

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

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

Jüri Üyeleri

Başkan :

Üye :

Üye :

Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

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

“Kutu Kesitli Ardgermeli Köprülerin Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Davranışlarının Belirlenmesi” isimli tez çalışmasını bana öneren, tez boyunca her aşamasında gerek bilgi ve tecrübesini gerekse maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen çok değerli danışmanım Prof. Dr. Şevket ATEŞ'e sonsuz teşekkürlerimi sunmayı her zaman bir borç bilirim.

Her konuda ilgi, destek ve alakalarını esirgemeyen Prof. Dr. Süleyman ADANUR'a, Dr. Öğr. Üyesi Barbaros ATMACA'ya, Eğitim ve Öğretim hayatım boyunca emeği geçen bütün hocalarıma teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince tecrübe, bilgi ve yardımından dolayı değerli arkadaşım İnş. Yük. Müh. Mohammad Trodi KARİMİ'ye çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında bana her zaman motivasyon kaynağı olan ve manevi desteklerini hissettiğim Sedef BAKAN'a, Hidayet SAEEDİ'ye Nur Melek KÜÇÜK'e Mehmet Akif POLAT'a Selenay SAKA UZUNER'e, Shah Mohammad SHAYIQ'a ve daha birçok ismini sayamadığım arkadaşşıma teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamısında yanımda olan maddi ve manevi desteğini üzerimde hissettiğim babam Ahmad YAQOOBİ'ye ve her zaman yollarımı gözleyen iyilik abidesi annem ve kardeşlerim Homayra, Jawed, Shafiq, Khalid, Salihah ve Obaidullah'a şükranlarımı sunarım.

Walid YAQOOBI
Trabzon, 2020

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kutu Kesitli Ardgermeli Köprülerin Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Davranışlarının Belirlenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Şevket ATEŞ’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, analizler ile ilgili, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 07/02/2020

Walid YAQOOBI

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	IX
SUMMARY	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER DİZİNİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Konuyla İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	2
1.3. Tez Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	6
1.4. Karayolu Köprüleri	7
1.5. Öngerilmeli Köprülerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	9
1.5.1. Beton	9
1.5.1.1. Betonun Basınç Dayanımı	11
1.5.1.2. Malzemelerin Seçimi ve Oranı	12
1.5.1.3. Çimento Tipi	12
1.5.1.4. Su Çimento Oranı.....	12
1.5.1.5. Agrega	12
1.5.1.6. Katkılar.....	12
1.5.1.7. Kür Durumu	13
1.5.1.8. Betonun Büzülmesi	13
1.5.1.9. Poisson Etkisi	13
1.5.1.10. Zamanla Basınç Dayanımı Gelişmesi	14
1.5.1.11. Betonun Çekme Dayanımı	14
1.5.1.12. Elastisite Modülü	15
1.5.2. Öngerme.....	16

1.5.2.1.	Öngerilme Teknikleri	17
1.5.2.2.	Ardgerme	17
1.5.3.	Öngerilmeli Beton Elemanları	18
1.5.4.	Öngermeli Yapılarda Hesap Aşamaları	21
1.5.4.1.	Servis Anı.....	21
1.5.4.2.	Aktarma.....	21
1.5.4.3.	Limit Durumu	21
1.5.5.	Öngerilemeli Yapıların Emniyet Gerilmesi.....	21
1.5.6.	Öngerilmeli Beton Malzemeleri.....	22
1.5.6.1.	Elastiste Modülü	22
1.5.7.	Öngerilmeli Bir Kirişte Basınç Diyagramı	23
1.6.	Öngerilme Kayıpları	25
1.6.1.	Kısa Dönem Kayıpları	25
1.6.1.1.	Ankraj Kayıpları	25
1.6.1.2.	Beton Elastik Kısılması Nedeniyle Oluşan Kayıplar	26
1.6.1.2.1.	Ardgerimeli Elemanlarda.....	26
1.6.1.3.	Sürtünme Kayıpları	26
1.6.2.	Uzun Dönem Kayıplar	27
1.6.2.1.	Betonun Sünmesinden Doğan Gerilme Kayıpları.....	28
1.6.2.2.	Betonun Rötresinden Doğan Gerilme Kaybı	28
1.6.2.3.	Çeliğin Gevşemesi Nedeniyle Gerilme Kaybı	29
1.7.	Karayolu Köprülerine Etkiyen Yükler	29
1.7.1.	Zati Ağırlığı.....	29
1.7.2.	Sabit Yük.....	29
1.7.3.	Hareketli Yükler.....	29
1.7.4.	Öngerme Yüğü	30
1.8.	Karayolu Köprülerinin Doğrusal Elastik ve Doğrusal Elastik Olmayan Analiz Yöntemleri ile Değerlendirme.....	30
1.8.1.	Deprem Etkisi Altında Performans Değerlendirilmesi	30
1.8.1.1.	Dayanıma Göre Performans Değerlendirilmesi	31
1.8.1.2.	Şekil Değiştirmeye Göre Performans Değerlendirilmesi.....	31
1.8.2.	Deprem Hasar Performans Düzeyleri	32
1.8.3.	Deprem Yer Hareketleri Düzeyleri	33
1.9.	Doğrusal Olmayan Davranışın Modellenmesi.....	34
1.9.1.	Doğrusal Olmayan Analiz Uygulaması	34

1.9.2.	Plastik Mafsal Hipotezi	35
1.9.3.	Plastik Mafsal Kesitinde Moment-Plastik Dönme ve Moment-Eğrilik İlişkisi.....	36
1.9.4.	Kolonlarda Momenti-Eğrilik İlişkisi.....	37
1.9.5.	Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemleri	38
1.9.5.1.	Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz.....	39
1.9.5.2.	Doğrusal Olmayan İtme Analizi	39
1.10.	Kutu Kesitli Karayolu Köprüleri.....	40
1.10.1.	Geometri.....	41
1.10.2.	Kutu Kesitli Köprü Yapım Yöntemleri.....	41
1.11.	Sonlu Elemanlar (SEY) Yöntemi.....	42
1.11.1.	Kiriş.....	42
1.11.2.	Tendon	43
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	45
2.1.	Köprü Bilgileri	45
2.2.	Malzeme Özellikleri.....	48
2.3.	Yük Birleşimleri.....	49
2.4.	Köprünün Doğrusal Elastik Analizi	50
2.4.1.	Sonlu Eleman Modeli.....	50
2.4.2.	Deprem Spektrumu	51
2.4.3.	Yatay Deprem Tasarım Spektrumu.....	53
2.4.4.	Düşey Deprem Tasarım Spektrumu	54
2.5.	Köprünün Doğrusal Olmayan Elastik Hesabı	57
2.5.1.	Statik İtme Analizi	57
2.5.1.1.	Kolonlarda Moment Eğrilik ve Normal Kuvvet-Moment (P-M) Etkileşim Yüzeyi İlişkisinin Belirlenmesi.....	58
2.5.2.	Zaman Tanım Alanında Analiz.....	60
3.	BULGULAR VE İRDELEMELER.....	62
3.1.	Elde Edilen Sonuçların Değerlendirmesi	62
3.1.1.	Köprünün Modal Analizi	62
3.1.2.	Köprünün Sabit Yüklere Göre Analizi.....	65
3.1.3.	Ardgerme Uygulandıktan Sonra Köprü Davranışı.....	66
3.1.4.	Köprünün Hareketli Yüklere Göre Analizi	68
3.1.5.	Kolonlar İçin Elverişsiz Yükleme Durumu	70
3.1.6.	Budan Köprüsünün Servis Dönemi.....	72

3.1.6.1.	Yükleme Durumu -I	73
3.1.6.2.	Yükleme Durumu -II.....	74
3.1.6.3.	Yükleme Durumu -III	76
3.1.6.4.	Yükleme Durumu- IV	77
3.1.6.5.	Yükleme Durumu- V	79
3.1.6.6.	Yükleme Durumu- VI	80
3.1.6.7.	Yükleme Durumu- VII.....	82
3.1.6.8.	Yükleme Durumu- VIII	83
3.1.6.9.	Yükleme Durumu- IX	85
3.1.6.10.	Yükleme Durumu- X	86
3.1.6.11.	Yükleme Durumu- XI	88
3.1.6.11.	Yükleme Durumu- XII.....	89
3.2.	Doğrusal Olmayan Statik İtme ve Zaman Tanım Alanında Analiz	92
3.2.1.	Statik İtme Analizi	92
3.2.2.	Zaman Tanım Alanında Ardgerilmeli Tabliyelerde ve Kolonlarda Oluşan Yer Değişirme ve Taban Kesme Kuvvetleri	95
3.2.2.1.	Doğrusal Analiz	96
3.2.2.2.	Doğrusal Olmayan Analiz.....	97
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	101
5.	KAYNAKLAR	103
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

KUTU KESİTLİ ARDGERMELİ KÖPRÜLERİN DOĞRUSAL VE DOĞRUSAL
OLMAYAN DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ.

Walid YAQOOBI

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Şevket ATEŞ
2020, 105 Sayfa

Bu tez çalışmasında, Artvin-Erzurum karayolu üzerinde bulunan ardgerme tekniği ile inşa edilen kutu kesitli Budan köprüsünün doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri, sonlu eleman yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Köprünün sonlu eleman yöntemi için SAP2000 paket programı kullanılmış ve bu program yardımıyla, köprüye etkiyen yüklerle, yük birleşimleri oluşturulmuş ve en elverişsiz yükleme göre maksimum kesit tesirleri belirlenmiştir. Ayrıca doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerden elde edilen büyüklükler karşılaştırılmıştır. Statik itme ve zaman tanım alanında analizler sonucu köprünün performans düzeyi, en büyük yerdeğiştirme ve en büyük taban kesme kuvvetleri belirlenmiştir.

Bu tez çalışması dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde; genel bilgiler, konuyla ilgili daha önce yapılan çalışmalar, formülasyon yöntemleri ve öngerilmeli köprülerin hesap ve tasarımı ile ilgili genel bilgiler verilmektedir. İkinci bölümde; köprünün geometrik özelliklerine, köprünün kesitlerine, malzeme özelliklerine, deprem yüklerine ve sonlu eleman modeline yer verilmektedir. Üçüncü bölümde; elde edilen bulgu ve irdelemelere yer verilmektedir. Dördüncü bölümde; çıkan sonuçlar değerlendirilerek bu sonuçlar ışığında önerilerde bulunulmuştur. Son olarak, referanslar ve özgeçmiş sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Öngerilmeli Karayolu Köprüsü, Ardgerilme, Malzeme Özelliği, Modal Analiz, Yerdeğiştirmeler, Sonlu Eleman Model

Master Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF LINEAR AND NONLINEAR BEHAVIOR OF POST
TENSIONED CONCRETE BOX GIRDER BRIDGES

Walid YAQOOBI

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Şevket ATEŞ
2020, 105 Pages

In this thesis, linear and nonlinear analyses of post tensioned concrete box girder Budan highway bridge located in Artvin-Erzurum are evaluated by finite element method. The SAP2000 package program was used for the finite element analyses of the bridge and combinations were made with loads that acted on the bridge and maximum cross sectional effects were determined according to the most critical loading. Moreover, as a result of pushover and time history analyses, the seismic performance level, maximum displacement and maximum base shear forces of bridge were determined. Values obtained from linear and nonlinear methods were compared.

This thesis contains four chapters. The first chapter includes general information, literature studies related to the topic, formulation methods related to design and calculation of prestressed bridges. The second chapter consists of information about geometric, cross section, material, applied loads and finite element model. The findings and investigations obtained from this study are given in the third chapter. The fourth chapter consists of results and suggestions in the light of findings and investigations. Finally, references and Curriculum vitae are presented.

Keywords: Prestressed Highway Bridge, Post Tensioned, Material Properties, Modal Analysis, Displacements, Finite Element Model

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Tarr Steps köprüsü (URL-3).....	8
Şekil 1.2.	Ahşap fiçı (URL-1).....	8
Şekil 1.3.	Betonun gerilme-şekildeğiştirme grafiği (URL1).....	10
Şekil 1.4.	Poisson Etkisi.....	14
Şekil 1.5.	Betonun Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi.....	15
Şekil 1.6.	Ardgerme ekipmanı (Arslan 2018).....	17
Şekil 1.7.	Öngerme tel ve halatı (URL-2).....	19
Şekil 1.8.	Ögerme halat detayları (URL-1).....	19
Şekil 1.9.	Öngerme çeliklerinin tipik gerilme – şekildeğiştirme eğrisi (URL-1)	19
Şekil 1.10.	Öngerme çeliği ve S420 çeliğin gerilme-şekildeğiştirme grafiği (Hamad, 2018)	23
Şekil 1.11.	Basit kirişin kendi ağırlığı altındaki davranışı.....	24
Şekil 1.12.	Kendi ağırlığı ve eksenel öngerme kuvveti etkisi altında gerilme dağılımı	24
Şekil 1.13.	Kendi ağırlığından, eksenel ve öngerme kuvvetin etkisi altında gerilme dağılımı	25
Şekil 1.14.	Ankastre tabanlı konsol kolon için yerel deplasman kapasitesi (CALTRANS, 2004).....	35
Şekil 1.15.	İki doğrulu moment-eğrilik diyagramı (Ganbat, 2008).....	36
Şekil 1.16.	Moment-plastik dönme diyagramı (Ganbat, 2008)	37
Şekil 1.17.	Moment eğrilik grafiği (Caltrans, 2004).....	37
Şekil 1.18.	Dinamik hesaplamalar için idealleştirilmiş moment eğrilik ilişkisi (Aviram, 2008)	38
Şekil 1.19.	Doğrusal olmayan analizde oluşan performans grafiği (Karimi, 2019)	40
Şekil 1.20.	Köprü tabliyesi çeşitleri	41
Şekil 1.21.	Sürekli sistemlerin ayrıklaştırması örneği (a) bir kiriş 4 parçaya bölünmüş (b) ve bir levha 32 eşit parçaya.....	42
Şekil 1.22.	SAP2000'deki bir eleman için serbestlik dereceleri ve iç kuvvetleri	43
Şekil 2.1.	Budan köprüsü	45
Şekil 2.2.	Kolon ve tabliye kesiti	46
Şekil 2.3.	Birinci açıklığın dolu diğer açıklıkların boş olması durumu	49

Şekil 2.4.	Orta açıklığın dolu diğer açıklıkların boş olması durumu	50
Şekil 2.5.	Üçüncü açıklığın dolu diğer açıklıkların boş olması durumu.....	50
Şekil 2.6.	Budan köprüsünün sonlu eleman modeli.....	51
Şekil 2.7.	Yatay elastik tasarım ivme spektrumu (TBDY-2018).....	53
Şekil 2.8.	Yatay elastik tasarım yerdeğiştirme spektrumu (TBDY-2018).....	54
Şekil 2.9.	Düşey elastik tasarım ivme spektrumu (TBDY-2018)	55
Şekil 2.10.	50 yılda aşılma olasılığı %2 olan DD-1 deprem yer hareketine karşılık gelen tasarım ivme spektrumunun tanımlanması	56
Şekil 2.11.	50 yılda aşılma olasılığı %10 olan DD-2 deprem yer hareketine karşılık gelen tasarım ivme spektrumunun tanımlanması	56
Şekil 2.12.	C40 betonu için Gerilme-Şekildeğiştirme eğrisi	58
Şekil 2.13.	S420 donatı çeliği için Gerilme-Şekildeğiştirme eğrisi.....	58
Şekil 2.14.	Moment-eğrilik grafiği	59
Şekil 2.15.	P-M etkileşim yüzeyi.....	59
Şekil 2.16.	Moment eğrilik değerlerinin SAP2000 programına tanımlanması.....	60
Şekil 3.1.	İlk 12 mod şekilleri.....	64
Şekil 3.2.	G yüklemesinde oluşan köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti.....	65
Şekil 3.3.	G yüklemesinde oluşan köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti.....	65
Şekil 3.4.	G yüklemesinde oluşan köprü uzunluğu boyunca düşey yer değiştirme.....	66
Şekil 3.5.	Ardgerme uygulanmasıyla köprü uzunluğu boyunca oluşan eğilme momenti	67
Şekil 3.6.	Ardgerme uygulanmasıyla köprü uzunluğu boyunca oluşan kesme kuvveti	67
Şekil 3.7.	Ardgerme uygulanmasıyla köprü uzunluğu boyunca oluşan düşey yerdeğiştirmeler	68
Şekil 3.8.	Elverişsiz yükleme durumları için köprü uzunluğu boyunca oluşan eğilme momenti	69
Şekil 3.9.	Elverişsiz yükleme durumları için köprü uzunluğu boyunca oluşan kesme kuvveti	69
Şekil 3.10.	Elverişsiz yükleme durumları için köprü uzunluğu boyunca oluşan düşey yerdeğiştirme	70
Şekil 3.11.	Kolonlar için yapılan elverişsiz yüklemelerden köprü uzunluğu boyunca oluşan eğilme momenti.....	71
Şekil 3.12.	Kolonlar için yapılan elverişsiz yüklemelerden köprü uzunluğu boyunca oluşan kesme kuvveti.....	71
Şekil 3.13.	Kolonlar için yapılan elverişsiz yüklemelerden köprü uzunluğu boyunca oluşan yerdeğiştirmeler.....	72
Şekil 3.14.	Yükleme durumu-I için köprü uzunluğu boyunca Eğilme momenti	73

Şekil 3.15.	Yükleme durumu-I için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti.....	74
Şekil 3.16.	Yükleme durumu-I için köprü uzunluğu boyunca yer değiştirme grafiği	74
Şekil 3.17.	Yükleme durumu-II için köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti	75
Şekil 3.18.	Yükleme durumu-II için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti	75
Şekil 3.19.	Yükleme durumu-II için köprü uzunluğu boyunca düşey yerdeğiştirme	76
Şekil 3.20.	Yükleme durumu-III için köprü uzunluğu boyunca eğilme moment	76
Şekil 3.21.	Yükleme durumu-III için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti	77
Şekil 3.22.	Yükleme durumu-III için köprü uzunluğu boyunca yerdeğiştirme	77
Şekil 3.23.	Yükleme durumu-IV için köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti.....	78
Şekil 3.24.	Yükleme durumu-IV için köprü uzunluğu boyunca yerdeğiştirme	78
Şekil 3.25.	Yükleme durumu-IV için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti.....	79
Şekil 3.26.	Yükleme durumu-V için köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti	79
Şekil 3.27.	Yükleme durumu-V için köprü uzunluğu boyunca yerdeğiştirme	80
Şekil 3.28.	Yükleme durumu-V için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti	80
Şekil 3.29.	Yükleme durumu- VI için köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti.....	81
Şekil 3.30.	Yükleme durumu-VI için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti.....	81
Şekil 3.31.	Yükleme durumu-VI için köprü uzunluğu boyunca yerdeğiştirme	82
Şekil 3.32.	Yükleme durumu- VII için köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti	82
Şekil 3.33.	Yükleme durumu-VII için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti	83
Şekil 3.34.	Yükleme durumu-VII için köprü uzunluğu boyunca yerdeğiştirme.....	83
Şekil 3.35.	Yükleme durumu- VII için köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti	84
Şekil 3.36.	Yükleme durumu-VII için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti	84
Şekil 3.37.	Yükleme durumu-VII için köprü uzunluğu boyunca yerdeğiştirme.....	85
Şekil 3.38.	Yükleme durumu-IX için köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti.....	85
Şekil 3.39.	Yükleme durumu-IX için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti.....	86
Şekil 3.40.	Yükleme durumu-IX için köprü uzunluğu boyunca yerdeğiştirme	86
Şekil 3.41.	Yükleme durumu-X için köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti	87
Şekil 3.42.	Yükleme durumu-X için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti	87
Şekil 3.43.	Yükleme durumu-X için köprü uzunluğu boyunca yerdeğiştirmesi.....	88
Şekil 3.44.	Yükleme durumu-XI için köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti.....	88
Şekil 3.45.	Yükleme durumu-XI için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti.....	89
Şekil 3.46.	Yükleme durumu-XI için köprü uzunluğu boyunca yerdeğiştirme	89
Şekil 3.47.	Yükleme durumu-XII için köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti	90
Şekil 3.48.	Yükleme durumu-XII için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti	90

Şekil 3.49. Yükleme durumu-XII için köprü uzunluğu boyunca yerdeğiştirme.....	91
Şekil 3.50. Köprü taban kesme kuvveti- tepe yerdeğiştirme ilişkisi.....	93
Şekil 3.51. Kapasite eğrisi	94
Şekil 3.52. Statik itme alanındaki kontur diyagramı.....	95
Şekil 3.53. Köprü tabliyesinin orta noktası düşey yerdeğiştirme-zamanla değişimi	96
Şekil 3.54. Kolon tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesinin zamanla değişimi	96
Şekil 3.55. Köprü tabliyesi orta noktasının taban kesmenin zamanla değişimi.....	97
Şekil 3.56. Sağ kolonun taban kesme kuvveti zamanla değişimi	97
Şekil 3.57. Köprü tabliyesinin orta noktası düşey yerdeğiştirme-zamanla değişimi.....	98
Şekil 3.58. Kolon tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesinin zamanla değişimi	98
Şekil 3.59. Köprü tabliyesi orta noktasının taban kesmenin zamanla değişimi.....	98
Şekil 3.60. Sağ kolon taban kesme kuvveti zamanla değişimi	99
Şekil 3.61. Zaman tanım alanındaki kontur diyagramı.....	100

TABLULAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Öngerme kavramı	18
Tablo 1.2. Öngerme telinin mekanik özellikleri	20
Tablo 1.3. Toronların mekanik özellikleri	20
Tablo 1.4. Çubukların mekanik özellikleri	20
Tablo 1.5. Sürtünme kayıpları.....	27
Tablo 1.6. Rötire birim şekildeğiştirme değerleri (TS3233).....	28
Tablo 1.7. Çeşitli köprüler için deprem seviyelerinde kullanılacak tasarım yöntemleri	32
Tablo 1.8. Deprem hasar performans düzeyleri	33
Tablo 1.9. Köprü bileşenlerinin modellenmesi (Aviram, 2008).....	34
Tablo 1.10. Kolon ayakların plastik kesitleri için verilen birim şekildeğiştirme (TDBY-2018)	36
Tablo 2.1. Budan köprüsünün tabliye kesit özellikleri	47
Tablo 2.2. Ardgerme halatlarının mekanik özellikleri.....	48
Tablo 2.3. Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayıları.....	52
Tablo 2.4. 0.1 Saniye Periyot İçin Yerel Zemin Etki Katsayıları	52
Tablo 2.5. Deprem kaydı parametreleri	61
Tablo 3.1. Modal analizi sonuçları.....	62
Tablo 3.2. Yük durumları.....	73
Tablo 3.3. Farklı yükleme durumlarından elde edilen büyüklükler.....	92
Tablo 3.4. Kolon ve üst tabliye için maksimum yer değiştirme ve taban kesme kuvvetleri	99

SEMBOLLER DİZİNİ

Φ_p	Plastik eğriliği
Φ_u	Kapasite eğriliği
Φ_y	Akma eğriliği
ε_c	Betonun yerdeğiştirmesi
A_{PS}	Öngerme donatısının kesit alanı
A_s	Bir halatın kesit alanı
F_1	1sn yerel zemin eki katsayısı
F_s	Kısa Yerel zemin etki katsayısı
L_p	Plastik mafsal boyu
M_p	Plastik moment
M_{sw}	Sabit yükten dolayı oluşan eğilme momenti
M_y	Akma moment
S_1	1sn spektral ivme değeri
S_{D1}	1sn periyot harita tasarım ivme değeri
S_{Ds}	Kısa periyot harita tasarım ivme değeri
$S_{ae}(T)$	Yatay deprem tasarım spektral ivmeleri
$S_{aeV}(T)$	Düşey deprem tasarım spektral ivmeleri
S_s	Kısa spektral ivme değeri
d_{bl}	Boyuna donatının alanını
d_x	Sonsuz küçük uzunluk
f_c	Betonun basınç dayanımı
f_{ck}	Öngermeli betonun karakteristik dayanımı
f_{cm}	Betonun 28 günlük basınç dayanımı
$f_{cm}(t)$	t zamanında beton basınç dayanımı
f_{cs}	Öngerme yükü aktarıldıktan sonra betona oluşan gerilme
f_{csd}	Öngerme uygulandıktan sonra sabit yük uygulamasıyla betona oluşan gerilme
$f_{p0,1k}$	%0,1 kalıcı uzamaya tekabül eden karakteristik akma gerilmesi

f_{pk}	Çeliğin kopma karakteristik değeri
f_{pt}	Öngerme kuvveti
f_{py}	Öngerme çeliğin akma dayanımı
f_s	Öngerme çeliğin çekme gerilmesi
f_{ye}	Donatının karakteristik akma dayanımı
k_1	Agrega için düzeltme faktörü
p_{eff}	Etkin öngerilme kuvveti
w_c	Betonun birim ağırlığı
β_{cc}	Betonun yaşına bağlı katsayı
ϵ_{uk}	En büyük yükteki uzama oranı
Δ	Değişim oranı
AASHTO	American Associations of State Highway and Transportation Officials
DD_1	50 yıl içerisinde aşılma olasılığı %2 olan deprem
DD-2	50 yıl içerisinde aşılma olasılığı %10 olan deprem
DD-2a	50 yıl içerisinde aşılma olasılığı %30 olan deprem
DD-3	50 yıl içerisinde aşılma olasılığı %50 olan deprem
DGT	Dayanıma göre tasarım
E	Betonun elastisite modülü
G	Betonun kayma modülü
GÖ	Göçmenin önlenmesi
I	Atalet momentini
KH	Kontrollü Hasar
Kk	Kesintisiz kullanım
L	kolon boyu
P0	Öngerilme kuvveti
PGA	Maksimum ivme değeri
PGV	Maksimum hız değeri
SH	Sınırlı hasar
ŞGDT	Şekil değiştirmeye göre tasarım
t	Zaman
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
ν	Poisson oranı

K	Yerel eğrilik katsayısı
T	Periyot
a	Açı değişkenliğini
e	Eksantrik mesafe
ε	Şekil değiştirme
μ	Sürtünme katsayısı



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Köprüler, geçmişten günümüze kadar sıkı bir bağ kuran tarihi ve önemli mühendislik yapılarındandır. İnsanoğlu vadileri, engebeli arazileri, su kütlelerini geçmek ve hızlı seyahat edebilmek için her zaman bir arayış içinde olmuştur. Köprüler, yapı olarak ilk antik çağlarda Mezopotamya'da yapılmıştır (Hamad, 2018). Ondan sonra köprü bilgisi ve mühendisliği tüm dünyaya yayılmaya ve gelişmeye başlamıştır. Belgelenebilir en eski tarihli ve günümüzde de kullanılmakta olan köprü M.Ö. 850 yılında taş yığma kemer tipi olarak İzmir ilinde Meles nehri üzerinde yapılan Kazarma (Arkadiko) köprüsüdür (Guinness, 2018).

Günümüzde çok farklı köprü tipleri, yapı malzemeleri ve inşaat teknikleri mevcuttur. Bilinen en yaygın köprü malzemeleri beton, çelik veya bunların her ikisinin birleşimi, yani kompozit köprülerdir. Köprülerin farklı tip imalat şekilleri mevcuttur bazı ana köprü tipleri asma köprüler, kemer köprüler, kablolu köprüler, kafes ve kirişli köprülerdir. Bu köprü tipleri karayolu ve demiryolu gibi uzun açıklıkları geçmesi ve ağır yükleri taşıması gibi durumlarda sıklıkla tercih edilmektedir.

Köprüler, Türkiye'de yer alan karayolları üzerindeki önemli yapılardır. İlk olarak kagir ve ahşap malzemelerden yapılan köprüler, hafif yükler, dar ve küçük açıklıkları geçmek için kullanılmıştır. Günümüzde ise toplumun, bir bölgenin gelişmesi ve üretilen ürünlerin üreticiden tüketiciye en hızlı, güvenli ve ekonomik şekilde ulaştırılmasına olanak tanıyan bu mühendislik yapıları yerini daha derin, uzun açıklık ve ağır yüklerin geçmesine olanak sağlayan uzun açıklıklı betonarme ve çelik köprülere bırakmıştır.

Betonarme köprülerin yapım maliyetinin yüksek olması ve buldukları bölgeye bıraktığı stratejik önemi dikkate alındığında, bu tür yapıların dinamik etkiler altından davranışının çok dikkatli incelenmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Özellikle Türkiye topraklarının %93'ü aktif deprem kuşağı üzerinde bulunması nedeniyle depremin dinamik parametreleri dikkate alınması zorunlu olunmuştur. Böyle bir mühendislik yapısının zarar görmesi can, mal ve şehirlerarası bağlantısının kesilmesine sebep olmaktadır (Karimi, 2019).

Karayolları Genel Müdürlüğü'nün kuruluşuyla köprülerin yapılmasına hız verilmiştir. Son zamanlarda ardgerilme ve öngerilmeli köprülerinin yapılmasına başlanmıştır.

Depremiň Őiddetine göre depreme dayanıklı yapı tasarımında, yapıların kabul edilebilir sınırlar içerisinde hasar alabileceği göz önüne alınmaktadır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliđinde, kolon, kiriŐ, perde gibi taŐıyıcı sistem elemanlarında meydana gelebilecek hafif Őiddetteki depremlerde yapısal hasarların oluŐması istenmemektedir. Orta Őiddetteki depremlerde kolon, kiriŐ, perde gibi taŐıyıcı olan elemanlarda onarım ve güçlendirme yapılabilecek düzeyde, taŐıyıcı olmayan elemanlarda ise yapısal hasarlara izin verilmektedir. Yapı mr içinde çok Őiddetli depremlerde taŐıyıcı elemanlarda bir kez onarılamayacak derecede hasarlar oluŐabilir. Fakat bu can kaybı meydana getirecek yıkımlar olmamalıdır (TBDY-2018).

1.2. Konuyla İlgili Daha nce Yapılmış alıŐmalar

Moon vd. (2004), köprüyü oluŐturan her bir parçanın yapısal davranışı ve basınç deđiŐimini öngerme uygulama aşamasında incelemek ve 3 boyutlu analitik sonuçları kullanarak inşaat aŐamalarında çatlamayı kontrol etmek için etkili bir inşaat tekniği önermeyi amaçlamıştır. ngerme sırasında oluşabilecek atlaklıklar diğer yapı aşamasında oluşabilecek atlaklıklardan daha fazla olduğunu, dilimlerin birleştirilmesi için germe halatları kullandığından aşırı deformasyona sebep olduğunu ve bu kirişin alt kısımlarında çatlamalara neden olacağını tahmin etmişlerdir. Kutu kesitli öngerilme köprülerin öngerme kabloların çoğalmasıyla deformasyonların artacağı ve dilimlerin kalınlıklarının artmasıyla %60 kadar deformasyonların azalacağı ve ankraj bölgesinin çatlama üzerindeki etkilerini çalışmışlardır.

zmen vd. (2007), betonarme kesitlerdeki doğrusal olmayan davranışı incelenmiŐlerdir, Farklı beton sınıfları ve sargı donatısı için modelin statik itme analizi yapılmış. Sonuç olarak kolon kesitlerin moment-eğrilik davranıŐında ortaya çıkan farklılıkların sistem davranışı üzerinde belirginliğini yitirdiğini gözlemlemiŐlerdir.

Ganbat (2008), Bayrampaşa köprüsünün güçlendirilmesi ve statik analizini içeren çalışmasında AASHTO ve CALTRANS ynetmenliklerini kullanarak performans değerlendirilmesi yapmıştır. Mevcut yapının deprem karŐısındaki davranışını doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler kullanarak değerlendirme yapmış sonuç olarak yetersiz bulmuŐtur. Betonarme kirişin yerine öngerilmeli beton prekast kirişlerin kullanılmasını önermiştir. Ayrıca, yapının doğrusal olmayan analizinden bulunan sonuçlar doğrultusunda köprünün performansı deđerlendirilmiŐtir. Deprem kuvvetine karşı güvenliğinin kontrolü

yapılmıştır. Güçlendirilmiş başlık kirişi ve temel kesme ve eğilme kuvveti tahkikleri yapılmıştır. Temel zemin gerilme kontrolü ve elastomer mesnet deplasmanların tahkikleri' de yapılmıştır.

Kim vd. (2008), laboratuvar ortamında aynı mekanik özelliklerine sahip iki öngerilmeli prekast kiriş tekparça (monolitik) ve dilimli olarak üretilerek iki kirişin statik davranışlarını değerlendirmek amacıyla deneylere tabi tutmuşlardır. Elde edilen normal kuvvet, gerilme, yer değiştirme ve kırılma durumlarına göre karşılaştırma yapmışlardır. Yapılan değerlendirme sonucunda dilimsel olarak üretilen kirişin monolitik olarak üretilen kirişe göre daha iyi statik performans sağladığını elde etmişlerdir.

Angomas (2009), betonun özelliklerini, büzülmesini, dona karşı dayanımı ve öngerilme kayıplarını değerlendirerek dünyada yaygın olarak kullanılan yönetmenliklere göre karşılaştırmıştır. Uzun ve kısa açıklıklı kirişlerin öngerilme kayıpları için bir yaklaşımda bulunarak ve uzun açıklıklı kirişlerin uzun dönem kayıpları için deneysel ve teorik bir çalışma yapmıştır.

Bayraktar vd. (2009), dengeli konsol olarak inşa edilen Türkiye'nin ilk dengeli konsol köprüsü olan Kömürhan köprüsünün deneysel ölçümleri ve sonlu elemanlar modelleri kullanarak doğal frekans, sönüm oranları ve mod şekilleri gibi dinamik özellikleri belirlemeyi amaçlayan bir çalışma yapmışlardır.

Yüksel (2009), İstanbul'da bulunan Yarımburgaz Viyadüğünün deprem performansını irdelemiştir. Bu çalışmada Viyadüğün doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemle şekil değiştirme esaslı analiz yapılmıştır. Doğrusal elastik hesap ve doğrusal olmayan hesap neticeleri kıyaslanarak bu viyadük için performans esaslı bir değerlendirme yapılmıştır.

Aktaş (2010), yaygın olarak kullanılan AASHTO-2002 ve CALTRANS-2001 yönetmenliklerini kullanarak öngerilmeli bir köprünün kuvvet ve performans bazlı tasarımını değerlendirmiştir.

Ateş (2011), Budan dengeli konsol köprüsünün yapım aşamasını ve zamana bağlı malzeme özelliklerini dikkate alarak çalışma yapmıştır. Köprü yapısının davranışını farklı yapım aşamaları için elde edilmiştir. Kesme kuvvetleri, eksenel kuvvetler, eğilme momentleri ve yerdeğiştirmelerin değişimi farklı yapım aşamaları için detaylı bir şekilde verilmiştir.

Yıldırım (2011), Elazığ-Malatya karayolu üzerinde bulunan Kömürhan Köprüsünün proje verileri kullanılarak sert, orta ve yumuşak zemin türleri ve yapım aşamaları için

doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucu elde edilen yerdeğiştirmeler ve gerilmeler, karşılaştırılmalı olarak irdelenmiştir.

Shatarat (2012), plastik mafsal özelliklerinin karayolu köprülerinin kapasite eğrisi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmada 1940 yıllarında inşa edilen iki köprü ele alınmıştır. Bu köprüler için kullanıcı tanımlı ve otomatik plastik mafsal modelleri kullanılarak itme analizi yapılmıştır. Çalışma sonucunda kapasite eğrisinde bir fark olduğunu göstermiştir. Deprem etkilerinin dikkate alınmadan inşa edilen eski otoyol köprüleri için plastik mafsal uzunluğunun elde edilmesi ve kapasite eğrisini elde etmek için kullanıcı tanımlı plastik mafsal özelliklerini kullanılmasını önermiştir bu durumda gerçeğe yakın sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

Korkmaz (2013), Türkiye'nin ilk dengeli konsol ard gerilemeli köprüsü olan Kömürhan köprüsünün ANSYS programıyla modellemiş, yaya yükü, sabit yükler, 250 kN ağırlığında kamyon yüklemesi ve $t=1000$ gün içinde oluşan kısa ve uzun dönem kayıpları dikkate alarak köprüde oluşan zamana bağlı yer değiştirmeleri hesaplamıştır.

Guiglia vd. (2014), 40 yıllık servis ömrünü dolduran İtalya karayolu ağında bulunan bir köprünün servis ömrünü doldurduktan sonra 35 m uzunluğu olan 9 adet kutu kesitli kirişin üzerine özel bir kırma makinesiyle kırılma anına kadar yükleme yapmışlardır. Elde edilen deneysel sonuçlar Eurocode 2 kurallarınca karşılaştırma yapmışlardır.

Setiawan vd. (2014), Abaqus sonlu eleman programı kullanarak ard gerilmeli bir köprünün ankraj bölgesini 3 boyutlu solid eleman olarak modellemişlerdir. Betonun 0.5, 1, 1.5, 2 ve 3 günlük yaşlarında basınç dağılımı ve ankraj bölgesinde oluşan çatlakları elde etmişlerdir. Ankraj bölgesi sonlu eleman analiz sonucu, rijitlik, basınç ve ankraj bölgesindeki çatlama kontur diyagramlarına dayanarak, krikolar vasıtasıyla halatlara ankraj kuvvetinin betonun bir günlük yaşında iken bile verilebileceğini ortaya koymuşlardır.

Naik vd. (2015), kutu kesitli çok açıklıklı ard gerilmeli bir köprünün farklı yük durumları için kesme kuvveti, eğilme momenti ve yer değiştirme davranışını incelemişlerdir. Aynı zaman kabloların geçmesi için bırakılan kılıflar için iki farklı kaplama malzemesi kullanarak kısa ve uzun dönem kayıpları karşılaştırmışlar ve ekonomik bakımından değerlendirme yapmışlardır.

Tejani vd. (2015), çalışmalarında uzun mesafeli açıklıklar için öngerilemeli sistemlerin maliyetinin daha uygun olduğunu ancak kısa açıklıklar için çok masraflı olacağını ve bazı mimari amaçlar için öngerilemeli sistemlerin kullanılmasının gerekli olduğunu belirtmişlerdir.

Hasiao vd., (2016), ard germe kuvvetlerinin eşdeğer yüke çevirerek 3 basit mesnetli ard gerilmeli kirişin farklı durumları göz önüne alarak ard germe ve eşdeğer yük durumu için çözümler yaparak karşılaştırma yapmışlardır. Her iki sonuç arasında %1 gibi bir fark olduğunu ve bu sebepten dolayı eşdeğer yük durumunun uygulanabileceğini ortaya koymuştur.

2016 yılında Amerika federal yol idaresi tarafından hazırlanan, kutu kesitli ard germe köprülerin analizi kılavuzunda, yerinde dökme kutu kesitli köprüler hakkında kapsamlı bilgiler sunulmaktadır. Tasarımı etkileyen malzeme özellikleri, öngerilmeli betonları esasları, ard germeye bağlı kayıplar, kutu kesitli kiriş üst yapısının boyuna ve enine analizinde yaklaşımlar, tek ve çok hücreli kutu kesitli kirişler hakkında bilgileri sunmaktadır.

Eriksson vd. (2017), SAP2000 programı kullanarak iki farklı köprü modelini analiz etmişlerdir. Bu çalışmada poisson oranını dikkate alarak ve almayarak aralarındaki farkı elde etmiştir. Aynı zamanda moment dağılımları, öngerme kuvvetinden dolayı köprü davranışı ve kırılma anındaki köprü davranışı iki farklı köprü tipi için elde ederek karşılaştırma yapmışlardır.

Fahad vd. (2017), ard gerilmeli kutu kesitli köprünün analizini SAP2000 programı kullanarak yapmışlardır. Kutu kesitli ard gerilmeli köprülerde sabit yük ve öngerme kuvveti altında yer değiştirmelerin izin verilen sınırlar içerisinde kaldığını ve aynı zamanda kutu kesitli kiriş seçiminden dolayı sabit yüklerde bir azalmanın olabileceğini ve bununla düşük maliyet, hafif ve narin yapılar elde edileceğini değerlendirmişlerdir.

Raseta vd. (2017), doğrusal olmayan dinamik analiz yaparak betonarme köprülerinin performans tahminini elde etmeye çalışmışlardır. Bu çalışmada $p-\Delta$ ve doğrusal olmayan malzeme özellikleri için plastik mafsal kullanılmış ve farklı uzunluklardaki kolonların zemine ankastre olarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada köprü kolonlarının yerel süneklik ve kritik bileşenlerin süneklik kapasitesi hesaplanmıştır.

Arslan (2018), öngerme hakkında genel bilgiler vermiş, ard gerilme ve ilk gerilme sistemlerini incelemiş ve bu elemanlardaki öngerme kayıpları, trafik ve deprem yükleri altında emniyet gerilmelerini kontrol etmiş ve donatı yeterliğini incelemiştir.

Atmaca (2018), Öngerilmeli prefabrik kirişli beton köprülerin üstyapısı üzerinde analitik ve deneysel çalışmalar yapmış, elde edilen bilgiler ışığında köprü üstyapısının farklı malzeme özelliklerine, açıklığa ve genişliğe sahip köprü üstyapısının, kesit tesirlerini, öngerme kablo sayısını, kabloların yerleşimini, üstyapının yapımında gerekli olan

betonarme donatı sayısı ve yerleşimini, farklı dış etkiler altındaki analizlerinin hızlı ve doğru bir şekilde yapılabilmesi için bir bilgisayar programı oluşturmuştur.

Çift (2018), tezinde dengeli konsol köprü sistemi hakkında genel bilgiler sunmakta olup maliyet değerlendirmesi ve SAP2000 programı ile analiz yapmıştır. C40 ve C50 sınıf beton kullanılmış ve karşılaştırma yapılmıştır. Her iki modelde, analizler sonucunda mod şekillerinin uyum içinde olduğu, her iki modelde maksimum yer değiştirmeler köprü ayak üstünde olduğu ve toplam maliyetleri arasında %10 arasında bir fark olduğunu gözlemlemiştir.

Karimi (2019), SAP2000 programı kullanarak Trabzon-Araklı ilçesinde bulunan Karadere köprüsünün doğrusal ve doğrusal olmayan analizini yapmıştır. Bu çalışmada üç farklı deprem kaydı kullanarak köprü kolonlarının farklı çap ve yükseklikleri için dinamik davranışlarını incelemiştir. Aynı zamanda köprünün kolon ve öngerme kirişlerinde oluşan yerdeğiştirme, kesme kuvvetleri ve deprem performans düzeylerini elde ederek karşılaştırma yapmıştır.

Tunç (2019), dengeli konsol yöntemi ve ard germe tekniği ile inşa edilen Artvin-Ortaköy viyadüğünün modeli ANSYS (2015) paket programı kullanarak, sabit yük ve taşıt yükleri altında analizini yaparak değerlendirme yapmıştır.

1.3. Tez Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında kutu kesitli ard gerilmeli köprülerin doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri sonucunda deprem performans düzeyleri, eğilme momenti, kesme kuvveti ve yer değiştirme değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Artvin-Erzurum karayolu üzerinde bulunan Budan köprüsünün doğrusal ve doğrusal olmayan analizi sonlu eleman yöntemleri kullanılarak değerlendirme yapılmıştır. Köprünün sonlu eleman yöntemi için SAP2000 programı kullanılarak, deprem ivme kaydı, deprem tepki spektrumu, farklı elverişsiz yüklemeler yapılarak ve P-delta etkileri dikkate alınarak analiz yapılmıştır.

Birinci bölümde, öngerilmeli köprüler hakkında genel bilgiler ve daha önce yapılan çalışmalar, öngerilmeli köprülerde kullanılacak olan malzemelerin özellikleri, öngerme yöntemleri, öngerme kayıpları, tasarımda kullanılacak yük türleri, öngerilmeli köprü tiplerinin seçiminde dikkate edilmesi gereken parametreler, analiz yöntemleri ve

doğrusal olmayan analizlerde dikkate alınacak performans davranışını hakkında genel bilgiler verilmektedir.

İkinci bölümde, bu tez çalışmasında dikkate alınan Budan köprüsünün geometrik özellikleri, köprünün kesitleri, hareketli yükler, malzeme özellikleri, deprem yükleri ve sonlu eleman modeline yer verilmektedir.

Üçüncü bölümde, Budan Köprüsünün sonlu eleman modeli SAP2000 programı ile analiz edilmiştir. Bu analiz sırasında köprünün doğrusal ve doğrusal olmayan davranışları elde edilmiştir. Doğrusal davranış içeren analizlerde köprü kendi ağırlığı, hareketli yükler ve deprem yükleri dikkate alınmıştır. Doğrusal olmayan analizlerde, 0.292g maksimum ivmeye sahip Kocaeli depremi statik itme analizi yapılmıştır. Doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerden elde edilen büyüklükler karşılaştırılmıştır

Dördüncü bölümde, çıkan sonuçlar değerlendirilerek bu sonuçlar ışığında önerilerde bulunulmuştur.

1.4. Karayolu Köprüleri

Köprüler, geçmişten günümüze bağ kuran önemli mühendislik yapılarındandır. Köprülerin yapısal özellikleri kullanım amacına göre farklılıklar göstermektedir. Günümüzde köprüler betonarme ve çelik elemanlardan oluşan taşıyıcı sistemler kullanılarak inşa edilmektedir. 1900 yıllarından sonra öngerilmeli betonarme köprüler yaygın olarak kullanılmaktadır. Betonarme köprülerinin özel bir şekli olan öngerilmeli betonarme köprüler maliyetinin az olması, uzun açıklıkları geçilmesi ve kısa zamanda inşa edilmesinden dolayı oldukça avantajlıdır.

İlk köprüler taş veya ahşap malzeme kullanılarak yapılmıştır. İlk sistematik köprüler kemer köprülerdir, kemer şeklindeki köprüler iki taraftan taşların konuşlandırılmasıyla orta noktada tek bir taş ile birleşmesiyle oluşmuştur. Bu tip köprüler Antik Mısır, Yunanistan ve Asya'da görülebilir. Bugünden 5000 yıl önce Mısırlılar gemilerinin gövdesini ahşap elemanlara birleştirip oluşturmaktaydılar ve bu ahşap birleşimlerini sıcak demir lamalarının soğuyarak kısılmasından faydalanmışlar. Daha uzun açıklıkları geçmek için uzun kemer köprüler yapılmıştır. Günümüze kadar ulaşan böyle tarihi köprüler İngiltere'de bulunan Tarr Steps (M.Ö 1000) köprüsü' dür (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Tarr Steps köprüsü (URL-3)

Çelik öngerme elemanı olarak ilk kez P.H Jackson tarafından kullanılmıştır. Jackson taşları delip içerisinden çelik çubuk geçirmiş ve bu çeliği gererek bir bütünlük sağlamayı amaçlamıştır. Benzer çalışma dünyanın farklı bölgelerinde beton ve normal çelik ile yapılmıştır fakat başarısız olmuştur. Çünkü verilen öngerilme kuvveti betonun zamanla kayıpları neticesinde kaybolmaktadır. 1908 yılında E.Freyssinet dayanımı yüksek çelik teller yardımıyla öngerilme gergilerini yerleştirmiş ve bu vesileyle betonun zamanla yer değiştirmelerinin incelemeye başlamıştır. Birinci dünya savaşı başlamasıyla çalışmalarına ara vermek zorunda kalmış ve 1926 yılında tekrar çalışmaya başlamış ve 1928 yılında öngerilmeli betona ait patentini almıştır. 1929 yılından itibaren önemli projelere bu teknik kullanılmaya başlamıştır.

İlk çağlardan beri öngerme tekniği kullanılmaktadır. İlk başlarda ince ahşap şeritlerin yan yana konularak gerilmiş metal veya gerilmiş ahşap ile sararak durmasını sağlayan fiçilerdir. Bu fiçiler radyal doğrultuda basınç uygulamaktadır (URL-1).



Şekil 1.2. Ahşap fiçi (URL-1)

Bisiklet tekerleğinde ince radyal teller, gerilme suretiyle göbek ve jant arasına monte edilmiştir. Tekerleğe yük geldiğinde bu ince teller basınca karşı çok düşük bir mukavemeti olan, bileşke olarak tesir eden çekmeye karşı emniyetle çalışabilmektedir. Bisiklet ve otomobil lastikleri basınca karşı mukavemeti sıfır, ama çekme mukavemeti yüksektir (Bilge, 1975).

Kemer tipi yapılar da öngerme uygulama esasına dayanılmaktadır çünkü ortaya yerleştirilen kilit taş, maruz kalan yükler altında basınç gerilmesini oluşmasını sağlamaktadır ve bu gerilmeyi diğer taşlara aktarmaktadır hiçbir kesite çekme gerilmesi oluşmaz (URL-1).

Türkiye'nin ilk dengeli konsol köprüsü Kömürhan köprüsüdür. Elazığ-Malatya karayollarının 51. kilometresinde, Fırat Nehri üzerindedir. İlk başlarda ilkel yöntemlerle yapılan bu köprü suların artmasıyla su altına kalmıştır. Birinci dünya savaşından sonra betonarme köprü yapılması gündeme gelmiş ve yapımı 3 Nisan 1932 tarihinde tamamlanmış. 109.6 m orta açıklığa sahip olan kemer tipi bu köprü, yapıldığı dönemde dünyanın altıncı en uzun açıklıklı köprü olarak nitelendirilmiştir. Karakaya Barajının yapılmasıyla kemer tipi bu köprü sular altında kalmış yerine 1986 yılında 135 m açıklığına sahip Türkiye'nin ilk dengeli konsol köprüsü yapılmıştır (Bayraktar vd. 2009).

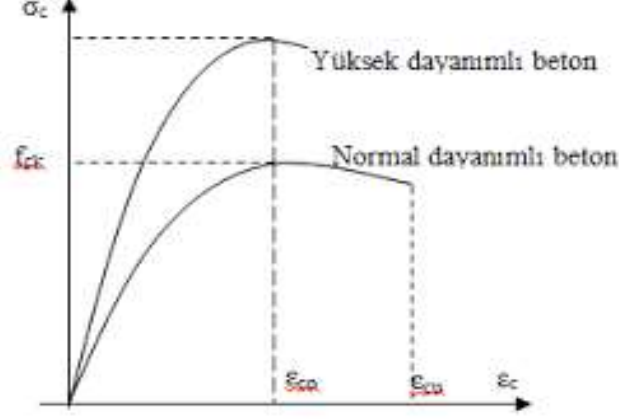
Bazı mühendisler donatıyı germek suretiyle betona basınç gerilmesi vermeyi denemişlerdir fakat betonun zamana tabii kayıplarını hesaplayamadıkları için başarıya ulaşamadılar. Betonda öngerilme fikri yeni bir uygulama değildir. 19. Yüzyılın sonlarında başlamıştır. 1872 kemerleri ve kirişleri inşa etmek için parçaları birleştirmede bağlantı çubukları kullanmıştır. 1888 de C. W. Doehring levhaları birleştirmek için çelik teller kullanmıştır. 1903 yılında Fransız mühendisi E. Freyssinet betona öngerilme fikrini öne sürmüştür (Nawy, 1989).

1.5. Öngerilmeli Köprülerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

1.5.1. Beton

Beton; agrega, çimento, su ve gerekirse mineral ve kimyasal katkı maddeleri ile birleşiminden oluşan kompozit bir yapı malzemesidir. Yürülükte bulunan standartlara göre beton normal ve yüksek dayanımlı olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır (Şekil 1.3). TS500'de C16-C50 dayanım sınıfı arasında olan betonlar, normal dayanımlı betonlar, C50 üzeri dayanım sınıfı betonlar yüksek dayanımlı betonlar olarak sınıflandırılmıştır. Yüksek

dayanımlı betonlarının özellikleri iki şekilde ayrılabilir kısa dönem özellikleri ve uzun dönem özellikleri, kısa dönem özellikleri basınç, çekme ve kesme kuvvetleridir. Uzun dönem özellikleri sünme ve büzülmesidir (URL-1).



Şekil 1.3. Betonun gerilme-şekildeğiştirme grafiği (URL1)

Kusur olarak kaydedilen çok önemli bir yapı malzemesi olan betonun, çekme dayanımı basınç dayanıma göre çok daha küçük olmasıdır. Basit çekme altında betonun mukavemeti, basit basınç altındaki mukavemetinin %10-%12 si kadardır, betonun bu mahsurunu giderebilmek için çekme bölgelerinde çekme mukavemetini karşılayabilmek için donatılar kullanılmaktadır (Özden vd. 1994).

Betonun mekanik karakteristik özelliğinden olan elastisite modülü TS500 ve TS3233'te yaklaşık olarak $E=3250\sqrt{f_{ckj}}+14000$ MPa olarak verilmektedir. Poisson oranı ($\nu = 0.2$) ve kayma modülü (G) aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1.1)$$

Betonun kırılma birim boy değişimleri basit basınç altında 0.002 ve basit çekme halinde 0.0002 dir.

AASHTO LRFD 2007'ye göre önerilmeli betonarme yapılarda kullanılacak olan betonun karakteristik basınç dayanımı 28 MPa daha az olmamalı ve yoğunluğu 1440-2500 kg/m^3 aralığında olmalıdır. Betonun basınç dayanımı 105 Mpa'dan daha düşük olduğu durumlarda elastisite modülü aşağıdaki formül yardımıyla bulunur.

$$E_c = 0.043 \times K_1 \times Y_c^{1.5} \times \sqrt{f'_c} \text{ (AASHTO LRFD)} \quad (1.2)$$

Yoğunluğu 2320 kg/m^3 olan betonlar için elastisite modülü aşağıdaki gibi bulunur.

$$E_c = 4800 \times \sqrt{f'_c} \text{ (AASHTO LRFD)} \quad (1.3)$$

1.5.1.1. Betonun Basınç Dayanımı

Betonun basınç dayanımı betonun en belirgin özelliğidir. Tasarım sürecinde mühendisler tarafından en yaygın kullanılan tasarım kriteridir. Çeşitli sebepler basınç dayanımını betonun en önemli malzeme özelliği yapmaktadır. İlk olarak basınç dayanımının test edilmesi oldukça kolaydır, hava şartlarına dirençli, elastik modülü, gerilme dayanımı, beton karışımında belirli bir kalite seviyesine ulaşmak için, üç temel husus göz önünde bulundurulmalıdır: malzemelerin seçimi ve oranı, sertleştirme koşulları ve test şartnameleri.

Basınç dayanımı (f'_c), betonun kalitesini genel olarak en iyi şekilde gösteren bir özelliktir. İmalat sırasında taze beton basınca maruz kalacağından 28 günlük basınç dayanımı 40 MPa olması doğru olacaktır. Betonun temel bileşenleri Portland çimentosu, çeşitli derecelerde agregalar, su ve katkı maddeleri'dir. Beton, çimento ve suyla kimyasal reaksiyonu ile sertleşir ve güçlenir. Çimento/su oranı betonun dayanımı açısından önemli bir faktördür. Çok az su kullanılırsa, tüm çimentolar hidrasyona girmeyecek ve istenilen dayanım elde edilemeyecektir. Aşırı su kullanılması sertleşmiş çimento parçacıklarının dağılmasına sebep olur ve aynı şekilde istenilen dayanım elde edilmemiş olur. Su/çimento oranları 0.35 ile 0.40 arasında olması uygundur.

Betonun kürüde kaliteli beton üretmek için önemlidir. Kürleşmenin asıl amacı gereksiz nem kaybını önlemektir özellikle ilk birkaç gün içinde, nem kaybına ek olarak, kürleşme sırasında beton sıcaklığının kontrolü önemlidir.

Sertleşmiş betonun kalitesini artırmak için katkılar beton karışımlarına dahil edilir mikroskobik hava kabarcığı maddelerinin kontrollü bir yüzde ile dağıtılması donma-çözölmeye karşı dayanıklılığı artırır. Yerleştirme ve konsolidasyon işlenebilirliği artırır. Süper akışkanlaştırıcılar işlenebilirliği artırır, su/çimento oranlarını azaltır ve daha yüksek mukavemet sağlar.

1.5.1.2. Malzemelerin Seçimi ve Oranı

Beton farklı malzemelerin karıştırılması sonucu bir üründür, bu malzemelerin etkileşimi betonun basınç dayanımını etkiler. Malzemelerin seçimi ve oranı önemli bir etki yaratmaktadır. Aşağıdaki paragraflarda, en sık kullanılan malzemeler ve bunların betonun basınç dayanımında önemi verilmiştir.

1.5.1.3. Çimento Tipi

Diğer bileşenlere göre beton özellikleri üzerinde en fazla etkiye sahip olan malzeme çimentodur. Portland çimentosunu kireçli ve killi, ya da diğer silika, alümina ve demir oksit içeren malzemeleri birbirine karıştırarak, sıcaklıkta yakmak ve elde edilen klinkeri öğütmek suretiyle elde edilen bir malzeme olarak tanımlar.

1.5.1.4. Su Çimento Oranı

Herhangi bir karışımında su ve çimento oranı dikkate alınmalıdır. Betonun dayanımında su çimento oranı ters orantılı olarak gösterilmiştir.

1.5.1.5. Agregası

Betonun üretimine kullanılacak agreganın en yüksek tane çapı, kalıp en kesit boyutlarına, donatının arasındaki mesafeye bağlı olarak 20-25 mm olmalıdır. Agregalar beton hacminin % 60'ından fazlasını kapladığından ve en güçlü bireysel bileşen olduğundan, betonun son basınç dayanımını etkiler, ayrıca işlenebilirliği, ekonomiyi ve sürtünmeyi etkilemektedir.

1.5.1.6. Katkılar

Beton özellikleri, katkıların katılmasıyla artırılabilir. Bunlar arasında birkaç çeşit katkı vardır: su azaltıcılar, hava sürükleyiciler, zaman geciktiricileri vb. Sıkıştırma dayanımını arttırmak için en yaygın kullanılan katkı maddesi su azaltıcı veya süper

akışkanlaştırıcıdır, çünkü belirli bir işlenebilirlik için daha az kullanım sağlar. $CaCl_2$ (kalsiyum klorür) içermemesine dikkat edilmelidir.

1.5.1.7. Kür Durumu

Beton fazla suyu dışarı akıtığından ve bu su iklim koşulları nedeniyle buharlaşır, kürlenme işlemini geliştirmek için nemli bir ortam sağlanmalıdır. Yaygın uygulama, betonun yedi günden az olmamak üzere kürlenmesini önerir. Kürlenme süresi betonun son dayanımı ile doğru orantılıdır. Sertleşme süresi ne kadar uzun olursa, betonun dayanım gücü de o kadar yüksek olur.

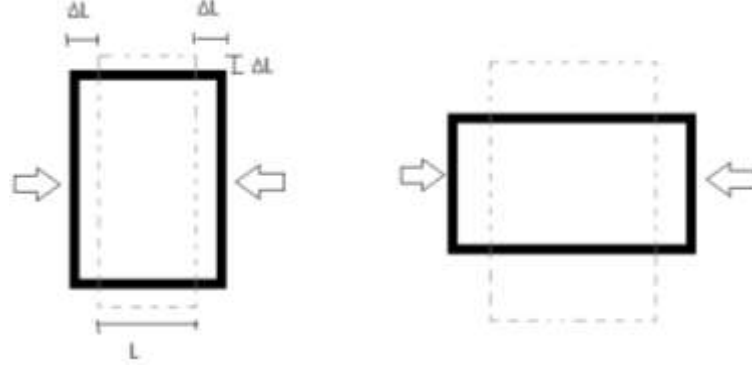
1.5.1.8. Betonun Büzülmesi

Beton gözenekli bir katı olduğundan, su içeriğinin azalması sonucunda büzülür. Betonun en yaygın kullanımı betonarme yapıların yapımında olduğu için, betonarme çeliğin dahil edilmesiyle yapıda gerilmelere neden olur. Bu gerilmeler betonun çekme dayanımından daha yüksek ise, yapının yapısal bütünlüğünü tehlikeye atan çatlaklar oluşacaktır.

Betonun büzülmesi, çimento macununun ve agreganın elastik özelliklerinden ve onların büzülmelerinden etkilenir. Ortamın bağıl nemi, kuruma süresi ve su çimentosu oranı da büzülmenin büyüklüğünü etkiler. Büzülme birçok farklı faktörden etkilendiğinden, doğru tahminlerin belirlenmesi zordur.

1.5.1.9. Poisson Etkisi

Poisson etkisi, bir malzemede sıkıştırıldığında veya gerildiğinde ortaya çıkan olguyu tanımlar. Bir yapı elemanı yüklendiğinde, bu eleman yüke dik yönde genişler veya daralır. Şekilde 1.4.' te görüldüğü gibi bu etki Poisson'ın oranı ile ölçülür. Bu yükler arasındaki dik ve paralel yükler arasındaki orandır. Eurocode'a göre bir betonarme döşeme için, Poisson oranı, levha'da çatlama olmadığında 0.2 ve levha kırıldığı anda sıfır olarak ayarlanmalıdır.



Şekil 1.4. Poisson Etkisi

1.5.1.10. Zamanla Basınç Dayanımı Gelişmesi

Standart olarak betonun 28 günlük basınç dayanımı dikkate alınır. Beton zamanla dayanım kazanan bir malzemedir. Beton basınç dayanımındaki artış, mukavemet ile ilgili diğer malzeme özelliklerini de artırır. Beton basınç dayanımındaki zamanla değişme arasındaki ilişkiyi CEB-FIP (1990) aşağıdaki gibi vermiştir;

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t)f_{cm} \quad (1.4)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (1.5)$$

Burada, f_{cm} 28 günlük basınç dayanımı, $f_{cm}(t)$ t zamanında beton basınç dayanımı, β_{cc} ise betonun yaşına bağlı katsayısı ifade etmektedir.

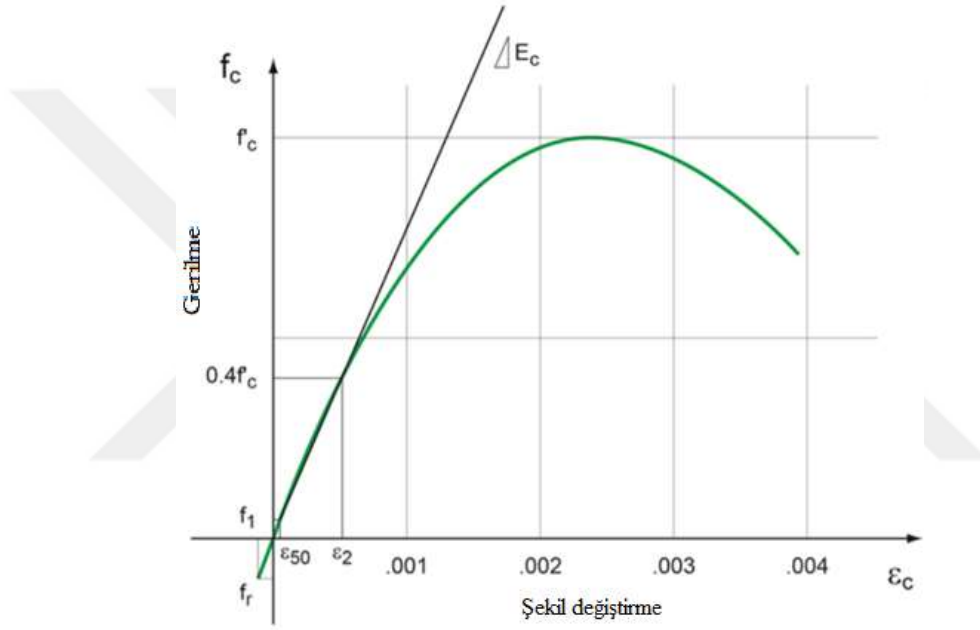
1.5.1.11. Betonun Çekme Dayanımı

AASHTO LRFD beton çekme gerilmesini iki farklı şekilde belirtmektedir: Bunlar Kırılma katsayısı ve doğrudan çekme dayanımı. Basınç dayanımı 103 MPa değerine kadar olan normal ağırlıktaki beton için kırılma katsayısı $f_r = 0,24\sqrt{f_c}$ olarak verilmektedir. Basınç dayanımı 70 MPa değerine kadar olan normal ağırlıktaki beton için doğrudan çekme dayanımı $f_r = 0,23\sqrt{f_c}$ bağıntısıyla ifade edilmektedir.

1.5.1.12. Elastisite Modülü

Malzemenin elastisite modülü (E_c), bir basınç veya çekme olayında Şekildeğiştirme ile gerilmenin oranıdır. Elastisite modülü, yapıların analizinde kullanılan rijitlik esaslı yöntemdir.

Şekil 1.5.' da beton için tipik bir gerilme ve şekil değiştirme eğrisi gösterilmektedir. Bu Şekilde gösterildiği gibi gerilme ile şekil değiştirme arasındaki ilişki oldukça non lineerdir.



Şekil 1.5. Betonun Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi

AASHTO LRFD (2012)'de betonun elastisite modülü için aşağıdaki denklemi vermiştir.

$$E_c = 33,000k_1w_c^{1.5}\sqrt{f'_c} \quad (1.8)$$

Burada, f'_c betonun 28 günlük basınç dayanımı, w_c betonun birim ağırlığı, k_1 ise agrega için düzeltme faktörünü ifade etmektedir.

Betonun elastisite modülü TS500'de yaklaşık olarak $E_{cj} = 3250\sqrt{f_{ckj}} + 14000$ MPa olarak verilmiştir.

1.5.2. Öngerme

Öngerme tekniği uzun yıllardan beri kullanılmaktadır. Birçok yapının stabilitesini temin etmek veya mukavemetlerini artırmak için yapının elemanlarına suni olarak bir takım iç kuvvetler tatbik olunmuştur (Bilge, 1975).

Betonla çeliğin arasındaki bağlantı sebebiyle beraber çalıştığı, çekme gerilmelerinin tamamı donatı tarafından ve basınç gerilmelerinin önemli bir bölümü beton tarafından karşılanmaktadır. Ancak betonun çekmede uzama kapasitesinin azlığı sebebi ile donatıda gerilmenin belirli bir değeri aştığı durumlarda betonda çatlaklar oluşmaktadır. Bu çatlakları karşılamak için kullanılacak olan donatıların artmasından dolayı ekonomik olmamaktadır. Açıklık büyüdükçe betonarme kirişlerin kendi ağırlığı sebebiyle ekonomik olmamaktadır aynı zamanda deprem etkileri ağırlıkla beraber artmaktadır, çatlaklar kabul edilebilecek sınırlar içinde olsalar bile donatı korozyona uğramaktadır ve yapının ömrünü azaltmaktadır. Bu mahsuru gidermenin, işletme durumunda söz konusu olabilecek tüm yüklenme durumlarında taşıyıcı sistemin hiçbir kesitinde hiç çekme gerilmesinin olmaması veya olması durumunda çatlama olmayacak kadar küçük olması ve basınç emniyet gerilmesi aşılmayacağını temin eden bir gerilme durumu suni veya yapay olarak verilen gerilmelerdir. Çekme gerilmesinin olmaması için donatıyı germek suretiyle verilen basınç gerilmesinin yükün kesitin alt tarafında verdiği çekme gerilmesinin mutlak değerine eşit olması gerekmektedir. Burada önemli olan diğer bir konu, yükün verdiği gerilme durumu ile yapay olarak yaratılmış gerilmenin yapı ömrü boyunca sabit kalmasıdır, bu bağlamda gerilme kayıpları önemli bir rol oynamaktadır ve hesaba katılmak zorundadır.

Betonun zamanla rötresi (büzülmesi) ve sabit basınç altında zamanla sünmesi(kısalması) sebebiyle kablo uçları arasındaki mesafe küçülür ve donatıdaki gerilme öngerme kablolarının ankre edildikten sonra bu donatının gerilmesi sabit kalmaz azalır. Çelik tellerinin uzaması (rölaksasyonu) sürtünme ve zamana tabi gerilme kayıpları vardır ve bunlar da ilave bir kayba sebep olurlar, bunlar düşüldükten sonra geri kalan gerilme artık daimi gerilme oldukları söylenebilir.

Şimdi şu tarifi verebiliriz, dış yüklerin etkimesinden önce veya onların bir kısmının etkimesi ile beraber yaratılan ve taşıyıcı sisteme dış yüklerden gelecek gerilmelerin maksada uygun şekilde değiştiren yapay ve sürekli bir gerilme durumuna öngerilme durumu denilir (Bilge 1975).

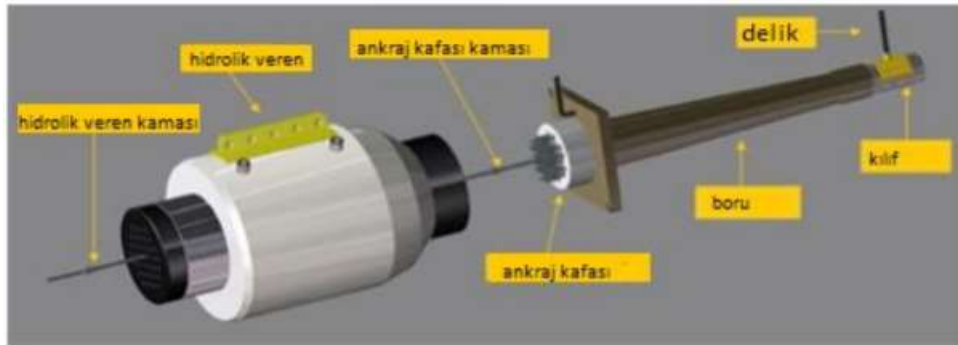
Bir beton elemana p_i gibi bir öngerilme kuvveti tatbik edilmesi durumunda, yalnızca öngerilme varken gergideki normal kuvvet; $N=p_i$ Dış yüklerin tesiri altındayken; $N=p_i - p$ halini alır. Gerginin kesit alanı F ile gösterilirse gerilme, yalnızca öngerilme varken, $\sigma = \frac{p_i}{F}$ olmaktadır. Şayet dış yüklerin etkisi altında ise $\sigma = \frac{p_i - p}{F}$ olmaktadır (Bilge 1975).

1.5.2.1. Öngerilme Teknikleri

Bir beton elamanına öngerilme, ön çekme ve ard çekme olarak uygulanabilir. Metodlar arasındaki ayırt edici fark betonun, tendonlara çekme kuvveti uygulanmasından önce mi sonra mı döküleceğidir. Öngerilme belli bir kuvvetle yüksek dayanımlı çeliğin çekilip sabitlenmesi ve bu kuvvetin betona aktarılması ile meydana gelmektedir. Çeliğin gerilme işlemi beton dökülmeden önce ise öngerilme, beton dökülüp ondan sonra germe işlemi yapılıyor ise ardgerilme adı verilmektedir. Öngerme işleminde çeliğe germe verilerek çekilir ve sabitlenir. Beton dökülür yeteri dayanımı kazandıktan sonra kesilerek gerilmeler betona aktarılır. Ardgerme işlemi en kesit için yeteri sayıda kılıflar bırakılır ondan sonra beton dökülür beton dayanımı kazandıktan sonra kılıflardan öngerme çeliği geçirilerek çekilip kitlenir böylece ard gerilme uygulanmış olur (Bilge, 1975).

1.5.2.2. Ardgerme

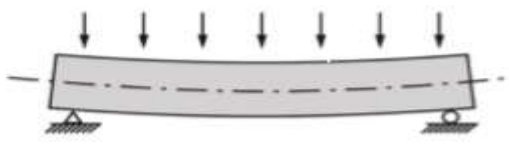

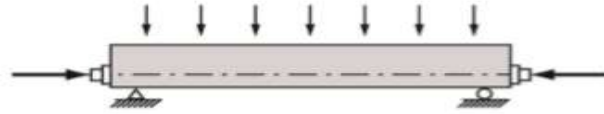
Ardgerme, beton döküldükten ve güçlendikten sonra tendonların gerdirilmesi ile yapılır, dökümden önce tendonlar için kılıflar yerleştirilir, Beton sertleştğinde, tendonlar bir veya her iki ucundan hidrolik kriko ile çekilir. Şekil 1.6' de ardgerme ekipmanı gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Ardgerme ekipmanı (Arslan 2018)

Tendonlar korozyona uğramaması için kılıflar çimento şerbetiyle için doldurulur. Çimento şerbeti standartlara uygun olması gerekir. Öngerilme, diğer yüklerden kaynaklanan gerilmeleri dengelemesi için toronlar vasıtasıyla betona aktarılan yüküdür. Tablo 1.1’ de basit açıklıklı bir kiriş için öngerilme kavramını gösterilmektedir.

Tablo 1.1. Öngerilme kavramı

Uygulanan yük altında kiriş	
Öngerilme uygulandığında	
Tüm yüklerin toplamı	

1.5.3. Öngerilmeli Beton Elemanları

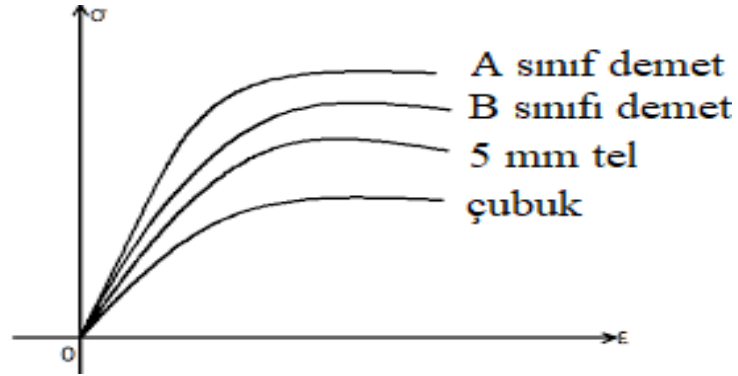
TS 3233’göre öngerilmeli betonu, elemana gelecek yüklerin etkilerini çeliğin gerilmesiyle istenilen şekilde dengelendiği betondur diye tarif etmektedir. Aşağıda öngerilmeli betonda kullanılan malzemeler tanımlanmıştır. Öngerilme ve ardgerme çelikleri sıcak haddeleri soğutulur çenelerden geçirilir ve soğuk çekme uygulandıktan sonra çaplarını istenilen boyutlara indirgenir. Öngerilme işleminde kullanılacak çelik; tel, toron veya halatlar şeklinde olabilir. Öngerilme telleri genellikle 2, 3, 4, ---, 7 mm çaplarında üretilebilmektedir. Öngerilme çeliklerin çekme gerilmeleri $f_s = 1600 - 1800$ MPa arasında değişmektedir (URL-1). Öngerilme toronu veya halatları genellikle 2, 3, ya da 4 mm çapındaki tellerin birleşmesiyle oluşmaktadır. Genellikle 7 telli olarak kullanılmaktadır. Kılıf, ard germeli sistemlerde donatının geçmesi için betonun içerisinde bırakılan metal veya plastik borudur. Öngerilme yönteminin temel bileşenleri; yüksek mukavemetli çelik tel veya halat, çekme elemanları ve çelik tel ve halat bağlantı elemanları şeklinde sıralayabiliriz.



Şekil 1.7. Öngerme tel ve halatı (URL-2)



Şekil 1.8. Ögerme halat detayları (URL-1)



Şekil 1.9. Öngerme çeliklerinin tipik gerilme – şekildeğiştirme eğrisi (URL-1)

TS 3233'e göre öngerme tel ve tornun mekanik özellikleri tablo 1.2 ve Tablo 1.3' de verilmiştir.

Tablo 1.2. Öngerme telinin mekanik özellikleri

Anma çapı (mm)	Minimum kopma dayanımı (MPa)	Minimum akma %1 uzamaya karşılık	Kopmada birim uzama (%)
1.5 ile \leq 3.0	1800	Kopma dayanımının %80'1 olarak kabul Edilir.	4
3.0 ile \leq 4.0	1700		4
4.0 ile \leq 12.0	1500		4

Tablo 1.3. Toronların mekanik özellikleri

Tel çapı (mm)	Tel sayısı	Minimum kopma dayanımı (MPa)	Minimum akma %1 uzamaya karşılık	Kopmada birim uzama (%)
2-3	2 ve 3	1600	Kopma dayanımının %80'1	3.5
2-4	7	1600		3.5

Kullanılan çubukların çapları öngerilme işlemlerinde 5 mm ile 40 mm arasında değişmektedir yaygın olarak 8 mm lik çapa ve üzerine sahip çubuklar yaygın olarak kullanılmaktadır. Tablo 1,4' de çubukların mekanik özellikleri verilmektedir (URL-1).

Tablo 1.4. Çubukların mekanik özellikleri

Çap	Minimum kopma dayanımı (MPa)	Minimum akma dayanımı	Kopmada birim uzama (%)
7-32	1000	Kopma dayanımının %90	4

TS EN 1992-1-1'e göre öngerilme kablosu olarak kullanılacak olan teller, çubuklar ve halatlarla için bazı kurallar verilmiştir. Buna göre öngerilme kabloları korozyona karşı

hassas olmalıdır. TS EN 1992-1-1'e göre çeliklerde çekme dayanımı, %0,1 kalıcı uzamaya karşılık gelen akma gerilmesi ve en büyük yükteki uzama oranı karakteristik değerlerdir. Bu değerler f_{pk} karakteristik çekme dayanımı $f_{p0,1k}$, %0,1 kalıcı uzamaya tekabül eden karakteristik akma gerilmesi, ϵ_{uk} en büyük yükteki uzama oranını göstermektedir.

1.5.4. Öngerimli Yapılarda Hesap Aşamaları

Öngerilmeli yapılarda hesap aşamaları; aktarma anı, servis anı ve limit durumu olarak belirtilmiştir.

1.5.4.1. Servis Anı

Sistemde ani ve zamana bağlı tüm gerilme kayıpları oluşmuştur ve sistem stabil hale gelmiştir, elemanın oluşabilecek maksimum yüke maruz kaldığı aşama.

1.5.4.2. Aktarma

$t=0$ anında halatlardaki öngerilme kuvvetinin betona aktardığı aşama.

1.5.4.3. Limit Durumu

Bu durumda yükler ilgili yük katsayıları ile çarpılarak eğilme ve kesmede taşıma gücüne göre kontrol yapılır. Bu durum ile elemanda genellikle karşılaşılmamasına rağmen bir sınır durumu olarak kontrol edilmelidir.

1.5.5. Öngerilemli Yapıların Emniyet Gerilmesi

Beton ve öngerme çeliğin aktarma safhasında ve işletme safhasında emniyet gerilmesi farklıdır. Aktarma anındaki emniyet gerilmesi genellikle servis dönemindeki emniyet gerilmesinden daha yüksektir. Öngerme yöntemine bağlı olarak ani şekil değişimi, kısa ve uzun dönem içerisinde kayıplar oluşmaktadır.

AASHTO'ya göre; aktarma anında basınç gerilmesi $0.6f_{cjk}$, Çekme gerilmesi $0.623\sqrt{f_{cjk}}$, servis anı için ise basınç gerilmesi $0.40f'_c$, çekme gerilmesi $0.50\sqrt{f'_c}$ bağıntılarıyla ifade edilmektedir.

TS 3233'göre; aktarma anında basınç emniyet gerilmesi (σ_{1de}), Prefabrik elemanlar için $0.60 f_{cjk}$ (kg/cm^2) Şantiyede dökülen elemanlar için $0.55 f_{cjk}$ (kg/cm^2), çekme emniyet gerilmesi için ise Kenar çekme gerilmesi $0.80 \sqrt{f_{cjk}}$ (kg/cm^2), Basit mesnetli kirişlerin mesnet bölgeleri $1.6 \sqrt{f_{cjk}}$ (kg/cm^2), bağıntılarıyla ifade edilmektedir. Servis anında; bu safhada bütün dış yükler işletme değerleri ile ve empoze edilmiş deformasyonlar ve öngerme kuvvetinin daimi değeri yapıya etkimektedir. TS 3233 de $\sigma_{1ge} = \sigma_{2pe}$, $\sigma'_{2ge} = \sigma'_{1pe}$ olarak kabul edilmiştir (Özden, vd. 1994). Basınç emniyet gerilmeleri servis safhasında; basınç emniyet gerilmesi Köprülerde $0.40 f_{ck}$, Diğer yapılarda $0.45 f_{ck}$, Çekme emniyet gerilmesi ise anolu elemanlarda sıfırdır. Beton için gerek basınç gerekse çekme için emniyet gerilmesi olarak verilen sınır gerilmeler, kesitin çatlamadığı kabulü ile bulunan kenar basınç ve kenar çekme gerilmeleri içindir (Özden, vd. 1994).

Öngerme çeliği için Germe esnasında $0.80 f_{pk}$ ancak bu değer çelik imalatçısının verdiği değeri aşmaz, Aktarmadan hemen sonra $0.70 f_{pk}$ bağıntılarıyla ifade edilir.

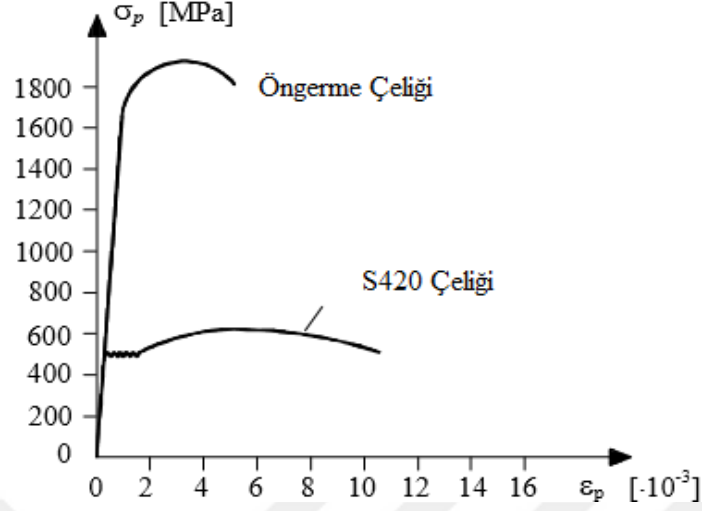
Burada f_{pk} çeliğin kopma karakteristik değeridir.

1.5.6. Öngerilmeli Beton Malzemeleri

Öngerilmeli beton teknolojisinde kullanılan malzemeler diğer betonarme teknolojisinde göre farklıdır. Bu yöntemde yüksek dayanımlı beton ve çelik kullanılmaktadır ve bu betonların diğer betonlara nazaran zamana bağlı şekil değiştirme yani rötresi %70 daha azdır. İmalat sırasında öngerilme kablolarının deplasmanına izin verilmiştir ve bu eksi yönde etki eder.

1.5.6.1. Elastikte Modülü

Şekil 1.10'de bir telin nihai gücünün yaklaşık yüzde 90'unun yüklenmesine kadar Gerilme-Şekil değiştirme diyagramını göstermektedir. Gerilme-Şekil değiştirme ilişkisi yaklaşık olarak doğrusaldır. Bu bölgedeki öngerilme halatların gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin eğimi, elastik sınır içindedir.



Şekil 1.10. Öngerme çeliği ve S420 çeliğin gerilme-şekildeğiştirme grafiği (Hamad, 2018)

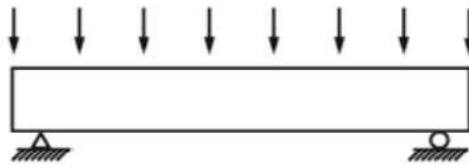
1.5.7. Öngerilmeli Bir Kirişte Basınç Diyagramı

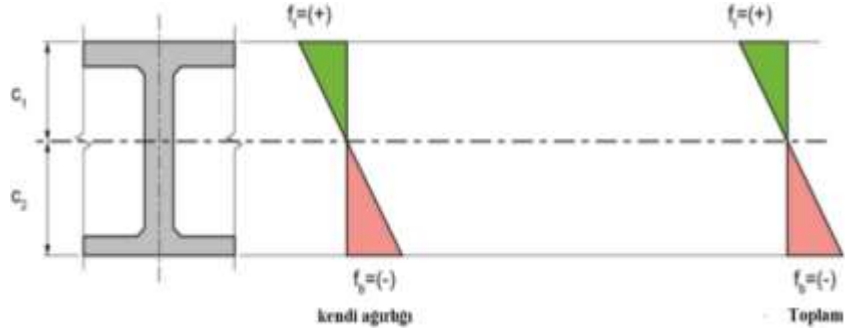
Kendi ağırlığının etkisi altında basit bir şekilde desteklenmiş beton kirişi elle alalım. Üst ve alt gerilmeler elastik kiriş teorisine göre incelenir. Kirişin üst kısmı basınca maruz kalırken alt kısmı ise çekmeye maruz kalır. Eğer çekme gerilmesinin değeri kırılma modülünü aşarsa, kiriş çatlayabilir ve kirişin arızalanmasına neden olabilir (Şekil 1.11).

$$f_{üst} = \frac{M_{sw} \times c_1}{I} \quad (1.9)$$

$$f_{alt} = -\frac{M_{sw} \times c_2}{I} \quad (1.10)$$

Burada, M_{sw} sabit yükten dolayı oluşan eğilme momenti, c_1 ve c_2 sıfır çizgisinden üst ve alt mesafesi, I ise atalet momentini ifade etmektedir.

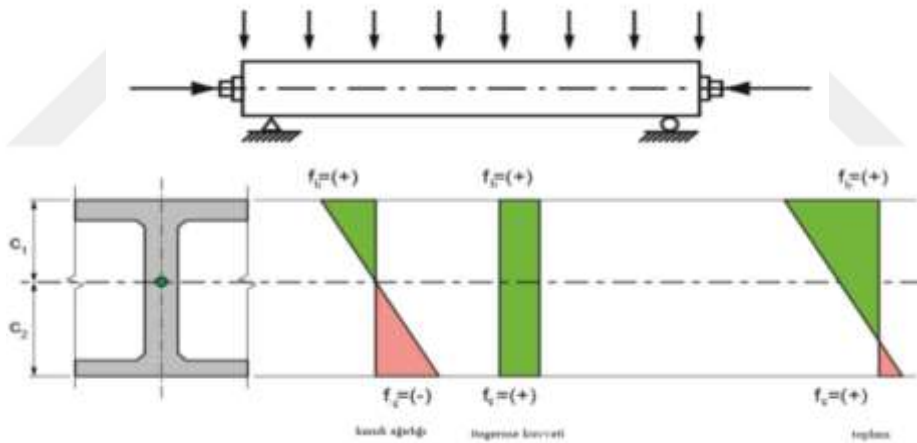




Şekil 1.11. Basit kirişin kendi ağırlığı altındaki davranışı

Eğer aksenal bir öngerme kuvveti (f_{pt}) kirişin ağırlık merkezinden uygulanırsa, görüldüğü gibi üst kısımda basınç değeri artarken alt kısımda azalmaktadır (Şekil 1.12).

$$f_{üst} = f_{alt} = \frac{f_{pt}}{A} \quad (1.11)$$



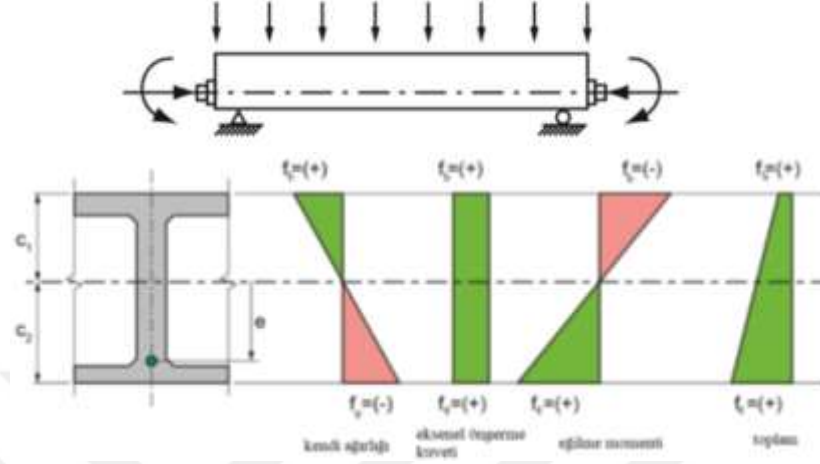
Şekil 1.12. Kendi ağırlığı ve aksenal öngerme kuvveti etkisi altında gerilme dağılımı

Öngerme kuvvetinin etkisini artırmak için öngerme kuvveti ve eğilme momentini eksantrik merkezden uygulanırsa;

$$f_{top} = -\frac{fexc1}{I} \quad (1.12)$$

$$f_{alt} = -\frac{fexc2}{I} \quad (1.13)$$

Burda, f_e öngerme kuvveti, c_1 ve c_2 sıfır çizgisinden üst ve alt mesafesi, I ise atalet momentini ifade etmektedir.



Şekil 1.13. Kendi ağırlığından, aksenal ve öngerme kuvvetin etkisi altında gerilme dağılımı

1.6. Öngerilme Kayıpları

Bir elemana öngerme uygulandıktan sonra bazı kayıplar ortaya çıkmakta ve bu kayıplar iki grupta incelenmektedir. Birincisi kısa dönem kayıpları, diğeri ise uzun dönem kayıplarıdır.

Öngerilme kuvveti, Öngerme uygulanan bir elemanda zamanla azalma eğilimindedir. Bu azalma betonun sünmesi, büzülmesi ve öngerilme çeliğinin yüksek gerilmesi altında gevşemesiyle oluşur. İlk başlarda bu kayıplar hızlı ilerler ve bir süre sonra yavaşlar. Bir süre sonra ise sabit hale gelir. Bu durum etkin öngerilme kuvveti (p_{eff}) olarak isimlendirilir.

1.6.1. Kısa Dönem Kayıpları

1.6.1.1. Ankraj Kayıpları

Öngerme işleminde iki tür ankraj kullanılır; bunlar aktif ve pasif ankrajlardır. Aktarma anında, veren basınç çubuğu erkek kamayı dışı kama içine itip kabloları iki kama arasında sıkıştırdıktan sonra veren kablolardan çözülür ve aktarma yapılmış olur. Tam bu sırada erkek kamanın çok iyi itilememiş olması yanıl basınçlar yüzünden erkek kamanın daralması ve

dişi kamanın genişlemesi sonucu, kablo ucu içeri doğru kayar ve erkek kama ile arasındaki sürtünme kuvvetleri ile erkek kamayı da içeri doğru çeker, erkek kama gömülür ve ankraj tamamlanır. Bu kayıplar genellikle uygun olmayan ankarajlarının kullanılması, ankraj kilit sisteminin kullanılan aparatların dişlerinin uygulanacak öngerme kuvvetinin karşılayacak düzeyde olmaması sebebiyle oluşur.

1.6.1.2. Beton Elastik Kısılması Nedeniyle Oluşan Kayıplar

1.6.1.2.1. Ardgerimeli Elemanlarda

Ardgerimeli elemanlarda kabloların tamamının aynı anda çekilmesi anında herhangi bir elastik kısılma oluşmadığı kabul edilmektedir. Fakat genellikle kablolar aynı anda çekilmemektedir. Bundan dolayı bazı kayıplar oluşmakta olup, $\Delta p = n \times \varepsilon \times A_{PS}$ bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada Δp öngerme kaybı, n çekilen halat sayısını, ε şekil değiştirmeyi ve A_{PS} ise öngerme donatısının kesit alanını göstermektedir.

1.6.1.3. Sürtünme Kayıpları

Ard çekmeli sistemlerde donatıyı çekerken sürtünmeden dolayı donatının çekme yapılan ucundan uzaklaştıkça donatıdaki gerilmede bir azalma oluşmaktadır. Bu azalma bir öngerme kayıp olarak değerlendirilir. Öngerme sistemlerde ise böyle bir kayıp meydana gelmemektedir.

Ardgerme sistemlerde kayıpların önemli bir bölümü sürtünme kayıplarından oluşmaktadır. Bu kayıplar kablonun şekline ve yerel eğriliklere de bağlıdır. Önlenemeyen bu kayıplar için deneysel çalışmalar ve gözlemler sonucu bazı yaklaşık değerler verilmiştir, Yönetmenliklerce bu değerler Tablo 1.5' de özetlenmiştir.

Tablo 1.5. Sürtünme kayıpları

Aderans türü		Donatı türü	Düzensizlik katsayısı	Sürtünme katsayısı
Spiral kılıf içinde enjeksiyonlu öngerme çeliği		Çelik teller	0.003-0.005	0.15-0.25
		Çubuklar	0.0003-0.002	0.08-0.30
		7 telli toron	0.015-0.006	0.15-0.25
Aderanssız öngerme çeliği	Mastik kaplı	7 telli toron	0.003-0.006	0.05-0.15
	Önceden yağlanmış	7 telli toron	0.001-0.006	0.05-0.15

Yerel eğrilikten oluşan kayıplar $d_p = K \times P \times d_x$ bağıntısıyla ile belirlenmektedir; burada d_p , d_x uzunluğu için öngerme kaybı, K yerel eğrilik katsayısı (kablodan), d_x sonsuz küçük uzunluğu ve P ise öngerme kuvvetini göstermektedir.

Sürtünme kaybı yerel eğrilikten dolayı kayıplar toplandığında $dP = K \times P \times d_x + \mu \times P \times d_a$ bağıntısıyla elde edilir. Burada d_p , d_x uzunluğu için öngerme kaybı, K yerel eğrilik katsayısı (kablodan), d_x sonsuz küçük uzunluğu ve P ise öngerme kuvvetini göstermektedir.

TS 3233 'e göre eğer ($\mu a + kl \leq 0.3$) olması durumunda,

$$p = p_x(1 + \mu a + kl) \quad (1.14)$$

olarak hesaplanabileceği belirtilmektedir.

1.6.2. Uzun Dönem Kayıplar

Betona aktarma bitikten sonra zamana bağlı olan deformasyonlar başlar ve bunlar sünme ve rötredir. Bu iki deformasyon ve gerilmiş bir çelik telin kendiliğinden boyu uzamış gibi gevşemesi olan rölaksasyon olayı sebebiyle her iki sistemde zamana tabi olan fakat sonuç değerlere asimtotik yaklaşan yeni gerilme kayıpları oluşur.

1.6.2.1. Betonun Sünmesinden Doğan Gerilme Kayıpları

İster ön germeli ister ard germeli sistem olsun, aktarma anından itibaren betona, sabit basınç altında zamana bağlı boy kısalması şeklinde gelişen sünme olayı başlamaktadır.

Sünme boy kısalması ACI-ASCE'ye göre; $\Delta f_{cr} = K_{cr} \times \frac{E_{PS}}{E_c}(f_{cs} - f_{csd})$ bağıntısıyla elde edilmektedir. Burada K_{cr} bir katsayıdır öngerilmeli elemanlarda 2, ardgerilmeli elemanlarda 1,60 alınabilir. f_{cs} Öngerme yükü aktarıldıktan sonra betona oluşan gerilme ve f_{csd} ise Öngerme uygulandıktan sonra sabit yük uygulamasıyla betona oluşan gerilmeleri göstermektedir.

TS 3233' e göre yaklaşık bir yöntem sünme kayıp değerleri için önerilmektedir. Bu değerler betonun karakteristik basınç dayanımı en az 35 MPa ve öngerme elemanları için 3-5 gün, ard germe elemanlar için 7-14 gün sonrası için verilen değerlerdir. Bu değerler öngerilmeli elemanlar için 48×10^{-7} ve ardgerilmeli elemanlar için 36×10^{-7} 'dir. Beton kalitesinin daha düşük olduğu durumlarda, ortalama değerler $\frac{350}{f_{ck}}$ ile çarpılmalıdır. Burada f_{ck} betonun karakteristik basınç dayanımıdır.

1.6.2.2. Betonun Rötresinden Doğan Gerilme Kaybı

Betonun rötresi, yükten bağımsız ve betonun su kaybından meydana gelen ve donatısız betonda her doğrultuda aynı birim boy kısalması şeklinde ortaya çıkan ve zamanla büyüme yönünde değişen bir şekil değiştirme olduğu bilinmektedir. Agregası tipi, çimento tipi, kür süresi ve tipi rötreyi etkilemektedir. Daha kesin hesaba gerek duyulmadığı durumlarda Tablo 1.6' te özetlenen değerler kullanılabilir.

Tablo 1.6. Rötme birim şekil değiştirme değerleri (TS3233)

	Kuru	Normal	Nemli ortam
Ön çekim elemanlar	500×10^{-6}	300×10^{-6}	100×10^{-6}
Ard çekmeli elemanlar	350×10^{-6}	200×10^{-6}	70×10^{-6}

1.6.2.3. Çeliğin Gevşemesi Nedeniyle Gerilme Kaybı

Çelik bir tel veya kablo gerilip uçlarından sabit iki nokta arasında bağlandığında zamanla bir gevşemeye uğradığı ve bunun sonucu donatının gerilmesinde bir azalma olduğu görülmektedir. Bu azalma donatının ön germesine ve gerilme zamanına bağlıdır. Öngerme çeliklerinin gevşeme özelliği ve gevşemeden oluşan sonuç gerilme kayıpları çelik üretici firmalar tarafından belirlenmektedir. TS 3233' de aktarmadan hemen sonra donatı gerilmesinin karakteristik çekme mukavemetinin 70%'ini aşmadığı durumlarda, gerilme kaybının öngerme gerilmesinin 8%' ini ve 50%' sini aşmadığı durumlarda 6%' sı kadar alınabileceği belirtilmiştir.

1.7. Karayolu Köprülerine Etkiyen Yükler

Öngereme yüküne ek olarak, köprünün kendi ağırlığı, sabit yükü, hareketli yük, rüzgar yükü, ve deprem yüküdür.

1.7.1. Zati Ağırlığı

Yapının kendi ağırlığı malzeme birim hacim ağırlığına bağlı olarak SAP2000 paket programıyla otomatik olarak hesaplanmaktadır.

1.7.2. Sabit Yük

Yapının kendi ağırlığı yanında asfalt ağırlığı, korkuluk, yaya kaldırımı vb. hesaplamalar sonucunda yaklaşık 30 kN/m olarak elde edilmiştir.

1.7.3. Hareketli Yükler

Taşıt yükünü temsilen köprünün üzerinde, köprünün tabliyesine yayılı olarak düşey yönde 15 kN/m olarak alınmıştır. Hareketli yükler elverişsiz yükleme durumuna bağlı olarak dikkate alınmıştır.

1.7.4. Öngerme Yüğü

Öngerme halatların her iki ucundan çekme suretiyle germe uygulanmaktadır. Fakat farklı germe uygulamaları da mevcuttur. İkinci bölümde halatların teknik özellikleri ve halatların öngerme yükünü yönetmenliklere göre hesaplanmaktadır.

1.8. Karayolu Köprülerinin Doğrusal Elastik ve Doğrusal Elastik Olmayan Analiz Yöntemleri ile Değerlendirme

Yönetmenliklerde deprem etkisi altındaki yapı sistemlerinin davranışı ve hasar sınırlandırılması için birtakım ilkeler esas alınmıştır. Bu konu ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. İki çeşit tasarım ve değerlendirme yöntemi standartlarca kabul görmüştür: Dayanıma göre tasarım (DGT) ve değerlendirme ikincisi şekil değiştirmeye göre tasarım (ŞGDT) ve değerlendirmedir. Şekil değiştirmeye göre tasarım ve değerlendirme yeni bir yaklaşım yöntemi olarak doğrusal analiz yerine doğrusal olmayan analiz yöntemi kullanılmaktadır.

1.8.1. Deprem Etkisi Altında Performans Değerlendirilmesi

Köprülerin deprem etkisi altında performans değerlendirilmesi için genel olarak iki kriter kullanılmaktadır. Birinci kriter, yapıya etki eden deprem yükleri, yönetmenliklerde öngörülen seviyelere ulaştığında yapının istenilen performans, şekil değiştirme ve yer değiştirme bakımından karşılaştırılması yapılmaktadır. İkinci kriter, belirli bir deprem etkisi altında yapıda öngörülen yer değiştirmeye ulaşıldığında yapının öngörülen performansa sahip olup olmadığı karşılaştırılır.

Genel olarak deprem yüküne maruz yapıların davranışı doğrusal elastik davranış esasına dayanmaktadır. Doğrusal elastik yönteminde yapı sistemlerinin deprem etkileri altında gerçek performans düzeyi kesin olarak hesaplanamamaktadır. Doğrusal elastik yöntemine bağlı analizler önemli ölçüde kolaylık sağlaması ve yapının elastik davranışını iyi bir şekilde sonuç vermesine karşı, yapıların göçme mekanizmasının belirlenmesine ve elastik ötesi davranışını kısmında yetersiz kalmaktadır.

Depremlerde oluşacak olan hasar ve büyük ölçüde ekonomik kayıplar sonucunda depreme dayanıklı yapı tasarımında performansa göre tasarım ve değerlendirme analizinin

önemi ortaya çıkmaktadır. Bu yöntemde göre tasarım ve değerlendirme yapının doğrusal olmayan davranışının belirlenmesi gerekir. Bunun için kullanılan yöntemler doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemleri ve doğrusal olmayan statik artımsal itme (Pushover) analiz yöntemleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Ganbat, 2008)

Doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemleri, bu yöntemde göre yapının doğrusal olmayan davranışı gerçeğe çok yakın bir sonuç vermektedir. Ancak bu yöntem zaman alıcı, çok karmaşık ve çok sayıda deprem kaydı gerektiği için uygulamada pratik olmamaktadır. Bu sebeplerden dolayı doğrusal olmayan artımsal itme analiz yöntemleri devreye girmektedir.

Doğrusal olmayan statik artımsal itme analiz yönteminde deprem yükleri kat seviyelerine yatay yükler ile zorlanmaktadır. Uygulamasında etki eden yatay yükler aralarında oran sabit kalacak şekilde artırılmakta ve belirli bir göçme veya yer değiştirmeye ulaşıncaya kadar yük-tepe nokta yer değiştirme ilişkisi belirlenmektedir. Kapasite eğrisi (yük-tepe nokta yer değiştirme) sayesinde, yapıda veya yapı elemanlarında oluşabilecek hasarlar elde edilebilmekte. Yapıda zayıf elemanlar ve bunların gerçekleşme kısımları, yapının göçme ve göçme anına ait limit yük değeri ve yer değiştirme miktarı aynı zamanda deformasyon talepleri gösterilebilmektedir. Aynı zamanda deprem yükleri altında kendisinden beklenen performans seviyesine ulaşmış ulaşmadığı kontrol edilebilmektedir (Ganbat, 2008).

1.8.1.1. Dayanıma Göre Performans Değerlendirilmesi

Bu yöntemde köprü boyutlarının belirlenmesinde sisteme etki eden yük dikkate alınmaktadır. DGT yönteminde elastik deprem yükleri veya elastik ötesi sünük davranışların dikkate alınarak azaltılan eşdeğer kuvvetler altında dayanımların yeterliliğinin sağlanıp sağlanmadığı dikkate alınır (TBDY-2018).

AASHTO, 2012'ya göre 475 dönüş periyodu 150 yılda %10 aşılma olasılığı olan depremin esas alınması ve R katsayılarının kullanılması önerilmiştir.

1.8.1.2. Şekil Değiştirmeye Göre Performans Değerlendirilmesi

Bu yöntemde belirli seviyedeki deprem yer hareketi için taşıyıcı sistemlerdeki hasarlar sayısal olarak belirlenir ve bu hasarlar kabul edilebilir hasar limitlerinin altında kalıp

kalmadığı belirlenir. Kabul edilebilir hasar düzeyleri, çeşitli büyüklükte deprem etkisi altında yapıları için kabul edilen hedef performans seviyeleri ile çakışacak seviye olması gerekmektedir. Büyük deprem altında eleman seviyesine oluşması beklenen deprem hasarları genellikle doğrusal davranış göstermemektedir. Depremden sonra gerçekleşecek deformasyonlar doğrusal olmayan şekil değiştirmeye denk gelmektedir. Köprülerin çeşitli deprem düzeylerinde uygulanacak tasarım yöntemleri Tablo 1.7 da verilmiştir (TDBY-2018).

Tablo 1.7. Çeşitli köprüler için deprem seviyelerinde kullanılacak tasarım yöntemleri

Yapı sınıfı	Deprem Düzeyi (D1)	Deprem Düzeyi (D2)	Deprem Düzeyi (D3)
Özel	-	DGT	ŞGDT
Normal	DGT	ŞGDT	-
Basit	-	DGT	-

1.8.2. Deprem Hasar Performans Düzeyleri

Performans düzeyleri, belirli bir deprem etkisi altında yapıda meydana geleceği öngörülen hasar durumlarının miktardır. Bu sınır durumlar can güvenliği ve yapıdaki yapısal olan veya olmayan elemanlardaki fiziksel hasar aynı zamanda depremden sonra yapının kullanabilip kullanamadığı durumlara bağlı olarak belirlenir. Köprülerde esas alınacak dört farklı performans düzeyinden oluşmaktadır. Şekil değiştirmeye ve dayanıma göre tasarım kapsamında, dört farklı deprem düzeyi altında aşağıda tanımlanan performans düzeylerinin gerçekleşmesi beklenmektedir:

Kesintisiz Kullanım (K.K.) Performans Düzeyi; depremden sonra yapı elemanlarında hasar durumu neredeyse ihmal edilebilir seviyelerde olup minimum hasarlara izin verilmekte olup depremden hemen sonra bu yapıların hizmete girmesi ve köprünün kullanım düzeyine herhangi bir aksaklık oluşmamaktadır.

Sınırlı Hasar (S.H.) performans Düzeyi; depremden sonra yapı elemanlarında önemli derecede doğrusal olmayan deformasyona izin verilmekte ancak öngörülen bu hasarlar yapının stabilitesini etkilemeyecek seviyede olup kısa bir süre zarfında onarılabilir düzeye olması öngörülmektedir.

Kontrollü Hasar (K.H.) Performans Düzeyi: depremden sonra yapı elemanlarında önemli derecede hasar meydana gelmektedir uzun bir yapıda hizmetler aksamaktadır.

Göçmenin Önlenmesi (G.Ö.) Durumu; depremden sonra yapı işlevi kayıp etmekte ve yapıda göçme oluşmaktadır. Yönetmenlikte çeşitli deprem düzeylerinde hedeflenen performans düzey tablosu verilmektedir (Tablo 1.8).

Tablo 1.8. Deprem hasar performans düzeyleri

Deprem yer hareketi düzeyi	KÖS = 1	KÖS = 2	KÖS = 3
DD3 Deprem Düzeyi	-	KK	KK
DD2 Deprem Düzeyi	KK	-	-
DD1 Deprem Düzeyi	KH	GÖ	-

1.8.3. Deprem Yer Hareketleri Düzeyleri

Yönetmenliğe göre DD-1, DD-2, DD-2a, DD-3 olmak üzere dört tür deprem düzeyleri verilmektedir.

DD-1 Deprem Düzeyi; Yapıların maruz kacağı en şiddetli deprem düzeyini ifade etmektedir. Çok nadir olarak meydana gelen bu yer hareketi 50 yılda aşılma olasılığı %2 buna karşı gelen tekrarlama periyodu 2475 yıldır.

DD-2 Deprem Düzeyi; Bu yer hareketi düzeyi standart tasarım deprem düzeyi olarak bilinir. Bu yer hareketi 50 yılda aşılma olasılığı %10 buna karşı gelen tekrarlama periyodu 475 yıldır.

DD-2a Deprem Düzeyi; Bu deprem yer hareketi düzeyi sık olarak meydana gelmektedir. Bu yer hareketinin 50 yılda aşılma olasılığı %30 buna karşı gelen tekrarlama periyodu 144 yıldır.

DD-3 Deprem Düzeyi; Bu yer hareketi düzeyi çok sık deprem düzeyini nitelendirmektedir. Bu yer hareketinin 50 yılda aşılma olasılığı %50 buna karşı gelen tekrarlama periyodu 72 yıldır (TBDY-2018).

1.9. Doğrusal Olmayan Davranışın Modellenmesi

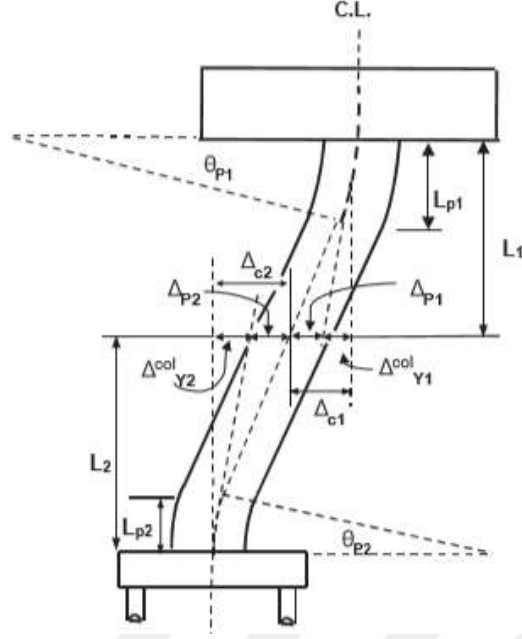
1.9.1. Doğrusal Olmayan Analiz Uygulaması

Karayolu köprülerinde, doğrusal olmayan statik analiz yönteminin önemi artmaktadır. Bu tür bir analiz için köprünün doğrusal olmayan özelliklerini belirlenmesi gerekir. Doğrusal olmayan itme analizi SAP2000 programı ile kullanıcı tanımlı malzeme özellikleri veya otomatik, programda tanımlı özellikleri ile yapılabilir. Çeşitli deprem senaryoları için emin sonuçlar elde edebilmek için idealize edilmiş model köprünün tüm ana bileşenlerinin doğrusal olmayan malzemelerin gerçek özelliklerini doğru bir şekilde temsil edilmelidir. Bir köprü yapısında, köprü elemanlarının analiz sırasında gerilmeler elastik sınırlarını aşmıyorsa sistem doğrusal elastik modeli tam sonuçlar vermektedir. Doğrusal olmayan modelleme ve analiz yönteminde kritik bileşenlerin gerilmeleri, deformasyonları, kuvvet ve yer değiştirmeler için daha kesin bir şekilde belirlemesini sağlar. Tablo 1.9’ de bir köprü yapısını içeren ana bileşenlerin modelleme kriterlerini içermektedir.

Tablo 1.9. Köprü bileşenlerinin modellenmesi (Aviram, 2008)

Eleman	Doğrusal	Doğrusal Olmayan
Üst yapı	√	
Kolon plastik mafsal bölgesi		√
Kolon da plastik mafsal olmayan	√	
Kenar ayaklar		√
Temel yayları	√	

Kolonların doğrusal olmayan davranışını plastik mafsal yöntemi ile tanımlanmaktadır. CALTRANS (2004)’ e göre köprü kolonlarının tabanı, sabit tabanlı olması gerekmektedir (Şekil 1.14). Kolon ile köprü kesitindeki birleşim yerleri rijit bir elemanla tanımlanması gerek. İdealleştirilmiş modelde plastik mafsal kolonun sabitleme noktasına yakın yerlerde oluşmaktadır. Kolon eğriliği, eğilme noktasından (sıfır moment) kolonun tabanına kadar yükseklik ile beraber doğrusal olarak artmaktadır.



Şekil 1.14. Ankastre tabanlı konsol kolon için yerel deplasman kapasitesi (CALTRANS, 2004)

1.9.2. Plastik Mafsal Hipotezi

Plastik mafsal hipotezi doğrusal olmayan köprülerin modellenmesine, yararlanması öngörülmüştür. Yapı elemanlarında oluşacak olan doğrusal olmayan şekil değiştirmeler köprülerin belirli noktalarında oluşmaktadır. Bu hipotez toplam şekil değiştirmelerin doğrusal şekil değiştirme oranı olarak tanımlanmaktadır. Süneklik düzeyi yüksek ve doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin küçük bir bölgeye yayıldığı sistemlere, belirli kesitlerde toplandığı doğrusal olmayan eğilme şekil değiştirmelere plastik mafsal adı verilmekte, bunun dışındaki bölgelerin doğrusal davrandığı varsayılmaktadır. Noktasal eleman olarak tanımlanan plastik mafsal elemanın tam ortasında yerleştirilmektedir.

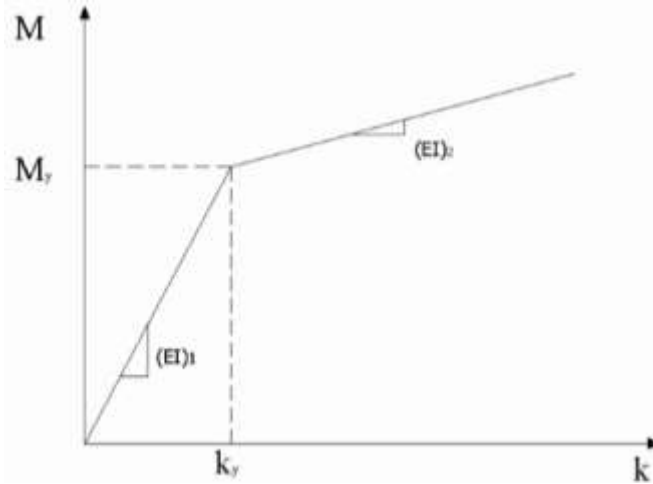
Plastik mafsal boyunu belirlemek için birçok çalışmada birçok ampirik bağlantılar verilmektedir. Köprü ve viyadük için verilen yaygın olarak kullanılan, CALTRANS (2004) yönetmenliğine kolon boyları için $L_p = 0,08L + 0,022f_{ye}d_{bl} \geq 0,044f_{ye}d_{bl}$ bağıntısı verilmektedir. Burada L_p plastik mafsal boyu (mm), L kolon boyu (mm), f_{ye} ayak kesitindeki donatının karakteristik akma dayanımı (MPa), d_{bl} boyuna donatının alanını (mm) göstermektedir.

Tablo 1.10. Kolon ayakların plastik kesitleri için verilen birim şekildeğiştirme (TDBY-2018)

Birim Şekil değiştirme	Performans Düzey	
	MH	KH
Beton Basınç Birim Şekil değiştirme	0.004	0.020
Donatı Çeliği Birim Şekil değiştirme	0.010	0.040

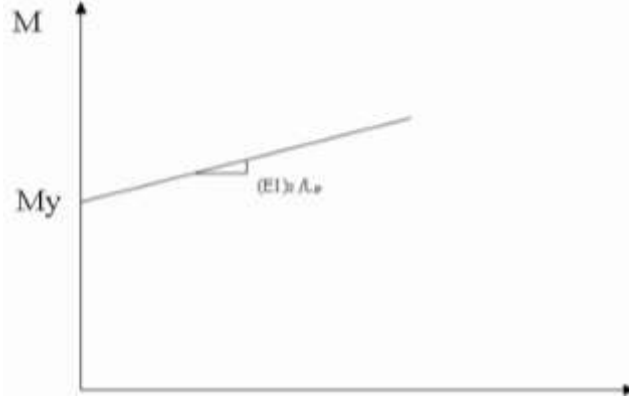
1.9.3. Plastik Mafsal Kesitinde Moment-Plastik Dönme ve Moment-Eğrilik İlişkisi

Plastik mafsal kesitinde, Mander sargılı/sargısız beton modeli ve pekleşmeyi de içeren donatı gerilme-şekil değiştirme ilişkisinden yararlanarak moment eğrilik diyagramları aksenal kuvvete bağlı olarak çizilip bu diyagramlardan yararlanarak iki doğrulu (bilineer) moment-eğrilik diyagramlarına dönüştürülecektir (Şekil 1.15). Bilineer diyagramındaki ilk doğrunun eğimi, doğrusal olmayan analizin ilk aşamasında yapılacak olan doğrusal analizde “eşdeğer kesit rijitliği (çatlamış kesit rijitliği)” olarak göz önüne alınacaktır. $(EI)_1 = M_y / K_y$, burada M_y plastik momenti göstermektedir (Ganbat 2008).



Şekil 1.15. İki doğrulu moment-eğrilik diyagramı (Ganbat, 2008)

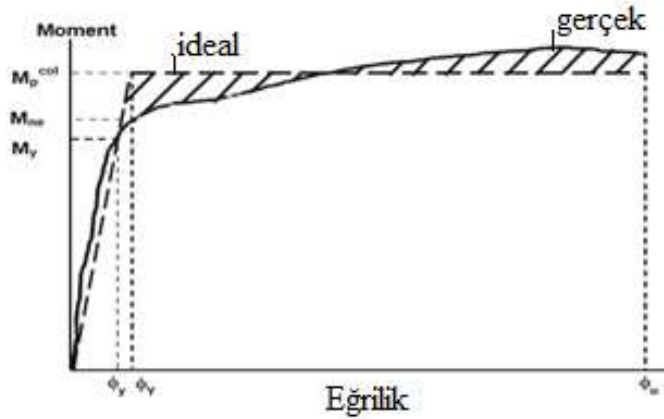
İkinci doğrusunun eğimi plastik mafsal boyu ile bölünerek plastik mafsalı temsil eden moment plastik dönme diyagramının eğimi elde edilir (Şekil 1.16).



Şekil 1.16. Moment-plastik dönme diyagramı (Ganbat, 2008)

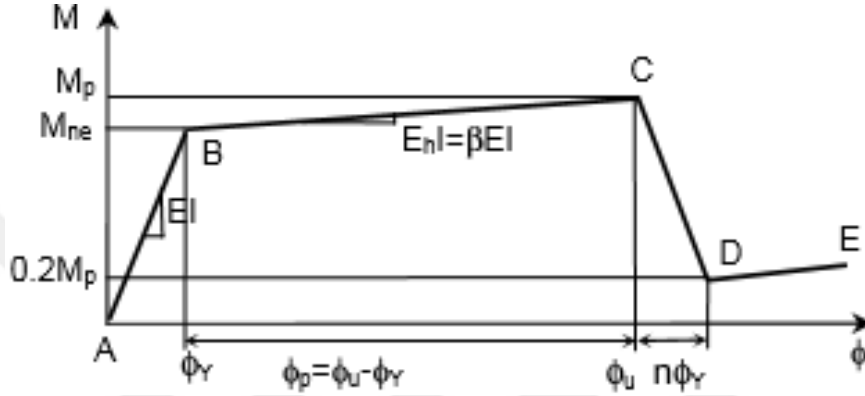
1.9.4. Kolonlarda Momenti-Eğrilik İlişkisi

Moment-eğrilik analizi yapılarak sünek davranan köprü elemanlarının plastik moment kapasitelerinin çözülmesi gerekmektedir. Malzeme özelliklerine göre moment- eğrilik değerleri elde edilmektedir. Moment-eğrilik analizi, gerilme uyumu ve kuvvetlerin dengesi prensiplerine dayanarak sabit yüklere maruz kalan bir kesit için moment eğrilik grafiği oluşturulur (Şekil 1.17). Moment-eğrilik eğrisi, bir kolonun plastik moment kapasitesini tahmin edebilmek için, elasto-plastik ilişkisiyle idealleştirilir. Bununla birlikte çubuğunun akma dayanımına nominal model tercih edilmektedir. İdealize edilmiş eğrinin elastik kısmı, donatı çubuğunun akma dayanımının nominal moment kapasitesini işaret eden noktadan geçmelidir. M_{ne} , Betonun yer değiştirmesi $\epsilon_c = 0.003$ değerine ulaştığında elastik davranışın sınırı belirlenir.



Şekil 1.17. Moment eğrilik grafiği (Caltrans, 2004)

İdealleştirilmiş plastik moment kapasitesi, gerçek ve ideal moment-eğrilik eğrileri arasındaki alanların, şekilde görüldüğü gibi ilk donatı çubuğunun akma dayanımı dengelemesiyle elde edilir. Akma noktası (ϕ_y, M_y), nominal nokta (ϕ_y, M_{ne}) ve plastik kapasite (ϕ_y, M_p) değerleri Belirli bir sabit yük altındaki kolonun moment-eğrilik analizinden elde edilir. Dinamik analiz için ortaya çıkan idealleştirilmiş moment-eğrilik ilişkisi aşağıdaki gibi verilmiştir (Şekil 1.22).



Şekil 1.18. Dinamik hesaplamalar için idealleştirilmiş moment eğrilik ilişkisi (Aviram, 2008)

Burada A noktası hiçbir yük etki etmediği durumdur. B noktası akma noktası olarak bilinmektedir. C noktası plastik kapasitesinin tahmini, D noktası plastik kapasitesinin $0.2M_p$ azalma noktası, E noktası ise kırılma noktası olarak tanımlanmaktadır. XTRACT paket programı kullanılarak moment eğrilik grafiği normalize edilecek olup hesaplanmaktadır. SAP2000 paket programına (P-M2-M3) olarak tanımlanacaktır. Burada P eksenel normal kuvveti, M2: 2-2 eksenini etrafındaki eğilme momenti, M3 ise 3-3 eksenini etrafındaki eğilme momentini göstermektedir.

1.9.5. Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemleri

Dış yüke maruz bir yapının gerilmeleri elastik sınırını aşmıyorsa yapının dinamik ve statik analizleri için doğrusal elastik yöntemi doğru bir hesap yöntemidir. Gerilmeler, kritik bileşen ve deformasyonlar için doğrusal olmayan yöntem modellemeye ve analizlerde daha yakın sonuçlar vermektedir. Bu analizler zaman tanım alanında veya statik itme şeklinde gerçekleşir.

1.9.5.1. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yönteminde, deprem etkisi altında olan bir köprü veya viyadük hareket denkleminin doğrusal olmayan iç kuvvet-şekil değiştirme bağıntısı kullanarak doğrudan entegrasyonu ile gerçekleşir. Bu yöntemin iyi ve kesin sonuçlar verebilmesi için köprünün bulunduğu konumun gerçek veya benzeri deprem kaydının bulunması ve zemin özelliklerini iyi bilinmesi gerekmektedir. Bir istatistik değerlendirme yapabilmek için kullanılan kaydın özelliklerine göre değişim gösterebileceğinden, bu tür analizlerde birden fazla kullanılması gerekmektedir. Pratikte statik itme analizi daha sık kullanılmakta, fakat bazı durumlarda mümkün olmadığından bu yönetime başvurulmaktadır.

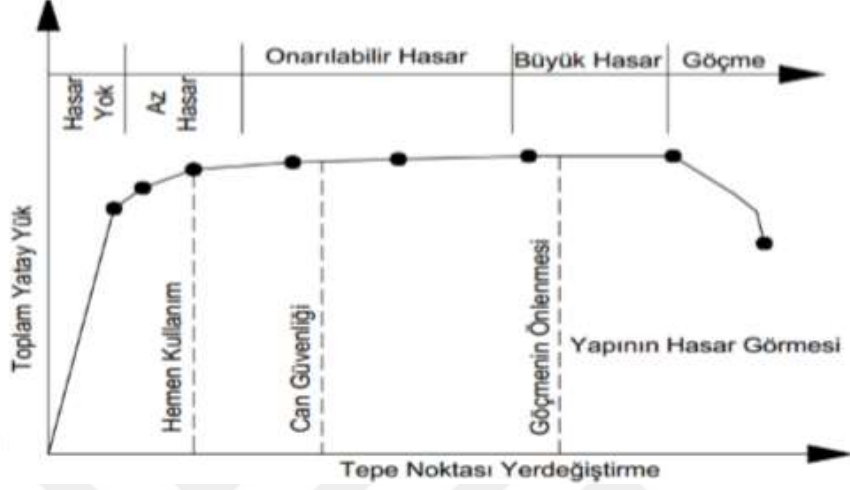
1.9.5.2. Doğrusal Olmayan İtme Analizi

Bu yöntemde yapı sistemi iki veya üç boyutlu olarak temsil edilmektedir. Doğrusal olmayan statik itme analizi yapının deprem altındaki yatay yük ilişkisinin malzeme ve geometri değişimleri bakımında doğrusal olmayan yani ikinci mertebe elasto-plastik teorisine göre elde edilmesi ve değerlendirilmesi esasına dayanmaktadır.

İtme analizi, yapısal yüklemenin büyüklüğü önceden tanımlanmış bir referans yüklemeye göre aşamalı olarak artırıldığı statik doğrusal olmayan bir işlemdir. Yüklemenin büyüklüğü artıkça köprü yapısının zayıf bağlantıları belirlenir. Bu yöntem analizinde, köprünün elastik ötesi deformasyon kabiliyetini ve hasar seviyesini belirlemek için kullanılır. Oranlar sabit kalacak şekilde yatay yükler artırılmakta itme analizi malzeme özellikleri doğru bir şekilde girilerek yapılır. Elemanların biri veya birkaçı taşıma kapasitesi sınırına gelmekte ve kesitte plastik mafsallık oluşmaktadır. Köprünün itme analizi, yer değiştirmeyi bir referans noktasında izleyerek yapının davranışını yakalamak için geliştirilen yöntemdir (Aviram 2008).

SAP2000 programında aynı analizde birden fazla itme analizi yüklenme durumları çalıştırabilir veya daha önce çalıştırılan itme analizi yüklenme durumları başlangıç şartı olarak alınabilir. Köprü yapısında itme analizi (Pushover) durumunda, sabit yüklerin (G) olarak tanımlanmasından sonra başlamaktadır.

Doğrusal olmayan analizinden elde edilen tipik bir yatay yük-tepe noktası yer değiştirmesi grafiği Şekil 1.23 'de dikkate alınan deprem yükü için, kendisinden istenen performans seviyesini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmek için verilmiştir.



Şekil 1.19. Doğrusal olmayan analizde oluşan performans grafiği (Karimi, 2019)

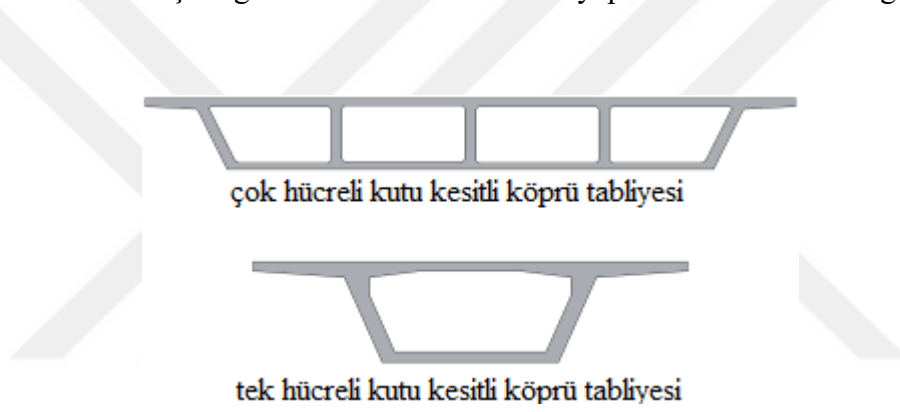
Yapı sistemlerinin deprem gibi dinamik etkiler altındaki performansa dayalı tasarım ve değerlendirmesinde, yapının doğrusal olmayan davranışını belirlemesi gerekmektedir. Bu amaçla kullanılan yöntemler: Doğrusal olmayan dinamik analizi ve statik itme analizi yöntemleri yapının doğrusal olmayan davranışını belirlemesi için sık kullanılan yöntemlerdir. Statik itme analizi yöntemi yapının dinamik yükler altındaki performansını temsil etmektedir. , yatay yük-tepe noktası yer değiştirmesi ilişkisinin, geometri ve malzeme değişimleri bakımından doğrusal olmayan teoriye (ikinci mertbe elastoplastik teori) göre değerlendirmesi esasına dayanmaktadır.

1.10. Kutu Kesitli Karayolu Köprüleri

Bir köprü tabliyesinin en esnek yapısal şekli kutu kesitlidir. Tabliye formu 25 m -150 m arasında bir açıklığa sahip olabilir ve tabliyenin genişliği 30 m kadar çıkabilir. Avantajları nedeniyle 50 metreden daha uzun açıklıklar için en uygun tabliye şeklidir (Hamad, vd. 2018).

1.10.1. Geometri

Kutu kesitli bu tip köprülerin tabliye içi boş bölümlerdir ve bunlar şekilsel olarak dikdörtgen veya trapez olabilir. Bu kesitler tek hücreli veya çok hücreli olabilir. İyi bir kutunun önemi, kutunun genişliği ile taşınan tabliye genişliği arasındaki rasyonel denge içindedir. Aynı zamanda kesme kuvvetinin az olması istendiği için olabildiğince hücrelerin artırılmasına ve bu sebeple gereksiz beton kullanımından kaçınılmış olup hafif bir yapı elde etmiş olacağız dikdörtgen kesitin yapımı trapez kesitin yapımına nazaran daha kolaydır fakat dezavantaj olarak köprünün alt tabakasının gereğinden fazla geniş olmasıdır. Böylece, trapez bir kesit seçilerek, daha hafif bir yapı elde edilebilecektir (Hamad, 2018). Kesitin geometrisi eğilme momentine karşı öngerilme ile birlikte önemli yapısal bir verimlilik sağlamaktadır.



Şekil 1.20. Köprü tabliyesi çeşitleri

1.10.2. Kutu Kesitli Köprü Yapım Yöntemleri

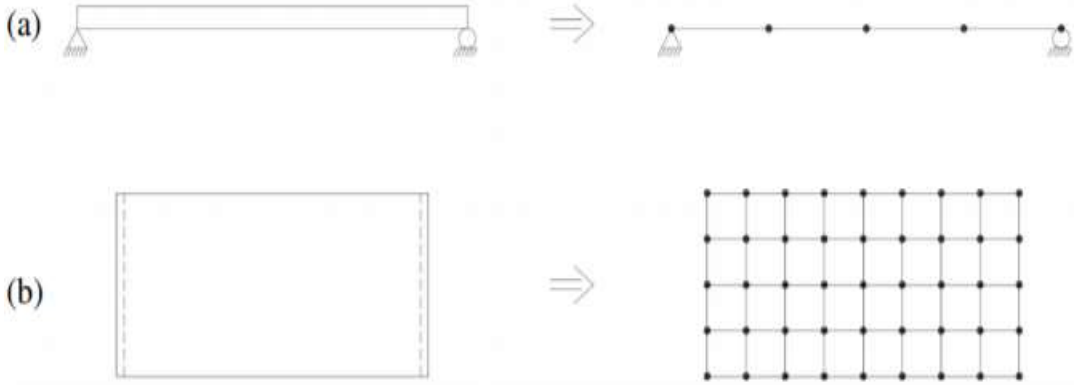
Kutu kesitli köprü tabliyesi yerinde dökülebilir veya prefabrik olarak montaj edilebilir. Yerinde dökme yöntemi yapım, betonun gerekli basınç dayanımı ve bakımı zor olduğun daha az tercih edilmektedir.

Kutu kesitli köprülerin inşaatı için hareketli iskele sistemi (kayar) ve artımlı bağlanma (dengeli konsol) olmak üzere iki şekilde yapılabilmektedir. Dilimsel kutular, vinç veya geçici ayaklar kullanılarak yerleştirilmektedir.

1.11. Sonlu Elemanlar (SEY) Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi sayısal bir yöntemdir ve bir yapının davranışını tanımlamak için yaklaşık değerler vermektedir. Sonlu elemanlar metodunda elemanlar parçalara ayrılmaktadır. Bu elemanlar kiriş, çatı ve kolonlar gibi farklı tiplerde olabilir. Elemanların seçimi analizin sonucunu etkileyecektir ve neyin araştırılması gerektiğini etkili bir şekilde tanımlayabilecek unsurların seçilmesi önemlidir.

Bir yapı elemanı örneğin bir kiriş, diferansiyel denklemler kullanılarak analitik olarak tanımlanabilir. Bu denklemler, yapı elemanın her bölümündeki davranışı tanımlar. Ancak bu denklemlerin çözülmesi oldukça karmaşık ve zor olabilir. Sonlu elemanlar yönteminde bu elemanlar küçük parçalara ayrıldığından, karmaşık olan yapı elemanın basit hale indirgenir. Her bir parça düğüm noktalarıyla birbirine bağlıdır ve bu düğüm noktaları dönmeleri ve ötelenmelerin tanımlanmasına yardımcı olur ve bu şekilde gerilmeler ve diğer parametreler eleman üzerinden hesaplanabilir.

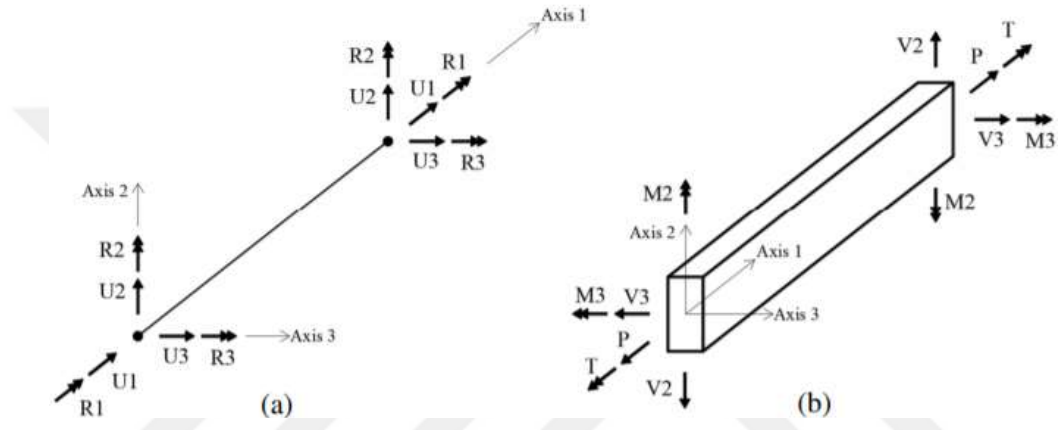


Şekil 1.21. Sürekli sistemlerin ayrıklaştırması örneği (a) bir kiriş 4 parçaya bölünmüş (b) ve bir levha 32 eşit parçaya

1.11.1. Kiriş

Sonlu elemanlar yönteminde her bir kiriş parçası iki düğüm ile tanımlanmaktadır. Her düğüm birçok serbestlik derecesine sahiptir ve bu serbestlik dereceleri dönme ve ötelenmeleri tanımlar. Bunlar yardımıyla momentler ve gerilmeler hesaplanabilir. Bir kirişin davranışını tanımlayan başlıca iki teori vardır bunlar Euler Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorileridir. Her iki teori için de temel esas; düzlem deformasyon sırasında düzlem kaldığı

varsayımdır. Ayrıca bu teoriler için önemli bir fark, Euler-Bernoulli teorisine göre düzlem kiriş eksenine normal kaldığını varsaydığı, ancak Timoshenko'nun teorisine göre dönmeye izin verdiği varsayımdır. SAP2000 programında bir kiriş veya kolon rahatlıkla tanımlanabilir ve buna “frame object” denir. Bu nesne SAP2000 programın arayüzünde çizilir ve iki nokta arasında tanımlanır. Burada farklı kesit alanları ve yüklemeler atanabilir. Bu özellikler uzunluğu boyunca değişebilir (Eriksson, vd. 2017). Bir parça iki düğüm noktası ile tanımlanır ve her bir düğüm noktası altı serbestlik derecesine sahiptir (Şekil 1.26).



Şekil 1.22. SAP2000'deki bir eleman için serbestlik dereceleri ve iç kuvvetleri

Bu kesitlerin kendi ağırlık yükleri SAP2000 paket programı ile otomatik olarak hesaplanmaktadır. İlave yükler ise etki edecek elamanın birim hacim ağırlığı ve kesitin alanı ile çarpılarak uygulanmaktadır.

1.11.2. Tendon

SAP2000 programında tendon nesnesi, öngerilimi ve ardgermeyi modellemek için kullanılan özel bir nesne türüdür ve sıradan bir sonlu eleman değildir. Nesne bir çizgi olarak çizilir ve program otomatik olarak tendon nesnesini içinden geçtiği elementlerdeki düğümlere bağlar.

Bir çizgi çizildiğinde tendon profili tanımlanır. Bu profiller liner, parabolik veya farklı türde olabilir. Ayrıca tendonun kesit alanı ve uygulanan kuvvetler girilir. Öngerilme yükü, kuvvet [N] olarak veya basınç [Pa] olarak tanımlanabilir. Her bir düğümün altı serbestlik derecesi vardır. Program otomatik olarak sonlu küçük parçalara bölerek çözüm yapar.

Tendon bir veya iki ucundan gerilirse sürtünme ve ankraj kaymasından kaynaklanan kayıplar SAP2000 tarafından otomatik olarak hesaplanır.

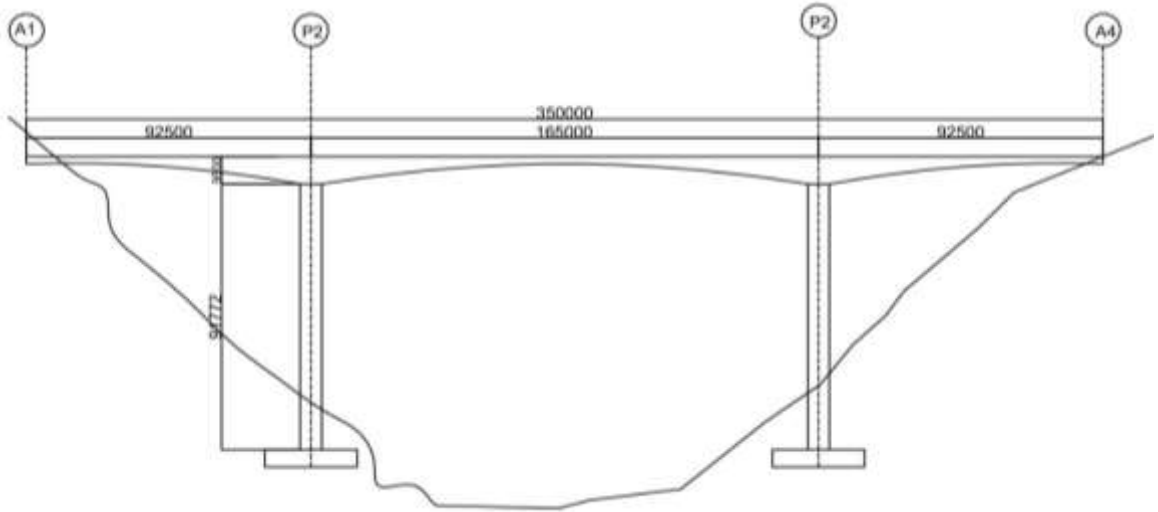
Tendon boyunca sürtünme kaybını hesaplamak için SAP2000 programı $P(x) = p_0 \cdot e^{-(\mu a + k^* x)}$ bağıntısını kullanır. Burada yerel eğrilik katsayısı $k^* = \mu \cdot k$ bağıntısı yardımıyla elde edilir. Burada p_0 ilk öngerme kuvveti, μ sürtünme katsayısı, k^* yerel eğrilik katsayısı (kabloda), a ise açı değişkenliğini (rad) göstermektedir.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Köprü Bilgileri

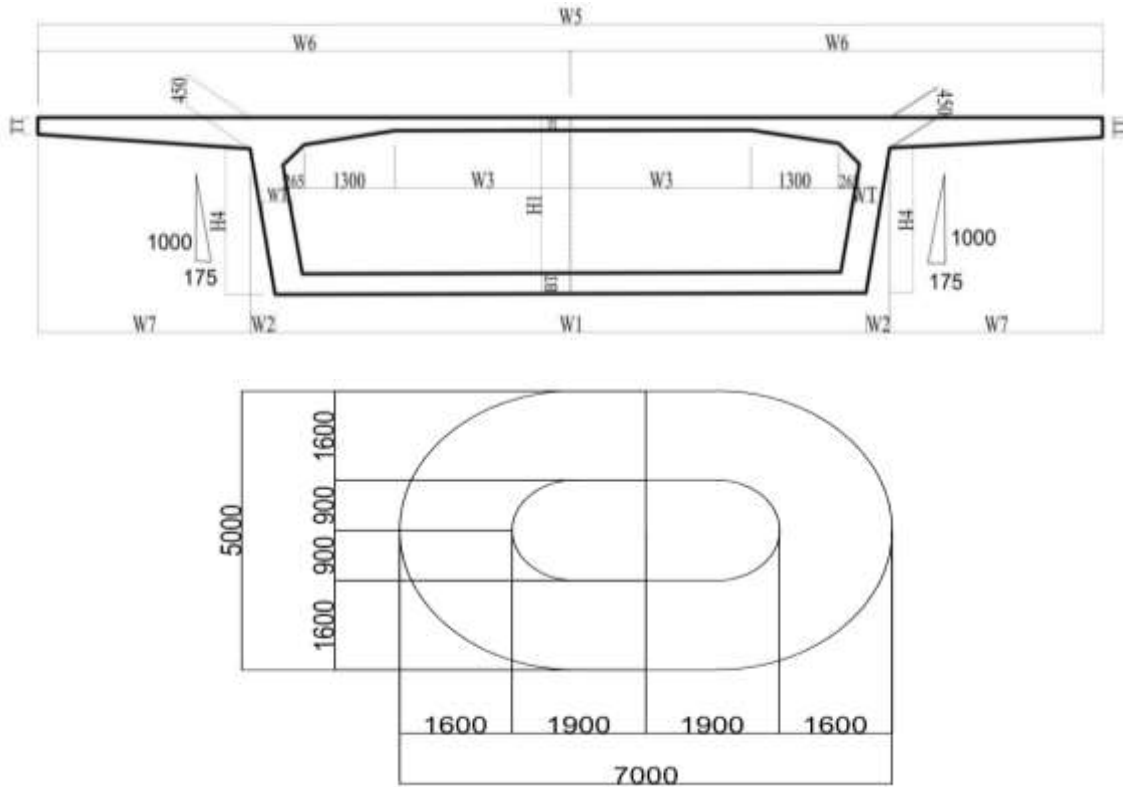
Bu tez çalışmasında Artvin–Erzurum karayolu üzerinde bulunan Budan köprüsü incelenmiştir. Bu köprü yüksek dayanımlı öngerilmeli kutu kesitli olarak yapılmıştır (Şekil 2.1). Bu köprünün yapımına 2007 yılında başlanmıştır. Köprünün üst yapısı kolonlarla sabitlendirilmiştir. Bu köprü üç açıklıktan oluşmakta olup orta açıklık 165.00 m ve iki yan açıklıkların her biri ise 92.50 m’den oluşmaktadır. Köprünün toplam uzunluğu 350.00 m ve toplam genişliği 15.00 m’dir. Bu köprü yapı elemanları bir sürekli tabliye, iki mesnet ve iki kolondan oluşmaktadır. Kolonların yüksekliği 91.77 m Köprü temeli ankastre olarak dikkate alınmıştır. Tabliye ve kolonların kesit özellikleri şekil 2.2 ‘da verilmiştir. Tabla kesit özellikleri, kutu kesitli ve tek hücreli olarak hesaplanmıştır. Her bir dilimin derinliği kolonların üzerinde 9.50 m iken ortada ve mesnetlere doğru kalınlıkları 2.50 m’ ye kadar parabolik olarak düşmektedir. Budan köprüsünün tabliye kesit özellikleri Tablo 2.1 ‘de verilmiştir.



Şekil 2.1. Budan köprüsü

Kutu kesitli tabliyeli köprüler; içi boşluk olan kesitlerden oluşmaktadır. Kutu kesitli köprüler çelik yapı, öngerilmeli beton veya kompozit olarak imal edilebilir. Tipik olarak yamuk veya dikdörtgen şeklinde olabilir. Köprülerin açıklıkları arttıkça, sabit yüklerde aynı şekilde artmaktadır. Köprü öz ağırlığının azaltılması için, tam kapasitesinde kullanılmayan gereksiz malzemelerin kesitten çıkarılması gerekli olmaktadır. Bu şekilde kutu kesitli hücreli tabliye meydana getirilmektedir. Kutu kesitli köprüler genel olarak karayolu üst geçitleri ve modern raylı sistemler için kullanılmaktadır. Uzun açıklıklı ve geniş tabliye için ardgermeli kutu kesitli köprüler önerilmektedir. Kutu kesitli köprülerin iç bakımı, iskele kullanmadan erişilebilirliği daha kolaydır.

Bu çalışmada Artvin-Erzurum karayolu üzerinde bulunan Budan köprüsü seçilmiştir. Ard germe yöntemi bu kutu kesitli köprüde uygulanmıştır. Seçilen ankraj sisteminin 140 mm^2 alana ve 195.30 MPa gerilmeye sahip halatlar kullanılmıştır. Halat profili parabolik olarak kabul edilir. Halatlar açıklık başı ve sonu uygun bir kriko kullanılarak gerilir ve halatların uç kısmı uygun malzemeler kullanılarak sabitlenir. Beton gerekli dayanıma ulaştığında yüksek çekme gücüne sahip teller gerilir ve sabitlenir. Tellerdeki kuvvetler betona aktarılmış olur. Halatların içinde olduğu kılıflar beton harcıyla doldurulmaktadır.



Şekil 2.2. Kolon ve tabliye kesiti

Tablo 2.1. Budan köprüsünün tabliye kesit özellikleri

No	Km	X	H1	BT	W1	WT	H2	H3	H4	W2	W3	W4	W5	W6	W7	TT
1	55	-1.5	2500	-	8314	-	-	-	2050	359	-	-	15042	7521	3005	280
2	A1	0	2500	-	8314	-	-	-	2050	359	-	-	15039	7520	3004	280
3		10.75	2500	250	8314	400	50	1305	2050	359	2500	5272	15026	7513	2997	280
4		15.25	2529	254	8304	400	50	1330	2050	364	2500	5263	15021	7510	2995	280
5		20.7	2615	266	8274	400	50	1404	2079	379	2500	5237	15016	7508	2992	280
6		25.75	2759	285	8223	400	50	1529	2165	404	2500	5193	15012	7506	2990	281
7		30.75	2960	312	8153	400	50	1703	2309	439	2500	5132	15009	7504	2989	281
8		35.75	3219	348	8062	400	50	1927	2510	485	2500	5054	15006	7503	2987	281
9		40.75	3536	391	7952	400	50	2200	2769	540	2500	4958	15003	7502	2986	273
10		45.75	3909	441	7821	400	50	2523	3086	603	2500	4845	15002	7501	2986	264
11		50.75	4341	500	7670	400	50	2896	3448	676	2500	4715	15002	7500	2989	254
12		55.75	4830	566	7499	400	50	3319	3866	760	2500	4567	15001	7500	2992	245
13		60.75	5376	640	7307	400	50	3791	4340	853	2500	4401	15000	7500	2994	235
14		65.75	5980	722	7096	400	50	4313	4873	956	2500	4219	15000	7500	2996	225
15		70.75	6642	812	6864	400	50	4887	5463	1069	2500	3819	15000	7500	2999	220
16		74.75	7213	890	6665	500	48	5380	6110	1168	2400	3646	15000	7500	3000	220
17		78.75	7820	972	6452	500	48	5905	6673	1274	2400	3462	15000	7500	3000	220
18		82.75	8464	1059	6226	500	48	6562	7280	1387	2400	3267	15000	7500	3000	220
19		85.75	8972	1128	6049	500	48	6901	7924	1476	2400	3114	15000	7500	3000	220
20		88.75	9500	1200	5864	500	48	7357	8432	1568	2400	2954	15000	7500	3000	220
21	P2	92.5	9500	1200	5864	500	48	7405	8960	1568	2400	3954	15000	7500	3000	220
22		96.25	9500	1200	5864	500	48	7357	8960	1568	2400	2954	15000	7500	3000	220
23		99.25	8972	1128	6049	500	48	6901	8960	1476	2400	3114	15000	7500	3000	220
24		102.3	8464	1059	6226	500	48	6462	8432	1387	2400	3267	15000	7500	3000	220
25		106.3	7820	972	6452	500	48	5905	7924	1274	2400	3462	15000	7500	3000	220
26		110.3	7213	890	6665	500	48	5380	7280	1168	2400	3646	15000	7500	3000	220
27		114.3	6642	812	6864	500	48	4887	6673	1068	2400	3819	15000	7500	3000	220
28		119.3	5980	722	7096	400	50	4313	6102	952	2500	4219	15000	7500	3000	220
29		124.3	5376	640	7307	400	50	3791	5440	846	2500	4401	15000	7500	3000	220
30		129.3	4830	566	7499	400	50	3319	4836	751	2500	4567	15000	7500	3000	220
31		134.3	4341	500	7670	400	50	2896	4290	665	2500	4715	15000	7500	3000	220
32		139.3	3909	441	7821	400	50	2523	3801	590	2500	4845	15000	7500	3000	220
33		144.3	3536	391	7952	400	50	2200	3369	524	2500	4958	15000	7500	3000	220
34		149.3	3219	348	8062	400	50	1927	2679	469	2500	5054	15000	7500	3000	220
35		154.3	2960	312	8153	400	50	1703	2420	424	2500	5132	15000	7500	3000	220
36		159.3	2759	285	8223	400	50	1529	2219	388	2500	5193	15000	7500	3000	220

Tablo 2.1'in devamı

37		164.3	2615	266	8274	400	50	1404	2075	363	2500	5237	15000	7500	3000	220
38		169.3	2529	254	8304	400	50	1330	1989	348	2500	5263	15000	7500	3000	220
39		174.3	2500	250	8314	400	50	1305	1960	343	2500	5272	15000	7500	3000	220
40		175.8	2500	250	8314	400	50	1305	1960	343	2500	5272	15000	7500	3000	220

Budan köprüsünün sonlu eleman modeli Şekil.2.6' te verilmiştir. Her bir düğüm noktası 6 serbestlik derecesinden oluşmaktadır. Tabliye 20 ayrı kesitten oluşmaktadır. Zemin-köprü etkileşimi dikkate alınmamıştır.

2.2. Malzeme Özellikleri

Ard gerilmeli kutu kesitli tabliyede ve diğer tüm betonarme elemanlarda elastisite modülü 36000 MPa olan C40/45 beton dikkate alınmıştır. Tüm alt ve üstyapıda S420 betonarme donatısı ($f_{yk}=420$ MPa) kullanılmıştır.

Ard gerilmeli tabliyede kullanılan öngerme çeliği ASTM A416 Grade 1860 (270K)' e göre seçilmiştir. Kullanılan öngerme halatları 0.6inç (15.24 mm) kesit alanı 140 mm^2 dır. Yapılan analizde her bir ard germe kablosu 38 adet halat bükümü ile elde edilirken her bir halat bükümün alanı 140 mm^2 toplan alanı ($5.32 \times 10^{-3} \text{ m}^2$) ve 7421.4 KN ardgerme kuvvetine sahiptir. Öngerme kuvvetinin en büyük değeri nihai dayanımı %75 olarak dikkate alınmıştır (AASHTO LRFD, 2012). Bu çalışmada öngerme ve diğer kayıplar dikkate alınmamıştır. Bir öngerme halatın kuvveti $0,75 \cdot 1860 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 140 \text{ mm}^2 = 195.300 \text{ N} = 195.30 \text{ KN}$ şeklinde hesaplanmıştır. %25'i emniyet payı olarak bırakılmıştır.

Tablo 2.2. Ardgerme halatlarının mekanik özellikleri

Öngerme çeliğin nihai çekme dayanımı (f_s)	1860 MPa
Öngerme çeliğin akma dayanımı (f_{py})	1680 MPa
Öngerme çeliğin Elastisite Modülü (E_s)	195000 MPa
Karakteristik çekme dayanımı ($0.75 f_s$) (f_{si})	1395 MPa
Halat Bükülme Çapı (a)	15.24 mm
Bir halatın kesit alanı (A_s)	140 mm^2
Halat bükülme sayısı	38

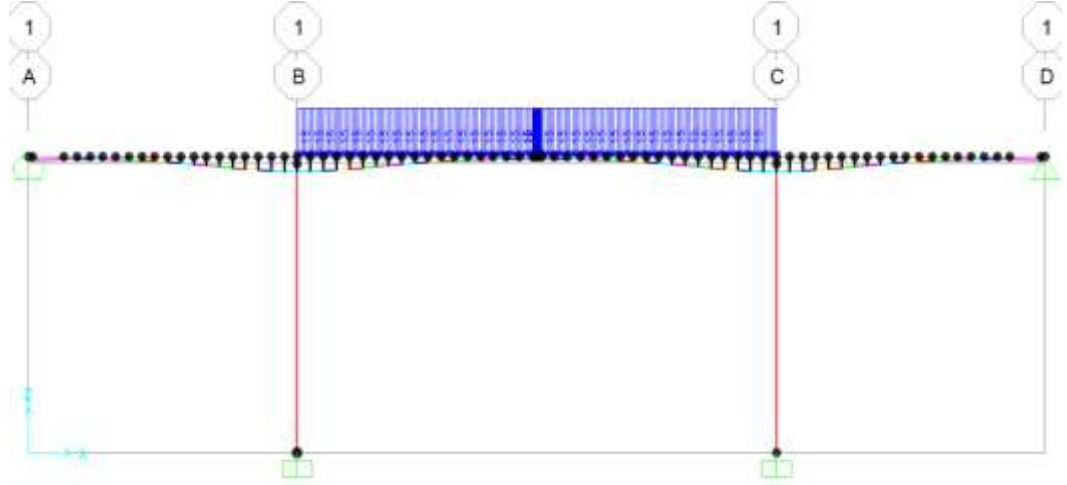
Burada 38 adet halat bükümü olup, köprünün ağırlığı ve açıklığı fazla olması nedeniyle 38 adet halat bir araya getirilerek her bir öngerme halat grubu elde edilmiştir. Kolonlarda S420 donatı çeliği kullanarak XTRACT programı yardımıyla elemanın moment-eğrilik diyagramı elde edilmiştir.

2.3. Yük Birleşimleri

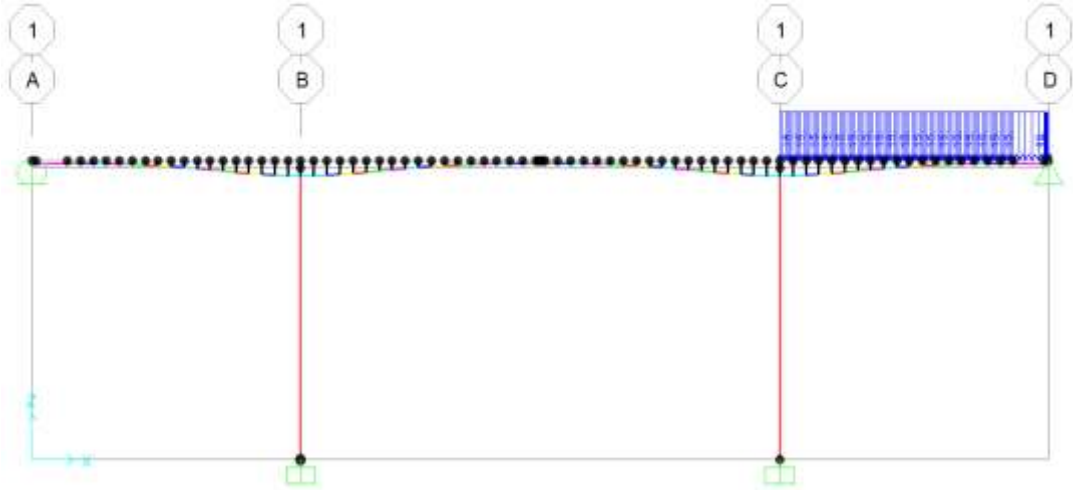
Aşağıda görüldüğü gibi farklı yük birleşimleri ve elverişsiz yükleme durumları dikkate alınmıştır. G Sabit yükleri, Q hareketli yükleri göstermektedir. Ayrıca elverişsiz yükleme yapabilmek amacıyla şekil 2.3-2.4'te görüldüğü gibi hareketli yükler Q_1 , Q_2 ve Q_3 olarak sınıflandırılmıştır. Burada 1,2 ve 3 sırasıyla açıklık isimlerini göstermektedir. TS500'e uygun olarak; düşey yükler; $1.4G+1.6Q$ olarak birleştirilmiştir. Bu yükleme durumu elverişsiz yükleme yapabilmek amacıyla $1.4G+1.6Q_1$; $1.4G+1.6Q_2$; $1.4G+1.6Q_3$ şeklinde bir düzenleme yapılmıştır. Kolonlar için ise, $1.4G+1.6Q_1+1.6Q_2$ ve $1.4G+1.6Q_2+1.6Q_3$ yükleme birleşimi oluşturulmuştur. Deprem yüklerini içeren yük birleşimlerinde ise $G+Q_i+EX$ ve $G+Q_i+EZ$ olacak şekilde dikkate alınmıştır. Deprem yükü (EX ve EZ) için DD-1 ve DD-2 düzeyleri de yükleme birleşimlerinde göz önünde bulundurulmuştur. Bu durumda toplam 17 farklı yük birleşimi köprünün analizlerinde kullanılmıştır. Deprem yükü, çok modlu spektrum analizi seçilerek 2018- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine göredir.



Şekil 2.3. Birinci açıklığın dolu diğer açıklıkların boş olması durumu



Şekil 2.4. Orta açıklığın dolu diğer açıklıkların boş olması durumu



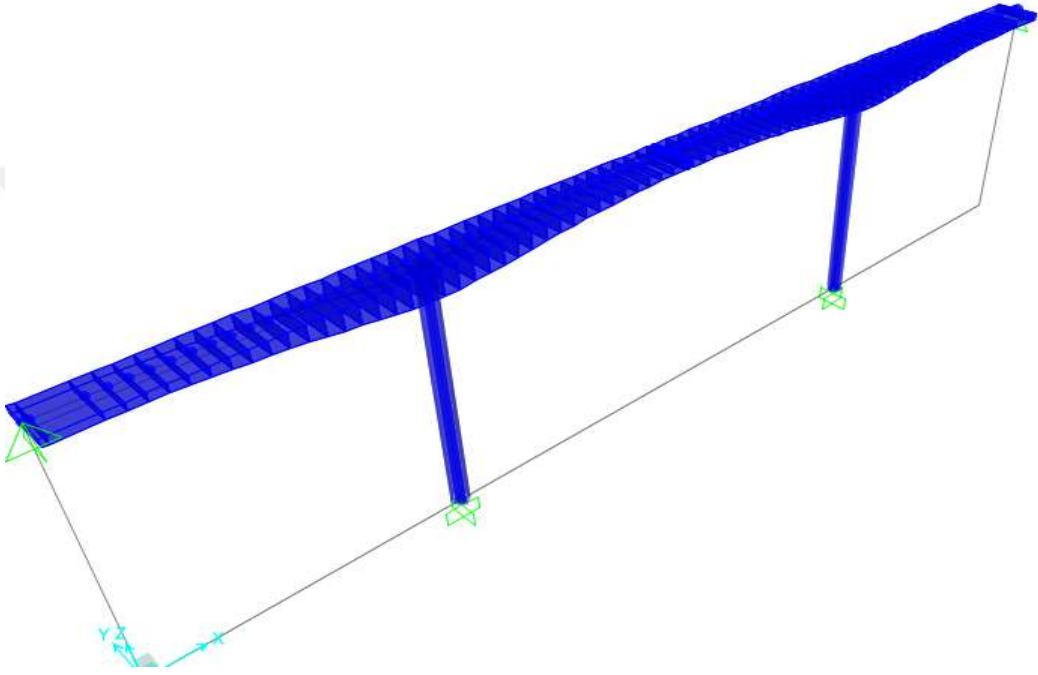
Şekil 2.5. Üçüncü açıklığın dolu diğer açıklıkların boş olması durumu

2.4. Köprü'nün Doğrusal Elastik Analizi

2.4.1. Sonlu Eleman Modeli

Köprü'nün sonlu eleman modeli SAP2000 kullanılarak yapılmıştır. Köprü'nün tüm elemanları çubuk eleman olarak düzlem olarak tasarlanmıştır (Şekil 2.3). Taşıyıcı eleman ağırlıkları, sabit ve hareketli yükleri, dış yükleri ve deprem yükleri tanımlanmıştır. Köprü'nün sol ve sağ uçları mesnet, kolonların alt uçları ankastre, tabliye farklı yüksekliğe sahip en

kesitlerden oluşturulmuştur. Kolon ile üst yapı bağlantısını sağlayan elemanlar SAP2000 programında BODY olarak atanmıştır. Bu köprüde mesnet elastomerlerin tutulduğu varsayımı ile analiz yapılmıştır. Öz ağırlıklar program tarafından hesaplanırken taşıyıcı olmayan elemanların ağırlıkları G yükleme grubuna bağlı olarak yayılı yük şeklinde oluşturulmuştur. Sonlu eleman modelinde, arđgerme halatları 38 bükümlü moment aktarmayan çubuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Budan köprüsünün sonlu eleman modeli

Köprünün üst yapısı her açıklığı 20 adet ard gerilmeli kutu kesitli elemanları içeren çubuk eleman olarak tanımlanmıştır. Bu köprü iki kolondan oluşmakta ve her kolonun yüksekliği 91.77m' dir.

Köprünün hesap yöntemi olarak çok modlu spektrum analizi seçilmiştir. Davranış spektrumu olarak şekil 2.10 ve 2.11. de verilen spektrumlar kullanılmıştır. Bu spektrum Budan köprüsüne enlem ve boylam bilgilerine bağlı olarak www.tdth.gov.tr 'den alınmıştır.

2.4.2. Deprem Spektrumu

Bundan köprüsünün depreme karşı davranış tahkikini yapmak için iki adet deprem seviyesi tanımlanmıştır. Çok modlu spektrum analizinde tasarım ve şiddetli deprem

spektrumları kullanılmıştır. Şiddetli deprem DD-1, Tasarım spektrumu DD-2 durumuna karşılık gelmektedir. DD-2 deprem düzeyi için kısa ve 1sn titreşim periyoduna karşı gelen spektral ivme değerleri sırası ile $s_s = 0.462$ ve $s_1 = 0.127$, DD-1 deprem düzeyi için kısa ve 1sn titreşim periyoduna karşı gelen spektral ivme değerleri sırası ile $s_s = 0.955$ ve $s_1 = 0.238$ alınmıştır. Zemin sınıfı olarak ZB dikkate alınmıştır.

S_s ve S_1 spektral ivme değerleri ve yerel zemin etki katsayıları kullanılarak spektral ivme katsayıları S_{Ds} ve S_{D1} değerlerine dönüştürülür.

$$S_{Ds} = S_s F_s \quad (2.1)$$

$$S_{D1} = S_1 F_1 \quad (2.2)$$

Burada, F_s ve F_1 Yerel zemin etki katsayıları olup Tablo 2.1 ve Tablo 2.2' de verilmiştir. S_{Ds} ve S_{D1} sırasıyla kısa periyot ve 1sn periyot için harita tasarım ivme değerleridir.

Tablo 2.3. Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayıları

Yerel Zemin Sınıfı	1.0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_s					
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s = 1.25$	$S_s \geq 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

Tablo 2.4. 0.1 Saniye Periyot İçin Yerel Zemin Etki Katsayıları

Yerel Zemin Sınıfı	0.1 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_1					
	$S_s \leq 0.10$	$S_s = 0.20$	$S_s = 0.30$	$S_s = 0.40$	$S_s = 0.50$	$S_s \geq 0.60$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
ZD	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
ZE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

2.4.3. Yatay Deprem Tasarım Spektrumu

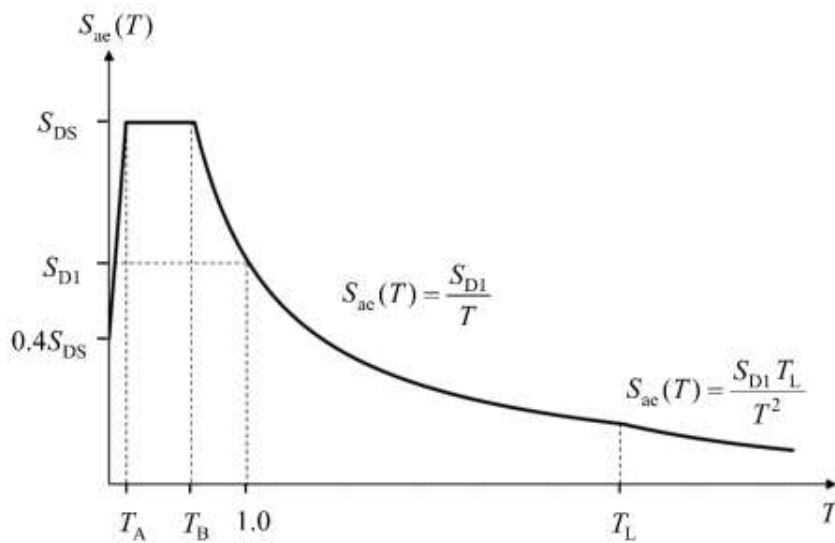
Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)' göre, göz önüne alınan herhangi bir deprem yer hareketi düzeyi için yatay deprem tasarım ivme spektrumunun ordinatları olan yatay deprem tasarım spektral ivmeleri $S_{ae}(T)$, doğal titreşim periyoduna bağlı olarak yerçekimi ivmesi [g] cinsinden Denk. (2.3)'te tanımlanmıştır (Şekil 2.7).

$$\begin{aligned}
 S_{ae}(T) &= (0.4 + 0.6 \frac{T}{T_A}) S_{Ds} & (0 \leq T \leq T_A) \\
 S_{ae}(T) &= S_{Ds} & (T_A \leq T \leq T_B) \\
 S_{ae}(T) &= \frac{S_{D1}}{T} & (T_B \leq T \leq T_L) \\
 S_{ae}(T) &= \frac{S_{D1} T_L}{T^2} & (T_L \leq T)
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

T_A ve T_B değerleri aşağıdaki denklemler yardımıyla bulunur.

$$T_A = 0.2 \frac{S_{D1}}{S_{Ds}}, \quad T_B = \frac{S_{D1}}{S_{Ds}} \tag{2.4}$$

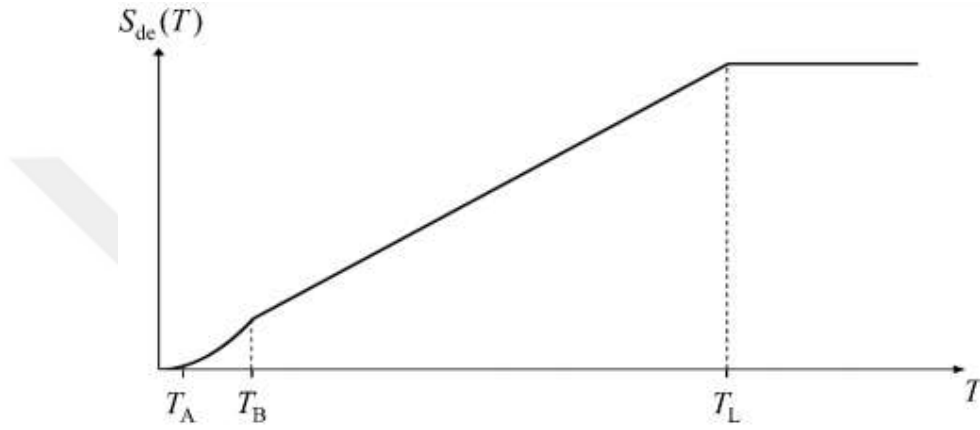
Burada T_A ve T_B değerleri köşe periyotlar olarak da isimlendirilmektedir. Sabit yer değiştirme bölgesine geçiş periyodu $T_L = 6s$ alınacaktır.



Şekil 2.7. Yatay elastik tasarım ivme spektrumu (TBDY-2018)

Göz önüne alınan herhangi bir deprem yer hareketi düzeyi için yatay deprem tasarım yer değiştirme spektrumunun ordinatları olan yatay tasarım spektral yer değiştirmeleri de $S_{de}(T)$, doğal titreşim periyoduna bağlı olarak metre cinsinden Denk (2.5) ile tanımlanır (Şekil 2.8).

$$S_{de}(T) = \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae}(T) \quad (2.5)$$



Şekil 2.8. Yatay elastik tasarım yerdeğiştirme spektrumu (TBDY-2018)

2.4.4. Düşey Deprem Tasarım Spektrumu

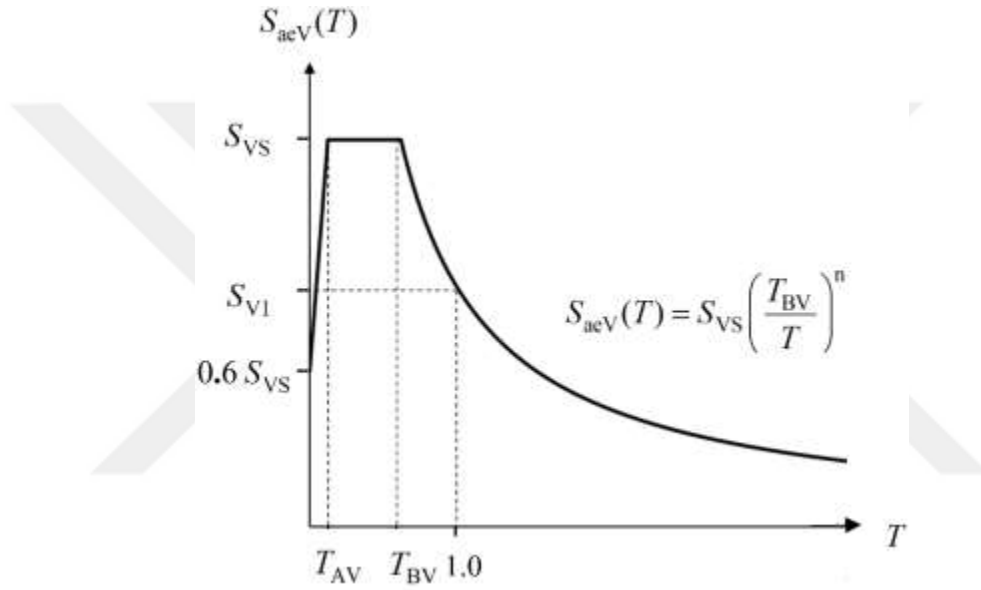
Göz önüne alınan herhangi bir deprem yer hareketi düzeyi için düşey deprem tasarım ivme spektrumunun ordinatları olan düşey deprem tasarım spektral ivmeleri $S_{aeV}(T)$ yatay deprem yer hareketi için tanımlanan kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısına ve doğal titreşim periyoduna bağlı olarak yerçekimi ivmesi [g] cinsinden Denk (2.6) ile tanımlanır (Şekil 2.9).

$$\begin{aligned} S_{aeV}(T) &= (0.4 + 0.6 \frac{T}{T_{AV}}) S_{Vs} & (0 \leq T \leq T_{AV}) \\ S_{aeV}(T) &= S_{Vs} & T_{AV} \leq T \leq T_{BV} \\ S_{aeV}(T) &= S_{Vs} (T_{BV}/T)^n & (T_{BV} \leq T) \end{aligned} \quad (2.6)$$

T_{AV} ve T_{BV} düşey spektrum köşe periyotları aşağıda verilmiştir.

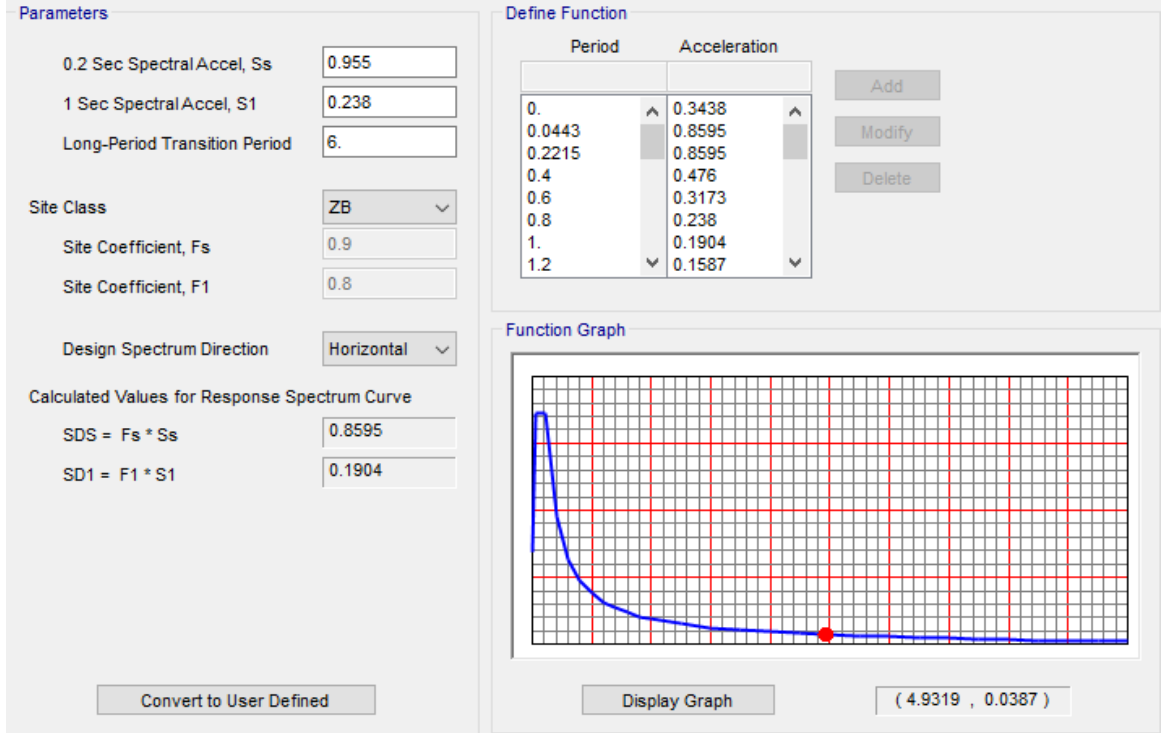
C_L terimi $C_L = 1 - \frac{S_{VI}}{S_{VS}}$ bağıntısı ile tanımlanmıştır. Bu bağıntıda yer alan kısa periyot düşey spektral ivme katsayısı S_{VS} ve 1.0 saniye periyoda karşı gelen düşey spektral ivme katsayısı S_{VI} aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

$$\begin{aligned} S_{VS} &= a_{VS}(A_S)^{b_{VS}} & S_{VI} &= a_{VI}(S_I)^{b_{VI}} \\ a_{VI} &= 9.90[(v_S)_{30}]^{-0.467} & b_{VI} &= 0.91 \\ a_{VS} &= 5.07[(V_S)_{30}]^{-0.306} & b_{VS} &= 1.03 + 0.066[\min(V_S)_{30}, 760]/1000 \end{aligned} \quad (2.7)$$

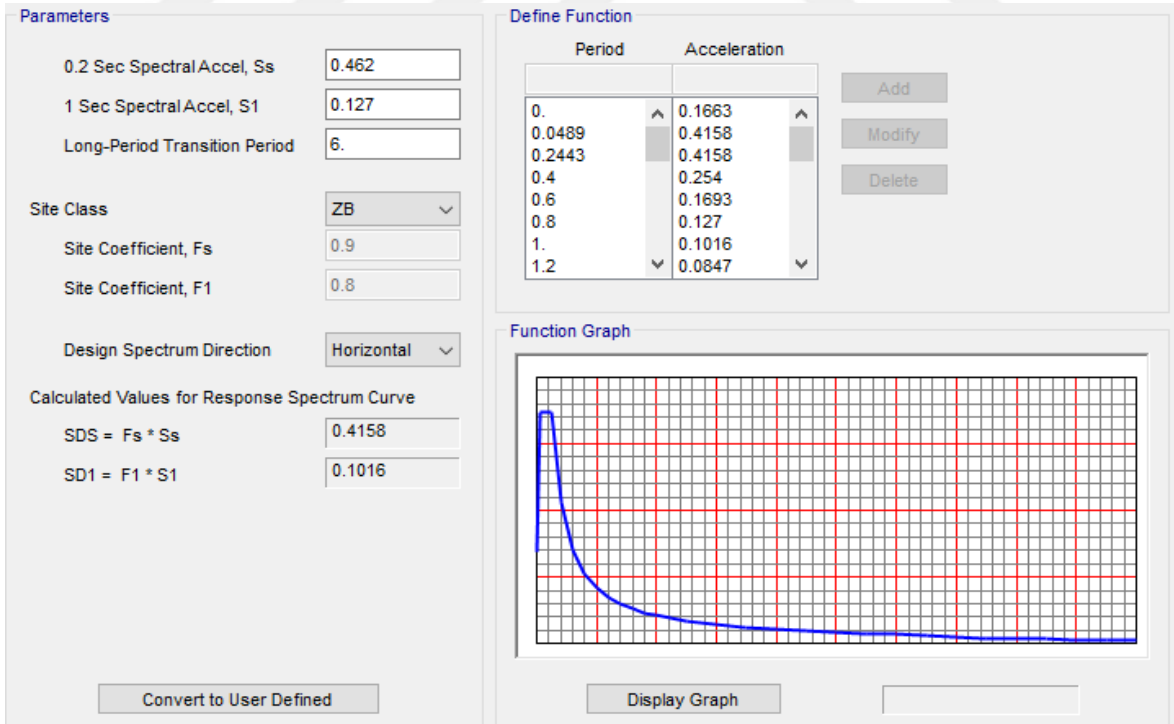


Şekil 2.9. Düşey elastik tasarım ivme spektrumu (TBDY-2018)

Bu bilgiler ışığında elde edilen deprem spektrumu SAP2000 programına Şekil 2.10 ve Şekil 2.11' daki gibi tanımlanacaktır.



Şekil 2.10. 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan DD-1 deprem yer hareketine karşılık gelen tasarım ivme spektrumunun tanımlanması



Şekil 2.11. 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan DD-2 deprem yer hareketine karşılık gelen tasarım ivme spektrumunun tanımlanması

2.5. Köprünün Doğrusal Olmayan Elastik Hesabı

Doğrusal olmayan elastik yöntemleri (statik itme ve zaman tanım alanında analiz) yapının davranışı hakkında daha gerçekçi sonuçlar verdiği için araştırmacılar ve mühendisler tarafında daha sık tercih edilmektedir. Bu çalışmada, düzlem köprünün dinamik doğrusal olmayan tepkisini yaklaşık olarak elde etmek için zaman tanım alanında analiz ve statik itme analizi yapılmıştır.

2.5.1. Statik İtme Analizi

Budan köprüsünün doğrusal olmayan statik itme analizi için XTRACT ve SAP2000 programları kullanılmıştır. Plastik mafsallı hipotezinde plastik şekil değiştirmelerden meydana gelen plastik mafsallı uzunlukları belirlenmesi gerekmektedir. Plastik mafsalların uzunlukları aşağıdaki ampirik formülden elde edilmektedir (CALTRANS 2004).

$$L_p = 0.08L + 0.022f_{ye}d_{bl} \geq 0.044f_{ye}d_{bl} \quad (2.9)$$

Burada, f_{ye} donatı çeliğin akma dayanımı, L_p plastik mafsallı boyu, L kolon boyu, ve d_{bl} boyuna donatı çapını belirlemek üzere, $L_p = 0.08L + 0.022f_{ye}d_{bl} \geq 0.044f_{ye}d_{bl}$ bağıntısı kullanılarak

$$L_p = 0,08 \times 91.77 + 0.022 \times 420 \times 0.032 = 7.637 \text{ m}$$

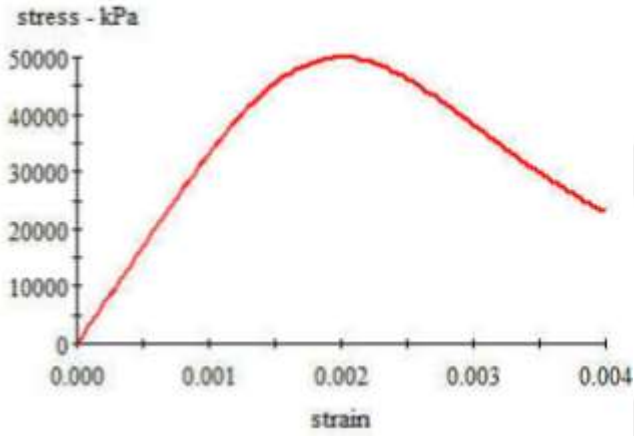
$$0.044f_{ye}d_{bl} = 0.044 \times 420 \times 0.032 = 0.591 \text{ m}$$

Plastik mafsallı boyu 7.637 m olarak hesaplanmıştır.

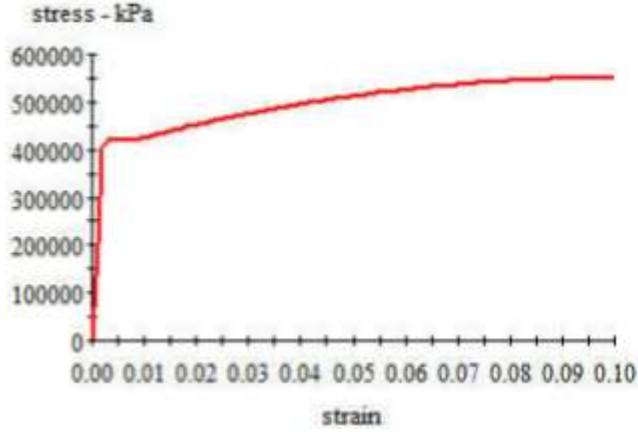
Statik itme analizi iki şekilde yapılabilir: SAP2000 programında tanımlı olarak otomatik seçeneği ile varsayılan malzeme özelliklerini dikkate alarak çözümlenme yapmak veya kullanıcı tarafından betonun ve diğer malzemelerin gerçek davranışını içeren verilerin girilmesiyle.

2.5.1.1. Kolonlarda Moment Eğrilik ve Normal Kuvvet-Moment (P-M) Etkileşim Yüzeyi İlişkisinin Belirlenmesi

Sargılı beton modeli kullanılarak malzeme özellikleri XTRACT programına girilerek Gerilme-şekil değiştirme diyagramları elde edilmiştir. Aynı şekilde S420 donatı çeliğinin için malzeme özellikleri XTRACT programına tanımlanarak Gerilme-şekil değiştirme diyagramı elde edilmiştir (Şekil 2.12-2.13).

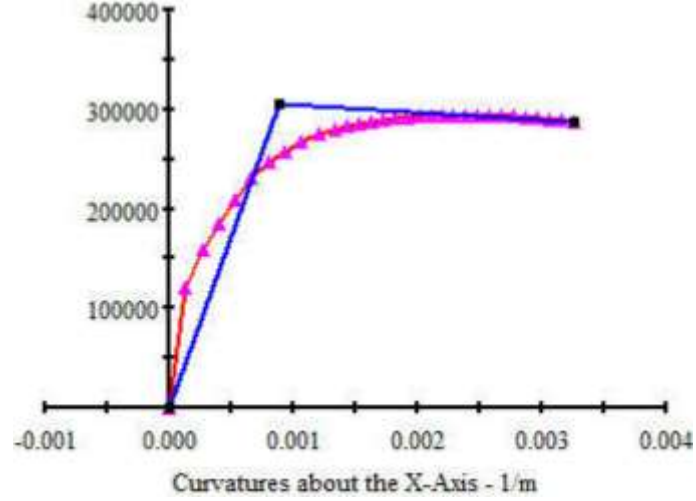


Şekil 2.12. C40 betonu için Gerilme-Şekildeğiştirme eğrisi



Şekil 2.13. S420 donatı çeliği için Gerilme-Şekildeğiştirme eğrisi

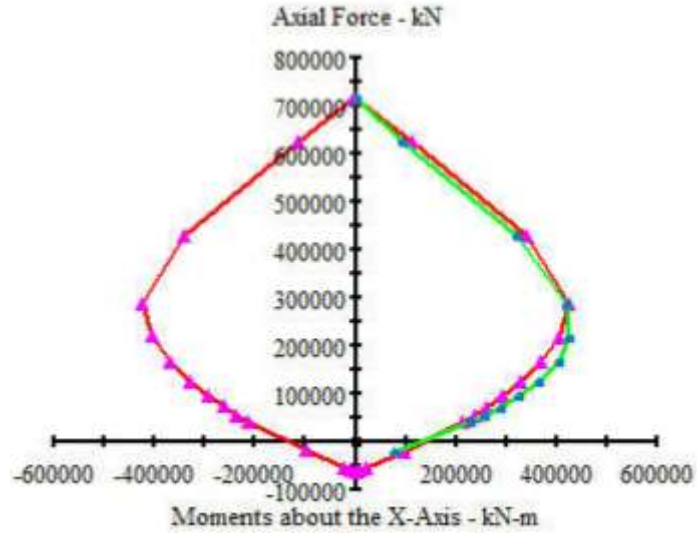
Eksenel sabit yüklere bağlı olarak kolonun, gerilme-şekil değiştirme bağıntısı kullanılarak Moment-Eğrilik grafiği elde edilmiştir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. Moment-eğrilik grafiği

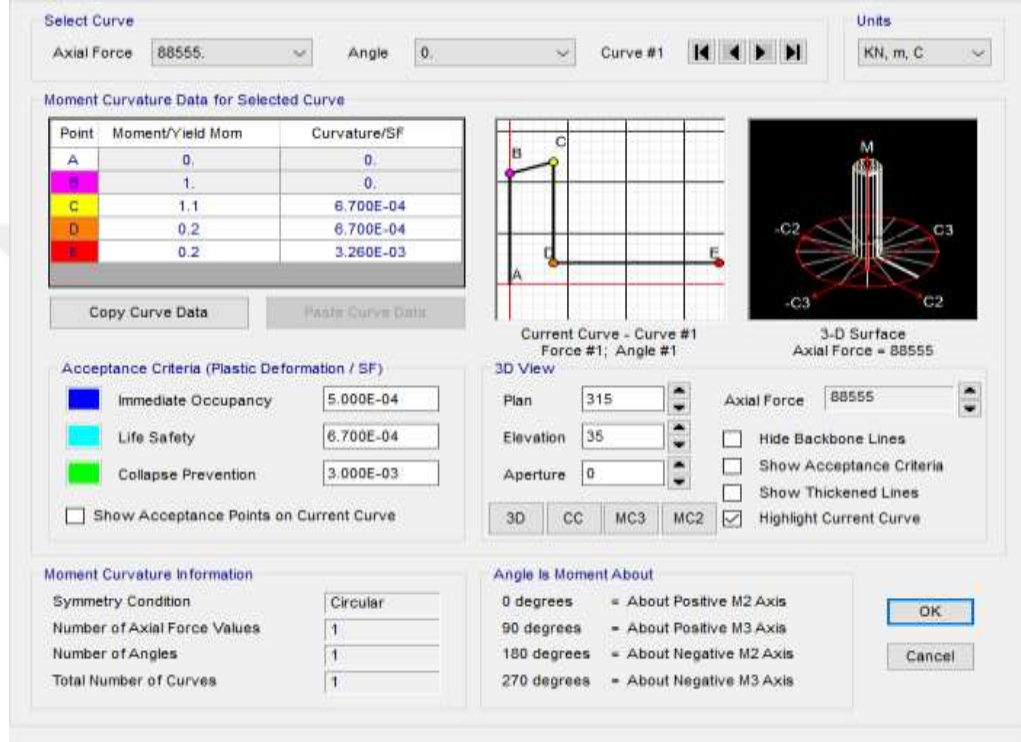
XTRACT program kullanılarak, beton ve çelik özelliklerine bağlı elips şeklinde ve içerisi boş kolonun analizi yapılmıştır. Köprü modeline ait moment-eğrilik grafiği elde edilmiştir. 91.77 m uzunluğundaki kolonun, basınç kuvveti ile moment (P-M) etkileşim yüzeyi ve bunların SAP2000 aktarılması Şekil 2.16' de verilmektedir.

Normal kuvvet – moment etkileşim yüzeyinde kolon doğrusal davranış kapasitesini aşıp doğrusal olmayan davranış sergilemektedir. Aşağıda Budan köprüsü kolonun eksenel basınç kuvveti ve moment ilişkisi gösterilmektedir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. P-M etkileşim yüzeyi

SAP2000 programında farklı tiplerde plastik mafsalları tanımlanabilir: P, V2, V3, T, M2, M3, P-M2-M3 şeklinde mevcuttur. Bu tez kapsamında köprü modelinin kolonların üst ve alt uçlarında bir aksel kuvvet ve iki taraflı eğilme momenti (P-M2-M3) mafsalları atanmıştır. Plastik mafsallın plastik dönme kapasitesi, plastik mafsallın uzunluğu boyunca kolonun eğrilik kapasitesi ile doğru orantılıdır.



Şekil 2.16. Moment eğrilik değerlerinin SAP2000 programına tanımlanması

2.5.2. Zaman Tanım Alanında Analiz

Zaman tanım alanı analiz yönteminde gerçek veya üretilmiş bir deprem kaydının kullanılması gerekmektedir. Daha önce gerçekleşen depremlerin ivme kayıtlarının bu konuda önemli bir yeri vardır. World data center for solid earth geophysics, *PEER*, ve AFAD deprem kayıtlarını saklayan önemli merkezlerdir. Boyutlama aşamasında gerçek yer hareketi kayıtlarının esas alınması tercih edilir. Gerçek yer hareket kaydının bulunmaması durumunda, yer hareketinin rastgele bir titreşim kabul ederek yapay deprem kayıtları da kullanılabilir.

Köprü, viyadük veya bina türü yapıların zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan deprem hesabı için yapay yollarla üretilen, benzeştirilmiş veya daha önce kaydedilmiş depremler kullanılabilir.

Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Hesap Yönteminin amacı, taşıyıcı sistemdeki doğrusal olmayan davranış göz önüne alınarak sistemin hareket denkleminin adım adım çözülmesidir. Analiz sırasında her bir zaman artımında sistemde meydana gelen yer değiştirme, plastik şekil değiştirme ve iç kuvvetler ile bu büyüklüklerin deprem istemine karşı gelen maksimum değerler hesaplanmaktadır. Zaman tanım alanında analiz için köprünün bulunduğu yerin deprem ve zemin özelliklerini temsil eden gerçek veya benzeştirilmiş deprem kayıtlarının elde edilmiş olması veya türetilmiş olması gereklidir. Çözümler, kullanılan kaydın özelliklerine göre değişim göstereceğinden, bu tür analiz yaklaşımında onbir kaydın kullanılması ve elde edilen sonuçların bir istatistik süreçten geçirilmesi öngörülmektedir (Aydınoğlu, 2005).

Bu çalışma kapsamında, 1992 Kocaeli depremi yarımca istasyonu kaydı alınmıştır. Köprünün doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri için kullanılan yer hareketi deprem kayıt hız değeri, kayıt süresi ve deprem kayıt ivme değeri Tablo 2.5’de verilmiştir.

Tablo 2.5. Deprem kaydı parametreleri

Deprem Kaydı	PGA (g)	PGV (cm/sn)	Kayıt Süresi (sn)
Kocaeli	0.292	57.86	15.00

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

3.1. Elde Edilen Sonuçların Değerlendirmesi

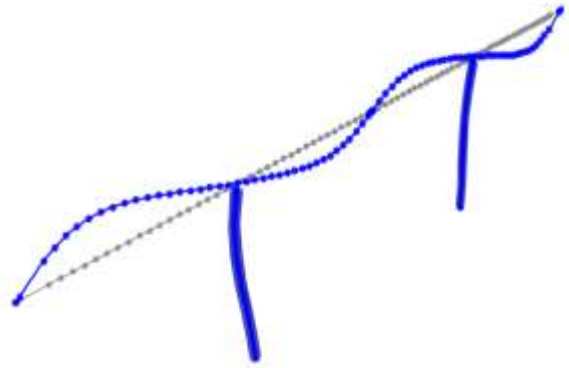
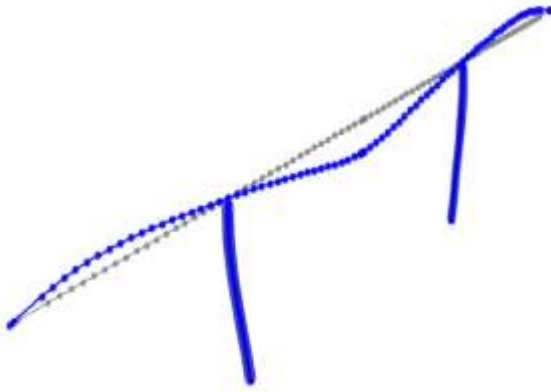
Artvin-Erzurum karayolu üzerinde bulunan ardgerilmeli kutu kesitli Budan Köprüsünün sonlu eleman modeli SAP2000 programı ile analiz edilmiştir. Bu analiz sırasında köprünün doğrusal ve doğrusal olmayan davranışları elde edilmiştir. Doğrusal davranış içeren analizlerde köprü kendi ağırlığı, hareketli yükler ve deprem ise maksimum ivmeye sahip yükleri dikkate alınmıştır. Doğrusal olmayan analizlerde, 0.292g maksimum ivmeye sahip Kocaeli depremi kaydı kullanılarak statik itme analizi yapılmıştır. Doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerden elde edilen büyüklükler karşılaştırılmıştır.

3.1.1. Köprünün Modal Analizi

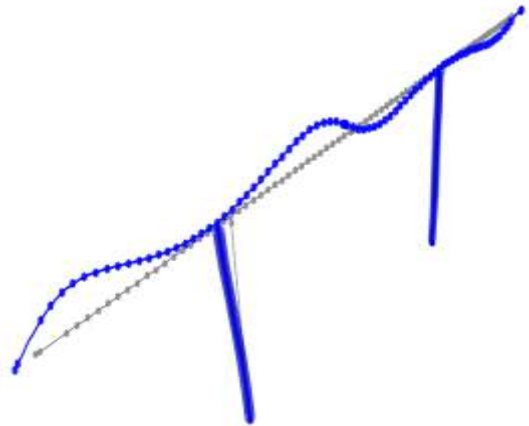
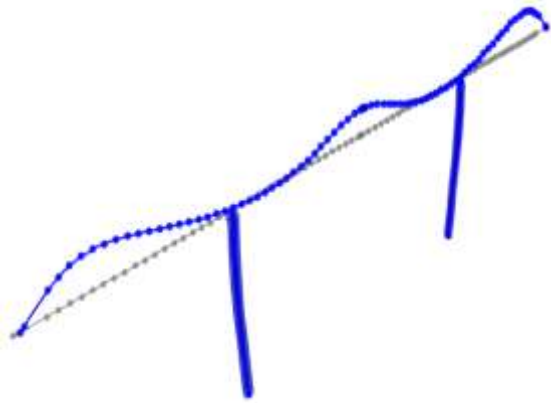
Budan köprüsünün modal analizi yapılarak serbest titreşim davranışı elde edilmiştir. Bu analiz sırasında 12 mod dikkate alınmıştır. Elde edilen mod şekilleri Şekil 3.1' de verilmektedir. Analiz sonucunda elde edilen periyot, frekans ve kütle katılım değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Modal analizi sonuçları

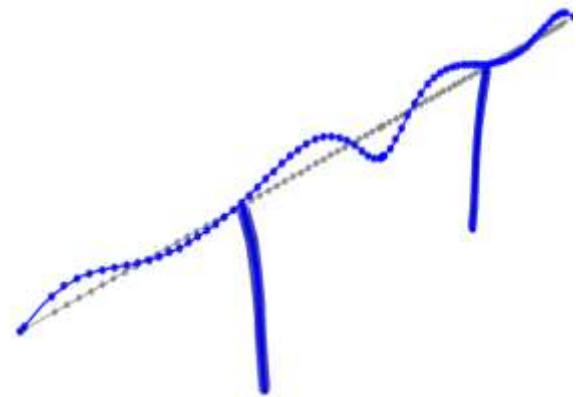
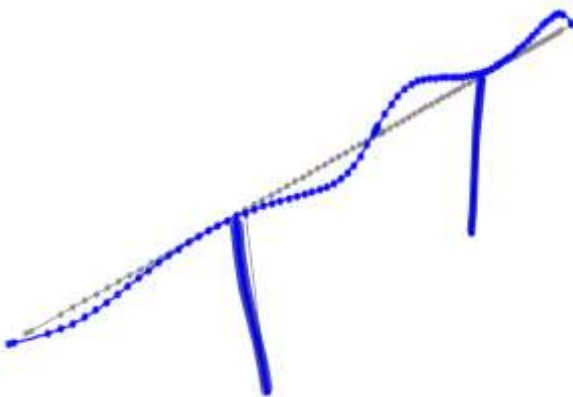
Mod Numarası	Periyot (sn)	Frekans (Hz)	Kütle katılım oranları	
			X yönünde	Z yönünde
1	1.629	0.613	0.015	0.0401
2	0.899	1.112	0.022	0.0000
3	0.660	1.513	0.047	0.3777
4	0.481	2.076	0.483	0.0413
5	0.464	2.153	0.265	0.0218
6	0.300	3.329	0.009	0.1195
7	0.242	4.121	0.000	0.0000
8	0.239	4.179	0.000	0.1790
9	0.195	5.120	0.0005	0.0000
10	0.174	5.714	0.0901	0.0018
11	0.153	6.527	0.0000	0.1657
12	0.136	7.327	0.0079	0.0000
Toplam			0.9425	0.94266



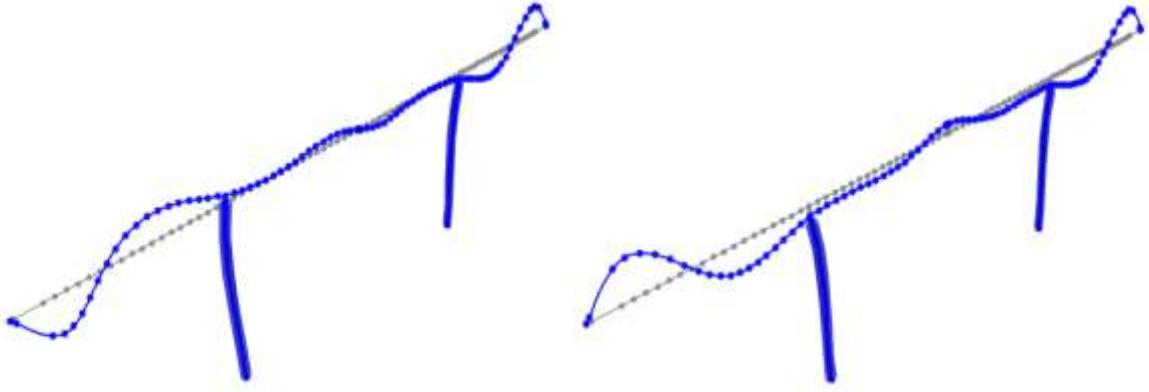
Mod 1; $T = 1.630$; $f = 0.614$	Mod 2; $T = 0.900$; $f = 1.112$
----------------------------------	----------------------------------



Mod 3; $T = 0.661$ $f = 1.513$	Mod 4; $T = 0.482$; $f = 2.076$
--------------------------------	----------------------------------

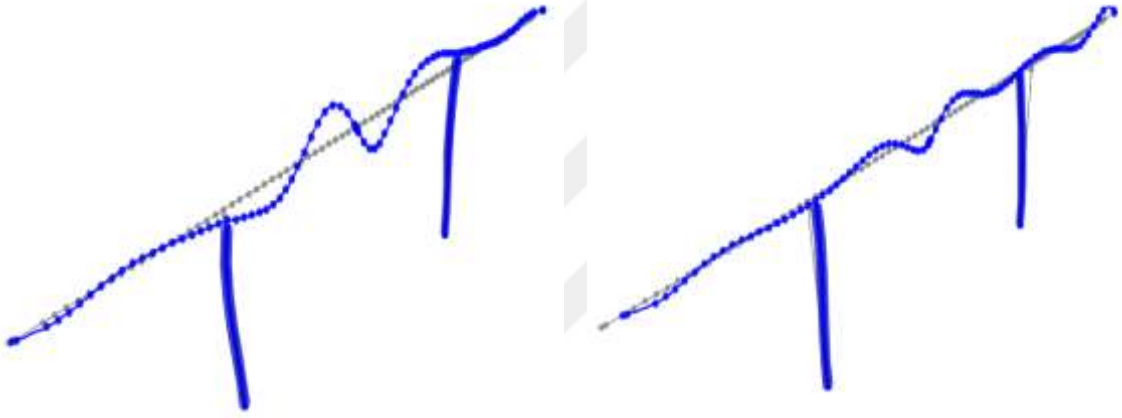


Mod 5; $T = 0.464$, $f = 2.153$	Mod 6; $T = 0.300$, $f = 3.330$
----------------------------------	----------------------------------



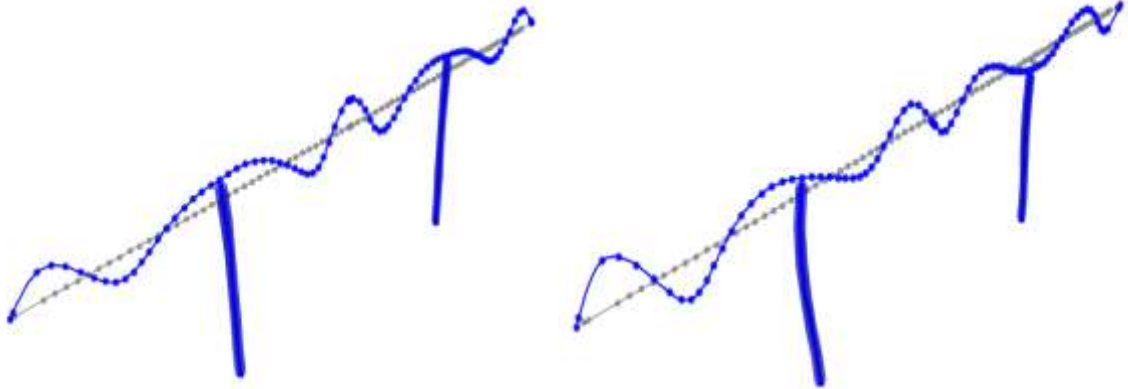
Mod 7; $T = 0.243$, $f = 4.121$

Mod 8; $T = 0.239$, $f = 4.180$



Mod 9; $T = 0.195$, $f = 5.121$

Mod 10; $T = 0.175$, $f = 5.715$



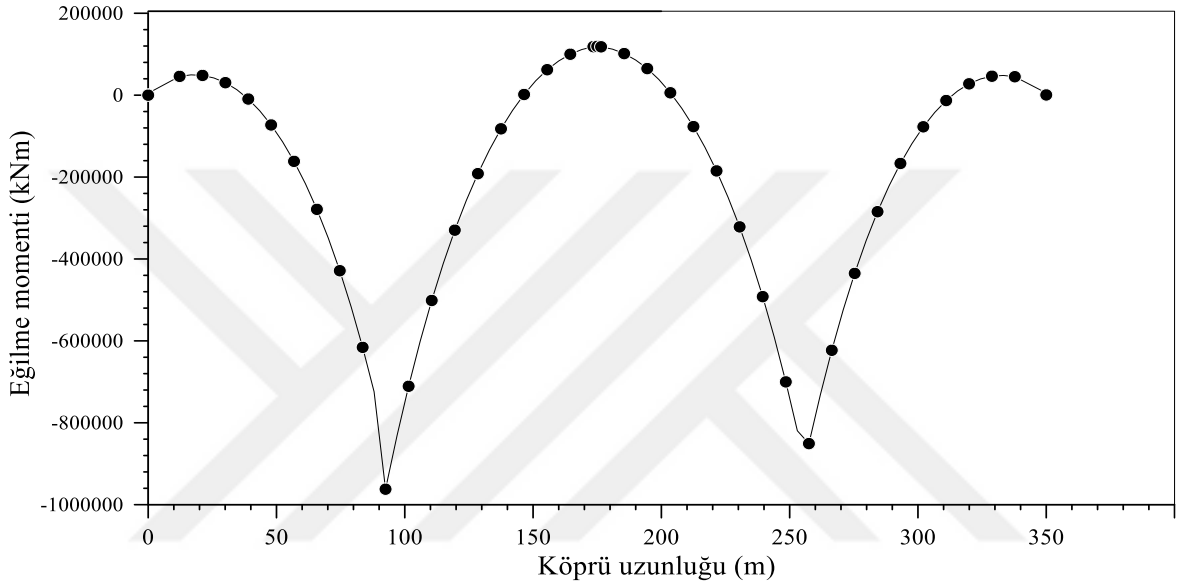
Mod 11; $T = 0.153$, $f = 6.528$

Mod 12; $T = 0.136$, $f = 7.328$

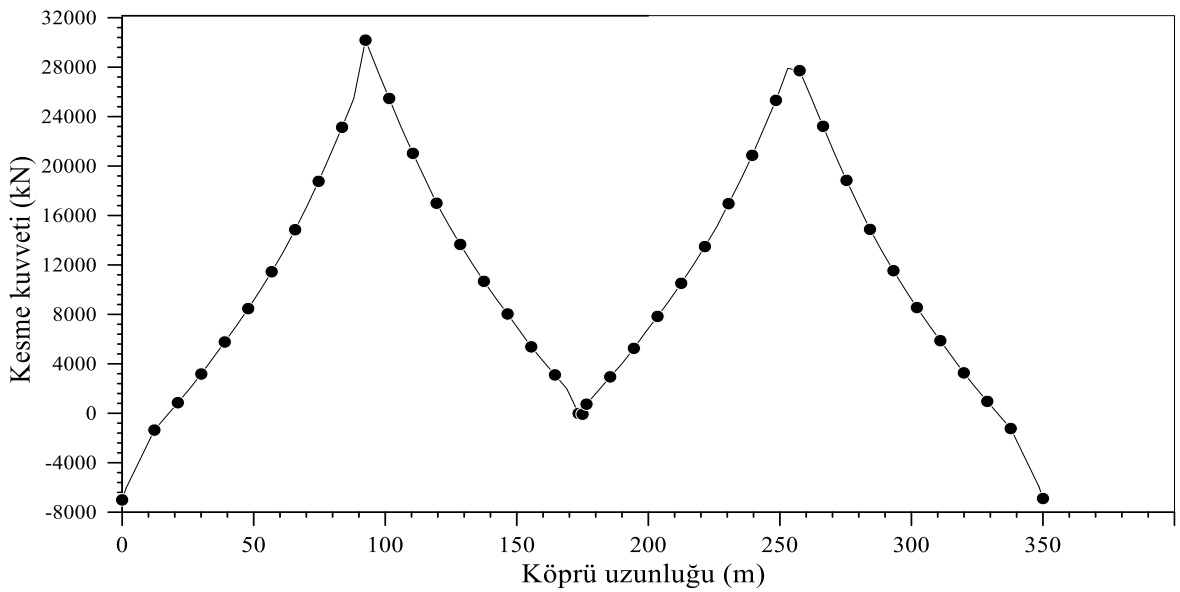
Şekil 3.1. İlk 12 mod şekilleri

3.1.2. Köprünün Sabit Yüklere Göre Analizi

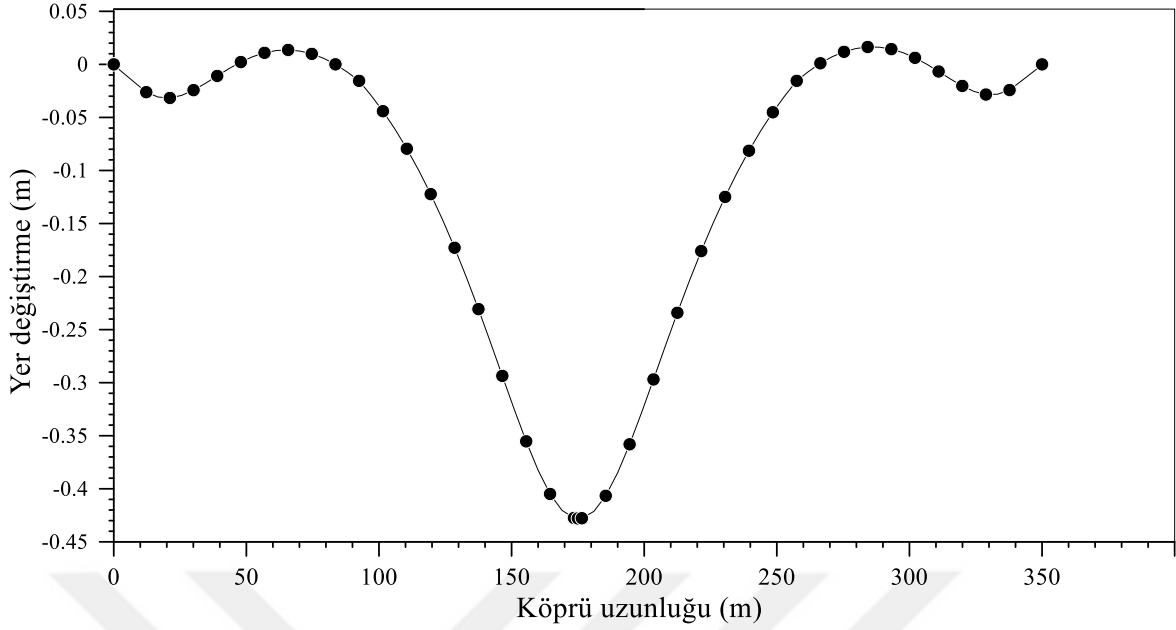
Budan köprüsü sabit yükler altında analizi yapılmıştır. Sabit yükler köprünün kendi ağırlığı, asfalt, yaya kaldırımı ve korkuluklardan oluşmaktadır. Köprünün analiz sonucunda elde edilen sonuçlar grafiklerle sunulmuştur. Şekil 3.2-3.4'te eğilme momenti, kesme kuvvet ve yer değiştirmelerin köprü uzunluğu boyunca değişimleri verilmektedir.



Şekil 3.2. G yüklemesinde oluşan köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti



Şekil 3.3. G yüklemesinde oluşan köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti



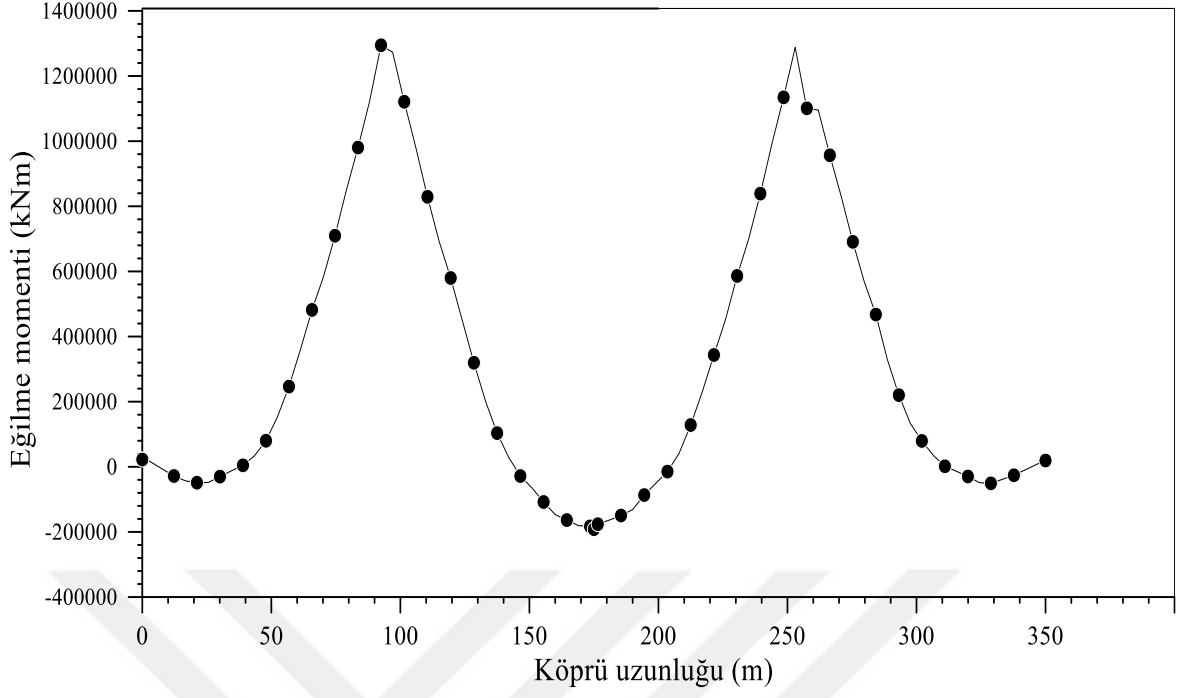
Şekil 3.4. *G* yüklemesinde oluşan köprü uzunluğu boyunca düşey yer değiştirme

Yukarıdaki şekillerde görüldüğü gibi sabit yükten dolayı maksimum düşey yer değiştirme köprünün orta açıklığında meydana gelmektedir. Maksimum düşey yer değiştirme değeri 43cm'dır. Maksimum kesme kuvvet kolonları hizalarında olduğu ve bu değeri 30×10^3 kN olduğu grafikte görülmektedir. Eğilme Moment değerleri kolon hizasında olduğu görülmektedir ve değeri 962×10^3 kNm'dır. Elde edilen bu eğilme momentleri, kesme kuvvetleri ve yer değiştirmelerin köprü yüklemesi yapılmadan önce olmaktadır. Ard germe uygulamasıyla ters sehim oluşacak ve bu büyüklükler büyük oranda azalacaktır.

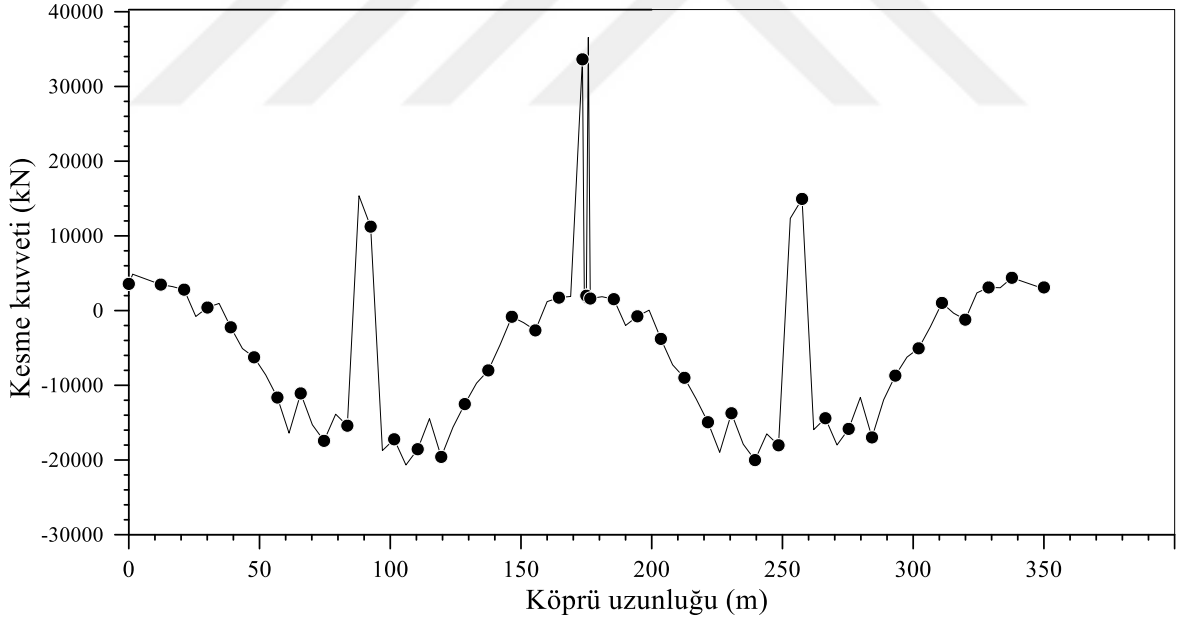
3.1.3. Ardgerme Uygulandıktan Sonra Köprü Davranışı

Budan köprüsünün ard germe uygulanmasıyla birlikte elde edilen kesit etkileri Şekil 3.5-3.72' de sırasıyla verilmektedir.

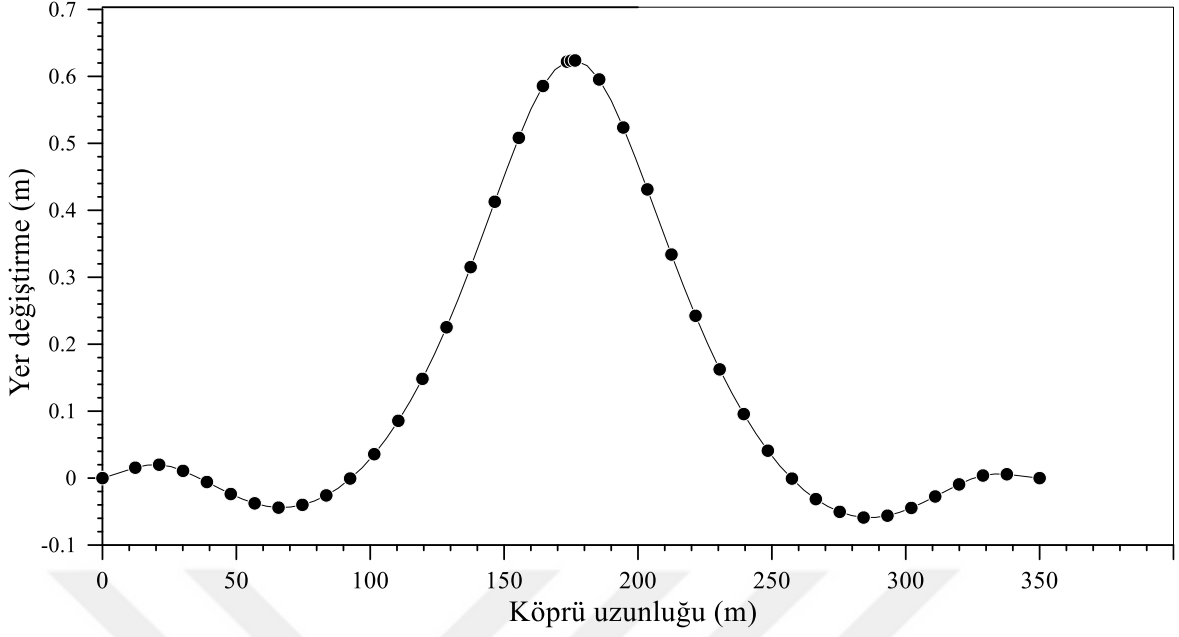
Yapılan analizde her bir ard germe kablosu 38 adet halat bükümü ile elde edilirken toplan alanı (53.2 cm^2) ve 7421.4 kN ard germe kuvvetine sahiptir.



Şekil 3.5. Ardgerme uygulanmasıyla köprü uzunluğu boyunca oluşan eğilme momenti



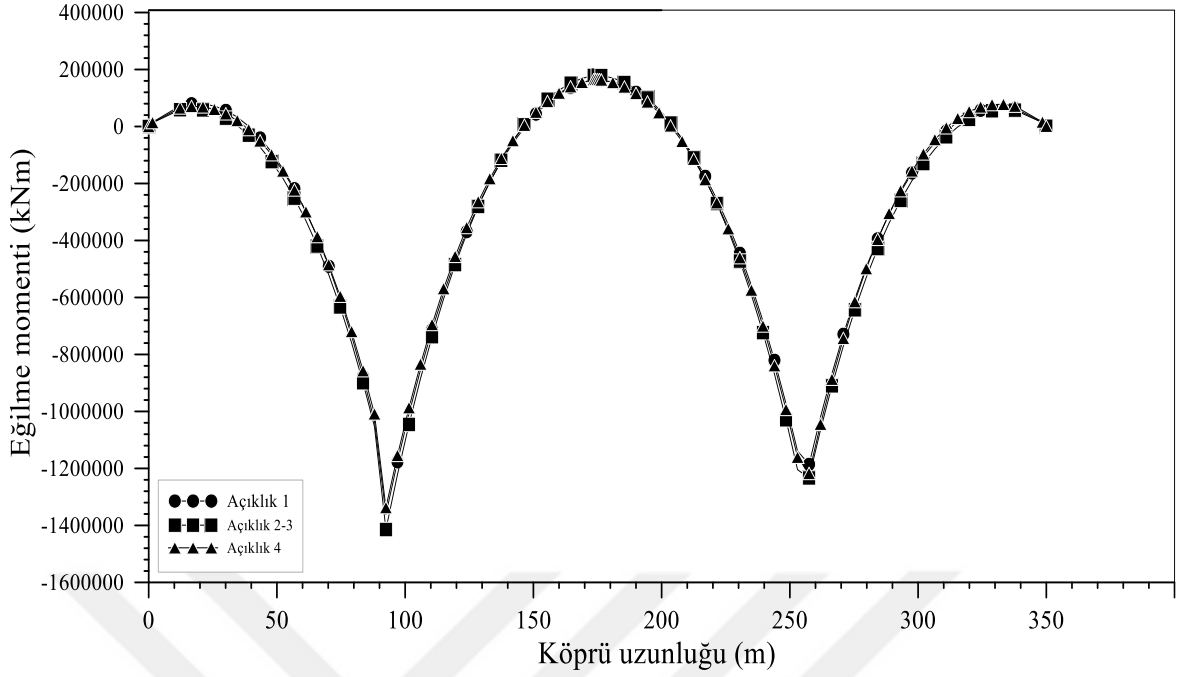
Şekil 3.6. Ardgerme uygulanmasıyla köprü uzunluğu boyunca oluşan kesme kuvveti



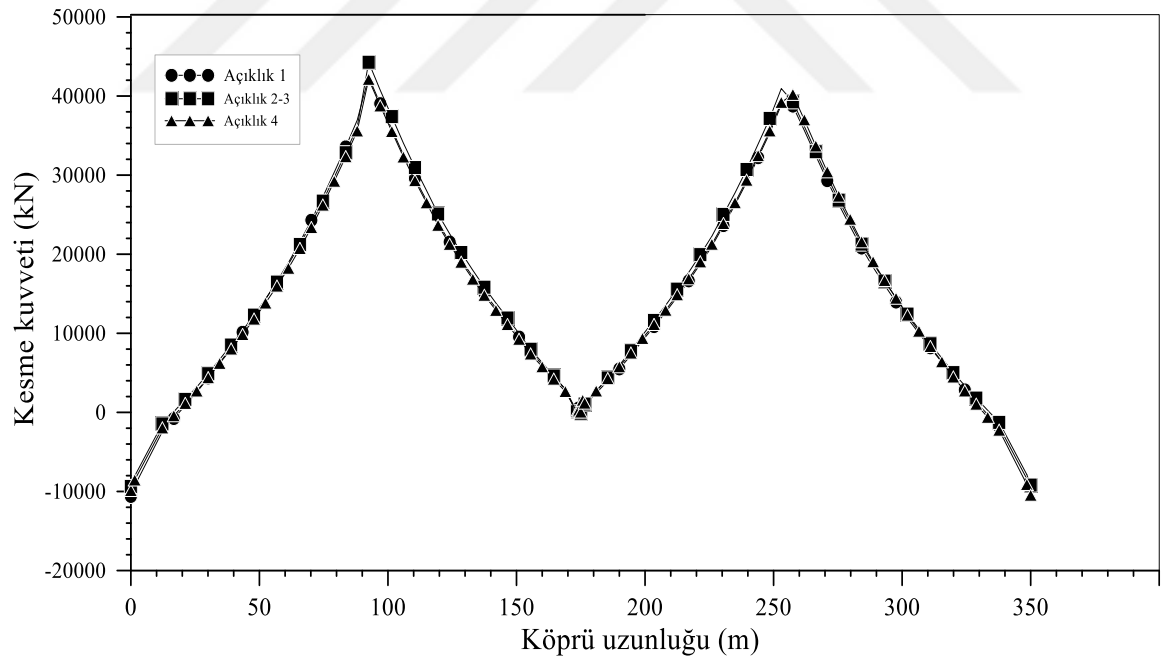
Şekil 3.7. Ardgerme uygulanmasıyla köprü uzunluğu boyunca oluşan düşey yerdeğiştirmeler

3.1.4. Köprünün Hareketli Yüklere Göre Analizi

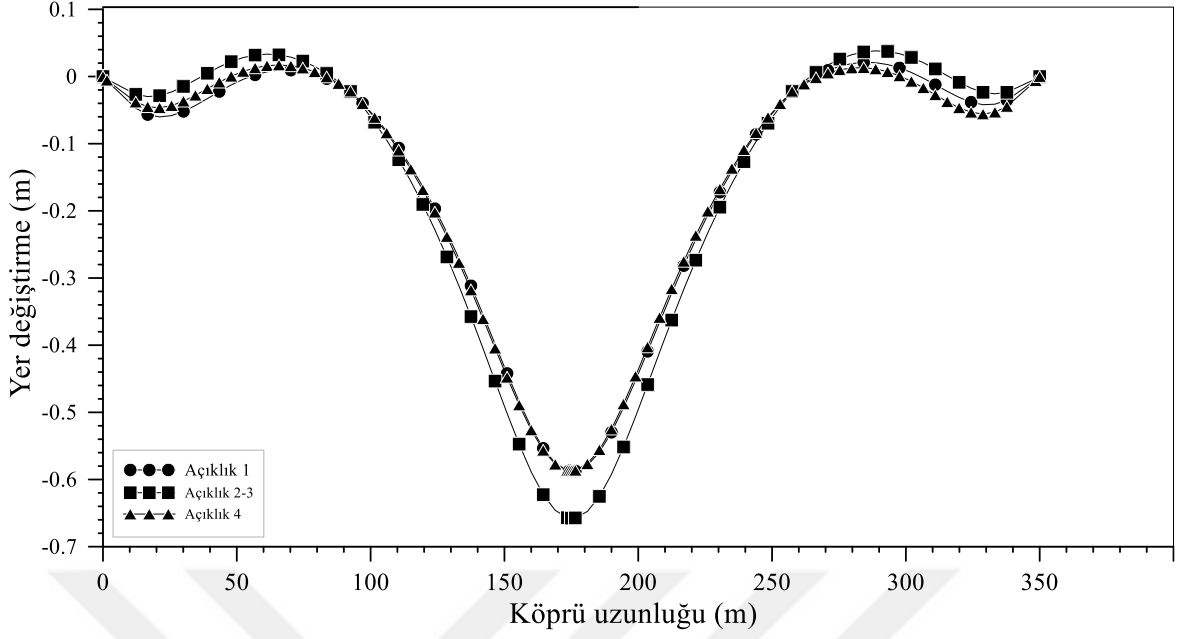
Taşıt yükünü temsilen elverişsiz yükleme durumu yapılmıştır. Köprü toplamda üç açıklıktan oluşmaktadır. Uzunluk boyunca birinci açıklığın dolu diğer açıklıkların boş olması, ikinci açıklığın dolu ve yan açıklıkların boş olması ve üçüncü açıklığın dolu ve diğer açıklıkların boş olması durumlarına ait eğilme momentleri, kesme kuvveti ve yer değiştirme diyagramları aşağıda verilmektedir. Taşıt yükünü temsilen 15 kN/m yayılı yük tanımlanmıştır. Analiz sonuçlarında meydana gelen eğilme momentleri, kesme kuvveti ve yer değiştirme grafikleri Şekil 3.8-3.10' de verilmiştir (Karadoğan, 2011). Yükleme $Q_1=Q_2=Q_3=15$ kN/m şeklinde yapılmıştır. Burada 1, 2, 3 açıklık isimleri olarak kullanılmıştır yani 1. açıklık, 2. açıklık ve 3. açıklık yükleme şeklinde.



Şekil 3.8. Elverişsiz yükleme durumları için köprü uzunluğu boyunca oluşan eğilme momenti



Şekil 3.9. Elverişsiz yükleme durumları için köprü uzunluğu boyunca oluşan kesme kuvveti

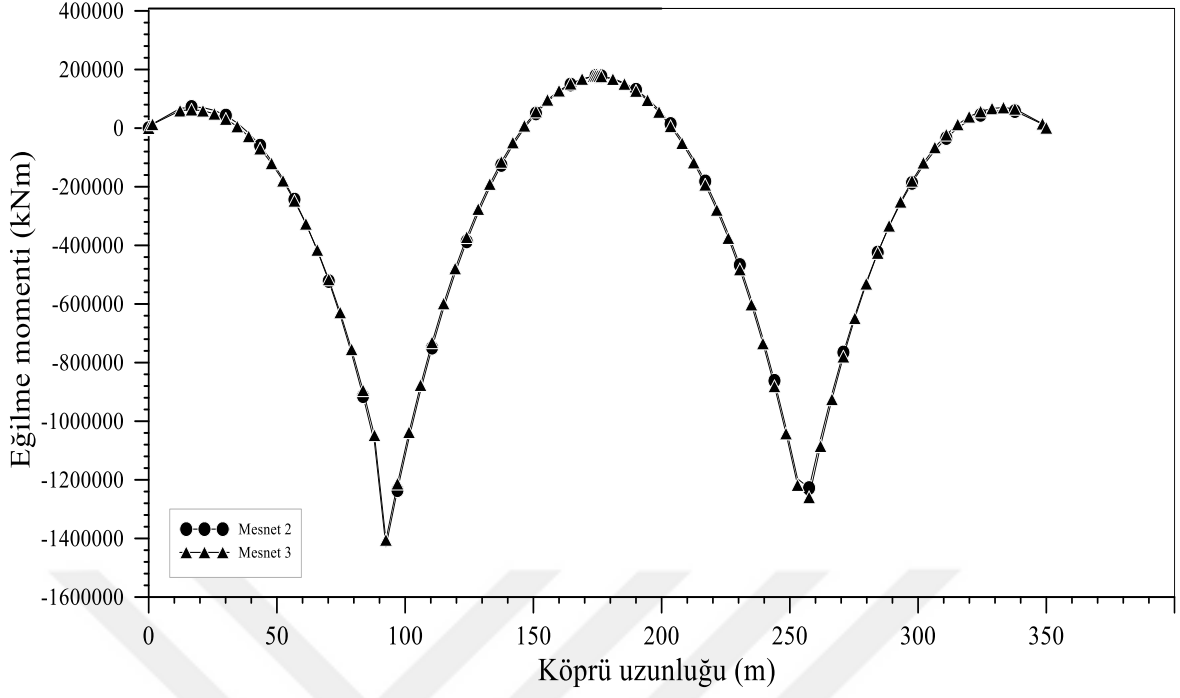


Şekil 3.10. Elverişsiz yükleme durumları için köprü uzunluğu boyunca oluşan düşey yerdeğiştirme

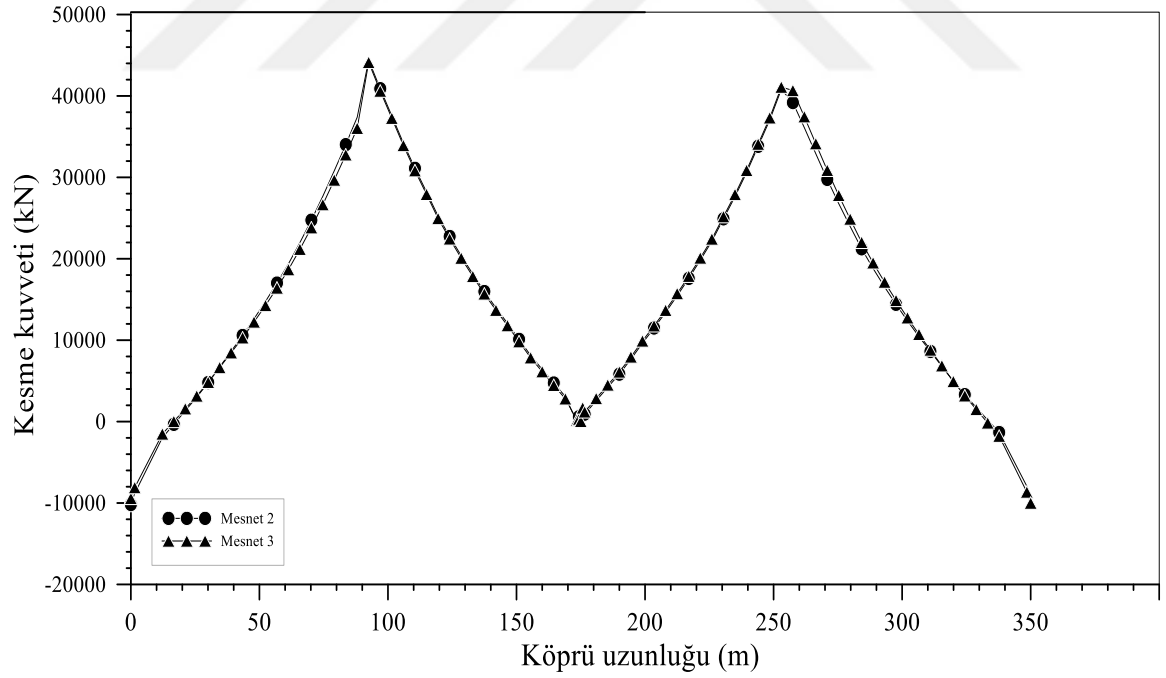
Yukarıdaki şekillerde görüldüğü gibi açıklıkların dolu ve boş olması durumlarına göre en elverişsiz yükleme gruplarına göre analiz yapılmıştır. Bu elverişsiz yüklemelerden dolayı maksimum kesme kuvveti ve eğilme moment değerleri kolon hizasında oluştuğu görülmektedir. Maksimum düşey yerdeğiştirme köprünün orta açıklığında-65cm'dir. Maksimum eğilme momenti ve Kesme kuvveti değerleri sırasıyla- $1,4 \times 10^6$ kNm ve 44×10^3 kN'dur. Elde edilen bu hareketli yüklemelerde ard germe etkisi dikkate alınmamıştır. Ard germe etkisi Şekil 3.5-3.7'de elde edilen sonuçlarla birleştirilmesi halinde oldukça azalmaktadır.

3.1.5. Kolonlar İçin Elverişsiz Yükleme Durumu

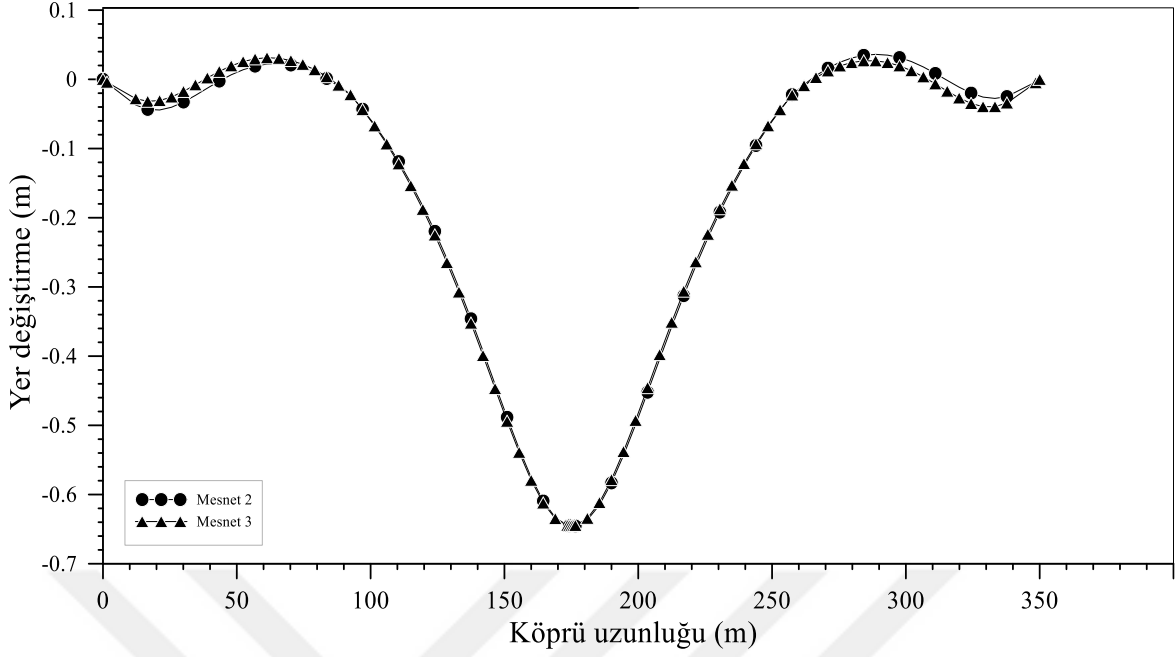
Önce birinci ve ikinci açıklıklar hareketli yüklerle dolu olduğu, daha sonra ikinci ve üçüncü açıklıkların hareketli yüklerle dolu olduğu kabul edilerek analizler yapılmıştır. Birinci durum Mesnet 2 ve ikinci durum mesnet 3 olarak isimlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.11-3.13 ile verilmiştir.



Şekil 3.11. Kolonlar için yapılan elverişsiz yüklemeden köprü uzunluğu boyunca oluşan eğilme momenti



Şekil 3.12. Kolonlar için yapılan elverişsiz yüklemeden köprü uzunluğu boyunca oluşan kesme kuvveti



Şekil 3.13. Kolonlar için yapılan elverişsiz yüklemeden köprü uzunluğu boyunca oluşan yer değiştirmeler

Kolonlar için yapılan elverişsiz yüklemelerden elde edilen maksimum kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri kolon hizasında olduğu görülmektedir. Maksimum düşey yer değiştirme köprü'nün orta açıklığında olup 65cm'dir. Maksimum eğilme momenti ve Kesme kuvveti değerleri sırasıyla $-1,4 \times 10^6 \text{ kNm}$ ve $44,4 \times 10^3 \text{ kN}$ olarak elde edilmiştir.

3.1.6. Budan Köprüsünün Servis Dönemi

Servis dönemi için sabit, hareketli ve deprem yüklemesi dikkate alınmıştır. Bu dönemde ard germe etkisini köprüye uygulandığı durumu göstermektedir. Deprem yüklemesi için köprü konumuna bağlı olarak Türkiye Deprem Tehlike Haritasından yararlanmıştır.

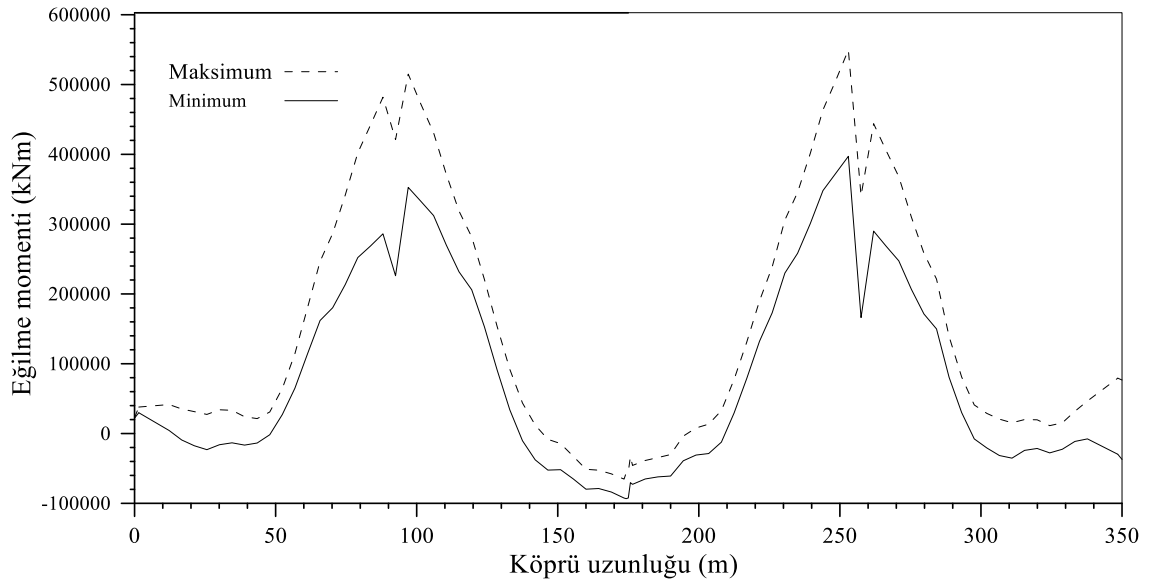
Yapılan analizler sonucunda elde edilen kesit etkileri aşağıdaki alt başlıklar altında sırasıyla incelenmiştir. Yükleme durumları tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Yük durumları

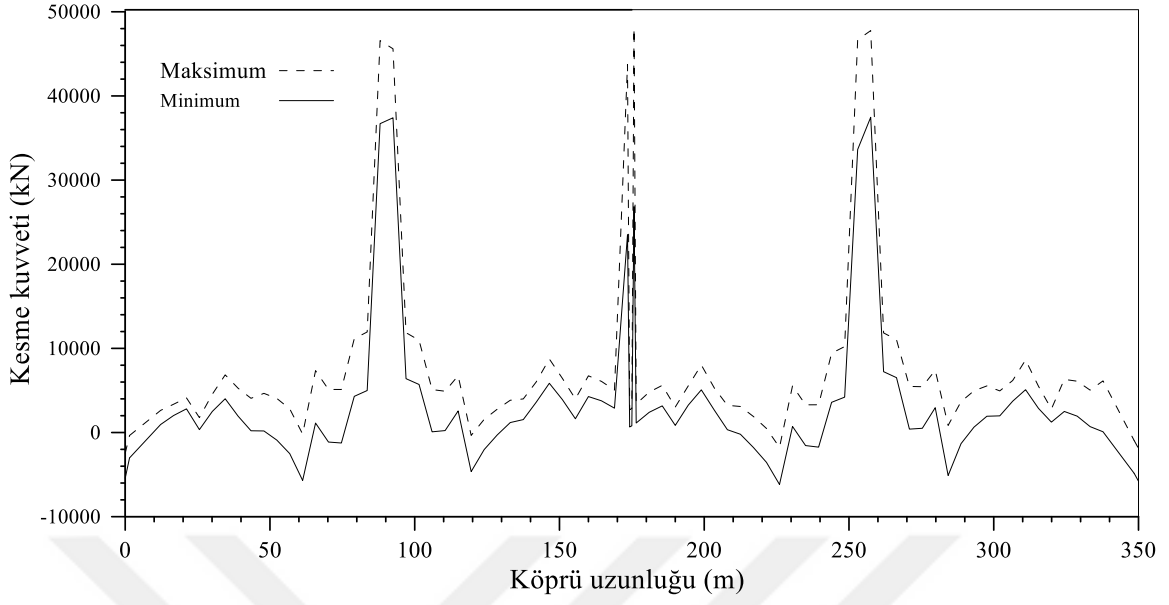
Yükleme Durumu	Katsayılar						Yük Birleşimleri
	G	Q_1	Q_2	Q_3	Deprem Düzeyi	Deprem doğrultusu	
I	1	1	0	0	DD-1	X	$G+Q_1+EX$
II	1	1	0	0	DD-2	X	$G+Q_1+EX$
III	1	1	0	0	DD-2	Z	$G+Q_1+EZ$
IV	1	1	0	0	DD-1	Z	$G+Q_1+EZ$
V	1	0	1	0	DD-1	X	$G+Q_2+EX$
VI	1	0	1	0	DD-2	X	$G+Q_2+EX$
VII	1	0	1	0	DD-1	Z	$G+Q_2+EZ$
VIII	1	0	1	0	DD-2	Z	$G+Q_2+EZ$
IX	1	0	0	1	DD-1	X	$G+Q_3+EX$
X	1	0	0	1	DD-2	X	$G+Q_3+EX$
XI	1	0	0	1	DD-1	Z	$G+Q_3+EZ$
XII	1	0	0	1	DD-2	Z	$G+Q_3+EZ$

3.1.6.1. Yüklemeye Durumu -I

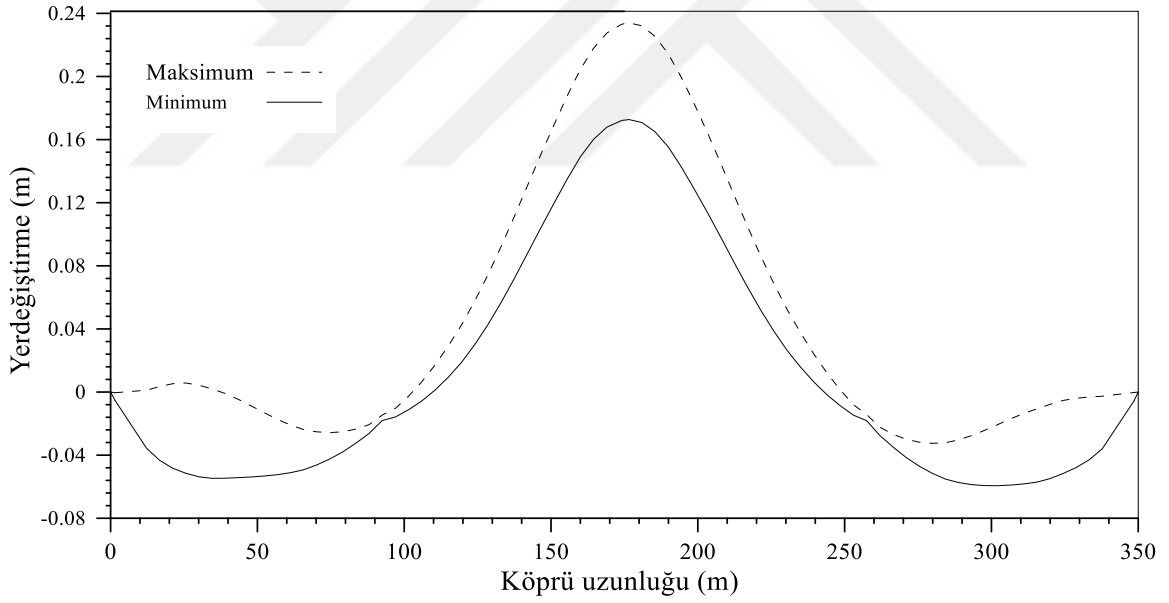
Elverişsiz yüklemeye yanında şiddetli deprem (DD-1) dikkate alınarak köprünün dinamik analizi yapılmıştır. Elden edilen maksimum ve minimum büyüklükler Şekil 3.14-3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.14. Yüklemeye durumu-I için köprü uzunluğu boyunca Eğilme momenti



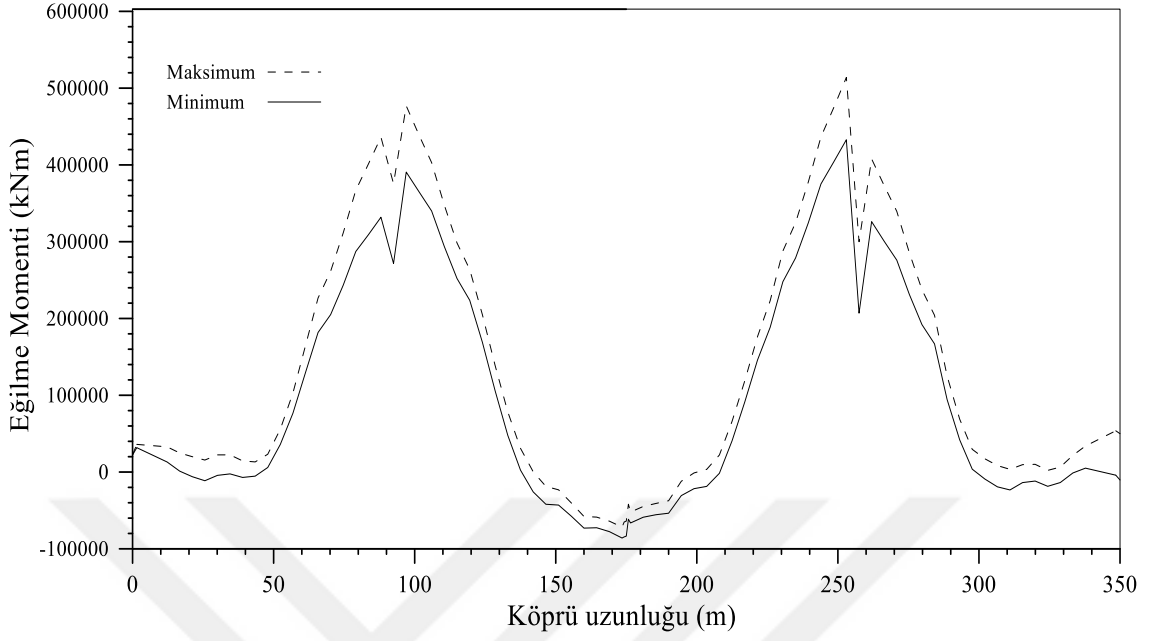
Şekil 3.15. Yükleme durumu-I için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti



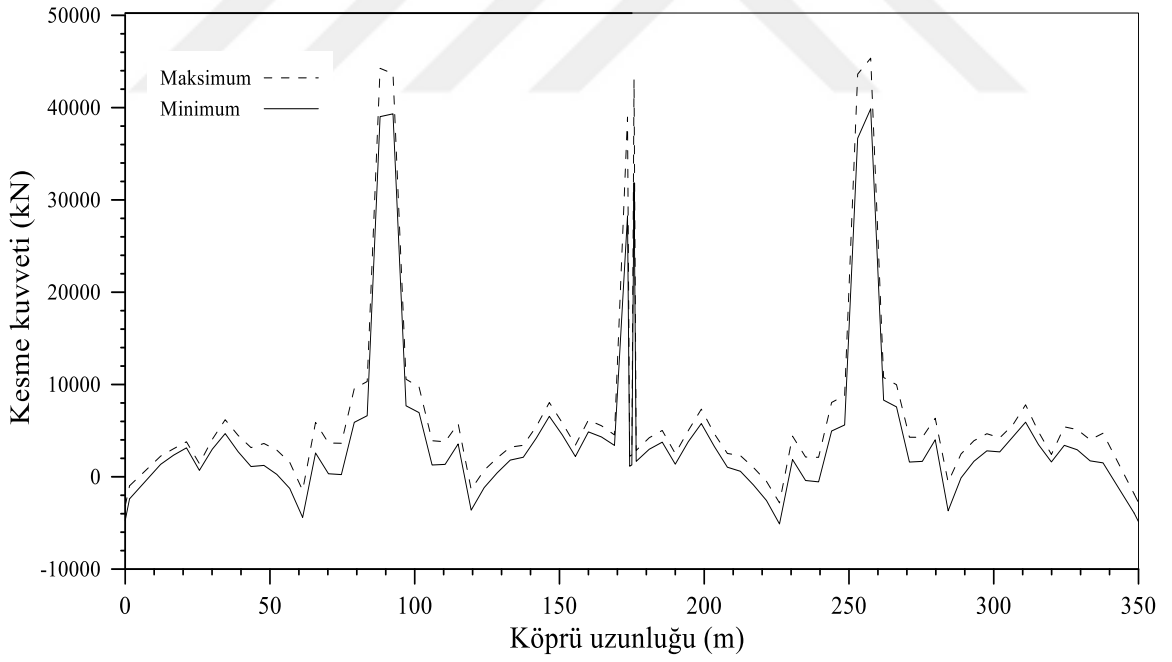
Şekil 3.16. Yükleme durumu-I için köprü uzunluğu boyunca yer değiştirme grafiği

3.1.6.2. Yükleme Durumu -II

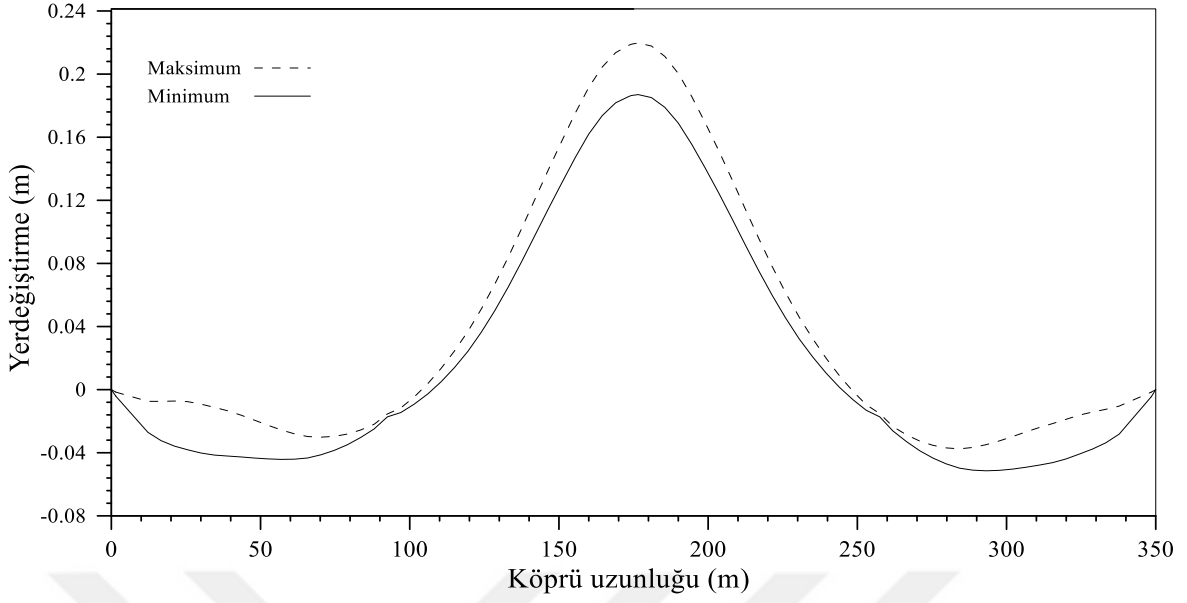
Elverişsiz yükleme yanında şiddetli deprem (DD-2) dikkate alınarak köprünün dinamik analizi yapılmıştır. Elden edilen maksimum ve minimum büyüklükler Şekil 3.17-3.19'da verilmiştir.



Şekil 3.17. Yükleme durumu-II için köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti



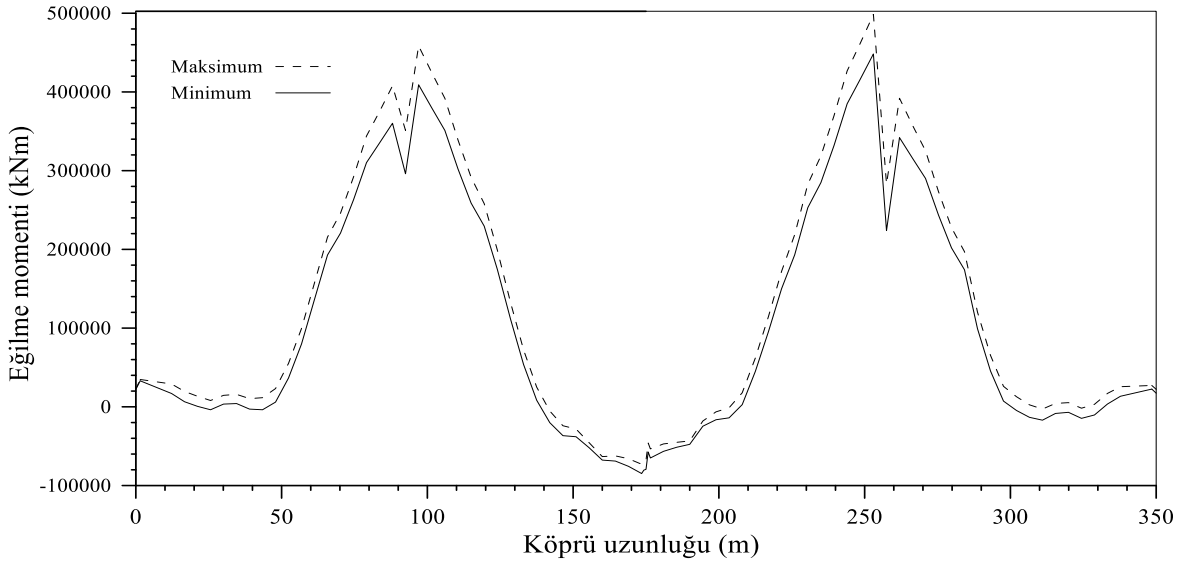
Şekil 3.18. Yükleme durumu-II için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti



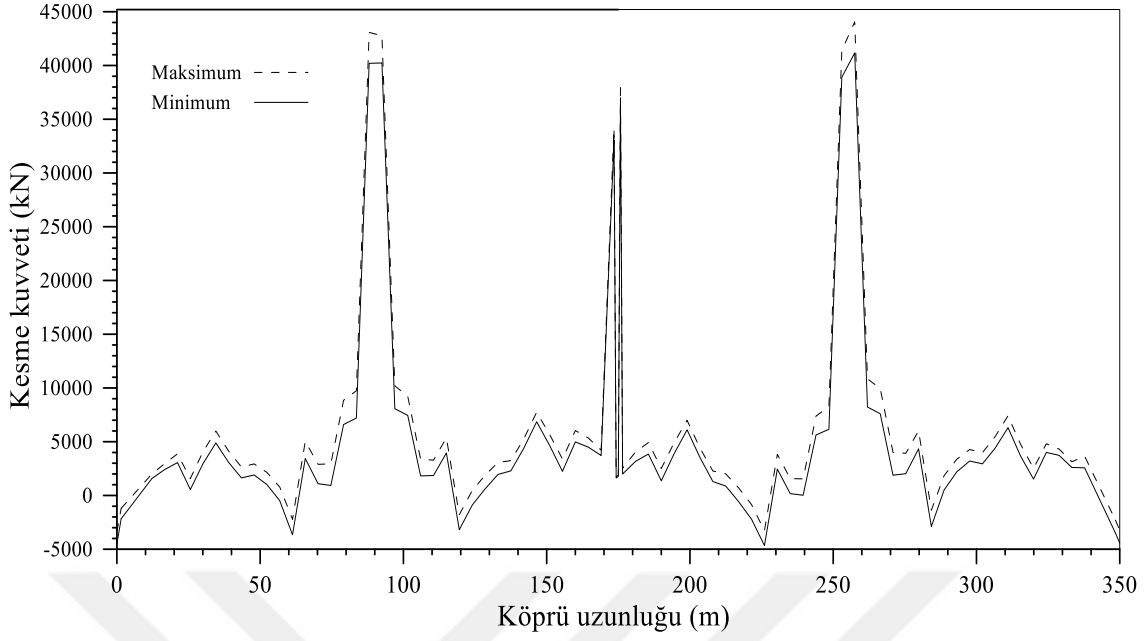
Şekil 3.19. Yükleme durumu-II için köprü uzunluğu boyunca düşey yerdeğiştirme

3.1.6.3. Yükleme Durumu -III

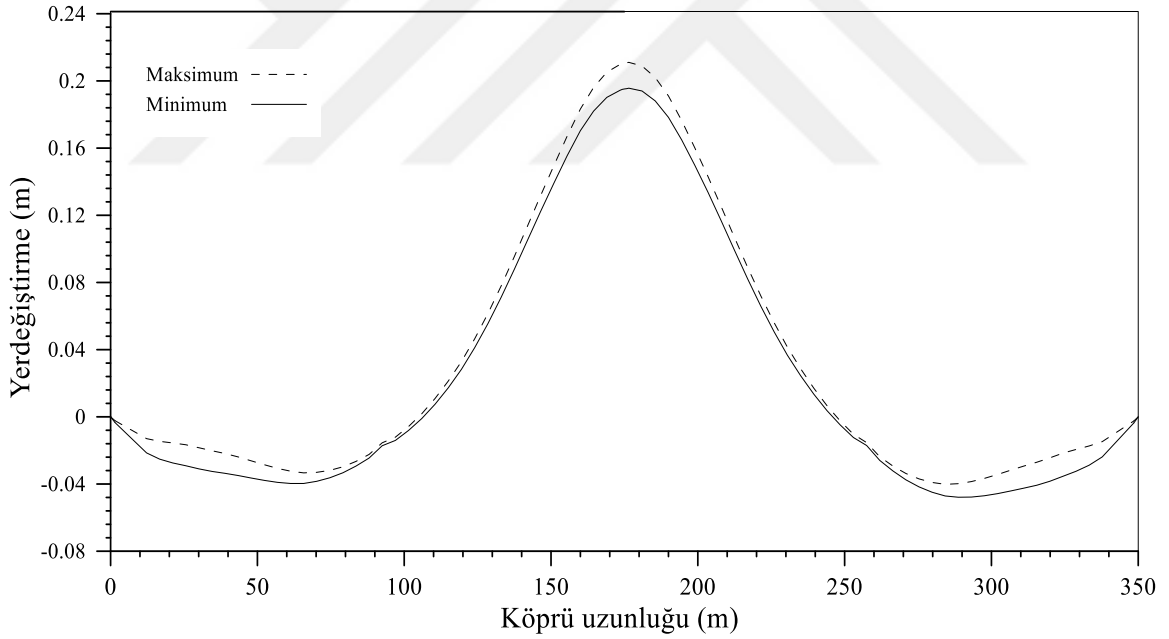
Elverişsiz yükleme yanında tasarım depremi dikkate alınarak köprü'nün dinamik analizi yapılmıştır. Elden edilen maksimum ve minimum büyüklükler Şekil 3.20-3.22'da verilmiştir.



Şekil 3.20. Yükleme durumu-III için köprü uzunluğu boyunca eğilme moment



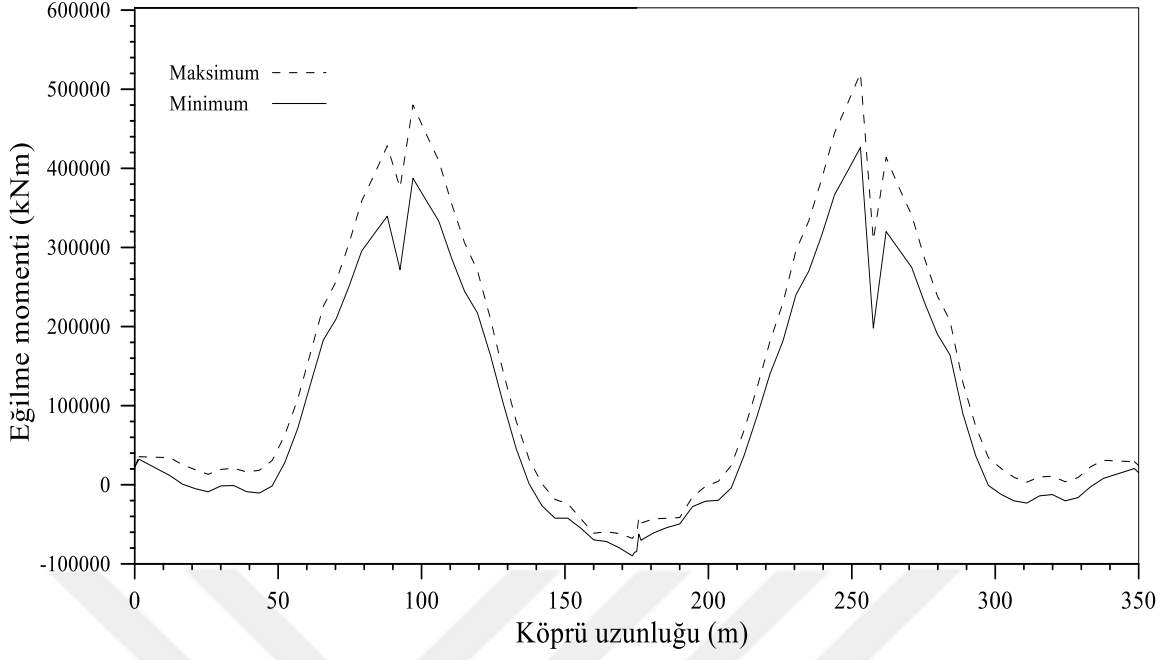
Şekil 3.21. Yükleme durumu-III için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti



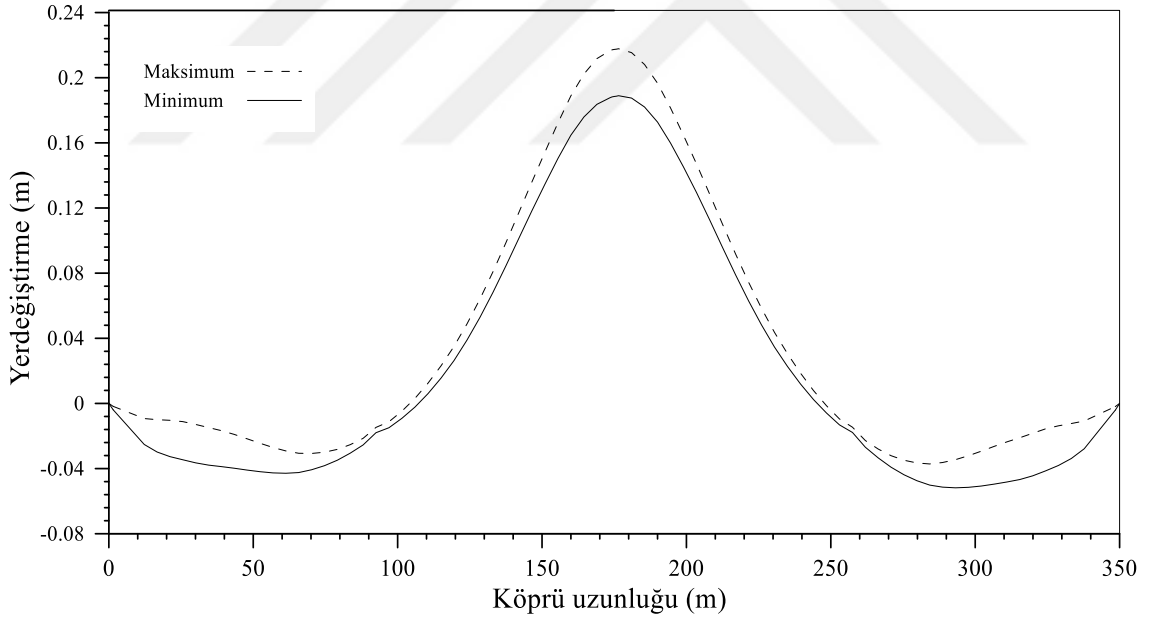
Şekil 3.22. Yükleme durumu-III için köprü uzunluğu boyunca yerdeğiştirme

3.1.6.4. Yükleme Durumu- IV

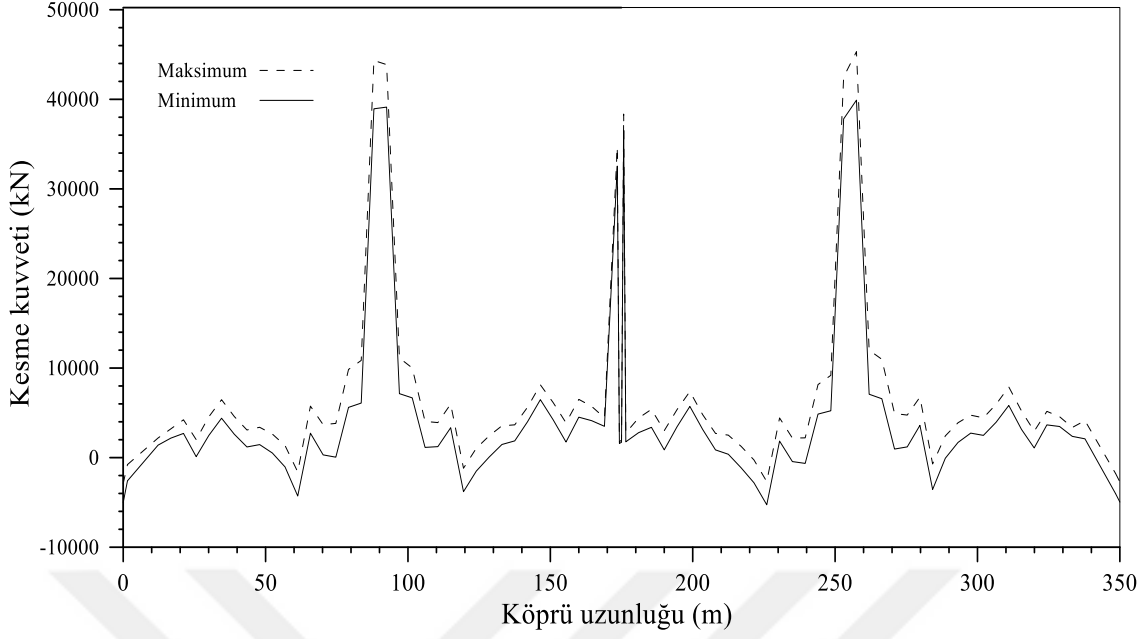
Elverişsiz yükleme yanında DD-1 depremi dikkate alınarak köprünün dinamik analizi yapılmıştır. Elden edilen maksimum ve minimum büyüklükler Şekil 3.23-3.25'da verilmiştir.



Şekil 3.23. Yükleme durumu-IV için köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti



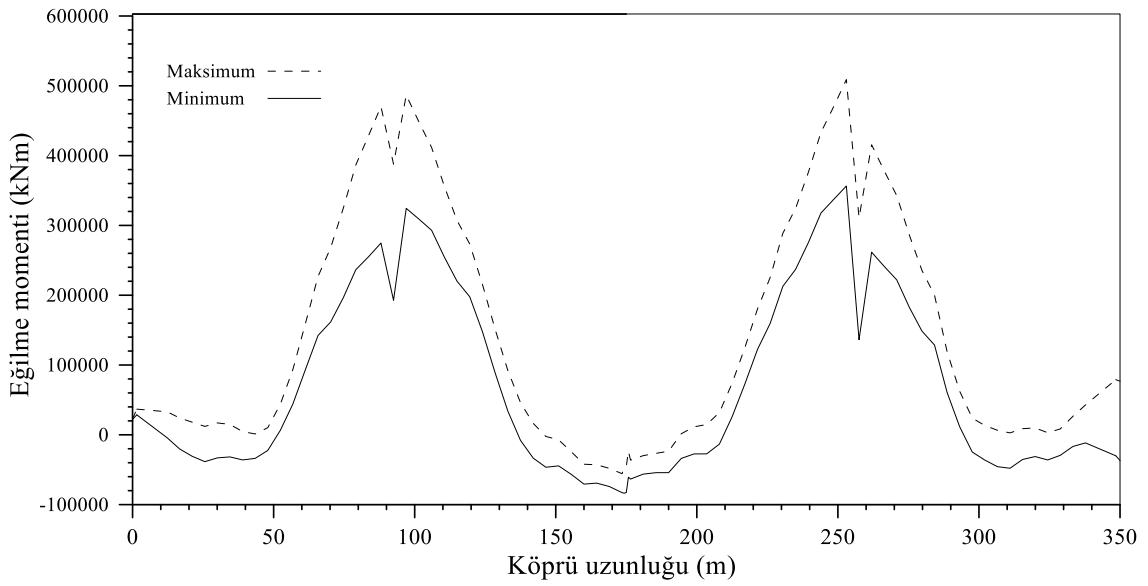
Şekil 3.24. Yükleme durumu-IV için köprü uzunluğu boyunca yerdeğiştirme



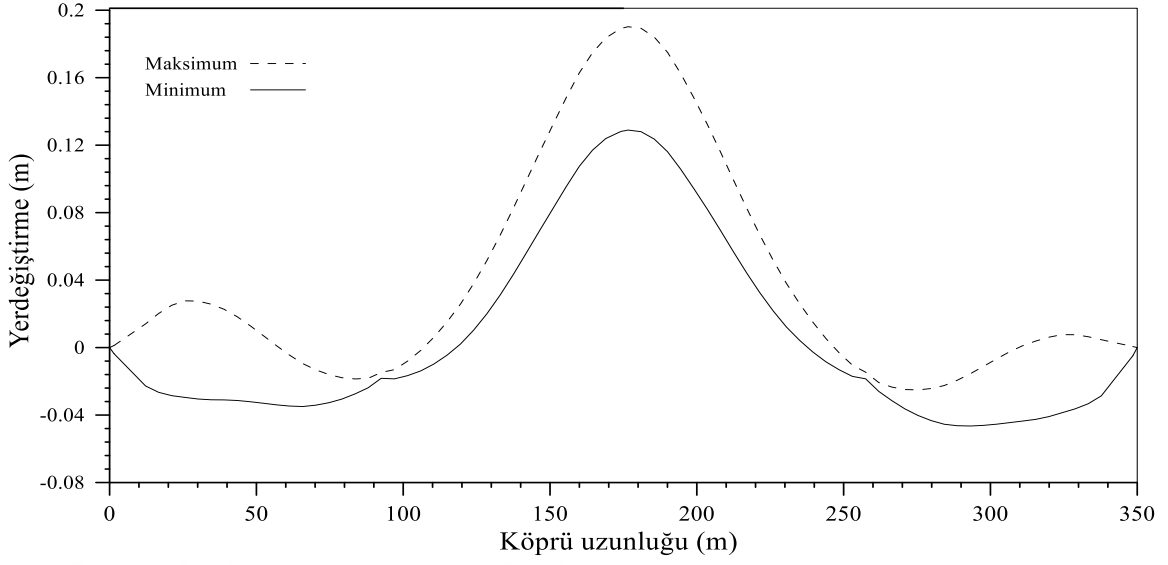
Şekil 3.25. Yükleme durumu-IV için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti

3.1.6.5. Yükleme Durumu- V

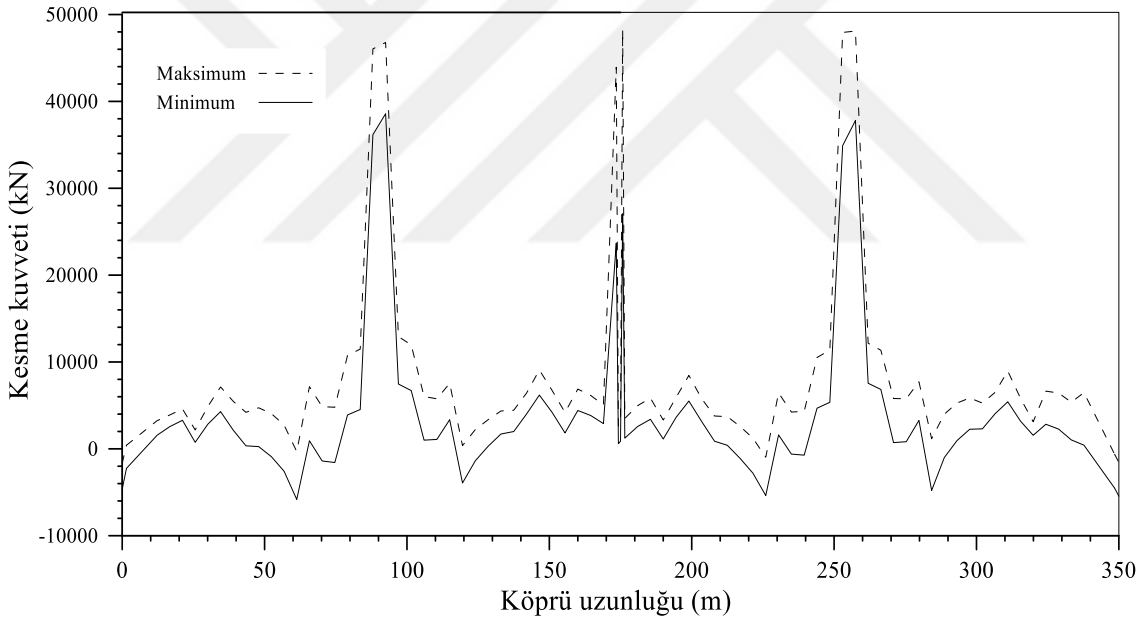
Elverişsiz yükleme yanında şiddetli depremi dikkate alınarak köprünün dinamik analizi yapılmıştır. Elden edilen maksimum ve minimum büyüklükler Şekil 3.26-3.28'da verilmiştir.



Şekil 3.26. Yükleme durumu-V için köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti



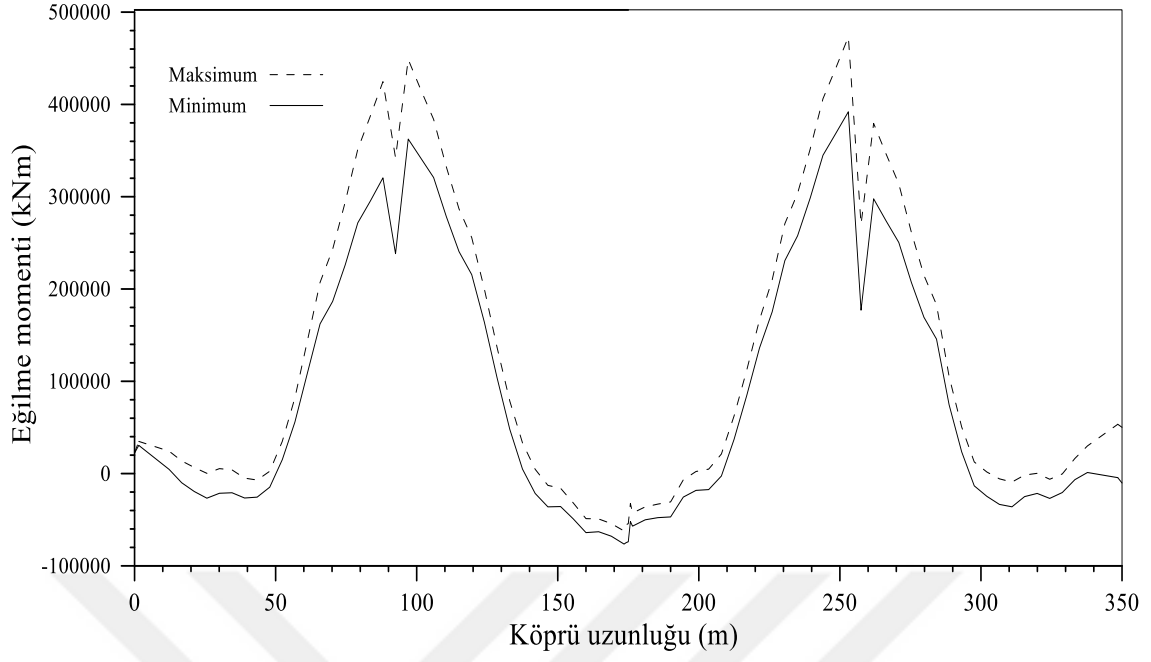
Şekil 3.27. Yükleme durumu-V için köprü uzunluğu boyunca yerdeğiştirme



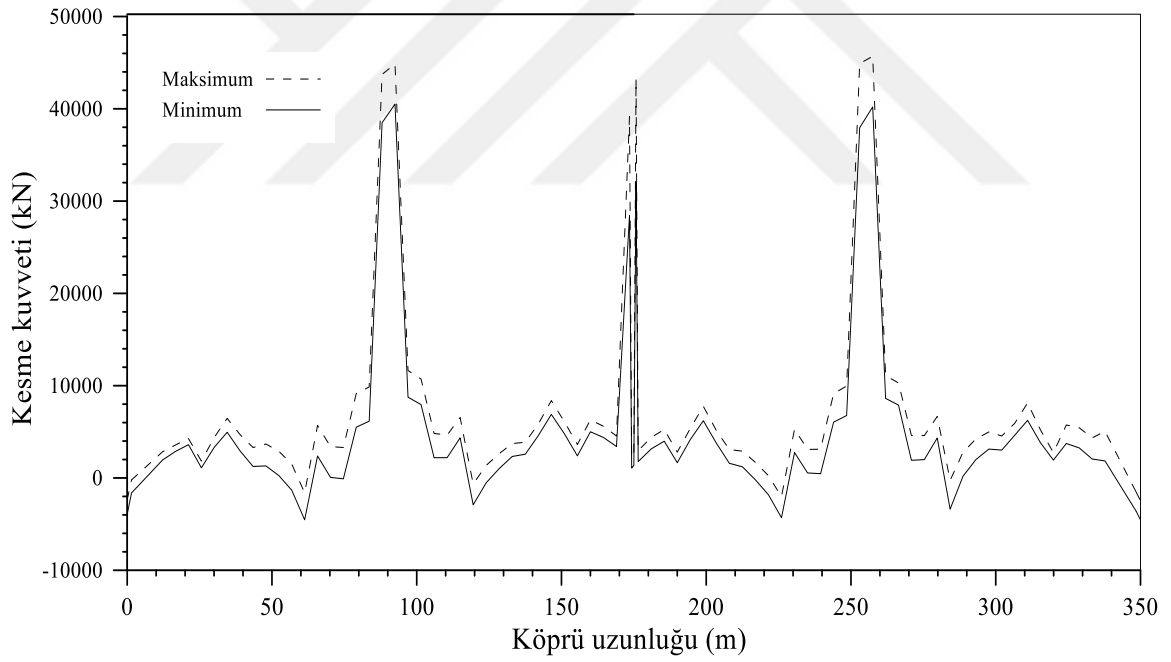
Şekil 3.28. Yükleme durumu-V için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti

3.1.6.6. Yükleme Durumu- VI

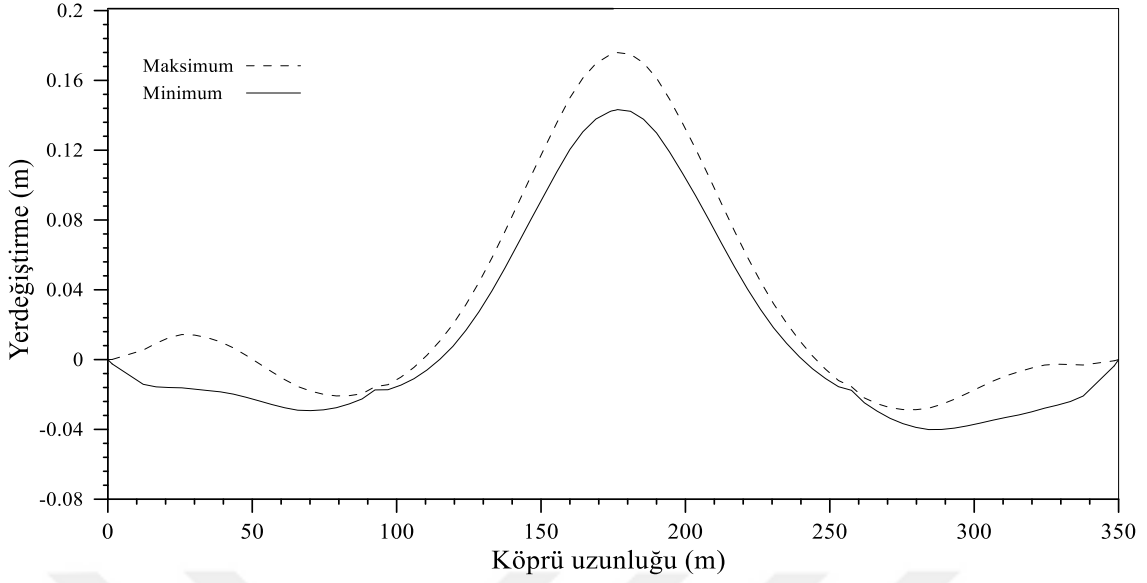
Elverişsiz yükleme yanında tasarım depremi dikkate alınarak köprünün dinamik analizi yapılmıştır. Elden edilen maksimum ve minimum büyüklükler Şekil 3.29-3.31'da verilmiştir.



Şekil 3.29. Yükleme durumu- VI için köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti



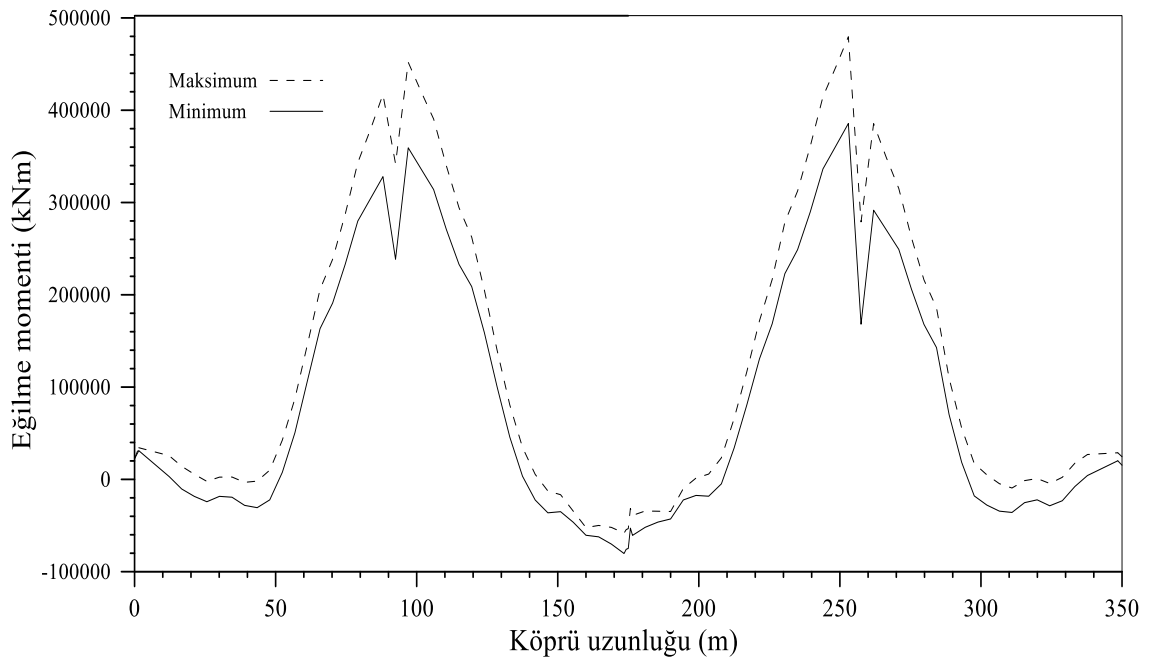
Şekil 3.30. Yükleme durumu-VI için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti



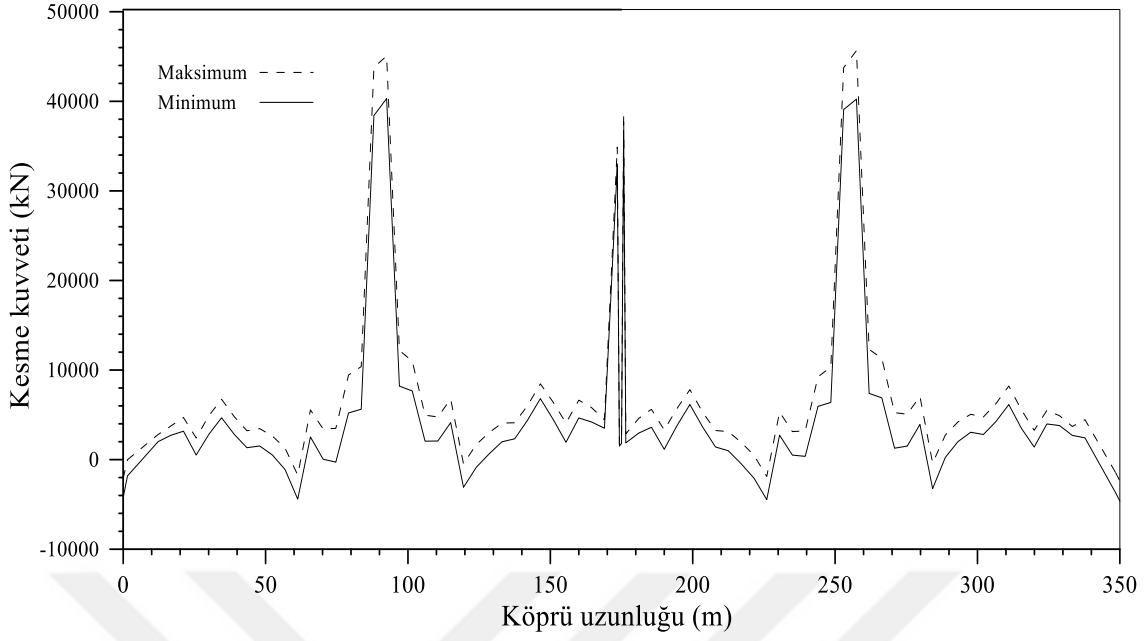
Şekil 3.31. Yükleme durumu-VI için köprü uzunluğu boyunca yerdeğiştirme

3.1.6.7. Yükleme Durumu- VII

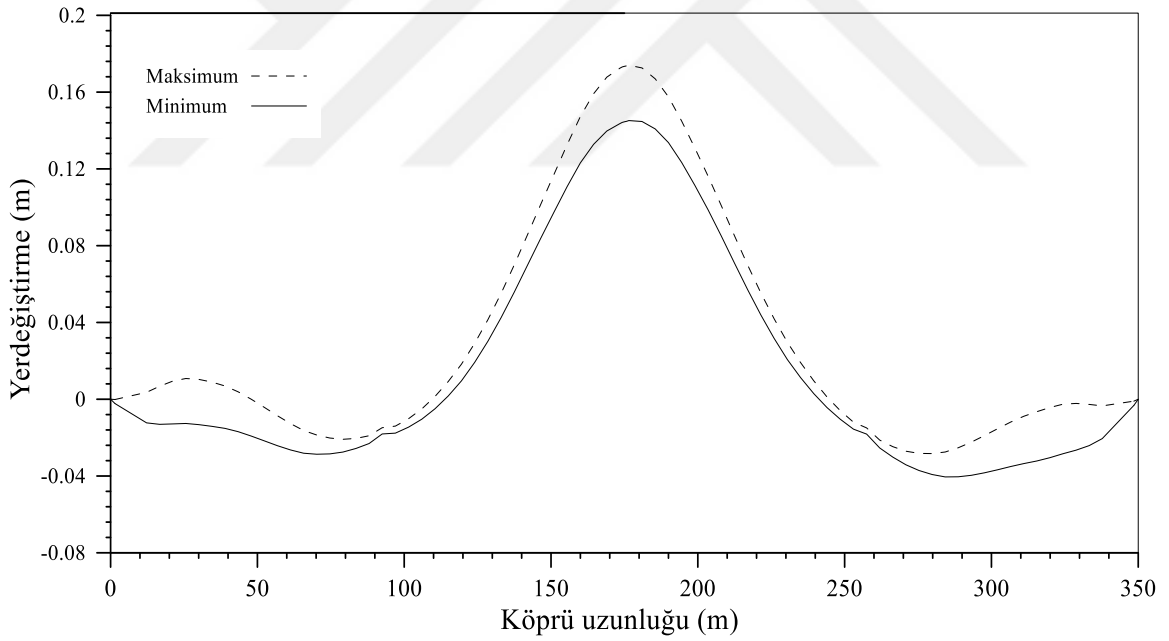
Elverişsiz yükleme yanında şiddetli depremi dikkate alınarak köprünün dinamik analizi yapılmıştır. Elden edilen maksimum ve minimum büyüklükler Şekil 3.32-3.34'da verilmiştir.



Şekil 3.32. Yükleme durumu- VII için köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti



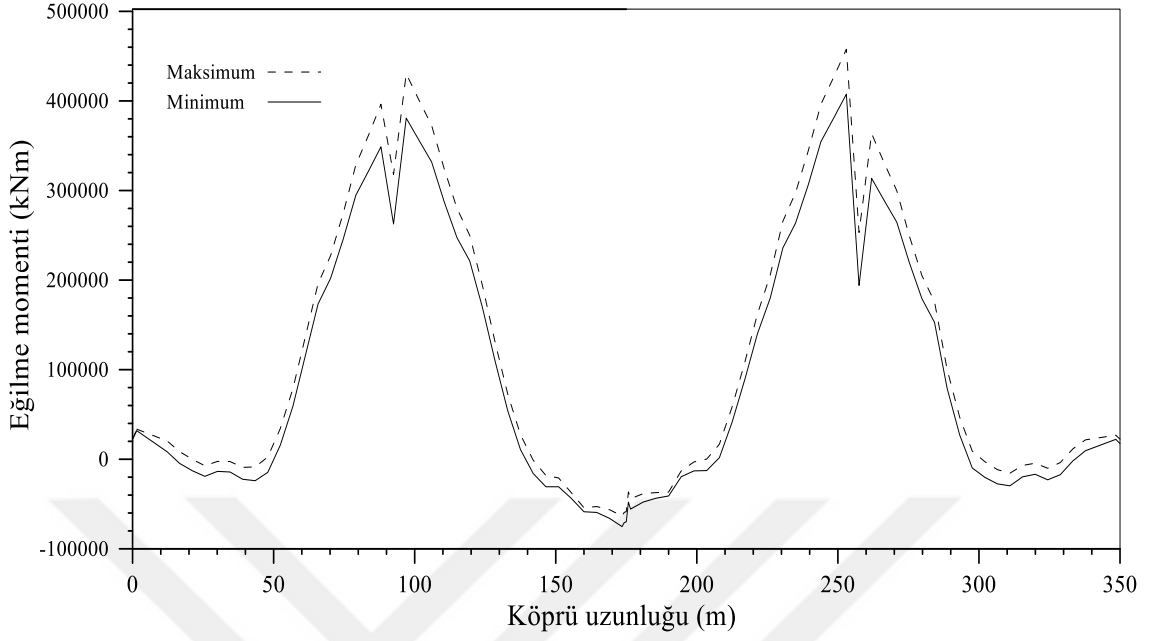
Şekil 3.33. Yükleme durumu-VII için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti



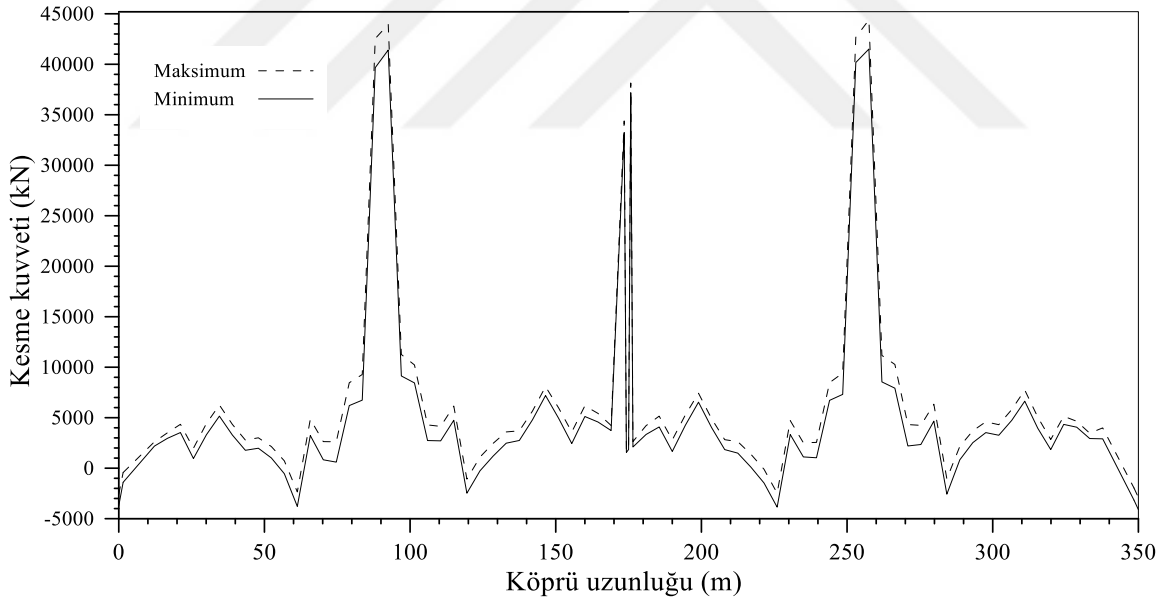
Şekil 3.34. Yükleme durumu-VII için köprü uzunluğu boyunca yerdeğiştirme

3.1.6.8. Yükleme Durumu- VIII

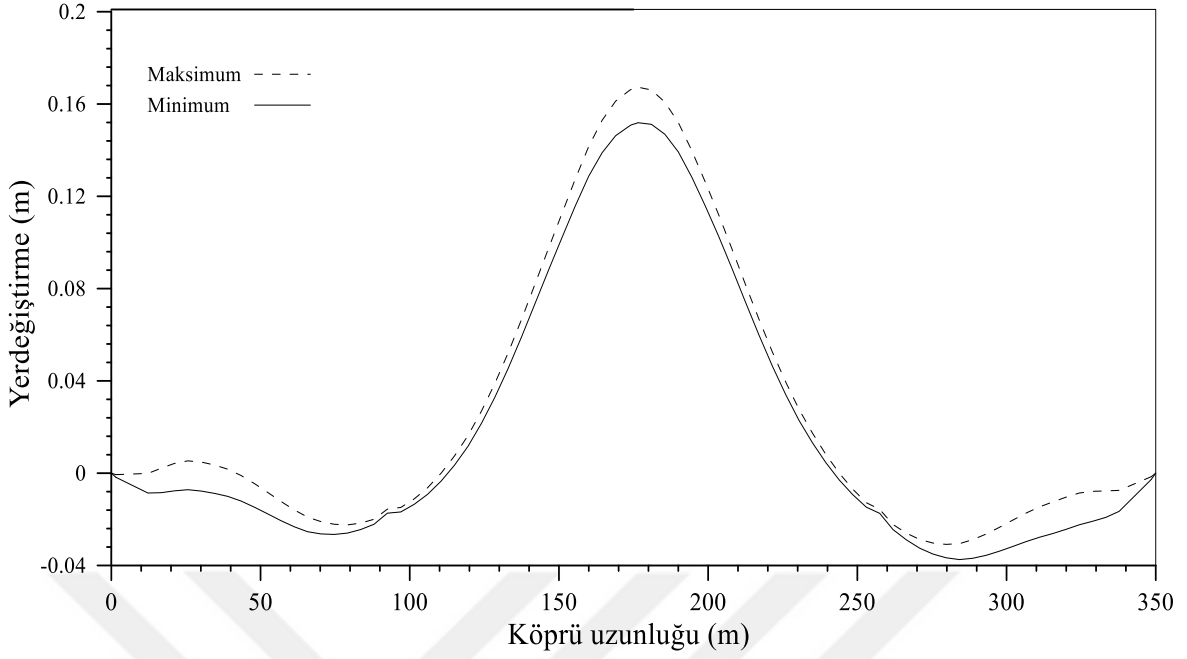
Elverişsiz yükleme yanında tasarım depremi dikkate alınarak köprü'nün dinamik analizi yapılmıştır. Elden edilen maksimum ve minimum büyüklükler Şekil 3.35-3.337'da verilmiştir.



Şekil 3.35. Yükleme durumu- VII için köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti



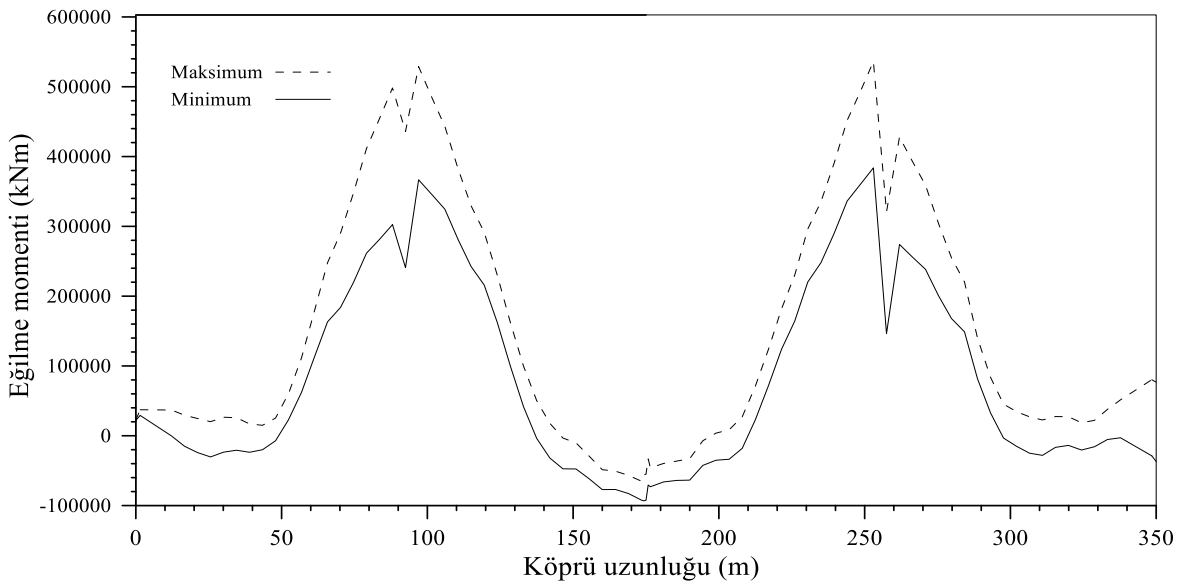
Şekil 3.36. Yükleme durumu-VII için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti



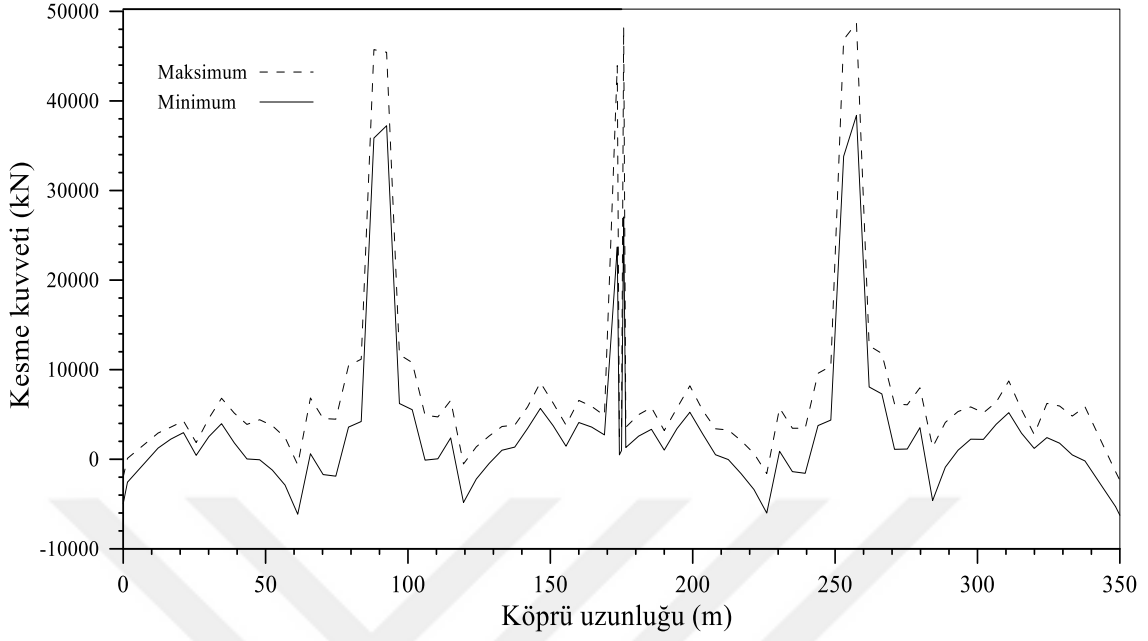
Şekil 3.37. Yükleme durumu-VII için köprü uzunluğu boyunca yerdeğiştirme

3.1.6.9. Yükleme Durumu- IX

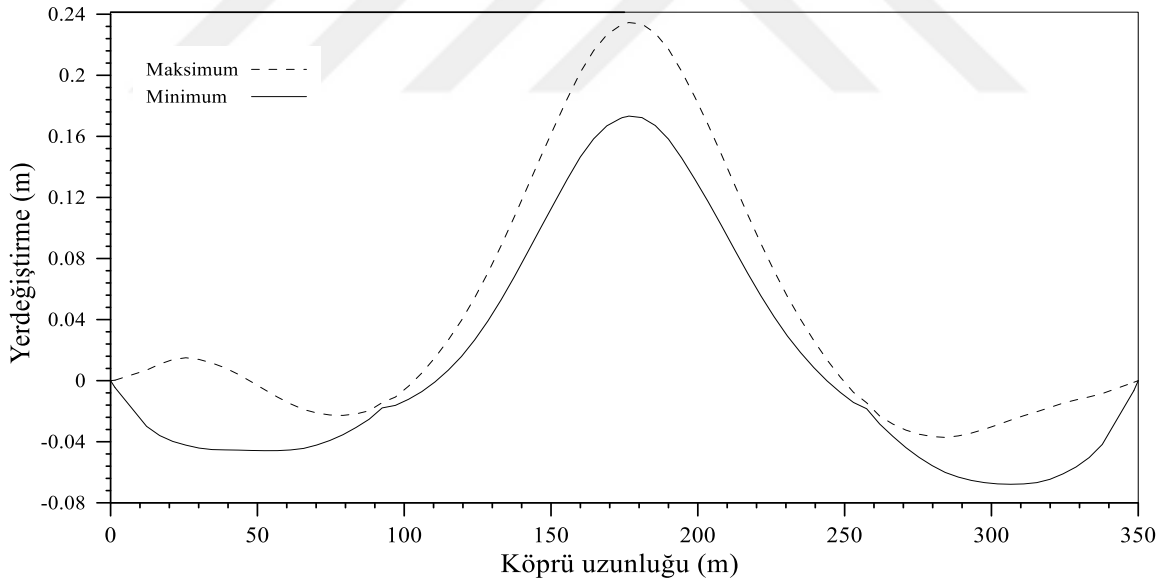
Elverişsiz yükleme yanında şiddetli depremi dikkate alınarak köprünün dinamik analizi yapılmıştır. Elden edilen maksimum ve minimum büyüklükler Şekil 3.38-3.340'da verilmiştir.



Şekil 3.38. Yükleme durumu-IX için köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti



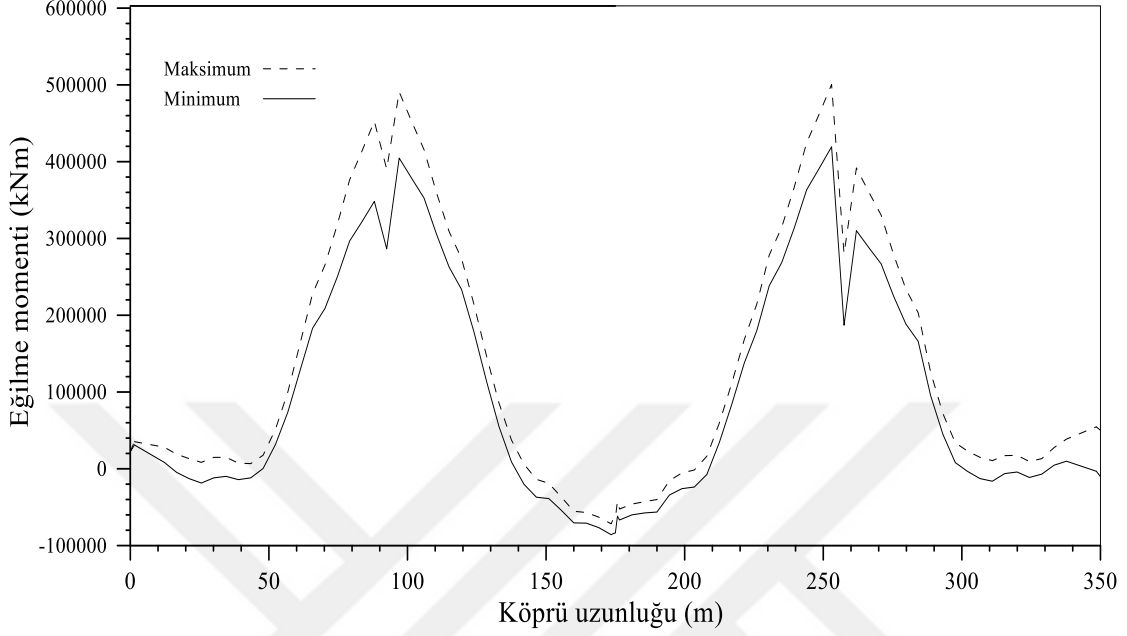
Şekil 3.39. Yükleme durumu-IX için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti



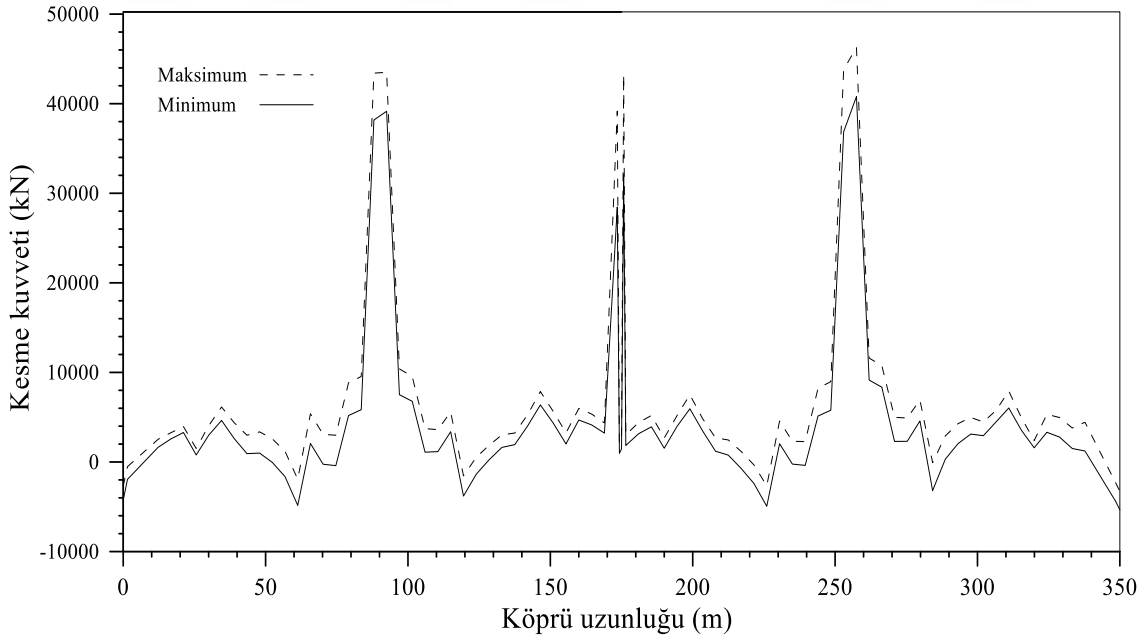
Şekil 3.40. Yükleme durumu-IX için köprü uzunluğu boyunca yerdeğiştirme

3.1.6.10. Yükleme Durumu- X

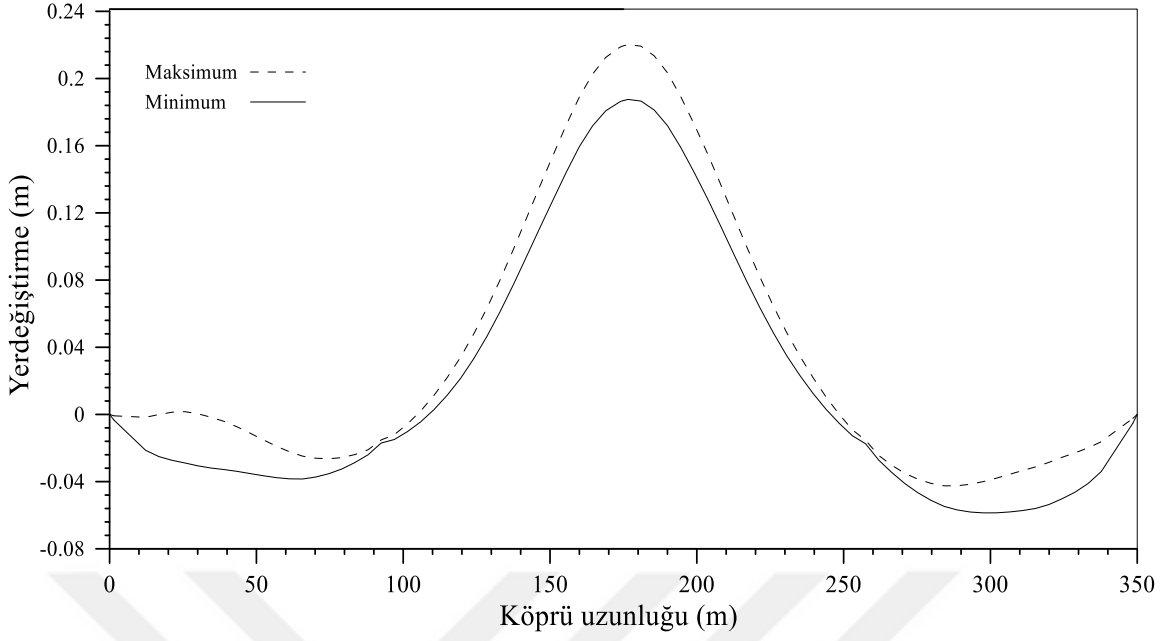
Elverişsiz yükleme yanında tasarım depremi dikkate alınarak köprünün dinamik analizi yapılmıştır. Elden edilen maksimum ve minimum büyüklükler Şekil 3.41-3.43'da verilmiştir.



Şekil 3.41. Yükleme durumu-X için köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti



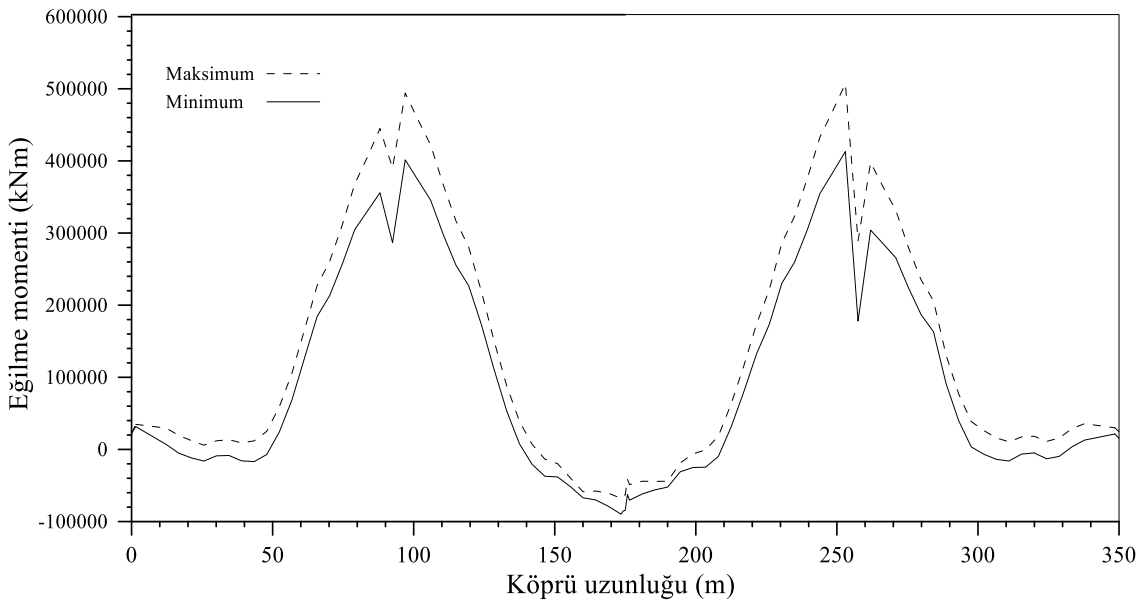
Şekil 3.42. Yükleme durumu-X için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti



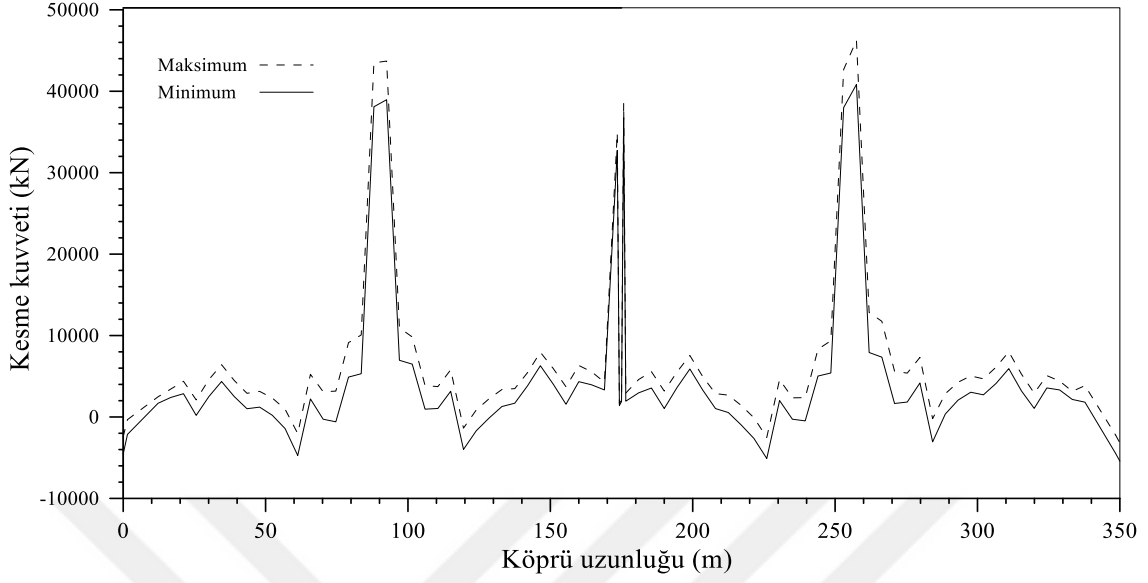
Şekil 3.43. Yükleme durumu-X için köprü uzunluğu boyunca yerdeğiştirme

3.1.6.11. Yükleme Durumu- XI

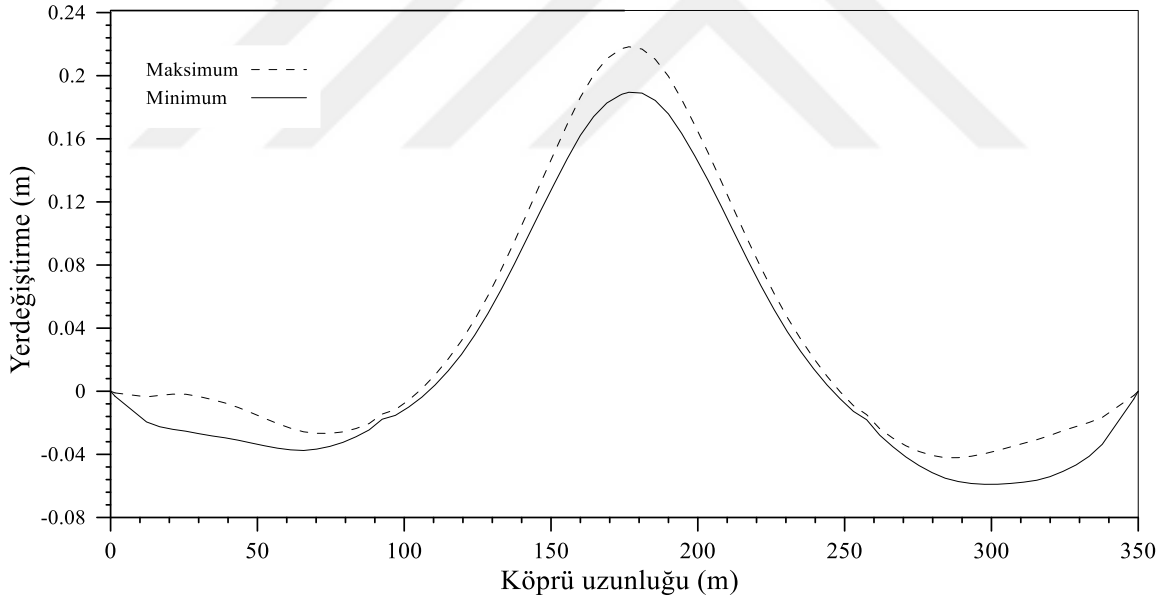
Elverişsiz yükleme yanında şiddetli deprem dikkate alınarak köprünün dinamik analizi yapılmıştır. Elden edilen maksimum ve minimum büyüklükler Şekil 3.44-3.46'da verilmiştir.



Şekil 3.44. Yükleme durumu-XI için köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti



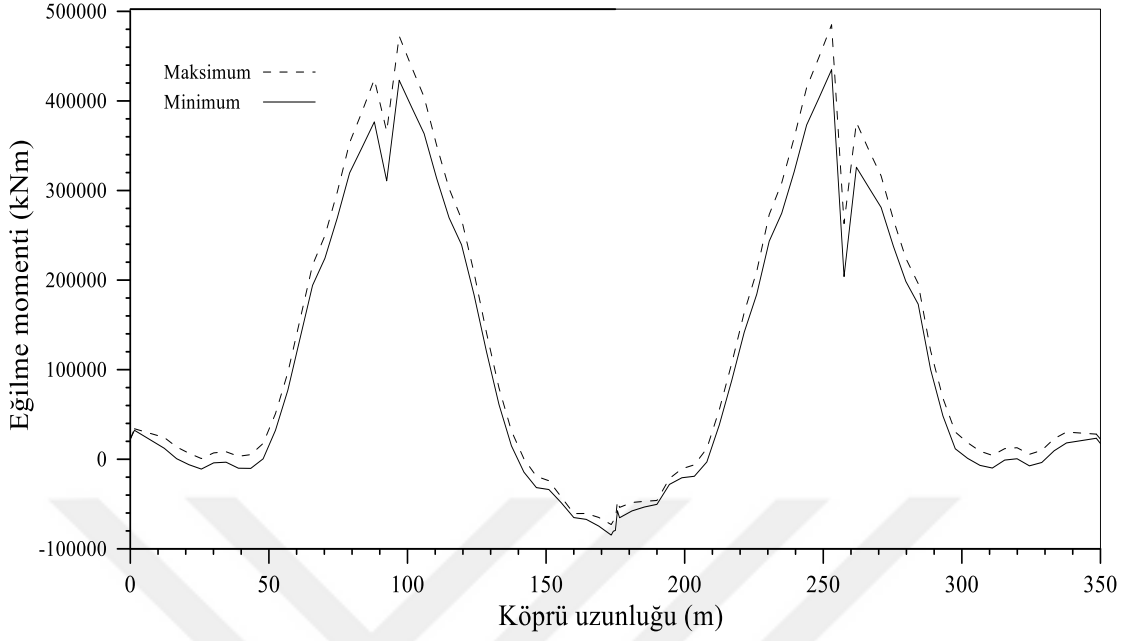
Şekil 3.45. Yükleme durumu-XI için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti



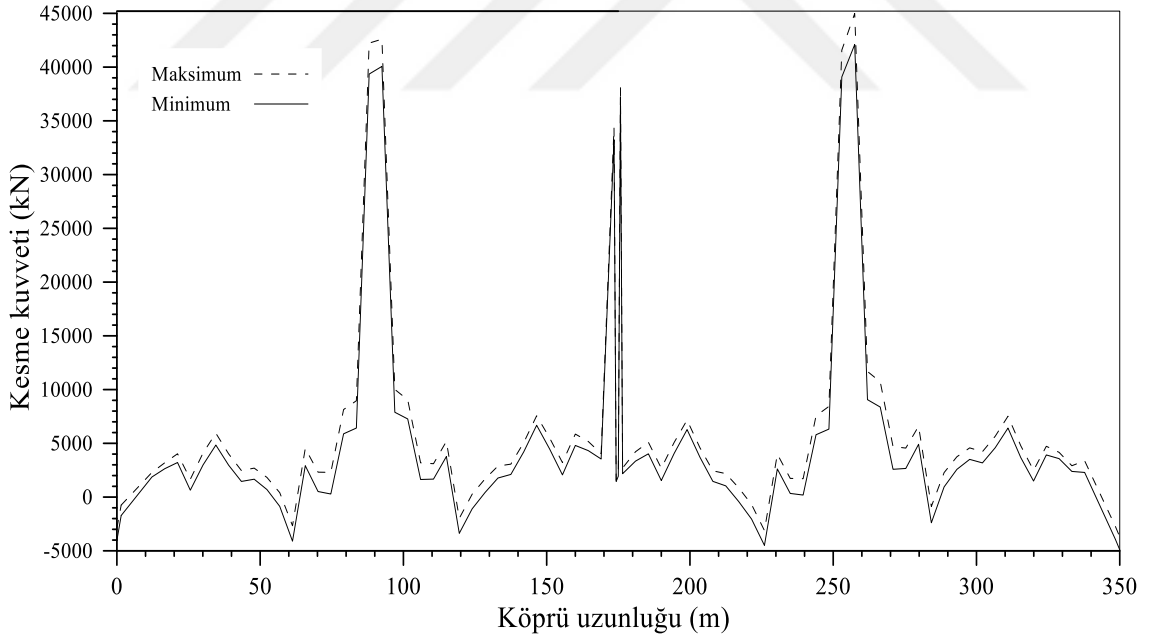
Şekil 3.46. Yükleme durumu-XI için köprü uzunluğu boyunca yerdeğiştirme

3.1.6.11. Yükleme Durumu- XII

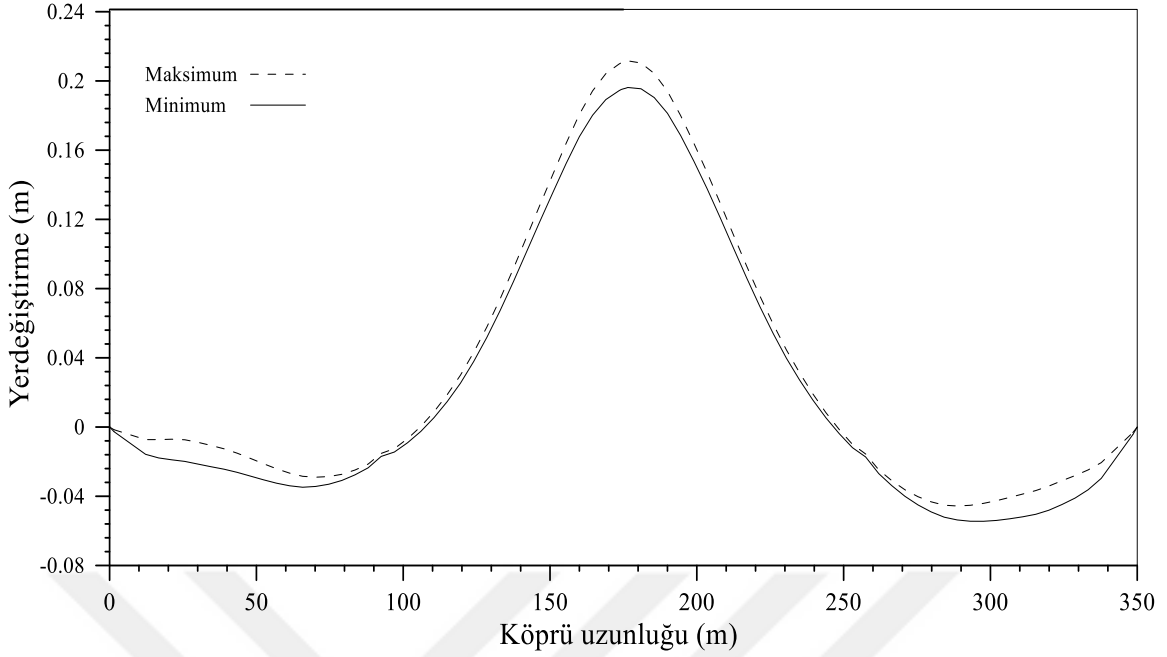
Elverişsiz yükleme yanında tasarım depremi dikkate alınarak köprünün dinamik analizi yapılmıştır. Elden edilen maksimum ve minimum büyüklükler Şekil 3.47-3.49'da verilmiştir.



Şekil 3.47. Yükleme durumu-XII için köprü uzunluğu boyunca eğilme momenti



Şekil 3.48. Yükleme durumu-XII için köprü uzunluğu boyunca kesme kuvveti



Şekil 3.49. Yükleme durumu-XII için köprü uzunluğu boyunca yerdeğiştirme

50 yılda alışılma olasılığı %2 ve tekrarlanma periyodu 2475 yıl olan DD-1 ve 50 yılda alışılma olasılığı %10 ve tekrarlanma periyodu 475 yıl olan DD-2 düzeylerine göre yapılan dinamik analizlerde, DD-1 yer hareketinden dolayı X yönünde maksimum yerdeğiştirme 3,06cm, maksimum kesme kuvveti $10,6 \times 10^3$ kN ve maksimum eğilme momenti 98×10^3 kNm olarak elde edilmiştir. Düşey deprem etkisi durumunda maksimum yerdeğiştirme 1,5 cm, maksimum kesme kuvveti 2698 kN ve maksimum eğilme momenti 54814 kNm elde edilmiştir. DD-2 yer hareketinden dolayı X yönünde maksimum yer değiştirme 16 cm ,maksimum kesme kuvveti 5605 kN ve maksimum eğilme momenti 52116 kNm, düşey deprem durumunda maksimum yer değiştirme 0.07 cm, maksimum kesme kuvveti 1440 kN ve maksimum eğilme momenti 29250 kNm olarak elde edilmiştir.

DD-1 deprem düzeyi ve DD-2 deprem düzeyi için X ve Z doğrultularına göre farklı yükleme durumlarından elde edilen en elverişsiz yükleme durumları tespit edilerek maksimum ve minimum büyüklükler şeklinde Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Farklı yükleme durumlarından elde edilen büyüklükler

Yükleme Durumu	Doğrultu		DD-1 Deprem Düzeyi			DD-2 Deprem Düzeyi		
			M (KNm)	T (KN)	Δx (cm)	M (KNm)	T (KN)	Δx (cm)
I	X	Maksimum	270×10^3	60×10^3	8,6			
	X	Minimum	224×10^3	47×10^3	8,7			
IV	Z	Maksimum	234×10^3	58×10^3	5,9			
	Z	Minimum	173×10^3	8×10^3	6,1			
II	X	Maksimum				221×10^3	58×10^3	6,3
	X	Minimum				159×10^3	50×10^3	6,5
XII	Z	Maksimum				186×10^3	57×10^3	5,1
	Z	Minimum				164×10^3	51×10^3	6,7

3.2. Doğrusal Olmayan Statik İtme ve Zaman Tanım Alanında Analiz

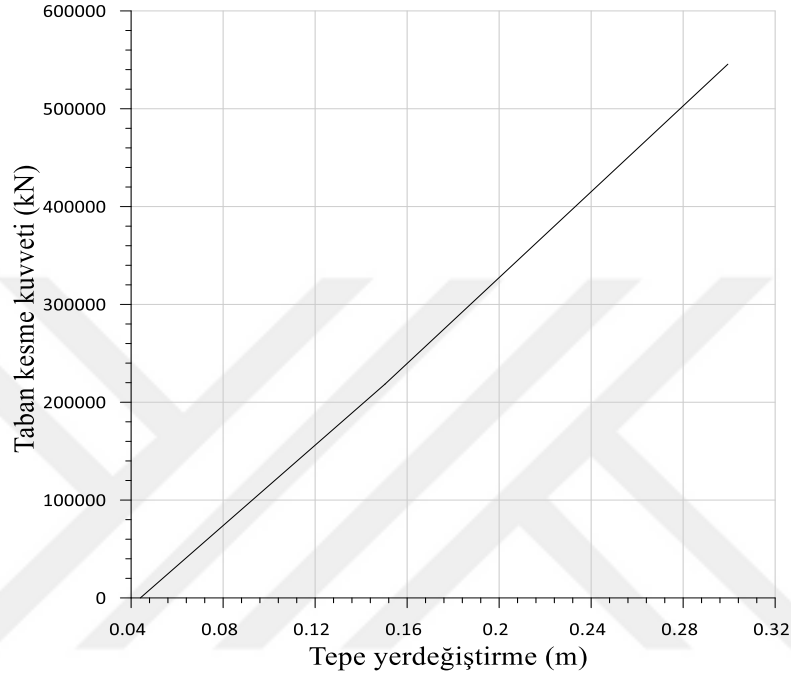
Köprünün davranışını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen Statik itme (Pushover) ve Zaman tanım alanı analizi köprünün sabit yükleri altında yapılmıştır. Statik itme analizi yapılırken köprü malzemelerin gerçek özelliklerine yakın değerler kullanılarak ve zaman tanım alanı için 0.292g maksimum ivme değerine sahip deprem kaydı kullanılarak analiz yapılmıştır.

3.2.1. Statik İtme Analizi

İtme analizi statik doğrusal olmayan bir işlemdir. Yapının yükü daha önce tanımlanmış bir referans noktaya göre aşamalı olarak artırılmaktadır. Yüklemenin büyüklüğü arttıkça köprü yapısının zayıf bağlantıları belirlenecektir. Statik itme analizinin amacı köprünün toplam dayanımını belirlemektir. Tipik olarak taban kesme kuvveti ve maksimum yer değiştirmeye göre belirlenir. İtme analizinden hedef; köprünün gerçek davranışını yakalamak olduğundan malzemelerin gerçek özelliklerini kullanılarak itme analizi yapılmaktadır. Ayrıca itme analizi eğrisi (kuvvet-şekildeğiştirme) malzeme dayanımındaki bozulma ve $p-\Delta$ etkileri nedeniyle yapının gevşeme davranışını belirlemeye izin vermektedir.

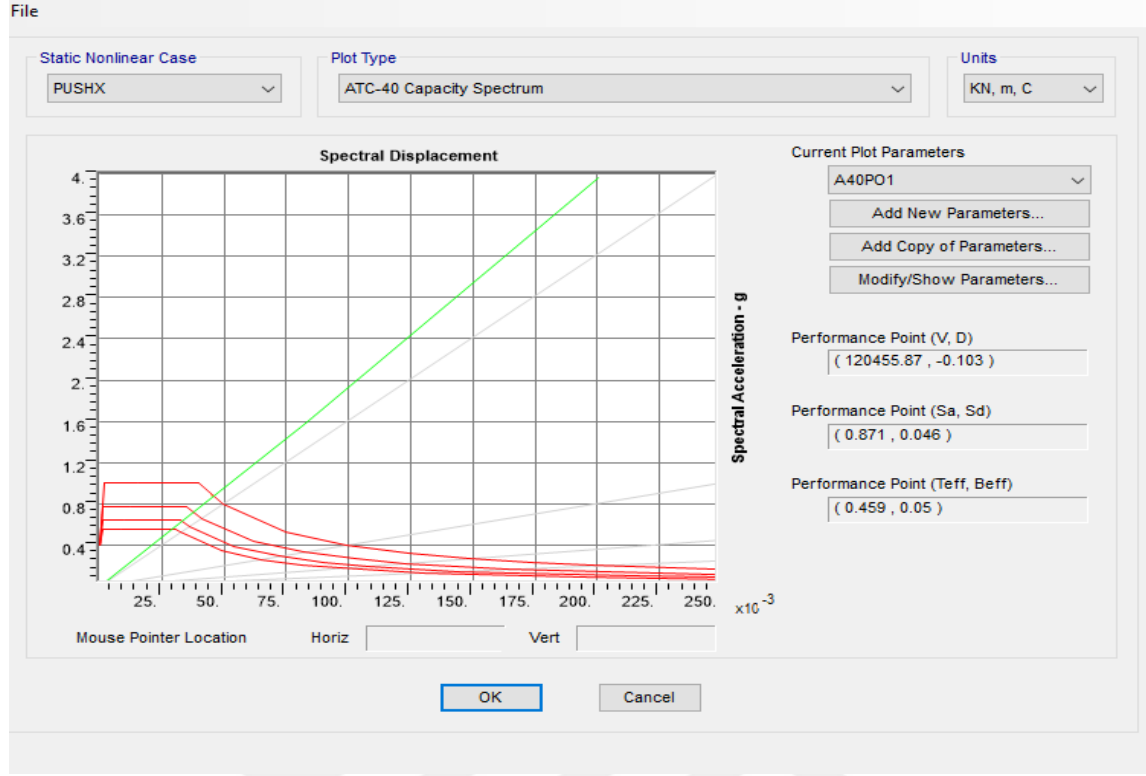
Budan köprüsünün modeli statik itme analizi ile irdelenmiştir. Bu köprü için 0.292g şiddetindeki deprem altında davranışını analiz yapılmıştır.

Kesme kuvveti ile tepe yer değiştirme ilişkisi grafiksel olarak çizgi halinde sunulmuş. Mevcut köprünün şiddetli depremlere karşı yüksek kolonlara sahip olmasına rağmen sınırlı yer değiştirme yaptığı görölmektedir. Köprünün artan yükler altında davranışı adım adım izlenebilmektedir (şekil 3.50).



şekil 3.50. Köprü taban kesme kuvveti- tepe yerdeğiştirme ilişkisi

Aşağıda SAP2000 paket programından alınan spektral ivme–spektral yerdeğiştirme diyagramı ve kapasite diyagramı şekil 4.51’da verilmiştir.

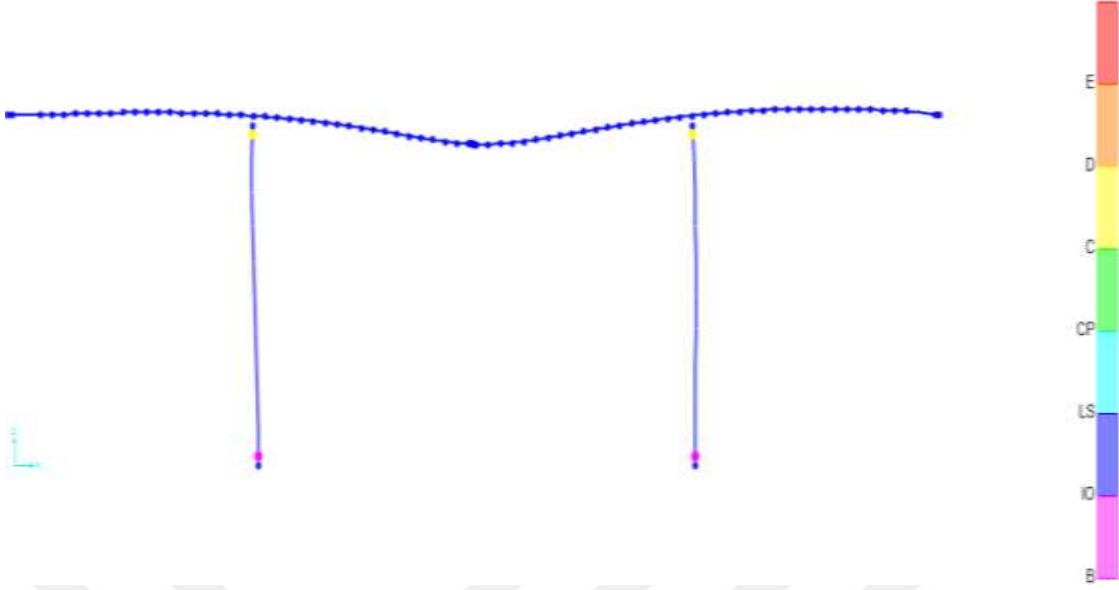


Şekil 3.51. Kapasite eğrisi

Yukarıda kapasite eğrisi yeşil çizgi ve talep eğrisi kırmızı çizgi ile gösterilmiştir. Bu iki eğrinin kesişim noktası performans noktası olarak dikkate alınmaktadır. Maksimum ivme değeri 0.292g olan Kocaeli depremi için performans noktası 0,046 m olarak hesaplanmıştır.

Yapılan Statik İtme analizi sonucunda kolonlarda da plastik mafsalsın yoğunlaşacağı gerçeğiyle, X yönünde maksimum taban kesme kuvveti 458035 kN ve maksimum yerdeğiştirme 28cm olarak bulunmuştur. Düşey yönde uygulanması halinde maksimum taban kesme kuvveti 189057 kN ve maksimum yerdeğiştirme değeri ise 1.7 cm olarak elde edilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda, statik itme analizi sonucunda elde edilen performans düzeyi gösterilmiştir (Şekil 4.52). Bu diyagramda köprünün plastikleşme davranışı sergilediği görülmektedir.



Şekil 3.52. Statik itme alanındaki kontur diyagramı

İncelemeler sonucunda, maksimum ivme değeri 0.292g Kocaeli depremi altında kolonun mesnet bölgelerinde turuncu nokta ile gösterilirken kolonun tepe noktası sarı nokta ile gösterilmiştir. Diğer bir deyişle kolonun alt ucunda minimum hasar tespit edilirken, tepe noktasında Nihai kapasite durumuna ulaşmıştır. Bu ivmeye sahip bir deprem için izin verilen limitler için kaldığı ve kesintisiz kullanım ile hizmete devam edebilir.

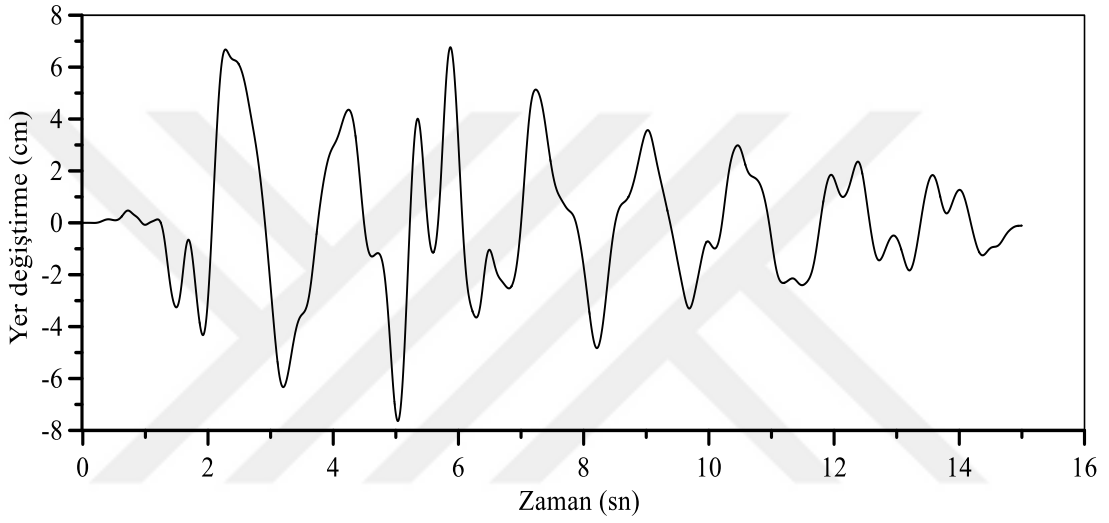
3.2.2. Zaman Tanım Alanında Ardgerilmeli Tabliyelerde ve Kolonlarda Oluşan Yer Değiştirme ve Taban Kesme Kuvvetleri

Köprü, viyadük veya bina türü yapıların zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan deprem hesabı için yapay yollarla üretilen, benzeştirilmiş veya daha önce kaydedilmiş depremler kullanılabilir.

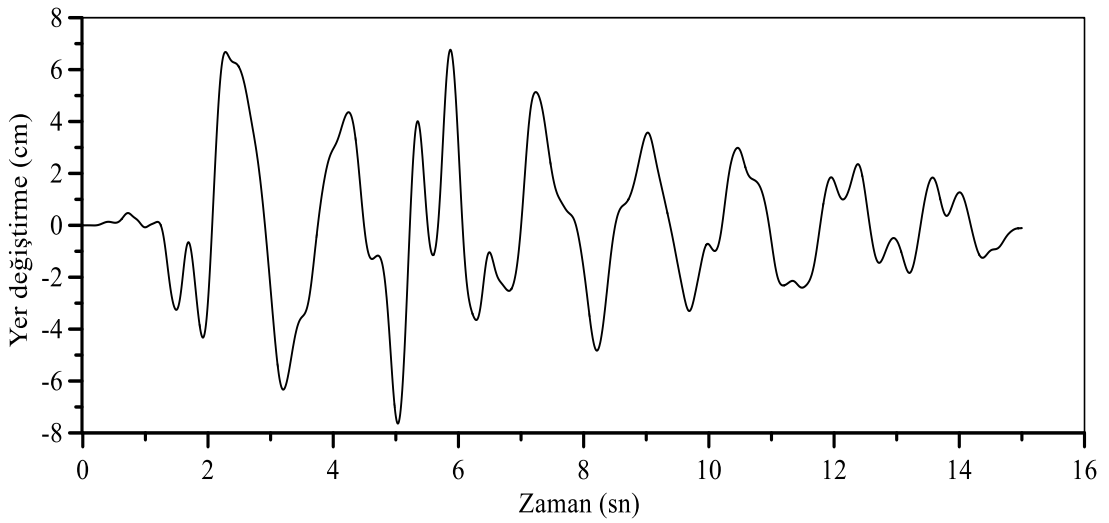
Budan köprüsünün doğrusal ve doğrusal olmayan analizi Kocaeli depreminden 0.292g ivme değerine sahip üretilmiş depreme göre gerçekleştirilmiştir. Yüksekliği 91.77 m elips şeklindeki kolonun ve üst tabliyenin Taban kesme kuvveti ve yer değiştirme grafiklerle verilmiştir.

3.2.2.1. Doğrusal Analiz

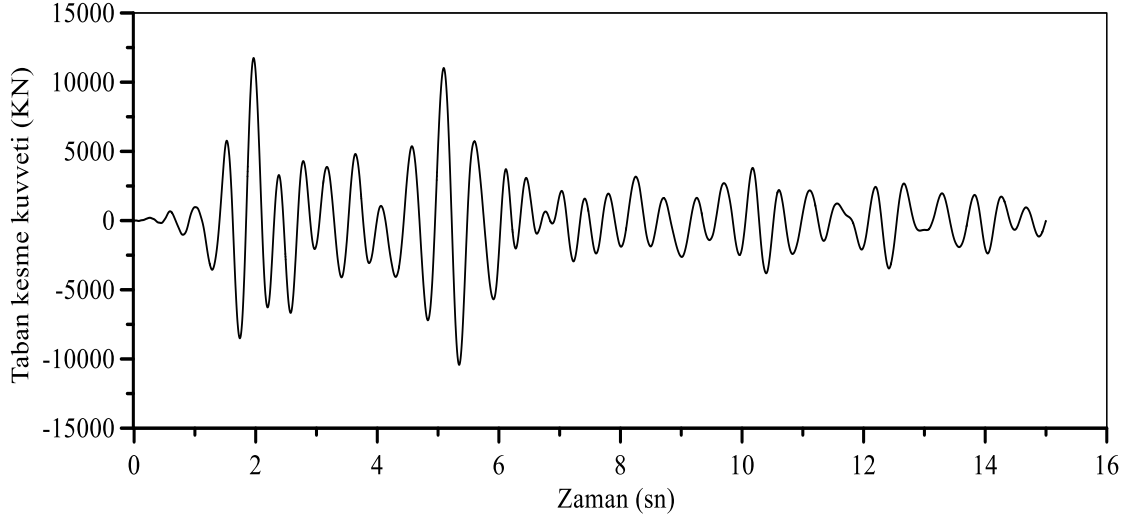
Budan köprüsünün davranışını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal analiz köprüünün kendi ağırlığı ve maksimum ivme değeri 0,292g olan Kocaeli depremi altında yapılmıştır. Analiz sonucunda köprü tabliyesi orta noktası ve kolonların tepe noktası için düşey yerdeğiştirme ve taban kesme kuvvetleri Şekil (3.53-3.56) verilmiştir.



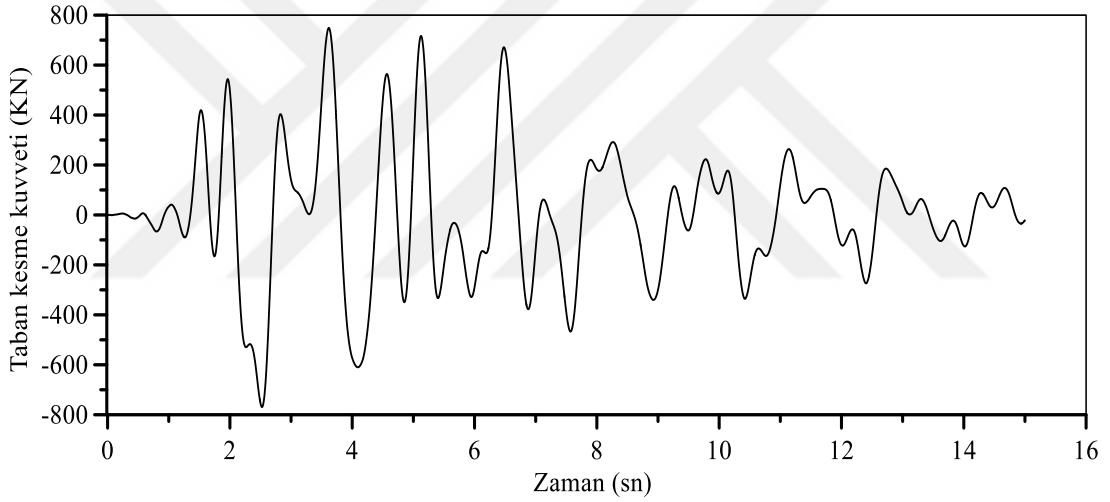
Şekil 3.53. Köprü tabliyesinin orta noktası düşey yerdeğiştirme-zamanla değişimi



Şekil 3.54. Kolon tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesinin zamanla değişimi



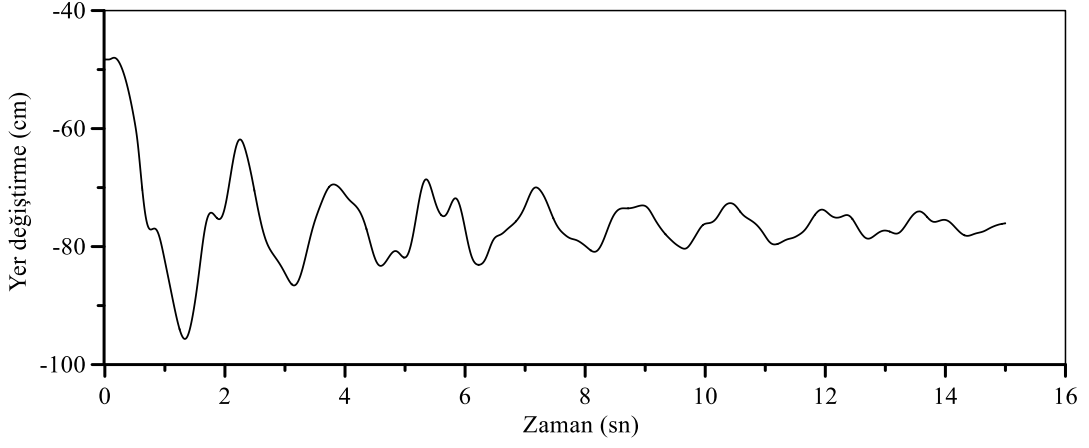
Şekil 3.55. Köprü tabliyesi orta noktasının taban kesmenin zamanla değişimi



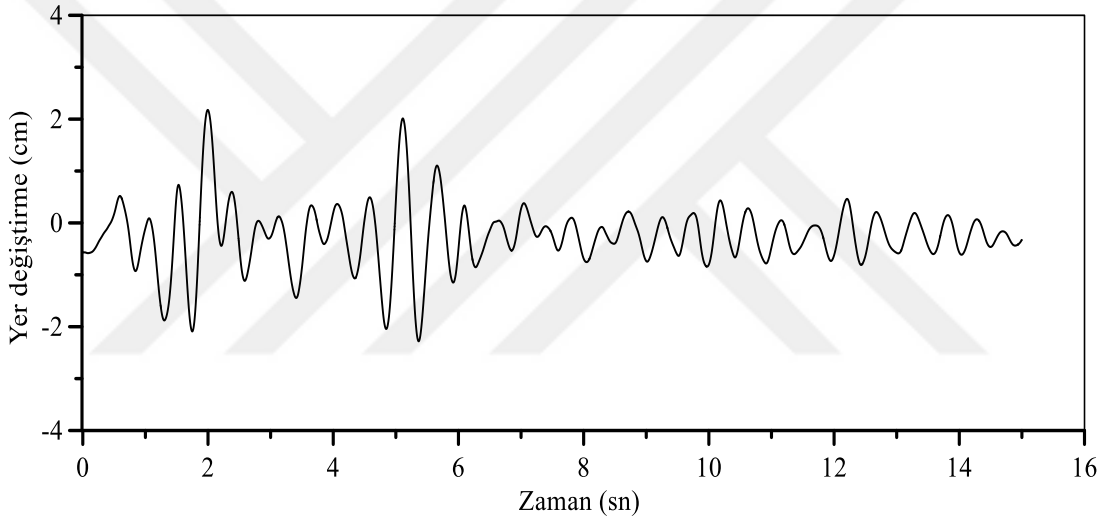
Şekil 3.56. Sağ kolonun taban kesme kuvveti zamanla değişimi

3.2.2.2. Doğrusal Olmayan Analiz

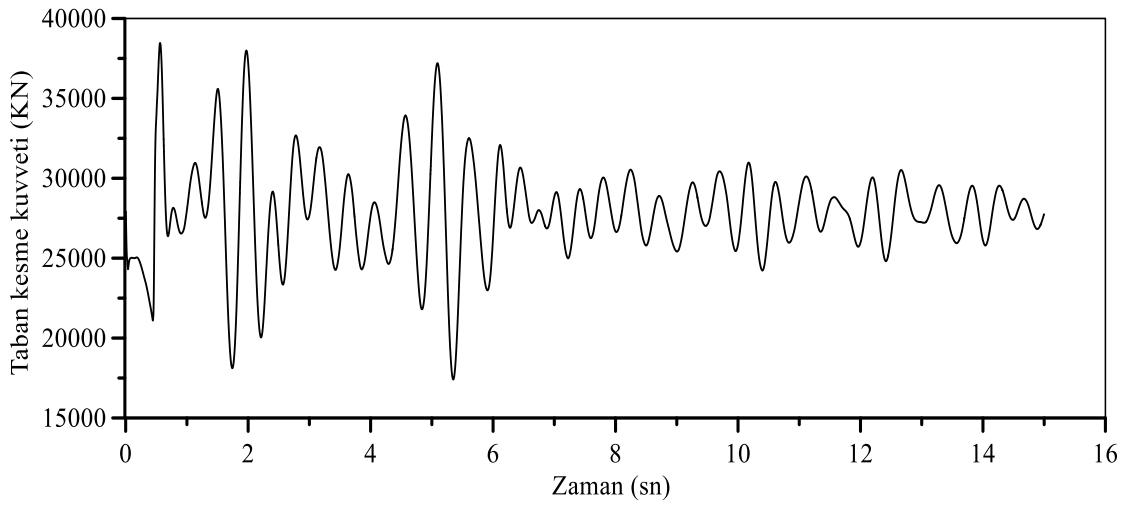
Budan köprüsünün davranışını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz köprünün kendi ağırlığı ve maksimum ivme değeri 0,292g olan Kocaeli depremi altında yapılmıştır. Analiz sonucunda köprü tabliyesi orta noktası ve kolonların tepe noktası için düşey yerdeğiştirme ve taban kesme kuvvetleri Şekil (3.57-3.60) verilmiştir.



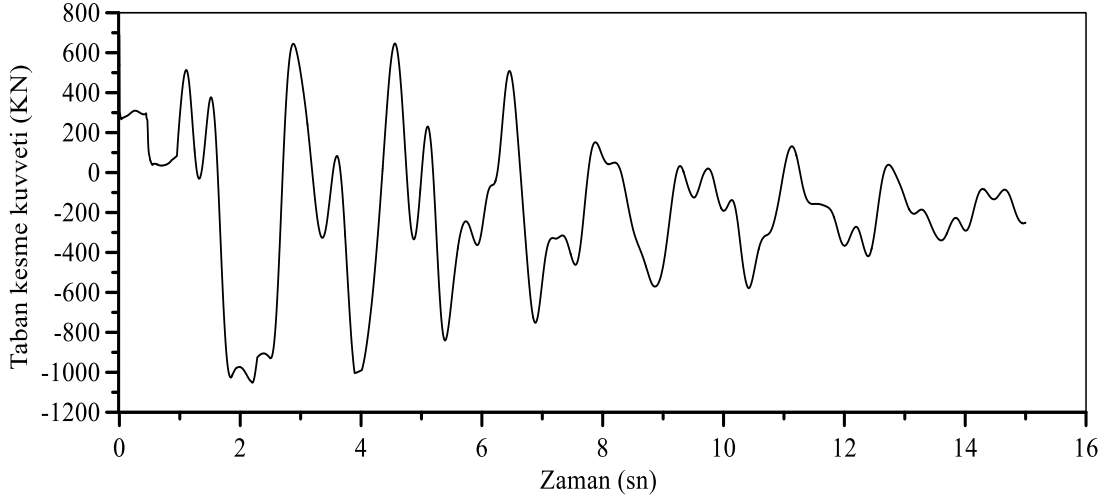
şekil 3.57. Köprü tabliyesinin orta noktası düşey yerdeğiştirme-zamanla değişimi



şekil 3.58. Kolon tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesinin zamanla değişimi



şekil 3.59. Köprü tabliyesi orta noktasının taban kesmenin zamanla değişimi



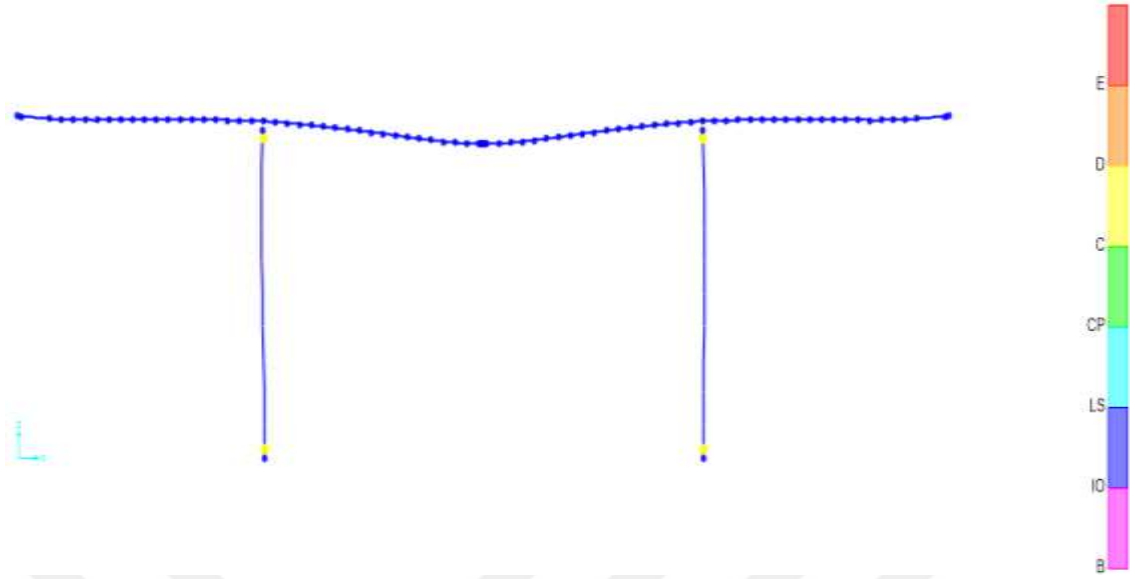
Şekil 3.60. Sağ kolon taban kesme kuvveti zamanla değişimi

Budan köprüsünün zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizi sonucunda köprü kolonlarında mafsallaşma oluştuğu, kolonun plastik şekil değiştirmeye geçtiği görülmüştür. Yani Kocaeli depremi büyük bir ivme ve yüksek hız değerine sahip olduğundan dolayı kolonun alt ve üst uçlarında plastik mafsal oluşmuştur. Diğer bir deyişle, 0.292g ivme değerine sahip Kocaeli depremin köprüsünün kolonlarında plastik mafsal oluşturacak kadar yeterli olmuştur.

Doğrusal ve doğrusal olmayan analiz neticesinde kolon ve tabliye için elde edilen Maksimum yer değiştirme ve taban kesme kuvveti değerleri Tablo 3.2 de verilmektedir.

Tablo 3.4. Kolon ve üst tabliye için maksimum yer değiştirme ve taban kesme kuvvetleri

Analiz tipi	Yer değiştirme(cm)		Taban kesme kuvveti (KN)	
	Üst yapı	Kolon	Üst yapı	kolon
Doğrusal	7.63	2.1	11740	770
Doğrusal olmayan	95.6	2.3	38470	1052



Şekil 3.61. Zaman tanım alanındaki kontur diyagramı

İncelemeler sonucunda, 0.292g deprem senaryosu altında kolonun mesnet ve uç kısmı sarı nokta ile gösterilmektedir. Diğer bir deyişle köprü'nün 0.292g ivme değerine sahip Kocaeli depremi için Nihai kapasite durumuna ulaşmıştır. Bu köprü'nün bu şekildeki bir deprem için izin verilen limitler için kaldığı ve kesintisiz kullanım ile hizmet edebileceği tespit edilmiştir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Artvin-Erzurum karayolu üzerinde bulunan ardgerilmeli kutu kesitli Budan köprüsünün

Sonlu eleman modeli oluşturularak dinamik ve statik analizleri yapılmıştır. Analizlerde SAP2000 programı kullanılmıştır. Yer hareketi olarak 1992 kocaali depremi yarımca istasyonu YPT330 kayıdı kullanılmıştır.

Dinamik hesaplarda doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlar incelenmiştir. Statik hesaplarda köprü ağırlığı yanında asfalt kaplama, kaldırım ve korkuluklar gibi sabit yükler olarak dikkate alınmıştır. H₃₀S₂₄ standart kamyon yükü (15 kN/m) elverişsiz yükleme olarak maksimum açıklık ve minimum mesnet momentleri için düzenlemiştir.

Model analizlerde ilk 12 mod dikkate alınmıştır. kütle katılım oranları boyuna doğrultuda %94, düşey doğrultuda %94 olduğundan mod sayısının yeterli olduğu kabul edilmiştir.

Sabit yüklerden oluşan açıklık düşey yerdeğiştirmesi yaklaşık 43 cm değerine ulaşmaktadır. Ayrıca hareketli yüklerden ise 65cm düşey yerdeğiştirme meydana gelmektedir. Ard germe uygulanması halinde ise orta açıklık düşey yerdeğiştirmesi sabit yükler durumunda ters sehim oluşturarak 2.45 cm iken sabit yük ile hareketli yükler durumunda 3.40cm'ye kadar düşmektedir. Ard germenin bu tür uzun açıklıklı köprüler için etkisinin önemini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde kesit etkileri incelendiğinde de köprü tabliyesinde oluşan kesit etkileri ardgermenin uygulanmasıyla birlikte büyük oranda azalmaktadır.

Statik itme analizinde taban kesme kuvveti ve kolon üst uçlarındaki yatay yerdeğiştirmeler incelenmiştir. Plastik mafsal oluşumu ele alınmıştır. köprü kolonlarının yükseklikleri oldukça fazla olmasına rağmen kesit boyutlarında etkisiyle birlikte sınırlı seviyede kalmıştır. Kolonların temelle birleştiği yerlerde IO (immediate occupancy) yani hemen kullanım durumunda olduğu, kolon tabliye birleşim bölgesinde ise yapı stabilite durumundadır. Zaman tanım alanında yapılan doğrusal olmayan analizlerde ise köprü kolon uçlarında mafsallaşmanın olduğu ve plastik şekildeğiştirmeye başladığı görülmüştür. Kullanılan yer hareketinin maksimum ivme değeri 0.292g'dir. Bu ivmenin üzerindeki yer hareketinde göçme durumunun oluşabileceği elde edilen sonuçlardandır.

Yapılan statik ve dinamik analizler sonucunda ardgermenin önemli ölçüde taşıma gücüne katkıları olduğu görülmüştür. Kablolardaki kayıpların da ihmal edilmemesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Statik itme ve zaman tanım analizlerinde köprü türü yapılarda uygulanabilir olduğu bu çalışma kapsamında ortaya koyulmuştur.

Zaman tanım analizleri en az 11 adet deprem kaydı kullanılarak ve bu kayıtlar bir hedef spektrumuna göre ölçeklendirilerek analizlerde dikkate alınması gerekmektedir.



5. KAYNAKLAR

- Aktaş, E., 2010. Öngerilme Kirişli Bir Köprü Tasarım ve Performansının Değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Altunışık, A.C., 2010. Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
- Angomas, F. B., 2009. Behavior Of Prestressed Concrete Bridge Girders, Master Thesis, Utah state University, Civil and Environmental Engineering, Logan, Utah, United States.
- Arslan, Z., 2018. Ard Gerilmeli Plak Köprü Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Ateş, Ş., 2011. Numerical Modelling of Continuous concrete Box Girder Bridges considering Construction Stage, Applied Mathematical Modelling, 35, 3809-3820.
- Atmaca, B., 2018. Öngerilmeli Kirişli Köprü Üstyapısının Hesap ve Tasarımının İrdelenmesi ve Bilgisayar Programının Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Aviram, A., Mackie, K. R. ve Stojadinović, B., 2008. Guidelines for nonlinear analysis of bridge structures in California, Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Aydinoğlu, M. N., Önem, G., 2007. Artımsal Spektrum Analizi (ARSA) ile köprülerin Nonlinear Performanslarının Değerlendirilmesi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, 16-20.
- Bilge, M. R., 1975. Öngerilmeli beton, İ. T. Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Caltrans, S., 2004. Caltrans seismic design criteria version 1.3, California Department of Transportation, Sacramento.
- Celep, Z. ve Kumbasar N., 2001. Yapı Dinamiği, Üçüncü baskı, İstanbul, Rehber Matbaacılık.
- Çift, Ö. F., 2018. Dengeli Konsol Köprü Analizi ve Değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Erhan, K., 2015. Ardgermeli Beton ve Yeni Çözümler, Lord Matbaacılık ve Kağıtçılık Alpaslan Arıbuğa. İstanbul.

- Eriksson, J. ve Jonsson, A., 2017. Modelling Techniques for Post-tensioned Concrete Slab Bridges, Master Thesis, Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering Division of Structural Engineering, Gothenburg, Sweden.
- Farhad, p. ve Priyanka, D., 2017. Analysis and Design of Post Tensioned Box Girder Bridge Using SAP 2000, International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology, 3, 2, 1990-2350.
- Ganbat, B., 2008. Köprülerin Deprem Performansının İtme Analizi Yöntemi İle Belirlenmesi ve Bayrampaşa Köprüsünün Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Grange, C., 2015. Robustness to Corrosion Of Post-Tensioned Concrete Slab Bridges, Master thesis,
- Guiglia, M. ve Taliano, M., 2014. Experimental analysis of the effective pre-stress in large-span bridge box girders after 40 years of service life, Engineering Structures 66, 146-158,
- Güngör, O., 2010. Mevcut Bir Karayolu Köprüsünün Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Yöntemler ile Performans Değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Hamad, A. H. ve Tanhan, F., 2018. Analysis Of Post Tensioned Concrte Box Girder Bridge, Master Thesis, Royal Institute of Technology, Department of Civil and Architectural Engineering Division of Structural Engineering and Bridges, Stockholm, Sweden.
- Hsiao, J. K. ve Jiang, A. Y., 2016. Post Tensioned Box Girder Bridge An Analysis Approach Using Equivalent Loads, International journal of Bridge Engineering, 1, 27-55.
- Karadoğan, F., Pala, S., Yüksel, E. ve Durgun, Y., 2011. Yapı Mühendisliğine Giriş, Birinci cilt, İstanbul.
- Karimi, T., 2019. Dinamik Yüklere Maruz İki Açıklıklı Prekast Öngerilmeli Karayolu Köprülerinin Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analizlerinde Performans Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Kim, j., Chung, W. ve Jaykim, J. H., 2008, Experimental Investigation On Behavior of a Spliced PSC Girder With Precast Box Segments, Engineering Structures 30, 3295-3304,
- Naik, T. C., Achar, M. M. ve lakshmi, K., 2015. Analysis and Design of Multi Cell Post-Tensioned PSC Box Girder, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineerin, 2278-1684
- Nawy, G. E., 1989. Prestressed Concrete a Fundamental Approach, Fourth Edition.

- Prof. Dr. Kemal, Ö., Prof. Dr. Antonio, L. T., Prof. Dr. İlhan, E. ve Yrd. Doç. Dr. Turgut, Ö., 1994B. Öngerilmeli beton. Birinci baskı
- Rašeta, A., Lađinović, Đ. ve Radujković, A., 2017. The estimation of seismic performances of reinforced concrete girder bridges using nonlinear dynamic analysis, *Tehnički vjesnik*, 24,2, 489-496.
- Setiawan, A.F., Sulistyo D. ve Aminullah A., 2014, Finite Element Method for Numerical Analysis of Post-Tension Anchorage Zone, *Procedia Engineering* 95, 272-278,
- Shatarat, N., Shehadeh, M. ve Naser, M., 2017. Impact of plastic hinge properties on capacity curve of reinforced concrete bridges, *Advances in Materials Science and Engineering* 13, 6310321.
- U.S Department Of Transportation Federal Highway Administration, 2016. Post-Tensioned Box Girder Design Manual.
- URL-1, <https://docplayer.biz.tr/48055561-Ongerilmeli-beton-prof-dr-metin-husem.html>, 20.04.2019.
- URL-2, <https://www.slideshare.net/ekremcakmak/ekrem-akmak-kaldrma-aralarnda-sal-ve-gvenlii-sunumu-asgem>, 20.04.2019
- URL-3, <https://www.atlasobscura.com/places/tarr-steps>, 20.04.2019
- Vaibhav, G., Tejani, H. K. ve Dhameliya, J. G. (2015) “Review for Study of Prestressing Systems for all Structural Element”
- XTRACT, 2001. Cross Sectional Analysis of Components, Imbsen Software System,
- Yıldırım, E., 2011. Yapım Aşamaları ve Farklı Zemin Durumlarının Betonarme Köprülerin Yapısal Davranışlarına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Yüksel, E.S., 2008. Mevcut Bir Viyadüğün Deprem Performansının Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Yöntemler ile Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Zhao, X., Wu, Y.F., Leung, A. Y. ve Lam, H. F., 2011. Plastic hinge length in reinforced concrete flexural members, *Procedia Engineering*, 14, 1266-1274.

ÖZGEÇMİŞ

Walid YAQOOBI, 1993 yılında Afganistan Takhar ilinde doğdu. İlkokulu İran'ın Meşhed ilinde, ortaokulu Takhar'da ve liseyi Balkh ilinde tamamladı. 2011 yılında girdiği Yabancı Öğrenci sınavı'nda (YÖS) gösterdiği başarı sonucu Yurtdışı Türkler ve Akraba Toplulukları Başkanlığı (YTB) tarafından burslu olarak lisans eğitimi almaya hak kazandı. Ankara Üniversitesi Türkçe ve Yabancı Dil Uygulama ve Araştırma Merkezi TÖMER Antalya şubesinde bir yıl Türkçe eğitimi aldıktan sonra 2012 yılında Çukurova Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık fakültesinde İnşaat Mühendisliğine başladı. Lisans eğitimini 2016 yılında İnşaat Mühendisi olarak tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalı'nda "Yüksek Lisans" eğitimine başladı.