

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KEMER BARAJLARIN YAPISAL DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ
AMACIYLA ÖLÇEKLENDİRME VE REGRESYONA DAYALI MÜHENDİSLİK
YAZILIMININ GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Ebru KALKAN

**HAZİRAN 2017
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KEMER BARAJLARIN YAPISAL DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ AMACIYLA
ÖLÇEKLENDİRME VE REGRESYONA DAYALI MÜHENDİSLİK YAZILIMININ
GELİŞTİRİLMESİ**

Ebru KALKAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30 / 05 / 2017

Tezin Savunma Tarihi : 16 / 06 / 2017

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK

Trabzon 2017

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Ebru KALKAN Tarafından Hazırlanan

KEMER BARAJLARIN YAPISAL DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ AMACIYLA
ÖLÇEKLENDİRME VE REGRESYONA DAYALI MÜHENDİSLİK YAZILIMININ
GELİŞTİRİLMESİ




başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 31 / 05 / 2017 gün ve 1704 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hasan Basri BAŞAĞA

Üye : Yrd. Doç. Dr. Murat GÜNAYDIN

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

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

“Kemer Barajların Yapısal Davranışlarının Belirlenmesi Amacıyla Ölçeklendirme ve Regresyona Dayalı Mühendislik Yazılımı Geliştirilmesi” isimli tez çalışmasını bana öneren ve her aşamasında hem bilgi ve tecrübesini hem de maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen danışmanım ve saygıdeğer Hocam Doç. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı başından beri takip eden, inceleyen ve değerli görüş ve bilgilerini benimle paylaşan değerli Hocam Yrd. Doç. Dr. Hasan Basri BAŞAĞA'ya çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamda görüş ve desteklerini esirgemeyen değerli Hocam Doç. Dr. Barış SEVİM'e ve akademik hayatım boyunca emeği geçen tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Murat GÜNAYDIN'a ve Arş. Gör. Ali Fuat GENÇ'e teşekkür ederim.

Akademik çalışmalarımızda birbirimize destek olduğumuz çalışma arkadaşlarım İnş. Yük. Müh. Fatih Yesevi OKUR, İnş. Yük. Müh. Olguhan Şevket KARAHASAN, İnş. Müh. Sema CEVKE, İnş. Müh. Fatma ÖNALAN, İnş. Müh. Hatice ERDOĞMUŞ, İnş. Yük. Müh. Ali YETİŞKEN, İnş. Müh. Yunus Emrahan AKBULUT, İnş. Müh. Onur Oğuz ÖZTÜRK ve İnş. Müh. Özgün BIÇAK'a teşekkür ederim

Okul hayatımın ilk yıllarından itibaren her koşulda en büyük destekçim ve dostum olan Harita Müh. Canan HAMZAOĞLU'na çok teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım süresince bana her türlü desteği veren ve yanımda olan babam Varol KALKAN'a, annem Güller KALKAN'a ve kardeşlerim Emel KALKAN'a, Esra KALKAN'a, Mihran KALKAN'a ve Zeynep Ada KALKAN'a, teşekkür eder ve bu çalışmanın, yeni çalışmalara öncülük etmesini ve Ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Ebru KALKAN
Trabzon 2017

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “KEMER BARAJLARIN YAPISAL DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ AMACIYLA ÖLÇEKLENDİRME VE REGRESYONA DAYALI MÜHENDİSLİK YAZILIMININ GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 16.06.2017

Ebru KALKAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	III
İÇİNDEKİLER.....	IV
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Konuyla İlgili Yapılan Çalışmalar.....	3
1.2.1. Barajların Yapısal Davranışlarının Belirlenmesi ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	3
1.2.2. Ölçeklendirme ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	6
1.2.3. Formül Geliştirme ve Yazılım Oluşturma ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	11
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği	15
1.4. Yapısal Ölçeklendirme	17
1.4.1. Ölçeklendirmenin Amacı ve Kullanım Alanları.....	17
1.4.2. Sistemler Arasında Benzerlik	18
1.4.2.1. Boyut Analizi.....	18
1.4.2.2. Buckingham II Teoremi	20
1.5. Sistemlerin Dinamik Karakteristikleri ve Yapısal Davranışları	22
1.5.1. Dinamik Karakteristikler	22
1.5.2. Yerdeğiştirmeler	26
1.5.3. Kesit Tesirleri	29
1.5.4. Gerilme ve Şekildeğiştirmeler	31
1.6. Dinamik Analiz.....	34
1.6.1. Dinamik Analiz Yöntemleri	35

1.6.2.	Tepki Spektrum Analizi.....	35
1.7.	İstatistik Yöntemler	37
1.7.1.	İstatistik Yöntemlerin Kullanım Alanı ve Amacı.....	37
1.7.2.	Regresyon Analizi ve Türleri	38
1.7.2.1.	En Küçük Kareler (EKK) Yöntemi	41
1.7.2.2.	Diğer Yöntemler	42
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	44
2.1.	Giriş	44
2.2.	Taşıyıcı Sistem Elemanlarında Ölçeklendirme	44
2.2.1.	Beton Taşıyıcı Sistemler.....	45
2.2.1.1.	Buckingham II Teoremi ve Alan Denklemleriyle Yapısal Davranışın Benzerlik Formülünün Elde Edilmesi.....	45
2.2.1.2.	Dinamik Karakteristikler ve Yapısal Özelliklerin Sonlu Eleman Analizleriyle Elde edilmesi.....	66
2.2.1.3.	Dinamik Karakteristikler ve Yapısal Davranışların Matematik Modellerle Elde Edilmesi	68
2.3.	Tip-1 Kemer Baraj.....	79
2.3.1.	Laboratuvar Modelinin Oluşturulması	80
2.3.2.	Deneyel Ölçümler	81
2.3.3.	Sonlu Eleman Yöntem Sonuçları	82
2.3.3.1.	Modal Analiz ve Sonuçlar	83
2.3.3.2.	Statik Analiz ve Sonuçlar	84
2.3.3.3.	Dinamik Analiz ve Sonuçlar.....	87
2.3.4.	Tip-1 Kemer Barajı İçin Ölçeklendirme.....	93
2.3.4.1.	Statik Kuvvetler Altında Tip-1 Kemer Barajına Benzerlik Formüllerinin Uygulanması.....	93
2.3.4.2.	Dinamik Kuvvetler Altında Tip-1 Kemer Barajına Benzerlik Formüllerinin Uygulanması.....	107
2.3.4.2.1.	Ölçek, Malzeme ve Dinamik Kuvvetlere göre Analiz Parametrelerinin Seçilmesi	108
2.3.4.2.2.	Analizlerin Gerçekleştirilmesi ve Sonuçların Düzenlenmesi.....	108
2.3.4.2.3.	Sonuçların Dağılım Grafiklerinin İncelenmesi.....	109
2.3.4.2.4.	Sonuçlar İçin Uygun Regresyon Analizlerinin Uygulanması	112
2.3.4.2.5.	Gerçek ve Regresyon Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	116
2.3.5.	Yazılımın Oluşturulması.....	118

2.3.5.1.	Yazılıma Ait İçerik ve Görünümün Düzenlenmesi	118
2.3.5.2.	Veriler ve Formüllerin Düzenlenmesi	119
2.3.5.3.	Yazılımın Tamamlanması ve Yazılıma Ait Görseller	120
2.3.5.4.	Kesit Değişimi ve Kontur Diyagramları.....	141
3.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	145
4.	KAYNAKLAR	151
ÖZGEÇMİŞ		



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

KEMER BARAJLARIN YAPISAL DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ
AMACIYLA ÖLÇEKLENDİRME VE REGRESYONA DAYALI MÜHENDİSLİK
YAZILIMININ GELİŞTİRİLMESİ

Ebru KALKAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK
2017, 155 Sayfa

Bu tez çalışması kapsamında, kemer barajların yapısal davranışlarının belirlenmesi amacıyla ölçeklendirme ve regresyona dayalı mühendislik yazılımının geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Hazırlanan yazılım ile birlikte, 0,6-300m arasında kemer yüksekliğine sahip tek eğrilikli kemer barajların statik ve dinamik yükler altındaki davranışları elde edilebilmekte, modal analiz sonucunda dinamik karakteristikler belirlenebilmekte ve analizler sırasında yapı-zemin etkileşimi de dikkate alınabilmektedir.

Tez çalışması dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde ölçeklendirme, Buckingham II teoremi, yapıların dinamik karakteristikleri ve yapısal davranışları ve regresyon analizi ile ilgili genel bilgiler ve formüller verilmiştir. İkinci bölümde tez kapsamında yapılan çalışmalara yer verilmektedir. Boyut analiziyle formül geliştirmek amacıyla beton taşıyıcı sistemler üzerinde çalışılarak gerçek sonuçlarla formül sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçların doğruluğunun tespit edilmesiyle formüller Tip-1 kemer barajı üzerinde uygulanmıştır. Dinamik analiz sonuçlarında geçerli olmadığı belirlenen benzerlik formülleri yerine regresyon analizi yapılarak formüller elde edilmiştir. Üçüncü bölümde çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler maddeler halinde sunulmaktadır. Son bölümde yararlanılan kaynaklar belirtilerek son olarak bu bölümü özgeçmiş takip etmektedir.

Çalışma sonucunda, Tip-1 kemer baraja ait dinamik karakteristikler ve yapısal davranışların ölçeklendirme ve regresyon analizine dayalı geliştirilen yazılım yardımıyla elde edilebileceği ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Tip-1 Kemer Baraj, Boyut Analizi, Regresyon Analizi, Formülasyon Oluşturma, Dinamik Karakteristikler ve Yapısal Davranışlar

Master Thesis

SUMMARY

DEVELOPMENT OF ENGINEERING SOFTWARE BASED ON SCALING AND
REGRESSION FOR THE DETERMINATION OF STRUCTURAL BEHAVIORS OF
ARCH DAMS

Ebru KALKAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Ahmet Can ALTUNIŞIK
2017, 155 Pages

In the scope of this thesis study, engineering software development based on scaling and regression has been studied in order to determine of structural behaviors of arch dams. Along with the prepared software, behavior of single curved arch dams with arch height between 0,6-300m can be obtained under static and dynamic loads, dynamic characteristics can be determined as a result of modal analysis and structure-ground interaction can be taken into account during analysis.

The thesis consists of four parts. In the first part, general information and formulas on scaling, Buckingham II theorem, dynamic characteristics of structures and structural behavior, regression analysis are given. In the second part, the work done within the scope of the thesis is given. In order to develop the formula by dimensional analysis, the concrete results were compared with the actual results by studying concrete and steel carrying systems. Type-1 arch was applied on the dam by determining the accuracy of the results. Formulas were obtained by performing regression analysis instead of dimension analysis formulas that were not valid in dynamic analysis results. The results and suggestions obtained in the third chapter are presented in specify. In the last section, the resources used are specified and finally this section is followed by a resume.

As a result of the study, the dynamic characteristics and structural behaviors of the Type-1 Arch Dam can be obtained with the aid of software developed based on scaling and regression analysis.

Key Words: Type-1 Arch Dam, Dimensional Analysis, Regression Analysis, Formulation Developed, Dynamic Characteristics and Structural Behaviors

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1.	Çok serbestlik dereceli sistemin (ÇSD), tek serbestlik dereceli sisteme (TSD) dönüştürülmesi..... 26
Şekil 1.2.	TSD sistemin analitik modeli..... 27
Şekil 1.3.	TSD sisteme ait serbest cisim diyagramı 27
Şekil 1.4.	Düzlem sistem..... 29
Şekil 1.5.	Uzay sistem..... 30
Şekil 1.6.	Dış kuvvetler etkisiyle oluşan kesit tesirleri 30
Şekil 1.7.	Kesit tesirlerinde kabul edilen pozitif yönler..... 30
Şekil 1.8.	Basit kirişe ait kesit tesiri diyagramları 31
Şekil 1.9.	Eksenel kuvvet altında oluşan normal gerilme 32
Şekil 1.10.	Eksenel kuvvet altında oluşan normal ve kayma gerilmeleri 32
Şekil 1.11.	Asal normal gerilmeler 33
Şekil 1.12.	Kuvvet altındaki elemanda uzama 33
Şekil 1.13.	Betonun gerilme-şekildeğiştirme grafiği 34
Şekil 1.14.	Tasarım Spektrumu 37
Şekil 1.15.	Değişkenler arasındaki ilişkiyi gösteren dağılım grafikleri 40
Şekil 1.16.	Gerçek değerler ve bu değerlere uydurulan $f(x)$ eğrisi arasındaki hatalar..... 42
Şekil 2.1.	Taşıyıcı sistemlere ait sonlu eleman modelleri 67
Şekil 2.2.	Her bir sistem üzerinde Yerdeğiştirmelerin elde edildiği düğüm noktaları 75
Şekil 2.3.	Tip-1 kemer barajın geometrik özellikleri (Arch Dams, 1968) 79
Şekil 2.4.	Tip-1 kemer barajın yerleştirildiği vadinin en kesiti (Arch Dams, 1968) 79
Şekil 2.5.	Tip-1 kemer barajın üç boyutlu yapı-zemin-rezervuar modeli (Sevim, 2010)..... 80
Şekil 2.6.	Tip-1 kemer barajın laboratuvar modeline ait bazı fotoğraflar (Sevim, 2010)..... 81
Şekil 2.7.	Kemere ait memba ve mansap yüzeyleri düğüm noktaları numaraları 84
Şekil 2.8.	Yerel zemin sınıfları için hazırlanan spektrum eğrileri 88

Şekil 2.9.	Regresyon analizi için elde edilen sonuçların sıralanmasına ait bir parça görüntü	109
Şekil 2.10.	Yerdeğiştirme sonuçlarına ait bazı düğüm noktaları için elde edilen dağılım grafikleri.....	110
Şekil 2.11.	Asal gerilme sonuçlarına ait bazı düğüm noktaları için elde edilen dağılım grafikleri.....	111
Şekil 2.12.	Asal şekildeğiştirme sonuçlarına ait bazı düğüm noktaları için elde edilen dağılım grafikleri	111
Şekil 2.13.	14 nolu düğüm noktasının yerdeğiştirme sonuçlarının doğrusal regresyon analizine ait verilerin bir kısmı	113
Şekil 2.14.	14 nolu düğüm noktası yerdeğiştirme sonuçlarının doğrusal regresyon analizine ait bilgiler ve Anova tablosu.....	113
Şekil 2.15.	Bazı düğüm noktalarına ait ikinci derece regresyon analiziyle elde edilen formülasyon katsayıları	115
Şekil 2.16.	Bazı düğüm noktaları için elde edilen sonuçların karşılaştırılması	116
Şekil 2.17.	Yazılıma ait giriş sayfası.....	122
Şekil 2.18.	Yazılım ana sayfası	123
Şekil 2.19.	Yazılım ana sayfasında verilerin girilmesi	124
Şekil 2.20.	Modal analiz sayfasına giriş ekranı.....	125
Şekil 2.21.	Modal analiz sayfasında örnek olarak 1. Titreşim modunun ve ilgili değerlerin görüntülenmesi	126
Şekil 2.22.	Statik analiz sayfasının görüntülenmesi.....	127
Şekil 2.23.	Statik analiz sayfasında örnek olarak 48 numaralı düğüm noktasının sonuçlarının ve ilgili formüllerin görüntülenmesi.....	128
Şekil 2.24.	Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı dinamik analiz sayfasına giriş.....	129
Şekil 2.25.	Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı dinamik analiz sayfasında, 48 nolu düğüm noktasına ait sonuçların ve ilgili formüllerin görüntülenmesi	130
Şekil 2.26.	Ankastre mesnetli durumun dikkate alındığı barajda dinamik analiz sayfasına giriş	131
Şekil 2.27.	Ankastre mesnetli durumun dikkate alındığı barajda dinamik analiz sayfasında, 48 nolu düğüm noktasına ait sonuçların ve ilgili formüllerin görüntülenmesi	132
Şekil 2.28.	Statik analizler sonucu oluşan kesit boyunca değişim diyagramları sayfasına giriş	133
Şekil 2.29.	Statik analizler sonucu oluşan kesit boyunca değişim diyagramları sayfasında 48 nolu düğüm noktasının yapısal özelliklerine ait diyagramların görüntülenmesi	134

Şekil 2.30.	Dinamik analizler sonucu oluşan kesit boyunca değişim diyagramları sayfasına giriş	135
Şekil 2.31.	Dinamik analizler sonucu oluşan kesit boyunca değişim diyagramları sayfasında 48 nolu düğüm noktasının yapısal özelliklerine ait diyagramların görüntülenmesi	136
Şekil 2.32.	Statik analizler sonucu oluşan kontur diyagramları sayfasına giriş	137
Şekil 2.33.	Statik analizler sonucu oluşan kontur diyagramları sayfasında kemere ait kontur diyagramların görüntülenmesi	138
Şekil 2.34.	Dinamik analizler sonucu oluşan kontur diyagramları sayfasına giriş	139
Şekil 2.35.	Dinamik analizler sonucu oluşan kontur diyagramları sayfasında kemere ait kontur diyagramların görüntülenmesi	140
Şekil 2.36.	48 nolu düğüm noktası için elde edilen kesit değişim diyagramları	141
Şekil 2.37.	Elde edilen kontur diyagramlarına ait örnek görüntüşler.....	143

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Bazı büyüklüklerin FLT ve MLT sistemlerine göre karşılığı	21
Tablo 1.2. Bazı taşıyıcı sistemlere ait rijitlik ifadeleri	24
Tablo 1.3. Bazı kesitlere ait atalet momenti ifadeleri	25
Tablo 1.4. Bazı taşıyıcı sistemlere ait yerdeğiştirme ifadeleri	28
Tablo 1.5. Yerel zemin sınıflarına karşılık gelen karakteristik periyotlar	36
Tablo 1.6. Etkin yer ivme katsayıları	36
Tablo 2.1. Ölçek türlerine göre frekans formülleri	60
Tablo 2.2. Ölçek türlerine göre yerdeğiştirme formülleri	63
Tablo 2.3. Taşıyıcı sistemlere ait boyut özellikleri	66
Tablo 2.4. Beton dayanım sınıflarına ait Elastisite Modülü değerleri	67
Tablo 2.5. 1/2 ölçek oranı için beton taşıyıcı sistemlere ait olan sonlu eleman analizleri ile analitik çözümler sonucunda elde edilen frekans değerleri.....	72
Tablo 2.6. 1/5 ölçek oranı için beton taşıyıcı sistemlere ait olan sonlu eleman analizleri ile analitik çözümler sonucunda elde edilen frekans değerleri.....	73
Tablo 2.7. 1/10 ölçek oranı için beton taşıyıcı sistemlere ait olan sonlu eleman analizleri ile analitik çözümler sonucunda elde edilen frekans değerleri.....	74
Tablo 2.8. 1/2 ölçek oranı için beton taşıyıcı sistemlere ait olan sonlu eleman analizleri ile analitik çözümler sonucunda elde edilen yerdeğiştirme değerleri.....	76
Tablo 2.9. 1/5 ölçek oranı için beton taşıyıcı sistemlere ait olan sonlu eleman analizleri ile analitik çözümler sonucunda elde edilen yerdeğiştirme değerleri.....	77
Tablo 2.10. 1/10 ölçek oranı için beton taşıyıcı sistemlere ait olan sonlu eleman analizleri ile analitik çözümler sonucunda elde edilen yerdeğiştirme değerleri.....	78
Tablo 2.11. Tip-1 kemer baraja ait frekans değerleri (Sevim, 2010).....	82
Tablo 2.12. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen dinamik karakteristikler.....	83
Tablo 2.13. Ankastre mesnetli durum dikkate alınarak Tip-1 kemer barajına ait dinamik karakteristikler	83

Tablo 2.14.	Yapı-Zemin etkileşimi dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen yerdeğiştirme değerleri.....	85
Tablo 2.15.	Ankastre mesnetli durum dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen yerdeğiştirme değerleri.....	85
Tablo 2.16.	Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen asal gerilmeler	86
Tablo 2.17.	Ankastre mesnetli durum dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen asal gerilmeler	86
Tablo 2.18.	Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen asal şekildeğiştirme değerleri	87
Tablo 2.19.	Ankastre mesnetli durum dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen asal şekildeğiştirme değerleri	87
Tablo 2.20.	Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen yerdeğiştirme değerleri.....	88
Tablo 2.21.	Ankastre mesnetli durum dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen yerdeğiştirme değerleri.....	89
Tablo 2.22.	Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen maksimum asal gerilme değerleri.....	89
Tablo 2.23.	Ankastre mesnetli durum dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen maksimum asal gerilme değerleri.....	90
Tablo 2.24.	Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen minimum asal gerilme değerleri.....	90
Tablo 2.25.	Ankastre mesnetli durum dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen minimum asal gerilme değerleri.....	91
Tablo 2.26.	Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme değerleri	91
Tablo 2.27.	Ankastre mesnetli durum dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme değerleri	92
Tablo 2.28.	Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen minimum asal şekildeğiştirme değerleri.....	92
Tablo 2.29.	Ankastre mesnetli durum dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen minimum asal şekildeğiştirme değerleri.....	93
Tablo 2.30.	Tip-1 kemer barajının prototip ve ölçekli modellerine (Model-1, Model-2, Model-3 ve Model-4) ait bazı özellikler	94
Tablo 2.31.	Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan Mode-1 ve Model-2'ye ait elde edilen frekans değerleri	95
Tablo 2.32.	Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan Model-3 ve Model-4'e ait elde edilen frekans değerleri	96
Tablo 2.33.	Ankastre mesnetli durumu dikkate alınan Model-1 ve Model-2'ye ait elde edilen frekans değerleri	96

Tablo 2.34.	Ankastre mesnetli durumu dikkate alınan Model-3 ve Model-4'e ait elde edilen frekans değerleri	97
Tablo 2.35.	Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan Model-1 ve Model-2'ye ait elde edilen yerdeğiştirme değerleri	98
Tablo 2.36.	Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan Model-3 ve Model-4'ye ait elde edilen yerdeğiştirme değerleri	99
Tablo 2.37.	Ankastre mesnetli durumu dikkate alınan Model-1 ve Model-2'ye ait elde edilen yerdeğiştirme değerleri	99
Tablo 2.38.	Ankastre mesnetli durumu dikkate alınan Model-3 ve Model-4'e ait elde edilen yerdeğiştirme değerleri	100
Tablo 2.39.	Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan Model-1 ve Model-2'ye ait elde edilen asal gerilme değerleri	101
Tablo 2.40.	Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan Model-3 ve Model-4'e ait elde edilen asal gerilme değerleri	102
Tablo 2.41.	Ankastre mesnetli durumu dikkate alınan Model-1 ve Model-2'ye ait elde edilen asal gerilme değerleri	102
Tablo 2.42.	Ankastre mesnetli durumu dikkate alınan Model-3 ve Model-4'e ait elde edilen asal gerilme değerleri	103
Tablo 2.43.	Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan Model-1 ve Model-2'ye ait elde edilen asal şekildeğiştirme değerleri	104
Tablo 2.44.	Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan Model-3 ve Model-4'e ait elde edilen asal şekildeğiştirme değerleri	105
Tablo 2.45.	Ankastre mesnetli durumu dikkate alınan Model-1 ve Model-2'ye ait bazı düğüm noktalarında asal şekildeğiştirmeler	105
Tablo 2.46.	Ankastre mesnetli durumu dikkate alınan Model-3 ve Model-4'e ait bazı düğüm noktalarında asal şekildeğiştirmeler	106
Tablo 2.47.	Frekans, yerdeğiştirme, asal gerilme ve asal şekildeğiştirmelere ait düzenlenmiş benzerlik formülleri	107
Tablo 2.48.	Yazılımda kullanılan parametreler ve sınırları	118

SEMBOLLER DİZİNİ

A	Alan
A_0	Etkin yer ivme katsayısı
C	Sönüm oranı
E	Elastisite modülü
EI	Eğilme rijitliği
F	Kuvvet
f_c	Betonun dayanımı
$f_{D(t)}$	Sönüm etkisi ile oluşan kuvvet
$f_{I(t)}$	Sürtünme etkisi ile oluşan kuvvet
f_n, f	Frekans
$f_{S(t)}$	Rijitlik etkisi ile oluşan kuvvet
g	Yer çekimi ivmesi
I	Atalet Momenti
k	Rijitlik
L	Uzunluk
M	Kütle
M_i, M_j	Eğilme Momenti
N_i, N_j	Normal Kuvvet
$P_{(t)}$	Zamana bağlı yük
R	Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
$R_a(T)$	Deprem yükü azaltma katsayısı
$S_{ae}(T)$	Spektral ivme
T	Zaman, Periyot
T_A, T_B	Karakteristik periyotlar
T_i, T_j	Kesme kuvveti
u	Hız
\dot{u}	Yerdeğiştirme

\ddot{u}	İvme
W	Ağırlık
$Z1, Z2, Z3, Z4$	Yerel zemin sınıfları
Θ	Sıcaklık
ω_n	Açısal frekans
π	Pi sayısı
δ	Yerdeğiştirme
σ	Normal gerilme
τ	Kayma gerilmesi
ε	Şekildeğiştirme
ε_{co}	Dayanıma karşılık gelen şekildeğiştirme
ε_{cu}	Ezilme şekildeğiştirmesi
ΔL	Birim uzama
ω_n	Açısal frekans

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Barajlar, su biriktirme, su seviyesini yükseltme ve geniş su yüzeyi meydana getirme amacı ile inşa edilen ve bir akarsu vadisini kapatarak akışı engelleyen yapılardır. Dünyada ilk olarak M.Ö. 4000 yıllarında Nil nehri üzerinde inşa edildiği tahmin edilen barajın uzunluğu 110m ve yüksekliği 12m'dir (URL-1). Sulama, içme ve kullanma suyu, sanayi suyu, enerji üretme, taşkın koruma vb. amaçlar için kullanılan barajlar Ülkemizde geniş bir alan kapsamaktadır.

Ülkemizde birçok nehir, akarsu ve çay bulunmaktadır. Sahip olunan bu zenginliği doğaya zarar vermeden işlemek ve insanlığa faydalı hale getirmek amacıyla yapılan barajlar, geçmişten günümüze önemini koruyan önemli mühendislik yapılarıdır. Ülkemizde bu tip yapılar Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından projelendirilmekte ve inşa edilmektedir. Şuan kullanılmakta olan 503 adet barajın, 203 adeti büyük baraj iken diğer 300 adeti ise gölet şeklinde olan barajlardır. Sayısal olarak en fazla baraj, İç Anadolu Bölgesinde bulunmaktadır.

Barajlar; ağırlık, toprak dolgu, kaya dolgu, kil çekirdekli, kemer, payandalı, ön yüzü beton kaplı ve silindirele sıkıştırılmış beton barajlar olmak üzere farklı malzeme ve geometrik özelliklere sahip olabilmektedirler. Baraj yapılacak bölgede birden fazla baraj tipinin yapımı söz konusu olabilmektedir. Bu nedenle, bölgesel özellikler, yapılış amacı ve ekonomik durumu göz önünde bulundurularak en uygun baraj tipinin belirlenmesi gerekmektedir.

Kemer barajlar, eğrilikli yapısı dolayısıyla sahip oldukları narin kesitleri sayesinde diğer barajlara oranla daha az miktarda beton kullanımını sağlamaktadır. Tek veya çift eğriliğe sahip olabilen kemer barajların, planda eğriliğe sahip olanlarına tek eğrilikli kemer baraj, hem plan hem de düşey kesit boyunca eğriliğe sahip olanlarına ise çift eğrilikli kemer baraj adı verilmektedir. Kemer barajlar, üzerlerine etkiyen su basıncını kemer ve konsol davranışları sayesinde vadi yamaçlarına aktardıkları için, vadi yamaçları bu basıncı taşıyabilecek dayanım ve rijitlikte olmalıdır.

Barajlar büyük hacimli, maliyetli ve yapımı uzun süren mühendislik yapılarıdır. Bu tür yapıların inşası sırasında meydana gelebilecek hata ve/veya oluşabilecek kaza

sonrasında büyük can ve mal kayıpları ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, böylesine önemli ve stratejik mühendislik yapılarının tasarım ve analizleri de uzman kişiler tarafından yapılmalıdır.

Ülkemiz aktif bir deprem kuşağı üzerinde yer almaktadır. Kemer barajların büyük hacimli, ağır kütleli ve narin yapılar olduğu düşünüldüğünde, deprem gibi dinamik kuvvetler altında önemli yerdeğiştirme, kesit tesirleri ve gerilmelere maruz kalacağı ortaya çıkmaktadır. Bu etkilerin ne düzeyde olduğu ve yapısal olarak en fazla zorlanan bölgelerin belirlenmesi ancak bilgisayar ortamında yapılacak analizler yardımıyla değerlendirilebilmektedir. Günümüzde baraj türü mühendislik yapılarının statik ve dinamik yükler altındaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla kullanılacak ve sonlu eleman yöntemine dayalı birçok mühendislik programı mevcuttur.

Sonlu eleman analizleri belirli kabullere dayandığından dolayı elde edilen sonuçların deneysel yöntemlerle karşılaştırılması ve/veya doğrulanması gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda, laboratuvar ortamında ölçekli baraj modelleri oluşturulabilmekte ve bu modeller üzerinde ilgili deneysel çalışmalar gerçekleştirilebilmektedir. Bu amaç doğrultusunda kullanılacak en uygun yöntemlerden bir tanesi de Deneysel Modal Analiz Yöntemi'dir.

Deneysel Modal Analiz (DMA) yöntemi, yapılara ait dinamik karakteristikler olan doğal frekansların, mod şekillerinin ve sönüm oranlarının belirlenmesinde kullanılan deneysel ölçüm yöntemlerine dayalı bir yöntemdir. DMA yöntemi, Çevresel ve Zorlanmış Titreşim Yöntemleri olarak yapıya uygulanan titreşimin doğal (deprem, rüzgar, trafik yükleri vb.) veya yapay (sarsıcılar, sarsma tablaları ve darbe çekiçleri) olmasına göre ikiye ayrılmaktadır. DMA yöntemiyle elde edilen yapıya ait dinamik karakteristiklerin doğruluğu yapılan deneysel ölçümün kalitesine bağlı olarak değişebilmektedir.

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilecek deneysel çalışmaların bütün baraj yapıları için ayrı ayrı yapılması oldukça zaman alıcı, maliyetli ve güç olduğundan dolayı çalışmalar daha çok bilgisayar yardımıyla sonlu eleman yöntemine dayalı gerçekleştirilmektedir. Günümüzde bir baraj modelinin modellenmesi sırasında yaklaşık 30000 sonlu elemanın ve 45000 düğüm noktasının kullanılması gerektiği, analizlerin farklı analiz türlerine göre 3-4 gün sürdüğü, sonuçların grafiklendirilmesinin ise 1-2 gün aldığı göz önünde bulundurulduğunda, barajların yapısal davranışlarının belirlenmesine yönelik hazırlanacak, ölçeklendirme ve istatistiki yöntemlere dayalı bir yazılımın oldukça faydalı ve süre azaltıcı olacağı düşünülmektedir.

1.2. Konuyla İlgili Yapılan Çalışmalar

1.2.1. Barajların Yapısal Davranışlarının Belirlenmesi ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Ghanaat vd. (1992), Çin'deki Dongjiang Kemer Barajı'nın dinamik davranışını baraj-rezervuar-temel etkileşimini dikkate alarak incelemek amacıyla, ilk olarak baraj ve baraj gölü çevresinde patlayıcı maddeler patlatılarak titreşim oluşturulmuş ve üç eksenli sismograflarla titreşim kayıtları alınmıştır. Ardından, tekrar patlayıcı maddeler kullanılarak baraj gölünde şok dalgaları oluşturularak sistem titreştirilmiştir. Patlatma ile oluşturulan titreşimlerle elde edilen karakteristik özellikler, analitik yöntemler sonucu elde edilen karakteristik özelliklerle kıyaslandığında sonuçların uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Chouinard vd. (1995), Hindistan'da bulunan 169m yüksekliğindeki Idduki Kemer Barajının çevresel titreşimler altında dinamik karakteristikleri ile deprem davranışının belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Kemer barajın dinamik davranışını belirlemede yapılan analiz sayısını azaltmak için, barajda mevsimsel ölçümler yapılmış ve asal bileşen analizi yaklaşımı kullanılarak istatistiksel bir prosedür oluşturulmaya çalışılmıştır. Uygulanan işlemler sonrasında gerekli iyileştirmeler yapılarak baraj davranışını daha iyi bir biçimde yansıtacak model ortaya konulmuştur.

Ohmachi ve Jalali (1999), yaptıkları çalışma ile yakın fay yer hareketi altındaki kemer barajların lineer dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Çalışma kapsamında seçtikleri ve Amerika'da bulunan Morrow Point Kemer Barajı, 1967 yılında inşa edilen, 144m yüksekliğe ve 244m kret uzunluğuna sahip çift eğrilikli bir barajdır. 1994 yılında meydana gelen Northridge depremi ivme kayıtları kullanılarak analizleri gerçekleştirilen baraj, kabuk elemanlarla modellenmiştir. Barajın memba ve mansap yüzündeki elemanlarda oluşan gerilmelerin değişimini incelemek için, ivme kayıtları barajla farklı açılar yapacak şekilde uygulanmıştır.

Nasserzarea vd. (2000), tarafından yapılan çalışmada, kemer barajlar için yapı-zemin-rezervuar etkileşimi dikkate alınarak doğal frekansları ve mod şekillerini belirlemek amacıyla özel bir yöntemin geliştirmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında ilk olarak yöntemin geçerliliğini test etmek için daha küçük ölçekli yapılar analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçların doğru olmasıyla yöntem kemer baraja uygulanmıştır. Çalışmada, kemer baraja ait doğal frekans ve mod şekilleri elde edilip, literatürle uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Cantieni (2001), 170m kret uzunluğuna ve 46m kemer yüksekliğine sahip Norsj Kemer Barajının dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemiştir. Baraja öncelikle çevresel titreşim testi uygulanmış ve barajın temel doğal frekansı elde edilmiştir. Doğal frekansın küçük çıkmasından dolayı EMPA tipi titreştiricilerle baraja zorlanmış titreşim testi uygulanarak barajın dinamik karakteristikleri daha net bir şekilde belirlenmiştir. Ölçümlerden toplanan sinyallerin işlenmesi sonucu barajın ilk 12 doğal frekansı, mod şekli ve sönüm oranı elde edilmiştir. Doğal frekanslar 3.0-13.5 Hz arasında elde edilmiş olup, mod şekilleri ise, simetrik, antisimetrik ve düşey eğilme modları olarak ortaya çıkmıştır. Baraja ait sonlu eleman modeli ise özel bir programda oluşturulmuş ve analiz edilerek barajın dinamik karakteristikleri analitik olarak belirlenmiştir. Analizler sonucunda analitik dinamik karakteristikler ile deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler karşılaştırılmıştır. Yapılan incelemede sonuçlar arası biraz farklılık olduğu grlmştir. Bu farklılığı gidermek amacıyla barajın sonlu eleman modeli üzerinde deneysel sonuçlara göre iyileştirmeler yapılmıştır.

Duron vd. (2003), California'daki Florance Lake Kemer Barajı'nın dinamik karakteristiklerini baraj rezervuarının boş ve dolu olması durumuna göre analitik ve deneysel olarak incelemişlerdir. 46m yüksekliğe sahip olup, 58 kemerden oluşmakta olan barajın kret uzunluğu yaklaşık 962m'dir. Çalışmada öncelikle, barajın en uzun 9 kemeri seçilerek yapı-zemin-rezervuar etkileşimini içerecek şekilde EACD-3D sonlu eleman programında modellenmiştir. Daha sonra baraj üzerinde seçilen kemer parçalarına ivmeölçerler yerleştirilerek çevresel titreşim yöntemiyle 37 noktadan sinyaller toplanmıştır. Toplanan sinyaller işlenerek barajın dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Yapılan çalışmada, rezervuarın boş ve dolu olması durumunda elde edilen analitik ve deneysel veriler incelenerek sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu grlmştir.

Akköse vd. (2004), tarafından yapılan çalışmada kemer barajların, yapı-rezervuar, yapı-zemin ve yapı-zemin-rezervuar etkileşimlerini içeren farklı durumlar için sonlu eleman modelleri oluşturularak sonuçların karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla 1940 El Centro ivme kaydı kullanarak lineer ve lineer olmayan dinamik analizler yapılıp, barajlara ait dinamik davranışlar incelenmiştir.

Karaton (2004), Tip-5 kemer barajında sismik hasar davranışının etkisini yapı-rezervuar etkileşimini dikkate alarak belirlenmesi için yaptığı çalışmada, barajın boş ve dolu olması durumları için lineer ve lineer olmayan analizler gerçekleştirmiştir. Dinamik etkiyle birlikte barajın hangi bölgelerinin hasar oluşabileceği belirlenmiştir. Analizlerde,

dinamik etki olarak 1967 Konya ve 1992 Erzincan deprem ivme kayıtları kullanılmıştır. Elde edilen bulgular sonucunda, hasarların daha çok tabana, yamaçlara ve krete yakın bölgelerde oluştuğu görülmüştür.

Alves ve Hall (2006), tarafından yapılan kapsamlı çalışmada, 113 m yüksekliğe sahip Pacoima Kemer Barajı'nın dinamik karakteristiklerini; deprem kayıtları, zorlanmış titreşim testleri ve sonlu eleman yöntemi kullanarak belirlemiştir. Çalışmada öncelikle 1994 Northridge depreminden ve 2001 yılında meydana gelen 4.3 büyüklüğündeki bir depremden alınan ivme kayıtları MODE-ID adı verilen bir program ile işlenerek iki farklı deprem kaydı kullanılmıştır. Northridge depremi ve 2001 deprem kayıtlarına göre barajın ilk iki doğal frekansları ile mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilmiş ve kıyaslanmıştır. 2001 yılında meydana gelen deprem baraja 6km mesafede olup, barajda maksimum 0.16g'lik bir ivme oluşturmuştur. Kayıtlar baraj üzerinde çeşitli noktalara yerleştirilen 17 adet ivmeölçerden toplanarak, MODE-ID programında işlenmiş ve elde edilen sonuçlar baraja 1980 yılında uygulanmış zorlanmış titreşim testi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Zorlanmış titreşim testlerinden elde edilen frekans ve sönüm oranı değerlerinin MODE-ID programından elde edilenlerden yüksek çıkması sebebiyle 2002 yılında baraja tekrar zorlanmış titreşim testleri uygulanmıştır. Titreştirici olarak eksantrik kütle sarsıcı kullanılmıştır. Bu testlerden elde edilen doğal frekans ve sönüm oranları ilk testlere göre azalmasına karşın MODE-ID programından elde edilenlere göre biraz yüksek çıkmıştır. Dinamik karakteristikler arasındaki uyumsuzluk depremler ve zorlanmış titreşim testleri sırasında rezervuarda bulunan su seviyesi farkından olduğu sonucuna varılmıştır. 1980 ve 2002 yıllarında gerçekleştirilen zorlanmış titreşim testi sonuçlarının farklı çıkmasının sebebi ise yine rezervuardaki farklı su seviyelerine veya 2001 yılında meydana gelen depremin, barajın rijitliğini azaltmış olabileceğine bağlanmıştır. Bu çalışmada son olarak, Pacoima Kemer Barajı'nın dinamik davranışı sonlu eleman yöntemiyle belirlenmiştir. Barajın üç boyutlu modeli rezervuar suyunun sıkışmaz, temelin ise kütesiz olması kabulüne göre oluşturulmuştur. Modelde su yüksekliği 2001 ve 2002 yılındaki yükseklik dikkate alınarak 38m seçilmiştir. Su uzunluğu 206m alınmış, temel sağ ve sol yamaçta 152m, memba 19m mansap doğrultusunda 73m kadar uzatılmıştır. Barajın analitik frekanslarının deneysel frekanslarla örtüşmesi için beton birim hacim ağırlığı, poisson oranı ve elastisite modülü iyileştirilerek uygun değerler almıştır.

Sevim (2010), kemer barajların dinamik davranışlarını, sonlu eleman ve deneysel modal analiz yöntemleri incelemiştir. Bu amaçla tez kapsamında, laboratuvar ortamında

ölçekli olarak inşa edilen Tip-1 kemer baraj üzerinde deneysel çalışmaları gerçekleştirip sonuçlar, ANSYS programıyla elde edilen sonlu eleman modeli ile karşılaştırılmıştır. Yapı-zemin-rezervuar etkileşimin incelendiği çalışma kapsamında, farklı su seviyeleri için kemer barajın dinamik karakteristikleri gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmanın gerçek bir barajı temsil etmesi durumu için Berke barajı seçilerek deneysel ve analitik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Sevim vd. (2011a), rezervuar uzunluğu ve yüksekliğinin kemer barajların deprem davranışları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, Tip-5 kemer barajı üzerinde yapılan bu çalışmayla, barajın deprem davranışı Imperial Valley (1940) yer hareketi kaydı kullanılarak belirlenmiştir.

Kemer barajların dinamik davranışlarının belirlenmesinde birçok analitik ve deneysel çalışma mevcuttur. (Bayraktar vd. 2011; Sevim vd. 2011b; Sevim vd. 2012; Sevim vd. 2013; Sevim vd. 2014)

Kartal vd. (2015), tarafından yapılan çalışmada, silindirle sıkıştırılmış beton barajda malzeme bakımından doğrusal ve doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilerek barajın yapısal davranışındaki değişimler incelenmiştir. Deprem kaydı olarak, 1999 Kocaeli depreminin ivme kayıtları kullanılmıştır. Zaman tanım alanında gerçekleştirilen dinamik analizlerde ivme kayıtlarının yatay ve düşey bileşenleri kullanılmıştır. Yapı-zemin-rezervuar etkileşiminde, rezervuar suyunun baraj ve temel ara yüzeyinde temas-hedef eleman çiftleri kullanılmıştır. Lagrange yaklaşımıyla rezervuar suyunun hidrodinamik basıncı dikkate alınmıştır. Yapılan doğrusal ve doğrusal olmayan analizler sonucunda; yerdeğiştirme, asal çekme gerilmeleri ve asal basınç gerilmelerinin baraj yüksekliğiyle değişim grafikleri barajın boş ve dolu olması durumları dikkate alınarak karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

1.2.2. Ölçeklendirme ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Zhou vd. (2000), 500 yılda %10 aşılma olasılığına sahip ivmeye göre tasarlanmış kemer barajda deprem hareketleriyle meydana gelecek çatlakları incelemek amacıyla, ölçekli modeller üreterek deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Dünyanın en yüksek çift eğrilikli kemer barajı olan 292m yüksekliğindeki Xiao Wan Barajı aktif deprem bölgesi üzerinde inşa edilmiştir. Sarsma masasının izin verdiği ölçüde, 1/350 ölçekli ve 4 farklı tipte 20 adet baraj modeli üretilmiştir. Malzeme olarak alçı taşının oyulmasıyla elde

edilen baraj modelinin geometrik özellikleri mümkün olduğu kadar prototipe benzetilmiştir. Model ve prototip arasındaki benzerlik ilişkisi, hazır olarak verilmiş ölçek faktörleriyle sunulmuştur. Deneyleerin fazlalığı ve zorluğu nedeniyle su etkisi dikkate alınmadan yapılan çalışmalarda ilgili sınır koşullar göz ardı edilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, her bir modele zorlanmış titreşim testi uygulanarak modellerin ilk üç doğal frekansı ve mod şekli elde edilmiştir. Sonraki aşamada, 3x3m boyutundaki sarsma masasında deprem etkisi değerlendirilmiştir. Titreşimler çatlaklar oluşuncaya kadar devam ettirilmiş ve çatlakların genellikle barajın orta bölgesinde krete yakın yerlerde oluştuğu gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamında, her bir modelde oluşan hasar durumları ayrı ayrı incelenmiştir. Deneyle çalışmalarını sonucunda, Xiao Wan kemer barajının depreme karşı yeterli dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir.

Jiang ve Shu (2005), askeri bölge çevresinde silahların oluşturduğu şok etkisini araştırmak amacıyla, laboratuvar ortamında oluşturulan ölçekli modelleri sarsma masası üzerinde farklı ivme kayıtları kullanarak deneylelere tabi tutmuş ve dinamik karakteristiklerin değişimlerini incelemişlerdir. Sayısal çözüm aşamasında, boyutsuz analiz olarak Buckingham II teoremi kullanılmış olup, laboratuvar modeli ile prototip arasındaki ilişki incelenmiştir.

Oliveira ve Faria (2006), küçük ölçekli modeller kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada, kemer barajlar için hasar seviyelerinin tespit edilmesini amaçlamışlardır. Bu amaç doğrultusunda, Portekiz de bulunan ve 110m yüksekliğindeki Alto Lindoso Kemer Barajı ile 96m yüksekliğindeki Alqueva Kemer Barajı'nın 1/250 ölçekli modellerini laboratuvar ortamında inşa etmişlerdir. Baraj modellerinin bir tanesinde, hasar gözlemlene kadar yük sistematik bir şekilde artırılmıştır. Diğer modelde ise baraj için izin verilen maksimum yerdeğiştirme değerine kadar yükleme yapılmıştır. Çalışma kapsamında, baraj gövdesinde kret seviyesinin biraz altındaki orta bölgelerde çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar sonlu eleman analiz sonuçları ile de karşılaştırmalı olarak irdelenmiş olup, sonuçların birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Wang ve Li (2006), Çin'de yapılması planlanan 278m yüksekliğe ve 612.5m kret uzunluğuna sahip bir kemer barajın deprem davranışını incelemek amacıyla, barajın 1/300 ölçekli modelini yapı-zemin-rezervuar etkileşimini içerecek şekilde laboratuvar ortamında inşa etmişlerdir. Yapı-zemin etkileşimini temsil etmek ve temeldeki dalga yayılımını modellemek için viskoz sıvı içeren sönümlü sınırlar kullanılmıştır. Oluşturulan modelde, baraj yüksekliği 92.6cm, rezervuar uzunluğu 254.7cm, temel uzunluğu yamaçlara doğru

320cm, su yönünde 220cm ve yüksekliği ise 133.3cm'dir. İlk olarak, barajın dinamik karakteristikleri rezervuar dikkate alınmadan analitik ve deneysel olarak belirlenmiştir. Daha sonra, baraj modeli sarsma masası üzerinde farklı deprem kayıtları altında testlere tabi tutulmuş ve dinamik davranış elde edilmiştir. Sarsma masası üzerinde yapılan çalışmalar sırasında, barajın mansap yüzeyinde aşırı gerilmelerin meydana geldiği belirtilmiş olup, baraja uygulanan deprem yükünün artmasıyla birlikte lineer olmayan bir davranışın ortaya çıktığı ifade edilmiştir. Hasar ile birlikte doğal frekanslarda azalma meydana gelirken, barajda belirgin bir deformasyonun oluşmadığı belirtilmiştir.

Wang ve He (2007), kemer barajlarda oluşan çatlakların doğal frekanslar üzerindeki etkilerini ölçekli modeller üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalar ile birlikte araştırmışlardır. Çalışma kapsamında, 80m yüksekliğinde ve 209m kret uzunluğunda tek eğrilikli bir kemer baraj tasarlanmıştır. Barajın, yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak oluşturulan 1/100 ölçekli üç boyutlu modeli laboratuvar ortamında inşa edilmiştir. Ölçeklendirme aşamasında sadece geometri ölçeği kullanılmış olup, malzeme üzerinde değişim dikkate alınmamıştır. Baraj gövdesi çimento hamurundan, zemin ise betondan yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında, baraj gövdesinde çeşitli oranlarda noktasal çatlaklar oluşturularak her bir durum için zorlanmış titreşim testleri yardımıyla doğal frekanslar elde edilmiştir. Ayrıca, barajın sonlu eleman modeli oluşturularak istatistiksel sınır ağları yöntemine göre barajdaki çatlaklar modellenmiş ve her bir durum için frekanslar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılarak, kemer barajlar için hasarsız ve hasarlı durumlar altında frekans değişimleri değerlendirilmiştir.

Wang ve Li (2007), Çin'de yapımı devam eden 292m yüksekliğindeki Xiao Wan Kemer Barajı'nın deprem davranışını deneysel olarak incelemek amacıyla, kemer barajın laboratuvar modelini yapı-zemin-rezervuar etkileşimini dikkate alarak oluşturmuşlardır. Baraj gövdesi ve temel, briket ve kauçuk malzemeler kullanılarak inşa edilmiştir. 5x5m boyutundaki sarsma masası üzerine yerleştirilen baraj modeline dinamik kuvvetler uygulanmış olup, barajın gövdesine yerleştirilen hassas ivmeölçerler kullanılarak frekans davranış fonksiyonları elde edilmiştir. Çalışma kapsamında, düşük ve yüksek su seviyeleri ile deprem hareketlerini içeren 18 farklı durum incelenmiş olup, dinamik hareketler ile birlikte on bir noktasal çatlağın oluşup frekansların %14 oranında azaldığı ifade edilmiştir.

Carpinteri ve Corrado (2010), eğilme etkisindeki donatılı beton kirişlerde, yüklenme süresince betonun çatlama veya kırılması ile donatının akması veya kopması gibi yapısal davranışları boyut analizi yardımıyla incelemiştir. Kirişlerdeki süneklik veya gevreklik

durumları donatı oranı, kopma dayanımı, çekme gerilmesi gibi farklı parametreler dikkate alınarak incelenmiştir. Sayısal sonuçlar, boyut analiz yöntemlerinden bir tanesi olan Buckingham II teoremi kullanılarak yorumlanmıştır.

Ramu vd. (2010), Buckingham II Teoremi ve benzerlik kriterlerini göz önüne bulundurarak ölçeklendirme kurallarını geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, elastik modellerin uygun bir şekilde üretilip yüklenilmesi halinde prototip ile benzer yapıların yapılabileceği belirtilmiştir. Ayrıca, Buckingham II Teoreminin işlem adımları açıkça belirtilmiş ve konsol kiriş örneği üzerinde ilgili teorem açıklanmıştır. Konsol kirişin model ve prototipi arasında kurulan benzerlik ilişkisiyle birlikte her parametre (yerdeğiştirme, ağırlık, yükseklik ve kuvvet) için ölçek faktörü oluşturulmuştur.

Balaguer ve Claramonte (2011), sundukları çalışma kapsamında ölçeklendirme ve boyut analizinin önemini, avantajlarını ve kullanılma amaçlarını detaylı bir şekilde açıklamış olup, ilgili analizlerin hangi alanlarda kullanılabileceğinden bahsetmişlerdir. Dinamik ve robotik araçlar üzerinde yapılan deneylerde, kazanç ve zaman ölçek faktörleri dikkate alınmıştır. Buckingham II teoremi kullanılarak oluşturulan boyut analizlerinde, model ve prototip üzerinde benzerlik ilişkisi kurularak ilgili karşılaştırmalar yapılmıştır.

Ghosh (2011), ölçeklendirmenin önemini ve genel kurallarını açıklamak amacıyla, ölçekleme yaparken dikkat edilmesi gereken koşullardan ve ölçekleme türlerinden detaylı olarak bahsetmiştir. Ölçeklendirme temel anlamda, objenin fiziksel boyutunun ve iç davranışının ölçeklendirilmesi olarak 2 farklı tipte olsa da; zaman, mekanik, geometrik, ivme gibi çeşitli birçok uygulama alanında da kullanılabileceği belirtilmiştir. Bilimin birçok alanında kullanılan ölçeklendirmenin, deneysel çalışmalarda zaman ve finansal başta olmak üzere birçok konuda kolaylık sağladığı belirtilmiş olup, ayrıca da ölçeklendirme ile ilgili kullanılabilecek tüm alanlar üzerinde de durulmuştur.

Ramu vd. (2013) tarafından yapılan çalışma kapsamında, küçük ölçekli olarak tasarlanmış modeller üzerinde benzerlik teorisinin uygulanabilirliğinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, analitik, sayısal ve deneysel analizin geçerliliği olmak üzere üç durumun kıyaslaması yapılmıştır. Model ve prototipe ait yerdeğiştirme değerleri arasındaki maksimum farkın %5 civarında olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, sonlu eleman modelindeki mesnet koşullarından dolayı maksimum farklılık %20 seviyelerinde elde edilmiş olup, bu farklılığın kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu ve benzerlik oranlarının geçerli olduğu ifade edilmiştir.

Datin ve Prevatt (2013), kasırga bölgelerinde bulunan yapıların rüzgara karşı dayanıklılığını arttırmak amacıyla, yönetmeliklerin rüzgarla ilgili olan kısımlarını geliştirmeyi amaçlamışlardır. Rüzgar yükünün yapısal etkilerini incelemek amacıyla, hafif ağırlıklı ahşap çubuklardan 1/3 ölçekli ahşap çatılar üretilmiştir. Prototip ve model çatılar arasındaki benzerliğin kurulması amacıyla, Buckingham II teoremi kullanılmıştır. Ahşap çubuklardan üretilen modellerin üst kısımları ile duvarların dış kısımları koruyucularla birlikte kapatılmıştır. Kullanılan bu koruyucu, ölçekli modellerde de ölçeklenerek kullanılmıştır. Bilgisayar modelinde ise rüzgar kuvveti her bir çubuğun birleşim noktasına etkittirilmiştir.

Balawi vd. (2015), düşük hız etkisi ve statik yükleme altında plak ve kirişlerde benzerlik teorisine dayalı ölçeklendirme kurallarını incelemeyi amaçlamışlardır. Deneysel çalışmalarda, kalınlığı, toplam kütlesi, malzeme özelliği vb. özellikleri farklı olan iki plak modeli kullanılmıştır. Prototiplerle uyum sağlaması amacıyla, modellerdeki her bir değişikliğin oranı olarak ölçek faktörü sunulmuştur. Sistemler arası benzerliğin oluşturulmasıyla, bir sistem için yazılan çeşitli denklem ve eşitliklerin tüm sistemler için geçerli olduğu ve bir çok durumda model ve prototip arasında tamamen benzerlik kurmanın imkansız olduğu belirtilmiştir.

Hafeez ve Almaskari (2015), kompozit tüplerin yanal yük altında ki davranışlarıyla ilgili çalışmaların uzun yıllardır devam ettiğini fakat silindirik örnekler kullanılarak ölçeklendirmenin etkisini araştıran çalışmaların yeterli düzeyde olmadığını belirtmişlerdir. Çalışma kapsamında, çentiklere maruz kalan ve V tipi desteklere dayanan GRE boru örneklerinin geometrik olarak ölçeklendirilmesi üzerine benzerlik çalışmaları yapılmıştır. Tüpler yanal yük altında zarar görebilen tüpler olup, boyut analizinde Buckingham II Teoremi kullanılmıştır. GRE boru örnekleri ve V şekilli desteklerin her biri için dört farklı ölçek (1, 3/4, 1/2, 1/4) kullanılarak modeller hazırlanmıştır. Tüplere uygulanan yükler sonucunda, her bir model için yük-yerdeğiştirme eğrisi ile boşaltma eğrisi elde edilip karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

Lu vd. (2015), çelikle güçlendirilmiş kolonlar ve beton çekirdek tüplü çok katlı bir yapının deprem performansını incelemiştir. 242m yüksekliğindeki 54 katlı yapının sarsma masasında test edilmesi için ölçekli modeli oluşturulmuş ve farklı depremler altında ki yapısal performansı incelenmiştir. Ölçekler (E, γ , kuvvet, frekans, ivme vd.), sarsma masasının yük taşıma kapasitesi ve büyüklüğüne göre belirlenmiştir. Ayrıca, sonlu eleman modeli ile birlikte dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, sonlu eleman

sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında ilk üç frekans değeri için ortalama %8'lik bir farklılık hesaplanmıştır. Oluşan bu farklılığın, malzemeye ait benzerliğin tam olmamasından ve inşa sürecinde bazı elemanların rijitliklerinin tasarım değerlerinden büyük olmasından kaynaklanabileceği ifade edilmiştir.

Shehadeh vd. (2015), gerçekleştirdikleri bu çalışmada, büyük boyutlu yapısal elemanların benzerlik ve ölçeklendirilmesinden bahsetmişlerdir. Büyük yapılar için yapılması planlanan deneylerin oldukça maliyetli olması ve testlerin zorluğunun küçük ölçekli modellerin kullanımını yaygınlaştırdığı belirtilmiştir. Sistemler arası benzerliğin kurulması ile birlikte, bir sisteme ait elde edilen davranış sonuçları kullanılarak diğer benzer sistemlerin davranışlarını tahmin edilebileceği belirtilmiş olup, bu incelemenin de orijinal sistem üzerinde yapılacak çalışmalardan çok daha kolay olacağı ifade edilmiştir. Çalışmada, yukarıda bahsedilen ilişki Buckingham II teoremi kullanılarak kurulmuştur. Büyük petrol sondaj aletlerinin basınç dağılımının sayısal tahmini ve sürekli yükler altındaki elastik deformasyonlarını incelemek amacıyla güvertede bulunan sondaj aletinin ölçekli modeli ve prototipi üretilmiştir. Prototip ve modele yük uygulanmış, Buckingham II teoreminden elde edilen parametrelere göre maksimum gerilme ve yerdeğiştirmeler hesaplanmıştır. Benzer ölçeğe sahip 9 farklı modele de aynı işlemler uygulanarak yerdeğiştirme ve gerilme değerleri elde edilmiş, sonuçlar arasındaki farkın %0.25'i geçmediği gözlemlenmiştir.

1.2.3. Formül Geliştirme ve Yazılım Oluşturma ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Şenel (1996) tarafından hazırlanan tez kapsamında, sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen formülasyon ve matrislerin kullanılmasıyla çubuk sistemlerden oluşan iki veya üç boyutlu yapılarda statik analiz yapabilen bir yazılım geliştirilmesi amaçlanmıştır. BORLAND DELPHİ program diliyle hazırlanan yazılımda, analiz süresince hesaplanan eleman veya sistem matrislerine ait kodlama tablosunun kullanıcı tarafından müdahale edilebilir olmasıyla, kullanıcının yöntem teorisini gözlemleyerek konuya daha hakim olunacağı belirtilmiştir. Görsel yapıya sahip programlama ile geliştirilen yazılımda çeşitli yapı sistemleri çözülerek sonuçlar SAP90 programıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar arasında tam uyumluluk olduğu ifade edilmiştir.

Özdemir (2004), iki periyodik–stokastik hidrolojik süreç arasındaki bağımlılık yapısının matematiksel ve yapısal olarak tanımlanmasını amaçlayarak verilerin içsel ve

karşılıklı bağımlılık yapılarının doğrusal regresyona ve bilgi aktarımına etkilerini analiz etmiştir. Tez kapsamında teorik incelemelerle, iki periyodik-stokastik süreç arasındaki bütünsel korelasyonun mevsimsel ortalamalar arasındaki ilişki ile mevsimlerin karşılıklı ilişkilerinin ağırlıklı toplamlarından oluştuğu sonucuna varılmış. Çalışmada, geleneksel ve Hirsch tarafından önerilen regresyon yaklaşımlarının kullanılmasıyla yüksek veya düşük tahminlerin ortaya çıktığı ve her iki yaklaşımda mevsimsel bileşenleri koruyamadığı belirtilmiştir. Bağımlı ve bağımsız değişkene ait mevsimsel değişim özelliklerinin de dikkate alınmasıyla mevsimsel regresyon yaklaşımlarının bilgi aktarımı performanslarını teorik ve deneysel açıdan daha iyi yansıttığı ifade edilmiştir.

Mittrup ve Hartmann (2005), barajların yapısal denetimi için yazılım geliştirilmesi üzerinde çalışmışlardır. Bu amaçla uygulama olarak seçilen ağırlık barajında, uzman bir ekip ile günlük ve elektronik ölçümler alınmış ve çalışma kapsamında belirtilen akış diyagramıyla geliştirilen yazılım sunulmuştur. Yazılımın doğruluğu Ennepe barajında yapılan testlerle belirlenmiş olup, uygulamanın kullanımı tavsiye edilmektedir.

Şahin (2009) tarafından yapılan tez kapsamında, yapıların dinamik karakteristiklerini zorlanmış ve çevresel titreşim deneylerinden elde edilen sinyallerle belirleyerek bu davranışın referans alınmasıyla yapının teorik modellerinin uygun seviyede iyileştirmesini sağlamak için bilgisayar yazılımı geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, ilk olarak laboratuvar ortamında üretilmiş olan üç boyutlu çelik çerçeve üzerinde deneysel ve operasyonel modal analizler gerçekleştirilerek, yapıya ait işlenmemiş zamana bağlı sinyaller elde edilmiştir. Bu ham veriler, ilk olarak tez kapsamında MATLAB program diliyle yazılmış olan sayısal sinyal işleme programı olan SignalCAD'e aktarılmıştır. SignalCAD programıyla, ham veriler analiz edilerek frekans ortamında davranış spektrumları elde edilmiş aynı zamanda filtreleme özellikleri grafiksel olarak verilmiştir. İkinci aşamada, SignalCAD ile üretilen spektral fonksiyonların MATLAB program diliyle yazılmış olan ModalCAD programına aktarılmasıyla, yapıya ait modal parametreler belirlenmiştir. Üçüncü aşamada ise, deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristiklerin referans alınmasıyla, teorik sonlu eleman modelinin optimum iyileştirmesini yapmak amacıyla MATLAB program diliyle yazılmış FemUP adı verilen program geliştirilmiştir.

Beşiktaş (2010) Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan bazı akım gözlem istasyonlarının verilerini kullanarak daha önce ölçüm yapılmamış noktaların debi tahminini, debi süreklilik eğrilerinin regresyon analizi metodu ile yapmıştır. Bölgenin karakteristiklerini ifade eden ortalama havza alanı, ortalama alan yağışı, ortalama

yükseklik ve ortalama eğim bağımlı değişkenlerinin seçilmesiyle her bir bağımsız değişkenin aylık ve yıllık olmak üzere %5, 50 ve 95 aşılma olasılıklarına karşılık gelen bağımlı değişken (debi) üzerindeki göstermek üzere regresyon analizi ile formüller geliştirilmiştir. Elde edilen bu formüllerle bölgesel debi tahmini yapılmış ve sonuçlar literatürde yapılan farklı yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Regresyon analizinde kullanılan günlük veriye sahip yıl sayısı arttıkça formüllerin bölgeyi daha iyi temsil ettiği belirtilmiştir.

Qiujing vd. (2012), yüksek kemer barajların inşa ve ilk su depolama sürecinde ki yatay yerdeğiştirme, gerilme ve güvenliğini regresyon analizi ile tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla Xiaowan kemer barajı uygulama olarak seçilmiştir. Kemer barajı etkileyen parametre olarak; su seviyesi, sıcaklık değişimi, zaman, beton ve kayanın elastisite modülü dikkate alınmıştır. Sonlu eleman analizlerinde yapılan iyileştirmelerle gerçek baraj modeli yansıtılmıştır. Yapılan analizler sonucu kemer barajda radyal yerdeğiştirmenin özellikle su seviyesi, sıcaklık ve zaman bileşenlerine bağlı olarak değiştiği ifade edilmiştir. Analiz verileri kullanılarak yapılan regresyon analizi ile Xiaowan kemer barajının yerdeğiştirme, gerilme ve güvenliğinin tahmin edilebileceği belirtilmiştir.

Bayraktar vd. (2014), tarihi kemer köprülerin dinamik karakteristiklerini elde etmek için formül geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla, farklı açıklıklara sahip sekiz adet taş kemer köprü üzerinde deneysel ve analitik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen frekans değerleri, sönüm oranları ve mod şekillerini sonlu eleman analizleriyle karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlardan, 4-8Hz aralığındaki birinci titreşim moduna ait frekans değerleri arasında ilişki kurmak amacıyla eğri oluşturulmuştur. Eğri denkleminde parametre olarak maksimum kemer açıklığı seçilmiş olup, girilen kemer açıklığına bağlı olarak frekans değeri elde edilmiştir. Seçilen tarihi kemer köprülerin değerlendirilmesi sonucu sönüm oranının, dinamik analizlerde %3 olarak kullanılabilirliği belirtilmiştir.

Kopuz (2014) tarafından hazırlanan tez çalışmasında, tek serbestlik dereceli sistemlerde dayanım, süneklik ve periyot arasındaki ilişkiyi irdelemiştir. Tez kapsamında, elastoplastik tek serbestlik dereceli sistemler ele alınmış ve 60 adet ivme kaydı kullanılarak, MATLAB ile hazırlanan bir program yardımıyla zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Sünekliğin; dayanım azaltma katsayısı, periyot ve zemin grubuna göre değişimi incelenmiş olup, süneklik-dayanım-periyot arasında bir ilişkinin varlığını tespit etmiştir. Süneklik-dayanım-periyot arasındaki ilişkiyi yansıtan

formülü elde etmek amacıyla regresyon analizleri yapılmıştır. Formülden elde edilen sonuçlara göre, periyot değerinin dayanım azaltma katsayısı ve zemin grubuna göre değiştiği, sünekliğin ise belirli bir periyot değerinden itibaren sabit değerler aldığı, periyot değerinin azalmasıyla ve/veya dayanım azaltma katsayısı değerinin fazla olması durumlarında sünekliğin arttığı belirtilmiştir.

Sümerkan (2014) tez kapsamında, ardgermeli dengeli konsol köprülerin doğal frekanslarını belirlemek amacıyla çevresel titreşim verileri ve sonlu eleman analizlerine dayalı bir formül geliştirmiştir. Bu amaçla, beş adet ardgermeli dengeli konsol köprünün dinamik karakteristiklerini deneysel ve analitik olarak elde etmiştir. Elde edilen değerlerin karşılaştırılmasıyla köprülerin frekans değerlerini etkileyen parametrelerin; kütle, rijitlik, yükseklik, elastisite modülü ve atalet momenti olduğu ifade edilmiştir. Beş adet Köprüye ait frekans değerlerinden, birbirine en yakın olan iki köprü arasında inceleme yapılarak etkili parametrenin seçilimi yapılmıştır. Deneysel ölçümleri alınan köprüler referans alınarak farklı yükseklik ve uzunluklar için sonlu eleman analizleri gerçekleştirilip, doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Verilere uygulanan regresyon analizi ile frekans değerleri arasındaki ilişkinin ikinci derece polinom olduğu kabul edilmiş ve bu polinom için en küçük kareler yöntemi kullanılarak köprülere ait doğal frekans değerini ifade eden formül elde edilmiştir. Geliştirilen formülden elde edilen sonuçlar, mevcut köprülerin deneysel sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Serhatoğlu (2015), tarihi minarelerin dinamik karakteristiklerini ve performanslarını incelemiştir. Bu amaçla tez kapsamında, Bursa'da bulunan 15 adet tarihi minare üzerinde deneysel çalışmalar ve sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Tarihi minarelerin, uzun ve narin olması, yığma yapı olmaları nedeniyle yatay yük taşıma kapasitelerinin düşük olması, heterojen malzeme özellikleri ve mesnet koşulları gibi birçok belirsizlik yapısal davranışların tespitinde zorluklar oluşturmasına karşın belirlenmesinin gerekliliğinden bahsetmiş ve bu amaçla minarelere çevresel titreşim testi uygulanmıştır. Uygulanan bu yöntemde modal parametrelerin belirlenebilmesi için klasik frekans alanlı yöntem kullanılmıştır. Minarelere ait malzeme özellikleri ultrases, birim hacim ağırlık ve özgül ağırlık testleri ile belirlenmiştir. Sonlu eleman modelleri oluşturularak testlerden elde edilen malzeme özelliklerinin dikkate alınmasıyla, deneysel çalışma sonuçları ile sonlu eleman analiz sonuçları arasındaki hata oranı %10'un altında tutulup, sonlu eleman modellerin gerçek yapı davranışını yansıttığı belirtilmiştir. Tarihi minarelere ait değerlerin elde edilmesiyle, birinci titreşim moduna ait periyotlar ve periyota etki eden parametreler

arasında ki ilişkiyi yansıtmak amacıyla regresyon analizi yapılmıştır. Elde edilen ampirik formülle tarihi minarelere ait birinci mod periyodunun seçilen parametrelere göre tahmin edileceği belirtilmiştir.

Atmaca (2016) tez kapsamında, deprem hasar tahmini ve kayıp azaltma çalışmalarının önemli aşamalarından biri olan mevcut yapı stokuna ait deprem envanterinin tamamlaması amacıyla structGIS isimli bir yazılım geliştirmiştir. Geliştirilen yazılım seçili bir bölgeye ait bina envanterinin, tam ölçekli olarak modellenbilmesine, zaman tanım alanında deprem analizlerinin yapılabilmesine ve elde edilen sonuçların CBS formatında kayıt edilebilmesine olanak vermektedir.

Mühendisliğin birçok alanında yapılan çalışmaları kolaylaştırmak ve zamandan kazanç sağlamak amacıyla yazılımlar geliştirilmekte ve sürekli olarak güncellenmektedir. Yazılımlar, değişen zaman koşullarına göre yapılan güncellemelerle bir adım daha ileri giderek yeniliklere ayak uydurmaktadır. (Peng ve Law 2002; Chan vd. 2010; Gu ve Özçelik 2011; Xiang vd. 2011; Cheng 2012)

1.3. Tezin Amacı ve İçeriği

Üç bölümden oluşan literatür araştırmasının ilk kısmında, barajların karakteristik özellikleri ve yapısal davranışlarının belirlenmesi hakkında yapılan çalışmalardan bahsedilmektedir. Bu çalışmalardan görüldüğü üzere barajlar hakkında yapılan çalışmalarda seçilen baraj parametreleri sınırlıdır. Ya küçük bir model üzerinde yapılan çalışmalardan ya da mevcut bir barajın analitik olarak sonlu eleman modellemesi yapılarak üzerinde yapılan çalışmalardan bahsedilmektedir. Literatür araştırmasının ikinci kısmında yapılarla ilgili ölçeklendirme, boyut analizi ve benzerlik yasaları hakkında yapılan çalışmalar sunulmuştur. Çok çeşitli alanlarda başvurulan benzerlik yasasıyla ilgili analitik olarak yapılan çalışmaların ispatlanması için deneysel çalışmalara da ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak inşaat mühendisliğinin uğraş alanı olan sistemler büyük ve maliyetli olduğu için her sistemi her boyutta ve özellikle modelleyip test etmek mümkün olmamaktadır. Literatür araştırmasının üçüncü kısmında ise, formülasyon geliştirme ve yazılım oluşturma ile ilgili yapılan çalışmalardan bahsedilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, önemli mühendislik yapılarından bir tanesi olan kemer barajların yapısal davranışlarının belirlenmesi amacıyla mühendislik yazılımı geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Söz konusu yazılım ile birlikte, 0.6-300m arasında kemer yüksekliğine

sahip tek eğrilikli kemer barajların statik ve dinamik yükler altındaki davranışlarının elde edilebilmesi, modal analizler sonucunda dinamik karakteristiklerin belirlenebilmesi ve analizler sırasında yapı-zemin etkileşiminin de dikkate alınabilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, baraj gövdesi üzerinde seçilecek herhangi bir düğüm noktasından geçen yatay ve düşey kesitler boyunca kesit tesirlerinin değişimleri ile gövdeye ait memba-mansap kontur diyagramlarının karşılaştırmalı olarak incelenmesi de gerçekleştirilebilecektir. Hazırlanan yazılımın doğruluğu, laboratuvar ortamında inşa edilen ve üzerinde analitik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilen, 1968 yılında İngiltere’de yapılan “Arch Dams” sempozyumunda (Arch Dams, 1968) sunulan beş farklı tip barajdan bir tanesi olan, Tip-1 kemer barajına ait sonuçlar ile değerlendirilmiştir. Literatüre katkı sağlayacağı düşünülen bu çalışmayla ilgili hazırlanan tez başlıca üç bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, genel bilgiler üzerinde durulmakta, konuyla ilgili yapılmış çalışmaların teorik kısımları hakkında bilgi verilerek konunun önemi vurgulanmaktadır. Bu bölümde, ölçeklendirme, benzerlik yasası ve boyut analizinin birbiriyle ilişkisi açıklanarak boyut analizlerinde en sık kullanılan Buckingham II Teoremi hakkında bilgi vermektedir. Barajların dinamik karakteristikleri ve yapısal davranışları olarak adlandırılan; frekans değeri, mod şekilleri, sönüm oranı, yerdeğiştirme, kesit tesirleri, gerilme ve şekildeğiştirme hakkında genel bilgiler ve gerekli formüller sunulmaktadır. Dinamik analiz hakkında bilgilendirmenin ardından analiz türlerinden bahsedilip tez kapsamında uygulanan Tepki Spektrum analizi üzerinde ayrıntılı şekilde durulmaktadır. Birinci bölümün son kısmında ise tezin büyük kısmında faydalanılan istatistik biliminin önemi, içeriği ve türlerinden bahsedilerek tez kapsamında kullanılan yöntemler üzerinde ayrıntılı şekilde durulmaktadır.

İkinci bölümde, tez kapsamında yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgular sunulmaktadır. İkinci bölümün ilk kısmında seçilen beton ve çelik taşıyıcı sistemler üzerinde ölçeklendirme ile ilgili yapılan analitik çalışmalar mevcuttur. Büyük boyuttaki taşıyıcı sistemlerin dinamik karakteristik ve yapısal davranışlarının, ölçeklendirme esasına dayanılarak küçültülmüş modellerde nasıl değiştiği ve bu değişimin nasıl formüle edildiği gösterilmektedir. SAP2000 programıyla sonlu eleman modelleri oluşturulup elde edilen sonuçlar, modellerin teorik formüllerinden yararlanılarak elde edilen sonuçlarla kıyaslanarak tablolarda sunulmaktadır. Örnek niteliği taşıyan bu çalışmaların ardından tezin asıl çalışma kısmına geçilmektedir. Tip-1 kemer barajı hakkında genel bilgiler verilip, Tip-1 Kemer Baraj’a ait laboratuvar modeli tanıtılmaktadır. Daha önceden bir tez çalışmasında kullanılan laboratuvar modelinin yapılmış deneysel

modal analiz sonuçları ve ANSYS yazılımıyla oluşturulmuş sonlu eleman modelinin modal analiz sonuçları verilmektedir. Bu verilerin yakın oluşu ile sonlu eleman modelinin doğru modellendiği ve gerçeği yansıttığı ispat edilerek, bu modelden elde edilecek farklı boyut ve malzeme özelliğindeki baraja ait sonlu eleman modellerinin de gerçeği yansıtacağı gösterilmektedir. Farklı parametrelerin kombinasyonlarıyla elde edilen modeller üzerinde yapılan Tepki Spektrum analiziyle elde edilen sonuçlarının nasıl gruplandığı ve elde edilen sonuçlara regresyon analizi uygulanarak uygun eğrinin elde edilip formüllerin oluşturulduğu anlatılmaktadır. Elde edilen formüllerin EXCEL programında tasarlanan yazılım yardımıyla sunumundan bahsedilmektedir.

Üçüncü bölümde, tez çalışmasından elde edilen sonuçlara ve yapılan önerilere yer verilmektedir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

1.4. Yapısal Ölçeklendirme

1.4.1. Ölçeklendirmenin Amacı ve Kullanım Alanları

Ölçeklendirme, üzerinde çalışma yapmayı kolaylaştırmak amacıyla büyük olan eleman veya sistemleri belirli oranda küçülterek, küçük eleman veya sistemleri ise belirli oranda büyüterek gerçekleştirilen ve her alanda kullanılabilen bir yöntemdir. Birçok alanda kullanılan ölçeklendirme konusu, temelde aynı amaca hizmet etmekte olup, yapılan birçok çalışmadan da görüldüğü gibi temel amaç test edilmesi zor ve zaman alan sistemleri daha küçük ve basit hale getirerek çalışmalarını kolaylaştırmaktır (Zhou vd., 2000; Kittirungsri, 2008; Datin ve Prevatt, 2013; Hafeez ve Almaskari, 2015; Shehadeh vd., 2015). İnşaat Mühendisliğine ait çalışma alanları çok katlı binalar, barajlar, havaalanları vb. gibi büyük sistemleri kapsamaktadır. Bu şekilde büyük olan gerçek sistemleri (prototip) incelemek ve test etmek oldukça pahalı, zaman alıcı ve kontrolü zor bir işlem sürecidir. Bu nedenle, prototipi ölçeklendirerek oluşturulan küçük modeller üzerinde istenilen çalışmayı yapmak çok kolay ve kullanışlı olmaktadır. Prototip ve model arasındaki benzerlik sayesinde de, küçük modelden elde edilen sonuçlar yorumlanabilecek olup, bu şekilde prototipin davranışı da tahmin edilebilecektir.

Ölçeklendirme genel anlamda; geometrik ölçeklendirme, mekanik ölçeklendirme, dinamik ölçeklendirme, ivmenin ölçeklenmesi, zamanın ölçeklenmesi, elektriksel

parametrelerin ölçeklendirilmesi vb. gibi çok sayıda çeşitlenebilse de, temel anlamda iki tip ölçeklendirme söz konusudur;

- Eleman veya sistemin fiziksel boyutunun ölçeklendirilmesi
- Eleman veya sistemin iç davranışının ölçeklendirilmesi

1.4.2. Sistemler Arası Benzerlik

Benzerlik analizinin amacı, büyük ve pahalı bir sistemin tasarım bilgilerini küçük ve ucuz bir model üzerinde yapılan deneylerden elde edilen bilgilerle ilişki kurarak elde etmektir. İlişkinin belirlenmesinde kullanılan bazı orantı kanunları vardır. Örneğin; bir uçağın hareket edip uçması için gerekli motor gücü yapılan testler sayesinde belirlenebilmektedir. Maliyetin azalması ve testlerde kolaylık sağlanması amacıyla orantı kanunlarının kullanılması ile uçağın küçük bir modeli elde edilebilmektedir. Bu modelin bir hava kanalında test edilmesiyle belirli hızlarda karşılaşılan direnç kuvvetleri ölçülerek bu ölçüm sonuçlarının gerçek uçak koşullarına uygulanması sağlanabilmektedir. Test aşamasında uygun ortamın oluşturularak deneyin düzgün şekilde yapılması elde edilecek sonuçların doğruluğunu büyük oranda etkilemektedir (URL-2).

Özetle sistemlerin benzerlik koşulları, ilgili sistem parametrelerinin aynı olmasını gerektirir ve bu sistemler özel eşitliklerin oluşturulmasıyla kontrol edilmektedir. Böylece bir sistem için yazılan değişkenlerin eşitlik veya ilişkileri tüm sistemler için geçerli olmaktadır. Bir modelde ki her bir değişken, prototipteki ilgili değişkenle orantılıdır.

1.4.2.1. Boyut Analizi

Problemlerin çözümü, analitik ve deneysel çalışmalar sonucu elde edilmektedir. Öncelikle problemin çözümünü elde etmek için matematiksel model ile yaklaşılmaktadır. Sonra ki aşamada analitik olarak elde edilen sonuçların kontrol edilmesi için deneysel ölçümler gerçekleştirilmektedir. Sonuçların kıyaslanması ve doğruluğunun teyit edilmesi için önemli bir adım olan deneysel çalışmalarda, uygun deneysel verilerin analizlerinin yapıp dikkatlice incelenmesi gerekmektedir. Eğer deneysel çalışmalar koşullara uygun tasarlanmaz ise genellikle maliyeti fazla, performansı zayıf ve kalitesi düşük sonuçlara

sebeptir. Diğer taraftan laboratuvarlarda ki deneysel çalışmalar gerekli koşulları sağlasa bile hem çok zaman alıcı hem de pahalı olmaları nedeniyle her sistem ve durum için tercih edilmemektedirler. Deneysel çalışmaların esas amacı; en az deneyle, en fazla bilgiyi elde edebilmektir. Bu amaca ulaşmakta önemli bir araç olarak boyut analizi kullanılmaktadır. Boyut analizi; bir fiziksel olayı etkileyen deneysel değişkenlerin sayısını ve karmaşıklığını azaltmayı amaçlayan bir yöntemdir. n adet boyutlu değişkene dayanan bir olay boyut analizi ile k ($k < n$) adet boyutsuz değişkene indirgenebilmektedir. (URL-2)

Herhangi bir fiziksel durumda, boyut ve birim birlikte kullanılabilir. Tanım olarak boyut, ölçülebilir fiziksel büyüklüğü, birim ise bu fiziksel büyüklüğün şiddetini ifade etmektedir. Boyut analizinde sadece boyutların dikkate alınmasının sebebi, boyut analizinde fiziksel büyüklüğün niceliğinden çok niteliğinin önemli olmasıdır. Her bir fiziksel büyüklüğün boyutu ise temel büyüklüklerin boyutu ve sembolü ile ifade edilmektedir (Tablo 1.1). Böylece tüm boyutlar ortak bir paydada toplanarak aynı işleme tabi tutulabilmesi sağlanmaktadır.

Deneysel çalışmalardan elde edilen ampirik formüller ve diyagramların genelleştirilmesi, aynı sistemi kullanan fakat farklı boyutlarla çalışan uygulamalar açısından oldukça önemlidir. Boyut analizinin temel amaçlarından bir tanesi, bu genelleştirmeyi sağlayacak deneysel çalışmaların oluşmasını sağlamaktır. Deneysel bir çalışmada, bir probleme etki eden çok sayıda parametre arasındaki ilişkiyi tanımlayan boyutsuz büyüklükler bulunabilmektedir. Bu amaçla boyut analizi, sonuçların daha az sayıda parametre ile daha genel anlamda yorumlanmasına etki eden etkili bir yöntem olup, çalışma kolaylığı da sağlamaktadır.

En genel ifadeyle, model ve prototip arasında ilişki kurmak için başlıca iki yol bulunmaktadır. Benzerlik koşulları, sistemin matematik modeli bulunuyorsa ilgili alan denklemlerinden, eğer sistem yeni bir olguysa ve sisteme ait matematik model geçerli değilse boyut analizi yoluyla oluşturulmaktadır. Boyut analizinde sistemin davranışını etkileyen parametre ve değişkenlerin tümü bilinmek zorundadır. Boyut analizi kullanılarak, sistemin özel denklemlerinin tamamlanmamış şekli formüle edilebilir. Bu denklem sistem parametrelerinin ve değişkenlerinin boyutsuz ürünüdür. Böylece oluşturulan denklem temelinde benzerlik koşulları oluşturulabilir.

1.4.2.2. Buckingham II Teoremi

Boyut analiziyle denklem oluşturmak amacıyla kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden en yaygın olarak kullanılanı ise Buckingham II Teorem'idir. Bir sistemde fiziksel büyüklük (hız, yoğunluk, vb.) sayısı n , bu fiziksel büyüklükleri oluşturan temel boyut (M, L, T) sayısı r ise, sistemi tanımlayan $k = n - r$ tane boyutsuz sayı (Π grubu) bulunmaktadır. Diğer bir ifadeyle, bir sistemi oluşturan fiziksel büyüklükler (Ramu vd. 2010);

$$f = (A_1, A_2, A_3, \dots, A_i, \dots, A_n) = 0 \quad (1.1)$$

denklemini ile ifade edilerek, bu değişkenler arasındaki ilişkiyi gösteren Π grupları,

$$F = \Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_i, \dots, \Pi_{n-r} = 0 \quad (1.2)$$

şeklinde olmaktadır. Her bir Π grubu, fiziksel problemi direkt etkileyen r tane tekrarlanan değişken ve en az bir farklı değişkenin fonksiyonu olacak şekilde belirlenmektedir. Buckingham II teoremine uygun olarak, tüm Π gruplarında tekrarlanacak r tane değişkenin seçiminde aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir:

- Tekrarlanacak değişkenler boyutlu olmalıdır
- Tekrarlanacak değişkenler, deneylerde ölçülebilir büyüklükler olmalıdır
- Tekrarlanacak değişkenlerden birinin boyutu, diğer tekrarlanacak değişkenlerin boyutunun birleşimi olmamalıdır. Örneğin; $r_1 = L$, $r_2 = T^{-1}$ ise $r_3 = LT^{-1}$ olamaz.
- Temel boyutların her biri (M, L, T), tekrarlanacak değişkenlerin en az birinde bulunmalı. Örneğin; $r_1 = L^3T^{-1}$, $r_2 = LT^{-1}$ ve $r_3 = L$ olamaz. Çünkü tekrarlanacak parametrelerin hiçbirinde M bulunmamaktadır.

Buckingham II teoremine göre;

- Temel büyüklük: Hareket kanunundaki büyüklükler (uzunluk, zaman, kuvvet)
- Temel boyut: Temel büyüklüklere ait boyutlar

Buckingham II teoreminde, büyüklüklerin boyutları ya “F, L, T” boyut sistemi (kuvvet, uzunluk, zaman) ya da “M, L, T” boyut sistemine (kütle, uzunluk, zaman) göre elde edilmektedir. Tablo 1.1’de bazı büyüklüklerin bu sistemlere göre karşılığı gösterilmektedir. Bu temel boyutlar arasında, “M, L, T” nin kullanımı daha yaygın olup, $r=3$ değeri kullanılmaktadır.

Tablo 1.1. Bazı büyüklüklerin FLT ve MLT sistemlerine göre karşılığı

	FLT sistem	MLT sistem
İvme	LT^{-2}	LT^{-2}
Açı	$F^0L^0T^0$	$M^0L^0T^0$
Açısal İvme	T^{-2}	T^{-2}
Açısal Hız	T^{-1}	T^{-1}
Alan	L^2	L^2
Yoğunluk	$FL^{-4}T^2$	ML^{-3}
Enerji	FL	ML^2T^{-2}
Kuvvet	F	MLT^{-2}
Frekans	T^{-1}	T^{-1}
Isı	FL	ML^2T^{-2}
Uzunluk	L	L
Kütle	$FL^{-1}T^2$	M
Elastisite Modülü	FL^{-2}	$ML^{-1}T^{-2}$
Kuvvet Momenti	FL	ML^2T^{-2}
Atalet Momenti (alan)	L^4	L^4
Atalet Momenti (kütle)	FLT^2	ML^2
Momentum	FT	MLT^{-1}
Güç	FLT^{-1}	ML^2T^{-3}
Basınç	FL^{-2}	$ML^{-1}T^{-2}$
Özgül ısı	$L^2T^{-2}\Theta^{-1}$	$L^2T^{-2}\Theta^{-1}$
Özgül ağırlık	FL^{-3}	$ML^{-2}T^{-2}$
Şekildeğiştirme	$F^0L^0T^0$	$M^0L^0T^0$
Gerilme	FL^{-2}	$ML^{-1}T^{-2}$
Yüzey Gerilmesi	FL^{-1}	MT^{-2}
Sıcaklık	Θ	Θ
Zaman	T	T
Burulma	FL	ML^2T^{-2}
Hız	LT^{-1}	LT^{-1}
Viskozite (dinamik)	$FL^{-2}T$	$ML^{-1}T^{-1}$
Viskozite (kinematik)	L^2T^{-1}	L^2T^{-1}
Hacim	L^3	L^3
Rijitlik	FL^{-1}	MT^{-2}
İş	FL	ML^2T^{-2}

Boyut analizi ile elde edilen ilişkiler, alanında uzman kişilerin konu hakkında ki bilgisi ve yorumlama becerisine bağlı olarak doğru ya da yanlış olarak elde edilebilmektedir. Analizde önemli adım olan, boyutsuz Π gruplarının belirlerken parametrelerin seçiminde dikkat edilmesi gereken bazı durumlar bulunmaktadır. Fiziksel probleme etki etmeyen gereksiz parametrelerin seçilmesi fazladan Π grubu oluşmasına sebep olabilmektedir. Diğer taraftan fiziksel problem için önemli bir parametrenin analize dahil edilmemesiyle de önemli bir Π grubu eksik olacak ve sonuçları etkileyebilecektir. Bu nedenle, fiziksel problem üzerinde etkili olan parametrelerin seçiminin dikkatle yapılması büyük önem taşımaktadır.

1.5. Sistemlerin Dinamik Karakteristikleri ve Yapısal Davranışları

Herhangi bir mühendislik yapısının veya taşıyıcı sistem elemanının, kendi ağırlığı ile statik ve dinamik yükler altında göstereceği davranış eleman tipine bağlı olarak başlıca dinamik karakteristikler, yerdeğiştirmeler, kesit tesirleri, gerilme ve şekildeğiştirmeler cinsinden ifade edilebilmektedir.

1.5.1. Dinamik Karakteristikler

Mühendislik yapıları ve taşıyıcı sistem elemanları, çevresel sesler ve etkilerden kaynaklanan hissedemediğimiz seviyede sürekli bir titreşim halindedirler. Yapıya özgü bu titreşimler, deprem anında hissedilebilir şekilde kendini göstermektedir. Yapıların deprem gibi dinamik kuvvetler altında göstereceği salınım hareketini temsil eden dinamik karakteristikleri (doğal frekans, mod şekli, sönüm oranı) elde edebileceğimiz analiz türüne Modal Analiz denilmektedir. Sonlu eleman modelleme işlemi tamamlanan herhangi bir mühendislik yapısının ilk olarak modal analizi yapılmalı, ilgili yapının göstereceği davranış belirlenmeli, gösterdiği hareketin bütün yapılar için uygun bir davranış olup olmadığı değerlendirilmeli ve gerekli görülmesi durumunda da tasarımda yeniden düzenlemeler yapılmalıdır.

Mod şekli, yapının titreşim altında göstermiş olduğu salınım hareketini ifade etmekte olup, bu hareketin süresini ise periyot veya frekans değerleri göstermektedir. Özellikle, mod şekli ilgili yapının amacına uygun bir şekilde tasarlanıp tasarlanmamış olmasının

açıkça bir göstergesidir. Örneğin, bina türü yapılar için istenmeyen bir hareket şekli olan burulma modu bu tür yapılarda ilk iki frekans için elde ediliyorsa yapılan tasarımın değişmesi zorunluluk arz etmektedir.

Yapının rijitliği ve kütesine bağlı olarak hesaplanan açısal frekans değeri;

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.3)$$

eşitliğiyle ifade edilmektedir. Burada, k yapıya ait rijitliği, m ise kütle göstermektedir. Farklı taşıyıcı sistem elemanları için hesaplanan ve yapının atalet momentiyle orantılı olan rijitlik ifadeleri Tablo 1.2’de, bazı kesitlerin ağırlık merkezine göre atalet momentleri ise Tablo 1.3’te sunulmaktadır.

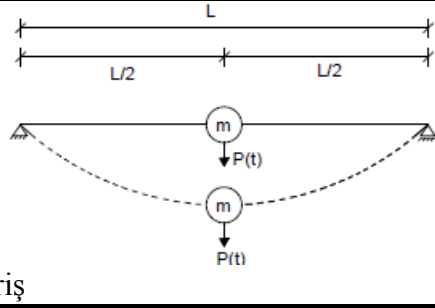
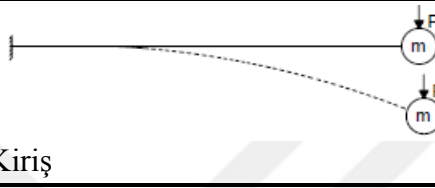
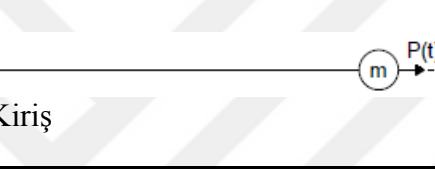
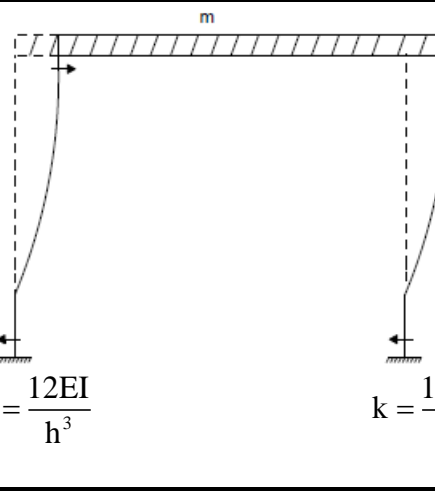
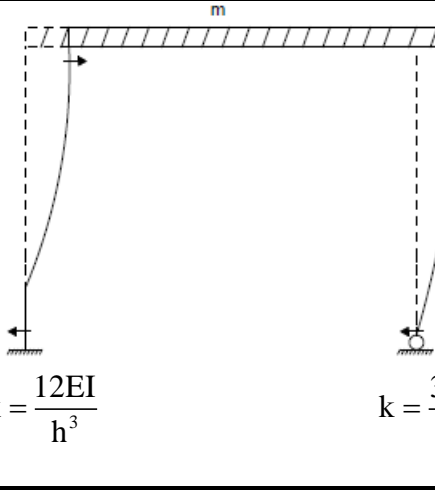
$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (1.4)$$

eşitliğiyle ifade edilmektedir. Yapının frekans değeriyle ters orantılı olan periyot değeri, yapının bir tam salınım yapması için geçen süre olarak ifade edilmekte olup,

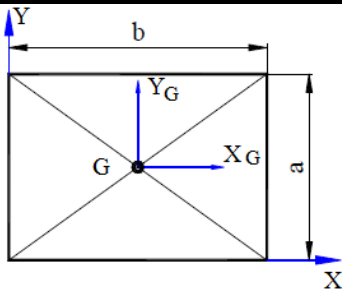
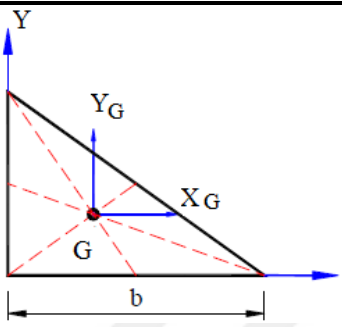
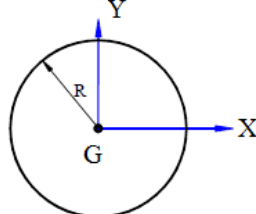
$$T = \frac{1}{f} \quad (1.5)$$

eşitliğiyle elde edilmektedir. Elde edilen denklemlerden de görüldüğü üzere, periyodun elde edilmesinde önemli bir parametre olan rijitlik doğrudan periyot değerinin değişmesine neden olmaktadır. Yapının periyodu ile yapının konumlanacağı zeminin karakteristik özelliği olan zemin hakim periyodu karşılaştırılarak bu iki değer birbirinden uzak tutulmalıdır. Zemin hakim periyodu fazla ise yapının periyodu düşük, zemin hakim periyodu düşük ise yapının periyodu fazla seçilerek yapının rezonansa girmesi engellenmelidir.

Tablo 1.2. Bazı taşıyıcı sistemlere ait rijitlik ifadeleri

Taşıyıcı Sistem	Rijitlik (k)
 <p>Basit Kiriş</p>	$k = \frac{48EI}{L^3}$
 <p>Konsol Kiriş</p>	$k = \frac{3EI}{L^3}$
 <p>Konsol Kiriş</p>	$k = \frac{EA}{L}$
 <p>Çerçeve</p>	$k_T = \frac{24EI}{h^3}$
 <p>Çerçeve</p>	$k_T = \frac{15EI}{h^3}$
<p>Burada, I atalet momenti, EI eğilme rijitliğini göstermektedir.</p>	

Tablo 1.3. Bazı kesitlere ait atalet momenti ifadeleri

Kesitler	Atalet momenti	
	X eksenine göre	Y eksenine göre
	$I_{X_G} = \frac{ba^3}{12}$	$I_{Y_G} = \frac{ab^3}{12}$
	$I_{X_G} = \frac{ba^3}{36}$	$I_{Y_G} = \frac{ab^3}{36}$
	$I_{X_G} = I_{Y_G} = \frac{\pi R^4}{4}$	

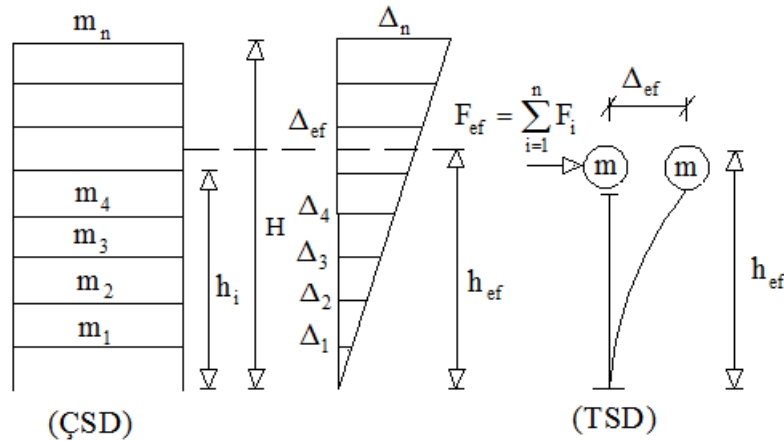
Titreşim etkisiyle hareket halindeki bir sistemde, potansiyel enerji ile kinetik enerji arasında denge mevcuttur. Sistemde bulunan iç ve dış sürtünme kuvvetleri, sisteme etki ederek, titreşimin neden olduğu yerdeğişimleri zamanla azaltıp titreşimi sona erdirmekte ve hareketi durdurmaktadır. Tüm bu etki, sistem sönümünün enerjisi yutması olarak ifade edilen, mevcut enerjiyi başka enerjiye çevirmesiyle sağlanmaktadır. Titreşim denklemlerinde sönüm, sönüm kuvveti olarak isimlendirilip bu kuvvetler iki şekilde ifade edilmektedir;

- Coulomb sönümü
- Viskoz sönüm

Yapılarda sönüm genellikle Viskoz sönüm şeklinde olup, sönüm kuvveti titreşimin hızı ile doğru orantılıdır.

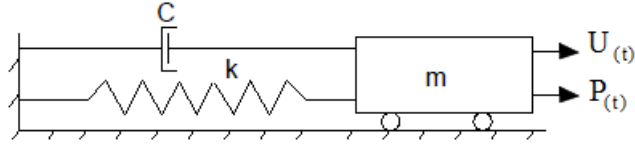
1.5.2. Yerdeğiştirmeler

Yapısal çözümler, eleman iç kuvvetlerinin yanı sıra yapı sistemlerinin çeşitli etkiler nedeniyle yaptığı yerdeğiştirmelerin hesabını da içermektedir. Yerdeğiştirmeler; dış yükler, ısı farklılıkları, imalat hataları ve oturmalar nedeniyle oluşabilmektedir. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007 (DBYBHY-2007)'de yer verilen ve önemli bir konu olan yerdeğiştirmelerin hesabı, yapısal ve yapısal olmayan yapı elemanlarının hasar görmemesi için oldukça önemlidir. Herhangi bir taşıyıcı sistemde kütle yayılı olarak bulunduğu için atalet momentleri ancak her noktanın ivmesinin dolayısıyla yerdeğiştirmesinin bilinmesiyle belirlenebilmektedir. Sistemdeki her noktanın yerdeğiştirmesinin hesabı çok büyük işlem hacmi gerektirmektedir. İşlemleri kolaylaştırmak ve hesap hacmini azaltmak için sistemin bütün yerdeğiştirmesini bazı seçilmiş noktaların yerdeğiştirmesi ile ifade etmek gerekmektedir. Diğer bir ifadeyle sistem çözümlerinde, sistemin kütlesi seçilen noktalarda toplanmış kabul edilmektedir. Bu idealleştirme yöntemine toplu kütle yaklaşımı adı verilmektedir. İdealleştirilmiş sistem, etkiyen kuvvetle sadece bir doğrultuda hareket etmektedir. Bu nedenle, bu yapılar tek serbestlik dereceli sistem olarak kabul edilmektedir. Şekil 1.1.'de belirtilen çok serbestlik dereceli (ÇSD) sistemlerin, tek serbestlik dereceli (TSD) sistemlere dönüştürülmesi şematik olarak gösterilmektedir.



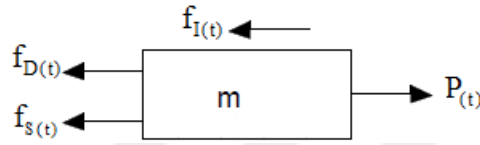
Şekil 1.1. Çok serbestlik dereceli sistemin (ÇSD), tek serbestlik dereceli sisteme (TSD) dönüştürülmesi

TSD sistemlerin çözümünü kolaylaştıran bu yöntemle Şekil 1.2.'de verilen TSD sistemin analitik modeli gösterilmektedir.



Şekil 1.2. TSD sistemin analitik modeli

TSD sistemlerin analitik modelinden elde edilen serbest cisim diyagramı Şekil 1.3'te gösterilmektedir.



Şekil 1.3. TSD sisteme ait serbest cisim diyagramı

Dinamik yüklere maruz bir sistemde, dinamik yerdeğişimleri tanımlayan matematik ifadelerle sistemin hareket denklemleri adı verilmektedir. Bu hareket denklemleri aynı zamanda sistemin matematik modelini oluşturmaktadır.

$P_{(t)}$; dinamik yük olmak üzere;

$$f_{I(t)}; f_{I(t)} = m \frac{d^2 u_{(t)}}{d_t^2} = m \ddot{u}_{(t)} \quad (1.6)$$

$$f_{D(t)}; f_{D(t)} = c \frac{du_{(t)}}{d_t} = c \dot{u}_{(t)} \quad (1.7)$$

$$f_{S(t)}; f_{S(t)} = k u_{(t)} \quad (1.8)$$

Burada; $u_{(t)}$, $\dot{u}_{(t)}$, $\ddot{u}_{(t)}$ sırasıyla, yerdeğişirme, hız ve ivmeyi göstermektedir. m , c , k ise sırasıyla kütle, sönüm kuvveti ve rijitliği göstermektedir.

Sisteme ait matematik model üç farklı yolla çözülebilmektedir.

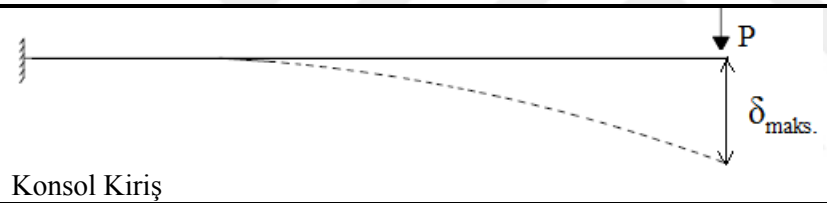
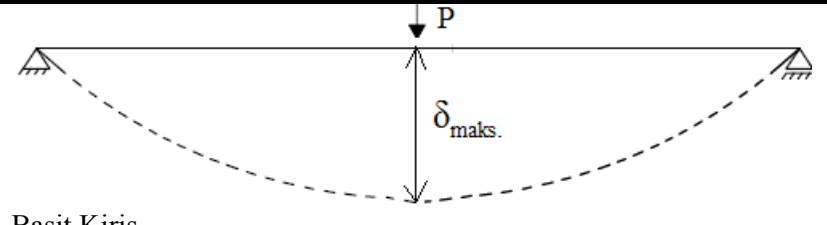
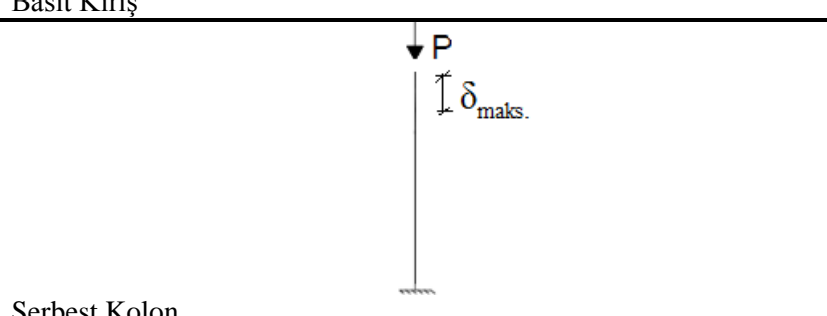
- 1) d'Alambert prensibi
- 2) Virtüel iş prensibi
- 3) Hamilton Prensibi

d'Alembert prensibine göre matematik model;

$$\left. \begin{aligned} \sum F = 0 \quad & P_{(t)} - f_{I(t)} - f_{D(t)} - f_{s(t)} = 0 \\ & f_{I(t)} + f_{D(t)} + f_{s(t)} = P_{(t)} \\ & m\ddot{u}_{(t)} + c\dot{u}_{(t)} + ku_{(t)} = P_{(t)} \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

Şeklinde ifade edilmektedir. TSD sistemden elde edilen serbest cisim diyagramında yazılan denge denklemi ile Denklem (1.9)'da gösterilmekte olan TSD sistemin matematik modeli oluşturulmaktadır. $P_{(t)} = 0$ olması durumunda serbest titreşim hareketi söz konusu olmaktadır. (1.9) denkleminde her bir terim kuvveti ifade etmektedir. Bazı taşıyıcı sistemlerin yerdeğiştirme bağıntıları aşağıda verilmektedir.

Tablo 1.4. Bazı taşıyıcı sistemlere ait yerdeğiştirme ifadeleri

Taşıyıcı Sistemler	Yerdeğiştirme
 <p>Konsol Kiriş</p>	$\delta = \frac{PL^3}{3EI}$
 <p>Basit Kiriş</p>	$\delta = \frac{PL^3}{48EI}$
 <p>Serbest Kolon</p>	$\delta = \frac{PL}{2EA}$

Diğer bir yaklaşımda ise sistemdeki yerdeğiştirmeler uygun fonksiyonların süperpozisyonu olarak kabul edilmektedir. Bu fonksiyonlar, koordinat fonksiyonları olarak isimlendirildiği için ilgili hesap yöntemine de genelleştirilmiş koordinat yaklaşımı denilmektedir.

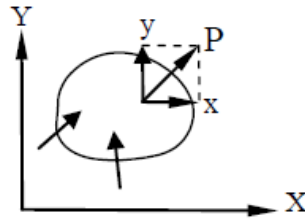
1.5.3. Kesit Tesirleri

Sistemler, üzerlerine etkiyen dış kuvvetler altında dengededir. Fizik kurallarından faydalanılarak yapılan çözümlerde, sistemlerin denge şartları göz önüne alınmaktadır. Sistemler, düzlem ve/veya uzay sistemler olarak ayrıldıklarında denge şartları farklılık göstermektedir.

Düzlem sistemlerde (Şekil 1.4);

- Kuvvetlerin x-ekseni üzerindeki izdüşümlerinin toplamı sıfır $\sum X = 0$
- Kuvvetlerin y-ekseni üzerindeki izdüşümlerinin toplamı sıfır $\sum Y = 0$
- Kuvvetlerin düzlem içindeki herhangi bir noktaya göre statik momentlerinin toplamı sıfır $\sum M = 0$

olmak üzere üç farklı denge şartı bulunmaktadır.

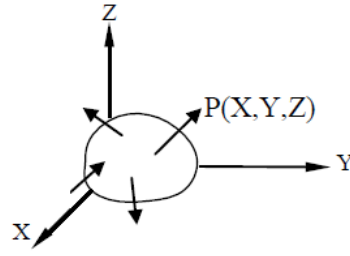


Şekil 1.4. Düzlem sistem

Uzay sistemlerde (Şekil 1.5);

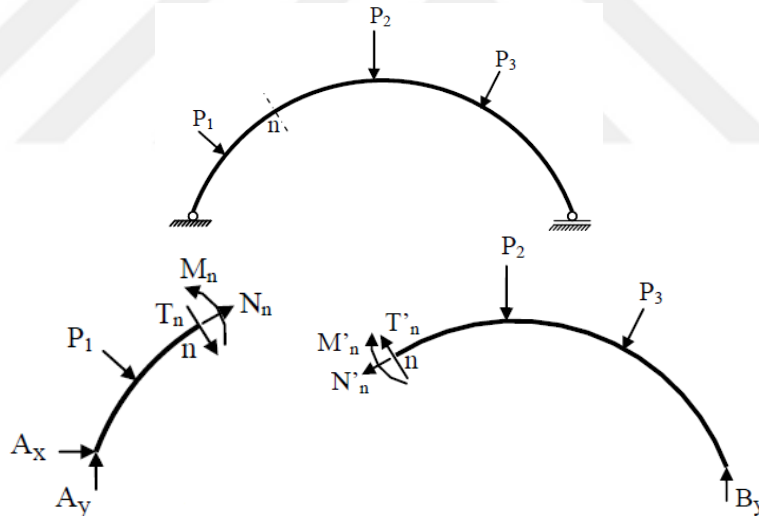
- Sisteme etkiyen kuvvetlerin X, Y, Z eksenleri üzerindeki izdüşümlerinin toplamı sıfır $\sum X = 0, \sum Y = 0, \sum M = 0$
- Kuvvetlerin uzayda seçilen bir noktaya göre statik momentlerinin X, Y, Z eksenleri üzerindeki izdüşümlerinin toplamı sıfır $\sum M_{A_x} = 0, \sum M_{A_y} = 0, \sum M_{A_z} = 0$

olmak üzere altı farklı denge şartı bulunmaktadır.



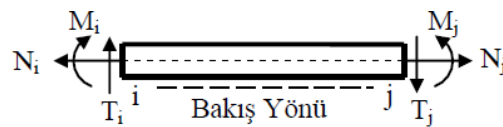
Şekil 1.5. Uzay sistem

Taşıyıcı sistemlerde, dış kuvvetlerden dolayı kesit içlerinde meydana gelen zorlanmalara kesit tesirleri (Şekil 1.6) adı verilmektedir. Normal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti olmak üzere üç tane kesit tesiri bulunmaktadır. Çubuk eksenine doğrultusundaki kesit tesirine Normal Kuvvet (N), çubuk eksenine dik doğrultudaki kesit tesirine Kesme Kuvveti (T), çubukta eğilme oluşturacak kesit tesirine ise Eğilme Momenti (M) denir.



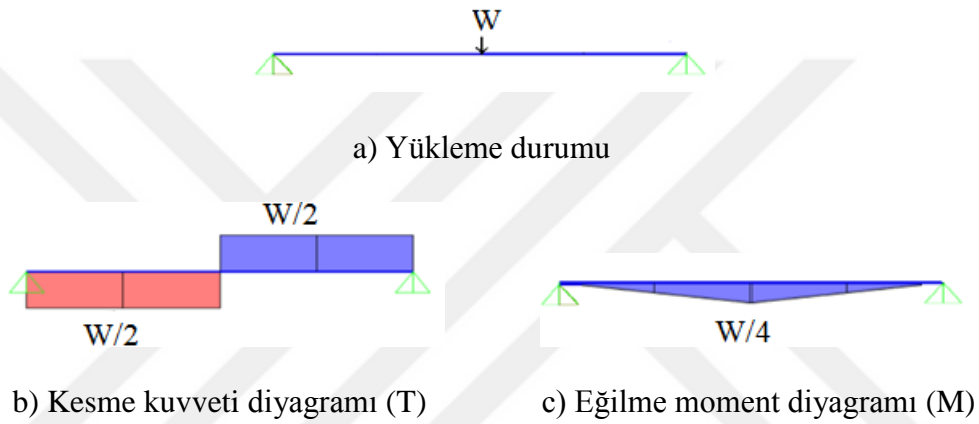
Şekil 1.6. Dış kuvvetler etkisiyle oluşan kesit tesirleri

Şekil 1.6'da, n noktasında yapılan kesimde dış kuvvetleri dengede tutacak şekilde oluşan kesit tesirlerine ait pozitif yön kabulü Şekil 1.7'de gösterilmektedir.



Şekil 1.7. Kesit tesirlerinde kabul edilen pozitif yönler

Tekil kuvvet altında taşıyıcı sistem elemanı olan basit kirişe ait kesit tesiri diyagramları Şekil 1.8’te örnek olarak gösterilmektedir. Kirişin yayılı haldeki kütlesi ihmal edilmiş, bu ağırlığın tekil kuvvet olarak etkittirilmesi ile birlikte oluşan yükleme sonucu kesme kuvveti ve eğilme momenti diyagramları şematik olarak gösterilmektedir. Kesme kuvveti yalnızca uygulanan yüke bağlı iken, eğilme momentinin ise yük ve kiriş açıklığına bağlı olduğu görülmektedir. Farklı yüklemeler altında veya farklı taşıyıcı sistemlerde diyagram şekilleri ve formül katsayıları değişse dahi temel prensip her zaman aynı kalmaktadır.



Şekil 1.8. Basit kirişe ait kesit tesiri diyagramları

1.5.4. Gerilme ve Şekildeğiştirmeler

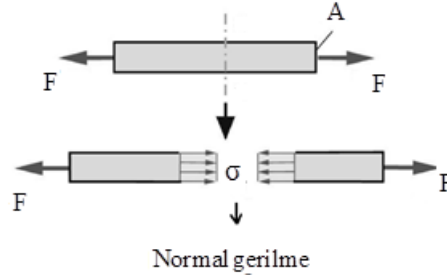
Dış kuvvetlerin ve/veya momentlerin etkisindeki bir elemanın herhangi bir kesitinde tepki olarak iç kuvvetler oluşmaktadır. Elemanın kesitinde birim alana isabet eden ve hesap yoluyla belirlenen iç kuvvetlere gerilme adı verilmektedir. Gerilmeler temel olarak ikiye ayrılmaktadır:

- 1) Yüzeye dik normal gerilmeler (Şekil 1.9-1.10)
- 2) Yüzeye paralel teğetsel (kayma) gerilmeler (Şekil 1.10)

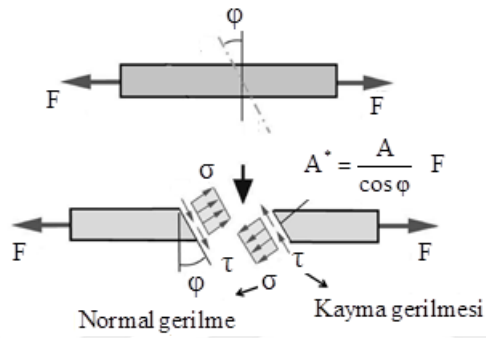
Gerilme birim alana etkiyen kuvvet olarak tarif edilir ve σ ile gösterilir.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1.10)$$

Burada, F kuvvet, A ise kuvvetin etki ettiği alanı göstermektedir.



Şekil 1.9. Eksenel kuvvet altında oluşan normal gerilme (URL-3)



Şekil 1.10. Eksenel kuvvet altında oluşan normal ve kayma gerilmeleri (URL-3)

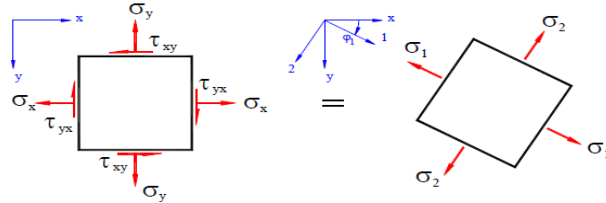
Sistem elemanlarındaki normal ve kayma gerilmeleri, bu elemanların değişik şekillerde zorlanmasından dolayı meydana gelmektedir. Bu zorlanmalar sırası ile

- a) Çekme ve/veya basınç
- b) Kesme
- c) Eğilme
- d) Burulma

şeklinde olabilmektedir.

Herhangi bir elemandan küçük bir parça alındığı ve bu parçanın σ_x , σ_y , τ_{xy} tarafından etkilendiği kabul edilsin. Bu parça yavaşça döndürüldüğünde gelecek belirli bir ϕ_1 açısında, normal gerilmelerden (σ_x, σ_y) birinin en büyük, diğerinin ise en küçük

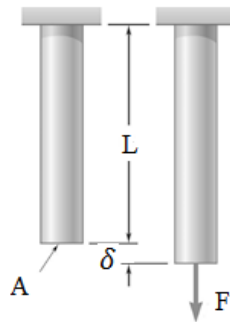
değere ulaştığı anda τ_{xy} 'nin kaybolduğu (Şekil 1.11) yani değerinin sıfır olduğu görülmektedir. Bir elemanda, kayma gerilmeleri sıfır olup yalnızca normal gerilmeler bulunuyor ise, bu gerilmelere asal normal gerilmeler (σ_1, σ_2) adı verilmektedir.



Şekil 1.11. Asal normal gerilmeler

Gerilme, tarif itibari ile hayali bir büyüklük olduğundan dolayı fiziksel olarak ölçülememektedir. Ancak sistemlerde uzama, dolayısı ile birim uzamayı ölçmek mümkündür. Bu nedenle gerilme ile uzama arasındaki ilişkiler bilinirse, uzamanın ölçülmesi ile söz konusu elemanda o yükleme durumu için gerilmeler hesaplanabilmektedir. Asal gerilmeler doğrultusundaki birim uzamalara asal birim uzama denilmektedir ve bu doğrultularda kayma gerilmesinden kaynaklanan şekil değişimi olmayacaktır.

Şekildeğiştirme-gerilme ilişkisi incelendiğinde, gerilme altındaki uzamanın ilk uzunluğa oranı birim uzama olarak adlandırılmaktadır. Şekil 1.12'de sisteme uygulanan kuvvet ile oluşan uzama gösterilmektedir.

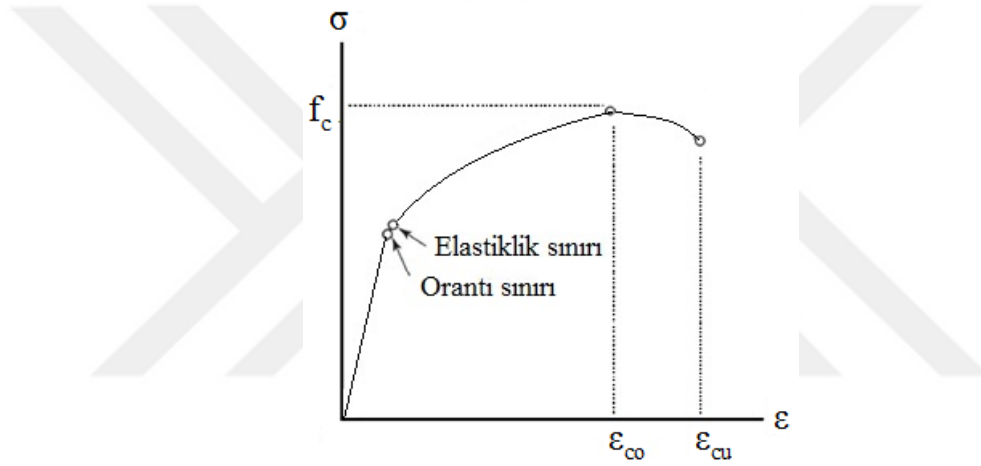


Şekil 1.12. Kuvvet altındaki elemanda uzama (URL-3)

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{\Delta L}{L} \quad (1.11)$$

Bir eksenli merkezi basınç etkisinde deneye tabi tutulan silindirik beton numunelerin, test sırasında hem kuvvet, hem de uzamanın sürekli olarak ölçülmesiyle gerilme ve birim uzama arasındaki ilişki elde edilmektedir. Orantı sınırı içinde, gerilme uzama ile orantılıdır. Orantı sabiti, Elastiklik modülü olarak adlandırılmaktadır (Hooke kanunu) ve Şekil 1.13'te verilmekte olan grafikte lineer kısmı ifade etmektedir. Homojen, izotrop ve lineer elastik cisimlerde gerilmeler ve şekildeğişiklikler genel Hook kanunlarına uygundur.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1.12)$$



Şekil 1.13. Betonun gerilme-şekildeğişiklik grafiği

Grafikte gösterilen $f_c, \varepsilon_{co}, \varepsilon_{cu}$ terimleri sırasıyla betonun dayanımını (basınç kuvveti), dayanıma karşılık gelen şekildeğişiklik ve ezilme şekildeğişikliklerini göstermektedir (Doğangün, 2012).

1.6. Dinamik Analiz

Yer hareketleri yapıyı temelden etkileyen, yapıda atalet kuvvetlerinin oluşmasına neden olan ani ve ivmeli titreşim hareketleridir. Deprem etkileri, ağırlık yüklerinden ileri gelen zorlanmalara bağlı olarak önemli mertebelere ulaşabilen oldukça karmaşık etkilere sahiptir.

1.6.1. Dinamik Analiz Yöntemleri

DBYBHY-2007’de deprem etkilerinin doğrusal elastik hesabı için üç farklı yöntem önerilmektedir. Bu yöntemler, yapı davranışının genellikle birinci titreşim moduna bağlı olduğu varsayımına dayanan Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi (yarı dinamik hesap-tek modlu çözüm), etkin modların hesaba katıldığı Mod Birleştirme Yöntemi (çok modlu çözüm) ve zamana bağlı değişen yerdeğiştirme, iç kuvvetler ve şekildeğiştirmeleri hesaplayan Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi’dir. Tasarımcı, yapıda mevcut olan düzensizliklere bağlı olarak uygun çözüm yöntemini belirleyebilmektedir.

1.6.2. Tepki Spektrum Analizi

Mod Birleştirme Yöntemi, yapıların deprem analizinde kullanılan ve Spektrum Analizi olarak da adlandırılan doğrusal dinamik bir hesap yöntemidir. Bu yöntemde, deprem etkisindeki yapı sistemlerinin dinamik hareket denklemi modal yerdeğiştirmeler cinsinden ifade edilmekte ve mod katkıları uygun bir istatistiksel yöntemle birleştirilerek gerçek yerdeğiştirmeler elde edilmektedir. Mod katkılarının birleştirilmesinde, Tam Karesel Birleştirme (SRSS) ve Karelerin Toplamının Karekökü (CQC) yöntemleri kullanılmaktadır (DBYBHY, 2007).

Spektral analiz ile elastik deprem yüklerinin hesaplanmasında kullanılan %5 sönüm oranı için tanımlanan elastik ivme spektrumunun ordinatı olan elastik spektral ivme $S_{ae}(T)$, yerel zemin sınıflarına göre tanımlı olan T_A ve T_B karakteristik periyotları için Denklem (1.13)’le hesaplanmaktadır

$$S_{ae}(T) = \begin{cases} A_0 I \left(1 + 1.5 \frac{T}{T_A} \right) g & , (0 \leq T \leq T_A) \\ A_0 I (2.5) g & , (T_A < T \leq T_B) \\ A_0 I \left[2.5 \left(\frac{T_B}{T} \right)^{0.8} \right] g & , (T_B \leq T) \end{cases} \quad (1.13)$$

Burada A_0 etkin yer ivmesi katsayısını, I bina önem katsayısını ve g yer çekimi ivmesini ifade etmektedir.

DBYBHY-2007’de zemin gruplarına göre sıralanan yerel zemin sınıflarının T_A ve T_B karakteristik periyotlarına göre değişim aralığı Tablo 1.5’te verilmektedir.

Tablo 1.5. Yerel zemin sınıflarına karşılık gelen karakteristik periyotlar

Yerel Zemin Sınıfı	T_A	T_B
Z1	0.10	0.30
Z2	0.15	0.40
Z3	0.15	0.60
Z4	0.20	0.90

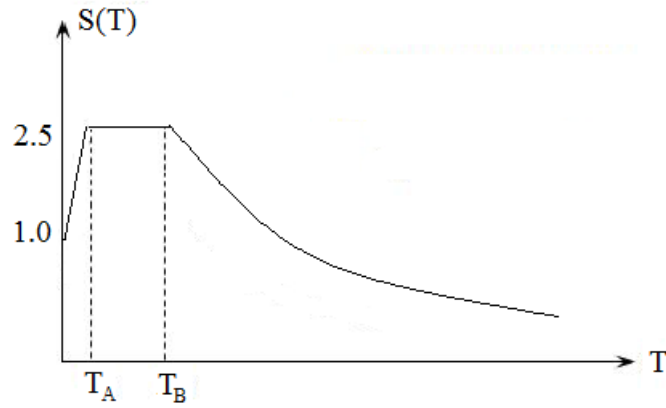
DBYBHY-2007’de yer alan etkin yer ivmesi katsayıları (A_0) Tablo 1.6’da verilmektedir.

Tablo 1.6. Etkin yer ivme katsayıları

Deprem Bölgesi	A_0
1	0.40
2	0.30
3	0.20
4	0.10

Seçilen parametrelere bağlı olarak elde edilen spektrum grafiğinde (Şekil 1.14), belirlenecek ivme spektrumu ordinatlarına karşılık gelen spektral ivme katsayıları denklem (1.13)’te bulunan değerden daha küçük olmayacaktır.

Depremde taşıyıcı sistemin kendine özgü doğrusal elastik olmayan davranışını göz önüne almak üzere, spektral ivme katsayısına göre bulunacak elastik deprem yükleri, Denklem (1.14)’te tanımlanan deprem yükü azaltma katsayısına bölünmektedir. Deprem yükü azaltma katsayısı, çeşitli taşıyıcı sistemler için DBYBHY-2007’de tanımlanan taşıyıcı sistem davranış katsayısı olan R ’ye ve doğal titreşim periyodu T ’ye bağlı olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 1.14. Tasarım Spektrumu

$$R_a(T) = \begin{cases} 1.5 + (R - 1.5) \frac{T}{T_A} & , (0 \leq T \leq T_A) \\ R & , (T_A < T) \end{cases} \quad (1.14)$$

Taşıyıcı sistem davranış katsayısı R'nin seçilmesi için, DBYBHY-2007'de taşıyıcı sistemler süneklik düzeyi yüksek ve süneklik düzeyi normal sistemler olmak üzere gruplandırılmıştır. Taşıyıcı sistemlere ait diğer tanım ve özelliklerin verildiği tablodan R değeri seçilmektedir.

DBYBHY-2007'ye göre yapılarda uygulanan mod birleştirme yöntemi ile analizde hesaba katılacak yeterli titreşim modu sayısı, göz önüne alınan deprem doğrultusunda her bir titreşim modu için hesaplanan etkin kütlelerin toplamı bina toplam kütlelerinin en az %90'ı olmalıdır.

1.7. İstatistik Yöntemler

1.7.1. İstatistik Yöntemlerin Kullanım Alanı ve Amacı

İstatistik; daha etkin kararlar vermek amacıyla sayıları derleme, özetleme, değerlendirme ve sayıların güven derecesini araştırma, deneysel çalışmalardan elde ettiği sonuçları genelleştirme yöntemlerini kapsayan bir bilim dalı ya da pek çok bilim dallarına yardımcı bir metotlar bütünüdür.

Bilimsel yasaların bulunmasında, kanıtlanmasında çoğu kez deney yöntemi kullanılmakta olsa da bazı konularda deney yapılması her zaman mümkün olamayabilir. Örneğin bir hastalığa belli bir mikrobun neden olduğu düşünüldüğünde, bu hastalığı taşıyan kişiden alınan mikrobun deney hayvanlarına aşılınmasıyla, bu hayvanlarda da aynı hastalık görülürse, söz konusu mikrobun o hastalığa neden olduğuna karar verilmektedir. Bu karara deneme yolu ile varılmaktadır. Ancak intihara sebep olan etken araştırılmak istense, deney yapmak mümkün değildir. Bütün bu hallerde istatistik yöntemler kullanılmaktadır (Tütek ve Gümüšoğlu, 2008).

İstatistik, teknik ve yöntemlerini kullanma amaçlarına göre iki gruba ayırabilmektedir.

- ❖ Tanımlayıcı (Betimleyici) İstatistik
- ❖ Öngörüleici (Tahminleyici) İstatistik

Tanımlayıcı istatistik, sayısal verileri sınıflama ve özetlemede kullanılan yordamlardır. Verileri tablo, grafik veya sayısal olarak anlamlı bir biçimde özetlemektedir. Yordama; istatistiksel teknikler kullanılarak ve bilinenlerden yararlanılarak, bilinmeyen durumlar hakkında yapılan geleceğe yönelik tahminlerde bulunma işlemidir. Eğitimsel anlamda yordama; genellikle bir testten alınan puanlara dayanılarak, bireylerin belli bir programdaki ya da işteki başarılarını önceden kestirme işlemidir. Öngörüleici istatistik, gözlemlenmiş durumlardan elde edilen verilerle, gözlemlenmemiş durumlar için sonuç çıkararak tahmin de bulunmaktadır (Tütek ve Gümüšoğlu, 2008).

1.7.2. Regresyon Analizi ve Türleri

Biyoloji, tıp, ekonomi, fizik, kimya, sosyal bilimler ve mühendislik bilimleri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmakta olan regresyon analizi, aralarında sebep-sonuç ilişkisi bulunan iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi inceleyen ve bu ilişkiyi modellemek için kullanılan istatistiksel bir analiz yöntemidir. Regresyon analiziyle, bilinen bulgulardan, bilinmeyen gelecekteki olaylarla ilgili tahminler yapılarak değişkenler arasındaki ilişkinin niteliğinin saptanması amaçlanmaktadır. Regresyon, bağımlı ve bağımsız değişken veya değişkenler arasındaki ilişkiyi ve doğrusal eğri kavramını

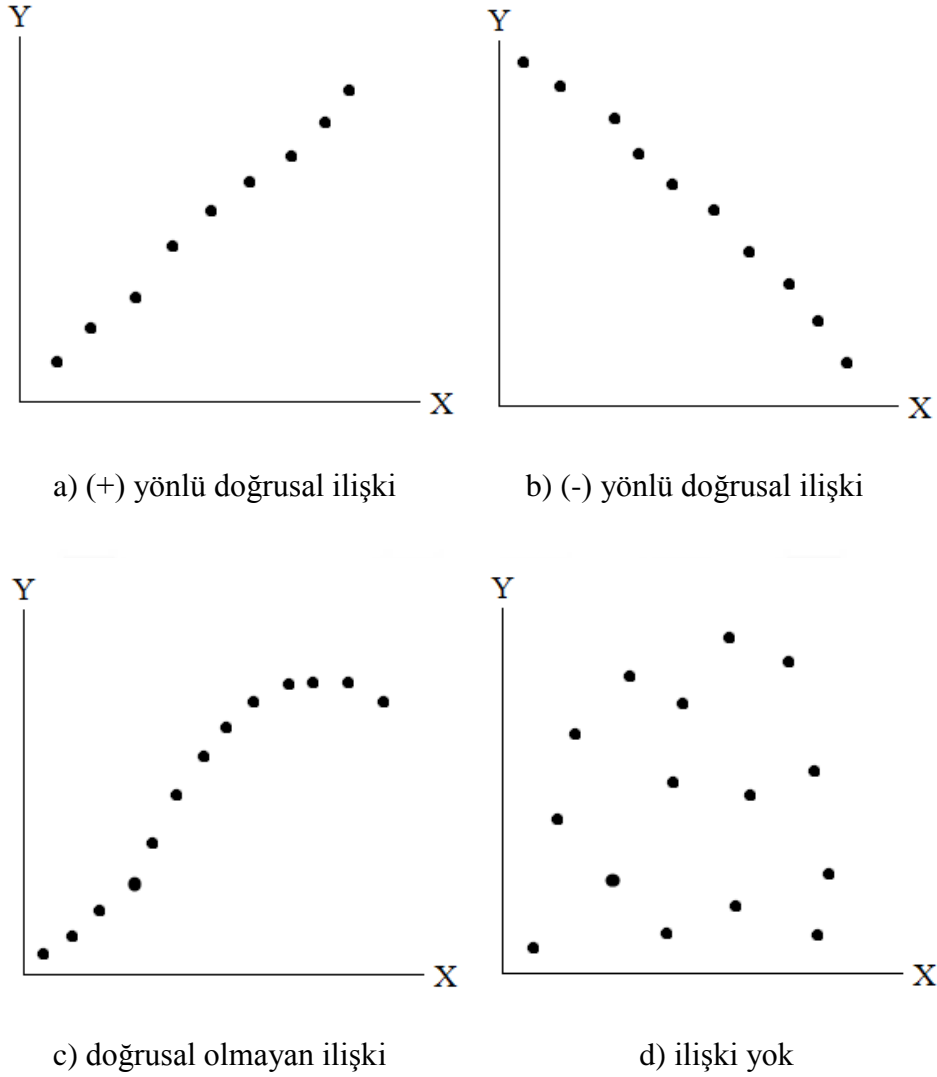
kullanılarak, bir tahmin eşitliği geliştirmektedir. Değişkenler arasındaki ilişki belirlendikten sonra, bağımsız değişken veya değişkenlerin değeri bilindiğinde bağımlı değişkenin değeri tahmin edilebilmektedir. Amaç, her bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkiyle toplam değişmeye olan katkısının belirlenmesi ve dolayısıyla bağımsız değişkenlerin doğrusal kombinasyonunun değerinden hareketle bağımlı değişken değerinin tahmin edilmesidir.

Bağımlı değişken, regresyon modelinde açıklanan ya da tahmin edilen değişkendir. Bu değişkenin bağımsız değişken ile ilişkili olduğu varsayılmaktadır. Bağımsız değişken ise, regresyon modelinde açıklayıcı değişken olup, bağımlı değişkenin değerini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bağımsız değişken olarak tek değişken kullanılıyorsa basit regresyon, iki veya daha fazla değişken kullanılıyorsa çoklu regresyon analizi olarak ifade edilmektedir.

Değişkenler arasında doğrusal ilişki olabileceği gibi, doğrusal olmayan bir ilişki de olabilmektedir. Bu nedenle, dağılım grafiği yapılmadan (ilişki yok, doğrusal ilişki var veya doğrusal olmayan ilişki var) ve değişkenler arasında korelasyon varlığına rastlanmadan regresyon analizine karar verilmemesi gerekmektedir. Şekil 1.15'te dağılım grafiklerine ait örnekler sunulmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda, tek-çok değişkenli doğrusal regresyon analizlerinin yanı sıra, tek-çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon analizleri de mevcuttur.

İki ya da daha çok değişken arasında ilişki olup olmadığını, ilişki varsa yönünü ve gücünü inceleyen istatistikî yöntem korelasyon analizi, değişkenlerden birisi belirli bir birim değiştiğinde diğerinin nasıl bir değişim gösterdiğini inceleyen yöntem ise regresyon analizi denilmektedir.

Regresyon analizinde araştırmacının asıl ilgilendiği kısım, yapılan tahminin ne kadar güçlü olduğu ve sonuçların gerçeği ne kadar temsil ettiği noktasıdır. Yani, ulaşılan regresyon modeli, Y'deki değişmelerin ne kadarını açıklamaktadır sorusuna yanıt aramaktadır. Regresyon analizinde, regresyonun sunduğu tahminin ne kadar güçlü olduğunu belirten istatistik, determinasyon katsayısı olarak adlandırılır. Regresyon analizinde determinasyon katsayısı olan R^2 , X' in Y'de açıkladığı değişme oranını gösterir. R^2 , 1 değerine yaklaştıkça yapılan tahminlerin doğruluğu artmaktadır yani oluşturulan denklem bağımsız değişkenleri kapsamaktadır. R^2 , 0 değerine yaklaştıkça oluşturulan denklemin değişkenleri kapsamadığı belirtilmektedir.



Şekil 1.15. Değişkenler arasındaki ilişkiyi gösteren dağılım grafikleri

Uygun olmayan regresyon yöntemlerinin kullanılmasıyla hatalı ve yanıltıcı sonuçlar elde edilebilmektedir. Regresyon analizinde incelenen değişkenler sürekli ya da kesikli yapıda olabilmektedir ve bu veri yapısına bağlı olarak farklı regresyon modelleri kullanılmaktadır. Regresyon yöntemleri; Doğrusal regresyon, Lojistik regresyon, Negatif binom regresyon, Poisson regresyon, Temel bileşenler regresyonu, Probit regresyon, Ridge regresyon, Cox regresyon yöntemi olmak üzere 8 gruba ayrılmaktadır. Probleme en uygun regresyon yönteminin belirlenip seçilmesi gerekmektedir (Arı ve Önder, 2013).

1.7.2.1. En Küçük Kareler (EKK) Yöntemi

Matematikçi C.F. Gauss'un 18 yaşındayken (1795) geliştirmiş olduğu en küçük kareler yöntemi, ilk kez 1801'de Cres asteroidinin yörüngesinin belirlenmesinde kullanılmıştır. İlk kez yayınlanması ise Gauss'un toplu eserlerinin yayınlandığı 1809 yılında olmuştur. Fransız matematikçi A. Legendre ve Amerikalı matematikçi R. Adrain de 1805 ve 1808 yıllarında da aynı yöntemi Gauss'dan bağımsız olarak keşfetmişlerdir.

En küçük kareler yöntemi; tıp, finans, mühendislik, ziraat, biyoloji ve sosyoloji gibi çeşitli bilim dallarında çeşitli değişkenler arasındaki ilişkiler belirlenirken kullanılan en önemli yöntemler arasındadır.

Belli ölçümler sonucunda elde edilen $i=1,2,3,\dots,n$ için (x_i, y_i) verilerinde, her bir y_i 'nin x_i 'ye bağlı olarak değiştiği varsayılmaktadır. (x_i, y_i) noktaları düzlem içinde bulunduğunu ele aldığımızda, pratikte bu noktalar herhangi bir düzgün eğri ya da bilinen bir fonksiyon grafiği üzerinde bulunmazlar. Bazı durumlarda ise, (x_i, y_i) 'ler arasındaki ilişkinin türü de bilinmeyebilir. Fakat yapılan ölçümlerde, her $i=1,2,3,\dots,n$ için $y_i = f_{(x_i)}$ olacak biçimde bir fonksiyonun varlığı bilinmekte ve alınan ölçümlerin hatalı olması nedeniyle bu eşitliklerin bazen sağlanamadığı kabul edilebilmektedir. Bu nedenle, ölçülen y_i değeri $f_{(x_i)}$ için yaklaşık değer kabul edilerek bu yaklaşımdaki hatanın minimum olduğu f fonksiyonu belirlenmeye çalışılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, f fonksiyonunun bir takım parametrelere bağlı olduğu kabul eldeki veriler yardımıyla bu parametreler belirlenmeye çalışılır. Örneğin, f fonksiyonu

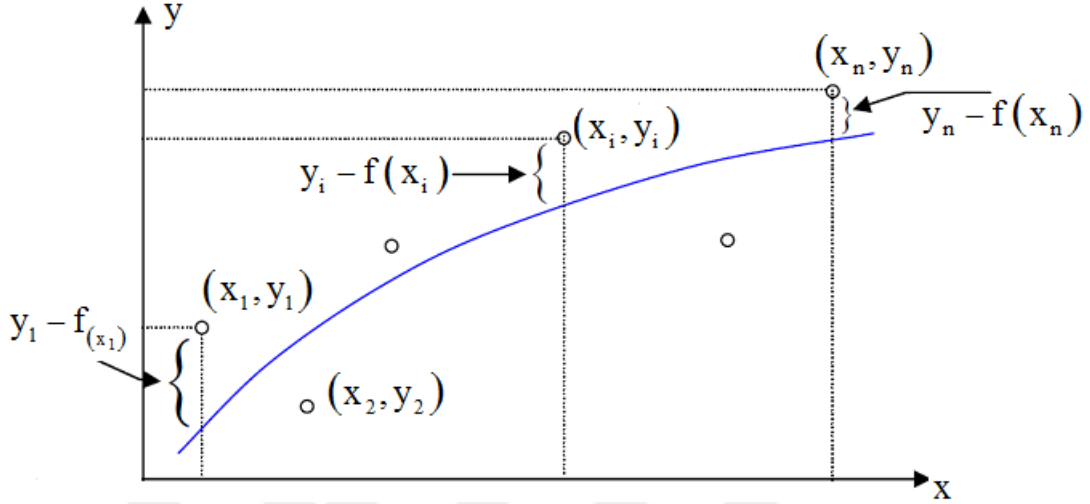
$$y = f(x) = mx + b \quad (1.15)$$

bir doğrusal fonksiyon veya

$$y = f(x) = ax^2 + bx + c \quad (1.16)$$

bir karesel fonksiyon olabilmektedir. Burada elde edilmesi gereken parametreler a, b, c ve m 'dir. y_i değeri $f_{(x_i)}$ için yaklaşık bir değer olarak ($f_{(x_i)} \cong y_i$) varsayıldığında oluşan hata,

$y_i - f(x_i)$ 'dir. Yaklaşımındaki amaç, oluşan hataların en az olacağı bir f fonksiyonu elde etmektir (Şekil 1.16).



Şekil 1.16. Gerçek değerler ve bu değerlere uydurulan $f(x)$ eğrisi arasındaki hatalar

$y_i - f(x_i)$ farklarından (hatalarından) her birine bir artık denir. En küçük kareler yönteminde elde edilen fonksiyon ya da onun parametreleri, tüm artıkların kareleri toplamı olan,

$$\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 = (y_1 - f(x_1))^2 + \dots + (y_n - f(x_n))^2 \quad (1.17)$$

denklemini minimum yapacak şekilde belirlenmektedir. Yapılan uygulamada, kareler toplamının minimum olması için her bir hatanın küçük olması gerekmektedir. Elde edilen verileri en iyi kapsayacak doğrusal fonksiyonun grafiği olan doğruya regresyon doğrusu veya en küçük kareler doğrusu denmektedir (URL-4).

1.7.2.2. Diğer Yöntemler

Yaygın olarak kullanılan ve işlem kolaylığı sağlayan En Küçük Kareler (EKK) tahmin yöntemi aykırı gözlemlere karşı duyarlı olması, dayanıklı olmaması nedeniyle eleştirilen ve eksik bulunan bir tahmin yöntemidir. EKK yönteminin verideki tüm gözlemlere eşit ağırlık vererek kalıntı kareler toplamını indirgeyen bir yöntem oluşu aykırı

bir gözlemin vereceği büyük kalıntı durumunda, kalıntı kareler toplamını ve dolayısıyla parametre tahminlerini de doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden amaç fonksiyonu daha güçlü olan, kırılma noktası daha yüksek tahminci seçilmesi önerilmektedir. Veride aykırı gözlem bulunması halinde diğer bir ifadeyle gözlemlerin homojen dağılmaması, gözlemler arası sapmaların bulunması durumunda, dayanıklı tahmincileri kullanmak sonuçların güvenilirliğini artırmaktadır. Bu tahmincilerden birkaçı şöyle sıralanmaktadır (Yorulmaz, 2009).

- En Küçük Mutlak Sapmalar Yöntemi
- En Küçük Medyan Kareler Yöntemi
- En Küçük Kırpılmış Kareler Yöntemi
- En Küçük Varyans-Kovaryans Determinant Yöntemi

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu tez çalışması kapsamında, kemer barajların yapısal davranışlarının belirlenmesi amacıyla mühendislik yazılımı geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, ilk olarak taşıyıcı sistemler üzerinde matematik formüller yardımı ile yapısal davranışları ifade eden denklemler elde edilerek analitik sonuçlar bulunmuştur. Elde edilen denklemler tek eğriliğe sahip Tip-1 kemer baraj üzerinde uygulanıp sonuçlar, sonlu eleman analizleriyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Statik ve dinamik analizlerin gerçekleştirilmesiyle boyut analizinden elde edilen formüllerin statik sonuçlar için geçerli olup, dinamik sonuçları yansıtmadığı belirlenmiştir. Dinamik analiz sonuçlarının elde edilmesi amacıyla istatistiki bir yöntem olan regresyon analizi yapılmıştır. 0,6-300m arasında kemer yüksekliğine sahip tek eğrilikli kemer barajların statik ve dinamik yükler altındaki davranışlarını elde edilebilecek, modal analiz sonucunda dinamik karakteristikleri belirleyebilecek ve analizler sırasında yapı-zemin etkileşimini de dikkate alabilecek bir yazılım geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu bakımdan yapılan çalışmalar, analitik ve yazılım geliştirme olarak iki kısımda incelenmiştir.

2.2. Taşıyıcı Sistem Elemanlarında Ölçeklendirme

Tez kapsamında ölçeklendirilerek farklı boyutlara getirilen sistemlerin dinamik karakteristiklerinin ve yapısal davranışlarının (yerdeğiştirme, asal gerilmeler ve asal şekildeğiştirmeler) değişimini belirlemek ve bu değişimi formüle etmek amacıyla taşıyıcı sistemler ilk uygulama olarak seçilmiştir. Taşıyıcı sistemlerde yapılacak analitik çalışmaların sonuçları, taşıyıcı sistemlere ait matematik modeller ve sonlu eleman modelleri ile elde edilmiştir.

2.2.1. Beton Taşıyıcı Sistemler

2.2.1.1. Buckingham II Teoremi ve Alan Denklemleriyle Yapısal Davranışın Benzerlik Formülünün Elde Edilmesi

Buckingham II Teoremiyle ilgili birinci bölümde anlatılan hususlar dikkate alınarak boyut analizi yapılmış olup, buradaki amaç prototip ile model arasındaki ilişkiyi göstermektir. Boyut analizi sonuçlarını kıyaslamak amacıyla ilk olarak Buckingham II teoremiyle, en kesit boyutları ve yüksekliği sırasıyla a, b, c olan kolonlarda frekans değişimi formüle edilmektedir. Frekans değerinin hesabında, Denklem (1.4) ve bu denklemin farklı yazılış şekilleri kullanılmıştır.

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}, \quad \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad k = \frac{XEI}{h^3} \quad (2.1)$$

Bu denklemlere bağlı parametreler; burada, m kütleyi, k rijitliği, π boyutsuz parametreyi, E Elastisite modülünü, I atalet momentini ve X sabit bir değeri göstermektedir. Buckingham II teoremine göre uygulanan işlem adımları aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır.

1. Adım: Parametrelerin (n sayısının) belirlenmesi

Frekans formülüne göre belirlenen parametreler ve bu parametrelerin M,L,T cinsinden birimleri aşağıda verilmektedir. Toplam 8 adet parametre (n=8) bulunmaktadır.

a	b	h	m	E	I	k	f
L	L	L	M	ML ⁻¹ T ⁻²	L ⁴	MT ⁻²	T ⁻¹

2. Adım: Sınırlayıcı sayısı r'nin tanımlanması

Analiz edilecek probleme ilişkin boyutların sayısı (r), sıcaklık, elektrik veya manyetik değişkenler içermemektedir. Sınırlayıcıların sayısı, temel boyutların sayısına eşittir. Tekrar eden parametre sayısı olan r'nin seçiminde önceki bölümde ifade edilen kurallar dikkate alınmakta olup, r=(E, h, m) olarak seçilmiştir. Değişkenlerin her biri deneysel olarak

ölçülebilir olduğu gibi, bu üç değişkenin boyutları göz önüne alındığında, temel boyutlara (M, L, T) ulaşmakta mümkündür.

3. Adım: Tekrar etmeyen parametre sayısı k ve Π -grup sayısının belirlenmesi

$k = n - r$ olmak üzere 5 adet Π -grup sayısı bulunmaktadır. Bu ifade, (1.2) denklemiyle gösterildiğinde

$$f = (\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5) = 0 \quad (2.2)$$

denklemi elde edilmektedir. Bu şekilde, $\pi_1 = a$, $\pi_2 = b$, $\pi_3 = I$, $\pi_4 = k$ ve $\pi_5 = f$ olmak üzere her bir tekrar etmeyen parametre belirlenmiş olmaktadır.

4. Adım: Tekrar etmeyen değişkenlerin tekrar eden değişkenlere bağlı olarak hesaplanması.

Her bir tekrar etmeyen parametre aşağıdaki şekilde elde edilebilmektedir

$$\left. \begin{aligned} \pi_1 &= a(E^a h^b m^c) \\ \pi_2 &= b(E^a h^b m^c) \\ \pi_3 &= I(E^a h^b m^c) \\ \pi_4 &= k(E^a h^b m^c) \\ \pi_5 &= f(E^a h^b m^c) \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Bu şekilde oluşturulan grupların boyutsuz olmaları için $M^0 L^0 T^0$ temel şartının da sağlaması gerekmektedir.

π_1 için;

$$\left. \begin{aligned} \pi_1 &= a(E^a h^b m^c) \\ M^0 L^0 T^0 &= L(M L^{-1} T^{-2})^a L^b M^c \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

ifadeleri elde edilmektedir. Denklem her iki tarafında, aynı temel boyuta ait üst kuvvetinin aynı olması kuralı göz önünde bulundurularak denklem çözüldüğünde a, b, c katsayıları elde edilmektedir. Tüm Π -gruplarında her bir parametre hesaplandığında, son kısım aşağıdaki şekilde elde edilmektedir.

$$\left. \begin{aligned} \pi_{1(\text{model})} &= \pi_{1(\text{prototip})} \\ \pi_{2(\text{model})} &= \pi_{2(\text{prototip})} \\ \pi_{3(\text{model})} &= \pi_{3(\text{prototip})} \\ \pi_{4(\text{model})} &= \pi_{4(\text{prototip})} \\ \pi_{5(\text{model})} &= \pi_{5(\text{prototip})} \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Bu eşitlikler ile, prototip ve model arasındaki ilişki kurulup, sırasıyla Π -gruplarının çözümleri yapılmıştır.

➤ $\pi_1 = a(E, h, m)$ için ;

$$\left. \begin{aligned} \pi_1 &= a(E^a h^b m^c) \\ M^0 L^0 T^0 &= L(M L^{-1} T^{-2})^a L^b M^c \\ M^0 L^0 T^0 &= M^{a+c} L^{1-a+b} T^{-2a} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

bağıntıları elde edilir. Burada, $a=0$, $b=-1$ ve $c=0$ olarak elde edilmektedir. İlgili ifadeler yerlerine yazıldığında:

$$\left. \begin{aligned} \pi_1 &= a(E^0 h^{-1} m^0) \\ \pi_1 &= a h^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

ifadeleri elde edilmektedir.

$$\pi_{1(\text{model})} = \pi_{1(\text{prototip})}$$

Eşitliği dikkate alınarak, m ve p sırasıyla model ve prototipi temsil ettiği göz önünde bulundurulduğunda ve ayrıca,

$$\left. \begin{aligned} \frac{a_m}{h_m} &= \frac{a_p}{h_p} \\ a_m &= \frac{a_p h_m}{h_p} \\ \frac{h_m}{h_p} &= \frac{1}{S} \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

olarak ifade edilirse;

$$\left. \begin{aligned} a_m &= \frac{a_p}{S} \\ \frac{a_m}{a_p} &= \frac{1}{S} \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

ifadesi elde edilmektedir. Buradan anlaşılacağı üzere, modelde ki a uzunluğu, prototipte ki a teriminin 1/S katı olmaktadır. Bu değere uzunluk ölçek faktörü denilmektedir.

➤ $\pi_2 = b(E, h, m)$ için ;

$$\left. \begin{aligned} \pi_2 &= b(E^a h^b m^c) \\ M^0 L^0 T^0 &= L (ML^{-1} T^{-2})^a L^b M^c \\ M^0 L^0 T^0 &= M^{a+c} L^{1-a+b} T^{-2a} \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

bağıntıları elde edilir. Burada, $a=0$, $b=-1$ ve $c=0$ olarak elde edilmektedir. İlgili ifadeler yerlerine yazıldığında:

$$\left. \begin{aligned} \pi_2 &= b(E^0 h^{-1} m^0) \\ \pi_2 &= b h^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

ifadeleri elde edilmektedir.

$$\pi_{2(\text{model})} = \pi_{2(\text{prototip})}$$

eşitliği dikkate alınarak, m ve p sırasıyla model ve prototipi temsil ettiği göz önünde bulundurulduğunda ve ayrıca,

$$\left. \begin{aligned} \frac{b_m}{h_m} &= \frac{b_p}{h_p} \\ b_m &= \frac{b_p h_m}{h_p} \\ \frac{h_m}{h_p} &= \frac{1}{S} \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

olarak ifade edilirse;

$$b_m = \frac{b_p}{S} \quad (2.13)$$

ifadesi elde edilmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere, modelde ki b uzunluğu, prototipte ki b teriminin 1/S katı olmaktadır. Bu değere uzunluk ölçek faktörü denilmektedir.

➤ $\pi_3 = I(E, h, m)$ için ;

$$\left. \begin{aligned} \pi_3 &= I(E^a h^b m^c) \\ M^0 L^0 T^0 &= L^4 (ML^{-1}T^{-2})^a L^b M^c \\ M^0 L^0 T^0 &= M^{a+c} L^{4-a+b} T^{-2a} \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

bağıntıları elde edilir. Burada, $a=0$, $b=-4$ ve $c=0$ olarak elde edilmektedir. İlgili ifadeler yerlerine yazıldığında:

$$\left. \begin{aligned} \pi_3 &= I(E^0 h^{-4} m^0) \\ \pi_3 &= I h^{-4} \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

ifadeleri elde edilmektedir.

$$\pi_{3(\text{model})} = \pi_{3(\text{prototip})}$$

eşitliği dikkate alınarak, m ve p sırasıyla model ve prototipi temsil ettiği göz önünde bulundurulduğunda ve ayrıca,

$$\left. \begin{aligned} \frac{I_m}{h_m^4} &= \frac{I_p}{h_p^4} \\ I_m &= \frac{I_p h_m^4}{h_p^4} \\ \frac{h_m}{h_p} &= \frac{1}{S} \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

olarak ifade edilirse;

$$\left. \begin{aligned} I_m &= \frac{I_p}{S^4} \\ I_m &= \frac{I_p}{S^4} \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

ifadesi elde edilmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere, modelin atalet momenti, prototipte ki atalet momentinin $1/S^4$ katı olmaktadır. Bu değere atalet momenti ölçek faktörü denilmektedir.

➤ $\pi_4 = k(E, h, m)$ için ;

$$\left. \begin{aligned} \pi_4 &= k(E^a h^b m^c) \\ M^0 L^0 T^0 &= M T^{-2} (M L^{-1} T^{-2})^a L^b M^c \\ M^0 L^0 T^0 &= M^{a+1+c} L^{-a+b} T^{-2a-2} \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

bağıntıları elde edilir. Burada, $a = -1$, $b = -1$ ve $c = 0$ olarak elde edilmektedir. İlgili ifadeler yerlerine yazıldığında:

$$\left. \begin{aligned} \pi_4 &= k(E^{-1}h^{-1}m^0) \\ \pi_4 &= kE^{-1}h^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

ifadeleri elde edilmektedir.

$$\pi_{4(\text{model})} = \pi_{4(\text{prototip})}$$

eşitliği dikkate alınarak, m ve p sırasıyla model ve prototipi temsil ettiği göz önünde bulundurulduğunda ve ayrıca,

$$\left. \begin{aligned} \frac{k_m}{E_m h_m} &= \frac{k_p}{E_p h_p} \\ k_m &= \frac{k_p E_m h_m}{E_p h_p} \\ \frac{h_m}{h_p} &= \frac{1}{S} \\ \frac{E_m}{E_p} &= \frac{1}{E} \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

olarak ifade edilirse;

$$\left. \begin{aligned} k_m &= \frac{k_p}{ES} \\ \frac{k_m}{k_p} &= \frac{1}{ES} \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

ifadesi elde edilmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere, modelde ki k rijitlikliği, prototipte ki k teriminin 1/ES katı olmaktadır. Bu değere rijitlik ölçek faktörü denilmektedir.

➤ $\pi_5 = f(E, h, m)$ için ;

$$\left. \begin{aligned} \pi_5 &= f(E^a h^b m^c) \\ M^0 L^0 T^0 &= T^{-1} (M L^{-1} T^{-2})^a L^b M^c \\ M^0 L^0 T^0 &= M^{a+c} L^{-a+b} T^{-2a-1} \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

bağıntıları elde edilir. Burada, $a = -\frac{1}{2}$, $b = -\frac{1}{2}$ ve $c = \frac{1}{2}$ olarak elde edilmektedir. İlgili ifadeler yerlerine yazıldığında:

$$\left. \begin{aligned} \pi_5 &= f\left(E^{-\frac{1}{2}} h^{-\frac{1}{2}} m^{\frac{1}{2}}\right) \\ \pi_5 &= \frac{f \sqrt{m}}{\sqrt{E} \sqrt{h}} \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

ifadeleri elde edilmektedir.

$$\pi_{5(\text{model})} = \pi_{5(\text{prototip})}$$

eşitliği dikkate alınarak, m ve p sırasıyla model ve prototipi temsil ettiği göz önünde bulundurulduğunda ve ayrıca,

$$\left. \begin{aligned} \frac{f_m \sqrt{m_m}}{\sqrt{E_m} \sqrt{h_m}} &= \frac{f_p \sqrt{m_p}}{\sqrt{E_p} \sqrt{h_p}} \\ \frac{f_m}{f_p} &= \frac{\sqrt{m_p}}{\sqrt{m_m}} \frac{\sqrt{E_m}}{\sqrt{E_p}} \frac{\sqrt{h_m}}{\sqrt{h_p}} \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

İfadesi elde edilmektedir. Denklem (2.24), frekansın ölçek faktörü olarak gösterilmektedir. Ayrıca,

$$f_m = \frac{\sqrt{m_p}}{\sqrt{m_m}} \frac{\sqrt{E_m}}{\sqrt{E_p}} \frac{\sqrt{h_m}}{\sqrt{h_p}} f_p \quad (2.25)$$

bağıntısı ile de modelin frekansı, prototip frekansına ve parametrelere bağlı olarak da elde edilmektedir. Bu denklemde;

$$\left. \begin{aligned} \frac{h_m}{h_p} &= \frac{1}{S}; \text{Geometrik ölçek} \\ \frac{E_m}{E_p} &= \frac{1}{E}; \text{Malzeme ölçeği} \\ \frac{m_m}{m_p} &= \frac{1}{M}; \text{Kütle ölçeği} \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

ifadeleri dikkate alınıp, yerlerine yazılır ise;

$$f_m = \sqrt{M \frac{1}{E} \frac{1}{S}} f_p \text{ elde edilmektedir.} \quad (2.27)$$

genel bağıntısı elde edilmektedir.

Örnek olarak:

➤ Kütlenin sabit olarak kabul edilip, sadece geometrinin ölçeklendirilmesi durumunda

$$\left. \begin{aligned} \frac{h_m}{h_p} &= \frac{1}{S} \\ \frac{E_m}{E_p} &= \frac{1}{E} = 1 \\ \frac{m_m}{m_p} &= \frac{1}{M} = 1 \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

ifadeleri elde edilmekte olup, bu ifadeler (2.27) denkleminde yerlerine yazıldığında,

$$f_m = \sqrt{\frac{1}{S}} f_p \quad (2.29)$$

bağıntısı elde edilmektedir.

➤ Kütle değişiminin de dikkate alınmasıyla geometri ölçeklendirmesinin yapılması durumunda ise;

$$\left. \begin{aligned} \frac{h_m}{h_p} &= \frac{1}{S} \\ \frac{E_m}{E_p} &= \frac{1}{E} = 1 \\ \frac{m_m}{m_p} &= \frac{1}{M} = \frac{1}{S^3} \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

ifadeleri elde edilmekte olup, bu ifadeler (2.27) denkleminde yerlerine yazıldığında,

$$\left. \begin{aligned} f_m &= \sqrt{S^3 \frac{1}{S}} f_p \\ f_m &= S f_p \end{aligned} \right\} \quad (2.31)$$

bağıntısı elde edilmektedir.

Farklı ölçeklendirme durumlarına göre, genel formülün değişimi Buckingham Π teoremiyle elde edilmektedir. Frekansın matematik modeli mevcut olduğu için, bu model yardımıyla da geometrik, kütle ve malzeme ölçeklerine göre farklı kombinasyonlarla benzerlik ilişkisi elde edilerek, sonuçlar birbiriyle karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

➤ Kolon elemanın prototip durumu için, matematik model yardımıyla çözüm aşağıdaki şekilde özetlenmektedir.

$$\begin{aligned} \text{Kolon boyutları} &= a \times b \times l \text{ m} \\ \text{Sistemde ki diğer veriler} &= \gamma, E_p, g \\ \text{Sistem rijitliği} &= k = \frac{12E_p I}{L^3} \end{aligned}$$

olmak üzere ilgili çözüm aşağıdaki şekilde yapılabilmekte ve

$$\left. \begin{aligned}
 I &= \frac{ab^3}{12} \\
 k &= \frac{12E_p \frac{ab^3}{12}}{L^3} = \frac{12E_p ab^3}{12L^3} = \frac{E_p ab^3}{L^3} \\
 m &= \frac{abL\gamma}{g} \\
 \omega_n &= \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{E_p ab^3}{L^3} \frac{g}{abL\gamma}} = \sqrt{\frac{E_p b^2 g}{L^4 \gamma}} \\
 f_{n(\text{Prototip})} &= \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E_p b^2 g}{L^4 \gamma}}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.32)$$

bağıntısı elde edilmektedir. Kolon elemanın farklı ölçekli model durumları için, matematik model yardımıyla yapılan işlem adımları aşağıda sıralanmaktadır.

➤ Kütlelerin sabit olarak kabul edilip, 1/S geometri ölçeklendirmesinin dikkate alınması durumunda;

$$\text{Kolon boyutları} = \frac{a}{S} \times \frac{b}{S} \times \frac{1}{S} \text{ m}$$

$$\text{Sistemde ki diğer veriler} = \gamma, E_p, g$$

olmak üzere ilgili çözüm aşağıdaki şekilde yapılabilmekte ve

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{a \left(\frac{b}{S} \right)^3}{12} = \frac{ab^3}{S^4 12} \\
 k &= \frac{12E_p \frac{ab^3}{S^4 12}}{\left(\frac{L}{S} \right)^3} = \frac{12E_p ab^3 S^3}{12S^4 L^3} = \frac{E_p ab^3}{L^3} \frac{1}{S} \\
 m &= \frac{abL\gamma}{g} \\
 \omega_n &= \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{E_p ab^3}{L^3} \frac{1}{S} \frac{g}{abL\gamma}} = \sqrt{\frac{E_p b^2 g}{L^4 \gamma}} \frac{1}{\sqrt{S}} \\
 f_{n(\text{Model})} &= \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E_p b^2 g}{L^4 \gamma}} \frac{1}{\sqrt{S}}
 \end{aligned} \quad (2.33)$$

bağıntısı elde edilmektedir. Kolon elemanın prototipi ile ölçekli modeli arasında ilişki kurulması ile;

$$\left. \begin{aligned} \frac{f_{n(\text{Model})}}{f_{n(\text{Prototip})}} &= \frac{1}{\sqrt{S}} \\ f_{n(m)} &= \frac{1}{\sqrt{S}} f_{n(p)} \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

eşitliği elde edilmektedir.

➤ Kütle değişiminin de dikkate alınmasıyla $1/S$ geometri ölçeklendirmesi durumunda;

$$\text{Kolon boyutları} = \frac{a}{S} \times \frac{b}{S} \times \frac{1}{S} \text{ m}$$

$$\text{Sistemde ki diğer veriler} = \gamma, E_p, g$$

olmak üzere ilgili çözüm aşağıdaki şekilde yapılabilmekte ve

$$\begin{aligned} I &= \frac{\frac{a}{S} \left(\frac{b}{S} \right)^3}{12} = \frac{ab^3}{S^4 12} \\ k &= \frac{12 E_p \frac{ab^3}{S^4 12}}{\left(\frac{L}{S} \right)^3} = \frac{12 E_p ab^3 S^3}{12 S^4 L^3} = \frac{E_p ab^3}{L^3} \frac{1}{S} \\ m &= \frac{\frac{abL}{SSS} \gamma}{g} = \frac{abL\gamma}{S^3 g} = \frac{abL\gamma}{g} \frac{1}{S^3} \\ \omega_n &= \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{E_p ab^3}{L^3} \frac{1}{S} \frac{g}{abL\gamma} \frac{S^3}{1}} = \sqrt{\frac{E_p b^2 g}{L^4 \gamma}} S \\ f_{n(\text{Model})} &= \frac{\omega_n}{2\pi} = \sqrt{\frac{E_p b^2 g}{L^4 \gamma}} \frac{1}{2\pi} S \end{aligned} \quad (2.35)$$

bağıntısı elde edilmektedir. Kolon elemanın prototipi ile ölçekli modeli arasında ilişki kurulması ile

$$\left. \begin{aligned} \frac{f_{n(\text{Model})}}{f_{n(\text{Prototip})}} &= \frac{S}{1} \\ f_{n(m)} &= S f_{n(p)} \end{aligned} \right\} \quad (2.36)$$

eşitliği elde edilmektedir.

➤ Yalnızca malzeme ölçeklendirmesinin dikkate alınması durumunda;

$$\begin{aligned} \text{Kolon boyutları} &= a \times b \times l \text{ m} \\ \text{Sistemde ki diğer veriler} &= \gamma, E_m, g \end{aligned}$$

olmak üzere ilgili çözüm aşağıdaki şekilde yapılabilmekte ve

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{ab^3}{12} \\ k &= \frac{12E_m \frac{ab^3}{12}}{L^3} = \frac{12E_m ab^3}{12L^3} = \frac{E_m ab^3}{L^3} \\ m &= \frac{abL\gamma}{g} \\ \omega_n &= \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{E_m ab^3}{L^3} \frac{g}{abL\gamma}} = \sqrt{\frac{E_m b^2 g}{L^4 \gamma}} \\ f_{n(\text{Model})} &= \frac{\omega_n}{2\pi} = \sqrt{\frac{E_m b^2 g}{L^4 \gamma}} \frac{1}{2\pi} \end{aligned} \right\} \quad (2.37)$$

bağıntısı elde edilmektedir. Kolon elemanın prototipi ile ölçekli modeli arasında ilişki kurulması ile

$$\left. \begin{aligned} \frac{f_{n(\text{Model})}}{f_{n(\text{Prototip})}} &= \frac{\sqrt{E_m}}{\sqrt{E_p}} \\ f_{n(m)} &= \sqrt{\frac{E_m}{E_p}} f_{n(p)} \end{aligned} \right\} \quad (2.38)$$

eşitliği elde edilmektedir.

➤ Kütlenin sabit olarak kabul edilip, 1/S geometri ve malzeme ölçeklendirmesinin dikkate alınması durumunda;

$$\text{Kolon boyutları} = \frac{a}{S} \times \frac{b}{S} \times \frac{1}{S} \text{ m}$$

$$\text{Sistemdeki diğer veriler} = \gamma, E_m, g$$

olmak üzere ilgili çözüm aşağıdaki şekilde yapılabilmekte ve

$$\begin{aligned} I &= \frac{a \left(\frac{b}{S} \right)^3}{12} = \frac{ab^3}{S^4 12} \\ k &= \frac{12 E_m \frac{ab^3}{S^4 12}}{\left(\frac{L}{S} \right)^3} = \frac{12 E_m ab^3 S^3}{12 S^4 L^3} = \frac{E_m ab^3}{L^3} \frac{1}{S} \\ m &= \frac{abL\gamma}{g} \\ \omega_n &= \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{E_m ab^3}{L^3} \frac{1}{S} \frac{g}{abL\gamma}} = \sqrt{\frac{E_m b^2 g}{L^4 \gamma}} \frac{1}{\sqrt{S}} \\ f_{n(\text{Model})} &= \frac{\omega_n}{2\pi} = \sqrt{\frac{E_m b^2 g}{L^4 \gamma}} \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{S}} \end{aligned} \quad (2.39)$$

bağıntısı elde edilmektedir. Kolon elemanın prototipi ile ölçekli modeli arasında ilişki kurulması ile,

$$\left. \begin{aligned} \frac{f_{n(\text{Model})}}{f_{n(\text{Prototip})}} &= \frac{\sqrt{E_m} \frac{1}{\sqrt{S}}}{\sqrt{E_p}} \\ f_{n(m)} &= \frac{1}{\sqrt{S}} \sqrt{\frac{E_m}{E_p}} f_{n(p)} \end{aligned} \right\} \quad (2.40)$$

eşitliği elde edilmektedir.

➤ Kütle değişiminin de dikkate alınmasıyla, 1/S geometri ve malzeme ölçeklendirmesi durumunda;

$$\text{Kolon boyutları} = \frac{a}{S} \times \frac{b}{S} \times \frac{1}{S} \text{ m}$$

$$\text{Sistemdeki diğer veriler} = \gamma, E_m, g$$

olmak üzere ilgili çözüm aşağıdaki şekilde yapılabilmekte ve

$$\begin{aligned} I &= \frac{a \left(\frac{b}{S} \right)^3}{12} = \frac{ab^3}{S^4 12} \\ k &= \frac{12E_m \frac{ab^3}{S^4 12}}{\left(\frac{L}{S} \right)^3} = \frac{12E_m ab^3 S^3}{12S^4 L^3} = \frac{E_m ab^3}{L^3} \frac{1}{S} \\ m &= \frac{\frac{abL}{SSS} \gamma}{g} = \frac{abL\gamma}{S^3 g} = \frac{abL\gamma}{g} \frac{1}{S^3} \\ \omega_n &= \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{E_m ab^3}{L^3} \frac{1}{S} \frac{g}{abL\gamma} \frac{1}{S^3}} = \sqrt{\frac{E_m b^2 g}{L^4 \gamma}} S \\ f_{n(\text{Model})} &= \frac{\omega_n}{2\pi} = \sqrt{\frac{E_m b^2 g}{L^4 \gamma}} \frac{1}{2\pi} S \end{aligned} \quad (2.41)$$

bağıntısı elde edilmektedir. Kolon elemanın prototipi ile ölçekli modeli arasında ilişki kurulması ile

$$\left. \begin{aligned} \frac{f_{n(\text{Model})}}{f_{n(\text{Prototip})}} &= \frac{\sqrt{E_m} S}{\sqrt{E_p}} \\ f_{n(m)} &= S \sqrt{\frac{E_m}{E_p}} f_{n(p)} \end{aligned} \right\} \quad (2.42)$$

eşitliği elde edilmektedir. Yukarıda detaylı olarak açıklanan denklem ve ifadeler kullanılarak farklı ölçek türlerine göre elde edilen frekans formülleri Tablo 2.1'de özetlenmektedir.

Tablo 2.1. Ölçek türlerine göre frekans formülleri

Ölçek Türleri	Benzerlik Formülleri
Geometrik	$f_{n(m)} = \frac{1}{\sqrt{S}} f_{n(p)}$
Geometrik ve kütle	$f_{n(m)} = S f_{n(p)}$
Malzeme	$f_{n(m)} = \sqrt{\frac{E_m}{E_p}} f_{n(p)}$
Geometrik ve malzeme	$f_{n(m)} = \frac{1}{\sqrt{S}} \sqrt{\frac{E_m}{E_p}} f_{n(p)}$
Geometrik, malzeme ve kütle	$f_{n(m)} = S \sqrt{\frac{E_m}{E_p}} f_{n(p)}$

Yapılan çalışmalar ve elde edilen denklemler değerlendirildiğinde, Buckingham II teoremi ve alan denklemlerinden elde edilen frekans bağıntılarının aynı olduğu görülmektedir. En genel ifadeyle, (2.24) denkleminde prototip ve modele ait veriler yerine yazıldığında ölçekli modelin frekans değeri elde edilmektedir. Verilerin farklı formatlara dönüştürülerek kullanılması da mümkündür. Kütle için dönüşüm yapılmak istendiğinde;

$$\left. \begin{aligned} m &= V\gamma \\ m_p &= V_p \gamma_p \\ m_m &= V_m \gamma_m \end{aligned} \right\} \quad (2.43)$$

ifadeleri Denklem (2.24)'de yerine yazılırsa;

$$f_m = \frac{\sqrt{V_p \gamma_p}}{\sqrt{V_m \gamma_m}} \frac{\sqrt{E_m}}{\sqrt{E_p}} \frac{\sqrt{h_m}}{\sqrt{h_p}} f_p \quad (2.44)$$

bağıntısı elde dilmektedir. Hacim için dönüşüm yapıldığında;

$$\left. \begin{aligned} V &= a b h \text{ (br}^3\text{)} \\ V_p &= a_p b_p h_p \\ V_m &= a_m b_m h_m \end{aligned} \right\} \quad (2.45)$$

ifadeleri de yerine yazıldığında

$$\left. \begin{aligned} f_m &= \frac{\sqrt{a_p b_p h_p \gamma_p}}{\sqrt{a_m b_m h_m \gamma_m}} \frac{\sqrt{E_m}}{\sqrt{E_p}} \frac{\sqrt{h_m}}{\sqrt{h_p}} f_p \\ f_m &= \frac{\sqrt{a_p b_p h_p}}{\sqrt{a_m b_m h_m}} \frac{\sqrt{\gamma_p}}{\sqrt{\gamma_m}} \frac{\sqrt{E_m}}{\sqrt{E_p}} \frac{\sqrt{h_m}}{\sqrt{h_p}} f_p \end{aligned} \right\} \quad (2.46)$$

bağıntısı elde dilmektedir. (2.46) denkleminde elde edilen şekilden, $\frac{h_m}{h_p} = \frac{1}{S}$ geometrik

ölçeğinde prototipin hacim ölçek faktörü S^3 yerine yazıldığında;

$$\left. \begin{aligned} f_m &= \frac{\sqrt{S^3}}{1} \frac{\sqrt{\gamma_p}}{\sqrt{\gamma_m}} \frac{\sqrt{E_m}}{\sqrt{E_p}} \frac{1}{\sqrt{S}} f_p \\ f_m &= S \frac{\sqrt{\gamma_p}}{\sqrt{\gamma_m}} \frac{\sqrt{E_m}}{\sqrt{E_p}} f_p \end{aligned} \right\} \quad (2.47)$$

şekline dönüştürülüp, kütleyi etkileyen parametre olan γ cinsinden de ifade edilerek farklı birim hacim ağırlıklarına göre sonuçlar elde edilebilmektedir.

Yapının ağırlığı ölçeklendirmeyele değişmektedir. Ölçeklemede kütlenin sabit tutulması, hacim azalmasıyla oluşan kütle farkının ekstra yük olarak yapıya eklenmesiyle oluşturulmaktadır. Bağıntılar üzerinde işlemler yapılarak istenilen parametreyi ölçekleyip veya sabit tutarak farklı bağıntılar elde edilebilmektedir.

(2.47) denkleminde geometrik ölçeklemeyle hacmi ve kütlesi değişen sistemin kütlesi, geometrik ölçek birimine dönüştürülmüş olmaktadır. Kolon taşıyıcı sistem elemanının kullanılmasıyla elde edilen bağıntılar, sisteme özgü katsayıların sadeleştirilip temel parametrelerin kalmasıyla genelleştirilmiş olup, bu bağıntılar her sistemde kullanılabilirler.

Yerdeğiştirme bağıntıları için de matematik modeller kullanılarak farklı ölçek türlerinde benzerlik ilişkileri elde edilmiştir. (1.8) denklemi kullanılarak, kolona ait yerdeğiştirme için benzerliğin kurulması ile prototipin ölçeklendirilerek küçültülmüş modeli arasındaki ilişkinin ifadesi:

$$\begin{aligned}
F &= K U \\
F &= V \gamma \\
k &= \frac{12EI}{L^3}
\end{aligned} \tag{2.48}$$

ifadeleri kullanılarak prototip için:

$$V_p \gamma_p = \frac{12E_p I_p}{L_p^3} U_p \tag{2.49}$$

model için ise:

$$V_m \gamma_m = \frac{12E_m I_m}{L_m^3} U_m \tag{2.50}$$

elde edilmektedir. $\frac{U_p}{U_m}$ benzerlik koşulu da uygulandığında;

$$\frac{U_p}{U_m} = \frac{E_m I_m L_p^3 V_p \gamma_p}{E_p I_p L_m^3 V_m \gamma_m} \tag{2.51}$$

ifadesi elde edilmektedir. Denklem (2.17)'de görüleceği üzere, atalet momenti için ölçek faktörü S^4 'tür. Bu ifade dikkate alındığında,

$$\left. \begin{aligned}
\frac{U_p}{U_m} &= \frac{E_m}{E_p} \frac{1}{S^4} S^3 \frac{V_p \gamma_p}{V_m \gamma_m} \\
\frac{U_p}{U_m} &= \frac{E_m}{E_p} \frac{1}{S} \frac{V_p \gamma_p}{V_m \gamma_m}
\end{aligned} \right\} \tag{2.52}$$

yerdeğiştirme için genel benzerlik formülü elde edilmektedir. Hacim ve birim hacim yoğunluğu, kütle formuna dönüştürülerek kullanılabilceği gibi hacim için ölçek faktörü olan S^3 'te yerine yazılarak,

$$\left. \begin{aligned} \frac{U_p}{U_m} &= \frac{E_m}{E_p} \frac{1}{S} S^3 \frac{\gamma_p}{\gamma_m} \\ U_m &= \frac{E_p}{E_m} \frac{1}{S^2} \frac{\gamma_m}{\gamma_p} U_p \end{aligned} \right\} \quad (2.53)$$

eşitliği de elde edilebilmektedir. (2.53) denkleminde prototipe ait yerdeğiştirmeye bağlı olarak verilerin formülde yerine yazılmasıyla ölçeklenmiş modele ait yerdeğiştirme değeri elde edilmektedir.

Bazı farklı ölçeklendirme türleri için ilgili formüllerin değişimleri Tablo 2.2'de özetlenmektedir.

Tablo 2.2. Ölçek türlerine göre yerdeğiştirme formülleri

Ölçek Türleri	Benzerlik Formülleri
Geometrik	$\delta_m = S \delta_p$
Geometrik ve kütle	$\delta_m = \frac{1}{S^2} \delta_p$
Malzeme	$\delta_m = \frac{E_p}{E_m} \delta_p$
Geometrik ve malzeme	$\delta_m = \frac{E_p}{E_m} S \delta_p$
Geometri, malzeme ve kütle	$\delta_m = \frac{E_p}{E_m} \frac{1}{S^2} \delta_p$

Gerilme bağıntıları için matematik modeller kullanılarak farklı ölçek türlerinde benzerlik ilişkisi kurulmuştur. (1.10) denklemini kullanılarak gerçekleştirilen gerilmeye ait benzerlik ilişkisi sonucunda,

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{V\gamma}{A} \quad (2.54)$$

prototip için;

$$\sigma_p = \frac{V_p \gamma_p}{A_p} \quad (2.55)$$

model için ise;

$$\sigma_m = \frac{V_m \gamma_m}{A_m} \quad (2.56)$$

denklemleri elde edilmektedir. Burada, σ_p ve σ_m sırasıyla prototip ve modelin gerilmesi, V_p ve V_m sırasıyla prototip ve modelin hacmi, γ_p ve γ_m sırasıyla prototip ve modelin birim hacim ağırlığı, A_p ve A_m sırasıyla prototip ve modelin alanını ifade etmektedir. Bu iki eşitliğin oranından;

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_p}{\sigma_m} &= \frac{V_p \gamma_p A_m}{A_p V_m \gamma_m} \\ \frac{\sigma_p}{\sigma_m} &= \frac{V_p \gamma_p A_m}{V_m \gamma_m A_p} \end{aligned} \right\} \quad (2.57)$$

gerilme için genel benzerlik formülü elde edilmektedir. Bu bağıntıda, alan için ölçek faktörü S^2 ve hacim için ölçek faktörü S^3 yerlerine yazılırsa,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_p}{\sigma_m} &= S^3 \frac{\gamma_p}{\gamma_m} \frac{1}{S^2} \\ \sigma_m &= \frac{1}{S} \frac{\gamma_m}{\gamma_p} \sigma_p \end{aligned} \right\} \quad (2.58)$$

denklemleri elde edilmektedir. Buradan da görüleceği üzere, denklem elastisite modülü değerinden bağımsız haldedir.

Şekildeğiştirme bağıntıları için de matematik modeller kullanılarak farklı ölçek türlerinde benzerlik ilişkileri kurulmuştur. (1.12) denklemi kullanılarak gerçekleştirilen şekildeğiştirmeye ait benzerlik ilişkisi ile,

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= E \varepsilon \\ \varepsilon &= \frac{\sigma}{E} \end{aligned} \right\} \quad (2.59)$$

prototip için;

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p} \quad (2.60)$$

model için ise;

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m} \quad (2.61)$$

denklemleri elde edilmektedir. Burada, ε_p ve ε_m sırasıyla prototip ve modelin şekildeğiştirmesini, σ_p ve σ_m sırasıyla prototip ve modelin gerilmesi, V_p ve V_m sırasıyla prototip ve modelin hacmi, γ_p ve γ_m sırasıyla prototip ve modelin birim hacim ağırlığı, A_p ve A_m sırasıyla prototip ve modelin alanını ifade etmektedir. Bu iki eşitliğin oranından;

$$\left. \begin{aligned} \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_m} &= \frac{\sigma_p}{\sigma_m} \frac{E_m}{E_p} \\ \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_m} &= \frac{V_p}{V_m} \frac{\gamma_p}{\gamma_m} \frac{A_m}{A_p} \frac{E_m}{E_p} \end{aligned} \right\} \quad (2.62)$$

şekildeğiştirme için genel benzerlik formülü elde edilmektedir. Bu bağıntıda, alan için ölçek faktörü S^2 hacim için S^3 yerlerine yazılırsa,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_m} &= S \frac{\gamma_m}{\gamma_p} \frac{E_m}{E_p} \\ \varepsilon_m &= \frac{1}{S} \frac{\gamma_p}{\gamma_m} \frac{E_p}{E_m} \varepsilon_p \end{aligned} \right\} \quad (2.63)$$

denklemini elde edilmektedir.

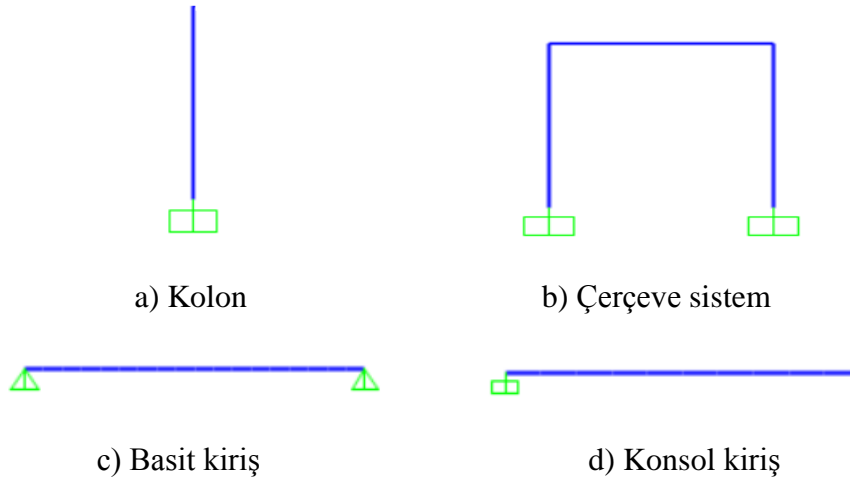
2.2.1.2. Dinamik Karakteristikler ve Yapısal Özelliklerin Sonlu Eleman Analiziyle Elde edilmesi

Taşıyıcı sistem elemanlarına ait dinamik karakteristikleri, yerdeğiştirmeleri, kesit tesirlerini, gerilmeleri ve şekildeğiştirmeleri sonlu eleman yöntemiyle elde edebilmek amacıyla, seçilen kolon, çerçeve, basit kiriş ve konsol kiriş modellerine ait sonlu eleman modelleri SAP2000 (2016) programıyla oluşturulmuştur. Farklı ölçek değerleri altında elde edilen sonuçları değerlendirmek amacıyla, ilgili işlemler 1/2, 1/5 ve 1/10 ölçek durumları göz önünden bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde, ilgili sistemlerin farklı beş tür ölçeklendirme durumuna ait elde edilen sonlu eleman analiz sonuçları matematik modeller kullanılarak gerçekleştirilen teorik çözümler ile karşılaştırılmıştır. Matematik modelleme sırasında dikkate alınan toplu kütle kabulü, sonlu eleman analizleri sırasında da göz önünde bulundurulmuştur.

Çalışmada, basit kiriş ve konsol kiriş elemanlarda elde edilen sonuçların birbirleriyle yakın olduğu görülmüş, elde edilen sonuçlar arasındaki farkları azaltmak amacıyla basit kiriş üzerinde açıklık ortasına, konsol kirişte ise konsol ucuna yapının kendi ağırlığını temsil eden tekil kuvvetler etki ettirilmiştir. Tablo 2.3'te seçilen sistemlere ait boyut özellikleri verilmektedir.

Tablo 2.3. Taşıyıcı sistemlere ait boyut özellikleri

Sistemler	SİSTEM BOYUTLARI (m)			
	Kolon	Uzunluk	Kiriş	Açıklık
Kolon	0,5×0,5	3	----	----
Çerçeve	0,5×0,5	3	0,3×0,5	3
Konsol	----	----	0,5×0,5	3
Basit Kiriş	----	----	0,5×0,5	3



Şekil 2.1. Taşıyıcı sistemlere ait sonlu eleman modelleri

Şekil 2.1’de verilmiş olan tüm taşıyıcı sistemlerde C20/25 beton dayanım sınıfı kullanılmış olup, beton birim hacim ağırlığı ise 24.0345 kN/m^3 olarak dikkate alınmıştır. Elastisite Modülü değeri için ise DBYBHY-2007’de belirtilen Denklem (2.64) kullanılarak hesaplanan sayısal değerler dikkate alınmıştır. Farklı beton dayanım sınıfları için, (2.64) denklemi kullanılarak hesaplanan Elastisite Modülü değerleri Tablo 2.4’te verilmektedir.

$$E = 3250\sqrt{f_{ck}} + 14000 \text{ (Birimler N / mm}^2\text{)} \quad (2.64)$$

Tablo 2.4. Beton dayanım sınıflarına ait Elastisite Modülü değerleri

Beton Dayanım Sınıfı	E (N/mm ²)	F _{ck} (N/mm ²)	Hesaplanan E (N/mm ²)
C14/16	26000	14	26160,38651
C16/20	27000	16	27000,00000
C18/22,5	27500	18	27788,58223
C20/25	28000	20	28534,44185
C25/30	30000	25	30250,00000
C30/37	32000	30	31800,98312
C35/45	33000	35	33227,25930
C40/50	34000	40	34554,80479
C45/55	36000	45	35801,66278
C50/60	37000	50	36980,97039

Malzeme özelliğinin ölçeklendirilmesi işleminde Elastisite Modülünün ölçeklendirilmesi dikkate alınmıştır. Örneğin, C20/25 beton dayanım sınıfı için 1/10 ölçekli bir betona karşılık gelen dayanım $2,0 \text{ N/mm}^2$ 'dir. Bu dayanıma karşılık gelen Elastisite Modülü ise (2.64) denklemi kullanılarak $E_m=18596194,08 \text{ kN/m}^2$ değerinde elde edilmektedir.

SAP2000 programında modellenen sistemlerin modal analiz sonuçlarında elde edilen dinamik karakteristik değerleri ile matematik çözümler sonucunda elde edilen değerleri arasında belirli düzeyde farklılıkların olduğu gözlemlenmiştir. Belirtilen farklılıkları minimum seviyeye indirmek amacıyla, modele ait sonlu eleman ağı değiştirilmiş ve sonuçları yakınsatan en uygun model elde edilmiştir. Çalışma kapsamında, frekans, periyot, mod şekli ile yerdeğiştirme değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerler Bölüm 2.2.1.4'te sunulmaktadır.

2.2.1.3. Dinamik Karakteristikler ve Yapısal Davranışların Matematik Modellerle Elde Edilmesi

Kolon, çerçeve, basit kiriş ve konsol kirişlere ait matematik modeller kullanılarak bu sistemlere ait frekans ve yerdeğiştirme değerleri analitik olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar konsol kiriş örneği üzerinde, aşağıda detaylı olarak açıklanmaktadır.

Konsol kirişe ait prototip ve 1/2 geometrik ve kütle ölçekli model dikkate alınarak gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda elde edilen frekans değeri hesap adımları aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

Konsol kirişe ait prototip verileri

Boyutlar	$0,5 \times 0,5 \times 3 \text{ m}$
Sistem verileri	$\gamma = 24,0345 \text{ kN/m}^3$ $E_p = 2853441 \text{ kN/m}^2$ (C20/25 beton dayanım sınıfı) $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
Sistem rijitliği	$k = \frac{3E_p I}{L^3}$

Yukarıda belirtilen veriler dikkate alınarak gerçekleştirilen çözüm adımları aşağıda maddeler halinde belirtilmekte olup, elde edilen frekans değeri,

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{0,5 \times 0,5^3}{12} = 5,20833E-3 \text{ m}^4 \\
 k &= \frac{3 \times 28534441 \times 5,20833E-3}{3^3} = 16512,97612 \text{ kN/m} \\
 m &= \frac{0,5 \times 0,5 \times 3 \times 24,0345}{9,81} = 1,8375 \text{ kNs}^2/\text{m} \\
 \omega_n &= \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{16512,97612}{1,8375}} = 94,797962 \text{ rad/s} \\
 f_{n(p)} &= \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{94,797962}{2\pi} = 15,087564 \text{ Hz}
 \end{aligned}
 \tag{2.65}$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Konsol kirişe ait 1/2 geometrik ve kütle ölçekli model verileri

Boyutlar	$0,25 \times 0,25 \times 1,5 \text{ m}$
Sistem verileri	$\gamma = 24,0345 \text{ kN/m}^3$
	$E_p = 2853441 \text{ kN/m}^2$ (C20/25 beton dayanım sınıfı)
	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$
Sistem rijitliği	$k = \frac{3E_m I}{L^3}$

Yukarıda belirtilen veriler dikkate alınarak gerçekleştirilen çözüm adımları aşağıda maddeler halinde belirtilmekte olup, elde edilen frekans değeri,

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{0,25 \times 0,25^3}{12} = 3,255208333E-3 \text{ m}^4 \\
 k &= \frac{3 \times 28534441 \times 3,255208333E-3}{1,5^3} = 8256,493344 \text{ kN/m} \\
 m &= \frac{0,25 \times 0,25 \times 1,5 \times 24,0345}{9,81} = 0,2296875 \text{ kNs}^2/\text{m} \\
 \omega_n &= \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{8256,493344}{0,2296875}} = 189,5959854 \text{ rad/s} \\
 f_{n(m)} &= \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{189,5959854}{2\pi} = 30,17513827 \text{ Hz}
 \end{aligned}
 \tag{2.66}$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Elde edilen geometrik ve kütle ölçekli benzerlik formülü kullanılarak prototipe ait frekans değerinden, modele ait frekans değeri;

$$\begin{aligned} f_{n(m)} &= 2 \times 15,087564 \\ f_{n(m)} &= 30,1752 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (2.67)$$

olarak elde edilmektedir. Diğer taşıyıcı sistemlere ait frekans değerleri sonlu eleman analiz sonuçları, analitik çözümlene ve benzerlik formülüyle elde edilen sonuçlar farklı ölçeklendirme türlerine göre Tablo 2.5, 2.6 ve 2.7'de detaylı olarak sunulmaktadır.

Konsol kirişin prototip ve 1/2 geometrik ve kütle ölçekli model için yerdeğiştirme hesabında yapılan işlem adımları sırasıyla şöyledir;

Konsol kirişe ait prototip verileri

Boyutlar	0,5×0,5×3 m
Sistem verileri	$\gamma = 24,0345 \text{ kN} / \text{m}^3$ $E_p = 2853441 \text{ kN} / \text{m}^2$ (C20/25 beton dayanım sınıfı)
Sistem yerdeğiştirmesi	$\delta = \frac{PL^3}{3EI}$

Yukarıda belirtilen veriler dikkate alınarak gerçekleştirilen çözüm adımları aşağıda maddeler halinde belirtilmekte olup, yerdeğiştirme değeri,

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{0,5 \times 0,5^3}{12} = 5,20833E - 3 \text{ m}^4 \\ P &= W = 0,5 \times 0,5 \times 3 \times 24,0345 = 18,025875 \text{ kN} \\ \delta_p &= \frac{18,025875 \times 3^3}{3 \times 2853441 \times 5,20833E - 3} = 0,0010916 \text{ m} = 1,09 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \quad (2.68)$$

olarak elde edilmektedir. Toplu kütle kabulüne göre P yükü, sistem ağırlığı olarak uygulanmıştır.

Konsol kirişe ait 1/2 geometrik ve kütle ölçekli model verileri

Boyutlar	$0,25 \times 0,25 \times 1,5 \text{ m}$
Sistem verileri	$\gamma = 24,0345 \text{ kN} / \text{m}^3$ $E_p = 2853441 \text{ kN} / \text{m}^2$ (C20/25 beton dayanım sınıfı)
Sistem yerdeğiştirmesi	$\delta = \frac{PL^3}{3EI}$

Yukarıda belirtilen veriler dikkate alınarak gerçekleştirilen çözüm adımları aşağıda maddeler halinde belirtilmekte olup, frekans değeri,

$$\left. \begin{aligned}
 I &= \frac{0,25 \times 0,25^3}{12} = 3,255208333\text{E} - 3 \text{ m}^4 \\
 P = W &= 0,25 \times 0,25 \times 1,5 \times 24,0345 = 2,253234375 \text{ kN} \\
 \delta_p &= \frac{2,253234375 \times 1,5^3}{3 \times 2853441 \times 3,255208333\text{E} - 4} = 0,0002729045 \text{ m} = 0,2729 \text{ mm}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.69)$$

olarak elde edilmektedir. Toplu kütle kabulüne göre P yükü, sistem ağırlığı olarak uygulanmıştır. Elde edilen geometrik ve kütle ölçekli benzerlik formülü kullanılarak prototipe ait yerdeğiştirme değerinden, modele ait yerdeğiştirme değeri;

$$\begin{aligned}
 \delta_m &= \frac{1}{2^2} \times 1,0916 \\
 \delta_m &= 0,2729 \text{ mm}
 \end{aligned} \quad (2.70)$$

olarak elde edilmektedir. Diğer taşıyıcı sistemlere ait yerdeğiştirme değerleri sonlu eleman analiz sonuçları, analitik çözümlene ve benzerlik formülüyle elde edilen sonuçlar farklı ölçeklendirme türlerine göre Tablo 2.8, 2.9 ve 2.10'da verilmektedir.

Tablo 2.5. 1/2 ölçek oranı için beton taşıyıcı sistemlere ait olan sonlu eleman analizleri ile analitik çözümler sonucunda elde edilen frekans değerleri

Ölçeklendirme Türleri	Taşıyıcı Sistem Elemanları	Sonlu Eleman Analiz Sonuçları (Hz)		Formül Sonuçları		Analitik Çözümleme Sonuçları (Hz)		Formül Sonuçları	
		1/2		1/2		1/2		1/2	
		Prototip	Ölçekli Model	Ölçekli Model	Ölçekli Model	Prototip	Ölçekli Model	Ölçekli Model	Ölçekli Model
Geometrik	Kolon	30,1573	20,1049	21,3244	30,1750	21,3370	21,3370	21,3370	
	Çerçeve	26,4612	18,0261	18,7109	26,4653	18,7138	18,7138	18,7138	
	Kiriş	58,0622	41,0562	41,0562	60,3503	42,6741	42,6741	42,6741	
	Konsol	14,9363	10,5616	10,5616	15,0875	10,6685	10,6685	10,6685	
Geometrik ve Kütle	Kolon	30,1573	60,3146	60,3146	30,1750	60,3503	60,3503	60,3500	
	Çerçeve	26,4612	54,0359	52,9224	26,4653	52,9307	52,9307	52,9306	
	Kiriş	58,0622	116,1243	116,1244	60,3503	120,7004	120,7004	120,7006	
	Konsol	14,9363	29,8727	29,8726	15,0875	30,1751	30,1751	30,1750	
Malzeme	Kolon	30,1573	27,8169	28,9635	30,1750	27,8333	27,8333	28,9805	
	Çerçeve	26,4612	24,4076	25,4137	26,4653	24,4115	24,4115	25,4176	
	Kiriş	58,0622	53,5562	55,7637	60,3503	55,6667	55,6667	57,9612	
	Konsol	14,9363	13,7772	14,3450	15,0875	13,9167	13,9167	14,4902	
Geometrik ve Malzeme	Kolon	30,1573	18,5446	20,4803	30,1750	19,6812	19,6812	20,4923	
	Çerçeve	26,4612	16,6272	17,9702	26,4653	17,2616	17,2616	17,9730	
	Kiriş	58,0622	37,8700	39,4309	60,3503	39,3623	39,3623	40,9847	
	Konsol	14,9363	9,7420	10,1435	15,0875	9,8406	9,8406	10,2461	
Geometrik, Malzeme ve Kütle	Kolon	30,1573	55,6339	57,9269	30,1750	55,6667	55,6667	57,9609	
	Çerçeve	26,4612	49,8424	50,8274	26,4653	48,8229	48,8229	50,8353	
	Kiriş	58,0622	107,1124	111,5274	60,3502	111,3334	111,3334	115,9223	
	Konsol	14,9363	27,5544	28,6900	15,0875	27,8334	27,8334	28,9805	

Tablo 2.6. 1/5 ölçek oranı için beton taşıyıcı sistemlere ait olan sonlu eleman analizleri ile analitik çözümler sonucunda elde edilen frekans değerleri

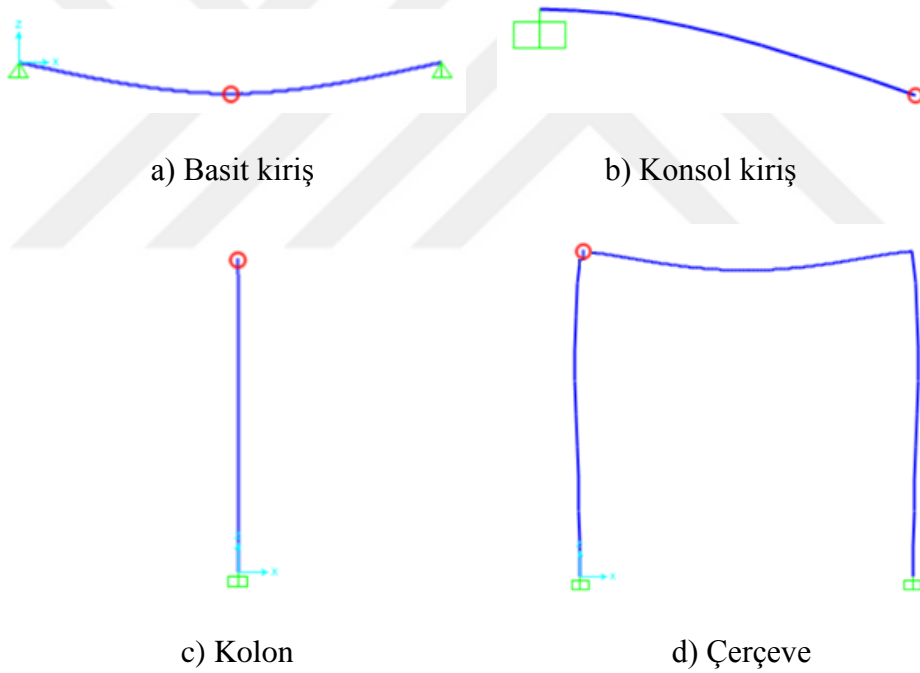
Ölçeklendirme Türleri	Taşıyıcı Sistem Elemanları	Sonlu Eleman Analiz Sonuçları (Hz)		Formül Sonuçları		Analitik Çözümleme Sonuçları (Hz)		Formül Sonuçları	
		1/5		1/5		1/5		1/5	
		Prototip	Ölçekli Model	Ölçekli Model	Ölçekli Model	Prototip	Ölçekli Model	Ölçekli Model	Ölçekli Model
Geometrik	Kolon	30,1573	13,4329	13,4868	30,1750	13,4947	13,4947		
	Çerçeve	26,4612	11,8849	11,8338	26,4653	11,8357	11,8356		
	Kiriş	58,0621	25,9662	25,9661	60,3503	26,9895	26,9895		
	Konsol	14,9363	6,6798	6,6797	15,0875	6,7474	6,7473		
Geometrik ve Kütle	Kolon	30,1573	150,7844	150,7865	30,1750	150,8757	150,8750		
	Çerçeve	26,4612	133,4035	132,3060	26,4653	132,3267	132,3265		
	Kiriş	58,0622	290,3108	290,3110	60,3503	301,7513	301,7515		
	Konsol	14,9363	74,6818	74,6815	15,0875	75,4378	75,4375		
Malzeme	Kolon	30,1573	25,5614	25,5614	30,1750	25,5765	25,5764		
	Çerçeve	26,4612	22,4286	22,4286	26,4653	22,4321	22,4320		
	Kiriş	58,0622	49,2136	49,2137	60,3503	51,1530	51,1531		
	Konsol	14,9363	12,6601	12,6600	15,0875	12,7882	12,7882		
Geometrik ve Malzeme	Kolon	30,1573	11,3858	11,4314	30,1750	11,4382	11,4381		
	Çerçeve	26,4612	10,0736	10,0304	26,4653	10,0319	10,0319		
	Kiriş	58,0622	22,0090	22,0090	60,3502	22,8763	22,8763		
	Konsol	14,9363	5,6618	5,6617	15,0875	5,7190	5,7191		
Geometrik, Malzeme ve Kütle	Kolon	30,1573	127,8053	127,8070	30,1750	127,8825	127,8820		
	Çerçeve	26,4612	113,0732	112,1429	26,4653	112,1605	112,1603		
	Kiriş	58,0622	246,0682	246,0683	60,3503	255,7651	255,7653		
	Konsol	14,9363	63,3005	63,3002	15,0875	63,8412	63,9410		

Tablo 2.7. 1/10 ölçek oranı için beton taşıyıcı sistemlere ait olan sonlu eleman analizleri ile analitik çözümler sonucunda elde edilen frekans değerleri

Ölçeklendirme Türleri	Taşıyıcı Sistem Elemanları	Sonlu Eleman Analiz Sonuçları (Hz)		Formül Sonuçları		Analitik Çözümleme Sonuçları (Hz)		Formül Sonuçları	
		1/10		1/10		1/10		1/10	
		Prototip	Ölçekli Model	Ölçekli Model	Ölçekli Model	Prototip	Ölçekli Model	Ölçekli Model	Ölçekli Model
Geometrik	Kolon	30,1573	9,5318	9,5366	30,1750	9,5421	9,5421		
	Çerçeve	26,4617	8,3219	8,3679	26,4653	8,3691	8,3690		
	Kiriş	58,0621	18,3608	18,3608	60,3503	19,0844	19,0844		
	Konsol	14,9363	4,7233	4,7233	15,0875	4,7711	4,7711		
Geometrik ve Kütle	Kolon	30,1573	301,5732	301,5730	30,1750	301,751	301,7500		
	Çerçeve	26,4617	263,2899	264,6170	26,4653	264,6535	264,6530		
	Kiriş	58,0622	580,6217	580,6220	60,3503	603,5027	603,5030		
	Konsol	14,9363	149,3637	149,3630	15,0875	150,8757	150,8750		
Malzeme	Kolon	30,1573	24,3455	24,3456	30,1750	24,3599	24,3599		
	Çerçeve	26,4617	21,3617	21,3622	26,4653	21,3651	21,3651		
	Kiriş	58,0622	46,8728	46,8728	60,3503	48,7199	48,7199		
	Konsol	14,9363	12,0579	12,0579	15,0875	12,1799	12,1799		
Geometrik ve Malzeme	Kolon	30,1573	7,6949	7,6987	30,1750	7,7032	7,7032		
	Çerçeve	26,4617	6,7182	6,7553	26,4653	6,7562	6,7562		
	Kiriş	58,0622	14,8224	14,8224	60,3503	15,4066	15,4066		
	Konsol	14,9363	3,8130	3,8130	15,0875	3,8516	3,8516		
Geometrik, Malzeme ve Kütle	Kolon	30,1573	243,4558	243,4560	30,1750	243,5995	243,5990		
	Çerçeve	26,4617	212,5503	213,6220	26,4653	213,6509	213,6510		
	Kiriş	58,0622	468,7277	468,7280	60,3503	487,1992	487,1990		
	Konsol	14,9363	120,5791	120,5790	15,0875	121,7997	121,7990		

Sonuçlardan görüldüğü üzere frekans değerleri için, sonlu eleman model ve analitik çözüm sonuçları oluşturulan benzerlik formülleri sonuçları ile yaklaşık sonuçlar vermektedir. Aynı ölçeğe sahip farklı sistemler arasındaki ölçek faktörü (f_m/f_p) sabit kalmaktadır. Farklı ölçeklendirme türlerine ait ölçek faktörleri de çarpım durumundadır. Örneğin, geometrik ölçeklendirmeye ait ölçek faktörü ile malzeme ölçeklendirmesine ait ölçek faktörü çarpıldığında, geometrik ve malzeme olarak ölçeklendirilmiş sisteme ait ölçeklendirme faktörü elde edilmektedir.

Modal analizler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler karşılaştırılarak doğruluğu teyit edildikten sonra, ilgili sistemlere ait düşey yerdeğiştirme değerleri elde edilmiştir. Yerdeğiştirmelerin elde edildiği düğüm noktaları, her bir sistem için maksimum yerdeğiştirme değerini veren noktalar olup, Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Her bir sistem üzerinde yerdeğiştirmelerin elde edildiği düğüm noktaları

Tablo 2.8. 1/2 ölçek oranı için beton taşıyıcı sistemlere ait olan sonlu eleman analizleri ile analitik çözümler sonucunda elde edilen yerdeğiştirme değerleri

Ölçeklendirme Türleri	Taşıyıcı Sistem Elemanları	Sonlu Eleman Analiz Sonuçları (mm)		Formül Sonuçları		Analitik Çözümleme Sonuçları (mm)		Formül Sonuçları	
		1/2		1/2		1/2		1/2	
		Prototip	Ölçekli Model	Ölçekli Model	Ölçekli Model	Prototip	Ölçekli Model	Ölçekli Model	
Geometrik	Kolon	0,0038	0,0076	0,0076	0,00379	0,00758	0,00758		
	Çerçeve	0,0061	0,0121	0,0122	0,0049	0,00985	0,00980		
	Kiriş	0,0737	0,1474	0,1468	0,0682	0,1364	0,1364		
	Konsol	1,1000	2,2000	2,2000	1,0916	2,1832	2,1836		
Geometrik ve Kütle	Kolon	0,0038	0,0009	0,0009	0,00379	0,000948	0,000975		
	Çerçeve	0,0061	0,0015	0,0015	0,0049	0,000559	0,001225		
	Kiriş	0,0737	0,0184	0,0184	0,0682	0,0171	0,0171		
	Konsol	1,1000	0,2784	0,2750	1,0916	0,2729	0,2729		
Malzeme	Kolon	0,0038	0,0045	0,0045	0,00379	0,00445	0,00445		
	Çerçeve	0,0061	0,007128	0,007169	0,0049	0,005791	0,005759		
	Kiriş	0,0737	0,0860	0,0866	0,0682	0,0802	0,0802		
	Konsol	1,1000	1,3000	1,29288	1,0916	1,2830	1,2830		
Geometrik ve Malzeme	Kolon	0,0038	0,0089	0,00893	0,00379	0,008909	0,008909		
	Çerçeve	0,0061	0,01426	0,01434	0,0049	0,011583	0,011518		
	Kiriş	0,0737	0,2000	0,1732	0,0682	0,1604	0,1603		
	Konsol	1,1000	2,6000	2,5858	1,0916	2,5660	2,5660		
Geometrik, Malzeme ve Kütle	Kolon	0,0038	0,0011	0,0011	0,00379	0,001114	0,0011		
	Çerçeve	0,0061	0,001782	0,001792	0,0049	0,000657	0,00143		
	Kiriş	0,0737	0,0217	0,0217	0,0682	0,0200	0,0200		
	Konsol	1,1000	0,3000	0,3232	1,0916	0,3208	0,3208		

Tablo 2.9. 1/5 ölçek oranı için beton taşıyıcı sistemlere ait olan sonlu eleman analizleri ile analitik çözümler sonucunda elde edilen yerdeğiştirme değerleri

Ölçeklendirme Türleri	Taşıyıcı Sistem Elemanları	Sonlu Eleman Analiz Sonuçları (mm)		Formül Sonuçları		Analitik Çözümleme Sonuçları (mm)		Formül Sonuçları	
		1/5		1/5		1/5		1/5	
		Prototip	Ölçekli Model	Ölçekli Model	Ölçekli Model	Prototip	Ölçekli Model	Ölçekli Model	Ölçekli Model
Geometrik	Kolon	0,0038	0,0190	<i>0,0190</i>	0,00379	0,01895	<i>0,01895</i>		
	Çerçeve	0,0061	0,03032	<i>0,0305</i>	0,0049	0,02464	<i>0,02450</i>		
	Kiriş	0,0737	0,4000	<i>0,3685</i>	0,0682	0,3411	<i>0,3410</i>		
	Konsol	1,1000	5,6000	<i>5,5000</i>	1,0916	5,4581	<i>5,4580</i>		
Geometrik ve Kütle	Kolon	0,0038	0,0002	<i>0,0002</i>	0,00379	0,000152	<i>0,000152</i>		
	Çerçeve	0,0061	0,000243	<i>0,000244</i>	0,0049	0,000121	<i>0,000196</i>		
	Kiriş	0,0737	0,0029	<i>0,00295</i>	0,0682	0,0027	<i>0,00273</i>		
	Konsol	1,1000	0,0445	<i>0,0440</i>	1,0916	0,0436	<i>0,04366</i>		
Malzeme	Kolon	0,0038	0,0053	<i>0,0053</i>	0,00379	0,00528	<i>0,00528</i>		
	Çerçeve	0,0061	0,008441	<i>0,00849</i>	0,0049	0,006859	<i>0,00682</i>		
	Kiriş	0,0737	0,1000	<i>0,10258</i>	0,0682	0,0950	<i>0,09493</i>		
	Konsol	1,1000	1,5000	<i>1,53111</i>	1,0916	1,5194	<i>1,5194</i>		
Geometrik ve Malzeme	Kolon	0,0038	0,0264	<i>0,0265</i>	0,00379	0,026379	<i>0,0264</i>		
	Çerçeve	0,0061	0,04221	<i>0,04245</i>	0,0049	0,034293	<i>0,0341</i>		
	Kiriş	0,0737	0,5000	<i>0,5129</i>	0,0682	0,4749	<i>0,4747</i>		
	Konsol	1,1000	7,7000	<i>7,6555</i>	1,0916	7,5972	<i>5,4580</i>		
Geometrik, Malzeme ve Kütle	Kolon	0,0038	0,0002	<i>0,0002</i>	0,00379	0,000211	<i>0,00211</i>		
	Çerçeve	0,0061	0,00034	<i>0,00034</i>	0,0049	0,00017	<i>0,00027</i>		
	Kiriş	0,0737	0,0041	<i>0,0041</i>	0,0682	0,0038	<i>0,0038</i>		
	Konsol	1,1000	0,0620	<i>0,0612</i>	1,0916	0,0608	<i>0,0608</i>		

Tablo 2.10. 1/10 ölçek oranı için beton taşıyıcı sistemlere ait olan sonlu eleman analizleri ile analitik çözümler sonucunda elde edilen yerdeğiştirme değerleri

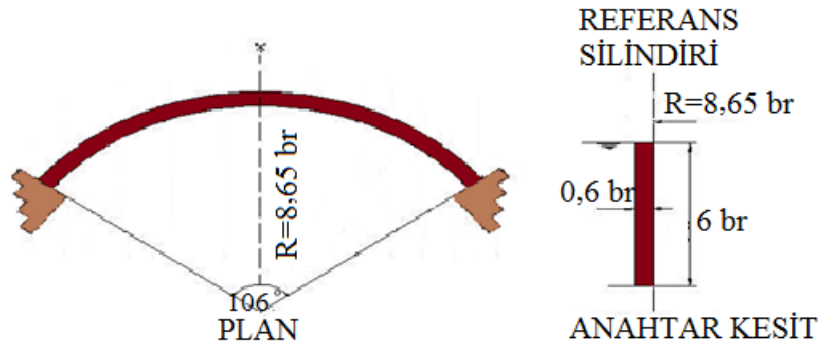
Ölçeklendirme Türleri	Taşıyıcı Sistem Elemanları	Sonlu Eleman Analiz Sonuçları (mm)		Formül Sonuçları	Analitik Çözümleme Sonuçları (mm)		Formül Sonuçları
		Prototip	1/10	1/10	Prototip	1/10	1/10
			Ölçekli Model	Ölçekli Model		Ölçekli Model	
Geometrik	Kolon	0,0038	0,03790	<i>0,03800</i>	0,00379	0,0379	<i>0,0379</i>
	Çerçeve	0,0061	0,06060	<i>0,0610</i>	0,0049	0,04927	<i>0,0490</i>
	Kiriş	0,0737	0,70000	<i>0,7370</i>	0,0682	0,6823	<i>0,6820</i>
	Konsol	1,1000	11,1000	<i>11,000</i>	1,0916	10,9162	<i>10,9160</i>
Geometrik ve Kütle	Kolon	0,0038	0,00004	<i>0,00004</i>	0,00379	0,00004	<i>0,00004</i>
	Çerçeve	0,0061	0,00006	<i>0,00006</i>	0,0049	0,00003	<i>0,00004</i>
	Kiriş	0,0737	0,00074	<i>0,00074</i>	0,0682	0,00068	<i>0,00068</i>
	Konsol	1,1000	0,01110	<i>0,0110</i>	1,0916	0,01092	<i>0,01092</i>
Malzeme	Kolon	0,0038	0,00580	<i>0,00583</i>	0,00379	0,00582	<i>0,00582</i>
	Çerçeve	0,0061	0,00931	<i>0,00936</i>	0,0049	0,00756	<i>0,00752</i>
	Kiriş	0,0737	0,10000	<i>0,11309</i>	0,0682	0,10469	<i>0,10465</i>
	Konsol	1,1000	1,70000	<i>1,6879</i>	1,0916	1,67500	<i>1,67498</i>
Geometrik ve Malzeme	Kolon	0,0038	0,05820	<i>0,05830</i>	0,00379	0,05816	<i>0,05820</i>
	Çerçeve	0,0061	0,09306	<i>0,09360</i>	0,0049	0,07561	<i>0,07520</i>
	Kiriş	0,0737	1,10000	<i>1,13090</i>	0,0682	1,04688	<i>1,04650</i>
	Konsol	1,1000	17,1000	<i>16,8790</i>	1,0916	16,7500	<i>16,7498</i>
Geometrik, Malzeme ve Kütle	Kolon	0,0038	0,00006	<i>0,00006</i>	0,00379	0,00006	<i>0,00006</i>
	Çerçeve	0,0061	0,00009	<i>0,00009</i>	0,0049	0,00005	<i>0,00007</i>
	Kiriş	0,0737	0,00113	<i>0,00113</i>	0,0682	0,00105	<i>0,00105</i>
	Konsol	1,1000	0,01709	<i>0,01688</i>	1,0916	0,01675	<i>0,01675</i>

Sonuçlardan görüldüğü üzere yerdeğiştirmeler için, sonlu eleman model ve analitik çözüm sonuçları oluşturulan benzerlik formüllerine ait sonuçlar ile yaklaşık sonuçlar vermektedir.

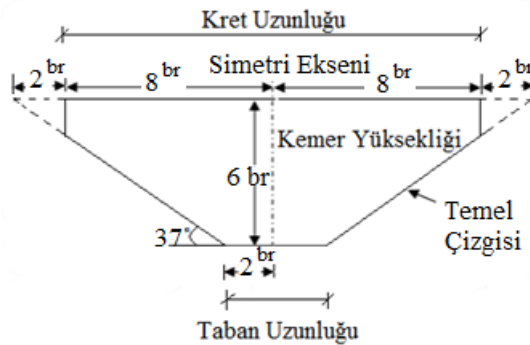
2.3. Tip-1 Kemer Baraj

1968 yılında İngiltere’de düzenlenen “Arch Dams (1968)” sempozyumunda önerilen farklı geometrilere sahip beş tip kemer baraj bulunmaktadır. Laboratuvar ortamında küçük ölçekli kemer baraj modellemek amacıyla önerilen beş tip barajdan Tip-1 barajı seçilmiştir. Tip-1 kemer barajı, sabit yarıçaplı, sabit açılı ve tek eğrilikli bir geometriye sahiptir.

Tip-1 kemer barajının plan ve anahtar kesit görünüşüne ait geometrik özellikleri Şekil 2.3’te verilmektedir, 106° ’lik sabit merkez açısına ve 8,65 birimlik sabit yarıçapa sahip Tip-1 kemer barajı, mansap yüzü referans kabul edilen simetrik bir barajdır. Tip-1 kemer barajının, yüksekliği 6 birim, kret ve taban genişliği 0,6 birimdir. En kesiti Şekil 2.4’da verilen trapez kesitli bir vadi üzerine yerleştirildiği kabul edilmiştir (Arch Dams, 1968). Tip-1 kemer barajın yerleştirildiği vadi, kret seviyesinde 16 birim, taban seviyesinde 4 birim genişliğe sahiptir.



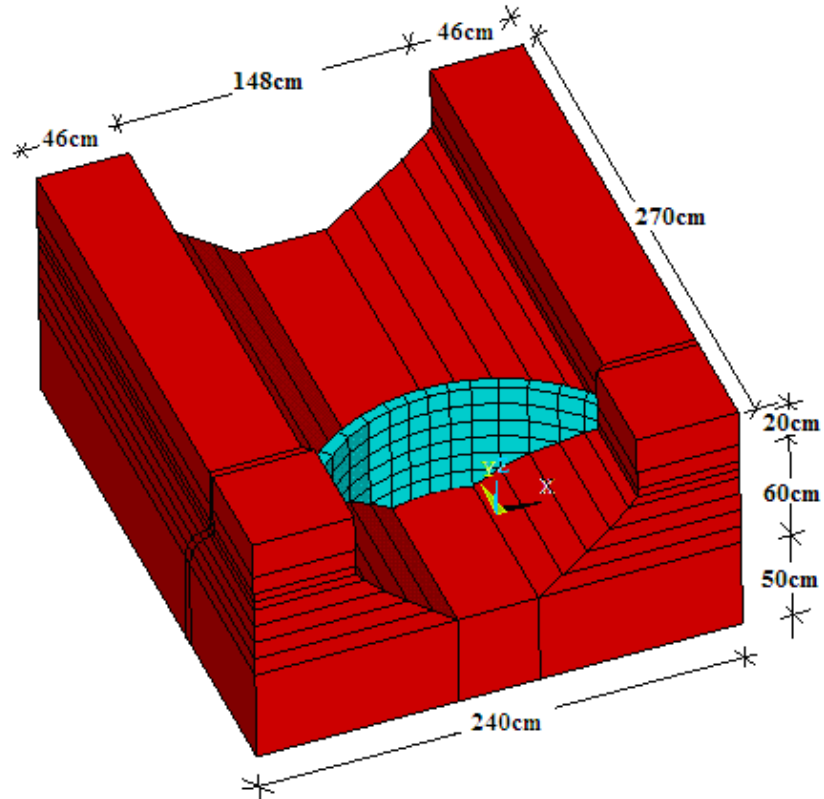
Şekil 2.3. Tip-1 kemer barajın geometrik özellikleri (Arch Dams, 1968).



Şekil 2.4. Tip-1 kemer barajın yerleştirildiği vadinin en kesiti (Arch Dams, 1968).

2.3.1. Laboratuvar Modelinin Oluşturulması

Boyutları birim olarak verilen Tip-1 kemer barajında, Sevim (2010) tarafından 1 birim=10cm seçilerek laboratuvar modeli oluşturulmuştur. Elde edilen verilere göre, baraj yüksekliği (H) 60cm, kret ve taban genişliği 6cm olarak belirlenmiş olup, barajın kret uzunluğu, memba kısmında 171,13cm ve mansap kısmında 160,03cm olarak hesaplanmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, Tip-1 kemer barajının dinamik davranışının gerçekçi bir şekilde belirlenebilmesi için baraj modeli, temel ve rezervuar içerecek şekilde geliştirilmiştir. Bu özelliklere göre hazırlanan Tip-1 kemer barajına ait üç boyutlu yapı-zemin etkileşimli model ve bu modelin sahip olduğu boyutlar Şekil 2.5’de verilmektedir (Sevim, 2010). Tip-1 kemer barajının laboratuvar modeline ait bazı fotoğraflar Şekil 2.6’da verilmektedir.



Şekil 2.5. Tip-1 kemer barajın üç boyutlu yapı-zemin-rezervuar modeli (Sevim, 2010).



Şekil 2.6. Tip-1 kemer barajın laboratuvar modeline ait bazı fotoğraflar (Sevim, 2010).

2.3.2. Deneysel Ölçümler

Sevim (2010) tarafından hazırlanmış doktora tezi kapsamında, laboratuvar ortamında modellenen Tip-1 kemer baraj üzerinde, baraj rezervuarının boş ve dolu olması durumları için yapılan çalışma kapsamında dinamik karakteristikler çevresel titreşim yöntemi ve zorlanmış titreşim yöntemleri ile birlikte elde edilmiştir. Tip-1 kemer barajının inşasında kullanılan betona ait malzeme özelliklerini belirlemek amacıyla tek eksenli basınç deneyleri ve ultrasonik hız testleri yapılmış olup, betonun birim kütle yoğunluğu (γ_{beton}) ve Poisson oranı (ν) sırasıyla yaklaşık olarak 2300kg/m^3 ve 0,2 elde edilmiştir. Oluşturulan sonlu eleman modelinde, elastisite modülleri değişken olarak seçilmiş olup deneysel frekanslara en yakın analitik frekansları elde edecek şekilde kemer ve temel betonunun elastisite modüllerini sırasıyla 15500 ve 20000MPa olarak tespit edilmiştir.

Aynı tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda; ivmeölçerlerin veri toplama ünitesine tanıtılması, ivmeölçerlerden sinyallerin alınarak veri toplama ünitesinde depolanması, depolanan sinyallerin sinyal koşullandırma işlemlerinin tamamlanması ve sinyal işleme programına aktarılması için Brüel&Kjaer Firması tarafından geliştirilen PULSE (2006) yazılımı kullanılmıştır. Çevresel titreşim testlerinden, PULSE (2006) yazılımıyla alınan sinyallerin işlenmesinde ve barajların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde Operational Modal Analysis (OMA, 2006) yazılımı kullanılıp, zorlanmış

titreşim testlerinden toplanan sinyaller ise özel bir sinyal işleme yazılımı olmadığından dolayı sadece PULSE (2006) yazılımında sinyal koşullama gerçekleştirilerek barajlara ait Frekans Davranış Fonksiyonları (FDF) elde edilmiştir (Sevim, 2010).

Laboratuvar modeli üzerinde Çevresel ve Zorlanmış Titreşim Yöntemlerine göre deneysel modal analiz ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sevim (2010) tarafından elde edilen ve tez kapsamında detaylı bir şekilde sunulan deneysel ve analitik dinamik karakteristikler Tablo 2.11’de özetlenmektedir.

Tablo 2.11. Tip-1 kemer baraja ait frekans değerleri (Sevim, 2010)

Mod	Frekans değerleri (Hz)		
	Sonlu Eleman Yöntemi	Çevresel titreşim yöntemi	Zorlanmış titreşim yöntemi
1	348,87	339,2	340
2	364,81	372,6	372
3	510,22	552,3	552
4	658,45	619,8	616
5	680,42	----	----
6	701,66	----	----
7	740,70	741,1	740
8	793,32	----	----
9	836,73	839,0	828

2.3.3. Sonlu Eleman Yöntem Sonuçları

Tip-1 kemer baraja ait sonlu eleman modeli, barajların dinamik karakteristiklerini ve yapısal özelliklerini belirlemeye yönelik yazılımın geliştirilmesi amacıyla bu tez kapsamında kullanılmıştır. Sonlu eleman modeli üzerinde yapılan çalışmalar sırasıyla anlatılmaktadır.

2.3.3.1. Modal Analiz ve Sonuçlar

Yapılan tez kapsamında, laboratuvar modeli mevcut ölçekli kemer baraj modeline ait olan ve deneysel yöntemlerle doğruluğu teyit edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapı-zemin-rezervuar ilişkili Tip-1 kemer barajının, temel etkileşimi olmadan yalnızca ankastre mesnetli olma durumu da ayrıca incelenmiştir.

Tip-1 kemer barajının, yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak ve ankastre mesnetli durumları için oluşturulan sonlu eleman modellerinin rezervuarın boş olma durumu dikkate alınarak gerçekleştirilen modal analizleri sonucunda elde edilen ilk on frekans ve periyot değerleri ile mod şekilleri Tablo 2.12 ve Tablo 2.13'te detaylı olarak sunulmaktadır. Analizlerde, deneysel ölçüm sonuçlarına göre iyileştirilen sonlu eleman modeline ait malzeme özellikleri $E=150000\text{MPa}$ olacak şekilde dikkate alınmıştır.

Tablo 2.12. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen dinamik karakteristikler

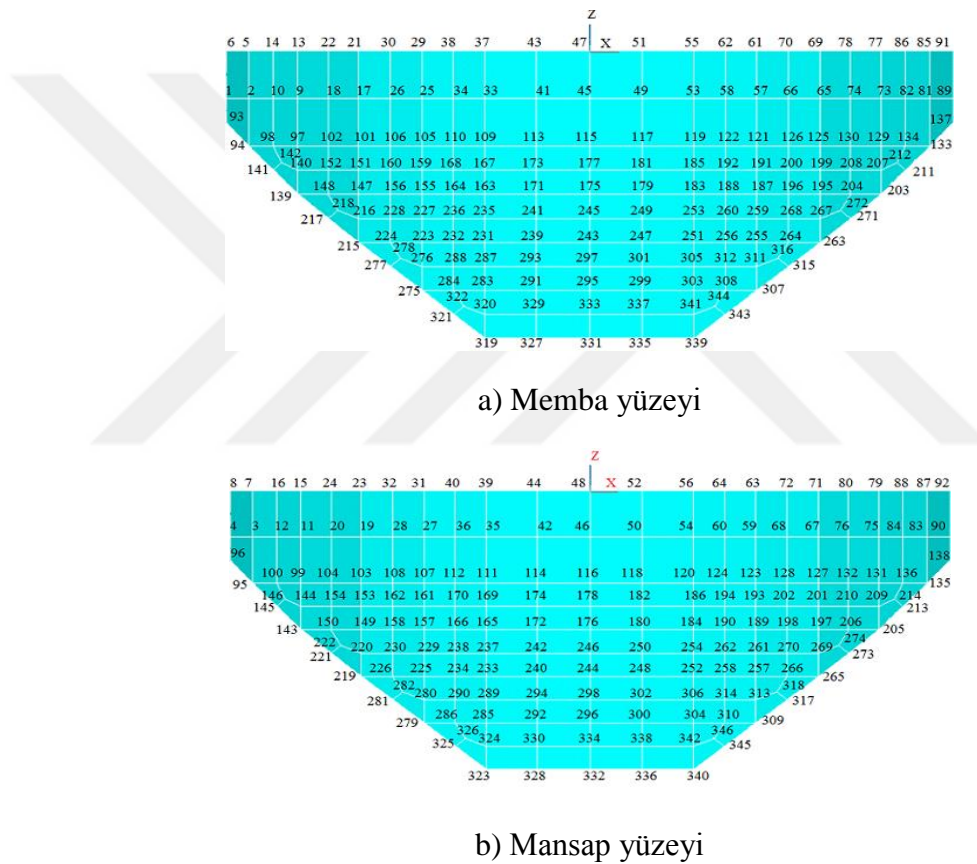
Mod	Sonlu Eleman Analiz Sonuçları		
	Frekans (Hz)	Periyot (sn)	Mod Şekli
1	344,58706	0,002020	Anti-Simetrik Eğilme
2	361,20676	0,002768	Simetrik Eğilme
3	505,5643	0,001978	Simetrik Eğilme
4	652,08387	0,001534	Anti-Simetrik Eğilme
5	674,36188	0,001483	Düşey Eğilme
6	860,11709	0,001163	Düşey Eğilme
7	890,79624	0,001125	Simetrik Eğilme
8	917,2344	0,001090	Düşey Eğilme
9	954,1686	0,001048	Simetrik Eğilme
10	958,79734	0,001043	Simetrik Eğilme

Tablo 2.13. Ankastre mesnetli durum dikkate alınarak Tip-1 kemer barajına ait dinamik karakteristikler

Mod	Sonlu Eleman Analiz Sonuçları		
	Frekans (Hz)	Periyot (sn)	Mod Şekli
1	362,74	0,0028161	Anti-Simetrik Eğilme
2	376,4	0,0027139	Simetrik Eğilme
3	525,12	0,0019453	Simetrik Eğilme
4	679,00	0,0015044	Anti-Simetrik Eğilme
5	698,13	0,0014632	Düşey Eğilme
6	904,96	0,0011288	Düşey Eğilme
7	923,45	0,0011062	Simetrik Eğilme
8	1196	0,0008541	Düşey Eğilme
9	1231,8	0,0008293	Simetrik Eğilme
10	1235,2	0,000827	Simetrik Eğilme

2.3.3.2. Statik Analiz ve Sonuçlar

Tip-1 kemer barajının statik analizleri, rezervuarının boş olması durumu dikkate alınarak yapının kendi ağırlığı altında gerçekleştirilmiştir. Statik analizler sonucunda, baraj gövdesi üzerindeki bütün düğüm noktalarındaki, yerdeğiştirmeler, asal gerilmeler ve asal şekildeğiştirmeler elde edilmiştir. Kemer gövdesi üzerinde, memba ve mansap yüzeylerinde toplam 346 adet düğüm noktası bulunmaktadır. Şekil 2.7’de, kemere ait memba ve mansap yüzeyleri düğüm noktaları numaraları verilmektedir.



Şekil 2.7. Kemere ait memba ve mansap yüzeyleri düğüm noktaları numaraları.

Kemer memba ve mansap yüzeyleri üzerinde bulunan düğüm noktalarından, yerdeğiştirme, asal gerilme ve asal şekildeğiştirmeler için ortak olarak kritik değerleri verecek olan 10 adet düğüm noktası seçilmiştir. Tip-1 kemer barajının statik analizleri sonucunda elde edilen yerdeğiştirme değerleri seçilen düğüm noktaları için Tablo 2.14 ve 2.15’te verilmektedir. Analizler sırasında, rezervuarın boş olma durumu dikkate alınmış

olup, elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi açısından hem yapı-zemin etkileşimli hem de ankastre mesnetli durum sonuçlar gösterilmektedir.

Tablo 2.14. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen yerdeğiştirme değerleri

Düğüm Noktaları	Yerdeğiştirmeler (cm)		
	Kret Doğrultusu	Memba-Mansap Doğrultusu	Düşey Doğrultu
48	7,8151E-20	1,7834E-05	-5,3070E-05
103	3,1855E-07	5,5562E-06	-4,4862E-05
115	2,3717E-20	1,3267E-05	-5,1530E-05
125	7,0024E-07	5,3223E-06	-4,5459E-05
169	-4,6662E-07	9,6484E-06	-4,7358E-05
185	1,5728E-06	9,8743E-06	-4,8836E-05
238	-7,9775E-07	5,5382E-06	-4,2099E-05
246	9,8158E-20	8,3769E-06	-4,3518E-05
260	1,9853E-06	5,8581E-06	-4,3770E-05
332	2,2340E-20	1,8290E-07	-2,6190E-05

Tablo 2.15. Ankastre mesnetli durum dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen yerdeğiştirme değerleri

Düğüm Noktaları	Yerdeğiştirmeler (cm)		
	Kret Doğrultusu	Memba-Mansap Doğrultusu	Düşey Doğrultu
48	-1,4647E-19	3,0146E-05	-2,2164E-05
103	3,7272E-06	1,5754E-06	-9,3188E-06
115	1,7788E-20	2,0645E-05	-2,2550E-05
125	-2,5929E-06	1,2345E-06	-8,8506E-06
169	1,5256E-06	1,2330E-05	-1,5822E-05
185	1,4175E-06	1,2109E-05	-1,8003E-05
238	1,5023E-06	5,6791E-06	-1,0008E-05
246	-2,6012E-20	1,2182E-05	-1,3890E-05
260	8,4133E-07	5,5834E-06	-1,1964E-05
332	0	0	0

Tip-1 kemer barajının statik analizleri sonucunda elde edilen asal gerilme değerleri seçilen düğüm noktaları için Tablo 2.16 ve 2.17’de verilmektedir.

Tablo 2.16. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen asal gerilmeler

Düğüm Noktaları	Asal Gerilmeler (MPa)	
	Maksimum Asal Gerilme	Minimum Asal Gerilme
48	-0,00014200	-0,00118540
103	0,00030622	-0,00416980
115	0,00042557	-0,00403250
125	0,00000265	-0,00389940
169	0,00001503	-0,00585250
185	0,00012880	-0,00527620
238	0,00002984	-0,00866150
246	-0,00001120	-0,00844570
260	0,00002497	-0,00747870
332	-0,00135100	-0,00852830

Tablo 2.17. Ankastre mesnetli durum dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen asal gerilmeler

Düğüm Noktaları	Asal Gerilmeler (MPa)	
	Maksimum Asal Gerilme	Minimum Asal Gerilme
48	-0,000155300	-0,0032515
103	0,00209600	-0,0042684
115	0,00110900	-0,0034780
125	0,00006272	-0,0046365
169	0,00002708	-0,0054861
185	0,00048807	-0,0049661
238	0,00002854	-0,0071746
246	-0,00001620	-0,0075281
260	0,00002407	-0,0073603
332	-0,00223850	-0,0085459

Tip-1 kemer barajının statik analizleri sonucunda elde edilen asal şekildeğiştirme değerleri seçilen düğüm noktaları için Tablo 2.18 ve 2.19'da verilmektedir.

Tablo 2.18. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen asal şekildeğiştirme değerleri

Düğüm Noktaları	Asal Şekildeğiştirmeler	
	Maksimum Asal Şekildeğiştirme	Minimum Asal Şekildeğiştirme
48	1,5484E-08	-6,7991E-08
103	7,5816E-08	-2,8226E-07
115	8,2162E-08	-2,7448E-07
125	5,3448E-08	-2,5871E-07
169	8,5846E-08	-3,8356E-07
185	7,8758E-08	-3,5364E-07
238	1,1440E-07	-5,1575E-07
246	1,2372E-07	-5,5104E-07
260	1,0653E-07	-4,9376E-07
332	6,1314E-08	-5,1287E-07

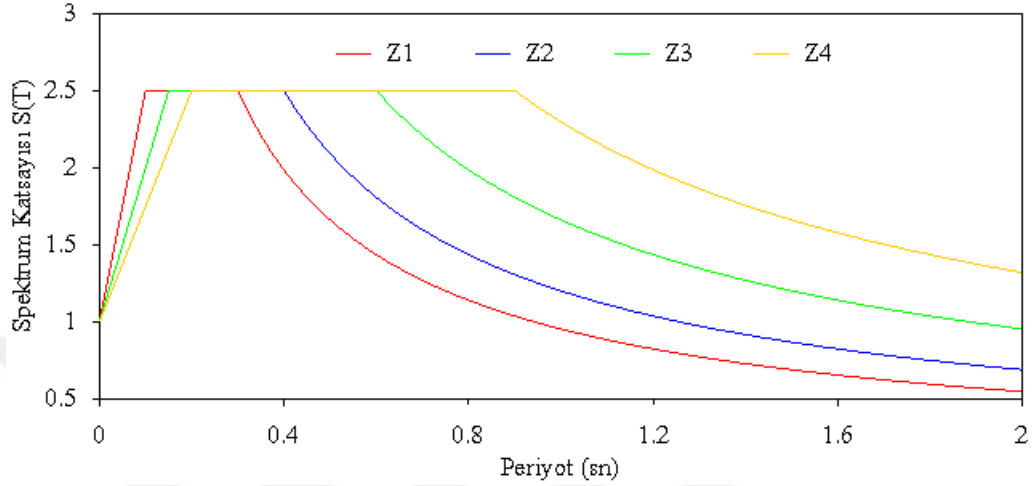
Tablo 2.19. Ankastre mesnetli durum dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen asal şekildeğiştirme değerleri

Düğüm Noktaları	Asal Şekildeğiştirmeler	
	Maksimum Asal Şekildeğiştirme	Minimum Asal Şekildeğiştirme
48	4,9696E-08	-1,9800E-07
103	1,9575E-07	-3,2961E-07
115	1,2043E-07	-2,6378E-07
125	6,6524E-08	-3,0941E-07
169	8,7642E-08	-3,5341E-07
185	9,8610E-08	-3,3772E-07
238	1,0287E-07	-4,7338E-07
246	1,2493E-07	-4,7602E-07
260	1,0459E-07	-4,8616E-07
332	2,6227E-07	-8,9783E-07

2.3.3.3. Dinamik Analiz ve Sonuçlar

Tip-1 barajının dinamik analizleri, Bölüm 1.6.2’de detaylı olarak anlatılan Mod Birleştirme Yöntemine göre gerçekleştirilmiştir. Analizler sırasında dikkate alınan ve %5 sönüm oranı için elde edilen spektrum grafikleri Şekil 2.8’de verilmektedir. İlgili grafikler,

50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem için elde edilmiş olup, Tip-1 kemer barajına rezervuarın boş olması durumunda yapı-zemin etkileşimi ile ankastre mesnetli durumlar göz önünde bulundurularak memba-mansap doğrultusunda uygulanmıştır.



Şekil 2.8. Yerel zemin sınıfları için hazırlanan spektrum eğrileri

Tip-1 kemer barajının spektrum analizi sonucunda elde edilen yerdeğiştirme değerleri seçilen düğüm noktaları için Tablo 2.20 ve 2.21’de verilmektedir. Analizler sırasında, rezervuarın boş olma durumu dikkate alınmış olup, elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi açısından hem yapı-zemin etkileşimli hem de ankastre mesnetli durum için sonuçlar gösterilmektedir.

Tablo 2.20. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen yerdeğiştirme değerleri

Düğüm Noktaları	Yerdeğiştirmeler (cm)			
	Z1	Z2	Z3	Z4
48	2,2270E-04	2,1301E-04	2,1301E-04	2,0817E-04
103	3,3530E-05	3,2073E-05	3,2073E-05	3,1344E-05
115	1,2778E-04	1,2223E-04	1,2223E-04	1,1945E-04
125	3,1161E-05	2,9806E-05	2,9806E-05	2,9129E-05
169	7,7629E-05	7,4254E-05	7,4254E-05	7,2567E-05
185	7,2703E-05	6,9542E-05	6,9542E-05	6,7962E-05
238	4,0173E-05	3,8426E-05	3,8426E-05	3,7553E-05
246	9,5207E-05	9,1068E-05	9,1068E-05	8,8998E-05
260	3,5417E-05	3,3877E-05	3,3877E-05	3,3107E-05
332	1,9967E-05	1,9099E-05	1,9099E-05	1,8665E-05

Tablo 2.21. Ankastre mesnetli durum dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen yerdeğiştirme değerleri

Düğüm Noktaları	Yerdeğiştirmeler (cm)			
	Z1	Z2	Z3	Z4
48	1,5163E-04	1,4503E-04	1,4503E-04	1,4174E-04
103	1,8147E-05	1,7358E-05	1,7358E-05	1,6963E-05
115	9,1853E-05	8,7860E-05	8,7860E-05	8,5863E-05
125	1,6317E-05	1,5608E-05	1,5608E-05	1,5253E-05
169	4,8946E-05	4,6818E-05	4,6818E-05	4,5754E-05
185	4,5475E-05	4,3498E-05	4,3498E-05	4,2509E-05
238	2,0403E-05	1,9516E-05	1,9516E-05	1,9073E-05
246	5,2402E-05	5,0124E-05	5,0124E-05	4,8985E-05
260	1,7415E-05	1,6658E-05	1,6658E-05	1,6279E-05
332	0	0	0	0

Tip-1 kemer barajının statik analizleri sonucunda elde edilen maksimum asal gerilme değerleri seçilen düğüm noktaları için Tablo 2.22 ve 2.23'te, minimum asal gerilme değerleri ise seçilen düğüm noktaları için Tablo 2.24 ve 2.25'te verilmektedir. Analizler sırasında, rezervuarın boş olma durumu dikkate alınmış olup, elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi açısından hem yapı-zemin etkileşimli hem de ankastre mesnetli durum için sonuçlar gösterilmektedir.

Tablo 2.22. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen maksimum asal gerilme değerleri

Düğüm Noktaları	Maksimum Asal Gerilmeler (MPa)			
	Z1	Z2	Z3	Z4
48	0,023823	0,022788	0,022788	0,02227
103	0,017686	0,016917	0,016917	0,016532
115	0,020964	0,020052	0,020052	0,019597
125	0,009437	0,009027	0,009027	0,008822
169	0,020436	0,019547	0,019547	0,019103
185	0,020623	0,019726	0,019726	0,019278
238	0,015846	0,015157	0,015157	0,014812
246	0,018644	0,017834	0,017834	0,017428
260	0,011436	0,010938	0,010938	0,01069
332	0,01288	0,01232	0,01232	0,01204

Tablo 2.23. Ankastre mesnetli durum dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen maksimum asal gerilme değerleri

Düğüm Noktaları	Maksimum Asal Gerilmeler (MPa)			
	Z1	Z2	Z3	Z4
48	0,013445	0,01286	0,01286	0,012568
103	0,012086	0,01156	0,01156	0,011297
115	0,013911	0,013306	0,013306	0,013004
125	0,00445	0,004257	0,004257	0,00416
169	0,009387	0,008979	0,008979	0,008775
185	0,008851	0,008466	0,008466	0,008274
238	0,009563	0,009147	0,009147	0,008939
246	0,006237	0,005966	0,005966	0,00583
260	0,005459	0,005222	0,005222	0,005103
332	0,009888	0,009458	0,009458	0,009243

Tablo 2.24. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen minimum asal gerilme değerleri

Düğüm Noktaları	Minimum Asal Gerilmeler (MPa)			
	Z1	Z2	Z3	Z4
48	0,000017779	0,000017005	0,000017005	0,000016619
103	0,00070608	0,00067538	0,00067538	0,00066003
115	0,0003923	0,00037524	0,00037524	0,00036671
125	-0,00032429	-0,00031019	-0,00031019	-0,00030315
169	-0,00019002	-0,00018176	-0,00018176	-0,00017763
185	0,000021127	0,000020209	0,000020209	0,000019749
238	-0,000064568	-0,000061761	-0,000061761	-0,000060357
246	0,00033532	0,00032074	0,00032074	0,00031345
260	-0,00012176	-0,00011646	-0,00011646	-0,00011382
332	0,0016058	0,001536	0,001536	0,0015011

Tablo 2.25. Ankastre mesnetli durum dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen minimum asal gerilme değerleri

Düğüm Noktaları	Minimum Asal Gerilmeler (MPa)			
	Z1	Z2	Z3	Z4
48	0,00016182	0,00015478	0,00015478	0,00015126
103	0,00015797	0,0001511	0,0001511	0,00014766
115	0,0001835	0,00017552	0,00017552	0,00017153
125	-0,00022422	-0,00021447	-0,00021447	-0,0002096
169	-0,0011011	-0,0010533	-0,0010533	-0,0010293
185	4,2004E-06	4,0177E-06	4,0177E-06	3,9263E-06
238	-0,00092956	-0,00088915	-0,00088915	-0,00086894
246	0,000098718	0,000094426	0,000094426	0,00009228
260	-0,000042164	-0,000040331	-0,000040331	-0,000039414
332	0,00042281	0,00040443	0,00040443	0,00039524

Tip-1 kemer barajının statik analizleri sonucunda elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme değerleri seçilen düğüm noktaları için Tablo 2.26 ve 2.27’de, minimum asal şekildeğiştirme değerleri ise seçilen düğüm noktaları için Tablo 2.28 ve 2.29’da verilmektedir. Analizler sırasında, rezervuarın boş olma durumu dikkate alınmış olup, elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi açısından hem yapı-zemin etkileşimli hem de ankastre mesnetli durum için sonuçlar gösterilmektedir.

Tablo 2.26. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme değerleri

Düğüm Noktaları	Maksimum Asal Şekildeğiştirmeler			
	Z1	Z2	Z3	Z4
48	1,5946E-06	1,5253E-06	1,5253E-06	1,4906E-06
103	1,2463E-06	1,1921E-06	1,1921E-06	1,1650E-06
115	1,3194E-06	1,2620E-06	1,2620E-06	1,2333E-06
125	6,8609E-07	6,5626E-07	6,5626E-07	6,4135E-07
169	1,5258E-06	1,4595E-06	1,4595E-06	1,4263E-06
185	1,3413E-06	1,2830E-06	1,2830E-06	1,2539E-06
238	1,2244E-06	1,1711E-06	1,1711E-06	1,1445E-06
246	1,2083E-06	1,1558E-06	1,1558E-06	1,1295E-06
260	7,8553E-07	7,5137E-07	7,5137E-07	7,3430E-07
332	8,4597E-07	8,0919E-07	8,0919E-07	7,9080E-07

Tablo 2.27. Ankastre mesnetli durum dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme değerleri

Düğüm Noktaları	Maksimum Asal Şekildeğiştirmeler			
	Z1	Z2	Z3	Z4
48	8,8409E-07	8,4565E-07	8,4565E-07	8,2643E-07
103	8,3497E-07	7,9867E-07	7,9867E-07	7,8052E-07
115	9,0631E-07	8,6691E-07	8,6691E-07	8,4721E-07
125	3,3324E-07	3,1875E-07	3,1875E-07	3,1151E-07
169	7,1448E-07	6,8342E-07	6,8342E-07	6,6788E-07
185	6,1758E-07	5,9072E-07	5,9072E-07	5,7730E-07
238	7,3285E-07	7,0099E-07	7,0099E-07	6,8506E-07
246	4,0388E-07	3,8632E-07	3,8632E-07	3,7754E-07
260	3,9477E-07	3,7761E-07	3,7761E-07	3,6902E-07
332	6,5032E-07	6,2205E-07	6,2205E-07	6,0791E-07

Tablo 2.28. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen minimum asal şekildeğiştirme değerleri

Düğüm Noktaları	Minimum Asal Şekildeğiştirmeler			
	Z1	Z2	Z3	Z4
48	1,9635E-07	1,8781E-07	1,8781E-07	1,8354E-07
103	-1,2774E-07	-1,2218E-07	-1,2218E-07	-1,1940E-07
115	3,6215E-07	3,4641E-07	3,4641E-07	3,3853E-07
125	-8,4921E-08	-8,1229E-08	-8,1229E-08	-7,9383E-08
169	-2,4597E-08	-2,3528E-08	-2,3528E-08	-2,2993E-08
185	1,1772E-07	1,1260E-07	1,1260E-07	1,1004E-07
238	-1,8366E-08	-1,7567E-08	-1,7567E-08	-1,7168E-08
246	2,2962E-07	2,1964E-07	2,1964E-07	2,1465E-07
260	-7,6498E-09	-7,3172E-09	-7,3172E-09	-7,1509E-09
332	5,2318E-08	5,0043E-08	5,0043E-08	4,8906E-08

Tablo 2.29. Ankastre mesnetli durum dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen minimum asal şekildeğiştirme değerleri

Node numaraları	Minimum Asal Şekildeğiştirmeler			
	Z1	Z2	Z3	Z4
48	1,0167E-07	9,7254E-08	9,7254E-08	9,5043E-08
103	-1,1209E-07	-1,0722E-07	-1,0722E-07	-1,0478E-07
115	2,0095E-07	1,9221E-07	1,9221E-07	1,8785E-07
125	-4,2187E-08	-4,0353E-08	-4,0353E-08	-3,9435E-08
169	-1,2496E-07	-1,1953E-07	-1,1953E-07	-1,1681E-07
185	3,3176E-08	3,1733E-08	3,1733E-08	3,1012E-08
238	-9,9894E-08	-9,5551E-08	-9,5551E-08	-9,3379E-08
246	8,6839E-08	8,3063E-08	8,3063E-08	8,1176E-08
260	1,3790E-09	1,3190E-09	1,3190E-09	1,2890E-09
332	3,0511E-09	2,9184E-09	2,9184E-09	2,8521E-09

2.3.4. Tip-1 Kemer Barajı İçin Ölçeklendirme

2.3.4.1. Statik Kuvvetler Altında Tip-1 Kemer Barajına Benzerlik Formüllerinin Uygulanması

Tip-1 kemer barajına ait laboratuvar model üzerinde gerçekleştirilen deneysel sonuçları ile sonlu eleman analiz sonuçları karşılaştırılarak oluşturulan modelin doğruluğu ortaya konmuştur. Böylelikle, aynı kemer baraj üzerinde farklı boyut ve malzeme özellikleri kullanılarak oluşturulacak sonlu eleman modellerinin de benzer doğrulukta sonuçlar vereceği kanaatine varılmıştır. Yapılan sonlu eleman modellemesinin doğruluğunun tespitindeki amaç, Tip-1 kemer baraja ait birimlerin belirli aralıklarda seçilmesi ile büyük ve gerçek baraj modelleri elde ederek farklı yüksekliklerdeki barajların dinamik karakteristiklerini ve yapısal özelliklerini elde etmektir. Bu amaç doğrultusunda, kemer yüksekliği 0,6-300m arasında değişecek şekilde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ülkemizde inşa edilen kemer baraj yükseklikleri dikkate alındığında, örnek olarak seçilen 201m, 240m, 250m ve 270m kemer yükseklikleri için ANSYS ile elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların boyut analizi ile elde edilen formül sonuçlarıyla karşılaştırılması yapılmıştır.

Tip-1 kemer barajı referans alındığında, barajın 201m, 240m, 250m ve 270m kemer yüksekliğine sahip olması için sırasıyla; 335, 400, 416,67 ve 450 kat büyütülmesi gerekmektedir. Tip-1 kemer barajın mevcut durumu prototip olarak isimlendirilirken, 335

kat ölçekli model (model-1), 400 kat ölçekli model (model-2), 416,67 kat ölçekli model (model-3) ve 450 kat ölçekli model (model-4) olarak isimlendirilmiştir. Tablo 2.30'da prototip ve modellere ait özellikler sunulmaktadır.

Tablo 2.30. Tip-1 kemer barajının prototip ve ölçekli modellerine (Model-1, Model-2, Model-3 ve Model-4) ait bazı özellikler

Tip-1 Kemer Barajı	Ölçek	Kemer yüksekliği (m)	Kemer iç yarıçapı (m)	Kret ve taban kalınlığı (m)	Elastisite Modülü (MPa)
Prototip	1	0,60	0,8650	0,06	15000
Model-1	335	201	289,78	20,1	34000
Model-2	400	240	346,00	24,0	34000
Model-3	416,67	250	360,42	25,0	34000
Model-4	450	270	389,25	27,0	34000

Boyut analiziyle elde edilen formüller kullanılarak Model-1, Model-2, Model-3 ve Model-4'e ait frekans değerleri elde edilmiştir. Tablo 2.12'de detaylı olarak verilen ve prototip için yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak elde edilen frekans değerleri kullanılarak, Denklem (2.46) yardımıyla frekans değerinin hesabında, büyük sistemin prototip ve küçük sistemin ise ölçekli model olduğu kabul edilmiş olup, bu nedenle de ölçek faktörü $\frac{h_m}{h_p} = \frac{1}{S}$ olarak dikkate alınmıştır. Burada yapılan çalışma kapsamında ise, prototip ifadesi laboratuvar modelini ifade ederken ölçekli model ise büyütülmüş barajları temsil etmektedir. Bu nedenle de, ilgili ölçek faktörü $\frac{h_m}{h_p} = S$, prototipin hacim ölçek faktörü $1/S^3$ olacak şekilde Denklem (2.53) yeniden düzenlenmiştir. Yeniden düzenlenen denkleme göre Model-1 için birinci doğal frekans değeri aşağıda hesaplanmıştır.

$$\left. \begin{aligned} f_{m_1} &= \frac{1}{S} \frac{\sqrt{\gamma_p}}{\sqrt{\gamma_{m_1}}} \frac{\sqrt{E_{m_1}}}{\sqrt{E_p}} f_p \\ f_{m_1} &= \frac{1}{335} \frac{\sqrt{2300}}{\sqrt{2300}} \frac{\sqrt{34000}}{\sqrt{15000}} 344,58706 = 1,548611 \text{ Hz} \end{aligned} \right\} \quad (2.71)$$

olarak elde edilirken, Model-2 için ise birinci doğal frekans değeri

$$\left. \begin{aligned} f_{m_2} &= \frac{1}{S} \frac{\sqrt{\gamma_p}}{\sqrt{\gamma_{m_2}}} \frac{\sqrt{E_{m_2}}}{\sqrt{E_p}} f_p \\ f_{m_2} &= \frac{1}{400} \frac{\sqrt{2300}}{\sqrt{2300}} \frac{\sqrt{34000}}{\sqrt{15000}} 344,58706 = 1,2969786 \text{ Hz} \end{aligned} \right\} \quad (2.72)$$

olarak hesap edilmektedir. Aynı denklemler kullanılarak elde edilen diğer frekans değerleri ise sonlu eleman analiz sonuçları ile birlikte Tablo 2.31 ve 2.32’de karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Tablo 2.31. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan Model-1 ve Model-2’ye ait elde edilen frekans değerleri

Mod Numarası	Frekans (Hz)			
	Model-1		Model-2	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
1	1,5486	1,5486311	1,297	1,2969786
2	1,6233	1,6233228	1,3595	1,3595329
3	2,2721	2,2720894	1,9029	1,9028749
4	2,9306	2,9305726	2,4544	2,4543545
5	3,0307	3,0306936	2,5382	2,5382059
6	3,8655	3,8655082	3,2374	3,2373631
7	4,0034	4,0033854	3,3528	3,3528352
8	4,1222	4,1222028	3,4523	3,4523449
9	4,2882	4,2881912	3,5914	3,5913601
10	4,309	4,3089935	3,6088	3,6087821

Tablo 2.32. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan Model-3 ve Model-4'e ait elde edilen frekans değerleri

Mod Numarası	Frekans (Hz)			
	Model-3		Model-4	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
1	1,2451	1,2450895	1,1529	1,1528698
2	1,3051	1,3051411	1,2085	1,2084736
3	1,8267	1,8267453	1,6914	1,6914444
4	2,3562	2,3561615	2,1816	2,1816485
5	2,4367	2,4366582	2,2562	2,256183
6	3,1078	3,1078437	2,8777	2,8776561
7	3,2187	3,2186961	2,9803	2,980298
8	3,3142	3,3142246	3,0688	3,068751
9	3,4477	3,4476782	3,1923	3,1923201
10	3,4644	3,4644031	3,2078	3,2078063

Ankastre mesnetli durum dikkate alınarak Tablo 2.13'teki frekans değerleri, aynı denklemlerde yerine koyularak elde edilen modellere ait frekans değerleri de sonlu eleman analiz sonuçları ile birlikte Tablo 2.33 ve 2.34'de karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Tablo 2.33. Ankastre mesnetli durumu dikkate alınan Model-1 ve Model-2'ye ait elde edilen frekans değerleri

Mod Numarası	Frekans (Hz)			
	Model-1		Model-2	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
1	1,6302	1,63021345	1,3653	1,365304
2	1,6916	1,69160374	1,4167	1,416718
3	2,36	2,35997597	1,9765	1,97648
4	3,0515	3,0515381	2,5557	2,555663
5	3,1375	3,13751147	2,6277	2,627666
6	4,0671	4,06703964	3,4062	3,406146
7	4,1501	4,15013675	3,4757	3,47574
8	5,3751	5,37502145	4,5017	4,50158
9	5,5361	5,53591256	4,6365	4,636327
10	5,5513	5,55119272	4,6492	4,649124

Tablo 2.34. Ankastre mesnetli durumu dikkate alınan Model-3 ve Model-4'e ait elde edilen frekans değerleri

Mod Numarası	Frekans (Hz)			
	Model-3		Model-4	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
1	1,3107	1,3106811	1,2136	1,2136033
2	1,36	1,3600385	1,2593	1,259305
3	1,8974	1,8974055	1,7569	1,756871
4	2,4534	2,453417	2,2717	2,2717006
5	2,5225	2,522539	2,3357	2,335703
6	3,2699	3,2698737	3,0277	3,0276851
7	3,3367	3,3366833	3,0895	3,0895462
8	4,3216	4,3214827	4,0015	4,0014049
9	4,451	4,4508381	4,1213	4,1211793
10	4,4632	4,4631232	4,1326	4,1325546

Tablo 2.31, 2.32, 2.33 ve 2.34'ten de görüleceği üzere ANSYS sonuçları ile boyut analiziyle elde edilen formül sonuçları birbirleriyle tam uyum içerisindedir.

Tip-1 kemer barajının yapı-zemin etkileşimli modeline ait Tablo 2.14'te verilen değerler kullanılarak, Denklem (2.53) yardımıyla yerdeğiştirmelerin hesabında, büyük sistemin prototip ve küçük sistemin ise ölçekli model olduğu kabul edilmiş olup, bu nedenle de ölçek faktörü $\frac{l_m}{l_p} = \frac{1}{S}$ olarak dikkate alınmıştır. Burada yapılan çalışma kapsamında ise, prototip ifadesi laboratuvar modelini ifade ederken ölçekli model ise büyütülmüş barajları temsil etmektedir. Bu nedenle de, ilgili ölçek faktörü $\frac{l_m}{l_p} = S$ olacak şekilde Denklem (2.53) yeniden düzenlenmiştir. Hesaplamalar sonucunda, kret orta noktasındaki 48 numaralı düğüm noktasına ait yerdeğiştirme değerleri hesaplanmıştır. Yeniden düzenlenen denklem aşağıda verilmektedir.

$$U_m = \frac{E_p \gamma_m}{E_m \gamma_p} S^2 U_p \quad (2.73)$$

Model-1 için 48 numaralı düğüm noktasının yerdeğiştirme değeri;

$$\left. \begin{aligned} U_{m_1} &= \frac{E_p}{E_{m_1}} \frac{\gamma_{m_1}}{\gamma_p} S^2 U_p \\ U_{m_1} &= \frac{15000}{34000} \times \frac{2300}{2300} \times 335^2 \times 1,7834E-5 = 0,8830 \text{ cm} \end{aligned} \right\} \quad (2.74)$$

şeklinde hesap edilmiştir. Model-2 için ise 48 numaralı düğüm noktasının yerdeğiştirme değeri;

$$\left. \begin{aligned} U_{m_2} &= \frac{E_p}{E_{m_2}} \frac{\gamma_{m_2}}{\gamma_p} S^2 U_p \\ U_{m_2} &= \frac{15000}{34000} \times \frac{2300}{2300} \times 400^2 \times 1,7834E-5 = 1,258871 \text{ cm} \end{aligned} \right\} \quad (2.75)$$

şeklinde hesap edilmiştir. Yukarıda açıklanan yöntem ile birlikte diğer modeller ve düğüm noktaları içinde memba-mansap doğrultusundaki yerdeğiştirme değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen değerler, sonlu eleman analiz sonuçları ile de Tablo 2.35 ve 2.36'da karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.35. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan Model-1 ve Model-2'ye ait elde edilen yerdeğiştirme değerleri

Düğüm Noktası	Yerdeğiştirme (cm) [Memba-Mansap Doğrultusunda]			
	Model-1		Model-2	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
48	0,88300	0,88298	1,25890	1,258871
103	0,27509	0,275093	0,39220	0,392202
115	0,65684	0,656863	0,93647	0,936494
125	0,26351	2,635126	0,37569	0,375692
169	0,4777	0,477702	0,68106	0,681064
185	0,48889	0,488887	0,69701	0,697009
238	0,27420	0,274202	0,39093	0,390932
246	0,41475	0,414749	0,59131	0,591311
260	0,29004	0,290041	0,41351	0,413513
332	0,00906	0,009056	0,01291	0,012911

Tablo 2.36. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan Model-3 ve Model-4'e ait elde edilen yerdeğiştirme değerleri

Düğüm Noktası	Yerdeğiştirme (cm) [Memba-Mansap Doğrultusunda]			
	Model-3		Model-4	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
48	1,366	1,3659839	1,5933	1,5932581
103	0,42558	0,4255736	0,49638	0,4963811
115	1,0161	1,0161774	1,1852	1,1852504
125	0,40766	0,4076582	0,47548	0,4754849
169	0,73901	0,739013	0,86197	0,861971
185	0,75631	0,7563157	0,88215	0,8821525
238	0,42419	0,4241949	0,49477	0,494773
246	0,64162	0,6416233	0,74838	0,7483775
260	0,4487	0,4486974	0,52335	0,5233523
332	0,014009	0,0140091	0,01634	0,01634

Ankastre mesnetli durum dikkate alınarak Tablo 2.15'teki memba-mansap doğrultusundaki yerdeğiştirme değerleri, düzenlenen aynı denklemlerle yerine koyularak elde edilen modellere ait yerdeğiştirme değerleri de sonlu eleman analiz sonuçları ile birlikte Tablo 2.37 ve 2.38'de karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Tablo 2.37. Ankastre mesnetli durumu dikkate alınan Model-1 ve Model-2'ye ait elde edilen yerdeğiştirme değerleri

Mod	Memba-Mansap Doğrultusu Yerdeğiştirme (cm)			
	Model-1		Model-2	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
48	1,492600	1,492559	2,128000	2,127953
103	0,077997	0,078	0,111200	0,111205
115	1,022100	1,022155	1,457300	1,457294
125	0,061123	0,061121	0,087143	0,087141
169	0,610480	0,610471	0,870370	0,870353
185	0,599550	0,599529	0,854780	0,854753
238	0,281180	0,281178	0,400870	0,400878
246	0,603130	0,603143	0,859890	0,859906
260	0,276440	0,27644	0,394120	0,394122
332	0	0	0	0

Tablo 2.38. Ankastre mesnetli durumu dikkate alınan Model-3 ve Model-4'e ait elde edilen yerdeğiştirme değerleri

Mod	Memba-Mansap Doğrultusu Yerdeğiştirme (cm)			
	Model-3		Model-4	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
48	2,309	2,3090137	2,6932	2,6931904
103	0,12066	0,1206668	0,14074	0,1407435
115	1,5813	1,5812906	1,8444	1,8443879
125	0,094558	0,0945557	0,11029	0,1102881
169	0,94443	0,9444085	1,1016	1,1015404
185	0,92751	0,9274811	1,0818	1,0817967
238	0,43498	0,434987	0,50736	0,5073608
246	0,93305	0,9330725	1,0883	1,0883184
260	0,42766	0,427657	0,49881	0,4988111
332	0	0	0	0

Tablo 2.35, 2.36, 2.37 ve 2.38'den görüleceği üzere ANSYS sonuçları ile boyut analiziyle elde edilen formül sonuçları birbirleriyle uyum içerindedir.

Tip-1 kemer barajının yapı-zemin etkileşimli modeline ait Tablo 2.16'da verilen değerler kullanılarak, Denklem (2.57) yardımıyla gerilmelerin hesabında, büyük sistemin prototip ve küçük sistemin ise ölçekli model olduğu kabul edilmiş olup, bu nedenle de

ölçek faktörü $\frac{l_m}{l_p} = \frac{1}{S}$ olarak dikkate alınmıştır. Burada yapılan çalışma kapsamında ise,

prototip ifadesi laboratuvar modelini ifade ederken ölçekli model ise büyütülmüş barajları temsil etmektedir. Bu nedenle de, ilgili ölçek faktörü $\frac{l_m}{l_p} = S$ olacak şekilde Denklem

(2.57) yeniden düzenlenmiştir. Hesaplamalar sonucunda, kret orta noktasındaki 48 numaralı düğüm noktasına ait maksimum ve minimum asal gerilme değerleri hesaplanmıştır. Yeniden düzenlenen denklem aşağıda verilmektedir.

$$\sigma_m = S \frac{\gamma_m}{\gamma_p} \sigma_p \quad (2.76)$$

Model-1 için 48 numaralı düğüm noktasının maksimum asal gerilme değeri,

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{m_1} &= S \frac{\gamma_{m_1}}{\gamma_p} \sigma_p \\ \sigma_{m_1} &= 335 \times \frac{2300}{2300} \times (-0,000142) = -0,04757 \text{ MPa} \end{aligned} \right\} \quad (2.77)$$

şeklinde hesap edilmiştir. Model-2 için ise 48 numaralı düğüm noktasının maksimum asal gerilme değeri,

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{m_2} &= S \frac{\gamma_{m_2}}{\gamma_p} \sigma_p \\ \sigma_{m_2} &= 400 \times \frac{2300}{2300} \times (-0,000142) = -0,0568 \text{ MPa} \end{aligned} \right\} \quad (2.78)$$

şeklinde hesap edilmiştir. Yukarıda açıklanan yöntem ile birlikte diğer modeller ve düğüm noktaları içinde asal gerilme değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen değerler, sonlu eleman analiz sonuçları ile de Tablo 2.39 ve 2.40’da karşılaştırılmıştır. Ankastrе mesnetli durum dikkate alınarak Tablo 2.17’deki asal gerilme değerleri, düzenlenen aynı denklemlerde yerine koyularak elde edilen modellere ait asal gerilme değerleri de sonlu eleman analiz sonuçları ile birlikte Tablo 2.41 ve 2.42’de karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Tablo 2.39. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan Model-1 ve Model-2’ye ait elde edilen asal gerilme değerleri

Düğüm Noktası	Asal Gerilmeler (MPa)							
	Model-1				Model-2			
	Maksimum Asal Gerilmeler		Minimum Asal Gerilmeler		Maksimum Asal Gerilmeler		Minimum Asal Gerilmeler	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
48	-0,04756	-0,04757	-0,39711	-0,39711	-0,05679	-0,0568	-0,47416	-0,47416
103	0,10258	0,102584	-1,3969	-1,39688	0,12249	0,122488	-1,6679	-1,66792
115	0,14257	0,142566	-1,3509	-1,35089	0,17023	0,170228	-1,613	-1,613
125	0,000887	0,000888	-1,3063	-1,3063	0,001059	0,00106	-1,5597	-1,55976
169	0,005034	0,005035	-1,9606	-1,96059	0,006011	0,006012	-2,341	-2,341
185	0,043147	0,043148	-1,7675	-1,76753	0,051519	0,05152	-2,1105	-2,11048
238	0,008146	0,009996	-2,6306	-2,9016	0,009727	0,011936	-3,1410	-3,4646
246	-0,00376	-0,00375	-2,8293	-2,82931	-0,00449	-0,00448	-3,3783	-3,37828
260	0,008366	0,008365	-2,5054	-2,50536	0,009989	0,009988	-2,9915	-2,99148
332	-0,45258	-0,45259	-2,857	-2,85698	-0,5404	-0,5404	-3,4113	-3,41132

Tablo 2.40. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan Model-3 ve Model-4'e ait elde edilen asal gerilme değerleri

Düğüm Noktası	Asal Gerilmeler (MPa)							
	Model-3				Model-4			
	Maksimum Asal Gerilmeler		Minimum Asal Gerilmeler		Maksimum Asal Gerilmeler		Minimum Asal Gerilmeler	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
48	-0,05915	-0,05917	-0,49392	-0,49392	-0,06389	-0,06390	-0,53343	-0,53343
103	0,12759	0,12759	-1,7374	-1,73743	0,1378	0,13780	-1,8764	-1,87641
115	0,17732	0,17732	-1,6802	-1,68022	0,19151	0,19151	-1,8146	-1,81463
125	0,001103	0,00110	-1,6248	-1,62476	0,001191	0,00119	-1,7547	-1,75473
169	0,006262	0,00626	-2,4386	-2,43856	0,006762	0,00676	-2,6336	-2,63363
185	0,053666	0,05367	-2,1984	-2,19843	0,057958	0,05796	-2,3743	-2,37429
238	0,010132	0,01243	-3,2719	-3,60899	0,010943	0,01343	-3,5337	-3,89768
246	-0,00468	-0,00467	-3,5191	-3,51907	-0,00505	-0,00504	-3,8005	-3,80057
260	0,010405	0,01040	-3,1161	-3,11615	0,011238	0,01124	-3,3654	-3,36542
332	-0,56292	-0,56292	-3,5535	-3,55349	-0,60795	-0,60795	-3,8377	-3,83774

Tablo 2.41. Ankastrre mesnetli durumu dikkate alınan Model-1 ve Model-2'ye ait elde edilen asal gerilme değerleri

Düğüm Noktası	Asal Gerilmeler (MPa)							
	Model-1				Model-2			
	Maksimum Asal Gerilmeler		Minimum Asal Gerilmeler		Maksimum Asal Gerilmeler		Minimum Asal Gerilmeler	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
48	-0,05202	-0,05203	-1,0892	-1,08925	-0,06211	-0,06212	-1,3006	-1,3006
103	0,70214	0,70216	-1,4299	-1,42991	0,83838	0,8384	-1,7074	-1,70736
115	0,37151	0,371515	-1,1651	-1,16513	0,4436	0,4436	-1,3912	-1,3912
125	0,02101	0,021011	-1,5532	-1,55323	0,025087	0,025088	-1,8546	-1,8546
169	0,009072	0,009072	-1,8378	-1,83784	0,010832	0,010832	-2,1944	-2,19444
185	0,163500	0,163503	-1,6636	-1,66364	0,19523	0,195228	-1,9864	-1,98644
238	0,009562	0,009561	-2,4035	-2,40349	0,011418	0,011416	-2,8698	-2,86984
246	-0,00542	-0,00543	-2,5219	-2,52191	-0,00647	-0,00648	-3,0112	-3,01124
260	0,0080635	0,008063	-2,4657	-2,4657	0,096281	0,009628	-2,9441	-2,94412
332	-0,7499	-0,7499	-2,8629	-2,86288	-0,8954	-0,8954	-3,4184	-3,41836

Tablo 2.42. Ankastre mesnetli durumu dikkate alınan Model-3 ve Model-4'e ait elde edilen asal gerilme değerleri

Düğüm Noktası	Asal Gerilmeler (MPa)							
	Model-3				Model-4			
	Maksimum Asal Gerilmeler		Minimum Asal Gerilmeler		Maksimum Asal Gerilmeler		Minimum Asal Gerilmeler	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
48	-0,0647	-0,06471	-1,3548	-1,3548	-0,06987	-0,06989	-1,4632	-1,46318
103	0,87332	0,87334	-1,7785	-1,77851	0,94318	0,9432	-1,9208	-1,92078
115	0,46209	0,46209	-1,4492	-1,44918	0,49905	0,49905	-1,5651	-1,5651
125	0,026132	0,02613	-1,9319	-1,93189	0,028223	0,02822	-2,0864	-2,08643
169	0,011283	0,01128	-2,2859	-2,28589	0,012186	0,01219	-2,4687	-2,46875
185	0,20336	0,20336	-2,0692	-2,06922	0,21963	0,21963	-2,2347	-2,23475
238	0,011894	0,01189	-2,9894	-2,98944	0,012845	0,01284	-3,2286	-3,22857
246	-0,00674	-0,00675	-3,1367	-3,13673	-0,00727	-0,00729	-3,3876	-3,38765
260	0,010029	0,01003	-3,0668	-3,06682	0,010832	0,01083	-3,3121	-3,31214
332	-0,93272	-0,93272	-3,5608	-3,56082	-1,0073	-1,00733	-3,8457	-3,84566

Tablo 2.39, 2.40, 2.41 ve 2.42'den de görüleceği üzere ANSYS sonuçları ile boyut analiziyle elde edilen formül sonuçları birbirleriyle tam uyum içerisindedir.

Tip-1 kemer barajının yapı-zemin etkileşimli modeline ait Tablo 2.18'de verilen değerler kullanılarak, Denklem (2.62) yardımıyla asal şekildeğiştirmelerin hesabında, büyük sistemin prototip ve küçük sistemin ise ölçekli model olduğu kabul edilmiş olup, bu

nedenle de ölçek faktörü $\frac{l_m}{l_p} = \frac{1}{S}$ olarak dikkate alınmıştır. Burada yapılan çalışma

kapsamında ise, prototip ifadesi laboratuvar modelini ifade ederken ölçekli model ise büyütülmüş barajları temsil etmektedir. Bu nedenle de, ilgili ölçek faktörü $\frac{l_m}{l_p} = S$ olacak

şekilde Denklem (2.62) yeniden düzenlenmiştir. Hesaplamalar sonucunda, kret orta noktasındaki 48 numaralı düğüm noktasına ait maksimum ve minimum asal şekildeğiştirme değerleri hesaplanmıştır. Düzenlenen denklem aşağıda verilmektedir.

$$\varepsilon_m = S \frac{\gamma_p}{\gamma_m} \frac{E_p}{E_m} \varepsilon_p \quad (2.79)$$

Model-1 için 48 numaralı düğüm noktasının asal şekildeğiştirme değeri,

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{m_1} &= S \frac{\gamma_p}{\gamma_{m_1}} \frac{E_p}{E_{m_1}} \varepsilon_p \\ \varepsilon_{m_1} &= 335 \times \frac{2300}{2300} \times \frac{15000}{34000} \times 1,5484E-8 = 2,2884E-6 \end{aligned} \right\} \quad (2.80)$$

şeklinde hesap edilmiştir. Model-2 için ise 48 numaralı düğüm noktasının asal şekildeğiştirme değeri,

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{m_2} &= S \frac{\gamma_p}{\gamma_{m_2}} \frac{E_p}{E_{m_2}} \varepsilon_p \\ \varepsilon_{m_2} &= 400 \times \frac{2300}{2300} \times \frac{15000}{34000} \times 1,5484E-8 = 2,7325E-6 \end{aligned} \right\} \quad (2.81)$$

şeklinde hesap edilmiştir. Yukarıda açıklanan yöntem ile birlikte diğer modeller ve düğüm noktaları içinde asal şekildeğiştirme değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen değerler, sonlu eleman analiz sonuçları ile de Tablo 2.43 ve 2.44'te karşılaştırılmıştır. Ankastre mesnetli durum dikkate alınarak Tablo 2.19'daki asal şekildeğiştirme değerleri, düzenlenen aynı denklemlerde yerine koyularak elde edilen modellere ait asal şekildeğiştirme değerleri de sonlu eleman analiz sonuçları ile birlikte Tablo 2.45 ve 2.46'da karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Tablo 2.43. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan Model-1 ve Model-2'ye ait elde edilen asal şekildeğiştirme değerleri

Düğüm Noktası	Asal Şekildeğiştirmeler							
	Model-1				Model-2			
	Maksimum Asal Şekildeğiştirmeler		Minimum Asal Şekildeğiştirmeler		Maksimum Asal Şekildeğiştirmeler		Minimum Asal Şekildeğiştirmeler	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
48	2,288E-06	2,288E-6	-1,005E-5	-1,005E-5	2,733E-06	2,733E-6	-1,200E-05	-1,200E-5
103	1,121E-05	1,121E-5	-4,172E-5	-4,172E-5	1,338E-05	1,338E-5	-4,981E-05	-4,981E-5
115	1,214E-05	1,214E-5	-4,057E-5	-4,057E-5	1,450E-05	1,450E-5	-4,844E-05	-4,844E-5
125	7,899E-06	7,899E-6	-3,824E-5	-3,824E-5	9,432E-06	9,432E-6	-4,566E-05	-4,566E-5
169	1,269E-05	1,269E-5	-5,669E-5	-5,669E-5	1,515E-05	1,515E-5	-6,769E-05	-6,769E-5
185	1,164E-05	1,164E-5	-5,227E-5	-5,227E-5	1,390E-05	1,390E-5	-6,241E-05	-6,241E-5
238	1,691E-05	1,691E-5	-7,623E-5	-7,622E-5	2,019E-05	2,019E-5	-9,102E-05	-9,102E-5
246	1,829E-05	1,829E-5	-8,144E-5	-8,144E-5	2,183E-05	2,183E-5	-9,724E-05	-9,724E-5
260	1,574E-05	1,575E-5	-7,298E-5	-7,297E-5	1,880E-05	1,880E-5	-8,713E-05	-8,713E-5
332	9,062E-06	9,062E-6	-7,580E-5	-7,579E-5	1,082E-05	1,082E-5	-9,051E-05	-9,049E-5

Tablo 2.44. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan Model-3 ve Model-4'e ait elde edilen asal şekildeğiştirme değerleri

Düğüm Noktası	Asal Şekildeğiştirmeler							
	Model-3				Model-4			
	Maksimum Asal Şekildeğiştirmeler		Minimum Asal Şekildeğiştirmeler		Maksimum Asal Şekildeğiştirmeler		Minimum Asal Şekildeğiştirmeler	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
48	2,846E-6	2,846E-6	-1,250E-5	-1,250E-5	3,074E-6	3,074E-6	-1,350E-5	-1,350E-5
103	1,394E-5	1,394E-5	-5,189E-5	-5,189E-5	1,505E-5	1,505E-5	-5,604E-5	-5,604E-5
115	1,510E-5	1,510E-5	-5,046E-5	-5,046E-5	1,631E-5	1,631E-5	-5,449E-5	-5,449E-5
125	9,825E-6	9,825E-6	-4,756E-5	-4,756E-5	1,061E-5	1,061E-5	-5,136E-5	-5,136E-5
169	1,578E-5	1,578E-5	-7,051E-5	-7,051E-5	1,704E-5	1,704E-5	-7,615E-5	-7,615E-5
185	1,448E-5	1,448E-5	-6,501E-5	-6,501E-5	1,564E-5	1,564E-5	-7,021E-5	-7,021E-5
238	2,103E-5	2,103E-5	-9,481E-5	-9,481E-5	2,271E-5	2,271E-5	-1,024E-4	-1,024E-4
246	2,274E-5	2,274E-5	-1,013E-4	-1,013E-4	2,456E-5	2,456E-5	-1,094E-4	-1,094E-4
260	1,958E-5	1,958E-5	-9,077E-5	-9,077E-5	2,115E-5	2,115E-5	-9,803E-5	-9,803E-5
332	1,127E-5	1,127E-5	-9,428E-5	-9,427E-5	1,217E-5	1,217E-5	-1,018E-4	-1,018E-4

Tablo 2.45. Ankastre mesnetli durumu dikkate alınan Model-1 ve Model-2'ye ait bazı düğüm noktalarında asal şekildeğiştirmeler

Düğüm Noktası	Asal Şekildeğiştirmeler							
	Model-1				Model-2			
	Maksimum Asal Şekildeğiştirmeler		Minimum Asal Şekildeğiştirmeler		Maksimum Asal Şekildeğiştirmeler		Minimum Asal Şekildeğiştirmeler	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
48	7,345E-6	7,345E-6	-2,926E-5	-2,926E-5	8,770E-6	8,770E-6	-3,494E-5	-3,494E-5
103	2,893E-5	2,893E-5	-4,632E-5	-4,871E-5	3,454E-5	3,454E-5	-5,531E-5	-5,817E-5
115	1,780E-5	1,780E-5	-3,644E-5	-3,899E-5	2,125E-5	2,125E-5	-4,351E-5	-4,655E-5
125	9,832E-6	9,832E-6	-4,573E-5	-4,573E-5	1,174E-5	1,174E-5	-5,460E-5	-5,460E-5
169	1,295E-5	1,295E-5	-5,223E-5	-5,223E-5	1,547E-5	1,547E-5	-6,237E-5	-6,237E-5
185	1,457E-5	1,457E-5	-4,991E-5	-4,991E-5	1,740E-5	1,740E-5	-5,960E-5	-5,960E-5
238	1,520E-5	1,520E-5	-6,996E-5	-6,996E-5	1,815E-5	1,815E-5	-8,354E-5	-8,354E-5
246	1,847E-5	1,846E-5	-7,035E-5	-7,035E-5	2,205E-5	2,205E-5	-8,400E-5	-8,400E-5
260	1,546E-5	1,546E-5	-7,185E-5	-7,185E-5	1,846E-5	1,846E-5	-8,579E-5	-8,579E-5
332	3,876E-5	3,876E-5	-7,422E-5	-7,422E-5	4,628E-5	4,628E-5	-8,862E-5	-8,862E-5

Tablo 2.46. Ankastre mesnetli durumu dikkate alınan Model-3 ve Model-4'e ait bazı düğüm noktalarında asal şekildeğişiklikler

Düğüm Noktası	Asal Şekildeğişiklikler							
	Model-3				Model-4			
	Maksimum Asal Şekildeğişiklikler		Minimum Asal Şekildeğişiklikler		Maksimum Asal Şekildeğişiklikler		Minimum Asal Şekildeğişiklikler	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
48	9,135E-6	9,135E-6	-3,640E-5	-3,640E-5	9,866E-6	9,866E-6	-3,931E-5	-3,931E-5
103	3,598E-5	3,598E-5	-5,761E-5	-6,059E-5	3,886E-5	3,886E-5	-6,222E-5	-6,544E-5
115	2,214E-5	2,214E-5	-4,532E-5	-4,849E-5	2,391E-5	2,391E-5	-4,894E-5	-5,237E-5
125	1,223E-5	1,223E-5	-5,688E-5	-5,688E-5	1,321E-5	1,321E-5	-6,143E-5	-6,143E-5
169	1,611E-5	1,611E-5	-6,497E-5	-6,497E-5	1,740E-5	1,740E-5	-7,016E-5	-7,016E-5
185	1,813E-5	1,813E-5	-6,208E-5	-6,208E-5	1,958E-5	1,958E-5	-6,705E-5	-6,705E-5
238	1,891E-5	1,891E-5	-8,702E-5	-8,702E-5	2,042E-5	2,042E-5	-9,398E-5	-9,398E-5
246	2,297E-5	2,297E-5	-8,750E-5	-8,750E-5	2,480E-5	2,480E-5	-9,450E-5	-9,450E-5
260	1,923E-5	1,923E-5	-8,937E-5	-8,937E-5	2,076E-5	2,076E-5	-9,652E-5	-9,652E-5
332	4,436E-7	4,436E-7	-9,231E-5	-9,231E-5	4,791E-7	4,791E-7	-9,970E-5	-9,970E-5

Tablo 2.43, 2.44, 2.45 ve 2.46'dan da görüleceği üzere ANSYS sonuçları ile boyut analiziyle elde edilen formül sonuçları birbirleriyle uyum içerisindedir.

Sonlu eleman analizleriyle elde edilen, frekans, yerdeğiştirme, asal gerilme ve asal şekildeğiştirme sonuçları ile benzerlik formülleri yardımıyla bulunan sonuçlar arasında ki hata oranları %0 olarak elde edilmektedir.

Benzerlik formüllerin Tip-1 kemer baraja uygulanmasında laboratuvar modeli mevcut olan küçük ölçekli baraj prototip kabul edilip büyütülmüş ölçekli durumları ise model olarak isimlendirilmiş olup benzerlik formülleri yeniden düzenlen yapısal davranışlara ait formüller Tablo 47'de verilmektedir.

Tablo 47. Frekans, yerdeğiřtirme, asal gerilme ve asal Őekildeğiřtirmelere ait dűzenlenmiř benzerlik forműlleri

Yapısal Davranış	Forműl
Frekans	$f_{m_2} = \frac{1}{S} \frac{\sqrt{\gamma_p}}{\sqrt{\gamma_{m_2}}} \frac{\sqrt{E_{m_2}}}{\sqrt{E_p}} f_p$
Yerdeğiştirme	$\delta_m = \frac{E_p}{E_m} \frac{\gamma_m}{\gamma_p} S^2 \delta_p$
Asal Gerilme	$\sigma_m = S \frac{\gamma_m}{\gamma_p} \sigma_p$
Asal Şekildeğiştirme	$\epsilon_m = S \frac{\gamma_p}{\gamma_m} \frac{E_p}{E_m} \epsilon_p$

2.3.4.2. Dinamik Kuvvetler Altında Tip-1 Kemer Barajına Benzerlik Forműllerinin Uygulanması

Zamana baęlı deęiřen yűkler altında gerĉekleřtirilen dinamik analiz sonuĉları karřılařtırılmalı olarak irdelendięinde, prototip baraj modelinden elde edilen yerdeęiřtirme, gerilme ve Őekildeęiřtirme deęerleri ile űlĉekli bir Őekilde bűyűtűlműř baraj modellerden elde edilen deęerlerin orantılı olmadıęı belirlenmiřtir. Dięer bir ifadeyle, prototip baraj modeli űzerinde ki herhangi bir dűęűm noktasında, dinamik analizler sonucunda elde edilen deęerlerin, belirli bir űlĉekle bűyűtűlműř baraj modeli űzerindeki aynı dűęűm noktasındaki deęere oranı, dięer dűęűm noktalarındaki oran ile aynı deęildir. Bu durum, dinamik analizler sonucunda elde edilen deęerlerin (yerdeęiřtirme, asal gerilme ve asal Őekildeęiřtirme) tek bir forműlle genelleřtirilemeyeceęini gűstermektedir. Bu nedenle, prototip sonuĉlarından referansla bűyűk űlĉekli gerĉek sistemlere ait sonuĉları yaklařık tahmin iĉin istatistiki bir yűntem olan ve sonuĉlar arasında eęri uydurarak istenilen verilere ulařılmasını saęlayan regresyon analizi kullanılmıřtır. Parametrik bir ĉalıřma olan regresyon analizinde, Tip-1 kemer baraj űzerinde istenilen herhangi bir verinin bařlangıĉ parametresi olarak kabul edilmesi, farklı parametreler ile farklı kombinasyonlardan oluřan analiz sonuĉlarıyla regresyon analizi yapılarak istenilen sonuĉların tamamını kapsayacak Őekilde bir eęri elde edilmesi ile bu eęrinin forműlűyle birlikte sonuca ulařılması gerĉekleřtirilmektedir. Seĉilen kemer baraj űzerinde bulunan bűtűn dűęűm noktalarında, tek bir eęri kullanılarak istenilen deęerlerin ifade edilmesi doęru bir yaklařım olmayacaęı gűrűlműřtir. Őzellikle gerilme ve Őekildeęiřtirme eęrilerinde, belirlenen forműlűn verileri

kapsama değeri olan R^2 değerinin %50'den düşük değerler alması uydurulacak eğrinin kemer üzerinde bulunan her bir düğüm noktası için ayrı ayrı ele alınıp farklı formüllerle ifade edilmesi gerektiğini ortaya çıkarmıştır.

2.3.4.2.1. Ölçek, Malzeme ve Dinamik Kuvvetlere göre Analiz Parametrelerinin Seçilmesi

Tip-1 kemer barajının, yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak ve ankastre mesnetli durumları için oluşturulan modeller esas alınarak; 1, 10, 20, ..., 500 kat ölçekli toplam 102 adet sonlu eleman modeli elde edilmiştir. Ölçekler kemer yüksekliği olarak ifade edildiğinde 0,60m-300m arasında değişen değerler almakta olup, bu değerler regresyon analizi için de ilk parametreyi oluşturmaktadır. İkinci parametre olarak seçilen Elastisite Modülü için, her bir modelde C14/16, C16/20, C18/22,5, C20/25, C25/30, C30/37, C35/45, C40/50 ve C45/55 olmak üzere dokuz farklı beton dayanım sınıfı göz önünde bulundurulmuştur. İki parametrenin esas alınmasıyla ve parametrelerin kombinasyonlarıyla oluşturulan 918 modele, dört zemin grubu olan Z1, Z2, Z3 ve Z4'ün dikkate alınmasıyla 3672 tepki spektrum analizi uygulanmıştır. Tüm analizler ANSYS (2016) sonlu eleman programıyla gerçekleştirilmiştir.

2.3.4.2.2. Analizlerin Gerçekleştirilmesi ve Sonuçların Düzenlenmesi

Analizlerden elde edilen sonuçlar, her bir düğüm noktasına ait yerdeğiştirmeleri, maksimum ve minimum asal gerilmeleri, maksimum ve minimum asal şekildeğiştirmeleri kapsamaktadır. Her bir düğüm noktasının, 102 farklı model için dokuz farklı beton dayanım sınıfına göre elde edilen sonuçlar alt alta gelecek şekilde sıralanarak regresyon analizi için uygun hale getirilmiştir. Şekil 2.9'da yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı baraj Z1 zemin sınıfına göre gerçekleştirilen spektrum analizleri sonucunda oluşan ve 1 nolu düğüm noktası için elde edilen sonuçların sıralanmasına ait bir parçanın gösterilimi verilmektedir. 1 nolu düğüm noktası için toplam veri 459 satırdan yani 459 gözlem sayısından oluşmaktadır.

Olcek	Elastisite	UY	S1	S3	EPEL1	EPEL3
1	0.26150000E+07	0.12860686E-05	0.15003240E+00	0.19274174E-01	0.59538700E-07	0.11589562E-09
1	0.27000000E+07	0.12455825E-05	0.15003247E+00	0.19274160E-01	0.57664363E-07	0.11224799E-09
1	0.27500000E+07	0.12229335E-05	0.15003242E+00	0.19274151E-01	0.56615903E-07	0.11020462E-09
1	0.28000000E+07	0.12010942E-05	0.15003236E+00	0.19274148E-01	0.55604877E-07	0.10823466E-09
1	0.30000000E+07	0.11210242E-05	0.15003239E+00	0.19274150E-01	0.51897900E-07	0.10102342E-09
1	0.32000000E+07	0.10509566E-05	0.15003236E+00	0.19274152E-01	0.48654265E-07	0.94704126E-10
1	0.33000000E+07	0.10191076E-05	0.15003223E+00	0.19274131E-01	0.47179851E-07	0.91831142E-10
1	0.34000000E+07	0.98913987E-06	0.15003250E+00	0.19274168E-01	0.45792299E-07	0.89138921E-10
1	0.36000000E+07	0.93418686E-06	0.15003249E+00	0.19274175E-01	0.43248276E-07	0.84184775E-10
10	0.26150000E+07	0.12907803E-03	0.16536581E+01	0.21211701E+00	0.65179499E-06	-0.24116055E-08
10	0.27000000E+07	0.12499671E-03	0.16482444E+01	0.21145596E+00	0.62932563E-06	-0.22222737E-08
10	0.27500000E+07	0.12271398E-03	0.16451488E+01	0.21107800E+00	0.61678867E-06	-0.21181334E-08
10	0.28000000E+07	0.12051307E-03	0.16421193E+01	0.21070811E+00	0.60472241E-06	-0.20190024E-08
10	0.30000000E+07	0.11244938E-03	0.16326942E+01	0.20959042E+00	0.56131817E-06	-0.17194775E-08
10	0.32000000E+07	0.10539805E-03	0.16251452E+01	0.20871796E+00	0.52389380E-06	-0.14965920E-08
10	0.33000000E+07	0.10219365E-03	0.16215661E+01	0.20830409E+00	0.50694171E-06	-0.13980349E-08
10	0.34000000E+07	0.99178279E-04	0.16181502E+01	0.20789647E+00	0.49103770E-06	-0.13083276E-08
10	0.36000000E+07	0.93651309E-04	0.16116434E+01	0.20712021E+00	0.46196972E-06	-0.11480458E-08
20	0.26150000E+07	0.56609554E-03	0.39677804E+01	0.50785385E+00	0.15546846E-05	-0.13485222E-07
20	0.27000000E+07	0.54666327E-03	0.39459581E+01	0.50497714E+00	0.14977360E-05	-0.12783323E-07
20	0.27500000E+07	0.53581989E-03	0.39335042E+01	0.50333516E+00	0.14660188E-05	-0.12395660E-07
20	0.28000000E+07	0.52538062E-03	0.39213178E+01	0.50172830E+00	0.14355288E-05	-0.12025278E-07
20	0.30000000E+07	0.48727310E-03	0.38784514E+01	0.49609104E+00	0.13256011E-05	-0.10777992E-07
20	0.32000000E+07	0.45414146E-03	0.38407300E+01	0.49113834E+00	0.12309727E-05	-0.97625326E-08
20	0.33000000E+07	0.43914718E-03	0.38228881E+01	0.48879490E+00	0.11882677E-05	-0.93103657E-08
20	0.34000000E+07	0.42507556E-03	0.38057306E+01	0.48652515E+00	0.11482794E-05	-0.88919060E-08
20	0.36000000E+07	0.39937906E-03	0.37730958E+01	0.48220724E+00	0.10754329E-05	-0.81385718E-08
30	0.26150000E+07	0.13968495E-02	0.69386936E+01	0.91157891E+00	0.27061736E-05	-0.32509228E-07
30	0.27000000E+07	0.13468514E-02	0.68890709E+01	0.90520437E+00	0.26026064E-05	-0.30948981E-07
30	0.27500000E+07	0.13221775E-02	0.68939052E+01	0.87991321E+00	0.25603166E-05	-0.29278275E-07
30	0.28000000E+07	0.12953216E-02	0.68662826E+01	0.87647760E+00	0.25047317E-05	-0.28466206E-07
30	0.30000000E+07	0.11974832E-02	0.67660196E+01	0.86413832E+00	0.23042222E-05	-0.25647955E-07
30	0.32000000E+07	0.11126808E-02	0.66760224E+01	0.85308995E+00	0.21319360E-05	-0.23304805E-07
30	0.33000000E+07	0.10743907E-02	0.66335777E+01	0.84787802E+00	0.20544003E-05	-0.22261223E-07
30	0.34000000E+07	0.10385258E-02	0.65935066E+01	0.84286603E+00	0.19821987E-05	-0.21273464E-07
30	0.36000000E+07	0.97316291E-03	0.65175363E+01	0.83336124E+00	0.18509851E-05	-0.19497015E-07
40	0.26150000E+07	0.27104088E-02	0.10615614E+02	0.13893931E+01	0.41300383E-05	-0.58291379E-07
40	0.27000000E+07	0.26103584E-02	0.10528293E+02	0.13783383E+01	0.39676816E-05	-0.55542522E-07
40	0.27500000E+07	0.25546442E-02	0.10478539E+02	0.13720384E+01	0.38774512E-05	-0.54022264E-07

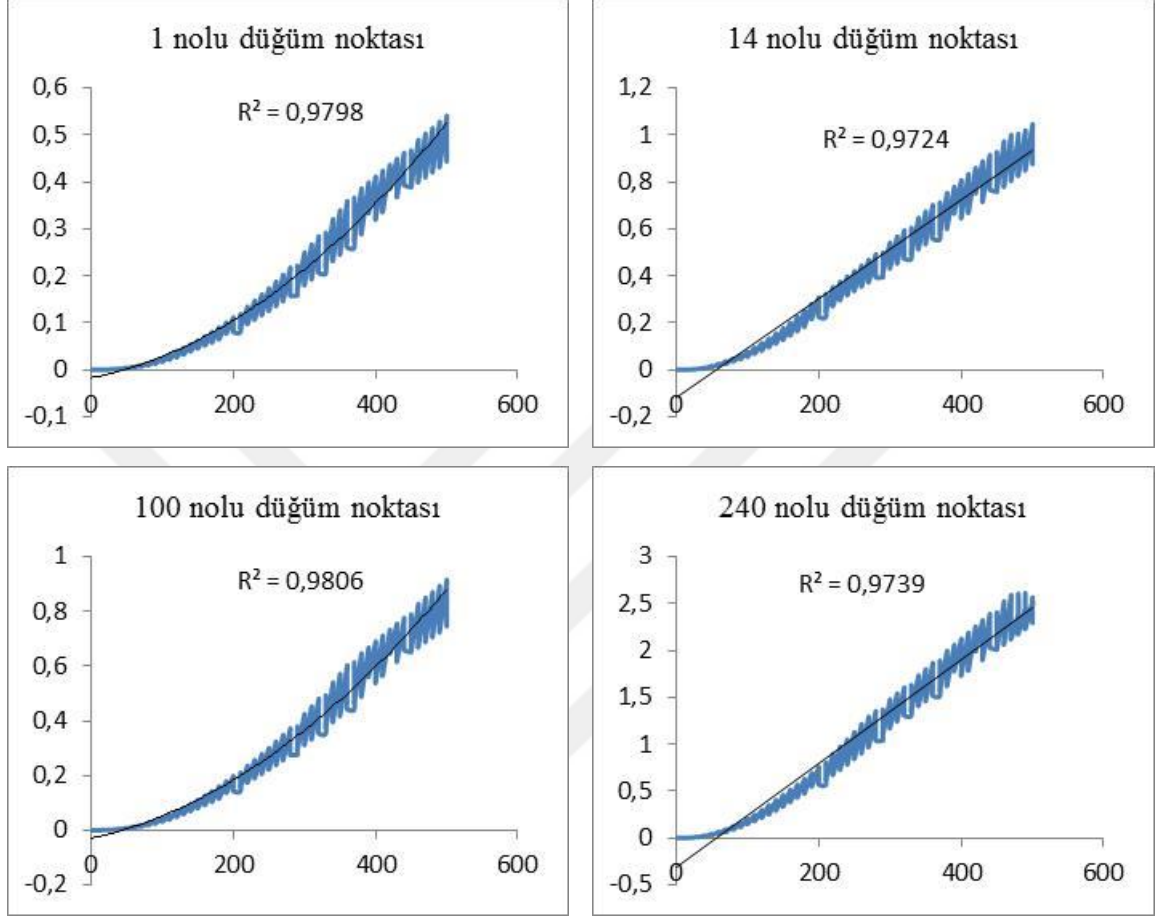
Şekil 2.9. Regresyon analizi için elde edilen sonuçların sıralanmasına ait bir parça görüntü

Yukarıda şekilde, her bir düğüm noktasına ait veriler bütün zemin sınıflarına göre ankastreli ve yapı-zemin etkileşimli model için elde edilmiş olup, toplam 2768 adet farklı dosya oluşturulmuştur.

2.3.4.2.3. Sonuçların Dağılım Grafiklerinin İncelenmesi

Elde edilen veriler arasında herhangi bir ilişkinin var olup olmadığı ya da ilişki var ise doğrusal veya doğrusal olmayan ilişki mi olduğu ilk adım olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, EXCEL yazılımıyla istenilen grafikler oluşturulmuş olup veriler arasındaki ilişki detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan genel inceleme sonucunda, yerdeğiştirmelere ait verilerin dağılımında genellikle doğrusal ilişki tespit edilmiştir. Buna rağmen bazı düğüm noktalarında doğrusal olmayan ilişkinin mevcut olduğu görülmüştür. Bu nedenle, yerdeğiştirme sonuçları için her bir düğüm noktasının

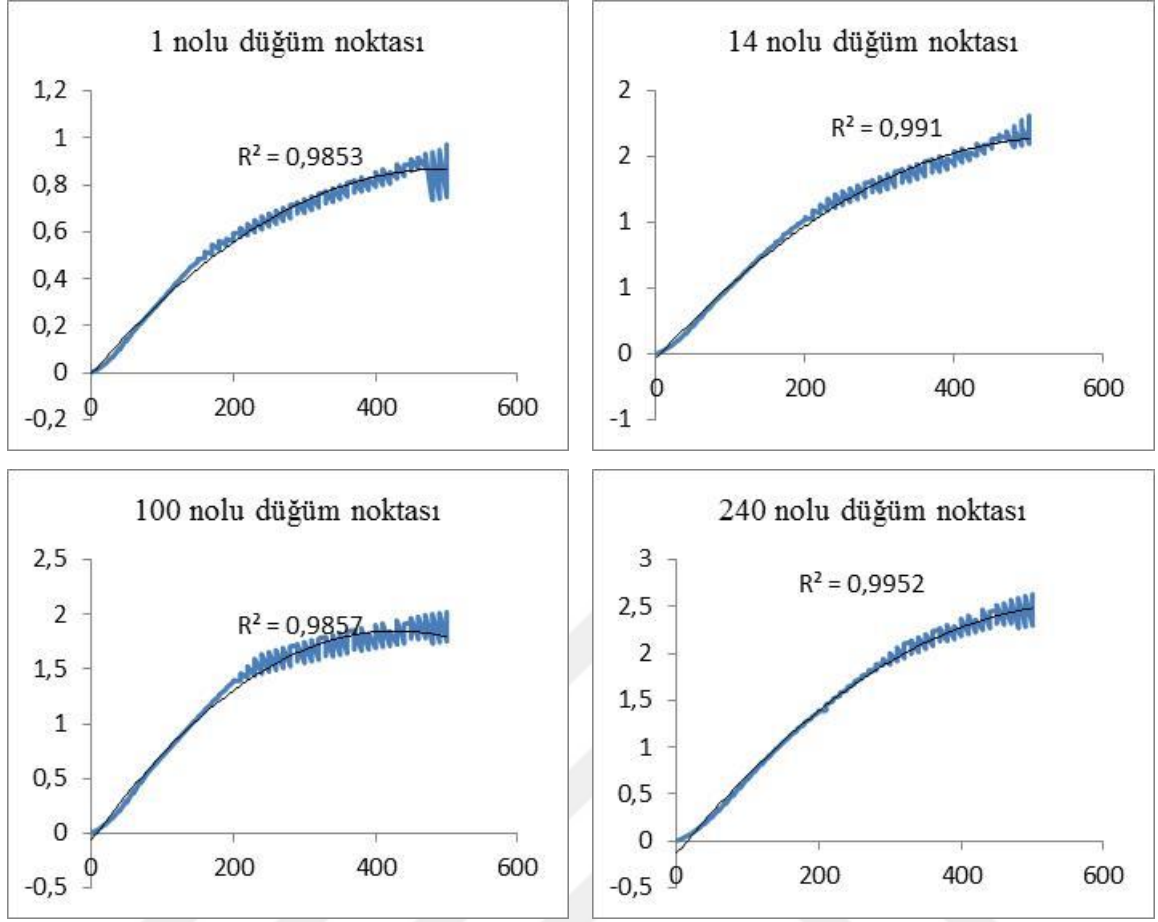
hangi tür dağılıma uygun olduğu değerlendirilmiştir. Yerdeğiştirmeler ile ilgili bazı düğüm noktalarına ait dağılım grafikleri Şekil 2.10'da verilmektedir.



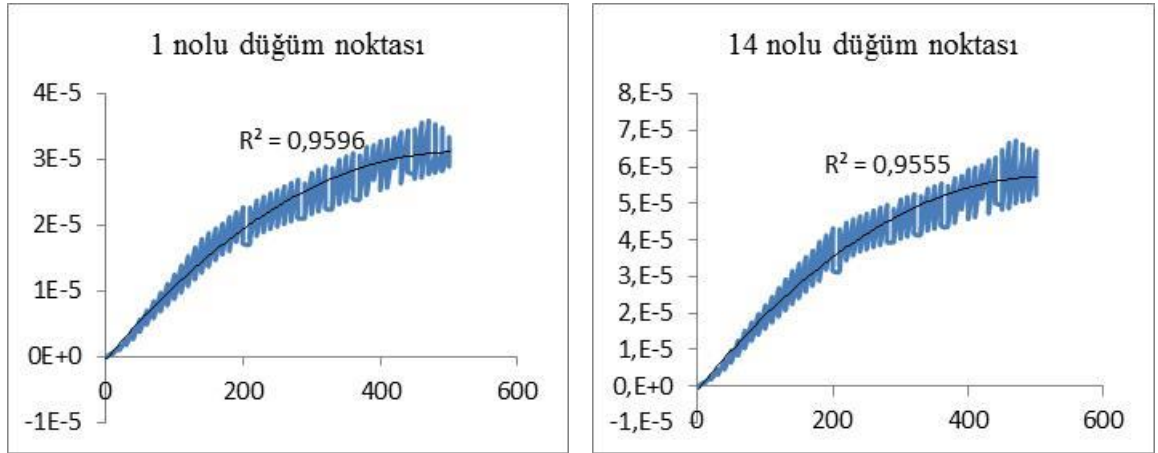
Şekil 2.10. Yerdeğiştirme sonuçlarına ait bazı düğüm noktaları için elde edilen dağılım grafikleri

Elde edilen dağılım grafiğinin eğilim çizgisi oluşturulduğunda, eğimin verileri ne oranda temsil ettiğini gösteren R^2 değeri okunabilmektedir. Şekil 2.10'da belirtilen düğüm noktaları için bu oranın %97-98 civarında olduğu görülmektedir.

Asal gerilmeler ve asal şekildeğiştirmelere ait verilerin dağılımında sırasıyla Şekil 2.11 ve Şekil 2.12'de görüldüğü üzere doğrusal olmayan ilişki tespit edilmiştir.

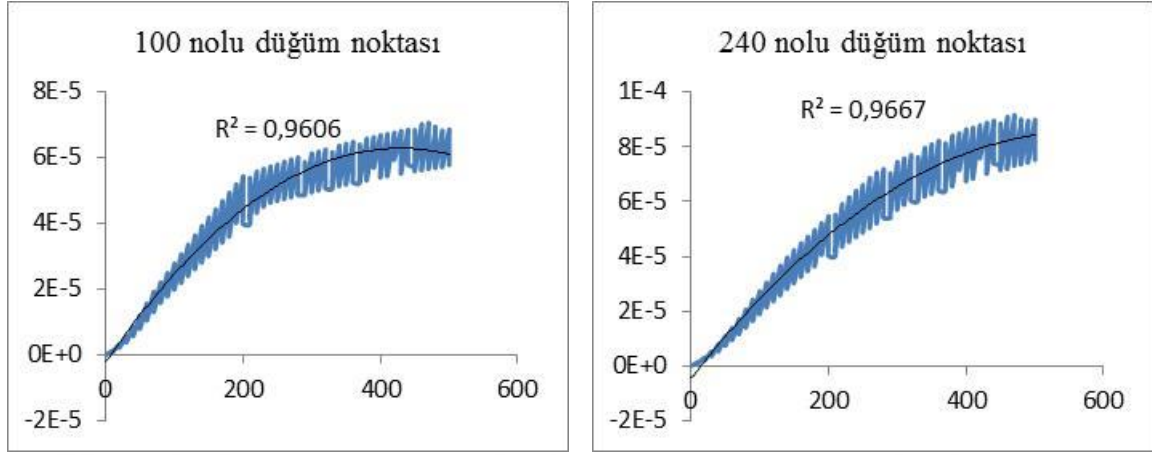


Şekil 2.11. Asal gerilme sonuçlarına ait bazı düğüm noktaları için elde edilen dağılım grafikleri



Şekil 2.12. Asal şekildeğiştirme sonuçlarına ait bazı düğüm noktaları için elde edilen dağılım grafikleri

Şekil 2.12'nin devamı



2.3.4.2.4. Sonuçlar İçin Uygun Regresyon Analizlerinin Uygulanması

Her bir düğüm noktasının dağılım grafikleriyle ilişki türünün belirlenmesinin ardından, belirlenen ilişki türlerine uygun regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Seçilen ölçek ve Elastisite Modülü'nün dikkate alınmasıyla, iki parametrelili regresyon analizleri yapılmıştır. Yerdeğiştirme sonuçları için doğrusal ilişkiye eğilimli düğüm noktalarında doğrusal regresyon analizi yapılmıştır. Ancak doğrusal olmayan ilişki için ise farklı bir yazılımla çalışmalara devam edilmiştir. Çok fazla sayıda regresyon analizi yapılacağından, analizler için SPSS gibi paket programlar yerine regresyon analizi için yazılmış olan açık kod kullanılmıştır. Bu amaçla, Başağa (2009)'da yer alan FORTRAN dilinde yazılmış kod ile analizler gerçekleştirilmiştir. EXCEL yazılımı kullanılarak, yapı-zemin etkileşimli Tip-1 kemer barajı için Z1 zemin sınıfı dikkate alınarak oluşturulan Spektrum eğrisi ile birlikte gerçekleştirilen analizler sonucunda 14 nolu düğüm noktasında oluşan yerdeğiştirmelerin doğrusal regresyon analizine ait verilerinin bir kısmı Şekil 2.13'te, regresyon analizi sonucu elde edilen bilgiler ve Anova tablosu ise Şekil 2.14'de verilmektedir.

Olcek	Elastisite	Yerdeğiştirme
1	2615000	3,66099E-06
1	2700000	3,54574E-06
1	2750000	3,48127E-06
1	2800000	3,4191E-06
1	3000000	3,19116E-06
1	3200000	2,99172E-06
1	3300000	2,90105E-06
1	3400000	2,81573E-06
1	3600000	2,6593E-06
10	2615000	0,000392638
10	2700000	0,000379243
10	2750000	0,000371768
10	2800000	0,00036457
10	3000000	0,000338383
10	3200000	0,000315652
10	3300000	0,000305359
10	3400000	0,000295721
10	3600000	0,000278108
20	2615000	0,001840457
20	2700000	0,001774499
20	2750000	0,001737737
20	2800000	0,001702381
20	3000000	0,001573889
20	3200000	0,001462676
20	3300000	0,001412457
20	3400000	0,001365451
20	3600000	0,00127977
30	2615000	0,004767115
30	2700000	0,004587189
30	2750000	0,004504068

Şekil 2.13. 14 nolu düğüm noktasının yerdeğiştirme sonuçlarının doğrusal regresyon analizine ait verilerin bir kısmı

ÖZET ÇIKIŞI

<i>Regresyon İstatistikleri</i>	
Çoklu R	0,993812757
R Kare	0,987663797
Ayarlı R Kare	0,987609691
Standart Hata	0,003312671
Gözlem	459

ANOVA

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Anlamlılık F</i>
Regresyon	2	0,40063517	0,200318	18254,2	0
Fark	456	0,00500405	1,1E-05		
Toplam	458	0,40563922			

	<i>Katsayılar</i>	<i>Standart Hata</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-değeri</i>	<i>Düşük %95</i>	<i>Yüksek %95</i>
Kesişim	0,015788162	0,00145988	10,81468	2E-24	0,0129192	0,0186571
X Değişkeni 1	0,00019986	1,0507E-06	190,218	0	0,0001978	0,0002019
X Değişkeni 2	-8,47126E-09	4,6955E-10	-18,04108	2,6E-55	-9,39E-09	-7,55E-09

Şekil 2.14. 14 nolu düğüm noktası yerdeğiştirme sonuçlarının doğrusal regresyon analizine ait bilgiler ve Anova tablosu

Anova tablosunda verilen bilgiler incelendiğinde, 459 gözlem sayısı ile oluşturulan analiz sonucunda elde edilen çoklu R, Korelasyon olarak adlandırılan ve parametreler arasında ki ilişkinin yönünü ve şiddetini belirten değerdir. R^2 ise, oluşturulan eğrinin, verileri hangi oranda temsil ettiğinin bir göstergesidir. Anova tablosundaki bilgiler, R^2 değerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Katsayılar ise, oluşturulan doğrunun denklemine ait katsayılarıdır. Şekil 2.13'te verilerin sütunlarının sırasına göre sırasıyla katsayıları almaktadırlar. 14 nolu düğüm noktasının doğrusal regresyon sonucu oluşan ve Şekil 2.14'de verilmekte olan bilgilere göre denklemi yazılacak olursa;

$$Y = 0,015788162 + 0,00019986 \times \text{Ölçek} - 8,47126E - 09 \times \text{Elastisite} \quad (2.82)$$

ifadesi elde edilmektedir. İstenilen ölçek ve elastisite modülü değerleri yerine yazıldığında, 14 nolu düğüm noktasında Z1 zemin sınıfı için gerçekleştirilen spektrum analizi sonucunu %98 oranında doğru sonuç verdiği belirlenmiştir.

A_0 ve R katsayıları, ilgili denkleme sonradan eklenerek 14 nolu düğüm noktasına ait denklem;

$$Y = 0,015788162 + 0,00019986 \times \text{Ö} - 8,47126E - 09 \times E \times A_0 / R \quad (2.83)$$

şeklinde genel halini almaktadır. Burada, Ö ölçek ve E elastisite modülünü ifade etmektedir.

Doğrusal olmayan analizler için, Başağa (2009) tarafından oluşturulan program kodu kullanılarak ikinci derece denklemlere ait katsayılar elde edilmiştir. Şekil 2.15'te, Z1 zemin sınıfı için gerçekleştirilen spektrum analizi sonucunda yapı-zemin etkileşimli kemer barajın ilk dört düğüm noktasının sonuçlarına ait regresyon analizi formül katsayıları verilmektedir. 1 nolu düğüm noktasına ait katsayıların bulunduğu satırlar, sırasıyla yerdeğiştirme, maksimum asal gerilme, minimum asal gerilme, maksimum asal şekildeğiştirme ve minimum asal şekildeğiştirmeleri göstermektedir.

1. Dugum Noktasi

```

0.1023872389219E+00 0.299115582354694E-03 -.341889438941842E-07 0.157132907379631E-05 -.168832096842433E-14
-.313732655891295E+02 0.351489255936679E+00 0.159667161648412E-04 -.353596306018798E-03 -.190666219033982E-11
-.365580821788276E+01 0.397552046714140E-01 0.220975861474975E-05 -.289505009502752E-04 -.302517073226579E-12
0.110010970464182E-04 0.122877565857039E-06 -.285753242760636E-11 -.119708364619089E-09 -.288923988346074E-18
0.209850747131279E-05 0.888670364418563E-10 -.114190139019655E-11 0.770188354474771E-11 0.137995610525371E-18

```

2. Dugum Noktasi

```

0.121356682406741E+00 0.340434718918405E-03 -.417629259726682E-07 0.176070443309146E-05 -.145608415573028E-14
-.599469177702752E+02 0.678420358837229E+00 0.295921309507400E-04 -.791415625048460E-03 -.329866790186901E-11
0.110050847510152E+01 -.122002417005805E-01 -.556322417025728E-06 0.247630706344315E-04 0.429201910684892E-13
0.148647485201306E-04 0.236609708971829E-06 -.244780275646765E-11 -.275390317976501E-09 -.818332467594373E-18
-.155406739097992E-05 -.386424760160359E-07 -.147410288459474E-12 0.501854493810413E-10 0.196570982553512E-18

```

3. Dugum Noktasi

```

0.154879123008439E+00 0.594937620776024E-03 -.554875143679419E-07 0.196599987194085E-05 -.154935480953513E-14
-.433614266545481E+02 0.954516122516818E+00 0.128050796980639E-04 -.109426133214759E-02 -.322760080903858E-12
-.204909529555681E+01 0.152356299601744E-01 0.105462769713768E-05 -.966706413461806E-05 -.143789058127543E-12
0.322962075932741E-04 0.318703172330477E-06 -.123726476461658E-10 -.365907236404394E-09 0.334095088536823E-18
-.635331889893772E-05 -.583369557493320E-07 0.268623384907163E-11 0.699891562747817E-10 -.143355679223576E-18

```

4. Dugum Noktasi

```

0.109180052168351E+00 0.312152710723259E-03 -.373509078080746E-07 0.161280395000299E-05 -.144123155231271E-14
-.214161019001941E+02 0.443100565646857E+00 0.748004767117211E-05 -.432295529216510E-03 -.541134552903224E-12
-.114291469796648E+01 0.344428034116858E-01 0.604673375223327E-06 -.101620411074534E-04 -.101771763570497E-12
0.185788623011292E-04 0.148026072998157E-06 -.716964680051110E-11 -.140604454148803E-09 0.220087986032748E-18
-.214163359232558E-06 -.981348514827775E-08 0.132849466713076E-12 0.191345926552047E-10 -.150274075328463E-19

```

Şekil 2.15. Bazı düğüm noktalarına ait ikinci derece regresyon analiziyle elde edilen formülasyon katsayıları

1 nolu düğüm noktasına ait yerdeğiştirme formülü:

$$\begin{aligned}
Y = & 0,1023872389219 + 0,299115582354694E - 3 \times \ddot{O} \\
& - 0,341889438941842E - 07 \times E + 0,157132907379631E - 05 \times \ddot{O}^2 \\
& - 0,168832096842433E - 04 \times E^2
\end{aligned} \quad (2.84)$$

şeklinde elde edilmektedir. Bu şekilde, ikinci dereceden regresyon analizinin birinci düğüm noktasına ait yerdeğiştirme denklemi elde edilmiş olmaktadır. Burada, \ddot{O} ölçek, E elastisite modülünü ifade etmektedir. A_0 ve R katsayıları, ilgili denkleme sonradan eklenerek 1 nolu düğüm noktasına ait denklem;

$$Y = \left(\begin{array}{l} 0,1023872389219 + 0,299115582354694E - 3 \times \ddot{O} \\ -0,34188943894184E - 07 \times E + 0,15713290737963E - 05 \times \ddot{O}^2 \\ -0,168832096842433E - 04 \times E^2 \end{array} \right) \times A_0 / R \quad (2.85)$$

şeklinde genel halini almaktadır. Kemer gövdesi üzerinde bulunan bütün düğüm noktalarında, her noktanın analiz sonuçlarıyla ilişkisini yansıtan iki parametrelili doğrusal ve doğrusal olmayan formülleri elde edilmiştir. Kemer gövdesi üzerindeki 346 düğüm

noktasının her birinde, yerdeğiştirme, maksimum ve minimum asal gerilmeler ile maksimum ve minimum asal şekildeğiştirmeler olmak üzere beş farklı yapısal davranış tepkisini veren toplam 13840 adet formül oluşturulmuştur.

2.3.4.2.5. Gerçek ve Regresyon Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yapılan regresyon analizleri sonucunda elde edilen formüllerin vereceği sonuçlar, ANSYS programından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak çalışmanın doğruluğu kontrol edilmiş olup, hata oranları incelenmiştir. Sonuçlar irdelendiğinde, hata oranlarının %10'u geçmediği görülmektedir. Sadece, 50 kat ölçek için yapılan karşılaştırmalarda, hata oranları %20-40 değerlerine ulaşmaktadır. 30m'lik bir baraj yüksekliğine denk gelen ölçek değerinde hata oranı fazla olduğu için bu yükseklik alt sınır kabul edilmiştir. Regresyon analizinde kullanılan üst sınır ise 500 kat ölçeğin denk geldiği 300m kemer yüksekliğidir. Bu nedenle oluşturulan formüllerin 30m-300m arasındaki baraj yükseklikleri için uygun olduğuna karar verilmiştir. Bu sınırlar dışındaki herhangi bir kemer yüksekliği değerinde, formüllerden elde edilen tahmini sonuçların %10'un üstünde bir hata vereceği ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.16'da bazı düğüm noktalarında, seçilen farklı parametre değerlerine göre elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve hata oranlarının elde edilmesi gösterilmiştir.

Yerdeğiştirme 500 ölçek, Ao=4, R=1, c30, Z1				Yerdeğiştirme 350 ölçek, Ao=4, R=1, c20, Z1			
D. Noktası	ANSYS	FORMÜL	%HATA	D. Noktası	ANSYS	FORMÜL	%HATA
1.	1,912806	1,872897	2,086368	1.	1,265894	1,275612	-0,76764
10.	3,043458	3,221922	-5,86386	10.	2,009601	1,888803	6,011048
19.	7,591565	7,561946	0,390151	19.	5,347013	5,271597	1,410442
31.	12,77068	12,48698	2,22151	31.	8,795554	8,682542	1,284874
37.	16,31958	16,74372	-2,59896	37.	11,42325	11,6339	-1,84402
47.	28,29404	27,3858	3,21	47.	19,67354	18,9694	3,579159
48.	28,33737	27,3858	3,358014	48.	19,70543	18,9694	3,735203
50.	14,99984	14,2395	5,068934	50.	10,57422	9,896279	6,411273
72.	12,42	12,21506	1,65014	72.	8,575083	8,49446	0,940204
81.	2,167173	2,332794	-7,64224	81.	1,422197	1,311373	7,792426
90.	1,977952	1,872897	5,311278	90.	1,304489	1,275612	2,213687
105.	6,075831	6,33973	-4,34342	105.	4,197693	4,399873	-4,81646

a) Yerdeğiştirmelerin karşılaştırılması (cm)

Şekil 2.16. Bazı düğüm noktaları için elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Şekil 2.16'nın devamı

Maksimum Asal Gerilme				Maksimum Asal Gerilme			
500 ölçek, Ao=4, R=1, c30, Z1				350 ölçek, Ao=4, R=1, c20, Z1			
D. Noktası	ANSYS	FORMÜL	%HATA	D. Noktası	ANSYS	FORMÜL	%HATA
1.	3,818485	3,501662	8,297081	1.	3,001937	3,12364	-4,05413
10.	6,148436	5,615179	8,673058	10.	4,727426	4,926082	-4,2022
19.	11,25033	10,05	10,66933	19.	9,321885	9,781326	-4,92863
31.	18,25134	17,63719	3,364963	31.	15,29411	15,40114	-0,69983
37.	17,03754	16,25964	4,565804	37.	14,16151	14,44354	-1,99149
47.	22,22792	21,11052	5,026991	47.	18,63059	18,97184	-1,83167
48.	16,29905	15,59064	4,346286	48.	13,46744	13,9183	-3,34782
50.	13,9666	13,6343	2,379239	50.	11,44135	11,60635	-1,44213
72.	16,11246	15,00316	6,88474	72.	13,49197	13,85522	-2,69239
81.	6,366244	5,693033	10,57471	81.	5,204113	5,501928	-5,72269
90.	4,724327	4,418209	6,479608	90.	3,750523	3,896581	-3,89434
105.	11,01363	10,62682	3,512145	105.	8,859026	9,041227	-2,05667

b) Maksimum asal gerilmelerin karşılaştırılması (MPa)

Maksimum Asal Şekildeğiştirme				Maksimum Asal Şekildeğiştirme			
500 ölçek, Ao=4, R=1, C30				350 ölçek, Ao=4, R=1, C20			
D. Noktası	ANSYS	FORMÜL	%HATA	D. Noktası	ANSYS	FORMÜL	%HATA
1.	0,000128	0,000122	4,771453	1.	0,000115	0,000116	-0,91788
10.	0,000203	0,000189	6,678509	10.	0,000179	0,000183	-2,2075
19.	0,000371	0,00034	8,494969	19.	0,000349	0,000356	-2,0922
31.	0,000587	0,000579	1,459684	31.	0,000561	0,000552	1,591474
37.	0,000584	0,000574	1,698026	37.	0,000556	0,000551	0,91254
47.	0,000712	0,000694	2,575171	47.	0,000682	0,000676	0,910996
48.	0,000518	0,00051	1,530274	48.	0,000489	0,000491	-0,37904
50.	0,000483	0,000488	-1,04108	50.	0,000453	0,000444	1,864185
72.	0,000519	0,000492	5,107603	72.	0,000494	0,000496	-0,23052
81.	0,000211	0,000192	8,672662	81.	0,000197	0,000203	-3,1155
93.	0,000118	0,000118	-0,32144	93.	0,000106	0,000103	2,319356
105.	0,000354	0,000349	1,257514	105.	0,000328	0,000327	0,396926

c) Maksimum asal şekildeğiştirmelerin karşılaştırılması

2.3.5. Yazılımın Oluşturulması

Tip-1 kemer barajı üzerinde yapılan çalışma kapsamında, birçok değişken parametrenin olması, parametrelerin seçiminde oluşacak kombinasyonların çok olması, oluşturulan formüllerin uzun ve her düğüm noktasına özel oluşu gibi nedenlerden dolayı elde edilen bütün sonuçların aynı anda sunulmasının mümkün olmadığı kanaatine

varılmıştır. Sayfalarca veri ve sonuç içerisinde istenilen bir verinin bulunması ve depolanması oldukça zor bir süreçtir. Bu nedenle, yalnızca istenilen veriye ait sonuçların, seçilen bir düğüm noktasında elde edilmesi ve bu sonuçlara ait çeşitli grafik ve kontur diyagramlarının görüntülenmesini sağlayacak bir yazılımın geliştirilmesi amaçlanmaktadır. EXCEL programında tasarlanan yazılım yardımıyla, belirsiz parametreler kullanıcının seçimine bırakılacak olup, yapılacak seçimler sonucunda kemer barajda istenilen düğüm noktasına ait regresyon analizinden elde edilen formüllerle statik ve dinamik analize ait tahmini sonuçlar görüntülenecektir. Aynı zamanda, seçilen parametrelere bağlı olarak herhangi bir düğüm noktasında, sonuçların kesit boyunca değişim diyagramlarının ve kemere ait kontur diyagramlarının değişimi de elde edilebilecektir.

2.3.5.1. Yazılıma Ait İçerik ve Görünümün Düzenlenmesi

Hazırlanacak yazılım kapsamında ilk olarak, kullanıcıya sunulacak olan parametrelerin seçilmesi hedeflenmiştir. Sonuçların bu parametrelere bağlı olarak elde edilmesi nedeniyle, yazılımın temeli bu parametreler üzerine kurulmuştur. Tablo 2.48’de kullanıcının seçimine sunulan parametreler ve sınırları sunulmaktadır.

Tablo 2.48. Yazılımda kullanılan parametreler ve sınırları

Yazılımda Kullanılan Parametreler	
Kemer Yüksekliği	30m-300m arası
Beton Dayanım Sınıfı	C14/16, C16/20, C18/22,5, C20/25, C25/30, C30/37, C35/45, C40/50, C45/55
Zemin Sınıfı	Z1, Z2, Z3, Z4
Etkin Yer İvme Katsayısı	0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.4g
Deprem Azaltma Katsayısı	Taşıyıcı sistem davranış katsayısına göre DBYBHY-2007’den elde edilmektedir
Düğüm Noktası Numarası	1-346 arası

Tablo 2.48’de belirtilen parametrelerin yazılıma tanıtılması ile birlikte kemer baraj gövdesindeki herhangi bir düğüm noktasında meydana gelecek sonucun hangi formüle bağlı olarak hesaplanacağı EXCEL’de oluşturulan formül tabloları yardımıyla otomatik olarak seçilecektir. Yazılımda, statik ve dinamik kuvvetler altında oluşacak

karakteristiklerin ve yapısal içsel kuvvetlerin sunulması planlanmıştır. Elde edilebilecek analiz sonuçları başlıca,

- Modal Analiz Sonuçları
- Statik Analiz Sonuçları
- Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Gerçekleştirilen Dinamik Analiz Sonuçları
- Ankastre Mesnetli Durum için Gerçekleştirilen Dinamik Analiz Sonuçları
- Kesit Boyunca Değişim Diyagramları
 - Statik Analiz
 - Dinamik Analiz
- Kontur Diyagramları
 - Statik Analiz
 - Dinamik Analiz

şeklinde sıralanabilmektedir.

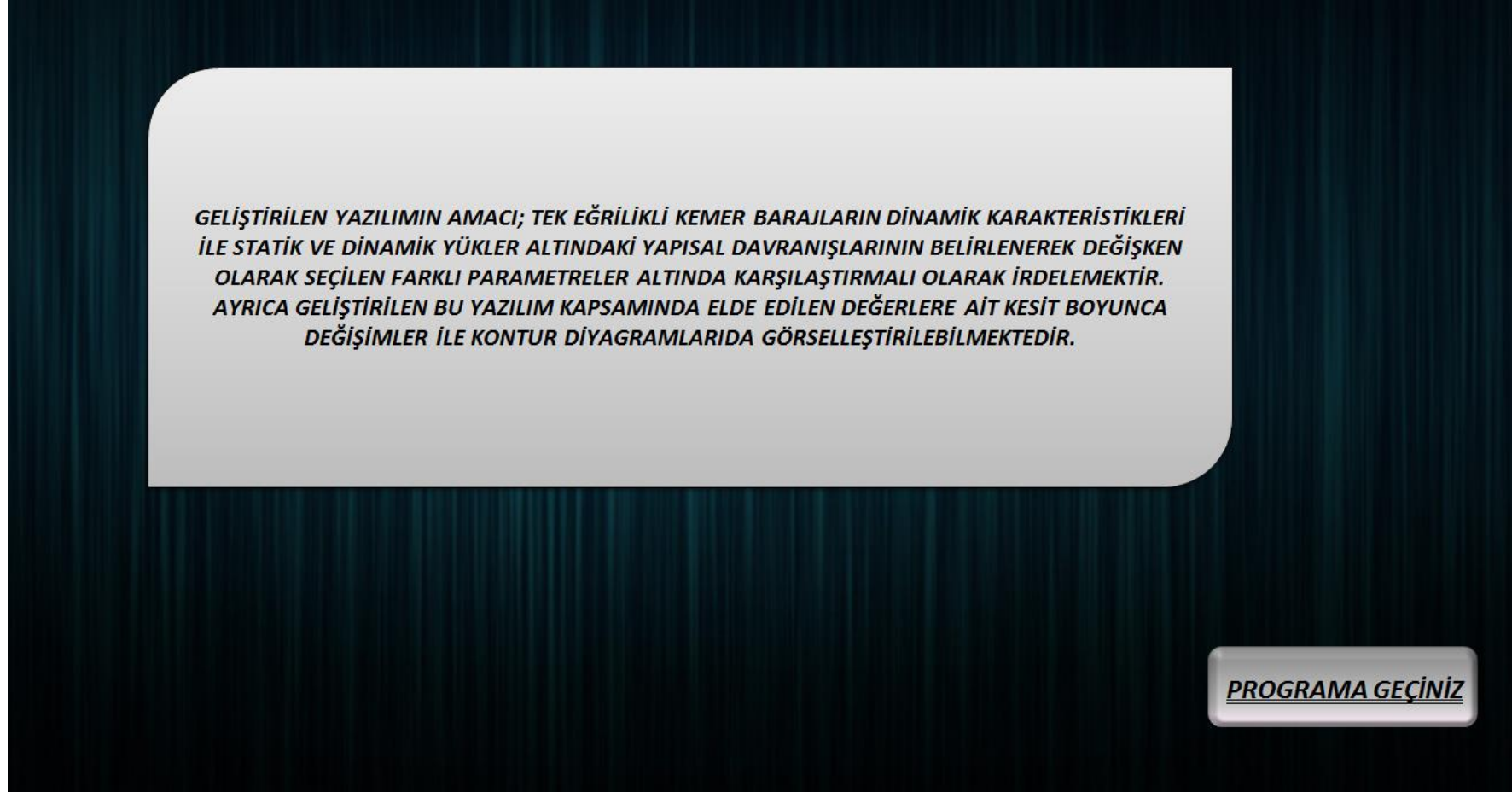
2.3.5.2. Veriler ve Formüllerin Düzenlenmesi

Yazılımın ön yüzünde seçilen parametrelere ait sonuçların doğru şekilde görüntülenmesi arka planda çalışan sayfalardaki binlerce formülün düzgün ve sistematik bir şekilde tablolaştırılmasıyla sağlanmaktadır. Bunun için arka planda çalışan sayfalar, başlıca modal analiz sayfası, statik analiz ve dinamik analiz içerisindeki yerdeğiştirme, maksimum asal gerilme, minimum asal gerilme, maksimum asal şekildeğiştirme ve minimum asal şekildeğiştirmelere ait sayfalar olarak gruplandırılmıştır. Her bir sonuca ait verinin kendi sayfasında depolanması, herhangi bir hata olduğunda veya bir değişiklik olduğunda ilgili noktanın kolayca bulunmasına olanak sağlamaktadır. Verilerin sistemli ve düzenli saklanması hem yazılımının kısa sürede oluşturulmasını hem de işlemlerin sıralı ve düzenli bir şekilde birbirine bağlanmasını sağlamaktadır.

2.3.5.3. Yazılımın Tamamlanması ve Yazılıma Ait Görseller

Tip-1 kemer barajına ait olan regresyon analizleriyle oluşturulan tahmini sonuçlara istenilen parametreye bağlı olarak kullanıcının rahat ulaşımını sağlamak amacıyla EXCEL’de hazırlanan yazılım tamamlanmış olup, yazılıma ait açılış sayfası Şekil 2.17’de göstermektedir. Burada programa ait genel bilgilendirme ve içeriğin sunulmasının ardından Şekil 2.17’de gösterilen “Programa Geçiş” butonu ile birlikte yazılımın ana sayfasına geçilebilmektedir. Şekil 2.17’de bulunan “Programa Geçiniz” butonunun tıklanılmasıyla Şekil 2.18’de, oluşturulan yazılımın ana sayfasına ait ilk giriş hali görülmektedir. Şekil 2.18’deki analiz verileri kısmının doldurulmasıyla Şekil 2.19’da görülen verilere bağlı olarak Tip-1 kemer barajına ait bütün geometrik ölçüler oluşmaktadır. Girilen analiz verilerinin doğruluğunu belirten sütunun alt kısmında ki “Analiz Sonuçlarını Görüntüleyebilirsiniz” ifadesi ile analiz sonuçları başlığı altındaki butonlarla ilgili sonuç sayfaları görüntülenebilir. İlk buton olan “Modal Analiz” e tıkladığı anda ekrana Şekil 2.20’deki giriş sayfası gelmektedir. “Mod Seçiniz” açılır listesinden istenilen mod seçilerek ilgili moda ait yapı-zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli baraja ait mod şekli, frekans değeri ile periyot ve frekans değerinin elde edildiği benzerlik formülü görüntülenmektedir(Şekil 2.21). “Mod Seçiniz” açılır listesinde bulunan ilk on moda ait frekans, periyot ve mod şekilleri “Sonuçları Yazdır” butonu ile tablo olarak da elde edilebilmektedir. “Ana Menüye Dön” butonu ile yazılımın ana sayfasına dönülmektedir. Ana sayfada bulunan analiz sonuçları başlığı altındaki “Statik Sonuçlar” butonuna tıkladığında, Şekil 2.22’de belirtilen statik sonuçların giriş sayfasına erişilmektedir. Kemere ait memba veya mansap yüzeylerinde bulunan düğüm noktalarından herhangi birinin seçilmesiyle, Şekil 2.23’te belirtilen kemere ait yapısal değerler ve değerlerin elde edildiği benzerlik formülleri verilmektedir. Sayfada bulunan “Ana Menüye Dön” butonu ile yazılımın ana sayfasına geçilmektedir. Analiz sonuçları başlığı altındaki “Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Dinamik Analiz” ve “Ankastre Mesnetli Barajlarda Dinamik Analiz” butonlarıyla Şekil 2.24 ve 2.26’da gösterilen butonlara ait giriş sayfasına geçilmektedir. Bu sayfalarda, düğüm noktasının seçilmesiyle yapı-zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli baraj için sırasıyla Şekil 2.25 ve 2.27’de görülmekte olan yapısal özelliklere ait değerler ve bu değerlerin elde edildiği regresyon analizi sonucu bulunan formüller verilmektedir. Yazılımın ana sayfasından kesit boyunca değişim diyagramları başlığı altında ki “Statik Analiz” ve “Dinamik Analiz” butonları ile sırasıyla Şekil 2.28 ve

2.30’da verilen ilgili butonlara ait giriş sayfasına geçilmektedir. Düğüm noktası seçilmesiyle ilgili düğüm noktasının düşey ve yatay kesitinde bulunan düğüm noktalarındaki yapısal özelliklerin değişim grafikleri sunulmaktadır. Şekil 2.29 ve 2.31’de bulunan açılır listelerden birincisi yerdeğiştirmenin yatay ve düşey kesit boyunca değişim grafiklerini vermekte, ikinci ise açılır listede maksimum ve minimum asal gerilmelerin yatay ve düşey kesit boyunca değişimleri gösterilmektedir. Üçüncü açılır listede ise maksimum ve minimum asal şekildeğiştirmelerin yatay ve düşey kesit boyunca değişimleri verilmektedir. Ana sayfada bulunan sonuçlar listesinin son kısmında bulunan kontur diyagramları başlığı altındaki “Statik Analiz” ve “Dinamik Analiz” butonları ile Şekil 2.32 ve 2.34’de verilen ilgili butonlara ait giriş sayfasına geçilmektedir. Yapısal özelliklere ait butonlara tıklanıldığında, ilgili özelliğe ait kontur diyagramını barajın memba ve mansap yüzeylerinde olmak üzere hem yapı-zemin etkileşimli baraj modelinde hem de ankastre mesnetli baraj modelinde vermektedir (Şekil 2.33 ve 2.35).



Şekil 2.17. Yazılıma ait giriş sayfası

ANALİZ VERİLERİNİ GİRİNİZ

KEMER YÜKSEKLİĞİ	
BETON DAYANIM SINIFI	SEÇİNİZ ▼
A _o	SEÇİNİZ ▼
R	
ZEMİN SINIFI	SEÇİNİZ ▼

GİRİLEN VERİLERE GÖRE SEÇİLEN BARAJ ÖLÇÜLERİ

KEMER YÜKSEKLİĞİ	
KRET GENİŞLİĞİ	
KEMER YARIÇAPI	
KEMER AÇISI	
KRET UZUNLUĞU	
TABAN UZUNLUĞU	
ÖLÇEK	

X

Analiz Sonuçlarını Görüntülemek İçin Verileri Giriniz!

ANALİZ VERİLERİNE AİT DETAYLI BİLGİLER

Deprem Bölgesi	A _o
1	0.40
2	0.30
3	0.20
4	0.10

Yerel Zemin Sınıfı	T _A (saniye)	T _B (saniye)
Z1	0.10	0.30
Z2	0.15	0.40
Z3	0.15	0.60
Z4	0.20	0.90

DAHA AYRINTILI BİLGİ İÇİN DBYBHY 2007 BAKINIZ

Kret Uzunluğu
Simetri Eksenini
Kemer Yüksekliği
Temel Çizgisi
Taban Uzunluğu

REFERANS SİLİNDİRİ
R=8.65 br
0.6 br
6 br
ANAHTAR KESİT

ANALİZ SONUÇLARI

• MODAL ANALİZ

• STATİK ANALİZ

• YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK GERÇEKLEŞTİRİLEN DİNAMİK ANALİZ

• ANKASTRE MESNETLİ DURUM İÇİN GERÇEKLEŞTİRİLEN DİNAMİK ANALİZ

KESİT BOYUNCA DEĞİŞİM DİYAGRAMLARI

• STATİK ANALİZ

• DİNAMİK ANALİZ

KONTUR DİYAGRAMLARI

• STATİK ANALİZ

• DİNAMİK ANALİZ

Şekil 2.18. Yazılım ana sayfası

ANALİZ VERİLERİNİ GİRİNİZ

KEMER YÜKSEKLİĞİ	200	
BETON DAYANIM SINIFI	C30	▼
Ao	1. DERECE DEPREM BÖLGESİ	▼
R	1	
ZEMİN SINIFI	Z1	▼

GİRİLEN VERİLERE GÖRE SEÇİLEN BARAJ ÖLÇÜLERİ

KEMER YÜKSEKLİĞİ	200,00 m
KRET GENİŞLİĞİ	20,00 m
KEMER YARIÇAPI	288,33 m
KEMER AÇISI	106°
KRET UZUNLUĞU	533,33 m
TABAN UZUNLUĞU	133,33 m
ÖLÇEK	333,33

✓

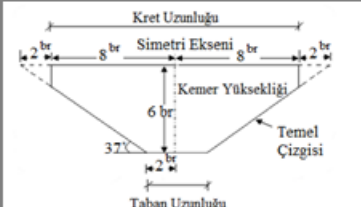
[Analiz Sonuçlarını Görüntüleyebilirsiniz](#)

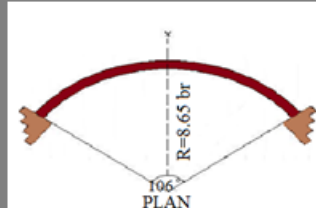
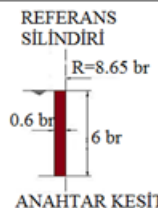
ANALİZ VERİLERİNE AİT DETAYLI BİLGİLER

Deprem Bölgesi	A _o
1	0.40
2	0.30
3	0.20
4	0.10

Yerel Zemin Sınıfı	T _A (saniye)	T _B (saniye)
Z1	0.10	0.30
Z2	0.15	0.40
Z3	0.15	0.60
Z4	0.20	0.90

DAHA AYRINTILI BİLGİ İÇİN DBYBHY 2007 BAKINIZ



ANALİZ SONUÇLARI

- MODAL ANALİZ
- STATİK ANALİZ
- YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK GERÇEKLEŞTİRİLEN DİNAMİK ANALİZ
- ANKASTRE MESNETLİ DURUM İÇİN GERÇEKLEŞTİRİLEN DİNAMİK ANALİZ

KESİT BOYUNCA DEĞİŞİM DİYAGRAMLARI

- STATİK ANALİZ
- DİNAMİK ANALİZ

KONTUR DİYAGRAMLARI

- STATİK ANALİZ
- DİNAMİK ANALİZ

Şekil 2.19. Yazılım ana sayfasında verilerin girilmesi

ANA MENÜYE DÖN

MOD SEÇİNİZ

MODAL ANALİZ SONUÇLARI

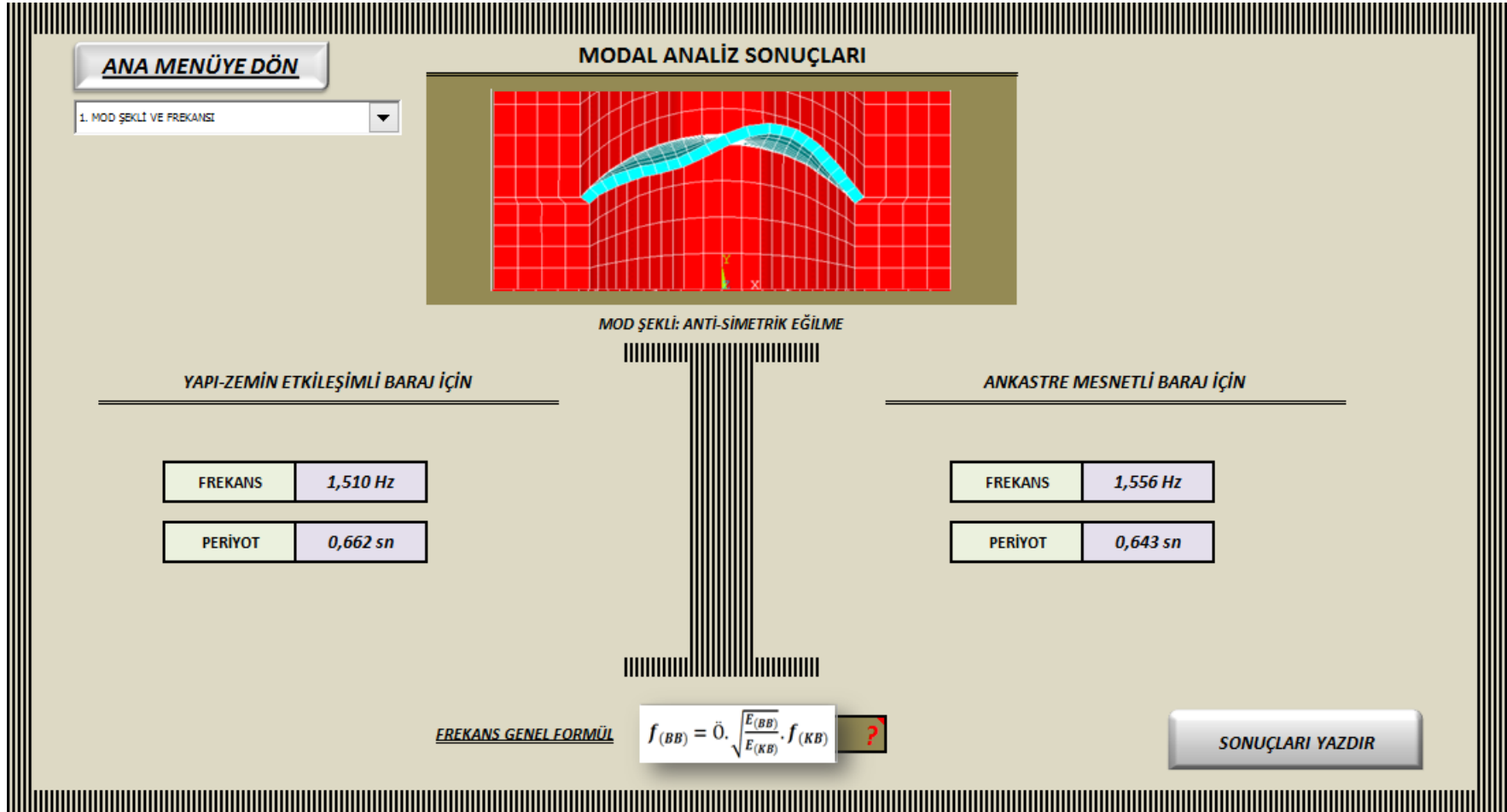
YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMLİ BARAJ İÇİN

ANKASTRE MESNETLİ BARAJ İÇİN

FREKANS GENEL FORMÜL

SONUÇLARI YAZDIR

Şekil 2.20. Modal analiz sayfasına giriş ekranı



Şekil 2.21. Modal analiz sayfasında örnek olarak 1. Titreşim modunun ve ilgili değerlerin görüntülenmesi

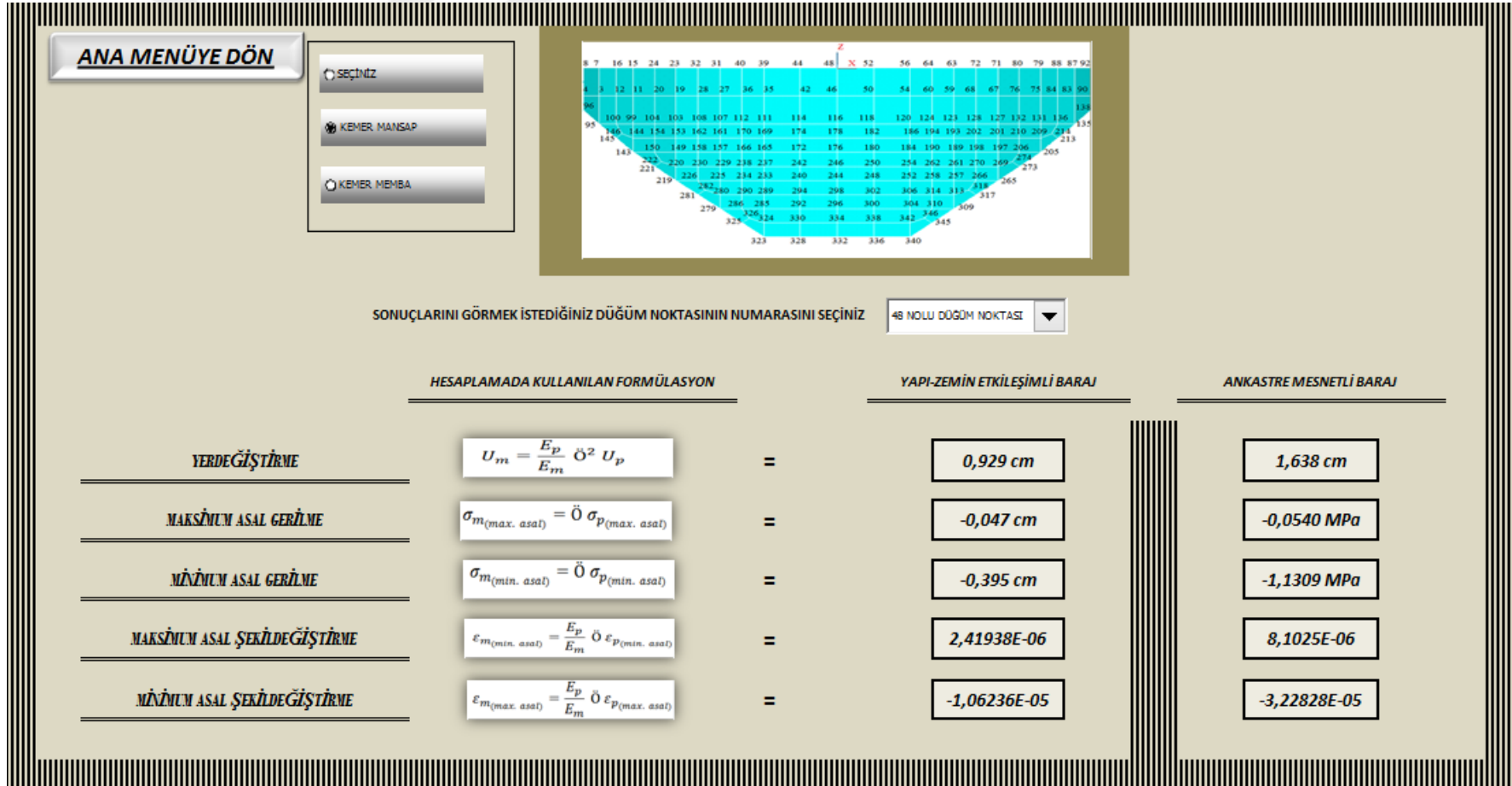
ANA MENÜYE DÖN

SEÇİNİZ
 KEMER, MANSAP
 KEMER, MEMBA

SONUÇLARINI GÖRMEK İSTEDİĞİNİZ DÜĞÜM NOKTASININ NUMARASINI SEÇİNİZ DÜĞÜM NOKTASI SEÇİNİZ ▼

<i>HESAPLAMADA KULLANILAN FORMÜLASYON</i>		<i>YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMLİ BARAJ</i>		<i>ANKASTRE MESNETLİ BARAJ</i>
<i>YERDEĞİŞTİRME</i>	=	[]		[]
<i>MAKSİMUM ASAL GERİLME</i>	=	[]		[]
<i>MİNİMUM ASAL GERİLME</i>	=	[]		[]
<i>MAKSİMUM ASAL ŞEKİLDEĞİŞTİRME</i>	=	[]		[]
<i>MİNİMUM ASAL ŞEKİLDEĞİŞTİRME</i>	=	[]		[]

Şekil 2.22. Statik analiz sayfasının görüntülenmesi



Şekil 2.23. Statik analiz sayfasında örnek olarak 48 numaralı düğüm noktasının sonuçlarının ve ilgili formüllerin görüntülenmesi

ANA MENÜYE DÖN

SEÇİNİZ

KEMER, MANSAP

KEMER, MEMBA

SONUÇLARINI GÖRMEK İSTEDİĞİNİZ DÜĞÜM NOKTASININ NUMARASINI SEÇİNİZ

DÜĞÜM NOKTASI SEÇİNİZ ▼

?

YERDEĞİŞTİRME

FORMÜL SONUÇLARI

MAKSİMUM ASAL GERİLME

MİNİMUM ASAL GERİLME

MAKSİMUM ASAL ŞEKİLDEĞİŞTİRME

MİNİMUM ASAL ŞEKİLDEĞİŞTİRME

Şekil 2.24. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı dinamik analiz sayfasına giriş

ANA MENÜYE DÖN

SEÇİNİZ

KEHER MANSAP

KEHER MEMBA

SONUÇLARINI GÖRMEK İSTEDİĞİNİZ DÜĞÜM NOKTASININ NUMARASINI SEÇİNİZ

YERDEĞİŞTİRME **FORMÜL SONUÇLARI**

$((-1,40360701215493+(0,0115830474506521)*\ddot{O}+(1,12507745216178E-06)*E+(7,54926690720761E-06)*\ddot{O}*\ddot{O}+(-2,63217083790579E-13)*E*E)*A_0/R$ = 17,14659308

MAKSİMUM ASAL GERİLME

$((-78,8876238927626+(1,62476236101248)*\ddot{O}+(2,45945867423316E-05)*E+(-0,00163608647755123)*\ddot{O}*\ddot{O}+(-1,30942802581644E-12)*E*E)*A_0/R$ = 13,84826312

MİNİMUM ASAL GERİLME

$((0,844053780628087+(-5,80577799345422E-05)*\ddot{O}+(-4,66818073976142E-07)*E+(-2,12089240005128E-05)*\ddot{O}*\ddot{O}+(1,07210467906296E-13)*E*E)*A_0/R$ = -0,077113143

MAKSİMUM ASAL ŞEKLDEĞİŞTİRME

$(6,22299822587237E-05+(5,40153122581574E-07)*\ddot{O}+(-2,46879493545075E-11)*E+(-5,35705569809831E-10)*\ddot{O}*\ddot{O}+(7,93649167941681E-19)*E*E)*A_0/R$ = 0,000447535

MİNİMUM ASAL ŞEKLDEĞİŞTİRME

$(7,21474417502507E-06+(6,8961957877666E-08)*\ddot{O}+(-2,95557550379723E-12)*E+(-7,49218477464001E-11)*\ddot{O}*\ddot{O}+(1,04156215006146E-19)*E*E)*A_0/R$ = 5,39445E-05

Şekil 2.25. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı dinamik analiz sayfasında, 48 nolu düğüm noktasına ait sonuçların ve ilgili formüllerin görüntülenmesi

ANA MENÜYE DÖN

SEÇİNİZ

KEMER MANSAP

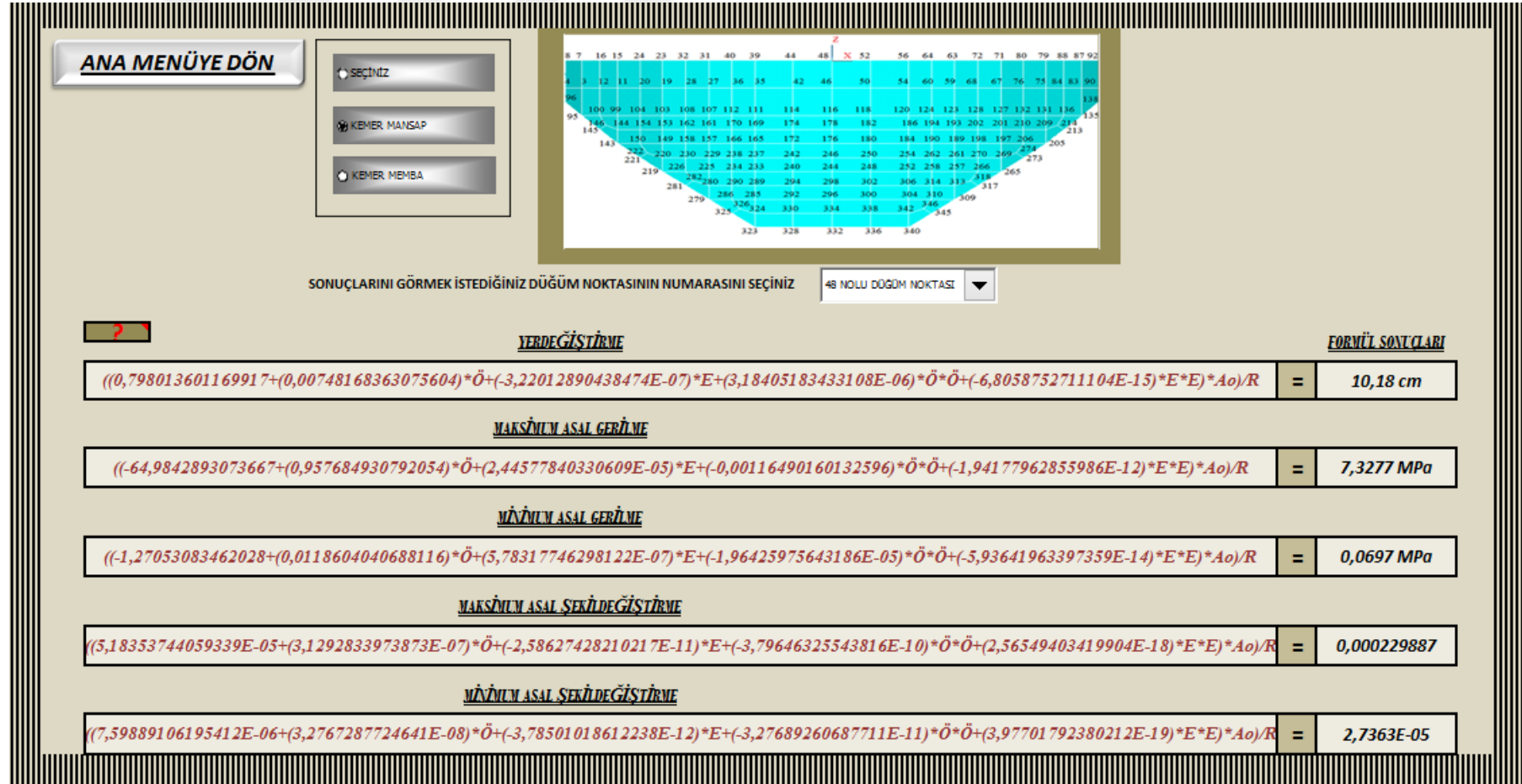
KEMER MEMBA

SONUÇLARINI GÖRMEK İSTEDİĞİNİZ DÜĞÜM NOKTASININ NUMARASINI SEÇİNİZ

DÜĞÜM NOKTASI SEÇİNİZ ▼

?	<u>YERDEĞİŞTİRME</u>	<u>FORMÜL SONUÇLARI</u>
	<u>MAKSİMUM ASAL GERİLME</u>	
	<u>MİNİMUM ASAL GERİLME</u>	
	<u>MAKSİMUM ASAL ŞEKİLDEĞİŞTİRME</u>	
	<u>MİNİMUM ASAL ŞEKİLDEĞİŞTİRME</u>	

Şekil 2.26. Ankastre mesnetli durumun dikkate alındığı barajda dinamik analiz sayfasına giriş



Şekil 2.27. Ankastr mesnetli durumun dikkate alındığı barajda dinamik analiz sayfasında, 48 nolu düğüm noktasına ait sonuçların ve ilgili formüllerin görüntülenmesi

ANA MENÜYE DÖN DOĞUM NOKTASI SEÇİNİZ ▼ GÖRMEK İSTEDİĞİNİZ KESİT ÜZERİNDE BULUNAN BİR NOKTA SEÇİNİZ

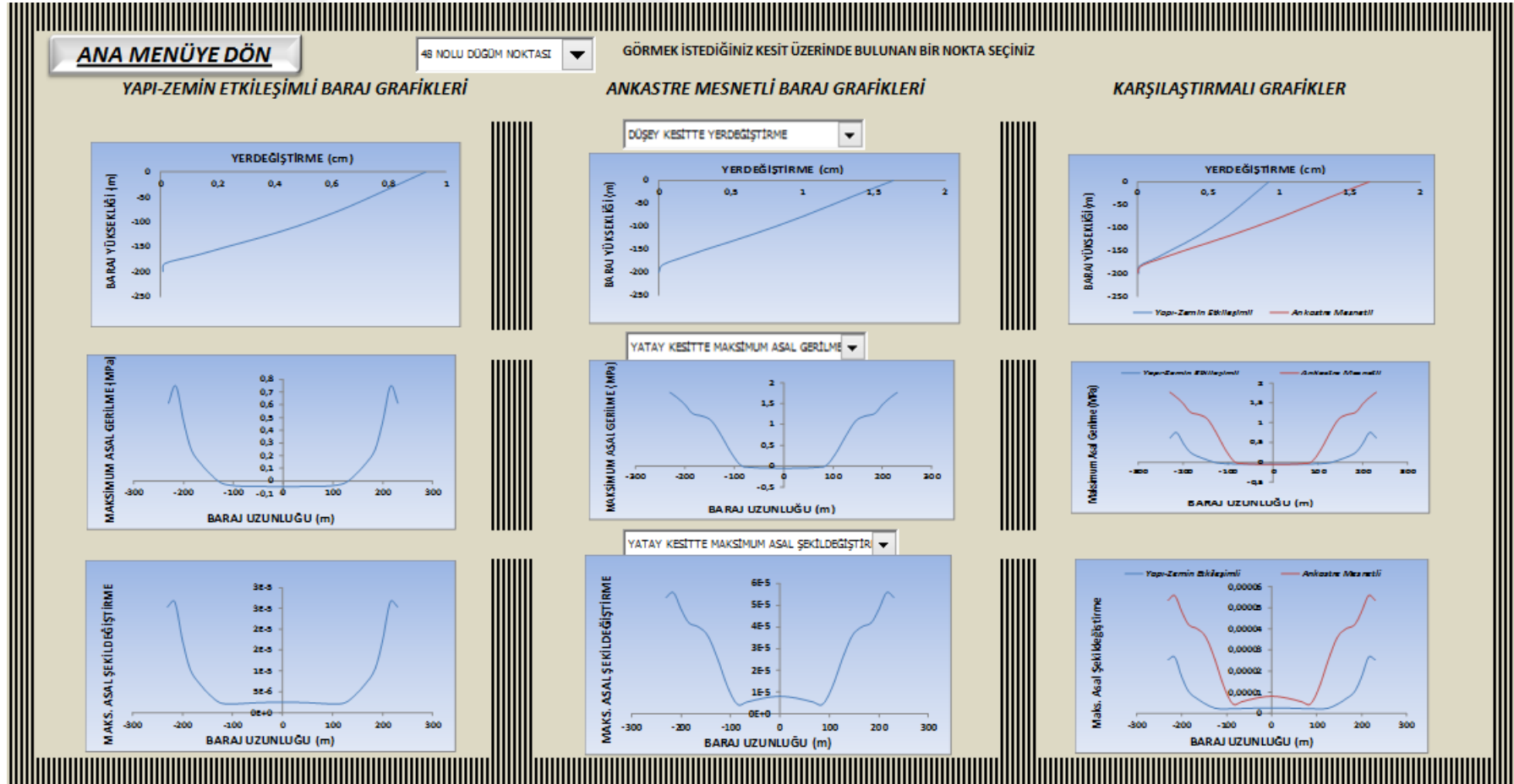
YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMLİ BARAJ GRAFİKLERİ *ANKASTRE MESNETLİ BARAJ GRAFİKLERİ* *KARŞILAŞTIRMALI GRAFİKLER*

seçiniz ▼

seçiniz ▼

seçiniz ▼

Şekil 2.28. Statik analizler sonucu oluşan kesit boyunca değişim diyagramları sayfasına giriş



Şekil 2.29. Statik analiz sonucu oluşan kesit boyunca değişim diyagramları sayfasında 48 nolu düğüm noktasının yapısal özelliklerine ait diyagramların görüntülenmesi

ANA MENÜYE DÖN DOĞUM NOKTASI SEÇİNİZ ▼ GÖRMEK İSTEDİĞİNİZ KESİT ÜZERİNDE BULUNAN BİR NOKTA SEÇİNİZ

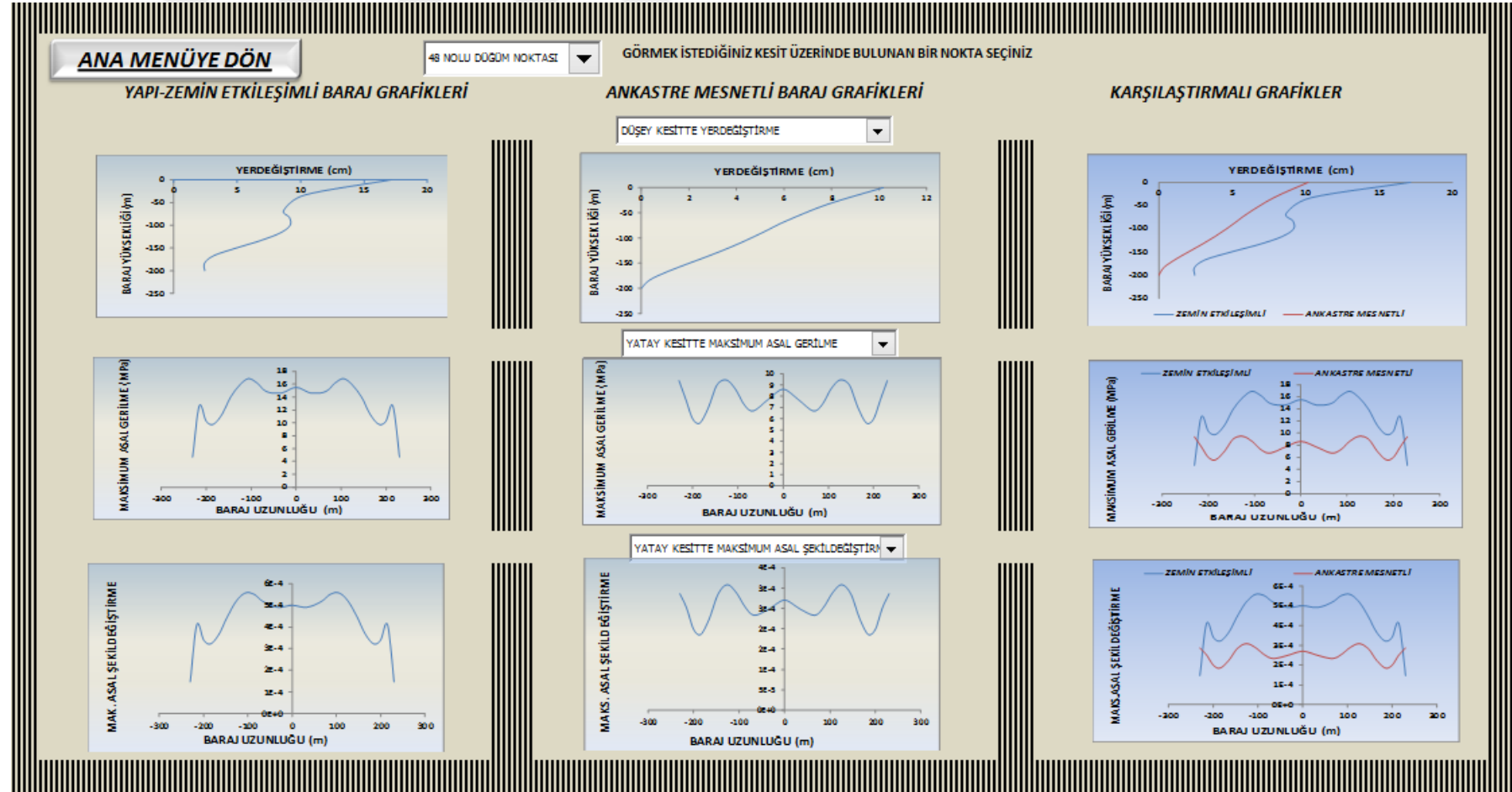
YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMLİ BARAJ GRAFİKLERİ **ANKASTRE MESNETLİ BARAJ GRAFİKLERİ** **KARŞILAŞTIRMALI GRAFİKLER**

SEÇİNİZ ▼

SEÇİNİZ ▼

SEÇİNİZ ▼

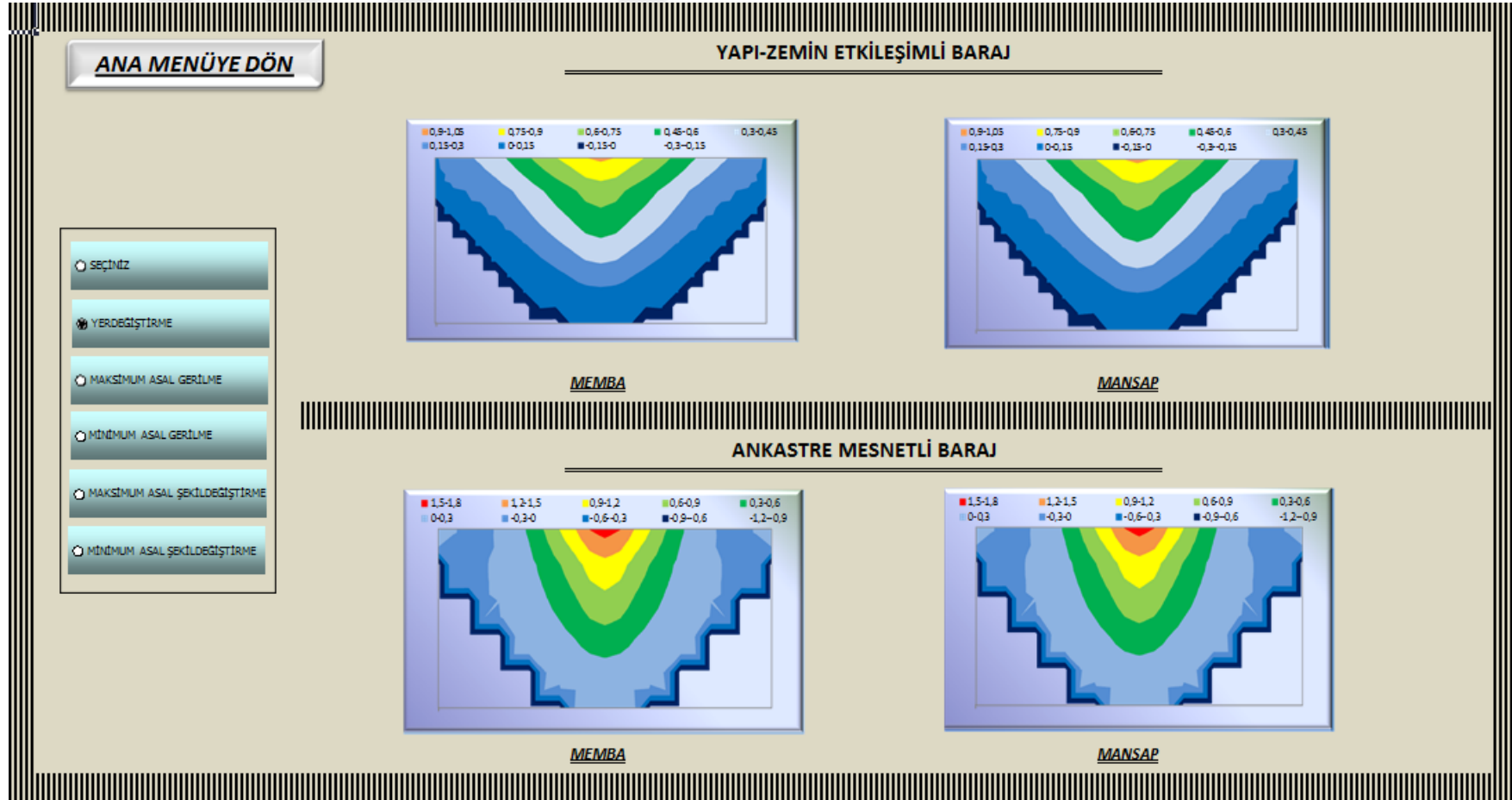
Şekil 2.30. Dinamik analizler sonucu oluşan kesit boyunca değişim diyagramları sayfasına giriş



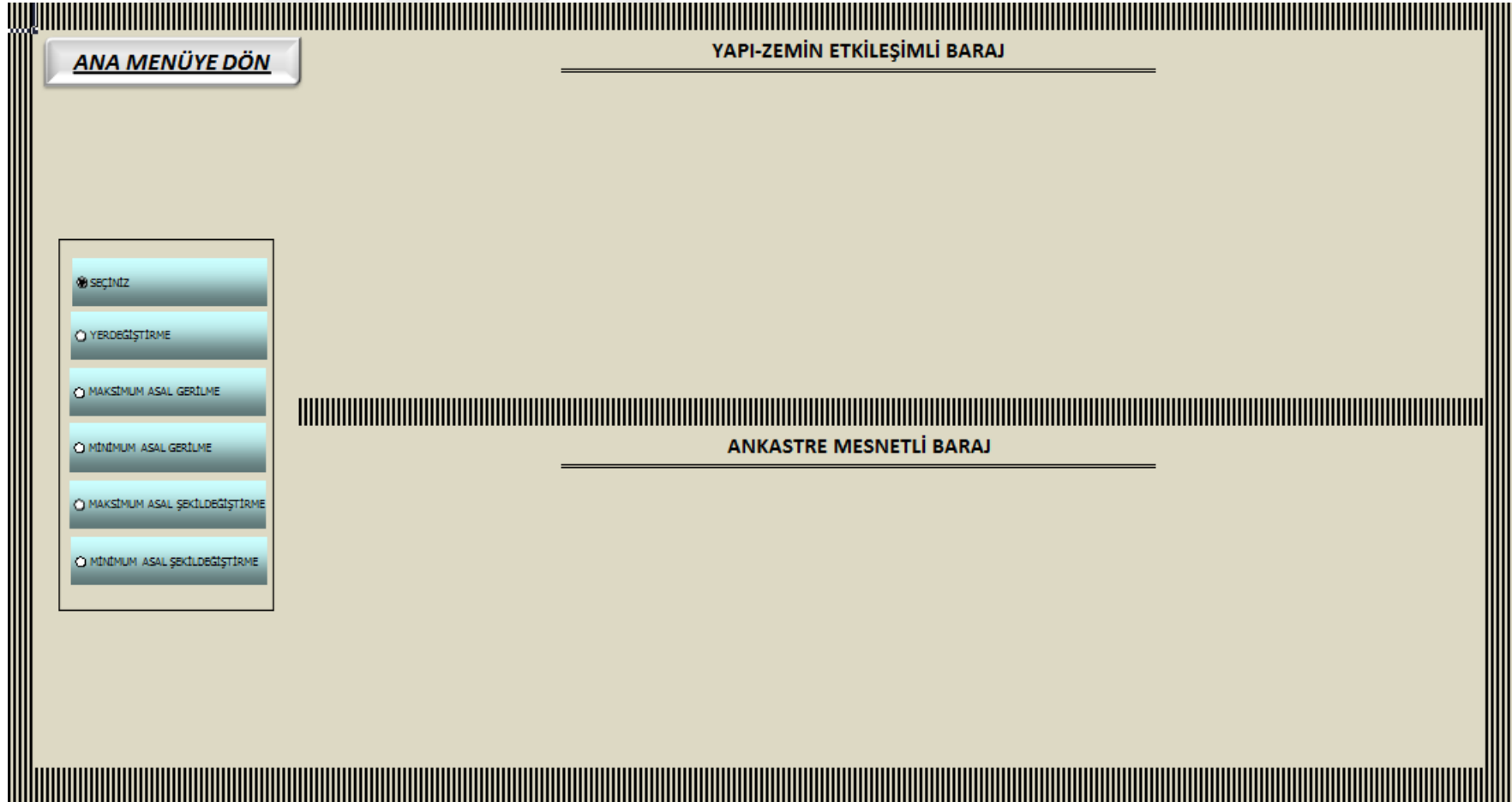
Şekil 2.31. Dinamik analizler sonucu oluşan kesit boyunca değişim diyagramları sayfasında 48 nolu düğüm noktasının yapısal özelliklerine ait diyagramların görüntülenmesi



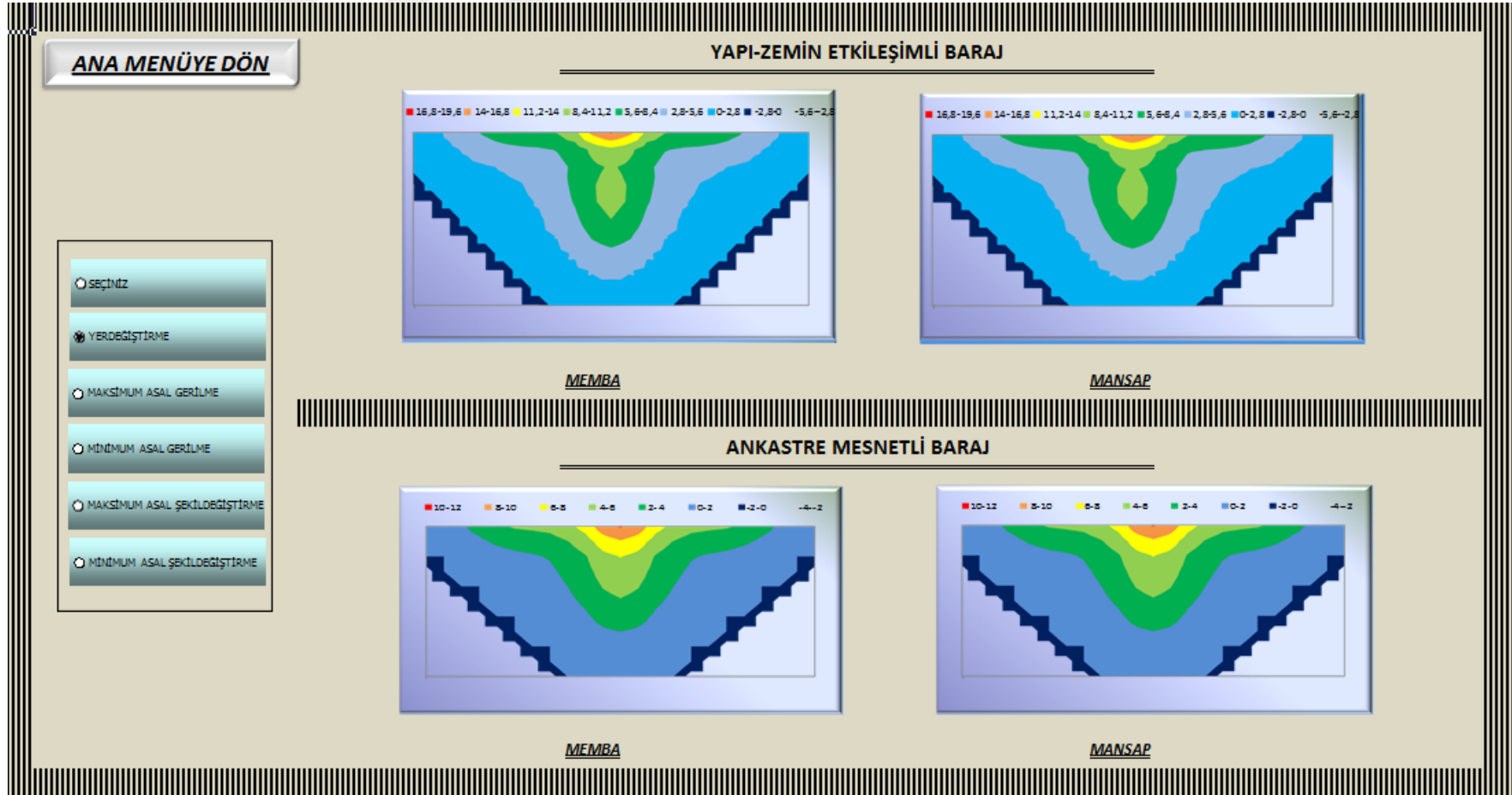
Şekil 2.32. Statik analizler sonucu oluşan kontur diyagramları sayfasına giriş



Şekil 2.33. Statik analizler sonucu oluşan kontur diyagramları sayfasında kemere ait kontur diyagramlarının görüntülenmesi



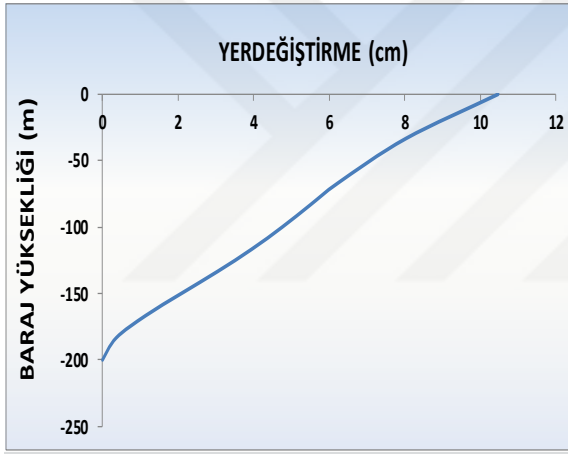
Şekil 2.34. Dinamik analizler sonucu oluşan kontur diyagramları sayfasına giriş



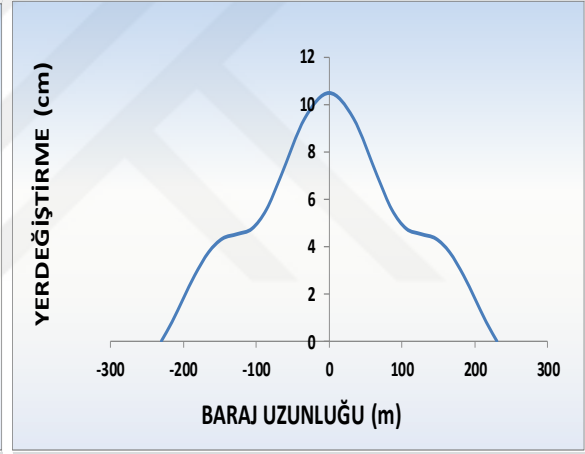
Şekil 2.35. Dinamik analizler sonucu oluşan kontur diyagramları sayfasında kemere ait kontur diyagramların görüntülenmesi

2.3.5.4. Kesit Değişimi ve Kontur Diyagramları

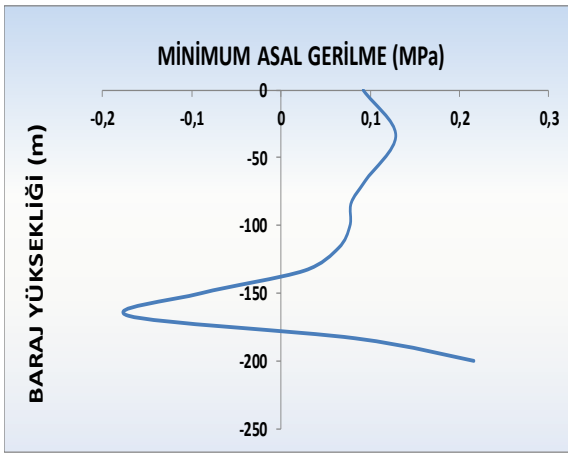
Kemer baraj gövdesi üzerinde bulunan herhangi bir düğüm noktasının, o düğüm noktasına ait yatay ve düşey kesitler boyunca aldığı değerlerin değişimi ve o andaki kontur diyagramları da grafiksel olarak incelenebilmektedir. Düğüm noktası için istenilen kesit diyagramlarının oluşturulmasında, o düğüm noktasından geçen yatay ve düşeydeki noktaların seçilmesi otomatik olarak yapılmaktadır. Şekil 2.36 ve 2.37’de örnek olarak seçilen (200m kemer yüksekliği, C25/30 beton dayanım sınıfı, 1. derece deprem bölgesi, Z1 zemin sınıfı, ankastre mesnetli model) 48 nolu düğüm noktasında oluşan değerlerin yatay ve düşey kesit boyunca değişim diyagramları ve kontur diyagramları gösterilmektedir.



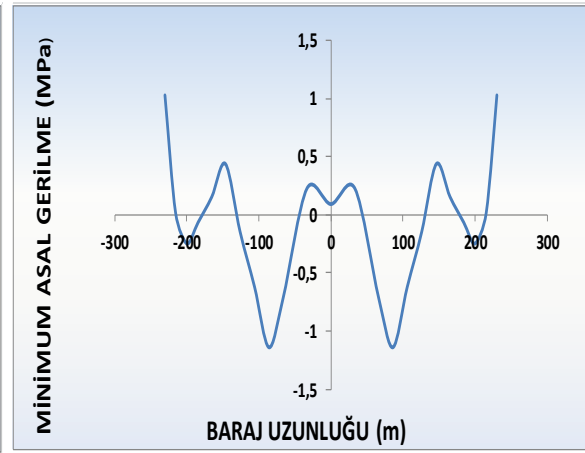
a) Düşey kesit boyunca yerdeğiştirme



b) Yatay kesit boyunca yerdeğiştirme



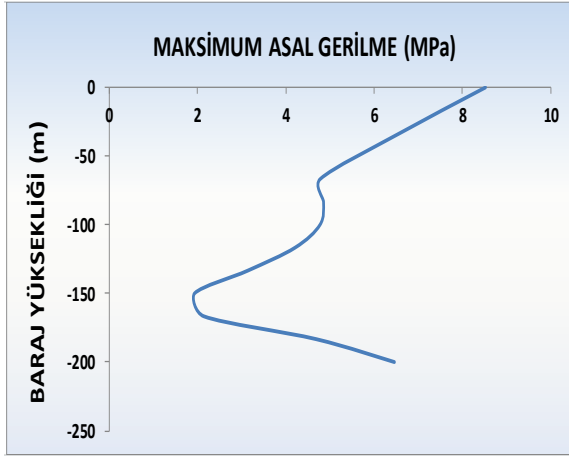
c) Düşey kesitte minimum asal gerilme



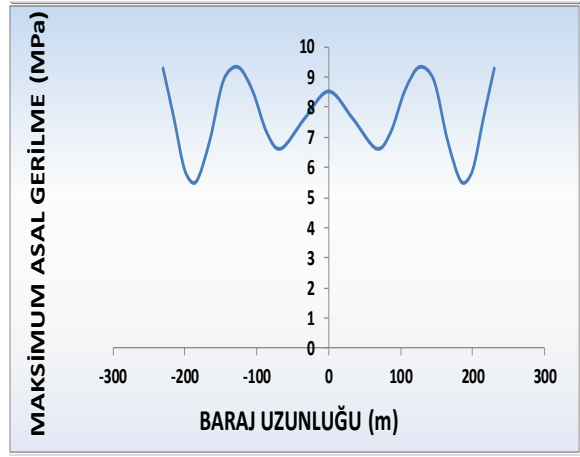
ç) Yatay kesitte minimum asal gerilme

Şekil 2.36. 48 nolu düğüm noktası için elde edilen kesit değişim diyagramları

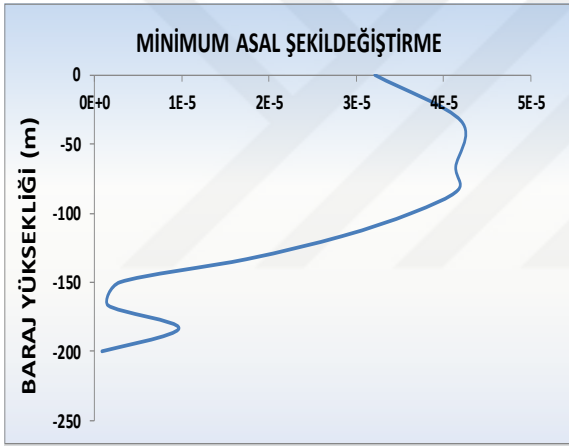
Şekil 2.36'nın devamı



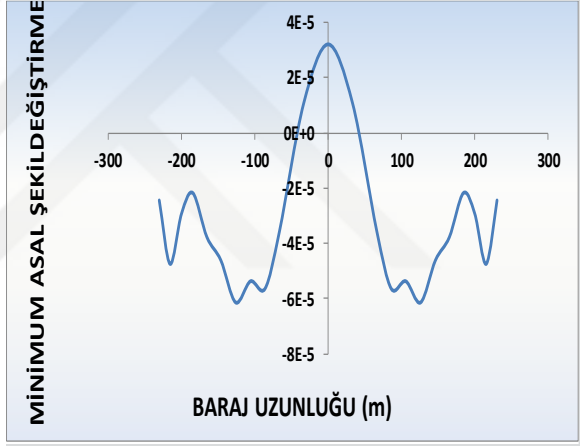
d) Düşey kesitte maksimum asal gerilme



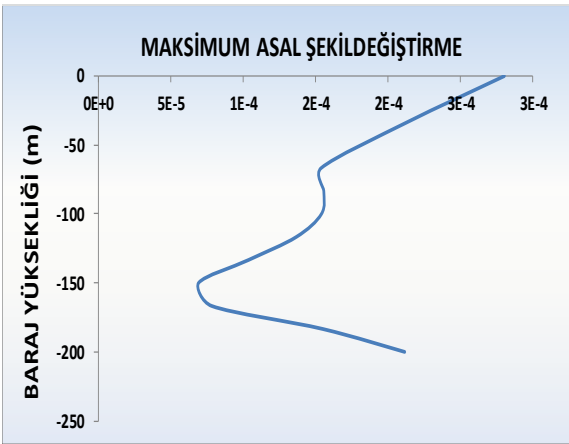
e) Yatay kesitte maksimum asal gerilme



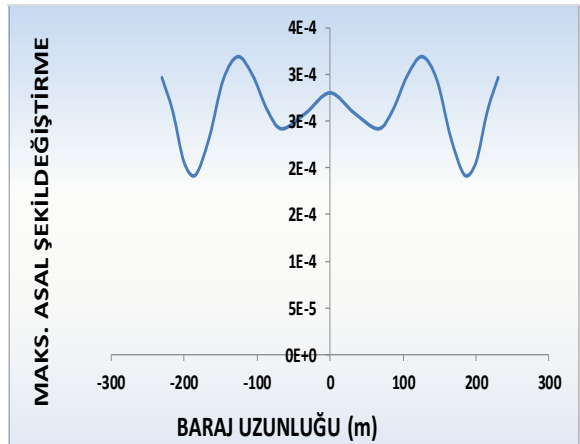
f) Düşey kesitte minimum asal
şekildeğiştirme



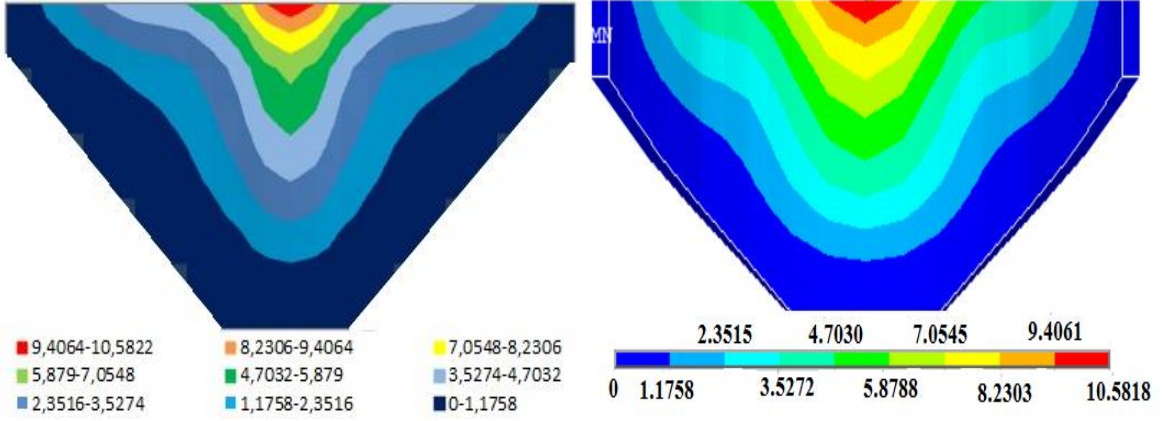
g) Yatay kesitte minimum asal
şekildeğiştirme



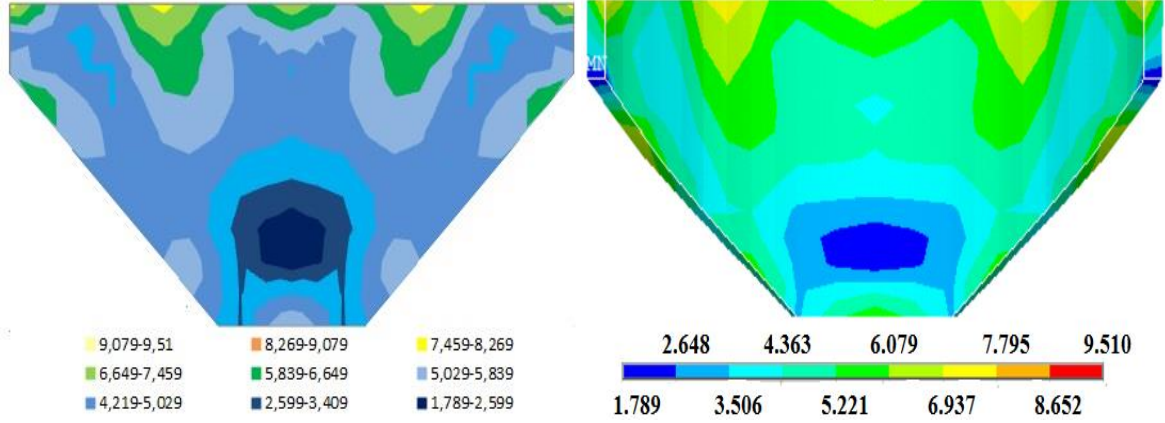
ğ) Düşey kesitte maksimum asal
şekildeğiştirme



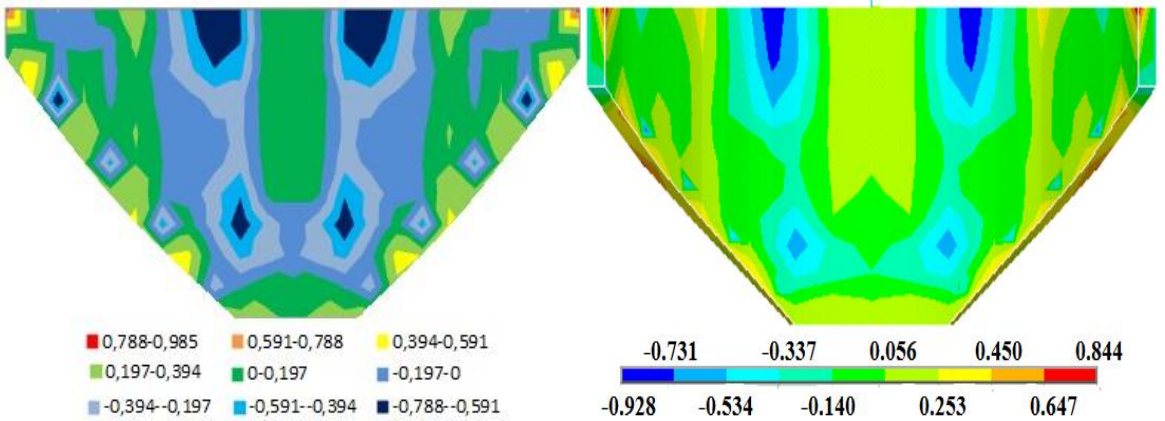
h) Yatay kesitte maksimum asal
şekildeğiştirme

YAZILIMANSYS

a) Yerdeğiştirme kontur diyagramı (cm)



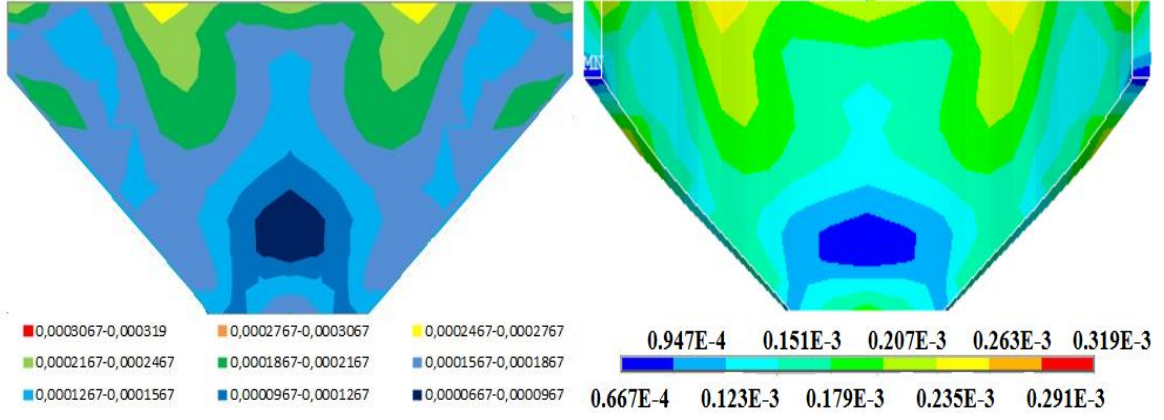
b) Maksimum asal gerilme kontur diyagramı (MPa)



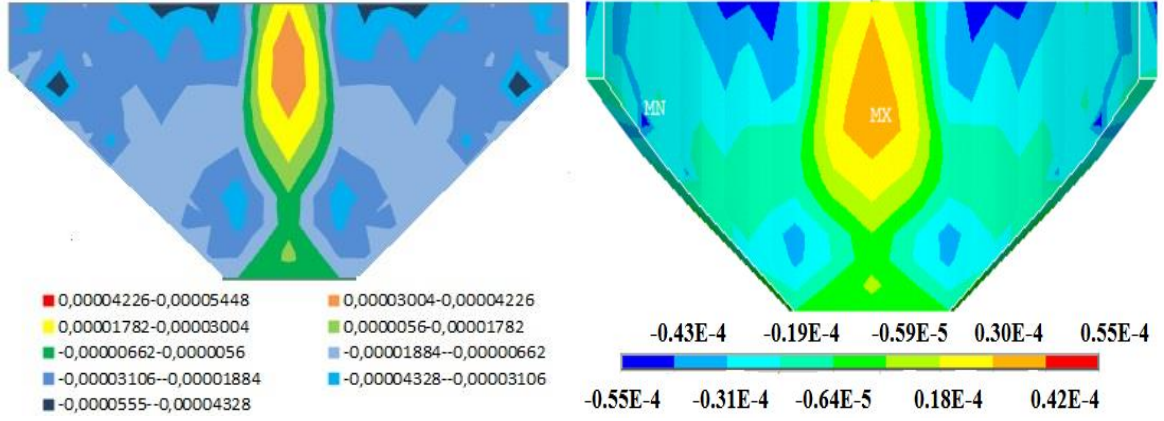
c) Minimum asal gerilme kontur diyagramı (MPa)

Şekil 2.37. Elde edilen kontur diyagramlarına ait örnek görüntüleri

Şekil 2.37'nin devamı



d) Maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı



e) Minimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, kemer barajların yapısal davranışlarının belirlenmesi amacıyla mühendislik yazılımı geliştirilmiştir. Tez kapsamında yapılan çalışmaların ilk adımı, boyut analizi ile dinamik karakteristik ve yapısal davranışlara ait benzerlik formüllerinin genelleştirilerek prototip ile ölçekli modeller arasında ilişki elde edilmesi ve basit taşıyıcı sistemler üzerinde uygulanarak matematik model sonuçlarıyla SAP2000’de elde edilen sonlu eleman sonuçların karşılaştırılması olmuştur. Bu adımda benzerlik formüllerinin etkili sonuçlar vermesi üzerine elde edilen formüller, laboratuvar ortamında mevcut olan ölçekli Tip-1 kemer barajın sonlu eleman modeli üzerinde uygulanmıştır. Laboratuvar modelinde önceki çalışmalarda yapılmış deneysel modal analizlerle sonlu eleman modelinin doğruluğu teyit edilerek sonlu eleman modeli üzerinde yapılacak boyut ve malzeme değişikliğinde de aynı doğrulukta sonuçlar vereceği görülmüştür. Bu nedenle sonlu eleman modelinden faydalanılarak yapılacak farklı parametreye sahip barajların laboratuvar modellemesine gerek kalmadan doğru sonuçları elde edilmiştir.

Benzerlik ilişkisi ile elde edilen formüller farklı parametrelere göre oluşturulan kemer baraj modellerine uygulanmıştır. Sonlu eleman modeli üzerinde küçük ölçekli (1 kat ölçekli) Tip-1 kemer barajın (prototip) modal analiz sonuçlarından hareketle 335 (model-1), 400 (model-2), 416,67 (Model-3) ve 450 kat (Model-4) büyütülerek normal kemer baraj boyutlarına getirilen kemer barajda, beton dayanım sınıfının C40/50 seçilmesiyle elastisite değeri 34000 MPa alınarak formül sonuçları elde edilmiştir ve bu sonuçlar ANSYS de elde edilen sonlu eleman sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

- Prototipin ANSYS’ten elde edilen ilk on moda ait frekans sonuçlarından hareketle benzerlik ilişkisinin kurulmasıyla elde edilen formüller kullanılarak Model-1, Model-2, Model-3 ve Model-4’e ait frekanslar elde edilmiştir. Ölçekli modellerin ANSYS programı ile elde edilen sonlu eleman modellerinin de modal analizi ile frekans değerleri elde edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda hata oranlarının %0 olduğu görülmüştür.

- Prototip ve ölçekli modellere ait mod şekillerinin incelenmesiyle, prototip ve ölçekli modellerin mod şekillerinin benzer olduğu ve değişmediği görülmüştür.

Sonlu eleman modeli üzerinde küçük ölçekli (1 kat ölçekli) Tip-1 kemer barajın (prototip) kendi ağırlığı dikkate alınarak yapılan statik analiz sonuçlarından hareketle gerçek kemer baraj boyutlarında olan Model-1, Model-2, Model-3 ve Model-4'te beton dayanım sınıfının C40/50 seçilmesiyle elastisite değeri 34000 MPa alınarak formül sonuçları elde edilmiş ve bu sonuçlar ANSYS programıyla elde edilen sonlu eleman sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

- Prototipe ait ANSYS modelinde kemer kısmının üzerinde bulunan ve kritik noktaları temsil edecek şekilde on farklı düğüm noktası seçilmiştir. Seçilen düğüm noktalarına ait yerdeğiştirme sonuçlarından hareketle benzerlik ilişkisinin kurulmasıyla elde edilen formüller kullanılarak Model-1, Model-2, Model-3 ve Model-4'e ait aynı noktalardaki yerdeğiştirmeler elde edilmiştir. Ölçekli modellerin ANSYS programında elde edilen sonlu eleman modelleri üzerinde uygulanan statik analizler ile elde edilen sonuçlarda seçilen on adet düğüm noktasına ait yerdeğiştirme değerleri incelenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda hata oranlarının %0 olduğu görülmüştür.

- Prototipe ait ANSYS modelinde kemer kısmının üzerinde bulunan ve kritik noktaları temsil edecek şekilde on farklı düğüm noktası seçilmiştir. Seçilen düğüm noktalarına ait maksimum ve minimum asal gerilme sonuçlarından hareketle benzerlik ilişkisinin kurulmasıyla elde edilen formüller kullanılarak Model-1, Model-2, Model-3 ve Model-4'e ait aynı noktalardaki asal gerilmeler elde edilmiştir. Ölçekli modellerin ANSYS programında elde edilen sonlu eleman modelleri üzerinde uygulanan statik analizler ile elde edilen sonuçlarda seçilen on adet düğüm noktasına ait maksimum ve minimum asal gerilme değerleri incelenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda hata oranlarının %0 olduğu görülmüştür.

- Prototipe ait ANSYS modelinde kemer kısmının üzerinde bulunan ve kritik noktaları temsil edecek şekilde on farklı düğüm noktası seçilmiştir. Seçilen düğüm noktalarına ait maksimum ve minimum asal şekildeğiştirme sonuçlarından hareketle benzerlik ilişkisinin kurulmasıyla elde edilen formüller kullanılarak Model-1, Model-2, Model-3 ve Model-4'e ait aynı noktalardaki asal şekildeğiştirmeler elde edilmiştir. Ölçekli modellerin ANSYS programında elde edilen sonlu eleman modelleri üzerinde uygulanan statik analizler ile elde edilen sonuçlarda seçilen on adet düğüm noktasına ait maksimum

ve minimum asal şekildeğiştirme değerleri incelenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda hata oranlarının %0 olduğu görülmüştür.

Prototip ve ölçekli modeller üzerinde dinamik analiz olarak Spektrum analizi uygulanarak sonuçların, benzerlik ilişkisinin kurulmasıyla oluşturulan formüllerden elde edilen sonuçlarla uyumlu olmadığı görülmüştür. Dinamik analiz sonuçlarında orantılı bir değişim olmaması nedeniyle dinamik analiz ile elde edilen sonuçlara ulaşmak amacıyla istatistiki yöntemler kullanılmıştır. İstatistiki bir yöntem olan Regresyon Analizinin uygulanması için bu analizde kullanılacak parametreler seçilmiştir. İlk olarak Tip-1 kemer barajda, yapı-zemin etkileşimi ve ankastre mesnetli durum dikkate alınarak oluşturulan iki farklı modelin, laboratuvar modeli esas alınarak 1,10,20,...,500 kat ölçeklenerek büyütülmesiyle toplamda 102 adet model elde edilmiştir. Oluşturulan 102 adet model üzerinde yapılan çalışmalarda, C14/16, C16/20, C18/22,5, C20/25, C25/30, C30/37, C35/45, C40/50 ve C45/55 olmak üzere dokuz farklı beton dayanım sınıfı ve Z1, Z2, Z3, Z4 olmak üzere dört zemin sınıfının dikkate alınmasıyla oluşturulan tepki spektrum analizleri yapılmıştır. Bu 3 parametrenin kombinasyonu ile oluşan 3672 analiz ANSYS programı ile yapılmıştır. Analiz sonuçlarından elde edilen veriler gruplanarak, veriler arasındaki ilişkinin varlığı, şiddeti ve yönü korelasyon analiziyle belirlenip ilişkiye uygun regresyon eğrileri kullanılarak kemer üzerinde bulunan 346 adet düğüm noktasında, her düğüm noktana ait değişimler arasındaki ilişkiyi yansıtan formülleri elde edilmiştir. Kemer üzerindeki 346 düğüm noktasının her birinde, yerdeğiştirme, maksimum ve minimum asal gerilmeler, maksimum ve minimum asal şekildeğiştirmeler olmak üzere beş farklı yapısal davranışın sonucunu gösteren 13840 adet formül elde edilmiştir.

- Prototipe ait ANSYS modeli üzerinde Z1, Z2, Z3 ve Z4 zemin gruplarına göre uygulanan Spektrum Analizi ile her bir düğüm noktasındaki yerdeğiştirme sonuçlarının değişimine bağlı olarak regresyon analizi sonucunda, 346 düğüm noktasına ait formüller elde edilmiştir. Elde edilen formüllerde ölçek ve elastisite modülü değeri yerine yazılarak sonuçların, R^2 değerine göre %95-99 tahmini bir yaklaşımla elde edildiği görülmüştür. ANSYS model sonuçları ve formül sonuçlarının karşılaştırılmasıyla düğüm noktalarının bazılarında iki parametrelili doğrusal regresyon analiziyle elde edilen formülün bazılarında ise iki parametrelili doğrusal olmayan regresyon analiziyle elde edilen formülün daha

yaklaşık sonuç verdiği görülmüştür. Bu nedenle ilgili düğüm noktasına ait en uygun sonucu veren regresyon formülü seçilip kullanılmıştır.

- Prototipe ait ANSYS modeli üzerinde Z1, Z2, Z3 ve Z4 zemin gruplarına göre uygulanan Spektrum Analizi ile her bir düğüm noktasındaki maksimum ve minimum asal gerilme sonuçlarının değişimine bağlı olarak regresyon analizi sonucunda, 346 düğüm noktasına ait formüller elde edilmiştir. Elde edilen formüllerde ölçek ve elastisite modülü değeri yerine yazılarak sonuçların, R^2 değerine göre %94-99 tahmini bir yaklaşımla elde edildiği görülmüştür. ANSYS model sonuçları ve formül sonuçlarının karşılaştırılmasıyla düğüm noktalarının tamamında iki parametrelili doğrusal olmayan regresyon analiziyle elde edilen formüllerin daha yaklaşık sonuç verdiği görülmüştür. Bu nedenle bütün düğüm noktalarında iki parametrelili 2. derece formüller kullanılmıştır.

- Prototipe ait ANSYS modeli üzerinde Z1, Z2, Z3 ve Z4 zemin gruplarına göre uygulanan Spektrum Analizi ile her bir düğüm noktasındaki maksimum ve minimum asal şekildeğiştirme sonuçlarının değişimine bağlı olarak regresyon analizi sonucunda, 346 düğüm noktasına ait formüller elde edilmiştir. Elde edilen formüllerde ölçek ve elastisite modülü değeri yerine yazılarak sonuçların, R^2 değerine göre %94-99 tahmini bir yaklaşımla elde edildiği görülmüştür. ANSYS model sonuçları ve formül sonuçlarının karşılaştırılmasıyla düğüm noktalarının tamamında iki parametrelili doğrusal olmayan regresyon analiziyle elde edilen formüllerin daha yaklaşık sonuç verdiği görülmüştür. Bu nedenle bütün düğüm noktalarında iki parametrelili 2. derece formüller kullanılmıştır.

Elde edilen binlerce veri, formül ve formül sonuçlarının depolanması ve istenilen parametreye ait sonucun kolay şekilde elde edilebilmesi amacıyla EXCEL programında bir yazılım oluşturulmuştur. Tasarımda parametreler kullanıcının seçimine bırakılarak yapılacak seçimler doğrultusunda kemer barajın istenilen düğüm noktasına ait regresyon analizi ile elde edilen statik ve dinamik analiz formülleriyle ilgili tahmini sonuçlar görülmektedir. Aynı zamanda seçilen parametrelere bağlı olarak herhangi bir düğüm noktasında, sonuçların karşılaştırmalı olarak kesit boyunca değişim diyagramları ve kemere ait kontur diyagramlarının değişimi de görülmektedir.

- Tip-1 kemer barajın dinamik karakteristiklerine ve yapısal davranışlarına ait statik ve dinamik analizler sonucu hazırlanan yazılımla, seçilen parametrelere bağlı olarak

istenilen düğüm noktasında ilgili formüllerin otomatik seçilmesiyle düğüm noktasına ait tahmini sonuçlar elde edilmektedir.

- Yazılımın giriş sayfasında sunulan açılır listelerden parametreler seçilerek yine aynı sayfada bulunan analiz sonuçları başlığı altındaki butonlarla istenilen sonuçlar görüntülenmektedir.

- Modal analiz sonuçlarıyla ilgili sonuç sayfasında kemer baraja ait yapı-zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli durum dikkate alınmak üzere iki farklı modelin ilk on titreşim moduna ait frekans ve periyot değeri ile her moda ait mod şekli ve ismi de görülmektedir.

- Statik analiz sonuçlarıyla ilgili sonuç sayfası görüntülediğinde, kemer üzerinde seçilecek herhangi bir düğüm noktası için benzerlik ilişkisinin kurulmasıyla elde edilen genel formül ve formül sonucu ilgili düğüm noktasına ait yerdeğiştirme, asal gerilme ve asal şekildeğiştirmeler sunulmaktadır.

- Dinamik analizlere ait sonuçlar için, yazılımın ana menüsünde bulunan analiz sonuçları başlığı altındaki yapı-zemin etkileşimli baraj ve ankastre mesnetli baraja ait iki buton bulunmaktadır. İstenilen butonla ilgili analize ait sonuç sayfası görüntülenmektedir. Kemer üzerinde seçilecek herhangi bir düğüm noktası için Regresyon analiziyle elde edilen formüller ve formül sonucu ilgili düğüm noktasına ait yerdeğiştirme, asal gerilme ve asal şekildeğiştirmeler sunulmaktadır.

- Yazılımın ana menüsünde bulunan analiz sonuçları başlığı altındaki kesit boyunca değişim diyagramlarının alt başlığına bağlı statik ve dinamik analiz butonlarıyla, ilgili butona ait diyagramlar sayfası görüntülenmektedir. Bu sayfada kemer üzerinde ki herhangi bir düğüm noktasının seçilmesiyle o düğüm noktasına ait yapı-zemin etkileşimli baraj, ankastre mesnetli baraj ve her ikisine ait yerdeğiştirme, asal gerilme ve asal şekildeğiştirme grafiklerinin karşılaştırıldığı karşılaştırma grafikleri sunulmaktadır.

- Yazılımın ana menüsünde bulunan analiz sonuçları başlığı altındaki kontur diyagramları alt başlığına bağlı statik ve dinamik analiz butonlarıyla, ilgili butona ait kontur diyagramları sayfası görüntülenmektedir. Bu sayfada yapı-zemin etkileşimli baraj ve ankastre mesnetli baraja ait yerdeğiştirme, asal gerilme ve asal şekildeğiştirme kontur diyagramları sunulmaktadır.

Bu tez kapsamında elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, benzerlik ilişkisi kurularak elde edilen formüller modal analiz ve statik analiz için geçerli olup, formülün

genelleştirilmesiyle dinamik karakteristikler ve yapısal özelliklere ait değerler elde edilebilmektedir. Dinamik analiz sonuçları incelendiğinde ise sonuçlar arasında orantılı bir değişimin olmadığı ve bu nedenle sonuçların tek bir formülle ifade edilmesinin mümkün olmayacağı görülmüştür. Kemer baraj üzerinde bulunan her bir düğüm noktası için regresyon analizi ile özel formüllerin oluşturulması ile gerçek sonuçlara yaklaşık tahmini sonuçlar elde edilmiştir. Seçilecek parametrelere bağlı sonuçların, sunulması ve diyagramlarla görselleştirilmesi için yazılım geliştirilmiştir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında farklı çalışmalara ışık tutması açısından yapılan bazı öneriler maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

- ❖ Tez kapsamında kullanılan Tip-1 kemer barajının haricinde diğer baraj tiplerinin de dikkate alınmasıyla 5 Tip baraj için benzer çalışmalar yapılabilir.
- ❖ Zaman tanım alanında analiz yöntemi ile gerçek bir depreme ait deprem kaydı kullanılarak elde edilen sonuçlar içinde regresyon analizi uygulanabilir.
- ❖ Deprem kaydının baraja açılı şekilde etki ettirilmesiyle farklı açılardaki en olumsuz sonucun belirlenmesi sağlanabilir.
- ❖ Malzeme yoğunluğu ve poisson oranının da birer parametre olarak seçilmesi sağlanabilir.
- ❖ Kemer baraja su etkittirilmesiyle oluşacak dinamik karakteristikler ve yapısal davranışların sonuçları elde edilebilir.
- ❖ Kemer baraj için oluşturulan yazılım, köprü, tünel gibi farklı önemli yapılar içinde uygulanabilir.

4. KAYNAKLAR

ANSYS, 2016. Swanson Analysis System, USA.

Arch Dams, 1968. A review of British Research and Development, Proceedings of the Symposium held at the Institution of Civil Engineers, March, London, England.

Akköse, M., Dumanoğlu, A.A. ve Tuna, M.E., 2004. Investigation of Hydrodynamic Effects on Linear and Nonlinear Earthquake Responses of Arch Dams by the Lagrangian Approach, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 28, 25-40.

Arı, A. ve Önder, H., 2013. Farklı Veri Yapılarında Kullanılabilecek Regresyon Yöntemleri, Anadolu Tarım Bilim Dergisi, 28,3, 168-174.

Alves, S.W. ve Hall, J.F., 2006. System Identification of a Concrete Arch Dam and Calibration of Its Finite Element Model, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35, 1321-1377.

Atmaca, H., 2016. Yapı Stoklarının Tam Ölçekli Modellenmesi ve Analizi için Sistem Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

Balaguer, P. ve Claramonte, J.A., 2011. Characterization and Control of Dimensionally Similar Systems, Journal of the Franklin Institute, 348, 1814-1831.

Balawi, S., Shahid, O. ve Mulla, M.A., 2015. Similitude and Scaling Laws–Static and Dynamic Behaviour Beams and Plates, Procedia Engineering, 114, 330-337.

Başağa, H.B., 2009. Yapıların Güvenilirlik Analizi İçin Bir Yaklaşım: Geliştirilmiş Yanıt Yüzeyi Yöntemi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Bayraktar, A., Sevim, B. ve Altunışık, A.C., 2011. Finite Element Model Updating Effects on Nonlinear Seismic Response of Arch Dam-Reservoir-Foundation Systems, Finite Elements in Analysis and Design, 47,2, 85-97.

Bayraktar, A., Türker, T. ve Altunışık, A.C., 2014. Experimental Frequencies and Damping Ratios for Historical Masonary Arch Bridges, Construction and Building Materials, 75, 234-241.

Beşiktaş, M., 2010. Doğu Karadeniz’de Debi Süreklilik Eğrilerinin Regresyon Analizi ile Belirlenmesi ve Akım Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

Cantieni, R., 2001. Assessing a Dam's Structural Properties using Forced Vibration Testing, Proc. IABSE International Conference on Safety, Risk and Reliability-Trends in Engineering, Malta.

- Carpinteri, A. ve Corrado, M., 2010. Dimensional Analysis Approach to the Plastic Rotation Capacity of Over-Reinforced Concrete Beams, Engineering Fracture Mechanics, 77, 1091-1100.
- Chan, Y.K., Lu, Y.K. ve Albermani, F.G., 2010. Performance-Based Structural Fire Desing of Steel Frames Using Conventional Computer Software, Steel and Composite Structures, 10,3, 207-222.
- Cheng, J., 2012. Development of Computational Software for Flutter Reliability Analysis of Long Span Bridges, Wind and Structures, 15,3, 209-221.
- Chouinard, L.E., Bennett, D.W. ve Feknous, N., 1995. Statistical Analysis of Monitoring Data for Concrete Arch Dams, Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, 9, 286-301.
- Datin, P.L. ve Prevatt, D.O., 2013. Using Instrumented Small-Scale Models to Study Structural Load Paths in Wood-Framed Buildings, Engineering Structures, 54, 47-56
- DBYBHY. 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, Türkiye.
- Duron, Z.H., Matheu, E.E. ve Hall, R.L., 2003. The Value Added of Field Testing on Concrete Dams, 35th Joint Meeting Panel on Wind and Seismic Effects, Japan.
- Doğangün, A., 2012. Betonarme yapıların Hesap ve Tasarımı, 8. Baskı Sayfa 74, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Ghanaat, Y., Clough, R.W. ve Redpath, B.B., 1992. Experimental Study of Dam-Water Foundation Interaction, Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, Spain.
- Ghosh, A., 2011. Scaling Laws, Mechanics Over Micro and Nano Scales, 10.1007/978-1-4419-9601-5_2.
- Gu, Q. ve Özçelik, Ö., 2011. Integrating OpenSees with other Software-with Application to Coupling Problems in Civil Engineering, Structural Engineering and Mechanics, 40, 85-103
- Hafeez, F. ve Almaskari, F., 2015. Experimental Investigation of the Scaling Laws in Laterally Indented Filament Wound Tubes Supported with V Shaped Cradles, Composite Structures, 126, 265-284.
- Jiang, D. ve Shu, D., 2005. Predication of Peak Acceleration of One Degree of Freedom Structures by Scaling Law, Journal of Structural Engineering, 131,4, 582-588.
- Karaton, M., 2004. Sıvı-Yapı Etkileşimi Dikkate Alınarak Kemer Barajların Dinamik Hasar Analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye.

- Kartal, M.E., Bayraktar, A., Çavuşlu, M., Karabulut, M. ve Başağa, H.B., 2015. Investigation of RCC Dams Considering Viscous Boundary Conditions, 2. International Sustainable Buildings Symposium, Ankara, Türkiye.
- Kittirungsi, B., 2008. A Scaling Methodology for Dynamic Systems: Quantification of Approximate Similitude and Use in Multiobjective Design, Master Thesis, University of Michigan, Ann Arbor, USA.
- Kopuz, C., 2014. Tek Serbestlik Dereceli Sistemlerde Dayanım-Süneklik-Periyot İlişkileri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Lu, X., Zhou, B. ve Lu, W., 2015. Shaking Table Test and Numerical Analysis of a High-Rise Building With Steel Reinforce Concrete Column and Reinforce Concrete Core Tube, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 24, 1019-1038.
- Mittrup, I. ve Hartmann, D., 2005. Structural Monitoring of Dams Using Software Agents, Computing in Civil Engineering, ASCE, 1-7.
- Nasserzarea, J., Leib, Y. ve Eskandari-Shiria, S., 2000. Computation of Natural Frequencies and Mode Shapes of Arch Dams as an Inverse Problem, Advances in Engineering Software, 31, 827-836.
- Ohmachi, T. ve Jalali, A., 1999. Fundamental Study on Near-Field Effects on Earthquake Response of Arch Dams, Earthquake Engineering and Engineering Seismology, 1,1, 1-11.
- Oliveira, S. ve Faria, R., 2006. Numerical Simulation of Collapse Scenarios in Reduced Scale Tests of Arch Dams, Engineering Structures, 28, 1430-1439.
- OMA, 2006. Operational Modal Analysis, Release 4.0. Structural Vibration Solution A/S, Denmark.
- Özdemir, Y., 2004. Periyodik-Stokastik Hidrolojik Süreçlerde Regresyon Yoluyla Bilgi Aktarımı, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Peng, J. Ve Law, K.H., 2002. A Prototype Software Framework for Internet-Enabled Collaborative Development of a Structural Analysis Program, Engineering with Computers, 18, 38-49.
- PULSE, 2006. Analyzers and Solutions, Release 11.2. Bruel and Kjaer, Sound and Vibration Measurement A/S, Denmark.
- Qiujing, Z., Guoxin, Z., Haifeng, L., Yi, L. ve Bo, Y., 2012. Study on Regression Analysis and Simulation Feedback-Prediction Methods of Super High Arch Dam during Construction and First Impounding Process, Earth and Space, ASCE, 1024-1033.

- Ramu, M., Prabhu, Raja, V. ve Thyla, P.R., 2010. Development of Structural Similitude and Scaling Laws for Elastic Models, 18.11.2016
- Ramu, M., Prabhu, Raja, V. ve Thyla, P.R., 2013. Establishment of Structural Similitude for Elastic Models and Validation of Scaling Laws, KSCE Journal of Civil Engineering, 17,1,139-144.
- SAP2000, 2016. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA.
- Serhatoğlu, C., 2015. Bursa Tarihi Minarelerinin Dinamik Davranışlarının ve Performanslarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye.
- Sevim, B., 2010. Kemer Barajların Dinamik Davranışlarının Sonlu Eleman ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye
- Sevim, B., Altunışık, A.C., Bayraktar, A., Akköse, M. ve Calayır, Y., 2011a. Water Length and Height Effects on the Earthquake Behavior of Arch Dam-Reservoir-Foundation Systems, KSCE Journal of Civil Engineering, 15, 295-303.
- Sevim, B., Bayraktar, A. ve Altunışık, A.C., 2011b. Investigation of Water Length Effects on the Modal Behavior of a Prototype Arch Dam Using Operational and Analytical Modal Analyses, Structural Engineering and Mechanics, 37,6, 593-615.
- Sevim, B., Altunışık, A.C. ve Bayraktar, A., 2012. Experimental Evaluation of Crack Effects on the Dynamic Characteristics of a Prototype Arch Dam using Ambient Vibration Tests, Computers and Concrete, 10,3, 277-294.
- Sevim, B., Altunışık, A.C. ve Bayraktar, A., 2013. Structural Identification of Concrete Arch Dams by Ambient Vibration Tests, Advances in Concrete Construction, 1,3, 227-237.
- Sevim, B., Altunışık, A.C. ve Bayraktar, A., 2014. Construction Stages Analyses using Time Dependent Material Properties of Concrete Arch Dams, Computers and Concrete, 14,5, 599-612.
- Shehadeh, M., Shennawy, Y. ve El-Gamal, H., 2015. Similitude and Scaling of Large Structural Elements: Case Study, Alexandria Engineering Journal, 54, 147-154.
- Sümerkan, S., 2014. Ardgermeli Dengeli Konsol Köprüler için Doğal Frekans Formülü Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- Şahin, A., 2009. Yapıların Deneysel ve Operasyonel Modal Analizleri için Sayısal Sinyal İşleme, Dinamik Karakteristik Belirleme ve Sonlu Eleman Model İyileştirme Yazılımları: SignalCAD-ModalCAD-FemUP, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.

- Şenel, Ş.M., 1996. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Üç Boyutlu Yapı Analizi Yapan Bir Bilgisayar Programı, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, Türkiye.
- Tütek, H. ve Gümüšoğlu, Ş., 2008. İşletme İstatistiği, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul.
- URL-1. <http://insaat.balikesir.edu.tr/dokumanlar/suyapilari/barajlar.pdf>, 01.11.2016.
- URL-2. http://eng.harran.edu.tr/moodle/moodledata/7/yesilata/01_Ders_Notlari/07ch4.pdf, 02.11.2016.
- URL-3. <http://web.itu.edu.tr/temizv/Sunular/Mukavemet.pdf>, 10.11.2016.
- URL-4. http://www.baskent.edu.tr/~afet/dersler/genel_matematik_2/dersnotlari_listesi/DERS_%207.pdf, 20.10.2016.
- Xiang, J., Jiang, Z., Wang, Y. ve Chen, X., 2011. Study on Damage Detection Software of Beam-like Structures, Structural Engineering and Mechanics, 39,1, 77-91.
- Wang, H. ve Li, D., 2006. Experimental Study of Seismic Overloading of Large Arch Dam, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35, 199-216.
- Wang, B.S. ve He, Z.C., 2007. Crack Detection of Arch Dam using Statistical Neural Network Based on the Reductions of Natural Frequencies, Journal of Sound and Vibration, 302, 1037-1047.
- Wang, H. ve Li, D., 2007. Experimental Study of Dynamic Damage of an Arch Dam, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 36, 347-366.
- Yorulmaz, Ö., 2009. Dayanıklı Regresyon Yöntemi ve Çeşitli Sosyal Veriler Üzerinde Aykırı Gözlemlerin Teşhisi, Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 12, 76-88.
- Zhou, J., Lin, G., Zhu, T., Jefferson, A.D. ve Williams, F.W., 2000. Experimental Investigation into Seismic Failure of High Arch Dams, Journal of Structural Engineering, ASCE, 126, 926-935.

ÖZGEÇMİŞ

Ebru KALKAN, 1991 yılında Trabzon’da doğdu. İlk ve ortaokulu 1998-2006 yılları arasında Trabzon Kanuni İlköğretim Okulu’nda, orta öğrenimini ise 2006-2009 yılları arasında Trabzon Fatih Lisesi’nde tamamladı. 2010 yılında girdiği Öğrenci Seçme Sınavı ile Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde “Lisans” eğitimi almaya hak kazandı. Lisans eğitimini 07/06/2014 tarihinde bölüm üçüncüsü olarak tamamladı. 2015 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda “Yüksek Lisans” eğitimine başladı. İngilizce bilen KALKAN’ın bugüne kadar yapmış olduğu akademik çalışmalara ait yayın listesi aşağıda sunulmaktadır.

- Altunışık, A.C. ve **Kalkan E.**, 2016. Investigation of Earthquake Angle Effect on The Seismic Performance of Steel Bridges, Steel and Composite Structures, 22, 4, 855-874.
- Altunışık, A.C., **Kalkan E.** ve Öztürk, O.O., 2016. Earthquake Incidence Angle Influence on Seismic Performance of Reinforced Concrete Buildings, Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, İncelemede.
- Altunışık, A.C. ve **Kalkan E.**, 2016. Earthquake Angle Influence on the Seismic Performance of Concrete Highway Bridges, Journal of Advanced Concrete Technology, İncelemede.
- Altunışık, A.C. ve **Kalkan E.**, 2017. Investigation of Structural Behaviors by Forming Similarity Requirement for Concrete Bearing Systems, Computers and Concrete, İncelemede.
- Altunışık, A.C. ve **Kalkan E.**, 2016. Creation of Similarity Requirement with Field Equations in Steel Bearing Systems, Steel and Composite Structures, İncelemede.
- Altunışık, A.C. ve **Kalkan E.**, 2017. Scaling Studies Aiming to Determine Structural Behavior of Arch Dams, Alexandria Engineering Journal, İncelemede.
- Altunışık, A.C., **Kalkan E.**, Başağa, H.B., 2017. Development of Engineering Software to Determine the Structural Behavior of Arch Dams, Programming and Computer Software, İncelemede.

- Altunışık, A.C., **Kalkan E.**, Başağa, H.B., 2016. Kemer Barajların Yapısal Davranışlarını Belirlemek Amacıyla Geliştirilen Mühendislik Yazılımı, DSİ Teknik Bülteni, İncelemede.

