



**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**SONLU ELEMENLAR MODEL GÜNCELLEMESİ
YAPILMIŞ TARİHİ AYAKLI SU DEPOSUNUN DEPREM
PERFORMANSININ BELİRLENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Elif YAZIKSIZ

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Emre ALPASLAN

SAMSUN
2024

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**SONLU ELEMANLAR MODEL GÜNCELLEMESİ
YAPILMIŞ TARİHİ AYAKLI SU DEPOSUNUN DEPREM
PERFORMANSININ BELİRLENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Elif YAZIKSIZ

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Emre ALPASLAN

**SAMSUN
2024**

TEZ KABUL VE ONAYI

Elif YAZIKSIZ tarafından, Dr. Öğr. Üyesi Emre ALPASLAN danışmanlığında hazırlanan “SONLU ELEMENLAR MODEL GÜNCELLEMESİ YAPILMIŞ TARİHİ AYAKLI SU DEPOSUNUN DEPREM PERFORMANSININ BELİRLENMESİ” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 21.8.2024 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	Sonuç
Başkan	Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Fatih BAŞOĞLU Ondokuz Mayıs Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Doç. Dr. Mehmet Fatih Yılmaz Ondokuz Mayıs Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Emre ALPASLAN Ondokuz Mayıs Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

Prof. Dr. Ahmet TABAK
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Yüksek Lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi?

Evet ☐ (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır ☒

21 /08 / 2024
Elif YAZIKSIZ

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : SONLU ELEMENLAR MODEL GÜNCELLEMESİ YAPILMIŞ
TARİHİ AYAKLI SU DEPOSUNUN DEPREM PERFORMANSININ
BELİRLENMESİ

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 26.6.2024 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 12

Tek kaynak oranı : % 4 çıkmıştır.

21 /08 / 2024
Dr. Öğr. Üyesi Emre ALPASLAN

ÖZET

SONLU ELEMENLAR MODEL GÜNCELLEMESİ YAPILMIŞ TARIHİ AYAKLI SU DEPOSUNUN DEPREM PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

Elif YAZIKSIZ

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans, Haziran/2024

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Emre ALPASLAN

Tarihi yapıların korunması ve geleceğe güvenle aktarılması için deprem performanslarının belirlenmesi büyük önem taşır. Bu süreçte yapıyı doğru şekilde temsil edecek bir sonlu eleman modeli oluşturmak kritik bir adımdır. Oluşturulan sonlu eleman modelinin doğruluğu analiz sonuçlarının güvenilirliğini ve doğruluğunu etkiler. Sonlu eleman modeli gerçek yapıdaki karmaşıklıkları, malzeme davranışlarını ve sınır koşullarını tam olarak yansıtmakta yetersiz kalabileceği için modelin doğruluğu kontrol edilmeli ve gerekirse model güncellenmelidir. Bu kontrol, gerçek yapı üzerinde yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen verilerle sonlu eleman modelinden elde edilen veriler karşılaştırması ile yapılabilmektedir.

Bu tez çalışmasında tarihi su deposunun başlangıç sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve bu model üzerinden analitik modal parametreler (doğal frekanslar, mod şekilleri vb.) belirlenmiştir. Çevresel etkiler altında titreşim kayıtları alınarak operasyonel modal analiz yöntemi ile deneysel modal parametreler belirlenmiştir. Analitik ve deneysel modal parametreler karşılaştırılarak aralarındaki farklar belirlenmiştir. Bu farkları minimize etmek için tepki yüzeyi yöntemi kullanılarak analitik model güncellenmiştir. Güncellenen sonlu eleman modeli kullanılarak yapı, tepki spektrumu yöntemiyle analiz edilmiş ve elde edilen analiz sonuçlarıyla tarihi ayaklı su deposunun deprem performansı belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Tarihi yapıların deprem performansı, Sonlu eleman model güncelleme, Operasyonel modal analiz, Tepki yüzeyi yöntemi

ABSTRACT

EVALUATION OF EARTHQUAKE PERFORMANCE OF A HISTORICAL ELEVATED WATER TANK WITH FINITE ELEMENT MODEL CALIBRATION

Elif Yazıksız

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Master, June/2022

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Emre ALPASLAN

Determining the seismic performance of historical structures is crucial for ensuring their longevity and safety, thereby preserving their cultural and historical value for future generations. A critical step in this process is creating a finite element model that accurately represents the structure. The accuracy of the finite element model affects the reliability and precision of the analysis results. Since finite element models may inadequately reflect the complexities, material behaviors, and boundary conditions of the actual structure, it is essential to verify and update their accuracy as necessary. This verification can be achieved by comparing data obtained from experimental studies conducted on the actual structure with data generated from the finite element model.

In this thesis study, the initial finite element model of the historical elevated water tank has been created, and analytical modal parameters (natural frequencies, mode shapes, etc.) have been determined based on this model. Experimental modal parameters have been determined using operational modal analysis method by recording vibrations under environmental influences. Discrepancies between analytical and experimental modal parameters were identified and minimized using response surface methods to update the finite element model. Using this calibrated model, the structure was analyzed using the response spectrum method to determine the seismic performance of the historical elevated water tank.

Keywords: The seismic performance of historical structures, Finite element model updating, Operational modal analysis, Response surface method

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, kıymetli zamanını bana ayıran, yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Dr. Emre ALPASLAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım

Ayrıca, eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olan ve beni motive eden aileme sonsuz teşekkür ederim.

Elif YAZIKSIZ



İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler	1
1.2. Konuyla İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	3
1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı	8
2. TARİHİ YAPILARIN DEPREM PERFORMANSININ BELİRLENMESİ	10
2.1. Giriş	10
2.2. Tarihi Yapılardan Bilgi Toplanması	11
2.3. Tarihi Yapıların Modellenmesi	12
2.3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi	13
2.3.2. Yığma Duvarların Modellenmesi	14
2.4. Tarihi Yapıların Analizi ve Değerlendirilmesi	16
3. YAPILARIN MODAL PARAMETRELERİNİN ELDE EDİLMESİ	20
3.1. Giriş	20
3.2. Modal Parametrelerin Analitik Olarak Belirlenmesi	20
3.3. Modal Parametrelerin Deneyisel Olarak Belirlenmesi	21
3.3.1. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi	22
3.3.1.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi	24
4. SONLU ELEMAN MODELİNİN GÜNCELLENMESİ	27
4.1. Giriş	27
4.2. Tepki Yüzeyi Yöntemi	29
4.3. Tepki Yüzeyi Yöntemi İle Sonlu Eleman Modelinin Güncellenmesi	34
5. YAPILAN ÇALIŞMALAR	37
5.1. Çalışma Yapılan Bina Hakkında Bilgiler	37
5.2. Başlangıç Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması	39
5.3. Yapının Analitik Olarak Modal Parametrelerinin Bulunması	44
5.4. Yapının Deneyisel Olarak Modal Parametrelerinin Bulunması	45
5.5. Modal Parametrelerin Karşılaştırılması	49
5.6. Yapının Sonlu Eleman Modelinin Güncellenmesi	50
5.7. Yapının Deprem Performansının Belirlenmesi	56
5. SONUÇLAR	66
KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ	71

SİMGELER VE KISALTMALAR

- R_a : Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı
 S_{aR} : Azaltılmış Tasarım Spektral İvmesi
 T_p : Yapının Hakim Doğal Titreşim Periyodu
 Γ : Modal Katkı Çarpanı
 $[M]$: Kütle Matrisi
 $[K]$: Rijitlik Matrisi
 $[C]$: Sönüm Matrisi
 $\{\ddot{x}\}$: İvme Vektörü
 $\{\dot{x}\}$: Hız vektörü
 $\{x\}$: Yerdeğiştirme Vektörü
 $\{A\}$: Hareketin Genlik Vektörü
 ω : Açısal Frekans
 $G_{yy}(j\omega)$: Tepki Sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk Matrisi
 $G_{xx}(j\omega)$: Etki Sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk Matrisi
 $H(j\omega)$: Transfer Matrisi
 λ_k : k'inci Modun Kutup Fonksiyonu
 σ_k : Modal Sönümleme Bozunum Sabiti
 ω_{dk} : k'inci Modun Sönümlenmiş Doğal Frekansı
 R_k : k'inci Modun Artık Değer Fonksiyonunu
 ϕ_k : Mod Şekli Vektörü
 γ_k : Modal Katılım Vektörü
 A_k : Her Bir Kutup İçin Bir Artık Değer Matrisi
 B_k : Geriye Dönük Kutuplar İçin Bir Artık Değer Matrisi
 d_k : k'inci Mod İçin Ölçeklendirme Katsayısı
 R^2 : Hesaplama Katsayısı
 $y_{RS}(j)$: j'inci Örnek Noktası İçin Tepki Yüzeyi Modelinin Tahmini Değeri
 $y(j)$: j'inci Örnek Noktasının Gerçek Değer
 $\bar{y}$: Tüm Örnek Noktalarının Ortalaması
 γ_i : i'inci Mod İçin Hedef Frekansa Olan Uzaklığı Ölçen Ağırlık Faktörü
 ω_i^m : i'inci Modun Deneysel Olarak Ölçülen Doğal Frekansı
 ω_i^{calc} : i'inci Modun Tepki Yüzeyi Modeli Kullanılarak Hesaplanan Doğal Frekansı

β : Mod Şekillerine Uygulanan Ağırlıklandırma Fonksiyonu

ϕ_i^m : i'inci Modun Deneysel Olarak Belirlenen Mod Şekli Vektörü

ϕ_i^{cal} : i'inci Modun Tepki Yüzeyi Modeli Kullanılarak Hesaplanan Mod Şekli Vektörü

MAC: Modal Güvence Kriteri

CQC : Tam Karesel Birleştirme

DD2 : Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2

FTAA : Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma

GFTAA : Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma

GSY : Güç Spektral Yoğunluk

HFD : Hızlı Fourier Dönüşümü

OMA : Operasyonel Modal Analiz

RMSE : Kök Ortalama Kare Hatası

SRSS : Toplamının Karekökü Kuralı

TBDY : Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

TYT : Tepki Yüzeyi Yöntemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Sonlu eleman modellerinin oluşturulmasında kullanılan eleman tipleri.....	14
Şekil 2.2. Mikro modelleme.....	14
Şekil 2.3. Basitleştirilmiş mikro modelleme	15
Şekil 2.4. Makro modelleme	15
Şekil 2.5. İvme tepki spektrumunun grafiksel gösterimi	17
Şekil 3.1. Operasyonel modal analiz yönteminin işlem adımları.....	23
Şekil 4.1. Sonlu eleman modelinin iteratif olarak güncellenmesinde işlem adımları	28
Şekil 4.2. N=3 için CCD tekniği ile deneysel tasarım	30
Şekil 4.3. TYY ile sonlu eleman modelinin güncellenmesinde işlem adımları	34
Şekil 5.1. Yapının genel görünümü	37
Şekil 5.2. Yapının kat planları	38
Şekil 5.3. Yapıda meydana gelmiş hasarlar	39
Şekil 5.4. Solid 186 elemanı	39
Şekil 5.5. Yapının sonlu eleman modeli	40
Şekil 5.6. Malzeme türlerine göre yapı elemanları	41
Şekil 5.7. Malzeme özelliklerine göre yapı elemanları.....	42
Şekil 5.8. Ayrık donatı ve yayılmış donatı.....	42
Şekil 5.9. Enine ve boyuna donatılar	43
Şekil 5.10. Kolon ve kirişteki enine ve boyuna donatılar	44
Şekil 5.11. Yapının başlangıç sonlu eleman modeline ait mod şekilleri.....	45
Şekil 5.12. Deneysel çalışmada kullanılan tek ve üç eksenli ivmeölçerler.....	45
Şekil 5.13. İvmeölçerlerin yerleşimi	46
Şekil 5.14. Her kat için ivmeölçer yerleşimi.....	47
Şekil 5.15. İvmeölçerlerin konfigürasyonu.....	47
Şekil 5.16. Deneysel çalışmada kullanılan veri toplama sistemi	48
Şekil 5.17. GFTAA yöntemi ile elde edilen değerler.....	48
Şekil 5.18. Tarihi su deposunun deneysel mod şekilleri.....	49
Şekil 5.19. Tahmin-Gözlemlenen grafiği.....	52
Şekil 5.20. Duyarlılık analizi	52
Şekil 5.21. Yatay elastik tasarım spektrumu	56
Şekil 5.22. Tasarım spektrumu	57
Şekil 5.23. 1. Mod için X yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı	59
Şekil 5.24. 2. Mod için X yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı	59
Şekil 5.25. 3. Mod için X yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı	60
Şekil 5.26. 4. Mod için X yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı	60
Şekil 5.27. 6. Mod için X yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı	61

Şekil 5.28. 11. Mod için X yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı	61
Şekil 5.29. 1. Mod için Z yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı.....	62
Şekil 5.30. 2. Mod için Z yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı.....	62
Şekil 5.31. 3. Mod için Z yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı.....	63
Şekil 5.32. 5. Mod için Z yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı.....	63
Şekil 5.32. 7. Mod için Z yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı.....	64
Şekil 5.34. 12. Mod için Z yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı.....	64



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Analiz yöntemleri	17
Tablo 3.1. Modal parametrelerin elde edilme yöntemleri	23
Tablo 5.1. Başlangıç sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri	41
Tablo 5.2. Yapının başlangıç sonlu eleman modelinden elde edilen doğal frekansları	44
Tablo 5.3. Tarihi su deposunun deneysel doğal frekans değerleri	48
Tablo 5.4. Tarihi su deposunun doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması	50
Tablo 5.5. Girdi parametrelerin alt ve üst sınırları	50
Tablo 5.6. Çıktı parametreleri	50
Tablo 5.7. Tepki yüzeylerinin uygunluğunu belirlemek için kullanılan ölçütler	41
Tablo 5.8. Tepki yüzeylerinin optimizasyonu için hedef değerleri	53
Tablo 5.9. Optimizasyon sonucu elde edilen aday parametre kombinasyonları(1-5)	53
Tablo 5.10. Optimizasyon sonucu elde edilen aday parametre kombinasyonları(6-10)	54
Tablo 5.11. Aday parametre kombinasyonlarıyla elde edilen doğal frekans değerleri	54
Tablo 5.12. Aday parametre kombinasyonlarının hata yüzdeleri	55
Tablo 5.13. Sonlu eleman modelinde dikkate alınan malzeme özellikleri	55
Tablo 5.14. Türkiye deprem tehlike haritası verileri	56
Tablo 5.15. Güncellenmiş sonlu eleman modeline ait frekans değerleri	57
Tablo 5.16. X yönünde Modal Katkı Oranı %0.1 üzerinde olan modlar	58
Tablo 5.17. Z yönünde Modal Katkı Oranı %0.1 üzerinde olan modlar	58

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler

Ülkemiz binlerce yıldır birçok kültüre ve medeniyete ev sahipliği yapmıştır. Bu medeniyetlerden geriye kalan tarihi yapıların korunması ve gelecek nesillere aktarılması kültürel mirasımızın yaşatılması ve tanıtılması açısından büyük önem taşımaktadır. Ülkemiz aktif faylar üzerinde bulunduğu için tarihi yapıların hasar görmesine veya yıkılmasına yol açabilecek önemli faktörlerden biri depremlerdir. Tarihi yapıların deprem altındaki davranışının, performansının ve kapasitelerinin belirlenmesi gereklidir.

Tarihi yapıların deprem performansını değerlendirmek için yapıyı doğru bir şekilde temsil eden bir analiz modeli kullanılmalıdır. Bu model kullanılarak yapılan yapısal analizler sonucunda yapının maruz kaldığı yükler altında nasıl davranacağı, taşıma kapasitesi ve olası göçme mekanizmaları elde edilir. Elde edilen sonuçların değerlendirilmesiyle yapının deprem performansı belirlenir. Eğer gerekiyorsa, yapısal güçlendirme veya onarım önerileri geliştirilir.

Tarihi yapılar genellikle karmaşık geometrilere sahiptirler. Tarihi yapıların özellikle malzeme ve yapısal özellikleri tam olarak bilinemeyebilir. Bu durumlar, sonlu eleman modeli oluşturulurken bazı geometrik basitleştirmelerin ve malzeme özelliklerinden sınır şartlarına kadar çeşitli kabullerin yapılmasını gerektirir. Yapılan basitleştirmeler ve kabuller sonlu eleman modelinin gerçek yapının davranışını eksiksiz olarak temsil edememesine neden olur ve dolayısıyla yapılan analizlerin doğruluğunu etkileyebilir.

Tarihi yapıların deprem performansını belirlemek için kullanılan sonlu eleman modellerinin yapıyı tam olarak temsil edip edemediğin kontrolünün yapılması gerekir. Sonlu eleman modelinin doğruluğunu değerlendirmek için modelden elde edilen sonuçların deneysel yöntemlerle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmalıdır. Bu karşılaştırma genellikle doğal frekans, mod şekilleri ve sönüm oranı gibi yapının dinamik davranışını ifade eden modal parametreler ile yapılır.

Yapının modal parametrelerin belirlenmesi modal analiz olarak adlandırılır. Yapının dinamik davranışını anlamak ve dinamik performansını değerlendirmek için modal analiz önemli bir araçtır. Sonlu eleman modelinin modal analizi ile analitik modal parametreler elde edilir. Yapının modal parametreleri deneysel olarak iki

yöntemle elde edilebilir. Bunlar, Deneysel Modal Analiz (EMA) ve Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemidir. EMA yönteminde yapı belirli bir kuvvetle titreştirilir ve bu titreşimlere ait veriler kullanılarak modal parametreler belirlenir. OMA yönteminde yapının modal parametreleri doğrudan operasyonel koşullarda (gerçek çalışma şartlarında) belirlenir ve yapıya herhangi bir kuvvet uygulanmaz. EMA yöntemi büyük yapılar için uygulanması zor ve maliyetli olan bir yöntemdir. Özellikle tarihi yapılar gibi korunması gereken yapılar için, uygulama sırasında oluşabilecek hasarlar nedeniyle EMA yöntemi yerine OMA yöntemi tercih edilmektedir.

Analitik modal parametreler ve deneysel modal parametreler birbiriyle uyumsuzsa, modelde güncellemeler yapılarak modelin gerçek yapıyı temsil edecek hale getirilmesi gerekir. Bu güncellemeler geometrik detayların, malzeme özelliklerinin ve sınır koşullarının gözden geçirilmesi ve gerektiğinde deneme-yanılma yaklaşımı yada optimizasyon yöntemleri kullanılarak değiştirilmesiyle gerçekleştirilir. Deneme-yanılma yaklaşımında, güncellenmesi gereken parametreler iteratif olarak değiştirilir. Her bir iterasyonda, güncellenmiş sonlu eleman modelinin analitik modal parametreleri hesaplanır ve deneysel modal parametreler ile karşılaştırılır. Bu süreç, analitik modal parametreler ile deneysel modal parametreler arasındaki uyum sağlanana kadar devam eder. Parametrelerin uygun değerleri bulanana kadar birçok iterasyon gerekebilir. Özellikle büyük ve karmaşık yapılar söz konusu olduğunda, her iterasyon için sonlu eleman modelinin yeniden analizi çok fazla hesaplama gücü ve zaman gerektirir.

Optimizasyon yöntemlerinde ise, genellikle analitik ve deneysel modal parametreler arasındaki farkları minimize etmek için bir hedef fonksiyon tanımlanır. Tepki Yüzeyi Yöntemi (TYY) sonlu eleman model güncellenmesinde kullanılan optimizasyon yöntemlerinden biridir. TYY’de girdi ve çıktı parametreleri arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak temsil eden bir model oluşturur. Oluşturulan tepki yüzeyi modelinin doğruluğu, modelin gerçek verilerle uyumlu olup olmadığına göre değerlendirilir. Belirli bir çıktı parametresine ulaşmak için girdi parametrelerinin en uygun kombinasyonunu belirlemek amacıyla optimizasyon çalışmaları yapılır. TYY ve OMA yöntemi sonlu eleman model güncellenmesinde kullanıldığında girdi parametreleri malzeme özellikleri, geometrik parametreler, yük veya sınır koşulları gibi sonlu eleman modelini etkileyen faktörler, çıktı parametreleri ise modal

parametrelerdir. OMA yöntemi ile elde edilen deneysel modal parametreler, TYY'nin hedef fonksiyonunu oluşturmak için kullanılır. TYY'de Deneme-yanılma yaklaşımında olduğu gibi her iterasyonda sonlu eleman modelinin analizi yapılarak modal parametreler hesaplanmaz ve tepki yüzeylerini kullanarak modelin modal parametrelerini tahmin eder. Sonlu eleman model güncellenmesinde TYY'nin kullanımı hesaplama yükünü ve işlem süresini önemli ölçüde azaltır.

1.2. Konuyla İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Bu bölümde, tarihi yapıların sonlu eleman modelinin OMA yöntemiyle edilen deneysel modal parametreler referans alınarak güncellendiği çalışmalara yer verilmiştir. Bu çalışmaların amacı, tarihi yapıların sonlu eleman modellerini, deneysel verilerle uyumlu hale getirmek ve yapıların gerçek davranışını daha iyi yansıtacak şekilde iyileştirmektir.

Gentile vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada tarihi Monza Katedrali'nin yığma çan kulesinin sonlu eleman modeli Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak güncellenmiştir. Güncelleme parametreleri olarak yığma duvarların elastisite modülü ve katedral ile çan kulesi arasındaki etkileşimi modellemek için kullanılan yayların elastik yay sabiti belirlenmiştir. Başlangıç sonlu eleman modelinden elde edilen analitik doğal frekanslar ve Operasyonel Modal Analiz yöntemini kullanarak elde edilen deneysel doğal frekanslar arasındaki farkları en aza indirmek için Ters Eigen-Duyarlılık ve Douglas-Reid gibi sistem tanımlama yöntemleri kullanılmıştır.

Birinci (2010) tarafından yapılan çalışmada ANSYS programı kullanılarak iki adet tarihi taş köprü'nün sonlu eleman modelini oluşturmuş ve analitik modal parametrelerini belirlemiştir. Operasyonel Modal Analiz yöntemini kullanarak elde ettiği deneysel parametreler ile analitik modal parametrelerin arasındaki farklılıkların sebebinin sonlu eleman modeli oluşturulurken dikkate alınan malzeme özellikleri ve sınır koşullarıyla ilgili varsayımların gerçek yapının davranışını tam olarak yansıtamaması olduğunu belirlemiştir. Bu parametrelerde değişiklikler yaparak köprülerin sonlu eleman modeli güncellenmiştir.

Ercan (2010) tarafından yapılan çalışmada tarihi su kemeri ve taş köprüde yapılan malzeme testleriyle elde edilen malzeme parametrelerini kullanarak sonlu eleman modellerini oluşturmuştur. Yapılarda OMA uygulaması ile deneysel modal

parametreleri elde edilmiştir. Deneysel ve analitik modal parametreler karşılaştırılarak, malzeme testlerinin yeterliliği irdelenmiştir ve sonlu eleman model güncelleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Güncellenen sonlu eleman modeli kullanılarak yapıların doğrusal olmayan statik analizleri ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Aras vd (2011) tarafından yapılan çalışmada tarihi yağma Beylerbeyi Sarayı'nın sonlu eleman modeli oluşturulmuştur ve yapının analitik modal parametreleri elde edilmiştir. Yapıda çevresel titreşim testi gerçekleştirilmiştir ve yapının deneysel modal elde edilmiştir. Analitik modal parametreler ve deneysel modal parametreler birbiriyle uyumlu olacak şekilde yapının sonlu eleman model güncellemesi gerçekleştirilmiştir. Güncelleme parametresi olarak yağma duvarın elastisite modülü seçilmiştir ve iteratif olarak güncellenmiştir.

Çalık vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada Trabzon Merkez Hacı Kasım Muhittin Camii'nin taş minaresinin malzeme özellikleri belirlenmiş ve başlangıç sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Yapılan deneysel ölçümlerin sonuçları dikkate alınarak başlangıç sonlu eleman modeli güncellenmiştir. Güncellenen model kendi ağırlığı, deprem etkisi, rüzgar etkisi ve sıcaklık değişimleri gibi durumlara göre analiz edilmiştir ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Yapının restorasyon aşaması için çeşitli öneriler geliştirilmiştir.

Foti vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada İtalya'nın Bari şehrindeki tarihi İl İdaresi Binası'nın kulesinin sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Güncelleme parametreleri olarak malzeme özellikleri(elastisite modülü, birim hacim ağırlığı), kule ile İl İdaresi binası arasındaki etkileşimi modellemek için kullanılan yayların elastik yay sabiti, yapısal olmayan elemanların ağırlığını hesaba katmak için eklenen kütleler seçilmiştir ve bu parametreler, sonlu eleman modeli ile OMA sonuçları arasındaki doğal frekans farklarını minimize etmek üzere iteratif olarak değiştirilmiştir.

Votsis vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada Nicholas Katedrali ve Mamas Kilisesi'nin deneysel modal parametreleri çevresel titreşim verilerini kullanarak belirlenmiştir. Başlangıç sonlu eleman modelinden elde edilen analitik modal parametreler ve deneysel modal parametreler karşılaştırmıştır. Aralarındaki farklar malzemenin elastisite modülü değiştirilerek minimize edilmeye çalışılmıştır.

Gentile vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada tarihi Chiesa Collegiata kilisesinin yağma çan kulesi sonlu eleman modelini Straus7 programını kullanarak

oluşturmuşlardır ve yapıda gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarla yapının deneysel modal parametrelerini elde etmişlerdir. Analitik doğal frekans ve deneysel modal frekanslar arasındaki fark %1.2 olduğunda yapılan model güncellemelerinin yeterli olduğu sonucuna varmışlardır.

Hökelekli (2015) tarafından yapılan çalışmada tarihi Hafsa Sultan Camii'nin başlangıç sonlu eleman modeli ABAQUS programı kullanılarak oluşturulmuştur. Sultan Camii'nin deneysel modal parametreleri OMA yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Başlangıç sonlu eleman modeli kullanılarak elde edilen modal parametreler ile deneysel modal parametreler arasındaki farklar tespit edilmiştir. Bu farkların, başlangıç sonlu eleman modeli oluşturulurken kullanılan malzeme özellikleri ve sınır şartları için yapılan kabullerin gerçekte tam olarak sağlanamaması olduğu düşünülmüştür. Bu nedenle, yapılan çalışmada, malzeme parametreleri iteratif olarak değiştirilerek model güncellemesi gerçekleştirilmiştir. 1999 Kocaeli depremi Düzce ivme kayıtları kullanılarak, yapının zaman tanım alanında doğrusal analizi gerçekleştirilmiştir ve deprem davranışı belirlenmiştir.

Costa vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada taş yığma kemer köprüsünün sonlu eleman modelini OMA yöntemiyle elde ettiği deneysel sonuçları kullanarak güncellemiştir. Yapı malzemesinin elastisite modülü güncelleme parametresi olarak dikkate alınmıştır. Taş kemer köprülerinin gerçek mekanik parametrelerini belirlemek için sonlu elemanlar analizi ve deneysel sonuçların birlikte değerlendirildiği bir model güncelleştirme yöntemi kullanılabileceğini vurgulamıştır.

Torres vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada Şili'deki Metropolitan Katedrali'nin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. OMA yöntemiyle elde edilen yapının deneysel modal parametreleri kullanılarak oluşturulan model iki aşamada güncellenmiştir. İlk aşamada, yapı malzemelerinin elastisite modülleri ve yatay rijitlik katsayıları, deneysel doğal frekans ile analitik frekans arasındaki farkı ölçen hata fonksiyonu minimize edilerek güncellenmiştir. İkinci aşamada ise, farklı elastisite modülü değerleri kullanılarak oluşturulan modellerle frekans ve MAC değerleri arasındaki farkı minimize etmeye yönelik bir optimizasyon yapılmıştır.

Ferrari vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, tarihi Brivio Köprüsü'nün sonlu eleman modeli, ilk olarak lineer elastik bir model olarak ABAQUS programında oluşturulmuş, daha sonra bu model MATLAB programına aktarılmıştır. OMA

yöntemiyle elde edilen deneysel modal parametreler köprünün sonlu eleman modelinin güncellenmesinde referans olarak kullanılmıştır. Yapılan duyarlılık analizlerinin sonuçları göz önüne alınarak güncelleme parametresi olarak yapı malzemelerinin elastisite modülü ve birim hacim ağırlığı seçilmiştir. Latin Hypercube Sampling yöntemi global optimizasyon teknikleriyle birleştirilerek model güncelleme gerçekleştirilmiştir. Güncelleme sürecinden önce, analitik doğal frekanslar ile deneysel doğal frekanslar arasındaki en büyük fark %9.13 iken güncellemeden sonra bu fark %6.42'ye düşmüştür.

Capanna vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada St. Silvestro Çan Kulesi'nin sonlu eleman modeli OMA yöntemiyle elde edilen deneysel modal parametreler referans alınarak güncellenmiştir. Yığma birimin elastisite modülü güncellenecek parametre olarak belirlenmiştir. Güncelleme modelin deneysel verilerle ne kadar uyumlu olduğunu ölçen bir amaç fonksiyonunu minimize eden bir optimizasyon problemi çözülerek gerçekleştirilmiştir. Güncellenmiş model kullanılarak, Kule'nin sismik kapasitesi değerlendirilmiştir.

Standoli vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada tarihi Ostra Civic Kulesi'nin iki farklı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. İlk modelde tüm malzemeler homojen ve izotropik olarak modellenmiş olup, güncellenmesi gereken parametreler elastisite modülü, birim hacim ağırlığı ve poisson oranı olarak belirlenmiştir. İkinci modelde yığma birim ve harç ortotropik olarak, beton ise izotropik olarak modellenmiş olup, güncellenmesi gereken parametreler yığma birim ve harç için elastisite modülleri, kayma modülleri, poisson oranları ve birim hacim ağırlığı; beton için elastisite modülü, birim hacim ağırlığı ve poisson oranı olarak belirlenmiştir. OMA yöntemi ile elde edilen deneysel modal parametreler referans alınarak, her iki sonlu eleman modelindeki güncellenecek parametreler Genetik Algoritmalar yardımıyla optimize edilmiştir. Optimizasyon sürecinin sonunda, her iki modeldeki parametreler OMA verileriyle uyumlu olacak şekilde güncellenmiştir.

Shabani vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada tarihi Slottsfjell Kulesi'nin zemin-yapı etkileşiminin anlaşılabilmesi için üç farklı sınır koşuluyla üç farklı sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. İlk modelde yapının zeminle olan etkileşimini göz ardı edilirken ikinci modelde zemin-yapı etkileşimini kısmen dikkate alınarak, zemin yayları eklenmiştir. Üçüncü modelde ise temel ve zemin detaylı bir şekilde modellenmiştir. Oluşturulan bu modeller OMA yöntemi ile elde edilen deneysel modal

parametreler referans alınarak güncellenmiştir. İlk modelin güncellenmesi, yığma birimin malzeme özelliklerinin güncellenmesiyle gerçekleştirilmiştir; ikinci modelde yığma birimin malzeme özellikleri ve yayların elastik sabitleri güncellenmiştir;  modelde ise hem yığma birimin hem de zemin malzeme özellikleri güncellenmiştir.  farklı model üzerinde iki sismik kayıt kullanılarak zaman tanım alanında analiz yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca,  model kullanılarak rezonans etkisi değerlendirilmiştir.

Alpaslan vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada tarihi Kurt Köprüsü'nün başlangıç sonlu eleman modeli ANSYS programı kullanılarak oluşturulmuştur. Köprünün modal parametrelerini belirlemek için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Tepki yüzeyi yöntemi kullanılarak köprünün sonlu eleman model güncellenmesi gerçekleştirilmiştir. Güncellenen sonlu eleman modeli kullanılarak tarihi köprünün taşıma kapasitesinin değerlendirilmesi için derecelendirme ve güvenilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Gara vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada tarihi Santa Maria in Via Kilisesi'nin sonlu eleman modeli ANSYS programı kullanılarak oluşturulmuştur. Yapıda evresel titreşim testleri gerçekleştirilmiştir ve OMA yöntemiyle yapının deneysel modal parametreleri elde edilmiştir. Güncellenmesi gereken parametreler olarak yapı malzemelerinin elastisite modülleri seçilmiştir. Güncelleme sürecinde, deneysel ve analitik modal parametreler arasındaki farkları dikkate alan hata fonksiyonunu minimize etmek için Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritması kullanılmıştır.

Sunara vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada tarihi yığma an kulesinin sonlu eleman modelinden elde edilen analitik modal parametrelerin, OMA yöntemi kullanılarak elde edilen deneysel modal parametrelerle uyumlu hale gelmesi için yapı malzemelerinin elastisite modülü ve birim hacim ağırlığı iteratif olarak değiştirilmiştir. Güncelleme sürecinden sonra, analitik doğal frekanslar ile deneysel doğal frekanslar arasındaki en büyük fark %8.9'a dşmştir.

Altunışık vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada tarihi Santa Maria Kilisesi'nin ve misafirhane binasının sonlu eleman modeli Abaqus programı kullanılarak oluşturulmuştur. Analitik doğal frekans ile OMA yöntemiyle elde edilen deneysel doğal frekans değerleri arasındaki farklar yapı malzemelerinin elastisite modülü ve

birim hacim ağırlığı değerleri iteratif olarak değiştirilerek minimize edilmeye çalışılmıştır. Güncellemelerinin sismik sonuçlar üzerindeki etkilerini anlamak için başlangıç ve güncellenmiş sonlu eleman modelleri kullanılarak zaman tanım alanında analizi gerçekleştirilmiştir ve yapının deprem performansı değerlendirilmiştir.

1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı

Tarihi su depoları genellikle yerel kültürel ve tarihi mirasın önemli bir parçasıdır. Bu yapılar, geçmişteki teknoloji, mimari ve mühendislik bilgisi hakkında bilgi verir. Şehirlerin ve bölgelerin kimliklerini belirlemelerine yardımcı olurlar.

Tarihi su depoları, su kaynağını ihtiyaç duyulan çevrelere yeterli basınçla iletebilmek amacıyla yüksek bir şekilde inşa edilmişlerdir ve bu tür yapılar, genellikle büyük bir su depo ve sıvı kütlesi içerdiklerinden özellikle narin yapısal elemanlar üzerinde büyük bir yük oluştururlar. Bu yüzden tarihi su depoları özellikle yatay deformasyonlara sebep olacak yüklere karşı çok narin yapılardır. Tarihi ve kültürel değere sahip olan bu yapıların işlevselliğine devam edebilmesi için deprem performanslarının belirlenmesi, gerektiğinde onarım ve güçlendirme çalışmalarının yapılması önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında, Samsun'da yer alan 150 yıllık geçmişe sahip tarihi su deposunun gerçek davranışını temsil edebilen güncellenmiş sonlu eleman modeli kullanılarak yapının deprem performansının belirlenmesi amaçlanmıştır. Tez çalışması altı ana başlıktan oluşmaktadır.

Bu çalışmanın ilk bölümünde tez konusu hakkında genel bilgiler verilmiştir ve konuyla ilgili daha önce yapılmış çalışmalardan, tezin amacı ve kapsamından bahsedilmiştir.

İkinci bölümde tarihi yapıların deprem performansının belirlenmesinden bahsedilmiştir. Tarihi yapılardan bilgi toplanması, tarihi yapıların modellenmesi, tarihi yapıların analizi ve değerlendirilmesi başlıkları incelenmiştir.

Üçüncü bölümde yapıların modal parametrelerinin belirlenmesi üzerinde durulmuştur. Bu bölümde modal parametrelerin belirlenmesinde kullanılan yöntemler hakkında bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde sonlu eleman model güncellemesinden bahsedilmiştir. Tepki yüzeyi yönteminden ve bu yöntemin sonlu eleman model güncellenmesinde kullanımı

hakkında bilgiler verilmiştir.

Beşinci bölümde yapılan çalışmadan bahsedilmiştir. Yapılan çalışmalar sırasıyla;

- Yapının başlangıç sonlu eleman modeli oluşturularak yapının analitik modal parametrelerinin belirlenmesi

- Çevresel etkiler altında titreşim kayıtları alınması ve operasyonel modal analiz yöntemi kullanılarak yapının deneysel modal parametrelerinin belirlenmesi

- Elde edilen analitik ve deneysel modal parametreler karşılaştırılarak aralarındaki farkların belirlenmesi

- Tepki yüzeyi yöntemi kullanılarak sonlu eleman modelinde gerekli güncellemeler yapılması ve yapıyı daha doğru temsil eden sonlu eleman modeli elde edilmesi

- Güncellenmiş sonlu eleman modelinin tepki spektrumu yöntemi kullanılarak analiz edilmesi ve bu analiz sonuçlarının değerlendirilmesi ile tarihi su deposunun deprem performansının belirlenmesidir.

Son bölümde tez çalışması sonucunda elde edilen sonuçlardan bahsedilmiştir.

2. TARİHİ YAPILARIN DEPREM PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

2.1. Giriş

Tarihi yapılar genellikle yığma yapılar olarak inşa edilmiştir. Bu tür yapılar, taş veya tuğla gibi yığma birimlerle oluşturulur ve bu birimler basınç altında iyi performans gösterirler. Yığma birimlerin birbirlerine ve yapının taşıyıcı elemanlarına olan bağlantıları, düşey yükleri taşıyacak şekilde tasarlanmıştır. Deprem yapıda düşey kuvvetler ile birlikte yatay kuvvetler de ortaya çıkarır. Yapının yalnızca düşey yükler altında iyi performans göstermesi yapının depreme karşı yeterli dayanıklılığın olduğunu göstermez. Özellikle yığma yapıların büyük bir kütlesi olduğu için, deprem sırasında bu yapılar üzerinde büyük etkiler meydana gelir. Yatay yükler, yapı elemanları arasındaki bağlantıları zorlayabilir ve bu da yapıya gerilim ve kesme kuvvetleri uygulayabilir. Bu nedenle, deprem etkisi altında yapıların tepkilerini ve potansiyel hasar noktalarını belirlemek önemlidir. Tarihi yapıların deprem performansın belirlenmesi için yapının taşıyıcı sistem modeli oluşturulur ve çeşitli etkiler altında yapısal analizler gerçekleştirilir. Bu analizlerde elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, yapıların deprem altında nasıl davranacaklarını anlamak ve gerekirse güçlendirme veya koruma önlemleri almak için kritik bir rol oynar.

Tarihi yapıların deprem performansı dört aşamada belirlenir. İlk aşama tarihi yapılardan bilgi toplanmasıdır. Yapının mevcut durumunu ve geçmişte maruz kaldığı değişiklikleri anlamak için bu aşama kritik öneme sahiptir. Bu aşamada elde edilen bilgiler, yapının gerçek davranışını en iyi şekilde temsil edecek analitik bir modelin oluşturulması için temel teşkil eder. İkinci aşama yapının geometrisi, malzeme özellikleri ve yapısal elemanların detaylarını içeren taşıyıcı sistem modeli oluşturulmasıdır. Oluşturulan modelin doğruluğu, deprem performansının belirlenmesini doğrudan etkiler. Model, yapıyı ne kadar doğru bir şekilde temsil ederse, analiz sonuçları da o kadar güvenilir olacaktır. Üçüncü aşamada ise, bu model kullanılarak uygun bir analiz yöntemiyle yapının kendi ağırlığı ve dinamik yükler, özellikle de deprem yükleri altındaki davranışının analiz edilmesidir. Bu analizler, doğrusal statik analiz, doğrusal dinamik analiz, doğrusal olmayan statik analiz ve doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemleri ile gerçekleştirilir ve yapıda oluşan gerilmeler, deformasyonlar ve potansiyel hasar bölgeleri hakkında bilgi sağlar. Son

aşama, analiz sonuçlarının değerlendirilmesi ve yapının deprem performansı belirlenmesidir. Bu değerlendirme, yapının hangi bölgelerinde hasar oluşabileceğini tespit etmeye ve gerekli onarım ve güçlendirme müdahalelerine karar vermeye yardımcı olur.

2.2. Tarihi Yapılardan Bilgi Toplanması

Tarihi yapı hakkında bilgi sahibi olmak için yapı hakkında tarihi araştırmalar yapılması gerekmektedir. Yapı ile ilgili arşiv kayıtları, yayınlar, belgeler ve çizimler derlenmeli ve detaylıca incelenmelidir. Yapının yapım tarihi, yapım tekniği, yapım aşamaları belirlenmelidir. Yapının önceden zarar görmüş bölgeleri, gelecekte yine zarar görebilecek potansiyel risk bölgeleri olduğundan yapının geçmişte yaşadığı depremler, önceden oluşmuş hasarlar, yapılan onarım ve güçlendirmeler belirlenmelidir.

Tarihi bir yapının modellenmesinde gerekli olan çizimler genellikle bulunmamaktadır. Bu yüzden yapının taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanlarının mevcut durumunu yansıtacak rölöve çizimlerinin hazırlanması gerekir.

Yapıların yük altındaki davranışlarında inşa edilirken kullanılan yapı malzemeleri belirleyici bir rol oynarlar. Bu yüzden yapılarda kullanılan malzemelerin özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi, yapıların yük altındaki davranışlarını anlamak ve güvenliğini sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. Yanlış tanımlanan malzeme özellikleri, analiz sonuçlarında ciddi hatalara ve yanıltıcı bilgilere yol açabilir. Tarihi yapıların malzeme özelliklerinin belirlenmesi için çeşitli tahribatsız deneyler uygulanabilir. Yüzey sıcaklığı ve nemi ölçümü, yüzey sertliği ölçümü, ultrases ölçümü, infrared/termografi, magnometri, georadar/radar tarama gibi yöntemler, yapı malzemelerinin özelliklerini belirlemek için kullanılan yaygın tahribatsız deneylerdir. Gerekli görüldüğü durumlarda az tahribatlı deneyler de yapılabilir. Yaygın az tahribatlı deneyler; yerinde gerilme deneyi (Flat-Jack), yerinde kayma deneyi, endoskopi uygulaması, yapıdan numune alınmasıdır. Tarihi yapıda kullanılan malzemelerin özelliklerini belirlenemediği durumlarda, tarihi yapılarla ilgili geçmiş araştırmalar ve çalışmalar incelenebilir ve bu çalışmalarda belirtilen malzeme özellikleri referans alınabilir. Ulusal ve uluslararası inşaat yönetmelikleri ve standartlar, tarihi yapılarda kullanılan malzemelerin özelliklerini tahmin etmek için kullanılabilir. Benzer dönemlerde ve benzer tekniklerle inşa edilmiş diğer tarihi yapılarla karşılaştırmalar yapılabilir ve malzemelerin olası özellikleri hakkında bilgi

elde edilebilir.

Tarihi yapılarda zemin sorunları genellikle yapının inşa edilmesinden hemen sonra veya bir süre sonra ortaya çıkar. Yapıda ve çevrede önemli ve beklenmedik bir değişiklik olmaksızın yıllarca aynı yerde durmuşsa, temel zemininde son yıllarda bir sorun çıkma olasılığı düşüktür. Bu tür yapıların genellikle oturması yıllar önce tamamlanmıştır (Sesigür vd., 2007). Ancak, tarihi bir yapının deprem etkilerine karşı dayanıklılığını belirlemek ve gerekli güçlendirme veya iyileştirme önlemlerini alabilmek için zemin ve deprem parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gereklidir. Bu nedenle, yapının bulunduğu bölgede ve laboratuvar ortamında zemin deneyleri yapılması gerekmektedir. Zeminin özellikleri, yapıya etkileyen deprem kuvvetlerinin büyüklüğünü ve etkilerini belirlemek için kullanılmaktadır.

2.3. Tarihi Yapıların Modellenmesi

Tarihi yapıların deprem performansının belirlenmesinde yapıların doğru modellenmesi kritik bir aşamadır. Oluşturulan modelin, yapının geometrisini, malzeme özelliklerini ve yapısal elemanlarını doğru bir şekilde temsil etmesi, yapısal analiz sonuçlarının güvenilirliğini doğrudan etkiler. Yanlış ya da eksik modelleme analiz sonuçlarında ciddi hatalara neden olabilir ve yapıların güvenliği ve dayanıklılığı hakkında yanıltıcı bilgilere yol açabilir. Ancak, tarihi yapıların gerçek yapıyı tam olarak temsil şekilde modellenmesi oldukça zorlu bir süreçtir.

Tarihi yapılar genellikle karmaşık geometrilere sahiptir ve modelleme işlemi sırasında sadeleştirme yapılması gerekebilir. Özellikle kubbeler, kemerler, çatılar gibi detaylı yapı elemanları, oluşturulan modelde tam olarak temsil edilemeyebilir.

Tarihi yapıların yapımında kullanılan malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi zor olabilir. Ayrıca, tarihî yapıların yapımında kullanılan malzemelerin standartlaştırılmamış olması, aynı yapı içinde bile benzer elemanların farklı malzeme özelliklerine sahip olabileceği anlamına gelir. Bu durum, yapı elemanlarının gerçek özelliklerinin modelde doğru bir şekilde tanımlanmasını zorlaştırır.

Tarihi yapıların modellemesi sırasında var olan hasarlar ve yapı üzerinde yapılmış olan onarımların bilinmemesi oldukça önemli bir sorundur. Çünkü bu hasarlar ve onarımlar, yapısal analizin doğru bir şekilde yapılmasını ve sonuçların güvenilir olmasını etkileyebilir.

Eski dönemlere ait kaynakların eksik veya yetersiz olduğu için tarihi yapıların

detaylı planlar veya çizimlerinin bulunmaması, tarihi yapıların zaman içinde geçirdiği doğal aşınma ve hasarların geometrik özelliklerin değişmesine yol açması gibi nedenlerden dolayı geometrik özellikleri tam olarak bilinemeyebilir veya belirsizlikler içerebilir. Bu tür belirsizlikler ve eksiklikler modellemenin doğru yapılmasını zorlaştırabilir.

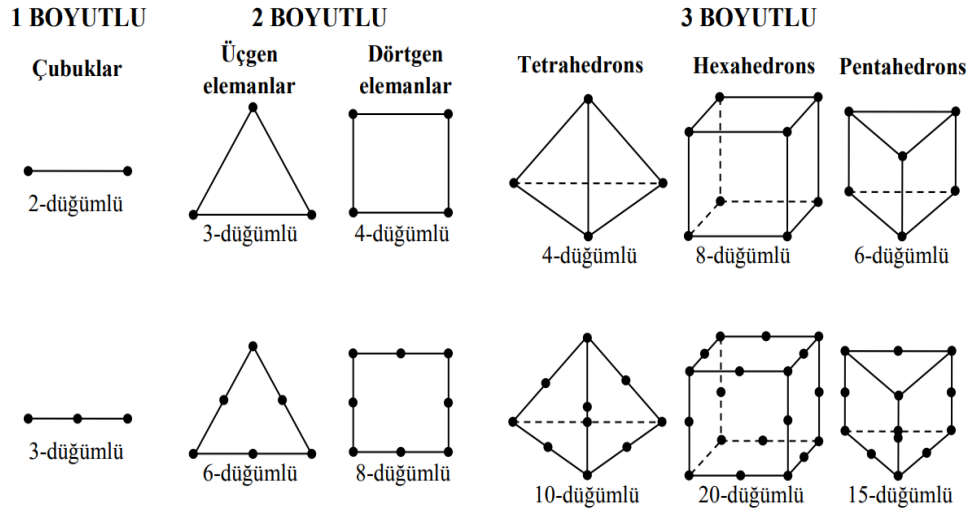
Tarihi yapıların karmaşık geometriye sahip olmaları, malzeme özelliklerinin tam olarak belirlenememesi, var olan hasarların ve geçirdiği onarımların tam olarak belirlenememesi ve doğru bir şekilde temsil edilememesi, yapının geometrik özelliklerinin tam olarak bilinememesi gibi nedenler dolayı oluşturulan model tam olarak yapıyı temsil edemeyebilir. Bu nedenle, tarihî yapıların modelleme işlemleri büyük bir titizlikle ve dikkatle gerçekleştirilmelidir.

2.3.1. Sonlu Eleman Yöntemi

Sonlu Eleman Yöntemi, karmaşık sistemlerin analizinde oldukça yaygın olarak kullanılan bir mühendislik hesaplama tekniğidir. Sonlu eleman yönteminde analizi yapılacak sistem düğüm noktalarında birbirleri ile bağlantılı olan küçük ve basit geometrik şekillere bölünür ve bu şekiller sonlu eleman olarak adlandırılır. Malzeme özellikleri bu elemanlara atanır. Her bir sonlu eleman için, elemanın geometrisi, malzeme özellikleri ve uygulanan yükler göz önüne alınarak geçerli denklemler oluşturulur. Oluşturulan denklemler, elemanlar arasındaki bağlantılar ve sınır koşulları dikkate alınarak birleştirilir ve böylece denklem takımları elde edilir. Bu denklem takımlarının çözülerek sistemdeki bilinmeyen değerler (gerilim, deformasyon, vb.) hesaplanır. Bu yöntem, tarihi yapıların modellenmesinde de kullanılabilir ve yapısal analizlerin yapılmasına olanak tanır.

Sonlu eleman modeli, tek boyutlu (çubuk şeklinde modellenen), iki boyutlu (düzlem şeklinde modellenen) veya üç boyutlu (katı model olarak modellenen) elemanlar kullanılarak oluşturulabilir (Şekil 2.1.).

Sonlu Elemanlar Yöntemi ile oluşturulan matematiksel modelin doğruluğu, birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörler arasında seçilen eleman tipi, eleman sayısı, elemanların davranışlarında yapılan kabuller, malzeme özelliklerinin doğru şekilde tanımlanması, geometrik özelliklerin doğruluğu ve sınır/kısıtlama koşullarının uygunluğu bulunmaktadır (Ercan, 2010).

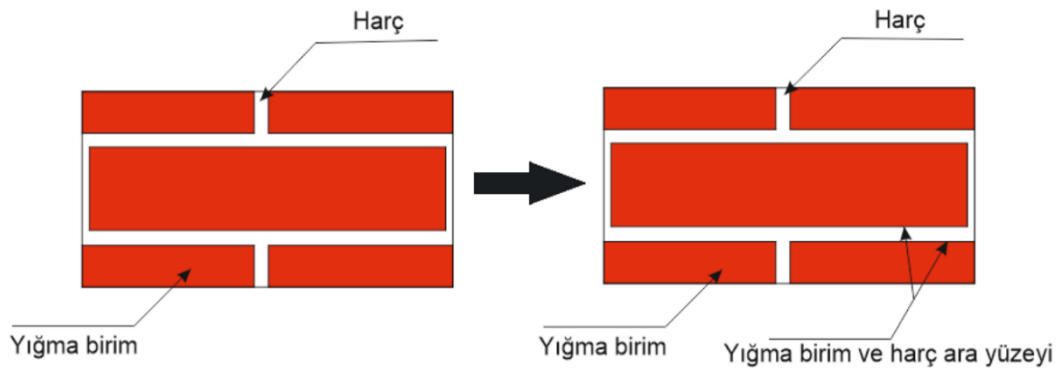


Şekil 2.1. Sonlu eleman modellerinin oluşturulmasında kullanılan eleman tipleri

2.3.2. Yığma duvarların modellenmesi

Tarihi yığma yapıların taşıyıcı elemanları olan duvarlar, taş ve tuğla gibi yığma birimlerinden ve bu birimleri birbirine bağlayıp bir bütünlük teşkil etmesini sağlayan harçtan oluşmaktadır. Yığma birimler ve harç farklı özelliklere sahip olduğu için yığma duvarların gerçeğe en yakın şekilde modellenmesi diğer yapılara göre daha hassas bir yaklaşım gerektirir.

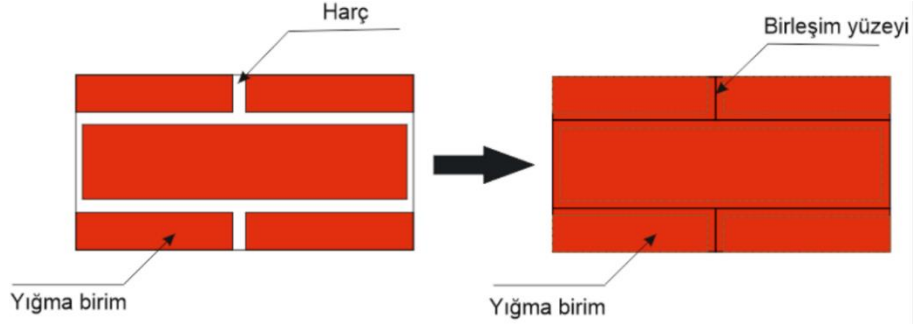
Yığma duvarların modellenmesinde üç farklı modelleme yöntemi öne çıkmaktadır (Lourenço, 1996). Bunlar, mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modellemedir.



Şekil 2.2. Mikro modelleme

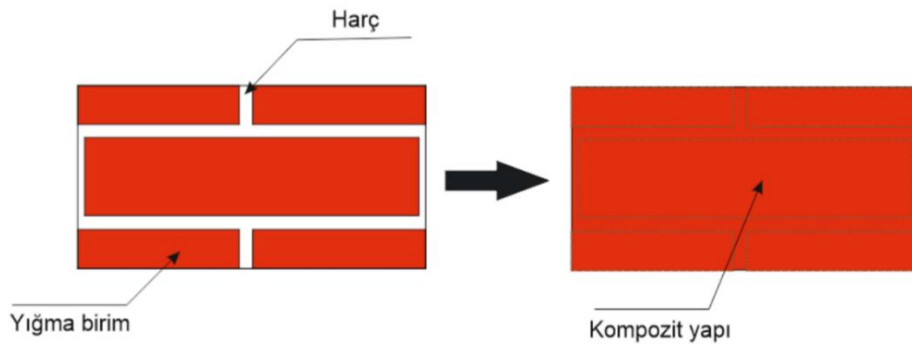
Mikro modelleme tekniğinde yukarıdaki şekilde gösterildiği gibi yığma birimler ve harç ayrı ayrı modellenir. Bu teknikte yığma birimlerin ve harcın malzeme özellikleri (elastisite modülleri, poisson oranları) bilinmelidir. Bu nedenle, bu özelliklerin belirlenmesi için detaylı bir çalışma yapılmalıdır. Mikro modellemede

yığma birimler ile harcın birleşim bölgelerinde oluşan ara yüzeyler modele dâhil edildiği için yığma birimler ile harç arasındaki mekanik ilişkilerin doğru bir şekilde tanımlanması, modelin gerçek davranışını doğru bir şekilde yansıtabilmesi için kritik öneme sahiptir.



Şekil 2.3. Basitleştirilmiş mikro modelleme

Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğinde yukarıdaki şekilde gösterildiği gibi harç göz ardı edilerek yığma birimlerinin gerçek boyutları harç kalınlığının yarısı kadar genişletilir. Bu yöntemde, yığma birimler ve yığma birimlerin birleşim yüzeyleri modellenir. Meydana gelmesi muhtemel çatlakların diğer deformasyonların birleşim yüzeylerinde oluşacağı kabul edilir. Bu şekilde, harcın göz ardı edilmesiyle modelleme süreci basitleştirilirken, yığma birimler arasındaki ilişkiler ve olası mekanik davranışlar hala göz önünde bulundurulur. Harç malzemesinin yapıya olan katkıları ve harç içinde meydana gelebilecek göçme mekanizmalarının tam olarak hesaba katılamaması gibi sorunlar bu yöntemin doğruluğunu etkileyebilir.



Şekil 2.4. Makro Modelleme

Makro modelleme tekniğinde, yığma birim ve harç yukarıdaki şekilde gösterildiği gibi homojen tek bir malzeme gibi düşünülüp modellenir. Bu malzemenin özellikleri homojenleştirme işlemleri sonucunda elde edilir. Homojenleştirme işlemi genellikle yığma birimlerin ve harcın özelliklerinin ortalaması veya ağırlıklı

ortalaması alınarak yapılır. Makro modelleme tekniğinde, bu homojenleştirme işlemi, yapısal analizi daha basit ve hızlı hale getirir.

2.4. Tarihi Yapıların Analizi ve Değerlendirilmesi

Yapısal analiz yöntemleri, yapıya etki eden yüklerin durumuna göre analizler statik ve dinamik analiz olarak sınıflandırılır. Statik analizde tek ve sabit bir kuvvet dikkate alınırken dinamik analizde kuvvetin değeri analiz sırasında değişir. Yapısal modelleme aşamasında dikkate alınan malzeme davranışına göre doğrusal elastik veya doğrusal olmayan olarak ikiye ayrılır. Doğrusal elastik davranış gösteren malzemelerde, gerilme ve deformasyon arasında doğrusal bir ilişki vardır. Deformasyonlar, gerilme kaldırıldığında tamamen tersine çevrilebilir ve malzeme başlangıçtaki durumuna geri dönebilir. Doğrusal olmayan davranış gösteren malzemelerde ise uygulanan gerilme arttıkça malzeme plastik deformasyon bölgesine ulaşabilir. Plastik deformasyon bölgesinde gerilme kaldırıldığında malzeme başlangıçtaki durumuna dönemez ve kalıcı deformasyonlar meydana gelir.

Doğrusal analiz yöntemlerinde yapı doğrusal elastik bir sistem olarak ele alınır. Ancak gerçek dünya koşullarında yapıların davranışı genellikle doğrusal değildir. Doğrusal analiz yöntemlerinde, yapıların deprem gibi dinamik yükler altında göstereceği doğrusal olmayan davranışları dikkate alarak, bu davranışlardan kaynaklanan kapasite artışı ve yapıya olan talepteki azalma Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı (R_a) ile hesaba katılır. Yığma yapılar, genellikle elastik ötesi davranış sınırlı olan yapılardır. Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzunda, bu tür yapılar için deprem yükü azaltma katsayısı 3 olarak önerilmiştir.

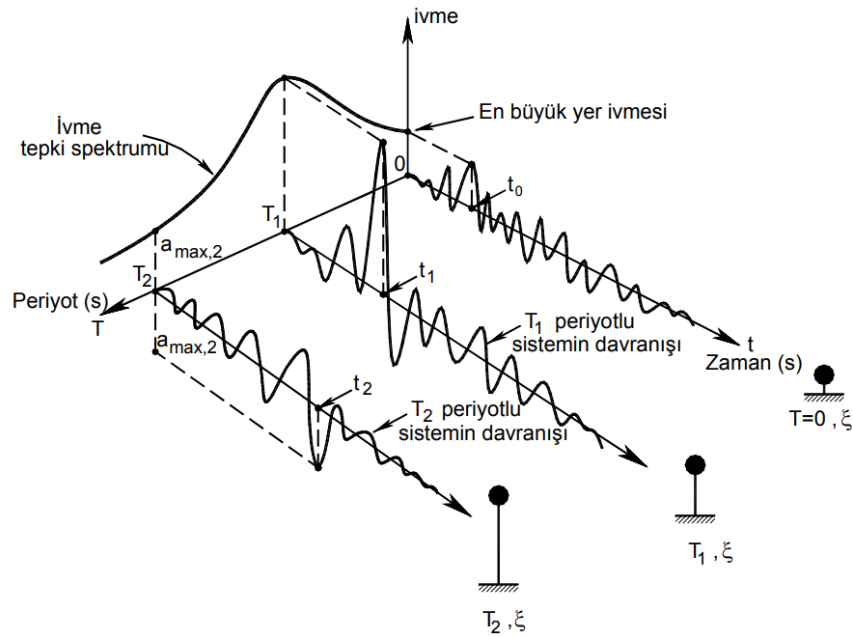
Tarihi yapıların analizinde doğrusal olmayan analiz yöntemlerinin kullanılabilmesi için, yapıların plastik deformasyon kapasitesinin yeterli düzeyde olması önemlidir. Bu kapasite yapıların deprem gibi büyük dinamik yükler altında elastik sınırlarının ötesinde deformasyon gösterebilme ve bu deformasyon sonrasında da yapısal bütünlüğünü koruyabilme kabiliyetini tanımlar. Doğrusal olmayan analizlerde elde edilen sonuçlarının, analizde kullanılan malzeme modelleri ve parametrelerine bağlılığı yüksek olduğu için bu parametrelerin olabildiğince gerçekçi olarak belirlenmelidir.

Tablo 2.1.' de gösterildiği gibi malzeme davranışına ve yük etkisine göre dört farklı analiz yöntemi söz konusudur.

Tablo 2.1. Analiz yöntemleri

	Doğrusal	Doğrusal Olmayan
Statik	Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi	İtme Analizi
Dinamik	Tepki Spektrumu Analizi	Zaman Tanım Alanında Analiz

En doğru ve güvenilir, aynı zamanda en karmaşık olan yöntem *Zaman Tanım Alanında Analiz* yöntemidir. Taşıyıcı sistemin hareket denkleminin seçilen bir ivme kaydı altında zaman artımları ile adım adım çözümlenmesidir. Her bir adımda taşıyıcı sistemde meydana gelen yer değiştirme, şekil değiştirme ve iç kuvvetler belirlenir. İvme kayıtları kullanılarak elde edilen bu sonuçlar uygun istatistik yöntemlerle birleştirilir. Bu hesap yönteminde kullanılacak ivme kayıtlarının yapının bulunduğu yer ve zemin özellikleri ile uyumlu olması ve yapının modelinin kütle, sönüm, rijitlik ve geometri özellikleri göz önüne alarak doğru bir şekilde oluşturulması gerekir.



Şekil 2.5. İvme tepki spektrumunun grafiksel gösterimi

Yapıların tepkisini daha iyi anlamak ve problemi basitleştirmek için tepki spektrumu kavramı geliştirilmiştir. Tepki spektrumu belirli bir deprem kaydı etkisinde aynı sönüm oranına(ξ) fakat farklı periyotlara(T) sahip tek serbestlik dereceli sistemlerin göstereceği en büyük tepkilerin(yer değiştirme, hız veya ivme) periyot değerlerine göre çizilmesi ile oluşturulmaktadır. Tepki spektrumu elde edilen en büyük tepki değerlerine göre adlandırılır. Yapıların yer değiştirme tepkilerini gösteren spektrum yer değiştirme spektrumu olarak adlandırılırken, hız tepkilerini gösteren

spektrum hız spektrumu ve ivme tepkilerini gösteren spektrum ise ivme spektrumu olarak adlandırılır. Deprem kuvvetini ivmeyi binanın kütlesiyle çarparak doğrudan elde edebildiğimiz için ivme spektrumu yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.5.). Tasarım spektrumları, birçok deprem kaydı kullanılarak oluşturulan spektrumların istatistik yöntemlerle değerlendirilmesi sonucu elde edilirler.

Tepki Spektrumu Analizi yönteminde ilk olarak yapının mod şekilleri ve bu mod şekillerine ait periyot değerleri elde edilir. Her bir modun yapının toplam yanıtına olan katkısını belirlemek için modal katkı çarpanı (Γ) hesaplanır. Tasarım tepki spektrumu kullanılarak bu periyot değerlerine karşılık gelen spektral ivme (S_a) değerleri belirlenir. Her bir mod için modal katkı çarpanı ve spektral ivme değerleri kullanılarak deprem yükleri ve bu yükün yapıda oluşturduğu iç kuvvetler, yerdeğiştirme vb. ayrı ayrı elde edilir ve bu modların katkıları, toplam tepkiyi belirlemek için birleştirilir. Bu yöntemde, her bir titreşim modunun maksimum katkıları eşzamanlı olarak oluşmadığı için üst üste toplanması uygun olmaz. Bu yüzden maksimum katkılar Kareleri Toplamının Karekökü Kuralı (SRSS) veya Tam Karesel Birleştirme Kuralı (CQC) gibi istatistik yöntemlerle birleştirilir.

Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi taşıyıcı sisteminin düzenli, simetrik konfigürasyonuna sahip ve toplam yüksekliği sınırlı olan yapılar için, bina dinamik davranışının taşıyıcı sistemin hakim doğal titreşim modundaki (yapı üzerindeki dinamik tepkilerde en büyük etkiye sahip olan mod) davranışı ile temsil edilebileceği esasına dayanan hesap yöntemidir. Hakim modun şekli genellikle yaklaşık olarak ters üçgen olarak idealize edilir. Bu yöntemde, yapıya etkiyen deprem yükü yapının hakim doğal titreşim periyodu değeri kullanılarak belirlendikten sonra yük bina yüksekliği boyunca ters üçgen olacak şekilde dağıtılır.

İtme Analizi depremin talep ettiği yatay yüke kadar taşıyıcı sistemin elastik ötesi davranış da göz önüne alınarak adım adım ittirilmesidir. Her bir adımda meydana gelen yer değiştirme, plastik şekil değiştirme ve iç kuvvet dağılımları hesaplanır. Her adımda elde edilen değerler, bir sonraki adım için başlangıç koşulu olarak kullanılır ve bu adımlar tekrarlanarak son itme adımına kadar ilerlenir. Son itme adımında, taşıyıcı sistemin deprem istemi karşısındaki maksimum tepkileri belirlenir.

Analiz sonuçları değerlendirilerek yapının deprem performansı belirlenir. Bu değerlendirme, hangi bölgelerde hasar oluşabileceğini tespit etmeye ve gerekli onarım

ve güçlendirme müdahalelerine karar vermeye yardımcı olur. Analiz sonuçları, yapı üzerindeki çeşitli performans ölçütlerine göre değerlendirilir. Bu ölçütler genellikle maksimum deformasyonlar ve gerilme seviyeleridir.

Maksimum deformasyonlar, yapı üzerinde meydana gelen en büyük şekil değiştirmeleri gösterir. Yapıda oluşan büyük deformasyonlar, tarihi yapının yapısal bütünlüğü tehdit edebilir ve güvenlik riski oluşturabilir. Bu nedenle, maksimum deformasyonların belirlenmesi, yapının deprem performansını değerlendirmek için kritik bir ölçüttür. Analiz sonucunda belirlenen maksimum deformasyonlar yapı elemanlarının hangi bölgelerinin zayıf olduğunu veya potansiyel olarak riskli olduğunu gösterir.

Gerilme seviyeleri, yapıya uygulanan yüklerin etkisi altında yapı elemanlarında oluşan iç gerilmelerin büyüklüğünü ve dağılımını ifade eder. Yapı elemanlarının gerilme seviyeleri, yapı elemanlarının taşıma kapasitesi ile karşılaştırılarak yapısal zayıf noktalar tespit edilebilir.

3. YAPILARIN MODAL PARAMETRELERİNİN ELDE EDİLMESİ

3.1. Giriş

Yapıların dinamik yüklerin (deprem, trafik, rüzgar yükü gibi) etkileri altında güvenli bir şekilde ayakta kalabilmesi için çeşitli önlemlerin alınması gerekmektedir. Doğru önlemlerin alınabilmesi, yapıların dinamik davranışlarının bilinmesine bağlıdır. Yapıların dinamik davranışları, yapı modal parametreleri (doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı) kullanılarak belirlenmektedir. Bu parametreler teorik ve deneysel yöntemler kullanılarak elde edilebilmektedir.

Teorik yöntemler sonlu eleman analizi ve analitik çözümlerdir. Sonlu eleman analizinde yapının matematiksel modeli, bilinen veya tahmin edilen malzeme özellikleri, geometri ve sınır şartları kullanılarak oluşturulur ve bu matematiksel model kullanılarak yapının modal parametreleri elde edilir. Analitik çözümlerde ise basit yapılar için, diferansiyel denklemler yardımıyla doğrudan çözümler elde edilebilir.

Deneysel yöntemlerde yapı üzerine uygulanan titreşimlerin veya çevresel titreşimlerin ölçülmesi yoluyla modal parametreler belirlenir. Deneysel yöntemlerde herhangi bir kabul yapılmadan gerçek yapı üzerinde doğrudan ölçümler yapıldığı için, yapının o andaki mevcut durumunu daha doğru bir şekilde yansıtır. Bu yüzden deneysel modal analiz sonuçları genellikle teorik analize göre daha güvenilirdir.

3.2. Modal Parametrelerin Analitik Olarak Belirlenmesi

Modal parametrelerin analitik olarak belirlenmesinde ilk aşama gerçek sistemi temsil eden ve matematiksel olarak daha kolay analiz edilebilen basitleştirilmiş bir modelin oluşturulmasıdır. Bu basitleştirilmiş model analitik model olarak adlandırılır. Analitik model oluşturulduktan sonra, yapı sistemine ait matematiksel model, analitik model üzerindeki hareket denklemlerinin yazılması yoluyla elde edilir. Bu hareket denklemleri, yapının dinamik davranışını tanımlar ve genellikle diferansiyel denklemler şeklinde ifade edilir. Modal parametreler, bu hareket denklemleri kullanılarak belirlenir. Doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları gibi modal parametreler, bu hareket denklemlerinin çözümünden elde edilir.

Yapılar çok serbestlik dereceli sistemler olarak kabul edilir. Çok serbestlik dereceli bir sistem için hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (3.1)$$

şeklinde verilmektedir. Burada $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini ifade eder. $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ $n \times n$ boyutlu matrislerdir. n sistemdeki serbestlik derecesini ifade etmektedir. $\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$ ve $\{x\}$ sırasıyla ivme, hız ve yerdeğiştirme vektörlerini, $\{F(t)\}$ yük vektörünü göstermektedir.

Bir yapı sisteminin sönümsüz serbest titreşimi, sistemde herhangi bir dış yükün ve sönümün olmadığı duruma karşılık gelir. Bu durumda $\{F(t)\}=0$ ve $[C]=0$ olur ve hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (3.2)$$

halini alır. Serbest titreşim hareketi basit harmonik bir harekettir ve yerdeğiştirme

$$\{x\} = \{A\}\sin\omega t \quad (3.3)$$

olarak elde edilir. Burada; $\{A\}$ zamana bağlı olmayan bir vektör olup hareketin genlik vektörünü ve ω açısal frekansı göstermektedir. $\{x\}$ ve $\{\dot{x}\}$ 'nin ikinci derece türevi hareket denkleminde yerine yazılırsa

$$-\omega^2[M]\{A\} + [K]\{A\} = \{0\} \quad (3.4)$$

elde edilir. Bu denklemin sıfırdan farklı bir çözümü olması için

$$|[K] - \omega^2[M]| = 0 \quad (3.5)$$

olmalıdır. Bu determinantın açılımı ile n . dereceden bir polinom elde edilir. Bu polinomun kökleri, özdeğerlerdir ve bu özdeğerler, açısal frekansların karelerini (ω^2) verir. Kökler bulunduktan sonra, her bir kök değeri (ω^2) için, karşılık gelen açısal frekanslar elde edilir. Sonuç olarak yapıdaki serbestlik derecesi kadar açısal frekans ($\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$) ve bunlara karşı gelen mod şekli elde edilir. En küçük frekans temel freans ve bu frekansa karşılık yapının almış olduğu şekil temel mod şekli olarak adlandırılmaktadır.

3.3. Modal Parametrelerin Deneysel Olarak Belirlenmesi

Deneysel yöntemlerde yapılar üzerinde titreşimlerden kaynaklanan tepkiler ölçülür ve bu ölçüm verileri kullanılarak yapıların modal parametreleri belirlenir. Modal parametreler deneysel olarak Deneysel Modal Analiz (EMA) ve Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemleri kullanılarak elde edilir. EMA yönteminde yapı sarsıcılar veya darbe çekiçleri gibi titreştiriciler kullanılarak titreştirilirken, OMA

yönteminde çevresel titreşimler dikkate alınarak ölçümler yapılmaktadır. OMA yöntemi EMA yöntemiyle kıyaslandığında

- Uygulanmasının hızlı ve ucuz olması
- Titreştirici kullanılmasına gerek olmaması
- Ölçüm sırasında yapının kullanımını kesintiye uğratmaması
- Gerçek servis koşulları altında ölçümlerin yapılabilmesi
- Yapısal tasarım, güçlendirme, yapı sağlığı izleme ve hasar tespiti gibi çeşitli alanlarda kullanılabilmesi gibi avantajlara sahip olması nedeniyle daha fazla tercih edilmektedir (Rainieri vd., 2008).

3.3.1. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi

OMA yönteminde, yapı üzerinde çevresel etkenler nedeniyle oluşan titreşimlerin ölçülmesiyle yapının modal parametreleri belirlenir. Çevresel etkenler deprem, rüzgar, taşıt yükü, yaya hareketi veya patlatma olabilir. OMA inşaat mühendisliğinde yapıların tasarımı ve değerlendirmesinde çeşitli uygulamalara sahiptir. Özellikle tarihi yapılar için sonlu eleman model güncellemesi, sismik performans değerlendirmesi, hasar tespiti, yapısal elemanların güçlendirilmesinin veya yenilenmesinin değerlendirilmesi, tarihi yapıların yapısal sağlık izlemesi gibi uygulamalar için kullanılmaktadır.

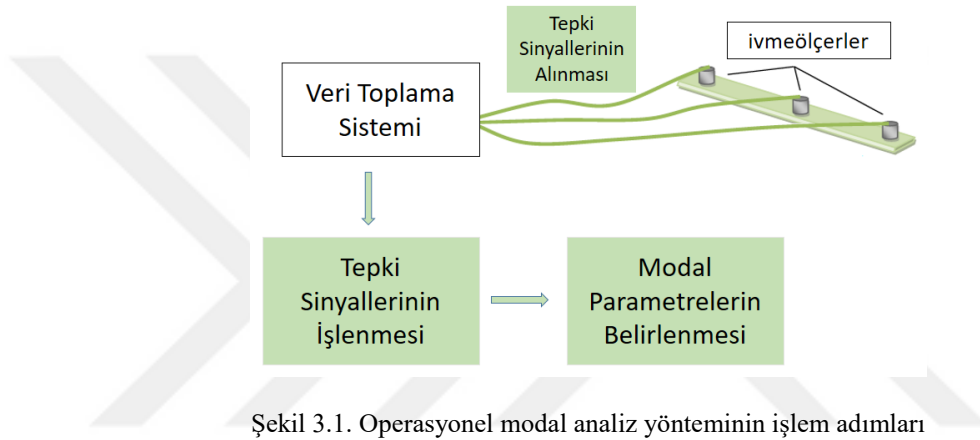
OMA yönteminde kullanılan ölçüm aletleri ivmeölçer ve veri toplama sistemidir. İvmeölçerler yapıda meydana gelen titreşimler sonucu oluşan ivmeyi ölçer ve bu ivme bilgisini elektrik sinyallerine dönüştürür. Veri toplama sistemi, ivmeölçerlerden iletilen sinyallerin toplanması, kaydedilmesi ve işlenmesi için gerekli olan veri toplama ünitesi ve bilgisayardan oluşur.

Çevresel titreşim testlerinde kullanılan ivmeölçerlerin ölçüm aralığı (maksimum ve minimum ölçülen tepki arasındaki fark), çözünürlük (tepkinin kaydedebileceği en küçük artış değeri), tip, algılama frekansı (ölçülen tepkinin maksimum frekans değeri), çalışma ortamı boyut gibi belirli karakteristik özellikleri, tarihi yapıların doğru tepkisini elde etmede önemli rol oynar (Shimpi vd., 2019). Yapının tepkisinin doğru bir şekilde ölçülebilmesi için, çevresel titreşim testleri sırasında yeterli sayıda ve doğru yerlere konumlandırılmış ivmeölçerler kullanılmalıdır.

Çevresel titreşim testi sırasında yapısal tepkinin doğru bir şekilde kaydedilmesi için örnekleme hızı ve ölçüm süresi doğru bir şekilde seçilmelidir. Örnekleme hızı,

kaydedilen sinyallerin analiz edilebileceği frekans aralığının üst limitini belirler ve çevresel titreşimlerinin ilgilendiği frekansları doğru bir şekilde kaydetmek için yeterince yüksek olmalıdır. Yetersiz örnekleme hızı, yüksek frekansların düşük frekanslar olarak yanlış kaydedilmesine neden olabilir. Ölçüm süresi ise yapısal tepkinin güvenilir bir şekilde analiz edilmesini sağlamak için yeterince uzun olmalıdır.

OMA yönteminde işlem adımları Şekil 3.1.'de gösterildiği gibidir. İlk olarak yapıya yerleştirilen ivmeölçerler kullanılarak yapıda meydana gelen tepki sinyalleri ölçülür. Ölçülen bu sinyaller veri toplama ünitelerine aktarılır. Elde edilen sinyaller frekans veya zaman ortamında işlenerek yapının modal parametreleri elde edilir.



OMA yönteminde sinyal işleme sürecinde kullanılan yöntemler, değişkenin zaman olduğu zaman tanım alanındaki yöntemler ve değişkenin frekans olduğu frekans tanım alanındaki yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tablo 3.1.'de, sinyal işleme sürecinde kullanılan yöntemlerin isimleri bulunmaktadır.

Tablo 3.1. Modal parametrelerin elde edilme yöntemleri

Tanım Alanı	Yöntem
Frekans	Piklerin Seçilmesi
	Polimax
	Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma
	Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma
Zaman	Rastgele Azaltım
	Tekrarlanan
	Maksimum Olasılık
	Stokastik Altalan Belirleme

Zaman tanım alanındaki yöntemlerde sinyallerin zaman içinde nasıl değiştiği incelenir. Çevresel titreşim testi sırasında sinyaller zamana bağlı olarak kaydedildiği için herhangi bir dönüşüm işlemi gerekmez. Frekans tanım alanındaki yöntemlerde ise değişken frekans olduğu için sinyallerin frekans bileşenlerine ayrılması gereklidir. Zaman tanım alanındaki veriler Fourier Dönüşümü veya Hızlı Fourier Dönüşümü gibi yöntemlerle frekans alanına dönüştürülür. Bu dönüşüm sayesinde sinyallerin frekans spektrumları elde edilir ve buradan yapının modal parametreleri belirlenir.

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, tarihi su deposunun modal parametrelerin belirlenmek için sıkça tercih edilen yöntemlerden biri olan Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) Yöntemi kullanılmıştır. Aşağıda bu yönteme ait formülasyonlar verilmiştir.

3.3.1.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi

Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (FTAA) yönteminin geliştirilmiş hali Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) yöntemidir. FTAA yöntemi kullanımı kolay temel bir tekniktir. Bu yöntemde, yapısal sistemin modları, tepki davranışının spektral yoğunluk fonksiyonundan hesaplanan tekil değer ayırıştırma grafiklerindeki piklerin seçilmesiyle belirlenir. FTAA yöntemi, Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) analizinden elde edilen tek bir frekans hattını kullanarak çalışır. Bu nedenle, belirlenen doğal frekansların kesinliği HFD 'nin çözünürlüğüne bağlıdır ve yapısal sönüm oranları belirlenemez. GFTAA yöntemi, FTAA yöntemine göre hem doğal frekansların hem de mod şekillerinin daha kesin bir tahminini sağlar ve ayrıca sönümü de içerir. GFTAA yönteminde, belirli bir frekans pikinde tanımlanan Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu Ters Ayrık Fourier Dönüşümü kullanılarak zaman tanım alanına geri dönüştürülebilir. Doğal frekans, zamanın bir fonksiyonu olarak sıfır geçiş sayısının belirlenmesiyle, sönüm ise tek serbestlik dereceli normalize edilmiş otokorelasyon fonksiyonunun logaritmik azalışıyla hesaplanır(Jacobsen vd., 2006).

Sistemdeki çevresel titreşim altında bilinmeyen etki kuvveti ile ölçülebilen tepki kuvveti arasındaki teorik ilişkiyi ifade eden denklem(Brincker vd., 2000);

$$G_{yy}(j\omega) = H(j\omega)^* G_{xx}(j\omega) H(j\omega)^T \quad (3.6)$$

şeklinde. Bu denklemde $G_{yy}(j\omega)$ tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk matrisidir ve sistemin çevresel titreşim altında ölçülen tepki kuvvetinin spektral yoğunluğunu ifade eder. $H(j\omega)$ sistemin frekans yanıtını temsil eden transfer matrisidir ve sistemin

girişine uygulanan etki kuvvetinin nasıl sistem tepkisine dönüştüğünü gösterir. $G_{xx}(j\omega)$ etki sinyalinin güç spektral yoğunluk matrisidir ve sisteme etki eden bilinmeyen bir kuvvetin spektral yoğunluğunu ifade eder. Denklem 3.6'da * ve T sırasıyla ifadelerin karmaşık eşleniğini ve transpozunu göstermektedir. $H(j\omega)$ kısmi kesirler şeklinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$H(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (3.7)$$

Bu formülde n mod sayısıdır. λ_k k'inci modun kutup fonksiyonunu temsil eder ve

$$\lambda_k = -\sigma_k + j\omega_{dk} \quad (3.8)$$

olarak ifade edilir. Burada σ_k modal sönümlleme bozunum sabiti ve ω_{dk} k'inci modun sönümlenmiş doğal frekansıdır. R_k k'inci modun artık değer fonksiyonunu temsil eder ve

$$R_k = \phi_k \gamma_k^T \quad (3.9)$$

olarak ifade edilir. Burada ϕ_k mod şekli vektörü ve γ_k modal katılım vektörüdür. Denklem 3.7 denklem 3.6'da yerine yazıldığında Denklem 3.6

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[\frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] G_{xx}(j\omega) \left[\frac{R_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{R_s^*}{j\omega - \lambda_s^*} \right]^H \quad (3.10)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada, s tekil değerleri, $\bar{H}$ kompleks eşleniği ve transpozeyi ifade etmektedir. Etki sinyalinin hem zaman hem de mekânda rastgele olduğu ve sıfır ortalama beyaz gürültü dağılımına sahip olduğu varsayılırsa (yani etki sinyalini güç spektral yoğunluğu sabit olduğu: $G_{xx}(j\omega) = C$), tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk matrisi şu şekilde yazılabilir.

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[\frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] C \left[\frac{R_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{R_s^*}{j\omega - \lambda_s^*} \right]^H \quad (3.11)$$

Heaviside parsiyel kesir teoremi kullanarak, sonuç

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{A_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{B_k}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{B_k^*}{-j\omega - \lambda_k^*} \quad (3.12)$$

olarak elde edilmektedir. A_k her bir kutup için bir artık değer matrisini ve B_k geriye dönük kutuplar için bir artık değer matrisini ifade etmektedir. A_k m×m hermitian (öz birleşik) bir matristir ve şu şekilde ifade edilmektedir.

$$A_k = R_k C \sum_{s=1}^n \left(\frac{R_s^{*T}}{-\lambda_k - \lambda_s^*} + \frac{R_s^T}{-\lambda_k - \lambda_s} \right) \quad (3.13)$$

Eğer sadece k'ncı mod dikkate alınırsa,

$$A_k = \frac{R_k C R_k^{*T}}{2\sigma_k} \quad (3.14)$$

olarak elde edilir. Bu terim, sönüm düşük olduğunda baskın hale gelebilir ve mod şekli vektörüne orantılı bir artış değer şu şekilde elde edilebilir:

$$A_k = R_k C R_k^* = \phi_k \gamma_k^T C \gamma_k \phi_k^T = d_k \phi_k \phi_k^T \quad (3.15)$$

Burada d_k , k'ncı mod için ölçeklendirme katsayısıdır. Zayıf sönümlü bir sistemde, belirli bir frekansta modların katkısı genellikle sınırlıdır. Tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk matrisi şu nihai formda yazılabilir;

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k \in \text{Sub}(\omega)} \left(\frac{d_k \phi_k \phi_k^T}{j\omega - \lambda_k} + \frac{d_k^* \phi_k^* \phi_k^{*T}}{j\omega - \lambda_k^*} \right) \quad (3.16)$$

Burada, $k \in \text{Sub}(\omega)$ belirli bir frekans ω 'de katkıda bulunan modların kümesini belirtir.

Sistemdeki tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk matrisi belirlendikten sonra, belirli frekanslarda tahmin edilir. Bu genellikle ayırık frekanslarda yapılır ve frekanslar $\omega = \omega_i$ olarak bilinir. Daha sonra, bu tahmini güç spektral yoğunluk matrisi, tekil değer ayrışımı yöntemi kullanılarak ayrıştırılır. Tekil değer ayrışımı, bir matrisi, tekil değerler, tekil vektörler ve bunların transpozunu ile çarparak ifade etme yöntemidir. Bu yöntem, bir matrisin içerdiği bilgileri daha basit ve daha kullanışlı bileşenlere ayırır. Güç spektral yoğunluk tekil değer ayrışımı işlemi sonucunda elde edilen tekil değerler ve tekil vektörler, orijinal güç spektral yoğunluk matrisini ifade etmek için kullanılır. Bu, genellikle aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$G_{yy}(j\omega) = U_i S_i U_i^H \quad (3.17)$$

Burada, U_i matrisi, tekil vektörleri içeren bir matristir. S_i ise, tekil değerleri içeren diyagonal bir matristir. U_i^H matrisi, U_i matrisinin karmaşık eşleniği ve transpozudur. Bu formüldeki pik değer yapan noktalar, güç spektral yoğunluk matrisinin belirli frekanslarda yoğunlaştığı noktalardır ve bu noktalar genellikle sistemdeki doğal frekanslara karşılık gelir. Tekil vektörler ise bu pik noktaları oluşturan frekanslarda sistemdeki doğal mod şekillerini temsil eder.

4. SONLU ELEMAN MODELİNİN GÜNCELLENMESİ

4.1. Giriş

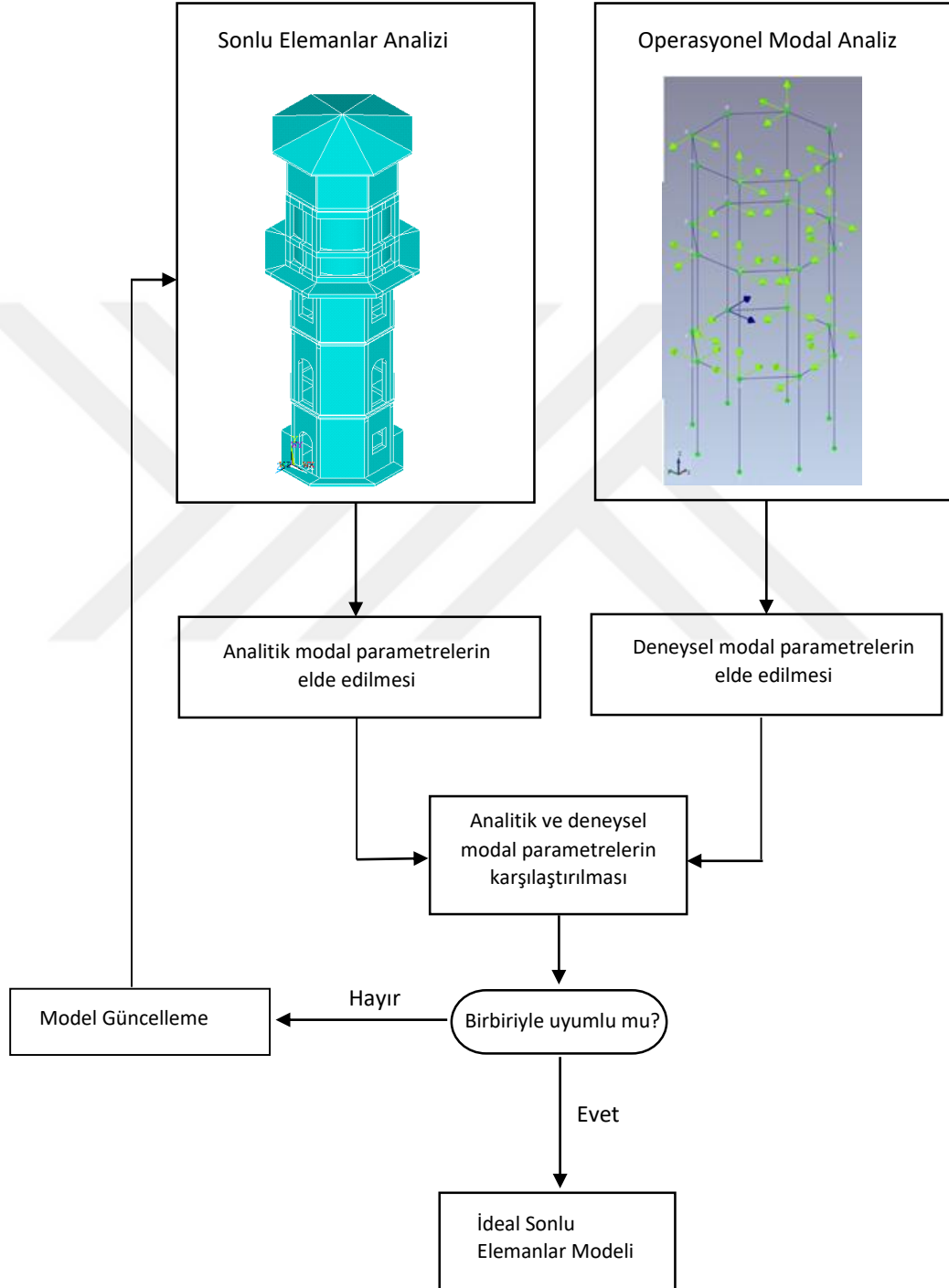
Sonlu eleman modeli, yapıyı oluşturan elemanların malzeme özelliklerinin tam olarak bilinmemesi, yapının gerçek geometrisinin modele aktarılamaması, yapı üzerinde zamanla meydana gelen deformasyonlar ve sınır şartlarındaki belirsizlikler nedeniyle gerçek yapıyı tam olarak temsil edemeyebilir. Sonlu elemanlar modelinin doğruluğunu değerlendirmek için deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapılır. Eğer modelin sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında uyum sağlanamıyorsa, modelin güncellenmesi gereklidir. Deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak başlangıçtaki sonlu eleman modelindeki belirsiz parametrelerinin değiştirilmesi veya güncellenmesi işlemine sonlu eleman model güncellemesi adı verilir.

Operasyonel modal analiz yöntemi kullanılarak elde edilen modal parametreler gerçek yapıyı temsil edebildiği için sonlu eleman modelinin güncellenmesinde genellikle referans olarak alınır. Güncelleme yöntemleri sonlu eleman modelinden elde edilen analitik modal parametrelerinin operasyonel modal analiz yöntemiyle elde edilen deneysel modal parametrelerinin uyumlu hale getirilmesine odaklanır.

Sonlu eleman model güncellenmesinde ilk aşama yapının başlangıç sonlu elemanlar modeli oluşturularak analitik modal parametrelerin ve yapıda deneysel çalışma yapılarak deneysel modal parametrelerin elde edilmesidir. Daha sonra elde edilen analitik ve deneysel modal parametreler karşılaştırılır. Eğer bu farklılıklar kabul edilebilir bir aralık içindeyse (genellikle %5 ila %10 gibi), analitik modal parametrelerin yapıyı yeterince doğru şekilde temsil ettiği kabul edilir (Sevim, 2010). Eğer bu farklılıklar kabul edilebilir bir aralık içinde değilse başlangıç sonlu eleman modeli güncellenerek yapısal özelliklerin daha doğru bir şekilde yansıtılması sağlanmalıdır. Sonlu eleman model güncellenmesinde ilk olarak, modelde kullanılan malzeme özellikleri, geometrik boyutlar, sınır şartları gibi parametreler gözden geçirilir ve hangi parametrelerin güncellenmesi gerektiği belirlenir.

Sonlu eleman modelindeki parametrelerin güncellenmesi, deneme-yanılma yaklaşımıyla ve/veya optimizasyon yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Deneme-yanılma yaklaşımında, başlangıç sonlu eleman modelindeki güncellenecek parametreler iteratif olarak güncellenir. Parametrelerin farklı değerleri denenir ve her bir deneme sonucunda model güncellenir. Güncellenen sonlu eleman modelinden elde

edilen analitik modal parametreler ile deneysel modal parametreler karşılaştırılır. Bu işlemler, güncellenen sonlu eleman modelinden elde edilen analitik modal parametreler ile deneysel modal parametreler arasındaki farklar kabul edilebilir bir seviyeye inene kadar devam eder (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. Sonlu eleman modelinin iteratif olarak güncellenmesinde işlem adımları

Deneme-yanılma yaklaşımında, her iterasyonda sonlu eleman modelinin yeniden analiz edilmesi gerektiğinden güncelleme zaman alıcı olabilir. Özellikle karmaşık yapılar söz konusu olduğunda, genellikle birçok parametrenin güncellenmesi gerekir ve bu da hesaplama yükünü artırır. Optimizasyon yöntemleri güncelleme sürecini daha verimli hale getirmek için kullanılabilir.

Bu tez çalışması kapsamında tarihi su deposunun sonlu eleman modelinin güncellenmesinde optimizasyon yöntemi olarak tepki yüzeyi yöntemi kullanılmıştır. Tepki yüzeyi yöntemi ve bu yöntemin sonlu eleman modelinin güncellenmesindeki rolü aşağıdaki bölümlerde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

4.2. Tepki Yüzeyi Yöntemi

Tepki Yüzeyi Yöntemi (TYY), bir sürecin veya sistemin performansını modellemek, analiz etmek ve optimize etmek için kullanılan istatistiksel ve matematiksel teknikler bütünüdür (Myers vd., 2009). Özellikle mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Sonlu eleman modelinin doğruluğunu artırmak veya belirli bir çıktı parametresini optimize etmek istendiğinde, TYT kullanılabilir.

TYY'nin amacı, bir veya daha fazla giriş değişkeninin etkisi altında olan bir çıkış değişkenini optimize etmektir. Giriş değişkenleri sürecin veya sistemin üzerinde kontrol edilebilen ve değiştirilebilen faktörlerdir. Çıkış değişkeni giriş değişkenlerinin etkisi altında ölçülen sonuç değişkenidir. TYT, deneysel tasarım oluşturulması, tepki yüzeyinin oluşturulması, oluşturulan tepki yüzeyinin kontrolü ve tepki yüzeyi optimizasyonu adımlarından oluşur.

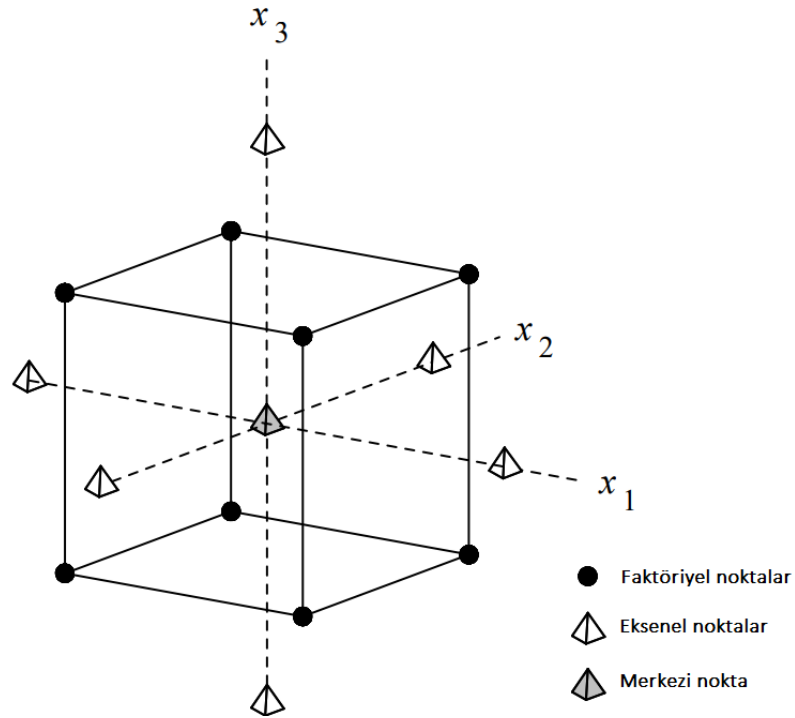
i) Deneysel tasarım oluşturulması

Deneysel tasarım oluşturulması incelenecek değişkenlerin, her bir değişken için dikkate alınacak alt ve üst sınırların ve hangi deneysel tasarım tekniğinin kullanılacağına belirlendiği aşamadır. Deneysel tasarımın amacı, örnek noktası adı verilen tepkilerin değerlendirileceği noktaların seçilmesidir. İyi bir deneysel tasarım, tepkilerin doğru bir şekilde modellenmesine olanak tanır ve sonuçların doğruluğu artırır. Az örnek noktasının kullanılması tepki yüzeyinin doğruluğunu azaltabilirken, fazla örnek noktasının kullanımı yüzeyin doğruluğunu artırabilir fakat iş yükünü artırır (Ren vd., 2010).

Mühendislik çalışmalarında birçok farklı deneysel tasarım tekniği bulunmaktadır. Kullanılan bu teknikler, örnek noktaları en verimli şekilde yerleştirerek gereken bilgileri elde etmeye çalışır. Bu tez çalışmasında, Merkezi Kompozit Tasarım (CCD) tekniği kullanılması planlanmaktadır. CCD, giriş değişkenlerin sayısı N ile ifade edildiğinde şunlardan meydana gelir:

- Merkezi nokta (1 adet): Giriş değişkenlerin ortalama değerinde olduğu nokta.
- Eksenel noktalar ($2N$ adet): Bir değişkenin ortalama değerinden belirli bir uzaklıkta ($\pm\alpha$) olup diğer değişkenlerin ortalama değerinde olduğu noktalar.
- Faktöriyel noktalar (2^N adet): Giriş değişkenlerin alt ve üst sınır değerlerinde olduğu tüm olası kombinasyonları içeren noktalar.

Giriş değişkenlerinin ($\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$) sayısı 3 olduğunda CCD tekniğiyle oluşturulan deneysel tasarım, 8 faktöriyel nokta, 6 eksenel nokta ve 1 merkezi nokta olmak üzere toplam 15 adet noktadan oluşmaktadır(Şekil 4.2.).



Şekil 4.2. N=3 için CCD tekniği ile deneysel tasarım

TYT'de, değişkenlerin analizini ve modellemesini kolaylaştırmak gerçek dünya ölçüm birimlerinde ifade edilen giriş değişkenleri aynı standart sapmalı ve boyutsuz sıfır ortalamalı kodlanmış değişkenlere dönüştürülür. Bu kodlama deneysel tasarımın

daha sistematik bir şekilde yapılmasını sağlar. CCD’de kodlanmış değişkenler $[-1,+1]$ aralığında ifade edilir ve formülasyon şu şekildedir.

$$x = \frac{2(\zeta - \text{Alt sınır})}{(\text{Üst sınır} - \text{Alt sınır})} - 1 \quad (4.1)$$

Burada x kodlanmış değişkenin değerini, ζ gerçek dünya ölçüm birimlerinde ifade edilen değişkenin değeri, Alt Sınır ilgili değişkenin gerçek dünya ölçüm birimlerinde alabileceği en düşük değeri, Üst Sınır ilgili değişkenin gerçek dünya ölçüm birimlerinde alabileceği en yüksek değeri ifade eder. CCD yöntemi kullanılarak yapılan deneysel tasarımda, 3 giriş değişkeni için nokta yerleşimi şu şekilde olur. Faktöriyel noktalar;

- $(x_1, x_2, x_3) = (-1, -1, -1)$
- $(x_1, x_2, x_3) = (1, -1, -1)$
- $(x_1, x_2, x_3) = (-1, 1, -1)$
- $(x_1, x_2, x_3) = (1, 1, -1)$
- $(x_1, x_2, x_3) = (-1, -1, 1)$
- $(x_1, x_2, x_3) = (1, -1, 1)$
- $(x_1, x_2, x_3) = (-1, 1, 1)$
- $(x_1, x_2, x_3) = (1, 1, 1)$

Eksenel noktalar;

- $(x_1, x_2, x_3) = (\pm\alpha, 0, 0)$
- $(x_1, x_2, x_3) = (0, \pm\alpha, 0)$
- $(x_1, x_2, x_3) = (0, 0, \pm\alpha)$

Merkezi nokta ise;

- $(x_1, x_2, x_3) = (0, 0, 0)$ ’dır

ii) Tepki yüzeyi modelinin oluşturulması

Tepki yüzeyi modeli, giriş değişkenleri $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ ile çıkış değişkeni (y) arasındaki ilişkiyi gösteren matematiksel bir modeldir. Bu model genellikle basit bir matematiksel formda veya polinom şeklinde olabilir;

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) + \epsilon \quad (4.2)$$

Burada, f çıkış değişkeninin giriş değişkenleriyle olan ilişkisini tanımlayan fonksiyondur. ϵ hata terimidir ve gerçek çıkış değeri ile modelin tahmin ettiği değer arasındaki farkı temsil eder. Eğer çıkış değişkeni ve giriş değişkenleri arasındaki ilişki karmaşık değilse ve doğrusal bir fonksiyonla modelleneniliyorsa birinci dereceden model kullanılabilir. Bu modelin matematiksel ifadesi şu şekildedir:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (4.3)$$

Birinci dereceden modelde, tahmin edilen değer şu şekilde ifade edilir:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (4.4)$$

Eğer çıkış değişkeni ve giriş değişkenleri arasındaki ilişki daha karmaşıksa ve doğrusal model yeterli değilse, ikinci dereceden veya üçüncü dereceden model kullanılabilir. İkinci dereceden modelde, tahmin edilen değer şu şekilde ifade edilir:

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (4.5)$$

Üçüncü dereceden modelde, tahmin edilen değer şu şekilde ifade edilir:

$$\begin{aligned} \hat{y} = & \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \beta_{iii} x_i^3 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{iij} x_i^2 x_j \\ & + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \sum_{l=j+1}^k \beta_{ijl} x_i x_j x_l \end{aligned} \quad (4.6)$$

Bu denklemlerde k modeldeki giriş değişkenlerin sayısıdır. $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}, \beta_{iii}, \beta_{iij}, \beta_{ijl}$ belirsiz (undetermined) katsayılarıdır. Bu katsayıların belirlenebilmesi için deneysel tasarımda belirlenen örnek noktalar için çıkış değişkeni değerleri hesaplanır. Modelin denklemi ve elde edilen sonuçlarla birlikte, katsayılar tahmin edilir. Bu işlem genellikle regresyon analizi gibi istatistiksel yöntemler kullanılarak yapılır. Tahmin edilen katsayıların model denklemine yerleştirilmesiyle tepki yüzeyi modeli oluşturulmuş olur.

Bu tez çalışması kapsamında Genetik Agregasyon yöntemi kullanılacaktır. Genetik Agregasyon farklı tepki yüzeyi modellerini birleştirerek her bir çıktı parametresi için en uygun tepki yüzeyi modelini otomatik olarak belirlemeye çalışır. Bu yaklaşım, daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar. Genetik Agregasyonun matematiksel formülasyonu genellikle şu şekilde ifade edilir;

$$\hat{y}_{ens}(x) = \sum_{i=1}^M w_i \hat{y}_i(x) \quad (4.7)$$

Burada $\hat{y}_{ens}(x)$ bireysel tepki yüzeylerinin ağırlıklı ortalamasından elde edilen tepki yüzeyini, $\hat{y}_i(x)$ i'inci tepki yüzeyini, w_i i'inci tepki yüzeyinin ağırlık faktörünü, M kullanılan tepki yüzeylerinin toplam sayısını, x tüm girdi parametrelerini ifade eder. Ağırlık faktörü her bir yanıt yüzeyinin katkısının ne kadar olacağını belirler. Ağırlık faktörü negatif olmamalıdır ve tüm tepki yüzeylerinin ağırlık faktörlerinin toplamı bir

olmalıdır.

iii) Oluşturulan Tepki yüzeyinin kontrolü

Tepki yüzeyi optimizasyonu aşamasında, doğru ve güvenilir sonuçların elde edilmesi uygun bir tepki yüzeyi modelinin oluşturulmasına bağlıdır. Eğer oluşturulan tepki yüzeyi modeli gerçek sistem davranışını doğru bir şekilde yansıtmıyorsa, optimizasyon sonuçları da istenilen hedeflere ulaşmakta başarısız olabilir. Bu yüzden tepki yüzeyinin doğruluğunun kontrolü, oluşturulan modelin gerçek sistemi ne kadar doğru bir şekilde temsil ettiğini belirlemek ve gerektiğinde iyileştirmek için önemlidir. Hesaplama Katsayısı(R^2) ve Kök Ortalama Kare Hatası(RMSE) tepki yüzeyinin kontrolünde yaygın olarak kullanılan ölçütlerdir.

Hesaplama katsayısı(R^2) bir tepki yüzeyi modelinin tahminlerinin gerçek değerlere ne kadar iyi uyduğunu ölçen bir istatistiksel ölçüdür. R^2 , modelin açıkladığı toplam varyasyonun toplam değişime oranını gösterir. En iyi değer 1'dir ve R^2 1'e ne kadar yakınsa, tepki yüzeyi modelinin tahminleri gerçek değerlere o kadar yakındır. R^2 matematiksel olarak şu şekilde ifade edilmektedir;

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N [y_{RS}(j) - y(j)]^2}{\sum_{j=1}^N [y(j) - \bar{y}]^2} \quad (4.8)$$

Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE) tepki yüzeyi modelinin tahminlerinin gerçek değerlerden ne kadar yakın olduğunu ölçen bir başka istatistiksel ölçüdür. En iyi değer 0'dır ve RMSE 0'a ne kadar yakınsa, tepki yüzeyi modelinin tahminleri gerçek değerlere o kadar yakındır. RMSE matematiksel olarak şu şekilde ifade edilmektedir;

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [y_{RS}(j) - y(j)]^2} \quad (4.9)$$

Bu formüllerde $y_{RS}(j)$ j'inci örnek noktası için tepki yüzeyi modelinin tahmini değeri, $y(j)$ j'inci örnek noktasının gerçek değeri, N toplam örnek noktası sayısı, $\bar{y}$ tüm örnek noktalarının ortalamasını ifade etmektedir.

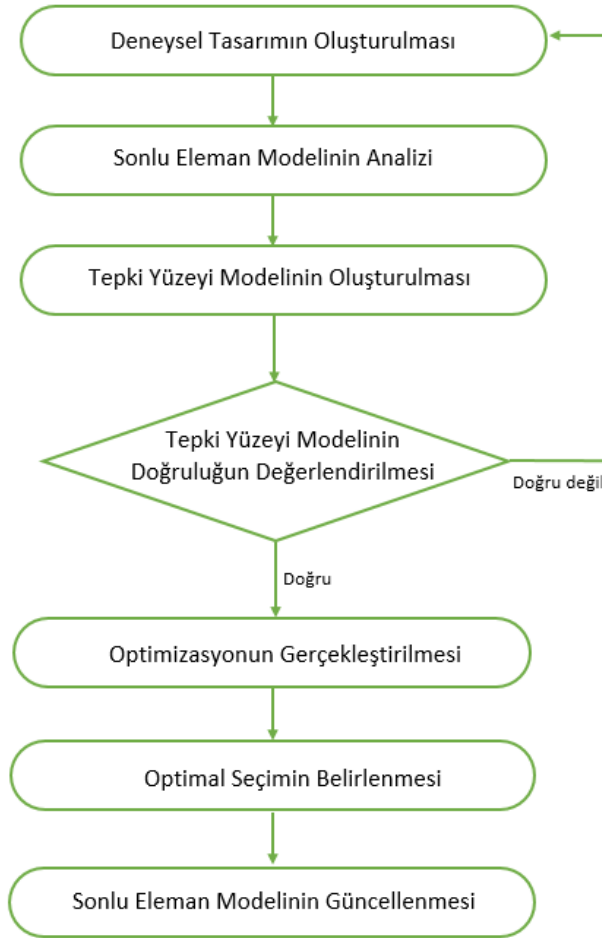
iv) Tepki yüzeyi optimizasyonu

Tepki yüzeyi optimizasyonu oluşturulan tepki yüzeyi modeli kullanılarak belirli bir hedefin elde edilmesi için en iyi parametre kombinasyonunun belirlenmesini içerir. İlk olarak hedef fonksiyonu tanımlanır. Hedef fonksiyonu, bir optimizasyon

probleminin ana hedefini matematiksel olarak ifade eden fonksiyondur ve genellikle minimize edilmesi veya maksimize edilmesi gereken bir değeri ifade eder. Hedef fonksiyonunu optimize etmek için uygun bir optimizasyon algoritması seçilir. Seçilen optimizasyon algoritması, tepki yüzeyi modelini kullanarak farklı parametre kombinasyonları için hedef fonksiyonunun değerlerini hesaplar ve hedef fonksiyonunu en iyi şekilde optimize eden parametre kombinasyonlarını belirler.

4.3. Tepki Yüzeyi Yöntemi ile Sonlu Eleman Modelinin Güncellenmesi

Guo ve Zhang (2004), sonlu eleman model güncellemesinde TYY'yi kullanmak için bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemin önemli bir avantajı, deneme-yanılma yaklaşımında her iterasyonda sonlu eleman modelinin analizini gerçekleştirme gereksinimini ortadan kaldırmasıdır. Bunun yerine, tepki yüzeyleri kullanılarak modelin modal parametreleri tahmin edilir. Bu yaklaşım, sonlu eleman model güncellemesinde hesaplama yükünü ve işlem süresini önemli ölçüde azaltır.



Şekil 4.3. TYY ile sonlu eleman modelinin güncellenmesinde işlem adımları

TTY ile sonlu eleman modelinin güncellenmesinde işlem adımları Şekil 4.3.'teki gibidir. Deneysel tasarımın oluşturulması adımı, güncellenecek parametreler ve parametrelerin hangi değerler arasında değişeceği belirlenir. Uygun bir deneysel tasarım yöntemi kullanılarak belirlenen alt ve üst sınırlar içinde, parametrelerin çeşitli kombinasyonları oluşturulur. Güncellenecek parametreler malzeme özellikleri, geometrik parametreler, yük veya sınır koşulları gibi sonlu eleman modelini etkileyen faktörler olabilir. Bu parametrelerin ve bu parametreler için uygun alt ve üst sınırların doğru bir şekilde belirlenmesi, sonlu eleman modelinin doğru bir şekilde güncellenmesi için kritik öneme sahiptir. Seçilen parametreler, modeldeki bilinen belirsizlikleri düzeltmeye yönelik olmalı ve deneysel sonuçlar bu parametrelere duyarlı olmalıdır (Friswell ve Mottershead, 1995).

Sonlu eleman modelinin analizi adımı, belirlenen parametre kombinasyonları kullanılarak sonlu eleman modelinde analizler yapılır ve çıktı parametreleri hesaplanır. Bu çıktı parametreleri, yapının modal parametreleridir. Tepki yüzeyi modelinin oluşturulması adımı, elde edilen çıktı parametreleri tepki yüzeyi modelinin matematiksel denklemi içine yerleştirilir. Matematiksel modeldeki belirsiz katsayılar ($\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ vb.) hesaplanır ve tepki yüzeyi modeli oluşturulur. Girdi parametreleri ile çıktı parametreleri arasındaki ilişki matematiksel olarak tanımlanmış olur. Tepki yüzeyi modelinde duyarlılık analizi gerçekleştirilerek, hangi parametrelerin çıktı sonuçları üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu belirlenebilir ve parametreler arasındaki etkileşimleri anlaşılabilir. Bu şekilde, güncelleme sürecinde odaklanılması gereken parametreler daha net bir şekilde belirlenebilir.

Tepki yüzeyi modelinin doğruluğu değerlendirilmesi adımı tepki yüzeyi modelinin örnek noktalar için tahmin ettiği çıktı parametreleri ile sonlu eleman modelinin analizinden elde edilen çıktı parametrelerin ne kadar uyumlu olduğu R^2 ve RMSE ölçütleri kullanılarak belirlenir. Eğer model istenen doğruluk gereksinimlerini karşılamıyorsa, ilk adıma geri dönülür ve deneysel tasarım yeniden oluşturulur.

Optimizasyonun gerçekleştirilmesi adımı hedef fonksiyonu tanımlanır ve optimizasyon algoritması seçilir. Sonlu eleman modelinin güncellenmesi sürecinde kullanılan hedef fonksiyonunu, deneysel modal parametreler ile tepki yüzeyi modelinden hesaplanan modal parametreler arasındaki farkları minimize etmeyi amaçlar ve şu şekilde formüle edilebilir (Marwala, 2010);

$$E = \sum_{i=1}^N \gamma_i \left(\frac{\omega_i^m + \omega_i^{calc}}{\omega_i^m} \right)^2 + \beta \sum_{i=1}^N (1 - diag(MAC(\phi_i^{calc}, \phi_i^m))) \quad (4.10)$$

Denklem 4.10'da N mod sayısını, γ_i i'inci mod için hedef frekansa olan uzaklığı ölçen ağırlık faktörünü, ω_i^m i'inci modun deneysel olarak ölçülen doğal frekansı, ω_i^{calc} i'inci modun tepki yüzeyi modeli kullanılarak hesaplanan doğal frekansı, β mod şekillerine uygulanan ağırlıklandırma fonksiyonunu, ϕ_i^m i'inci modun deneysel olarak belirlenen mod şekli vektörünü, ϕ_i^{calc} i'inci modun tepki yüzeyi modeli kullanılarak hesaplanan mod şekli vektörünü ifade eder. MAC (modal güvence kriteri) mod şekillerinin doğruluğunu ve uyumunu ölçmek için kullanılan bir kriterdir. $MAC(\phi_i^{calc}, \phi_i^m)$ ifadesi, hesaplanan mod şekilleri ile deneysel olarak elde edilen mod şekillerinin uyumunu ölçen MAC matrisini temsil eder. $diag(MAC)$ MAC matrisinin i'inci köşegen elemanını ifade eder ve bu, belirli bir modun hesaplanan ve deneysel mod şekillerinin uyumunu gösterir.

Optimizasyonun sonucunda uygun parametre kombinasyonları belirlenir. Bu kombinasyonlar arasından, en iyi performansı gösteren (yani en az hata veya en yüksek doğruluk sağlayan) kombinasyon seçilir. Seçilen optimal parametre kombinasyonu kullanılarak sonlu eleman modeli güncellenir.

5. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında tarihi su deposunun analitik ve deneysel yöntemlerle elde edilen modal parametrelerinin karşılaştırılarak sonlu eleman modelinin güncellenmesi ve güncellenen sonlu eleman modeli kullanılarak yapının deprem performansının belirlenmesi amaçlanmıştır. ANSYS programı yardımıyla sonlu eleman modeli oluşturularak analitik modal parametreler ve OMA yöntemi ile deneysel modal parametreler elde edilmiştir. Analitik ve deneysel çalışmalardan elde edilen modal parametreler birbirleriyle karşılaştırılmış ve aralarındaki farkları en aza indirecek şekilde yapının sonlu eleman modeli TYY yöntemi kullanılarak güncellenmiştir. Güncellenen sonlu eleman modelinin tepki spektrum analizinden elde edilen sonuçlar değerlendirilerek yapının deprem performansı belirlenmiştir.

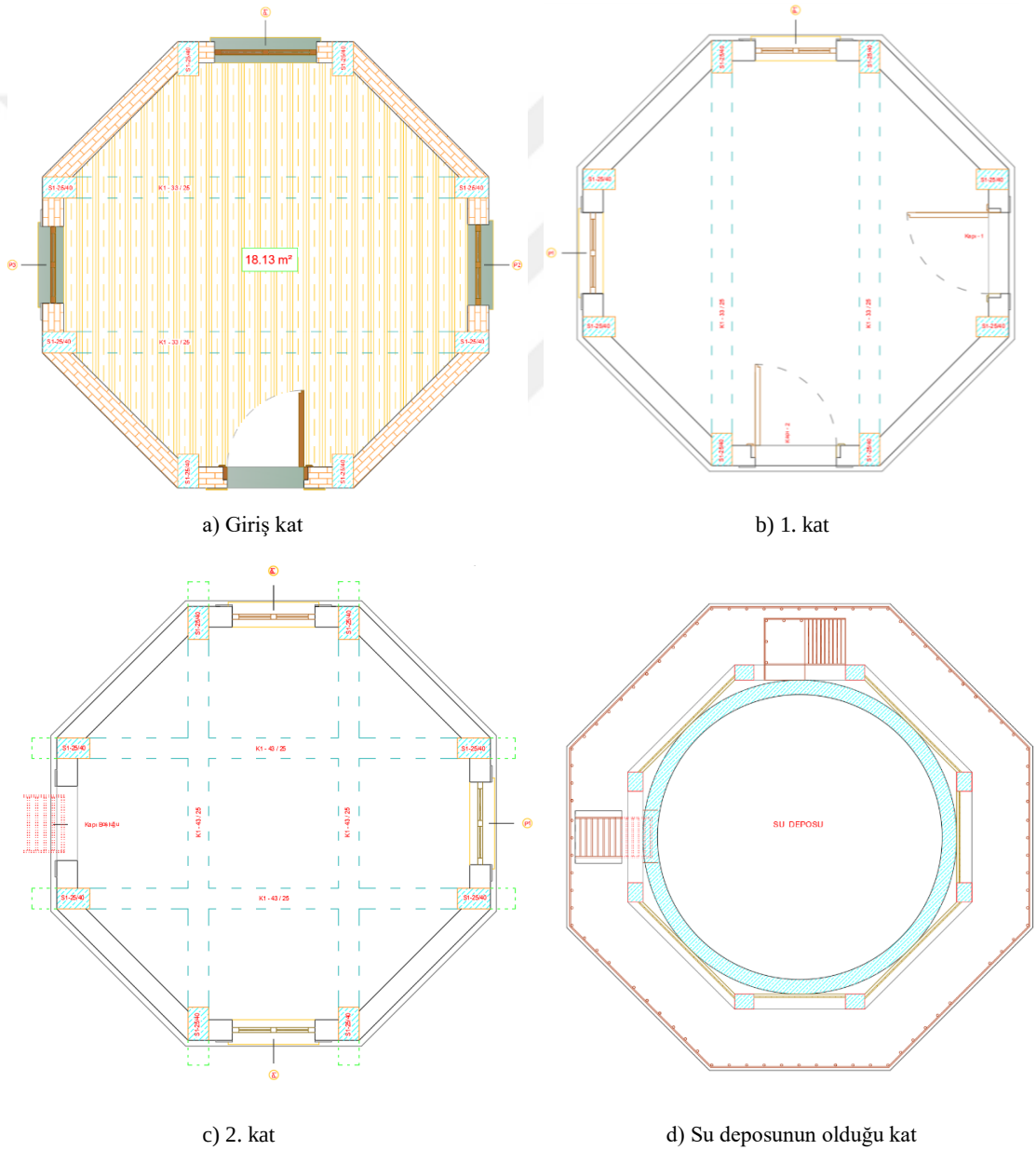
5.1. Çalışma Yapılan Yapı Hakkında Bilgiler

150 yıllık bir geçmişe sahip Tarihi Su Deposunun Samsun İlkadım Belediyesi tarafından onarımı yapılmıştır ve şu anda “Çerkez Etnografya Müzesi” haline getirilmiştir. Yapının genel görünümü Şekil 5.1.’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Yapının genel görünümü

Yapı sekizgen geometriye sahiptir. Yapı 3 normal kattan, su deposunun olduğu kattan ve çatı katından oluşmaktadır. Normal katların yükseklikleri sırasıyla 3.95, 4.5 ve 3.95 metre, su deposunun bulunduğu kat 4.6 metre ve çatı katı ise 4 metredir. Yapının toplam yüksekliği 21 metredir. Normal katlarda yer alan kolonların boyutları 25x40 cm, kirişlerin 25x33 cm ve yığma duvarların kalınlığı 25 cm olarak ölçülmüştür. Su deposunun olduğu katta yer alan kolonların boyutları 26x33 cm, kirişlerin 20x33 cm olarak ölçülmüştür. Su deposu dış çapı 2.7 metre, iç çapı 2.45 metre ve yüksekliği 4.4 metre olan dik dairesel silindirdir. Yapının kat planları Şekil 5.2.'de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.2. Yapının kat planları

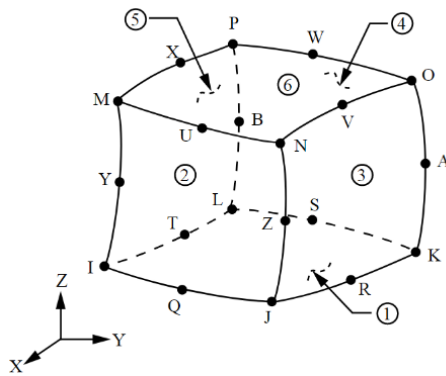
Zamanla meydana gelmiş deprem yüklerinden, işlevsel fonksiyonlardan, rüzgâr yüklerinden ve yapının 10m-15m civarında hem ağır raylı tren yolu hem de Samsun-Trabzon Karayolu geçmesinden kaynaklanan trafik yükü gibi etmenlerden kaynaklanan yapı üzerindeki bazı hasarlar Şekil 5.3.'te gösterilmektedir.



Şekil 5.3. Yapıda meydana gelmiş hasarlar

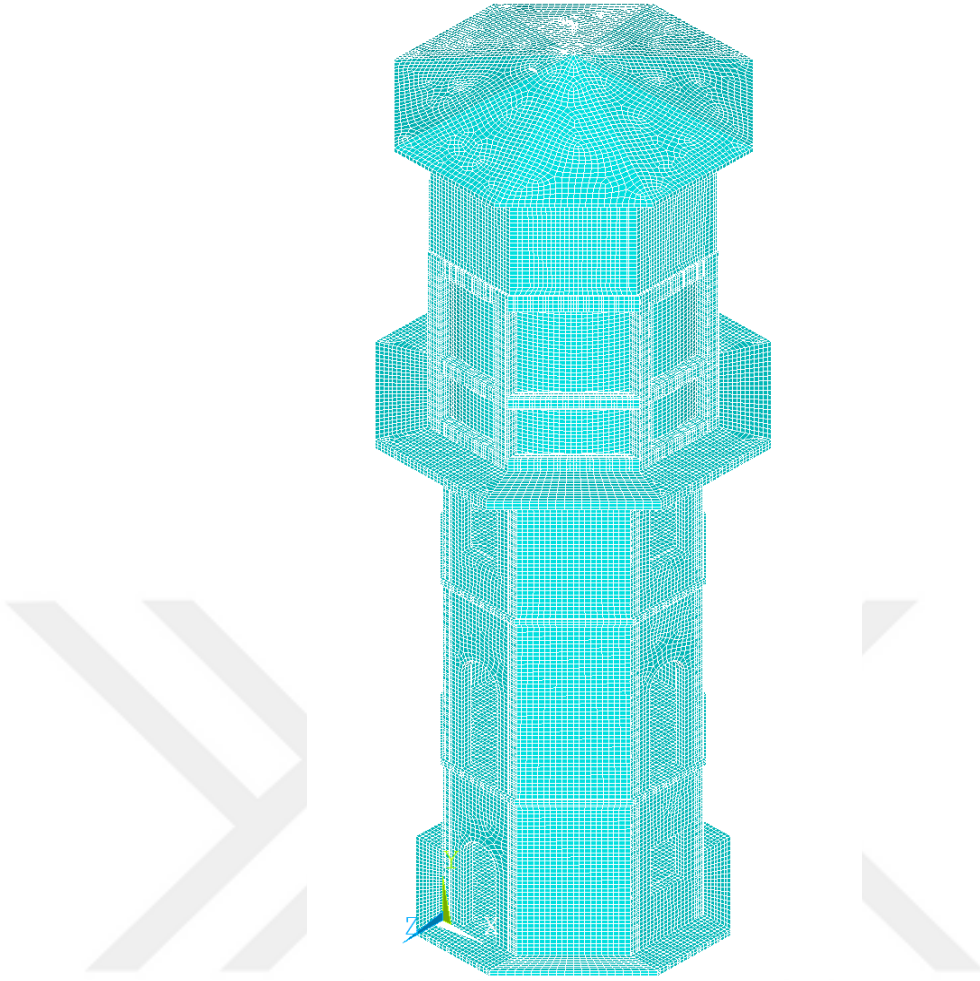
5.2. Başlangıç Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Yapının sonlu eleman modelinin oluşturulması için daha önce hazırlanmış olan röleve çalışmalarından elde edilen geometrik boyutlar kullanılmıştır. Yapının ANSYS programında sonlu eleman modeli oluşturulurken Solid186 elemanı kullanılmıştır. Bu eleman 3 serbestlik derecesine sahip 20 düğüm noktasından oluşan bir altıyüzlüdür (Şekil 5.4.).



Şekil 5.4. Solid 186 elemanı

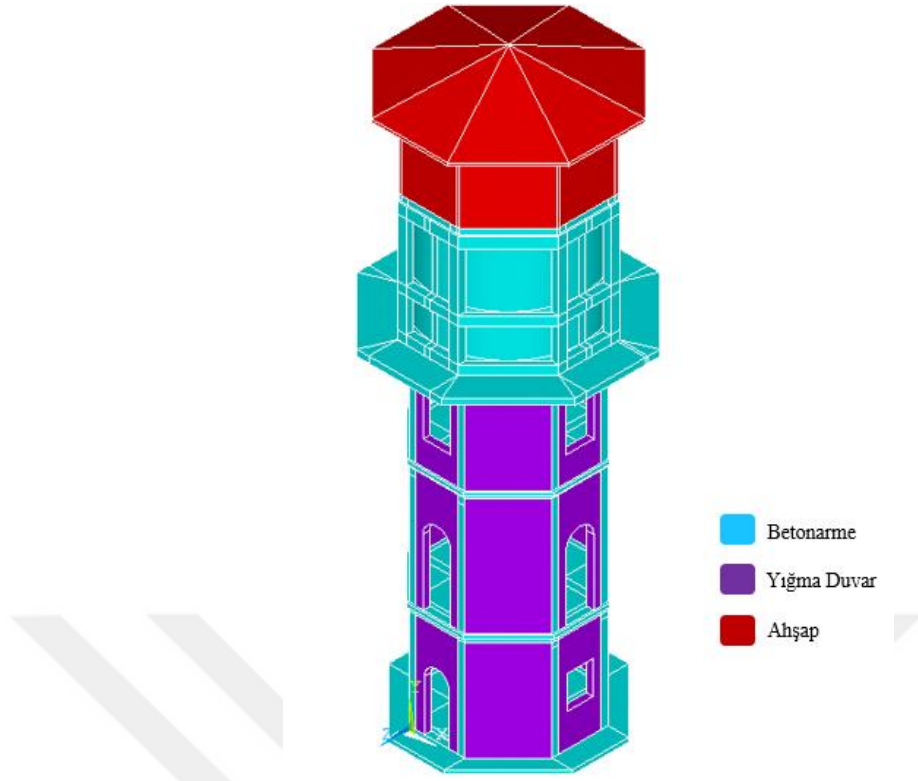
Tarihi su deposunun sonlu eleman modelinin oluşturulmasında 219684 adet katı eleman ve 920544 adet düğüm noktası kullanılmıştır(Şekil 5.5.).



Şekil 5.5. Yapının sonlu eleman modeli

Model oluşturulurken yapı elemanının zeminle bağlantısı ankastre mesnet olarak modellenmiştir. Yapı günümüzde su deposu olarak kullanılmadığı için su deposu boş olarak modellenmiştir. Ayrıca su deposunun olduğu katta bulunan merdivende modelde kullanılmamıştır. Tarihi su deposunun yığma duvarları makro modelleme yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Tarihi yapının sonlu elemanlar modellenmesinde taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanlar ayrı ayrı modellenmiştir. Şekil 5.6’da yapının betonarme, ahşap ve yığma duvar kısımları farklı renklerde gösterilmiştir.

Yapının tarihi öneminden dolayı, malzeme özelliklerinin belirlenmesinde herhangi bir deneysel çalışma yapılamamıştır. Bu çalışmada malzeme özelliklerinin doğru şekilde belirlenmesinin zorluğundan dolayı, yapılan literatür taraması sonucunda elde edilen ve genelde kullanılan malzeme özellikleri tercih edilmiştir (Aydın ve Özkaya, 2018; Karanikoloudis ve Lourenço, 2018; Salachoris vd., 2024).

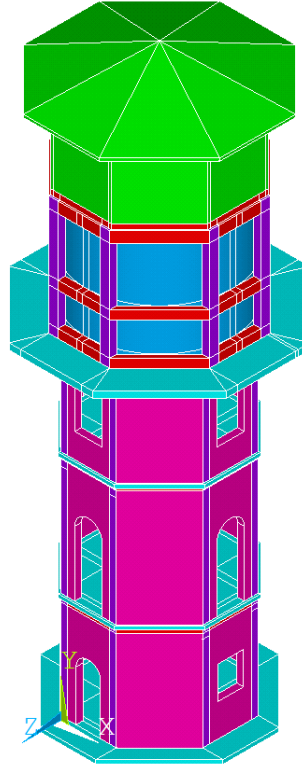


Şekil 5.6. Malzeme türlerine göre yapı elemanları

Tarihi yapının sonlu elemanlar modelinde kullanılacak olan betonarme kolon, kiriş ve döşeme, yığma duvarlar ve ahşap çatı malzeme özellikleri, çalışmanın daha sonraki kısımlarında uygulanacak olan tepki yüzeyi yönteminde girdi parametresi olarak kullanılacağından, her bir yapısal eleman için ayrı ayrı modellenerek sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur(Şekil 5.7.). Betonarme kolon kiriş ve döşemeler, yığma duvarlar, ahşap çatı ve donatı malzemelerin özellikleri Tablo 5.1’de görüldüğü gibidir.

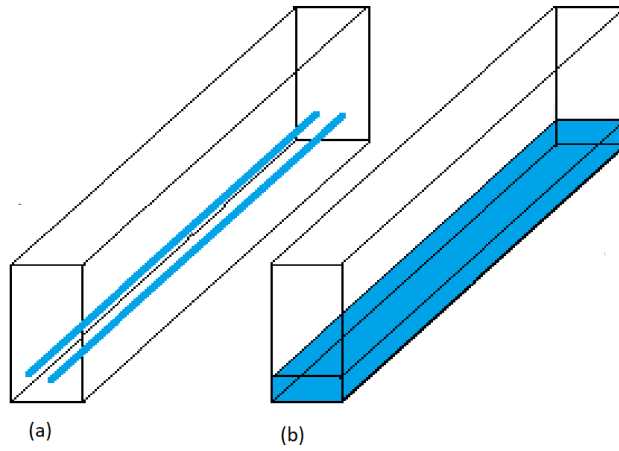
Tablo 5.1. Başlangıç sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri

Elemanlar	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı
Kolonlar	2400	28000	0.2
Kirişler	2400	28000	0.2
Döşemeler	2400	28000	0.2
Su deposu	2400	28000	0.2
Yığma duvarlar	1800	1000	0.2
Ahşap çatı	450	9000	0.2
Donatı	7850	200000	0.3



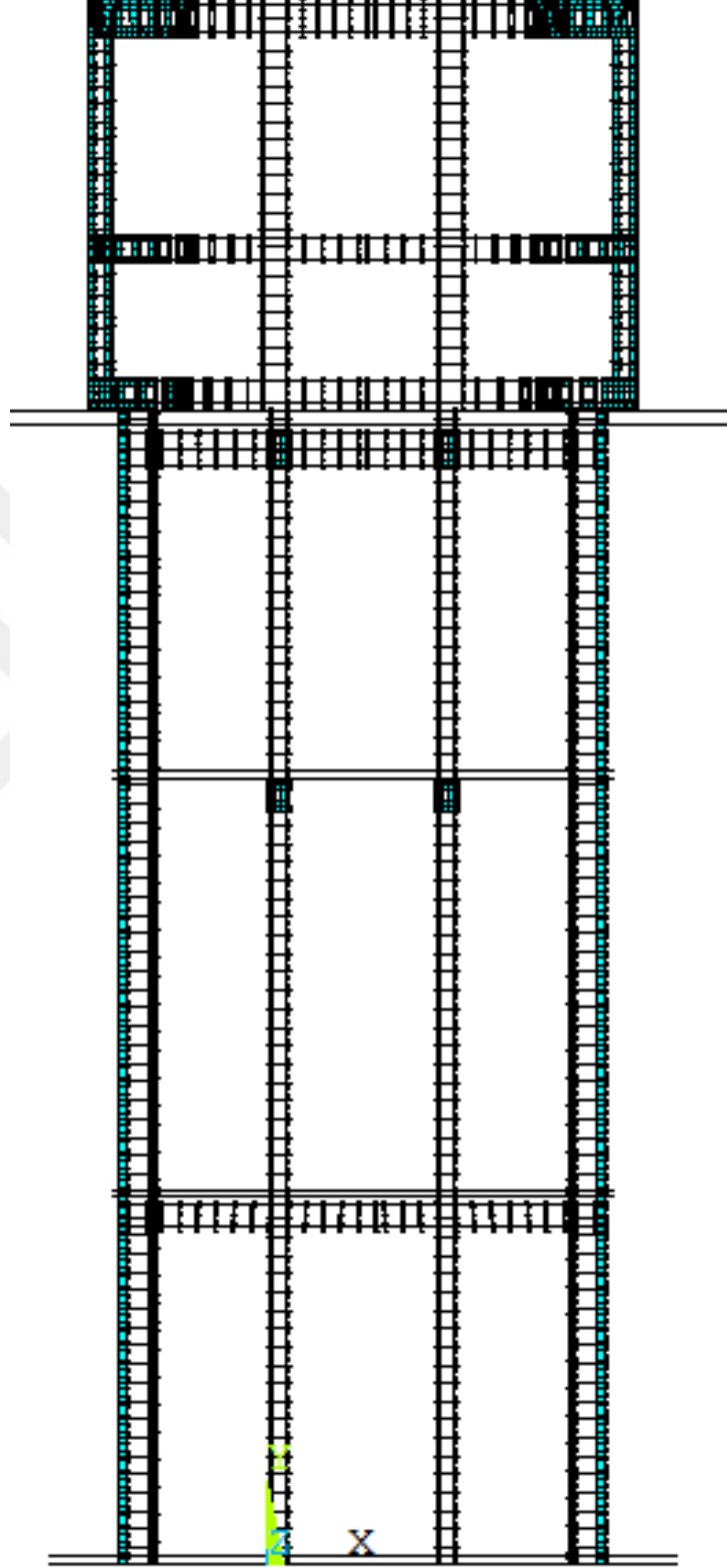
Şekil 5.7. Malzeme özelliklerine göre yapı elemanları

ANSYS programında donatılar için kullanılan iki temel modelleme yöntemi vardır. Bunlar ayırık donatı (discrete reinforcement) ve yayılmış donatı (smeared reinforcement) yöntemleridir. Ayırık donatı yönteminde donatılar çubuk elemanlar olarak ayrı ayrı modellenir(Şekil 5.8a.). Yayılmış donatı yönteminde ise donatının etkileri beton eleman içinde yayılarak veya ortalama alınarak modellenir. Donatının detaylı geometrisi göz ardı edilir ve beton eleman içinde donatının sağladığı takviyenin homojen bir şekilde temsil edilmesi amaçlanır(Şekil 5.8b.).

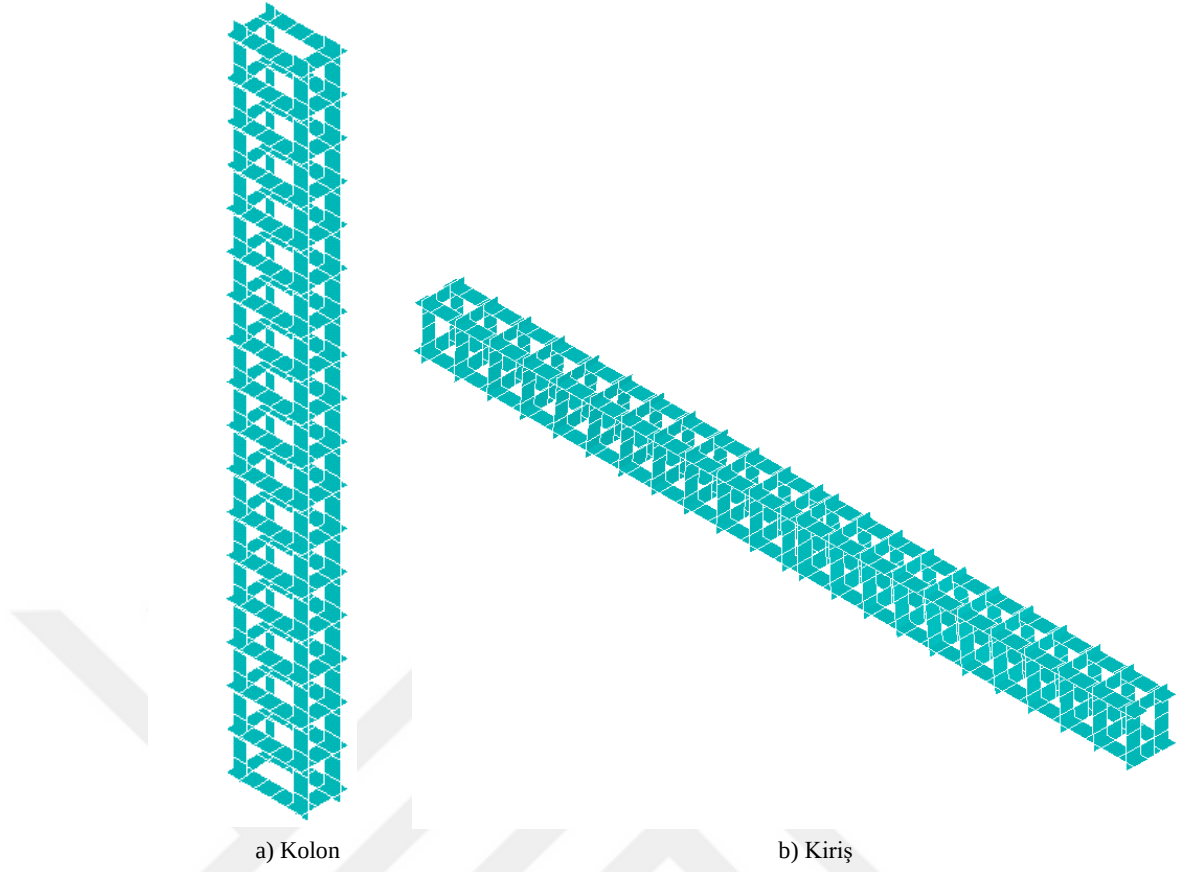


Şekil 5.8. Ayırık donatı ve yayılmış donatı

Bu çalışmada donatılar yayılmış donatı yöntemi kullanılarak aşağıdaki şekillerde gösterildiği gibi modellenmiştir.



Şekil 5.9. Enine ve boyuna donatılar



Şekil 5.10. Kolon ve kirişteki enine ve boyuna donatılar

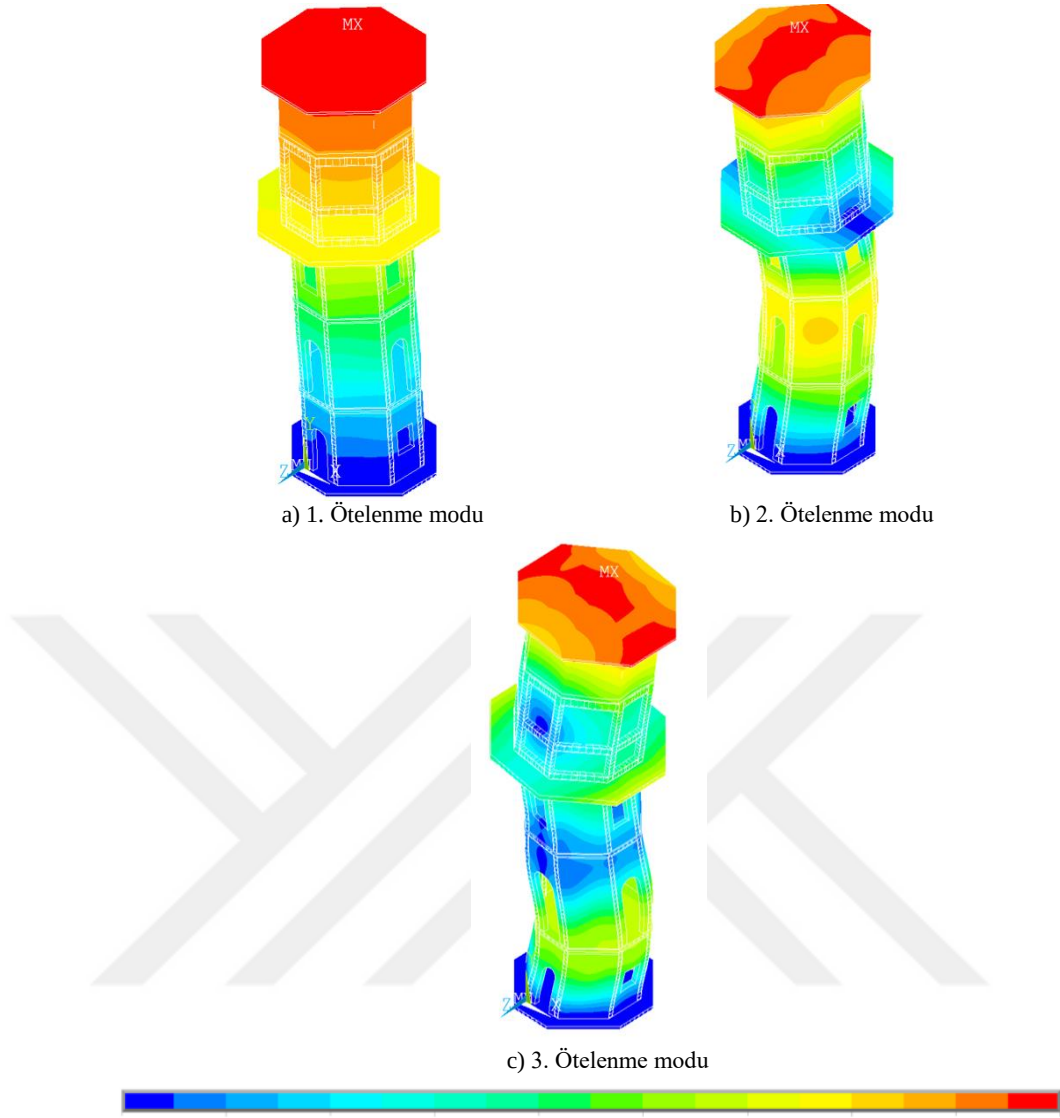
Kolonda ve kirişte boyuna donatı olarak 4 adet $\phi 16$ çapında donatı, enine donatı olarak $\phi 8$ çapında ve 20cm aralıklı donatı bulunmaktadır. Döşemelerde $\phi 14$ çapında ve 25cm aralıklı donatı bulunmaktadır.

5.3. Yapının Analitik Olarak Modal Parametrelerinin Bulunması

Tarihi su deposunun başlangıç sonlu eleman modeli üzerinde gerçekleştirilen modal analiz sonucunda yapıya ait modal parametreler elde edilmiştir. Tablo 5.2.'de elde edilen ilk üç ötelenme modu için doğal frekans değeri listelenirken, Şekil 5.11'de ise mod şekilleri görsel olarak sunulmuştur.

Tablo 5.2. Yapının başlangıç sonlu eleman modelinden elde edilen doğal frekansları

Mod	Doğal Frekans (Hz)
1.Ötelenme modu	2.51
2.Ötelenme modu	9.94
3.Ötelenme modu	16.6



Şekil 5.11. Yapının başlangıç sonlu eleman modeline ait mod şekilleri

5.4. Yapının DeneySEL Olarak Modal Parametrelerinin Bulunması

OMA yöntemi kullanılarak tarihi su deposunun deneysel modal parametrelerini belirlemek amacıyla çevresel titreşim testi gerçekleştirilmiştir. Bu testte, Şekil 5.12.'de gösterilen 0.1-120 Hz aralığında çalışabilen tek ve üç eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır.



Şekil 5.12. DeneySEL çalışmada kullanılan tek ve üç eksenli ivmeölçerler

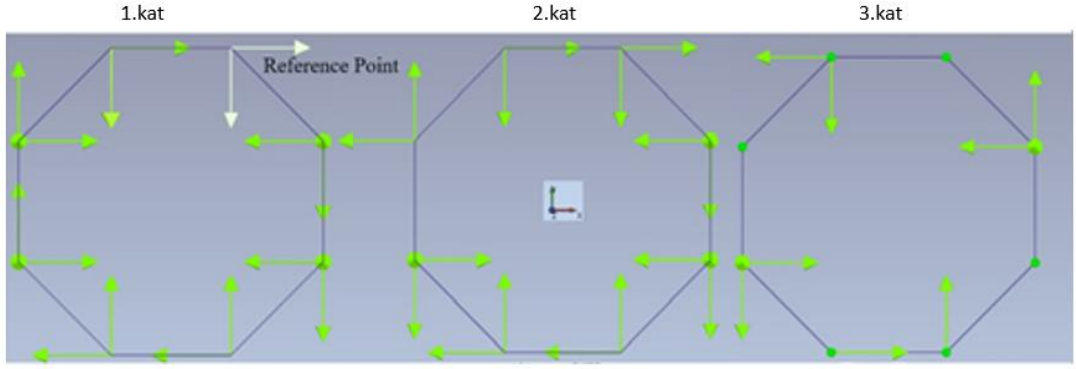
Yapının her katındaki kolon-kiriş düğüm noktalarına Şekil 5.13.'te gösterildiği gibi ivmeölçerler yerleştirilmiştir.



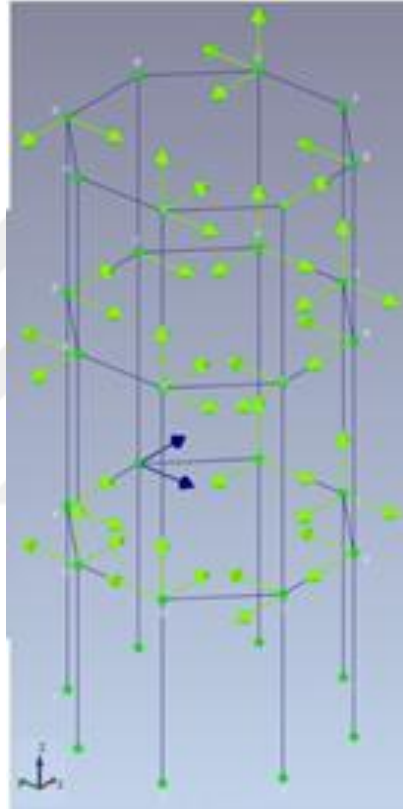
Şekil 5.13. İvmeölçerlerin yerleşimi

Toplamda 9 adet tek eksenli ve 4 adet üç eksenli ivmeölçer, yapının 20 farklı noktasına yerleştirilerek ölçümler alınmıştır. Bu düzenlemeler Şekil 5.14.'te gösterildiği gibi yapılmıştır. Birinci katta, 8 düğüm noktasına 4 adet üç eksenli ve 8 adet tek eksenli ivmeölçer yerleştirilmiştir. İkinci katta, 8 düğüm noktasına 4 adet üç eksenli ve 7 adet tek eksenli ivmeölçer yerleştirilmiştir. Üçüncü katta, 4 düğüm noktasına 2 adet üç eksenli ve 4 adet tek eksenli ivmeölçer yerleştirilmiştir.

Referanslı ölçüm gerçekleştirilmiştir. Birinci katta, bir kolon-kiriş düğüm noktasında yatay her iki yönde yerleştirilen ivmeölçerler, ölçüm süresince sabit bir konumda tutulmuş ve referans olarak kullanılmıştır. Şekil 5.15.'te yapıya yerleştirilen ivmeölçerin konfigürasyonunu gösterilmiştir.



Şekil 5.14. Her kat için ivmeölçer yerleşimi



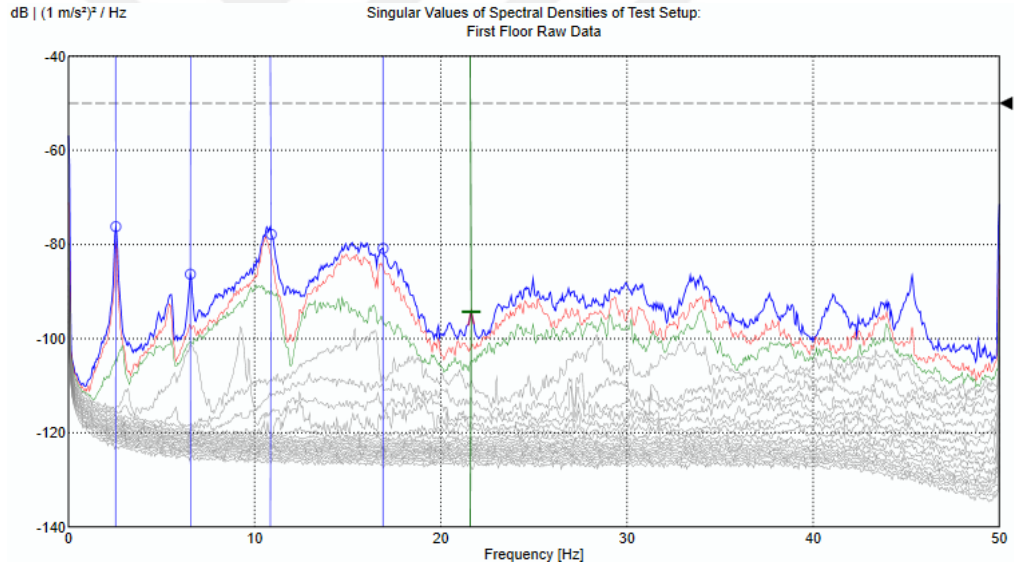
Şekil 5.15. İvmeölçerlerin konfigürasyonu

İvmeölçerlerden gelen titreşim sinyalleri Şekil 5.16.'da gösterilen veri toplama sistemi ile Testlab_V2 yazılımı kullanılarak kaydedilmiştir. Ölçüm süresi 30 dk. ve kaydedilen frekans aralığı ise 0-100 Hz olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.16. Deneysel çalışmada kullanılan veri toplama sistemi

Elde edilen sinyallerin ARTeMIS (SVS, 2013) Modal yazılımı aracılığıyla GFTAA yöntemi kullanılarak işlenmesiyle tarihi su deposunun deneysel modal parametreleri elde edilmiştir. GFTAA yönteminden elde edilen değerler Şekil 5.17.'de gösterilmektedir.

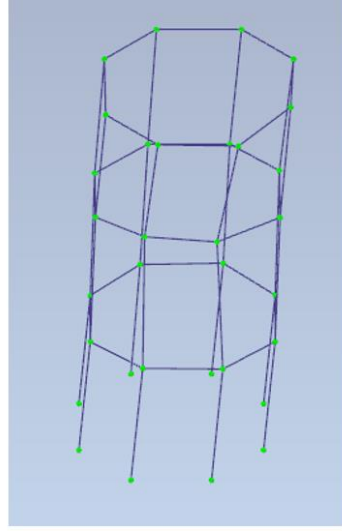


Şekil 5.17. GFTAA yöntemi ile elde edilen değerler

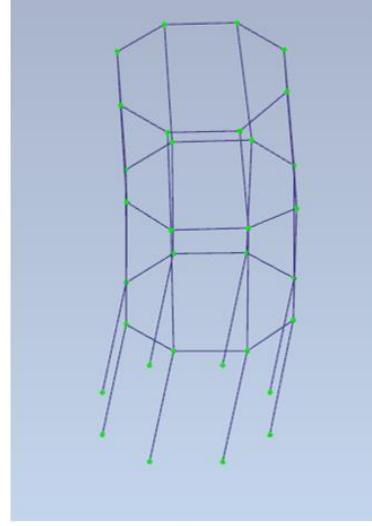
Tablo 5.3.'te elde edilen ilk üç ötelenme modu için doğal frekans değeri listelenirken, Şekil 5.18'de ise mod şekilleri görsel olarak sunulmuştur.

Tablo 5.3. Tarihi su deposunun deneysel doğal frekans değerleri

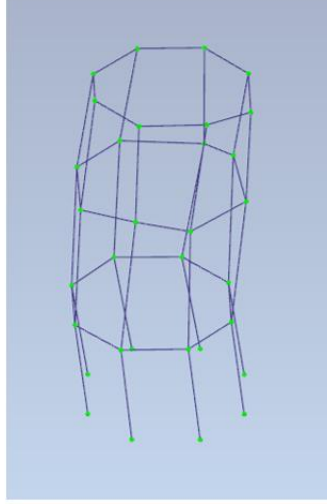
Mod	Doğal Frekanslar, f (Hz)
1.Ötelenme modu	2.528
2.Ötelenme modu	10.836
3.Ötelenme modu	16.895



a) 1. Ötelenme modu



b) 2. Ötelenme modu



c) 3. Ötelenme modu

Şekil 5.18. Tarihi su deposunun deneysel mod şekilleri

5.5. Modal Parametrelerin Karşılaştırılması

Tarihi su deposunun analitik ve deneysel yöntemlerle elde edilen modal parametreleri incelendiğinde, elde edilen mod şekillerinin birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Deneysel olarak elde edilen frekans değerleri ile analitik olarak elde edilen frekans değerleri arasında bazı farklılıkların olduğu Tablo 5.4.'de karşılaştırmalı olarak incelendiğinde görülmektedir. Doğal frekanslar arasındaki bu farklılıkları ortadan kaldırmak veya en aza indirebilmek için yapının başlangıç sonlu eleman modeli deneysel ölçüm sonuçlarına göre güncellenmelidir. Böylelikle yapıyı daha doğru bir şekilde temsil edebilen bir sonlu eleman modeli oluşturabilir.

Tablo 5.4. Tarihi su deposunun doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

Mod	Analitik Frekans (Hz)	Deneysel Frekans (Hz)	Fark (%)
1.Ötelenme modu	2.51	2.528	0.72
2.Ötelenme modu	9.94	10.836	8.27
3.Ötelenme modu	16.6	16.895	1.75

5.6. Yapının Sonlu Eleman Modelinin Güncellenmesi

Tarihi su deposunun sonlu elemanlar model güncellenmesi Tepki Yüzeği Yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tarihi su deposunun sonlu elemanlar model güncellenmesinde yapı elemanlarının elastisite modülü ve birim hacim ağırlığı değerleri değişken parametre olarak belirlenmiştir. Bu değişkenlerin ilgilendiğimiz doğal frekans değerleri üzerindeki etkileri araştırılarak deneysel doğal frekans değerlerine en yakın olan sonuçları veren parametre değerleri seçilerek model güncellemesi yapılmıştır. Güncelleme işleminde girdi parametreleri için belirlenen alt ve üst sınırlar Tablo 5.5.'te çıktı parametreleri Tablo 5.6.'da gösterilmektedir.

Tablo 5.5. Girdi parametrelerin alt ve üst sınırları

Parametre	Parametre Adı	Alt sınır	Üst sınır
Kolonların birim hacim ağırlığı(kg/m ³)	P1	2160	2640
Kolonların elastisite modülü(MPa)	P2	25200	30800
Kirişlerin birim hacim ağırlığı(kg/m ³)	P3	2160	2640
Kirişlerin elastisite modülü(MPa)	P4	25200	30800
Döşemelerin birim hacim ağırlığı(kg/m ³)	P5	2160	2640
Döşemelerin elastisite modülü(MPa)	P6	25200	30800
Su deposunun birim hacim ağırlığı(kg/m ³)	P7	2160	2640
Su deposunun elastisite modülü(MPa)	P8	25200	30800
Yığma duvarların birim hacim ağırlığı(kg/m ³)	P9	1500	2100
Yığma duvarların elastisite modülü(MPa)	P10	900	1100
Çatının birim hacim ağırlığı(kg/m ³)	P11	405	495

Tablo 5.6. Çıktı parametreleri

Parametre	Parametre Adı
1. Ötelenme Modu (Hz)	P12
2. Ötelenme Modu (Hz)	P13
3. Ötelenme Modu (Hz)	P14

Güncellenecek parametreler ve bu parametreler için belirlenen alt ve üst sınırları ile Merkezi Kompozit Tasarım (CCD) yöntemi kullanılarak deneysel tasarım oluşturulmuştur. Toplamda 151 adet analiz yapılmıştır. Analizler sonucunda, girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerindeki etkisinin anlaşılmasını sağlayan tepki yüzeyleri genetik agregasyon tekniği kullanılarak oluşturulmuştur.

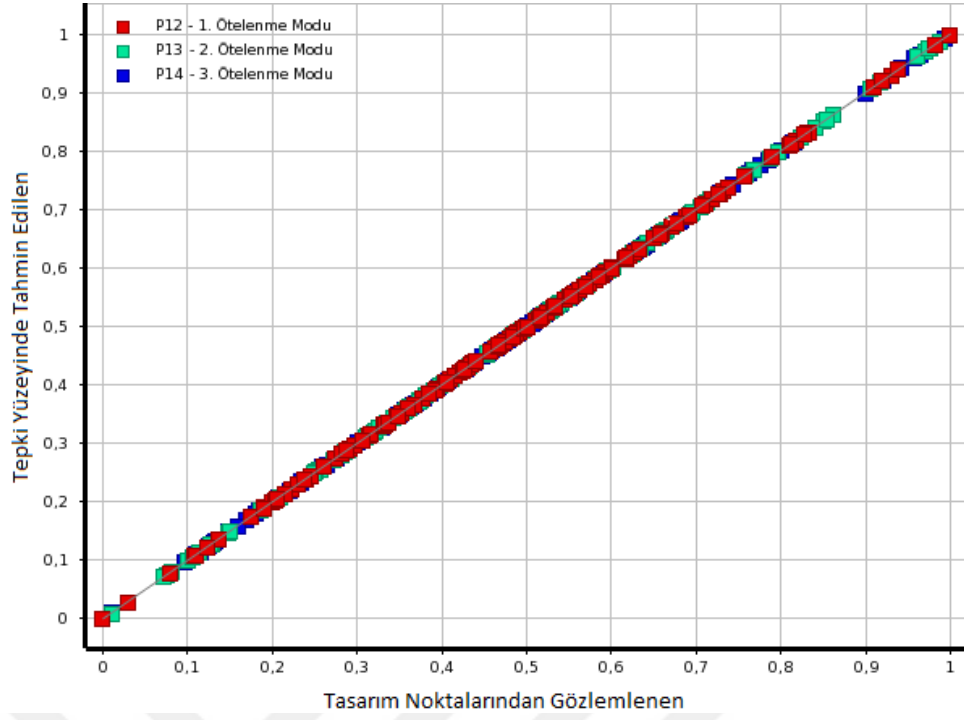
Tepki yüzeylerinin uygunluğunu belirlemek için Hesaplama Katsayısı (R^2) ve Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE) değerleri hesaplanmıştır ve bu değerler Tablo 5.7.'de gösterilmektedir. R^2 değerlerinin 1'e yakın olması, RMSE değerlerinin 0'a yakın olması modelin tahminlerinin gerçek verilere yakın olduğunu ve dolayısıyla modelin doğruluğunun yüksek olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.7. Tepki yüzeylerinin uygunluğunu belirlemek için kullanılan ölçütler

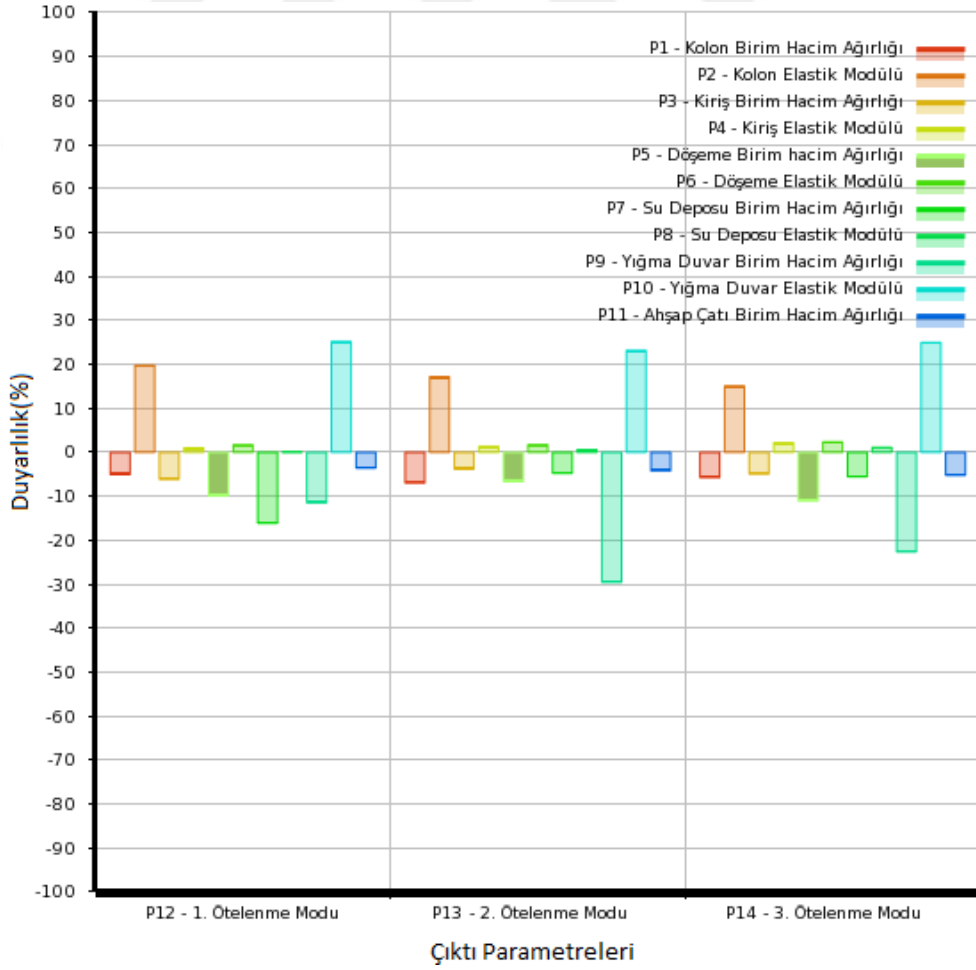
	1. Ötelenme Modu	2. Ötelenme Modu	3. Ötelenme Modu
R^2	0.99998	0.9997	0.99847
RMSE	0.00046	0.00261	0.02773

Oluşturulan tepki yüzeylerinin doğruluğunu değerlendiren diğer bir gösterge tasarım noktalarından gözlemlenen değerler ile tepki yüzeyinden tahmin edilen değerler arasındaki ilişkiyi gösteren tahmin gözlemlenen grafiğidir. Tahmin gözlemlenen grafiği, genellikle bir eksen boyunca tahmin edilen değerlerin, diğer eksen boyunca ise gözlemlenen değerlerin yer aldığı bir grafikdir. Eğer model, gerçek değerlerle uyum içinde ise, grafikteki noktalar yaklaşık olarak bir doğru boyunca yer alır ve bu durumda grafik diyagonal bir çizgi oluşturur. Bu durumda, tahminler gerçek değerlere tam olarak uyarlanmıştır. Ancak, tahminler gerçek değerlerden sapma gösteriyorsa, grafikte noktalar diyagonal çizginin dışında olacaktır, bu da modelin doğruluğunun ve güvenilirliğinin sorgulanması gerektiğini gösterir. Oluşturulan tahmin-gözlemlenen grafiği Şekil 5.19.'da gösterilmektedir. Görüldüğü gibi tepki yüzeylerindeki değerler, deneysel tasarım noktalarındaki değerlere yakındır.

Tepki yüzeyi modelleri, duyarlılık analizi için kullanılabilir. Duyarlılık analizi, optimizasyon sürecinde hangi girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğunu belirlemek için kullanılır. Böylelikle optimizasyon sürecinde hangi değişkenlerin öncelikli olarak dikkate alınması gerektiği anlaşılabilir ve optimizasyon süreci daha etkin bir şekilde ilerler.



Şekil 5.19. Tahmin-Gözlemlenen Grafiği



Şekil 5.20. Duyarlılık Analizi

Gerçekleştirilen duyarlılık analizleri sonucunda çıktı parametreleri üzerinde en büyük etkiye sahip olan parametrelerin yığma duvarın birim hacim ağırlığı ve yığma duvarın elastik modülü olduğu görülmüştür (Şekil 5.20.).

Tepki yüzeyleri oluşturulduktan ve doğrulukları kontrol edildikten sonra, çıktı parametreleri olan doğal frekans değerleri, tarihi su deposunda yapılan deneysel ölçümlerden elde frekans değerleri ile uyumlu hale getirilmeye çalışılmıştır. Optimizasyon sürecinde tarama yaklaşımı kullanılmıştır. Hedef değerleri Tablo 5.8.'de gösterildiği gibidir.

Tablo 5.8. Tepki yüzeylerinin optimizasyonu için hedef değerleri

Parametre	Parametre Adı	Hedef
1. Ötellenme Modu (Hz)	P12	2.528
2. Ötellenme Modu (Hz)	P13	10.836
3. Ötellenme Modu (Hz)	P14	16.895

Optimizasyon analizinde 10 adet aday parametre kombinasyonu belirlenmiştir. Analiz sonucunda belirlenen parametre kombinasyonları Tablo 5.9. ve Tablo 5.10.'da gösterilmiştir.

Tablo 5.9. Optimizasyon sonucu elde edilen aday parametre kombinasyonları(1-5)

Parametre adı	Aday parametre kombinasyonları				
	1.	2.	3.	4.	5
P1 (kg/m ³)	2224.8	2232.1	2368.9	2265.8	2519.4
P2 (MPa)	28758	29305	30779	26449	30729
P3 (kg/m ³)	2631.7	2450.8	2391	2604.5	2596.8
P4 (MPa)	30714	26342	26537	29838	28106
P5 (kg/m ³)	2541.3	2408.5	2489.9	2634.2	2490.4
P6 (MPa)	28811	27935	28727	27359	29208
P7 (kg/m ³)	2564.9	2414.6	2520.5	2418.5	2612.8
P8 (MPa)	27394	26911	30488	29026	27806
P9 (kg/m ³)	1523.6	1505.4	1502.7	1503.9	1555
P10 (MPa)	1035	959.4	936.8	1066.4	1005.7
P11 (kg/m ³)	453.4	475.6	408.6	406.9	423.3

Tablo 5.10. Optimizasyon sonucu elde edilen aday parametre kombinasyonları(6-10)

Parametre adı	Aday parametre kombinasyonları				
	6.	7.	8.	9.	10.
P1 (kg/m ³)	2289.6	2299.8	2509.4	2299.7	2194.8
P2 (MPa)	29779	30687	30586	29287	28946
P3 (kg/m ³)	2623.6	2426.1	2461.6	2532.8	2586
P4 (MPa)	30682	26847	29754	29983	25381
P5 (kg/m ³)	2442.7	2595.5	2602.3	2458.3	2483.7
P6 (MPa)	27376	28773	29342	27755	30775
P7 (kg/m ³)	2489.9	2609.7	2604	2535.8	2538.6
P8 (MPa)	29590	26549	26256	25890	28981
P9 (kg/m ³)	1547.2	1628.7	1568.3	1565.5	1594.9
P10 (MPa)	970.41	1017.3	1002.3	999.9	1007.4
P11(kg/m ³)	411.9	440.5	407	434.3	407.7

Aday parametre kombinasyonlarıyla elde edilen doğal frekans değerleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. Aday parametre kombinasyonlarıyla elde edilen doğal frekans değerleri deneysel doğal frekans değerleri ile kıyaslanmıştır ve aralarındaki hata yüzdeleri Tablo 5.11.'de gösterilmiştir

Tablo 5.11. Aday parametre kombinasyonlarıyla elde edilen doğal frekans değerleri

Aday parametre kombinasyonları	1. Ötelenme Modu (Hz)	2. Ötelenme Modu (Hz)	3. Ötelenme Modu (Hz)
1.	2.529	10.318	17.010
2.	2.529	10.223	16.847
3.	2.523	10.257	16.847
4.	2.527	10.289	17.008
5.	2.530	10.278	16.985
6.	2.526	10.252	16.946
7.	2.537	10.266	16.946
8.	2.529	10.266	16.964
9.	2.528	10.246	16.934
10.	2.529	10.257	16.973

Tablo 5.12.'de görüldüğü gibi birinci sırada yer alan parametre kombinasyonu, deneysel doğal frekans değerleri için en uygun parametre kombinasyonunu göstermektedir

Tablo 5.12. Aday parametre kombinasyonlarının hata yüzdeleri

Aday parametre kombinasyonu	1.Ötelenme modu için hata yüzdesi	2.Ötelenme modu için hata yüzdesi	3.Ötelenme modu için hata yüzdesi	Toplam hata yüzdesi
1.	%0.04	%4.78	%0.68	%5.5
2.	%0.04	%5.66	%0.28	%5.98
3.	%0.2	%5.34	%0.2	%5.74
4.	%0.04	%5.05	%0.67	%5.76
5.	%0.08	%5.15	%0.53	%5.76
6.	%0.08	%5.39	%0.3	%5.77
7.	%0.36	%5.26	%0.3	%5.92
8.	%0.04	%5.26	%0.41	%5.71
9.	%0	%5.44	%0.23	%5.68
10.	%0.04	%5.34	%0.46	%5.84

Elde edilen bu sonuçlar doğrultusunda, güncellenmiş sonlu eleman modeli için elemanlarının elastisite modülü ve birim hacim ağırlığı değişimleri Tablo 5.13.'te gösterilmiştir. Güncelleme sürecinde en belirgin değişiklik yığma duvarların birim hacim ağırlığı parametresinde olmuştur.

Tablo 5.13. Sonlu eleman modelinde dikkate alınan malzeme özellikleri

Elemanlar	Başlangıç Sonlu Eleman Modeli		Güncellenmiş Sonlu Eleman Modeli		Fark	
	γ (kg/m ³)	E (MPa)	γ (kg/m ³)	E (MPa)	γ için	E için
Kolonlar	2400	28000	2224.8	28758	%7.3	%2.7
Kirişler	2400	28000	2631.7	30714	%9.7	%9.7
Döşemeler	2400	28000	2541.3	28811	%5.9	%2.9
Su deposu	2400	28000	2564.9	27394	%6.9	%2.2
Yığma duvarlar	1800	1000	1523.6	1035	%15.4	%3.5
Ahşap çatı	450	9000	453.4	9000	%0.8	%0

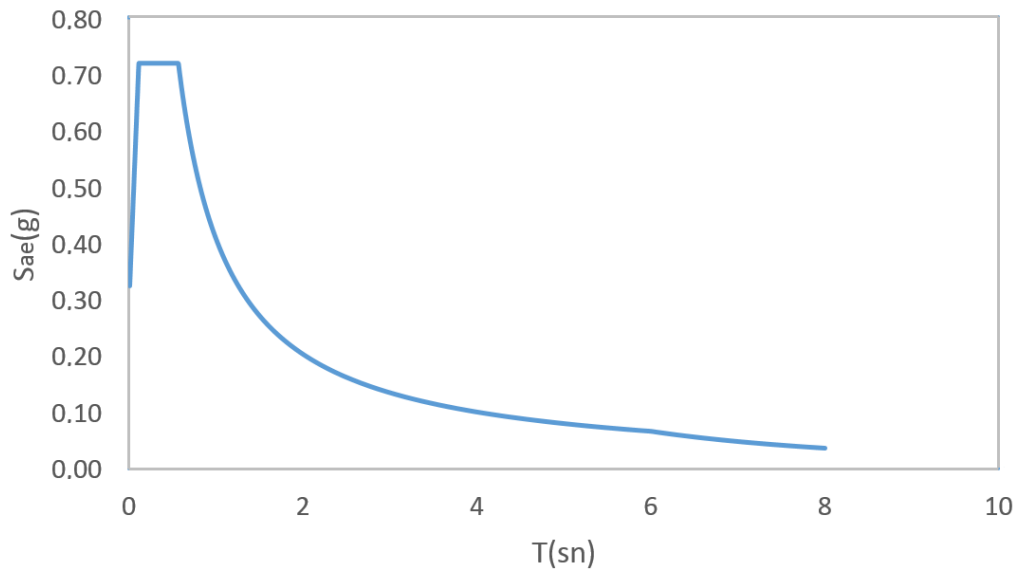
E: elastisite modülü, γ : birim hacim ağırlığı

5.7. Yapının Deprem Performansının Belirlenmesi

Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulamasından yapının bulunduğu koordinatlar (E:41.27739; B:36.34932) için gerekli veriler elde edilmiştir. DD2 deprem yer hareketi ve ZD zemin sınıfına göre haritadan okunan değerler Tablo 5.14.'te ve yatay elastik tasarım spektrumu Şekil 5.21.'de verilmiştir.

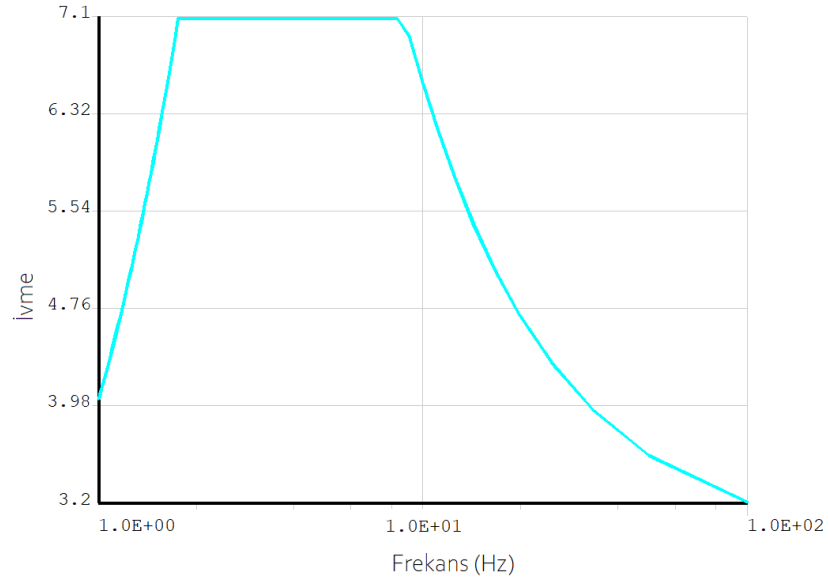
Tablo 5.14. Türkiye deprem tehlike haritası verileri

	DD2
Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı S_s	0.522
1.0 sn için harita spektral ivme katsayısı S_1	0.184
Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı S_{DS}	0.772
1.0 sn periyot için tasarım spektral ivme katsayısı S_{D1}	0.411



Şekil 5.21. Yatay Elastik Tasarım Spektrumu

ANSYS programında tasarım spektrumu oluşturulurken, ivme değerleri frekans değerlerine bağlı olarak çizilir. Bu yüzden yatay elastik tasarım spektrumundaki periyot değerleri frekans değerlerine dönüştürülmüştür(Şekil 5.22.).



Şekil 5.22. Tasarım spektrumu

Güncellenmiş sonlu eleman modeli kullanılarak yapının ilk yirmi moduna ait şekilleri ve bu mod şekillerine ait frekans değerleri elde edilmiştir. Elde edilen frekans değerleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 5.15. Güncellenmiş sonlu eleman modeline ait frekans değerleri

Mod	Frekans (Hz)	Mod	Frekans (Hz)
1	2.529	11	22.414
2	2.531	12	22.448
3	4.147	13	26.150
4	10.246	14	29.378
5	10.318	15	30.633
6	17.010	16	31.897
7	17.156	17	32.199
8	17.932	18	33.147
9	18.416	19	33.811
10	22.009	20	36.940

Her bir mod için modal katkı oranları belirlenmiştir. X yönü doğrultusunda uygulanacak deprem etkisi için X yönünde modal katkı oranları %0.1 üzerinde olan yani yapısal davranışta etkin olan modlar dikkate alınmıştır(Tablo 5.16.).

Tablo 5.16. X yönünde Modal Katkı Oranı %0.1 üzerinde olan modlar

Mod	Frekans (Hz)
1	2.529
2	2.531
3	4.147
4	10.246
6	17.010
11	22.414

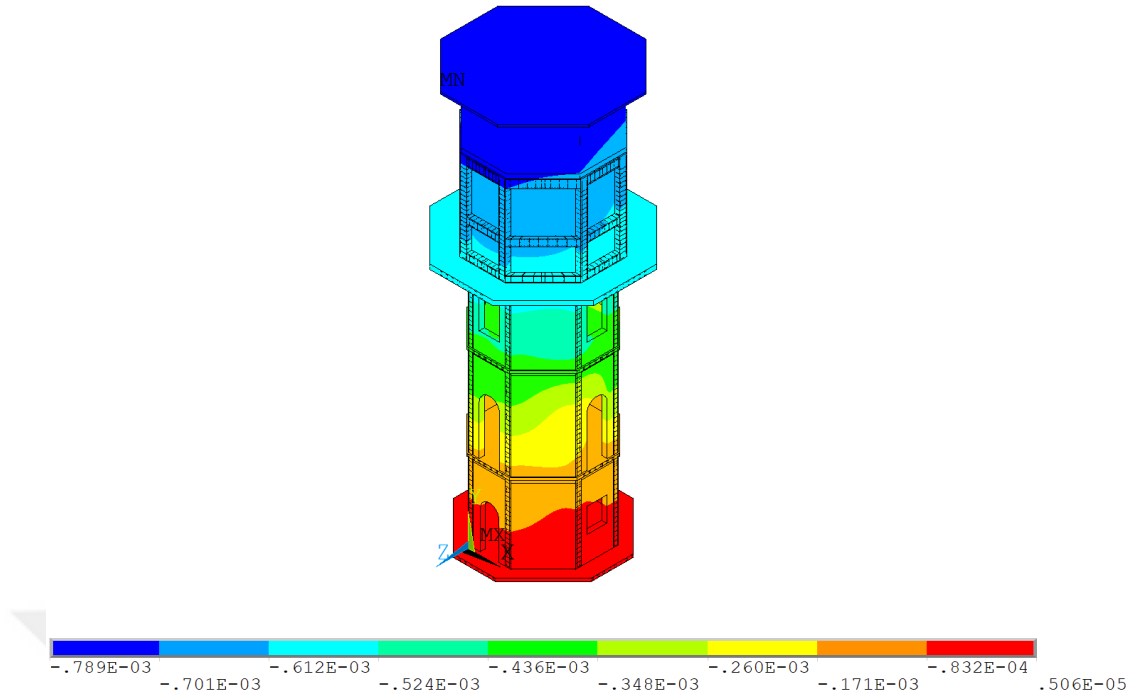
Benzer şekilde, Z yönü doğrultusunda uygulanacak deprem etkisi için Z yönünde de modal katkı oranı %0.1'in üzerinde olan modlar dikkate alınmıştır(Tablo 5.17.).

Tablo 5.17. Z yönünde Modal Katkı Oranı %0.1 üzerinde olan modlar

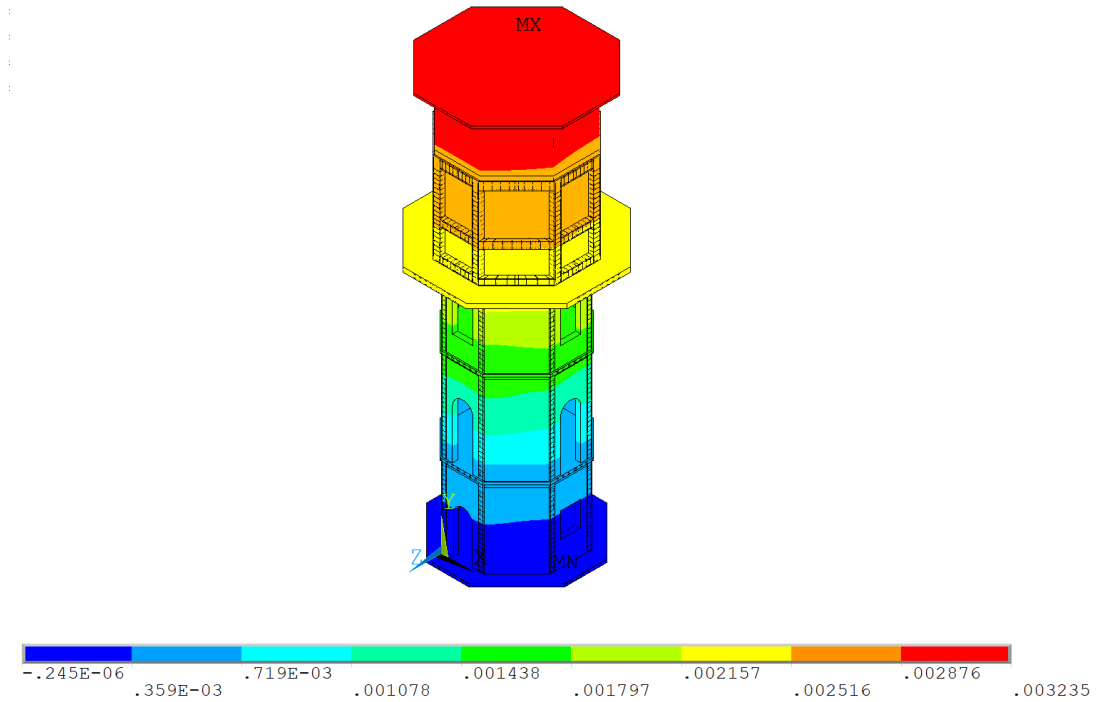
Mod	Frekans (Hz)
1	2.529
2	2.531
3	4.147
5	10.318
7	17.156
12	22.448

Tepki spektrumunu kullanılarak bu frekans değerlerine karşılık gelen ivme değerleri belirlenmiştir. İvme değerleri, yapı elemanlarına uygulanan deprem yüklerini belirlemek için kullanılmıştır. Bu yüklerin yapıda oluşturduğu iç kuvvetler, yerdeğiştirme vb. her bir mod için ayrı ayrı elde edilmiştir.

X yönü doğrultusunda 1. Mod için uygulanan deprem yükünün yapıda oluşturduğu en büyük yerdeğiştirme 0.789 mm olarak elde edilmiştir(Şekil 5.23.). X yönü doğrultusunda. 2.Mod için uygulanan deprem yükünün yapıda oluşturduğu en büyük yerdeğiştirme 3.235 mm olarak elde edilmiştir(Şekil 5.24.).

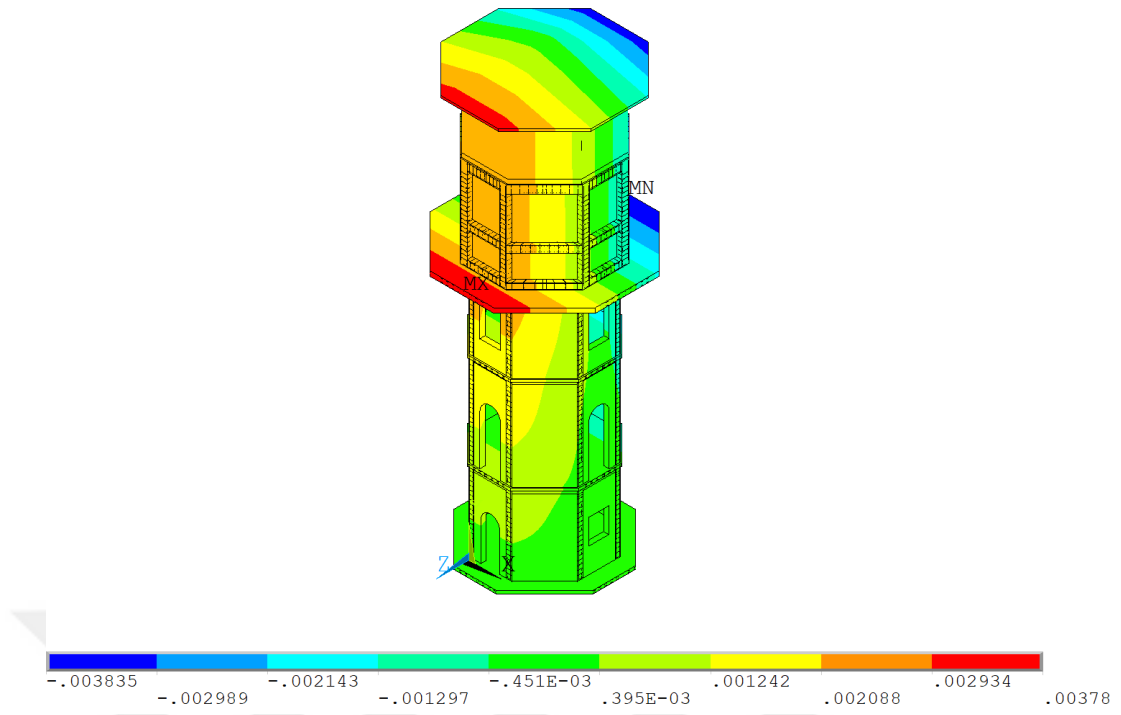


Şekil 5.23. 1. Mod için X yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı

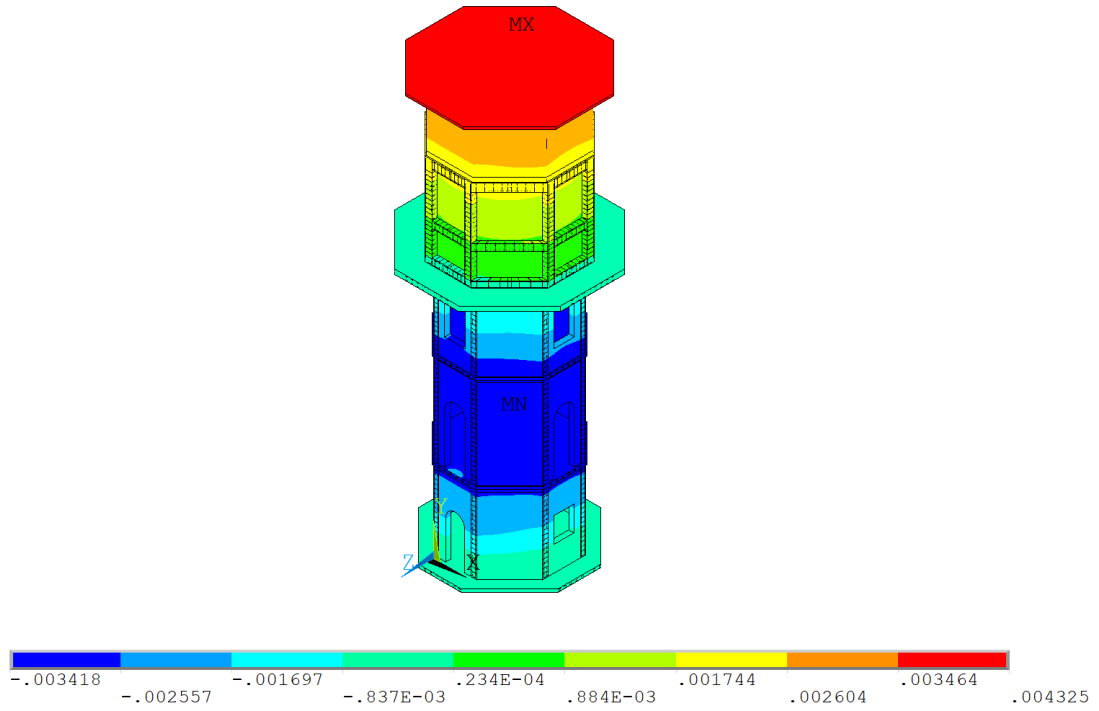


Şekil 5.24. 2. Mod için X yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı

X yönü doğrultusunda 3. Mod için uygulanan deprem yükünün yapıda oluşturduğu en büyük yerdeğiştirme 3.83 mm olarak elde edilmiştir(Şekil 5.25.). X yönü doğrultusunda 4. Mod için uygulanan deprem yükünün yapıda oluşturduğu en büyük yerdeğiştirme 4.32 mm olarak elde edilmiştir(Şekil 5.26.).

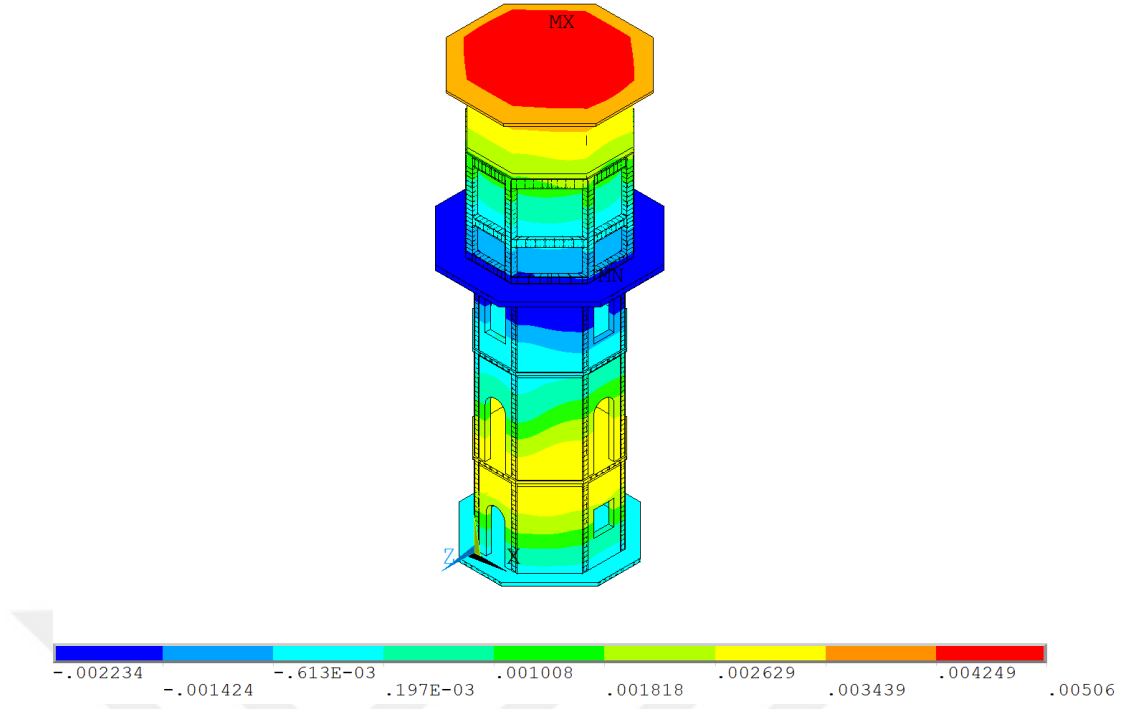


Şekil 5.25. 3. Mod için X yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı

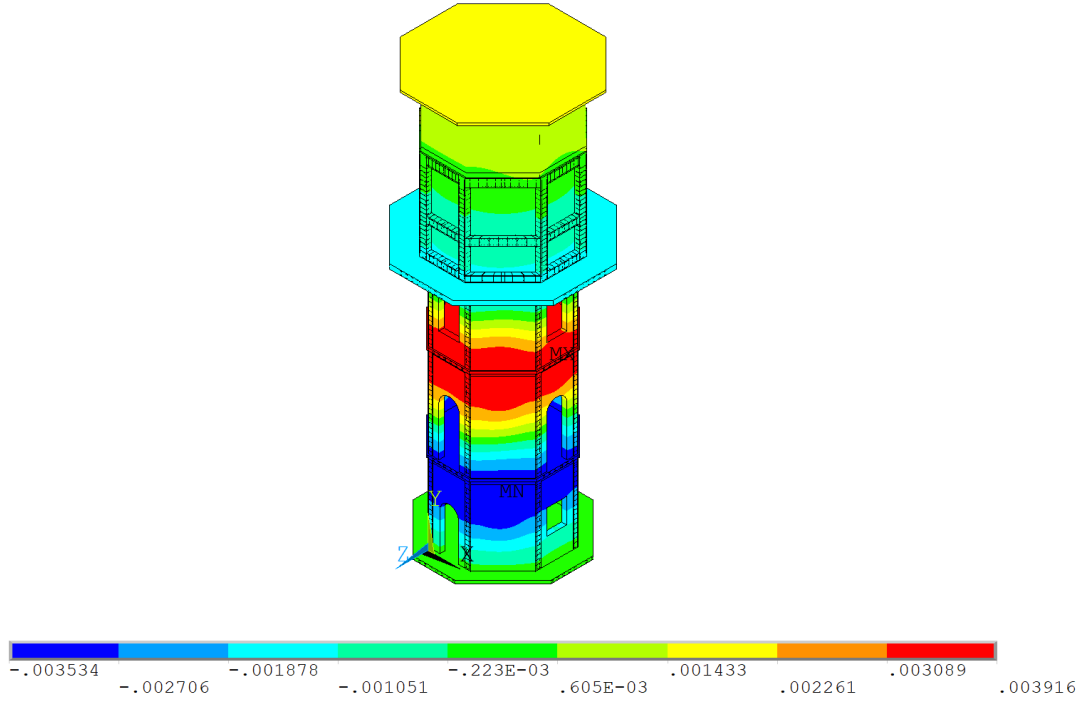


Şekil 5.26. 4. Mod için X yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı

X yönü doğrultusunda 6. Mod için uygulanan deprem yükünün yapıda oluşturduğu en büyük yerdeğiştirme 5.06 mm olarak elde edilmiştir(Şekil 5.27.). X yönü doğrultusunda 11. Mod için uygulanan deprem yükünün yapıda oluşturduğu en büyük yerdeğiştirme 3.92 mm olarak elde edilmiştir(Şekil 5.28.).

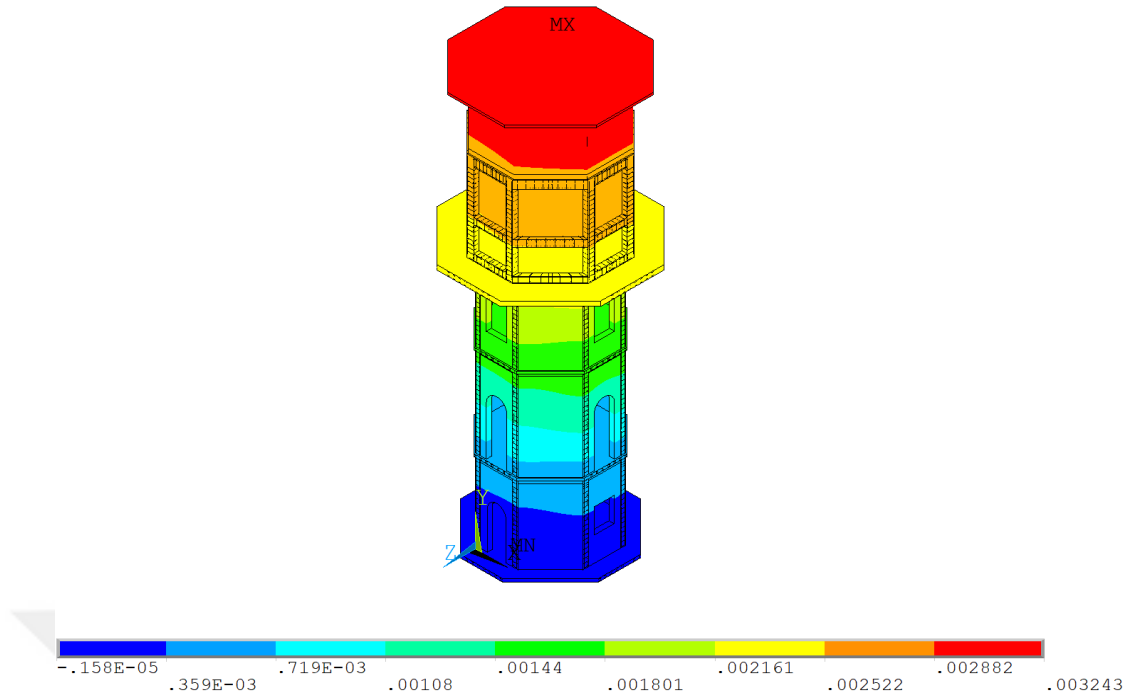


Şekil 5.27. 6. Mod için X yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı

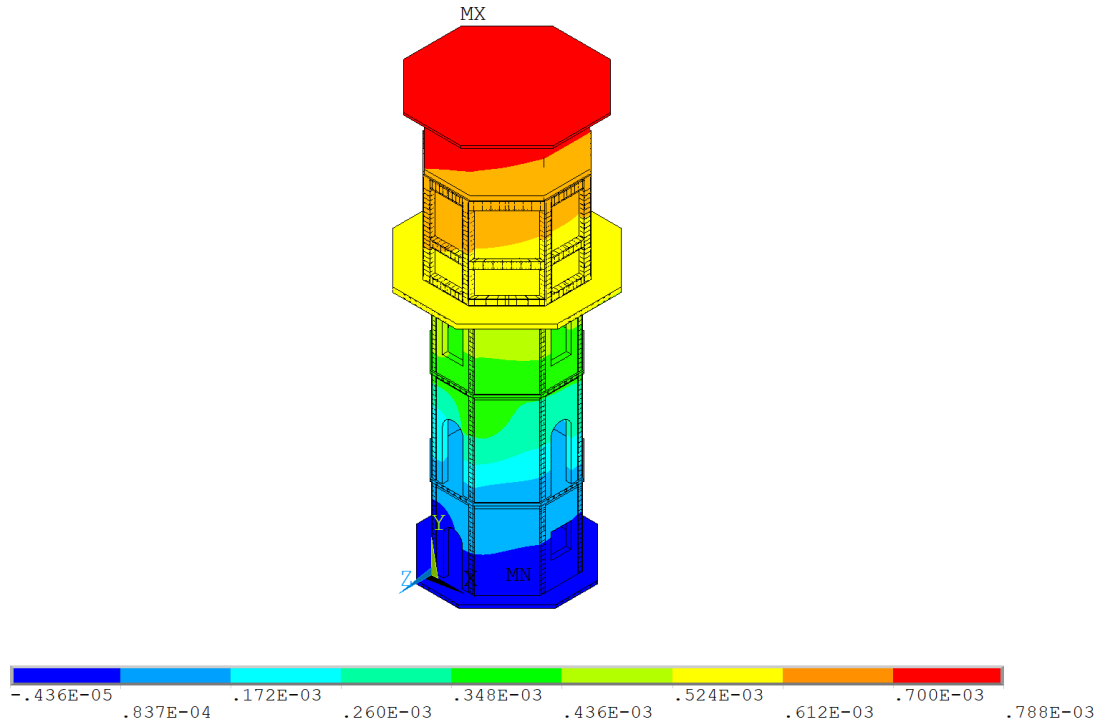


Şekil 5.28. 11. Mod için X yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı

Z yönü doğrultusunda 1. Mod için uygulanan deprem yükünün yapıda oluşturduğu en büyük yerdeğiştirme 3.24 mm olarak elde edilmiştir(Şekil 5.29.). Z yönü doğrultusunda 2. Mod için uygulanan deprem yükünün yapıda oluşturduğu en büyük yerdeğiştirme 0.78 mm olarak elde edilmiştir(Şekil 5.30.).

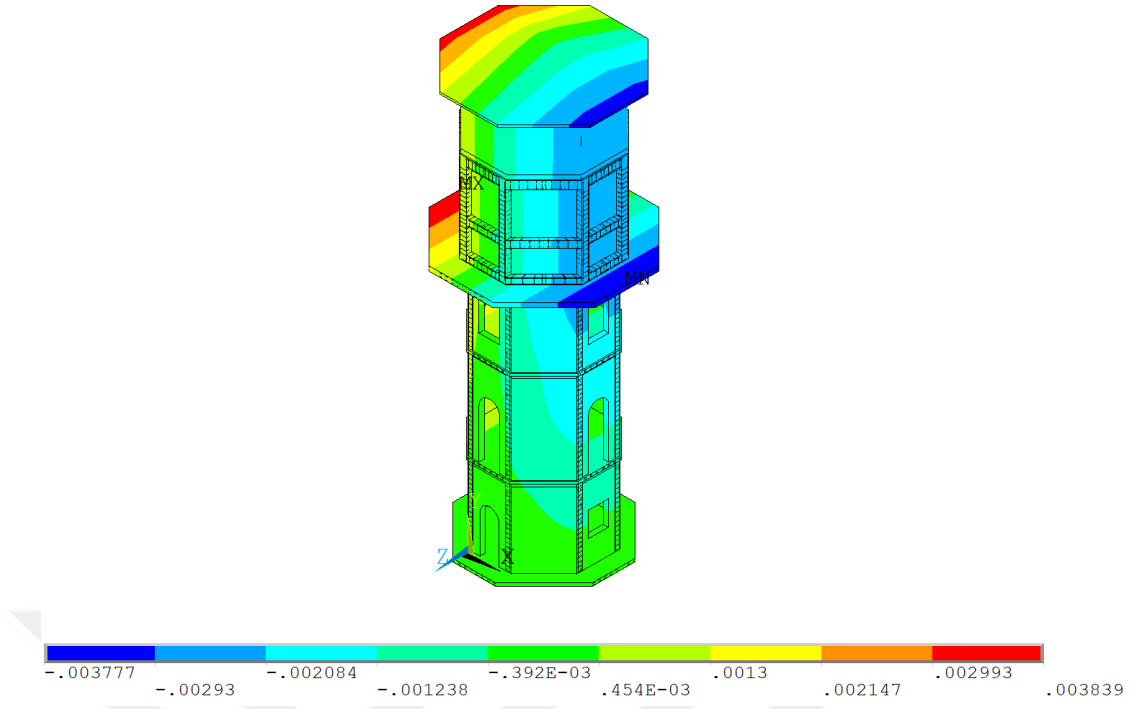


Şekil 5.29. 1. Mod için Z yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı

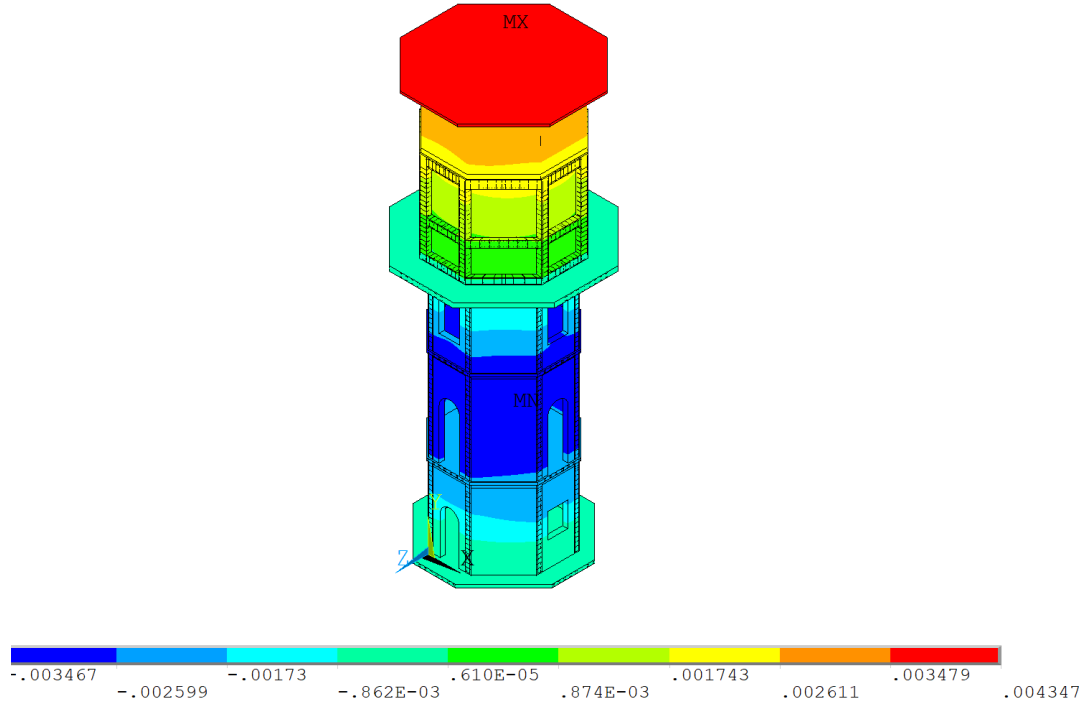


Şekil 5.30. 2. Mod için Z yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı

Z yönü doğrultusunda 3. Mod için uygulanan deprem yükünün yapıda oluşturduğu en büyük yerdeğiştirme 3.84 mm olarak elde edilmiştir(Şekil 5.31.). Z yönü doğrultusunda 5. Mod için uygulanan deprem yükünün yapıda oluşturduğu en büyük yerdeğiştirme 4.35 mm olarak elde edilmiştir(Şekil 5.32.).

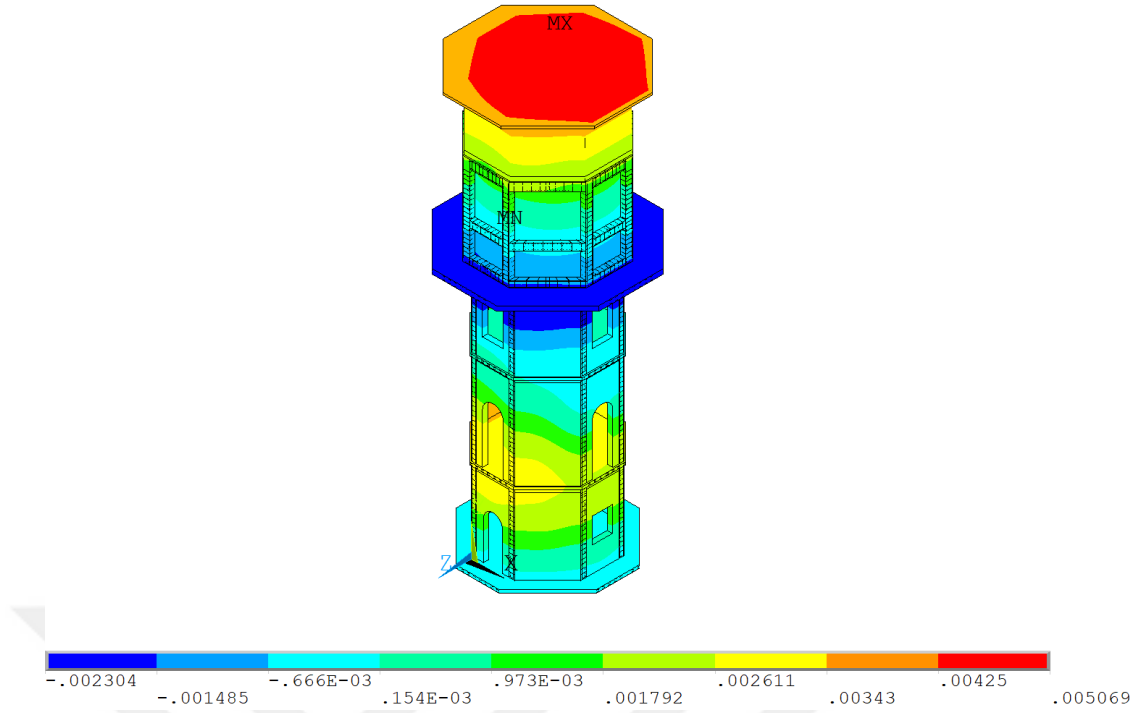


Şekil 5.31. 3. Mod için Z yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı

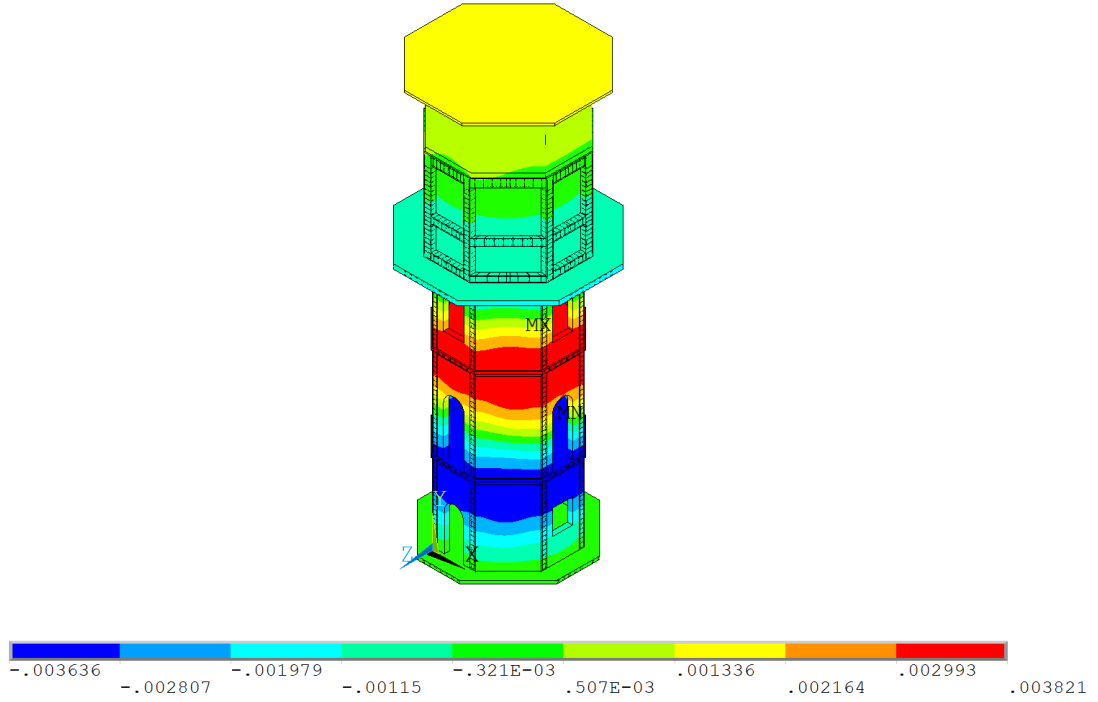


Şekil 5.32. 5. Mod için Z yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı

Z yönü doğrultusunda 7. Mod için uygulanan deprem yükünün yapıda oluşturduğu en büyük yerdeğiştirme 5.07 mm olarak elde edilmiştir(Şekil 5.33.). Z yönü doğrultusunda 12. Mod için uygulanan deprem yükünün yapıda oluşturduğu en büyük yerdeğiştirme 3.82 mm olarak elde edilmiştir(Şekil 5.34.).



Şekil 5.33. 7. Mod için Z yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı



Şekil 5.34. 12. Mod için Z yönündeki deprem yükü altında yerdeğiştirme dağılımı

Farklı modların yerdeğiştirmeleri Karelerin Karekökü Toplamı (SRSS) yöntemi kullanılarak birleştirildiğinde X yönündeki deprem yüklemesi sonucunda X yönündeki en büyük yerdeğiştirme 38.14 mm, Z yönündeki deprem yüklemesi sonucunda Z yönündeki en büyük yerdeğiştirme 38.23 mm olarak elde edilmiştir.

X yönü doğrultusunda uygulanan deprem etkisi altında meydana gelen toplam taban kesme kuvvetinin X doğrultusunda 3964.4 kN ve Z yönü doğrultusunda uygulanan deprem etkisi altında meydana gelen toplam taban kesme kuvvetinin, Z doğrultusunda 4171.9 kN olduğu görülmüştür.



6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında tarihi su deposunun başlangıç sonlu eleman modeli yapı üzerinde yapılan deneysel ölçümlere bağlı olarak güncellenmiştir. Güncellenen model kullanılarak yapının deprem performansı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

Tarihi su deposunun başlangıç sonlu eleman modeli ANSYS programı yardımıyla oluşturulmuştur. Başlangıç sonlu elemanlar modelinin modal analizi sonucunda ilk üç ötelenme modu için doğal frekans değerleri 2.51 Hz, 9.94 Hz ve 16.6 Hz olarak elde edilmiştir. Tarihi su deposunun deneysel modal parametrelerini belirlemek amacıyla titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. OMA yöntemi kullanılarak ilk üç ötelenme modu için doğal frekans değerleri 2.528 Hz, 10.836 Hz ve 16.895 Hz olarak elde edilmiştir.

Başlangıç sonlu elemanlar modelinden elde edilen analitik modal parametreler ile deneysel modal parametreler karşılaştırıldığında mod şekillerinin birbiriyle uyumlu olduğu ama doğal frekans değerleri arasında farklar olduğu görülmüştür. Bu farklar 1. ötelenme modu için % 0.71, 2. ötelenme modu için %8.27, 3. ötelenme modu için %1.75'dir. Bu farkların oluşmasındaki başlıca nedenler malzeme özelliklerindeki belirsizlikler, model oluştururken yapılan geometrik sadeleştirmeler ve yapıda mevcut olan hasarların sonlu eleman modelinde temsil edilememesi olduğu düşünülmektedir.

Doğal frekans değerleri arasındaki farkları azaltılmak amacıyla tarihi su deposunun sonlu eleman modelinin deneysel sonuçlara bağlı olarak güncellemesini gerçekleştirmek için kolonların, kirişlerin, döşemelerin, su deposunun, yığma duvarların ve ahşap çatının elastisite modülleri ve birim hacimleri güncelleme parametreleri olarak seçilmiştir. Bu parametreler için belirlenen alt ve üst sınır değerleri, başlangıç sonlu eleman modelinde kullanılan değerlerin %10 aşağısı ve %10 yukarıdaki değerler olarak belirlenmiştir. Ancak, yapılan duyarlılık analizleri sonucunda yığma duvarların birim hacim ağırlığının modeldeki etkisinin büyük olduğu ve bu nedenle güncelleme sürecinde bu parametrenin daha geniş bir aralıkta değerlendirilmesi gerektiği düşünülmüştür. Bu nedenle, yığma duvarların birim hacim ağırlığı için alt ve üst sınırlar, başlangıç sonlu eleman modelinde kullanılan değerlerin %16.67 aşağısı ve %16.67 yukarıdaki değerler olarak belirlenmiştir.

Güncellemeyi yapmak için TYY kullanılmıştır. Öncelikle, CCD yöntemi ile deneysel tasarım oluşturulmuştur. Bu tasarımda oluşturulan parametre kombinasyonları kullanılarak, sonlu eleman modelinde toplamda 151 analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen veriler ile genetik algoritma tekniği kullanılarak tepki yüzeyleri oluşturulmuştur. R^2 değerlerinin 1'e, RMSE değerlerinin 0'a yakın olduğu dolayısıyla oluşturulan tepki yüzeyi modellerinin doğruluğunun yüksek olduğu görülmüştür. Tepki yüzeylerinin optimizasyonu sonucunda belirlenen 10 aday parametre kombinasyonu arasından seçim yapmak için OMA yöntemiyle elde edilen doğal frekanslarla karşılaştırdığında, 1. aday parametre kombinasyonunun uygun olduğunu belirlenmiştir. Bu parametre kombinasyonu doğal frekans farklarını 1. ötelenme modu için % 0.04, 2. ötelenme modu için %4.78 ve 3. ötelenme modu için %0.68'e indirmiştir.

Güncellemede en büyük değişim yığma duvarların birim hacim ağırlığında (%15.4) görülmüştür. Ahşap çatının birim hacim ağırlığında (%0.8) çok az değişim görülmüştür. Yığma duvarların birim hacim ağırlığı için literatürdeki çalışmalara bağlı olarak belirlenen değer gerçek yapıyı doğru şekilde yansıtamamıştır. Güncelleme yapılmadan yapının deprem performansı belirlenseydi analiz sonuçları yanıltıcı olabileceği sonucuna varılmıştır.

OMA yönteminde yapının gerçek çalışma koşullarında modal parametrelerini belirlendiği için deneysel modal parametrelerin yapının gerçek dinamik davranışını doğru bir şekilde yansıttığı ve sonlu eleman model güncellenmesinde referans olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Bu tez çalışmasında TYY'nin tarihi yapıların sonlu eleman modelinin güncellenmesinde oldukça etkili bir yöntem olduğu görülmüştür. TYY'nin kullanılmasıyla güncellenecek parametrelerinin iteratif olarak değiştirilmesine ve her bir iterasyonda sonlu eleman modelinin yeniden analiz edilmesine gerek kalmamıştır. TYY'nin güncellenecek parametrelerin belirlenen aralıklarda değerlendirilmesini sağlaması farklı parametre değerlerinin modelin sonuçları üzerindeki etkilerini anlamaya, modelin parametre değişimlerine karşı hassasiyetini belirlemeye ve hangi parametrelerin sonuçları en çok etkilediğini öğrenmeye yardımcı olmuştur. Böylece güncelleme daha hızlı ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- Alpaslan, E., Yilmaz, M. F., ve Şengönül, B. D. (2023). Rating and reliability assessment of a historical masonry arch bridge. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 13, ss. 1003-1021.
- Altunışık, A. C., Günaydin, M., Atmaca, E. E., Genç, A. F., Okur, F. Y. ve Sevim, B. (2024). Experimental measurement-based fe model updating and seismic response of Santa Maria Church and its guesthouse building. *Journal Of Civil Structural Health Monitoring*, 14, ss. 663-692.
- ANSYS. (2013). Swanson Analysis System. Canonsburg, PA: Ansys Incorporation.
- Aras, F., Krstevska, L., Altay, G., ve Tashkov, L. (2011). Experimental and numerical modal analyses of a historical masonry palace. *Construction And Building Materials*, 25, ss. 81-91.
- Aydin, A. C. ve Özkaya, S. G. (2018). The finite element analysis of collapse loads of single-spanned historic masonry arch bridges (Ordu, Sarpdere Bridge). *Engineering Failure Analysis*, 84, ss. 131-138.
- Birinci, F. (2010). Taş kemer köprülerin sonlu eleman modellerinin operasyonel modal analiz yöntemiyle iyileştirilmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Brincker, R., Zhang, L., ve Andersen, P. (2000). Output-only modal analysis by frequency domain decomposition. In *Proceedings of the ISMA25 Noise and Vibration Engineering*, Leuven, Belgium.
- Capanna, I., Cirella, R., Aloisio, A., Alaggio, R., Di Fabio, F. ve Fragiaco, M. (2021). Operational modal analysis, model update and fragility curves estimation, through truncated incremental dynamic analysis, of a masonry belfry. *Buildings*, 11, 120.
- Costa, C., Arêde, A., Costa, A., Caetano, E., Cunha, Á., ve Magalhães, F. (2015). Updating numerical models of masonry arch bridges by operational modal analysis. *International Journal of Architectural Heritage*, 9, ss. 760-774.
- Çalık, İ., Demirtaş, B., Bayraktar, A., ve Türker, T. (2012). Yığma taş minarelerin analitik ve deneysel yöntemlerle güvenliğinin belirlenmesi: Trabzon muhittin camii minaresi örneği. *Vakıflar Dergisi*, 38, ss. 121-140.
- Douglas, B. M., ve Reid, W. H. (1982). Dynamic tests and system identification of bridges. *Journal of the Structural Division*, 108(10), ss. 2295-2312.
- Ercan, E. (2010). Tarihi yığma yapıların güvenliklerinin analitik ve deneysel yöntemlerle belirlenmesi. Ege Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- Fotia, D., Diaferio, M., Giannoccaro, N., ve Mongelli, M. (2012). Ambient vibration testing, dynamic identification and model updating of a historic tower. *NDT&E International*, 47, ss. 88-95.
- Ferrari, R., Froio, D., Rizzi, E., Gentile, C. ve Chatzi, E. N. (2019). Model updating of a historic concrete bridge by sensitivity and global optimization-based latin hypercube sampling. *Engineering Structures*, 179, ss. 139-160.
- Friswell, M. I. ve Mottershead, J. E. (1995). *Finite element model updating in structural dynamics*. Springer.
- Gara, F., Nicoletti, V., Arezzo, D., Cipriani, L., ve Leoni, G. (2023). Model updating of cultural heritage buildings through swarm intelligence algorithms. *International Journal of Architectural Heritage*, ss. 1-17.
- Gentile, C. ve Saisi, A. (2007). Ambient vibration testing of historic masonry towers for

- structural identification and damage assessment. *Construction And Building Materials*, 21, ss. 1311-1321.
- Gentile, C., Saisi, A., ve Cabboi, A. (2015), Structural identification of a masonry tower based on operational modal analysis, *International Journal of Architectural Heritage*, 9, ss. 98–110.
- Guo, Q., ve Zhang, L. (2004). Finite element model updating based on response surface methodology. In Proceedings of the 22nd international modal analysis conference.
- Hökelekli, E. (2015). Manisa Hafsa Sultan Camii deprem davranışının operasyonel modal analiz yöntemiyle incelenmesi. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Jacobsen, N. J., Andersen, P., ve Brincker, R. (2006). Using enhanced frequency domain decomposition as a robust technique to harmonic excitation in operational modal analysis. Proceedings of ISMA 2006: International Conference on Noise & Vibration Engineering, Leuven, Belgium.
- Karanikoloudis, G. ve Lourenço, P. B. (2018). Structural assessment and seismic vulnerability of earthen historic structures. application of sophisticated numerical and simple analytical models. *Engineering Structures*, 160, ss. 488-509.
- Lourenço, P. B. (1996). Computational strategies for masonry structures. Delft University Of Technology, The Netherlands.
- Marwala, T. (2010). *Finite-element-model updating using computational intelligence techniques: Applications to structural Dynamics*, Springer.
- Myers R. H., Montgomery D. C. ve Anderson-Cook C. M. (2009). *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiment*, Wiley & Sons.
- Rainieri, C. ve Fabbrocino, G. (2008). Operational modal analysis: overview and applications. *Strategies for Reduction of the Seismic Risk*, ss. 29-44.
- Ren, W. ve Chen, H. (2010). Finite element model updating in structural dynamics by using the response surface method. *Engineering Structures*, 32(8), ss. 2455-2465.
- Salachoris, G. P., Standoli, G., Betti, M., Milani, G. ve Clementi, F. (2024). Evolutionary numerical model for cultural heritage structures via genetic algorithms: a case study in central Italy. *Bulletin Of Earthquake Engineering*, 22, ss. 3591–3625
- Sesigür, H., Çelik, O.C., Çılı, F. (2007). Tarihi yapılarda taşıyıcı bileşenler, hasar biçimleri, onarım ve güçlendirme, *Yapı Dergisi*, 303, ss. 10-21
- Sevim, B. (2010). Kemer barajların dinamik davranışlarının sonlu eleman ve deneysel modal analiz yöntemleriyle belirlenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Shabani, A., Feyzabadi, M. ve Kioumarsi, M. (2022). Model updating of a masonry tower based on operational modal analysis: the role of soil-structure interaction. *Case Studies In Construction Materials*, 16.
- Shimpi, V., Sivasubramanian, M.V.R. ve Singh, S.B. (2019). System identification of heritage structures through AVT and OMA: A review. *Structural Durability & Health Monitoring*, 13, ss.1-40.
- Standoli, G., Salachoris, G. P., Masciotta, M. G. ve Clementi, F. (2021). Modal-based FE model updating via genetic algorithms: exploiting artificial intelligence to build realistic numerical models of historical structures. *Construction And Building Materials*, 303.
- Sunara, M., Banovi'c, İ., Buzov, A. ve Grgi', N. (2023). Structural identification of historic bell tower in Cuntić, Croatia using ambient vibration testing. *Applied Sciences*, 13.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2018). Türkiye bina deprem yönetmeliği, Ankara.

Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması.
<https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>

Torres, W., Almazán, J. L., Sandoval, C. ve Boroschek, R. (2017). Operational modal analysis and fe model updating of the Metropolitan Cathedral of Santiago, Chile. *Engineering Structures*, 143, ss. 169-188.

Vakıflar Genel Müdürlüğü (2017). Tarihi yapılar için deprem risklerinin yönetimi kılavuzu. Ankara.

Votsis, R.A., Kyriakides, N., Chrysostomou, C., Tantele, E., ve Demetriou. T. (2012). Ambient vibration testing of two masonry monuments in Cyprus. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 43, ss. 58-68.



ÖZGEÇMİŞ

Elif Yazıksız, Samsun Anadolu Lisesi'ni bitirdikten sonra Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2020 yılında mezun oldu. 2021 yılında Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda lisansüstü eğitime başladı.

İletişim Bilgileri

ORCID ID: 0009-0001-3140-8178

Yayınlar:

1. Yazıksız, E., ve Alpaslan, E.(2023). Tarihi Ayaklı Su Deposunun Deneysel ve Sayısal Yöntemlerle Modal Parametrelerinin Belirlenmesi. 12. Uluslararası Akademik Araştırmalar Kongresi (ICAR), Samsun,Türkiye.
2. Yazıksız, E., ve Alpaslan, E. (2024). Determination of the Modal Parameters of the Historical Elevated Water Tank Using Experimental and Numerical Methods. Civil Engineering Beyond Limits,2.