

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ARDGERMELİ DENGELİ KONSOL KÖPRÜLER İÇİN DOĞAL FREKANS
FORMÜLÜ GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Soner SÜMERKAN

KASIM 2014
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ARDGERMELİ DENGELİ KONSOL KÖPRÜLER İÇİN DOĞAL FREKANS
FORMÜLÜ GELİŞTİRİLMESİ

İnş. Müh. Soner SÜMERKAN

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 23.09.2014
Tezin Savunma Tarihi : 10.11.2014

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR

Trabzon 2014

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında

Soner SÜMERKAN tarafından hazırlanan

**ARDGERMELİ DENGELİ KONSOL KÖPRÜLER İÇİN DOĞAL FREKANS
FORMÜLÜ GELİŞTİRİLMESİ**

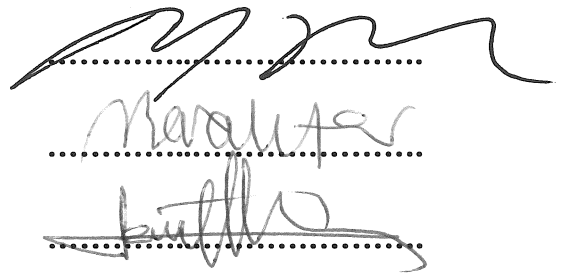
**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 14/10/2014 gün ve 1573 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Muzaffer DOĞAN

Üye : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR

Üye : Yrd. Doç. Dr. Temel TÜRKER



Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

“Ardgermeli Dengeli Konsol Köprüler İçin Doğal Frekans Formülü Geliştirilmesi” adlı bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu tez çalışmasını bana öneren, yoğun çalışma temposu içerisinde tez çalışmamın her aşamasında ilgisini eksik etmeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden daima yararlandığım Hocam Sayın Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR’a minnet ve şükranlarımı sunmayı her zaman bir borç bilirim.

Çalışmalarım sırasında bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Temel TÜRKER’e ve Yrd. Doç. Dr. Hasan Basri BAŞAĞA’ya teşekkür ederim. Ayrıca öğrenim hayatım boyunca bana emeği geçen tüm hocalarımı saygıyla anar, kendilerine minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Tez çalışmamın deneysel ölçümleri sırasında yardımcı olan arkadaşım Emre SARI’ya teşekkür ederim.

Tez çalışmamın sağlıklı bir şekilde yürütülebilmesi için gerekli desteği sağlayan KOLİN İnşaat Turizm Sanayi ve Ticaret A.Ş.’ye ve SÜMERKAN İnşaat Taahhüt Turizm Nakliyat ve Ticaret Limited Şirketi’ne teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince beni sürekli teşvik eden, tecrübelerinden faydalandığım babam Salih SÜMERKAN’a teşekkür ederim. Öğrenim hayatım boyunca bana her türlü desteği veren annem Necla SÜMERKAN’a ve kardeşlerim Eyüp Sümer SÜMERKAN ve Hakkı Doğaner SÜMERKAN’a müteşekkür olduğumu belirtmek isterim. Bu çalışmanın, Ülkemizin bilimsel alanda ilerlemesine ve yeni yapılacak olan çalışmalara katkıda bulunmasını temenni ederim.

Soner SÜMERKAN
Trabzon 2014

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Ardgermeli Dengeli Konsol Köprüler İçin Doğal Frekans Formülü Geliştirilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda arazide yaptığımı, 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. 23/09/2014

Soner SÜMERKAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	X
SUMMARY	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
TABLolar DİZİNİ.....	XVII
SEMBOLLER DİZİNİ	XVIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar.....	2
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği	5
1.4. Dengeli Konsol Yöntemi ile Köprü Yapımı.....	6
1.4.1. Köprü Temellerinin Geometrik Özellikleri ve Yapım Aşamaları	6
1.4.2. Köprü Kolonlarının Geometrik Özellikleri ve Yapım Aşamaları	10
1.4.3. Üstyapı Geometrik Özellikleri ve Yapım Aşamaları.....	12
1.4.3.1. Başlık Segmenti	14
1.4.3.2. Arabalı Kalıbın Kurulumu ve Segmentlerin İlerlemesi.....	18
1.4.3.3. Ardgerme Sistemi	21
1.5. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi	23
1.5.1. Operasyonel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Ölçüm Sistemi	24
1.5.1.1. İvmeölçerler.....	24
1.5.1.2. Veri Toplama Sistemi ve Sinyal İşleme	25
1.5.2. Operasyonel Modal Analiz Formülasyonu.....	26
1.5.2.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) Yöntemi	26
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	29
2.1. Giriş	29
2.2. Ortaköy Köprüsü	29
2.2.1. Genel Özellikler.....	30
2.2.1.1. Köprü Tabliyesi	30
2.2.1.1.1. Başlık Anosu.....	32

2.2.1.1.2.	Kenarayak Uç Diyaframları.....	33
2.2.1.1.3.	Ardgerme Halatları Yerleşim Planı	33
2.2.1.1.4.	Genleşme Derzleri	35
2.2.1.1.5.	Mesnetler	36
2.2.1.2.	Köprü Kolonu	36
2.2.1.2.1.	P2 Kolonu	36
2.2.1.3.	Köprü Temelleri	37
2.2.1.3.1.	P2 Temeli.....	37
2.2.2.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Ortaköy Köprüsünün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	37
2.2.3.	Ortaköy Köprüsü'nün Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	43
2.2.3.1.	Köprü'nün Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli	43
2.2.3.2.	Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Ortaköy Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	45
2.3.	Akarsın Köprüsü.....	49
2.3.1.	Genel Özellikler.....	51
2.3.1.1.	Köprü Tabliyesi	51
2.3.1.1.1.	Başlık Anosu.....	53
2.3.1.1.2.	Kenarayak Uç Diyaframları.....	54
2.3.1.1.3.	Ardgerme Halatları Yerleşim Planı	55
2.3.1.1.4.	Genleşme Derzleri	58
2.3.1.1.5.	Mesnetler	58
2.3.1.2.	Köprü Kolonları.....	59
2.3.1.2.1.	P2 Kolonu	59
2.3.1.2.2.	P3 Kolonu	59
2.3.1.3.	Köprü Temelleri	60
2.3.1.3.1.	P2 Temeli.....	60
2.3.1.3.2.	P3 Temeli.....	60
2.3.1.4.	Kenarayaklar.....	61
2.3.1.4.1.	A1 Kenarayağı.....	61
2.3.1.4.2.	A4 Kenar Ayağı.....	62
2.3.2.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Akarsın Köprüsünün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	63
2.3.3.	Akarsın Köprüsü'nün Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	70

2.3.3.1.	Köprü'nün Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli	70
2.3.3.2.	Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Akarsın Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	72
2.4.	Budan Köprüsü	76
2.4.1.	Genel Özellikler.....	78
2.4.1.1.	Köprü Tabliyesi	78
2.4.1.1.1.	Başlık Anosu.....	80
2.4.1.1.2.	Kenararak Uç Diyaframları.....	81
2.4.1.1.3.	Ardgerme Halatları Yerleşim Planı	81
2.4.1.1.4.	Genleşme Derzleri	84
2.4.1.1.5.	Mesnetler	85
2.4.1.2.	Köprü Kolonları.....	85
2.4.1.2.1.	P2 Kolonu	85
2.4.1.2.2.	P3 Kolonu	86
2.4.1.3.	Köprü Temelleri	87
2.4.1.3.1.	P2 Temeli.....	87
2.4.1.4.	Kenararaklar.....	89
2.4.1.4.1.	A1 Kenarayağı.....	89
2.4.1.4.2.	A4 Kenar Ayağı.....	90
2.4.2.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Budan Köprüsünün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	91
2.4.3.	Budan Köprüsü'nün Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	99
2.4.3.1.	Köprü'nün Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli.....	99
2.4.3.2.	Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Budan Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	101
2.5.	Sengan Köprüsü.....	106
2.5.1.	Genel Özellikler.....	107
2.5.1.1.	Köprü Tabliyesi	107
2.5.1.1.1.	Başlık Anosu.....	109
2.5.1.1.2.	Kenararak Uç Diyaframları.....	110
2.5.1.1.3.	Ardgerme Halatları Yerleşim Planı	110
2.5.1.1.4.	Genleşme Derzleri	112
2.5.1.1.5.	Mesnetler	113
2.5.1.2.	Köprü Kolonu	113
2.5.1.2.1.	P2 Kolonu	113

2.5.1.3.	Köprü Temelleri	114
2.5.1.3.1.	P2 Temeli.....	114
2.5.1.4.	Kenar ayaklar.....	115
2.5.1.4.1.	A1 Kenarayağı.....	115
2.5.1.4.2.	A3 Kenar Ayağı.....	116
2.5.2.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Sengan Köprüsünün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	117
2.5.3.	Sengan Köprüsü'nün Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	123
2.5.3.1.	Köprü'nün Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli.....	123
2.5.3.2.	Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Sengan Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	125
2.6.	Berta Köprüsü.....	129
2.6.1.	Genel Özellikler.....	131
2.6.1.1.	Köprü Tabliyesi	131
2.6.1.1.1.	Başlık Anosu.....	133
2.6.1.1.2.	Kenar ayak Uç Diyaframları.....	134
2.6.1.1.3.	Ardgerme Halatları Yerleşim Planı	135
2.6.1.1.4.	Genleşme Derzleri	137
2.6.1.1.5.	Mesnetler	138
2.6.1.2.	Köprü Kolonları.....	138
2.6.1.2.1.	P2 Kolonu	138
2.6.1.2.2.	P3 Kolonu	139
2.6.1.3.	Köprü Temelleri	140
2.6.1.3.1.	P2 Temeli.....	140
2.6.1.3.2.	P3 Temeli.....	140
2.6.1.4.	Kenar ayaklar.....	141
2.6.1.4.1.	A1 Kenarayağı.....	141
2.6.1.4.2.	A4 Kenar Ayağı.....	142
2.6.2.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Berta Köprüsünün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	143
2.6.3.	Berta Köprüsü'nün Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	149
2.6.3.1.	Köprü'nün Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli.....	149
2.6.3.2.	Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Berta Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	151

2.7.	Bulgular ve İrdemeler	156
2.7.1.	Köprülerin Teorik ve Deneysel Frekansların Karşılaştırılması	156
2.7.2.	Deneysel ve Teorik Mod Şekillerinin Karşılaştırılması	160
2.7.3.	Köprü Frekansını Etkileyen Parametrelerin Belirlenmesi	165
2.7.3.1.	Köprü Dinamik Karakteristiklerin Köprü Yükseklik ve Uzunluklarına Bağlı Değişiminin İncelenmesi	167
2.7.4.	Dengeli Konsol Köprüler İçin Doğal Frekans Formülünün Geliştirilmesi	168
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	171
4.	KAYNAKLAR	174
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ARDGERMELİ DENGELİ KONSOL KÖPRÜLER İÇİN DOĞAL FREKANS
FORMÜLÜ GELİŞTİRİLMESİ

Soner SÜMERKAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR
2014, 176 Sayfa

Bu çalışmada, Ardgermeli Dengeli Konsol Köprüler için çevresel titreşim verileri ve Sonlu Elemanlar Yöntemi analizlerine dayalı doğal frekans formülü geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Dengeli Konsol Yöntemi ile yapılan beş adet köprü üzerinde deneysel ve analitik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda Operasyonel Modal Analiz Yöntemi, analitik çalışmalarda Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmıştır. Tez çalışması dört bölümden oluşmaktadır. Birinci Bölüm’ de konu ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalardan, tezin amacı ve içeriğinden, dengeli konsol köprülerin inşaat aşamalarından ve Operasyonel Modal Analiz Yönteminden bahsedilmiştir. İkinci Bölüm’ de seçilen köprüler tanıtılmış ve geometrik özellikleri detaylı olarak verilmiştir. Köprüler üzerinde yapılan çevresel titreşim testleri sonucunda köprülerin dinamik karakteristikleri deneysel olarak elde edilmiştir. Daha sonra köprüler Sonlu Elemanlar Yöntemi ile modellenerek analitik dinamik karakteristikleri hesaplanmıştır. Deneysel ve analitik çalışmalar sonucunda köprülerin frekanslarını en çok etkileyen parametrelerin köprü yüksekliği ve uzunluğu olduğu belirlenmiştir. Bu parametrelerin köprü dinamik davranışına etkisi birçok köprü modeli üzerinde analiz edilerek, dengeli konsol köprüler için enine ve düşey hareketlere ait doğal frekans formülleri önerilmiştir. Üçüncü Bölüm’ de deneysel ve analitik analizler sonucu elde edilen sonuçlar ve öneriler sunulmuştur. Son bölüm’ de bu çalışmada kullanılan kaynaklara yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ardgermeli Dengeli Konsol Köprüler, Operasyonel Modal Analiz, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Çevresel Titreşim Yöntemi, Doğal Frekans.

Master Thesis

SUMMARY

NATURAL FREQUENCY FORMULA FOR POST TENSIONED BALANCED
CANTILEVER BRIDGES

Soner SÜMERKAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR
2014, 176 Pages

In this study, developing a natural frequency formula for Post Tensioned Balanced Cantilever Bridges by using Ambient Vibration Tests and Finite Element Analyses results is intended. For this purpose, experimental and analytical studies are performed on five bridges which were constructed by Balanced Cantilever method. Operational Modal Analysis and Finite Element Methods are used in the experimental and analytical studies, respectively. This thesis consists of four chapters. The first chapter includes the previous studies on this subject, aim and content of thesis, construction stages of the balanced cantilever bridges and information about Operational Modal Analysis Method. In the second chapter, selected bridges are introduced briefly with their geometrical properties. Experimental dynamic characteristics of the bridges are determined by performing Ambient Vibration Tests. The analytical dynamic characteristics of bridges are obtained by the Finite Element Method. As a result of experimental and analytical studies, the most important parameters affecting the natural frequency of the bridges are determined as height and length of the bridge. The effects of these parameters to the dynamical response of the bridges are investigated on various bridge models, and a formula for natural frequency of post tensioned balanced cantilever bridges is suggested. In the third chapter, results and suggestions are presented. The last chapter consists of the references used in this study.

Key Words: Post Tensioned Balanced Cantilever Bridges, Operational Modal Analysis, Finite Elements Method, Ambient Vibration Tests, Natural Frequency.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Malabadi Köprüsü, (Silvan, Diyarbakır).....	1
Şekil 1.2. Berta Köprüsü, (Artvin)	2
Şekil 1.3. Sengan Köprüsü temel demiri montajı.....	7
Şekil 1.4. Akarsın Köprüsü temel demiri	8
Şekil 1.5. Sengan Köprüsü kolon filizleri	8
Şekil 1.6. Temel betonu dökümü.....	9
Şekil 1.7. Temel betonu.....	9
Şekil 1.8. Kolon kalıbı.....	10
Şekil 1.9. Berta Köprüsü P2 kolonu	11
Şekil 1.10. İç kalıp.....	11
Şekil 1.11. Tırmanır sistem kolon kalıbı, dış kalıbın kaldırılması	12
Şekil 1.12. Değişken kutu kesitli köprü tabliyesi genel görünüm	13
Şekil 1.13. Ortaköy Köprüsü birinci segment tabliye kesiti.....	14
Şekil 1.14. Ortaköy Köprüsü son segment tabliye kesiti.....	14
Şekil 1.15. Başlık platformlarının kaldırılması	15
Şekil 1.16. Başlık platformu	15
Şekil 1.17. Başlık segmenti ikinci kademesi demir ve kalıp montajı.....	16
Şekil 1.18. Başlık segmenti ikinci kademe gövde betonu	16
Şekil 1.19. Başlık segmenti üst tabliye iskele kurulumu ve kalıp montajı.....	17
Şekil 1.20. Üst tabliye germe halatlarının geçeceği kılıf borularının yerleşimi	17
Şekil 1.21. Üst tabliye betonu.....	18
Şekil 1.22. Arabalı kalıp	18
Şekil 1.23. Ardgerme halatlarının geçeceği kılıf boruları	19
Şekil 1.24. Berta Köprüsü	20
Şekil 1.25. Arabalı kalıbın ilerlemesi	20
Şekil 1.26. Berta Köprüsü	21
Şekil 1.27. Halat sürme makinası	22
Şekil 1.28. Germe krikosu	22
Şekil 1.29. Germe krikosunun hidrolik pompası	22
Şekil 1.30. Kama plakası ve kamalar	23
Şekil 1.31. Piezoelektrik tipi ivmeölçerlerin iç mekanizması	24

Şekil 1.32.	B&K 8340 tipi tek eksenli kablolu ivmeölçer.....	25
Şekil 1.33.	B&K 3560-C tipindeki 17 kanallı veri toplama ünitesi	25
Şekil 1.34.	Modal sönüm oranının elde edilmesi	28
Şekil 2.1.	Ortaköy Köprüsü	29
Şekil 2.2.	Ortaköy Köprüsü genel vaziyet planı.....	30
Şekil 2.3.	Ortaköy Köprüsü tabliye planı	31
Şekil 2.4.	Değişken kutu kesitli tabliye boyutları.....	32
Şekil 2.5.	Başlık segmenti kesitleri ve boyutları	32
Şekil 2.6.	Kenar ayak uç diyaframı genel görünümü	33
Şekil 2.7.	Köprüsü alt döşeme halatları yerleşim planı	34
Şekil 2.8.	Genleşme derzi yerleşimi	36
Şekil 2.9.	P2 ayağı kolon kesiti	37
Şekil 2.10.	İvmeölçer yerleşim planı	38
Şekil 2.11.	İvmeölçer yerleşim planı	38
Şekil 2.12.	Ortaköy Köprüsü'nde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar	38
Şekil 2.13.	Ortaköy Köprüsü'nde yapılan iki ölçümden elde edilen stabilizasyon diagramları	39
Şekil 2.14.	Geliştirilmiş frekans tanım aralığında ayrıştırma yöntemi ile elde edilen tekil değerler	40
Şekil 2.15.	Ortaköy köprüsünün çevresel titreşim yöntemi ile elde edilen mod şekilleri	41
Şekil 2.16.	Ortaköy Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli	45
Şekil 2.17.	Ortaköy Köprüsü'nün analitik olarak elde edilen ilk 7 mod şekli	46
Şekil 2.18.	Akarsın Köprüsü	50
Şekil 2.19.	Akarsın Köprüsü genel vaziyet planı kesiti.....	50
Şekil 2.20.	Akarsın Köprüsü tabliye cephe görüntüsü	51
Şekil 2.21.	Akarsın Köprüsü tabliye planı.....	52
Şekil 2.22.	Değişken kutu kesitli tabliye boyutları.....	53
Şekil 2.23.	Başlık segmenti kesitleri	53
Şekil 2.24.	Kenar ayak uç diyaframı genel görünümü	54
Şekil 2.25.	Akarsın Köprüsü üst döşeme halat yerleşim planı	55
Şekil 2.26.	Akarsın Köprüsü alt döşeme halatları yerleşim planı	57
Şekil 2.27.	Genleşme derzi yerleşimi	58
Şekil 2.28.	P2 ayağı kolon kesiti	59
Şekil 2.29.	P3 ayağı kolon kesiti	60

Şekil 2.30.	P2 ve P3 temelleri plan ve kesitleri.....	61
Şekil 2.31.	A1 kenar ayağı genel görünümü	62
Şekil 2.32.	A4 kenar ayağı genel görünümü	63
Şekil 2.33.	Akarsın köprüsünün çevresel titreşim testleri için kullanılan ivmeölçer yerleşim planları.....	65
Şekil 2.34.	Akarsın Köprüsü'nde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar	66
Şekil 2.35.	Akarsın Köprüsü'nde yapılan dört ölçümden elde edilen stabilizasyon diagramları	67
Şekil 2.36.	Geliştirilmiş frekans tanım aralığında ayrıştırma yöntemi ile elde edilen tekil değerler.....	68
Şekil 2.37.	Akarsın Köprüsü'nün çevresel titreşim yöntemi ile elde edilen mod şekilleri.....	69
Şekil 2.38.	Akarsın Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli.....	72
Şekil 2.39.	Akarsın Köprüsü'nün analitik olarak elde edilen ilk 7 mod şekli.....	73
Şekil 2.40.	Budan Köprüsü.....	77
Şekil 2.41.	Budan Köprüsü genel vaziyet planı	77
Şekil 2.42.	Budan Köprüsü tabliye cephe görüntüsü	78
Şekil 2.43.	Budan Köprüsü tabliye planı.....	79
Şekil 2.44.	Değişken kutu kesitli tabliye boyutları.....	80
Şekil 2.45.	Başlık segmenti kesitleri	80
Şekil 2.46.	Kenar ayak uç diyaframı genel görünümü	81
Şekil 2.47.	Budan Köprüsü üst döşeme halat yerleşim planı	82
Şekil 2.48.	Budan Köprüsü alt döşeme halatları yerleşim planı.....	84
Şekil 2.49.	Genleşme derzi yerleşimi	85
Şekil 2.50.	P2 ayağı kolon kesiti	86
Şekil 2.51.	P3 ayağı kolon kesiti	87
Şekil 2.52.	P2 ve P3 temelleri plan ve kesitleri.....	88
Şekil 2.53.	A1 kenar ayağı genel görünümü	89
Şekil 2.54.	A4 kenar ayağı genel görünümü	90
Şekil 2.55.	Budan Köprüsü'nün çevresel titreşim testleri için kullanılan ivmeölçer yerleşim planları.....	93
Şekil 2.56.	Budan Köprüsü'nde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar	93
Şekil 2.57.	Budan Köprüsü'nde yapılan dört ölçümden elde edilen stabilizasyon diagramları	94

Şekil 2.58.	Geliştirilmiş frekans tanım aralığında ayrıştırma yöntemi ile elde edilen tekil değerler	95
Şekil 2.59.	Budan Köprüsü'nün çevresel titreşim yöntemi ile elde edilen mod şekilleri	96
Şekil 2.60.	Budan Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli	101
Şekil 2.61.	Budan Köprüsü'nün analitik olarak elde edilen ilk 7 mod şekli	102
Şekil 2.62.	Sengan Köprüsü	106
Şekil 2.63.	Sengan Köprüsü genel vaziyet planı	107
Şekil 2.64.	Sengan Köprüsü tabliye cephe görüntüsü	108
Şekil 2.65.	Sengan Köprüsü tabliye planı	108
Şekil 2.66.	Değişken kutu kesitli tabliye boyutları.....	109
Şekil 2.67.	Başlık segmenti kesitleri	109
Şekil 2.68.	Kenar ayak uç diyaframı genel görünümü	110
Şekil 2.69.	Köprüsü üst döşeme halat yerleşim planı.....	111
Şekil 2.70.	Sengan Köprüsü alt döşeme halatları yerleşim planı	112
Şekil 2.71.	Genleşme derzi yerleşimi	113
Şekil 2.72.	P2 ayağı değişken kesitli kolon.....	114
Şekil 2.73.	P2 temeli plan ve kesitleri	115
Şekil 2.74.	A1 kenar ayağı genel görünümü	116
Şekil 2.75.	A3 kenar ayağı genel görünümü	117
Şekil 2.76.	Sengan köprüsünün çevresel titreşim testi için kullanılan ivmeölçer yerleşim planı	118
Şekil 2.77.	Sengan Köprüsü'nde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar	118
Şekil 2.78.	Sengan Köprüsü'nde yapılan ölçümden elde edilen stabilizasyon diagramı.....	119
Şekil 2.79.	Geliştirilmiş frekans tanım aralığında ayrıştırma yöntemi ile elde edilen tekil değerler	120
Şekil 2.80.	Sengan köprüsünün çevresel titreşim yöntemi ile elde edilen mod şekilleri	121
Şekil 2.81.	Sengan Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli.....	125
Şekil 2.82.	Sengan Köprüsü'nün analitik olarak elde edilen ilk 7 mod şekli.....	126
Şekil 2.83.	Berta Köprüsü	130
Şekil 2.84.	Berta köprüsü genel vaziyet planı	130
Şekil 2.85.	Berta köprüsü tabliye cephe görüntüsü	131
Şekil 2.86.	Berta Köprüsü tabliye planı.....	132
Şekil 2.87.	Değişken kutu kesitli tabliye boyutları.....	133

Şekil 2.88.	Başlık segmenti kesitleri	133
Şekil 2.89.	Kenar ayak uç diyaframı genel görünümü	134
Şekil 2.90.	Berta Köprüsü üst döşeme halat yerleşim planı	135
Şekil 2.91.	Berta Köprüsü alt döşeme halatları yerleşim planı	137
Şekil 2.92.	Genleşme derzi yerleşimi	138
Şekil 2.93.	P2 ayağı kolon kesiti	139
Şekil 2.94.	P3 ayağı kolon kesiti	140
Şekil 2.95.	P2 ve P3 temelleri plan ve kesitleri	141
Şekil 2.96.	A1 kenar ayağı genel görünümü	142
Şekil 2.97.	A4 kenar ayağı genel görünümü	143
Şekil 2.98.	Berta Köprüsü'nün çevresel titreşim testleri için kullanılan ivmeölçer yerleşim planları	145
Şekil 2.99.	Berta Köprüsü'nde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar	145
Şekil 2.100.	Berta Köprüsü'nde yapılan iki ölçümden elde edilen stabilizasyon diagramları	146
Şekil 2.101.	Geliştirilmiş frekans tanım aralığında ayrıştırma yöntemi ile elde edilen tekil değerler	147
Şekil 2.102.	Berta köprüsünün çevresel titreşim yöntemi ile elde edilen mod şekilleri	148
Şekil 2.103.	Berta Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli	151
Şekil 2.104.	Berta Köprüsü'nün analitik olarak elde edilen ilk 7 mod şekli	152
Şekil 2.105.	DeneySEL ve teorik doğal frekansların karşılaştırılması	157
Şekil 2.106.	DeneySEL ve teorik mod şekilleri	160
Şekil 2.107.	1. doğal frekans-yükseklik değişimi	167
Şekil 2.108.	1. doğal frekans-uzunluk değişimi	168

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Ortaköy Köprüsü'nün ilk yedi doğal frekansı ve modal sönüm oranı	41
Tablo 2.2. Ortaköy Köprüsü'nün sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri.....	44
Tablo 2.3. Ortaköy Köprüsü'nün ilk yedi doğal frekans ve periyotları	46
Tablo 2.4. Akarsın Köprüsü'nün ilk yedi doğal frekansı ve modal sönüm oranı.....	68
Tablo 2.5. Akarsın Köprüsü'nün sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri.....	71
Tablo 2.6. Akarsın Köprüsü'nün ilk 7 doğal frekans ve periyotları.....	73
Tablo 2.7. Budan Köprüsü'nün ilk yedi doğal frekansı ve modal sönüm oranı.....	96
Tablo 2.8. Budan Köprüsü'nün sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri.....	100
Tablo 2.9. Budan Köprüsü'nün ilk 7 doğal frekans ve periyotları	101
Tablo 2.10. Sengan Köprüsü'nün ilk yedi doğal frekansı ve modal sönüm oranı	120
Tablo 2.11. Sengan Köprüsü'nün sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri.....	124
Tablo 2.12. Sengan Köprüsü'nün ilk 7 doğal frekans ve periyotları.....	126
Tablo 2.13. Köprüsü'nün ilk yedi doğal frekansı ve modal sönüm oranı	147
Tablo 2.14. Berta Köprüsü'nün sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri.....	150
Tablo 2.15. Berta Köprüsü'nün ilk 7 doğal frekans ve periyotları.....	152
Tablo 2.16. Deneysel ve teorik analizlerden elde edilen ilk 7 doğal frekans	156
Tablo 2.17. Deneysel dinamik karakteristikler.....	159
Tablo 2.18. Budan Köprüsü doğal frekansı etkileyen faktörler	166
Tablo 2.19. Frekansın parametrelere bağlı değişim oranları	166
Tablo 2.20. Doğal frekans-yükseklik ve uzunluk değişimi	167
Tablo 2.21. Farklı yükseklik ve uzunluklar için köprü doğal frekansları.....	168
Tablo 2.22. Dengeli konsol köprüler için elde edilen formüllerin kontrolü.....	170

SEMBOLLER DİZİNİ

A_*	: Durum matrisi
A_k	: Tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonuna ait k. artık değer matrisi
B_k	: Tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonuna ait k. artık değer matrisi
B_*	: Veri matrisi
f	: Frekans
$G_{xx}(j\omega)$: Etki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonu
$G_{yy}(j\omega)$: Tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonu
\bar{H}	: Kompleks eşlenik ve transpoze
$H(j\omega)$: Frekans davranış fonksiyonu
ω	: Sönümsüz doğal açısal frekans
ξ	: Sönüm oranı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Geçmişten günümüze köprüler nehirler ve vadiler gibi geçilmesi güç coğrafik oluşumların iki kıyısını birbirine bağlayan önemli yapılardır. Gerek ticaret yolları üzerinde bulunmaları gerekse buldukları yerde diğer alternatif yollara nazaran mesafeleri çok kısaltmaları sebebiyle çok büyük stratejik öneme sahiptirler. Bu bağlamda köprü yapımını tarihi çok eskilere dayanmaktadır. İlk köprülere M.Ö 4000'de Mezapotamya' da rastlanmaktadır. Taş köprülerin yapımı ise M.Ö 200 civarlarında başlamıştır. Bu taş kemerli köprülerden günümüze kadar ulaşanlara örnek Şekil 1.1'de verilmektedir.



Şekil 1.1. Malabadi Köprüsü, (Silvan, Diyarbakır)

Köprü yapımı zaman içinde fazlaca ilerlemiş olup köprünün yapılacağı yerin coğrafik durumuna göre uygulanabilecek yeni köprü tipleri ve yapım metotları geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden Dengeli Konsol Yöntemi, uzun mesafelerin daha az sayıda kolon yapılarak geçilmesini sağlaması açısından, özellikle yüksek ayaklara ihtiyaç duyulan derin vadilerin geçilmesinde hem ekonomi hem de zaman açısından avantaj sağlamaktadır. Ayrıca daha uzun açıklıklı köprülerin estetik açıdan daha güzel görüldüğü

de düşünölmektedir. Dengeli Konsol Yöntemi ile yapılan Berta Köprüsü'nün fotoğrafı Şekil 1.2'de verilmiştir.



Şekil 1.2. Berta Köprüsü, (Artvin)

1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Skrinar ve Strukelj (1996), değişken derinlikli bir dengeli konsol köprüde frekansları belirlemek için ölçümler gerçekleştirmiştir. Casas (1997), beton köprülerin konsol yapımında kısmi güvenilirlik faktörlerini belirlemek için çalışmalar yapmıştır.

Manjure (2001), dengeli konsol köprülerin rehabilitasyonu üzerine çalışmalar yapmıştır. Strommen vd. (2001), dengeli konsol yöntemi ile yapılan kutu kesitli betonarme köprü'nün yapım aşaması sırasında meydana gelen dinamik yük etkilerini araştırmışlardır.

Schimdt ve Solari (2003), dengeli konsol köprü'nün yapımı sırasında üç boyutlu rüzgar etkilerini incelemişlerdir.

McDonald vd. (2003), ardgermeli dengeli konsol Palau Köprüsü'nün yıkımını incelemişlerdir.

Kwak ve Son (2004), dengeli konsol yöntemiyle yapılan köprülerde tasarım moment değişimlerini hesaplamışlardır.

Pimanmas (2007), dengeli konsol yöntemi ile yerinde dilimli olarak inşa edilen moment dağılımı üzerinde sünme ve öngerilmenin etkisini incelemiştir.

Jung vd. (2007), kendi kendine öğrenme simülasyonu kullanarak dilimli köprülerin zamana bağlı zamana bağlı davranışının kalibrasyonunu araştırmışlardır.

Hewson (2007), dengeli konsol köprüleri incelemiştir.

Hedjazi vd. (2007), dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen öngerilmeli kutu kesit beton köprülerin yerdeğiştirme ve sünme etkilerini değerlendirmişlerdir.

Morassi ve Tonon (2008), yapmış oldukları çalışmada yüksek seviyede deprem bölgesi olan kuzey doğu İtalya'da bulunan 3 açıklıklı ardgermeli Palu köprüsünün dinamik karakteristiklerini belirlemek için zorlanmış titreşim testleri yapmışlardır. Köprünün analitik modeli SAP2000 programında testler yapılmadan önce hazırlanmıştır. Analitik modelin analizinden elde edilen verilere göre ölçümlerde kullanılacak ivmeölçerlerin yerleştirilecekleri yerler belirlenmiştir. Deneysel ölçümlerden elde edilen dataolar kullanılarak analitik model kalibre edilmiştir. Analitik modelin kalibrasyonunda kullanılacak parametre seçiminin önemine vurgu yapılmıştır.

Gentile ve Bernardini (2008), yapmış oldukları çalışmada 113,3m uzunluğunda ve dengeli konsol yöntemiyle inşa edilmiş olan Capriate köprüsünde çevresel titreşim testleri yapmışlardır. Ölçümler sırasında radar sensörlü titreşimölçerler kullanılmıştır. Elde edilen titreşim verileri frekans ortamında ayrıştırma yöntemi kullanılarak köprünün dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Radar sensörlü ivmeölçerlerle elde edilen doğal frekanslar ve mod şekilleri konvansyonel ivmeölçerlerle elde edilenlerle karşılaştırıldığında sonuçların birbirleriyle uyum içinde oldukları görülmüştür.

Marzouk vd. (2008), dengeli konsol köprüler için özel amaçlı bir simülasyon modeli geliştirmişlerdir.

Kronenberg (2008), köprünün dengeli konsol yöntemi ile yapımı sırasında sürekli beton yerleştirmesini incelemiştir.

Kamaitis (2008), ardgermeli parçalı olarak inşa edilen beton köprülerde birleşim düğümlerinin yapım sırasında ve servisteki davranışını araştırmıştır.

Bayraktar vd. (2009), Elazığ-Malatya karayolu üzerinde bulunan, Fırat nehrinin üzerinden geçen Kömürhan köprüsünün dinamik karakteristiklerini belirlemek için çevresel titreşim testleri yapmışlardır. 287m uzunluğundaki köprünün tam ortasında genişleme derzi bulunmaktadır. Bu nedenle köprü iki simetrik parça olarak düşünülüp ölçüm yapılmıştır. Ölçümden köprünün ilk 14 doğal frekansı 0 ile 14Hz arasında deneysel

olarak elde edilmiştir. Simetrik parçalarda ayrı ayrı yapılan çevresel titreşim testlerinin sonucunda elde edilen doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları birbirleriyle karşılaştırıldığında çok yakın değerler elde edildiği görülmüştür. Ayrıca köprü sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş, bu model üzerinde yapılan modal analizler sonucunda elde edilen doğal frekanslar ve mod şekilleri deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Deneysel ve teorik verilerin küçük farklar dışında birbirleriyle uyum içinde oldukları görülmüştür.

Liu vd. (2009), 235m uzunluğundaki üç açıklıklı öngerilmeli ve kutu kesitli betonarme bir karayolu köprüsünün dinamik karakteristiklerini oniki ay boyunca farklı sıcaklık değişimleri altında çevresel titreşim testleriyle deneysel olarak belirlemişlerdir. Köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli ABAQUS programında analiz edilerek dinamik karakteristikler analitik olarak elde edilmiştir. Sonlu eleman modeli malzeme özellikleri, sınır şartları ve seçilen eleman tipleri değiştirilerek iyileştirilmiş, böylelikle deneysel ve analitik dinamik karakteristikler arasındaki farklılıklar minimum düzeye indirilmiştir.

Vonganan (2009), İkinci Mekong köprüsünü incelemiştir.

Pimanmas vd. (2009), Tayland'da yapılan yeni Phra-Nangklao köprüsünü incelemişlerdir. Köprü dengeli konsol yöntemi ile öngerilmeli beton kullanılarak yapılmıştır.

Starossek (2009), Kore'de yapılan Shin Chon köprüsünü incelemişlerdir. Köprü ardemeli dengeli konsol yöntemi ile betonarme kutu kesit olarak yapılmış olup ana açıklığı 170m'dir.

Altunışık vd. (2010), Kömürhan köprüsünün zamana bağlı malzeme özelliklerini dikkate alarak yapım aşamalı analizini gerçekleştirmişlerdir.

Malm ve Sundquist (2010), dengeli konsol yöntemi ile parçalı inşa edilen köprülerin zamana bağlı analizlerini yapmışlardır.

Stathapoulos vd. (2010), Yunanistan'da dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen Metsovo köprüsünün dinamik davranışını araştırmışlardır.

Altunışık vd. (2011) Giresun-Espiye karayolunda bulunan dengeli konsol yöntemiyle yapılmış olan Gülburnu viyadüğünde çevresel titreşim testleri yapmışlardır. Yapılan ölçümlerin sonucunda viyadüğün ilk sekiz mod için doğal frekansları 0-6Hz arasında çıkmıştır. Viyadüğün sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan analitik modelinden elde edilen doğal frekanslarla karşılaştırıldığında arada yaklaşık %9' luk bir fark olduğu belirtilmiştir. Köprünün analitik modeli deneysel verilerin ışığında revize edilmiştir.

Köprünün deprem davranışını belirlemek için 1992 Erzincan depremi kayıtları kullanılmıştır. Köprüde kullanılan sismik izolatörlerin önemi vurgulanmıştır.

Ateş (2011), dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen sürekli kutu kesitli beton köprülerin dinamik davranışını malzeme özelliklerini zaman bağlı dikkate alarak incelemiştir.

Turan (2012), yapmış olduğu yüksek lisans tezi kapsamında dengeli konsol betonarme karayolu köprülerinin dinamik karakteristikleri analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla, dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen Berta Köprüsü üzerinde analitik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Analitik çalışmalarda Sonlu Elemanlar Yöntemi, deneysel çalışmalarda çevresel titreşim verilerini dikkate alan Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılmıştır. Berta köprüsünün analitik modal analizinden elde edilen ilk beş doğal frekans 0,394-1,310 Hz arasında elde edilmiştir.

Ateş vd. (2013), yapı-zemin etkileşimi ve zamana bağlı malzeme özelliklerini dikkate alarak kutu kesitli beton karayolu köprülerinin davranışını incelemiştir.

Kudu vd. (2014), ardgermeli dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen Berta Köprüsü'nün sonlu elemanlar yöntemi ve çevresel titreşim yöntemini kullanarak dinamik karakteristiklerini elde etmişlerdir.

1.3. Tezin Amacı ve İçeriği

Literatür araştırmasından görülebileceği gibi ardgermeli dengeli konsol köprülerin doğal frekanslarını veren bir formül bulunmamaktadır. Bu tez çalışmasında ardgermeli dengeli konsol köprülerin doğal frekanslarının analitik olarak belirlenebilmesi için çevresel titreşim verileri ve sonlu eleman analizlerine dayalı bir formül geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla Artvin-Erzurum karayolu üzerinde yapılmış olan beş adet ardgermeli dengeli konsol köprünün dinamik davranışları deneysel ve analitik çalışmalar yapılarak incelenmiştir. Bu kapsamda hazırlanan tez çalışması üç bölümden oluşmaktadır.

Birinci Bölümde dengeli konsol köprüler ile ilgili çalışmalar, tezin amacı ve içeriği, dengeli konsol yöntemi ile köprü yapımı ve deneysel yöntem olarak kullanılan Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile ilgili formülasyonlara yer verilmektedir. İkinci Bölümde, seçilen köprülerin geometrik özelliklerinden, deneysel ölçümler ve sonlu eleman analizlerinden bahsedilmektedir. Analitik ve deneysel sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılarak köprülerin dinamik karakteristiklerini etkileyen parametreler belirlenmiş

ve bu parametrelerin köprülerin birinci doğal frekansına etkisi incelenmiştir. Köprü doğal frekansı için bir formül önerilmiştir. Üçüncü Bölüm’ de yapılan çalışmalardan çıkarılan sonuçlar ve gelecekte yapılacak çalışmalar için önerilere yer verilmiştir.

1.4. Dengeli Konsol Yöntemi ile Köprü Yapımı

Dengeli konsollu köprülerin yapım metodolojisi çok karmaşık olmamakla beraber klasik tarzda inşa edilen köprülere nazaran daha çok unsuru içinde bulundurmaktadır. Bu yüzden düzenli bir şekilde takip edilmesi gerekir. Dengeli konsollu köprülerde temeller ve kolonlar(ayaklar) inşa edildikten sonra sistemin ilerlemesini sağlayacak olan kalıp arabalarının yerleştirileceği başlık anosu yapılır. Başlık anosu özellikle yüksek köprülerde sistemin yapılması zor kısımlarından biri olarak değerlendirilmektedir.

Başlık segmentinin inşasının ardından 90ton ağırlığındaki arabalı kalıbın montajına başlanır. Arabalı kalıbın montajının bitirilmesinden sonra 3-5m arasında değişken uzunluktaki segmentlerin inşasına başlanır. Bu segmentler bir kolonun iki tarafına doğru denge sağlayacak şekilde eş zamanlı olarak yerinde döküm yapılarak oluşturulmaktadır. İnşası biten segment ardgerme sistemi ile geriye ve birbirine bağlanmaktadır. Orta ayaklardan sağlı sollu çıkan konsolların imalatı segment segment ilerlerken bir yandanda kenar ayak perdeleri ve başlıkları yapılır. Kenar ayak başlığının üzerine izolator montajı ve kesme kilidi yapılır. Konsolun bir tarafını kenarayağa bağlayan dolu kesitin inşasıyla birlikte bir taraf tamamlanmış olur. Konsolun diğer tarafı ise iki konsolu birbirine bağlayan kilit segmentinin inşası ile tamamlanır. Kilit segmenti yeterli mukavemeti aldıktan sonra açıklıkların birbirine bağlanmasını sağlayan alt tabliyeye ait halatlar sürülür ve ardgerme işlemi yapılır. Kenarayaklara projede belirlenen özelliklerdeki genleşme derzleri yerleştirilir. Aşağıda dengeli konsol köprüler için yapım aşamaları sırasıyla verilmektedir.

1.4.1. Köprü Temellerinin Geometrik Özellikleri ve Yapım Aşamaları

Bu tez çalışmasında incelenen 5 adet dengeli konsol yöntemi ile yapılan farklı yükseklik ve açıklıklardaki köprülerin hepsinde orta ayak temellerinin yükseklikleri 6m olup temel genişlik ve uzunlukları 27-33m arasında değişmektedir. Temellerin altında 3m derinliğinde ve 3m genişliğinde temelin köprü eksenine dik istikameti boyunca uzanan

kesme dişi bulunmaktadı. 25cm kalınlığında olan temel grobetonunun dökülmesinden sonra kesme dişinin demir montajına başlanır. 3m derinliğinde olan kesme dişinin filizleri temel üst kotuna kadar uzamaktadır (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Sengan Köprüsü temel demiri montajı

Kesme dişinin beton üst kotu grobeton üst kotuyla aynıdır. Kesme dişi betonu döküldükten sonra temel demirinin montajına başlanır. Bir temelde kullanılan demir miktarı 900-1200ton arasında değişmektedir. Temel demiri tamamen 32mm çapında olup altta 4 katlı ve üstte 2 katlı hasır şeklinde projelendirilmiştir. Ayrıca hasır oluştururken kullanılan her donatı eleman çift olarak kullanılmıştır (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. Akarsın Köprüsü temel demiri

Alt hasırın 1.katı döşendikten sonra temelin etrafını dönen 5,75m uzunluğundaki U şeklindeki demirlerin montajı yapılır. Alt hasırın 2. katı da bitirildikten sonra 12m uzunluğundaki kolon filizlerinin dikilmesi için gereken ve profilden yapılmış olan şablon yapılır (Şekil 1.5). Bu şablon 12m'lik filiz demirlerinin sağa sola yatmaması veya devrilmemesi için yapılır. Kolon filizleri alt hasırın 2. katına ve oluşturulan profil şablona tam dengede duracak şekilde bağlanır.



Şekil 1.5. Sengan Köprüsü kolon filizleri

Kolonun oluşturulmasından sonra alt hasırın 3. Katı ve 4. Katının montajı yapılır. 6m yüksekliğinde olan temelde C30 sınıfı beton kullanılır.



Şekil 1.6. Temel betonu dökümü

Yüksek hidrotasyon ısısı oluşumundan dolayı temel 1,5m yüksekliğinde 4 kademe dökülür (Şekil 1.6). Her kademedan sonra aderansın sağlanması için pürüzlendirme yapılır. 3.kademe betonu döküldükten sonra 2 katlı olan demirin üst hasırı bağlanır ve son kademe dökülerek temel betonu tamamlanmış olur (Şekil 1.7).



Şekil 1.7. Temel betonu

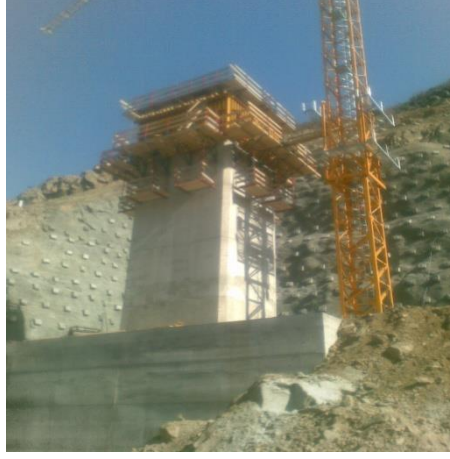
1.4.2. Köprü Kolonlarının Geometrik Özellikleri ve Yapım Aşamaları

İncelemiş olduğumuz Dengeli konsol yöntemi ile yapılan 5 köprünün de kolonları içi boş dikdörtgen kutu kesittir. Et kalınlıkları 4 tanesinde 120cm olup, Ortaköy viyadüğünde 80cm'dir. Kolon genişlik ve uzunlukları 6-9m arasında değişmektedir. Kolon yükseklikleri ise 75-110m arasındadır. Kolonların inşası temellerin bitirilmesinin ardından kalıp montajı ile başlar (Şekil 1.8).



Şekil 1.8. Kolon kalıbı

Kolonların inşasında 4,5m yüksekliğindeki tırmanır sistemli kalıbın kullanılması uygun görülmüştür. Kolon betonu 4,5m'lik anolar halinde dökülecek olup kolon kalıbı dökülmüş olan bir önceki anoya konik ankrajlar yardımıyla sabitlenerek tırmandırılacaktır (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Berta Köprüsü P2 kolonu

Kolon kalıbı dış kalıp ve iç kalıp olmak üzere iki ana parçadan oluşmaktadır. İlk önce iç kalıp kaldırılır. İç kalıp 4 parçadan oluşur ve içinde içboş kutu kesitli kolonun boşluğunu dolduran bir platform vardır. Bu platform iç kalıbı karşıdan karşıya atılmış gergilerin yardımıyla taşımakta ve aynı zamanda herhangi bir düşme anında çalışanların kolon boşluğuna düşmelerini engellemeleri açısından güvenlik sağlamaktadır (Şekil 1.10).



Şekil 1.10. İç kalıp

İç kalıbın montajının bitirilmesinden sonra 4 parçadan oluşan dış kalıp kaldırılır (Şekil 1.11). Dış kalıplar bir önceki anoda bırakılan konik ankrajlar yardımıyla kolon betonuna sabitlenir.



Şekil 1.11. Tırmanır sistem kolon kalıbı, dış kalıbın kaldırılması

Kalıp kaldırma işlemi bittikten sonra kalıbın köşe kordinatlarına ve istikametine bakılır ve kolon demiri montajı için demircilere teslim edilir.

Genel olarak bakıldığında, köprü kolonları yapımında, önce demir montajı, sonra kalıp montajı yapıldığı görülür. Fakat incelenen 5 köprüde kolon et kalınlıklarının yeterli genişlikte olması demir montajının kalıp montajından sonra yapılabilmesine imkan vermiştir. Kolonların yüksek olmasından dolayı uzun süren demir montajının kalıp montajından sonra yapılması uygun görülmüştür. Bu sayede demir montajını yapan işçiler tamamen kalıp tarafından kapatılmış ve dışarıyı görmeyen güvenli bir ortamda çalışmışlardır. Kolon demir montajı kolon etriyelerinin montajı ile başlar. Etriyeler kalıp yüksekliğine paralel olarak 4,5metreye kadar monte edilir. Etriyelerin montajı bittikten sonra filiz dikme işlemine geçilir. Kolon filizlerinin de bitirilmesiyle beraber kolon beton dökümüne hazır hale gelmiştir.4,5 m'lik 1 anonun bitirilmesi 4 gün sürmektedir. Böylelikle kolonlardaki günlük ilerleme hızı 1,125m/gün' dür.

1.4.3. Üstyapı Geometrik Özellikleri ve Yapım Aşamaları

İncelenen beş adet dengeli konsol köprünün orta açıklıkları 132-165m, kenar açıklıklar ise 71,5-95m arasında değişmektedir.

$$\text{Berta Viyadüğü } L= 87,5 + 165 + 87,5 = 340 \text{ m}$$

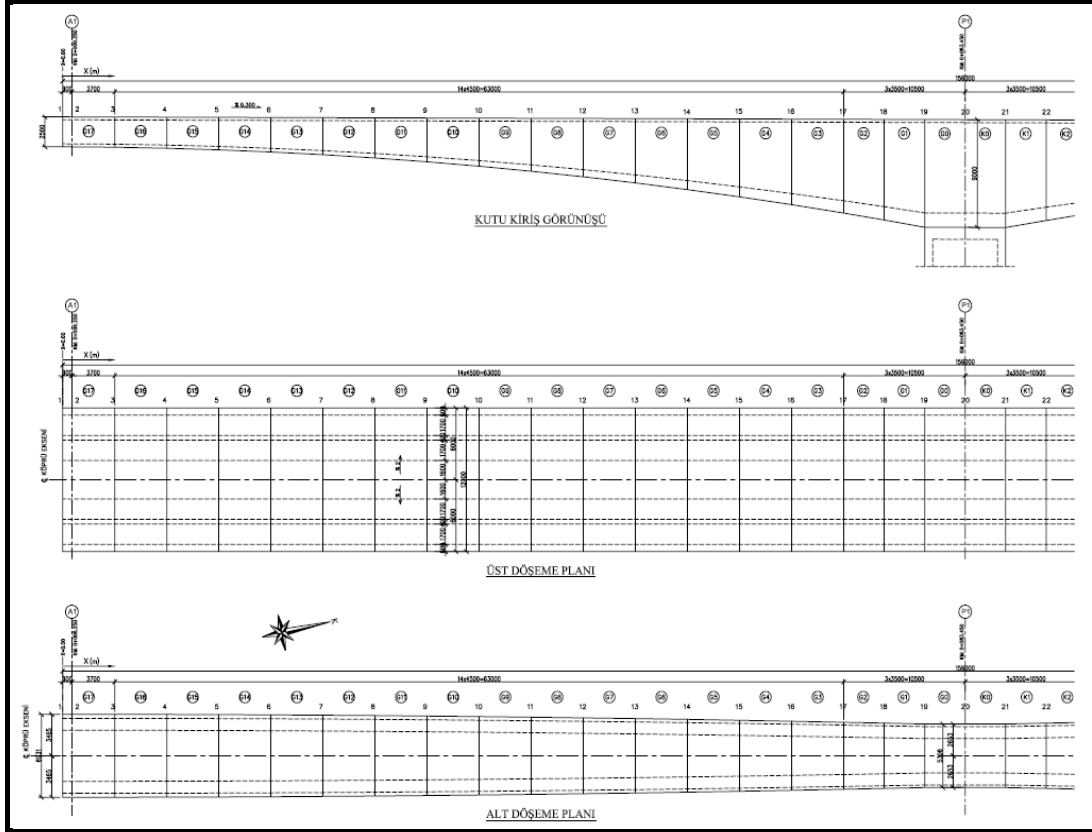
$$\text{Akarsın Viyadüğü } L= 71,5 + 132,0 + 71,5 = 275 \text{ m}$$

Sengan Viyadüğü $L = 95,0 + 95,0 = 190$ m

Budan Viyadüğü $L = 92,5 + 165,0 + 92,5 = 350$ m

Ortaköy Viyadüğü $L = 77,2 + 77,2 = 154,4$ m

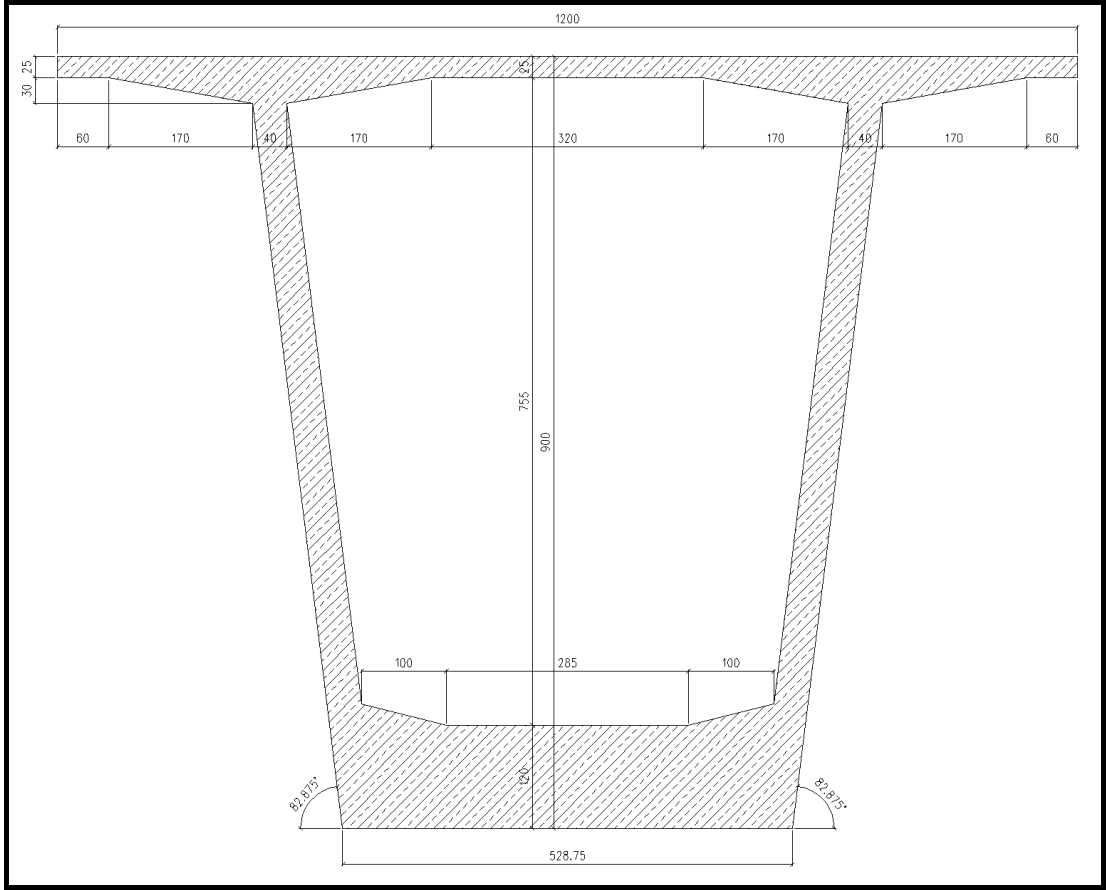
Dengeli konsol yapımı, incelemiş olduğumuz beş köprüdede uzunluğu 3-5m arasında değişen değişken boyutlu kutu kesit segmentler halinde ilerlemiştir (Şekil 1.12).



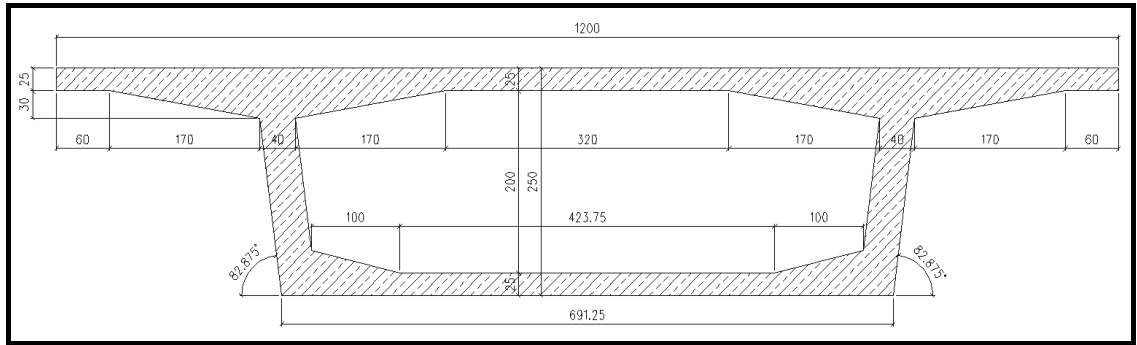
Şekil 1.12. Değişken kutu kesitli köprü tabliyesi genel görünüm, (DSİ, 2007)

İncelemiş olduğumuz 5 adet köprünün 4 tanesinde üst tabliye genişliği 15m iken Oratköy Köprüsünde ise 12m'dir. Üst tabliye kalınlıkları 25cm' dir. Alt tabliye genişliği ise bütün köprülerde farklıdır ve segmentler ilerledikçe alt tabliye genişler. Oratköy Köprüsünde alt tabliye genişliği 1. segmentte 5,28m iken aynı köprünün son segmentinde 6,91m' dir (Şekil 1.13).

Kutu kesitin iç yüksekliği segmentler ilerledikçe azalır. Oratköy köprüsünde 1. segmentte 7,75 m iken, son segmentte 2m' dir (Şekil 1.14).



Şekil 1.13. Ortaköy Köprüsü birinci segment tabliye kesiti, (DSİ, 2007)



Şekil 1.14. Ortaköy Köprüsü son segment tabliye kesiti, (DSİ, 2007)

1.4.3.1. Başlık Segmenti

Kolonların yapımı tamamlandıktan sonra başlık segmentinin yapımına daha önce yerde hazırlanmış başlık platformlarının kaldırılıp kolonlara ankre edilmesiyle başlanır (Şekil 1.15).



Şekil 1.15. Başlık platformlarının kaldırılması



Şekil 1.16. Başlık platformu

Başlık platformunun yerine konulmasından sonra köprü eksenine dik olan tarafların dış kalıp montajları yapılır (Şekil 1.16). Başlık anosu alt tabliye, gövde ve üst tabliye betonları olmak üzere 3 aşamada beton dökülerek oluşturulmaktadır (Şekil 1.17 ve 1.18). Alt tabliye demir montajı yapılır ve alt tabliye betonu dökülür. Başlık alt tabliye betonundan sonra gövde için iç kalıp ve donatı montajları tamamlanıp betonları dökülür.



Şekil 1.17. Başlık segmenti ikinci kademesi demir ve kalıp montajı



Şekil 1.18. Başlık segmenti ikinci kademe gövde betonu

Gövde betonu döküldükten sonra üst tabliyenin yapımı için iskele kurulur.



Şekil 1.19. Başlık segmenti üst tabliye iskele kurulumu ve kalıp montajı

İskelenin üzerinde üst tabliye demir montajı tamamlanır. Demir montajı tamamlandıktan sonra segmentlerin ileriye yürütülmesinden önce yapılacak olan ardirme işleminde kullanılacak halatların içerisinde geçecek oldukları kılıf boruları yerlerine konulur (Şekil 1.20). Bu boruların sayıları her köprüde kullanılacak halat sayısına göre değişir. Berta köprüsünde üst tabliyede 28 sağda, 28 solda olmak üzere 56 tanedir.



Şekil 1.20. Üst tabliye germe halatlarının geçeceği kılıf borularının yerleşimi

Üst tabliyenin son aşamasında kurulacak olan arabalı kalıbı tutacak montaj çubukları için boşluklar (pvc boru) bırakılır ve beton sınıfı C40 olarak betonu dökülür (Şekil 1.21).



Şekil 1.21. Üst tabliye betonu

1.4.3.2. Arabalı Kalıbın Kurulumu ve Segmentlerin İlerlemesi

Arabalı kalıp, dengeli konsol yapımının en önemli ve vazgeçilmez olan bir parçasıdır. Başlık (1.segment) yapımının ardından arabalı kalıp sistemi (90 ton) montajı yapılır (Şekil 1.22). Her segmentte arabalı kalıp daha önce bırakılan montaj deliklerinden geçirilen montaj çubukları ile tabliyeye sabitlenir.



Şekil 1.22. Arabalı kalıp

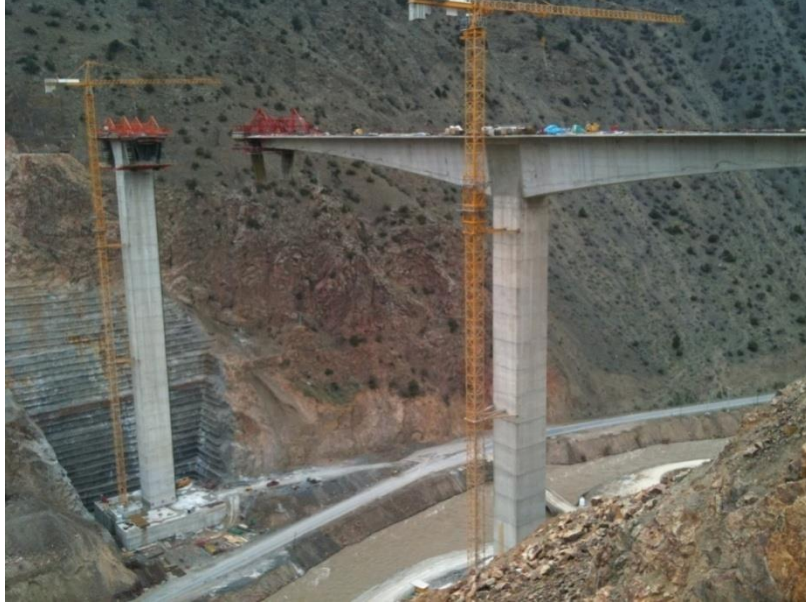
Arabalı kalıp, dökülecek olan bir sonraki segmentin ağırlığını, üzerinde bulunan konsol ve askı sistemleri yardımıyla dökülmüş olan segmente aktarır. Arabalı kalıp

kurulduktan sonra yapılacak olan segmentin demir montajı yapılır. Ardından ardgerme halatlarının geveceği kılıf boruları yerleştirilir (şekil 1.23).



şekil 1.23. Ardgerme halatlarının geveceği kılıf boruları

Segmentin betonu dökölür. Beton yeterli mukavemeti aldıktan sonra ardgerme halatları sürölür ve gerilir. Germe işleminin ardından kalıp arabası bir sonraki anoya yürütölür ve aynı işlemler tekrar edilir. Segment betonları kolonun sağında ve solunda eş zamanlı olarak dökölür. Böylelikle dengeli konsol 3-5m arasında değişen ano boyları boyunca ilerler (şekil 1.24 - 1.26).



Şekil 1.24. Berta Köprüsü



Şekil 1.25. Arabalı kalıbın ilerlemesi



Şekil 1.26. Berta Köprüsü

1.4.3.3. Ardgerme Sistemi

Köprü ve viyadüklerde uygulanan ard germeli beton tekniği, betonun çekmeye karşı zayıflığının üstesinden gelmek için kullanılan bir uygulama yöntemidir. Şantiyede beton dökülmeden önce kesite istenilen geometride yerleştirilen kılıfların içerisinden geçirilen yüksek dayanımlı çelik halatlar, beton dökülüp mukavemetini kazandıktan sonra gerilerek ard germe (sonradan germe) uygulaması gerçekleştirilir. Bu sayede sabit bir basınç kuvveti uygulanan betonda çekme gerilmeleri sınırlandırılarak dış yüklere karşı önceden önlem alınmış olur. Genel olarak ölü yük, hareketli yük, hareketli yükün çarpma ve dinamik etkisi, rüzgâr yükleri, deprem gerilmeleri, merkezkaç kuvveti, termal kuvvetler, kaldırma kuvveti, büzülme gerilmeleri, yapısal gerilmeler vb. hesaplarda göz önüne alınan gerilmeler ile en büyük moment zorlamaları izostatik sistemde oluşmaktadır. Konsol iki sistemin kenar ayak ve birbirine kilitlendikten sonra hiperstatik sisteme dönüşmesi ve moment değişimlerinin olması nedeniyle üst ve alt tabliyede kullanılan ard germe halatlarının tasarımı yapılmıştır (Kozluca 2011). Aşağıda germe işleminde kullanılan bazı ekipmanlar gösterilmiştir (Şekil 1.27-1.30).



Şekil 1.27. Halat sürme makinası



Şekil 1.28. Germe krikosu



Şekil 1.29. Germe krikosunun hidrolik pompası



Şekil 1.30. Kama plakası ve kamalar

1.5. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi

Çevresel Titreşim Yöntemi olarak da adlandırılan Operasyonel Modal Analiz Yönteminde bilinmeyen kuvvetler/etkiler ya da yapı titreştiricileri olarak rüzgâr yükleri, yaya ve taşıt trafiği, deprem, dalga hareketleri vb. çevresel etkiler kullanılmaktadır. Bu yöntem, yapılarda meydana gelen titreşimleri dikkate alarak, yapıların dinamik karakteristikleri olarak tanımlanan doğal frekanslarının, mod şekillerinin ve modal sönüm oranlarının deneysel olarak belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Operasyonel Modal Analiz Yöntemin’ de bazı kabuller yapılmaktadır. Bunlar;

- Malzeme özelliklerinin değişmediği,
- Sınır şartlarının değişmediği,
- Yapıda oluşan titreşimlerin küçük olduğu,
- Yapının bir bütün ve sürekli olduğu,

şeklindedir (Turan, 2012).

Genel olarak Operasyonel Modal Analiz Yönteminin uygulama alanları,

- Yapı sağlığı izlenmesi,
- Analitik modellerin iyileştirilmesi,
- Yapılarda hasar tespiti, yapıların güvenliklerinin belirlenmesi,
- Yapı dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi,
- Yapı kalan ömrünün belirlenmesi

şeklinde sıralanabilir (Turan, 2012).

1.5.1. Operasyonel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Ölçüm Sistemi

Operasyonel modal analiz ölçümlerinde kullanılan ölçüm düzeneği başlıca iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlar,

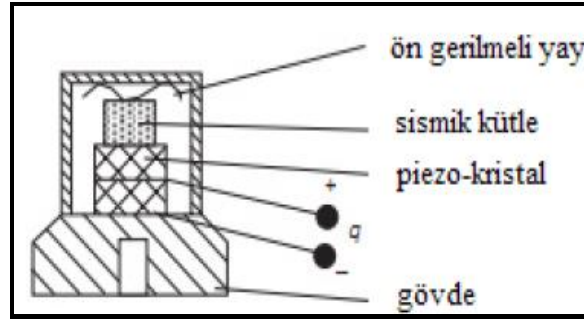
- İvmeölçerler,
- Veri Toplama Sistemi ve Sinyal İşleme

aşamalarıdır.

1.5.1.1. İvmeölçerler

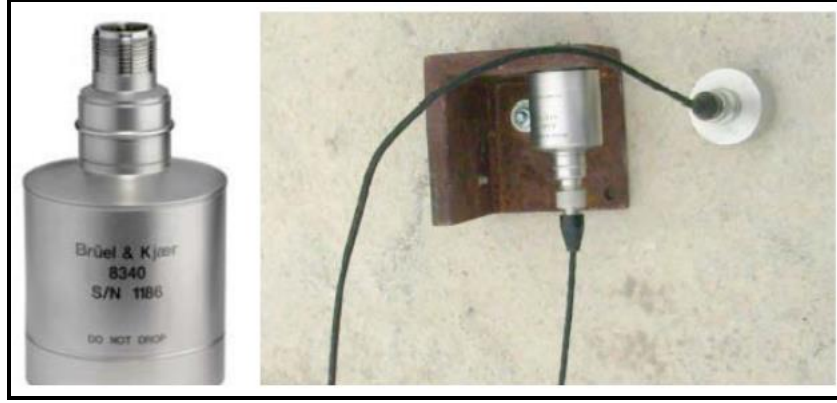
Titreşim algılayıcı olarak da bilinen ivmeölçerler, geniş frekans ve dinamik aralığa sahip olmalarından dolayı en çok tercih edilen dönüştürücü tipleridir. Genellikle yapısal titreşim ölçümlerinde piezoelektrik ivmeölçerler kullanılmaktadır.

Şekil 1.31’de görüldüğü gibi bu tip ivmeölçerler, yay-kütle-sönümleyici sisteminden oluşmaktadır (Turan, 2012).



Şekil 1.31. Piezoelektrik tipi ivmeölçerlerin iç mekanizması

Bu çalışma kapsamında, B&K 8340 tipi tek eksenli kablolu ivmeölçerler kullanılmıştır. Bu ivmeölçerlerin hassasiyeti 10 V/g, frekans aralığı 0.1–1500 Hz, maksimum ivmesi $\pm 5g$, boyutları 50.3 x 50.3 x 91.9 mm ve toplam kütlesi 775 gram’dır (Şekil 1.32).



Şekil 1.32. B&K 8340 tipi tek eksenli kablolu ivmeölçer

1.5.1.2. Veri Toplama Sistemi ve Sinyal İşleme

Veri toplama sistemi, ivmeölçerlerden gelen sinyalleri toplamak ve ilgili bilgisayar programına aktarmak için kullanılan veri toplama ünitesinden ve gelen sinyallerin işlenmesinde kullanılacak olan bilgisayardan oluşmaktadır (Turan, 2012). Yapılan deneysel ölçümler sırasında B&K 3560-C tipindeki 17 kanallı veri toplama ünitesi kullanılmıştır (Şekil 1.33).



Şekil 1.33. B&K 3560-C tipindeki 17 kanallı veri toplama ünitesi

Veri toplama sistemlerinden elde edilen titreşim verileri sinyal işleme yazılımları ile analiz edilmektedir. Bu çalışmada, Brüel&Kjær Firması tarafından geliştirilen PULSE (2006) ve OMA (2006) yazılımları kullanılmıştır.

1.5.2. Operasyonel Modal Analiz Formülasyonu

Operasyonel Modal Analiz Yönteminde frekans ve zaman ortamında yöntemler kullanılmaktadır. Frekans ortamındaki yöntemler; Piklerin Seçilmesi (PS), Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (FTAA), Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA), Polimax yöntemleridir. Zaman ortamındaki yöntemler ise; Rastgele Azaltım, Tekrarlanan, Maksimum Olasılık ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemleridir (Turan, 2012).

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, köprülerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde, literatürde sıklıkla tercih edilen yöntemlerden, Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) Yöntemi kullanılmıştır. Bu yönteme ait formülasyonlar aşağıda verilmektedir.

1.5.2.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) Yöntemi

Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) yöntemi frekans ortamına dayalı bir yöntem olup, kullanımı oldukça kolay olan Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (FTAA) yönteminin genişletilmiş halidir. Bu yöntemde, modlar davranışın spektral yoğunluk fonksiyonundan hesaplanan tekil değer ayırıştırma grafiklerindeki piklerin seçilmesiyle elde edilmektedir (Jacobsen vd., 2006). GFTAA Yönteminde ölçülmeyen etki kuvveti ve ölçülen tepki davranış fonksiyonu arasındaki ilişki,

$$G_{yy}(j\omega) = H(j\omega)^* G_{xx}(j\omega)H(j\omega)^T \quad (1.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Altunışık, 2010; Türker, 2010). Burada $G_{xx}(j\omega)$ etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonunu, $G_{yy}(j\omega)$ tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonunu ve $H(j\omega)$ frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. (1.1) denklemindeki * ve T sırasıyla ifadelerin kompleks eşleniğini ve transpozisini göstermektedir. Matematiksel düzenlemelerden sonra tepki sinyaline ait Güç Spektral Yoğunluk Fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda,

$$H(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (1.2)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada, n mod sayısını, λ_k kutup fonksiyonunu ve R_k artık değer fonksiyonunu göstermektedir. Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra (1.2) denklemi,

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[\frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] G_{xx}(j\omega) \left[\frac{R_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{R_s^*}{j\omega - \lambda_s^*} \right]^{\bar{H}} \quad (1.3)$$

şeklinde elde edilmektedir (Brincker vd., 2000). Burada s tekil değerleri, \bar{H} kompleks eşleniği ve transpozeyi ifade etmektedir. Matematiksel ifadeler sadeleştirildiğinde tepki sinyaline ait Güç Spektral Yoğunluk Fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda,

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{A_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{B_k}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{B_k^*}{-j\omega - \lambda_k^*} \quad (1.4)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada, A_k tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonuna ait k . artık değer matrisini göstermektedir.

Spektral yoğunluk fonksiyonu belirlendikten sonraher bir rezonansa ait tepe noktası ve bu noktaya karşılık gelen frekans değeri (yapının doğal frekansı), f_r belirlenir. Sönüm oranı için tepe noktasına karşılık gelen genlik değeri, $|\alpha|$, belirlenir. Bu tepe noktasından genlik değerinin $1/\sqrt{2}$ 'si kadar aşağıda o rezonansa ait frekans bant genişliği, Δf , belirlenir. Bu noktalar f_a ve f_b olarak frekans davranış fonksiyonu üzerinde işaretlenir ve yarı-güç noktaları olarak adlandırılırlar (Şekil 1,34), (Türker, 2011).

Modal sönüm oranı ξ ,

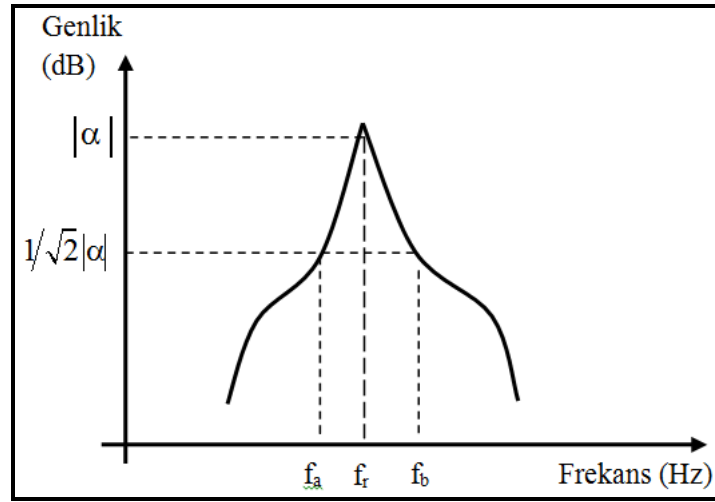
$$n_r = \frac{f_a^2 - f_b^2}{2 f_r^2} = \frac{\Delta f}{f_r} \quad (1.5)$$

ve

$$\xi = 2 * n_r \quad (1.6)$$

ifadesiyle hesaplanır (Türker, 2011).

Bu yöntemde sönüm maksimum genliğe bağlı olarak hesaplandığından, maksimum genlik değeri ne kadar doğru olarak belirlenirse, yapının sönümü de o kadar doğru hesaplanır.



Şekil 1.34. Modal sönüm oranının elde edilmesi

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

2.1. Giriş

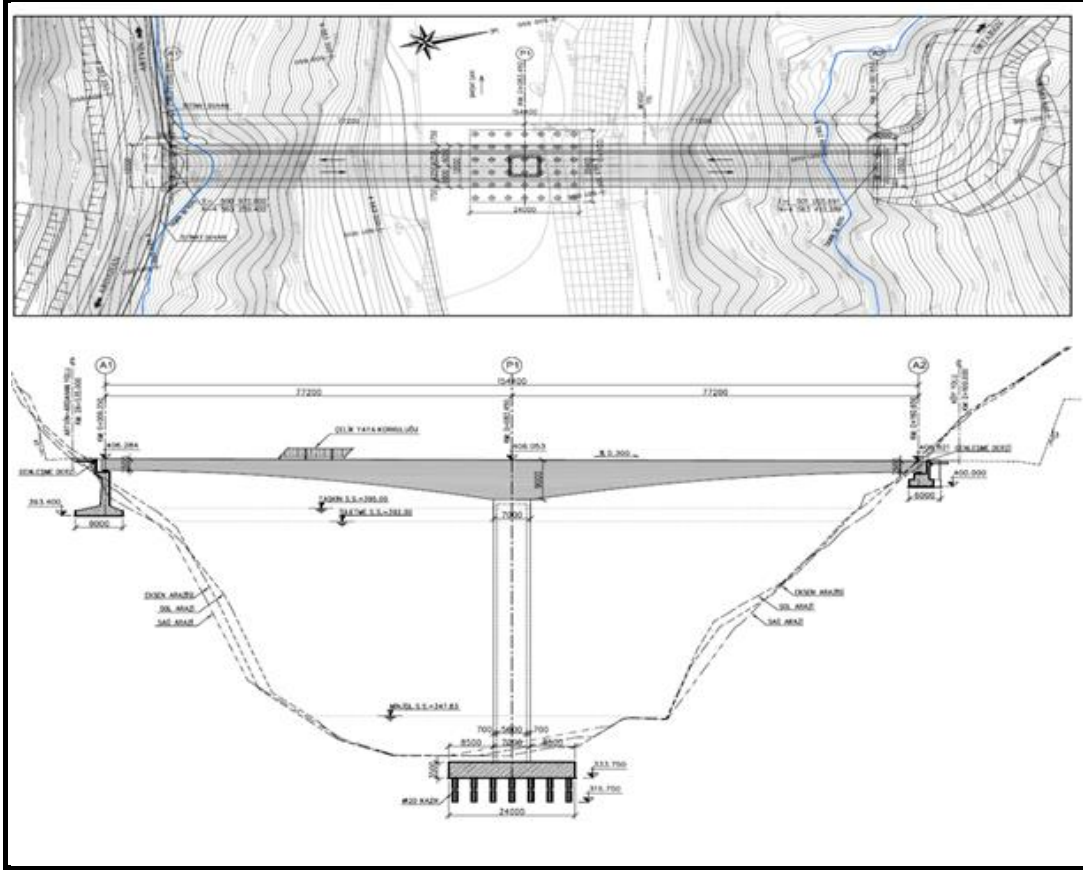
Çalışma kapsamında, Artvin-Erzurum karayolunda dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen beş adet köprünün deneysel ve analitik dinamik karakteristiklerini belirlemek için çevresel titreşim testleri yapılmıştır. Aşağıda her bir köprü yapısal özellikleri tanıtılmakta, sonlu eleman ve deneysel analiz sonuçları verilmektedir. Elde edilen sonuçlar kullanılarak ardgermeli dengeli konsol köprüler için doğal frekans formülü elde edilmektedir.

2.2. Ortaköy Köprüsü

Tek kolunu olan Ortaköy Köprüsünün genel görünüşü ve vaziyet planı Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de verilmektedir.



Şekil 2.1. Ortaköy Köprüsü



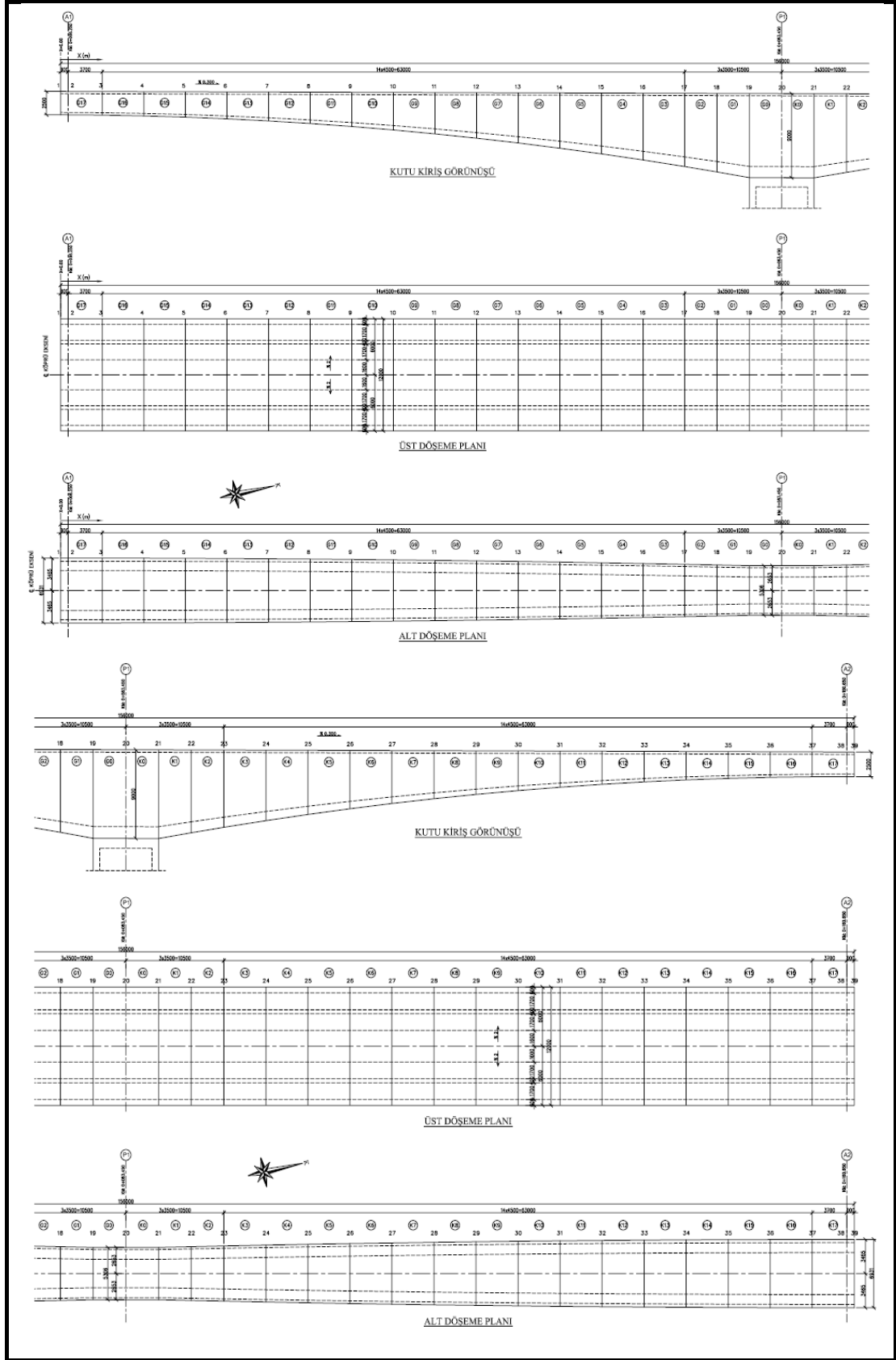
Şekil 2.2. Ortaköy Köprüsü genel vaziyet planı, (DSİ, 2007)

2.2.1. Genel Özellikler

Ortaköy köprüsü 154,4m uzunluğunda 69m yüksekliğinde ve iki açıklıklıdır. Köprünün iki orta açıklığıda 77,2m'dir. Köprü Şavşat çayı üzerinde ve vadinin iki yakasını birbirine bağlamaktadır.

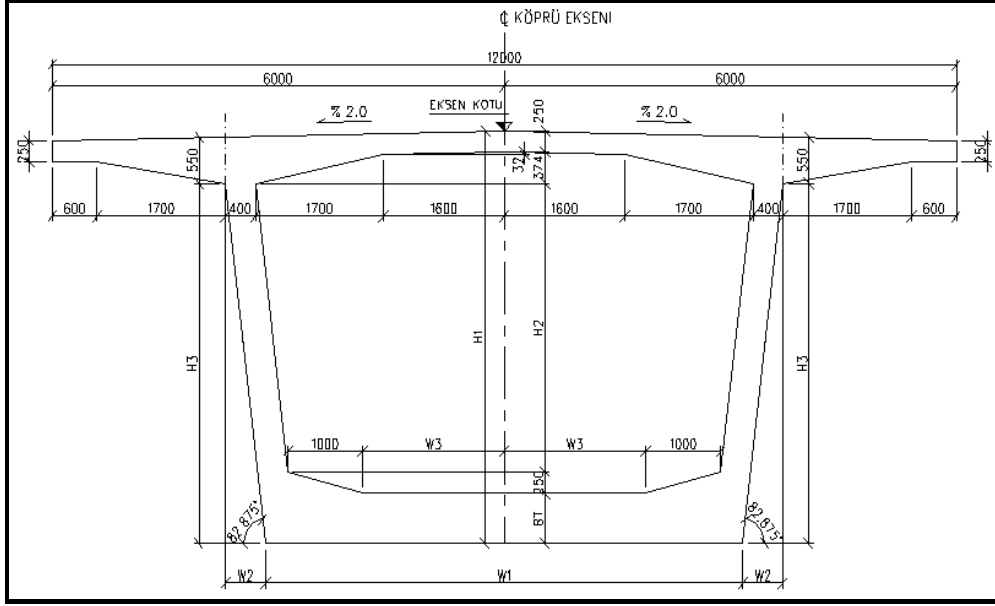
2.2.1.1. Köprü Tabliyesi

Köprü tabliyesi orta ayaklardan kenar ayaklara doğru 17'şer anodan oluşmaktadır. Başlık anosu olarak da adlandırılan 1. anonun uzunluğu 7m'dir. 2. ve 3. anolar 3,5m'dir. Diğer bütün anoların boyu 4,5m'dir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Ortaköy Köprüsü tabliye planı, (DSİ, 2007)

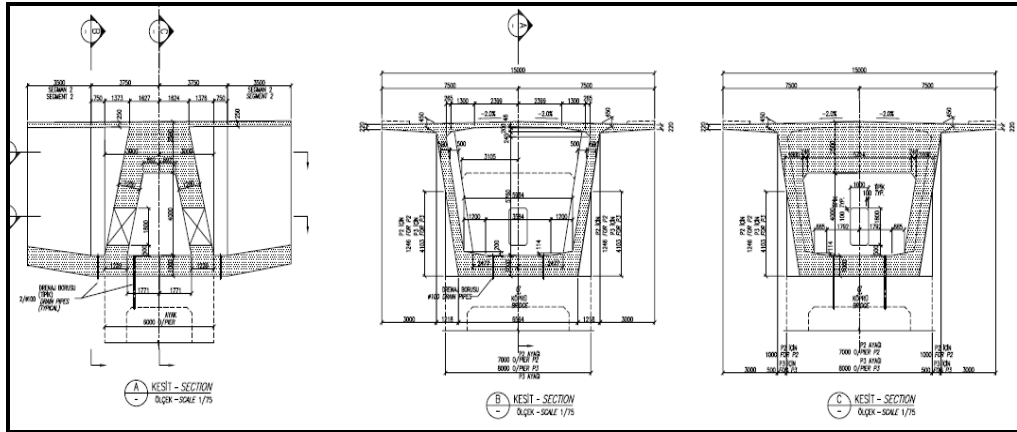
Köprü tabliyesi değişken boyutlu kutu kesittir. Kutu kesitin üst döşeme genişliği köprü tabliyesi boyunca 12m'dir. Kutu kesitin alt döşemesi ortaayakdan kenarayaklara doğru genişlemektedir. Alt döşeme genişliği ortaayak üzerinde 5,28m iken, kenarayaklar üzerinde 6,91m'dir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Değişken kutu kesitli tabliye boyutları, (DSİ, 2007)

2.2.1.1.1. Başlık Anosu

Köprü tabliyesinin ilk anosudur. Şekil 2.5'te geometrik özellikleri verilmektedir.

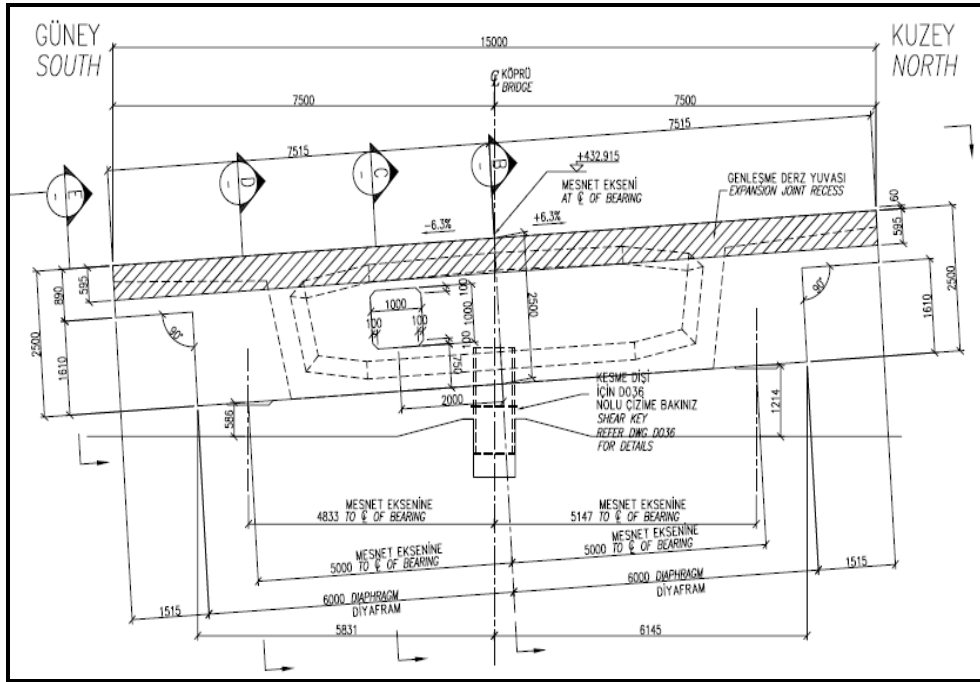


Şekil 2.5. Başlık segmenti kesitleri ve boyutları, (DSİ, 2007)

Dengeli konsol tabliye inşaatı sürecinde karşılıklı anoları birbirine germek için üst döşemede kullanılan bütün ön germe halatları başlık anosunun üstünden geçmektedir. Başlık diyafram olarak tasarlanmıştır.

2.2.1.1.2. Kenarayak Uç Diyaframları

Uç diyaframları, değişken boyutlu kutu kesitli köprü tabliyesinin kenarayak tarafındaki uç kısmına, sistemi kenar ayağa mesnetleyecek şekilde inşa edilir. 1,6m uzunluğunda olup tamamen dolu kesitlidir. Ortasında daha sonra köprü tabliyesinin içine girebilmek için yapılmış menteşeli çelik kapı vardır. Üstünde daha sonra yapılacak genleşme derzi montajına uygun boşluk bırakılmıştır. Altında kenarayakla beraber inşa edilen yuvasına girecek olan kesme dişi bulunur (Şekil 2.6).



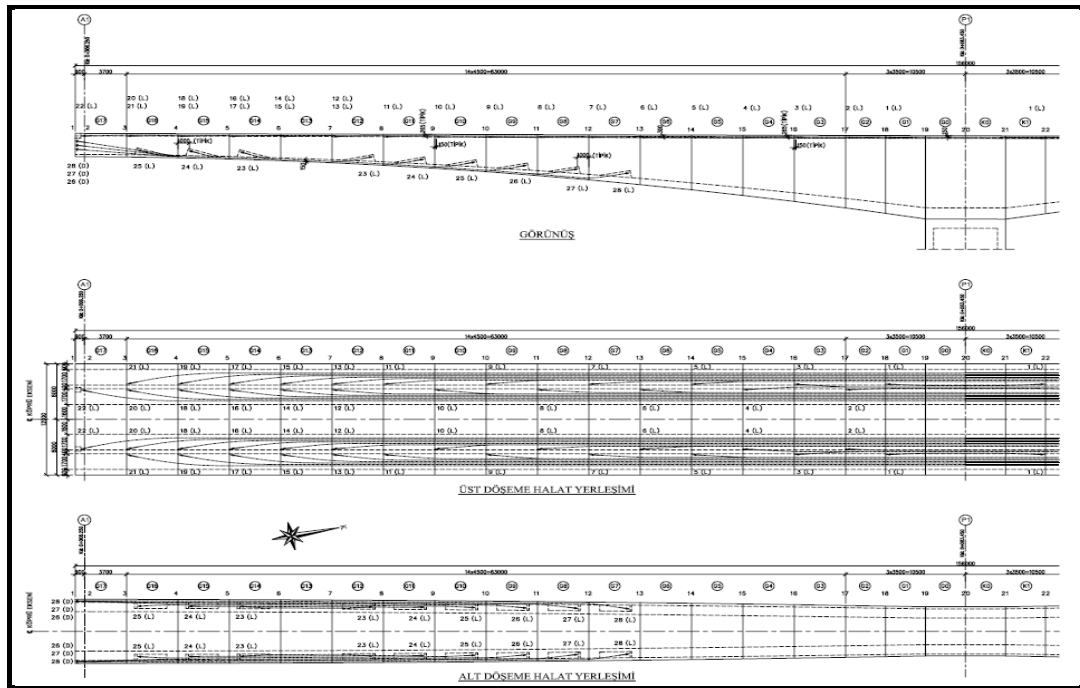
Şekil 2.6. Kenar ayak uç diyaframı genel görünümü, (DSİ, 2007)

2.2.1.1.3. Ardgerme Halatları Yerleşim Planı

Değişken boyutlu kutu kesitli köprü tabliyesinin üst ve alt döşemelerinde ardgerme halatları bulunmaktadır. Bu halatlar beton dökümünden sonra daha önce kalıp içine

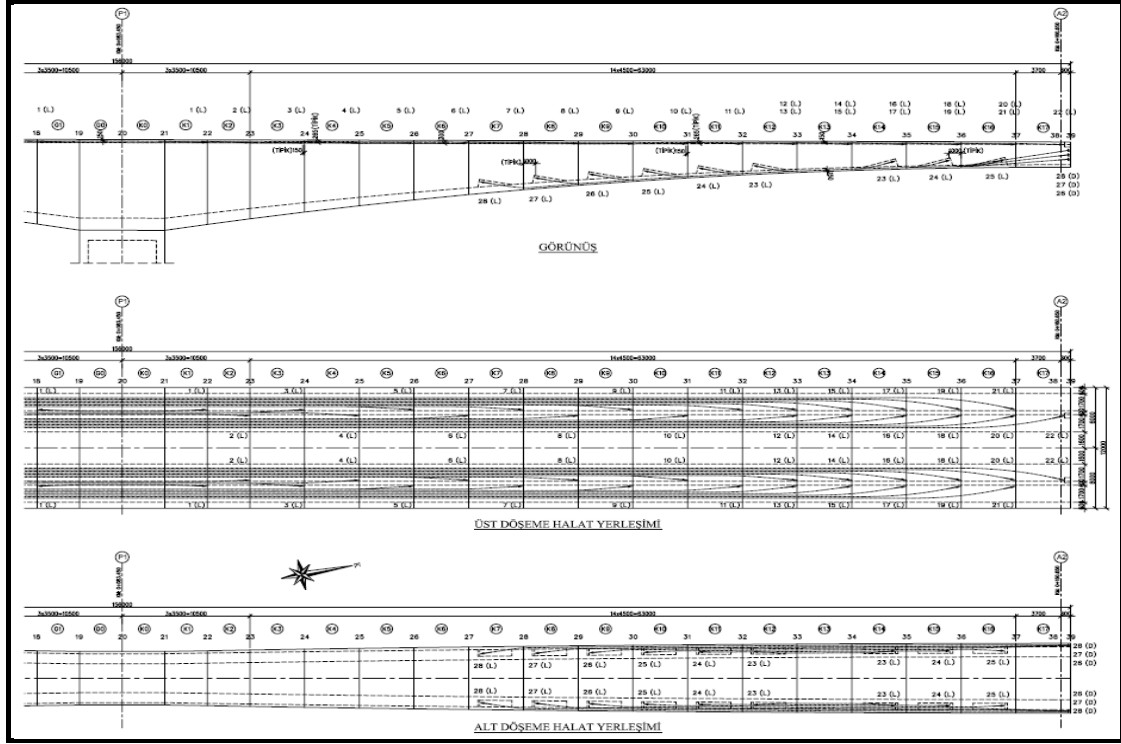
bırakılmış boruların içine yerleştirilir ve gerilir. Üst döşemede bulunan halatlar her anonun karşılıklı olarak betonlanmasından sonra yerleştirilir ve karşılıklı uçlarından gerilir. Bir halat 15,2mm çapında 19 adet çelik kablodan oluşmaktadır. Üst döşemenin ilk 11 anosunda kesitin sağında ve solunda olmak üzere birer halat, 11. ve 16. anolar arasında çift halat. 17. ano da ise tek halat kullanılmıştır.

Alt döşemeden geçen ardgerme halatların montajı segmentlerin inşası bitirilip ortaayak konsolları kenarayakla birleştikten sonra yapılır. Tabliyenin ilk 6 anosunda alt döşemede halat kullanılmamıştır. Alt döşeme halatları 7. anodan itibaren başlar. P2 ayağından kenarayağa doğru tabliyenin alt döşemesinde biri kesitin sağında diğeri solunda olmak üzere 6'şar adet halat bulunmaktadır. Ortaayak konsolunun 7. 8. ve 9. anosunun alt döşeme halatları 14. 15. ve 16. ano ile karşılıklı olarak gerilir. 10. 11. ve 12. anolardan gerilen halatlar ise kenarayak diyaframına sabitlenerek gerilir. Alt döşeme halatları yerleşimi ortaayağın sağında ve solunda tam simetriktir. Döşeme halat yerleşimi Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



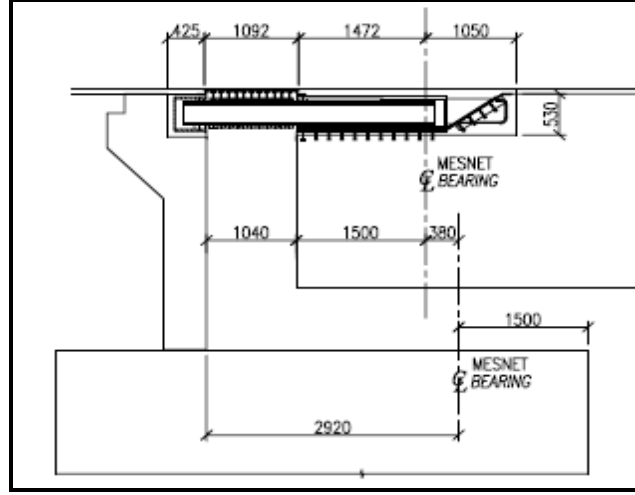
Şekil 2.7. Köprüsü alt döşeme halatları yerleşim planı, (DSİ, 2007)

Şekil 2.7'nin devamı



2.2.1.1.4. Genleşme Derzleri

Köprüde 2 adet genişleme derzi kullanılmıştır. Bu derzler köprü tabliyesinin kenarayaklarla birleştiği yerlerdedir. Bu derzler, 100 yıllık depremlerde oluşacak yer değiştirmelerde yapı elemanlarında ve genişleme derzinin kendisinde hasar oluşmayacak şekilde, 475 yıllık depremlerde oluşan yer değiştirmelerde yapı elemanlarında hasar oluşturmayacak fakat genişleme derzinin kendisinde hasar oluşabilecek şekilde dizayn edilmiştir. Genleşme derzi yerleşimi Şekil 2.8'de verilmektedir.



Şekil 2.8. Genleşme derzi yerleşimi, (DSİ, 2007)

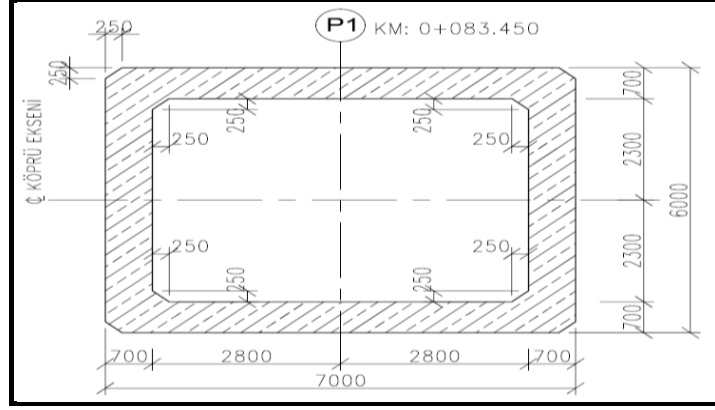
2.2.1.1.5. Mesnetler

Köprüde 4 tane serbest kayar mesnet kullanılmıştır. Bunlar kenarayaklar üzerinde 2 şer adettir. Tabliyede sadece boyuna harekete müsade edilmiştir. 475 yıllık deprem durumunda köprü tabliyesinde oluşacak boyuna yer değiştirme maksimum 760 mm dir. Köprü yapı elemanlarında hasar oluşmayacak şekilde mesnetler dizayn edilmiştir. Enine doğrultudaki hareketin önüne geçmek için kesme dişi kullanılmıştır. Kenarayak uç diyaframının altına yerleştirilen kesme dişi, kenarayak üzerinde 2 mesnet arasına inşa edilmiş olan yuvasına oturtularak enine hareketin önüne geçilmiştir.

2.2.1.2. Köprü Kolonu

2.2.1.2.1. P2 Kolonu

P2 kolonunun yüksekliği 60m'dir, kolon kesiti 7m x 6m ve beton et kalınlığı 70cm'dir. İç ve dış köşelerinde 3cm x 3cm pah vardır. Kolon enkesiti aşağıda Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. P2 ayağı kolon kesiti, (DSİ, 2007)

2.2.1.3. Köprü Temelleri

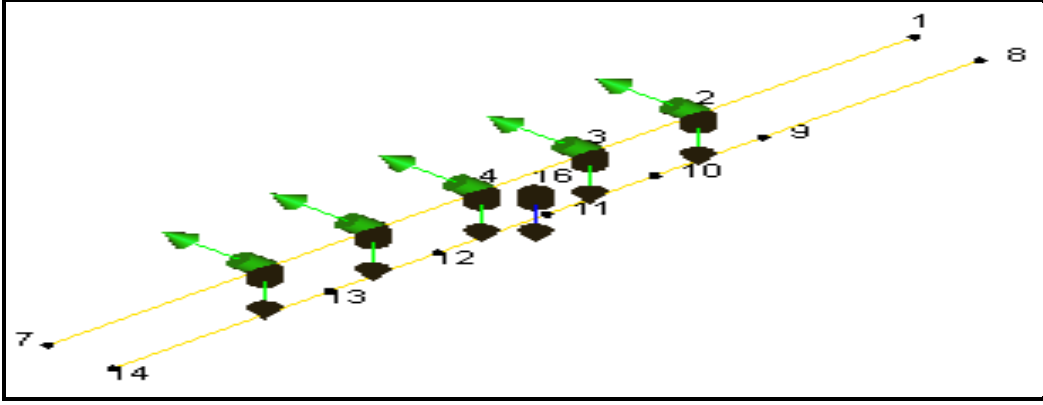
2.2.1.3.1. P2 Temeli

24m x 20m boyutlarında dikdörtgen şeklindedir. Yüksekliği 3,5m dir.

2.2.2. Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Ortaköy Köprüsünün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

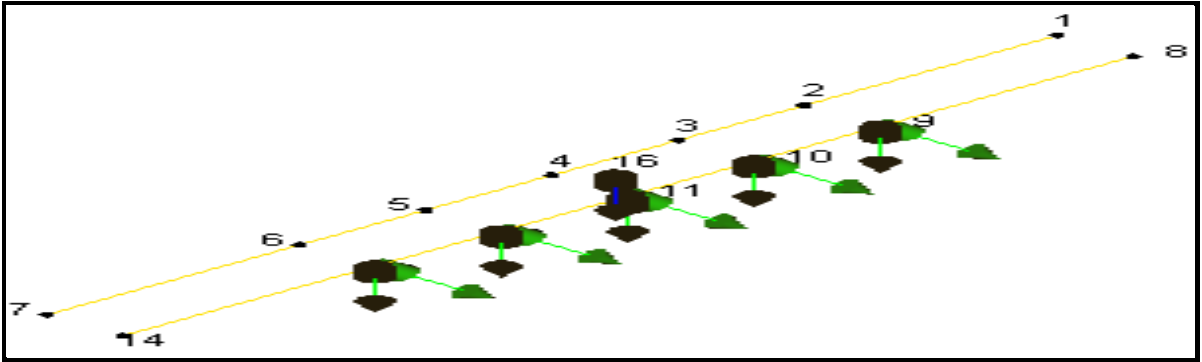
Ortaköy Köprüsü'nün dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemek için köprü'nün her iki yakasından birer ölçüm alınmak suretiyle iki adımda referanslı olarak tek çevresel titreşim testi uygulanmıştır. Ölçümler sırasında doğal titreşim olarak, rüzgâr, yaya ve köprü üzerindeki araç geçişlerinden yararlanılmıştır. Ölçümler 0-12.5 Hz aralığında, analizler ise 0-6,25 Hz frekans aralığında yapılmış ve ölçüm süresi ise her bir adım için 30dk seçilmiştir. Köprü üzerinde ölçüm yapılacak noktalara ivmeölçerler bağlandıktan sonra sinyallerin toplanacağı veri toplama ünitesi ayarları yapılarak (frekans aralığı, model ve ivmeölçer bağlantıları, ölçüm süresi, vb.) ölçümler alınmıştır. Ölçümler için referans noktası olarak köprü açıklığının orta noktası başka bir deyişle ortaayağın üstü seçilmiştir. Ölçümler için ivmeölçerler belirlenen noktalara düşey ve enine olmak üzere iki doğrultuda yerleştirilmiştir.

Birinci Ölçüm Testi: Birinci ölçüm köprü'nün Artvin-Şavşat istikametine göre sağ yanından ve köprü boyunca yapılmıştır. Düşey ve enine doğrultuda olmak üzere toplam 10 adet ivmeölçer daha önceden belirlenen noktalara yerleştirilmiştir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. İvmeölçer yerleşim planı

İkinci Ölçüm Testi: İkinci ölçüm köprü'nün Artvin-Şavşat istikametine göre sol yanından ve köprü boyunca yapılmıştır. Düşey ve enine doğrultuda olmak üzere toplam 10 adet ivmeölçer daha önceden belirlenen noktalara yerleştirilmiştir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. İvmeölçer yerleşim planı

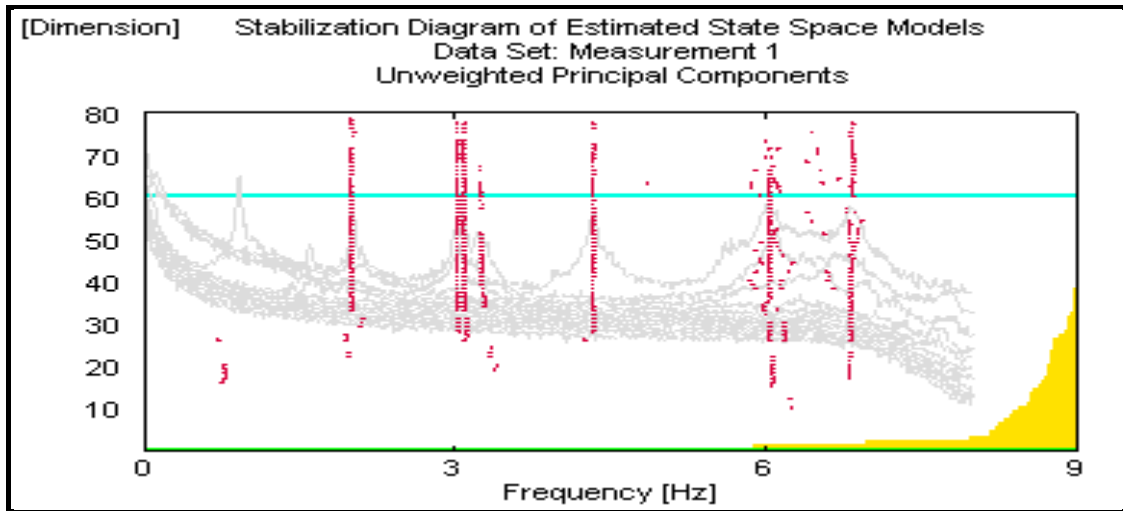


Şekil 2.12. Ortaköy Köprüsü'nde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar

Şekil 2.12'nin devamı

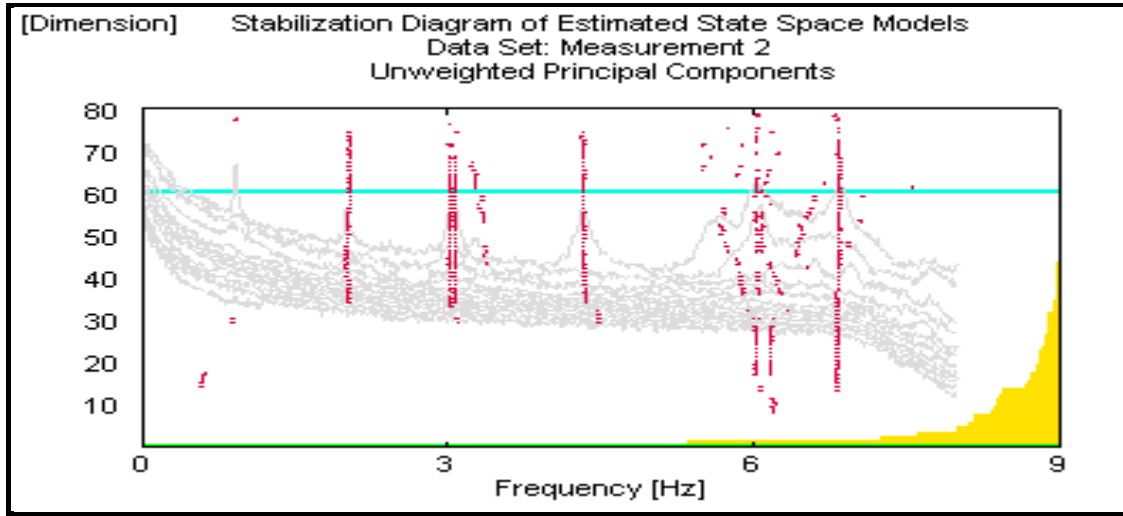


Ortaköy Köprüsü'nde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar Şekil 2.12'de verilmektedir. Ortaköy köprüsü'ne uygulanan iki farklı çevresel titreşim testinden toplanan sinyallerin GFTAA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu her bir ölçüm adımı için elde edilen tekil değerler Şekil 2.13'de verilmiştir.

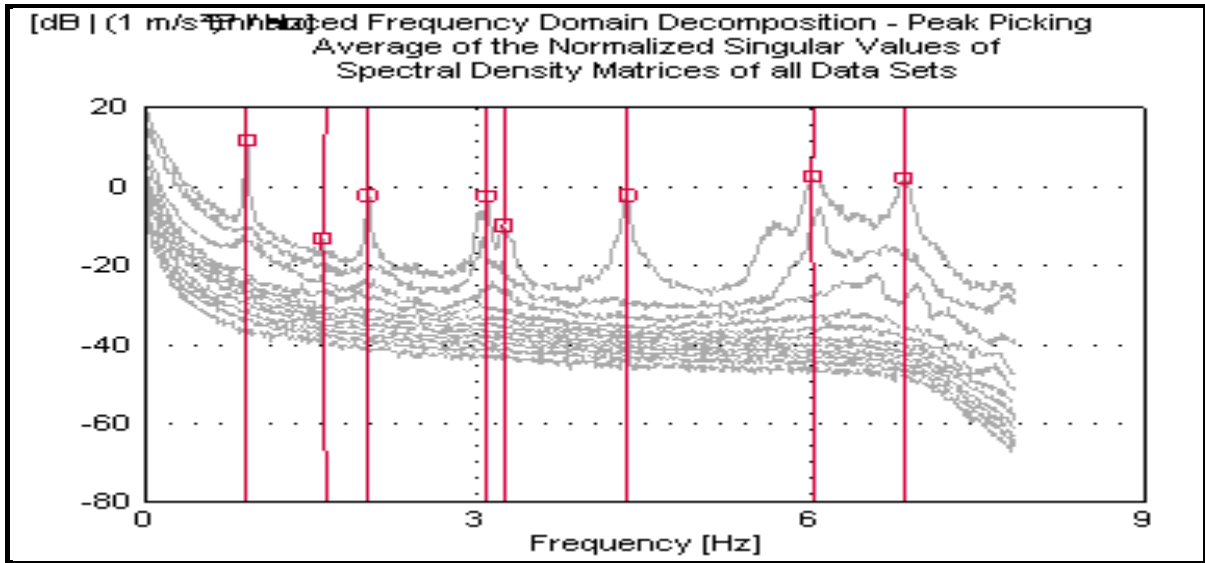


Şekil 2.13. Ortaköy Köprüsü'nde yapılan iki ölçümden elde edilen stabilizasyon diagramları

Şekil 2.13'ün devamı



Her bir ölçüm adımı sonucunda elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ortalamaları Şekil 2.14'te verilmiştir.



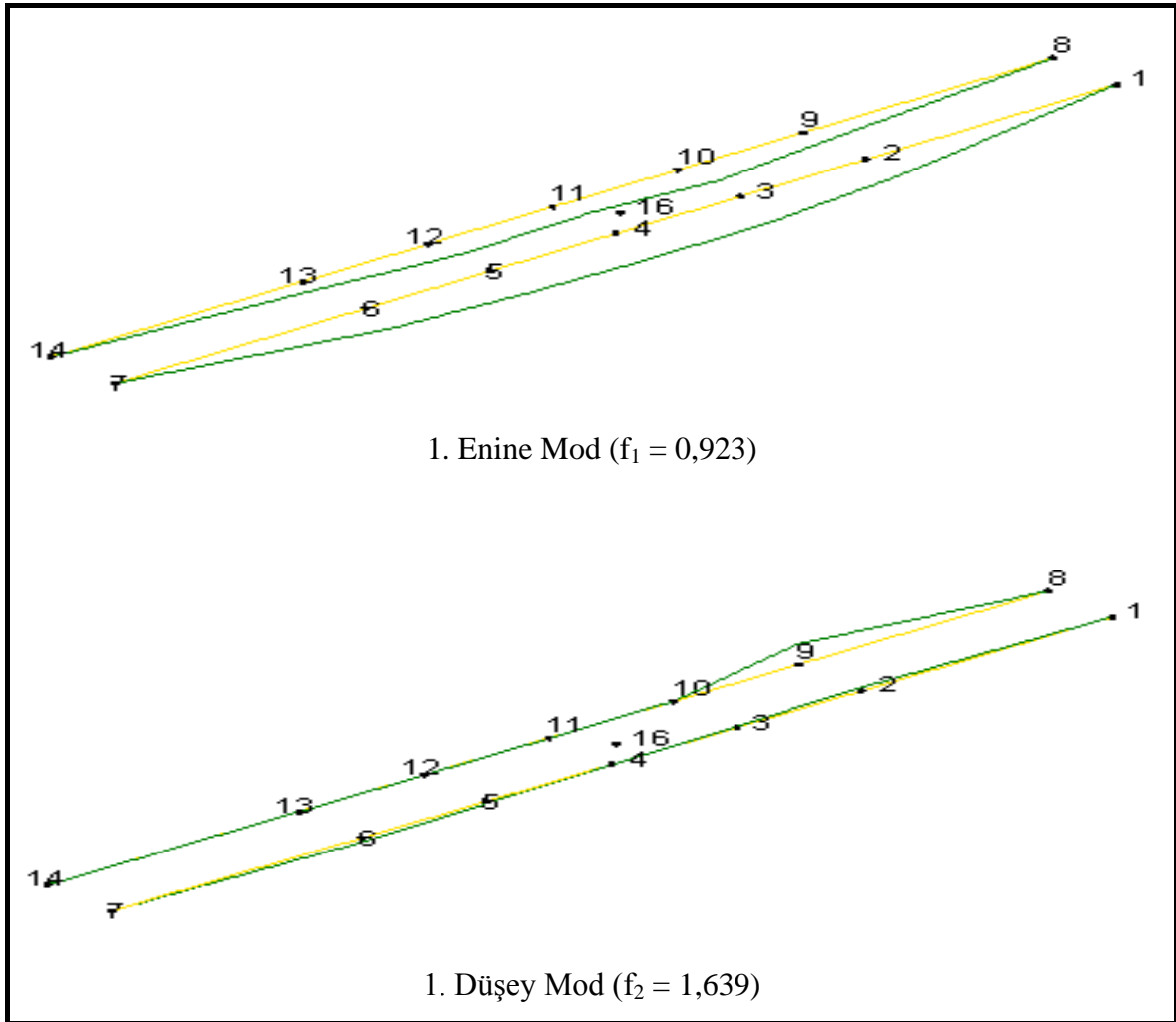
Şekil 2.14. Geliştirilmiş frekans tanım aralığında ayrıştırma yöntemi ile elde edilen tekil değerler

Ortaköy Köprüsüne ait ilk yedi mod için frekans değerleri ve sönüm oranları Tablo 2.1'de verilmiştir. İlk yedi frekansın 0,923-6,028 arasında olduğu, sönüm oranı değerlerinin ise %1,931-0,688 arasında değiştiği görülmektedir.

Tablo 2.1. Ortaköy Köprüsü'nün ilk yedi doğal frekansı ve modal sönüm oranı

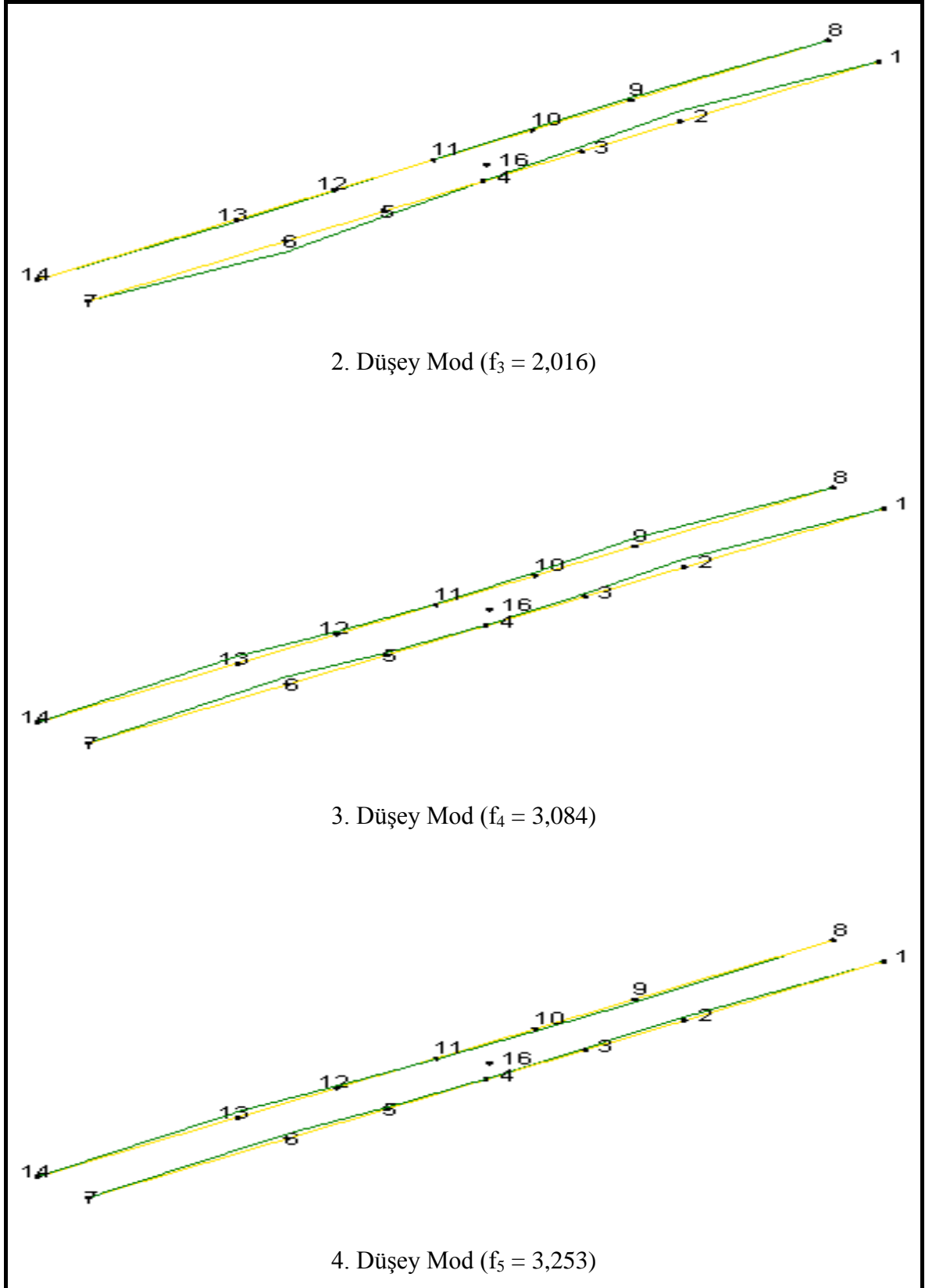
Mod No	Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı
1	0,923	0,808
2	1,639	1,931
3	2,016	0,635
4	3,084	0,484
5	3,253	0,907
6	4,339	0,526
7	6,028	0,688

Ortaköy Köprüsü'ne uygulanan deneysel ölçüm testlerinden GFTAA Yöntemine göre elde edilen mod şekilleri Şekil 2.15'te verilmiştir.

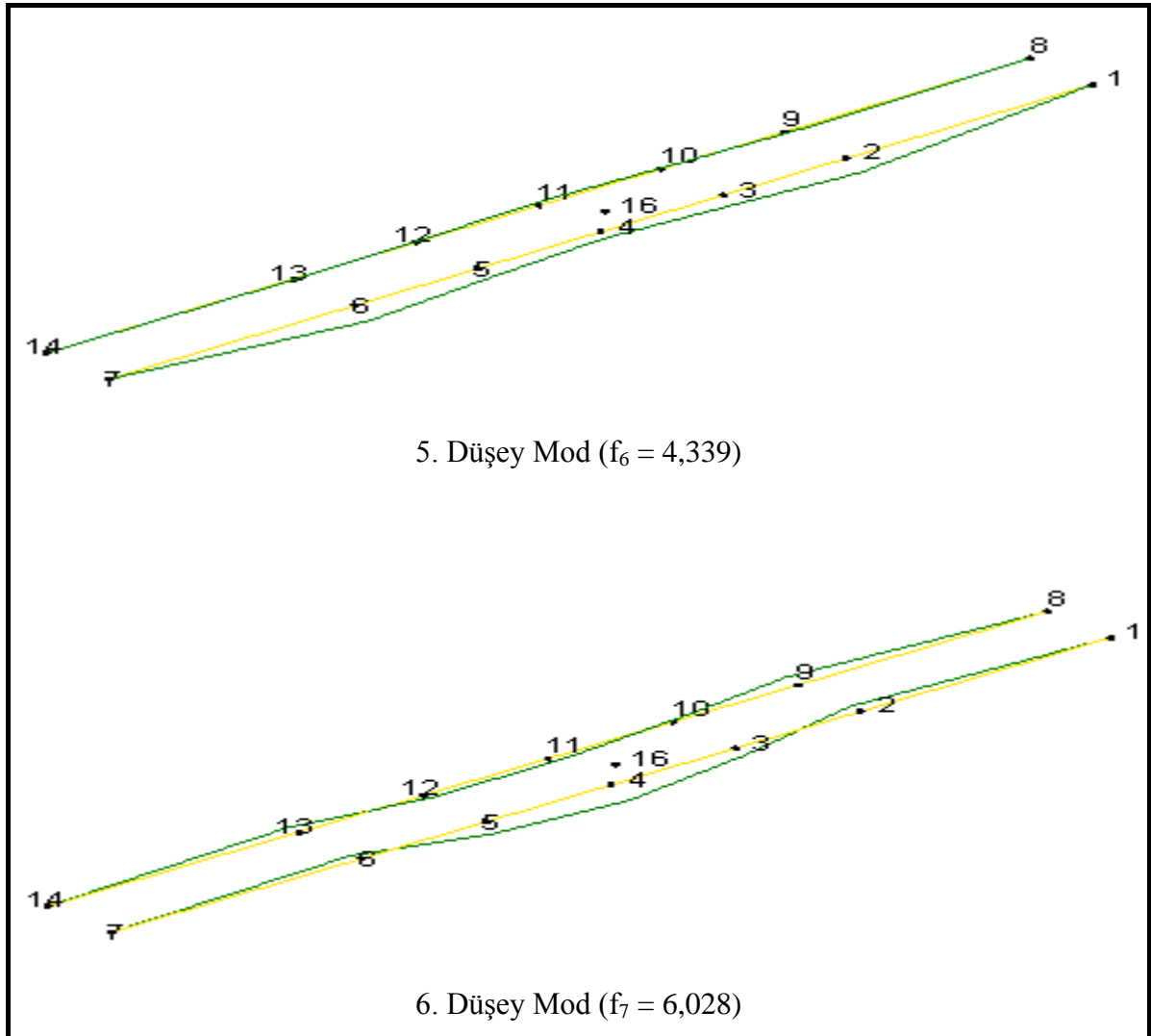


Şekil 2.15. Ortaköy köprüsünün çevresel titreşim yöntemi ile elde edilen mod şekilleri

Şekil 2.15'in devamı



Şekil 2.15'in devamı



2.2.3. Ortaköy Köprüsü'nün Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

2.2.3.1. Köprü'nün Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli

Ortaköy Köprüsü'nün teorik dinamik karakteristiklerini (doğal frekanslar ve mod şekilleri) belirlemek için köprü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 (SAP2000, 2008) programı kullanılarak, aşağıda belirtilen modelleme kriterlerine göre yapılmıştır.

- Köprü SAP2000 programının "Bridge" sekmesi kullanılarak modellenmiştir. Değişken kutu kesitli tabliye boyutları parametrik varyasyonlar tanımlanarak

proje verilerine göre çizilmiştir. Ortaayaklarda ve tabliyede segment boyları 5m olarak tanımlanmıştır.

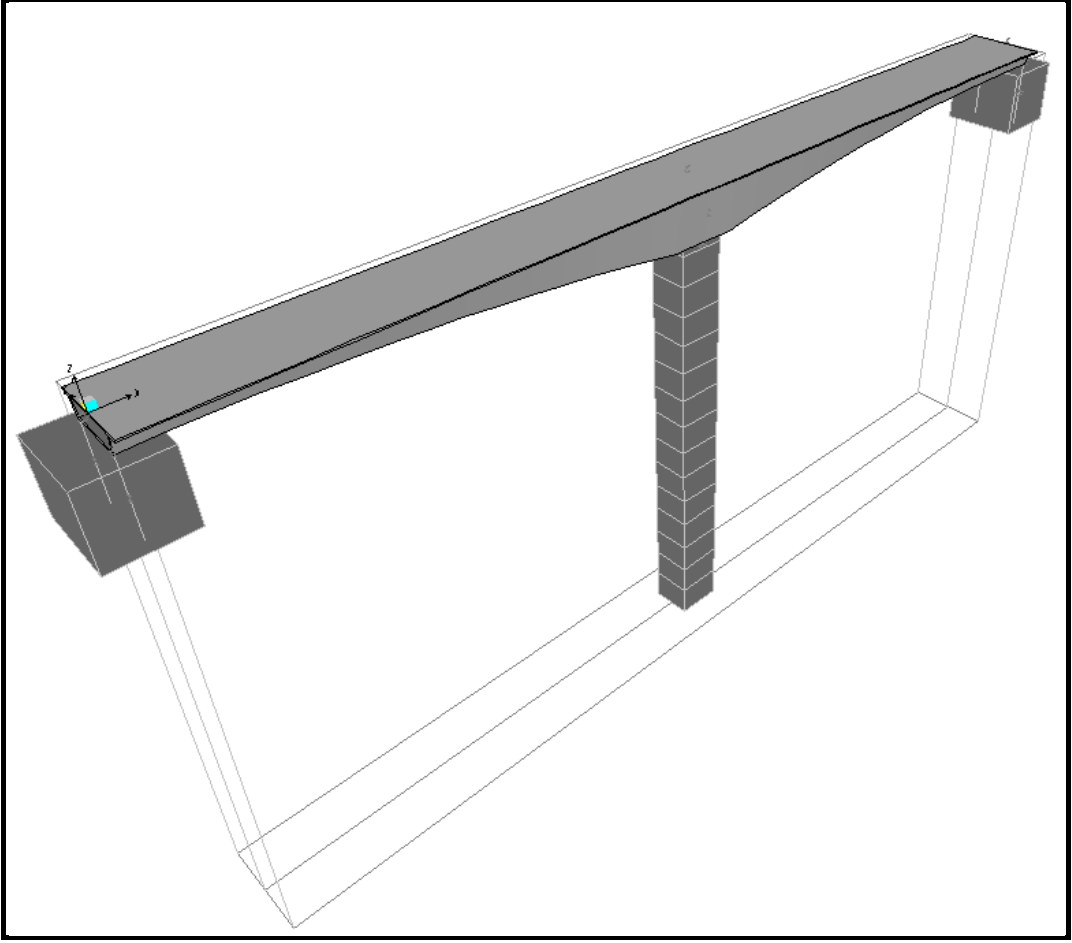
- Ortaayaklarla tabliyenin birleşimleri projede olduğu gibi ankastre olarak tanımlanmış olup, tabliye birleşiminden önceki son 1m leri dolu kesit alınmıştır.
- Kenarayakların ve ortaayakların köprü tabliyesi ile birleşimlerinde 1m kalınlığında diyaframlar tanımlanmıştır.
- Kutu kesitli tabliyenin üstünde kullanılan öngerme halatları ve altında kullanılan ardgerme halatları proje verilerine uygun boy ve sayıda tanımlanmıştır.
- Kenarayak mesnetleri belli rijitliklere sahip yaylarla tanımlanmıştır. Kenarayakların düşey ve enine doğrultuda serbestlikleri tamamen tutulmuştur. Boyuna doğrultudaki hareketler için yay rijitliği 50000 kN/m olarak belirlenmiştir.

Köprünün modellenmesi ve analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Ortaköy Köprüsü’nün sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri

Eleman	Elastisite Modülü N/m ²	Poisson Oranı -	Yoğunluk Kg/m ³	Beton Sınıfı
Tabliye	3,4E10	0,2	2450	C40
Ortaayak kolonları	3,2E10	0,2	2450	C30
Ortaayak temelleri	3,2E10	0,2	2450	C30
Kenarayaklar	3,2E10	0,2	2450	C30
Öngerme çeliği	1,95E11	-	-	-

Ortaköy Köprüsü’nün yukarıda belirtilen modelleme kriterleri ve malzeme özellikleri dikkate alınarak oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 2.16’da verilmiştir.



Şekil 2.16. Ortaköy Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli

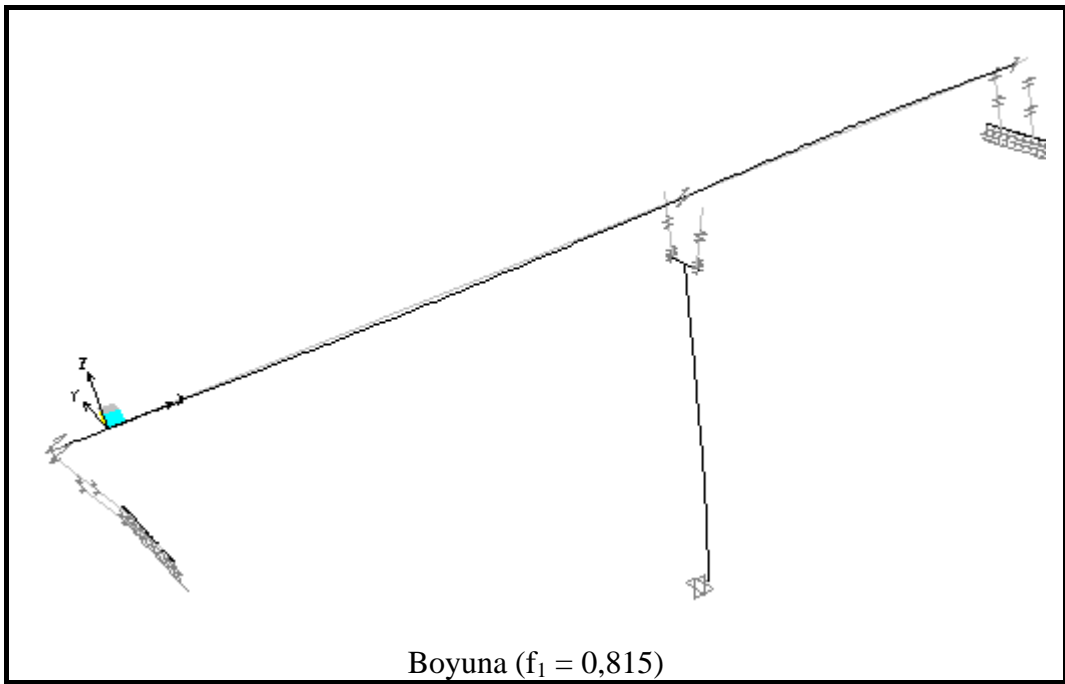
2.2.3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Ortaköy Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Köprü'nün 3-boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 programında oluşturulduktan sonra modal analiz gerçekleştirilmiş ve köprü teorik dinamik karakteristikleri olan mod şekilleri ve doğal frekans değerleri belirlenmiştir.

Ortaköy Köprüsü'nün SAP2000 programı kullanılarak gerçekleştirilen modal analizinden elde edilen ilk yedi moduna ait doğal frekans ve periyot değerleri Tablo 2.3'te verilmiştir. Tablo 2.3'te görüldüğü gibi köprü'nün ilk yedi doğal frekansı 0,815-5,840 Hz değerleri arasında değişmektedir. Köprü'nün ilk yedi mod şekli Şekil 2.17'de verilmektedir.

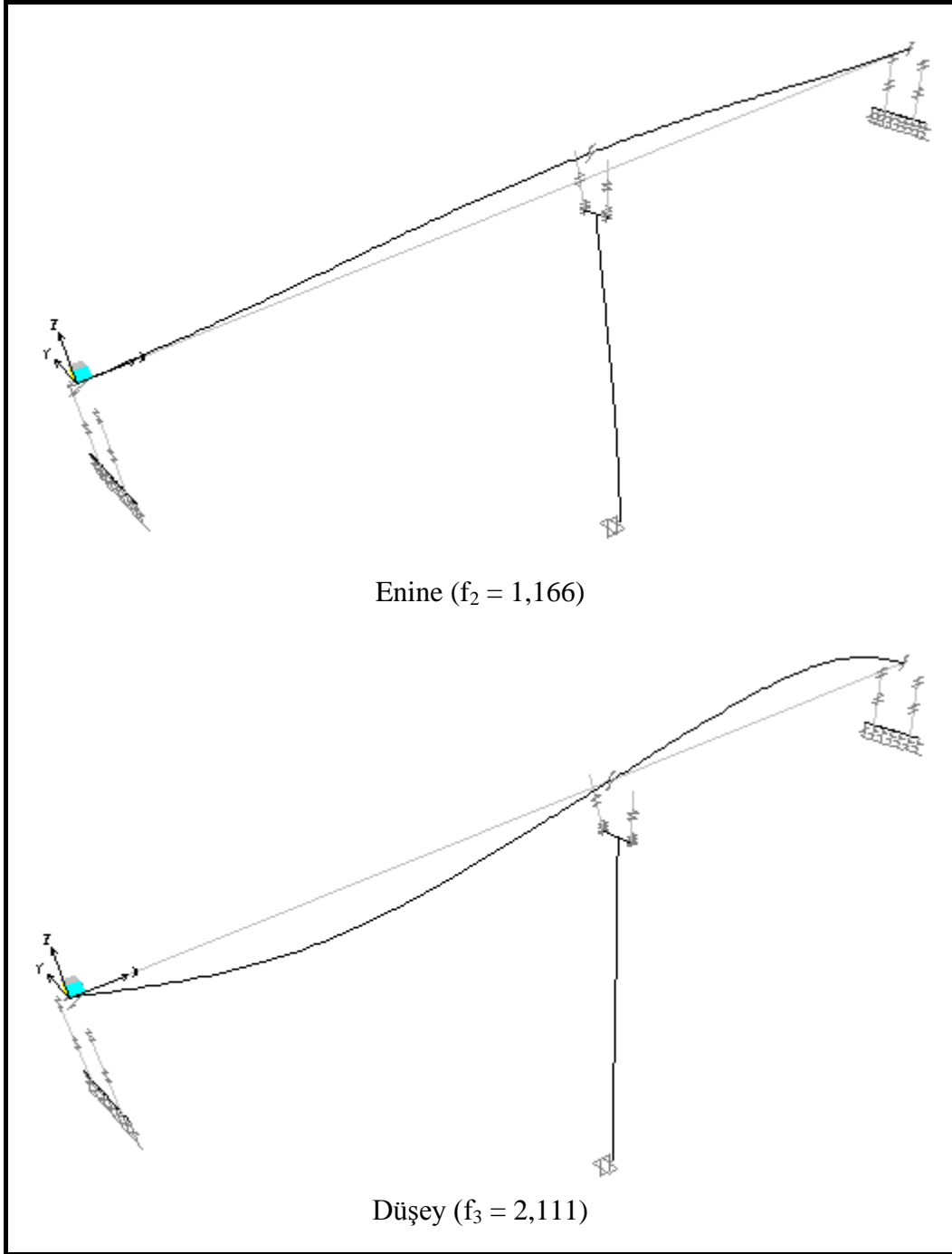
Tablo 2.3. Ortaköy Köprüsü'nün ilk yedi doğal frekans ve periyotları

Ortaköy Köprüsü ($\approx L=154,4m$)		
Mod No	Frekans (Hz)	Periyot (sn)
1	0,815	1,227
2	1,166	0,858
3	2,111	0,473
4	3,384	0,296
5	3,534	0,283
6	3,620	0,276
7	5,840	0,171

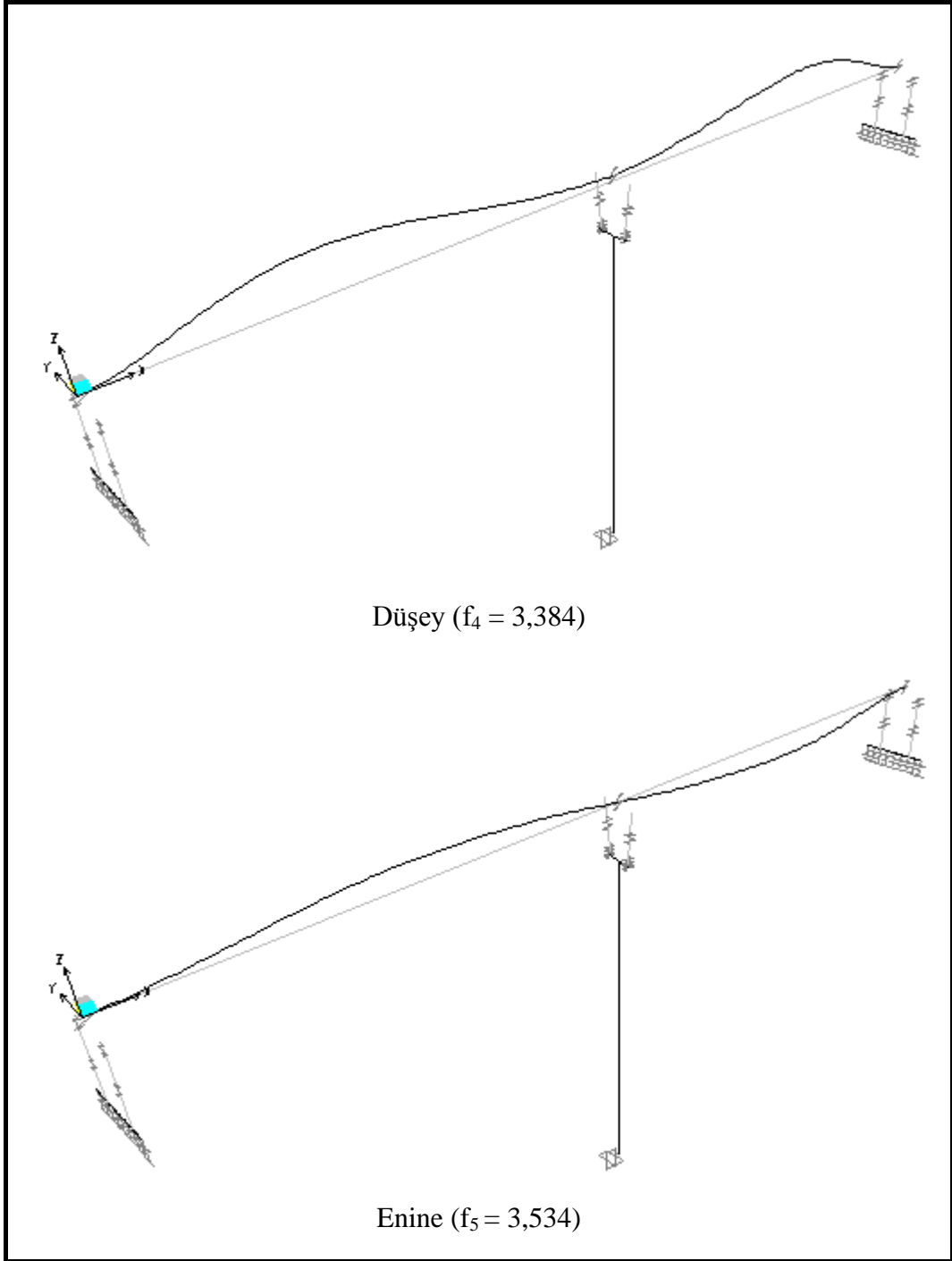


Şekil 2.17. Ortaköy Köprüsü'nün analitik olarak elde edilen ilk 7 mod şekli

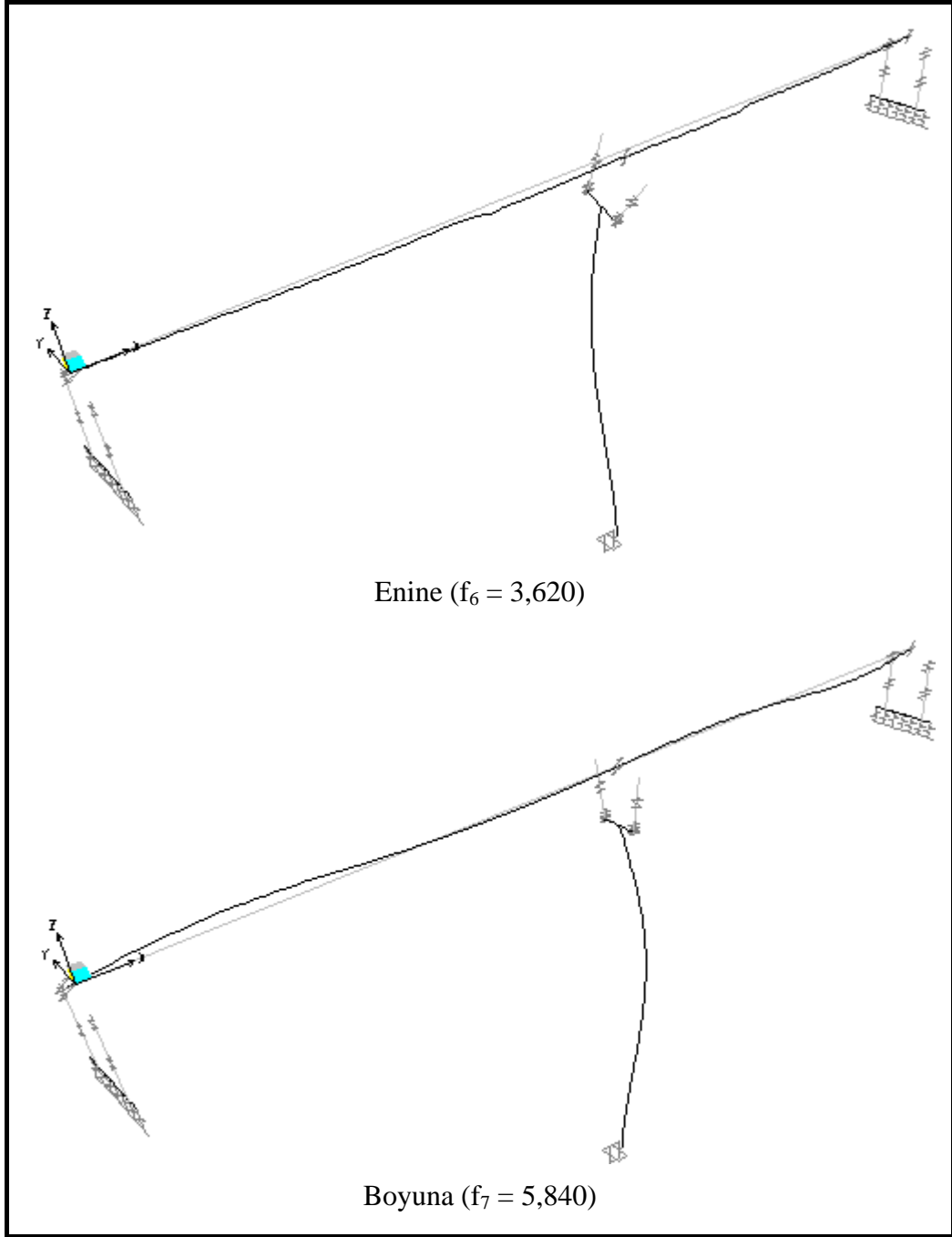
Şekil 2.17'nin devamı



Şekil 2.17'nin devamı



Şekil 2.17'nin devamı

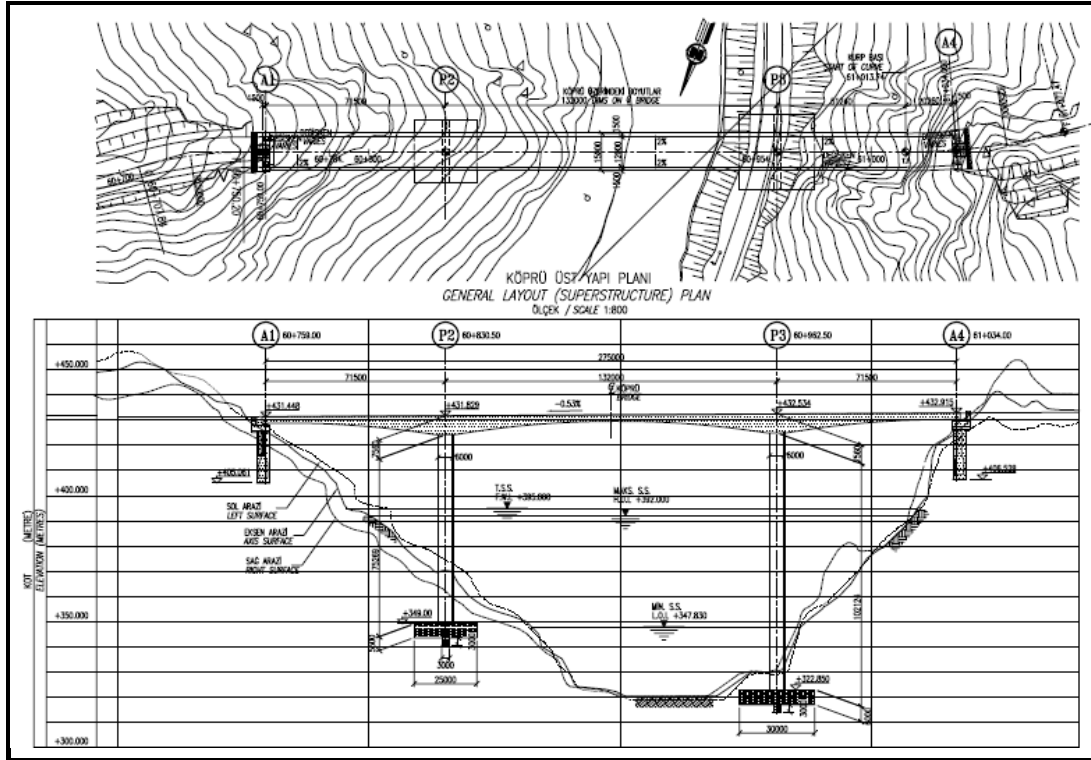


2.3. Akarsın Köprüsü

İki ayaklı ve üç açıklıklı olan Akarsın Köprüsü' ne ait genel görünüş ve vaziyet planı Şekil 2.18 ve 2.19'da verilmektedir.



Şekil 2.18. Akarsın Köprüsü



Şekil 2.19. Akarsın Köprüsü genel vaziyet planı kesiti, (DSİ, 2007)

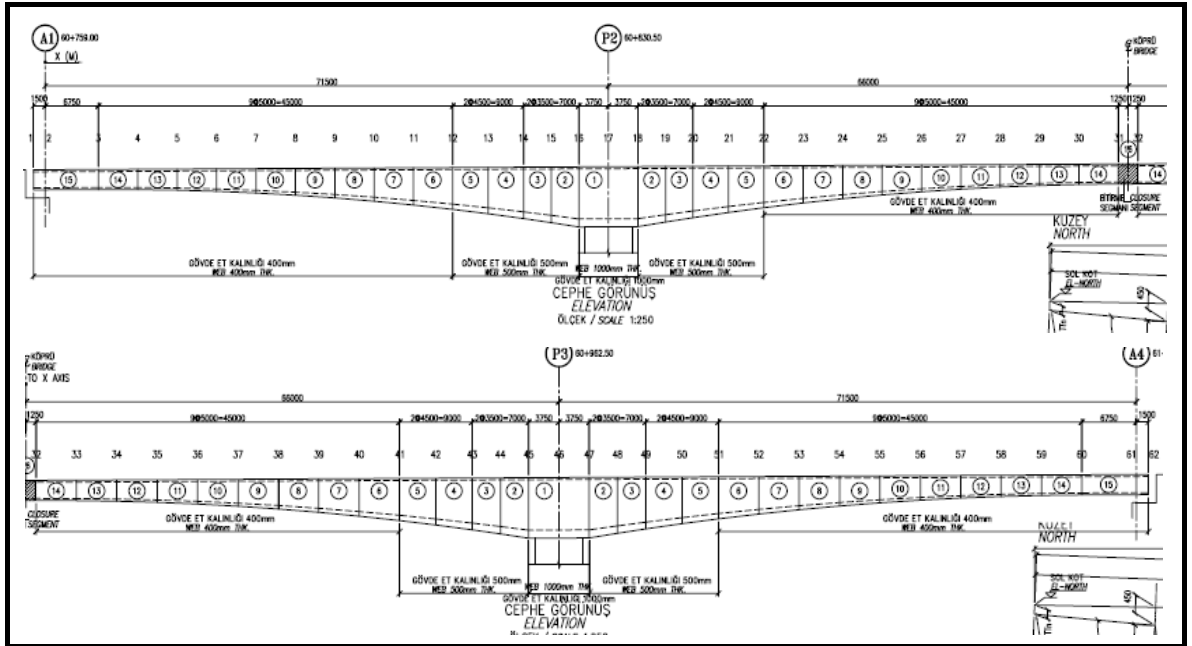
2.3.1. Genel Özellikler

Akarsın köprüsü 275m uzunluğunda, 109,7m yüksekliğinde ve 3 açıklıklıdır. Köprünün orta açıklığı 132m, kenar açıklıkları ise 71,5m dir. Köprü Artvin-Erzurum yolu üzerinde 60 + 759.000 -61 + 034.000km'leri arasında Çoruh Nehri vadisi üzerinde vadinin iki yakasını birbirine bağlamaktadır.

Köprünün iki kenarayağı ve bir orta ayağı vadinin eteklerinde diğer ortaayağı ise kısmen Çoruh Nehri'nin yatağındadır (Şekil 2.19).

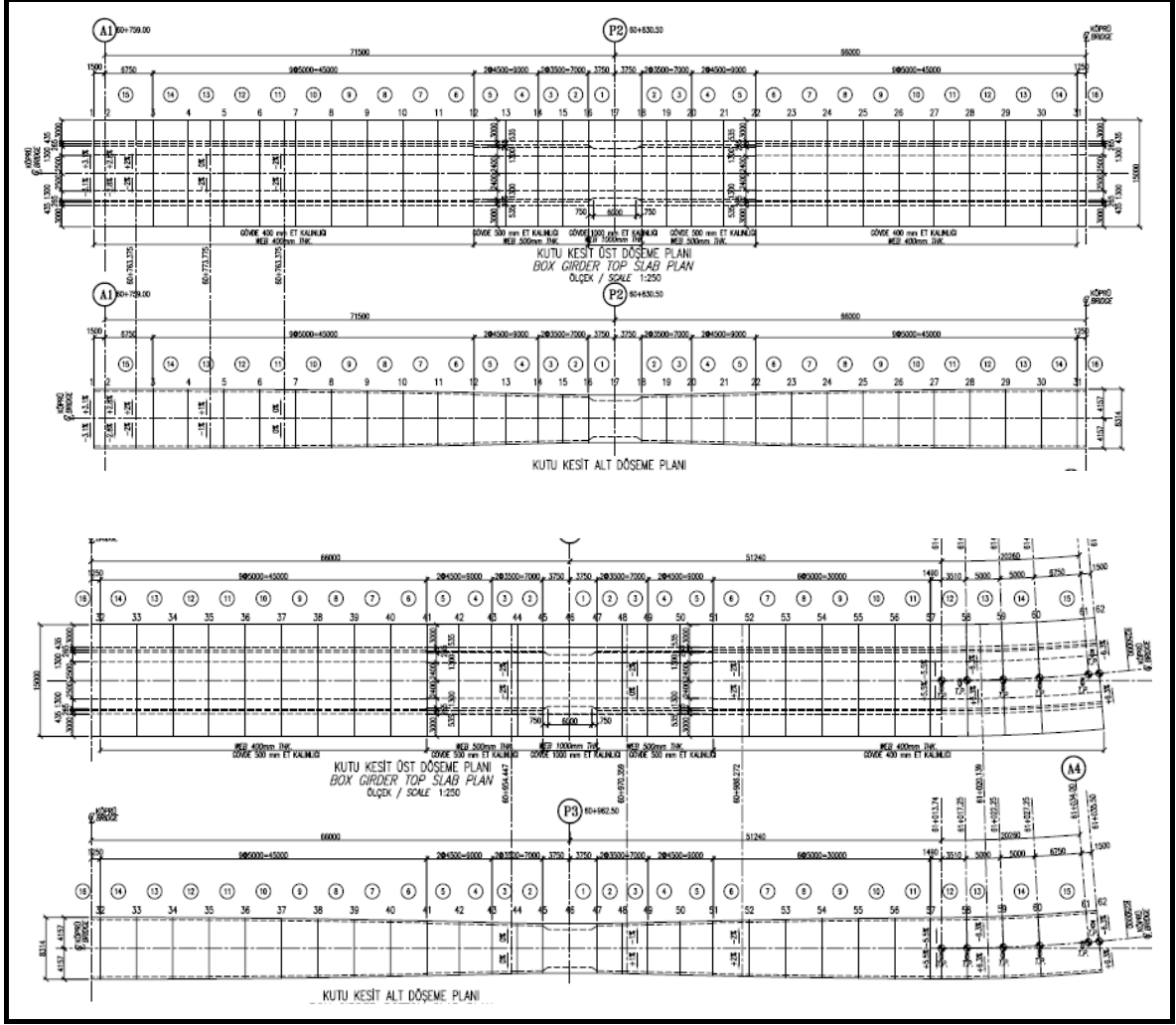
2.3.1.1. Köprü Tabliyesi

Şekil 2.20'de köprü tabliyesinin cephe görünüşü verilmiştir. P2 ve P3 ortaayakları üzerinde birbirlerine doğru başlık anolarıyla beraber 14 er ano, kenarayaklara doğru ise 15 er ano bulunmaktadır. Başlık anosu olarak da adlandırılan 1. anonun uzunluğu 7,5m dir. Ortaayakların kenarayaklar tarafındaki konsollarının son anoları 6,75m'dir. Diğer anoların uzunlukları ise 3,5m ile 5m arasında değişmektedir. Her iki orta ayak konsollarının birbirleriyle birleşme noktasında 2,5m uzunluğunda kilit ano bulunmaktadır.

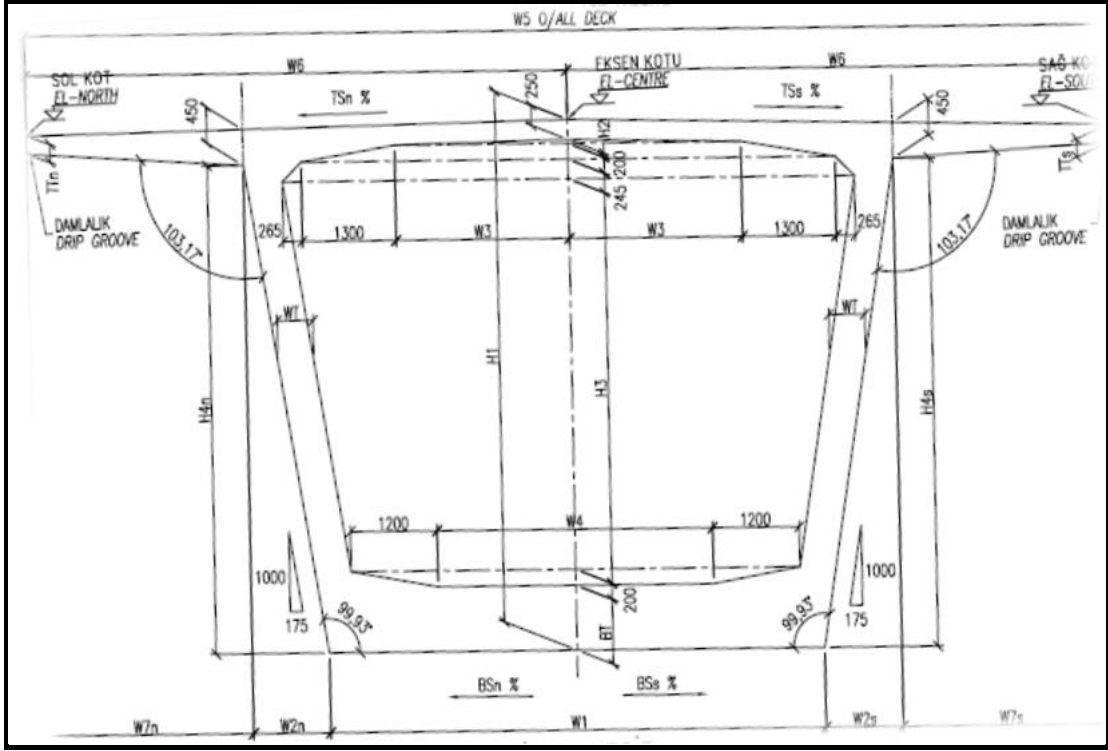


Şekil 2.20. Akarsın Köprüsü tabliye cephe görüntüsü, (DSİ, 2007)

Köprü tabliyesi değişken boyutlu kutu kesittir. Şekil 2.21’de görüldüğü gibi kutu kesitin üst döşeme genişliği köprü tabliyesi boyunca 15m dir. Kutu kesitin alt döşemesi ortaayaklardan kenarayaklara doğru genişlemektedir. Alt döşeme genişliği P2 ve P3 ortaayakları üzerinde 6,56m iken kenarayaklar üzerinde 8,31’ m dir (Şekil 2.22).



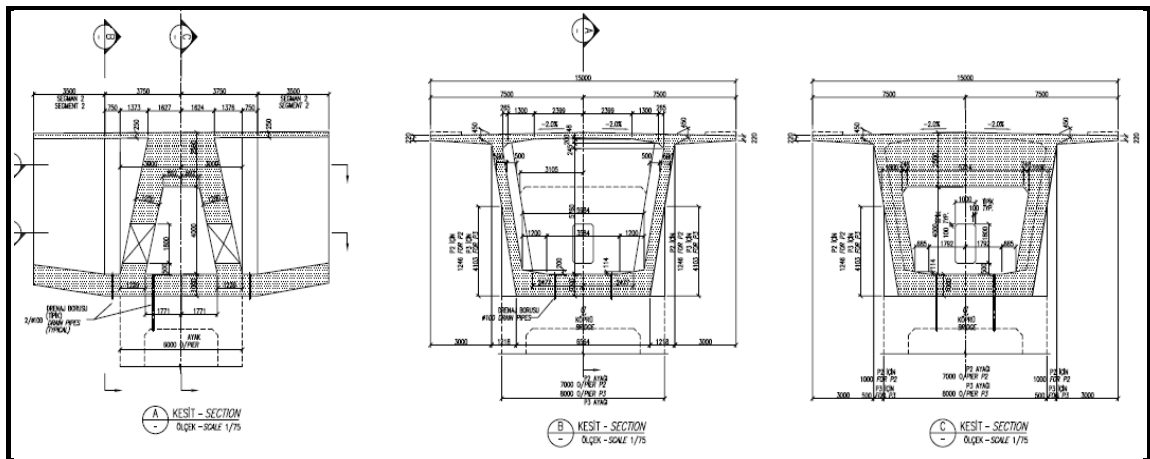
Şekil 2.21. Akarsın Köprüsü tabliye planı, (DSİ, 2007)



Şekil 2.22. Değişken kutu kesitli tabliye boyutları, (DSİ, 2007)

2.3.1.1.1. Başlık Anosu

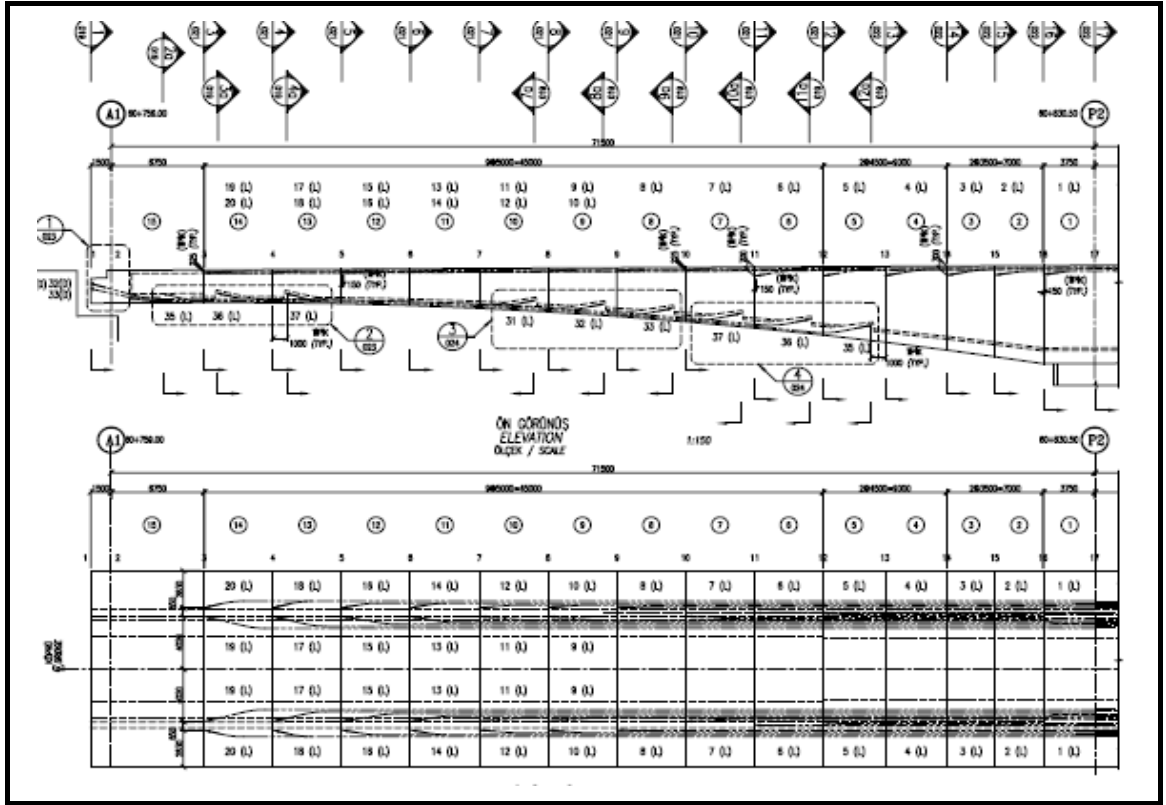
Köprü tabliyesinin ilk anosudur. Şekil 2.23'te geometrik özellikleri verilmiştir.



Şekil 2.23. Başlık segmenti kesitleri, (DSİ, 2007)

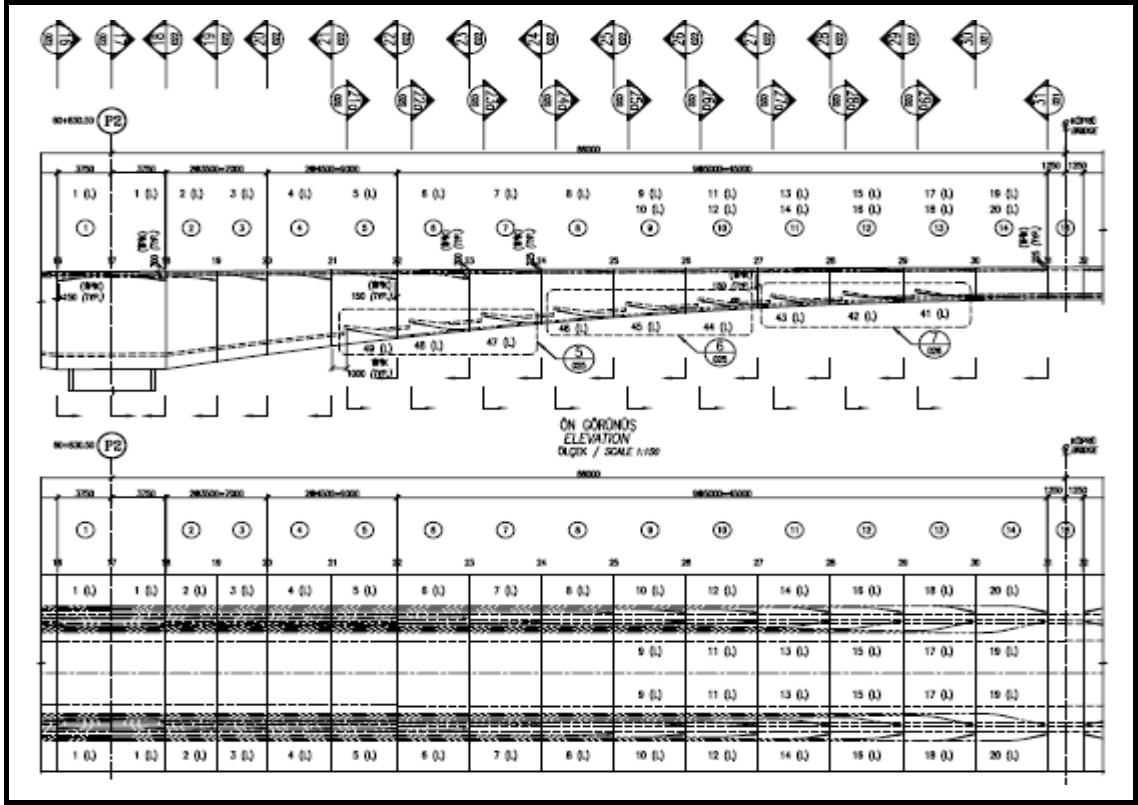
2.3.1.1.3. Ardgerme Halatları Yerleşim Planı

Değişken boyutlu kutu kesitli köprü tabliyесinin üst ve alt döşemelerinde ardgerme halatları bulunmaktadır. Bu halatlar beton dökümünden sonra daha önce kalıp içine bırakılmış boruların içine yerleştirilir ve gerilir. Üst döşemede bulunan halatlar her anonun karşılıklı olarak betonlanmasından sonra yerleştirilir ve birbirine gerilir. Bir halat 15,2mm çapında 19 adet çelik kablodan oluşmaktadır. Üst döşemenin ilk 8 anosunda kesitin sağında ve solunda olmak üzere birer kablo, diğer 6 anoda ise 2 şer kablo kullanılmıştır. Üst döşeme halat yerleşim planı aşağıdaki Şekil 2.25’te gösterilmiştir.

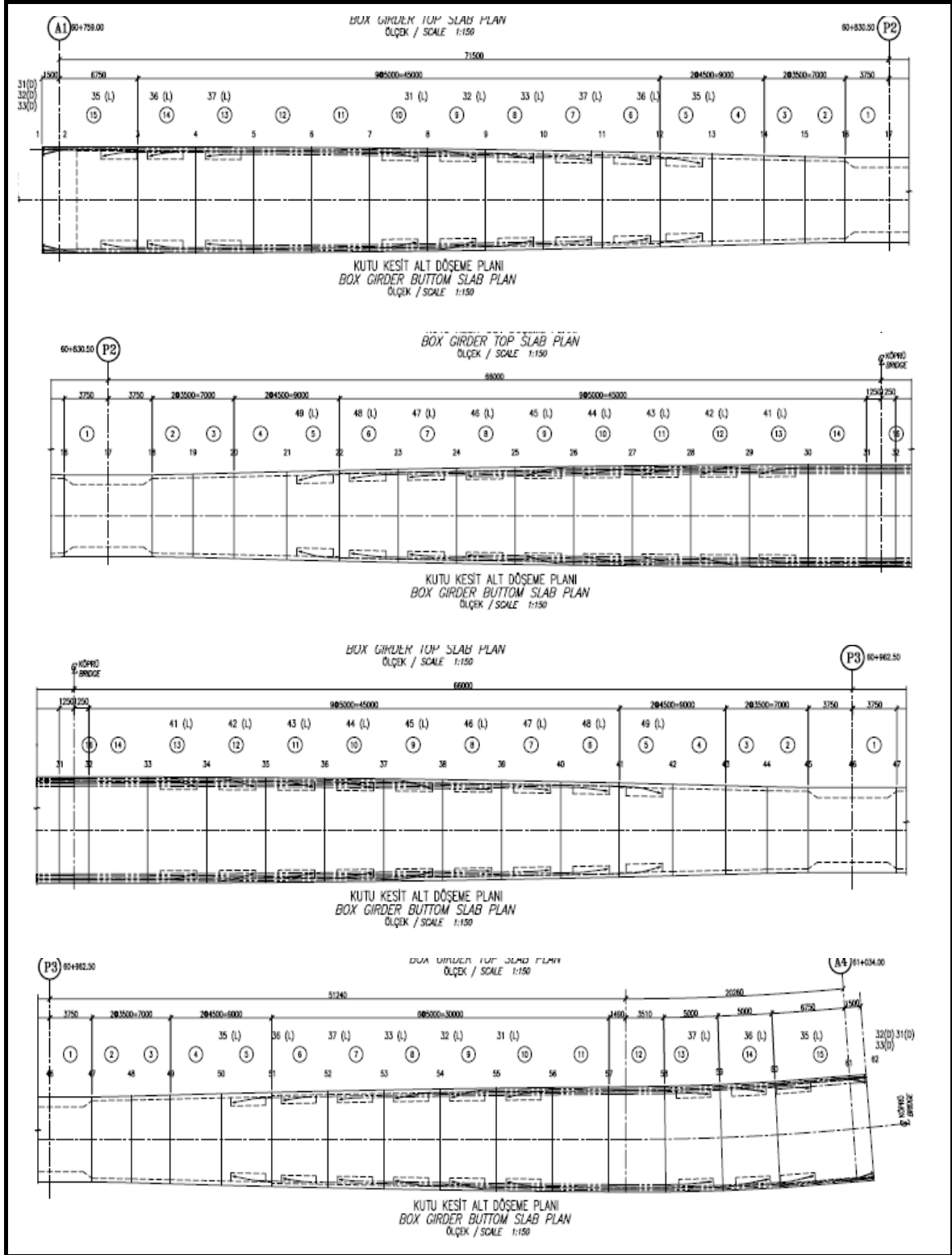


Şekil 2.25. Akarsın Köprüsü üst döşeme halat yerleşim planı, (DSİ, 2007)

Şekil 2.25'in devamı



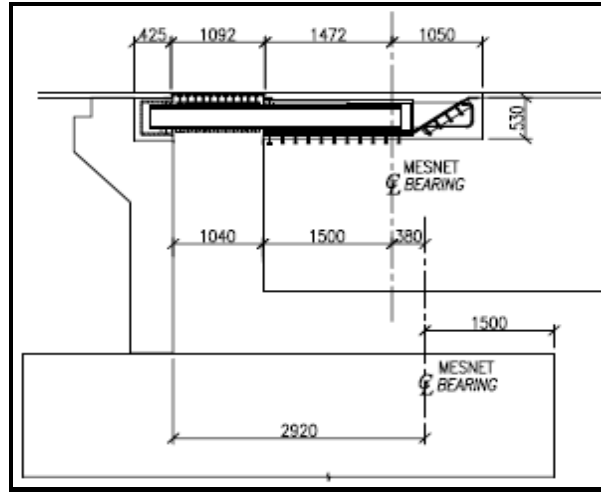
Alt döşemeden geçen arderme halatların montajı segmentlerin inşası bitirilip ortaayak konsolları kenarayakla birleştikten sonra yapılır. Tabliyenin ilk 4 anosunda alt döşemede halat kullanılmamıştır. Alt döşeme halatları 5. anodan itibaren başlar.P2 ayağından kenarayağa doğru tabliyenin alt döşemesinde biri kesitin sağında diğeri solunda olmak üzere 9 ar adet halat bulunmaktadır.Kenarayak tarafındaki konsolun 5.,6. ve 7. anosunun alt döşeme halatları 13.,14. ve 15. ano ile karşılıklı olarak gerilir. 8.,9. ve 10. anolardan gerilen halatlar ise kenarayak diyaframına sabitlenir. P2 ve P3 ayakları arasındaki köprü orta açıklığının alt döşemesinde kutu kesitin sağında ve solunda olmak üzere 9 ar adet halat bulunmaktadır. Bu halatlarla P2 ayağının P3 ayağına doğru olan konsolundaki ve P3 ayağının P2 ayağı tarafındaki konsolundaki 5. ve 14. anolar arasındaki bütün anolar birbirlerine gerilir. P3 ayağının Kenarayak tarafındaki halat yerleşimi P2 ayağıyla simetriktir. Alt döşeme halat yerleşimi Şekil 2.26'da gösterilmiştir.



Şekil 2.26. Akarsın Köprüsü alt döşeme halatları yerleşim planı, (DSİ, 2007)

2.3.1.1.4. Genleşme Derzleri

Köprüde 2 adet genleşme derzi kullanılmıştır. Bu derzler köprü tabliyesinin kenarayaklarla birleştiği yerlerdedir (Şekil 2.27). Derzler 100 yıllık depremlerde oluşacak yer değiştirmelerde yapı elemanlarında ve genleşme derzinin kendisinde hasar oluşmayacak şekilde, 475 yıllık depremlerde oluşan yer değiştirmelerde yapı elemanlarında hasar oluşturmayacak fakat genleşme derzinin kendisinde hasar oluşabilecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 2.27. Genleşme derzi yerleşimi, (DSİ, 2007)

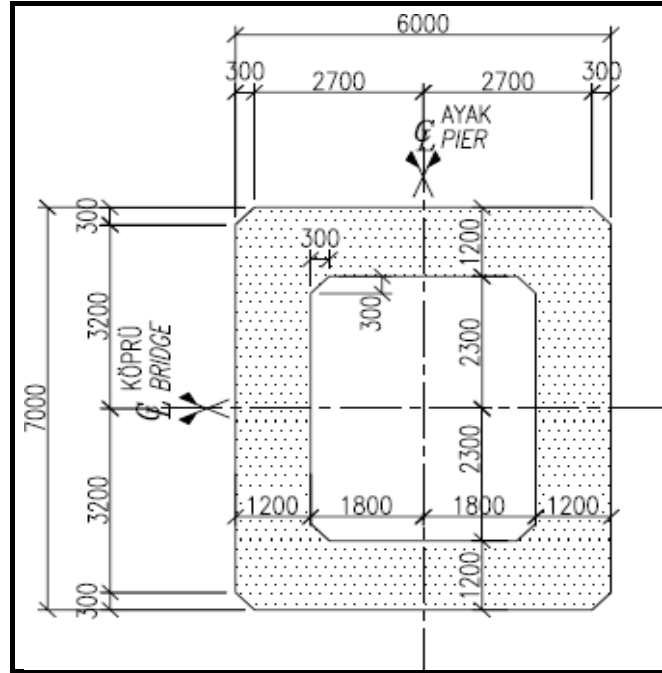
2.3.1.1.5. Mesnetler

Köprüde 4 tane serbest kayar mesnet kullanılmıştır. Bunlar kenarayaklar üzerinde 2 şer adettir. Köprüde sadece boyuna harekete müsaade edilmiştir. 475 yıllık deprem durumunda köprü tabliyesinde oluşacak boyuna yer değiştirme maksimum 760 mm'dir. Köprü yapı elemanlarında hasar oluşmayacak şekilde mesnetler tasarlanmıştır. Enine doğrultudaki hareketin önüne geçmek için kesme dişi kullanılmıştır. Kenarayak uç diyafrazının altına yerleştirilen kesme dişi kenarayak üzerinde 2 mesnet arasında inşa edilmiş olan yuvasına oturarak enine hareketin önüne geçilmiştir.

2.3.1.2. Köprü Kolonları

2.3.1.2.1. P2 Kolonu

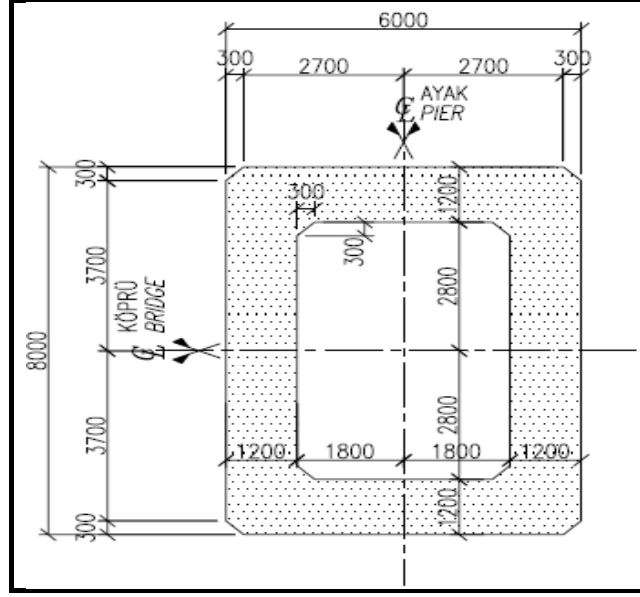
P2 kolonunun yüksekliği 75,27m'dir. Kolon, 7m x 6m içi boş dikdörtgen kesitlidir. Beton et kalınlığı 120cm' dir. İç ve dış köşelerinde 3cm x 3cm pah vardır. Kolon enkesiti Şekil 2.28'de gösterilmiştir.



Şekil 2.28. P2 ayağı kolon kesiti, (DSİ, 2007)

2.3.1.2.2. P3 Kolonu

P2 kolonunun yüksekliği 102,12m'dir. Kolon, 8m x 6m içi boş dikdörtgen kesitlidir. Beton et kalınlığı 120cm'dir. İç ve dış köşelerinde 3cm x 3cm pah vardır. Kolon enkesiti Şekil 2.29'da gösterilmiştir.



Şekil 2.29. P3 ayağı kolon kesiti, (DSİ, 2007)

2.3.1.3. Köprü Temelleri

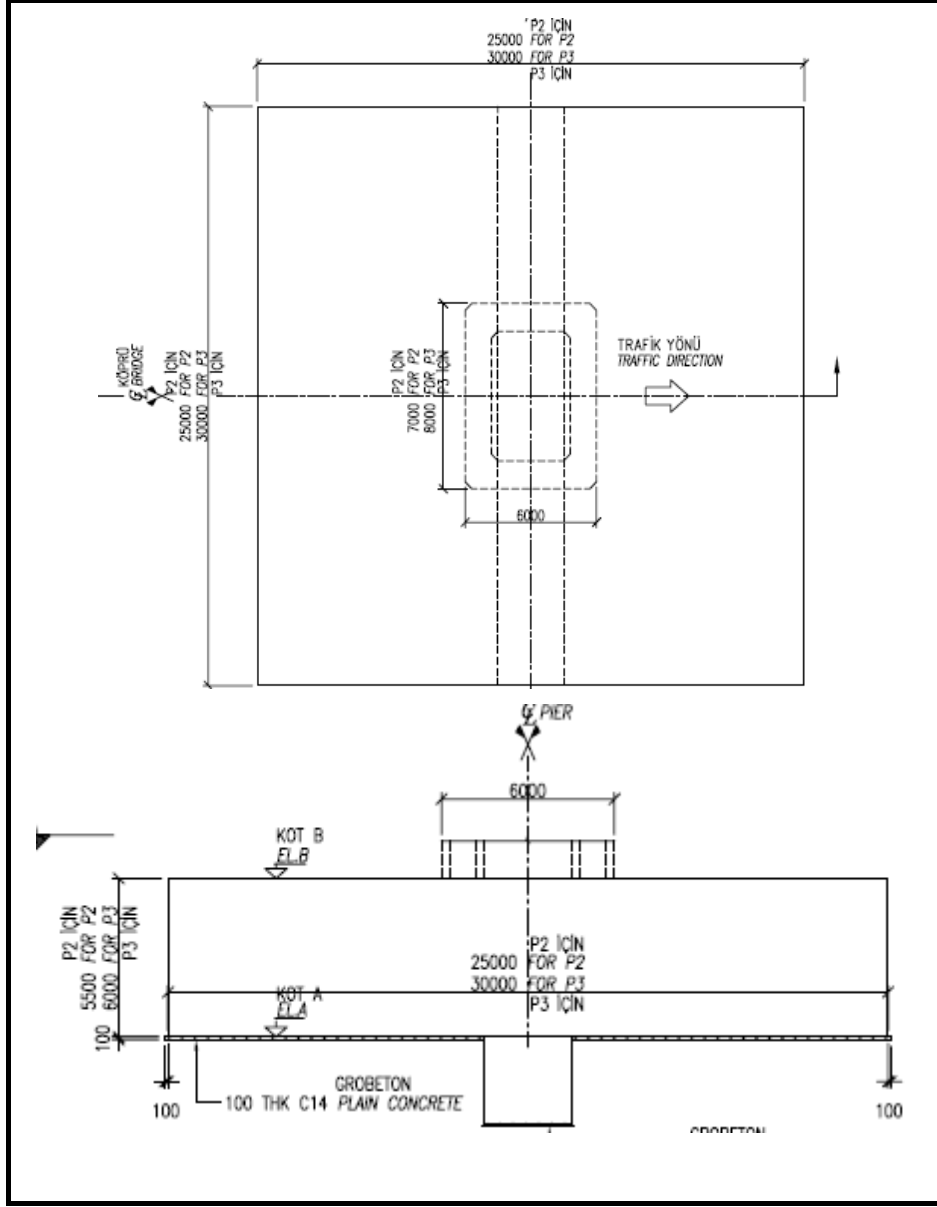
2.3.1.3.1. P2 Temeli

P2 temeli 25m x 25m boyutlarında 5,5m yüksekliğinde kare şeklindedir. Temelin ortasında köprü eksenine dik istikamette temel boyunca devam eden kesme dişi bulunmaktadır. Kesme dişinin genişliği 3m'dir.

2.3.1.3.2. P3 Temeli

P3 temeli, 30m x 30m boyutlarında 6m yüksekliğinde kare şeklindedir. Temelin ortasında köprü eksenine dik istikamette temel boyunca devam eden kesme dişi bulunmaktadır. Kesme dişinin genişliği 3m'dir.

P2 ve P3 temellerine ait kesitler ve plan görüntüsü Şekil 2.30'da verilmiştir.



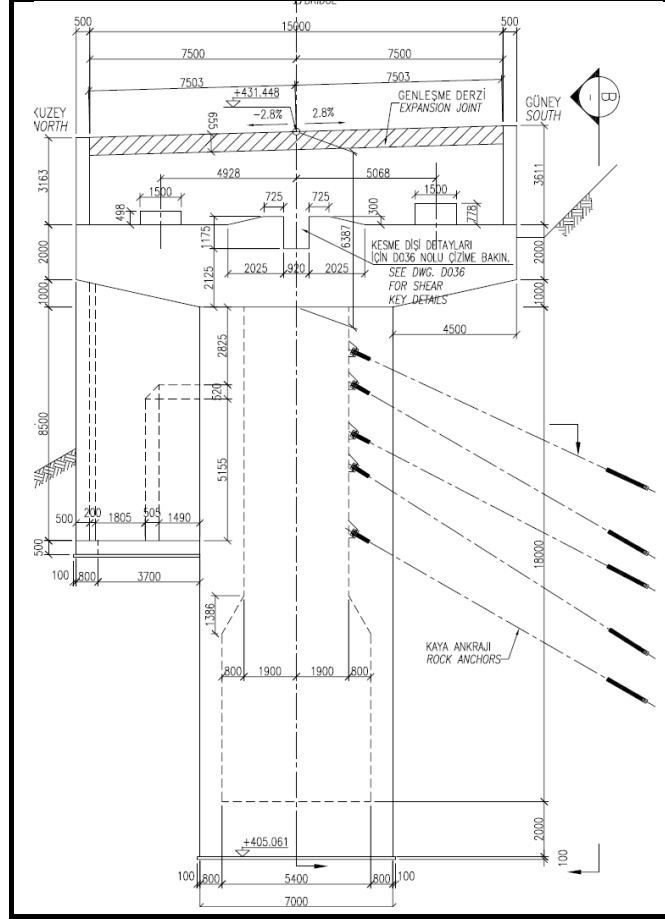
Şekil 2.30. P2 ve P3 temelleri plan ve kesitleri, (DSİ, 2007)

2.3.1.4. Kenarayaklar

2.3.1.4.1. A1 Kenarayağı

A1 kenarayağının temeli 7m x 5 m boyutlarında, 2 m yüksekliğindedir. Temelin üzerine içi boş basık silindir kesitli 18m yüksekliğinde şaft şeklindeki kolon inşa edilmiştir. Kolon betonunun et kalınlığı, kolonun 6.metresine kadar 80cm'dir. 6.metreden sonra 160cm'ye çıkmaktadır. Kenarayak kolon içinden yapılan kaya ankrajlarıyla sabitlenmiştir. Kolonun üzerine 15m genişliğindeki başlık kirişi inşa edilir. Bu yapılan

başlık kirişinin üzerine mesnetler konmuş ve ortaayak konsollarıyla kenarayağı birleştirecek olan uç diyaframı bu mesnetlerin üzerine oturmuştur. A1 kenarayağının genel görünümü ve boyutları Şekil 2.31’de verilmiştir.



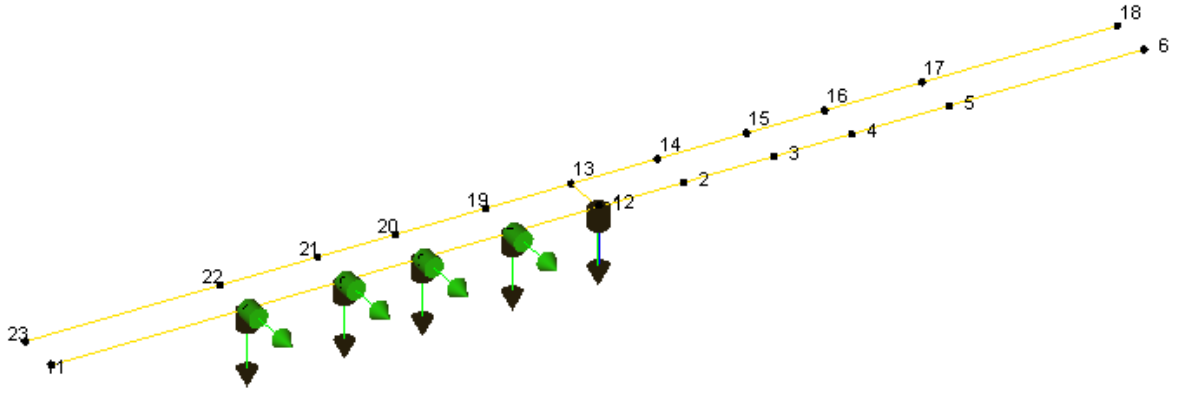
Şekil 2.31. A1 kenar ayağı genel görünümü, (DSİ, 2007)

2.3.1.4.2. A4 Kenar Ayağı

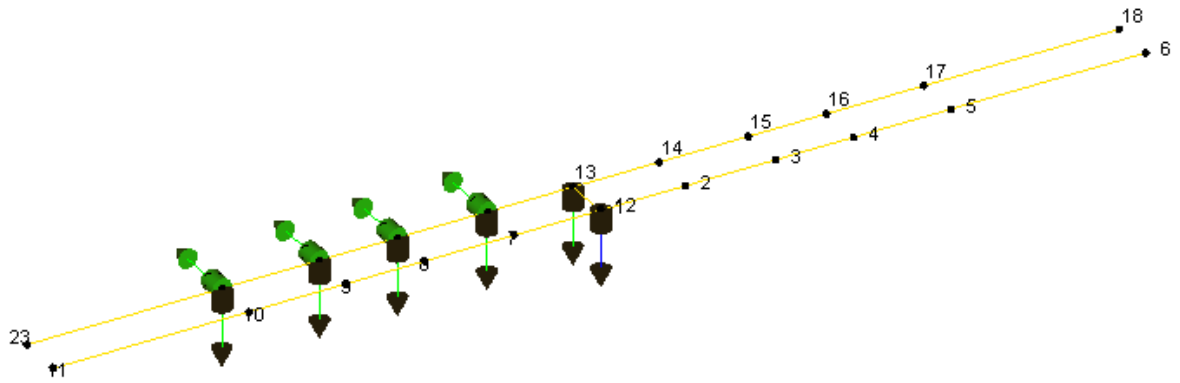
A4 kenar ayağının temeli 7m x 5m boyutlarında, 2m yüksekliğindedir. Temelin üzerine içi boş basık silindirik kesitli 18m yüksekliğinde şaft şeklindeki kolon inşa edilmiştir. Kolon betonunun et kalınlığı kolonun 6. metresine kadar 80cm’dir. 6.metreden sonra 160cm’ye çıkar. Kenarayağ kolon içinden yapılan kaya ankrajlarıyla sabitlenmiştir. Kolonun üzerine 15m genişliğindeki başlık kirişi inşa edilmiştir. Bu yapılan başlık kirişinin üzerine mesnetler konmuş ve ortaayak konsollarıyla kenarayağı birleştirecek olan uç

aralığında yapılmış ve ölçüm süresi ise her bir adım için 30dk seçilmiştir. Ölçümler için referans noktası olarak köprü orta açıklığının orta noktası başka bir deyişle her iki ortaayak konsolunun birbirleriyle birleştiği nokta seçilmiştir. Ölçümler için ivmeölçerler belirlenen noktalara düşey ve enine olmak üzere iki doğrultuda yerleştirilmiştir.

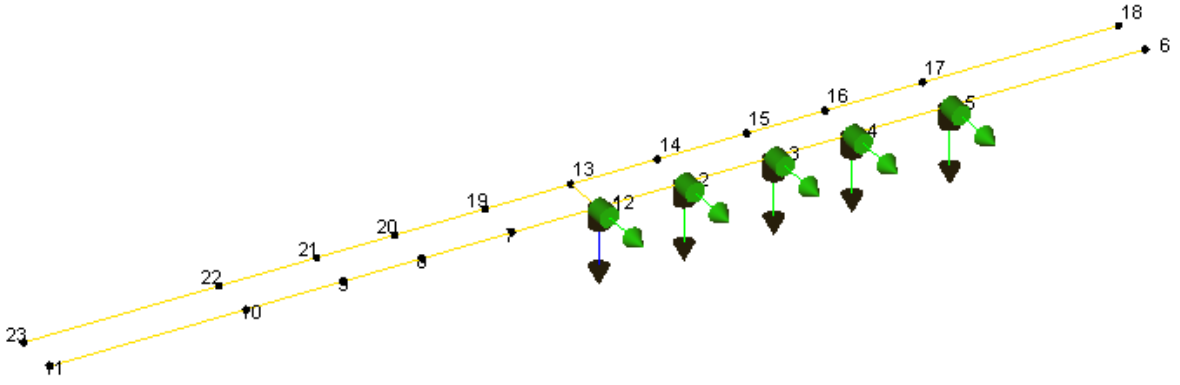
Birinci Ölçüm Testi: Birinci ölçüm Köprü'nün Artvin-Erzurum istikametine göre sağ yanından ve Artvin tarafından yapılmıştır. Düşey ve enine doğrultuda olmak üzere toplam 10 adet ivmeölçer daha önceden belirlenen noktalara yerleştirilmiştir.



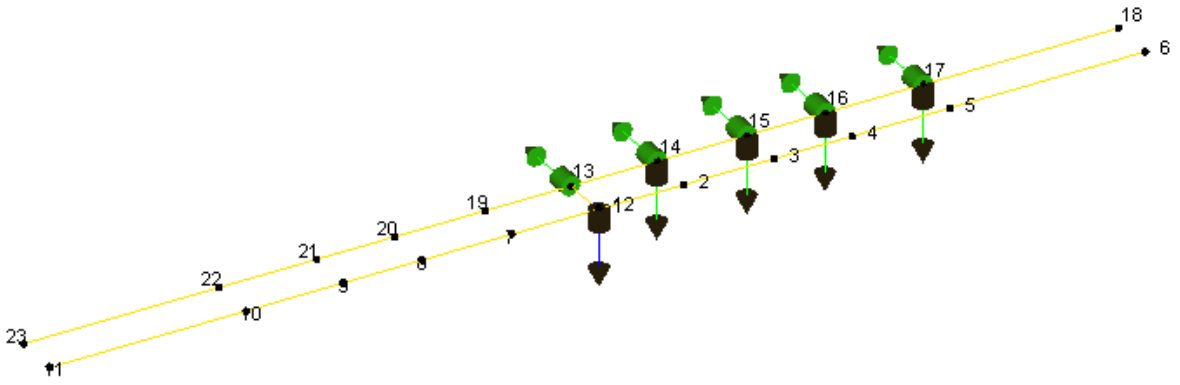
İkinci Ölçüm Testi: İkinci ölçüm Köprü'nün Artvin-Erzurum istikametine göre sol yanından ve Artvin tarafından yapılmıştır. Düşey ve enine doğrultuda olmak üzere toplam 10 adet ivmeölçer daha önceden belirlenen noktalara yerleştirilmiştir.



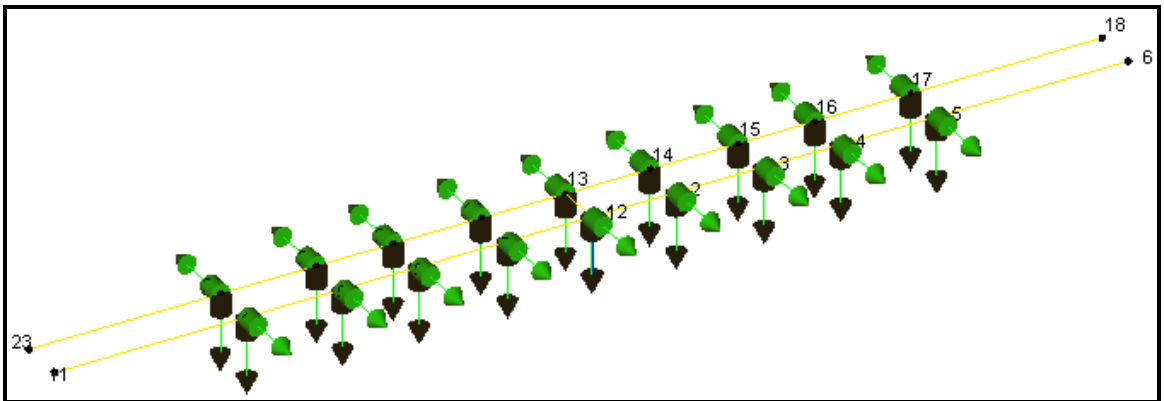
Üçüncü Ölçüm Testi: Üçüncü ölçüm Köprü'nün Artvin-Erzurum istikametine göre sağ yanından ve Erzurum tarafından yapılmıştır. Düşey ve enine doğrultuda olmak üzere toplam 10 adet ivmeölçer daha önceden belirlenen noktalara yerleştirilmiştir.



Dördüncü Ölçüm Testi: Dördüncü ölçüm Köprü'nün Artvin-Erzurum istikametine göre sol yanından ve Erzurum tarafından yapılmıştır. Düşey ve enine doğrultuda olmak üzere toplam 10 adet ivmeölçer daha önceden belirlenen noktalara yerleştirilmiştir.



Tüm ölçümleri kapsayan ivmeölçer yerleşim planı Şekil 2.33'te verilmiştir.

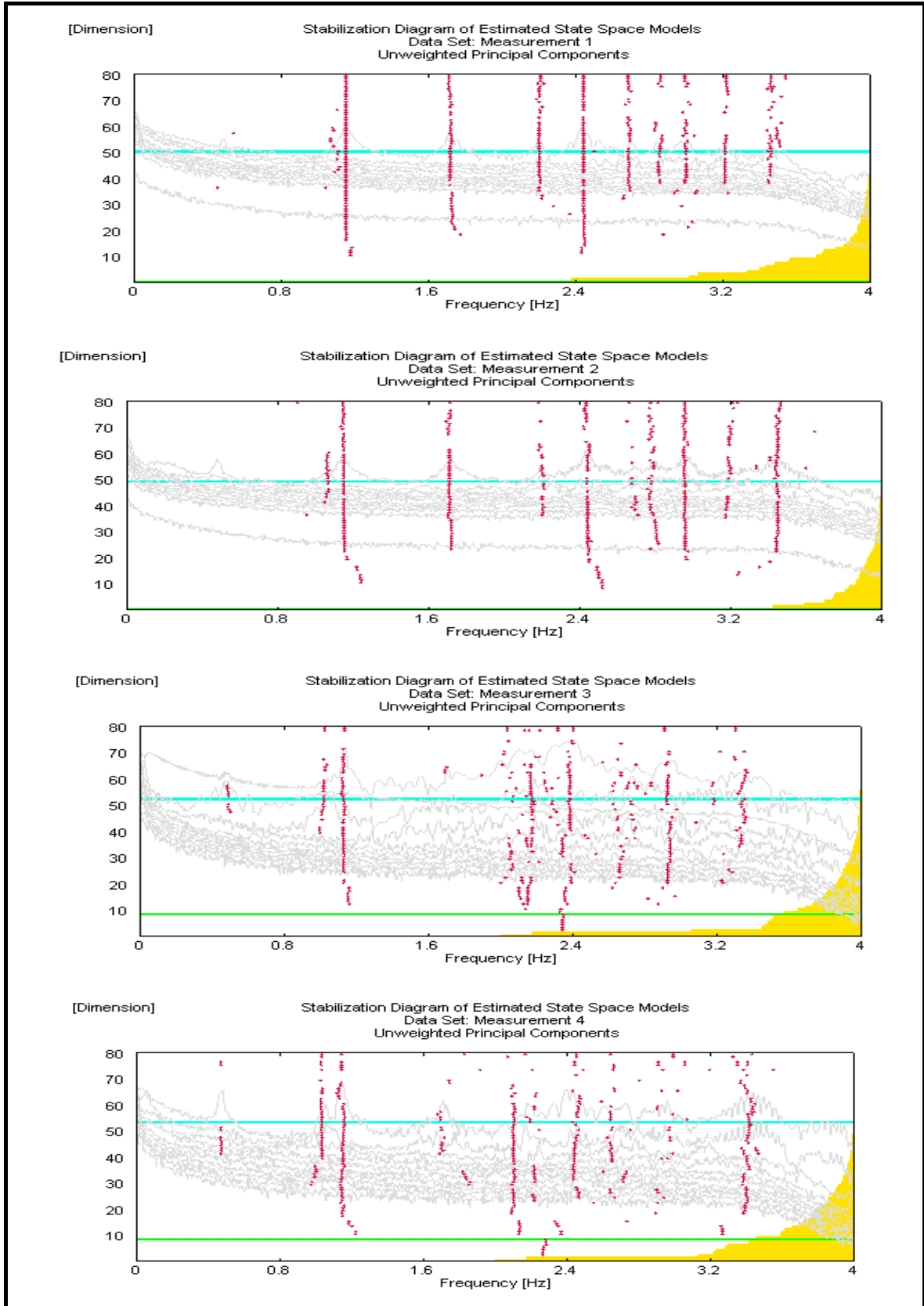


Şekil 2.33. Akarsın köprüsünün çevresel titreşim testleri için kullanılan ivmeölçer yerleşim planları



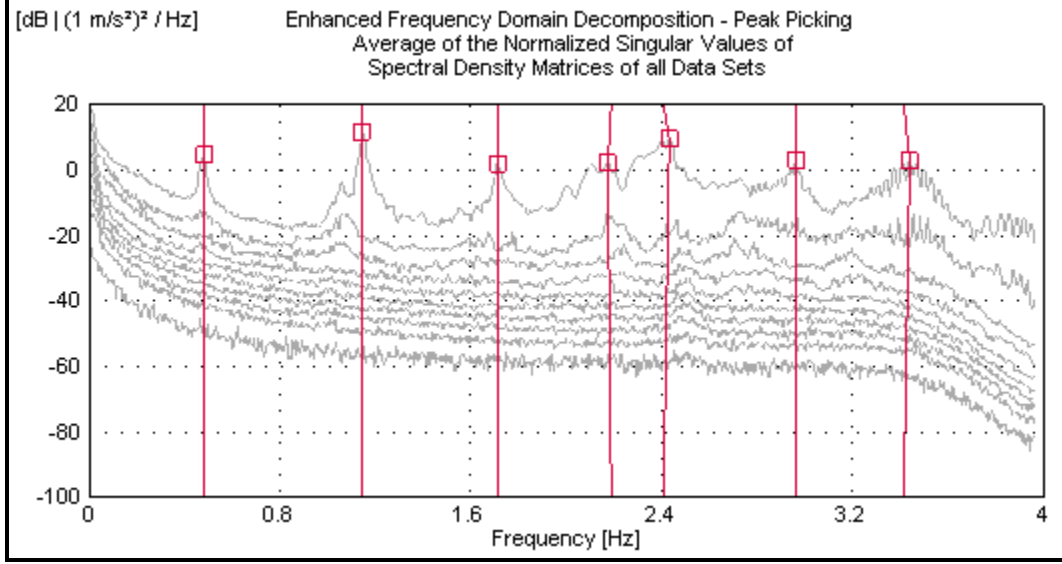
Şekil 2.34. Akarsın Köprüsü'nde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar

Akarsın Köprüsü'nde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar Şekil 2.34'te verilmektedir. Akarsın Köprüsü'ne uygulanan dört farklı çevresel titreşim testinden toplanan sinyallerin GFTAA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu her bir ölçüm adımı için elde edilen tekil değerler Şekil 2.35'te verilmiştir.



Şekil 2.35. Akarsın Köprüsü'nde yapılan dört ölçümden elde edilen stabilizasyon diagramları

Her bir ölçüm adımı sonucunda elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ortalamaları Şekil 2.36’da verilmiştir.



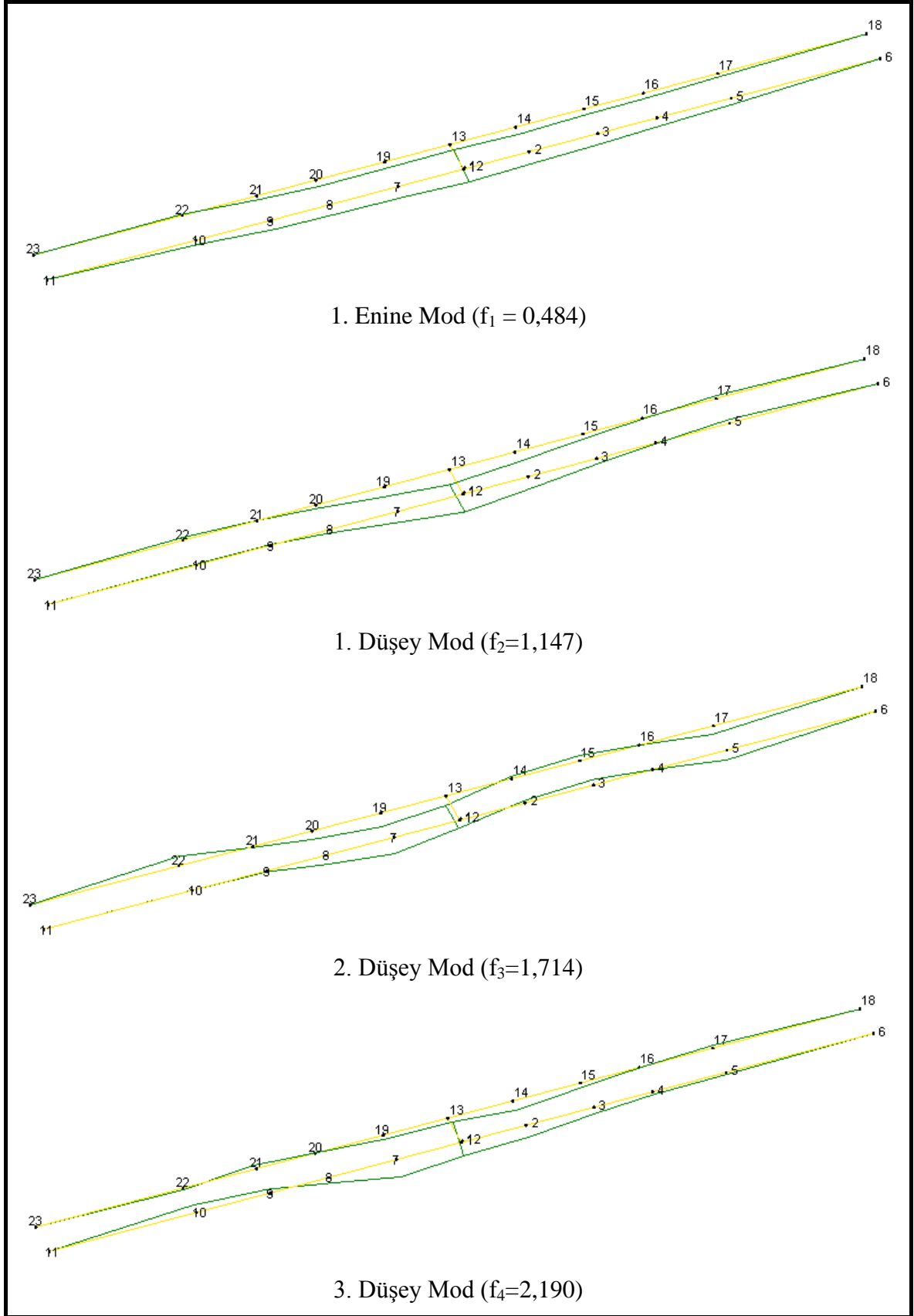
Şekil 2.36. Geliştirilmiş frekans tanım aralığında ayrıştırma yöntemi ile elde edilen tekil değerler

Akarsın Köprüsüne ait ilk yedi mod için frekans değerleri ve sönüm oranları Tablo 2.4’te verilmiştir. İlk yedi frekansın 0,484-3,417 Hz. arasında olduğu sönüm oranı değerlerinin ise %1,592-0,166 arasında değiştiği görülmektedir.

Tablo 2.4. Akarsın Köprüsü’nün ilk yedi doğal frekansı ve modal sönüm oranı

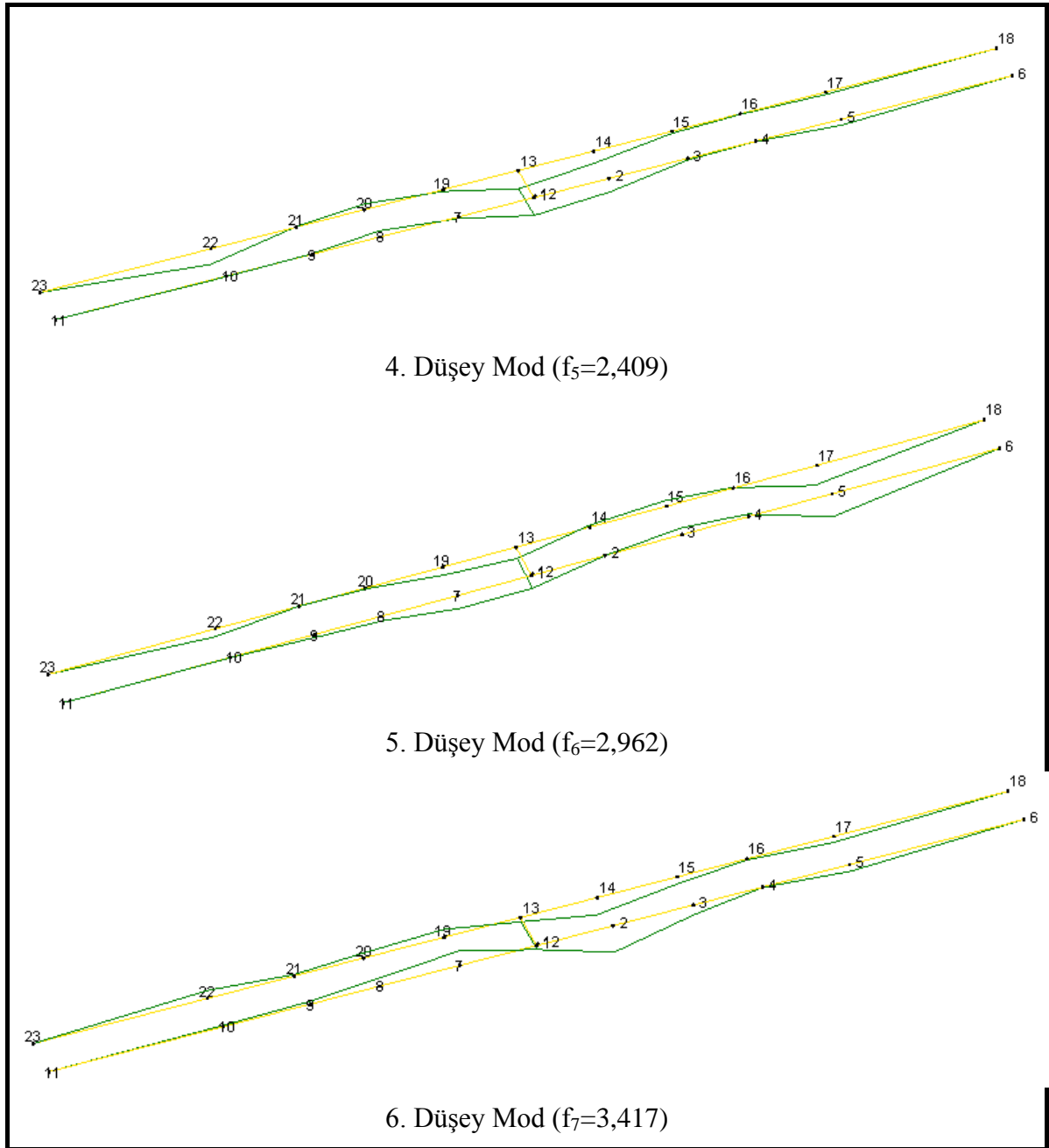
Mod No	Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı
1	0,484	1,592
2	1,147	0,552
3	1,714	0,681
4	2,190	0,420
5	2,409	0,843
6	2,962	0,323
7	3,417	0,166

Akarsın Köprüsü’ne uygulanan deneysel ölçüm testlerinden GFTAA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri Şekil 2.37’de verilmiştir.



Şekil 2.37. Akarsın Köprüsü'nün çevresel titreşim yöntemi ile elde edilen mod şekilleri

Şekil 2.37'nin devamı



2.3.3. Akarsın Köprüsü'nün Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

2.3.3.1. Köprü'nün Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli

Akarsın Köprüsü'nün teorik dinamik karakteristiklerini (doğal frekanslar ve mod şekilleri) belirlemek için köprü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 (SAP2000,

2008) programı kullanılarak, aşağıda belirtilen modelleme kriterleri dikkate alınarak oluşturulmuştur.

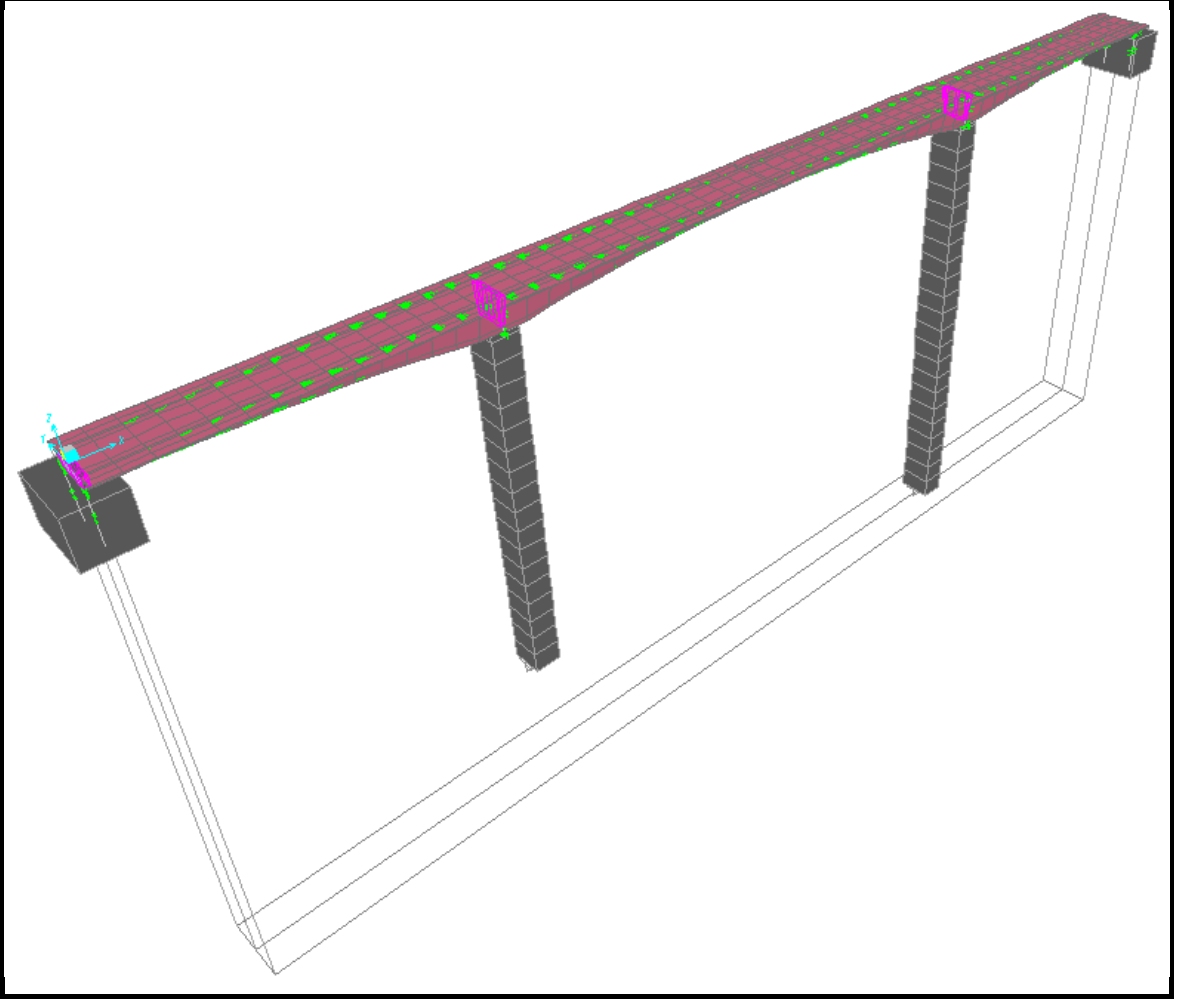
- Köprü, SAP2000 programının “Bridge” sekmesi kullanılarak modellenmiştir. Değişken kutu kesitli tabliye boyutları parametrik varyasyonlar tanımlanarak proje verilerine göre çizilmiştir. Ortaayaklarda ve tabliyede segment boyları 5m olarak tanımlanmıştır.
- Ortaayaklarla tabliyenin birleşimleri projede olduğu gibi ankastre olarak tanımlanmış olup, tabliye birleşiminden önceki son 1m leri dolu kesittir.
- Kenarayakların ve ortaayakların köprü tabliyesi ile birleşimlerinde 1m kalınlığında diyaframlar tanımlanmıştır.
- Kutu kesitli tabliyenin üstünde kullanılan öngerme halatları ve altında kullanılan ardgerme halatları proje verilerine uygun boy ve sayıda tanımlanmıştır.
- Kenarayak mesnetleri belli rijitliklere sahip yaylarla tanımlanmıştır. Kenarayakların düşey ve enine doğrultuda serbestlikleri tamamen tutulmuştur. Boyuna doğrultudaki hareketler için yay rijitliği 50000 kN/m olarak belirlenmiştir.

Köprünün modellenmesi ve analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.5’te sunulmaktadır.

Tablo 2.5. Akarsın Köprüsü’nün sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri

Eleman	Elastisite Modülü N/m ²	Poisson Oranı -	Yoğunluk Kg/m ³	Beton Sınıfı
Tabliye	3,4E10	0,2	2450	C40
Ortaayak kolonları	3,2E10	0,2	2450	C30
Ortaayak temelleri	3,2E10	0,2	2450	C30
Kenarayaklar	3,2E10	0,2	2450	C30
Öngerme çeliği	1,95E11	-	-	-

Akarsın köprüsünün yukarıda belirtilen modelleme kriterleri ve malzeme özellikleri dikkate alınarak oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 2.38’de verilmiştir.



Şekil 2.38. Akarsın Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli

2.3.3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Akarsın Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

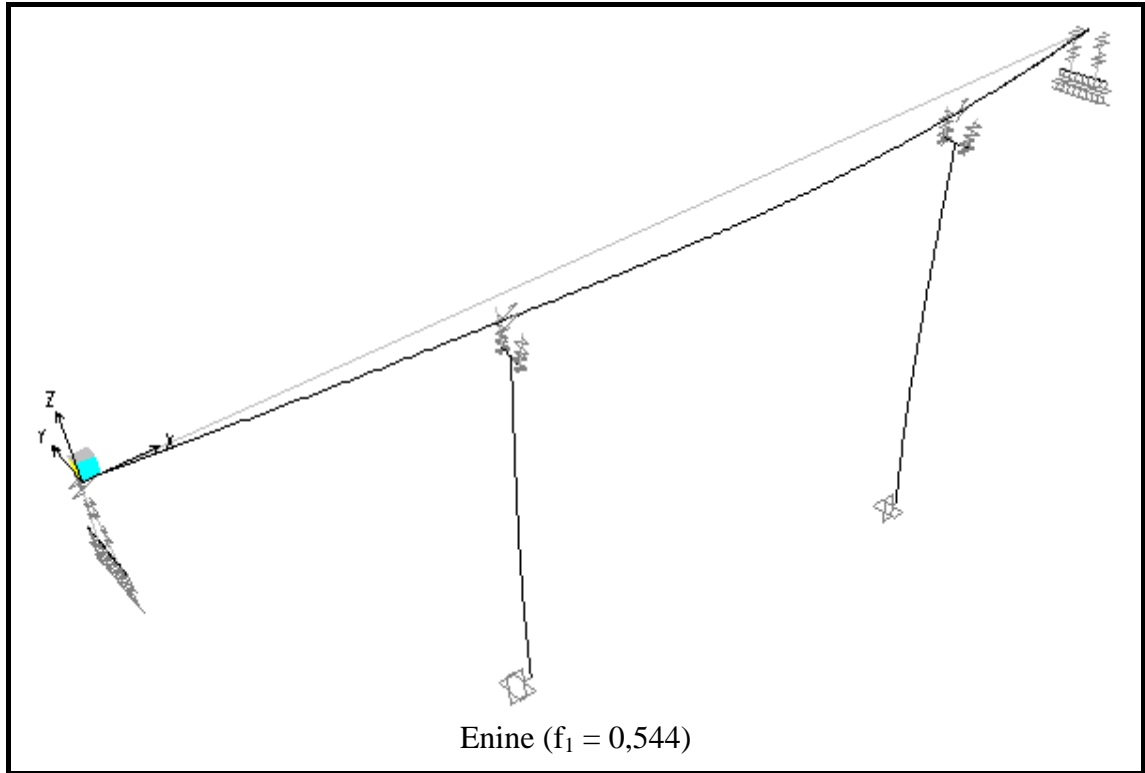
Köprü'nün 3-boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 programında oluşturulduktan sonra modal analiz gerçekleştirilmiş ve köprü teorik dinamik karakteristikleri olan mod şekilleri ve doğal frekans değerleri belirlenmiştir.

Akarsın Köprüsü'nün SAP2000 programı kullanılarak gerçekleştirilen modal analizinden elde edilen ilk yedi moduna ait doğal frekans ve periyot değerleri Tablo 2.6'da verilmiştir. Tablo 2.6'dan görüldüğü gibi köprü'nün ilk yedi doğal frekansı 0,544-2,140 Hz değerleri arasında değişmektedir. Köprü'nün ilk yedi mod şekli Şekil 2.39'da verilmektedir.

Tablo 2.6. Akarsın Köprüsü'nün ilk 7 doğal frekans ve periyotları

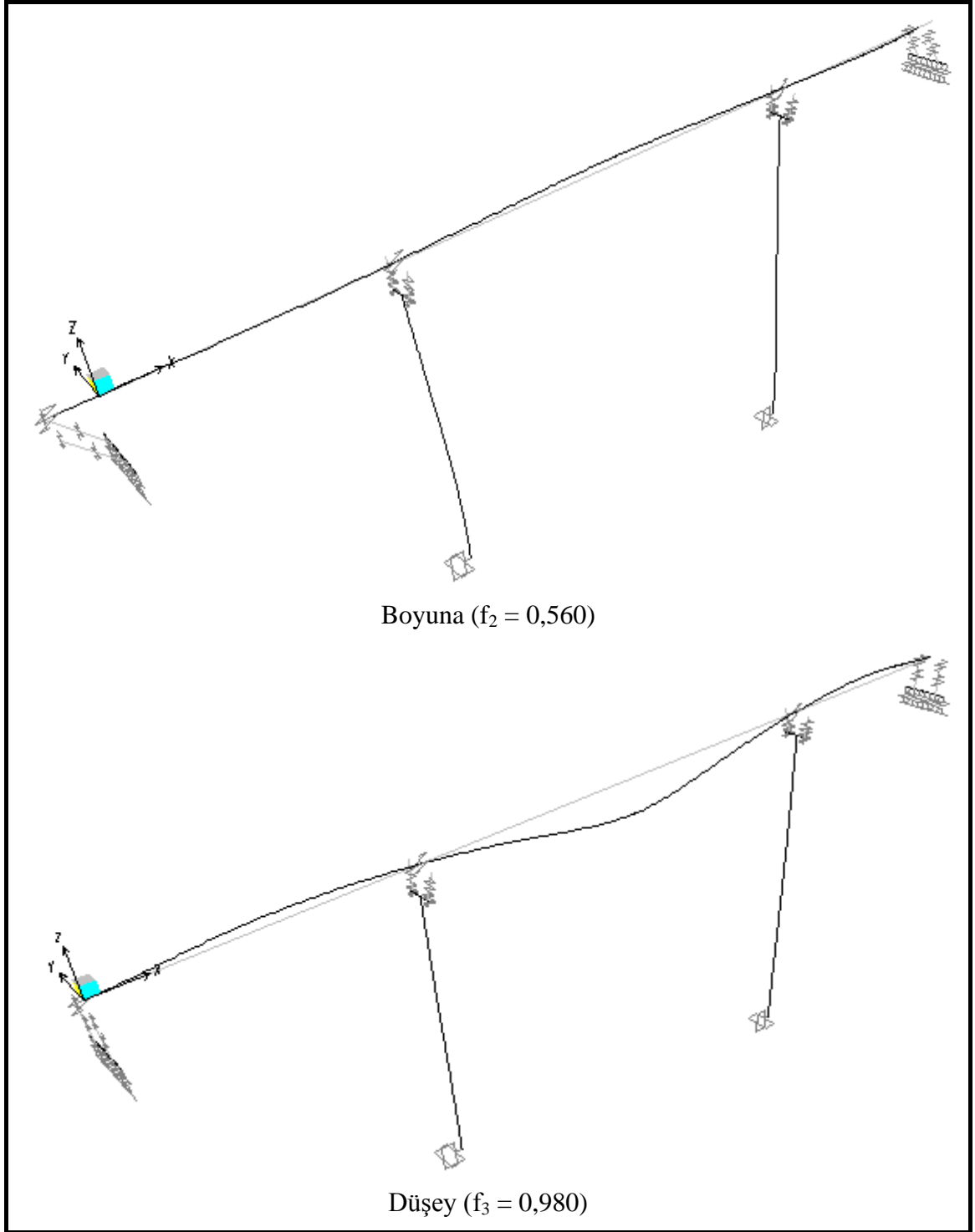
Akarsın Köprüsü ($\approx L=275m$)

Mod No	Frekans (Hz)	Periyot (sn)
1	0,544	1,838
2	0,560	1,786
3	0,980	1,020
4	1,091	0,916
5	1,600	0,625
6	1,730	0,578
7	2,140	0,467

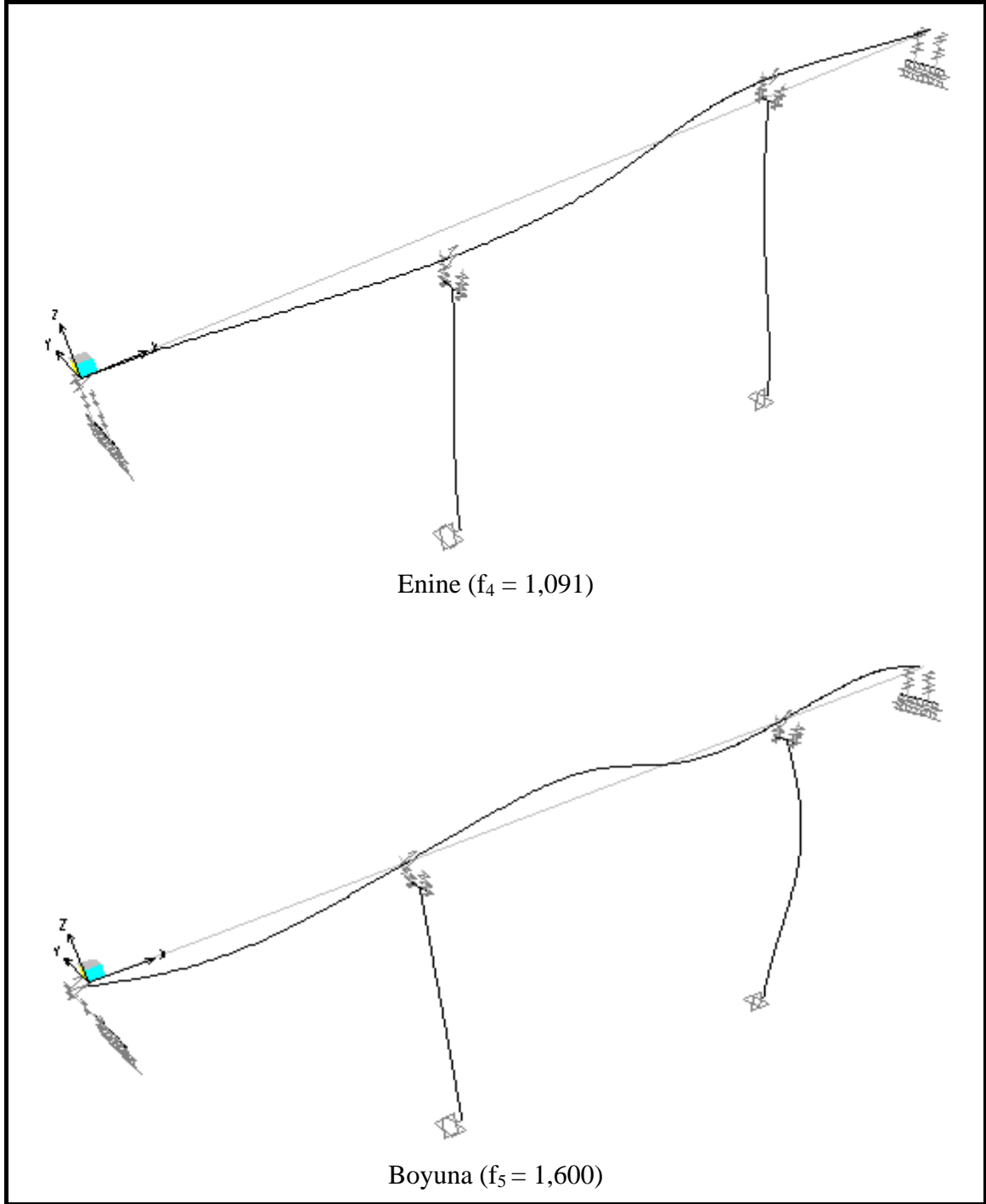


Şekil 2.39. Akarsın Köprüsü'nün analitik olarak elde edilen ilk 7 mod şekli

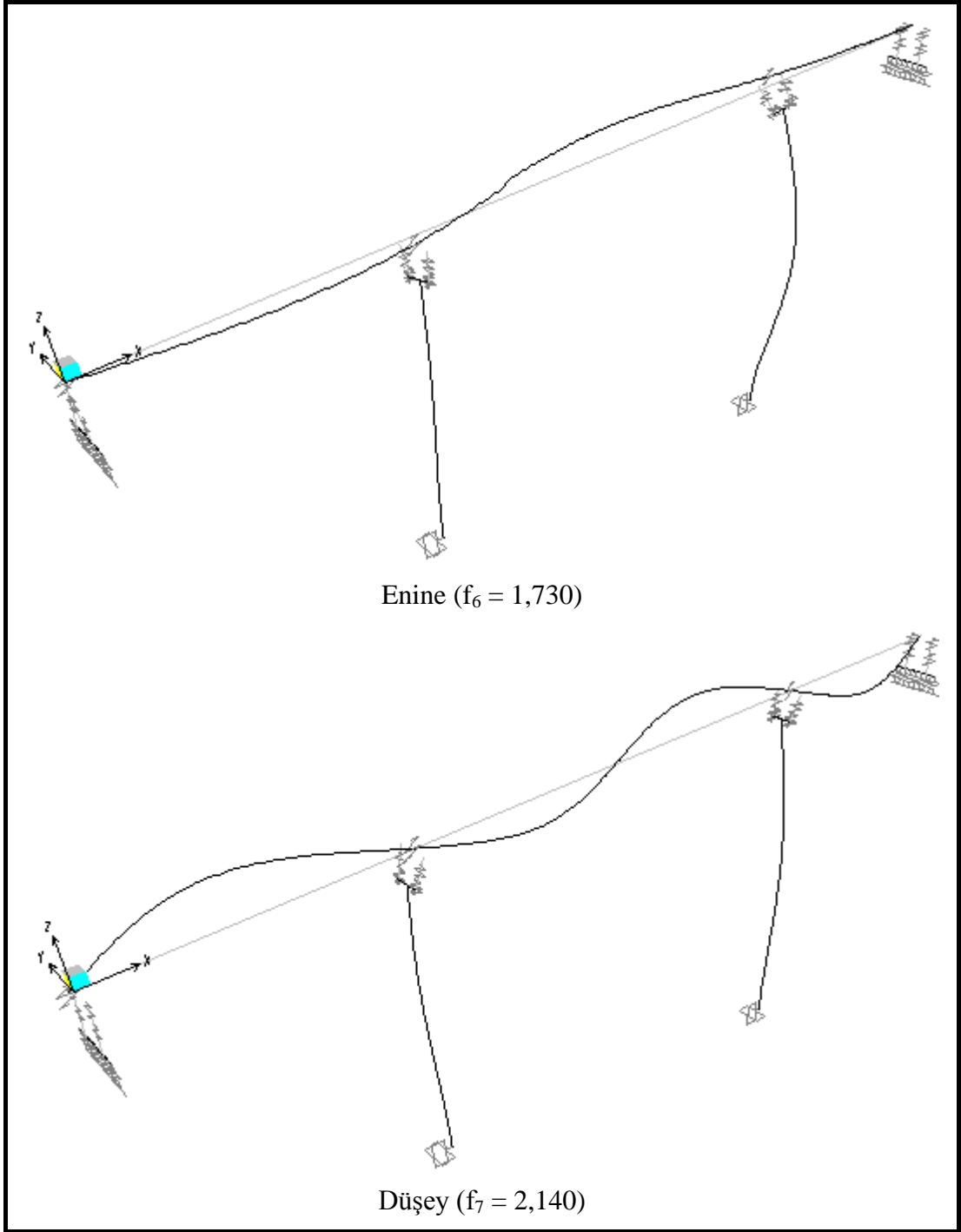
Şekil 2.39'un devamı



Şekil 2.39'un devamı



Şekil 2.39'un devamı

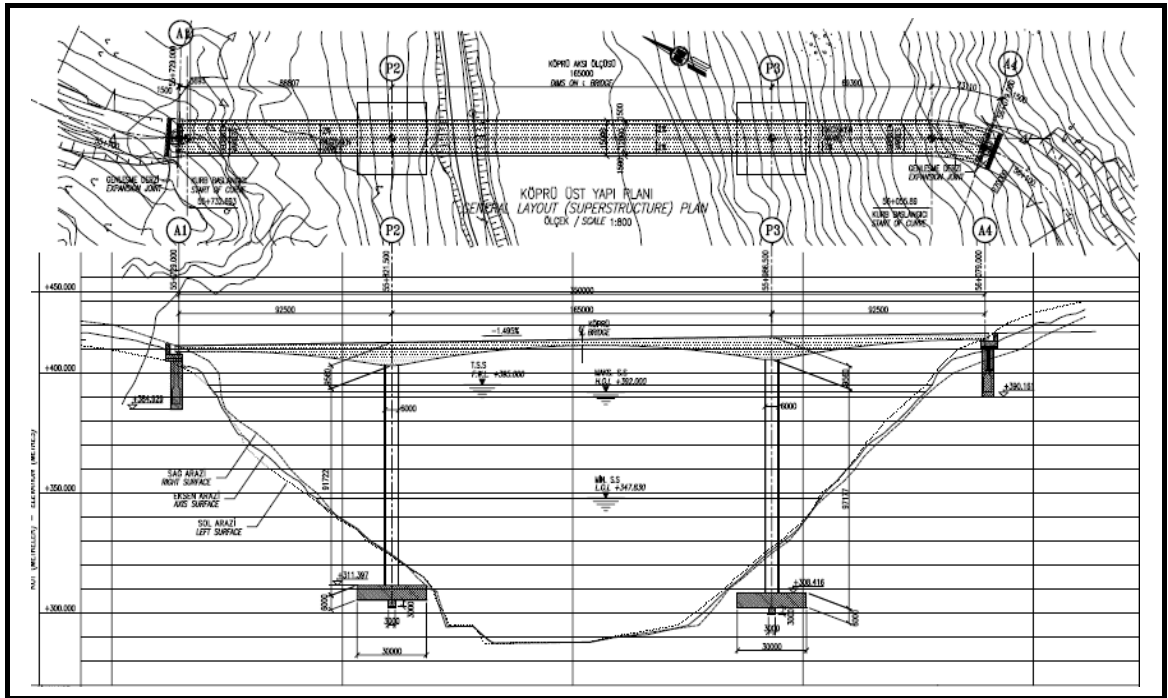


2.4. Budan Köprüsü

Budan Köprüsü genel görünüşü ve vaziyet planı Şekil 2.40 ve Şekil 2.41'de verilmiştir.



Şekil 2.40. Budan Köprüsü



Şekil 2.41. Budan Köprüsü genel vaziyet planı, (DSİ, 2007)

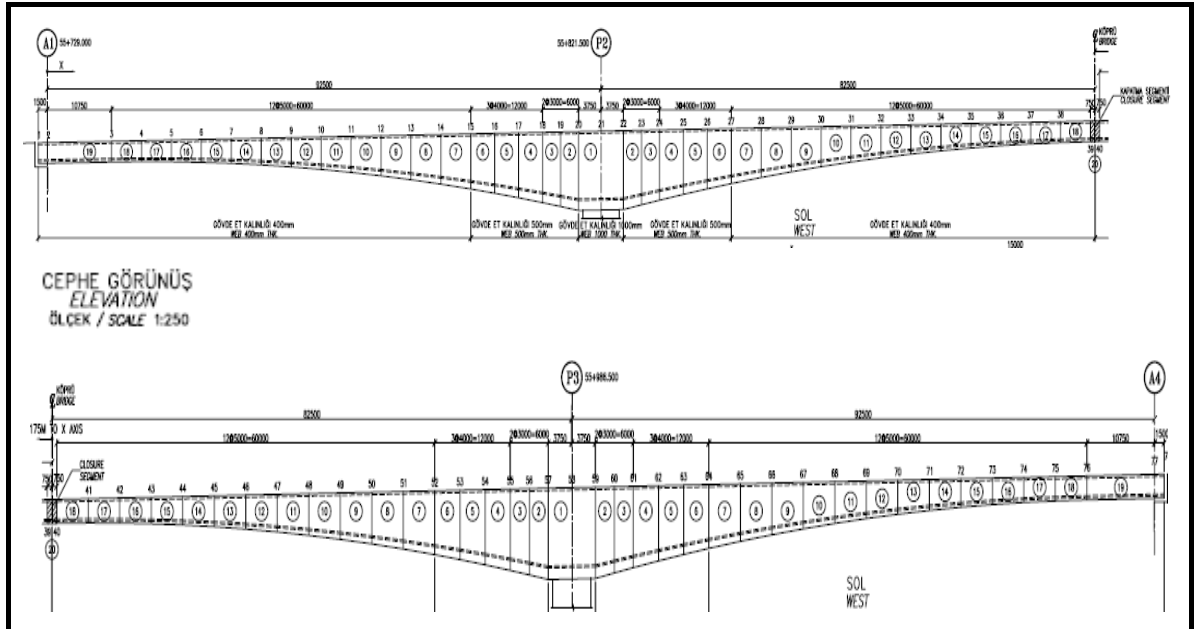
2.4.1. Genel Özellikler

Budan köprüsü 350m uzunluğunda 106,7m yüksekliğinde ve üç açıklıklıdır. Köprünün orta açıklığı 165m, kenar açıklıkları ise 92,5m'dir. Köprü Artvin-Erzurum yolu üzerinde 55 + 729.000 -60 + 079.000km'leri arasında Çoruh Nehri vadisi üzerinde vadinin iki yakasını birbirine bağlamaktadır.

Köprünün iki kenarayağı ve bir orta ayağı vadinin eteklerinde diğer ortaayağı ise kısmen Çoruh Nehri'nin yatağındadır.

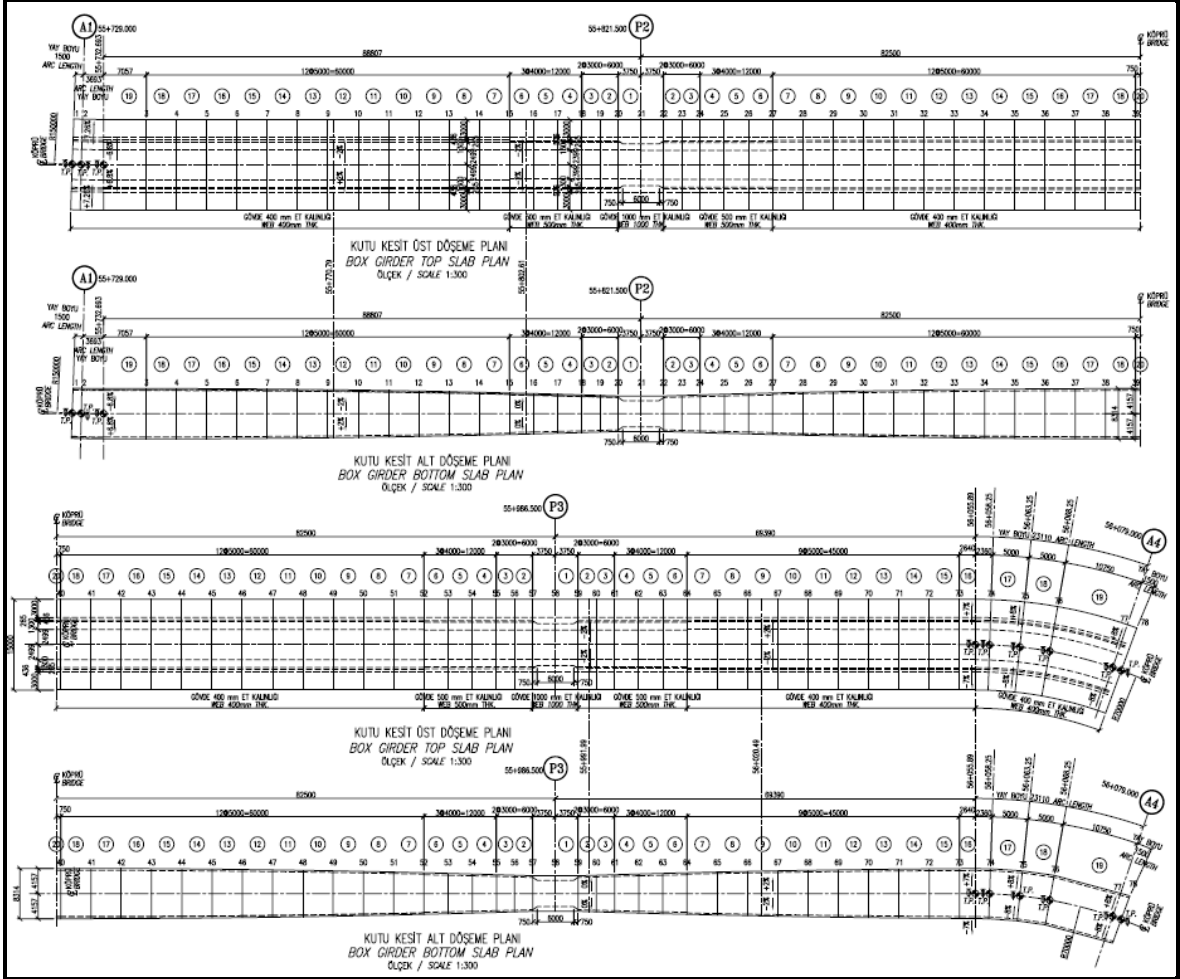
2.4.1.1. Köprü Tabliyesi

Şekil 2.42'de köprü tabliyesinin cephe görünüşü verilmiştir. P2 ve P3 ortaayakları üzerinde birbirlerine doğru başlık anolarıyla beraber 18'er ano, kenarayağlara doğru ise 19 ar ano bulunmaktadır. Başlık anosu olarak adlandırılan 1. anonun uzunluğu 7,5m'dir. Ortaayakların kenarayağlar tarafındaki konsollarının son anoları 10,75m'dir. Diğer anoların uzunlukları ise 3m ile 5m arasında değişir. Her iki orta ayak konsollarının birbirleriyle birleşme noktasında 1,5m uzunluğunda kilit ano bulunur.



Şekil 2.42. Budan Köprüsü tabliye cephe görüntüsü, (DSİ, 2007)

Köprü tabliyesi değişken boyutlu kutu kesittir. Şekil 2.43'te görüldüğü gibi kutu kesitin üst döşeme genişliği köprü tabliyesi boyunca 15m'dir. Kutu kesitin alt döşemesi ortaayaklardan kenarayaklara doğru genişlemektedir. Alt döşeme genişliği P2 ve P3 ortaayakları üzerinde 5,86m iken, kenarayaklar üzerinde 8,31m'dir. Şekil 2.44'te tabliye enkesiti görülmektedir.

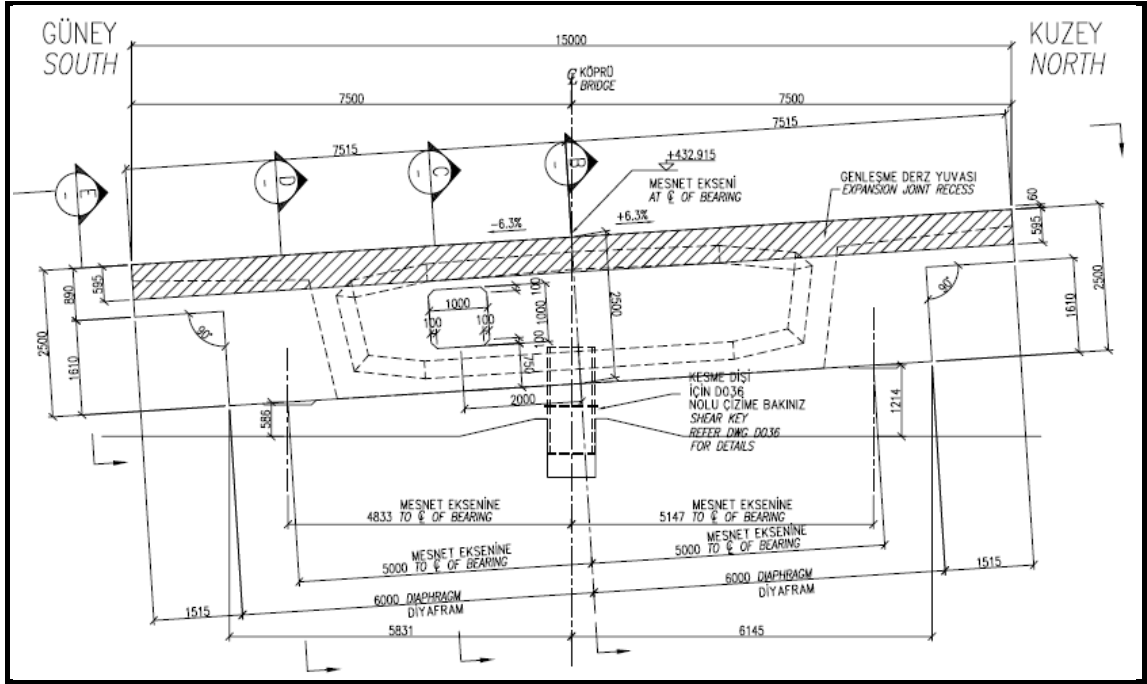


Şekil 2.43. Budan Köprüsü tabliye planı, (DSİ, 2007)

Dengeli konsol tabliye inşaatı sürecinde karşılıklı anoları birbirine germek için üst döşemede kullanılan bütün ön germe halatları başlık anosunun üstünden geçer. Başlık anosu diyafram olarak tasarlanmıştır.

2.4.1.1.2. Kenarayak Uç Diyaframları

Uç diyaframları, değişken boyutlu kutu kesitli köprü tabliyesinin kenarayak tarafındaki uç kısmına sistemi kenar ayağa mesnetleyecek şekilde inşa edilir (Şekil 2.46). 1,5m uzunluğundadır. Tamamen dolu kesitlidir. Ortasında daha sonra köprü tabliyesinin içine girebilmek için yapılmış menteşeli çelik kapı vardır. Üstünde daha sonra yapılacak genleşme derzi montajına uygun boşluk bırakılmıştır. Altında kenarayakla beraber inşa edilen yuvasına girecek olan kesme dişi bulunur.

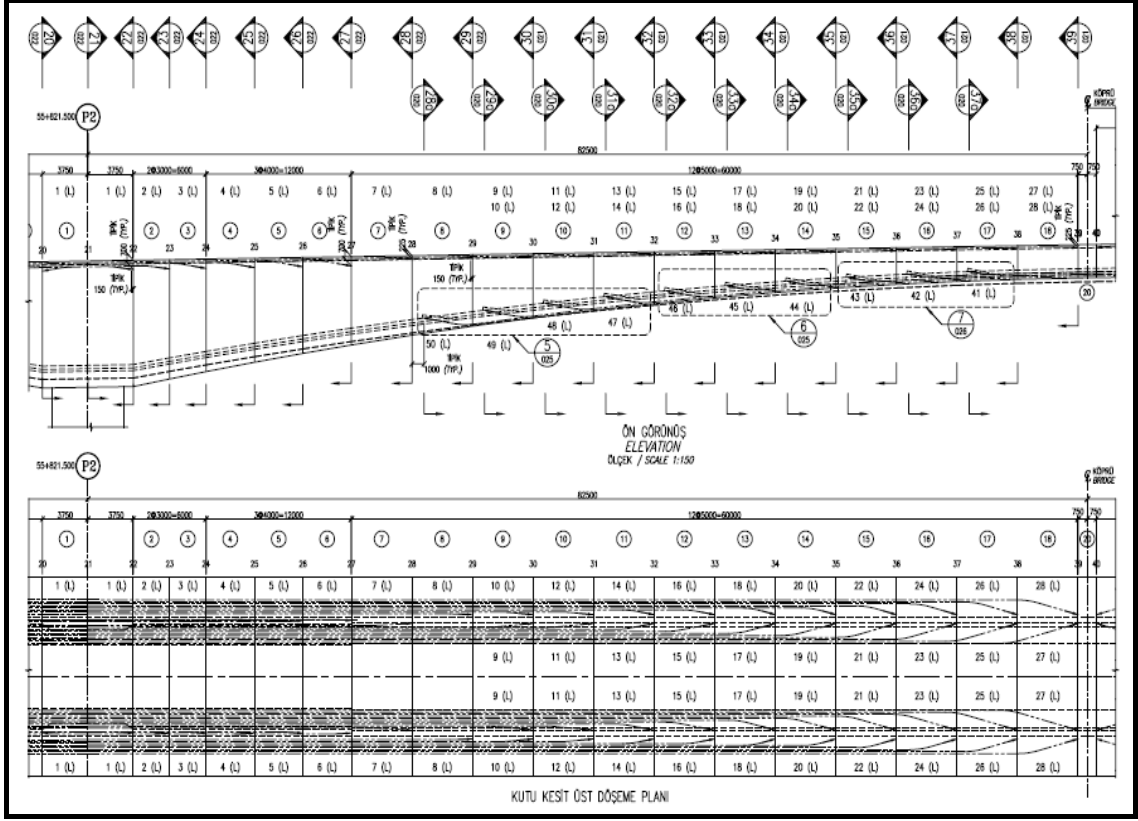


Şekil 2.46. Kenar ayak uç diyaframı genel görünümü, (DSİ, 2007)

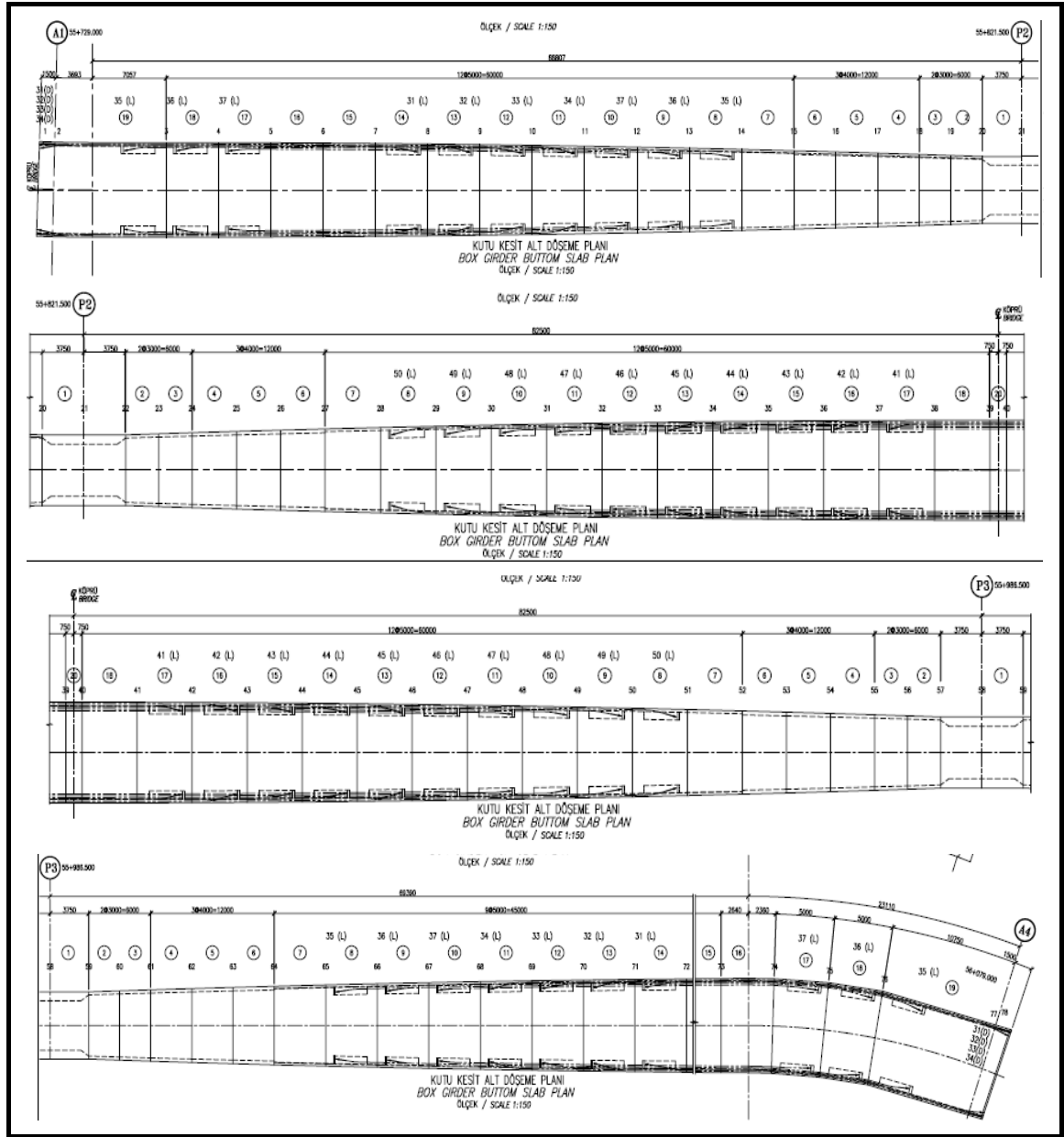
2.4.1.1.3. Ardgerme Halatları Yerleşim Planı

Değişken boyutlu kutu kesitli köprü tabliyesinin üst ve alt döşemelerinde ardgerme halatları bulunmaktadır (Şekil 2.47). Bu halatlar beton dökümünden sonra daha önce kalıp

Şekil 2.47'nin devamı



Alt döşemeden geçen ardgerme halatların montajı segmentlerin inşası bitirilip ortaayak konsolları kenarayakla birleştikten sonra yapılır. Tabliyenin ilk 7 anosunda alt döşemede halat kullanılmamıştır. Alt döşeme halatları 7. anodan itibaren başlar. P2 ayağından kenarayağa doğru tabliyenin alt döşemesinde biri kesitin sağında diğeri solunda olmak üzere 7 şer adet halat bulunmaktadır. Kenarayak tarafındaki konsolun 8.,9. ve 10. anosunun alt döşeme halatları 17.,18. ve 19. ano ile karşılıklı olarak gerilir. 11.,12.,13 ve 14. anolardan gerilen halatlar ise kenarayak diyaframına sabitlenir. P2 ve P3 ayakları arasındaki köprü orta açıklığının alt döşemesinde kutu kesitin sağında ve solunda olmak üzere 10 ar adet halat bulunmaktadır. Bu halatlarla P2 ayağının P3 ayağına doğru olan konsolundaki ve P3 ayağının P2 ayağı tarafındaki konsolundaki 8. ve 17. anolar arasındaki bütün anolar birbirlerine gerilir. P3 ayağının kenarayak tarafındaki halat yerleşimi P2 ayağıyla simetriktir. Alt döşeme halat yerleşimi Şekil 2.48'de gösterilmiştir.

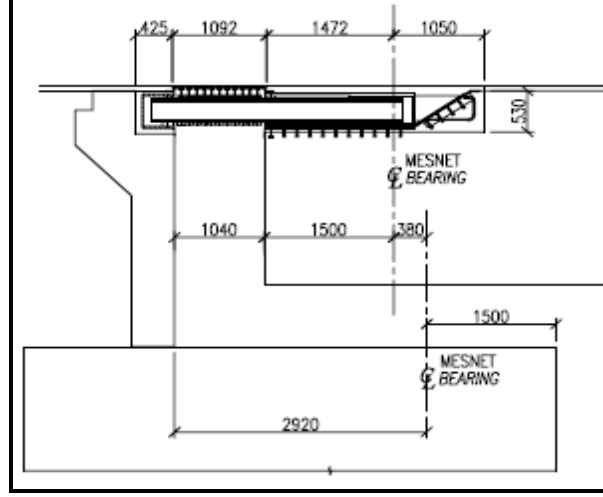


Şekil 2.48. Budan Köprüsü alt döşeme halatları yerleşim planı, (DSİ, 2007)

2.4.1.1.4. Genleşme Derzleri

Köprüde 2 adet genleşme derzi kullanılmıştır (Şekil 2.49). Bu derzler köprü tabliyesinin kenarayaklarla birleştiği yerlerdedir. Derzler 100 yıllık depremlerde oluşacak yer değiştirmelerde yapı elemanlarında ve genleşme derzinin kendisinde hasar oluşmayacak şekilde, 475 yıllık depremlerde oluşan yer değiştirmelerde yapı

elemanlarında hasar oluşturmayacak fakat genişleme derzinin kendisinde hasar oluşabilecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 2.49. Genleşme derzi yerleşimi, (DSİ, 2007)

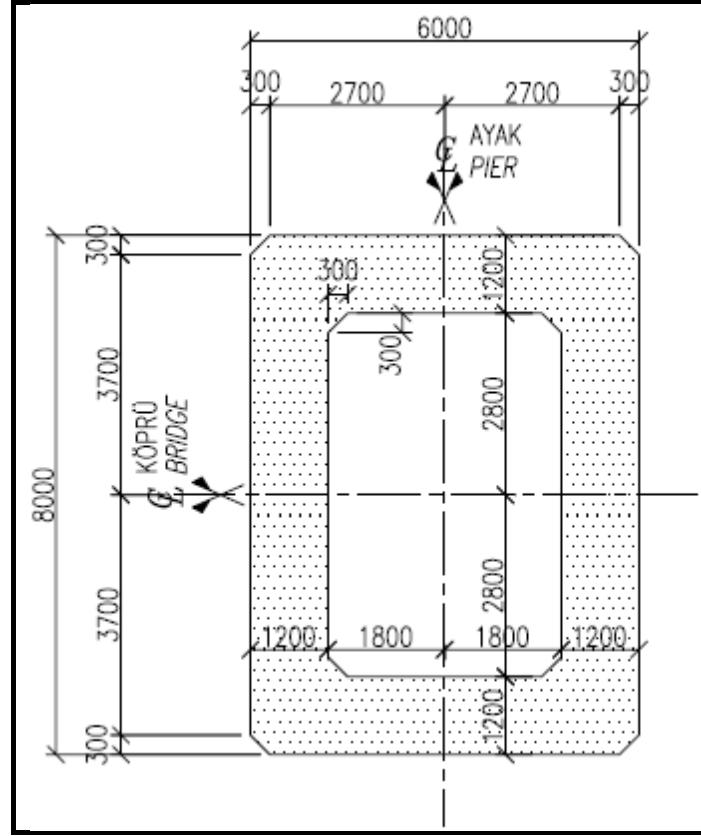
2.4.1.1.5. Mesnetler

Köprüde 4 tane serbest kayar mesnet kullanılmıştır. Bunlar kenarayaklar üzerinde 2 şer adettir. Köprüde sadece boyuna harekete müsaade edilmiştir. 475 yıllık deprem durumunda köprü tabliyesinde oluşacak boyuna yer değiştirme maksimum 760mm'dir. Köprü yapı elemanlarında hasar oluşmayacak şekilde mesnetler dizayn tasarlanmıştır. Enine doğrultudaki hareketin önüne geçmek için kesme dişi kullanılmıştır. Kenarayak uç diyaframının altına yerleştirilen kesme dişi kenarayak üzerinde 2 mesnet arasında inşa edilmiş olan yuvasına oturarak enine hareketin önüne geçilmiştir.

2.4.1.2. Köprü Kolonları

2.4.1.2.1. P2 Kolonu

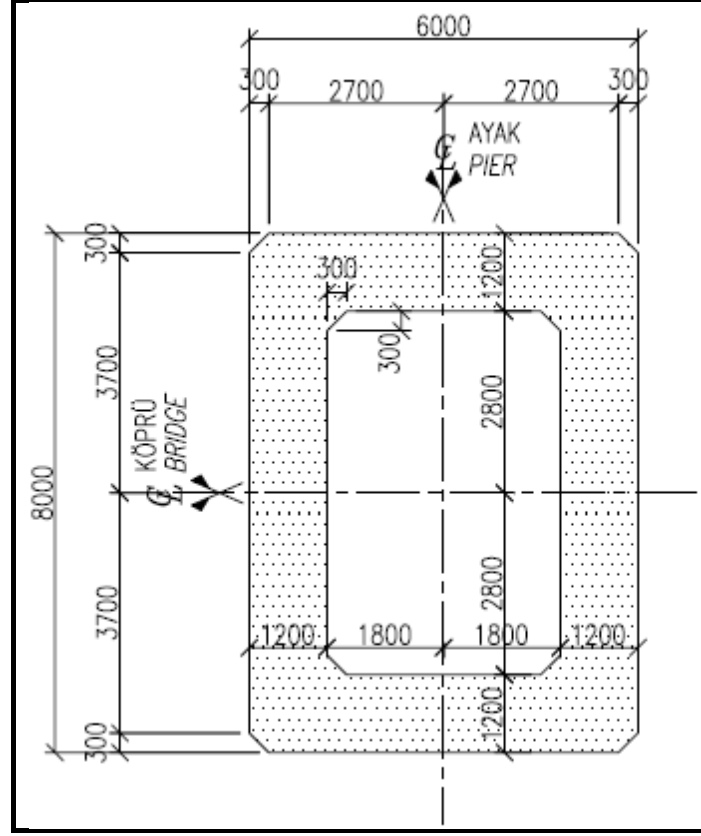
P2 kolonunun yüksekliği 91,72m dir. Kolon 8m x 6m içi boş dikdörtgen kesitlidir. Beton et kalınlığı 120cm'dir. İç ve dış köşelerinde 3cm x 3cm pah vardır. Kolon enkesiti Şekil 2.50'de gösterilmiştir.



Şekil 2.50. P2 ayağı kolon kesiti, (DSİ, 2007)

2.4.1.2.2. P3 Kolonu

P3 kolonunun yüksekliği 97,17m'dir. Kolon 8m x 6m içi boş dikdörtgen kesitlidir. Beton et kalınlığı 120cm'dir. İç ve dış köşelerinde 3cm x 3cm pah vardır. Kolon enkesiti Şekil 2.51'de gösterilmiştir.



Şekil 2.51. P3 ayağı kolon kesiti, (DSİ, 2007)

2.4.1.3. Köprü Temelleri

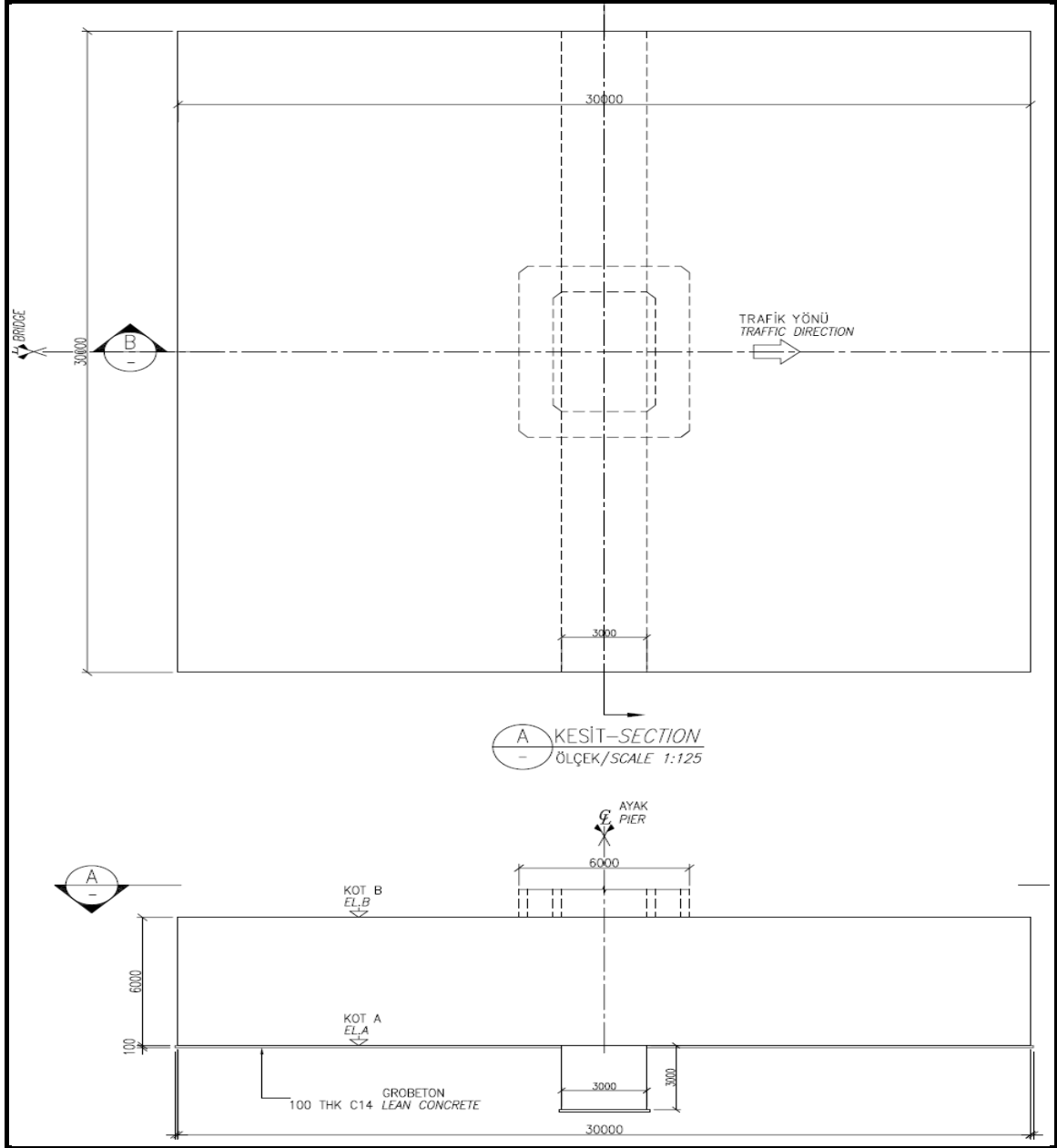
2.4.1.3.1. P2 Temeli

30m x 30m boyutlarında 5,5m yüksekliğinde kare şeklindedir. Temelin ortasında köprü eksenine dik istikamette temel boyunca devam eden kesme dişi bulunmaktadır. Kesme dişinin genişliği 3m'dir (Şekil 2-52).

2.4.1.3.2. P3 Temeli

30m x 30m boyutlarında 6m yüksekliğinde kare şeklindedir. Temelin ortasında köprü eksenine dik istikamette temel boyunca devam eden kesme dişi bulunmaktadır. Kesme dişinin genişliği 3m'dir.

P2 ve P3 temellerine ait kesitler ve plan görüntüsü aşağıdaki Şekil 2.52'de verilmiştir.

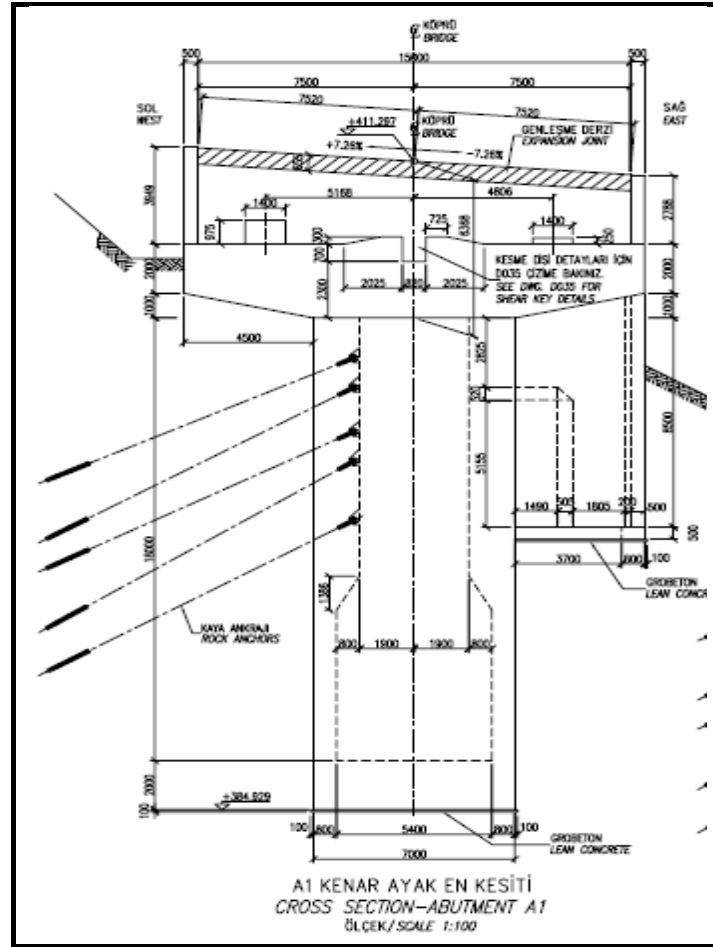


Şekil 2.52. P2 ve P3 temelleri plan ve kesitleri, (DSİ, 2007)

2.4.1.4. Kenarayaklar

2.4.1.4.1. A1 Kenarayağı

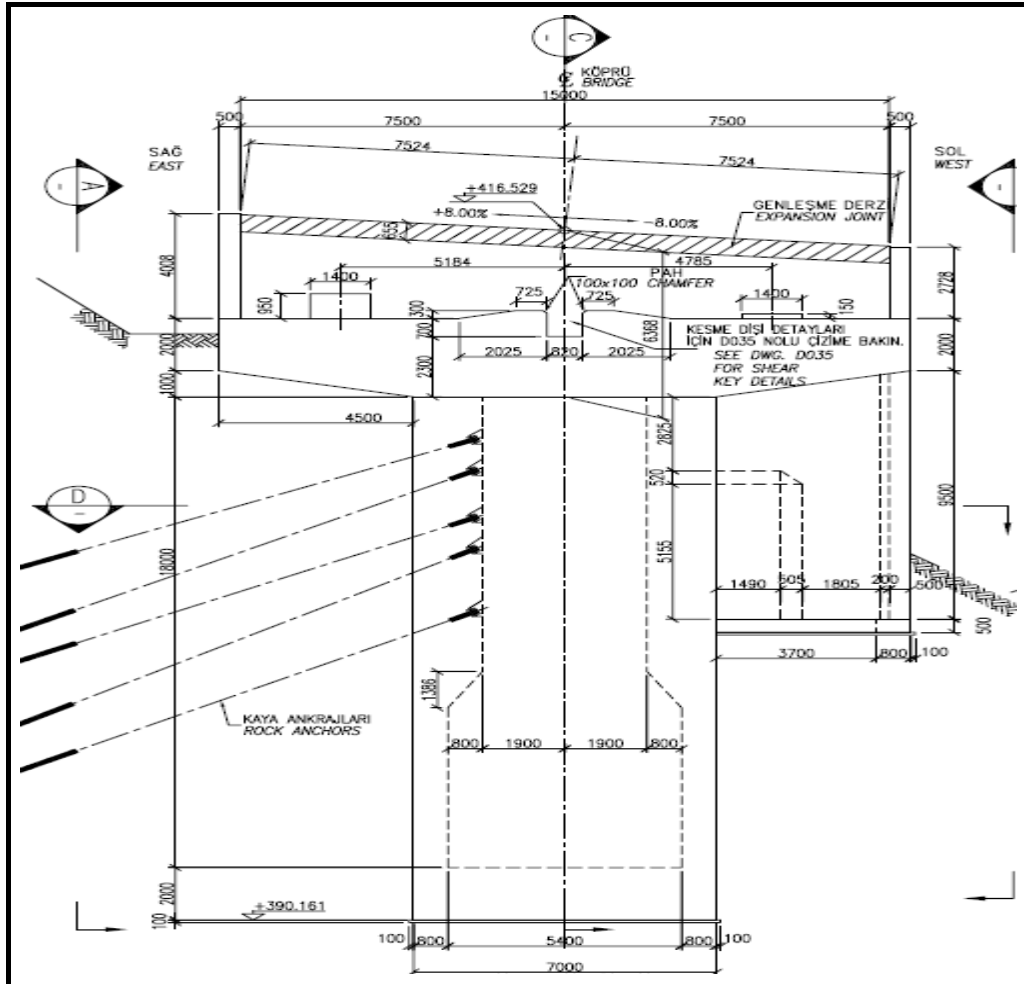
A1 kenarayağının temeli 7m x 5m boyutlarında, 2m yüksekliğindedir. Temelin üzerine içi boş basık silindir kesitli 18m yüksekliğinde şaft şeklindeki kolon inşa edilmiştir. Kolon betonunun et kalınlığı kolonun 6.metresine kadar 80cm'dir. 6.metreden sonra 160cm'ye çıkar. Kenarayak kolon içinden yapılan kaya ankrajlarıyla sabitlenmiştir. Kolonun üzerine 15m genişliğindeki başlık kirişi inşa edilir. Bu yapılan başlık kirişinin üzerine mesnetler konulmuş ve ortaayak konsollarıyla kenarayağı birleştirecek olan uç diyaframı bu mesnetlerin üzerine oturmuştur. A1 kenarayağının genel görünümü ve boyutları aşağıdaki Şekil 2.53'te verilmiştir.



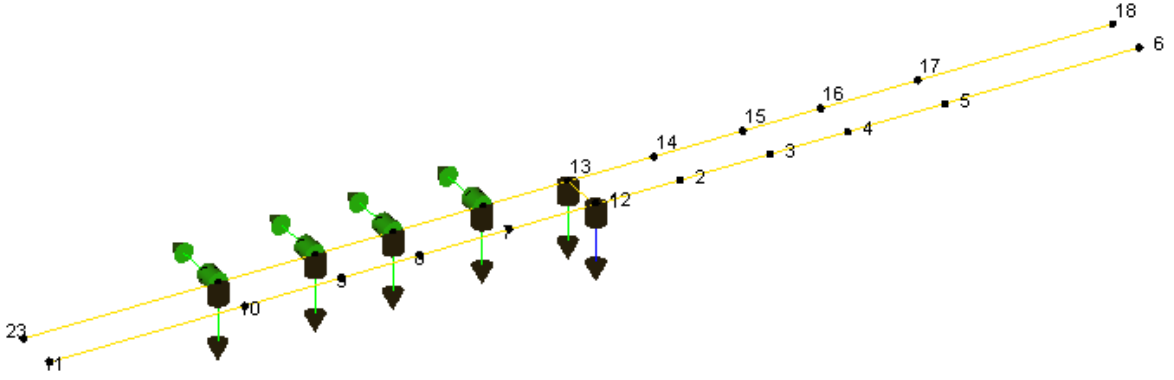
Şekil 2.53. A1 kenar ayağı genel görünümü, (DSİ, 2007)

2.4.1.4.2. A4 Kenar Ayağı

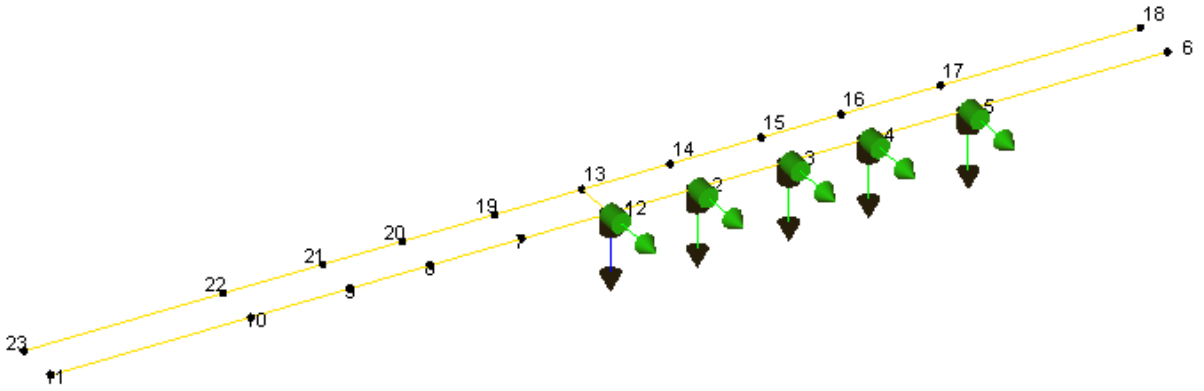
A4 kenar ayağının temeli 7m x 5m boyutlarında, 2m yüksekliğindedir. Temelin üzerine içi boş basık silindir kesitli 18m yüksekliğinde şaft şeklindeki kolon inşa edilmiştir. Kolon betonunun et kalınlığı kolonun 6.metresine kadar 80cm'dir. 6.metreden sonra 160cm'ye çıkar. Kenar ayak kolon içinden yapılan kaya ankrajlarıyla sabitlenmiştir. Kolonun üzerine 15m genişliğindeki başlık kirişi inşa edilmiştir. Bu yapılan başlık kirişinin üzerine mesnetler koyulmuş ve orta ayak konsollarıyla kenarayağı birleştirecek olan uç diyaframı bu mesnetlerin üzerine oturmuştur. A4 kenarayağının genel görünümü ve boyutları Şekil 2.54'te verilmiştir.



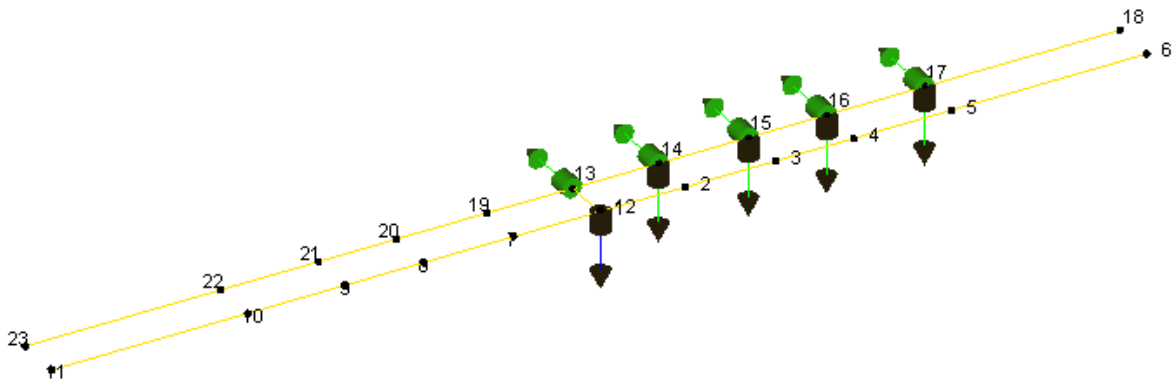
Şekil 2.54. A4 kenar ayağı genel görünümü, (DSİ, 2007)



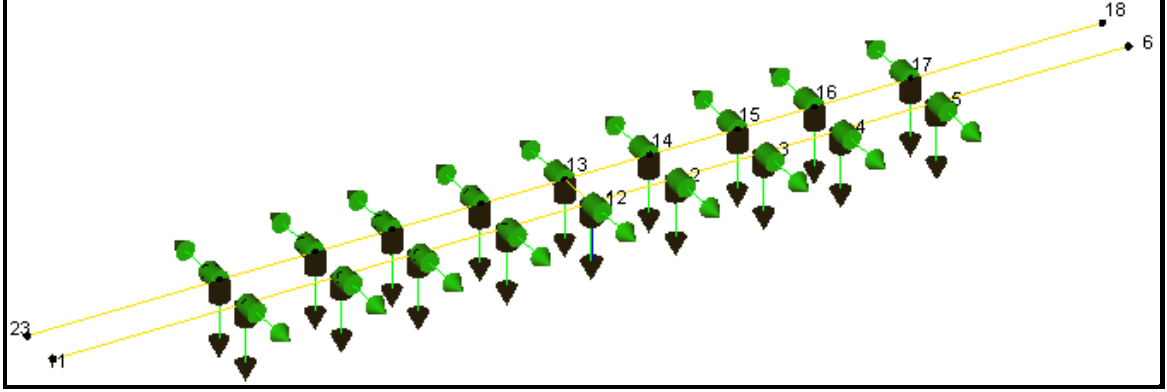
Üçüncü Ölçüm Testi: Üçüncü ölçüm Köprü'nün Artvin-Erzurum istikametine göre sağ yanından ve Erzurum tarafından yapılmıştır. Düşey ve enine doğrultuda olmak üzere toplam 10 adet ivmeölçer daha önceden belirlenen noktalara yerleştirilmiştir.



Dördüncü Ölçüm Testi: Dördüncü ölçüm Köprü'nün Artvin-Erzurum istikametine göre sol yanından ve Erzurum tarafından yapılmıştır. Düşey ve enine doğrultuda olmak üzere toplam 10 adet ivmeölçer daha önceden belirlenen noktalara yerleştirilmiştir.



Köprünün tümü için kullanılan ivmeölçer yerleşim planı Şekil 2.55'te verilmektedir. Ölçüm sırasında çekilen resimler Şekil 2.56'da gösterilmektedir.

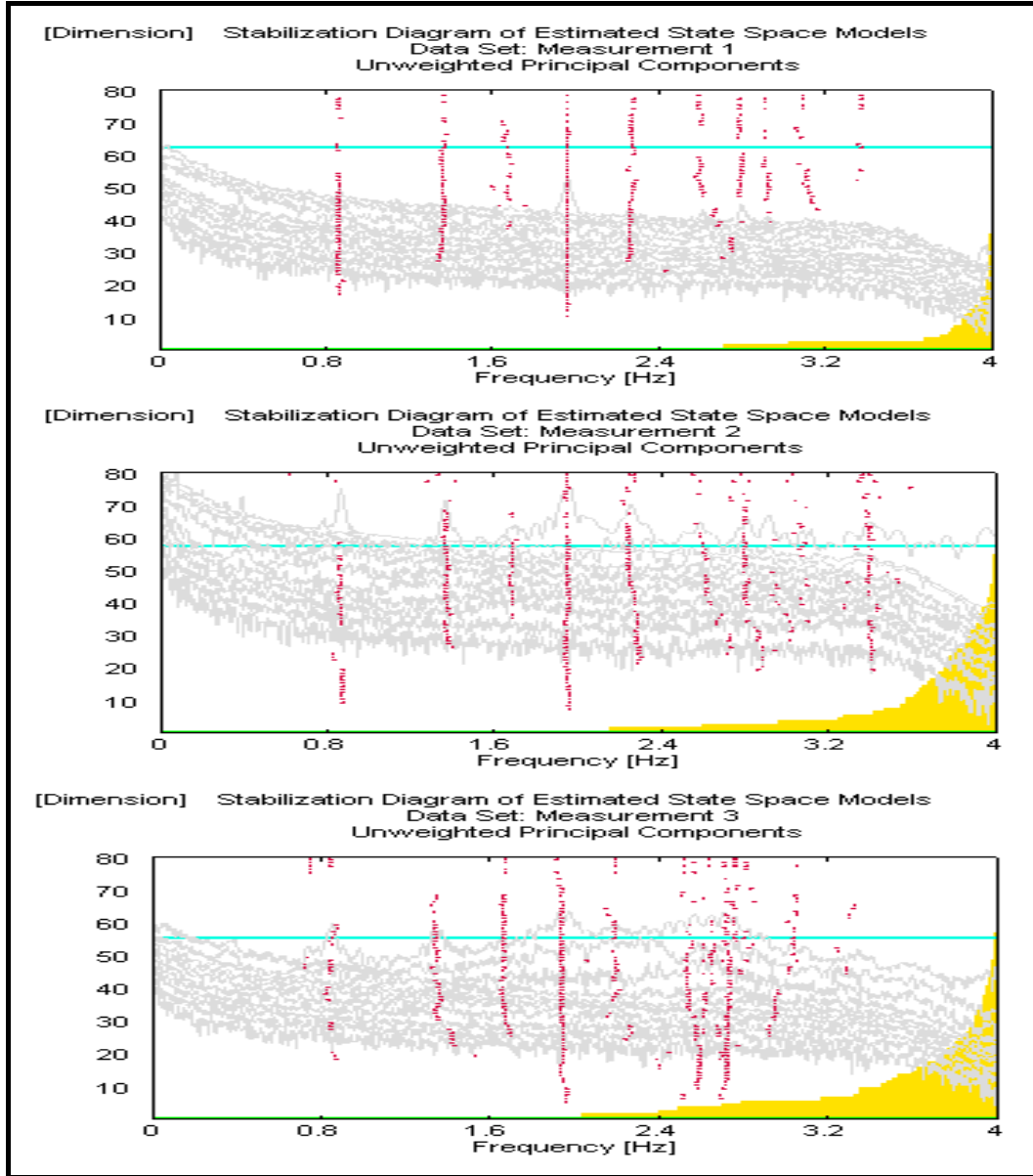


Şekil 2.55. Budan Köprüsü'nün çevresel titreşim testleri için kullanılan ivmeölçer yerleşim planları



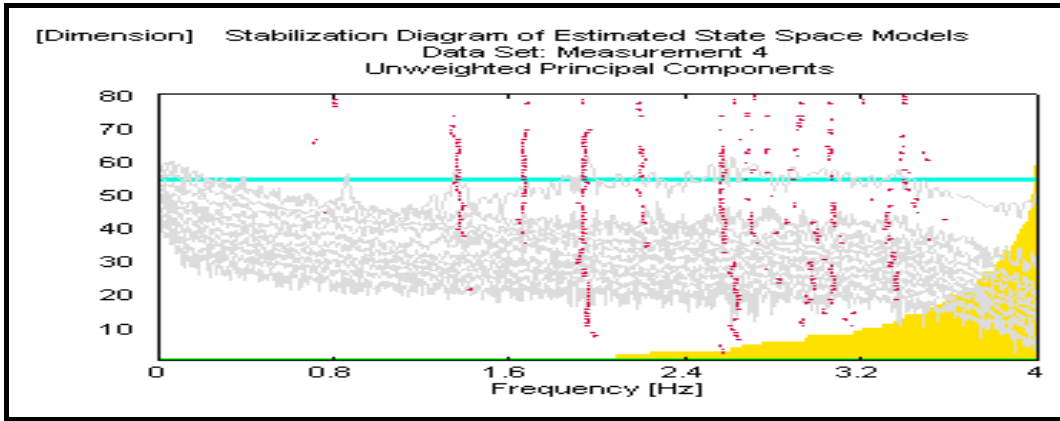
Şekil 2.56. Budan Köprüsü'nde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar

Budan Köprüsü'ne uygulanan dört farklı çevresel titreşim testinden toplanan sinyallerin GFTAA Yöntemine göre ayrıştırılması sonucu her bir ölçüm adımı için elde edilen tekil değerler Şekil 2.57'de verilmiştir.

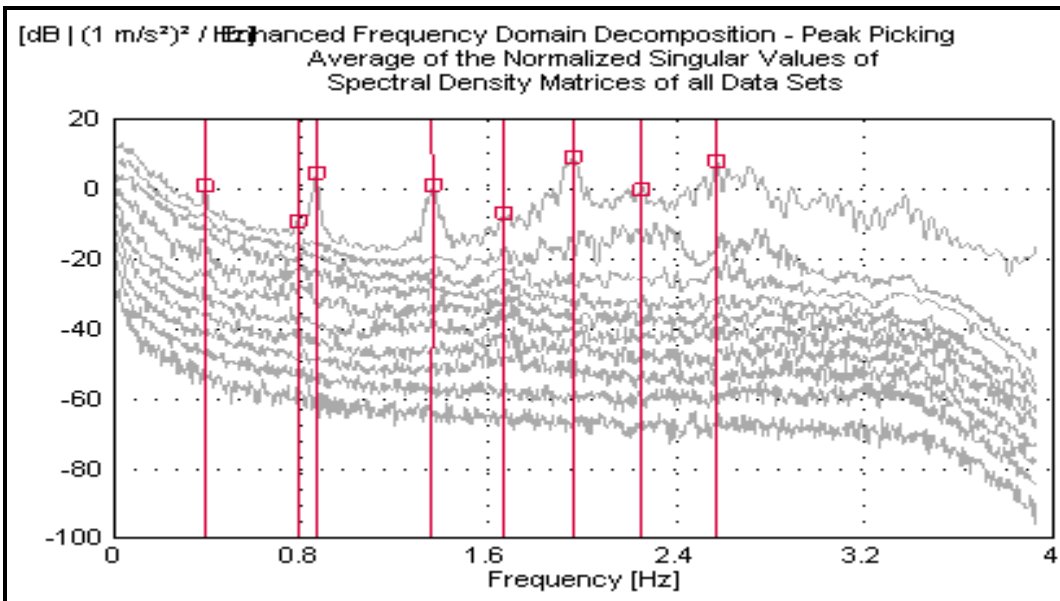


Şekil 2.57. Budan Köprüsü'nde yapılan dört ölçümden elde edilen stabilizasyon diagramları

Şekil 2.57'nin devamı



Her bir ölçüm adımı sonucunda elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ortalamaları Şekil 2.58'de verilmiştir.



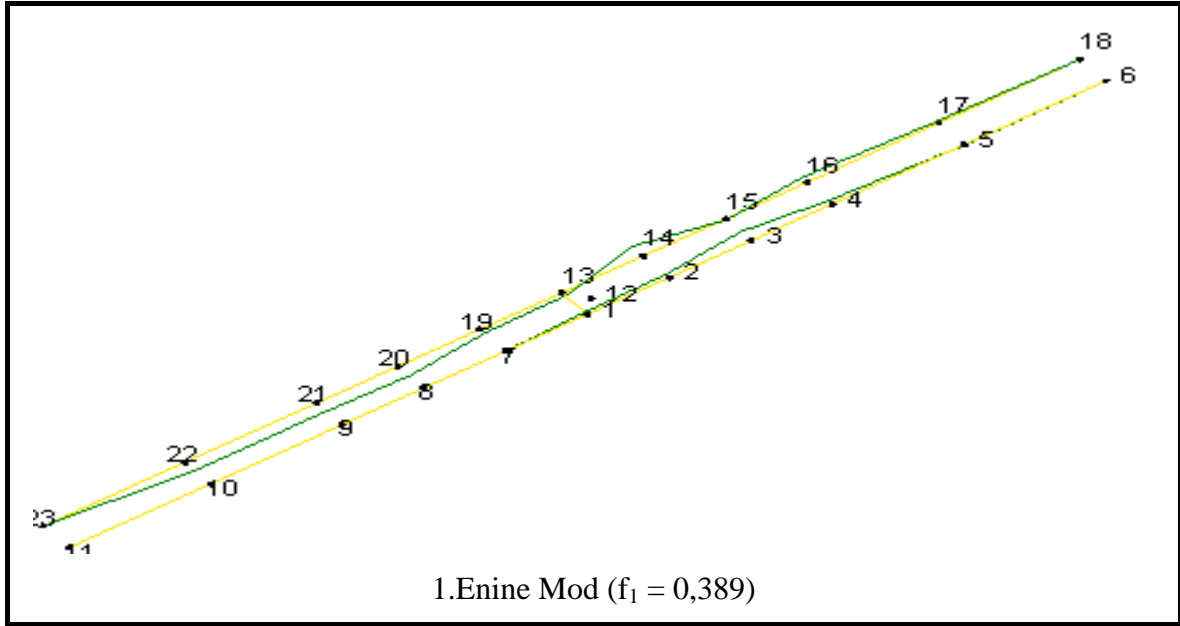
Şekil 2.58. Geliştirilmiş frekans tanım aralığında ayrıştırma yöntemi ile elde edilen tekil değerler

Budan Köprüsüne ait ilk yedi mod için frekans değerleri ve sönüm oranları Tablo 2.7'de verilmiştir. İlk yedi frekansın 0,389 -2,254 Hz. arasında olduğu, sönüm oranı değerlerinin ise %1,398-0,338 arasında değiştiği görülmektedir.

Tablo 2.7. Budan Köprüsü'nün ilk yedi doğal frekansı ve modal sönüm oranı

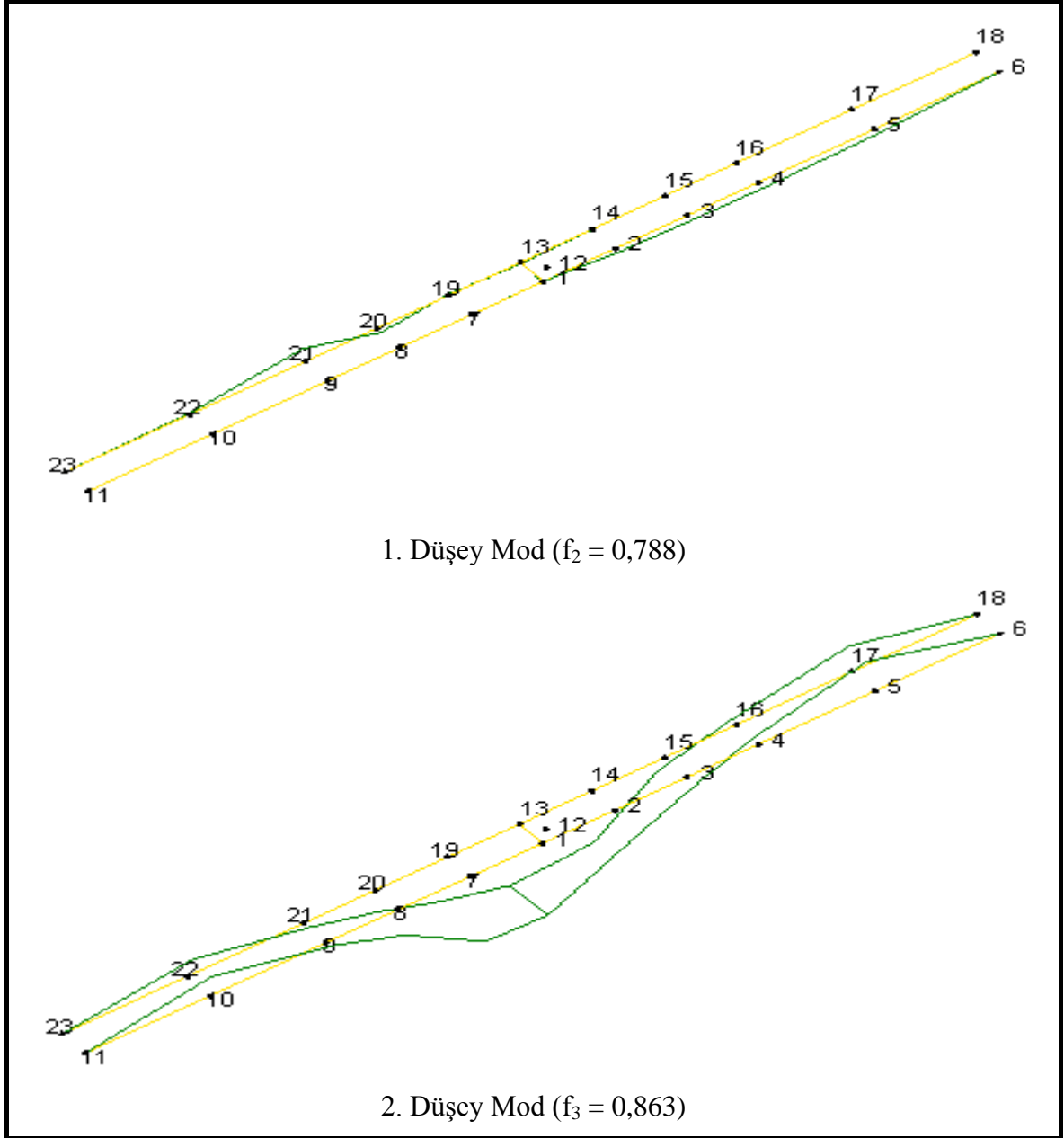
Mod No	Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı
1	0,389	1,398
2	0,788	0,691
3	0,863	0,766
4	1,354	0,737
5	1,664	0,251
6	1,958	0,829
7	2,254	0,338

Budan Köprüsü'ne uygulanan deneysel ölçüm testlerinden GFTAA Yöntemine göre elde edilen mod şekilleri Şekil 2.59'da verilmiştir.

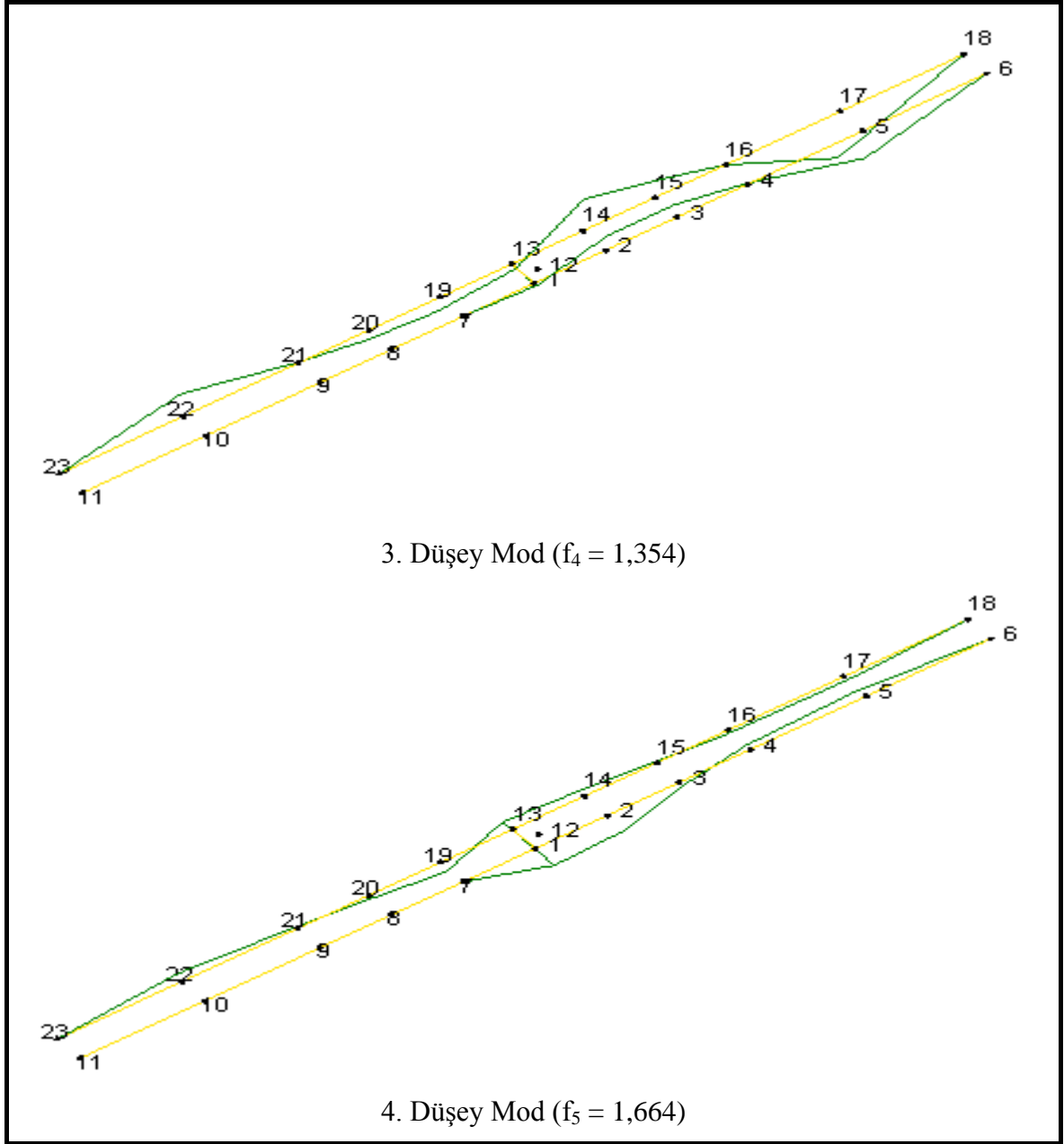


Şekil 2.59. Budan Köprüsü'nün çevresel titreşim yöntemi ile elde edilen mod şekilleri

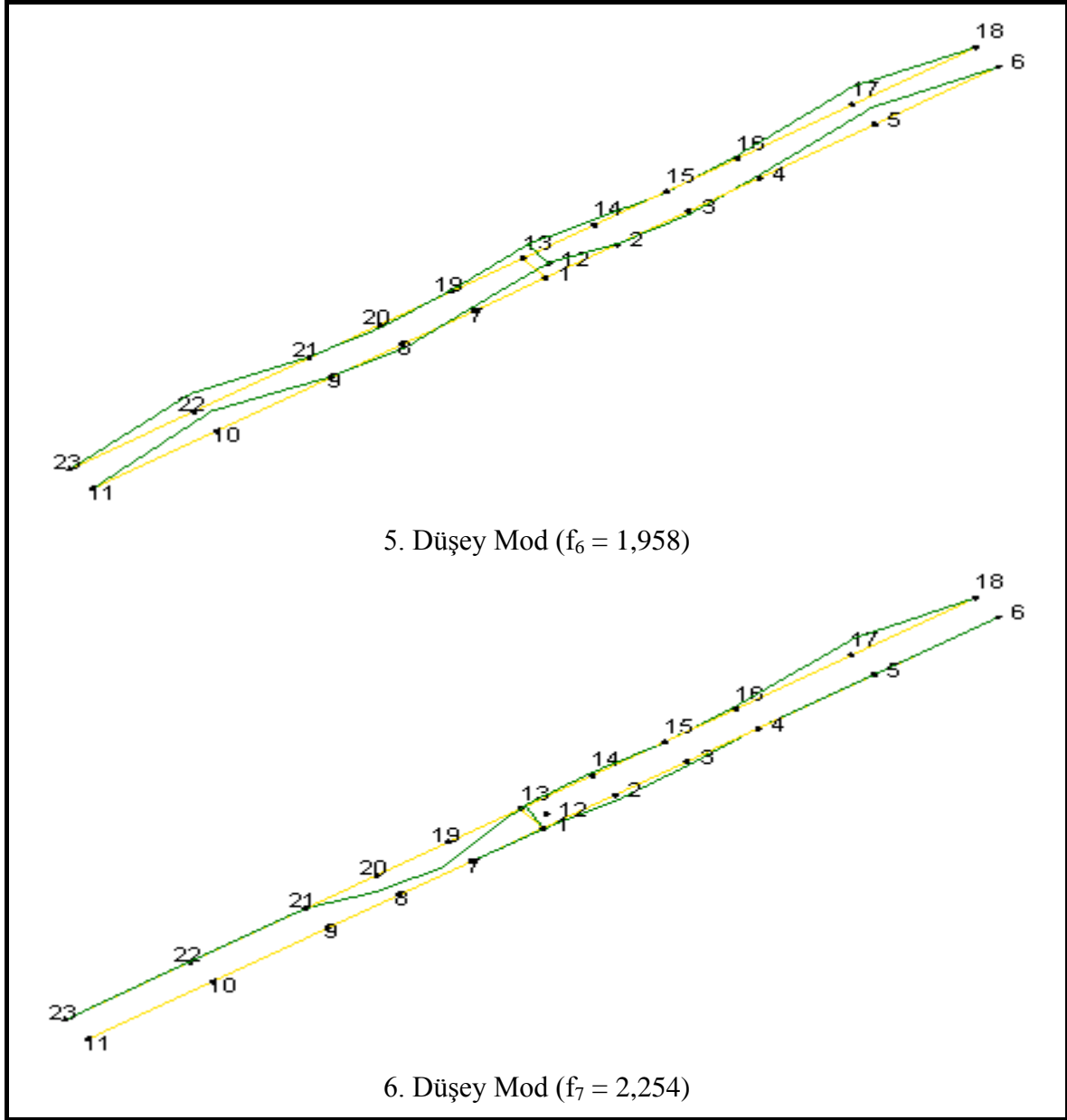
Şekil 2.59'un devamı



Şekil 2.59'un devamı



Şekil 2.59'un devamı



2.4.3. Budan Köprüsü'nün Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

2.4.3.1. Köprü'nün Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli

Budan Köprüsü'nün teorik dinamik karakteristiklerini (doğal frekanslar ve mod şekilleri) belirlemek için köprü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 (SAP2000,

2008) programı kullanılarak ve aşağıda belirtilen modelleme kriterleri dikkate alınarak oluşturulmuştur.

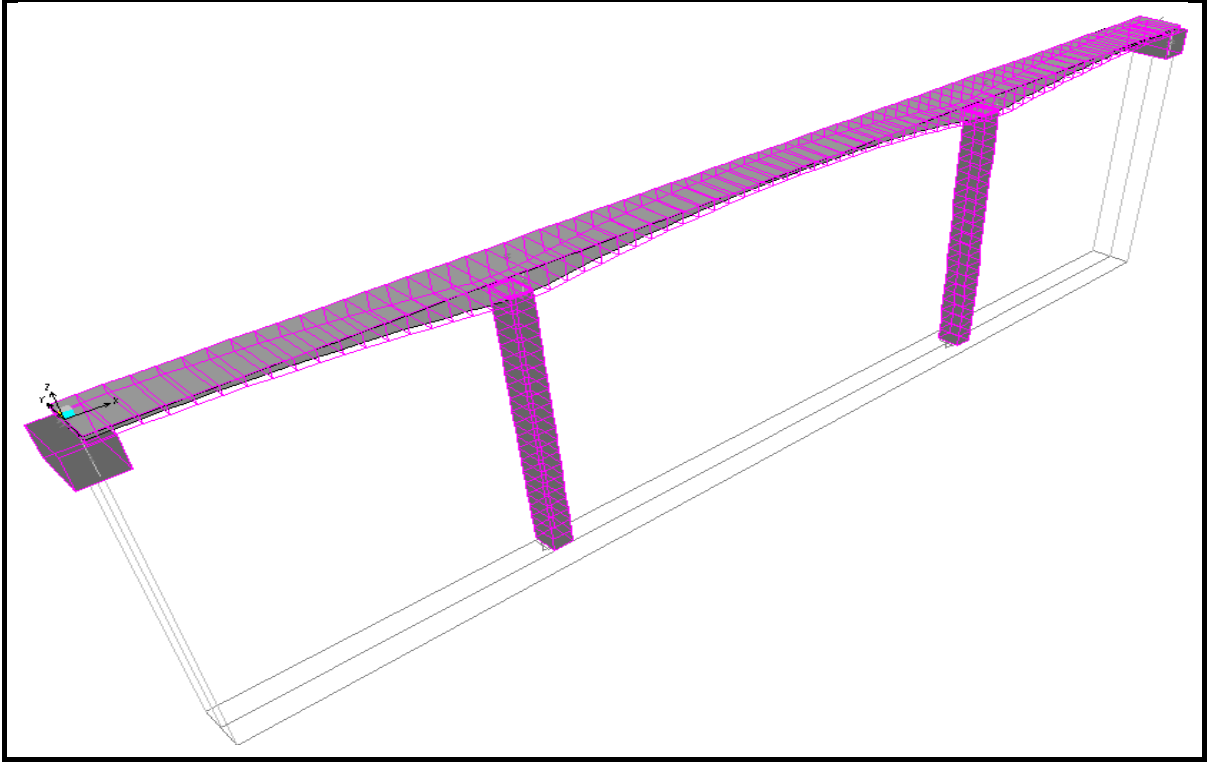
- Köprü SAP2000 programının “Bridge” sekmesi kullanılarak modellenmiştir. Değişken kutu kesitli tabliye boyutları parametrik varyasyonlar tanımlanarak proje verilerine göre çizilmiştir. Ortaayaklarda ve tabliyede segment boyları 5m olarak tanımlanmıştır.
- Ortaayaklarla tabliyenin birleşimleri projede olduğu gibi ankastre olarak tanımlanmış olup, tabliye birleşiminden önceki son 1m leri dolu kesittir.
- Kenarayakların ve ortaayakların köprü tabliyesi ile birleşimlerinde 1m. kalınlığında diyaframlar tanımlanmıştır.
- Kutu kesitli tabliyenin üstünde kullanılan öngerme halatları ve altında kullanılan ardgerme halatları proje verilerine uygun boy ve sayıda tanımlanmıştır.
- Kenarayak mesnetleri belli rijitliklere sahip yaylarla tanımlanmıştır. Kenarayakların düşey ve enine doğrultuda serbestlikleri tamamen tutulmuştur. Boyuna doğrultudaki hareketler için yay rijitliği 50000 kN/m olarak belirlenmiştir.

Köprünün modellenmesi ve analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.8’de verilmiştir.

Tablo 2.8. Budan Köprüsü’nün sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri

Eleman	Elastisite Modülü N/m ²	Poisson Oranı -	Yoğunluk Kg/m ³	Beton Sınıfı
Tabliye	3,4E10	0,2	2450	C40
Ortaayak kolonları	3,2E10	0,2	2450	C30
Ortaayak temelleri	3,2E10	0,2	2450	C30
Kenarayaklar	3,2E10	0,2	2450	C30
Öngerme çeliği	1,95E11	-	-	-

Budan köprüsünün yukarıda belirtilen modelleme kriterleri dikkate alınarak oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 2.60’da verilmiştir.



Şekil 2.60. Budan Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli

2.4.3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Budan Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Köprü'nün 3-boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 programında oluşturulduktan sonra modal analiz gerçekleştirilmiş ve köprü teorik dinamik karakteristikleri olan mod şekilleri ve doğal frekans değerleri belirlenmiştir.

Budan Köprüsü'nün SAP2000 programı kullanılarak gerçekleştirilen modal analizinden elde edilen ilk yedi moduna ait doğal frekans ve periyot değerleri Tablo 2.9'da verilmiştir. Tablo 2.9'dan görüldüğü gibi köprü'nün ilk yedi doğal frekansı 0,371-1,743 Hz değerleri arasında değişmektedir. Köprü'nün ilk yedi mod şekli Şekil 2.61'de verilmektedir.

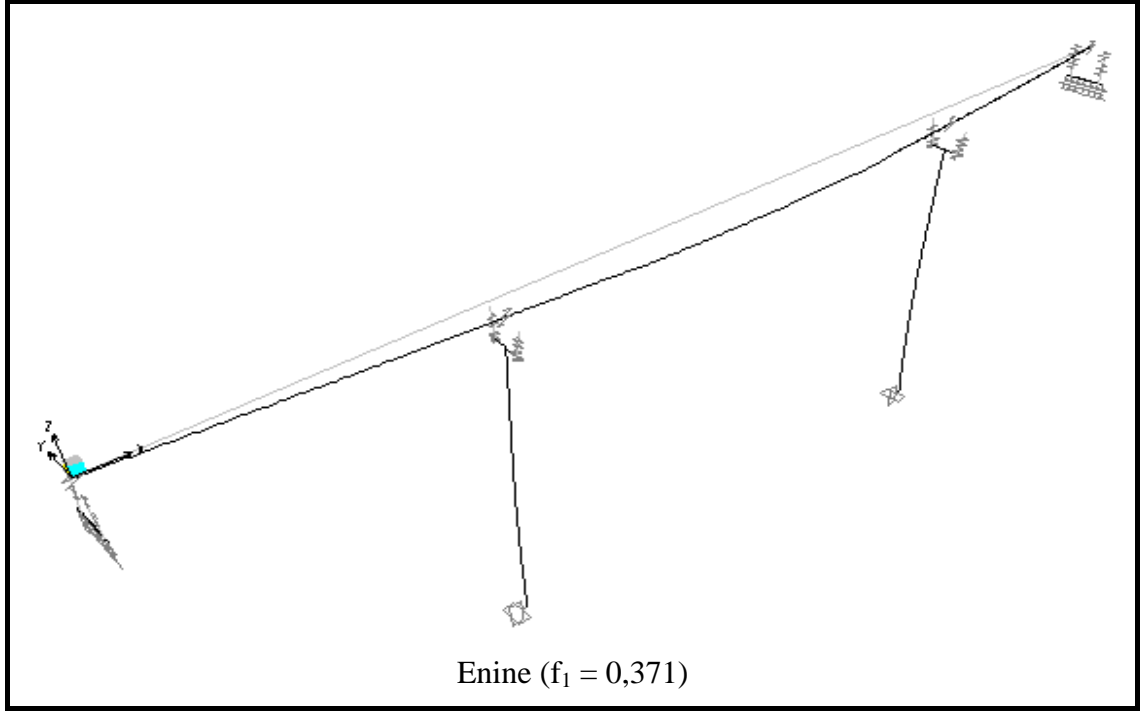
Tablo 2.9. Budan Köprüsü'nün ilk 7 doğal frekans ve periyotları

Budan Köprüsü ($\approx L=350m$)

Mod No	Frekans (Hz)	Periyot (sn)
1	0,371	2,704
2	0,490	2,047

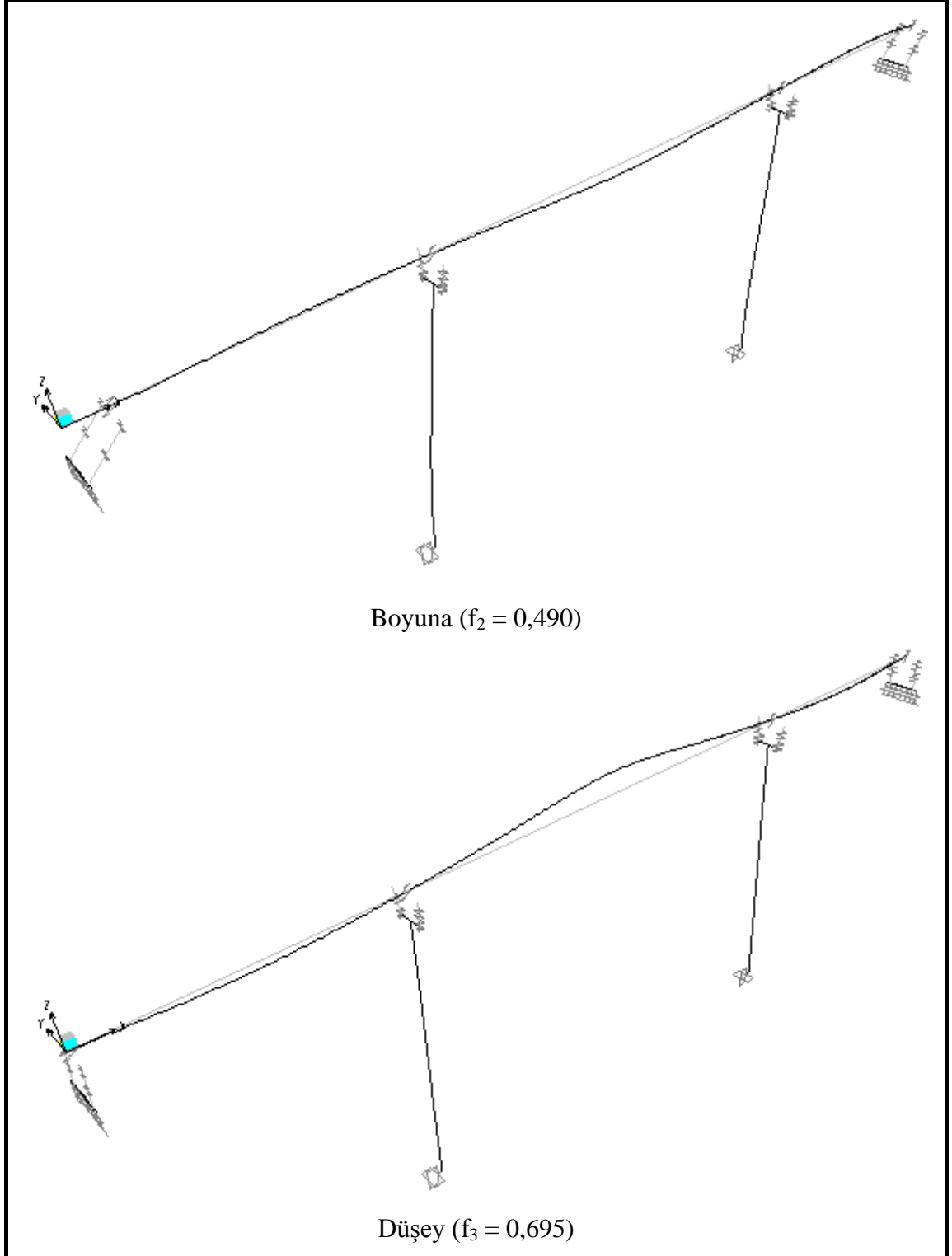
Tablo 2.9'un devamı

3	0,695	1,439
4	0,738	1,358
5	1,382	0,724
6	1,524	0,658
7	1,743	0,580

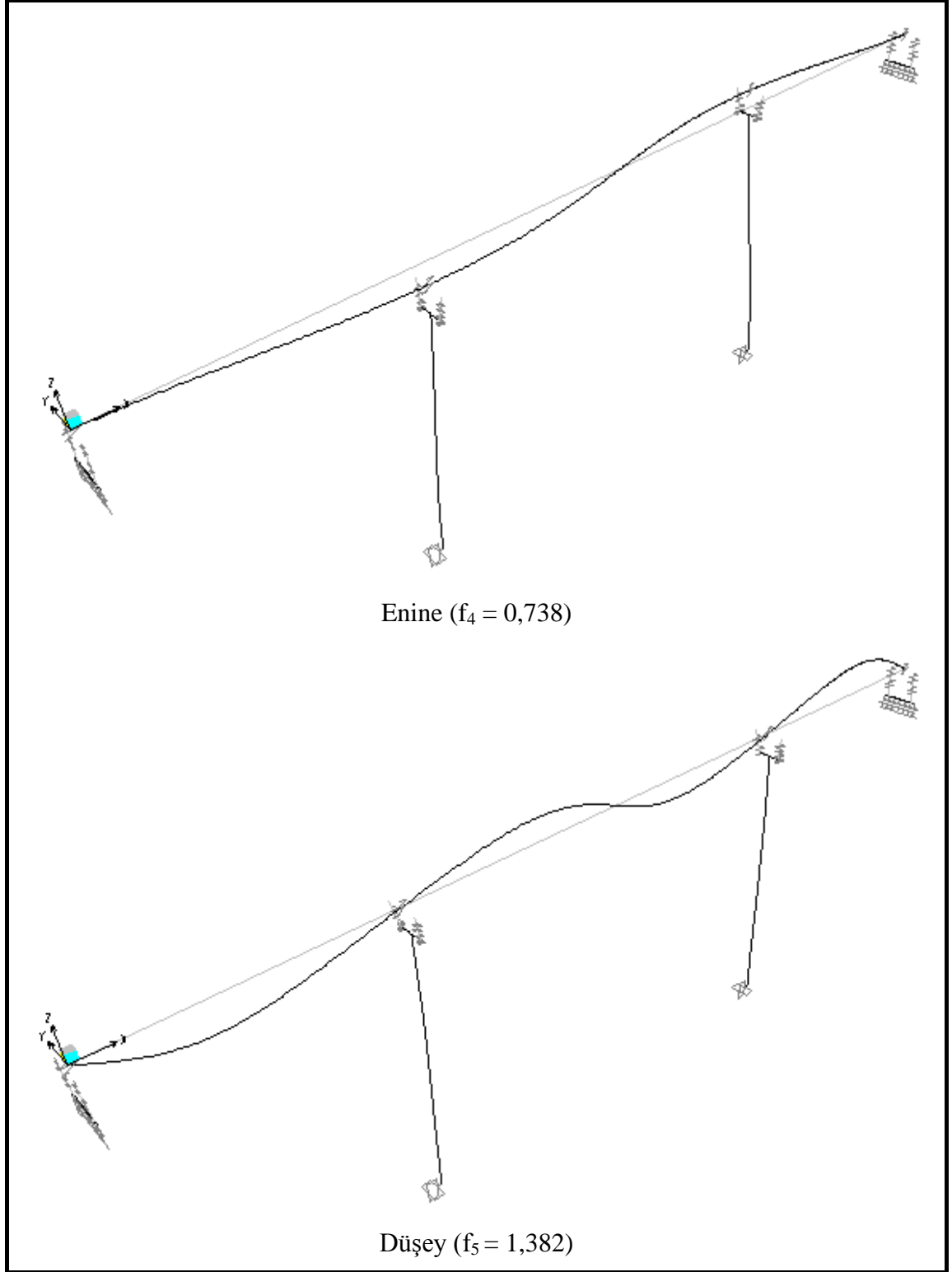


Şekil 2.61. Budan Köprüsü'nün analitik olarak elde edilen ilk 7 mod şekli

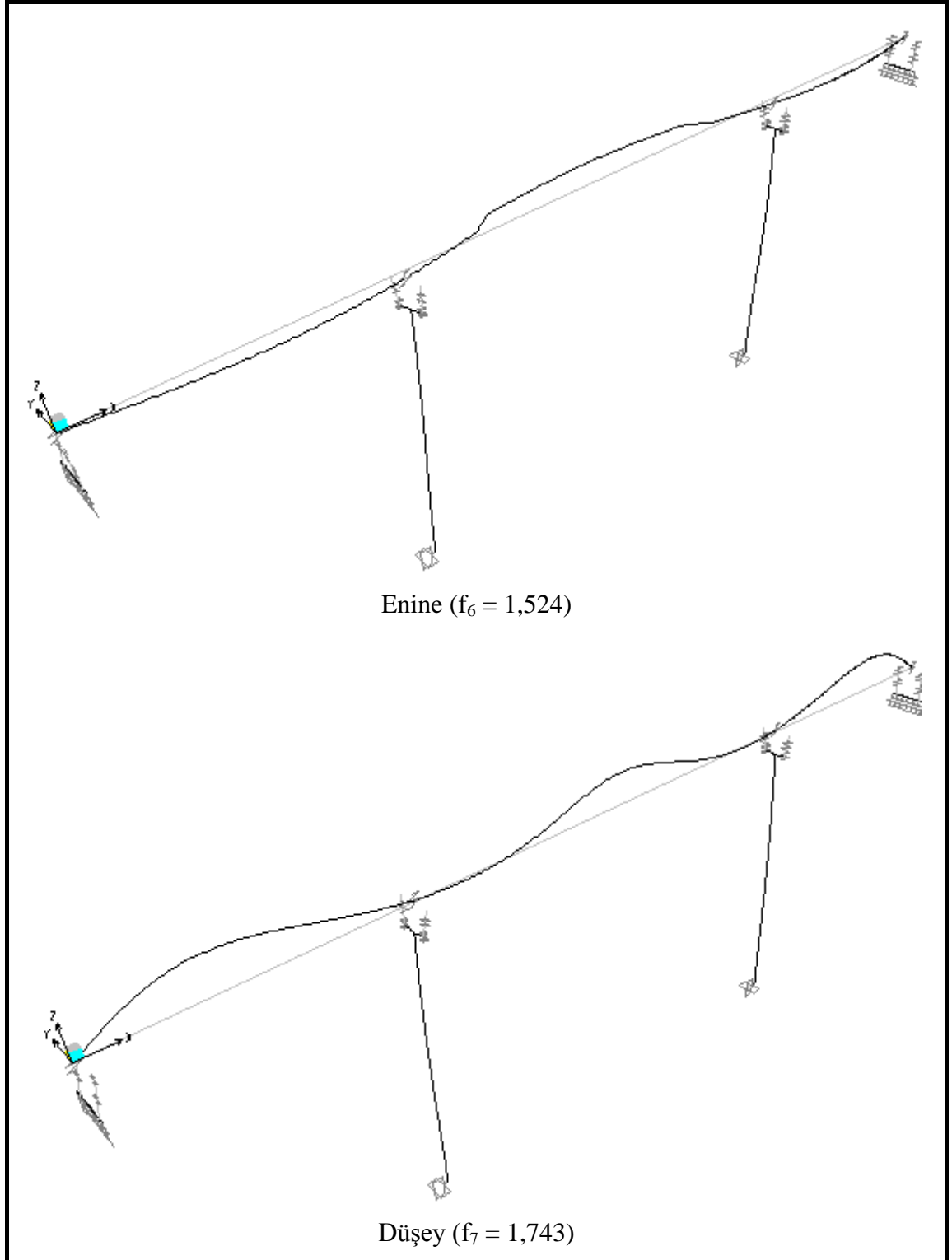
Şekil 2.61'in devamı



Şekil 2.61'in devamı



Şekil 2.61'in devamı

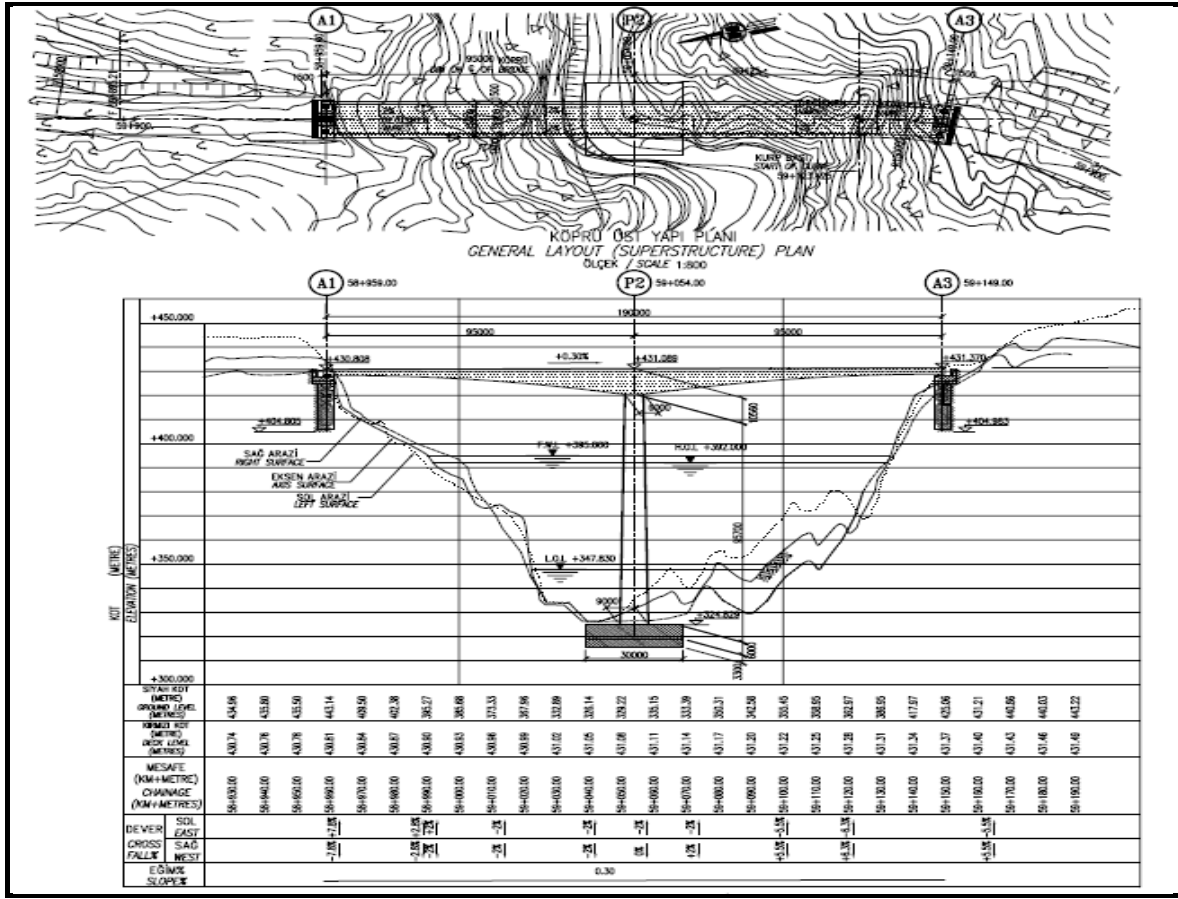


2.5. Sengan Köprüsü

Sengan Köprüsü'nn genel grn ve vaziyet planı Şekil 2.62 ve Şekil 2.63'te verilmektedir.



Şekil 2.62. Sengan Köprüsü



Şekil 2.63. Sengan Köprüsü genel vaziyet planı, (DSİ, 2007)

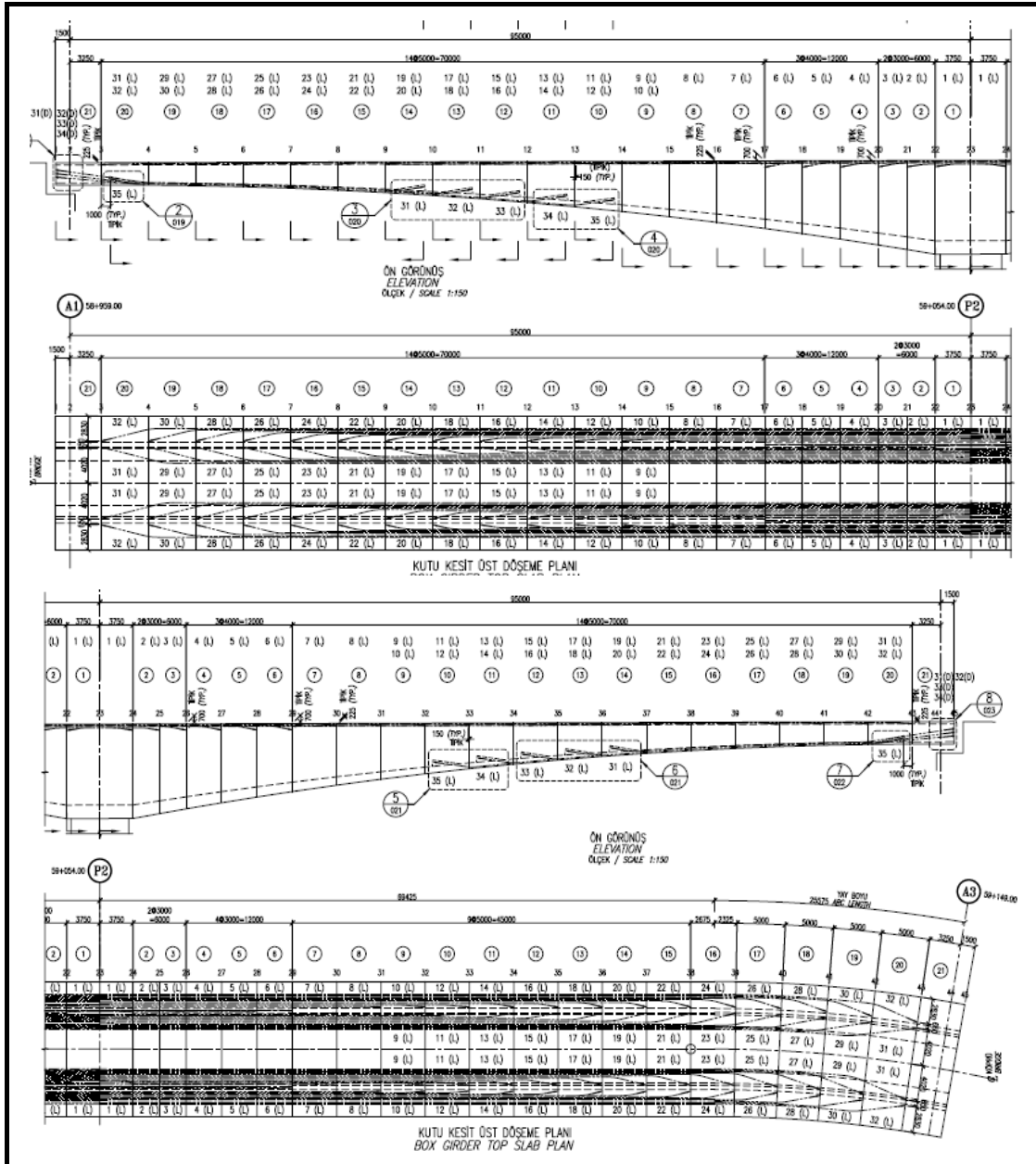
2.5.1. Genel Özellikler

Sengan Köprüsü 190m uzunluğunda 106,16m yüksekliğinde ve iki açıklıklıdır. Köprünün 2 orta açıklığıda 95m dir. Köprü Artvin-Erzurum yolu üzerinde 58 + 959.000 - 59 + 149.000 km leri arasında Çoruh Nehri'nin yan derelerinden olan Hod Deresi'nin vadisi üzerinde vadinin iki yakasını birbirine bağlamaktadır.

2.5.1.1. Köprü Tabliyesi

Şekil 2.64'te köprü tabliyesinin cephe görünüşü verilmiştir. Ortayaktan kenarayaklara doğru karşılıklı 21'er ano bulunmaktadır. Başlık anosu olarakda adlandırılan 1. anonun uzunluğu 7,5m'dir. Ortaayağın kenarayaklar tarafındaki konsollarının son anoları 3,25m'dir. Diğer anoların uzunlukları ise 3m ile 5m arasında değişir.

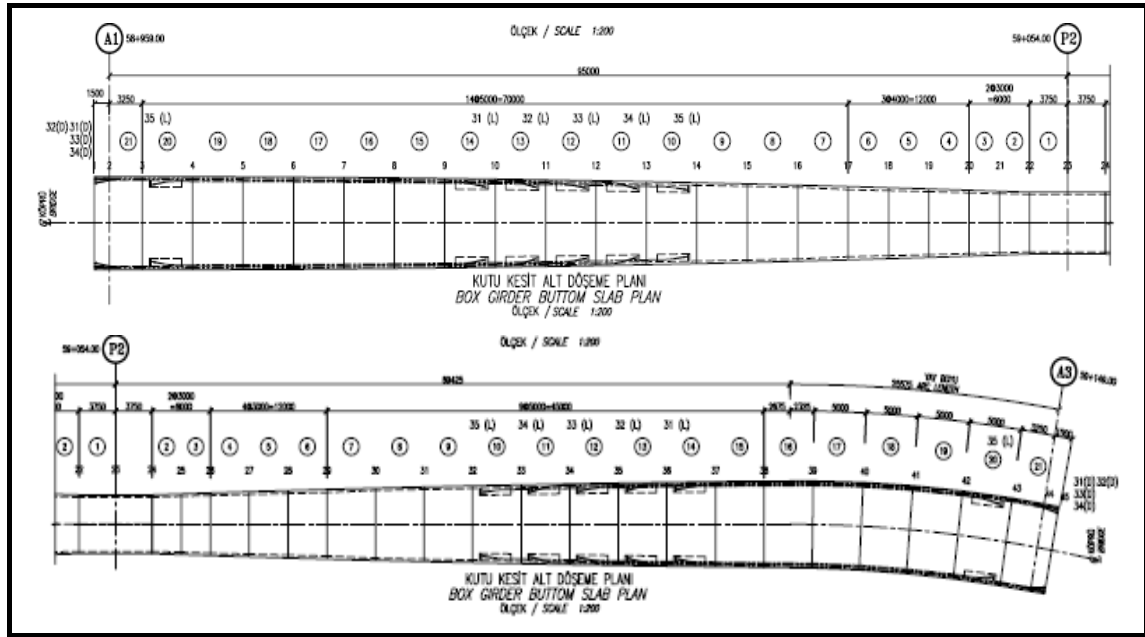
karşılıklı olarak betonlanmasından sonra yerleştirilir ve birbirine gerilir. Bir halat 15,2mm çapında 19 adet çelik kablodan oluşmaktadır. Üst döşemenin ilk 8 anosunda kesitin sağında ve solunda olmak üzere birer halat, 20. anoya kadar olan diğer 12 anoda ise 2 şer halat kullanılmıştır. Son ano olan 21. anoda germe yapılmamıştır. Üst döşeme halat yerleşim planı aşağıdaki Şekil 2.69’da gösterilmiştir.



Şekil 2.69. Köprüsü üst döşeme halat yerleşim planı, (DSİ, 2007)

Alt döşemeden geçen ardgerme halatların montajı, segmentlerin inşası bitirilip ortaayak konsolları kenarayakla birleştikten sonra yapılır. Tabliyenin ilk 9 anosunda alt

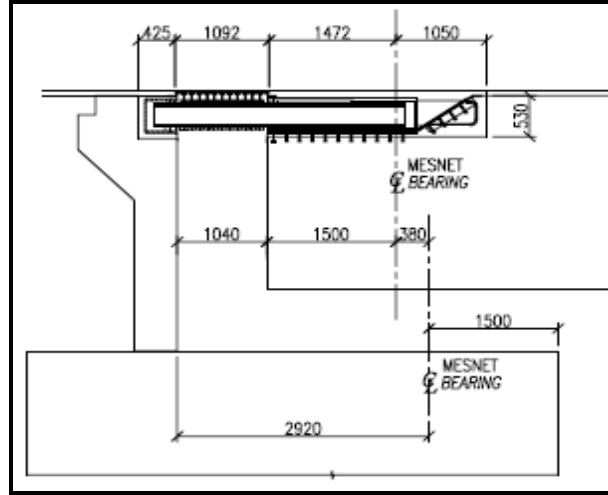
döşemede halat kullanılmamıştır. Alt döşeme halatları 10. anodan itibaren başlar. P2 ayağından kenarayağa doğru tabliyenin alt döşemesinde biri kesitin sağında diğeri solunda olmak üzere 5'er adet halat bulunmaktadır. Ortaayak konsolunun 10. anosunun alt döşeme halatları 20. ano ile karşılıklı olarak gerilir. 11.,12.,13 ve 14. anolardan gerilen halatlar ise kenarayağ diyafraamına sabitlenerek gerilir. Alt döşeme halatları yerleşimi ortaayağın sağında ve solunda tam simetriktr. Alt döşeme halat yerleşimi aşağıdaki Şekil 2.70'de gösterilmiştir.



Şekil 2.70. Sengan Köprüsü alt döşeme halatları yerleşim planı, (DSİ, 2007)

2.5.1.1.4. Genleşme Derzleri

Köprüde 2 adet genleşme derzi kullanılmıştır. Bu derzler, köprü tabliyesinin kenarayaklarla birleştiği yerlerdedir (Şekil 2.71). Derzler 100 yıllık depremlerde oluşacak yer değiştirmelerde yapı elemanlarında ve genleşme derzinin kendisinde hasar oluşmayacak şekilde, 475 yıllık depremlerde oluşan yer değiştirmelerde yapı elemanlarında hasar oluşturmayacak fakat genleşme derzinin kendisinde hasar oluşabilecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 2.71. Genleşme derzi yerleşimi, (DSİ, 2007)

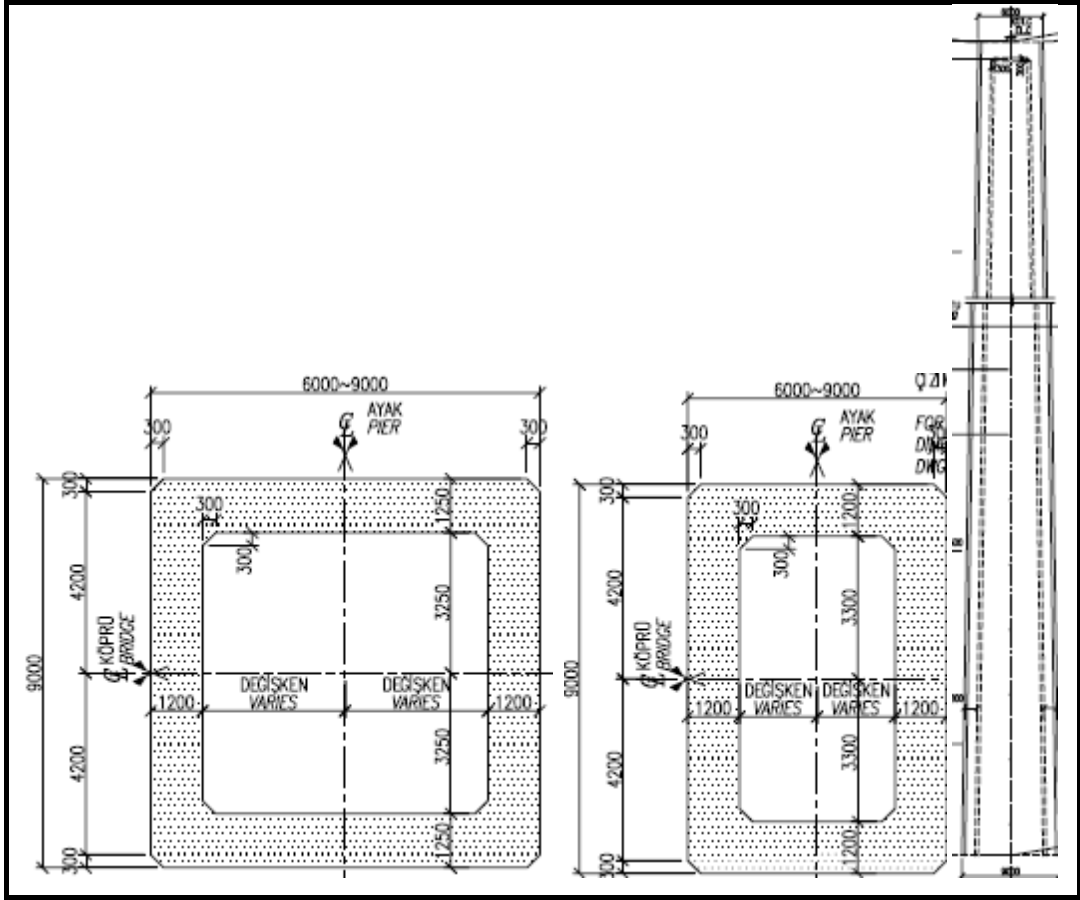
2.5.1.1.5. Mesnetler

Köprüde 4 tane serbest kayar mesnet kullanılmıştır. Bunlar kenarayaklar üzerinde 2'şer adettir. Köprüde sadece boyuna harekete müsaade edilmiştir. 475 yıllık deprem durumunda köprü tabliyesinde oluşacak boyuna yer değiştirme maksimum 760mm'dir. Köprü yapı elemanlarında hasar oluşmayacak şekilde mesnetler tasarlanmıştır. Enine doğrultudaki hareketin önüne geçmek için kesme dişi kullanılmıştır. Kenarayak uç diyaframının altına yerleştirilen kesme dişi kenarayak üzerinde 2 mesnet arasına inşa edilmiş olan yuvasına oturarak enine hareketin önüne geçilmiştir.

2.5.1.2. Köprü Kolonu

2.5.1.2.1. P2 Kolonu

P2 kolonunun yüksekliği 95,7m'dir. Sengan Köprüsü'nün kolonu incelediğinde, diğer köprülerin kolonlarından farklı olarak değişken geometriye sahiptir. Kolon köprü eksenini dik kesen yönde daralmaktadır. Kolon temel üstünde 9m x 9m başlarken, başlık anosuna kadar 9m x 6m ye düşer. Beton et kalınlığı değişmez ve 120cm'dir. İç ve dış köşelerinde 3cm x 3cm pah vardır. Kolon enkesiti Şekil 2.72'de gösterilmiştir.

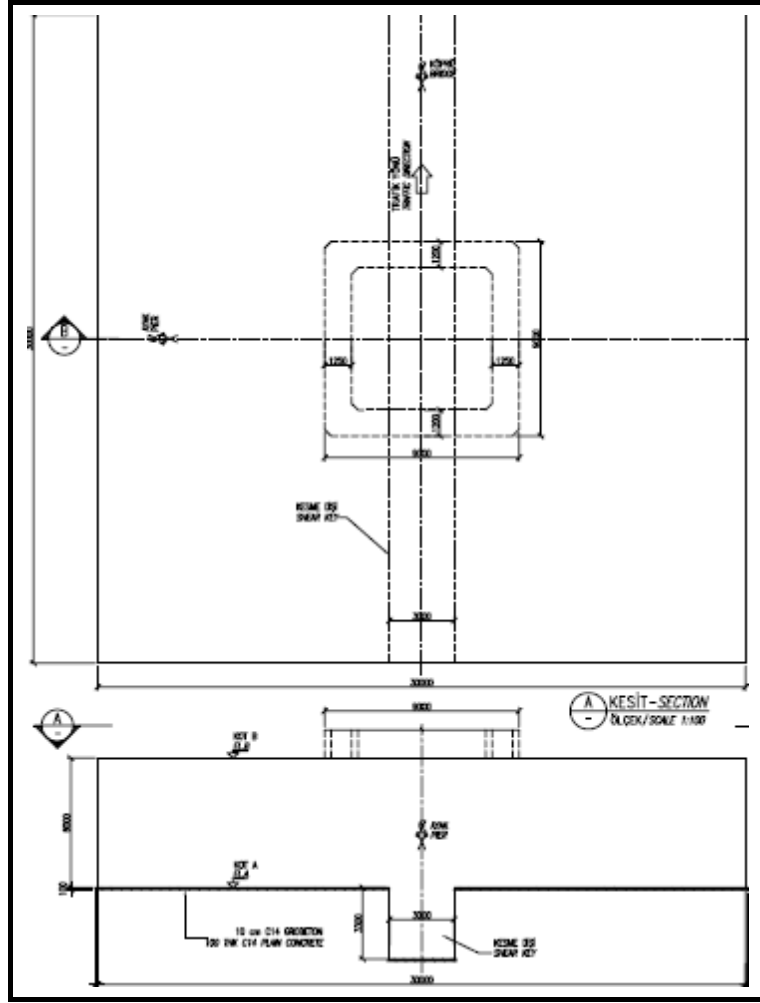


Şekil 2.72. P2 ayağı değişken kesitli kolon, (DSİ, 2007)

2.5.1.3. Köprü Temelleri

2.5.1.3.1. P2 Temeli

33m x 30m boyutlarında, 6m yüksekliğinde dikdörtgen şeklindedir. Temelin ortasında köprü eksenine dik istikamette temel boyunca devam eden kesme dişi bulunmaktadır. Kesme dişinin genişliği 3m'dir. P2 temeline ait kesitler ve plan görüntüsü Şekil 2.73'te verilmiştir.

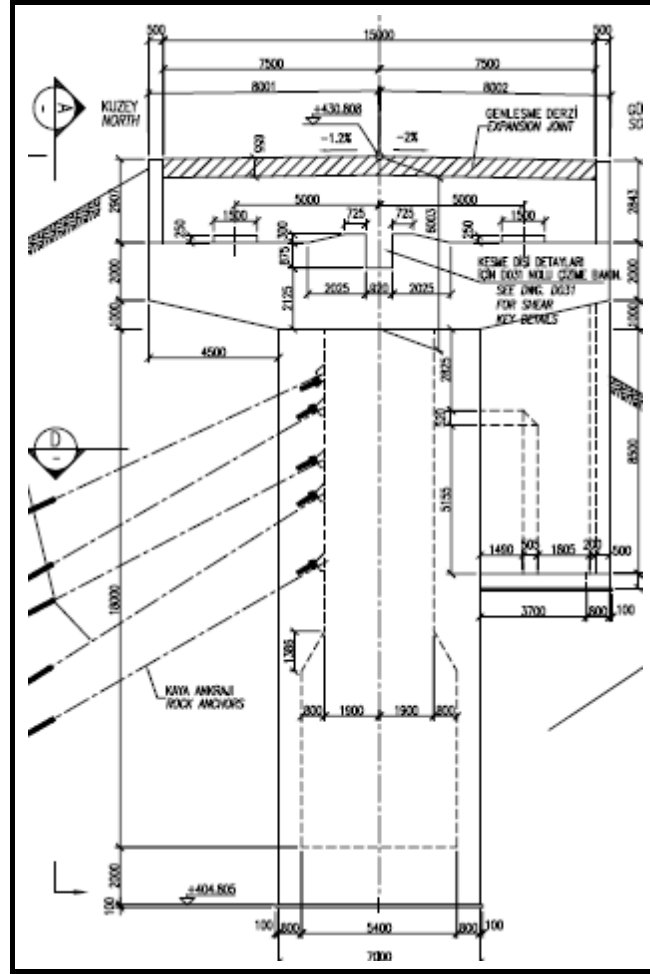


Şekil 2.73. P2 temeli plan ve kesitleri, (DSİ, 2007)

2.5.1.4. Kenarayaklar

2.5.1.4.1. A1 Kenarayağı

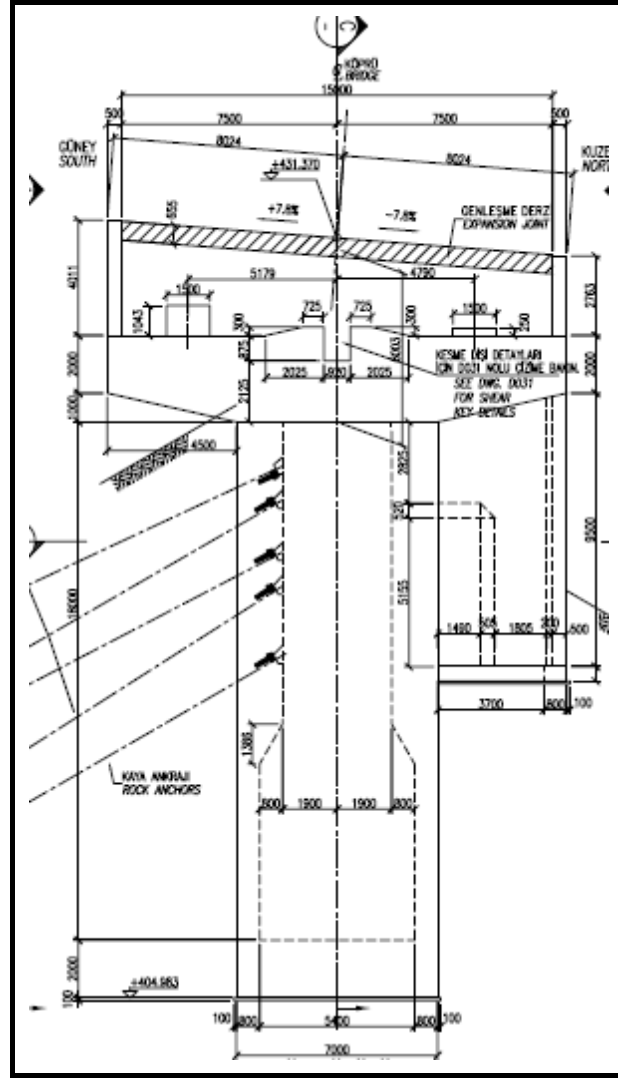
A1 kenarayağının temeli 7m x 5m boyutlarında, 2m yüksekliğindedir. Temelin üzerine içi boş basık silindir kesitli 10m yüksekliğinde şaft şeklindeki kolon inşa edilir. Kolon betonunun et kalınlığı kolonun 8,11 metresine kadar 80cm'dir. 8,11m'den sonra 160 cm ye çıkar. Kolonun üzerine 15m genişliğindeki başlık kirişi inşa edilir. Bu yapılan başlık kirişinin üzerine mesnetler koyulmuş ve ortaayak konsollarıyla kenarayağı birleştirecek olan uç diyaframı bu mesnetlerin üzerine oturmuştur. A1 kenarayağının genel görünümü ve boyutları aşağıdaki Şekil 2.74'te verilmiştir.



Şekil 2.74. A1 kenar ayağı genel görünümü, (DSİ, 2007)

2.5.1.4.2. A3 Kenar Ayağı

A3 kenarayağının temeli 7m x 5m boyutlarında, 2m yüksekliğindedir. Temelin üzerine içi boş basık silindirik kesitli 10m yüksekliğinde şaft şeklindeki kolon inşa edilir. Kolon betonunun et kalınlığı kolonun 8,11.metresine kadar 80cm'dir. 8,11. m'den sonra 160 cm ye çıkar. Kolonun üzerine 15m genişliğindeki başlık kirişi inşa edilir. Bu yapılan başlık kirişinin üzerine mesnetler koyulmuş ve ortaayak konsollarıyla kenarayağı birleştirecek olan uç diyaframı bu mesnetlerin üzerine oturmuştur. A3 kenarayağının genel görünümü ve boyutları aşağıdaki Şekil 2.75'te verilmiştir.

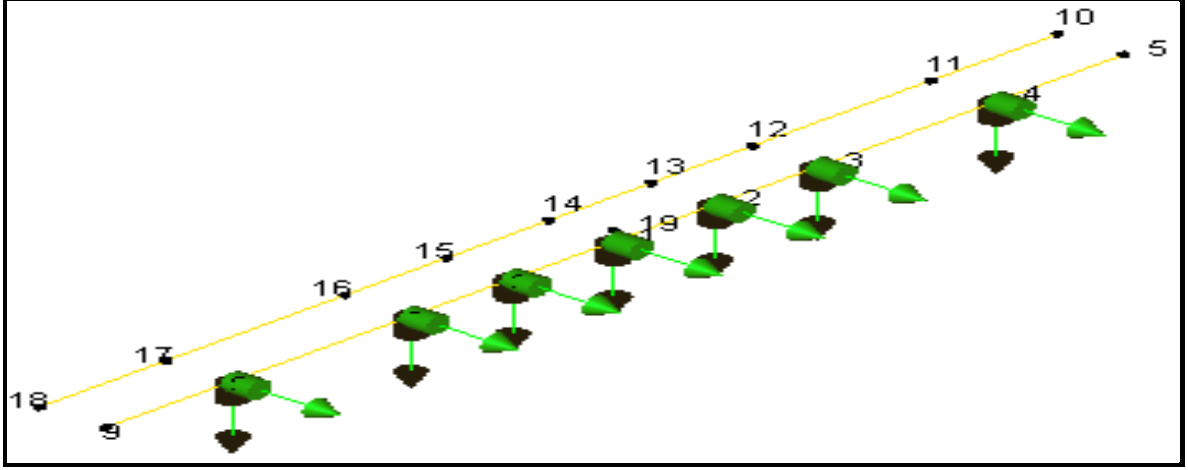


Şekil 2.75. A3 kenar ayağı genel görünümü, (DSİ, 2007)

2.5.2. Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Sengan Köprüsünün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Sengan Köprüsü'nün dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemek için köprü'nün Artvin-Erzurum istikametine göre sağ tarafından 14 adet ivmeölçer kullanılarak tek çevresel titreşim testi uygulanmıştır. Ölçümler sırasında doğal titreşim olarak rüzgâr, yaya ve köprü üzerindeki araç geçişlerinden yararlanılmıştır. Köprü üzerinde ölçüm yapılacak noktalara ivmeölçerler bağlandıktan sonra sinyallerin toplanacağı veri toplama ünitesi ayarları yapılarak (frekans aralığı, model ve ivmeölçer bağlantıları, ölçüm süresi vb.) ölçümler alınmıştır. Ölçümler için 14 adet ivmeölçerler belirlenen noktalara düşey ve enine olmak üzere iki doğrultuda yerleştirilmiştir (Şekil 2.76). Ölçümler 0-12,5 Hz

aralığında, analizler ise 0-6,25Hz frekans aralığında yapılmış ve ölçüm süresi ise her bir adım için 30dk seçilmiştir.



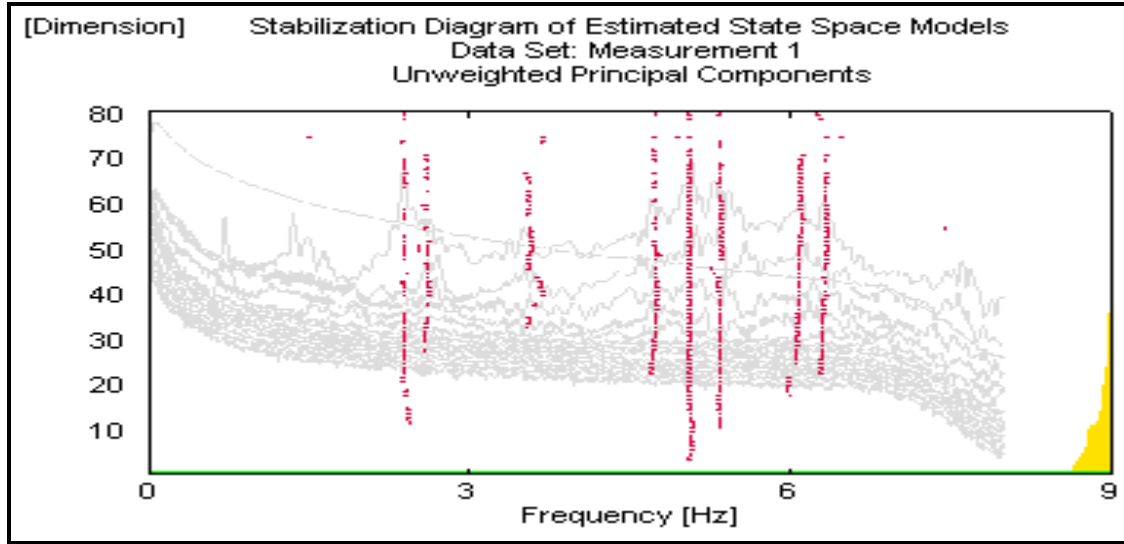
Şekil 2.76. Sengan köprüsünün çevresel titreşim testi için kullanılan ivmeölçer yerleşim planı

Sengan Köprüsü'nde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar Şekil 2.77'de verilmektedir. Sengan Köprüsü'ne uygulanan çevresel titreşim testinden toplanan sinyallerin GFTAA Yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen stabilizasyon diagramı Şekil 2.78'de gösterilmektedir.



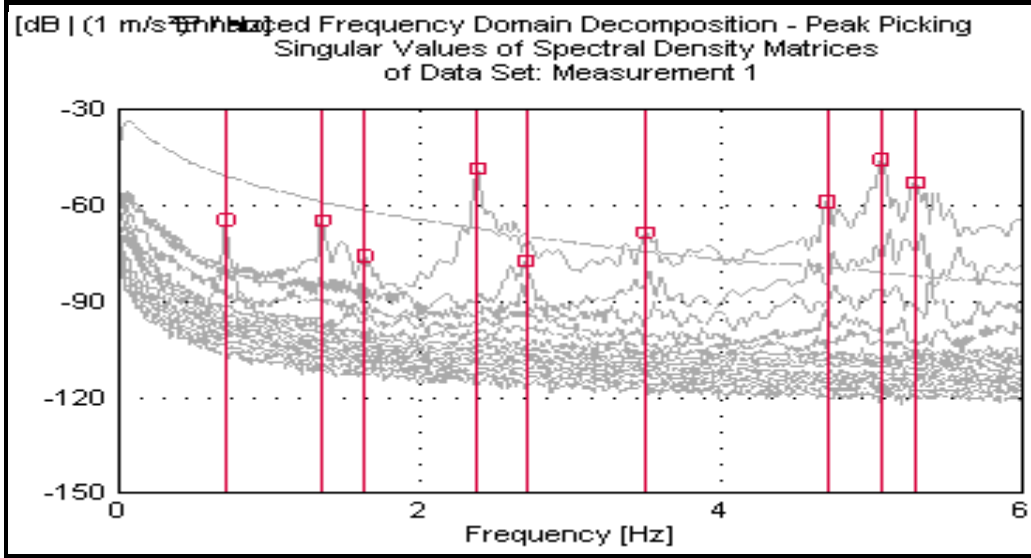
Şekil 2.77. Sengan Köprüsü'nde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar

Şekil 2.77'den devamı



Şekil 2.78. Sengan Köprüsü'nde yapılan ölçümden elde edilen stabilizasyon diagramı

Ölçüm sonucunda elde edilen spektral yoğunluk matrisine ait tekil değerler Şekil 2.79'da verilmiştir.



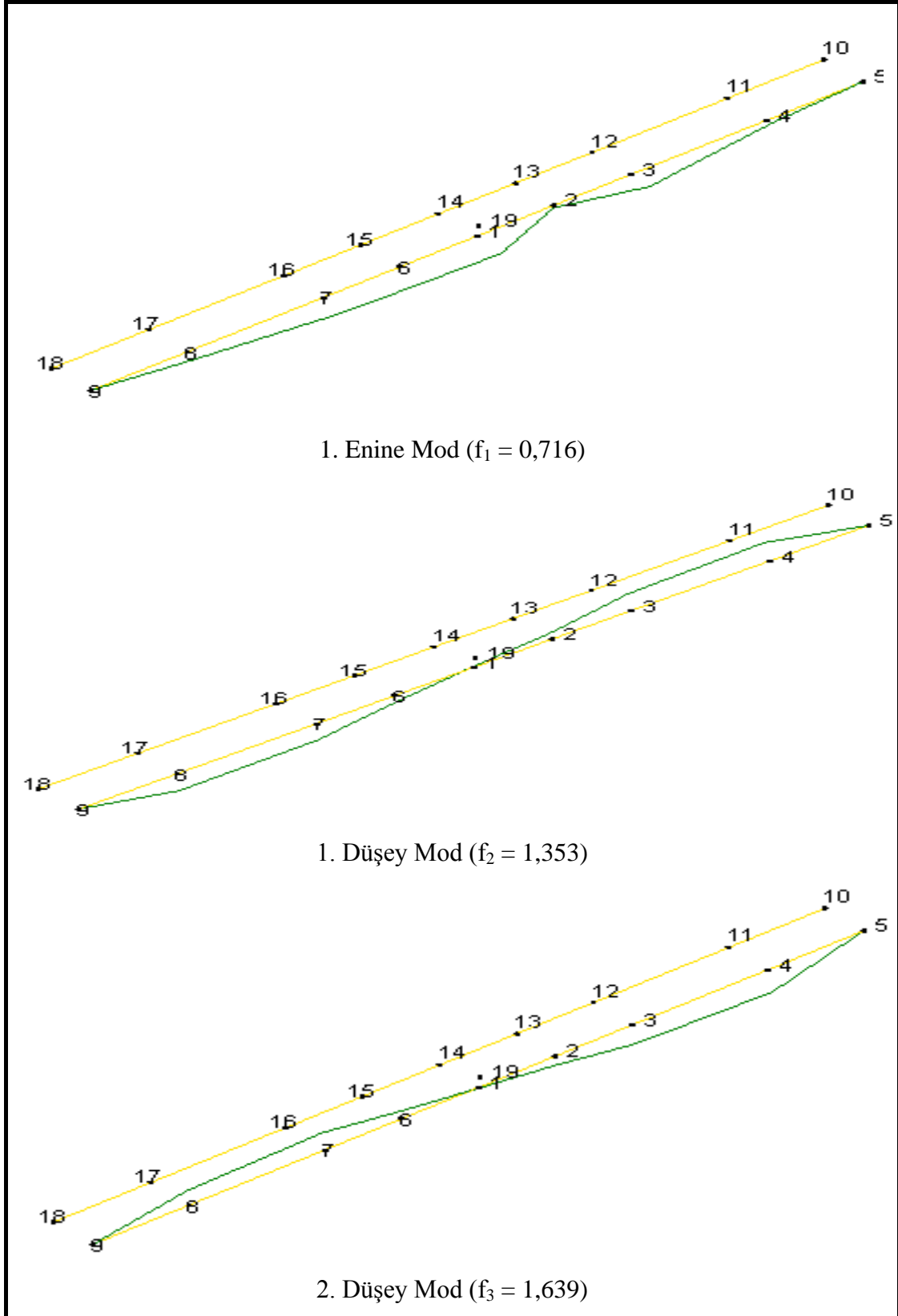
Şekil 2.79. Geliştirilmiş frekans tanım aralığında ayrıştırma yöntemi ile elde edilen tekil değerler

Sengan Köprüsüne ait ilk yedi mod için frekans değerleri ve sönüm oranları Tablo 2.10'da verilmiştir. İlk yedi frekansın 0,716-4,711 Hz. arasında olduğu, sönüm oranı değerlerinin ise %1,636-0,338 arasında değiştiği görülmektedir.

Tablo 2.10. Sengan Köprüsü'nün ilk yedi doğal frekansı ve modal sönüm oranı

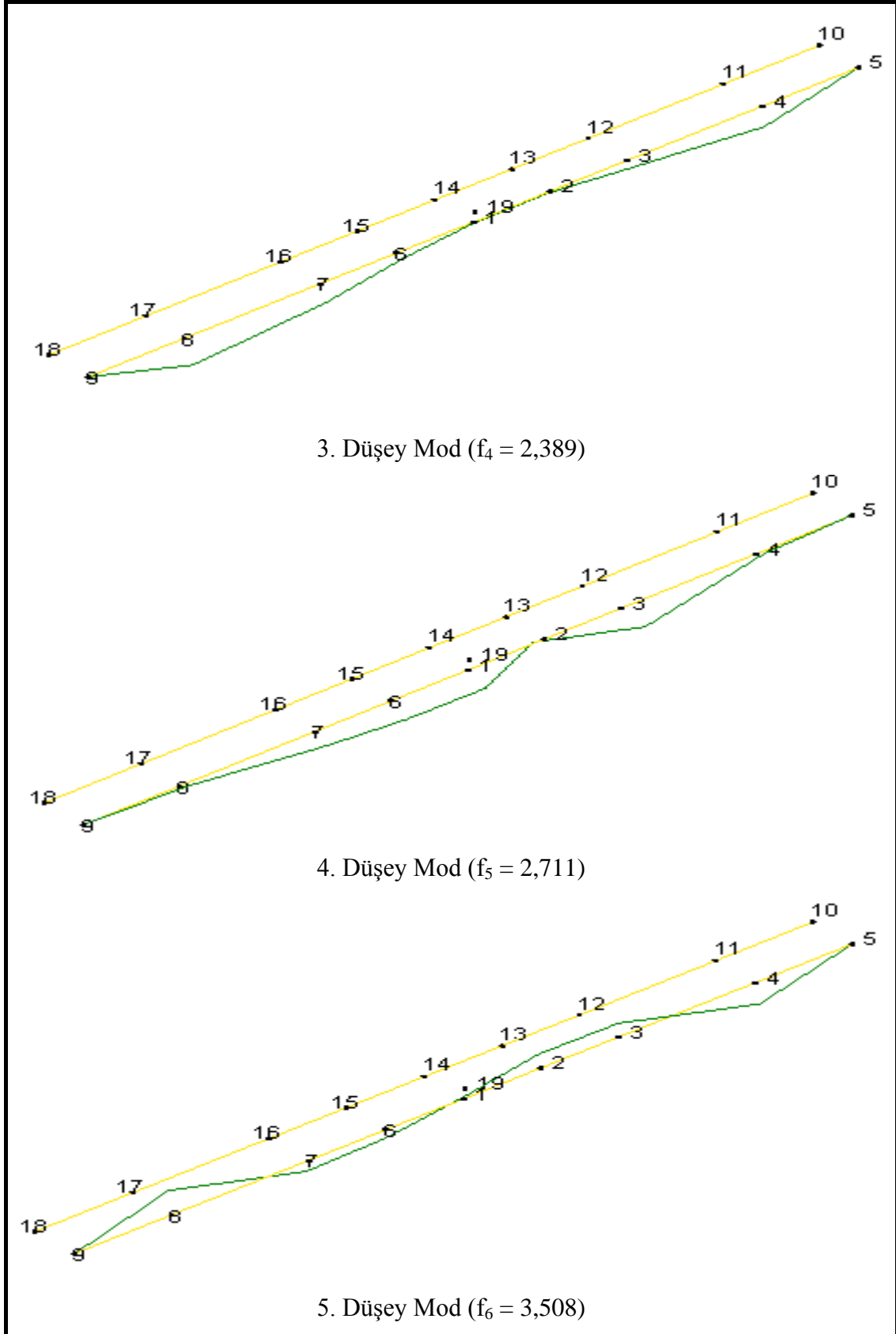
Mod No	Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı
1	0,716	1,112
2	1,353	0,665
3	1,639	1,636
4	2,389	0,563
5	2,711	0
6	3,508	0,557
7	4,711	0,338

Sengan Köprüsü'ne uygulanan deneysel ölçüm testlerinden GFTAA Yöntemine göre elde edilen mod şekilleri Şekil 2.80'de verilmiştir.

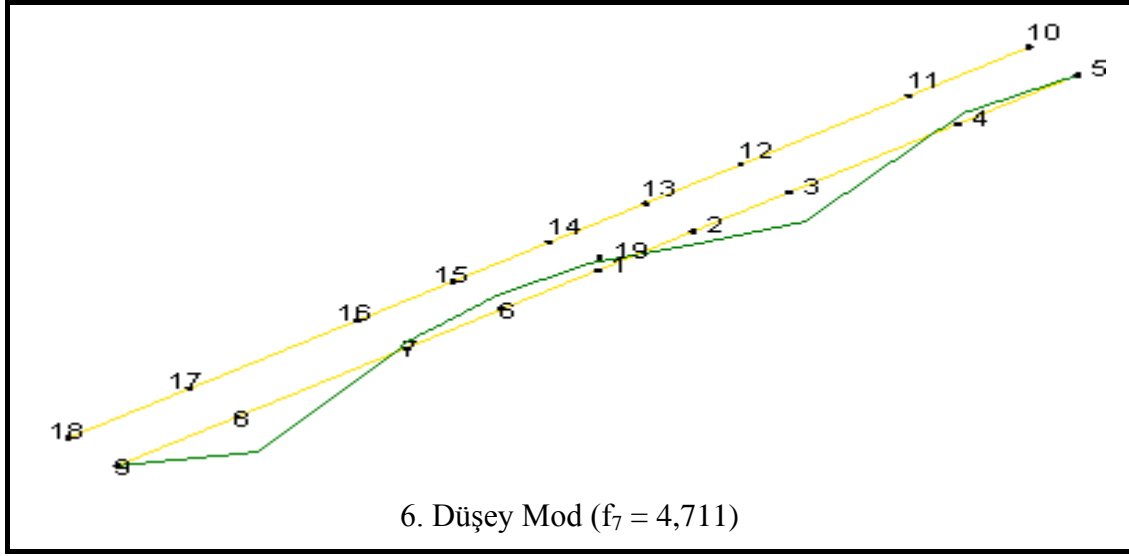


Şekil 2.80. Sengun köprüsünün çevresel titreşim yöntemi ile elde edilen mod şekilleri

Şekil 2.80'nin devamı



Şekil 2.80'nin devamı



2.5.3. Sengan Köprüsü'nün Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

2.5.3.1. Köprü'nün Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli

Sengan Köprüsü'nün teorik dinamik karakteristiklerini (doğal frekanslar ve mod şekilleri) belirlemek için köprü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 (SAP2000, 2008) programı kullanılarak ve aşağıda belirtilen modelleme kriterleri dikkate alınarak yapılmıştır.

- Köprü SAP2000 programının "Bridge" sekmesi kullanılarak modellenmiştir. Değişken kutu kesitli tabliye boyutları parametrik varyasyonlar tanımlanarak proje verilerine göre çizilmiştir. Ortaayaklarda ve tabliyede segment boyları 5m olarak tanımlanmıştır.
- Ortaayaklarla tabliyenin birleşimleri projede olduğu gibi ankastre olarak tanımlanmış olup, tabliye birleşiminden önceki son 1m leri dolu kesittir.
- Kenarayakların ve ortaayakların köprü tabliyesi ile birleşimlerinde 1m kalınlığında diyaframlar tanımlanmıştır.
- Kutu kesitli tabliyenin üstünde kullanılan öngerme halatları ve altında kullanılan ardgerme halatları proje verilerine uygun boy ve sayıda tanımlanmıştır.
- Kenarayak mesnetleri belli rijitliklere sahip yaylarla tanımlanmıştır. Kenarayakların düşey ve enine doğrultuda serbestlikleri tamamen tutulmuştur.

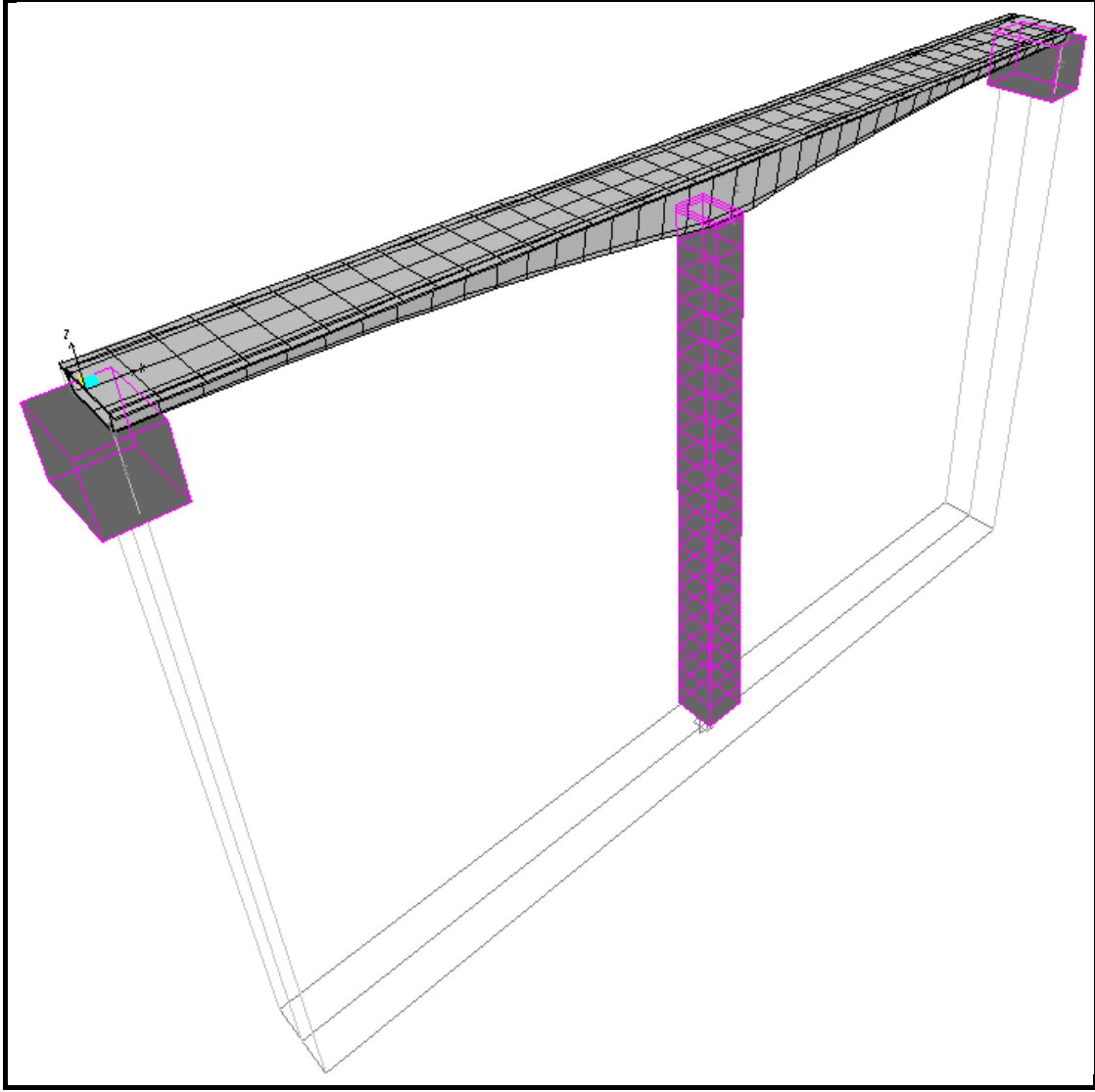
Boyuna doğrultudaki hareketler için yay rijitliği 50000 kN/m olarak belirlenmiştir.

Köprünün modellenmesi ve analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.11’de verilmiştir.

Tablo 2.11. Sengan Köprüsü’nün sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri

Eleman	Elastisite Modülü N/m ²	Poisson Oranı -	Yoğunluk Kg/m ³	Beton Sınıfı
Tabliye	3,4E10	0,2	2450	C40
Ortaayak kolonları	3,2E10	0,2	2450	C30
Ortaayak temelleri	3,2E10	0,2	2450	C30
Kenarayaklar	3,2E10	0,2	2450	C30
Öngerme çeliği	1,95E11	-	-	-

Sengan Köprüsü’nün yukarıda belirtilen modelleme kriterleri dikkate alınarak oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 2.81’de verilmiştir.



Şekil 2.81. Sengan Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli

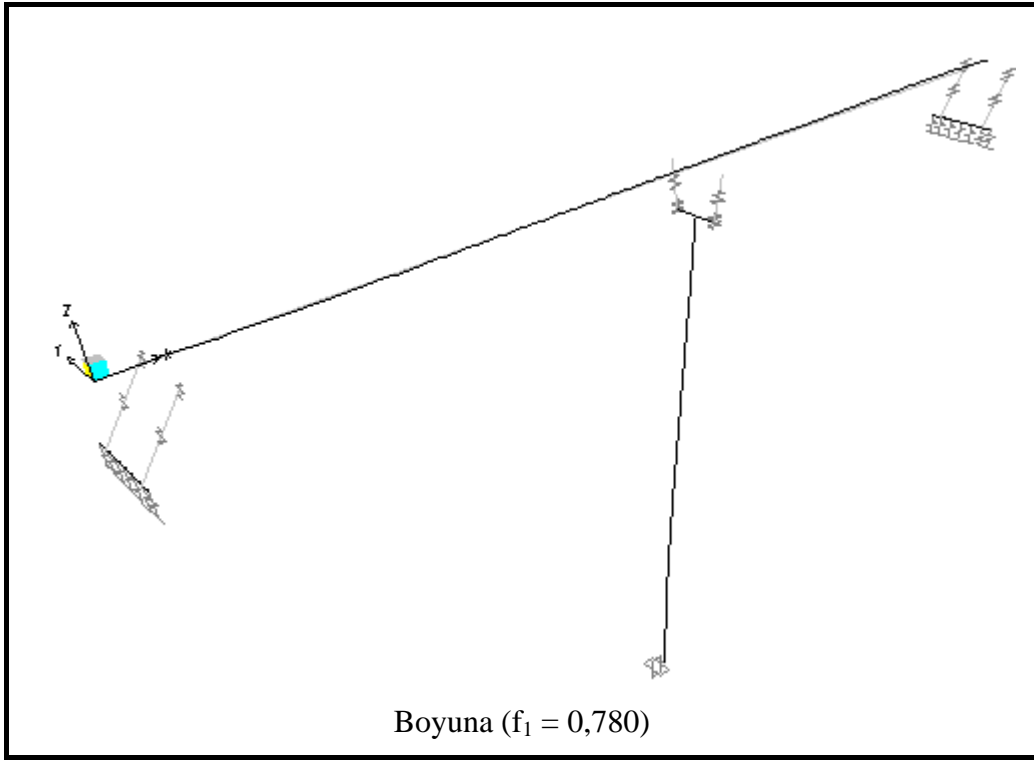
2.5.3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Sengan Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Köprü'nün 3-boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 programında oluşturulduktan sonra modal analiz gerçekleştirilmiş ve köprü teorik dinamik karakteristikleri olan mod şekilleri ve doğal frekans değerleri belirlenmiştir.

Sengan Köprüsü'nün SAP2000 programı kullanılarak gerçekleştirilen modal analizinden elde edilen ilk yedi moduna ait doğal frekans ve periyot değerleri Tablo 2.12'de verilmiştir. Tablo 2.12' den görüldüğü gibi köprü'nün ilk yedi doğal frekansı 0,780-2,812 Hz. değerleri arasında değişmektedir. Köprü'nün ilk yedi mod şekli Şekil 2.82'de gösterilmektedir.

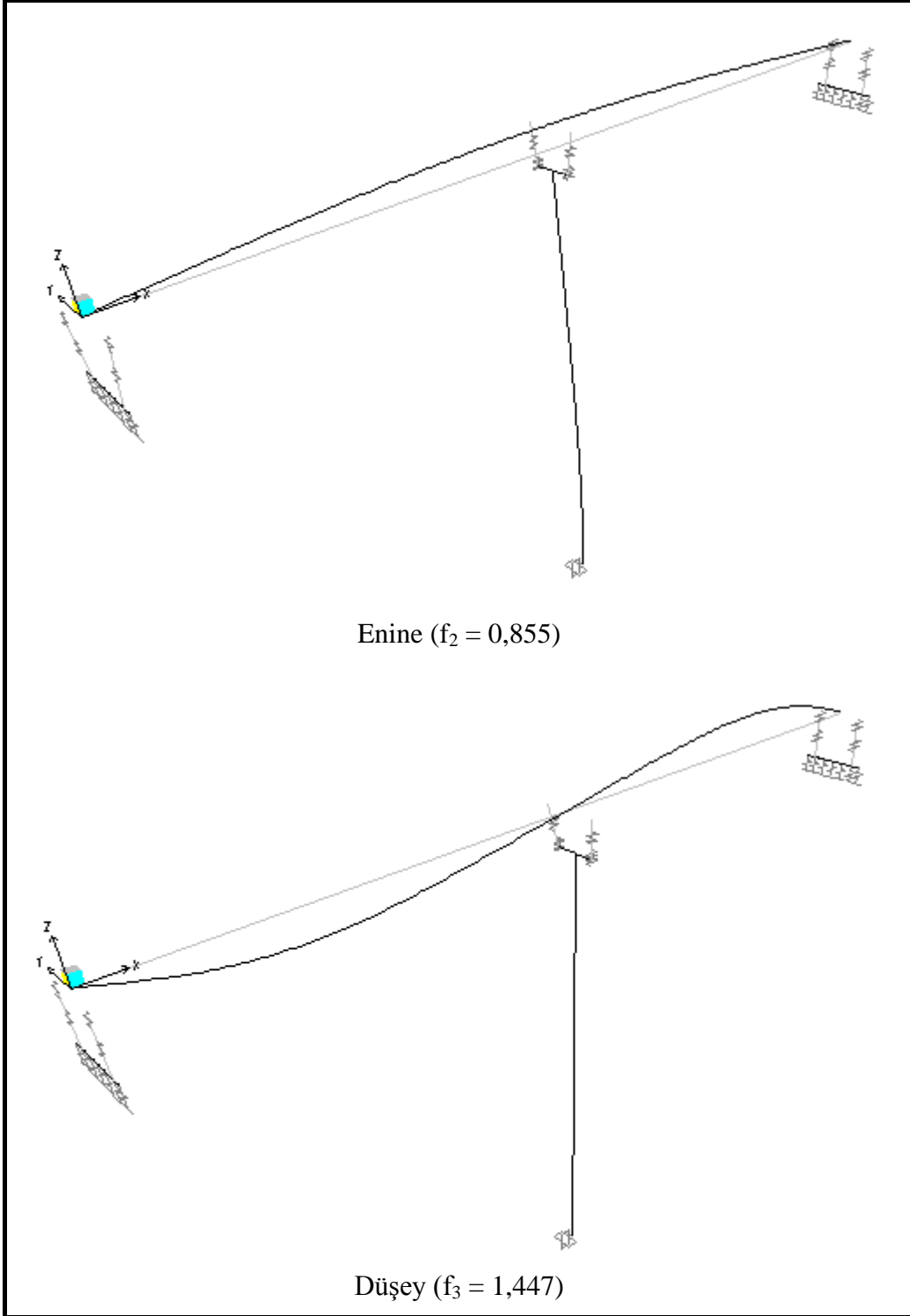
Tablo 2.12. Sengan Köprüsü'nün ilk 7 doğal frekans ve periyotları

Sengan Köprüsü ($\approx L=190\text{m}$)		
Mod No	Frekans (Hz)	Periyot (sn)
1	0,780	1,282
2	0,855	1,169
3	1,447	0,691
4	2,173	0,460
5	2,488	0,402
6	2,727	0,367
7	2,812	0,356

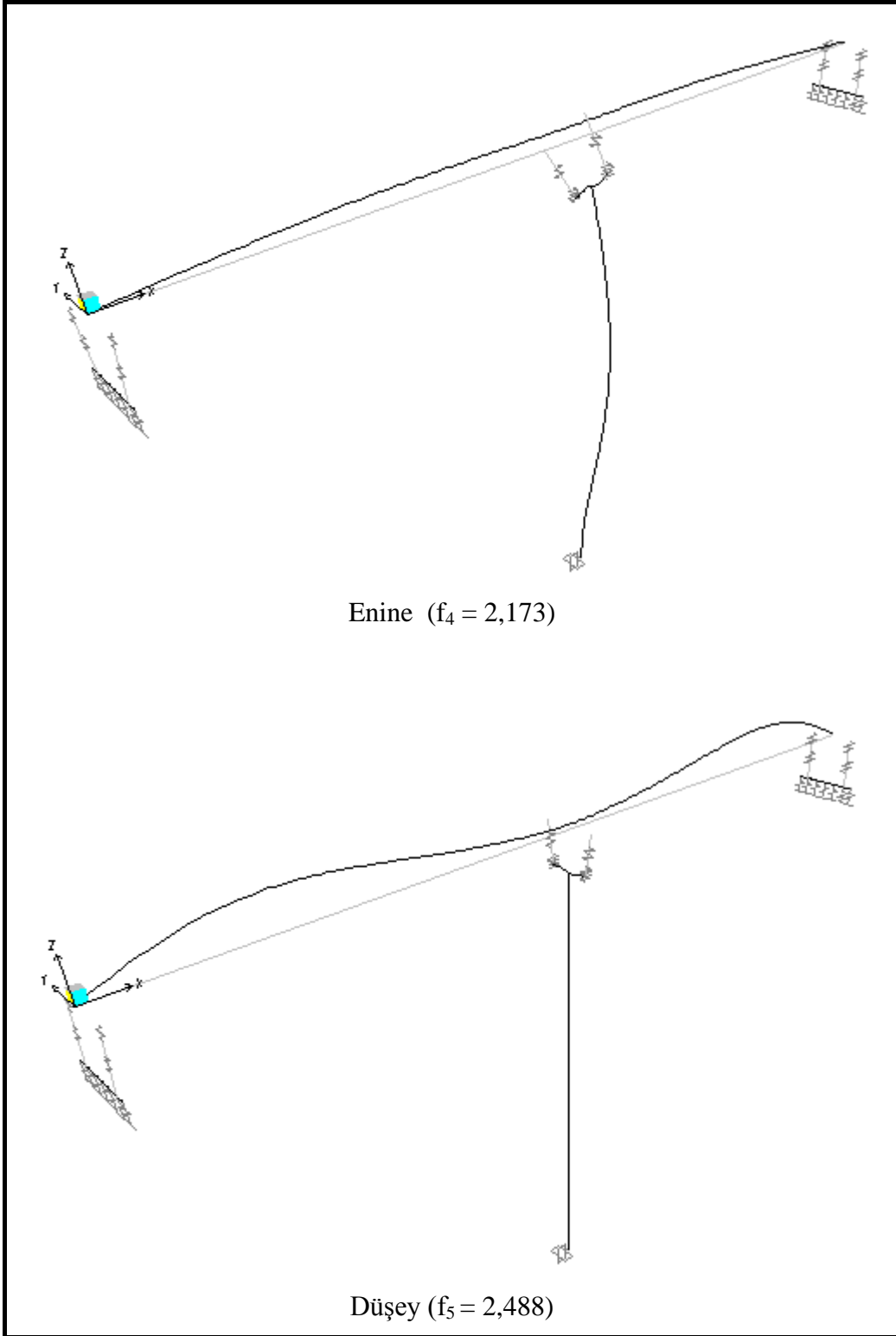


Şekil 2.82. Sengan Köprüsü'nün analitik olarak elde edilen ilk 7 mod şekli

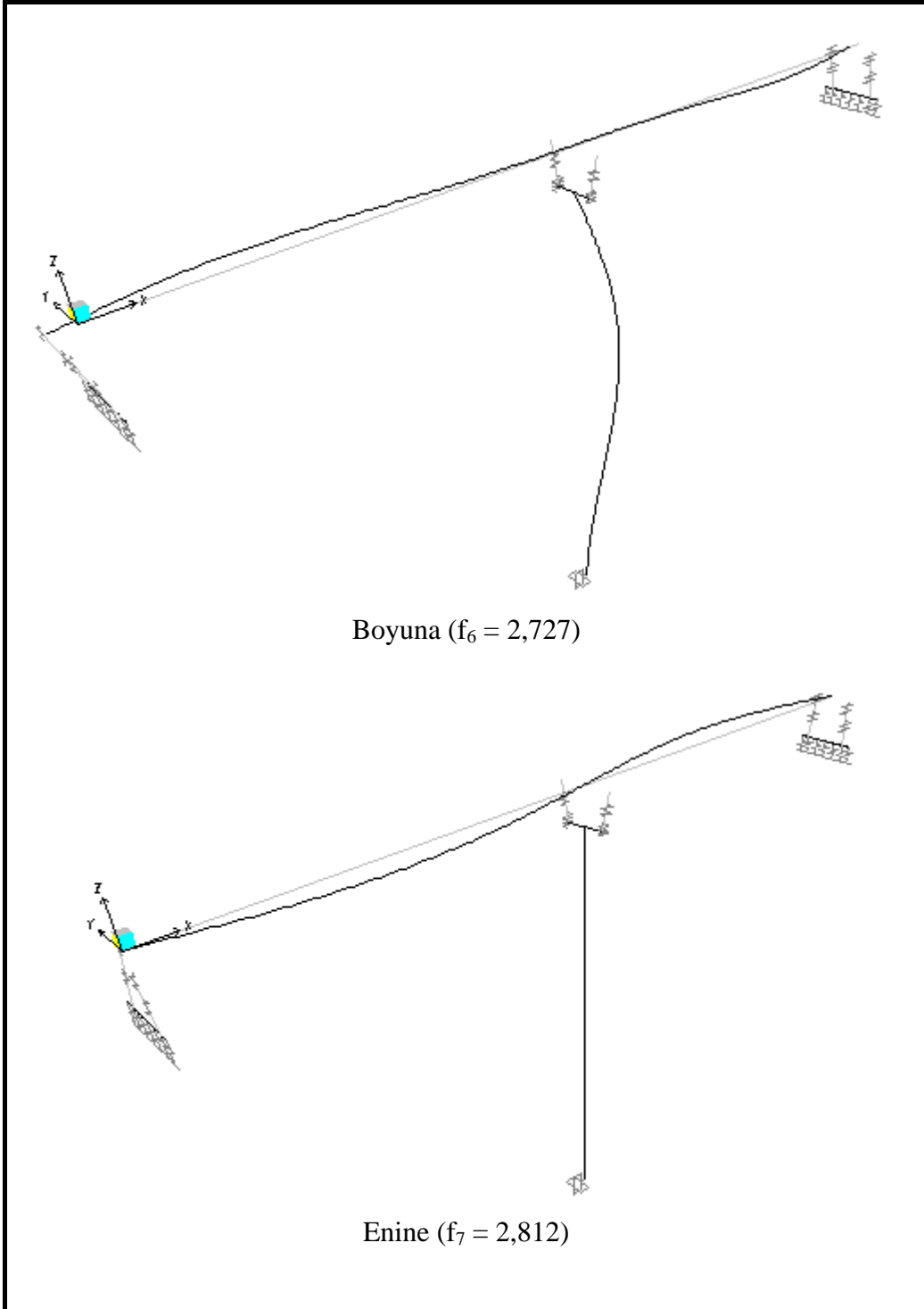
Şekil 2.82'devamı



Şekil 2.82'devamı



Şekil 2.82'devamı



2.6. Berta Köprüsü

Üç açıklıklı Berta Köprüsü'nün genel görünüşü ve vaziyet planı Şekil 2.83 ve Şekil 2.84'de verilmiştir.

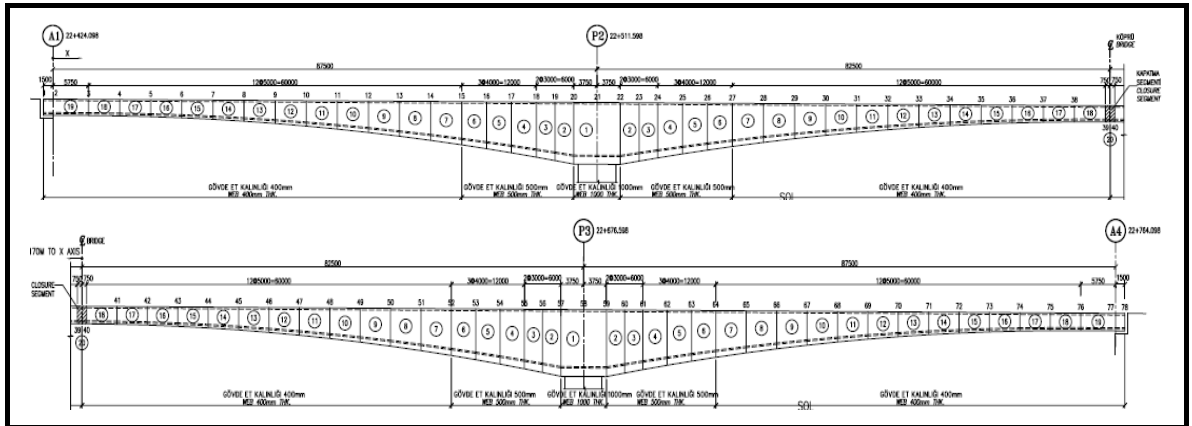
2.6.1. Genel Özellikler

Berta köprüsü 340m uzunluğunda, 124,63m yüksekliğinde ve üç açıklıklıdır. Köprünün orta açıklığı 165m kenar açıklıkları ise 87,5m'dir. Köprü Artvin-Erzurum yolu üzerinde 22 + 424.098 -22 + 764.098 km'leri arasında Çoruh Nehri'nin yan derelerinden olan Berta Deresi'nin vadisi üzerinde vadinin iki yakasını birbirine bağlamaktadır.

Köprünün iki kenarayağı ve bir orta ayağı vadinin eteklerinde diğer ortaayağı ise kısmen Berta Deresi'nin yatağındadır.

2.6.1.1. Köprü Tabliyesi

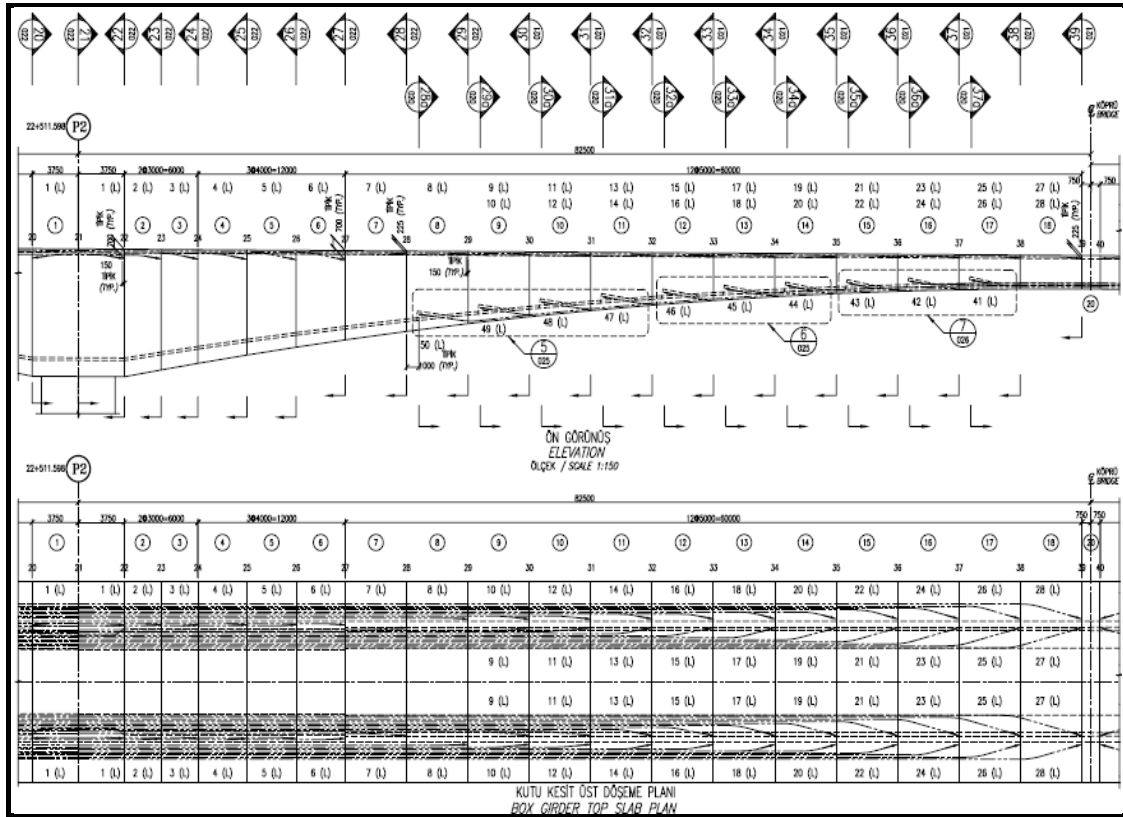
Köprü tabliyesinin cephe görünüşü Şekil 2.85'de verilmektedir. P2 ve P3 ortaayakları üzerinde birbirlerine doğru başlık anolarıyla beraber 18'er ano kenarayaklara doğru ise 19'ar ano bulunmaktadır. Başlık anosu olarak da adlandırılan 1. anonun uzunluğu 7,5m'dir. Ortaayakların kenarayaklar tarafındaki konsollarının son anoları 5,75m'dir. Diğer anoların uzunlukları ise 3m ile 5m arasında değişir. Her iki orta ayak konsollarının birbirleriyle birleşme noktasında 1,5m uzunluğunda kilit ano bulunur.



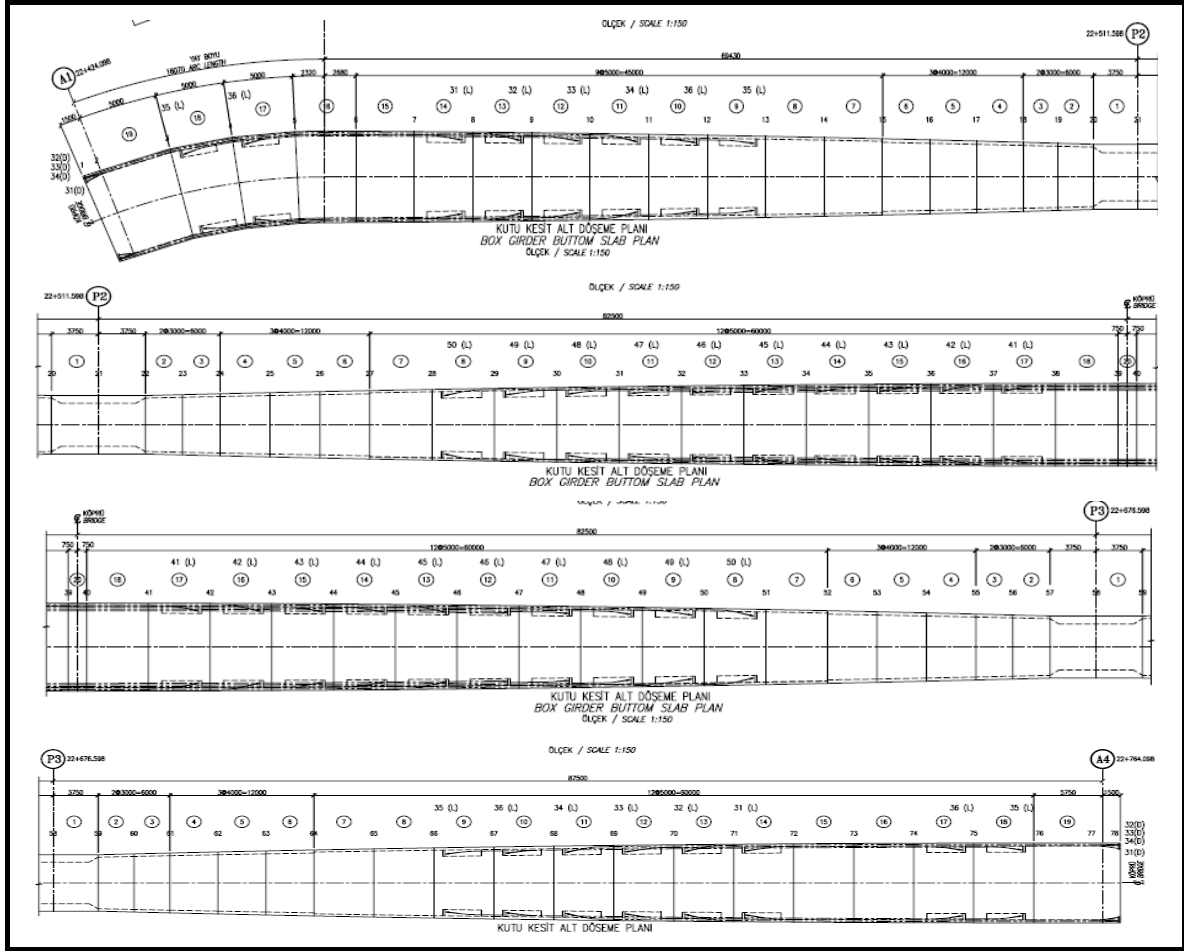
Şekil 2.85. Berta köprüsü tabliye cephe görüntüsü, (DSİ, 2007)

Köprü tabliyesi değişken boyutlu kutu kesittir. Şekil 2.86'da görüldüğü gibi kutu kesitin üst döşeme genişliği köprü tabliyesi boyunca 15m'dir. Kutu kesitin alt döşemesi ortaayaklardan kenarayaklara doğru genişlemektedir. Alt döşeme genişliği P2 ve P3 ortaayakları üzerinde 5,86m iken, kenarayaklar üzerinde 8,31m'dir (Şekil 2.87).

Şekil 2.90'ın devamı



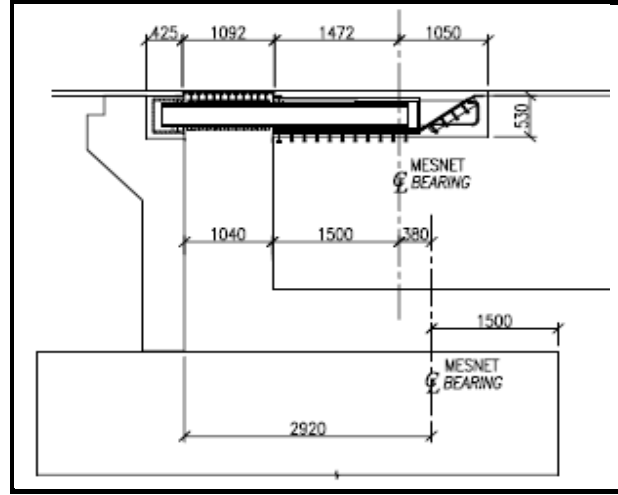
Alt döşemeden geçen ardgerme halatların montajı segmentlerin inşası bitirilip ortaayak konsolları kenarayakla birleştikten sonra yapılır. Tabliyenin ilk 7 anosunda alt döşemede halat kullanılmamıştır. Alt döşeme halatları 9. anodan itibaren başlar. P2 ayağından kenarayağa doğru tabliyenin alt döşemesinde biri kesitin sağında diğeri solunda olmak üzere 6 şar adet halat bulunmaktadır. Kenarayak tarafındaki konsolun 9. ve 10. anosunun alt döşeme halatları 17. ve 18. ano ile karşılıklı olarak gerilir. 11., 12., 13 ve 14. anolardan gerilen halatlar ise kenarayak diyaframına sabitlenir. P2 ve P3 ayakları arasındaki köprü orta açıklığının alt döşemesinde kutu kesitin sağında ve solunda olmak üzere 10 ar adet halat bulunmaktadır. Bu halatlarla P2 ayağının P3 ayağına doğru olan konsolundaki ve P3 ayağının P2 ayağı tarafındaki konsolundaki 8. ve 17. anolar arasındaki bütün anolar birbirlerine gerilir. P3 ayağının kenarayak tarafındaki halat yerleşimi P2 ayağıyla simetriktir. Alt döşeme halat yerleşimi Şekil 2.91'de gösterilmiştir.



Şekil 2.91. Berta Köprüsü alt döşeme halatları yerleşim planı, (DSİ, 2007)

2.6.1.1.4. Genleşme Derzleri

Köprüde 2 adet genleşme derzi kullanılmıştır. Derzler köprü tabliyesinin kenarayaklarla birleştiği yerlerdedir (Şekil 2.92). Bu derzler, 100 yıllık depremlerde oluşacak yer değiştirmelerde yapı elemanlarında ve genleşme derzinin kendisinde hasar oluşmayacak şekilde, 475 yıllık depremlerde ise oluşan yer değiştirmelerde yapı elemanlarında hasar oluşturmayacak fakat genleşme derzinin kendisinde hasar oluşabilecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 2.92. Genleşme derzi yerleşimi, (DSİ, 2007)

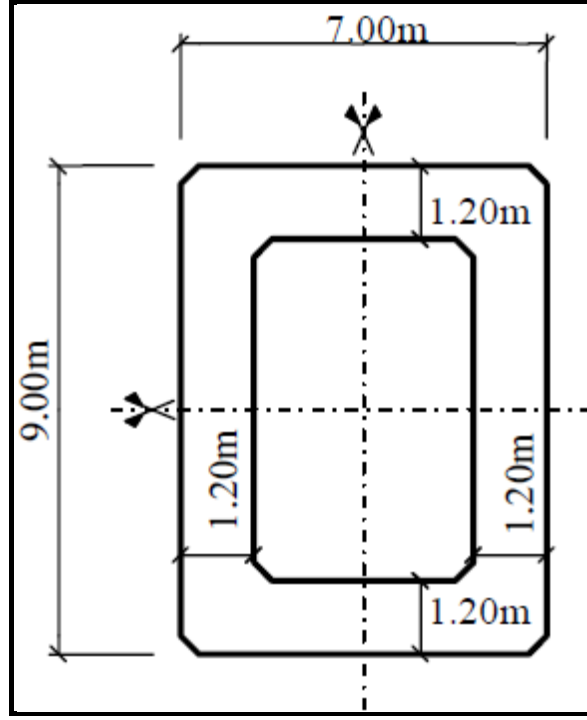
2.6.1.1.5. Mesnetler

Köprüde 4 tane serbest kayar mesnet kullanılmıştır. Bunlar kenarayaklar üzerinde 2 şer adettir. Köprüde sadece boyuna harekete müsaade edilmiştir. 475 yıllık deprem durumunda köprü tabliyesinde oluşacak boyuna yer değiştirme maksimum 760mm'dir. Köprü yapı elemanlarında hasar oluşmayacak şekilde mesnetler tasarlanmıştır. Enine doğrultudaki hareketin önüne geçmek için kesme dişi kullanılmıştır. Kenarayak uç diyaframının altına yerleştirilen kesme dişi kenarayak üzerinde 2 mesnet arasında inşa edilmiş olan yuvasına oturarak enine hareketin önüne geçilmiştir.

2.6.1.2. Köprü Kolonları

2.6.1.2.1. P2 Kolonu

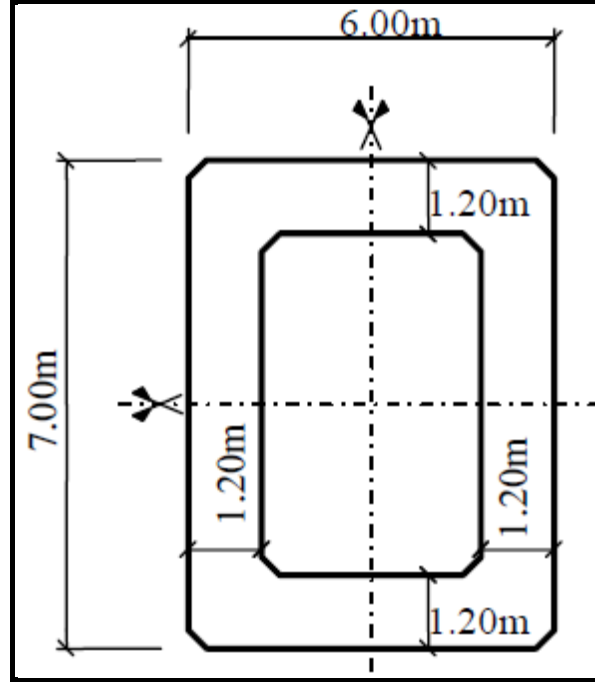
P2 kolonunun yüksekliği 109,245m'dir. Kolon 9m x 7m içi boş dikdörtgen kesitlidir. Beton et kalınlığı 120cm'dir. İç ve dış köşelerinde 3cm x 3cm pah vardır. Kolon enkesiti Şekil 2.93'te gösterilmiştir.



Şekil 2.93. P2 ayağı kolon kesiti, (DSİ, 2007)

2.6.1.2.2. P3 Kolonu

P3 kolonunun yüksekliği 85,193m'dir. Kolon 7m x 6m içi boş dikdörtgen kesitlidir. Beton et kalınlığı 120cm'dir. İç ve dış köşelerinde 3cm x 3cm pah vardır. Kolon enkesiti Şekil 2.94'te gösterilmiştir.



Şekil 2.94. P3 ayağı kolon kesiti, (DSİ, 2007)

2.6.1.3. Köprü Temelleri

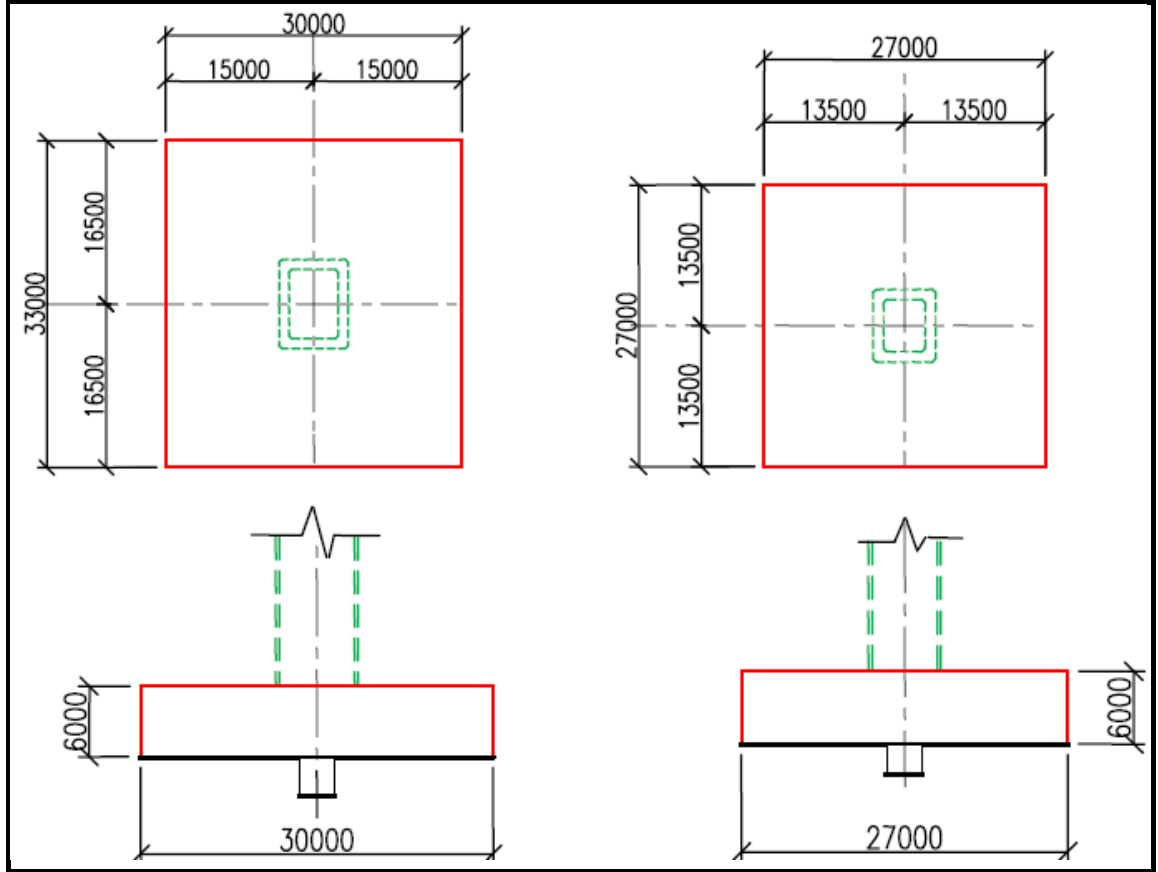
2.6.1.3.1. P2 Temeli

33m x 30m boyutlarında, 6m yüksekliğinde dikdörtgen şeklindedir. Temelin ortasında köprü eksenine dik istikamette temel boyunca devam eden kesme dişi bulunmaktadır. Kesme dişinin genişliği 3m'dir.

2.6.1.3.2. P3 Temeli

27m x 27m boyutlarında, 6m yüksekliğinde kare şeklindedir. Temelin ortasında köprü eksenine dik istikamette temel boyunca devam eden kesme dişi bulunmaktadır. Kesme dişinin genişliği 3m'dir.

P2 ve P3 temellerine ait kesitler ve plan görünüşü aşağıdaki Şekil 2.95'de verilmiştir.

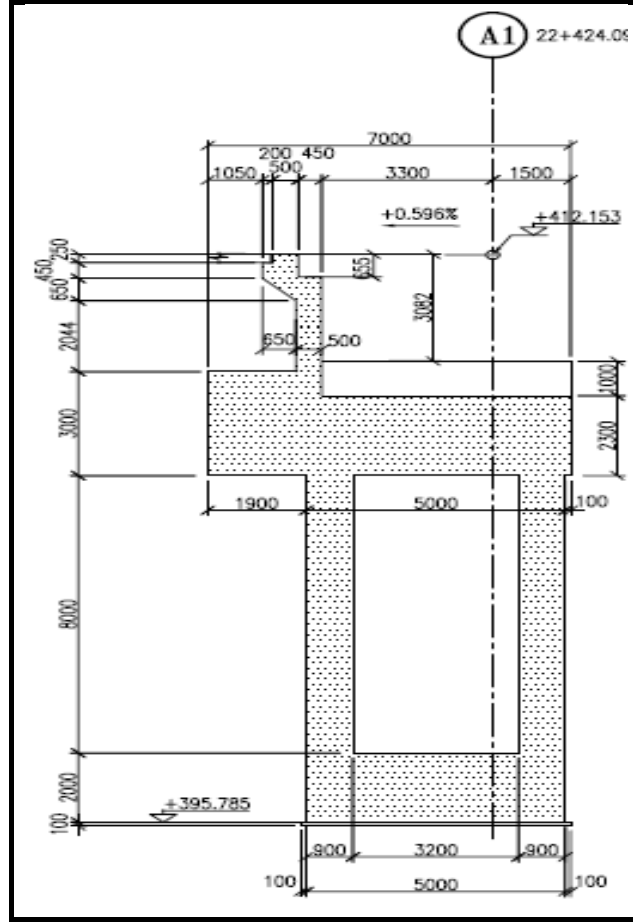


Şekil 2.95. P2 ve P3 temelleri plan ve kesitleri, (DSİ, 2007)

2.6.1.4. Kenarayaklar

2.6.1.4.1. A1 Kenarayağı

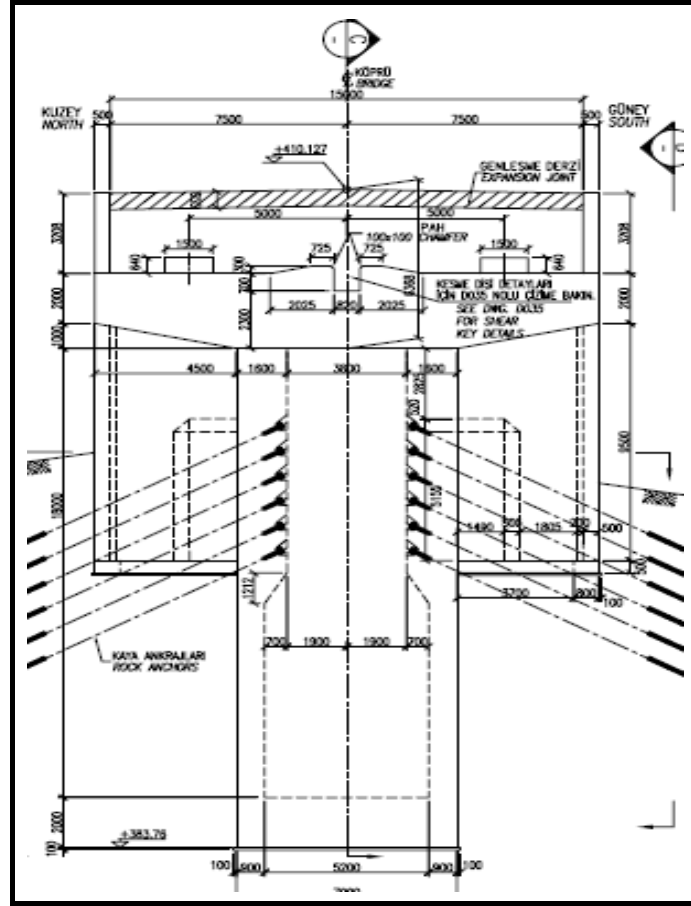
A1 kenarayağının temeli 7m x 5m boyutlarında, 2m yüksekliğindedir. Temelin üzerine içi boş basık silindir kesitli 10m yüksekliğinde şaft şeklindeki kolon inşa edilir. Kolon betonunun et kalınlığı 90cm'dir. Kolonun üzerine 15m genişliğindeki başlık kirişi inşa edilir. Bu yapılan başlık kirişinin üzerine mesnetler konulmuş ve ortaayak konsollarıyla kenarayağı birleştirecek olan uç diyaframı bu mesnetlerin üzerine oturmuştur. A1 kenarayağının genel görünümü ve boyutları Şekil 2.96'da verilmiştir.



Şekil 2.96. A1 kenar ayağı genel görünümü, (DSİ, 2007)

2.6.1.4.2. A4 Kenar Ayağı

A4 kenar ayağının temeli 7mx5m boyutlarında, 2m yüksekliğindedir. Temelin üzerine içi boş basık silindir kesitli 18m yüksekliğinde şaft şeklindeki kolon inşa edilir. Kolon betonunun et kalınlığı kolonun 9,78.metresine kadar 90cm'dir. 9,78.metresinden sonra 160cm'ye çıkar. Kenarayağ kolon içinden yapılan kaya ankrajlarıyla sabitlenmiştir. Kolonun üzerine 15m genişliğindeki başlık kirişi inşa edilir. Bu yapılan başlık kirişinin üzerine mesnetler konulmuş ve ortaayak konsollarıyla kenarayağı birleştirecek olan uç diyaframı bu mesnetlerin üzerine oturmuştur. A4 kenarayağının genel görünümü ve boyutları Şekil 2.97'de verilmiştir.

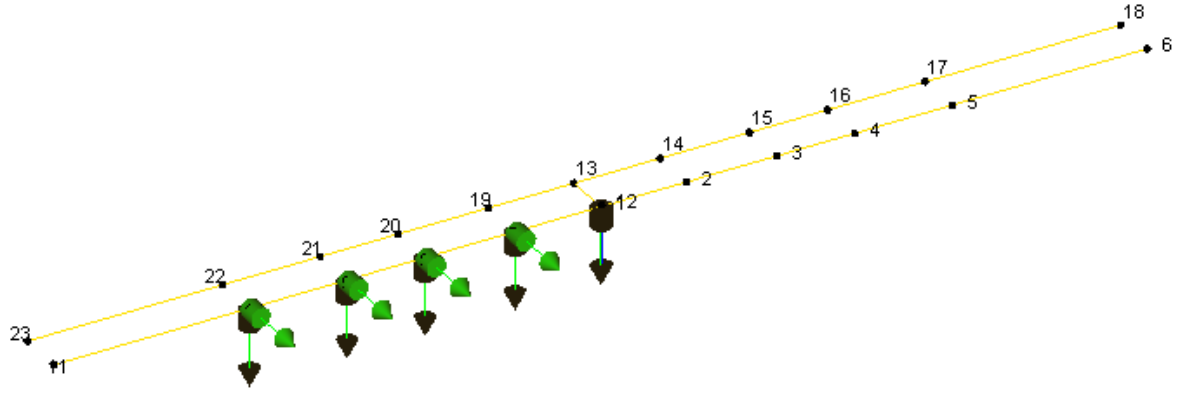


Şekil 2.97. A4 kenar ayağı genel görünümü, (DSİ,2007)

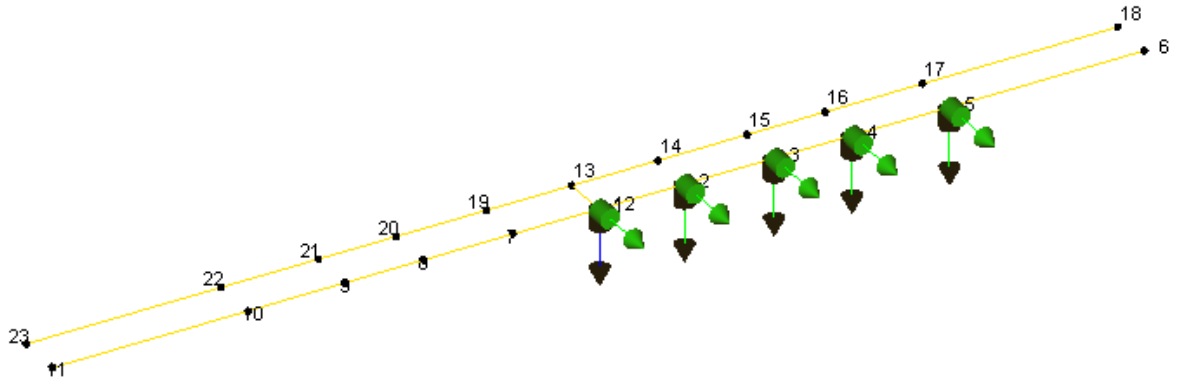
2.6.2. Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Berta Köprüsünün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Berta Köprüsü'nün dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemek için köprü'nün her iki yakasından ikişer ölçüm alınmak suretiyle dört adımda referanslı olarak tek çevresel titreşim testi uygulanmıştır. Ölçümler sırasında doğal titreşim olarak rüzgâr, yaya ve köprü üzerindeki araç geçişlerinden yararlanılmıştır. Köprü üzerinde ölçüm yapılacak noktalara ivmeölçerler bağlandıktan sonra sinyallerin toplanacağı veri toplama ünitesi ayarları yapılarak (frekans aralığı, model ve ivmeölçer bağlantıları, ölçüm süresi vb.) ölçümler alınmıştır. Ölçümler 0-12,5 Hz aralığında, analizler ise 0-6,25Hz frekans aralığında yapılmış ve ölçüm süresi ise her bir adım için 30dk seçilmiştir. Ölçümler için referans noktası olarak köprü orta açıklığının orta noktası başka bir deyişle her iki ortaayak konsolunun birbirleriyle birleştiği nokta seçilmiştir. Ölçümler için ivmeölçerler belirlenen noktalara düşey ve enine olmak üzere iki doğrultuda yerleştirilmiştir.

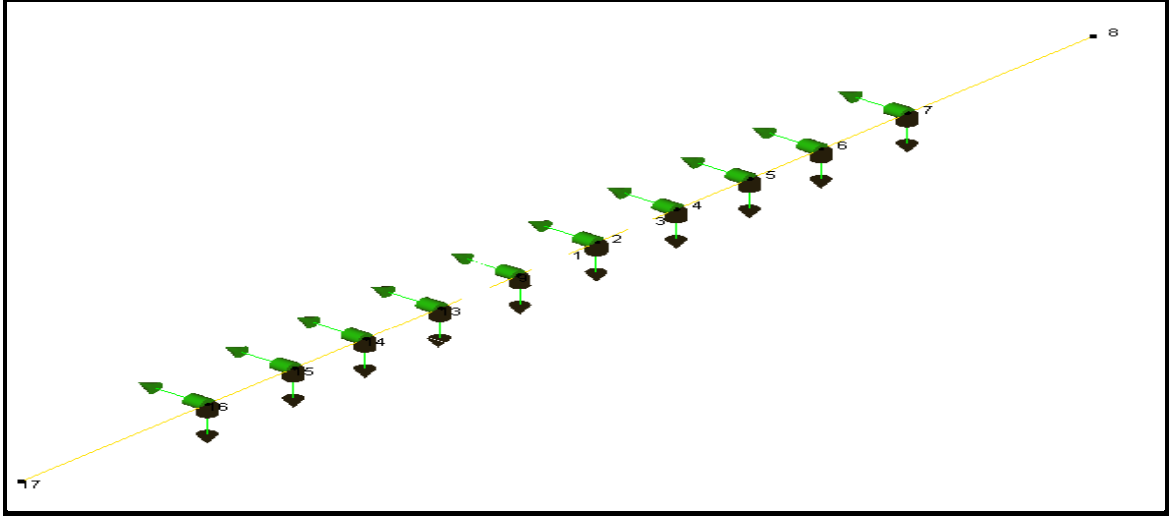
Birinci Ölçüm Testi: Birinci ölçüm köprüünün Artvin-Erzurum istikametine göre sağ yanından ve Artvin tarafından yapılmıştır. Düşey ve enine doğrultuda olmak üzere toplam 10 adet ivmeölçer daha önceden belirlenen noktalara yerleştirilmiştir.



İkinci Ölçüm Testi: İkinci ölçüm köprüünün Artvin-Erzurum istikametine göre sağyanından ve Erzurum tarafından yapılmıştır. Düşey ve enine doğrultuda olmak üzere toplam 10 adet ivmeölçer daha önceden belirlenen noktalara yerleştirilmiştir.



Ölçümler sırasında köprüde kullanılan tüm ivmeölçer yerleşim planı ve çekilmiş bazı fotoğraflar Şekil 2.98 ve Şekil 2.99'da verilmiştir.

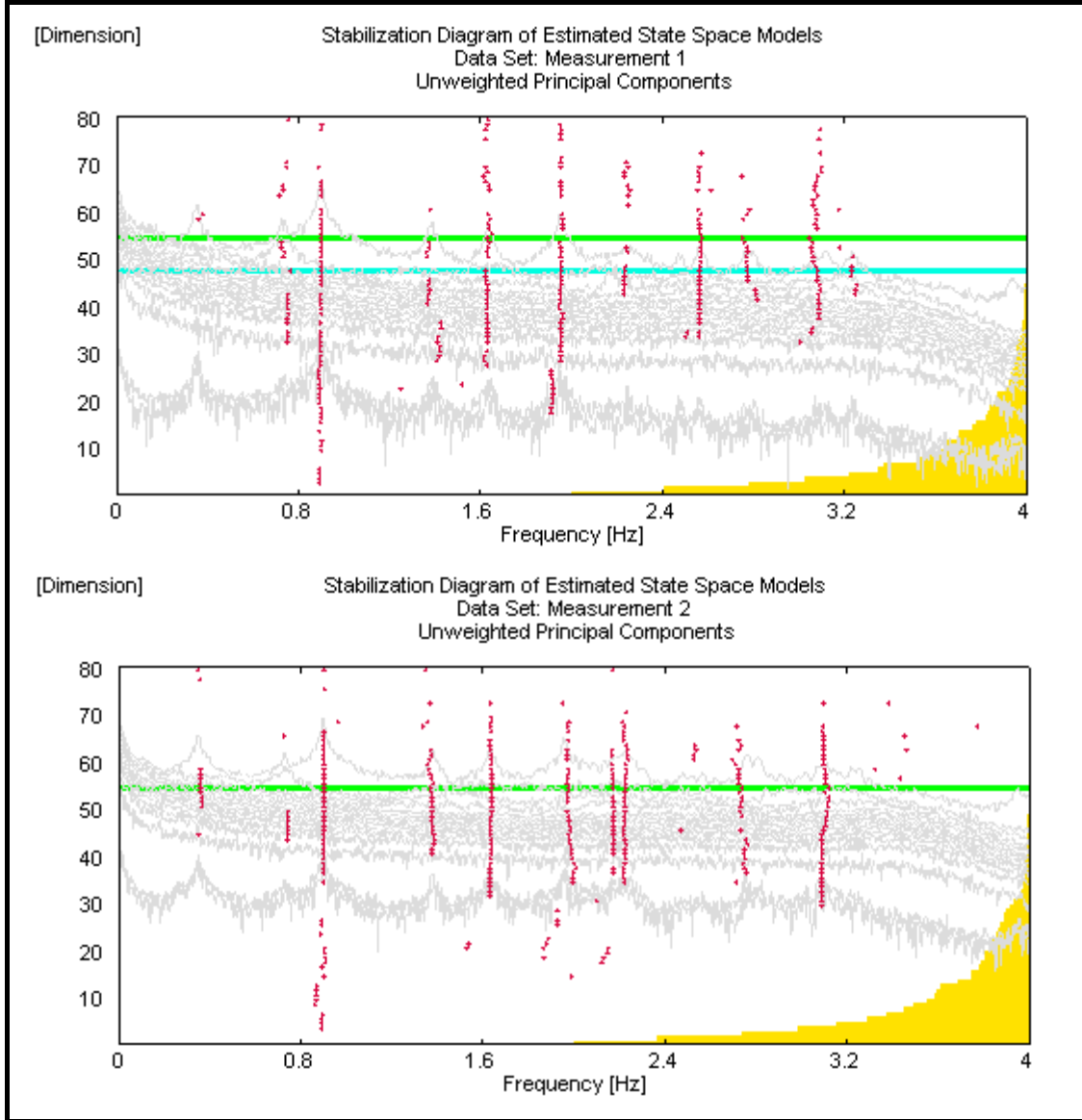


Şekil 2.98. Berta Köprüsü'nün çevresel titreşim testleri için kullanılan ivmeölçer yerleşim planları



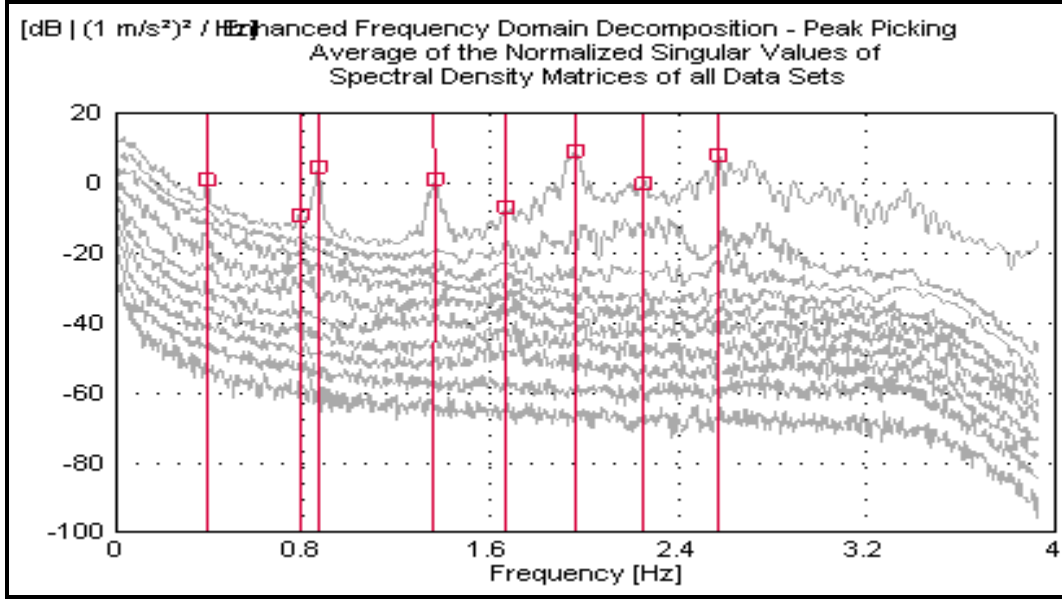
Şekil 2.99. Berta Köprüsü'nde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar

Berta Köprüsü'nde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar Şekil 2.99'da verilmektedir. Berta Köprüsü'ne uygulanan iki farklı çevresel titreşim testinden toplanan sinyallerin GFTAA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu her bir ölçüm adımı için elde edilen tekil değerler Şekil 2.100'de verilmiştir.



Şekil 2.100. Berta Köprüsü'nde yapılan iki ölçümden elde edilen stabilizasyon diagramları

Her bir ölçüm adımı sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ortalamaları Şekil 2.101'de verilmiştir.



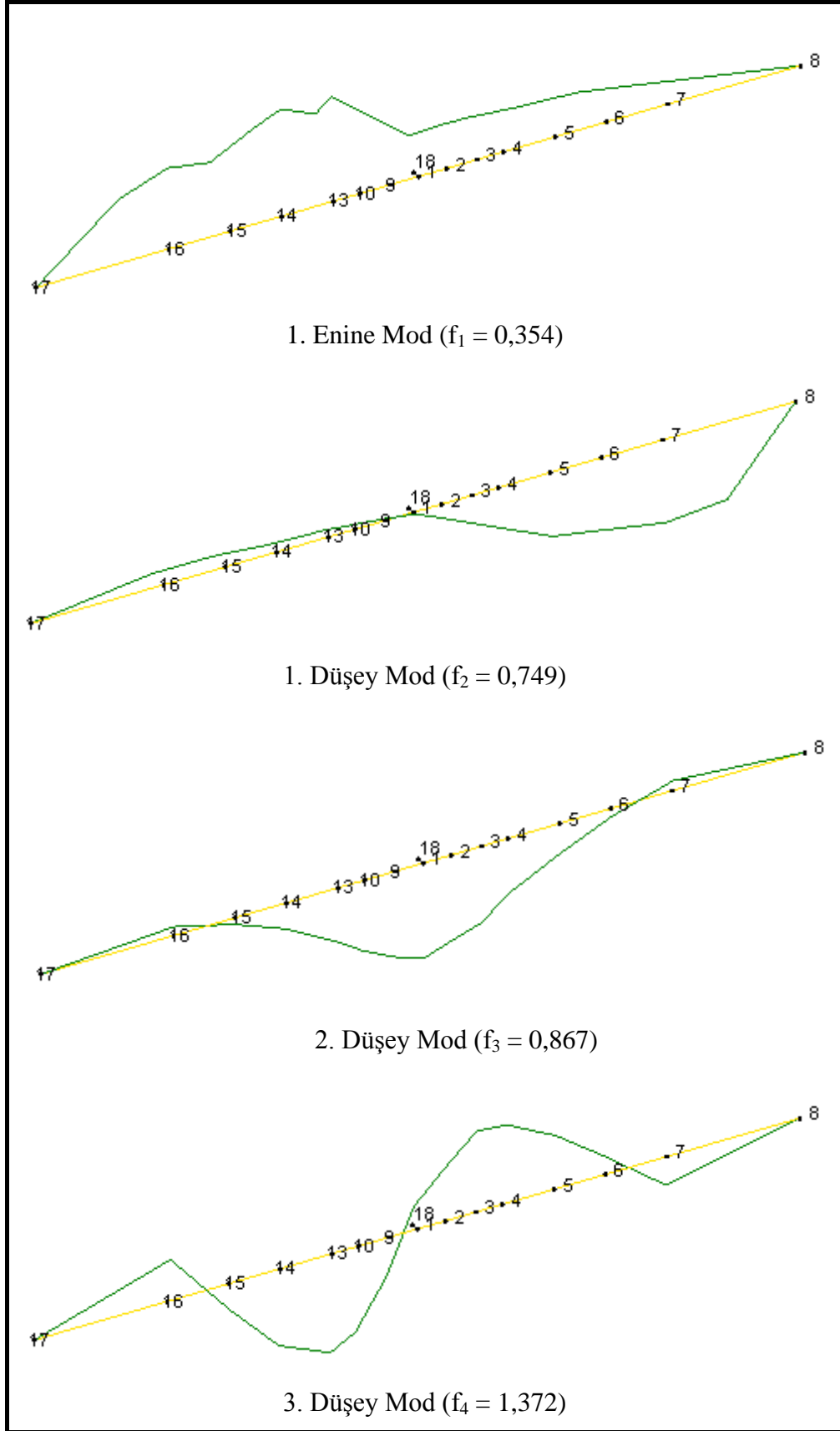
Şekil 2.101. Geliştirilmiş frekans tanım aralığında ayrıştırma yöntemi ile elde edilen tekil değerler

Berta Köprüsüne ait ilk yedi mod için frekans değerleri ve sönüm oranları Tablo 2.13’de verilmiştir. İlk yedi frekansın 0,354-2,273 Hz. arasında olduğu, sönüm oranı değerlerinin ise %3,169-0,419 arasında değiştiği görülmektedir.

Tablo 2.13. Köprüsü’nün ilk yedi doğal frekansı ve modal sönüm oranı

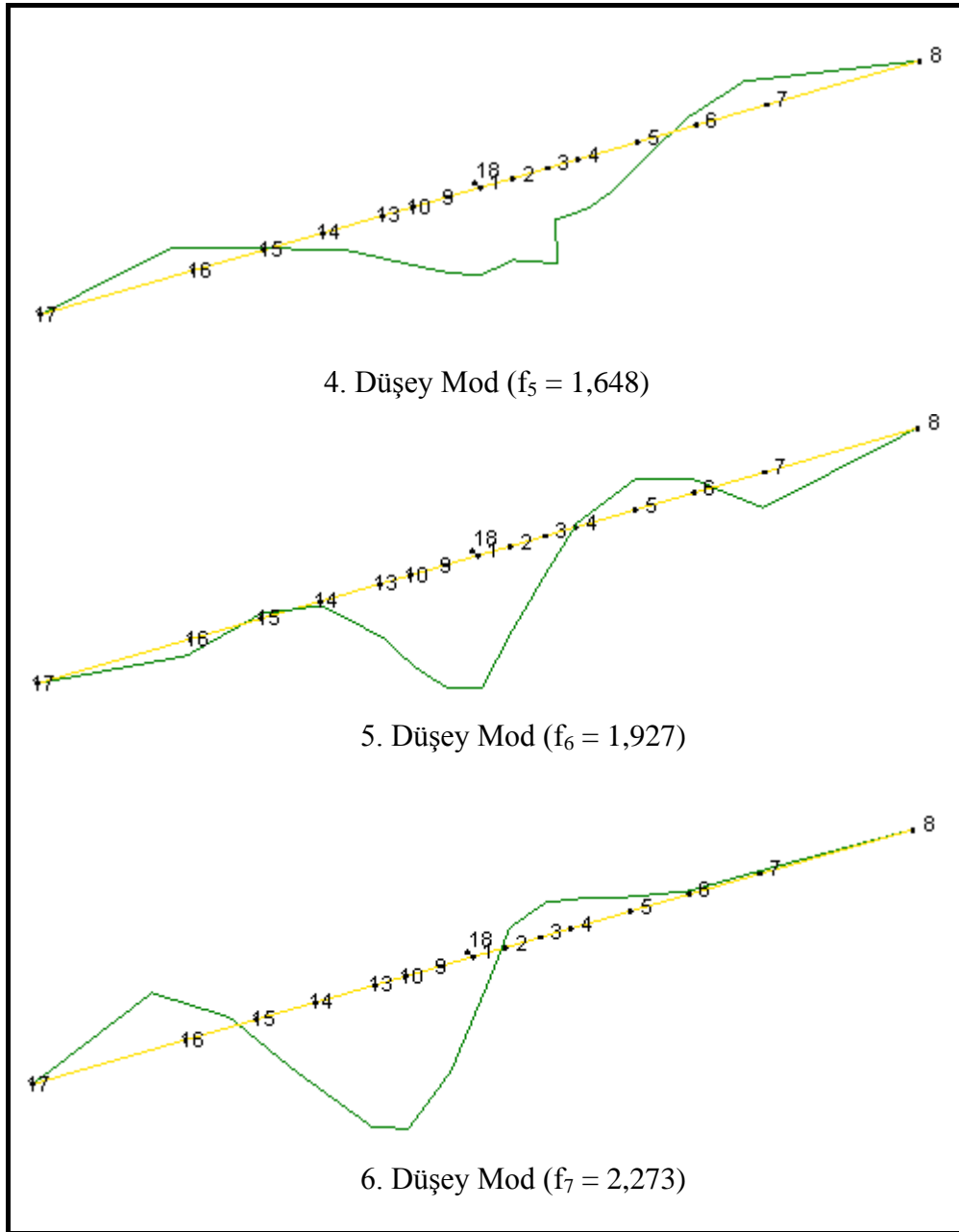
Mod No	Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı
1	0,354	1,769
2	0,749	3,169
3	0,867	0,652
4	1,372	1,030
5	1,648	0,620
6	1,927	0,419
7	2,273	1,124

Berta Köprüsü’ne uygulanan deneysel ölçüm testlerinden GFTAA Yöntemine göre elde edilen mod şekilleri Şekil 2.102’de verilmiştir.



Şekil 2.102. Berta köprüsünün çevresel titreşim yöntemi ile elde edilen mod şekilleri

Şekil 2.102'nin devamı



2.6.3. Berta Köprüsü'nün Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

2.6.3.1. Köprü'nün Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli

Berta Köprüsü'nün teorik dinamik karakteristiklerini (doğal frekanslar ve mod şekilleri) belirlemek için köprü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 (SAP2000,

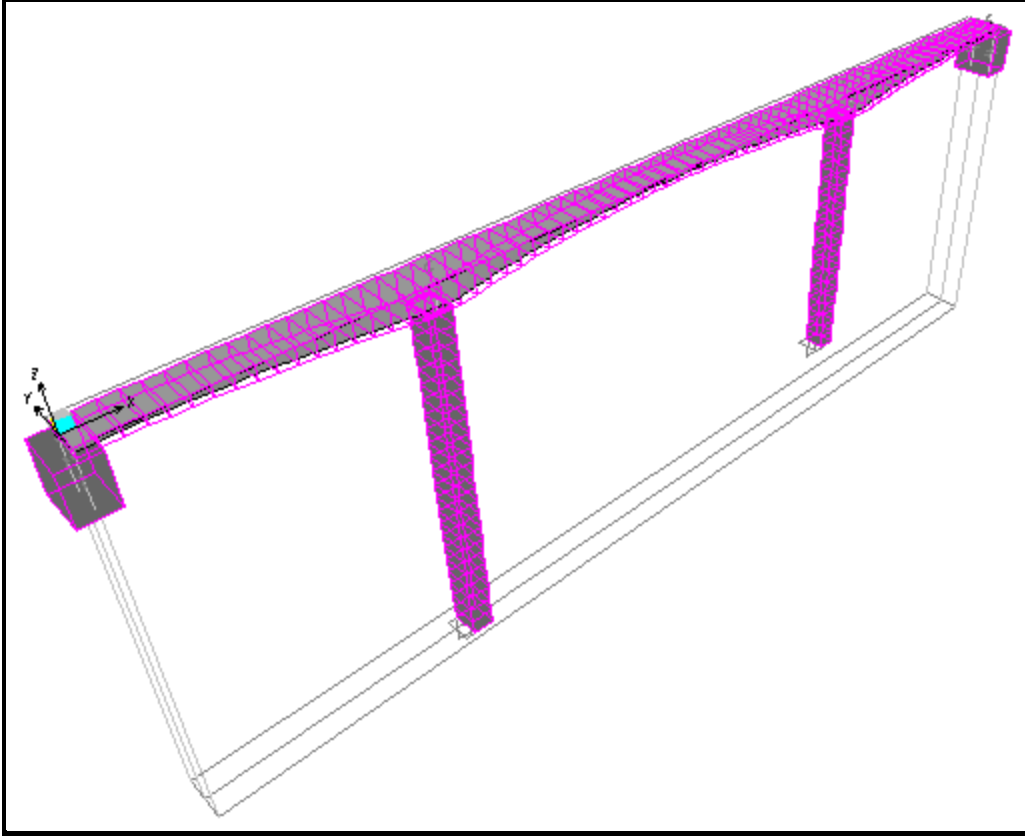
2008) programı kullanılarak, aşağıda belirtilen modelleme kriterleri kullanılarak yapılmıştır.

- Köprü SAP 2000 programının “Bridge” sekmesi kullanılarak modellenmiştir. Değişken kutu kesitli tabliye boyutları parametrik varyasyonlar tanımlanarak proje verilerine göre çizilmiştir. Ortaayaklarda ve tabliyede segment boyları 5m olarak tanımlanmıştır.
- Ortaayaklarla tabliyenin birleşimleri projede olduğu gibi ankastre olarak tanımlanmış olup tabliye birleşiminden önceki son 1m leri dolu kesittir.
- Kenarayakların ve ortaayakların köprü tabliyesi ile birleşimlerinde 1m kalınlığında diyaframlar tanımlanmıştır.
- Kutu kesitli tabliyenin üstünde kullanılan öngerme halatları ve altında kullanılan ardgerme halatları proje verilerine uygun boy ve sayıda tanımlanmıştır.
- Kenarayak mesnetleri belli rijitliklere sahip yaylarla tanımlanmıştır. Kenarayakların düşey ve enine doğrultuda serbestlikleri tamamen tutulmuştur. Boyuna doğrultudaki hareketler için yay rijitliği 50000 kN/m olarak belirlenmiştir.

Köprünün modellenmesi ve analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.14’de verilmiştir. Köprü içim oluşturulan sonlu eleman modeli Şekil 2.103’te gösterilmektedir.

Tablo 2.14. Berta Köprüsü’nün sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri

Eleman	Elastisite Modülü N/m ²	Poisson Oranı -	Yoğunluk Kg/m ³	Beton Sınıfı
Tabliye	3,4E10	0,2	2450	C40
Ortaayak kolonları	3,2E10	0,2	2450	C30
Ortaayak temelleri	3,2E10	0,2	2450	C30
Kenarayaklar	3,2E10	0,2	2450	C30
Öngerme çeliği	1,95E11	-	-	-



Şekil 2.103. Berta Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli

2.6.3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Berta Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

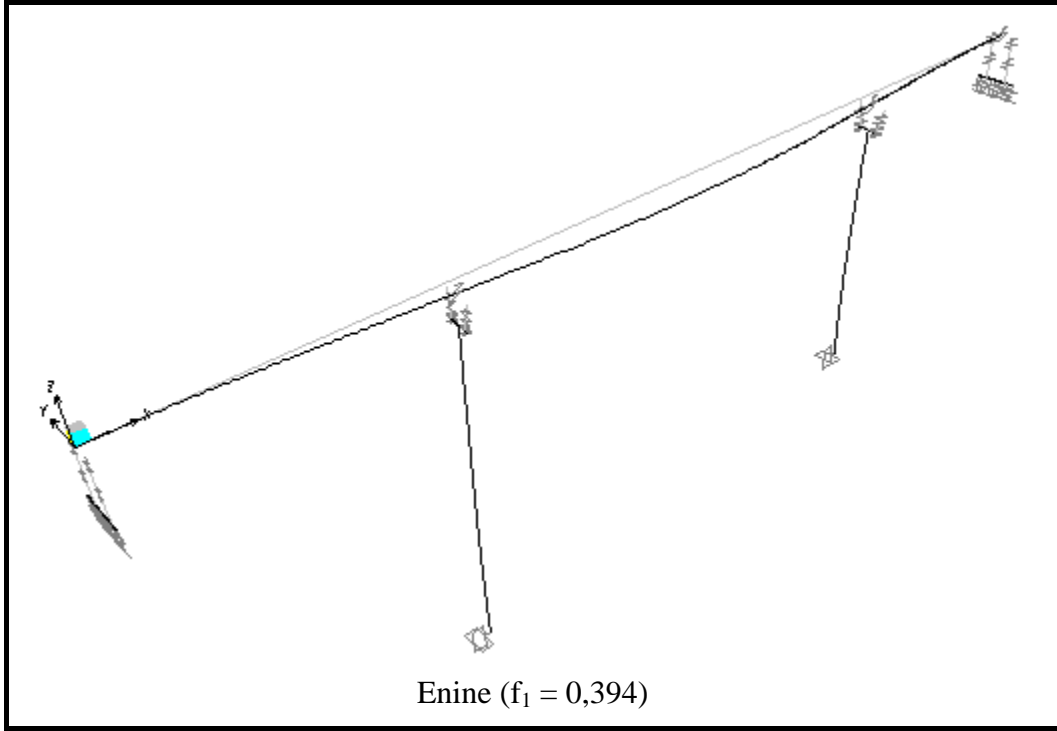
Köprü'nün 3-boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 programında oluşturulduktan sonra modal analiz gerçekleştirilmiş ve köprü teorik dinamik karakteristikleri olan mod şekilleri ve doğal frekans değerleri belirlenmiştir.

Berta Köprüsü'nün SAP2000 programı kullanılarak gerçekleştirilen modal analizinden elde edilen ilk yedi moduna ait doğal frekans ve periyot değerleri Tablo 2.15'de verilmiştir. Tablo 2.15'den görüldüğü gibi köprü'nün ilk yedi doğal frekansı 0,394-1,880 Hz. değerleri arasında değişmektedir. Köprü'nün ilk yedi mod şekli Şekil 2.104'te gösterilmektedir.

Tablo 2.15. Berta Köprüsü'nün ilk 7 doğal frekans ve periyotları

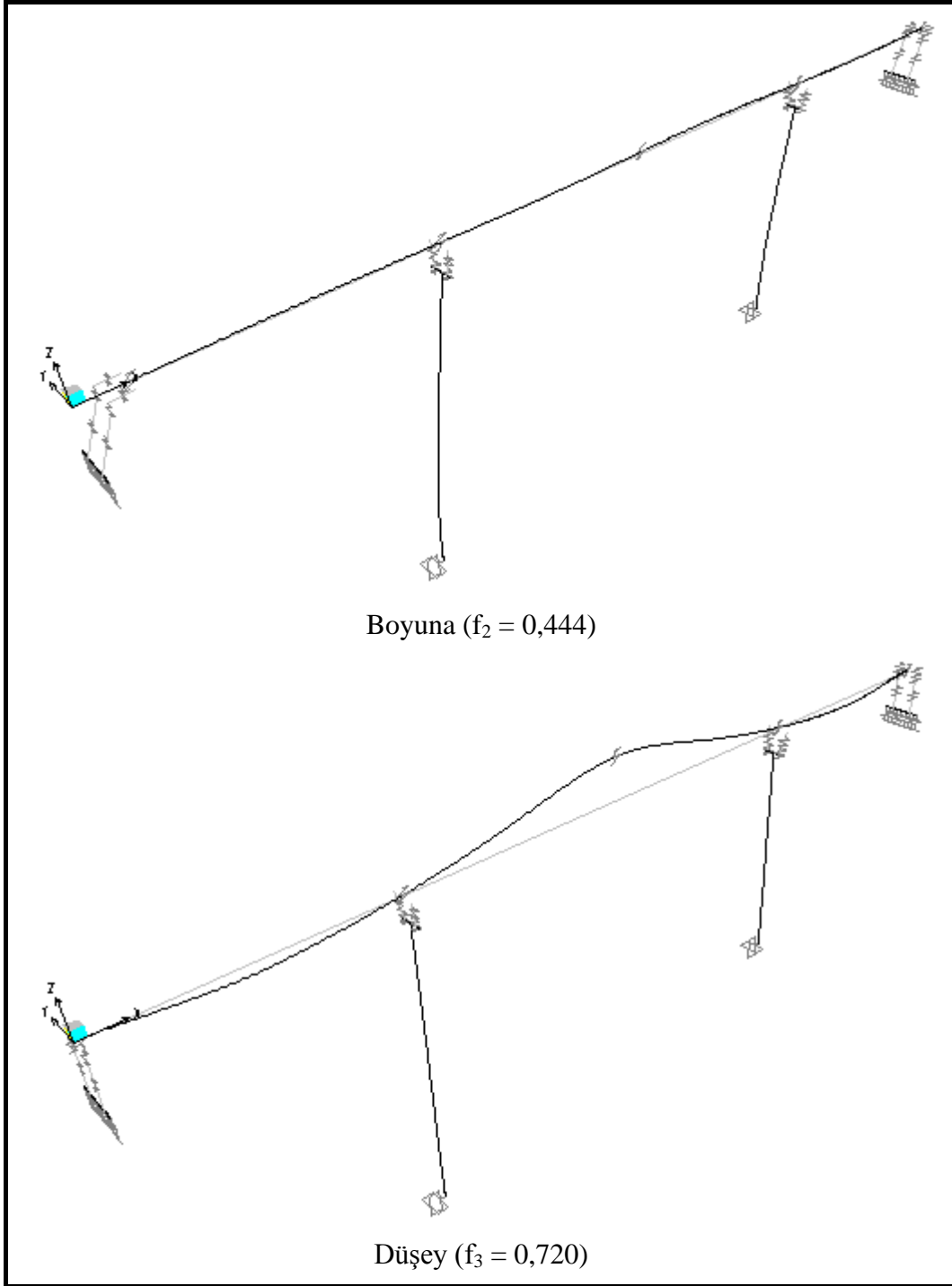
Berta Köprüsü ($\approx L=340\text{m}$)

Mod No	Frekans (Hz)	Periyot (sn)
1	0,394	2,538
2	0,444	2,252
3	0,720	1,389
4	0,773	1,294
5	1,465	0,683
6	1,501	0,666
7	1,880	0,532

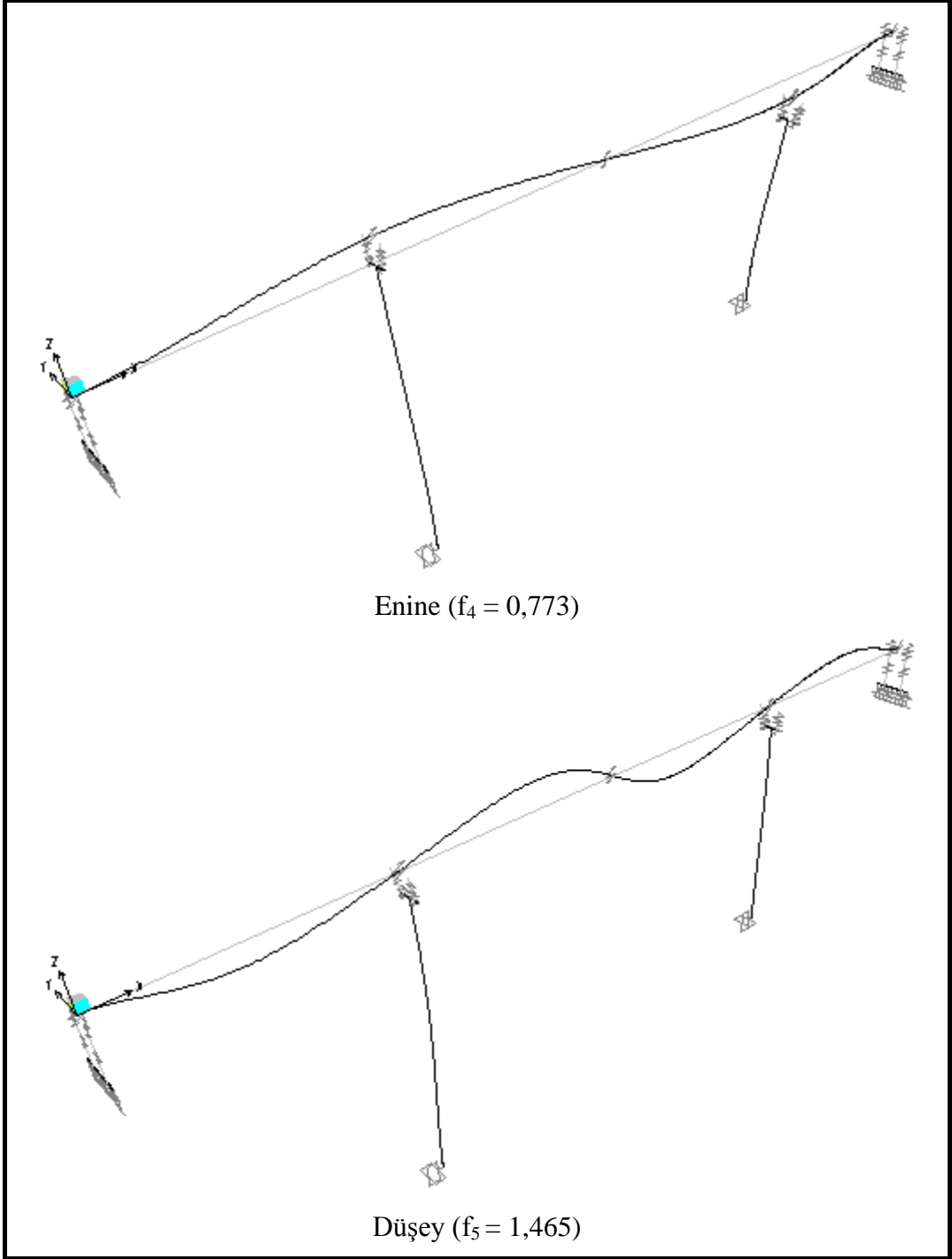


Şekil 2.104. Berta Köprüsü'nün analitik olarak elde edilen ilk 7 mod şekli

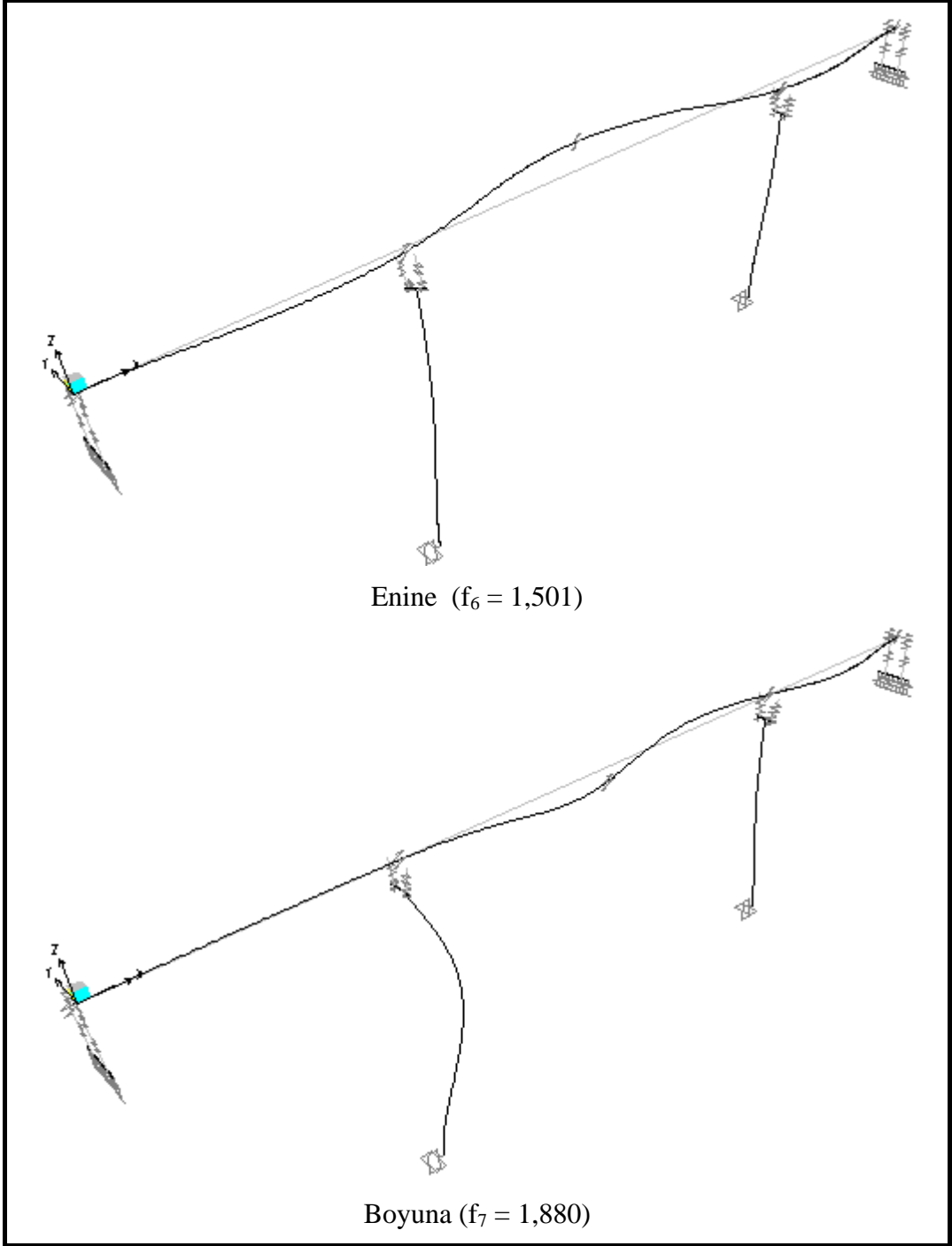
Şekil 2.104'ün devamı



Şekil 2.104'ün devamı



Şekil 2.104'ün devamı



2.7. Bulgular ve İrdemeler

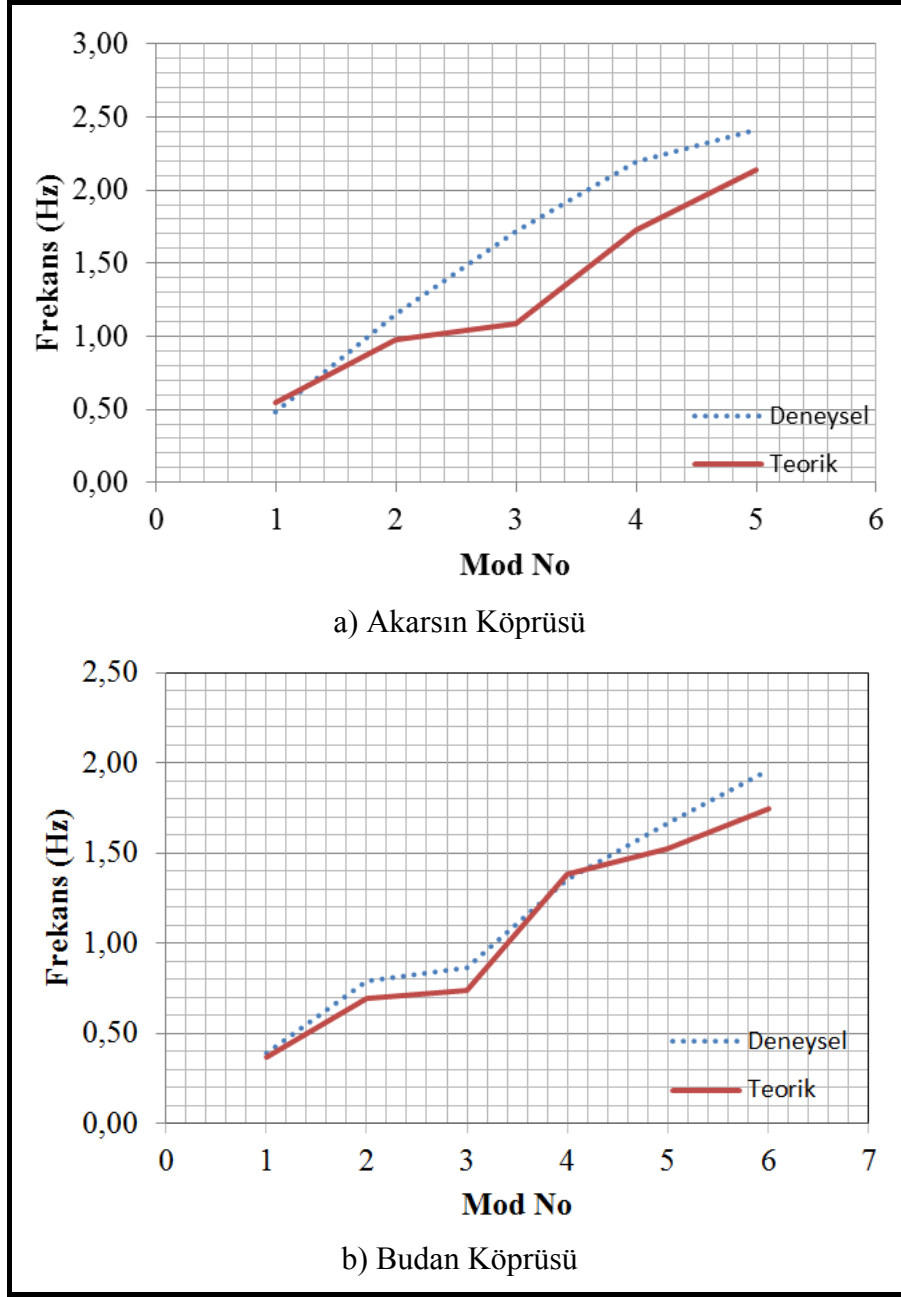
2.7.1. Köprülerin Teorik ve Deneysel Frekansların Karşılaştırılması

Artvin-Erzurum karayolunda bulunan, dengeli konsol yöntemi ile yapılmış olan 5 adet köprünün yapılmış olan Çevresel Titreşim Testleri sonucunda elde edilen ilk 7 doğal frekansı ve Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak SAP2000 programında oluşturulan köprü modellerinin teorik modal analizi sonucunda elde edilen ilk 7 doğal frekansı Tablo 2.16’da verilmektedir. Yapılan çevresel titreşim testlerinde boyuna yönde ivmeölçer kullanılmadığından dolayı boyuna modlara karşılık gelen doğal frekanslar ölçülmemiştir. Bu sebepten teorik modal analiz neticesinde elde edilen boyuna modlara karşılık doğal frekanslar Tablo 2.16’da gösterilmemiştir.

Tablo 2.16. Deneysel ve teorik analizlerden elde edilen ilk 7 doğal frekans

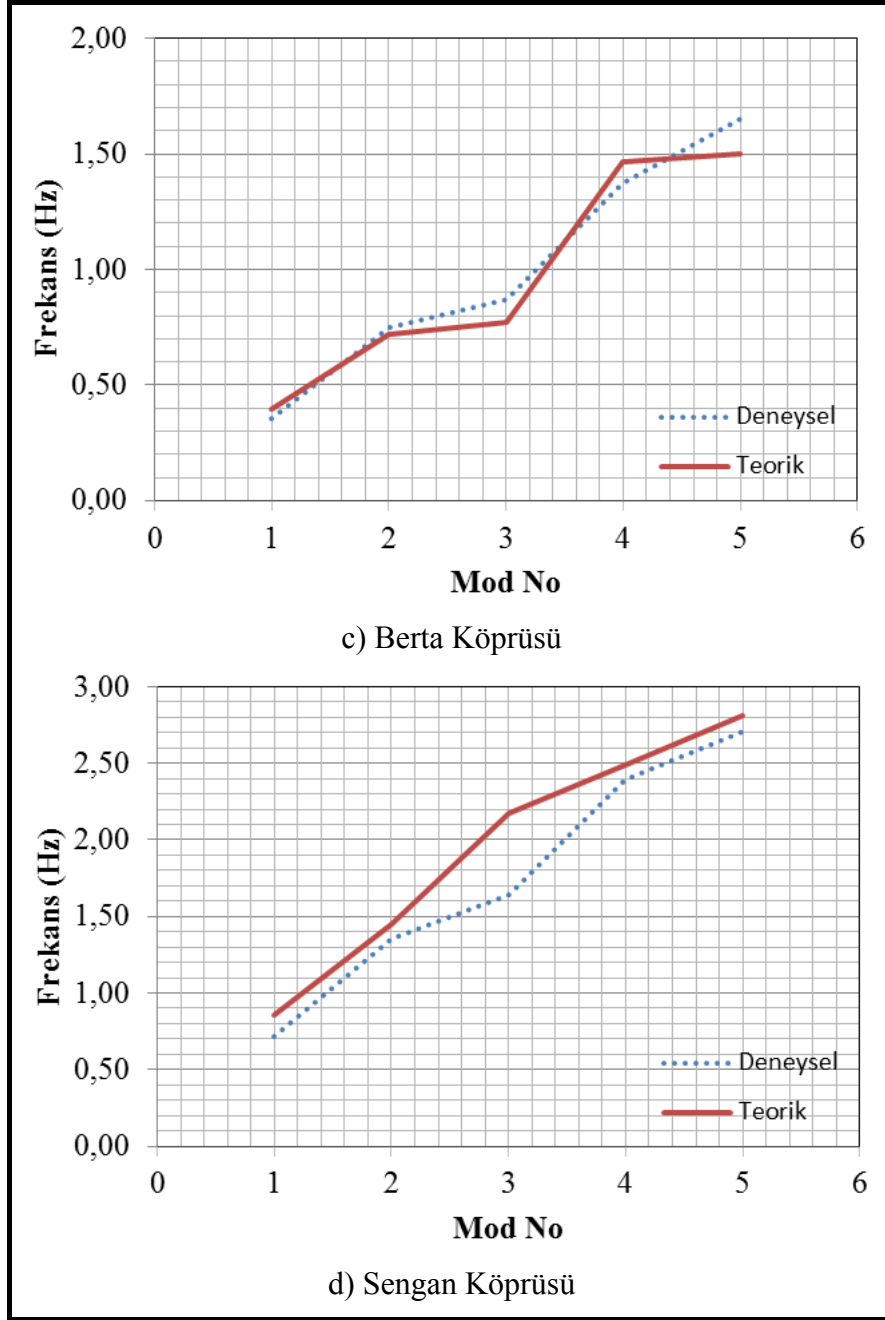
MMod No	Akarsın Köp.		Budan Köp.		Berta Köp.		Sengan Köp.		Ortaköy Köp.	
	Deney.	Teori	Deney.	Teorik	Deney.	Teorik	Deney.	Teorik	Deney.	Teorik
1	0,484	0,544	0,389	0,371	0,354	0,394	-	0,780	-	0,815
2	-	0,560	-	0,490	-	0,444	0,716	0,855	0,923	1,166
3	1,147	0,980	0,788	0,695	0,749	0,720	1,353	1,447	1,639	2,111
4	1,714	1,091	0,863	0,738	0,867	0,773	1,639	2,173	2,016	3,384
5	-	1,600	1,354	1,382	1,372	1,465	2,389	2,488	3,084	3,534
6	2,190	1,730	1,664	1,524	1,648	1,501	-	2,727	3,253	3,620
7	2,409	2,140	1,958	1,743	-	1,880	2,711	2,812	-	5,840

Her köprüye ait deneysel ve teorik doğal frekansların karşılaştırıldığı grafikler Şekil 2.105’te gösterilmektedir.

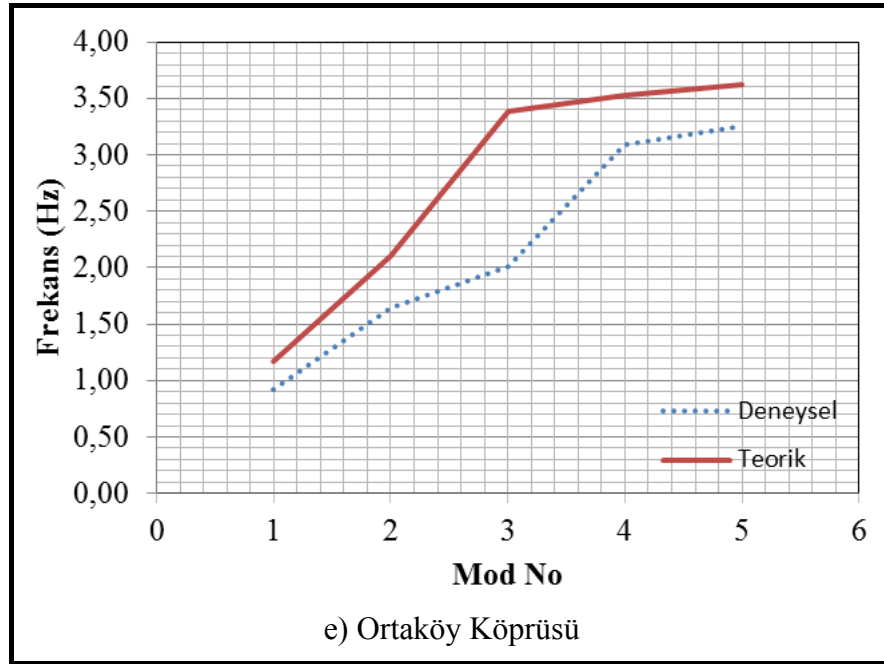


Şekil 2.105. Deneysel ve teorik doğal frekansların karşılaştırılması

Şekil 2.105'in devamı



Şekil 2.105'in devamı



Şekil 2.105'de görüldüğü gibi Budan, Berta ve Sengan Köprülerinin deneysel ve teorik doğal frekans değerleri bütün modlarda oldukça uyumludur. Akarsın ve Ortaköy köprülerinde ise 1. ve 2. modlarda yakın değerler elde edilmiştir.

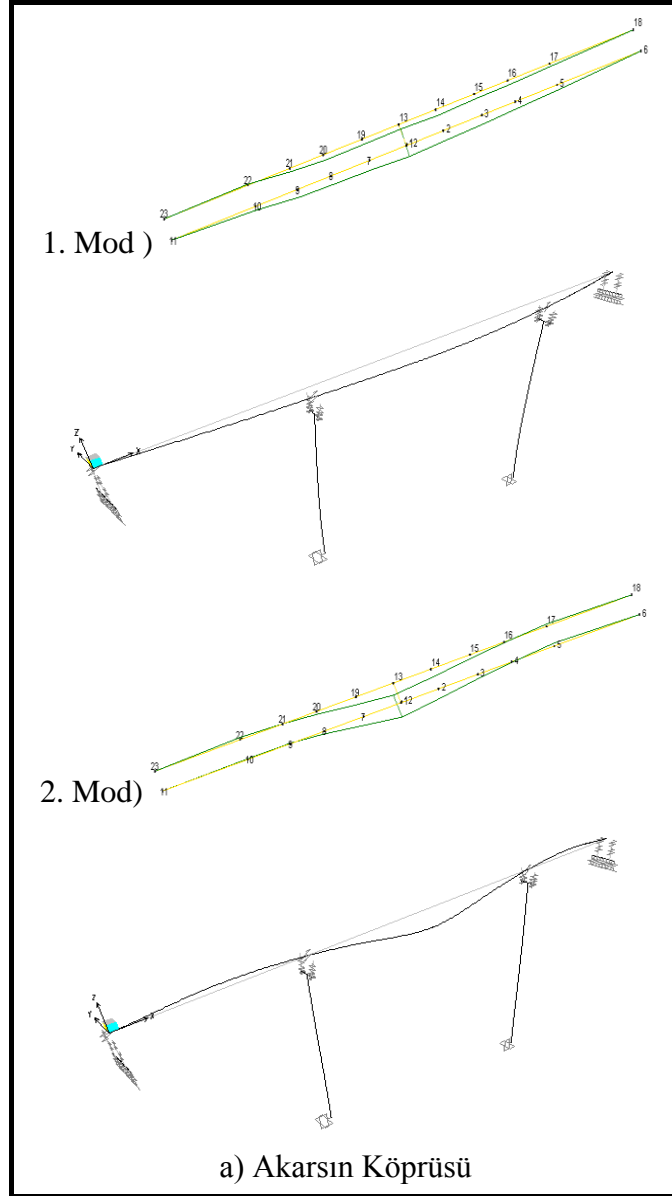
Çevresel Titreşim Yöntemi ile dinamik karakteristikleri elde edilen 5 adet köprünün ilk 5 mod için doğal frekansları ve sönüm oranları Tablo 2.17'de karşılaştırılmaktadır. Köprülerin sönüm oranlarının %3'ün altında olduğu görülmektedir.

Tablo 2.17. Deneysel dinamik karakteristikler

Mod No	Akarsın H=109,7m L=275m		Budan H=106,7m L=350m		Berta H=124,63m L=340m		Sengan H=106,16m L= 190m		Ortaköy H=69m L=154,4m	
	Frekans (Hz)	Sönüm oranı (%)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	0,484	1,592	0,389	1,398	0,354	1,769	0,716	1,112	0,923	0,808
2	1,147	0,552	0,788	0,691	0,749	3,169	1,353	0,665	1,639	1,931
3	1,714	0,681	0,863	0,766	0,867	0,652	1,639	1,636	2,016	0,635
4	2,190	0,420	1,354	0,737	1,372	1,030	2,389	0,563	3,084	0,484
5	2,409	0,843	1,664	0,251	1,648	0,620	2,711	0,0	3,253	0,907

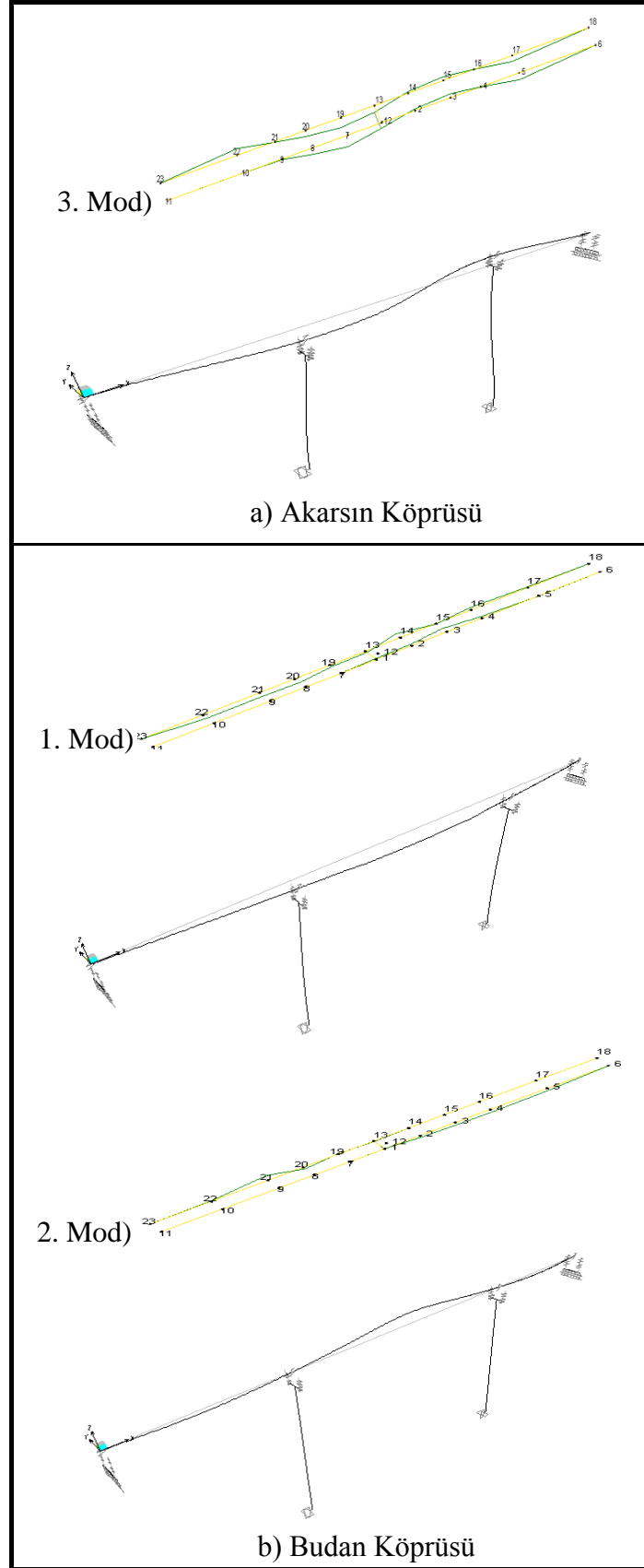
2.7.2. Deneysel ve Teorik Mod Şekillerinin Karşılaştırılması

Köprülerin çevresel titreşim testleri ve teorik analizler sonucunda elde edilen ilk 3 mod şekilleri Şekil 2.106'da verilmiştir. Deneysel ölçümlerde boyuna modlar ölçülmediğinden teorik analiz sonuçlarından boyuna modlar çıkarılmıştır.

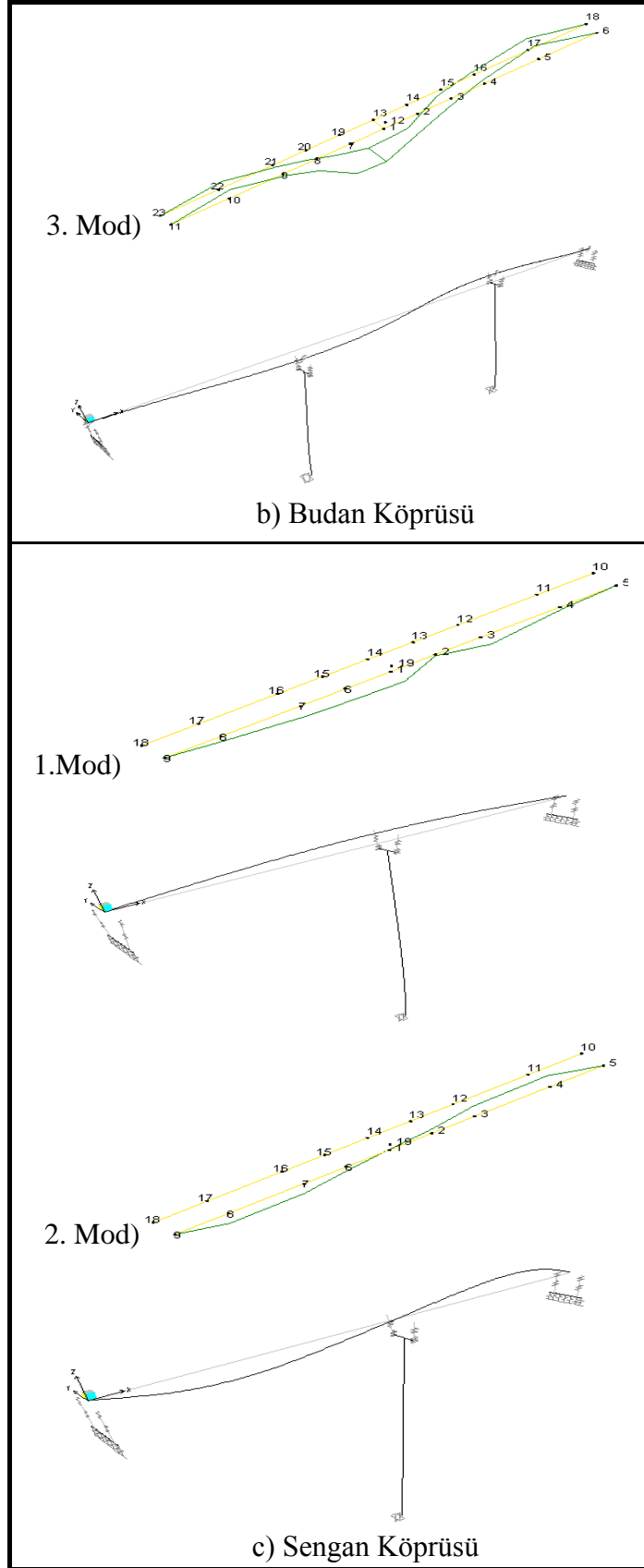


Şekil 2.106. Deneysel ve teorik mod şekilleri

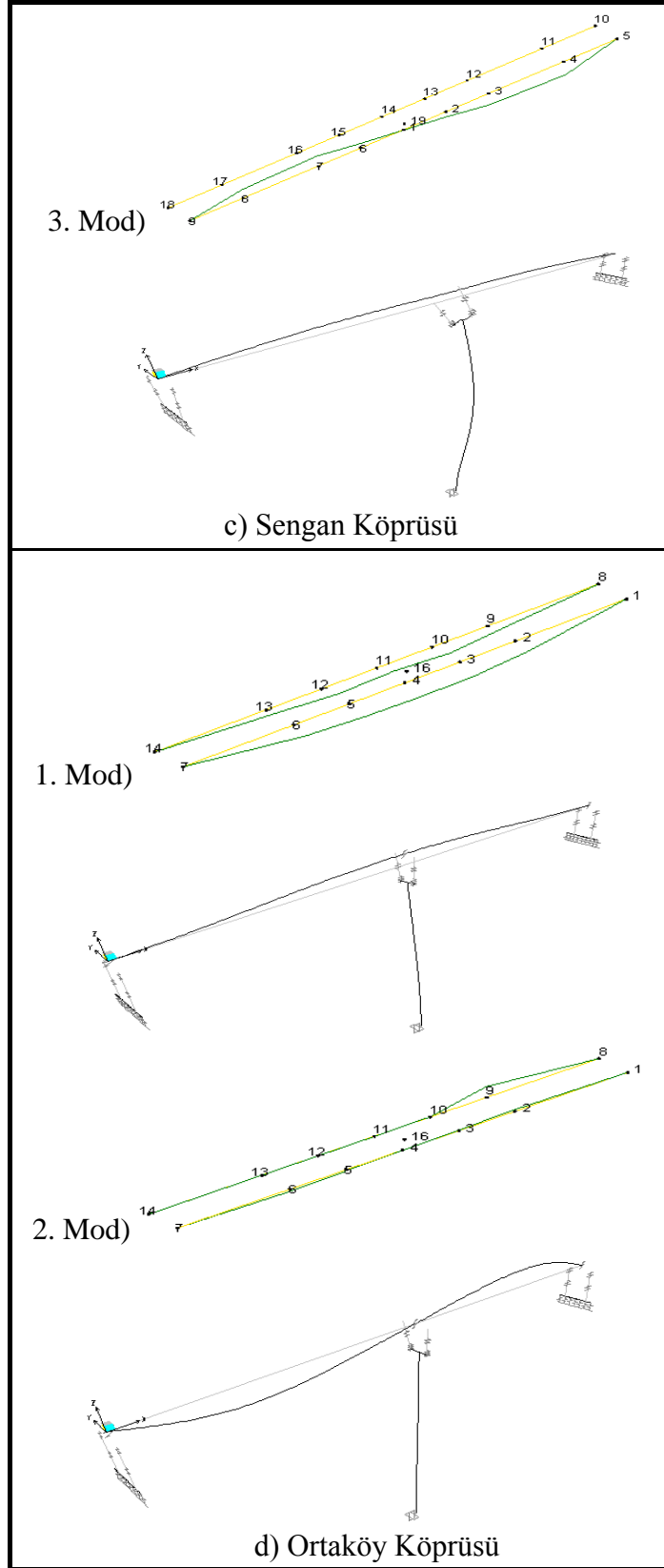
Şekil 2.106'nın devamı



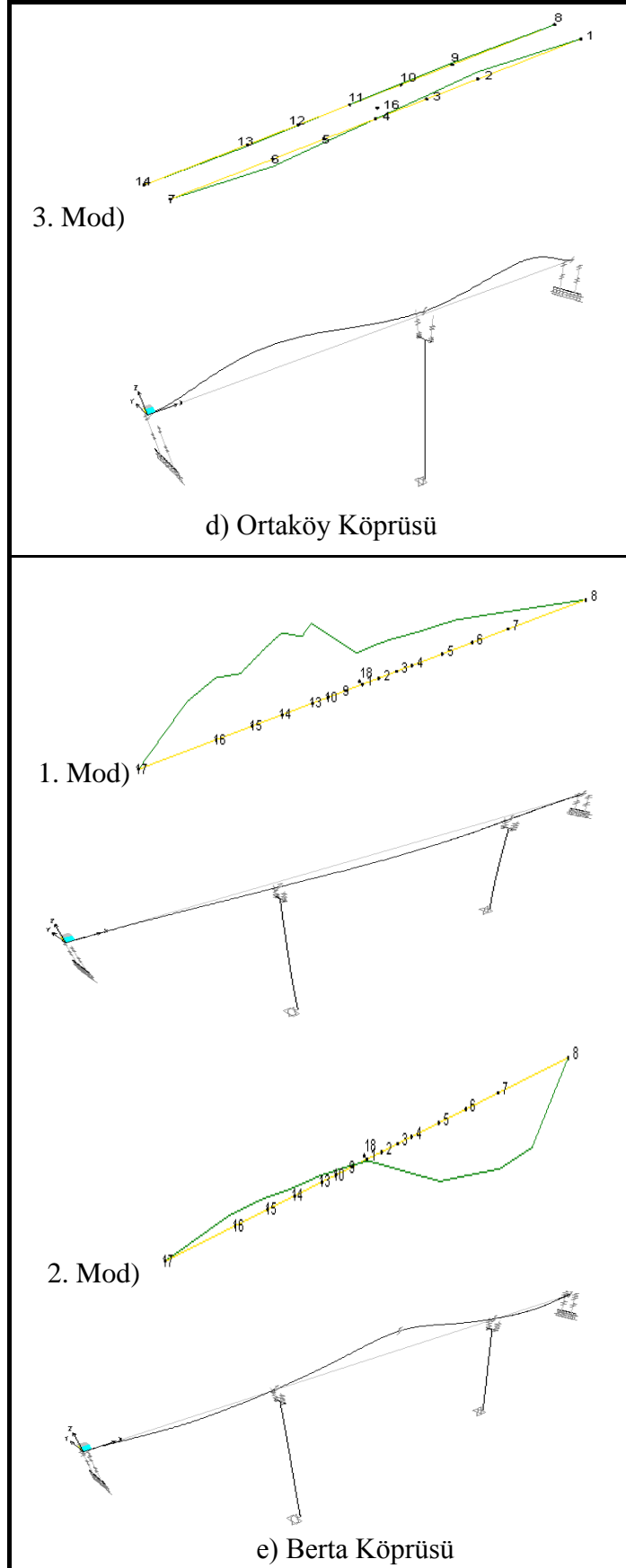
Şekil 2.106'nın devamı



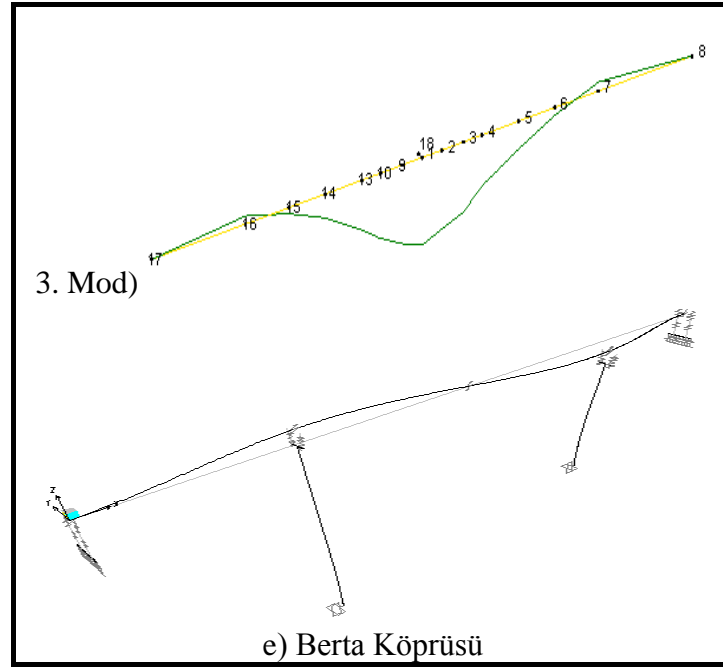
Şekil 2.106'nın devamı



Şekil 2.106'nın devamı



Şekil 2.106'nın devamı



Şekil 2.106'dan görüldüğü gibi deneysel ve teorik mod şekilleri birbirleri ile uyumludur.

2.7.3. Köprü Frekansını Etkileyen Parametrelerin Belirlenmesi

Köprü doğal frekansı etkileyen faktörler kütle ve rijitliktir. Rijitlik' de yükseklik, elastisite modülü ve atalet momentine bağlıdır. Bu faktörlerin doğal frekansı ne kadar etkilediği teorik model üzerinde incelenecektir. Şekil 2.105'de görüldüğü gibi çevresel titreşim testleri sonucunda elde edilen doğal frekanslarla teorik analiz sonucunda elde edilen doğal frekansların birbirine en yakın olduğu köprü Budan Köprüsüdür. Bu sebeple 1. doğal frekansı etkileyen parametrelerin seçilmesinde Budan Köprüsü'nün teorik modeli kullanılacaktır. Budan Köprüsü' nün proje verilerine göre oluşturulan teorik modelinde kullanılan elastisite modülü, ayak yükseklikleri, beton birim ağırlığı ve atalet momentleri Tablo 2.18'de verilmiştir. Köprü'nün 1. modu enine ve kolon eğilmesine bağlı olduğundan köprü'nün boyuna eksenine etrafındaki kolon atalet momentleri dikkate alınmıştır.

Tablo 2.18. Budan Köprüsü doğal frekansı etkileyen faktörler

1. Doğal Frekans (Hz)	Elastisite Modülü (kN/m)	Ayak Yükseklikleri (m)		Beton Birim Ağırlık (kN/m ³)	Atalet Momentleri (m ⁴)	
		P2	P3		P2	P3
0,371	32000000	101,2	107,2	24,5	203,31	203,31

Budan Köprüsü'nün elastisite modülü, ayak yükseklikleri, kütle ve atalet momentleri değerlerinin ayrı ayrı %10 değiştirildiğinde 1. doğal frekansın aldığı değerler ve değişim oranları Tablo 2.19'da verilmiştir. Tabloda “%” ler önündeki (-) azaltmayı (+) arttırmayı göstermektedir.

Tablo 2.19. Frekansın parametrelere bağlı değişim oranları

	Gerçek Değer	Elastisite Modülü (- %10)	Ayak Yükseklikleri (+%10)	Kütle (+ %10)	Atalet Momenti (- %10)
1. Doğal Frekans (Hz)	0,371	0,351	0,350	0,353	0,363
Değişim	-	-%5,4	-%5,6	-%4,8	-%2,1

Tablo 2.19'dan görüldüğü gibi köprünün 1. doğal frekansını etkileyen en önemli faktör ayak yükseklikleridir. Elastisite modülü ve kütlede belirgin olarak etkilidir. Atalet momentinin etkisi bu üçüne nazaran daha azdır. İncelenmiş olunan köprülerde aynı sınıf beton kullanıldığından elastisite modülleri aynıdır. 5 adet köprüde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen 1. doğal frekansların değişiminde elastisite modülü bütün köprülerde aynı olduğundan dolayı göz ardı edilmiştir. Atalet momentinin 1. doğal frekansa etkisi nispeten daha az olduğu için göz ardı edilmiştir. Köprü yüksekliği ve kütle, 1. doğal frekansını etkileyen parametreler olarak seçilmiştir. İncelenmiş olunan 5 adet köprünün üstyapı kesiti birbirlerine yakındır. Bu sebeben üstyapı kesitleri arasındaki küçük farklılıklar ihmal edilip, köprü kütleleri köprü uzunluklarıyla doğru orantılı olarak kabul edilmiştir. 1. doğal frekansın değişiminde parametre olarak köprü kütlesi yerine köprü uzunluğu dikkate alınacaktır.

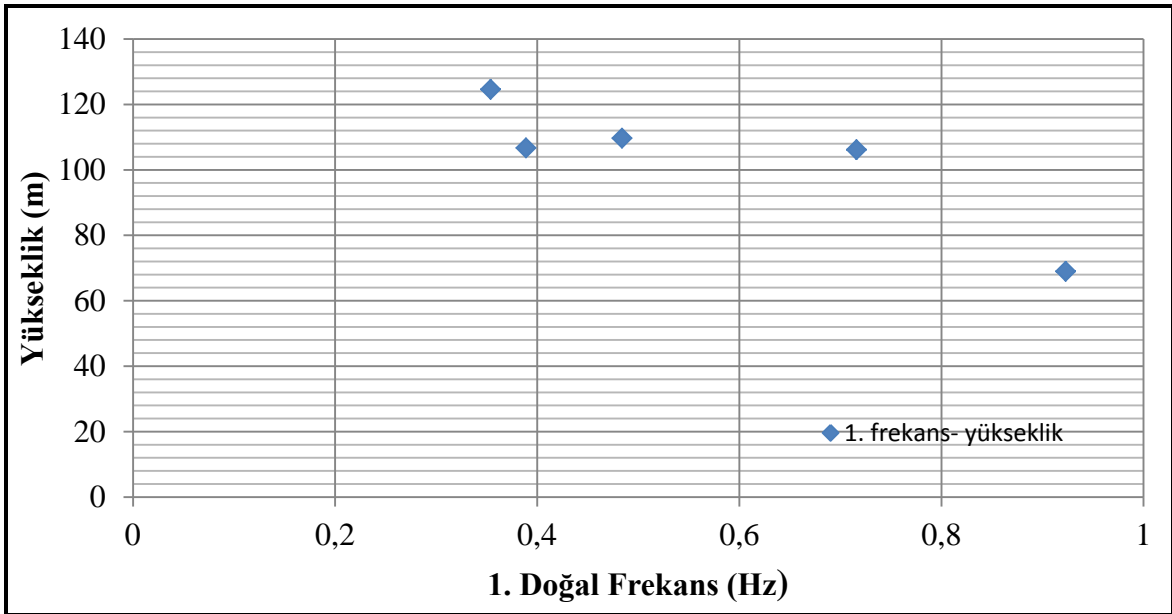
2.7.3.1. Köprü Dinamik Karakteristiklerin Köprü Yükseklik ve Uzunluklarına Bağlı Değişiminin İncelenmesi

Köprü 1. deneysel doğal frekanslarının köprü yükseklik ve uzunluklarına bağlı değişimi Tablo 2.20’de verilmiştir. Tabloda H yükseklik, L uzunluğu göstermektedir.

Tablo 2.20. Doğal frekans-yükseklik ve uzunluk değişimi

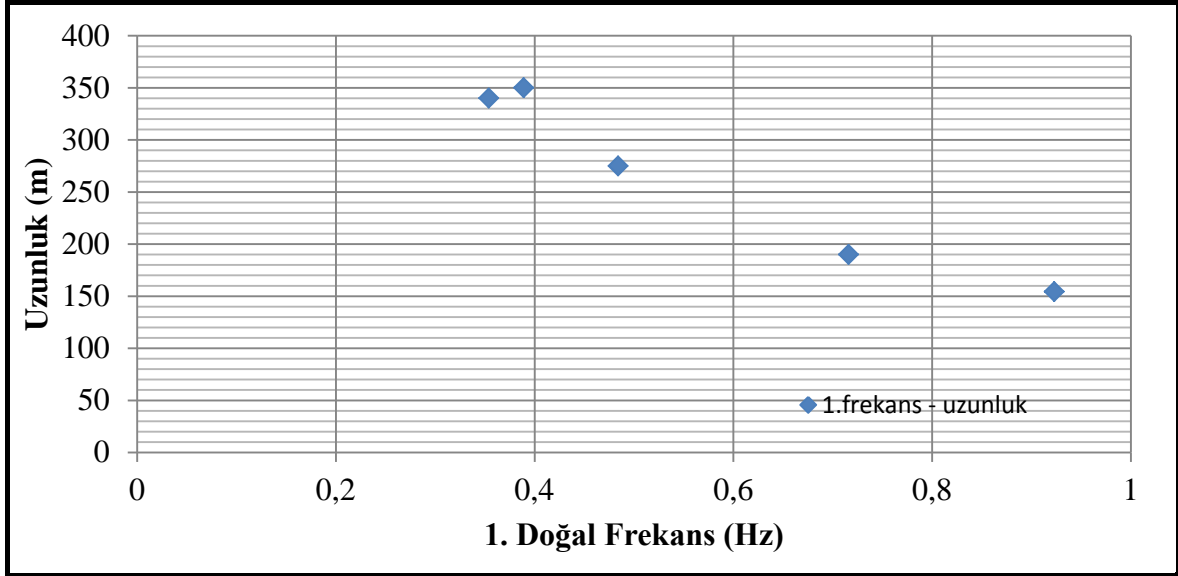
Köprü	Akarsın		Budun		Berta		Sengan		Ortaköy	
	H (m)	L (m)	H (m)	L (m)	H (m)	L (m)	H (m)	L (m)	H (m)	L (m)
		109,7	275	106,7	350	124,63	340	106,16	190	69
1. frekans (Hz)	0,484		0,389		0,354		0,716		0,923	

Köprülerin 1. frekanslarının köprü yükseklikleri ile değişimi Şekil 2.107’de gösterilmektedir.



Şekil 2.107. 1. doğal frekans-yükseklik değişimi

Köprülerin 1. frekanslarının köprü uzunlukları ile değişimi Şekil 2.105’te çizilmiştir.



Şekil 2.108. 1. doğal frekans-uzunluk değişimi

Şekil 2.107 ve 2.108’de görüldüğü gibi köprülerin 1. doğal frekansları köprü yükseklikleri ve uzunlukları azaldıkça artmaktadır. Bu grafiklere bakarak köprü yükseklik ve uzunluklarının köprülerin 1. doğal frekansını etkileyen önemli parametreler oldukları düşünülebilir.

2.7.4. Dengeli Konsol Köprüler İçin Doğal Frekans Formülünün Geliştirilmesi

Tez çalışmasında, dengeli konsol köprülerin doğal frekansını hesaplayabilen formülleri geliştirmek için regresyon analizi yapılmıştır. Bu amaçla, tez kapsamında ölçülen köprüler esas alınarak farklı yükseklik ve uzunluklar için birçok analiz SAP2000 programında gerçekleştirilmiş ve doğal frekans değerleri elde edilmiştir (Tablo 2.21). Girdi olarak alınan yükseklik ve uzunluğa bağlı olarak elde edilen çıktılar (doğal frekanslar) arasındaki ilişkinin ikinci derece polinom olduğu kabul edilmiştir. Buna göre, polinomun katsayıları en küçük kareler yöntemi ile hesaplanarak köprülerin doğal frekanslarını veren formüller elde edilmiştir.

Tablo 2.21. Farklı yükseklik ve uzunluklar için köprü doğal frekansları

Yükseklik (m)	Uzunluk (m)	1. Enine Doğal Frekans (Hz)	1. Düşey Doğal Frekans (Hz)
80	350	0,454	0,706
90	350	0,415	0,701

Tablo 2.21'in devamı

100	350	0,385	0,697
110	350	0,363	0,693
90	340	0,488	0,733
100	340	0,446	0,727
110	340	0,414	0,723
120	340	0,390	0,720
85	330	0,456	0,760
95	330	0,424	0,756
105	330	0,400	0,752
115	330	0,383	0,747
85	320	0,479	0,806
95	320	0,446	0,801
105	320	0,422	0,796
115	320	0,403	0,791
80	300	0,540	0,914
90	300	0,501	0,907
100	300	0,473	0,902
110	300	0,451	0,895
75	290	0,565	0,979
85	290	0,522	0,971
95	290	0,491	0,964
105	290	0,468	0,957
80	275	0,600	1,054
90	275	0,562	1,046
100	275	0,535	1,038
110	275	0,514	1,027
80	190	0,804	1,401
90	190	0,774	1,393
100	190	0,751	1,385
110	190	0,731	1,376
70	180	0,922	1,562
80	180	0,880	1,551
90	180	0,848	1,541
100	180	0,822	1,532
80	170	0,965	1,753
90	170	0,931	1,741
100	170	0,903	1,728
110	170	0,876	1,701
70	160	1,107	1,976
80	160	1,062	1,962
90	160	1,027	1,948
100	160	0,995	1,928

Tablo 2.21'deki değerler kullanılarak yapılan regresyon analizi sonucunda 1.enine ve 1.düsey modlara ait frekanslar için aşağıdaki formüller elde edilmiştir. Formüllerde H ve L metre cinsinden sırasıyla köprü maksimum yüksekliği ve toplam uzunluğunu göstermektedir.

$$f_{1enine} = 2,806 - 0,010510 * H - 0,009699 * L + 0,00003977 * H^2 + 0,00001353 * L^2$$

$$f_{1düsey} = 4,133 - 0,006089 * H - 0,015494 * L + 0,00002430 * H^2 + 0,00001928 * L^2$$

Bu formüller deneysel ölçümlerden elde edilen sonuçlarla kontrol edilmiş ve Tablo 2-22'de gösterilmiştir. Tablo 2.22'den görülebileceği gibi formüller ardgermeli dengeli konsol köprüler için birbirine yakın sonuçlar vermektedir.

Tablo 2.22. Dengeli konsol köprüler için elde edilen formüllerin kontrolü

Mod No	Budun		Akarsın		Berta		Sengan		Ortaköy	
	Deneysel	Formül	Deneysel	Formül	Deneysel	Formül	Deneysel	Formül	Deneysel	Formül
f_{1enine}	0,389	0,400	0,484	0,488	0,354	0,380	0,716	0,784	0,923	1,095
$f_{1düsey}$	0,863	0,699	1,714	0,955	0,867	0,712	1,639	1,513	2,016	1,896

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen ardgermeli beton köprülerin dinamik karakteristiklerinin analitik ve deneysel olarak belirlenmesi ve frekans formülü elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, Artvin - Erzurum yolunda 2008 - 2011 yılları arasında 5 adet dengeli konsol yöntemi ile yapılmış olan köprü seçilmiştir. Köprülerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde deneysel ve analitik yöntemler kullanılmıştır. Deneysel dinamik karakteristiklerin (doğal frekanslar, mod şekilleri, sönüm oranları) belirlenmesi için köprülere çevresel titreşim testleri uygulanmıştır. Bu çevresel titreşim testlerinde titreştirici olarak rüzgar, yaya ve taşıt yüklerinden yararlanılmıştır. Teorik dinamik karakteristiklerin (doğal frekanslar ve mod şekilleri) belirlenmesi için köprülerin üç boyutlu sonlu eleman modelleri SAP2000 programında proje verilerine göre oluşturulmuştur. 5 adet köprüden deneysel ve teorik olarak elde edilen dinamik karakteristikler birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda birbirine en yakın sonuçların Budan Köprüsü'ne ait olduğu tespit edilmiştir. 1. Doğal frekansı etkileyen parametrelerin belirlenmesi için kullanılacak teorik model olarak Budan Köprüsü'nün teorik modeli seçilmiştir. Teorik model üzerinde 1. doğal frekansı etkilediği düşünülen parametreler birbirinden bağımsız olarak değiştirilmiştir. Böylelikle 1. doğal frekansı etkileyen parametreler önem sırasına göre ayak yüksekliği, elastisite modülü, kütle ve atalet momenti olarak belirlenmiştir. Elastisite modülü bütün köprülerde aynı olduğundan parametre olarak kullanılmamıştır. Atalet momentinin 1. doğal frekansa etkisi nispeten az olduğundan gözardı edilmiştir. İncelemiş olduğumuz 5 adet köprü'nün üstyapı kesitleri birbirlerine yakındır. Aradaki küçük farklılıklar ihmal edilerek köprü kütlelerinin köprü uzunlukları ile doğru orantılı olduğu kabul edilmiştir. Köprü yükseklikleri ve köprü uzunlukları 1. doğal frekansı etkileyen parametreler olarak seçilmiştir. Farklı köprü yükseklikleri ve uzunlukları için analizler yapılarak köprü doğal frekanslarına ait formüller regresyon analizinden elde edilmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar her köprü için ayrı ayrı maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

- Akarsın Köprüsü'ne uygulanan çevresel titreşim testlerinden elde edilen ilk 5 deneysel doğal frekans 0,484-2,409 Hz arasındadır. Köprü'nün teorik analizinden

elde edilen ilk 7 analitik doğal frekans 0,544-2,140 Hz arasındadır. 7 analitik doğal frekansın iki tanesi deneysel olarak ölçülmeyen boyuna modlara aittir.

- Akarsın Köprüsü'ne uygulanan çevresel titreşim testlerinden elde edilen sönüm oranı değerleri % 1,592-0,166 arasında değişmektedir.
- Akarsın Köprüsü'nün deneysel ölçümlerden elde edilen mod şekilleri teorik olarak elde edilen mod şekilleri ile uyum içindedir. Birinci ve dördüncü modlar enine, üçüncü mod ise düşeydir. İkinci mod ise analitik analizlerde boyuna olarak elde edilmiştir. Deneysel ölçümlerde boyuna yönde ivmeölçer kullanılmadığından analitik moda karşılık gelen boyuna mod elde edilememiştir.
- Budan Köprüsü'ne uygulanan çevresel titreşim testlerinden elde edilen ilk 6 deneysel doğal frekans 0,389-1,958 Hz arasındadır. Köprü'nün teorik analizinden elde edilen ilk 7 analitik doğal frekans 0,371-1,743 Hz arasındadır. 7 analitik doğal frekansın bir tanesi deneysel olarak ölçülmeyen boyuna modlara aittir.
- Budan Köprüsü'ne uygulanan çevresel titreşim testlerinden elde edilen sönüm oranı değerleri % 1,398-0,251 arasında değişmektedir.
- Budan Köprüsü'nün deneysel ölçümlerden elde edilen mod şekilleri teorik olarak elde edilen mod şekilleri ile uyum içindedir. Birinci ve dördüncü modlar enine üçüncü mod ise düşeydir. İkinci mod ise analitik analizlerde boyuna olarak elde edilmiştir. Deneysel ölçümlerde boyuna yönde ivmeölçer kullanılmadığından analitik moda karşılık gelen boyuna mod elde edilememiştir.
- Berta Köprüsü'ne uygulanan çevresel titreşim testlerinden elde edilen ilk 5 deneysel doğal frekans 0,354-1,648 Hz arasındadır. Köprü'nün teorik analizinden elde edilen ilk 7 analitik doğal frekans 0,394-1,880 Hz arasındadır. 7 analitik doğal frekansın iki tanesi deneysel olarak ölçülmeyen boyuna modlara aittir.
- Berta Köprüsü'ne uygulanan çevresel titreşim testlerinden elde edilen sönüm oranı değerleri % 1,769-0,419 arasında değişmektedir.
- Berta Köprüsü'nün deneysel ölçümlerden elde edilen mod şekilleri teorik olarak elde edilen mod şekilleri ile uyum içindedir. Birinci ve dördüncü modlar enine üçüncü mod ise düşeydir. İkinci mod ise analitik analizlerde boyuna olarak elde edilmiştir. Deneysel ölçümlerde boyuna yönde ivmeölçer kullanılmadığından analitik moda karşılık gelen boyuna mod elde edilememiştir.
- Sengan Köprüsü'ne uygulanan çevresel titreşim testlerinden elde edilen ilk 5 deneysel doğal frekans 0,716-2,711 Hz arasındadır. Köprü'nün teorik analizinden

elde edilen ilk 7 analitik doğal frekans 0,780-2,812 Hz arasındadır. 7 analitik doğal frekansın iki tanesi deneysel olarak ölçülmeyen boyuna modlara aittir.

- Sengan Köprüsü'ne uygulanan çevresel titreşim testlerinden elde edilen sönüm oranı değerleri % 1,636-0,338 arasında değişmektedir.
- Sengan Köprüsü'nün deneysel ölçümlerden elde edilen mod şekilleri teorik olarak elde edilen mod şekilleri ile uyum içindedir. İkinci ve dördüncü modlar enine üçüncü mod ise düşeydir. Birinci mod ise analitik analizlerde boyuna olarak elde edilmiştir. Deneysel ölçümlerde boyuna yönde ivmeölçer kullanılmadığından analitik moda karşılık gelen boyuna mod elde edilememiştir.
- Ortaköy Köprüsü'ne uygulanan çevresel titreşim testlerinden elde edilen ilk 5 deneysel doğal frekans 0,923-3,253 Hz arasındadır. Köprü'nün teorik analizinden elde edilen ilk 7 analitik doğal frekans 0,815-5,840 Hz arasındadır. 7 analitik doğal frekansın iki tanesi deneysel olarak ölçülmeyen boyuna modlara aittir.
- Ortaköy Köprüsü'ne uygulanan çevresel titreşim testlerinden elde edilen sönüm oranı değerleri % 1,931-0,484 arasında değişmektedir.
- Ortaköy Köprüsü'nün deneysel ölçümlerden elde edilen mod şekilleri teorik olarak elde edilen mod şekilleri ile uyum içindedir. İkinci ve dördüncü modlar enine üçüncü mod ise düşeydir. Birinci mod ise analitik analizlerde boyuna olarak elde edilmiştir. Deneysel ölçümlerde boyuna yönde ivmeölçer kullanılmadığından analitik moda karşılık gelen boyuna mod elde edilememiştir.
- Regresyon analizi sonucunda ardgermeli dengeli konsol köprüler için 1.enine ve 1.düşey moda ait aşağıdaki doğal frekans formülleri elde edilmiştir.

$$f_{1enine} = 2,806-0,010510*H-0,009699*L+0,00003977*H^2+0,00001353*L^2$$

$$f_{1düşey} = 4,133-0,006089*H-0,015494*L+0,00002430*H^2+0,00001928*L^2$$

Tez çalışmasından elde edilen sonuçlara dayanılarak aşağıda bazı önerilere yer verilmektedir.

- Deneysel ölçüm sonuçları kullanılarak ölçmüş olduğumuz 5 adet köprü'nün hasar tespiti yapılabilir.
- Köprülere uygulanan çevresel titreşim testlerinden elde edilen dinamik karakteristikler köprülerin ölçüm esnasındaki durumlarını yansıtmaktadır. Bu ölçümler daha uzun süreli hale getirilerek köprülerin dinamik davranışı sürekli incelenebilir. Böylelikle herhangi bir olumsuzluk halinde önceden müdahale edilebilir.

4. KAYNAKLAR

- Altunışık, A.C., Bayraktar, A., Sevim, B., Adanur, S. ve Domaniç, A., 2010. Construction Stage Analysis of Kömürhan Highway Bridge Using Time Dependent Material Properties, Structural Engineering and Mechanics, 36, 2, 207-223.
- Altunışık, A. C., Bayraktar, A., Sevim, B. ve Ateş, Ő. 2011. Ambient Vibration Based Seismic Evaluation of Isolated G lburnu Highway Bridge, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31, 11, 1496-1510.
- Ates, Ő., 2011. Numerical Modelling of Continuous Concrete Box Girder Bridges Considering Construction Stages, Applied Mathematical Modelling, 35, 8, 3809-3820.
- Ates, S., Atmaca, B., Yildirim, E. ve Demiroz, N.A., 2013. Effects of Soil-Structure Interaction on Construction Stage Analysis of Highway Bridges, Computers and Concrete, 12, 2, 169-186.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Domaniç, A. ve Taş, Y., 2009. Vibration Characteristics of Kömürhan Highway Bridge Constructed with Balanced Cantilever method, Journal of Performance of Constructed Facilities , 23, 2, 90-99.
- Casas, J.R. 1997. Reliability-Based Partial Safety Factors in Cantilever Construction of Concrete Bridges, Journal of Structural Engineering, 123, 3, 305-312.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2007. Akarsın Köprüsü Projeleri, Ankara.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2007. Berta Köprüsü Projeleri, Ankara.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2007. Budan Köprüsü Projeleri, Ankara.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2007. Ortaköy Köprüsü Projeleri, Ankara.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2007. Sengan Köprüsü Projeleri, Ankara.
- Gentile, C. ve Bernardini, G., 2008. Output-Only Modal Identification of a Reinforced Concrete Bridge from Radar-Based Measurements, Nondestructive Testing and Evaluation, 41, 544-553.
- Hedjazi, S., Rahai, A., Sennah, K., 2007. Evaluation of Creep Effects on the Time-Dependent Deflections and Stresses in Prestressed Concrete Bridges, Bridge Structures, 3, 2, 119-132.
- Hewson, N., 2007. Balanced Cantilever Bridges, Concrete (London), 41, 10, 59-60.

- Jacobsen, N.J., Andersen, P. ve Brincker, R., 2006. Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis, Proceedings of ISMA 2006: International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium.
- Jung, S., Ghaboussi, J. ve Marulanda, C., 2007. Field Calibration of Time-Dependent Behavior in Segmental Bridges Using Self-Learning Simulation, Engineering Structures, 29, 10, 2692-2700.
- Kamaitis, Z., 2008. Field Investigation of Joints in Precast Post-Tensioned Segmental Concrete Bridges, Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 3, 4, 198-205.
- Kozluca, M., 2011. Dengeli Konsol Köprüler, Artvin-Erzurum Yolundaki Uygulama Örnekleri, Kolin İnşaat, Ankara, Türkiye
- Kronenberg, J., 2008. Continuous Concrete Placing During Balanced Cantilever Construction of a Bridge, Concrete Engineering International, 12, 3, 38-39.
- Kudu, F.N., Bayraktar, A., Bakir, P.G., Türker, T. ve Altunişik, A.C. 2014. Ambient Vibration Testing of Berta Highway Bridge with Post-Tension Tendons, Steel and Composite Structures, 16, 1, 23-46.
- Kwak, H.-G. ve Son, J.-K., 2004. Design Moment Variations in Bridges Constructed Using a Balanced Cantilever Method, Construction and Building Materials, 18, 10, 753-766.
- Liu, C., DeWolf, J.T. ve Kim, J., 2009. Development of a Baseline for Structural Health Monitoring for a Curved Post-Tensioned Concrete Box Girder Bridge, Engineering Structures, 31, 3107-3115.
- Malm, R. ve Sundquist, H. 2010. Time-dependent Analyses of Segmentally Constructed Balanced Cantilever Bridges, Engineering Structures, 32, 4, 1038-1045.
- Manjure, P.Y., 2001. Rehabilitation of Balanced Cantilever Bridges, Indian Concrete Journal, 75, 1, 76-82.
- Marzouk, M., Said, H. ve El-Said, M., 2008. Special-Purpose Simulation Model for Balanced Cantilever Bridges, Journal of Bridge Engineering, 13, 2, 122-131.
- McDonald, B., Saraf, V. ve Ross, B., 2003. A Spectacular Collapse: Koror-Babeldaob (Palau) Balanced Cantilever Prestressed, Post-Tensioned Bridge, Indian Concrete Journal, 77, 3, 955-962.
- Morassi, A. ve Tonon, S., 2008. Dynamic Testing for Structural Identification of a Bridge, Journal of Bridge Engineering, 13, 573-585.
- OMA, 2006. Operational Modal Analysis, Release 4.0. Structural Vibration Solution A/S, Denmark.

- Pimanmas, A., 2007. The Effect of Long-Term Creep and Prestressing on Moment Redistribution of Balanced Cantilever Cast-in-Place Segmental Bridge, Songklanakarin Journal of Science and Technology, 29, 1, 205-216.
- Pimanmas, A., Imsombat, S. ve Neilsen, K.Hj., 2009. New Phra-Nangklao Bridge - A Balanced Cantilever Prestressed Concrete Bridge in Thailand, Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 19, 1, 38-40.
- PULSE, 2006. Analyzers and Solutions, Release 11.2. Bruel and Kjaer, Sound and Vibration Measurement A/S, Denmark.
- SAP2000, 2008. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures Inc, Berkeley, California, USA.
- Schmidt, S. ve Solari, G., 2003. 3-D Wind-Induced Effects on Bridges During Balanced Cantilever Erection Stages, Wind and Structures, An International Journal, 6, 1, 1-22.
- Skrinar, M. ve Strukelj, A., 1996. Eigenfrequency Monitoring During Bridge Erection, Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 6, 3, 191-194.
- Starossek, U., 2009. Shin Chon Bridge Korea, Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 19, 1, 79-84.
- Stathopoulos, S., Seifried, G., Kotsanopoulos, P., Haug, H., Spyropoulos, I. ve Stathopoulos, K., 2010. The Metsovo bridge, Greece, Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 20, 1, 49-53.
- Strommen, E., Hjorth-Hansen, E. ve Kaspersen, J.H., 2001. Dynamic Loading Effects of a Rectangular Box Girder Bridge, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89, 14-15, 1607-1618.
- Vonganan, B., 2009. The Second Mekong International Bridge, Thailand, Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 19, 1, 67-68.
- Turan, F. N., 2012. Dengeli Konsol Betonarme Köprülerin Dinamik Karakteristiklerinin Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
- Türker, T., 2011. Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Hasar Durumlarının Tespiti ve Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

ÖZGEÇMİŞ

Soner SÜMERKAN, 1981 yılında Ordu ilinin Ünye ilçesinde doğdu. İlk ve orta ve lise öğrenimini Trabzon'da tamamladı. 1999 yılında Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2006 yılında İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki lisans eğitimini tamamladı. 2007 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. SÜMERKAN iyi dercede İngilizce bilmektedir.

Sümerkan S., Bayraktar A., Türker T. A Simplified Frequency Formula for Post-Tensioned Balanced Cantilever Bridges, Engineering Structures, (İncelemede).