

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BETONARME KÖPRÜLERDE MODAL, LİNEER ve LİNEER OLMAYAN  
DAVRANIŞA DONATI ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Umut Ufuk DOĞAN**

**OCAK 2019**

**TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BETONARME YAPILARDA DONATININ MODAL, DOĞRUSAL VE DOĞRUSAL  
OLMAYAN DAVRANIŞA ETKİSİNİN BELİRLENMESİ**

**İnş. Müh. Umut Ufuk DOĞAN**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**  
**"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 02 / 01 / 2019**

**Tezin Savunma Tarihi : 25 / 01 / 2019**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK**

**Trabzon 2019**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında  
İnş. Müh. Umut Ufuk DOĞAN Tarafından Hazırlanan**

**BETONARME KÖPRÜLERDE MODAL, LİNEER VE LİNEER OLMAYAN DAVRANIŞA  
DONATI ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 08/ 01 / 2019 gün ve 1786 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

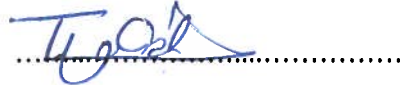
**Başkan : Prof. Dr. Süleyman ADANUR**



**Üye : Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK**



**Üye : Doç. Dr. Tufan ÇAKIR**



**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

“Betonarme Köprülerde Modal, Lineer ve Lineer olmayan Davranışa Donatı Etkisinin İncelenmesi” isimli tez çalışmasını bana öneren ve her aşamasında gerek bilgi ve tecrübelerini gerekse maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmama başından beri emeği geçen tüm değerli hocalarıma çok teşekkür eder, kendilerine minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Akademik hayattaki güçlükleri beraber atlattığımız, sevinçleri ve üzüntüleri beraber yaşadığımız, en zor zamanlarımda hep yanımda olan değerli dostlarım Sayın Arş. Gör. Mustafa ERGÜN'e, Sayın İnş. Müh. İsmail DOĞAN'a, Sayın Öğr. Gör. Mehmet YILMAZ'a ve Sayın Arş. Gör. Dr. Barbaros ATMACA'ya şükranlarımı sunarım.

Öğrenim hayatım süresince bana her türlü desteği veren annem Nazire DOĞAN'a, ablam Vijdan DOĞAN'a müteşekkir olduğumu belirtmek isterim. Ayrıca, tüm desteğiyle yanımda olan eşim Hilal Tuba DOĞAN'a ve çocuklarım Çınar ve Affan'a göstermiş olduğu sabır ve sevgiden dolayı teşekkür eder, bu çalışmanın yeni çalışmalara ışık tutmasını ve Ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Umut Ufuk DOĞAN

Trabzon 2019

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Betonarme Köprülerde Modal, Lineer ve Lineer olmayan Davranışa Donatı Etkisinin İncelenmesi ” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma süresince bilimsel çalışma ve etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 02/01/2019.

Umut Ufuk DOĞAN

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	II
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	III
İÇİNDEKİLER.....	IV
ÖZET .....	VI
SUMMARY .....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XII
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Betonarme Köprülerde Donatının Dinamik Karakteristiklere Etkisi Üzerine Daha Önce Yapılan Çalışmalar .....	9
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği .....	19
1.4. Sonlu Eleman Yöntemiyle İlgili Dinamik Formülasyon .....	20
1.4.1 Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi .....	20
1.4.2. Newmark Yöntemine Göre Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz .....	21
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR ve BULGULAR .....	24
2.1. Giriş .....	24
2.2. Model Köprünün Geometrik Özellikleri .....	24
2.3. Model Köprünün Analizinde Kullanılacak Malzemelerin Seçimi .....	26
2.4. Model Köprünün Sonlu Eleman Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi .....	27
2.5. Model Köprünün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi .....	29
2.5.1. Modal Analiz .....	30
2.6. Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz .....	34
2.6.1. Zaman Tanım Alanında Lineer Dinamik Analiz .....	35
2.6.2. Zaman Tanım Alanında Lineer Olmayan Dinamik Analiz .....	41
2.7. Köprünün Sayısal Modellenmesinde Donatı Etkisinin Araştırılması.....	48
2.7.1. Donatının Modal Davranışa Etkisi .....	49

2.7.2. Donatının Lineer Davranışa Etkisi .....	49
2.7.3. Donatının Lineer Olmayan Davranışa Etkisi.....	52
2.8. İki Kat Büyütülmüş Modele Ait Bulgular .....	56
2.8.1. Donatısız Beton Modele Ait Bulgular .....	56
2.8.2. Donatılı Beton Modele Ait Bulgular .....	58
2.8.3. İki Kat Büyütülmüş Modelde Donatının Lineer Olmayan Analize Etkisine Ait Bulgular .....	61
3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	64
4. KAYNAKLAR .....	69
ÖZGEÇMİŞ	



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

BETONARME KÖPRÜLERDE MODAL, LİNEER VE LİNEER OLMAYAN  
DAVRANIŞA DONATI ETKİSİNİN İNCELENMESİ  
Umut Ufuk DOĞAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK  
2019, 72 Sayfa

Bu tez çalışmasında, betonarme köprülerde donatının yapısal davranışa olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, laboratuvar ortamında daha önceden başka bir çalışma için oluşturulmuş model bir köprü boyutları göz önünde bulundurularak ANSYS sonlu eleman programında sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Yüksek Lisans tez çalışması üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde; betonarme köprülerde donatının yapısal davranış üzerindeki etkisinin belirlenmesi ile ilgili literatür çalışmaları ve sonlu eleman yöntemi ile ilgili genel bilgiler ve bu yöntemlerde kullanılan bazı formülasyonlar sunulmaktadır.

İkinci bölümde; yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgular sunulmaktadır. Bu bölümde sunulan sonlu eleman modelinin oluşturulması kısmında; ilk olarak seçilen köprü modeli 1/1 ölçekte donatısız olarak, sadece beton malzemeden oluşan bir hacim şeklinde ANSYS sonlu eleman analiz programı kullanılarak modellenmiştir. Daha sonra aynı köprü model hali hazır donatı durumu dikkate alınarak yeniden ANSYS programında donatılı olarak modellenmiştir. Elde edilen iki farklı (donatılı ve donatısız) modele ait dinamik karakteristikler belirlenmiş ve birbirleriyle karşılaştırarak donatının bu dinamik karakteristikler üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Ayrıca bu bölümde, köprü modelinin donatılı ve donatısız sonlu eleman modelleri üzerinde 1992 yılı Erzincan depremine ait etkin deprem ivme kaydı kullanılarak lineer ve lineer olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiş ve yapısal davranış değerlendirilmiştir. Sonuçlar, grafik ve tablolar ile karşılaştırmalı olarak bu bölümde sunulmuştur.

Üçüncü bölümde; yapılan bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar ile bazı önerilere yer verilmektedir. Bu bölümde son olarak kaynaklar ve özgeçmiş sunulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Betonarme, Dinamik Karakteristik, Donatı, Köprü, Lineer Analiz, Lineer Olmayan Analiz, Sonlu Eleman Yöntemi



Master Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF REBAR EFFECT ON MODAL, LINEAR AND NONLINEAR  
BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BRIDGES

Umut Ufuk DOĞAN

Karadeniz Technical University  
Institute of Natural Sciences  
Civil Engineering Programs  
Advisor: Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK  
2019, 72 Page

In this thesis, the effect of rebar on structural behavior in reinforced concrete bridges is investigated. For this purpose, numerical studies were carried out in ANSYS finite element program by considering the dimensions of a model bridge which was previously formed in laboratory for different a study.

Master thesis is consist of three chapters. In the first chapter, literature studies about the determination of the effect of rebar on structural behavior in reinforced concrete bridges and general information about the finite element method and some formulations used in these methods are presented.

In the second chapter, the studies and the findings obtained from these studies are presented. In this chapter, the 1/1 scaled model of the bridge which is chosen in the creation of the finite element model is modelled in the form of a volume consisting of only concrete material without rebar element using by ANSYS finite element analysis program. Then, in the same bridge model, by considering the rebar, it is modelled again in the ANSYS program. The dynamic characteristics of the two different (non-reinforced and non-reinforced) models are determined and the effects of the rebar on these dynamic characteristics are examined. In this chapter, linear and nonlinear dynamic analyzes are carried out by applying the effective earthquake acceleration of the 1992 Erzincan earthquake and the structural behavior is evaluated. The results are presented in this chapter in comparison with graphs and tables.

In the third chapter, some suggestions are given with the results obtained within the scope of this thesis. In this section, references and curriculum vitae are presented.

**Keywords:** ANSYS Finite Element Bridge Model, Dynamic Characteristic, Earthquake Behaviour, Linear Analysis, Model Analysis, Non-Linear Analysis.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Joseph Louis Lambot'un betonarme tekniğini kullanarak yapmış olduğu tekne.....	3
Şekil 1.2. Joseph Monier'in betonarme tekniğini kullanarak yapmış olduğu saksı tasarımı .....	3
Şekil 1.3. Wilkinson'un konut ve depo tipi yapılar için geliştirdiği hasır donatı sistemi .....	4
Şekil 1.4. Ward'ın betonarme tekniğini kullanarak inşa ettiği konut .....	4
Şekil 2.1. Model köprüye ait 3B görünüş .....	25
Şekil 2.2. Model köprüye ait 2B görünüşler .....	25
Şekil 2.3. Model köprüye ait tabliye en kesiti görünüşü.....	26
Şekil 2.4. Solid 65 tipi eleman .....	27
Şekil 2.5. Model Beton köprünün sonlu elemana bölünmüş üç boyutlu gösterimi .....	28
Şekil 2.6. Link 180 tipi eleman .....	28
Şekil 2.7. Model köprünün Ayaklarındaki ve tabliyesindeki donatı çubuklarının üç boyutlu sonlu eleman modeli gösterimi.....	29
Şekil 2.8. Model Betonarme köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli gösterimi. ....	30
Şekil 2.9. Model köprüye ait mod şekilleri.....	33
Şekil 2.10. Erzincan 1992 yılı deprem ivme-zaman kaydı .....	34
Şekil 2.11. Erzincan 1992 yılı deprem hız-zaman kaydı .....	34
Şekil 2.12. Erzincan 1992 yılı deprem yerdeğiştirme-zaman kaydı .....	35
Şekil 2.13. Donatısız modelin zaman tanım alanında lineer analizi için maksimum yerdeğiştirme diyagramı .....	36
Şekil 2.14. Donatılı modelin zaman tanım alanında lineer analizi için maksimum yerdeğiştirme diyagramı .....	36
Şekil 2.15. Donatısız modelin lineer analizi için maksimum asal gerilme diyagramı .....	37
Şekil 2.16. Donatılı modelin lineer analizi için maksimum asal gerilme diyagramı .....	37
Şekil 2.17. Donatısız modelin lineer analizi için minimum asal gerilme diyagramı .....	38
Şekil 2.18. Donatılı modelin lineer analizi için minimum asal gerilme diyagramı .....	38

Şekil 2.19.	Donatısız modelin lineer analizi için maksimum asal şekildeğiştirme diyagramı.....	39
Şekil 2.20.	Donatılı modelin lineer analizi için maksimum asal şekildeğiştirme diyagramı .....	39
Şekil 2.21.	Donatısız modelin lineer analizi için minimum asal şekildeğiştirme diyagramı .....	40
Şekil 2.22.	Donatılı modelin lineer analizi için minimum asal şekildeğiştirme diyagramı .....	40
Şekil 2.23.	Beton malzeme için gırlen gerçek malzeme özelliklerine göre elde edilen Gerilme – Şekil değiştirme grafiği.....	42
Şekil 2.24.	Çelik malzeme için gırlen gerçek malzeme özelliklerine göre elde edilen Gerilme – Şekil değiştirme grafiği.....	42
Şekil 2.25.	Donatısız modelin zaman tanım alanında lineer olmayan analizi için maksimum yerdeğiştirme diyagramı .....	43
Şekil 2.26.	Donatılı modelin zaman tanım alanında lineer olmayan analizi için maksimum yerdeğiştirme diyagramı .....	44
Şekil 2.27.	Donatısız modelin lineer olmayan analizi için maksimum asal gerilme diyagramı .....	44
Şekil 2.28.	Donatılı modelin lineer olmayan analizi için maksimum asal gerilme diyagramı .....	45
Şekil 2.29.	Çelik malzeme için gırlen gerçek malzeme özelliklerine göre elde edilen Gerilme – Şekil değiştirme grafiği.....	45
Şekil 2.30.	Donatılı modelin lineer olmayan analizi için minimum asal gerilme diyagramı .....	46
Şekil 2.31.	Donatısız modelin lineer olmayan analizi için maksimum asal şekildeğiştirme diyagramı.....	46
Şekil 2.32.	Donatılı modelin lineer olmayan analizi için maksimum asal şekildeğiştirme diyagramı.....	47
Şekil 2.33.	Donatısız modelin lineer olmayan analizi için minimum asal şekildeğiştirme diyagramı.....	47
Şekil 2.34.	Donatılı modelin lineer olmayan analizi için minimum asal şekildeğiştirme diyagramı.....	48
Şekil 2.35.	Donatısız beton modele ait maksimum yerdeğiştirme grafiği .....	56
Şekil 2.36.	Donatısız beton modele ait maksimum asal gerilme grafiği .....	56
Şekil 2.37.	Donatısız beton modele ait minimum asal gerilme grafiği.....	57
Şekil 2.38.	Donatısız beton modele ait maksimum şekildeğiştirme grafiği .....	57
Şekil 2.39.	Donatısız beton modele ait minimum şekildeğiştirme grafiği.....	57
Şekil 2.40.	Donatılı beton modele ait maksimum yerdeğiştirme grafiği .....	58
Şekil 2.41.	Donatılı beton modele ait maksimum asal gerilme grafiği.....	59

Şekil 2.42.	Donatılı beton modele ait minimum asal gerilme grafiği .....	59
Şekil 2.43.	Donatılı beton modele ait maksimum şekildeğiştirme grafiği.....	59
Şekil 2.44.	Donatılı beton modele ait minimum şekildeğiştirme grafiği .....	60
Şekil 2.45.	Donatılı-donatısız beton modellere ait maksimum yer değiştirme karşılaştırma grafiği (lineer olmayan analiz sonuçlarına göre) .....	61
Şekil 2.46.	Donatılı-donatısız beton modellere ait maksimum asal gerilme karşılaştırma grafiği (lineer olmayan analiz sonuçlarına göre) .....	61
Şekil 2.47.	Donatılı-donatısız beton modellere ait minimum asal gerilme karşılaştırma grafiği (lineer olmayan analiz sonuçlarına göre). .....	62
Şekil 2.48.	Donatılı-donatısız beton modellere ait maksimum şekil değiştirme karşılaştırma grafiği (lineer olmayan analiz sonuçlarına göre) .....	62
Şekil 2.49.	Donatılı-donatısız beton modellere ait minimum şekil değiştirme karşılaştırma grafiği (lineer olmayan analiz sonuçlarına göre) .....	62

## TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Beton ve donatının çeşitli etkiler altındaki karakteristik davranışları .....	1
Tablo 2.1. Model köprünün sonlu eleman analizlerinde kullanılan beton ve donatı çeliğine ait malzeme özellikleri .....	26
Tablo 2.2. Donatılı ve donatısız model köprüye ait doğal frekans değerleri .....	30
Tablo 2.3. Beton malzeme için Hognestat Modeline göre elde edilen gerilme-şekil değiştirme değerleri.....	41
Tablo 2.4. Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen modal analiz sonuçları .....	49
Tablo 2.5. Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden elde edilen maksimum yer değiştirme sonuçları .....	50
Tablo 2.6. Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden elde edilen maksimum asal gerilme sonuçları .....	50
Tablo 2.7. Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden elde edilen minimum asal gerilme sonuçları.....	51
Tablo 2.8. Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden elde edilen maksimum şekil değiştirme sonuçları .....	51
Tablo 2.9. Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden elde edilen minimum şekil değiştirme sonuçları.....	52
Tablo 2.10. Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen lineer olmayan analizlerden elde edilen maksimum yer değiştirme sonuçları.....	53
Tablo 2.11. Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen lineer olmayan analizlerden elde edilen maksimum asal gerilme sonuçları.....	53
Tablo 2.12. Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen lineer olmayan analizlerden elde edilen minimum asal gerilme sonuçları .....	66
Tablo 2.13. Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen lineer olmayan analizlerden elde edilen maksimum şekil değiştirme sonuçları.....	54
Tablo 2.14. Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen lineer olmayan analizlerden elde edilen minimum şekil değiştirme sonuçları.....	55

## SEMBOLLER DİZİNİ

$\ddot{U}$	: İvme
$\dot{U}$	: Hız
$U$	: Yer değiştirme
$\gamma$	: İvmede meydana gelen değişimi ifade eden katsayı
$C$	: Sönüm matrisi
$K$	: Rijitlik
$M$	: Kütle
$R$	: Yapı sistemine etkiyen ve zamanla değişen dış yük vektörü
$t$	: Zaman

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Kelime olarak, Fransızca'da donatılmış beton anlamına gelen Béton Armé teriminden türetilmiş olan betonarme, beton ve donatıdan oluşan bir yapı malzemesidir. Betonarme davranışın tam olarak sağlanabilmesi için bu iki malzemenin kendilerinden beklenen davranışı sergilemesi, diğer bir deyişle her birinin üzerine düşen görevi tam olarak yerine getirmesi gerekmektedir. Donatı; çekme etkilerinin, kısmen de kayma gerilmelerinin karşılanmasında etkili olduğu gibi, malzemenin sünek davranış göstermesine de katkıda bulunmaktadır. Beton ise basınç gerilmelerini karşılamasının yanında, etrafını sararak donatının burkulmasını önlemekte, malzemenin dış ortama karşı dayanıklılığını ve yangın dayanımını artırmaktadır. Bu iki malzeme arasında bu şekilde bir etkileşimin olmaması durumunda betonarmeden söz edilemez. Beton ve donatının ayrı malzemeler olarak çeşitli etkiler altındaki davranışları ve performansları Tablo 1.1'de verilmiştir.

Tablo 1.1. Beton ve donatının çeşitli etkiler altındaki karakteristik davranışları (Doğangün, 2018)

Özellik	Beton	Donatı
<b>Basınç dayanımı</b>	Oldukça yüksek basınç dayanımına sahiptir ( <i>bazı durumlarda donatının katkısına ihtiyaç duyar</i> ).	Donatı çubuklarının basınç kuvveti altında burkulma sorunu vardır ( <i>betonun sarmasına ihtiyaç duyar</i> ).
<b>Çekme dayanımı</b>	Çekme dayanımı oldukça düşüktür ( <i>donatının katkısına ihtiyaç duyar</i> ).	Oldukça yüksek çekme dayanımına sahiptir.
<b>Kesme dayanım</b>	Orta seviyelerde kesme dayanımına sahiptir ( <i>bazı durumlarda donatının katkısına ihtiyaç duyar</i> ).	Oldukça yüksek kesme dayanımına sahiptir.
<b>Yangın dayanımı</b>	Yangına karşı iyi bir dayanıma sahiptir.	Yangına karşı dayanımı oldukça zayıftır ( <i>betonun sarmasına ihtiyaç duyar</i> ).
<b>Süneklik</b>	Gevrek bir malzemedir. Bu yüzden süneklik özelliği oldukça zayıftır ( <i>donatının katkısına ihtiyaç duyar</i> ).	Süneklik özelliği oldukça iyidir.
<b>Durabilite</b>	Durabilite özelliği oldukça yüksek bir malzemedir.	Durabilitesi düşüktür, korozyona uğrama ihtimali oldukça yüksektir ( <i>betonun sarmasına ihtiyaç duyar</i> ).
<b>Sünme</b>	Çeşitli koşullar etkisi altında sünme meydana gelebilir ( <i>donatının katkısına ihtiyaç duyar</i> ).	Sünme olayı gerçekleşmez.
<b>Büzülme</b>	Çeşitli koşullar etkisi altında büzülme meydana gelebilir ( <i>donatının katkısına ihtiyaç duyar</i> ).	Büzülme olayı gerçekleşmez.

İnsanoğlu, binlerce yıl önce temel ihtiyaçlarından olan; barınma, ibadethane, ulaşım, vb. gibi gereksinimlerini karşılamak amacıyla doğal taş gibi çeşitli ilkel malzemeleri temel yapı malzemesi olarak kullanmıştır. Ellerinde herhangi bir bağlayıcı maddenin olmaması kolon ve kiriş gibi taşıyıcı elemanların tek parça taşlardan inşa edilmesini gerekli kılmıştır. Bu durum, ağır elemanların taşınmasında ve yerine montajında büyük sorunlar yarattığı için yapılan uygulamalar sınırlı seviyede kalmıştır. Çimento ve beton, ilkel çağların mağaralarında başlayıp, günümüzün devasa gökdelenlerine kadar gelen bu süreçte büyük ilerlemeler kaydedilmesini sağlayan iki temel malzeme olarak ortaya çıkmıştır. Fakat betonun çekme dayanımının çok düşük olması geçilen açıklıkların sınırlı kalmasını ve büyük açıklıkların geçilememesine neden olmuştur. Betondan kaynaklı bir takım kusurların çelik çubuklar ile telafi edilmesine yönelik yapılan çalışmalar neticesinde betonarme tekniği ortaya çıkmıştır. Betonarme tekniğinin tarihi süreç içerisinde gelişimi ile ilgili bir takım önemli bilgiler aşağıda takip eden paragraflarda verilmiştir (Celep ve Kumbasar, 1998; Nawy, 2000; Ersoy ve Özcebe, 2001; Topçu, 2005; Doğangün, 2018).

1756 yılı, çimento üretim tekniğindeki sıçramanın mihenk taşı olarak kabul edilir. Hidrolik bağlayıcılar ile ilgili ilk bilimsel araştırmayı yapan ve somut bir sonuca varan John Smeaton, kireç taşı ile kil karışımını pişirerek elde ettiği hidrolik çimentoyu, 1759 yılında yangında hasar gören Eddystone, Cornwall/İngiltere deniz fenerinin onarımında kullanmıştır. Smeaton, en uygun malzemeyi bulabilmek için değişik kireçtaşı ve puzolanik malzemeler ile sistematik deneyler yapmıştır. 1756 yılında yapılan deneyler sonucunda, kil içeren kireçtaşlarından elde edilen kireç ile yapılan karışımın daha sağlam olduğunu gözlemlemiştir. Smeaton, aynı teknik ile Ramsgate limanını inşa etmiş ve konu ile ilgili bilgilerini 1791 yılında “Narrative of the Building of the Eddystone Lighthouse” adlı kitabında yayınlamıştır. Smeaton çimentosu, bugünkü Portland çimentosunun öncüsüdür.

1824 yılı, ilk Portland çimentosunun ortaya çıktığı yıl olarak tarihe geçmiştir. İngiliz duvar ustası Joseph Aspdin, öğütölmüş kalker ve kil karışımını pişirdikten sonra toz haline getirerek bugünkü çimentonun özelliklerine sahip ilk bağlayıcıyı üretmeyi başarmıştır. Bu çimentoya, İngiltere’nin Portland şehri kıyılarındaki kayaların rengine benzediğinden dolayı “Portland çimentosu” adı verilmiştir.

1848 yılı, betonarme tekniğinin doğuşu olarak kabul edilir. Fransız çiftçi Joseph Louis Lambot, beton ile donatıyı birlikte kullanan tarihteki ilk kişidir. 1848 yılında, metal örgüleri ve donatıları birbirine bağlayarak elde ettiği hasır örgüler üzerine hidrolik çimento kullanarak bir tekne yapmıştır. 1851 yılında, beton ve çeliğin birlikte kullanımı

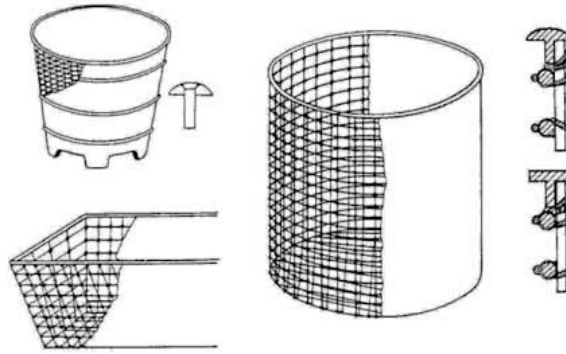


konusundaki ilk patentini almıştır. 1855 yılında ise Paris'teki bir sergide yapmış olduğu tekneyi ilk defa sergilemiştir. 3.66 m uzunluğuna, 1.22 m genişliğine ve 25-38 mm et kalınlığına sahip olan tekne, Fransa'daki Brigndes Müzesi'nde hala sergilenmektedir.



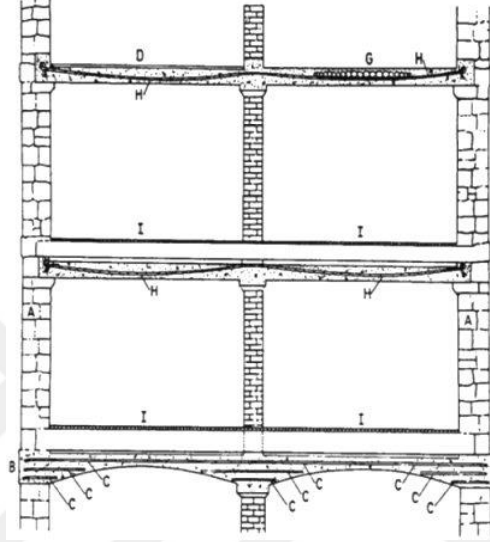
Şekil 1.1. Joseph Louis Lambot'un betonarme tekniğini kullanarak yapmış olduğu tekne (URL-1, 2018)

1850 yılı, betonarmenin babası olarak bilinen Fransız bahçıvan Joseph Monier'in betonarme tekniğini kullanarak yapmış olduğu öncü çalışmaların başlangıç yılı olarak kabul edilir. Monier, beton saksıların kırılma dayanımını azaltmak amacıyla hasır donatı kullanmıştır. Daha sonraki yıllarda, betonarme çiçek saksıları, betonarme borular, betonarme su depoları, betonarme cephe elemanları, betonarme köprü ayakları, betonarme kirişler ve betonarme kemerler üzerinde yapmış olduğu çok sayıda sistematik çalışmaları ve almış olduğu patentleri ile bu tekniğin gelişime önemli katkılar sağlamıştır.



Şekil 1.2. Joseph Monier'in betonarme tekniğini kullanarak yapmış olduğu saksı tasarımı (URL-1, 2018)

1854 yılında dünyadaki ilk betonarme bina uygulaması gerçekleştirilmiştir. İngiliz sıva ustası olan William Boutland Wilkinson, döşemeleri tel donatılı olan iki katlı bir evi 1854 yılında inşa etmiş ve patentini almıştır. Patentinde, demirin çekme kuvvetlerini, betonun ise basınç kuvvetlerini karşıladığından bahsetmiştir. Bu ifade, betonarme davranışın tanımını ile alakalı tarihteki ilk açıklamadır.



Şekil 1.3. Wilkinson'un konut ve depo tipi yapılar için geliştirdiği hasır donatı sistemi (URL-1, 2018)

1873 yılında, Amerikalı tüccar William E. Ward, New York'ta Amerika'nın ilk betonarme evini inşa etmiştir. Ward, inşa ettiği bu evde sürekli olarak şenlik ateşleri düzenleyerek betonarmenin yangına karşı dayanıklılığını test eden çalışmalar gerçekleştirmiştir.



Şekil 1.4. Ward'ın betonarme tekniğini kullanarak inşa ettiği konut (URL-2, 2018)

Tarihteki ilk beton köprü, 1816 yılında, Louis-Joseph Vicat tarafından Souillac (Dordogne)/Fransa’da inşa edilmiştir. İlk beton köprüden yaklaşık 60 yıl sonra betonarme köprülerin inşasına başlanmıştır. O tarihlerde, betonarme tekniğinin kullanılması ile inşa edilmiş köprülere ait bir takım örnekler aşağıda verilmiştir.

- 1875-1877 yılları arasında Joseph Monier, 13,8 m uzunluğunda ve 4,25 m genişliğinde ilk kirişli betonarme köprüyü Chazalet/Fransa’da inşa etmiştir.
- 1889 yılında, Lake Alvord köprüsü E. L. Ransome tarafından San Francisco/ABD’de inşa edilmiştir.
- 1889 yılında, Macar mühendis Gyözö Mihailich, her bir açıklığı 5 m olan toplam iki açıklıklı ilk betonarme kemer köprüyü Solt/Macaristan da inşa etmiştir.
- 1890 yılında, Bremen’de 39 m açıklığında Almanya’nın ilk betonarme köprüsü inşa edilmiştir.

Beton ve betonarme baraj uygulamaları tarihte ilk kez Avustralya’da uygulanmaya başlanmıştır. O tarihlerde yapılan bu tür küçük kapasiteli barajların çoğu buharlı trenlere su temini amacıyla kullanılmıştır. Beton ve betonarme tekniğinin kullanılması ile inşa edilmiş ilk baraj yapılarına ait bir takım örnekler aşağıda verilmiştir.

- 1873 yılında inşa edilen Lower Stony Creek kemer ağırlık barajı, Avustralya’nın ilk kütle beton barajıdır ve bugün hala kullanılmaktadır.
- 1880 yılında, Warwick/Avusturya’da inşa edilen The 75 Miles barajı, tarihteki bilinen ilk beton barajdır. Kalın cidarlı ve silindir kemerli bu baraj rezerv olarak günümüzde de hala kullanılmaktadır.
- 1897 yılında tamamlanan Junction Reefs betonarme barajı, Avustralya’da inşa edilen ve dünyanın bilinen en eski betonarme barajıdır.
- 1908’de Sierra Nevada dağlarında inşa edilen 18,6 m yüksekliğindeki ve 206 m uzunluğundaki Hume Lake barajı, California/ABD’de inşa edilmiş betonarme barajların ilk önemli örneğidir.

Alman Mathias Koenen, “Boyutlandırmanın Temel Kuralları” adlı beton yapıların teorisi ve tasarımıyla ilgili ilk kitabı 1886 yılında yayınlamıştır. Betonarmenin ilk teorisini olarak kabul edilen Koenen, kitabında; düzlem kesitler eğilme etkisinden sonra da düzlem kalırlar, betonun çekme dayanımı oldukça düşüktür, aralarındaki aderanstan dolayı beton demire yapışır, tarafsız eksen kesit geometrik merkezinden geçer, basınç gerilmesinin dağılımı kesit yüksekliği boyunca lineerdir gibi çeşitli varsayımlardan bahsetmiştir. Koenen ile başlayan teorik çalışmalar, diğer birçok araştırmacının katkılarıyla

olgunlaşmış ve 1886 yılından itibaren teknik dergilerde yayınlanan ilk bilimsel yayınların da temelini oluşturmuştur.

Yukarıda verilen bilgilerden anlaşıldığı üzere 1800'lü yıllarda betonarmeye ilişkin önemli sayılabilecek gelişmeler olmasına rağmen, yaygın olarak kullanımı sağlanamamıştır. Hatta bu tekniğin uygulanabilir bir teknik olduğundan bile oldukça şüphe edilmiştir. Bunda, betonarmeye ilişkin teorik çalışmalarda bir gelişme kaydedilememesi, bu çalışmaların çeşitli varsayımlara dayanması ve uygulanabilirliğin tam olarak ispatlanamaması ve çelik elemanlar için hazırlanmış çizelgelerin betonarme elemanlara uyarlanmasındaki zorlukların etkisi bulunmaktadır. Ancak, 1900'lü yılların hemen başlarında, inşaat mühendisliği konularıyla uğraşan bilim adamları ve mühendisler, modüler oranı kullanarak, elastisite bağıntılarını betonarmeye uyarlamışlar, teori ve pratikte önemli gelişmelere öncülük etmişlerdir. 1900'lü yılların başlarından itibaren betonarme tekniği, farklı uygulamaları ile Dünya üzerinde hem yüksek yapılar hem de büyük açıklıklı yapıların inşaatında yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Doğru tasarımların yapılabilmesi ve uygulamadan gelen sorunların çözülebilmesi için 1904 yılından itibaren çeşitli uluslararası yapı yönetmelikleri yürürlüğe girmiştir. Ülkemizde ise ilk betonarme şartnamesi 1953 yılında Türkiye Köprü ve İnşaat Cemiyeti adı altında yürürlüğe girmiştir. Betonarme yapıların hesap, tasarım ve inşası konularındaki sanatsal, bilimsel ve teknolojik gelişmeler özellikle 1950'lilerde, bugün bile muhteşem kabul edilen, önemli yapıların inşasını mümkün kılmıştır.

Günümüzde; yüksek dayanımlı beton uygulamalarının yaygınlaşması, fiber donatılı betonarme tekniğinin gelişmesi, beton ve donatı arasındaki aderansın nervürlü donatı ve kaliteli betonla daha etkin bir şekilde sağlanması, davranışı daha iyi temsil eden hesap yöntemlerinin kullanılması, teknolojiye meydan gelen muazzam gelişmeler ve daha önce inşa edilmiş yapılardan deneyimler kazanılması gibi nedenlerle, sanatsal ve teknik açıdan üstün sayılabilecek betonarme yapıların Dünya'nın birçok yerinde inşa edildiğini görmek mümkündür. Dünya'da olduğu gibi ülkemizde de inşa edilen farklı tür yapılarda en yaygın kullanılan yapı malzemesi betonarmedir. Betonarme, hemen hemen her türlü alanda rahatlıkla uygulanabilen bir malzemedir. Bu alanlardan bazıları aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Bina inşaatlarında
- Köprü inşaatlarında
- Baraj inşaatlarında

- Sıvı deposu inşaatlarında
- Tünel inşaatlarında
- Dayanma duvarı inşaatlarında
- Silo inşaatlarında
- Sanat yapılarında
- Kanal ve sulama yapılarında
- Hiperbolik soğutucu ve baca inşaatlarında
- İletim ve enerji hatlarında
- Derin temel kazılarında ve inşaatlarında

Hem bilgisayar teknolojisinde meydana gelen gelişmeler hem de betonarme yapıların hesap ve tasarımında kullanılan yöntemlerin gelişmesi ve yenilenmesi bu tür yapıların çeşitli etkiler altında tasarımını ve değerlendirilmesini mümkün kılmıştır. Tasarım ve değerlendirmenin yapılabilmesi için yapının bu farklı etkiler altında göstermiş olduğu davranışın tam olarak belirlenmesi gerekmektedir. Gelişen bilgisayar teknolojisinin yardımıyla bu tür farklı davranışların belirlenmesi çeşitli analiz yöntemleriyle gerçekleştirilmektedir. Bu analiz türlerinden birisi de yapının dinamik karakteristikleri olarak bilinen mod şekli, frekans ve periyot değerlerinin elde edilmesini sağlayan serbest titreşim analizidir (modal analiz).

Modal analiz, yapıların dinamik davranışlarının sayısal olarak belirlenmesinde kullanılan bir metoddur. Modal analizde ilk olarak yapının sayısal modeli oluşturulur. İkinci aşamada modeli oluşturan malzemenin malzeme özellikleri ve modelin bağlanma durumuna göre sınır şartları tanımlanır. Son olarak, sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri oluşturularak modal analizi gerçekleştirilir. Dinamik karakteristiklerin sayısal olarak belirlenmesi aşamasında yapıların matematik modellerinin kurulmasında yaygın olarak sonlu eleman yöntemi kullanılmaktadır.

Sonlu eleman yöntemi karmaşık mühendislik problemlerini kabul edilebilir bir yaklaşıklıkta çözebilmek için geliştirilmiş sayısal bir çözüm yöntemidir. Başka bir ifadeyle sonlu eleman yöntemi; kısmi diferansiyel ve integral denklemlerden oluşan ve yaklaşık çözümler bulmak için ortaya konmuş sayısal bir tekniktir. Bu yöntemin temel düşüncesi birçok parametreye bağlı bir problemi basite indirgeyerek çözüm üretmektir.

Sonlu eleman yönteminin sunduğu avantajların bazıları; incelenen cismin geometrisinin tam olarak temsil edilebilmesi, çok farklı malzeme özelliklerine sahip cisimlerin incelenmesine izin vermesi, sınır şartlarının kolaylıkla temsil edilmesine izin

vermesi olarak sıralanabilir. Sonlu eleman yöntemi ile bulunan sonuçlar yaklaşık olarak elde edilse de, çıkan sonuçlara göre çeşitli parametrelerde yapılacak küçük iyileştirmelerle kesin sonuca ulaşılmasını mümkün kılmaktadır. Bunun anlamı binlerce deney yapmadan, çok fazla zaman harcamadan ve en ekonomik yoldan en güvenli sonuca ulaşmak demektir.

Türkiye aktif deprem kuşağı üzerinde yer almaktadır. Geçmişte yaşanmış depremler göstermiştir ki tüm mühendislik yapılarının projelendirilmesinde ve yapımında dinamik bir parametre olan deprem etkisinin mutlaka dikkate alınması gerekmektedir. Diğer taraftan yapım maliyetlerinin yüksek olmasının yanında herhangi bir deprem de zarar görmesi halinde meydana getireceği tahribatın boyutları düşünüldüğünde; bir yapının dinamik açıdan yapısal davranışının önceden biliniyor olması hayati bir öneme sahiptir.

Herhangi bir mühendislik yapısının dinamik bir etki karşısındaki yapısal davranışı; yapının dinamik karakteristiklerine bağlı olarak tanımlanmaktadır. Buradaki dinamik karakteristiklerden kasıt; yapının mod şekli, sönüm oranı ve doğal titreşim frekansıdır. Dinamik karakteristikler ise yapının projesi dikkate alınarak elde edilen bilgiler ışığında oluşturulacak bir sonlu eleman modeli üzerinden hesaplanmaktadır. Hesaplamalar, mevcut yapıyı meydana getiren elemanlarda kullanılan malzemelerin özellikleri, boyutları ve mesnetlenme durumları dikkate alınarak oluşturulan sonlu eleman modelleri üzerinde gerçekleştirilen modal analizler üzerinden yapılmaktadır.

Betonarme yapıların dinamik karakteristiklerinin sayısal yöntemlerle belirlenmesine yönelik geçmiş yıllarda yapılan çalışmalar incelendiğinde, yapının sonlu eleman yöntemi ile modellenmesinde genellikle donatının etkisinin dikkate alınmadığı görülmüştür. Modelleme aşamasında verilen bu kararın, sonlu eleman yöntemi ile herhangi bir yapının donatı düzeninin modellenmesinde yaşanan zaman kaybını ve çeşitli zorlukları ortadan kaldırdığı bilinmesine rağmen, yapısal davranış üzerinde ne tür bir etkiye yol açtığı konusunda oldukça fazla belirsizlik vardır. Bu belirsizlikleri ortadan kaldırmak amacıyla yürütülen bu tezin temel amacı, laboratuvar ortamında inşa edilmiş bir köprü modelinin boyutları ve kullanılan donatı düzeni dikkate alınarak ANSYS sonlu eleman analiz programında; donatısız ve donatılı modeller üzerinde donatının etkisini irdelemektir. Ayrıca köprünün Sonlu Eleman modelleri üzerinde Erzincan 1992 depremine ait etkin ivme kaydı kullanılarak lineer ve lineer olmayan analizler uygulanmış, modellerin bir dış yük etkisi altındaki davranışları da incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar grafikler ve tablolar yardımıyla karşılaştırmalı olarak ilerleyen bölümlerde sunulmuştur.

## 1.2. Betonarme Köprülerde Donatının Dinamik Karakteristiklere Etkisi Üzerine Daha Önce Yapılan Çalışmalar

Betonarme köprülerde yapısal davranış üzerine yapılan çalışmalar tezin amacına uygun olarak; modal, lineer ve lineer olmayan davranış üzerine yapılan çalışmalar ile betonarme yapı sistemlerinde sonlu eleman analiz programları kullanılarak yapılan çalışmalara genel bir bakış olacak şekilde dört başlık altında incelenmiştir.

Bu kısımda, betonarme yapı elemanlarında donatının, dinamik karakteristikler (frekans, mod şekli ve sönüm oranı) üzerindeki etkisini belirlemek için son yirmi yıl içerisinde yapılmış çalışmalara yer verilmiştir. Betonarme köprülerde donatının modal davranış üzerindeki etkisi ile alakalı geçmiş yıllarda yapılmış çalışmalar aşağıda irdelenmektedir;

Bayraktar vd. (2010), betonarme binaların farklı inşa durumlarını dikkate alarak dinamik parametrelerini tespit etmek ve modal davranışlarını inceleyerek rijitlik dağılımları ve burulma düzensizliklerini değerlendirilmek için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında, yapıların dinamik yükler etkisindeki davranışları, her bir yapı için karakteristik özelliğe sahip dinamik parametreler kullanılarak belirlendiğini ve bu parametrelerin yapının mevcut yapısal özelliklerine, malzeme özelliklerine, sınır şartlarına ve hasar durumuna bağlı olarak elde edildiğini belirtmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, binaların dinamik davranışlarının belirlenmesi amacıyla oluşturulacak sayısal modellerin binanın mevcut durumu için gerçekleştirilecek ölçümlerden elde edilecek sonuçlara göre iyileştirilebileceğini göstermişlerdir.

Türker (2011), doktora tezi kapsamında çevresel titreşim verileri kullanılarak yapıların hasar durumlarının tespiti ve değerlendirilmesi üzerinde çalışmıştır. Yapıların modal davranışı teorik ve deneysel olmak üzere iki şekilde analiz edilebilir. Söz konusu tezde teorik modal analiz gerçekleştirme adımları özetlenmiştir. Buna göre teorik modal analiz yapılırken ilk olarak yapının kütle, sönüm ve rijitlik özelliklerini yansıtan bir matematiksel model oluşturulur. Oluşturulan sayısal model üzerinden yapılacak geleneksel modal analizler neticesinde yapıya ait frekans, mod şekilleri ve modal sönüm oranı belirlenerek yapıya ait modal davranış elde edilir. Daha sonra yapının sınır şartları ve yüklemeler altında vereceği tepkiler frekans ve itme koşulları cinsinden hesaplanır. Hesaplanan bu değerlere göre yapının gerçek davranışını yansıtacak model elde edilmiş olur.

Chopra (2015), doğal titreşim modu kavramını yapıların dinamik etkiler karşısındaki özel yerdeğişimi biçimlerinin her biri şeklinde tanımlamıştır. Başka bir deyişle mod şekli farklı doğal frekanslarda yapının deformasyonuna bağlı bir değerdir. Bir yapının deprem hareketi sırasında ne kadar süre hangi yapısal davranışı sergileyeceğini gösteren değerlerden biri olan bu davranışa modal davranış denir.

Sevim ve Altunışık (2016), kompozit kolonların modal davranışlarını sayısal olarak belirlemek için bir çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında sekiz farklı kesite ve sabit yüksekliğe sahip bir kompozit kolon seçilerek ANSYS sonlu eleman programını kullanarak üç boyutlu modellerini oluşturulmuşlar ve sekiz farklı modeli analiz ederek doğal frekansları ve mod şekillerini belirlemiş ve elde ettikleri dinamik karakteristikleri birbirleriyle kıyaslamışlardır. Çalışmada ayrıca, yapının deprem anında nasıl davranacağını anlayabilmek için, bu yapıların doğal frekans, periyot ve deprem esnasında yaptıkları hareketin bir göstergesi olarak kabul edilen mod şekillerinin bilinmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, donatılı kompozit kolonların davranışının donatısız kompozit kolonlara göre çok fazla değişmediğini göstermişlerdir.

Literatür araştırmasının ikinci kısmında, betonarme köprülerde donatının lineer davranışa etkisi üzerine yapılan çalışmaların incelenmesi amacıyla yapılan taramada doğrudan bu konu üzerine yapılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bununla birlikte lineer davranış üzerine farklı mühendislik disiplinlerinde, farklı konularda birçok araştırma incelenmiştir. Lineer davranış kavramının ve kullanım alanlarının izahı için bu çalışmalardan bazılarını bu kısımda yer verilmiştir. Genel olarak betonarme elemanların lineer davranışı üzerine yapılan çalışmalardan bazıları şu şekilde özetlenebilir.

Çavdar (2005), yüksek lisans tez çalışmasında geleneksel betonarme çerçeve sistem ile eğik elemanlarla rijitleştirilmiş yapıların depreme karşı lineer davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Yapılan çalışma neticesinde genel olarak kullanılan eğik elemanların betonarme yapıların yatay yüklere karşı dayanım ve rijitliğini arttırdığı ortaya konulmuştur.

Eom vd. (2011), yaptıkları çalışmada, betonarme moment çerçevelerin elastik olmayan sismik tasarımı için uygulanabilir bir lineer analiz yöntemi araştırmışlardır. Bu çalışmada, betonarme moment çerçevelerinin yanal yük transfer mekanizmasını incelemek için lineer olmayan analiz yapmışlardır. Yaptıkları analiz sonuçlarına dayanarak, lineer olmayan analiz için ardışık lineer yaklaşım kavramına dayalı olarak, ardışık lineer analizler



gerçekleştirerek, özellikle ön deprem tasarımında kullanılmak üzere uygun bir lineer analiz geliştirmişlerdir.

Hendriks ve Rots (2012), yayınladıkları makalede beton gibi kırılabilir malzemelerin modellenmesinde lineer ve lineer olmayan analizleri karşılaştırmışlardır. Lineer olmayan sonlu eleman analiz programlarının, kırılma durumunun üstesinden kırılma davranışı meydana geldiğinde yapısal tepkinin bazı iterasyon algoritmaları kullanarak anlık çözümler üreterek ve alınan sonucu birleştirerek geldiğini, fakat bu durumda da meydana gelen yakınsama farklılıklarından dolayı alternatif modelleme yöntemlerini ortaya çıkardığını söylemektedir. Çalışmada beton ve betonarme malzemeler için sonlu eleman analizine benzer ardışık lineer analizler ile sürekli bir formülasyon kullanılmıştır. Çalışmada ardışık lineer analizlerin betonarme yapıların modellenmesinde avantajlı olduğu noktalar irdelenmiştir.

Şimşek (2016), elastik malzeme kavramını tanımlamıştır. Bu tanıma göre bir malzemeye kuvvet uygulandığında, gerilme değeri arttıkça şekil değiştirmeler gözlemlenir. Taşıdığı yükün etkisi altında şekil değiştirip yük etkisi kaldırıldığında ilk halini alan malzemelere “Elastik Malzemeler” adı verilir. Elastik sınır aşılmaya kadar uygulanan kuvvetin etkisiyle malzemede meydana gelen şekil değişimleri elastik davranış olarak tanımlanır. Elastik bölgede gerilme ve şekil değiştirmenin doğru orantılı olduğunu açıklayan kanuna Hooke Kanunu ve bu özelliği gösteren cisimlere de Hooke cismi adı verilir. Başka bir ifadeyle yükleme sonucunda plastik (kalıcı) deformasyon göstermeyen (elastik) ve tek eksenli yüklemede gerilme-şekil değiştirme arasında lineer bir ilişki bulunan malzemelerin gösterdiği davranış lineer elastik davranış olarak tanımlanır. Lineer davranış analizleri yapıda yer değiştirmenin fazla olmadığı durumlarda ve yapıya etkileyen tekrarlı yüklerin olmadığı durumlarda daha sağlıklı sonuçlar vermektedir.

Betonarme köprülerde donatının lineer olmayan davranış üzerindeki etkisi ile alakalı geçmiş yıllarda yapılmış çalışmalar şu şekilde özetlenebilir.

Kolgu ve Peker (2003), yaptıkları çalışmada farklı geometriye sahip kesitlerin lineer olmayan davranışını dikkate alarak bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada yapılan çözümler statik ve dinamik lineer olmayan çözümler olmak üzere iki şekilde yapılmıştır. Bu çalışmada yük-deplasman eğrisi, betonarme kesitin dönme kapasitesi için incelenmiştir. İncelemede karakteristik değişkenlerin bulunması için malzeme modeli (sargı donatısı etkisi), yükleme durumu ve kesitin geometrik özelliklerinin değişimi takip edilerek geniş kapsamlı bir parametrik çalışma yapılmıştır. Çalışmada, istenilen

geometrideki kesitlerin değişik malzeme modelleri ve donatı oranları için lineer olmayan analizini yapan XTRACT programı kullanılmıştır. Çalışmanın sonunda Sargı donatısı oranının artması kesitin sünekliğini ve maksimum moment taşıma kapasitesini arttırmaktadır. Lineer olmayan analiz yapılırken gerçek davranışı görmek için, başlangıçta malzeme modeli tanımlanırken sargı donatısı oranı ve eksenel yük oranı kullanılmalıdır sonucuna ulaşılmıştır.

Betonarme yapı sistemlerinin lineer olmayan davranışının hesaba katılması, bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeye bağlı olarak günümüzde sadece akademik çevrelerin değil, aynı zamanda tasarım yapan mühendislerinde ilgilendiği bir konu haline gelmiştir. Ülkemizde de yaşanan ve büyük acılara sebep olan depremler neticesinde, mevcut Yönetmelik 2007 yılında güncellenerek Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY'07) kullanılmaya başlanmıştır. DBYBHY'07 ye göre yapı sistemlerinin deprem performansının belirlenmesinde hem lineer elastik hesap yöntemi (DEHY) hem de lineer elastik olmayan hesap yöntemi (DEOHY) olmak üzere her iki yöntemin kullanılmasına izin verilmektedir.

Uygun ve Celep (2007), betonarme bir binanın deprem güvenliğinin deprem yönetmeliği (2007)'deki lineer ve lineer olmayan yöntemlerle karşılaştırmalı olarak incelenmesi üzerine yaptıkları çalışmada DBYBHY'07 lineer elastik yöntem çözümü her ne kadar lineer olsa da değerlendirme yönteminde sistemin elastik ötesi davranışının dikkate alındığını belirtmişlerdir.

Bu noktada özellikle deprem gibi dinamik yük etkisi altında kalan betonarme yapı sistemlerinin hesabında, lineer yöntemlerin mi yoksa lineer olmayan davranış hesap ilkelerinin mi daha gerçekçi sonuçlar vereceği sorusu karşımıza çıkmaktadır.

Celep (2007), betonarme sistemlerin lineer olmayan davranışı üzerine yaptığı çalışmasında; Lineer olmayan davranışın göz önüne alınması daha gerçekçi davranıştır ve kapasite hesabını mümkün kılar ve taşıyıcı sistemin kuvvetli ve zayıf taraflarını belirlemek mümkün olur. Lineer davranışın göz önüne alınması ile kapasite daha yüksek bulunduğu belirlenebilmektedir. Lineer davranışın belirlenmesinde malzeme değerlerinin ve davranış eğrilerinin daha gerçekçi belirlenmesi önemlidir. Daha ileri hesap için daha gerçekçi kabullerle ihtiyaç vardır. Lineer olmayan hesap günümüzde ancak belirli yazılımlarla yapılabilmektedir sonucuna ulaşmıştır.

Özer (2009), bir yapı sisteminin dış etkiler altındaki davranışının lineer olmamasının genel olarak iki nedenden kaynaklandığını belirtmiştir. Bunlardan ilki malzemenin lineer –

elastik olmaması nedeniyle gerilme-şekil değiştirme bağıntılarının lineer olmaması olarak ifade edilmiştir. Diğer neden de geometri değişimleri nedeniyle denge denklemlerinin ve bazı hallerde de süreklilik denklemlerinin lineer olmaması olarak açıklanmıştır. Aynı kitapta kopma sınırındaki toplam şekil değiştirmelerin lineer şekil değiştirmelere oranının büyük olduğu sünek malzemelerden yapılmış sistemlerde, lineer olmayan şekil değiştirmelerin “Plastik Mafsal” adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bunun dışındaki bölgelerde ise sistemin lineer-elastik davrandığı varsayılabilir tespiti yapılmıştır. Bu durumda lineer olmayan davranışa malzeme açısından bakıldığında şu şekilde ifade edilebilir. Malzemenin karakteristik mekanik özelliklerini açıklamakta kullanılan gerilme-şekil değiştirme ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) grafikleri incelendiğinde malzemenin lineer ve lineer olmayan davranışının tarif edilmesinde kullanılan “orantı sınırı” terimi karşımıza çıkmaktadır. Orantı sınırı; gerilmelerin birim şekil değişimlere orantılı olduğu bölgenin en büyük gerilme değeridir. Başlangıçtan eğriye teğet çizilerek, teğetten ilk sapmanın görüldüğü yerde orantı sınırı gözlenir Yapı sisteminin lineer davranışını esas alan usullerde malzemelerin Gerilme – Şekil değiştirme bağıntıları bu sınır gerilmenin (orantı sınırı) altında lineer – elastik ve küçük yer değiştirmeleri olan sistemler olduğu varsayılmaktadır. Buna karşın yapı sistemlerinde gerçekte yer değiştirmeler varsayıldığı kadar küçük olmaz. Ayrıca dış yüklerin etkisiyle meydana gelen gerilme değerinin orantı sınırını aşması sistemin taşıma gücü kapasitesine ulaşması demek değildir. Gerçekte sistem bir miktar gerilme daha taşıyarak kırılır.

Darılmaz (2015), sünekliği dayanımda belirgin bir azalma olmadan şekil değiştirme veya yer değiştirme yapabilme özelliği olarak tarif etmektedir. Lineer olmayan değerlendirme yönteminde ise elastik ötesi davranışı daha gerçekçi biçimde ele almak gerektiği için çözüm aşamalarında en genel haliyle iki bakımdan zorluk ortaya çıkmaktadır. Bunlardan birinci zorluk taşıyıcı sisteme ait daha çok parametreye ihtiyaç duyulmasıdır. Bu durum mevcut binalar için bazen aşılması zor olan bir takım belirsizlikler ortaya çıkarmaktadır. İkinci zorluk ise, mevcut lineer çözüm programlarının kullanılamaması ve çok daha ayrıntılı çözüm tekniklerini içeren programlara ihtiyaç duyulmasıdır.

Merter ve Uçar (2015), yaptıkları çalışma kapsamında monotonik yükleme altındaki betonarme kesitlerin lineer olmayan davranışta tükettikleri enerji hesaplanmış ve kesit enerji tüketimlerine boyuna donatı oranının, enine donatı adım aralığının ve eksenel yükün etkisini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında seçtikleri betonarme kesitlerde pratikteki

mühendislik uygulamalarında sıkça karşılaşılan farklı boyuna donatı oranları, farklı sargı donatısı aralıkları ve farklı aksenal yükler için eğilme momenti-eğrilik ve enerji analizleri gerçekleştirmişlerdir. Enerji tüketimi açısından enine donatı adım aralığı ile kesit sünekliği arasında ters orantılı bir ilişki olduğu, aksenal yükteki artışın genel olarak sünekliği azalttığı ve betonarme elemandaki enerji tüketiminin aksenal yükteki artışla birlikte azaldığı sonucunu elde etmişlerdir.

Bilgisayar teknolojisinde meydana gelen gelişmelerin etkisiyle sonlu eleman analiz programı kullanılarak yapılan çalışmaların günümüze yaklaştıkça arttığı etüt edilmiştir. Bununla birlikte, literatürde betonarme köprülerin dinamik karakteristiklerinin ve yapısal davranışlarının belirlenmesi üzerine sayısal ve deneysel yöntemlere dayalı birçok araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların bazıları aşağıda sıralanmıştır;

Pang (1996), doktora tezi kapsamında Amerika'nın Oklahoma eyaletindeki Walunt Creek isimli betonarme karayolu köprüsünün dinamik karakteristiklerini sayısal ve deneysel yöntemlerle belirlemek üzerine çalışma yapmıştır. Bu çalışmada önce sayısal model üzerinden köprünün ilk 12 frekansı hesaplamıştır. Daha sonra köprü üzerinden alınan ölçümlerle karşılaştırılmıştır.

Kou ve DeWolf (1997), köprülerin dinamik davranışlarının belirlenmesinde modelleme tekniklerinin etkisi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, malzeme ve kesit özellikleri gibi değişkenlerin dinamik karakteristikler üzerine etkisini incelenmişlerdir. Bunu yaparken tespit ettikleri bazı noktalardaki yer değiştirme ve deformasyon değerlerini karşılaştırarak malzeme ve kesit özelliklerinin yer değiştirmeleri önemli derecede etkilediği sonucunu ortaya koymuşlardır.

Çolakoğlu ve Köksal (2000), hareketli bir platforma monte edilen cihazlarda oluşan titreşimleri incelemişlerdir. Bunu yaparken sistemin sayısal modelini ANSYS sonlu eleman analiz programını kullanarak oluşturmuşlardır. Bu çalışma neticesinde sonlu eleman modeli üzerinden elde ettikleri değerler ile deneysel sonuçları karşılaştırmaları neticesinde sonlu eleman modeli ile elde edilen sonuçlarının doğruluğunu ortaya koymuşlardır.

Friyba ve Pirner (2001), karayolu köprülerinin dinamik karakteristiklerini ve lineer davranışını sayısal olarak belirlemişlerdir.

Halling vd. (2001), karayolu köprülerinin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi üzerine sayısal ve deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, göz önüne aldıkları bir

köprünün önce sonlu eleman modelini oluşturmuşlar daha sonra da elde ettikleri deneysel verilerle karşılaştırmışlardır.

Wang ve Zong (2002), Amerika'nın Florida eyaletindeki betonarme köprülerin dinamik davranışlarını sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışmada önce köprülerin sonlu eleman modelini oluşturmuşlar ve yapısal davranışlarını incelenmişlerdir. Daha sonra deneysel veriler ile sonlu eleman analizlerinden elde ettikleri frekans, sönüm, mod şekli, yer ve şekil değiştirme gibi parametreleri karşılaştırmışlardır.

Xu (2002), doktora tezi kapsamında Amerika'nın Ilionis eyaletinde dengeli konsol yöntemi ile yapılmış iki köprünün yapısal dinamik davranışını incelemiştir. Bu çalışma kapsamında sonlu eleman modeli üzerinden elde ettiği sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırarak köprülerin dinamik karakteristikleri hakkında sonuçları incelemiştir.

Zapico vd. (2003), çok açıklıklı bir karayolu köprüsünün yapısal davranışını deneysel ve sayısal olarak belirlemek için laboratuvar ortamında köprüye ait 1/50 ölçeğinde bir model oluşturmak suretiyle çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada sonlu eleman analizleri sonucu elde edilen mod şekli, frekans, yer ve şekil değiştirme gibi veriler deneysel olarak elde ettiği dinamik karakteristik değerler ile karşılaştırmıştır. Karşılaştırma sonucunda ilk durumda % 30 civarında oluşan fark, sonlu eleman modeli üzerinde malzeme özelliklerini ve sınır koşullarını değiştirdiğinde % 2 civarına kadar indiğini tespit etmiştir.

Owen ve Haritos (2003), Avustralya'nın Victoria eyaletinde bulunan 3 tane karayolu köprüsünün yapısal dinamik davranışlarını belirlemek için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma kapsamında köprülerin sonlu eleman modelleri ile birlikte laboratuvar ortamında köprülerin sırasıyla 1/1, 1/2 ve 1/5 ölçeklerinde modelleri oluşturmuşlardır. Köprülere ait sonlu eleman analizleri ile deneysel ölçümler yaparak elde ettikleri sonuçları birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Köprülerin modelleri için seçtikleri parametreleri değiştirerek köprülerin mevcut halini yansıtacak şekilde sonlu eleman modelleri elde etmişlerdir.

Ren vd. (2004), Amerika'nın Cumberland Nehri üzerinde bulunan bir betonarme karayolu köprüsü üzerinde köprünün yapısal dinamik davranışını belirlemek için bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada önce köprüye ait sonlu eleman modeli SAP2000 sonlu eleman analiz programı yardımı ile oluşturmuşlardır. Sonlu eleman modeli üzerinde yaptıkları analiz neticesinde köprüye ait dinamik karakteristikleri sayısal olarak elde etmişlerdir. Daha sonra köprü üzerinden aldıkları gerçek ölçümler neticesinde köprüye ait

dinamik karakteristikleri deneysel olarak da elde etmişlerdir. Sayısal ve deneysel sonuçları karşılaştırmışlar ve sonlu eleman modelini bu sonuçlar ışığında iyileştirmişlerdir.

El-Borgi vd. (2004), Tunus'da bulunan SidiBouAli köprüsünün dinamik karakteristiklerini sayısal ve deneysel yöntemlerle araştırmışlardır. Bu çalışmada önce köprüye ait sonlu eleman modelini SAP2000 yardımı ile oluşturmuşlardır. Köprü üzerinde yaptıkları ölçümlerle deneysel olarak da dinamik özelliklerini tespit etmişlerdir. Sayısal ve deneysel olarak elde ettikleri değerleri karşılaştırdıklarında; frekans değeri bazında % 10-30 arasında bir fark, sönüm için % 5-10 arasında bir fark olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bu veriler ışığında oluşturdukları sonlu eleman modelinin malzeme özellikleri ve sınır şartlarında değişiklikler yaparak köprünün mevcut durumunu yansıtan bir sonlu eleman modeli oluşturmuşlardır.

Sgambi (2004), betonarme bir köprünün yapısal davranışını oluşturduğu bir model köprü üzerinde lineer olmayan analizler gerçekleştirerek sayısal olarak belirlemiştir.

Bagchi (2005), üç açıklıklı betonarme bir köprü üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bu çalışma kapsamında önce köprünün sonlu eleman modelini oluşturmuş, daha sonra köprü üzerinde yaptığı ölçümler neticesinde elde ettiği deneysel verilerin ışığında oluşturduğu sonlu eleman modelinde iyileştirmeler yapmıştır. Bu iyileştirmenin ardından köprünün mod şekilleri, frekansın değerleri gibi dinamik özelliklerinin birbiriyle uyum içerisinde olduğunu ortaya koymuştur.

Öztürk ve Çatal (2005), yarı rijit yapıların dinamik kuvvetlere karşı göstereceği tepkilerini bir bilgisayar programı yardımıyla ortaya koymuşlardır. Bunu yaparken sayısal modelleme esnasında yapının bağlantı noktalarını lineer elastik ve dönebilen bir yay gibi modellemişlerdir. Ele aldıkları yapılardan elde ettikleri dinamik sonuçları, bu yapılar için program tarafından bulunan modal parametreler ile karşılaştırmışlardır. Bu çalışmanın neticesinde yapıların düşük modlarda titreşim periyotlarının arttığı sonucunu elde etmişlerdir.

Guan (2006), doktora tezi kapsamında köprülerin dinamik karakteristiklerinin titreşime bağlı olarak belirlenmesi üzerine çalışmıştır. Bu çalışmada Amerika'nın Kaliforniya eyaletinde bulunan Watson Wash, Vicent Thomas ve Kings Stormwater köprülerini ele alarak dinamik karakteristiklerini hem sayısal olarak hem de deneysel veriler kullanarak belirlemiştir. Köprüler için oluşturduğu sonlu eleman modelini deneysel veriler ışığında iyileştirerek köprülerin mevcut durumuna uygun modeller elde etmiştir.

Wu vd. (2006), Japonya’da bulunan betonarme bir köprünün deprem davranışını sayısal olarak belirlemişlerdir.

Bayraktar vd. (2007a-b), Operasyonel Modal Analiz yöntemi ile yığma köprülerin ve yaya üst geçitlerinin dinamik karakteristiklerini belirlemişler, sayısal ve deneysel olarak belirlenen dinamik karakteristikleri karşılaştırarak köprülerin sonlu eleman modelini iyileştirmişlerdir. Ayrıca bu çalışmalarda, malzeme özellikleri ve sınır şartlarının köprülerin gerçek durumunu yansıtan sonlu eleman modelini oluşturmada etkili olduğu vurgulanmışlar ve olası bir deprem davranışını belirlenmişlerdir. Bu çalışmada, Trabzon’un Of ilçesinde bulunan bir karayolu köprüsünü örnek olarak seçilmişlerdir. Çalışmanın teorik kısmında SAP2000 programı kullanarak köprünün üç boyutlu sonlu eleman modelini proje verileri üzerinden oluşturmuşlar ve Modal analizi gerçekleştirmişlerdir. Seçtikleri köprünün dinamik karakteristiklerini sayısal ve Operasyonel Modal Analiz yöntemlerini kullanarak belirlenmişlerdir. Deneysel ve teorik analizlerden elde edilen dinamik karakteristikler arasındaki farklılıkları minimize edebilmek için, malzeme özelliklerindeki değişimler kullanarak köprünün sonlu eleman modeli iyileştirmişlerdir. Sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özelliklerinin köprünün dinamik karakteristikleri üzerinde etkili olduğunu görmüşlerdir. Köprünün iyileştirilmiş sonlu eleman modeli seçilen deprem yer hareketi kaydı için analiz ederek deprem davranışı ve en çok zorlanan kesitleri belirlemişlerdir.

Bayraktar vd. (2007a-b), çalışmalarında, Malatya-Elazığ karayolu üzerinde bulunan Kömürhan Köprüsü’nün mevcut durumunu yansıtan gerçek sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır. Köprünün sonlu eleman modeli SAP2000 kullanılarak oluşturulmuş ve dinamik karakteristikler sayısal olarak elde edilmiştir. Çalışma sonunda, sayısal ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler birbirleriyle karşılaştırılmış, malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki değişimler dikkate alınarak köprünün mevcut durumunu yansıtan gerçek sonlu eleman modelini elde etmişlerdir.

Boduroğlu ve Musa (2007), kablolu köprülerin zaman tanım alanında lineer olmayan analiz yöntemiyle deprem performansının belirlenmesi üzerine sayısal bir inceleme başlıklı çalışmada tasarımda kullanılan yapı önem katsayısının ve bazı elemanların elastik bölgede kalacak şekilde modellenmesi durumunda, karayolu köprülerinin lineer olmayan deprem performansının, olması gereken sınırlar içinde kaldığını görmüştür.

Morassi ve Tonon (2008), yapmış oldukları çalışmada yüksek seviyede deprem bölgesi olan kuzey doğu İtalya’da bulunan Palu köprüsünün dinamik karakteristiklerini

belirlemek için bir çalışma yapmışlardır. Köprünün Sonlu eleman modelini SAP2000 programında oluşturmuşlardır. Sonlu eleman modelin analizinden elde edilen verilerle deneysel ölçümlerden elde edilen verileri karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre sonlu eleman modeli mevcut durumu yansıtacak şekilde yeniden düzenlemişlerdir. Sonlu eleman modelin kalibrasyonunda kullanılacak değişkenlerin önemine vurgu yapmışlardır.

Sanayei ve DiCarlo (2009), köprüler için oluşturulan sonlu eleman modellerinin deneysel veriler ışığında mevcut durumu yansıtacak hale getirilebileceğini ortaya koyabilmek için bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma kapsamında laboratuvar koşullarında iki açıklıklı betonarme bir köprü modeli oluşturmuşlardır. Bu modele ait sonlu eleman modelini SAP2000 programında oluşturmuşlardır. Oluşturulan sonlu eleman modeli üzerinde 17 frekans değeri ve mod şekli için sayısal analizler yapmışlardır. Deneysel ölçümler yaparak yapısal değerlerini elde etmişlerdir. Sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında özellikle yüksek modlarda fark olduğunu görmüşlerdir. Bu farklılıkları, malzeme özelliklerinde değişimler yaparak en aza indirmiş ve köprünün gerçek durumunu yansıtan sonlu eleman modelini ortaya koymuşlardır.

Whelan vd. (2009), köprülerin dinamik karakteristiklerini deneysel ve sonlu eleman analizi kullanarak araştırmışlardır. Bu çalışmada betonarme bir köprüyü örnek model seçmişlerdir. Deneysel ölçümlerde doğal titreştirici olarak rüzgâr ve taşıt yüklerini göz önüne almışlardır. Köprünün sonlu eleman modelini ise FEMPRO programı ile oluşturmuşlardır. Bu çalışmada köprüye ait dinamik karakteristikleri her iki yöntem kullanarak belirlemişlerdir. Çalışma kapsamında, deneysel ve sayısal yöntemlerle elde ettikleri frekans değerleri birbiriyle karşılaştırarak incelemişlerdir.

Altunışık (2010), doktora tezi kapsamında betonarme karayolu köprülerinin yapısal davranışlarını sayısal ve deneysel yöntemlerle incelemiştir. Bu incelemede, sayısal ve deneysel dinamik karakteristikler arasındaki farklılığın %5-10 civarında olması halinde, sonlu eleman modelinin dinamik karakteristiklerin yapının mevcut durumunu yansıttığı, fakat bu değer %5-10'dan büyük ise sayısal dinamik karakteristiklerin yapının mevcut durumunu yansıtmadığını belirlemiştir.

Altunışık vd. (2011), bu çalışmada Giresun-Espiye karayolu üzerinde bulunan Gülburnu köprüsünün 3B sonlu eleman modelini, SAP2000 programını kullanarak oluşturmuşlardır. Köprü üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda köprünün dinamik karakteristiklerini elde etmişlerdir. Daha sonra elde ettikleri sayısal ve deneysel sonuçları karşılaştırmışlar ve değerlerin aynı olmadığını gözlemlemişlerdir. Bunun üzerine



sonlu eleman modelinde malzeme özellikleri için iyileştirme yapılarak modelin var olan köprü davranışını gösterecek duruma gelmesini sağlanmışlardır. Öyle ki iyileştirmeden sonra model ile köprünün doğal frekansları arasındaki farkın yaklaşık olarak % 2 civarına kadar düştüğünü gözlemlemişlerdir. Fark bu kadar azalttıktan sonra iyileştirme yapılan sonlu eleman modeli üzerine, Erzincan 1992 depremini uygulayarak köprünün depreme karşı davranışını belirlemişlerdir.

Sonuç olarak literatürde konuyla ilgili daha önce yapılmış diğer çalışmaların araştırılması ve elde edilen bilgiler ışığında; Betonarme yapı sistemlerinde donatının modal, lineer ve lineer olmayan davranışa etkisi üzerine yapılan direkt bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle tezin amacının ve ortaya koyacağı verilerin ve bu verilerin irdelenmesi ile elde edilecek sonuç ve önerilerin akademik hayata ve başka çalışmalara faydalı olacağı düşünülmektedir.

### **1.3. Tezin Amacı ve İçeriği**

Daha önce yapılan çalışmaların araştırılması sonucunda, literatürde betonarme köprülerin sonlu eleman yöntemi ile modellenmesi ve bu modeller üzerinden yapısal davranışın belirlenmesine yönelik bugüne kadar birçok çalışma yapıldığı değerlendirilmiştir.

Bu çalışmaların tamamında hedeflenen amaç; betonarme bir köprünün gerçekte dinamik etkiler karşısında sergilediği yapısal davranışları tam olarak yansıtabilecek düzeyde bir sonlu eleman modeli oluşturabilmek ve bu durumu sağlayacak doğru analiz şeklini ortaya koyabilmektir.

Bu tezin amacı ise, sonlu eleman yöntemi ile oluşturulan betonarme bir modele uygulanacak dinamik analizler neticesinde elde edilecek sonuçlara, donatının etkisinin ne kadar olduğunun belirlenmesidir. Ayrıca; hem lineer hemde lineer olmayan analizlerin sonuçları da karşılaştırılarak sonlu eleman modellemede analiz türünün farklı olması durumu içinde donatı etkisinin araştırılması amaçlanmaktadır. Bu amaca yönelik olarak laboratuvar ortamında inşa edilmiş boyutları ve kullanılan donatı durumu bilinen bir köprü modeli dikkate alınarak donatının; frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Yüksek lisans tez çalışmasının içeriği üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde; betonarme köprülerin dinamik davranışının belirlenmesine yönelik daha önce yapılan çalışmalar ve genel bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde; yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgular sunulmuştur. Bu bölümde, laboratuvar ortamında inşa edilmiş bir köprü modelinin boyutları ve kullanılan donatı durumu dikkate alınarak ANSYS sonlu eleman analiz programında; önce donatısız daha sonrada donatılı olarak ayrı ayrı sonlu eleman modelleri ortaya konmuştur. Elde edilen iki farklı köprü modeline ait dinamik karakteristikler sayısal yöntemler kullanılarak belirlenmiş ve birbirleriyle karşılaştırarak donatının bu karakteristikler üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Ayrıca, köprü modellerinin sonlu eleman modelleri üzerine 1992 Erzincan depremine ait etkin ivme kaydı uygulanmış, lineer ve lineer olmayan yapısal davranışlar değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, grafik ve tablolar ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Üçüncü bölümde; yapılan bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar ile yapılan bazı önerilere yer verilmiştir.

#### **1.4. Sonlu Eleman Yöntemiyle İlgili Dinamik Formülasyon**

##### **1.4.1. Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi**

Yapıların deprem hareketleri etkisindeki sönümlü hale ait ortak hareket denklemi aşağıda verilmiştir.

$$M\ddot{U}+C\dot{U}+KU=R \quad (1.1)$$

Burada, M, K ve C yapı sisteminin sırasıyla kütle, rijitlik ve sönüm matrislerini  $\ddot{U}$ ,  $\dot{U}$  ve U sırasıyla ivme, hız ve yer değiştirme vektörlerini göstermektedir. R ise yapı sistemine etkiyen ve zamanla değişen dış yük vektörüdür. Yapı sistemlerine ait doğal frekans ve mod şekilleri, o sisteme ait serbest titreşim denkleminin çözümünden elde edilir. Yukardaki denklemde sönüm ve dış kuvvetin olmadığı kabul edilirse, zaman tanım aralığında serbest titreşim hareket denklemi

$$M\ddot{U}+KU=0 \quad (1.2)$$

aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Chopra 2006).

#### 1.4.2. Newmark Yöntemine Göre Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz

Bu yönteme göre hız ve yer değiştirmeler  $t$  ile  $t+\Delta t$  zaman aralığındaki değişim, aşağıda verilen Eşitlik 1.3 ve 1.4'deki gibi ( ).

$$\ddot{U}_{t+\Delta t}=\dot{U}_t+\left[(1-\gamma)\ddot{U}_t+\gamma\ddot{U}_{t+\Delta t}\right]\Delta t \quad (1.3)$$

$$U_{t+\Delta t}=U_t+\dot{U}_t(\Delta t)+\left[(0,5-\beta)\ddot{U}_t+\beta\ddot{U}_{t+\Delta t}\right](\Delta t)^2 \quad (1.4)$$

gibi ifade edilmektedir (Bathe, 1996; Chopra 2006). Denklemlerde  $U_t$ ,  $\dot{U}_t$  ve  $\ddot{U}_t$  değişkenleri sırasıyla  $t$  zamanındaki yer değiştirme, hız ve ivme vektörlerini temsil etmektedir.  $U_{t+\Delta t}$ ,  $\dot{U}_{t+\Delta t}$  ve  $\ddot{U}_{t+\Delta t}$  değişkenleri ise  $t+1$  anındaki yer değiştirme, hız ve ivme vektörleridir. Ayrıca  $\gamma$  ve  $\beta$  sabit sayıları  $\Delta t$  aralığında ivmede meydana gelen değişimi ifade eden katsayılardır.  $\gamma=\frac{1}{2}$  ve  $\frac{1}{6}\leq\beta\leq\frac{1}{4}$  alınması bu yöntemin doğru şekilde uygulanması için yeterlidir (Chopra 2006).

Denklem (1.1) de verilen sönümlü sistemler için genel hareket denklemi  $t$  ve  $t+\Delta t$  anları için ayrı ayrı yazılırsa;

$$M\ddot{U}_t+C\dot{U}_t+KU_t=R_t \quad (1.5)$$

$$M\ddot{U}_{t+\Delta t}+C\dot{U}_{t+\Delta t}+KU_{t+\Delta t}=R_{t+\Delta t} \quad (1.6)$$

Denklemleri elde edilir. Son olarak elde edilen (1.6) denklemden (1.5) denklemi çıkarıldığında artımsal hareket denklemi aşağıdaki

$$M\Delta\ddot{U}_t+C\Delta\dot{U}_t+K\Delta U_t=\Delta R_t \quad (1.7)$$

$$\Delta\ddot{U}_t = \ddot{U}_{t+\Delta t} - \ddot{U}_t \quad (1.8)$$

$$\Delta\dot{U}_t = \dot{U}_{t+\Delta t} - \dot{U}_t \quad (1.9)$$

$$\Delta U_t = U_{t+\Delta t} - U_t \quad (1.10)$$

şeklinde elde edilir. (1.3) ve (1.4) denklemleri artımsal olarak düzenlenirse;

$$\Delta\dot{U}_t = (\Delta t)\ddot{U}_t + \gamma(\Delta t)\Delta\ddot{U}_t \quad (1.11)$$

$$\Delta U_t = (\Delta t)\dot{U}_t + \frac{(\Delta t)^2}{2}\ddot{U}_t + \beta(\Delta t)^2\Delta\ddot{U}_t \quad (1.12)$$

elde edilmektedir. Denklem (1.12)'de  $\Delta\ddot{U}_t$  ifadesi yalnız bırakılırsa;

$$\Delta\ddot{U}_t = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}\Delta U_t - \frac{1}{\beta(\Delta t)}\dot{U}_t - \frac{1}{2\beta}\ddot{U}_t \quad (1.13)$$

şeklinde olacaktır. Bulunan  $\Delta\ddot{U}_t$  ifadesini denklem (1.11)'de yerine yazarsak;

$$\Delta\dot{U}_t = \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)}\Delta U_t - \frac{\gamma}{\beta}\dot{U}_t - \Delta t\left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right)\ddot{U}_t \quad (1.14)$$

Denklem (1.13) ve (1.14) de bulunan değerler denklem (1.6) da yerine yazılırsa;

$$\begin{aligned} & \left( \mathbf{K} + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)}\mathbf{C} + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}\mathbf{M} \right) \Delta U_t = \Delta \mathbf{R}_t + \left( \frac{1}{\beta(\Delta t)}\mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta}\mathbf{C} \right) \dot{U}_t \\ & + \left[ \frac{1}{2\beta}\mathbf{M} + \Delta t \left( \frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \mathbf{C} \right] \ddot{U}_t \end{aligned} \quad (1.15)$$

şeklinde elde edilmektedir. Önce  $\Delta U_t$ ,  $\Delta \dot{U}_t$  ve  $\Delta \ddot{U}_t$  değerleri sırasıyla denklem (1.11) , (1.12) ve (1.13) kullanılarak elde edilmektedir. Daha sonra  $\Delta t$  zaman sonraki ikinci adıma ait çözümler;

$$U_{t+1} = U_t + \Delta U_t \quad (1.16)$$

$$\dot{U}_{t+1} = \dot{U}_t + \Delta \dot{U}_t \quad (1.17)$$

$$\ddot{U}_{t+1} = \ddot{U}_t + \Delta \ddot{U}_t \quad (1.18)$$

denklemlerinden elde edilecek değerlere göre hesaplanmaktadır.

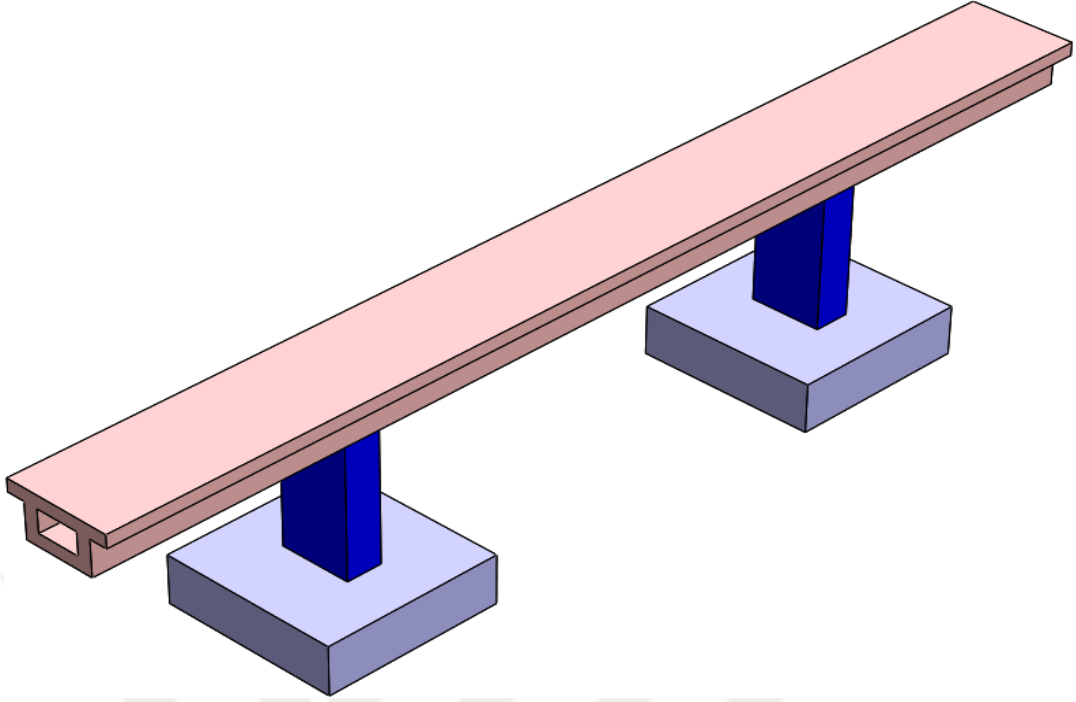
## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR**

### **2.1. Giriş**

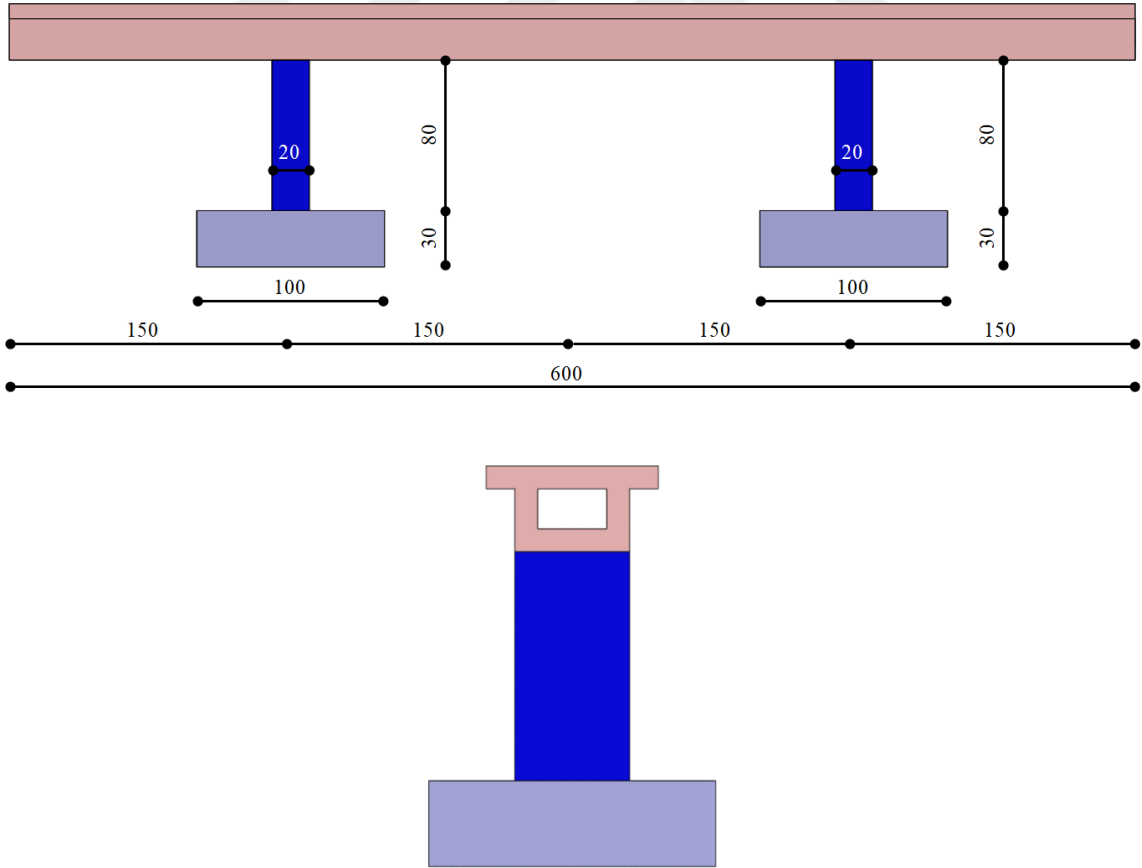
Bu tez çalışması kapsamında, betonarme köprülerin yapısal davranışlarının sayısal yöntemlerle belirlenmesi için oluşturulan sonlu eleman modellerinde donatının modal, lineer ve lineer olmayan davranışa etkisinin ne ölçüde olduğunun araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla tez kapsamında yapılan çalışmalarda, sonlu eleman yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde ANSYS sonlu eleman analiz programı kullanılmıştır. İlk önce donatısız betondan oluştuğu varsayılan bir model oluşturulmuş daha sonra beton ve donatının bir arda bulunduğu bir betonarme model oluşturularak her iki modelin lineer ve lineer olmayan davranışları karşılaştırılmıştır.

### **2.2. Model Köprünün Geometrik Özellikleri**

Tez çalışması kapsamında, aşağıda özellikleri verilen ve laboratuvar ortamında inşa edilen bir köprü modeli dikkate alınmıştır. Dikkate alınan model köprü, orta açıklığı 3 m ve kenar açıklıkları 1.5'şer m olmak üzere toplam uzunluğu 6 m olan ve üç açıklıktan oluşan bir köprü olarak tasarlanmıştır. Model köprünün analizine esas teşkil etmek üzere, iki ayak zemine ankastre olacak şekilde modellenmiştir. Model köprünün ayakları 20x40 cm<sup>2</sup> en kesitine sahip ve 110 cm yüksekliğindedir. Model köprüye ait iki ve üç boyutlu görünüşler ise Şekil 2.1'de ve 2.2'de verilmiştir. Boyutlar cm cinsindedir.

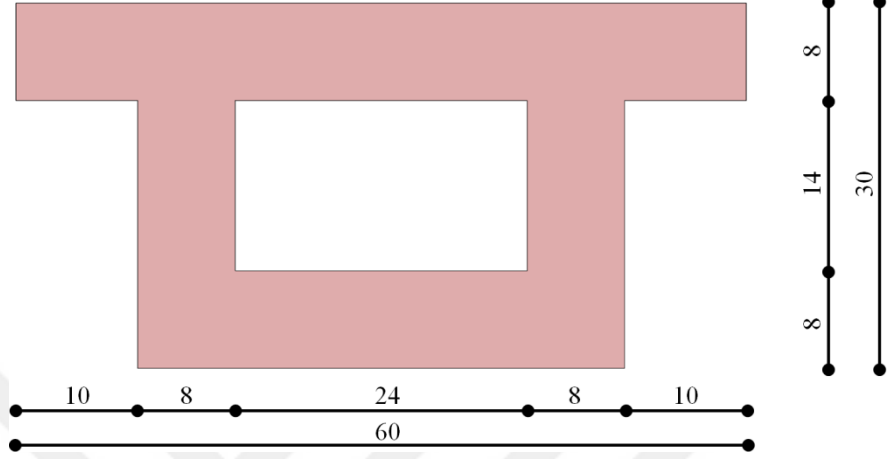


Şekil 2.1. Model köprüye ait üç boyutlu görünüş



Şekil 2.2. Model köprüye ait iki boyutlu görünüşler

En kesiti 25 cm yüksekliğinde ve alt genişliği 40 cm üst genişliği 60 cm olan tek hücreli kutu kesit şeklindeki tabliye 6 m uzunluğunda planlanmıştır. Model köprüye ait tabliye en kesiti görünüşü Şekil 2.3’te verilmiştir.



Şekil 2.3. Model köprüye ait tabliye en kesiti görünüşü

### 2.3. Model Köprünün Analizinde Kullanılacak Malzemelerin Seçimi

Model köprünün ayak ve tabliyesi C30/37 sınıfı beton kullanılarak inşa edilmiştir. Ayaklar ve tabliye kısmında kullanılan donatının ise değişik çaplarda nervürlü S420C donatı çeliğidir.

Model köprünün inşaatı sırasında kullanılan beton ve donatıya ait malzeme özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Model köprünün sonlu eleman analizlerinde kullanılan beton ve donatı çeliğine ait malzeme özellikleri

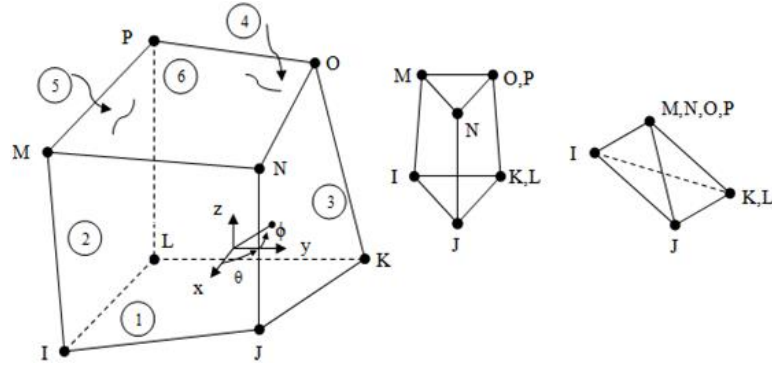
Malzeme	Elastisite Modülü [N/m <sup>2</sup> ]	Poisson Oranı [-]	Yoğunluk [kg/m <sup>3</sup> ]
S420C	2.06E11	0.3	7850
C30/37	2.95E10	0.2	2500



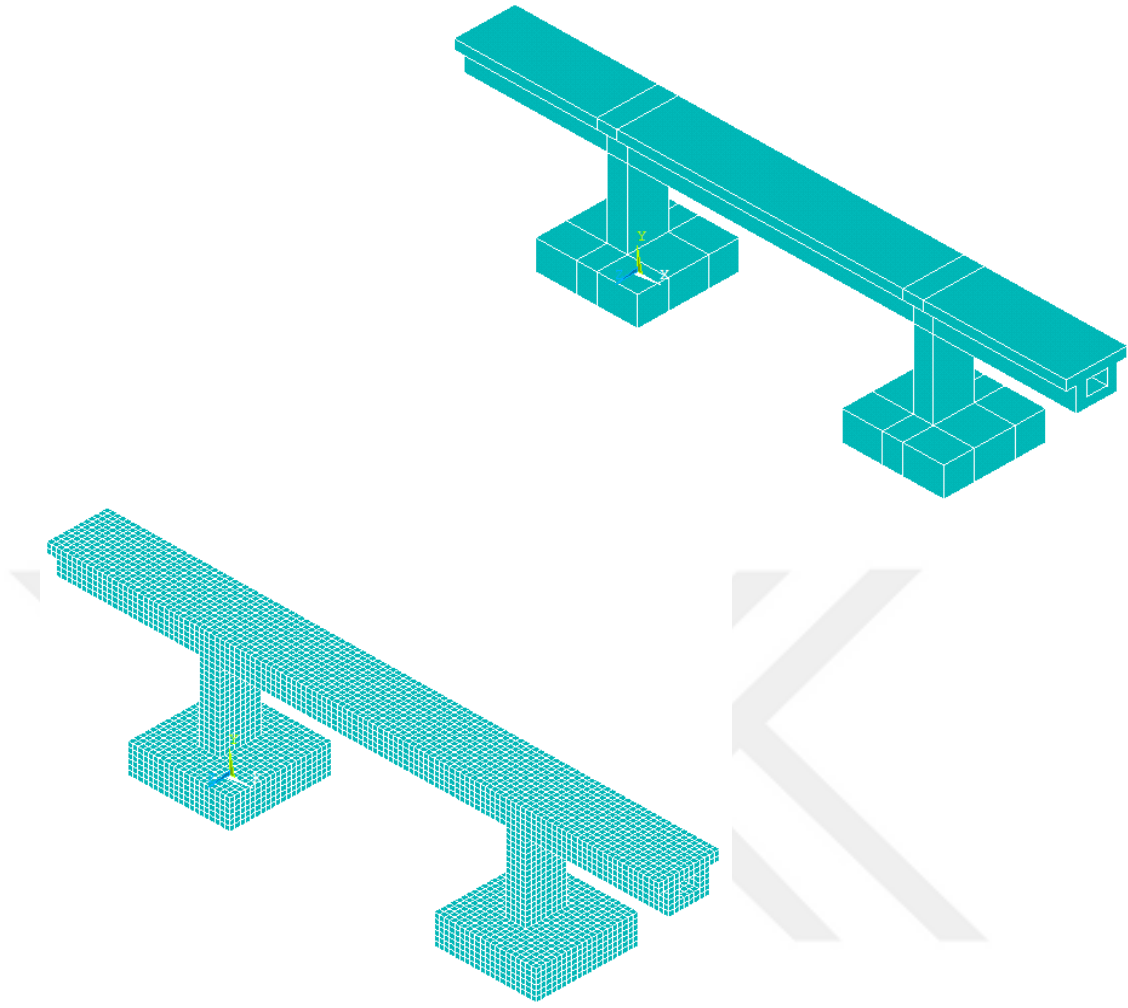
## 2.4. Model Köprünün Sonlu Eleman Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Geometrik özellikleri yukarıda belirtilen köprünün dinamik karakteristikleri sonlu eleman yöntemiyle belirlenmiştir. Dinamik karakteristiklerin (frekans, periyot ve mod şekli) belirlenmesinde kullanılan üç boyutlu model ANSYS (2014) sonlu eleman analiz programı kullanılarak oluşturulmuştur. Modellemede kullanılan taşıyıcı sistem elemanlarına ait malzeme özellikleri Tablo 2.1’de gösterilmiştir. Çalışmada kullanılacak betonarme köprünün sonlu eleman modeli aşağıdaki ölçütlere göre oluşturulmuştur:

- Model köprünün temel, ayak ve tabliyesinde bulunan beton kısımlar programda; çekme, çatlama, ezilme, plastik deformasyon ve sünme özellikleri ile tanımlı her bir düğüm noktasında x, y ve z yönlerinde 3 ötelenme serbestlik derecesine sahip 8 düğüm noktası bulunan SOLID65 tipi eleman seçilerek oluşturulmuştur.
- Model köprünün SOLID65 eleman ile temsil edilen beton kısmının 2.5 cm (mesh) aralıklarla kare sonlu elemana bölündüğünde 35.224 eleman ve 51.366 düğüm noktası (node) meydana gelmiştir.



Şekil 2.4. SOLID65 tipi eleman

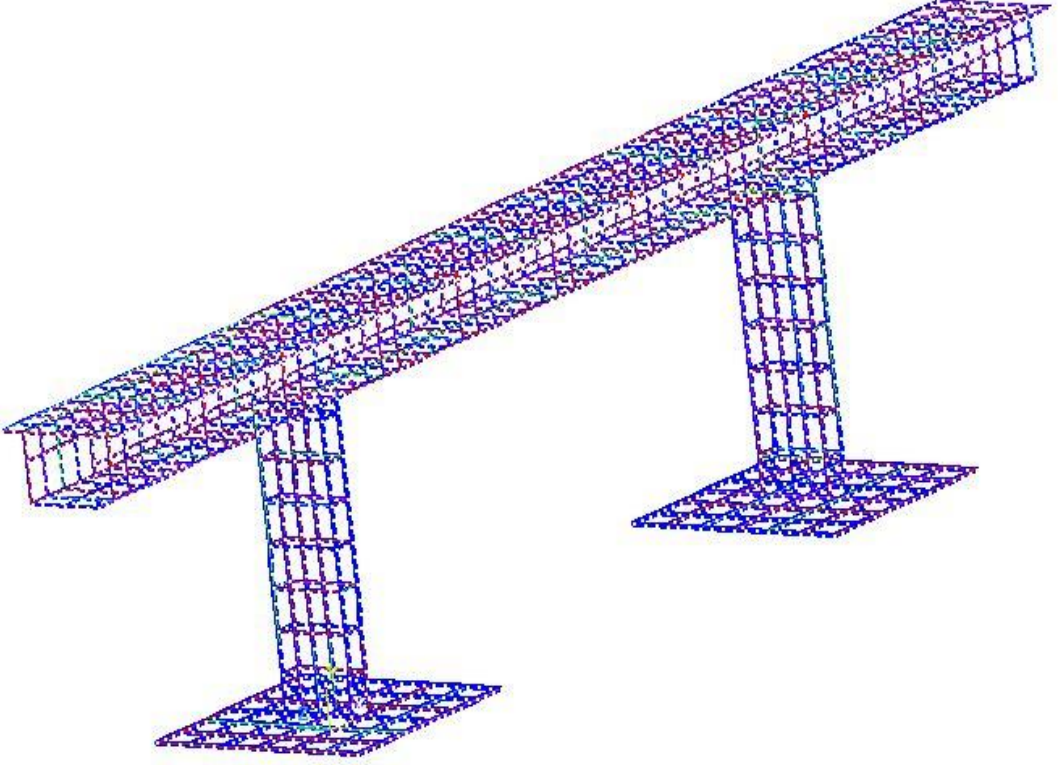


Şekil 2.5. Model beton köprünün sonlu elemana bölünmüş üç boyutlu gösterimi

- Model köprünün temel, ayak ve tabliyesinde bulunan donatı çeliği kısımları programda; herbir düğüm noktasında x, y ve z yönlerinde 3 ötelenme serbestlik derecesine sahip 2 düğüm noktası bulunan LINK180 tipi eleman seçilerek oluşturulmuştur.
- Model köprü LINK180 eleman ile temsil edilen donatı kısmının 2.5 cm (mesh) aralıklarla kare sonlu elemanı bölündüğünde 3.732 Eleman ve 3.874 düğüm noktası (node) meydana gelmiştir.



Şekil 2.6. LINK180 tipi eleman



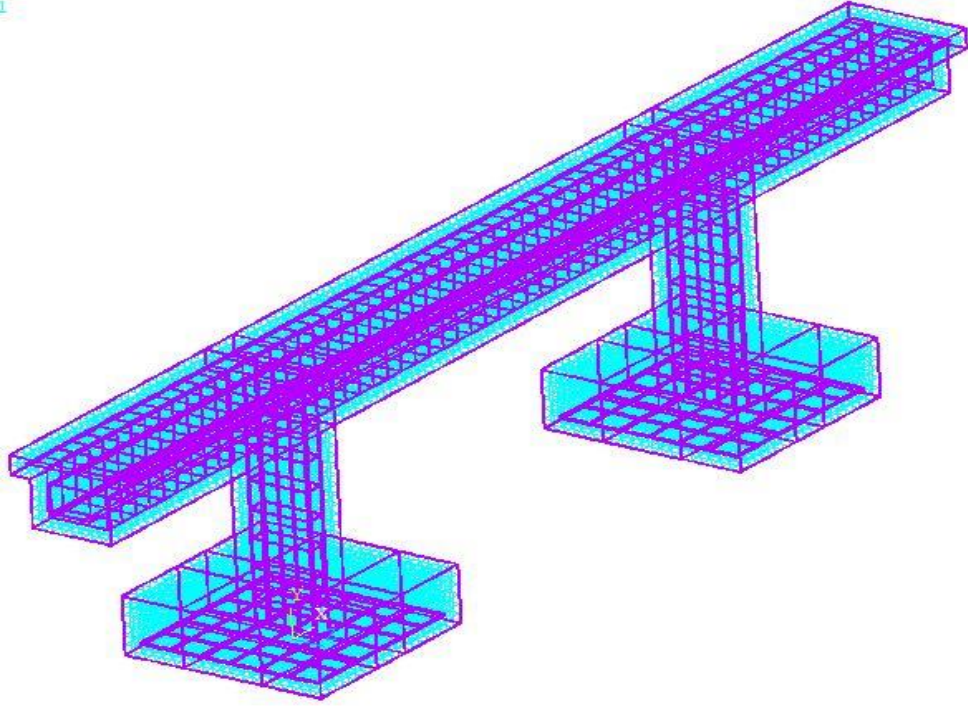
Şekil 2.7. Model köprünün ayaklarındaki ve tabliyesindeki donatı çubuklarının üç boyutlu sonlu eleman modeli gösterimi

- Model köprüyü oluşturan tüm elemanlar 2.5 cm (mesh aralığı) aralıklarla kare geometride sonlu eleman parçalarına bölünmüştür.
- Modele ait sınır şartları iki ayak zemine ankastre ve kenar açıklıklardan biri sabit diğeri hareketli mesnet ile zemin bağlantısı sağlanacak şekilde modellenmiştir.

## 2.5. Model Köprünün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Doğal frekansları ve mod şekilleri belirlenecek 6 m uzunluğunda 1.1 m yüksekliğinde tek hücreli kutu kesit sisteminde planlanan köprü modeli ANSYS sonlu eleman analiz programı kullanılarak oluşturulmuştur.

Model köprü için analizlerde kullanılacak sınır şartları şu şekildedir. Ayakların yere ankastre olarak bağlandığı kabul edilmiştir. Dolayısıyla bu noktaların tüm yönlere göre hareketi engellenmiştir.



Şekil 2.8. Model betonarme köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli gösterimi

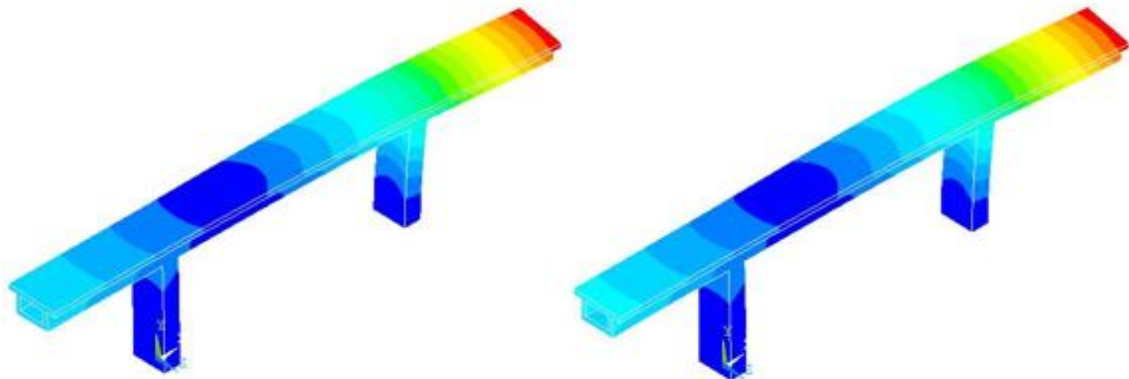
### 2.5.1. Modal Analiz

ANSYS sonlu eleman analiz programı kullanılarak elde edilen model köprüye ait modal analizler neticesinde beton ve betonarme modele ait doğal frekans değerleri sırası ile Tablo 2.2’de sunulmuştur.

Tablo 2.2. Donatılı ve donatısız model köprüye ait doğal frekans değerleri

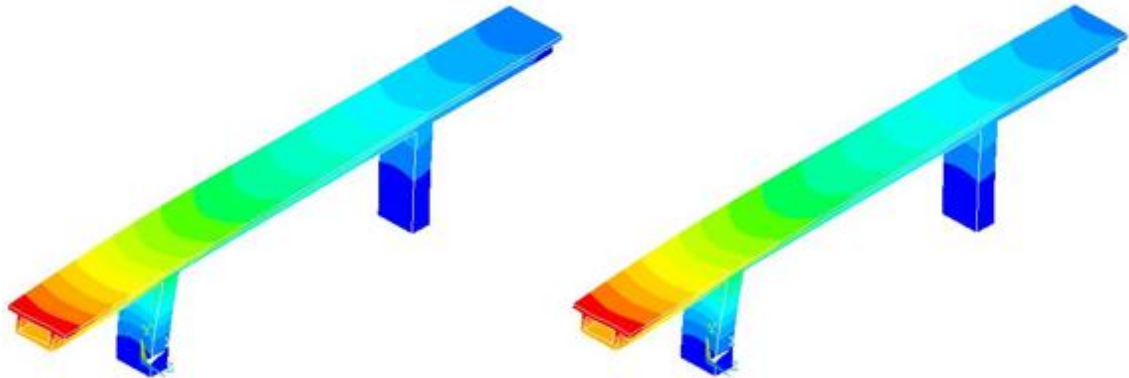
MOD	BETON MODEL	BETONARME MODEL
	Frekans [Hz]	Frekans [Hz]
1	45.305	45.967
2	46.544	47.195
3	65.810	67.051
4	84.534	85.887
5	111.45	113.31
6	149.92	153.02
7	199.74	202.82
8	216.83	218.61

Model Köprünün donatılı ve donatısız sonlu eleman modellerinin ilk sekiz mod şekilleri Şekil 2.9’da karşılıklı olarak verilmektedir. Elde edilen mod şekilleri incelendiğinde oluşan modların; uzama, düşey ve enine modlar olduğu görülmektedir. Ayrıca, donatının model köprünün dinamik karakteritkleri olarak adlandırılan frekans ve mod şekilleri üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür.



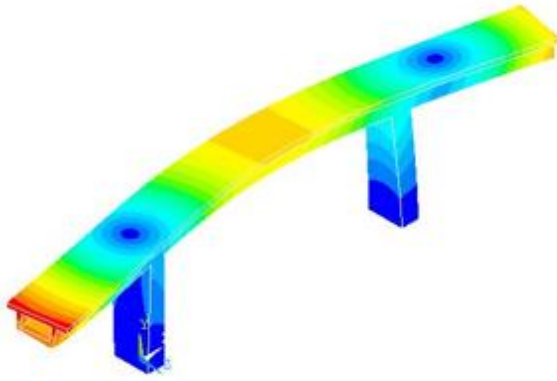
Donatısız model  
1. Mod ( $f_1=45.305$  Hz)

Donatılı model  
1. Mod ( $f_1=45.967$  Hz)

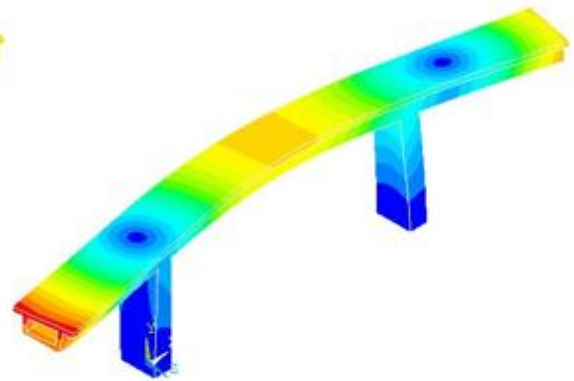


Donatısız model  
2. Mod ( $f_2=46.544$  Hz)

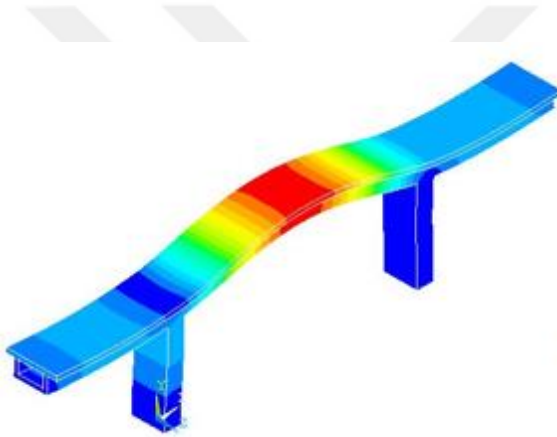
Donatılı model  
2. Mod ( $f_2=47.195$  Hz)



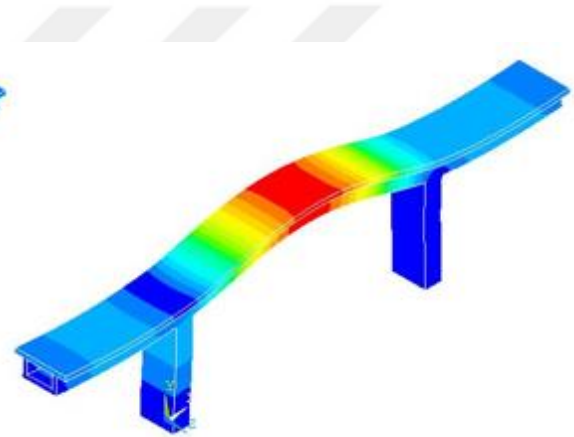
Donatısız model  
3. Mod ( $f_3=65.810$  Hz)



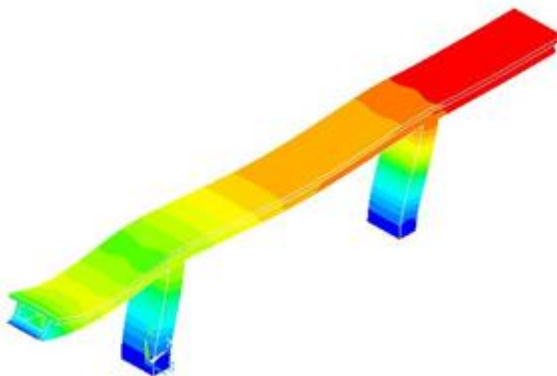
Donatılı model  
3. Mod ( $f_3=67.051$ Hz)



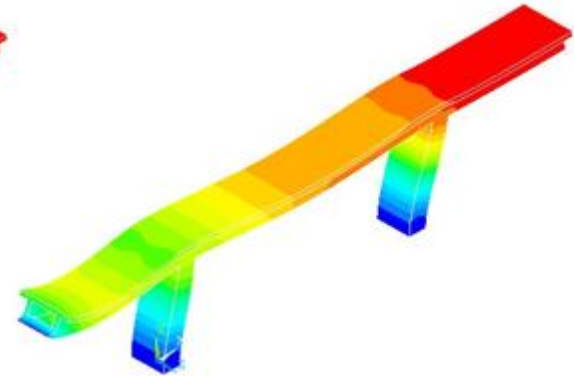
Donatısız model  
4. Mod ( $f_4=84.534$  Hz)



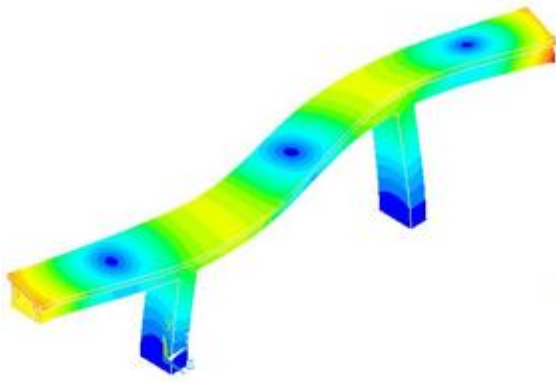
Donatılı model  
4. Mod ( $f_4=85.887$ Hz)



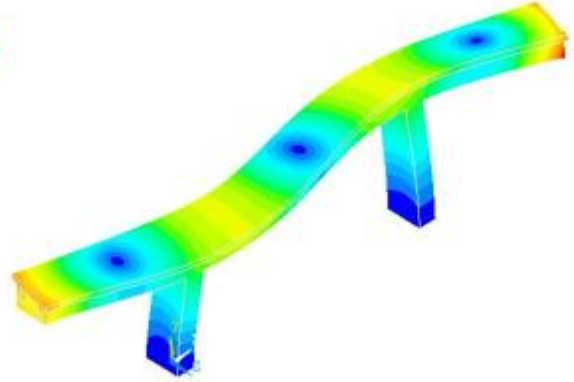
Donatısız model  
5. Mod ( $f_5=111.45$  Hz)



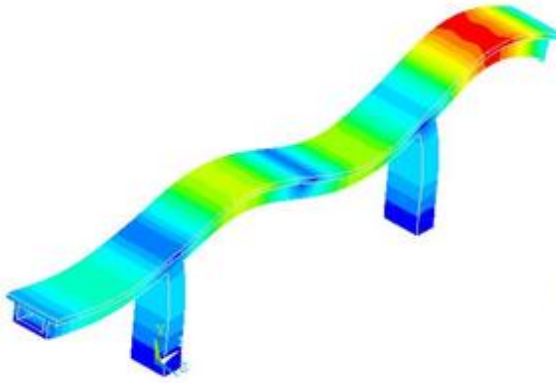
Donatılı model  
5. Mod ( $f_5=113.31$  Hz)



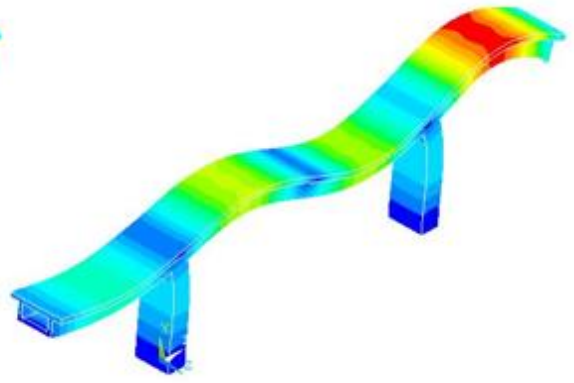
Donatısız model  
6. Mod ( $f_6=149.92$  Hz)



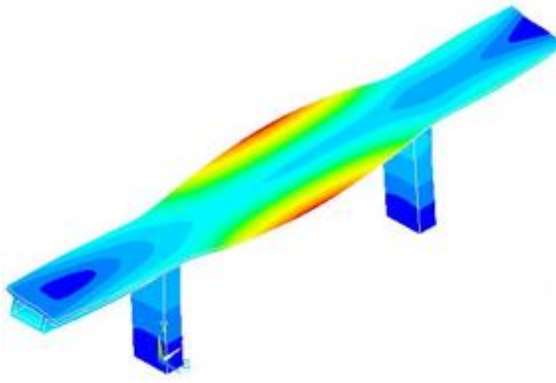
Donatılı model  
6. Mod ( $f_6=153.02$  Hz)



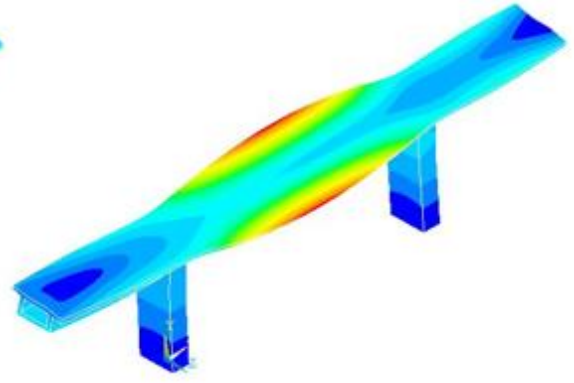
Donatısız model  
7. Mod ( $f_7=199.74$  Hz)



Donatılı model  
7. Mod ( $f_7=202.82$  Hz)



Donatısız model  
8. Mod ( $f_8=216.83$  Hz)



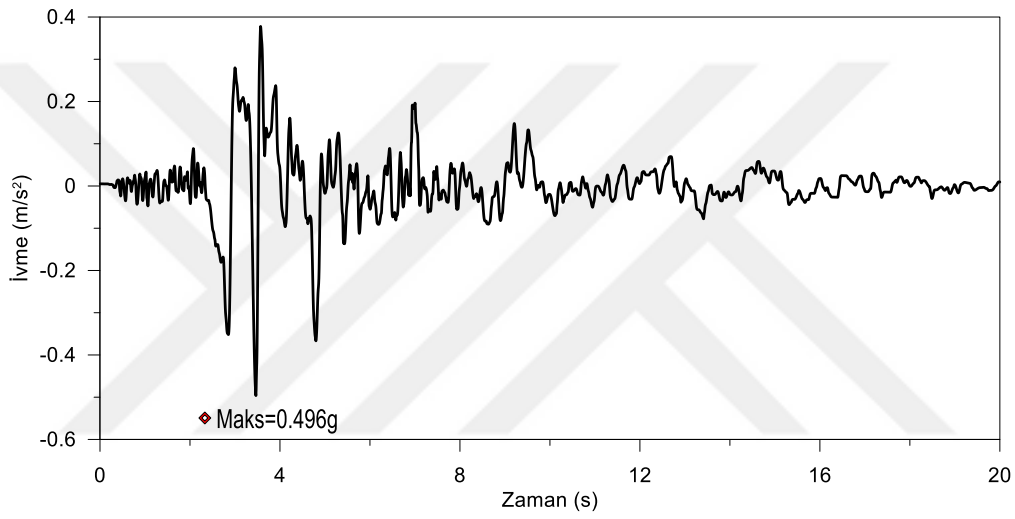
Donatılı model  
8. Mod ( $f_8=218.61$  Hz)

Şekil 2.9. Model köprüye ait ilk sekiz mod şekli ve frekans değerleri

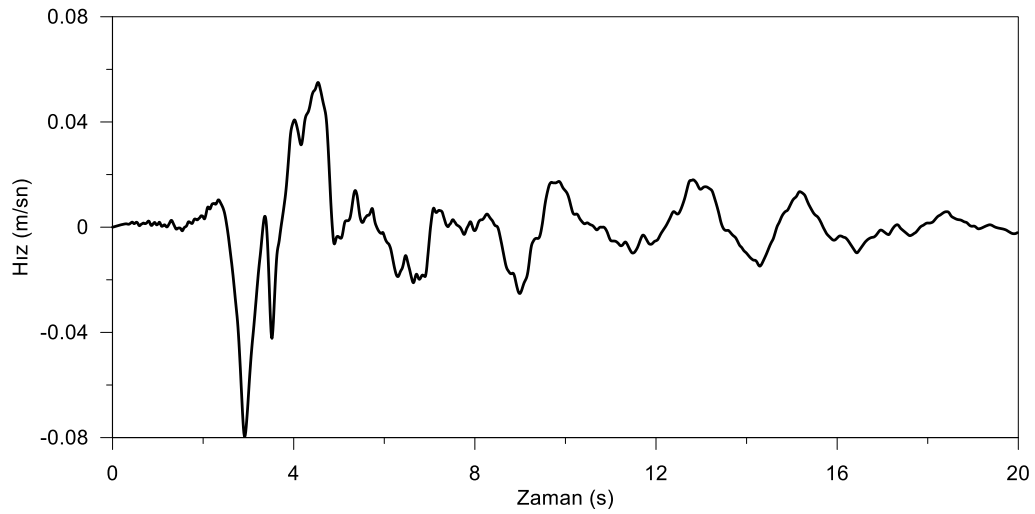
## 2.6. Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz

Model köprünün zaman tanım alanındaki dinamik analizleri için, ANSYS programına oluşturulan sonlu eleman modelleri üzerine 1992 Erzincan depreminin etkin yer ivmesi 0.005 sn'lik aralıklarda hakim titreşim modu doğrultusunda uygulanmıştır.

Dikkate alınan 1992 yılına ait deprem ivme, hız ve yer değiştirme grafikleri Şekil 10-12'de verilmiştir. Bu ivme kaydı, 0-7 saniyeler arası bir zaman aralığı için analizlerde dikkate alınmıştır.

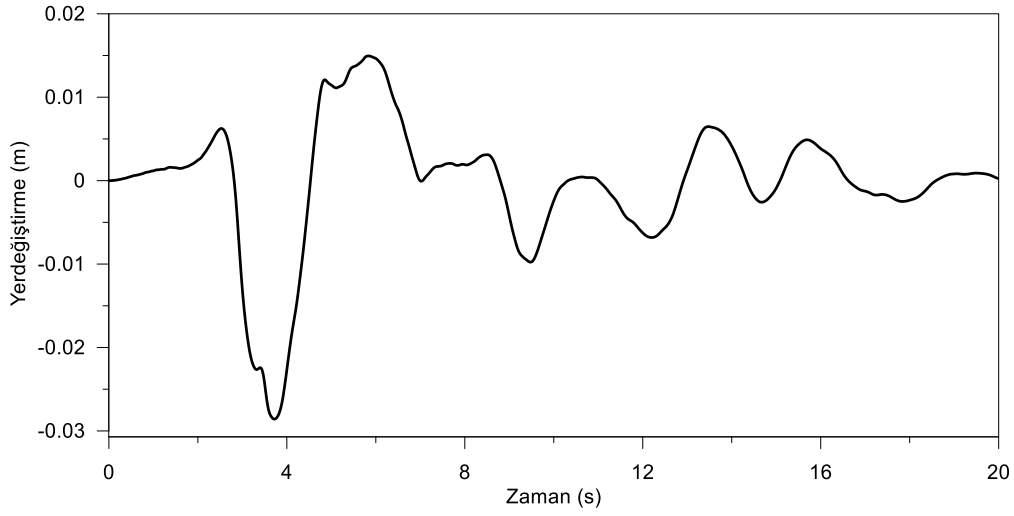


Şekil 2.10. Erzincan 1992 yılı deprem ivme-zaman kaydı



Şekil 2.11 Erzincan 1992 yılı deprem hız-zaman kaydı





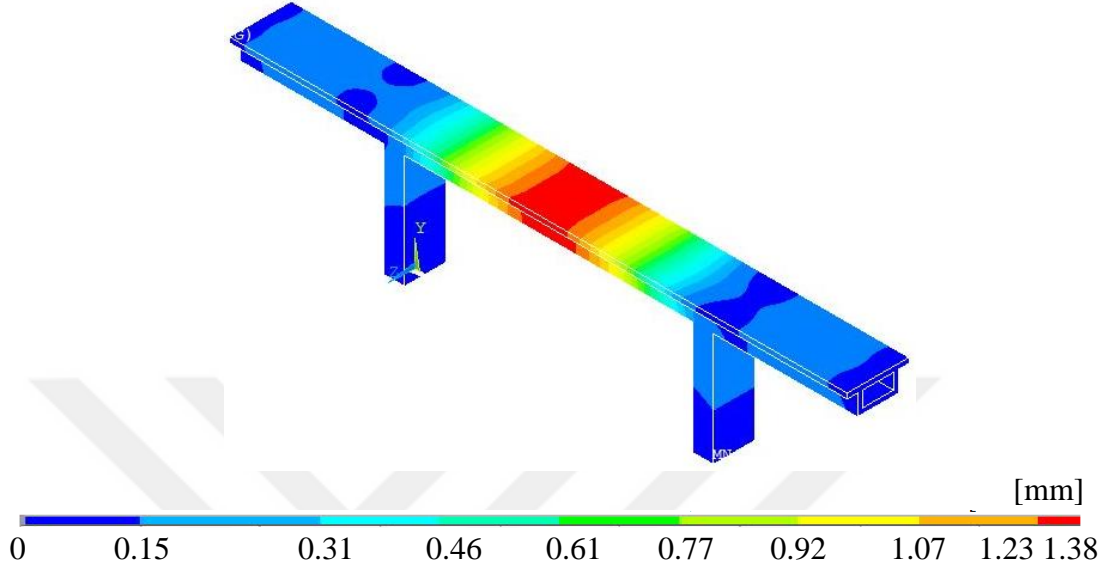
Şekil 2.12. Erzincan 1992 yılı deprem yerdeğiştirme-zaman kaydı

### 2.6.1. Zaman Tanım Alanında Lineer Dinamik Analiz

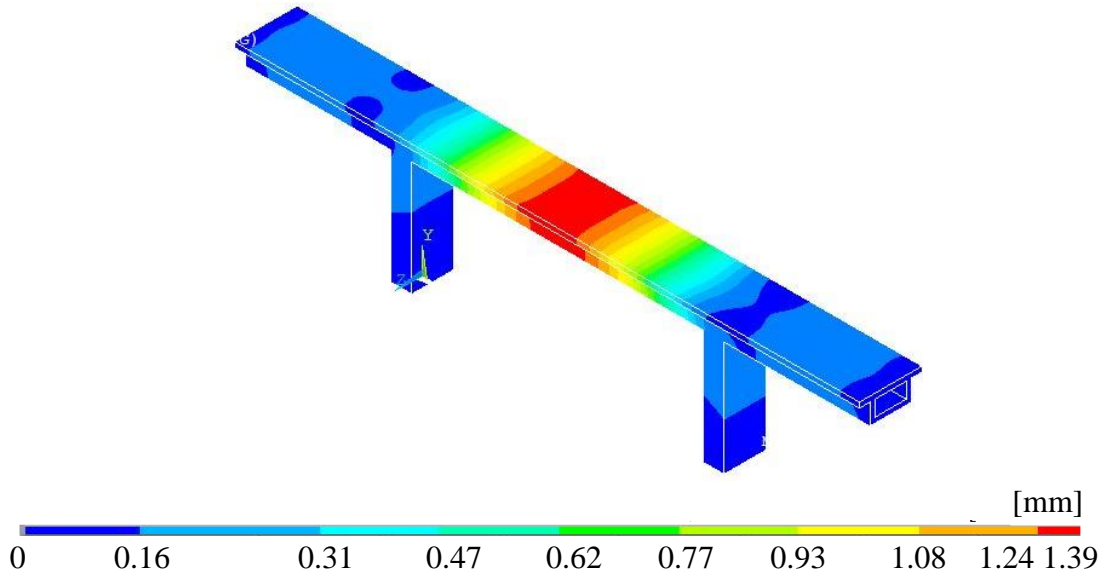
Model köprü ANSYS sonlu eleman analiz programında ilk olarak donatısız, sadece beton malzemeden meydana gelmiş bir hacim olarak, daha sonra beton ve donatının bir arada bulunduğu betonarme malzemeden oluşan bir model olarak dikkate alınmıştır. Karşılaştırma yapabilmek için her iki malzeme özelliklerinin de Hooke Yasasına uygun olduğu kabulü yapılmıştır. Bu kanuna göre, gerilme-şekil değiştirme eğrisinin grafiği lineerdir ve eğimi elastisite modülünü vermektedir.

Bu kabule göre programa tanıtilan hem beton hem de çelik malzemelerin elastisite modülü analizlerde program tarafından model üzerine uygulanmıştır. Köprünün sonlu eleman modelinin beton kısımları ANSYS programında SOLID65 eleman tipi ile katı hacim olarak, donatı kısmı ise LINK180 eleman tipi ile çubuk malzemeler kullanılarak temsil edilmiştir. Model köprünün beton kısımları C30/37 sınıfı beton, donatı kısımları ise S420 donatı çeliği kullanılarak oluşturulmuştur. Beton ve çelik malzemelerin programa girilen değerleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Oluşturulan sayısal modele 1992 Erzincan depreminin etkin yer ivme kaydı 0.005 sn zaman aralıkları ile uygulanarak zaman tanım alanında dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. 1992 Erzincan depremi etkin yer ivmesinde dikkate alınan 0-7 sn'lik bölümde, model köprünün en çok zorlandığı 1.90 sn anında donatılı ve donatısız modellere ait zaman tanım alanında lineer analizlerden elde edilen maksimum yer değiştirme, maksimum-minimum asal gerilmelere ve maksimum-minimum

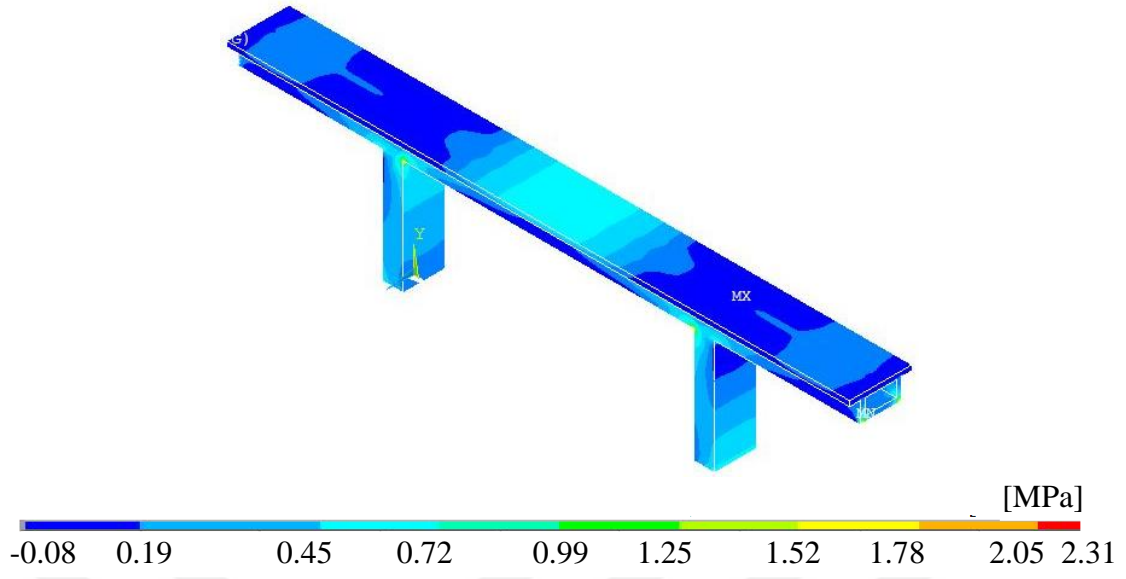
şekil değiştirmelere ait sonuçlar Şekil 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19, 2.20, 2.21 ve 2.22’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



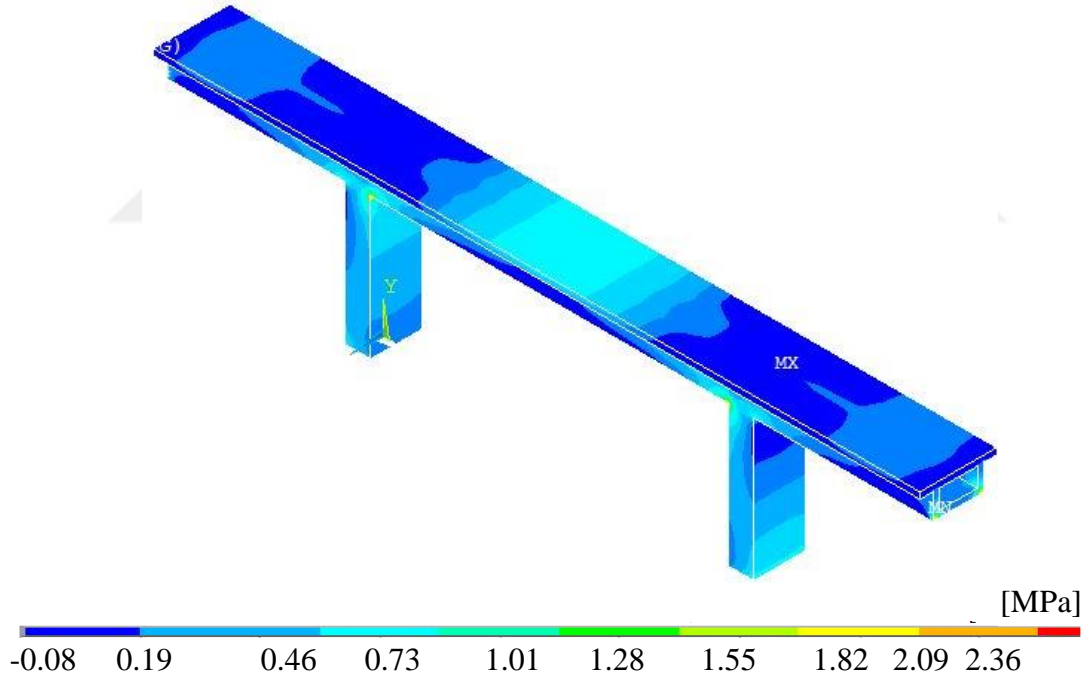
Şekil 2.13. Donatısız modelin zaman tanım alanında lineer analizi için maksimum yerdeğiştirme diyagramı



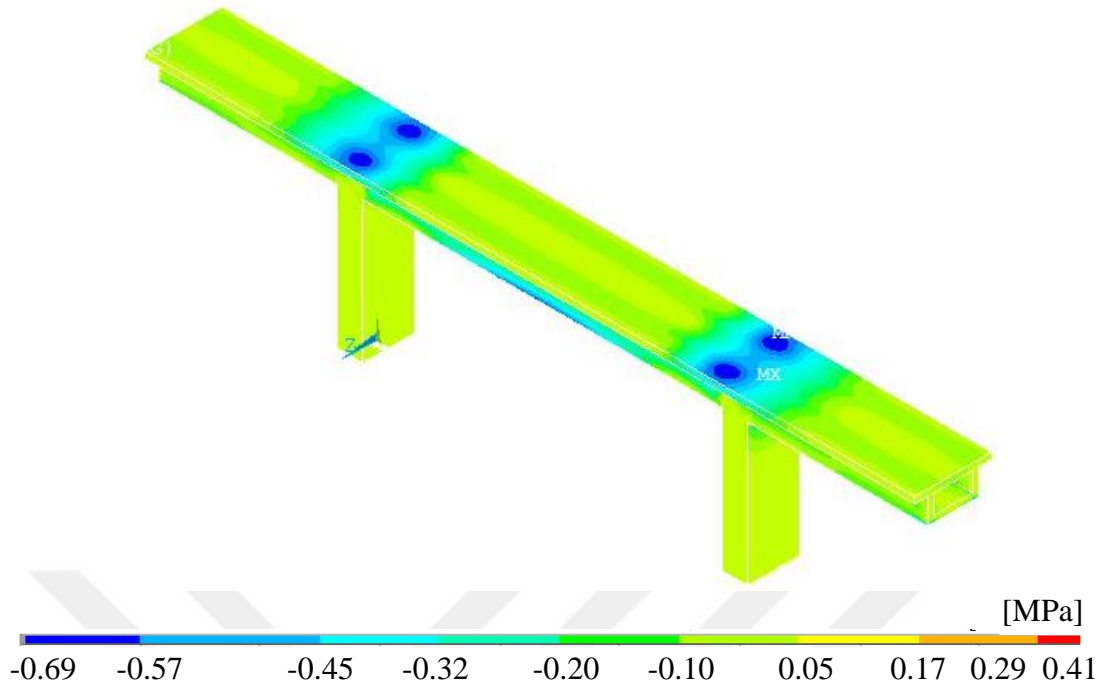
Şekil 2.14. Donatılı modelin zaman tanım alanında lineer analizi için maksimum yerdeğiştirme diyagramı



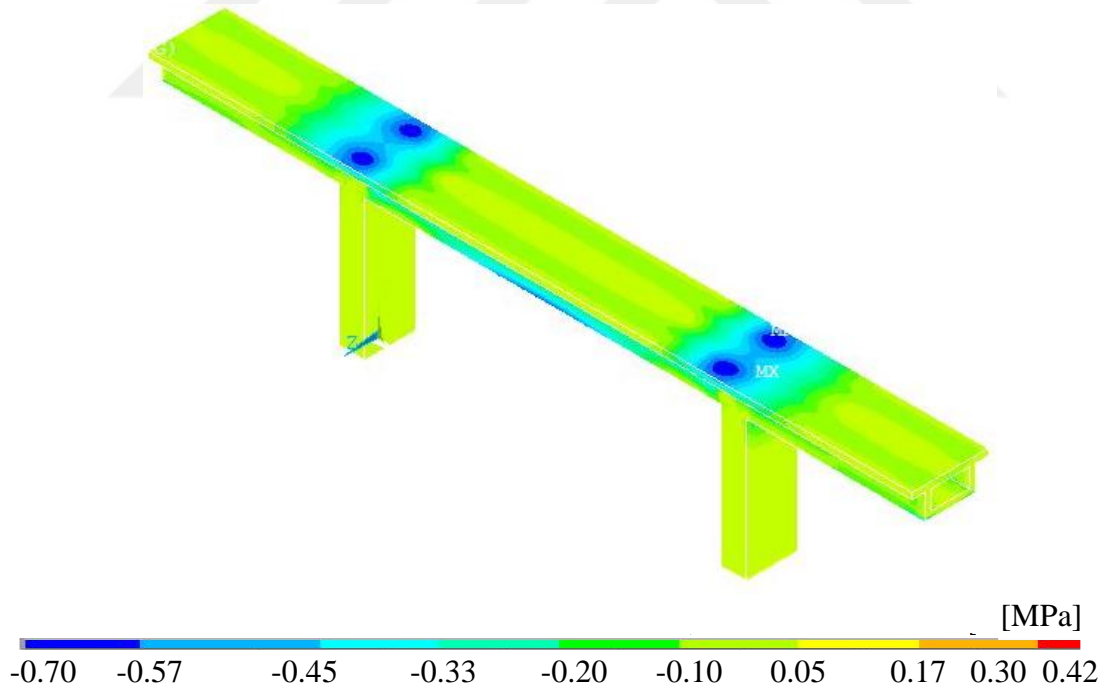
Şekil 2.15. Donatısız modelin lineer analizi için maksimum asal gerilme diyagramı



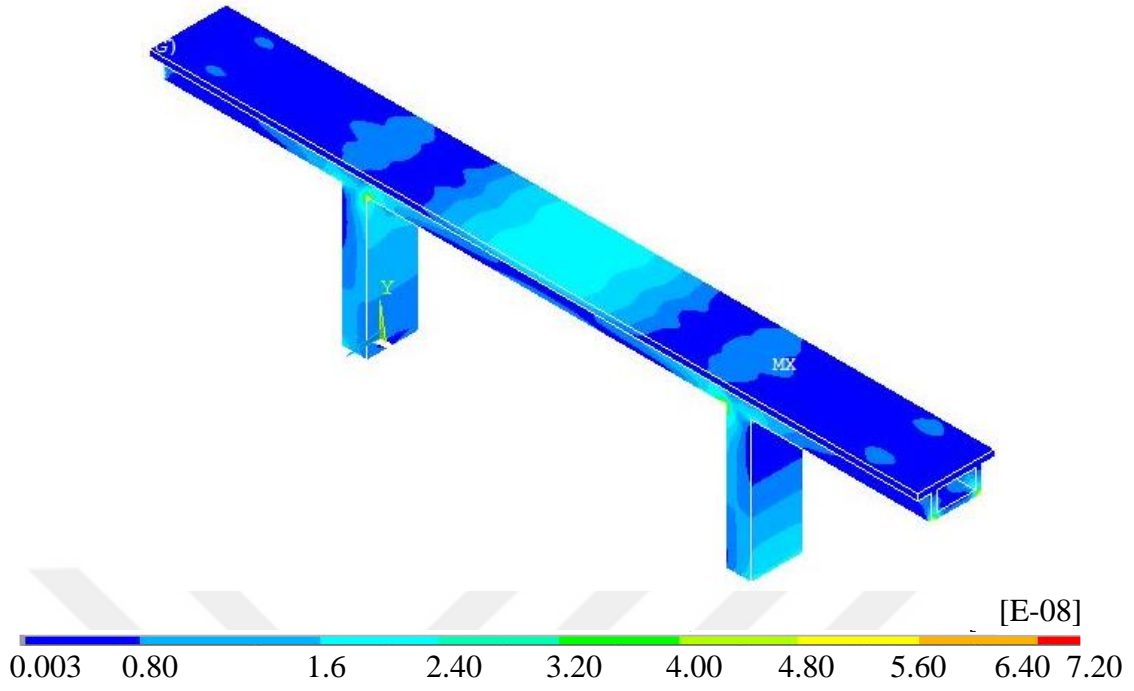
Şekil 2.16. Donatılı modelin lineer analizi için maksimum asal gerilme diyagramı



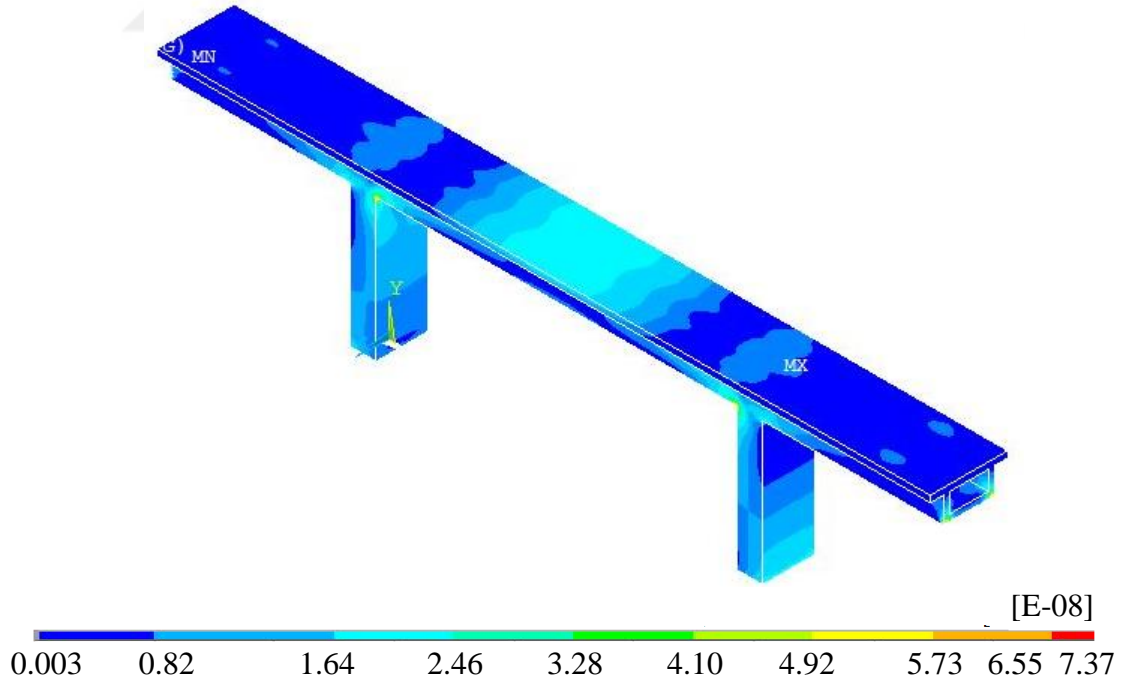
Şekil 2.17. Donatısız modelin lineer analizi için minimum asal gerilme diyagramı



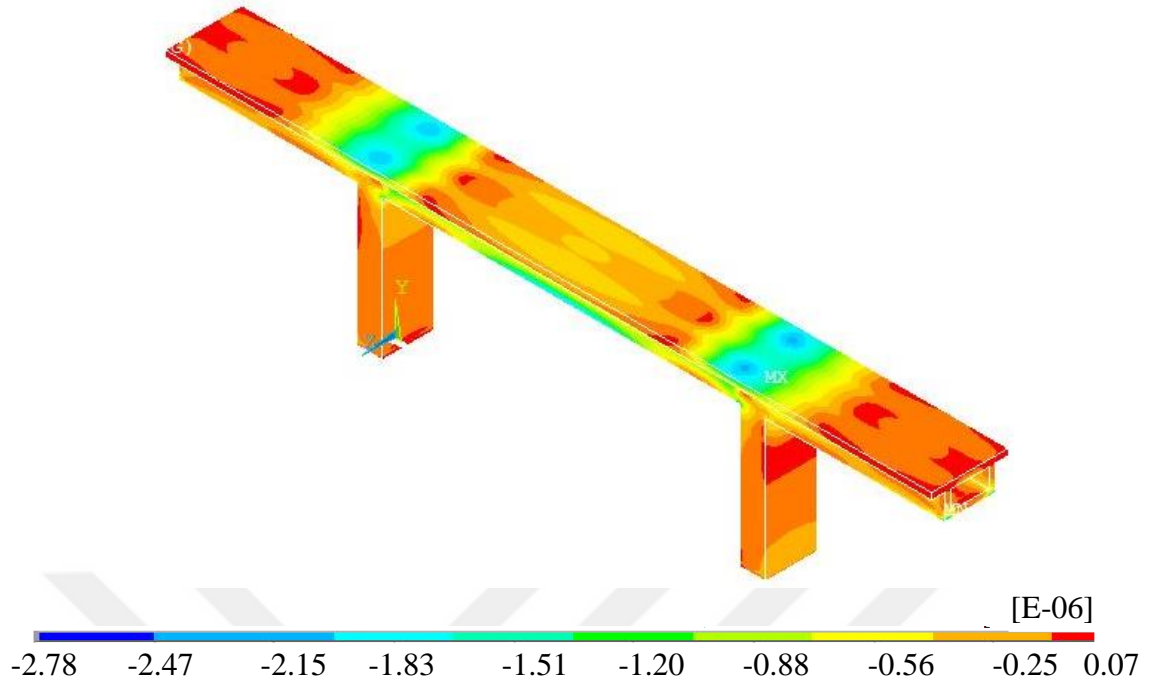
Şekil 2.18. Donatılı modelin lineer analizi için minimum asal gerilme diyagramı



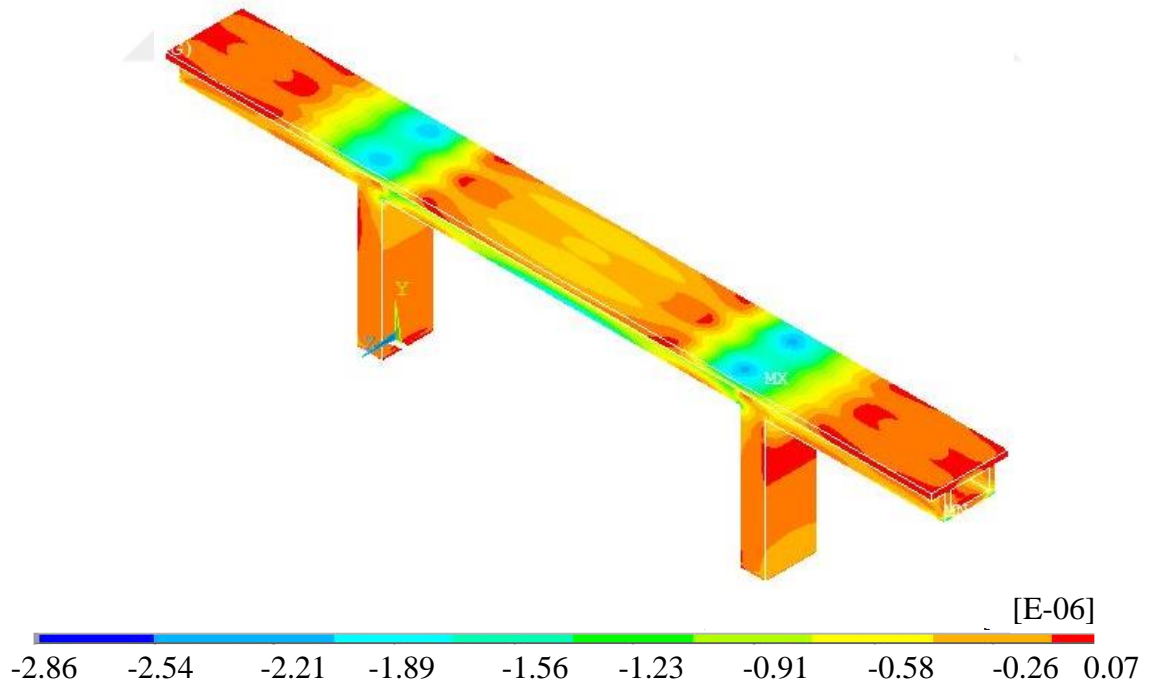
Şekil 2.19. Donatısız modelin lineer analizi için maksimum asal şekildeğiştirme diyagramı



Şekil 2.20. Donatılı modelin lineer analizi için maksimum asal şekildeğiştirme diyagramı



Şekil 2.21. Donatısız modelin lineer analizi için minimum asal şekildeğiştirme diyagramı



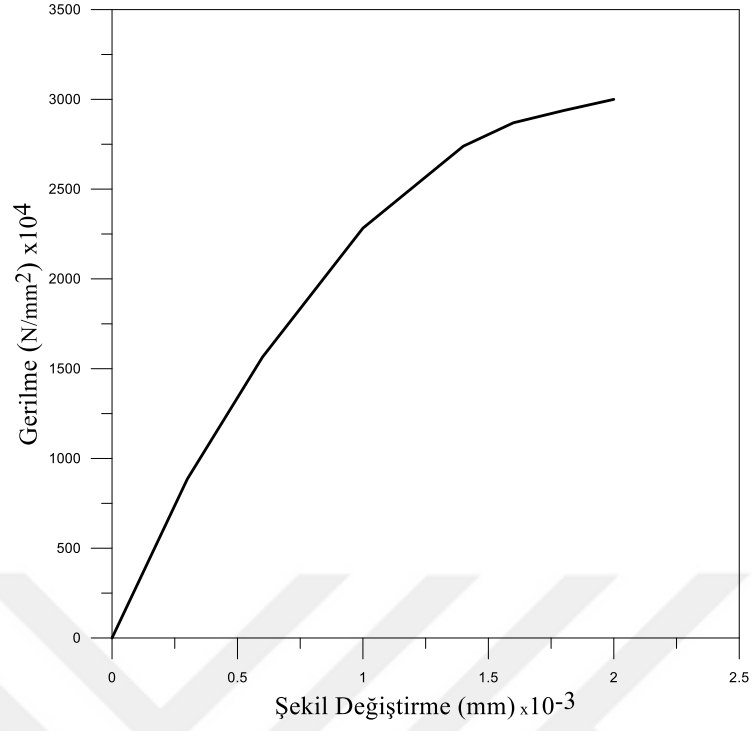
Şekil 2.22. Donatılı modelin lineer analizi için minimum asal şekildeğiştirme diyagramı

### 2.6.2. Zaman Tanım Alanında Lineer Olmayan Dinamik Analiz

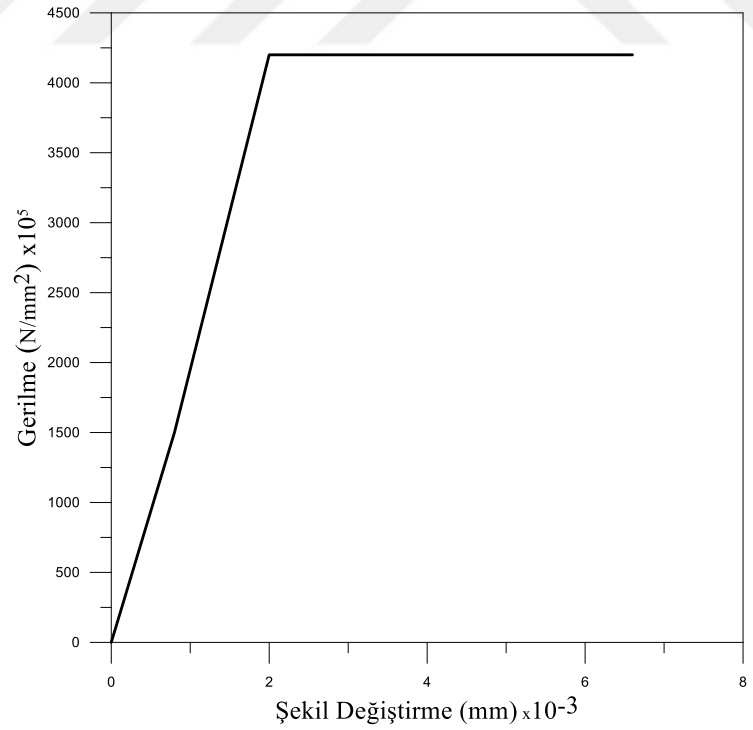
Lineer olmayan dinamik analizler sırasında malzeme özelliğindeki değişimleri dikkate almak için, program tarafından sunulan hazır malzeme modelleri kullanılmamış olup, bunun yerine gerçek malzeme davranışını daha iyi bir şekilde yansıtabilmek adına manual veri girişi ile birlikte gerilme-şekil değiştirme eğrisi tanımlanmıştır. Beton malzeme için Hognestat sargılı beton modeline göre elde edilen gerilme-şekil değiştirme değerleri programa tek tek girdi verileri olarak tanıtılmış ve malzemenin gerçek davranışını göstermesi amaçlanmıştır. Beton malzeme için Hognestat modeline göre elde edilen gerilme-şekil değiştirme değerleri Tablo 2.3'te gösterilmiştir. Program tarafından oluşturulan gerilme-şekildeğiştirme grafiği Şekil 2.23'te verilmiştir. Ayrıca C30/37 betonu için karakteristik malzeme değerleri TS-500 yönetmeliğinden alınarak programa girdi verileri olarak tanıtılmıştır. Burada C30/37 betonu için basınç dayanımı 30 MPa ve çekme dayanımı 1.9 MPa olarak programa girilmiştir. S420 donatı çeliği için karakteristik malzeme değerleri TS-708 yönetmeliğinden alınarak programa girdi verileri olarak tanıtılmıştır. Buna göre S420 çeliğinin akma dayanımı 420 MPa olarak programa girilmiştir. Donatı çeliği olarak kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Ayrıca S420 donatı çeliği için girilen malzeme özelliklerine göre program tarafından oluşturulan gerilme-şekildeğiştirme grafiği Şekil 2.24'te verilmiştir.

Tablo 2.3 Beton malzeme için Hognestat Modeline göre elde edilen gerilme-şekil değiştirme değerleri

	<b>Gerilme</b> [N/m <sup>2</sup> ]	<b>Şekil değiştirme</b> [mm]
<b>1. Nokta</b>	8850000	0.0003
<b>2. Nokta</b>	15652000	0.0006
<b>3. Nokta</b>	22826000	0.001
<b>4. Nokta</b>	27391000	0.0014
<b>5. Nokta</b>	28696000	0.0016
<b>6. Nokta</b>	29348000	0.0018
<b>7. Nokta</b>	30000000	0.002



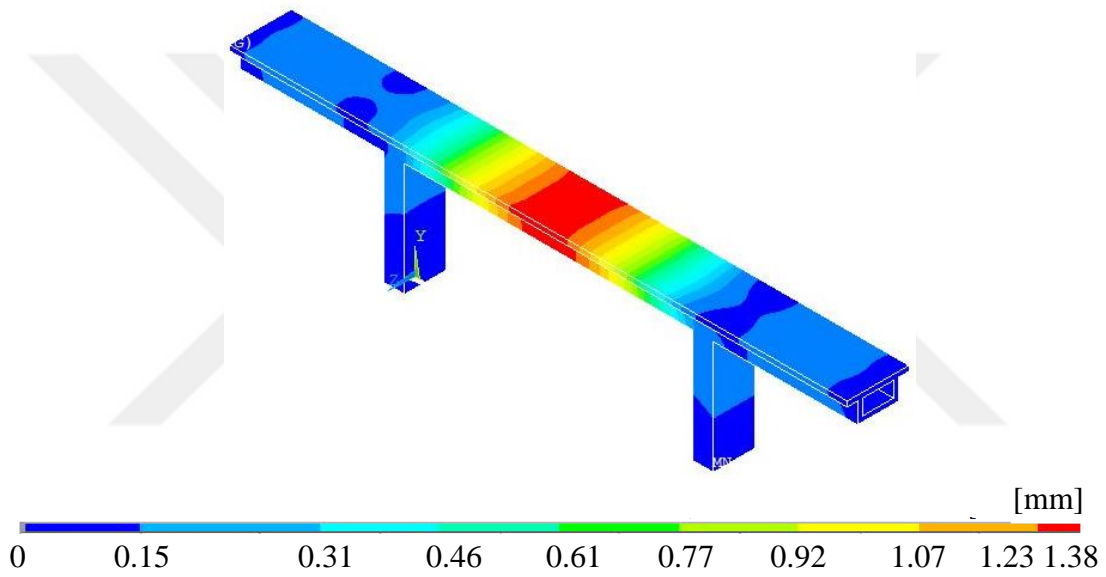
Şekil 2.23. Beton malzeme için girilen gerçek malzeme özelliklerine göre elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafiği



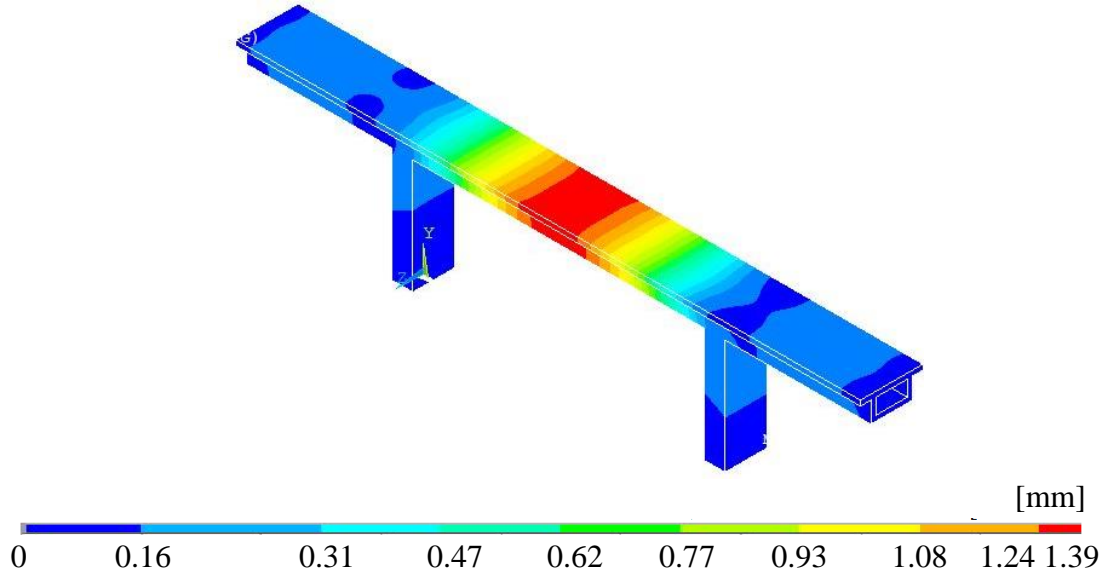
Şekil 2.24. Çelik malzeme için girilen gerçek malzeme özelliklerine göre elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafiği



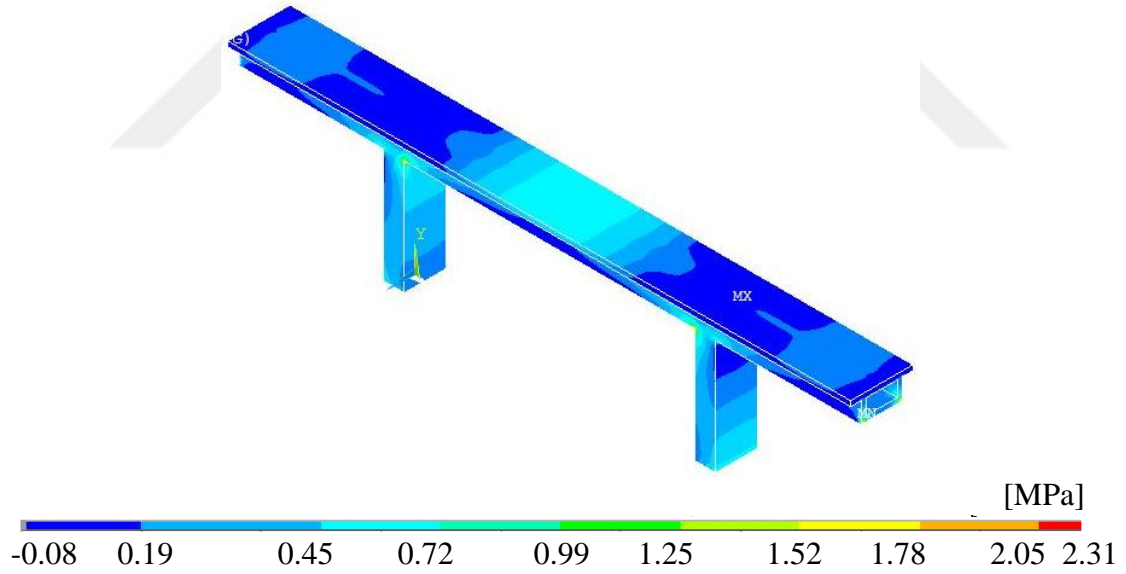
Oluşturulan sonlu eleman modeli üzerine 1992 Erzincan depreminin etkin yer ivmesi 0.005 sn zaman aralıkları ile etkin mod doğrultusunda uygulanmış olup, zaman tanım alanında dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Erzincan 1992 depreminin etkin yer ivmesinin dikkate alınan 0-7 sn'lik bölümünde en çok zorlanmanın olduğu 1.90 sn anındaki donatılı ve donatısız modellere ait zaman tanım alanında lineer olmayan analizlerden elde edilen maksimum yer değiştirme, maksimum-minimum asal gerilmelere ve maksimum-minimum şekil değiştirmelere ait sonuçlar Şekil 2.25, 2.26, 2.27, 2.28, 2.29, 2.30, 2.31, 2.32, 2.33 ve 2.34'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



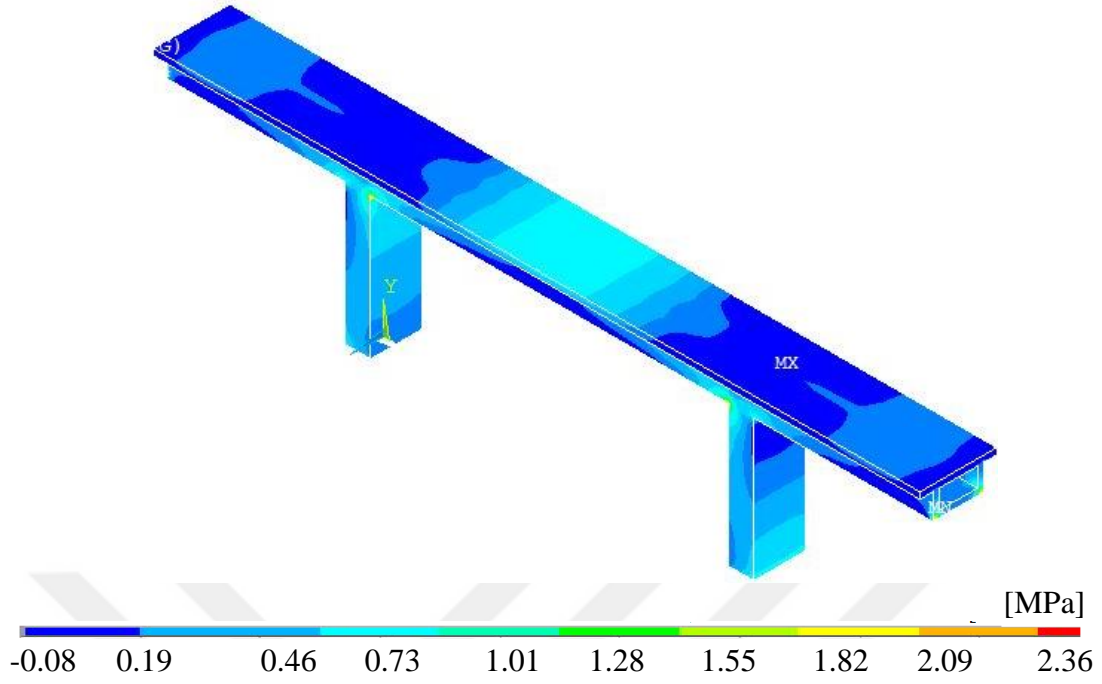
Şekil 2.25. Donatısız modelin zaman tanım alanında lineer olmayan analizi için maksimum yerdeğiştirme diyagramı



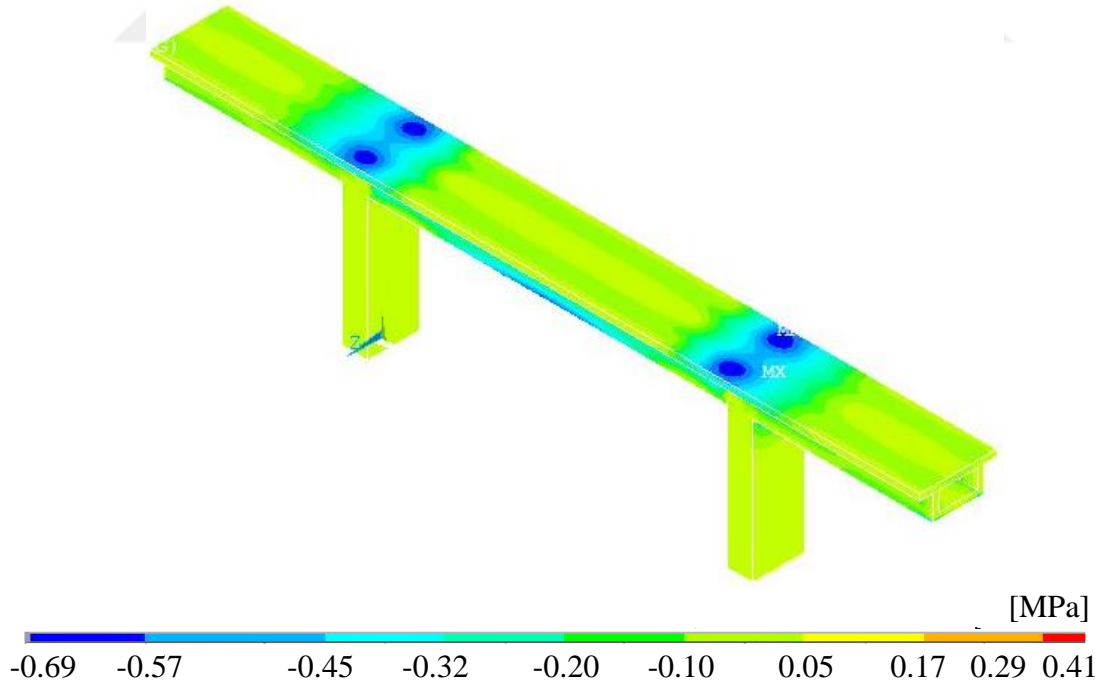
Şekil 2.26. Donatılı modelin zaman tanım alanında lineer olmayan analizi için maksimum yerdeğiştirme diyagramı



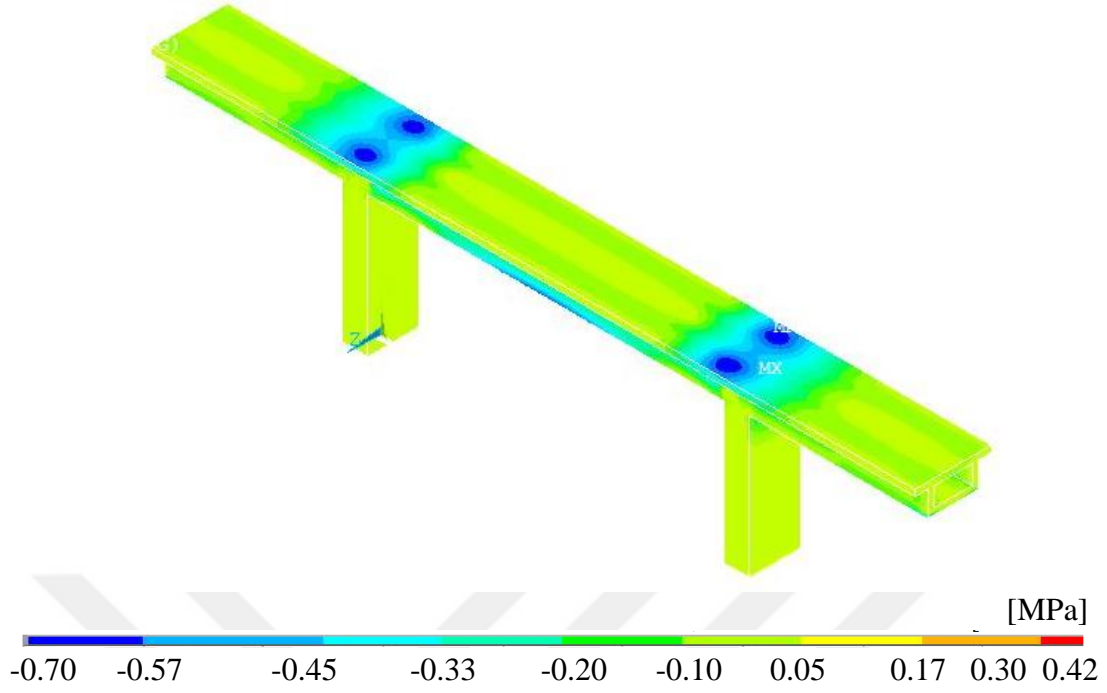
Şekil 2.27. Donatısız modelin lineer olmayan analizi için maksimum asal gerilme diyagramı



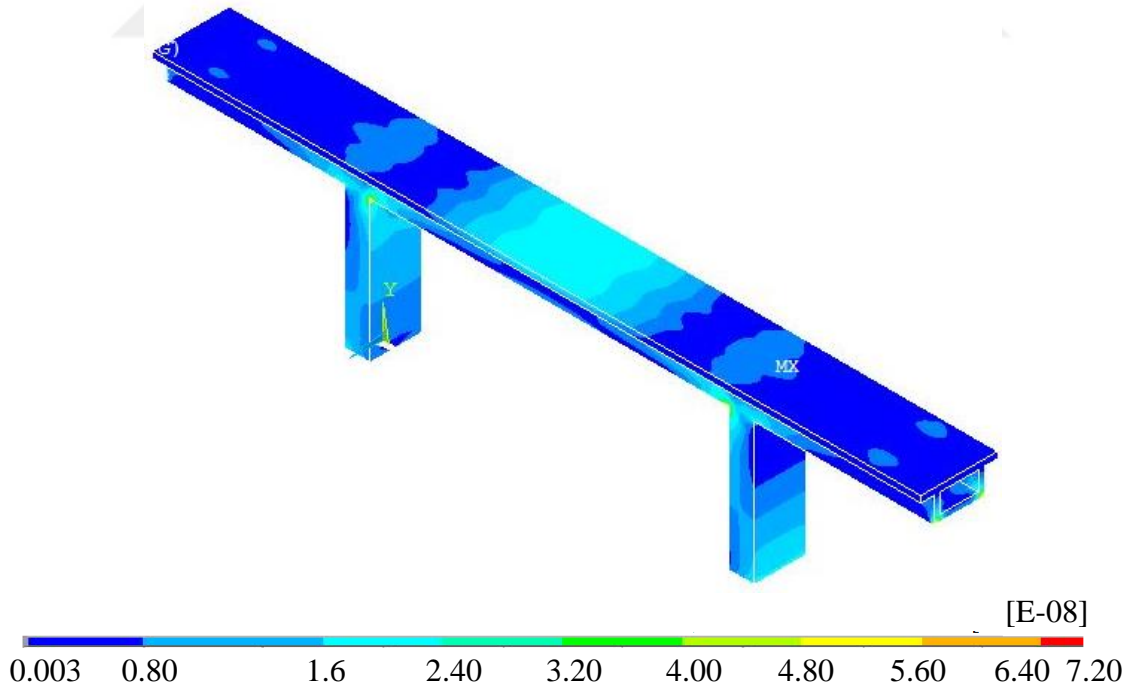
Şekil 2.28. Donatılı modelin lineer olmayan analizi için maksimum asal gerilme diyagramı



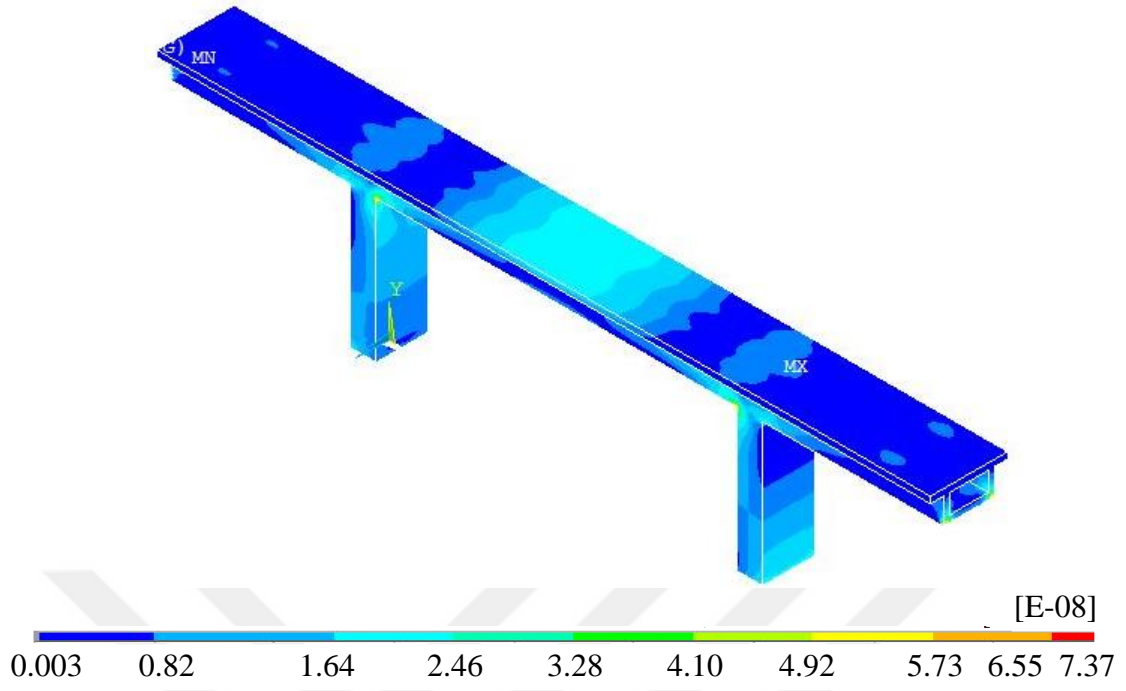
Şekil 2.29. Donatısız modelin lineer olmayan analizi için minimum asal gerilme diyagramı



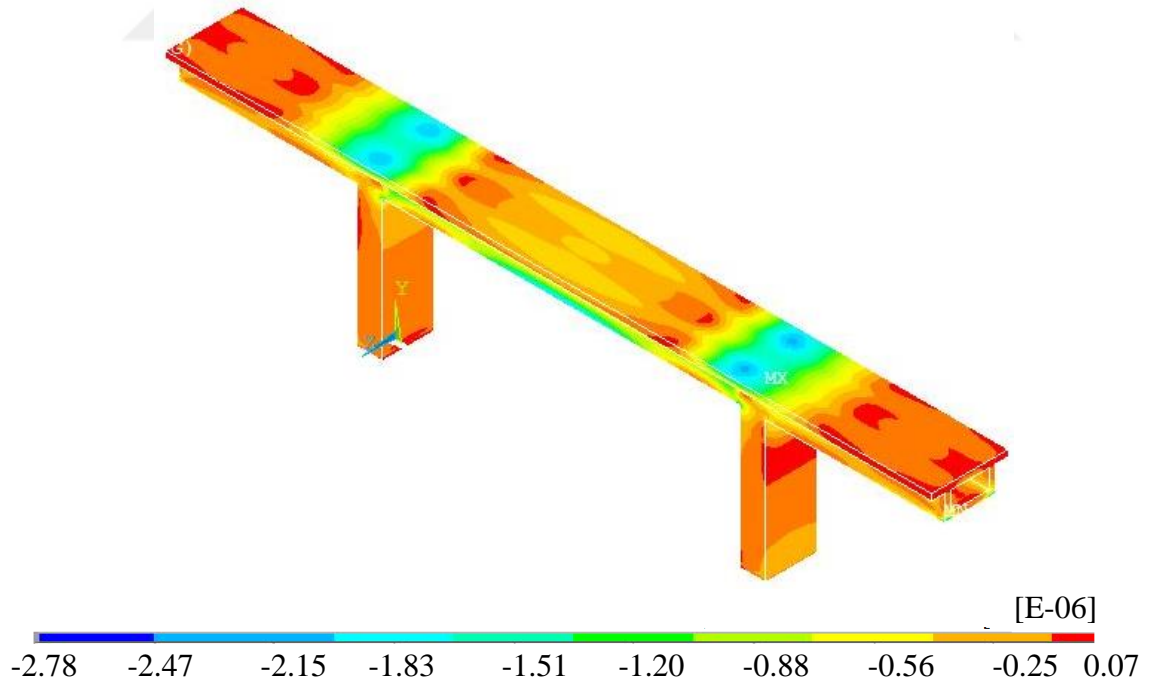
Şekil 2.30. Donatılı modelin lineer olmayan analizi için minimum asal gerilme diyagramı



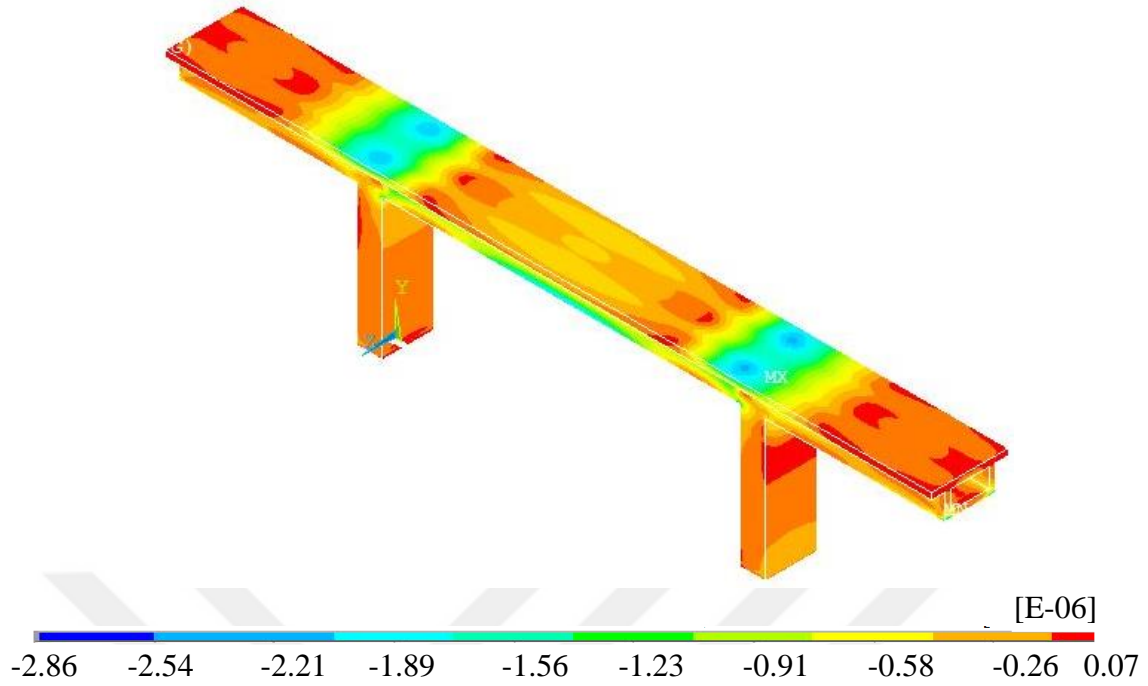
Şekil 2.31. Donatısız modelin lineer olmayan analizi için maksimum asal şekildeğiştirme diyagramı



Şekil 2.32. Donatılı modelin lineer olmayan analizi için maksimum asal şekildeğiştirme diyagramı



Şekil 2.33. Donatısız modelin lineer olmayan analizi için minimum asal şekildeğiştirme diyagramı



Şekil 2.34 Donatılı modelin lineer olmayan analizi için minimum asal şekildeğiştirme diyagramı

## 2.7. Köprünün Sayısal Modellenmesinde Donatı Etkisinin Araştırılması

Model köprü ANSYS sonlu eleman analiz programında ilk olarak beton malzemeyi temsil eden bir hacim olarak modellenmiştir. Bu model üzerinde ayrı ayrı modal, lineer ve lineer olmayan analizler gerçekleştirilmiştir.

İkinci aşamada ise köprünün donatılı hali aynı programda oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yeni modelede modal, lineer ve lineer olmayan analizler tekrarlanmıştır.

Her iki model üzerinde gerçekleştirilen lineer ve lineer olmayan analizlerde, 1992 yılı Erzincan depremine ait etkin yer ivmesi kayıtlarınının 7 sn'lik bölümü 0.005 sn zaman aralıkları ile etkilmiştir. Karşılaştırmalar deprem ivme kaydının dikkate alınan kısmının maksimum ivme değerine ulaştığı zaman olan  $t = 1.900$  sn'deki maksimum yer değiştirme, maksimum ve minimum asal gerilme ve maksimum ve minimum asal şekil değiştirme değerleri üzerinden yapılmıştır.

### 2.7.1. Donatının Modal Davranışa Etkisi

ANSYS sonlu eleman analiz programı kullanılarak donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen modal analizlerden elde edilen sonuçlar Tablo 2.4'de verilmiştir.

Tablo 2.4. Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen modal analiz sonuçları

Mod	Beton Model	Betonarme Model	Karşılaştırma %
	Frekans [Hz]	Frekans [Hz]	
1	45.305	45.967	1.46
2	46.544	47.195	1.40
3	65.810	67.051	1.89
4	84.534	85.887	1.60
5	111.45	113.31	1.67
6	149.92	153.02	2.07
7	199.74	202.82	1.54
8	216.83	218.61	0.82

Donatılı ve donatısız köprü modellerinin ilk 8 modu karşılaştırıldığında, elde edilen maksimum farkın %2 civarında olduğu görülmektedir. Yukarıda elde edilen sonuçlar neticesinde donatının modal davranış üzerinde yapısal davranışı etkileyecek düzeyde bir etkisinin olmadığı değerlendirilmiştir.

### 2.7.2. Donatının Lineer Davranışa Etkisi

ANSYS sonlu eleman analiz programı kullanılarak donatısız ve donatılı beton köprü modelleri üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden elde edilen sonuçlar Tablo 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 ve 2.9'da verilmiştir.

Tablo 2.5. Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden elde edilen maksimum yer değiştirme sonuçları

Maksimum Yer Değiştirme			
D.N.	Beton Model	Betonarme Model	Karşılaştırma %
	[mm]	[mm]	
1	0	0	0
2	0.153	0.155	1.31
3	0.306	0.309	0.98
4	0.460	0.464	0.87
5	0.613	0.618	0.82
6	0.766	0.773	0.91
7	0.919	0.927	0.87
8	1.070	1.080	0.93
9	1.230	1.240	0.81
10	1.380	1.390	0.73

Tablo 2.6 Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden elde edilen maksimum asal gerilme sonuçları

Maksimum Asal Gerilme			
D.N.	Beton Model	Betonarme Model	Karşılaştırma %
	[MPa]	[MPa]	
1	-0.0785	-0.0808	2.93
2	0.1873	0.1906	1.76
3	0.4531	0.4621	1.98
4	0.7189	0.7334	2.02
5	0.9847	1.0048	2.00
6	1.2505	1.2762	2.06
7	1.5163	1.5477	2.07
8	1.7821	1.8181	2.02
9	2.0479	2.0905	2.08
10	2.3127	2.3619	2.13



Tablo 2.7. Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden elde edilen minimum asal gerilme sonuçları

Minimum Asal Gerilme			
D.N.	Beton Model	Betonarme Model	Karşılaştırma %
	[MPa]	[MPa]	
1	-0.6902	-0.6983	1.17
2	-0.5676	-0.5743	1.18
3	-0.4451	-0.4503	1.17
4	-0.3225	-0.3263	1.18
5	-0.1999	-0.2023	1.20
6	-0.0774	-0.0783	1.16
7	0.0452	0.0457	1.11
8	0.1667	0.1697	1.80
9	0.2903	0.2936	1.14
10	0.4128	0.4176	1.16

Tablo 2.8. Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden elde edilen maksimum şekil değıştirme sonuçları

Maksimum Şekil Değıştirme			
D.N.	Beton Model	Betonarme Model	Karşılaştırma %
1	0.304 E-08	0.313 E-08	2.96
2	0.803 E-06	0.822 E-06	2.37
3	0.160 E-05	0.164 E-05	2.50
4	0.240 E-05	0.244 E-05	1.67
5	0.320 E-05	0.328 E-05	2.50
6	0.400 E-05	0.410 E-05	2.50
7	0.480 E-05	0.492 E-05	2.50
8	0.560 E-05	0.573 E-05	1.17
9	0.640 E-05	0.655 E-05	2.34
10	0.720 E-05	0.737 E-05	2.36

Tablo 2.9. Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden elde edilen minimum şekil değiştirme sonuçları

Minimum Şekil Değiştirme			
D.N.	Beton Model	Betonarme Model	Karşılaştırma %
1	-0.278 E-05	-0.286 E-05	2.88
2	-0.247 E-05	-0.254 E-05	2.83
3	-0.215 E-05	-0.221 E-05	2.79
4	-0.183 E-05	-0.189 E-05	3.28
5	-0.151 E-05	-0.156 E-05	3.31
6	-0.120 E-05	-0.123 E-05	2.50
7	-0.879 E-06	-0.908 E-06	3.30
8	-0.562 E-06	-0.582 E-06	3.56
9	-0.245 E-06	-0.256 E-06	4.49
10	0.728 E-07	0.701 E-07	3.71

Donatılı ve donatısız kpr modellerin etkin yer ivmesinin  $t = 1.900$  sn'deki analiz sonuçları karşılaştırıldığında; maksimum yer değiştirmedeki farkın % 1, maksimum asal gerilmedeki farkın % 2, minimum asal gerilmedeki farkın % 1, maksimum Şekil değiştirmedeki farkın % 2 ve minimum Şekil değiştirmedeki farkın % 4 civarında olduğu gözlemlenmektedir. Yukarıda elde edilen sonuçlar neticesinde, donatının model kprnn lineer dinamik davranışı üzerinde yapısal davranışı etkileyecek düzeyde bir etkisinin olmadığı değerlendirilmiştir.

### 2.7.3. Donatının Lineer Olmayan Davranışa Etkisi

ANSYS sonlu eleman analiz programı kullanılarak donatısız ve donatılı beton kpr modelleri üzerinde gerçekleştirilen lineer olmayan analizlerden elde edilen sonuçlar Tablo 2.10, 2.11, 2.12, 2.13 ve 2.14'de verilmiştir.

Tablo 2.10. Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen lineer olmayan analizlerden elde edilen maksimum yer değiştirme sonuçları

Maksimum Yer Değiştirme			
D.N.	Beton Model	Betonarme Model	Karşılaştırma %
	[mm]	[mm]	
1	0	0	0
2	0.153	0.155	1.31
3	0.306	0.309	0.98
4	0.460	0.464	0.87
5	0.613	0.618	0.82
6	0.766	0.773	0.91
7	0.919	0.927	0.87
8	1.070	1.080	0.93
9	1.230	1.240	0.81
10	1.380	1.390	0.73

Tablo 2.11. Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen lineer olmayan analizlerden elde edilen maksimum asal gerilme sonuçları

Maksimum Asal Gerilme			
D.N.	Beton Model	Betonarme Model	Karşılaştırma %
	[MPa]	[MPa]	
1	-0.0785	-0.0808	2.93
2	0.1873	0.1906	1.76
3	0.4531	0.4621	1.98
4	0.7189	0.7334	2.02
5	0.9847	1.0048	2.00
6	1.2505	1.2762	2.06
7	1.5163	1.5477	2.07
8	1.7821	1.8181	2.02
9	2.0479	2.0905	2.08
10	2.3127	2.3619	2.13

Tablo 2.12. Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen lineer olmayan analizlerden elde edilen minimum asal gerilme sonuçları

Minimum Asal Gerilme			
D.N.	Beton Model	Betonarme Model	Karşılaştırma %
	[MPa]	[MPa]	
1	-0.6902	-0.6983	1.17
2	-0.5676	-0.5743	1.18
3	-0.4451	-0.4503	1.17
4	-0.3225	-0.3263	1.18
5	-0.1999	-0.2023	1.20
6	-0.0774	-0.0783	1.16
7	0.0452	0.0457	1.11
8	0.1667	0.1697	1.80
9	0.2903	0.2936	1.14
10	0.4128	0.4176	1.16

Tablo 2.13. Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen lineer olmayan analizlerden elde edilen maksimum şekil değiştirme sonuçları

Maksimum Şekil Değiştirme			
D.N.	Beton Model	Betonarme Model	Karşılaştırma %
1	0.304 E-08	0.313 E-08	2.96
2	0.803 E-06	0.822 E-06	2.37
3	0.160 E-05	0.164 E-05	2.50
4	0.240 E-05	0.244 E-05	1.67
5	0.320 E-05	0.328 E-05	2.50
6	0.400 E-05	0.410 E-05	2.50
7	0.480 E-05	0.492 E-05	2.50
8	0.560 E-05	0.573 E-05	1.17
9	0.640 E-05	0.655 E-05	2.34
10	0.720 E-05	0.737 E-05	2.36

Tablo 2.14. Donatısız ve donatılı beton modeller üzerinde gerçekleştirilen lineer olmayan analizlerden elde edilen minimum şekil değiştirme sonuçları

Minimum Şekil Değiştirme			
D.N.	Beton Model	Betonarme Model	Karşılaştırma %
1	-0.278 E-05	-0.286 E-05	2.88
2	-0.247 E-05	-0.254 E-05	2.83
3	-0.215 E-05	-0.221 E-05	2.79
4	-0.183 E-05	-0.189 E-05	3.28
5	-0.151 E-05	-0.156 E-05	3.31
6	-0.120 E-05	-0.123 E-05	2.50
7	-0.879 E-06	-0.908 E-06	3.30
8	-0.562 E-06	-0.582 E-06	3.56
9	-0.245 E-06	-0.256 E-06	4.49
10	0.728 E-07	0.701 E-07	3.71

Donatılı ve donatısız köprü modellerin etkin yer ivmesinin  $t = 1.900$  sn'deki analiz sonuçları karşılaştırıldığında; elde edilen sonuçların lineer analiz sonuçları ile aynı olduğu görülmüştür.

Bu durumun sebebi, çalışmada kullanılan köprü modelinin geometrik kesit değerlerinin normal bir köprüye oranla çok küçük olması nedeniyle yer değiştirme ve şekil değiştirme değerlerinin çok küçük miktarlarda meydana gelmesi olarak belirtilebilir. Bu ise modeli oluşturan malzemenin gerçek davranışını göstermesi için gereken kesit tesirlerine ulaşamaması anlamına gelir.

Bu noktada donatının lineer olmayan davranışa etkisinin daha iyi araştırılabilmesi için daha önce 1/1 ölçekte modellenen donatılı ve donatısız köprü sonlu eleman modelleri, iki kat büyütülmüş, 1992 Erzincan depreminin 7'sn lik etkin yer ivmesi ile analizler tekrarlanmıştır. Buradaki amaç model köprünün boyutlarını büyüterek daha fazla yer değiştirme ve şekil değiştirme elde edilmesi ve böylece kullanılan malzemenin elastik bölgeyi aşarak gerçek davranışını sergilemesini sağlamaktır.

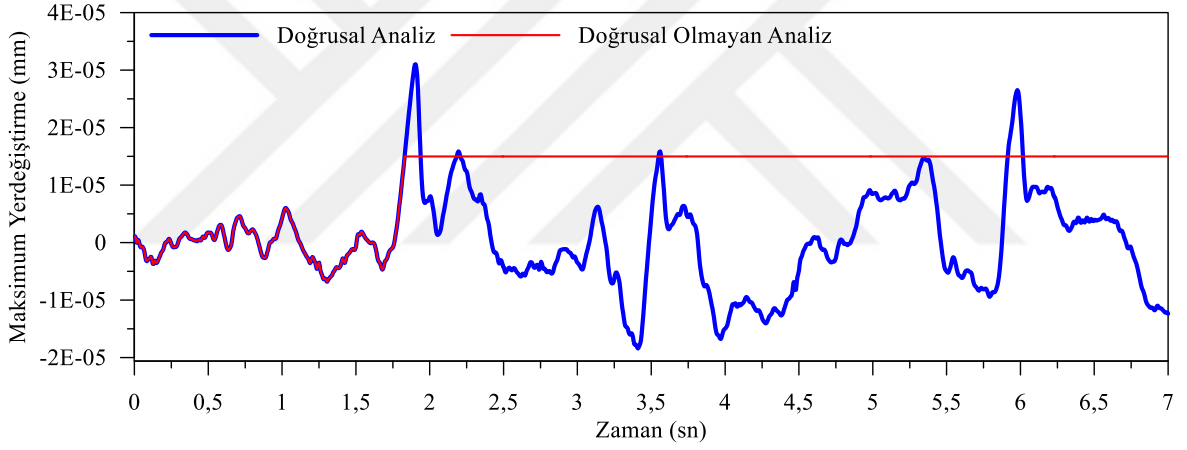
Yukarıda belirtilen amaçla model köprü 1/1 ölçekteki lineer ve lineer olmayan analizlerde kullanılan malzeme özellikleri ve sınır şartları aynı tutularak 2/1 oranında tekrar modellenmiştir. Modeller üzerine 1992 Erzincan depremi etkin yer ivmesinin 7 sn'lik kaydı 0.005 sn zaman aralıklarıyla uygulanarak zaman tanım alanında lineer ve

lineer olmayan analizler tekrarlanmıştır. Dinamik analizler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.

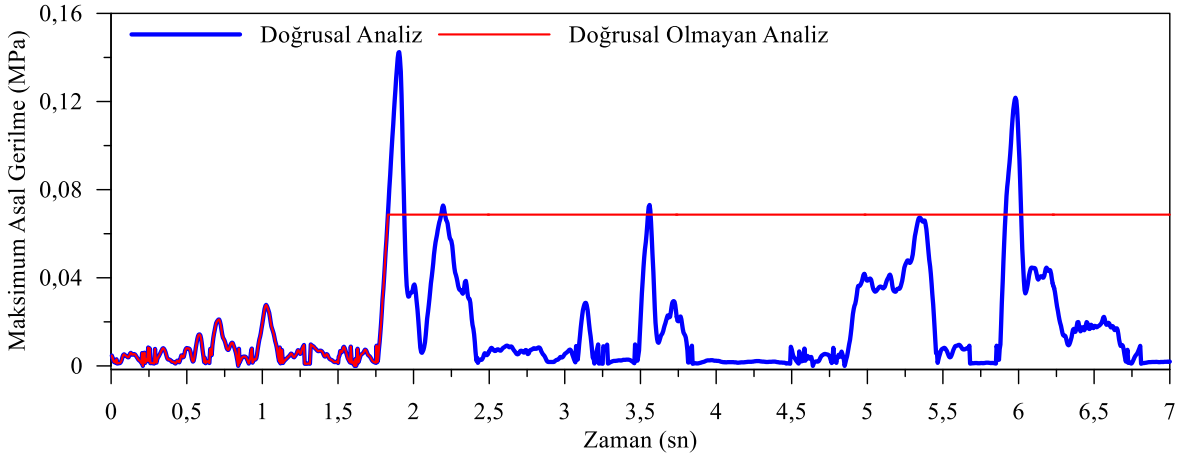
## 2.8. İki Kat Büyütülmüş Modele Ait Bulgular

### 2.8.1. Donatısız Beton Modele Ait Bulgular

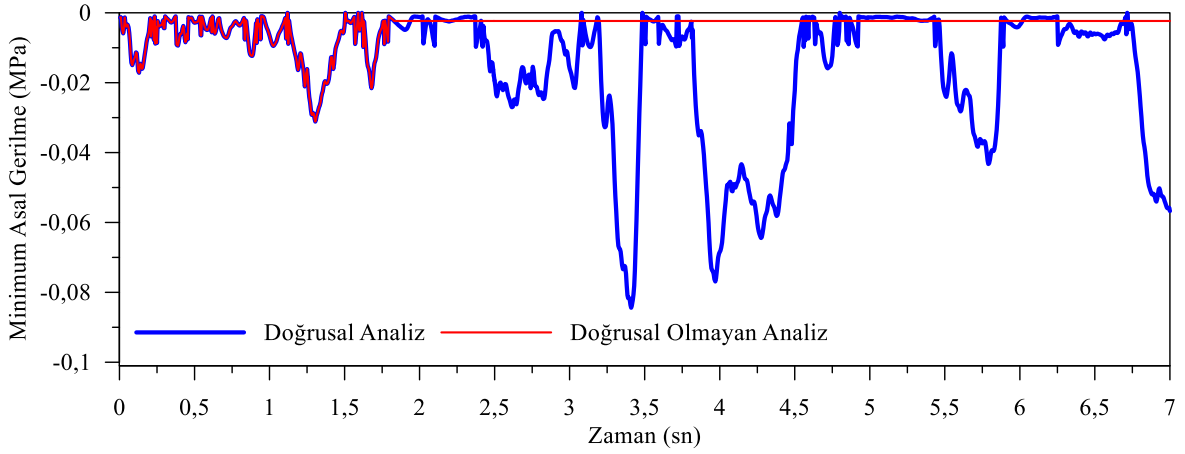
Donatısız beton model üzerine 1992 Erzincan depremi etkin yer ivmesinin 7 sn'lik kaydı 0.005 sn zaman aralıklarıyla uygulanarak zaman tanım alanında tekrarlanan lineer ve lineer olmayan analizler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda Şekil 2.35, 2.36, 2.37, 2.38 ve 2.39'da karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



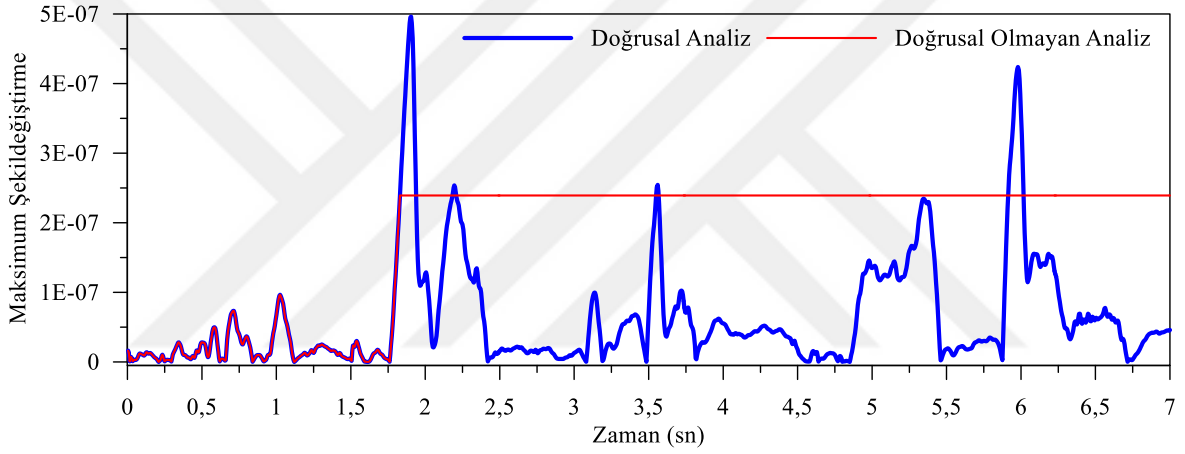
Şekil 2.35. Donatısız beton modele ait maksimum yerdeğiştirme grafiği



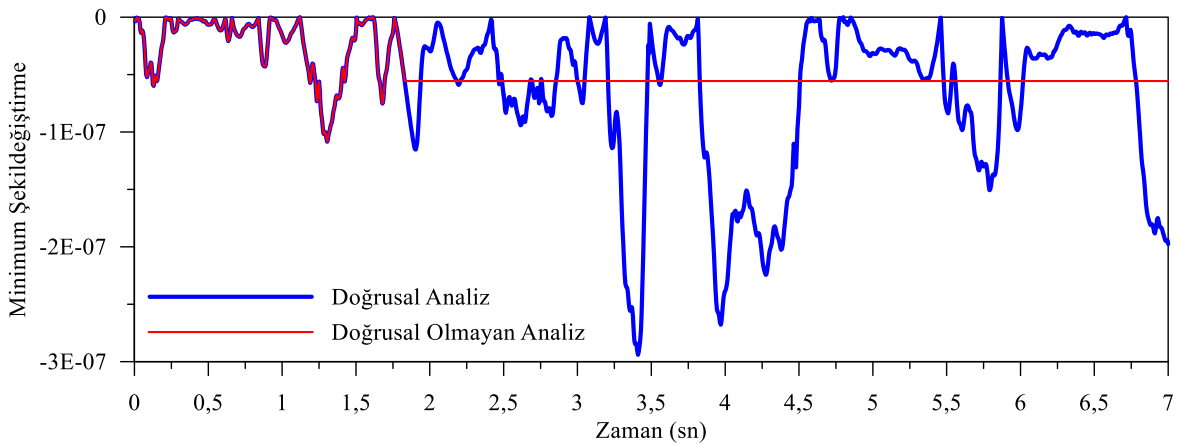
Şekil 2.36. Donatısız beton modele ait maksimum asal gerilme grafiği



Şekil 2.37. Donatısız beton modele ait minimum asal gerilme grafiği



Şekil 2.38. Donatısız beton modele ait maksimum şekildeğiştirme grafiği



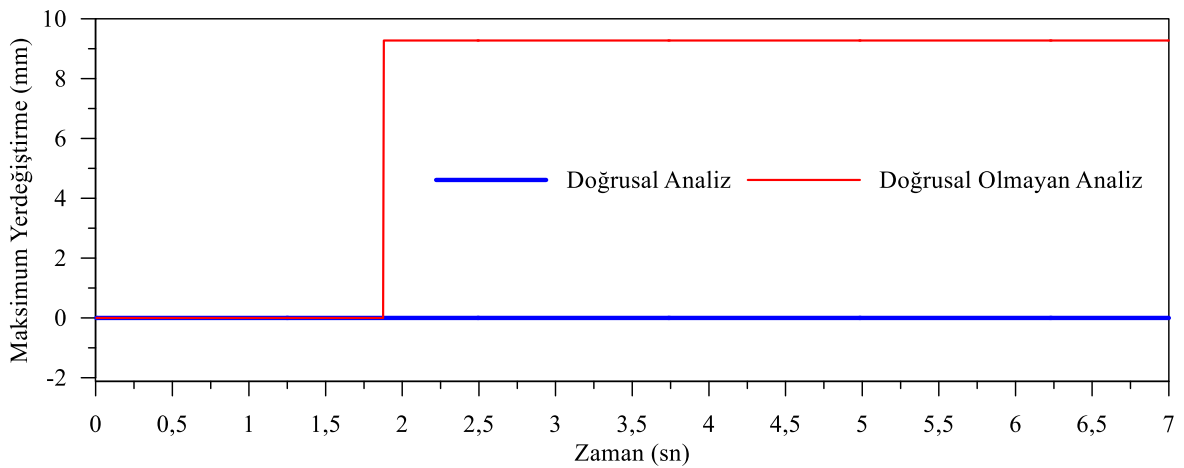
Şekil 2.39. Donatısız beton modele ait minimum şekildeğiştirme grafiği

Yukarıda gösterilen sonuçlar incelendiğinde donatısız beton modelin  $t=1.830$  sn'ye kadar lineer ve lineer olmayan analiz sonuçlarının aynı olduğu, bu zaman adımıdan sonra lineer olmayan analiz sonuçları sabit kalırken, lineer analiz sonuçlarının artarak devam ettiği gözlenmiştir.

Bu durum girilen kesit geometrisi değerleri, malzeme özellikleri, sınır şartları ve programın analizde kullandığı iterasyon algoritmaları için programa tanımlanan yakınsama kriterleri dikkate alındığında, mevcut depremin  $t= 1.830$ . saniyesinde donatısız beton modelin çekme bölgesinde meydana gelen çatlak genişliğinin öngörülen sınırı aşması ve kapasitesine erişerek plastikleşen kesitlerin olduğu şeklinde yorumlanmıştır. Yani bu zaman adımı köprü modeline etkiyen deprem kuvveti beton malzemenin mukavemet özelliğini yitirmesine sebep olmaktadır.

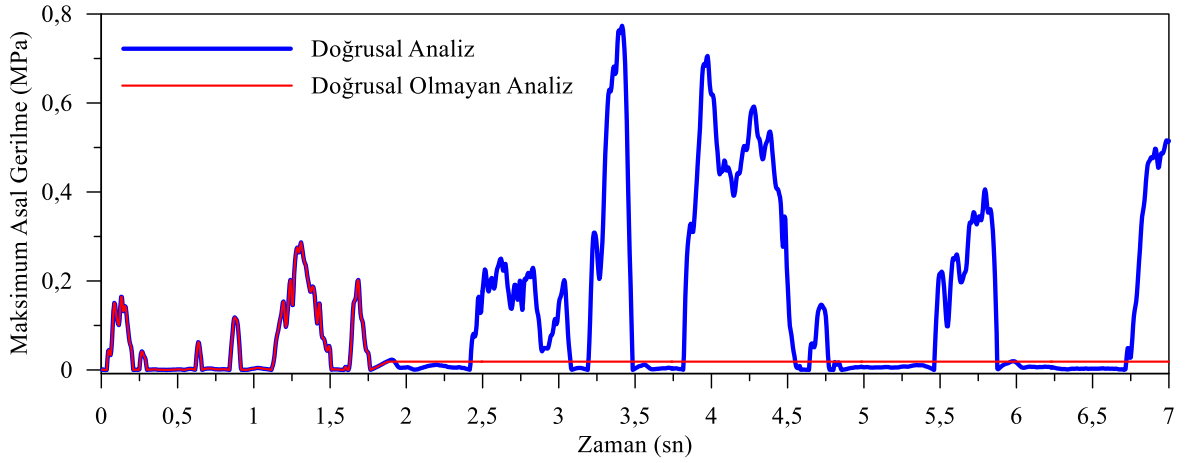
### 2.8.2. Donatılı Beton Modele Ait Bulgular

Donatılı beton model üzerine 1992 Erzincan depremi etkin yer ivmesinin 7 sn'lik kaydı 0.005 sn zaman aralıklarıyla uygulanarak zaman tanım alanında tekrarlanan lineer ve lineer olmayan analizler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda Şekil 2.40, 2.41, 2.42, 2.43 ve 2.44'te karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.

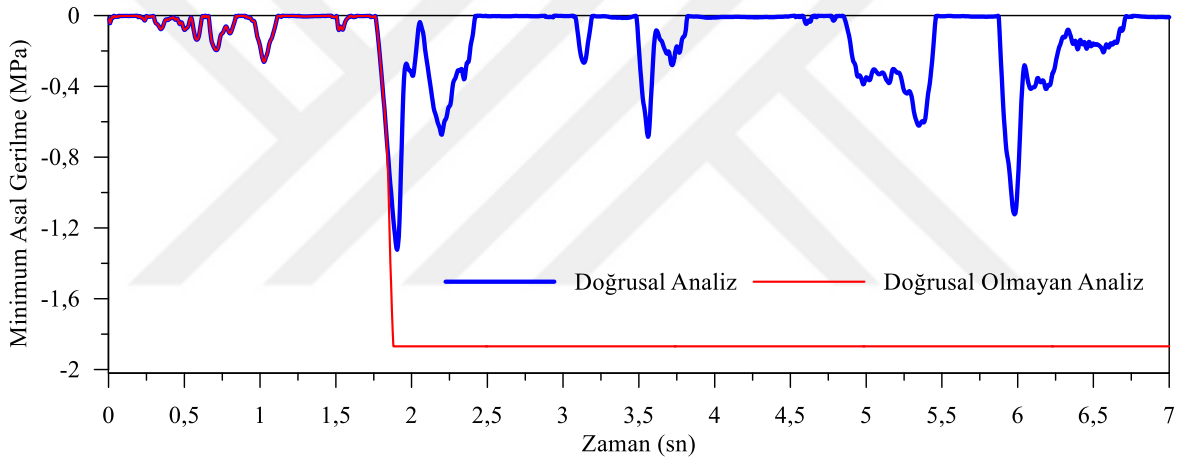


Şekil 2.40. Donatılı beton modele ait maksimum yerdeğiştirme grafiği

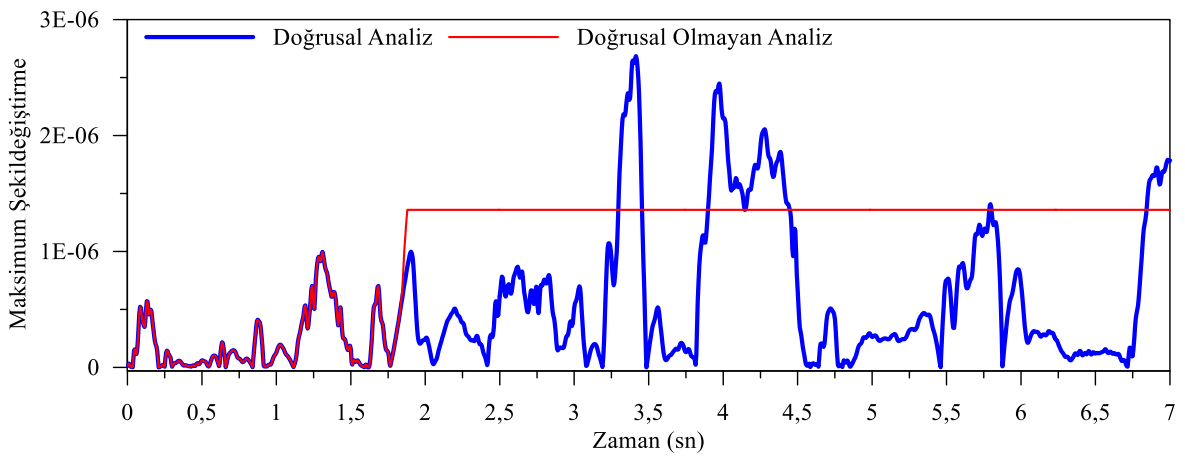




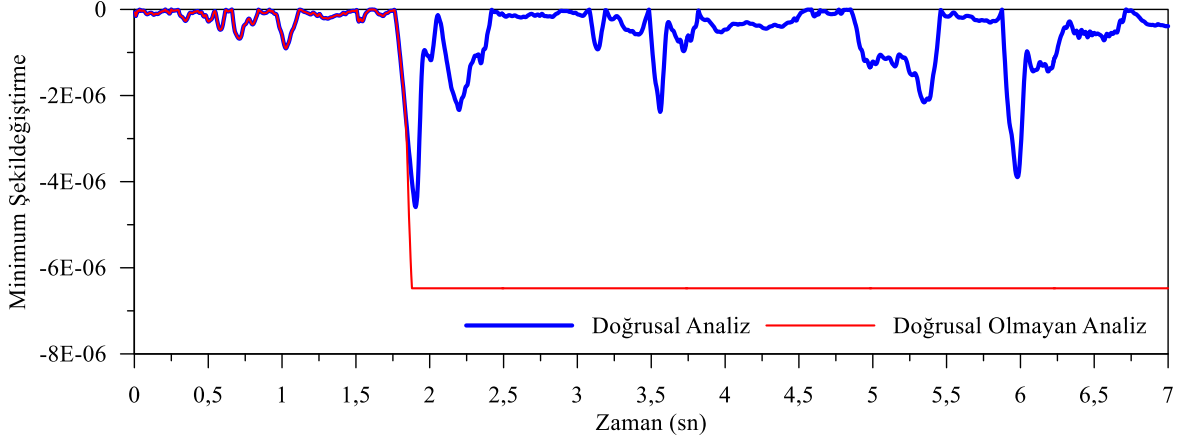
Şekil 2.41. Donatılı beton modele ait maksimum asal gerilme grafiği



Şekil 2.42. Donatılı beton modele ait minimum asal gerilme grafiği



Şekil 2.43. Donatılı beton modele ait maksimum şekildeğiştirme grafiği



Şekil 2.44. Donatılı Beton Modele Ait Minimum Şekildeğiştirme Grafiği

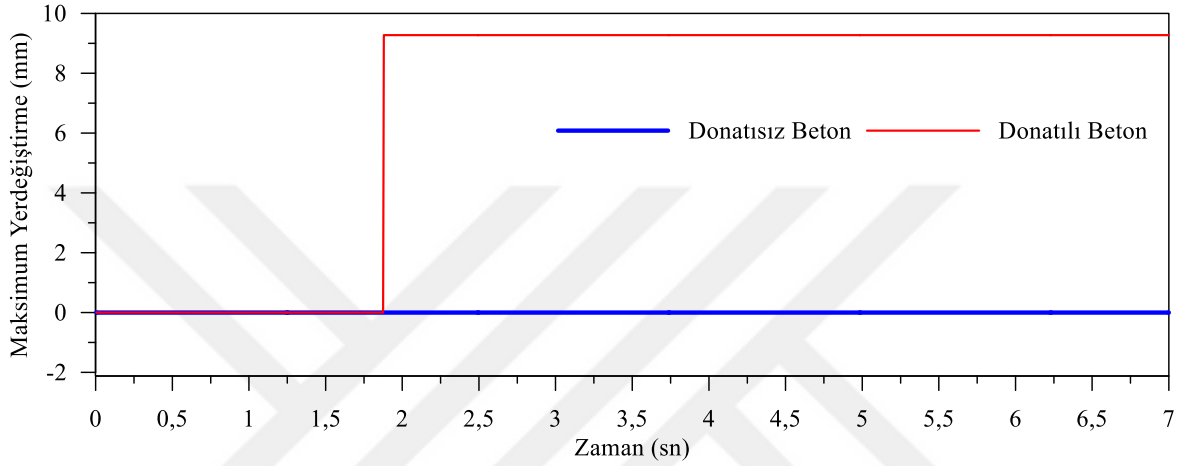
Yukarıda gösterilen donatılı beton modele ait analiz sonuçları incelendiğinde  $t=1.830$  ve  $t=1.880$ . saniyeler olmak üzere iki farklı zaman adımında sonuçlarda değişimler olduğu gözlenmiştir. Donatılı beton modele ait lineer ve lineer olmayan analiz sonuçlarının  $t=1.830$  sn'ye kadar aynı olduğu, bu zaman adımından sonra, lineer analiz sonuçları grafikleri değişmeye devam ederken, lineer olmayan analiz sonuçlarının sabit bir eğimde arttığı görülmektedir. Bu artış  $t=1.880$ . saniyeye kadar devam edip bu zaman adımından sonra grafik sabit kalırken, lineer analiz sonuçlarının değişmeye devam ettiği gözlenmiştir.

Donatısız beton modele ait inceleme sonuçlarında göz önünde bulundurulursa, modelin çekme bölgesindeki beton malzeme ile temsil edilen kesitin zaten  $t=1.830$ . saniyesinde mukavemetini yitirdiği ve plastikleştiği tesbiti daha önce yapılmıştı. Betonarme bir yapı dikkate alındığında eğilme momenti etkisi altında bir sonraki olması beklenen adım donatının akmasıdır. Buna göre  $t=1.880$ . saniyede gerçekleşen olay çekme bölgesindeki donatının akması olarak değerlendirilmiştir.

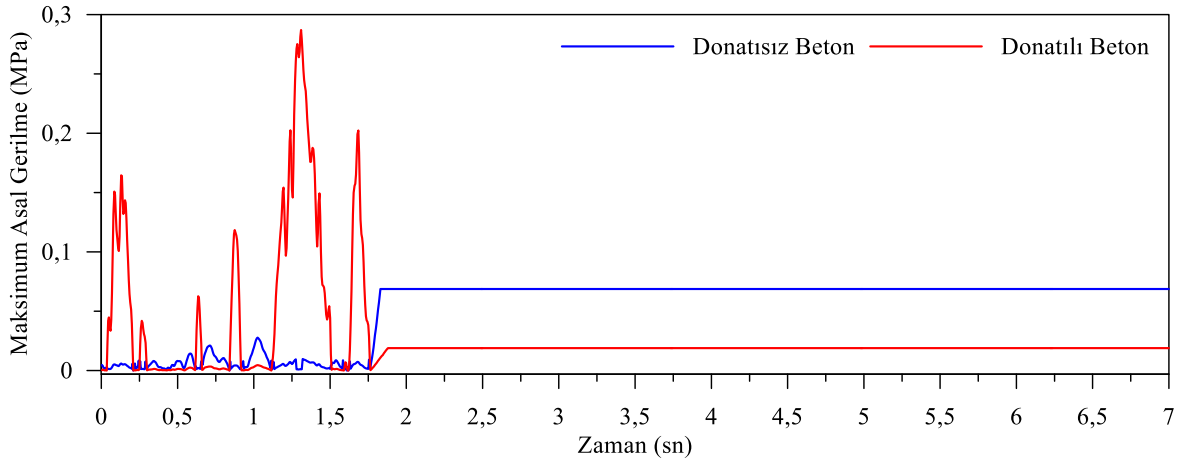
Bu yüzden lineer ve lineer olmayan sonuçlar  $t=1.830$ . saniyeye kadar aynı çıkmış, lineer olmayan analiz sonuçlarında ise bu noktada beton mukavemetini yitirmiş fakat donatı yapının bir miktar daha gerilme taşımaya olanak sağlamıştır.

### 2.8.3. İki Kat Büyütülmüş Modelde Donatının Linear Olmayan Analize Etkisine Ait Bulgular

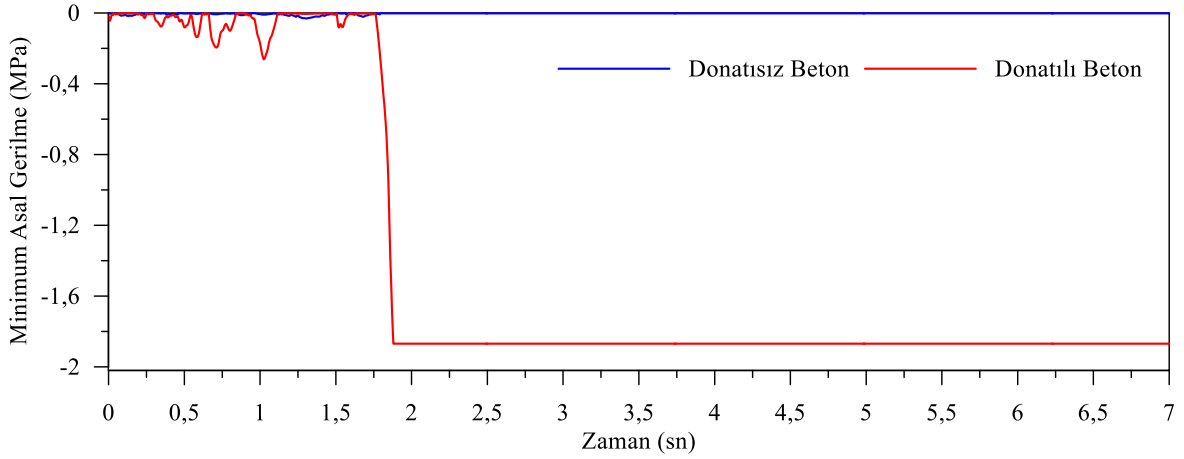
Donatısız ve donatılı beton modeller üzerine, 1992 Erzincan depremi etkin yer ivmesinin 7 sn'lik kaydı 0.005 sn zaman aralıklarıyla uygulanarak zaman tanım alanında tekrarlanan lineer ve lineer olmayan analizler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda Şekil 2.45, 2.46, 2.47, 2.48 ve 2.49'da karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



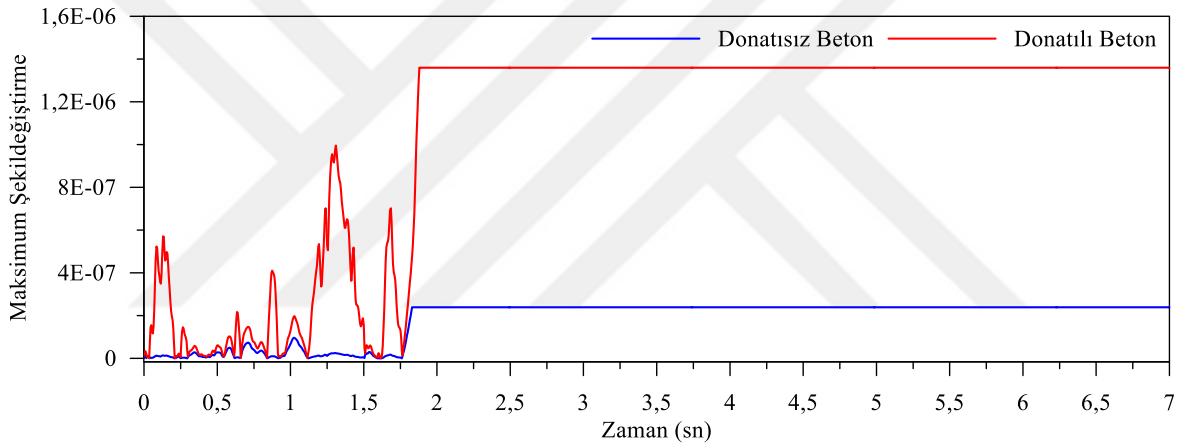
Şekil 2.45. Donatılı-donatısız beton modellere ait maksimum yer değıştirme karşılaştırma grafiği (lineer olmayan analiz sonuçlarına göre).



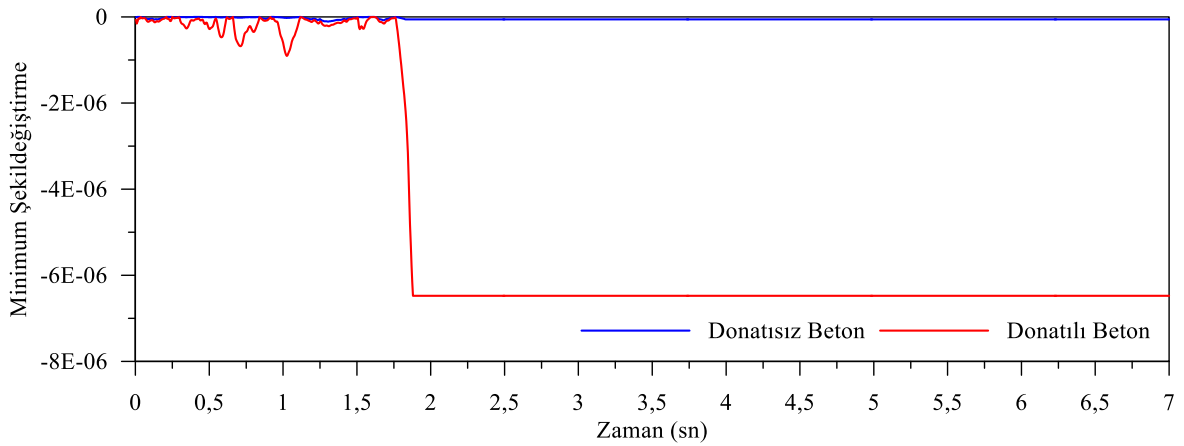
Şekil 2.46. Donatılı-donatısız beton modellere ait maksimum asal gerilme karşılaştırma grafiği (lineer olmayan analiz sonuçlarına göre).



Şekil 2.47. Donatılı-donatsız beton modellere ait minimum asal gerilme karşılaştırma grafiği (lineer olmayan analiz sonuçlarına göre).



Şekil 2.48. Donatılı-donatsız beton modellere ait maksimum şekil değıştirme karşılaştırma grafiği (lineer olmayan analiz sonuçlarına göre).



Şekil 2.49. Donatılı-donatsız beton modellere ait minimum şekil değıştirme karşılaştırma grafiği (lineer olmayan analiz sonuçlarına göre).

Donatılı ve Donatısız köprü modellerin etkin yer ivmesinin  $t = 1.900$  saniyeye kadar lineer olmayan analiz verilerinin karşılaştırması yapılırken donatısız ve donatılı modellere ait incelemelerde dikkate alınarak yorumlanmıştır. Buna göre;

Şekil değiştirmeye dayalı değerlendirmelerde, hesap sonuçlarının “yapılan kabuller” doğrultusunda geçerli olduğu görülmektedir. Örneğin analiz başlangıcında programa girilen elastik ötesi parametrelerin hassasiyeti biraz daha arttırılsa veya azaltılsa çözümün tekrarlanması gerekmektedir. Ayrıca lineer olmayan çözümde, akma ve akma ötesi davranış, rijitlikteki değişiklik, çevrimsel davranışın tarifi için ek kabullere ihtiyaç vardır (Celep, 2009). Bu durumda ek belirsilikler anlamına gelmektedir.

Yukarıda elde edilen bilgiler ışığında birçok parametre ve kabulün yapıldığı lineer olmayan davranışa donatının tek başına etkisini net bir şekilde söylemenin çok doğru sonuçlar ortaya koymayacağı değerlendirilmiştir.

Bununla beraber yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar neticesinde; lineer olmayan analizler kullanılacak sayısal modellemelerde donatının analiz sonuçlarını etkilediği ve bu nedenle lineer olmayan analiz kullanılacak betonarme köprülerin sonlu eleman modellerini oluştururken, sadece beton malzemeden değil donatılı olarak modellemenin daha doğru sonuç vereceği değerlendirilmiştir.

### 3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, betonarme köprülerde donatının modal, lineer ve lineer olmayan davranış üzerine etkisi sayısal yöntemlerle araştırılmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmalar ve bulgular kısmında, incelenen betonarme köprünün sonlu eleman modeli ANSYS programında önce donatısız beton, daha sonrada donatılı beton model şeklinde oluşturulmuş, modal analizler sonucunda dinamik karakteristikler sayısal olarak belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen bu dinamik karakteristik değerler dikkate alınarak, modeller üzerine ayrı ayrı lineer ve lineer olmayan malzeme özellikleri kullanılarak zaman tanım alanında dinamik analizler uygulanmıştır. Zaman tanım alanında dinamik analizler için Erzincan 1992 depremine ait deprem ivme kaydının 7 sn'lik bölümü 0.005 sn zaman aralıklarında modeller üzerine uygulanmıştır. Lineer ve lineer olmayan analizler sonucunda ortaya çıkan sonuçlar karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca 1/1 ölçekte oluşturulan model için lineer olmayan analizlere ait veriler incelenerek daha yakın bir bakış sağlanması amacıyla sonlu eleman modeli 2/1 ölçekte yeniden oluşturularak analizler tekrarlanmıştır. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

- ✓ İncelenen köprüye ait sayısal modellerin modal analizinden elde edilen ilk sekiz doğal frekans donatısız beton için 45.305- 216,83 Hz iken donatılı beton model için 45.967- 218.61 Hz arasında elde edilmiştir.
- ✓ Donatısız ve donatılı modellere ait doğal frekanslar birbirine çok yakın değerler olarak elde edilmiştir.
- ✓ İncelenen köprüye ait donatısız ve donatılı modellerin sonlu eleman analizlerinden elde edilen mod şekilleri birbiriyle uyum içerisindedir. Mod şekilleri uzama, düşey ve enine modlar şeklinde elde edilmiştir.
- ✓ Bu durum sonlu eleman modelleri üzerinden gerçekleştirilen modal analizlerin doğru bir şekilde uygulandığını göstermektedir.
- ✓ İncelenen köprüye ait donatısız ve donatılı modellerin sonlu eleman analizlerinden elde edilen doğal frekanslar incelendiğinde, frekanslar arasında maksimum %2 civarında bir farklılığın bulunduğu görülmüştür.

- ✓ Bu şekilde donatının modal davranışa bir etkisinin bulunmadığı ve oluşturulan sonlu eleman modellerinin köprü modellerinin mevcut durumunu yansıttığı sonucu elde edilmiştir.
- ✓ Donatının lineer davranışa etkisini araştırmak amacı ile köprüyü meydana getiren beton ve betonarme çeliği malzemelerinin, malzeme özellikleri, sadece elastisite modülü ve birim hacim ağırlığı değerleri programa tanımlanarak (malzemenin lineer elastik davrandığı kabulüne göre) ANSYS programı tarafından oluşturulmuştur. Daha sonra incelenen köprüye ait donatısız ve donatılı modeller üzerinde zaman tanım alanında 0.005 sn adım aralığında lineer analizler gerçekleştirilmiştir. Bu lineer analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.
- ✓ İncelenen köprüye ait donatısız ve donatılı modelleri üzerinde zaman tanım alanında gerçekleştirilen lineer analizlerden, yer değiştirmelerin köprü açıklık ortasına doğru arttığı görülmüştür. Maksimum düşey yer değiştirme değeri donatısız model için 1.38 mm, donatılı model için 1.39 mm olarak elde edilmiştir.
- ✓ Donatısız ve donatılı modellere ait lineer analizlerden elde edilen yer değiştirme değerleri incelendiğinde, yer değiştirmeler arasında %1 civarında bir farkın bulunduğu ayrıca yer değiştirme diyagramlarının uyum içinde olduğu görülmüştür.
- ✓ İncelenen köprüye ait donatısız ve donatılı modelleri üzerinde zaman tanım alanında gerçekleştirilen lineer analizlerden, maksimum asal gerilme değerinin köprü tabliyesinin ayaklarla birleştiği noktaların üst kısımlarına doğru arttığı görülmüştür. Maksimum asal gerilme değeri donatısız model için 2.314 MP, donatılı model için 2.32 MPa olarak elde edilmiştir.
- ✓ Donatısız ve donatılı modellere ait lineer analizlerden elde edilen maksimum asal gerilme değerleri incelendiğinde, maksimum asal gerilmeler arasında %2 civarında bir farkın bulunduğu ayrıca maksimum asal gerilme diyagramlarının uyum içinde olduğu görülmüştür.
- ✓ İncelenen köprüye ait donatısız ve donatılı modelleri üzerinde zaman tanım alanında gerçekleştirilen lineer analizlerden, minimum asal gerilme değerinin köprü ayaklarına ve tabliye uç bölgelerine doğru arttığı görülmüştür. Minimum

asal gerilme değeri donatısız model için -0.6902 MPa, donatılı model için -0.6983 MPa olarak elde edilmiştir.

- ✓ Donatısız ve donatılı modellere ait lineer analizlerden elde edilen minimum asal gerilme değeri incelendiğinde, minimum asal gerilmeler arasında %1 civarında bir farkın bulunduğu ayrıca minimum asal gerilme diyagramlarının uyum içinde olduğu görülmüştür.
- ✓ İncelenen köprüye ait donatısız ve donatılı modelleri üzerinde zaman tanım alanında gerçekleştirilen lineer analizlerden, maksimum şekil değiştirme değerinin köprü açıklık ortasına doğru arttığı görülmüştür. Maksimum şekil değiştirme değeri donatısız model için 0.720 E-5, donatılı model için 0.737 E-5 olarak elde edilmiştir.
- ✓ Donatısız ve donatılı modellere ait lineer analizlerden elde edilen maksimum şekil değiştirme değeri incelendiğinde, maksimum şekil değiştirmeler arasında %2 civarında bir farkın bulunduğu ayrıca maksimum şekil değiştirme diyagramlarının uyum içinde olduğu görülmüştür.
- ✓ İncelenen köprüye ait donatısız ve donatılı modelleri üzerinde zaman tanım alanında gerçekleştirilen lineer analizlerden, minimum şekil değiştirme değerinin köprü ayaklarına ve tabliye uç bölgelerine doğru arttığı görülmüştür. Minimum şekil değiştirme değeri donatısız model için -0.278 E-5, donatılı model için -0.286 E-5 olarak elde edilmiştir.
- ✓ Donatısız ve donatılı modellere ait lineer analizlerden elde edilen minimum şekil değiştirme değeri incelendiğinde, minimum şekil değiştirmeler arasında %4 civarında bir farkın bulunduğu ayrıca minimum şekil değiştirme diyagramlarının uyum içinde olduğu görülmüştür.
- ✓ Bu durumda donatının sayısal lineer davranış üzerinde bir etkisinin olmadığı değerlendirilmiştir.

Donatının lineer olmayan davranışa etkisini araştırmak amacı ile köprüyü meydana getiren beton ve betonarme çeliği malzemelerinin, malzeme özelliklerinin ANSYS programı tarafından oluşturulmasına izin verilmeden, hem beton hem de çeliğin malzeme özellikleri programa tek tek tanımlanmıştır. Daha sonra köprüye ait donatısız ve donatılı modeller üzerinde zaman tanım alanında 0.005 sn adım aralığında lineer olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.



- ✓ Donatılı ve donatısız köprü modellerin Erzincan 1992 depremi etkin yer ivmesinin dikkate alınan 7.0 sn'lik bölümünün maksimum ivme değerine ulaştığı  $t=1.900$  sn'deki analiz sonuçları karşılaştırıldığında, elde edilen sonuçların lineer analiz sonuçları ile aynı olduğu görülmüştür.
- ✓ Bu noktada donatının lineer olmayan davranışa etkisinin daha iyi araştırılabilmesi için daha önce 1/1 ölçekte modellenen donatılı ve donatısız sonlu eleman modelleri, malzeme özellikleri ve sınır şartları sabit tutulup 2/1 ölçekte yani iki kat büyütülerek zaman tanım alanında dinamik analizler tekrarlanmıştır.
- ✓ Donatısız beton sonlu eleman modelin iki kat büyütülmesi ile tekrarlanan dinamik analiz sonuçları incelendiğinde, donatısız beton modelin  $t=1.830$  saniyeye kadar lineer ve lineer olmayan analiz sonuçlarının aynı olduğu, bu zaman adımıdan sonra lineer olmayan analiz sonuçları sabit kalırken, lineer analiz sonuçlarının artarak devam ettiği gözlenmiştir.
- ✓ Bu durum; girilen kesit geometrisi değerleri, malzeme özellikleri, sınır şartları ve elastik ötesi parametrelerin dikkate alındığında, mevcut depremin  $t=1.830$  saniyesinde donatısız beton modeli oluşturan hacimin çekme bölgesinde meydana getirdiği çatlak genişliğinin öngörülen sınırı aşması ve kapasitesine erişerek plastikleşen kesitlerin oluştuğu şeklinde yorumlanmıştır.
- ✓ Donatılı beton sonlu eleman modelin iki kat büyütülmesi ile tekrarlanan dinamik analiz sonuçları incelendiğinde  $t=1.830$  ve  $t=1.880$  saniyeler olmak üzere iki farklı zaman adımıda sonuçlarda değişimler olduğu gözlenmiştir.
- ✓ Donatılı beton modele ait lineer ve lineer olmayan analiz sonuçlarının  $t=1.830$  saniyeye kadar aynı olduğu, bu zaman adımıdan sonra; lineer analiz sonuçları grafiği sabit eğime sahip bir şekilde artarken, lineer olmayan analiz sonuçlarının farklı bir eğimde arttığı görülmektedir. Bu artış  $t=1.880$  saniyeye kadar devam edip bu zaman adımıdan sonra artık sabit kalırken, lineer analiz sonuçlarının aynı eğim ile artarak devam ettiği gözlenmiştir.
- ✓ Donatılı beton modelin lineer olmayan analizinde  $t=1.880$  saniyede gerçekleşen olay çekme bölgesindeki donatının akması olarak değerlendirilmiştir.
- ✓ Bu verilere göre, lineer olmayan analizler gibi şekil değiştirmeye dayalı değerlendirmelerde, kesin olmayan yaklaşım ve kabuller içeren birçok

parametrenin bir arada kullanıldığı ve bu nedenle hesap sonuçlarının yapılan kabuller doğrultusunda geçerli olduğu değerlendirilmiştir.

- ✓ Buna göre donatının tek başına lineer olmayan davranış üzerine etkisini kesin hassasiyette elde etmenin geçerli bir yaklaşım olmayacağı değerlendirilmiştir.
- ✓ Bununla beraber yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar neticesinde; lineer olmayan analizler kullanılacak sayısal modellemelerde donatının analiz sonuçlarını etkilediği ve bu nedenle lineer olmayan analiz kullanılacak betonarme yapıların sonlu eleman modellerini oluştururken, sadece beton malzemeden değil donatılı olarak modellemenin daha doğru sonuç vereceği değerlendirilmiştir.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar incelendiğinde, betonarme köprülerin modal ve lineer yapısal davranışına donatının herhangi bir etkisi bulunmadığı değerlendirilmiştir. Bu durum gerçek betonarme bir yapının dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde çok büyük kolaylık sağlamaktadır.

Bununla beraber betonarme köprülerin lineer olmayan sayısal analizlerinde donatının etkisi olduğu, bu yüzden betonarme bir yapıda lineer olmayan analiz kullanılacaksa, model oluştururken donatı ile birlikte model oluşturmanın daha doğru sonuç vereceği değerlendirilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Altunışık, A.C., 2010. Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Sayısal ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Altunışık, A.C., Bayraktar, A., Sevim, B. ve Birinci, F., 2011. Vibration-Based Operational Modal Analysis of the Mikron Historic Arch Bridge After Restoration, Civil Engineering and Environmental Systems, 28, 3, 247-259.
- ANSYS, 2015. Swanson Analysis System, Pennsylvania, USA.
- Bagchi, A., 2005. Updating the Mathematical Model of a Structure using Vibration Data, Journal of Vibration and Control, 11, 12, 1469-1486.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., 2007a. Modal Testing and Finite Element Model Calibration of an Arch Type Steel Footbridge, Steel and Composite Structures, 7, 6, 487-502.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Türker, T. ve Sevim, B., 2007b. Tarihi Yığma Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-1, Eylül, Ankara, Bildiriler Kitabı, 429-440.
- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C., Sevim, B., Şahin, A., Özcan, D.M., 2010, Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, İMO Teknik Dergi, 5185-5205.
- Boduroğlu, M.K., 2007. Karayolu Köprülerinin Zaman Tanım Alanında Lineer Olmayan Analiz Yöntemi İle Deprem Performansının Belirlenmesi Üzerine Sayısal Bir İnceleme, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Celep, Z., 2007. Betonarme Sistemlerde Lineer Olmayan Davranış, Plastik Mafsallı Kabulü ve Çözümleme, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul.
- Celep, Z., 2009. Yapıların Deprem Etkisinde Şekil Değiştirmeye Dayalı Değerlendirilmesi, İMO İstanbul Şubesi Meslek İçi Eğitim Semineri, İstanbul, 7-28.
- Çavdar, Ö., 2005, K ve Dirsek Tipi Eğik Elemanların Rijitleştirilmiş Deprem Etkisindeki Yapıların Lineer Davranışlarının Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Çolakoğlu, A. ve Köksal, Ö., 2000. Savunma Sistemlerinde Sonlu eleman Yöntemi İle Doğal Frekans Analizi, Aselsan Dergileri, 55-85.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N., 1998. Betonarme Yapılar, Beta Dağıtım, İstanbul.

- Chopra, A.K., 2015. Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering, Fourth Edition, Prentice Hall, USA.
- Darılmaz, K., 2015, Depreme Dayanıklı Betonarme Binaların Tasarımına Giriş, “Yapı Yazılımı Yayınları”, İstanbul.
- DBYBHY, 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- Demir, S., 2013, Mevcut Betonarme Yapılarda Kısa Kolon Davranışlarının İncelenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Trabzon.
- El-Borgi, S., Smaoui, H., Cherif, F., Bahlous, S. ve Gharairi, A., 2004. Modal Identification and Finite Element Model Updating of a Reinforced Concrete Bridge, Emirates Journal for Engineering Research, 9, 2, 29-34.
- Eom, T.S., Park, H.G., Kim, C.S., Kim, J., 2011, Adaptive Linear Analysis For Inelastic Seismic Design of Reinforced Concrete Moment, Magazine of Concrete Research, 63, 11-23.
- Ersoy, U. ve Özcebe, G., 2001. Betonarme, Evrim Yayınevi ve Tic. Ltd. Şti., İstanbul.
- Fryba, L. ve Pirner, M., 2001. Load Tests and Modal Analysis of Bridges, Engineering Structures, 23, 102-109.
- Halling, M.W., Muhammad, I. ve Womack, K.C., 2001. Dynamic Field Testing for Condition Assessment Bridge Bents, Journal of Structural Engineering, ASCE, 127, 2, 161-167.
- Hendriks, M.A.N., Rots J.G., 2012, Sequentially Linear Versus Nonlinear Analysis Of RC Structures, Engineering Computations, 30, 6, 792-801.
- Kolgu, S., Peker, K., 2003, Betonarme Kesit Davranışında Eksenel Yük Malzeme Modeli ve Sargı Donatısı Oranının Etkisi, Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul.
- Kou, J.W. ve DeWolf, J.T., 1997. Vibrational Behavior of Continuous Span Highway Bridge-Influencing Variables, Journal of Structural Engineering, 123, 3, 333-344.
- Merter, O., Uçar, T., 2015. Betonarme Kesitlerin Lineer Elastik Ötesi Davranışında Tüketilen Enerjiye Boyuna Donatı Oranının Enine Donatı Aralığının ve Eksenel Yükün Etkisi, Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 4, 1, 21-39
- Nawy, E. G., 2000. Reinforced Concrete-A Fundamental Approach, Fourth Edition, Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Owen, J.S. ve Haritos, N., 2003. Damage Detection in Large-Scale Laboratory Bridge Models, Key Engineering Materials, 245-246, 35-42.

- Pang, J., 1996. Modeling and Experimental Modal Analysis of Highway Bridge, Doktora Tezi, University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, USA.
- Ren, W.X., Zatar, W. ve Harik, I.E., 2004. Ambient Vibration-Based Seismic Evaluation of a Continuous Girder Bridge, Engineering Structures, 26, 631-640.
- Sgambi, L., 2004. Fuzzy Theory based Approach for Three-Dimensional Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Two-Blade Bridge Piers, Computer and Structures, 82, 1067-1076.
- Sevim, B., Altunışık, A.C., Kompozit Kolon Elemanların Modal Davranışlarının Belirlenmesi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 1, 13-24.
- Şimşek, O., 2016, Yapı Malzemesi-I, "Seçkin Yayınları", 4. Baskı, Ankara.
- Topçu, A., Betonarme 150 Yaşında I-II, Yapı Dünyası, Sayı 111-112.
- TS-708, 2016. Beton Çelik Çubukları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS-500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Türker, T., 2011, Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Hasar Durumlarının Tespiti Ve Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Uygun, G., Celep, Z., 2007, Betonarme Bir Binanın Deprem Güvenliğinin Deprem Yönetmeliği (2007)deki Lineer Ve Lineer Olmayan Yöntemlerle Karşılaştırmalı İncelenmesi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul.
- Wang, T.L. ve Zong, Z., 2002. Improvement of Evaluation Method for Existing Highway Bridges, Proje Sonuç Raporu, Rapor No: FL/DOT/RMC/6672-818, Structural Research Center, Florida Department of Transportation, Miami, Florida, USA.
- Whelan, M.J., Gangone, M.V., Janoyan, K.D. ve Jha, R., 2009. Real-Time Wireless Vibration Monitoring for Operational Modal Analysis of an Integral Abutment Highway Bridge, Engineering Structures, 31, 2224-2235.
- Wu, Q., Yoshimura, M., Takahashi, K., Nakamura, S. ve Nakamura, T., 2006. Nonlinear Seismic Properties of the Second Saikai Bridge A Concrete Filled Tubular (CFT) Arch Bridge, Engineering Structures, 28, 163-182.
- Xu, F., 2002. Health Assessment and Monitoring of a Post-Tensioned Segmental Concrete Bridge, Doktora Tezi, University of Illinois, Chicago, USA.
- Zapico, J.L., Gonzalez, M.P., Friswell, M.I., Taylor, C.A. ve Crewe, A.J., 2003. Finite Element Model Updating of a Small Scale Bridge, Journal of Sound and Vibration, 268, 993-1012.

URL-1, [http://www.yildiz.edu.tr/~zcgirgin/RC\\_lecture\\_notes/RChistory.html](http://www.yildiz.edu.tr/~zcgirgin/RC_lecture_notes/RChistory.html), 21.12.2018.

URL-2, <http://www.arch.mcgill.ca/prof/sijpkes/abc-structures-2005/concrete/timeline.html>, 21.12.2018.



## ÖZGEÇMİŞ

**Umut Ufuk DOĞAN**, 1979 yılında Sivas’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini 1985-1993 yılları arasında Sivas’da, lise öğrenimini 1994-1996 yılları arasında Amasya’da tamamladı. 1999 yılında girdiği Öğrenci Seçme Sınavı’nda gösterdiği başarı sonucu Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde “Lisans” eğitimi almaya hak kazandı. Lisans eğitimini 2004 yılında tamamladı. 2011 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Anabilim Dalı’nda “Yüksek Lisans” eğitimine başladı. Halen Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Meslek Yüksekokulunda Öğretim Görevlisi olarak görevine devam eden DOĞAN evli ve iki çocuk babasıdır, iyi derecede İngilizce bilmektedir.