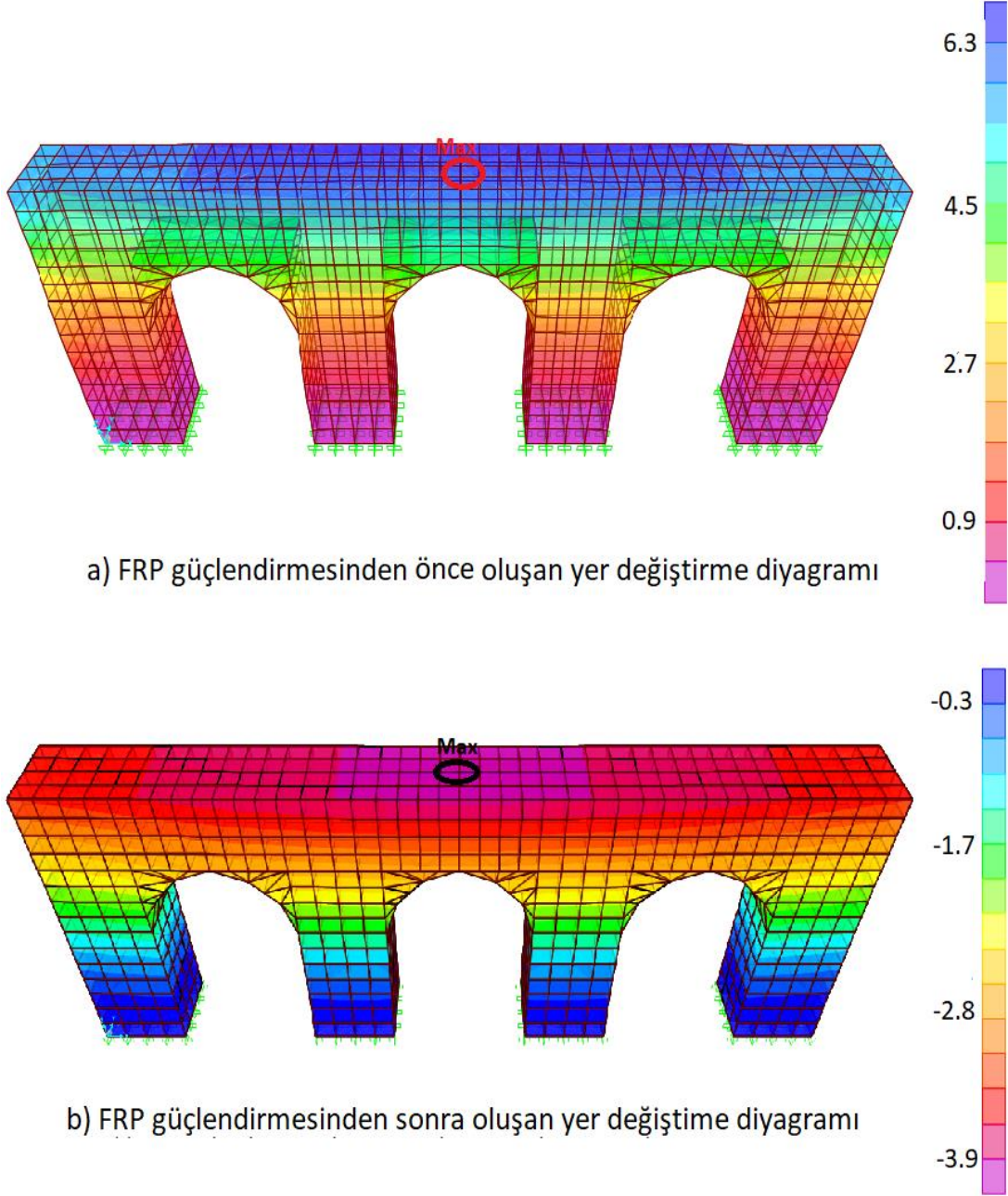
Şekil 5. Yer değiştirme- zaman grafikleri

Tablo 8 ve Şekil 5’te görüldüğü üzere tüm deprem yüklemeleri sonucunda FRP güçlendirmesinden sonra yer değiştirmeler önemli ölçüde azalmıştır. Örneği Kocaeli depremi için bu azalma %50.8 oranında olmuştur. Şekil 6’da Erzincan depremi için elde edilen yer değiştirme diyagramı FRP güçlendirmesinden önce ve sonraki durumlar için

gösterilmiştir. Şekil 6’da görüldüğü üzere her iki modelde de yükseklik arttıkça yer değiştirmeler artmıştır. Bununla birlikte en büyük yer değiştirme değerleri her iki modelde kemer yapısının orta bölgesinin tepe noktasında meydana gelmiştir.

Tablo 9’da Tüm deprem yüklemeleri için her iki modelde oluşan en büyük maksimum ve minimum asal gerilmeler ile en büyük kayma gerilmeleri verilmiştir. Bu tabloya göre tüm deprem yüklemeleri için maksimum ve minimum asal gerilme ile kayma gerilmesi değerleri FRP güçlendirmesinden sonra önemli ölçüde azalmıştır. Örneğin Kocaeli depremi için en büyük maksimum ve minimum asal gerilme ile en büyük kayma gerilmesi sırasıyla %52.0, 52.0 ve 45.8 oranında azalmıştır.

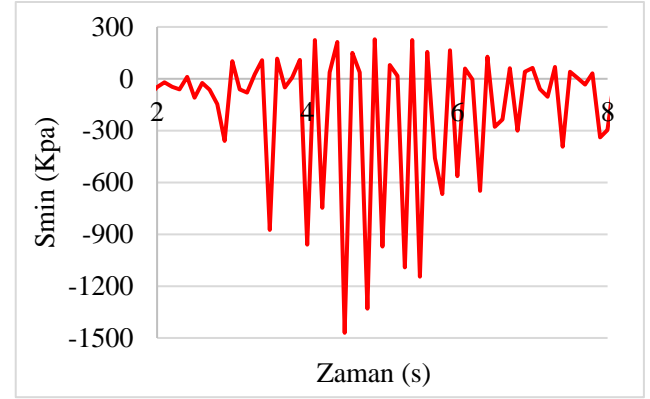
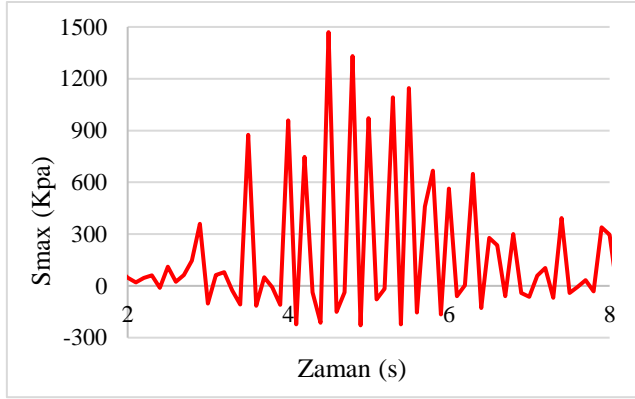
Şekil 7’de Erzincan depremi yüklemesi sonucunda en büyük maksimum ve minimum asal gerilme grafikleri zamana bağlı bir şekilde verilmiştir. Bu grafikte deprem ivmesinin en yüksek olduğu zaman dilimleri (2-8 s aralığı) ele alınmıştır. Şekil 8 ve Şekil 9’da ise sırasıyla Erzincan depremi yüklemesi sonucunda elde edilen maksimum ve minimum asal gerilme diyagramı ile kayma gerilmesi diyagramı gösterilmiştir.



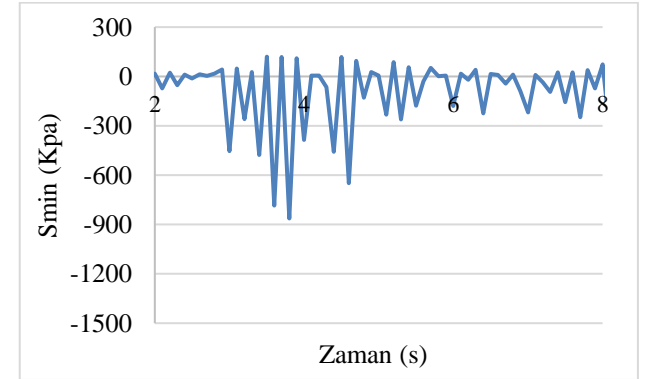
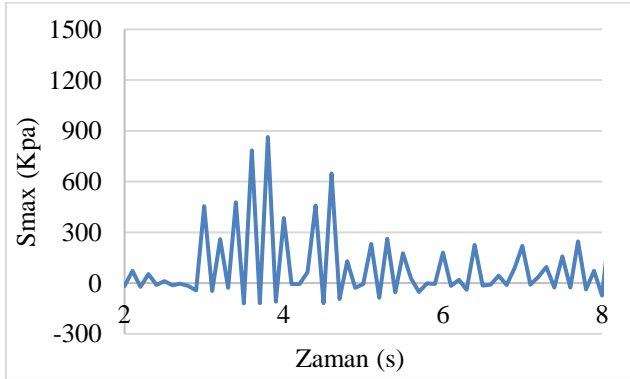
Şekil 6. Erzincan depremi için elde edilen yer değiştirme diyagramı (mm)

Tablo 9. En büyük maksimum/minimum asal gerilme ve kayma gerilmesi değerleri

Gerilme türü	Deprem	FRP güçlendirmesinden önce (Kpa)	FRP güçlendirmesinden sonra (Kpa)	Gerilmedeki azalma (%)
Max. asal gerilme (Smax)	Kocaeli	1290	619	52.0
	Düzce	648	345	46.8
	Erzincan	1469	863	41.3
Min. asal gerilme (Smin)	Kocaeli	-1290	-619	52.0
	Düzce	-648	-345	46.8
	Erzincan	-1469	-863	41.3
Max. kayma gerilmesi	Kocaeli	153	83	45.8
	Düzce	154	90	41.6
	Erzincan	166	91	45.2

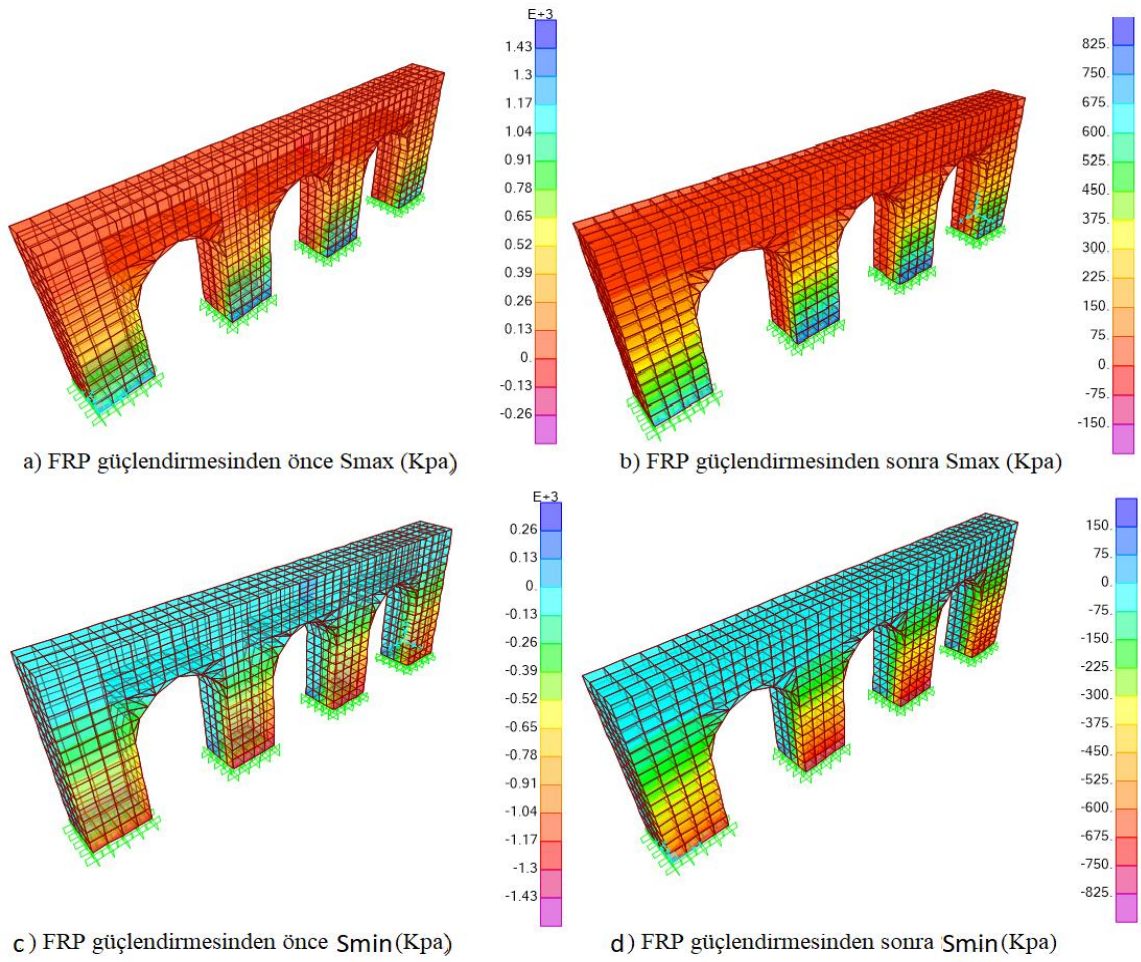


a) FRP güçlendirmesinden önce

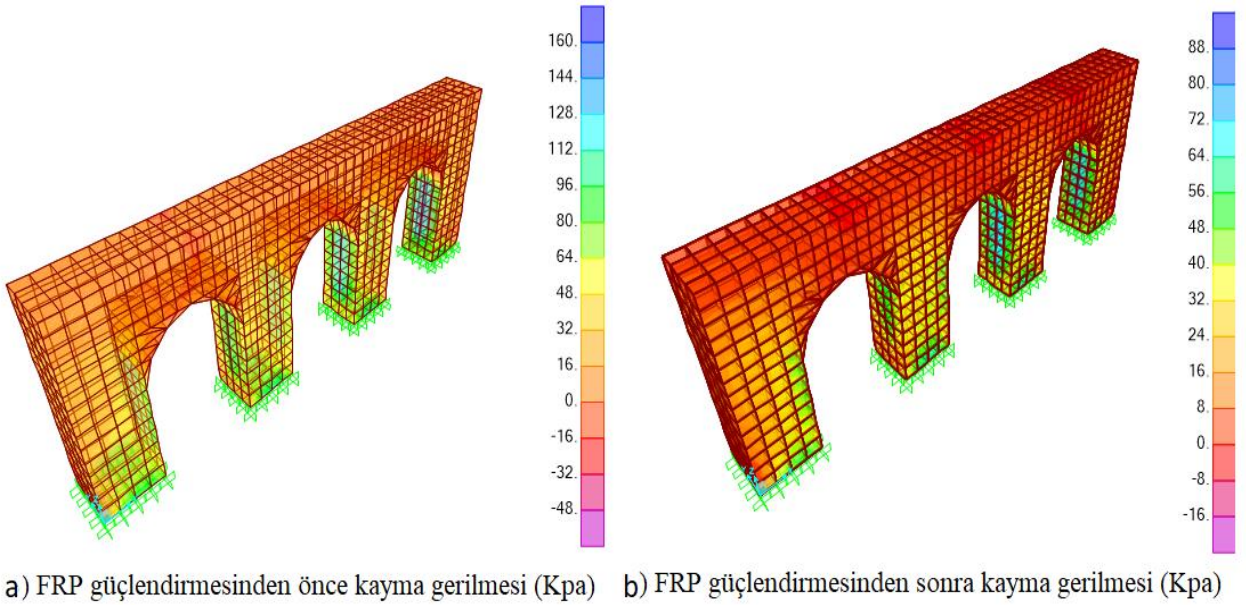


b) FRP güçlendirmesinden sonra

Şekil 7. Erzincan depremi için maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamana bağlı grafikleri



Şekil 8. Erzincan depremi için elde edilen en büyük maksimum ve minimum asal gerilme diyagramları



Şekil 9. Erzincan depremi için en büyük kayma gerilmesi diyagramı

Şekil 8’de görüldüğü üzere maksimum ve minimum asal gerilmeler her iki modelde de mesnet bölgelerinde en büyük değerlerine ulaşmıştır. Literatürde kemer köprüler için yapılan çalışmalarda da benzer olarak maksimum ve minimum asal gerilmeler kemer ayaklarının zemine mesnetlendiği

bölgelerde en büyük değerlerine ulaşmıştır (Sakcalı vd., 2019; Özmen ve Sayın, 2020; Özmen ve Sayın, 2021).

Şekil 9’da görüldüğü üzere kayma gerilmeleri her iki modelde de mesnet bölgelerinde en büyük

değerlerine ulaşmıştır. Literatürde kemer köprüler için yapılan çalışmalarda da kayma gerilmelerinin köprü ayaklarında en büyük değerlerine ulaştığı tespit edilmiştir (Özodabaş ve Artan, 2021).

5. Sonuç

Bu çalışmada FRP ile güçlendirmenin yığma kemer formundaki yapıların sismik davranışını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Bu amaçla SAP2000 programında FRP levha ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş 2 farklı sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve bu modeller üzerinde modal analiz ve üç farklı depreme ait ivme kayıtları kullanılarak zaman tanım alanında analizler yapılmıştır.

FRP levha ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş modeller üzerinde yapılan modal analizler sonucunda FRP güçlendirmesinden sonra periyot değerinin önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir.

Zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda ise:

- Yığma kemer yapısında oluşan en büyük yer değiştirme değerlerinin tüm deprem yüklemeleri için FRP ile güçlendirmeden sonra büyük ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. En büyük yer değiştirmelerdeki azalmalar Kocaeli, Düzce ve Erzincan depremleri için sırasıyla %50.8, 47.5 ve 40.2 oranında gerçekleşmiştir. Her iki modelde de tüm deprem yüklemeleri sonucunda yerden yükseklik arttıkça yer değiştirme değerlerinin arttığı ve kemer yapısının orta bölgesinin tepe noktasında en büyük değerine ulaştığı tespit edilmiştir.
- En büyük maksimum ve minimum asal gerilme ile en büyük kayma gerilmesi değerleri FRP güçlendirmesinden sonra tüm deprem yüklemeleri için kayda değer bir biçimde azalmıştır. Kayma gerilmeleri her iki modelde de kemer yapısının ayak bölgelerinde en büyük değerlerine ulaşmıştır. Maksimum ve minimum asal gerilmeler de içteki kemer ayaklarının yere mesnetlendiği bölgelerde en büyük değerlerine ulaşmıştır. Dolayısıyla muhtemel bir deprem sonucunda kemer yapısında hasarın ilk oluşacağı bölge mesnet bölgesi olarak tespit edilmiştir. Özellikle bu bölgenin FRP levha ile güçlendirilmesi tavsiye edilmektedir.

6. Kaynaklar

- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Ankara, Türkiye.
- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması. Erişim Tarihi: 20.03.2023. <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>
- Altunışık, A.C., 2011. Dynamic Response of Masonry Minarets Strengthened with Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, (7), 2011-2019.
- Anania, L., Badalà, A., D'Agata, G., 2013. The Post Strengthening of The Masonry Vaults by The Ω -Wrap Technique Based on the Use of C-FRP. *Construction and Building Materials*, 47, 1053-1068.
- ANSYS, 2008. Swanson Analysis System, US.
- ATC-40, 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings-Vol.1, Applied Technology Council, Redwood City, CA
- De Lorenzis, L., Dimitri, R., La Tegola, A., 2007. Reduction of The Lateral Thrust of Masonry Arches and Vaults with FRP Composites. *Construction and Building Materials*, 21, (7), 1415-1430.
- Foraboschi, P., 2004. Strengthening of Masonry Arches with Fiber-Reinforced Polymer Strips. *Journal of Composites for Construction*, 8, (3), 191-202.
- Işık, E., Antep, B., 2018. Ahlat İlçesinde Yer Alan Tarihi Yığma Minarenin Yapısal Analizi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7, (1), 46-56.
- Kader A, Sayın E, Özmen A., 2021. Farklı Sönüm Tipleri Altında Tarihi Yığma Köprülerin Sismik Tepkilerinin Değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 34, (1), 45-59.
- Karaca, Z., Türkeli, E., Günaydın, M., Adanur, S., 2015. Dynamic Responses of Industrial Reinforced Concrete Chimneys Strengthened

- with Fiber-Reinforced Polymers. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 24, (3), 228-241.
- Korkmaz, K.A., 2017. A Simplified Strengthening Methodology for Minaret Structures in Turkey: Hagia Sophia Case. International Journal of Architectural Engineering Technology, 4, 11-17.
- Landolfo, R., Portioli, F., Mammana, O., Mazzolani, F.M. 2007. Finite Element and Limit Analysis of the Large Scale Model of Mustafa Pasha Mosque in Skopje Strengthened with FRP. Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS), 12-14 December, Hong Kong, China, 283-288.
- Laterza, M., D'Amato, M., Casamassima, V.M., 2017. Seismic Performance Evaluation of Multi-Span Existing Masonry Arch Bridge. International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM), In AIP Conference Proceedings Book, Rhodes, Greece, 1863, 450010.
- Lourenco P.B., 1996. Computational Strategy for Masonry Structures. Delft University Press, p., 210, Delft, The Netherlands.
- Lourenco, P.B., Oliveira, D.V., 2006. Strengthening of Masonry Arch Bridges: Research and Applications. International Conference on Advances in Bridge Engineering, London, UK, 107-116.
- Mahdikhani, M., Naderi, M., Zekavati, M., 2016. Finite Element Modeling of the Influence of FRP Techniques on the Seismic Behavior of Historical Arch Stone Bridge. Computers and Concrete, 18, (1), 99-112.
- Omar, A., Tartoussi, N., 2019. Seismic Analysis and Retrofitting with FRP of an Old Masonry Clock Tower. 7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 24-26 June, Crete, Greece.
- Özmen A, Sayın E., 2020. Tarihi Yığma bir Köprünün Deprem Davranışının Değerlendirilmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9, (2), 956-965.
- Özmen, A., Sayın, E., 2021. Seismic Response of a Historical Masonry Bridge Under Near and Far-Fault Ground Motions. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 65, (3), 946-958.
- Özodabaş, A., Artan, C., 2021. Determination of Stress and Deformation Zones of Historical Mus Murat Bridge. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8, (1), 413-429.
- PEER, Pacific Earthquake Engineering Research Centre, 2008.
- Sakcalı, G.B., Gönül, A., Yüksel, İ., 2019. Seismic Behavior of Historical Masonry Bridges: The Case Study of Irgandi Bridge. International Journal, 6, 25, 24-32.
- SAP2000. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual. Computer and Structures Inc., Berkeley, California,
- Seismosoft, 2023. SeismoMatch 2023-A Computer Program for Spectrum Matching of Earthquake Records.
- Sivaraja, S.S., Thandavamoorthy, T.S., Vijayakumar, S., Aranganathan, S.M., Dasarathy, A.K., 2013. Preservation of Historical Monumental Structures Using Fibre Reinforced Polymer (FRP)-Case Studies. Procedia Eng., 54, 472-479.
- Sözen, Ş., Çavuş, M., 2020. Tek Açıklıklı Tarihi Taş Köprülerde Form Değişikliğinin Köprünün Sismik Davranışına Etkisinin Değerlendirilmesi: Niksar Yılanlı (Leylekli) Köprü Örneği. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8, (1), 48-59.
- Türkeli, E., 2020. Comparative Dynamic Seismic Analyses of RC Minarets Strengthened with FRP And Buttresses. Journal of Natural Hazards and Environment, 6, (1), 119-136.