

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



FARKLI YÜKSEKLİKLERE SAHİP YIĞMA MİNARELERİN
SİSMİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Aysun GÖKÇEN YILDIZ

Yüksek Lisans Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mekanik Bilim Dalı

ŞUBAT 2024

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI YÜKSEKLİKLERE SAHİP YIĞMA MİNARELERİN SİSMİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Tez Yazarı

Aysun GÖKÇEN YILDIZ

Danışman

Prof. Dr. Erkut SAYIN

ŞUBAT 2024

ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: Farklı Yüksekliklere Sahip Yığma Minarelerin Sismik Performansının İncelenmesi

Yazarı: Aysun GÖKÇEN YILDIZ

İlk Teslim Tarihi: 12.01.2024

Savunma Tarihi: 13.02.2024

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Erkut SAYIN Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Dr. Öğr. Üyesi Senem YILMAZ ÇETİN Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Muhammet KARATON Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım ‘‘Farklı Yüksekliklere Sahip Yığıma Minarelerin Sismik Performansının İncelenmesi’’ Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

13.02.2024

Aysun GÖKÇEN YILDIZ



ÖNSÖZ

Yığma minarelerin deprem etkisi altındaki davranışlarını belirlemek amacıyla yapılmış çalışmalar, literatürde güncelliğini korumaktadır. İnşaat mühendisliğine ait diğer çalışmalara bakıldığında, literatürde bu konu üzerinde çok çalışma yapılmadığı görülmüştür. Yığma minarelerin deprem etkisi altındaki davranışlarının belirlenmesi, bu yapıların gelecek nesillere güvenle aktarılması açısından önemlidir. Yığma minarelerin üç boyutlu modellerinin oluşturulması ve bu modellerin sonlu elemanlara bölünmesi zor ve karmaşıktır. Oluşturulan modeller üzerinde zaman tanım alanında dinamik analizler yapılması, analiz süresini artırmaktadır. Bu çalışmada, analizlerin çıktılarına göre yığma minarede oluşan gerilme yığılmaları ve tepe deplasmanları araştırılmıştır.

Yüksek lisans tez danışmanlığımı yapan, tezimin her aşamasında payı olan, yardımlarını eksik etmeyen, Sayın Prof. Dr. Erkut SAYIN hocama çok teşekkür ederim. Hayatım boyunca yanımda olan, desteklerini benden esirgemeyen, aileme teşekkür ederim.

Aysun GÖKÇEN YILDIZ
ELAZIĞ, 2024

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR.....	3
3. YIĞMA YAPILAR VE YIĞMA MİNARELER	9
3.1. Yığma Yapılarda Taşıyıcı Elemanlar	9
3.1.1. Temeller	9
3.1.2. Duvarlar ve Payandalar	10
3.1.3. Sütunlar ve Ayaklar.....	11
3.1.4. Kemer	11
3.1.5. Tonozlar	12
3.1.6. Kubbelere.....	12
3.1.7. Döşemeler	13
3.2. Taşıyıcı Sistemine Göre Minareler	14
3.2.1. Karkas Taşıyıcı Sistemli Minareler	14
3.2.2. Yığma Taşıyıcı Sistemli Minareler	16
3.3. Yığma Minarelerin Yapım Aşamaları	17
3.4. Yığma Minarenin Bölümleri	19
3.4.1. Temel	20
3.4.2. Kürsü (Kaide).....	20
3.4.3. Geçiş Bölgesi (Pabuç, Küp, Yedisekiz)	21
3.4.4. Gövde	22
3.4.5. Şerefe	22
3.4.6. Petek.....	23
3.4.7. Kûlah	23
3.4.8. Alem.....	24
3.4.9. Merdivenler	25
3.5. Yığma Yapı Malzemeleri	25
3.5.1. Taş Malzeme	25
3.5.2. Ahşap Malzeme.....	26
3.5.3. Harç Malzeme	27
3.5.4. Tuğla Malzeme.....	28
3.5.5. Küfeki Taşı.....	28
3.5.6. Agrega	29
3.5.7. Katkılar.....	29
3.5.8. Metal Bağlantı Elemanları.....	29
3.6. Yığma Yapılarda Meydana Gelen Hasar Çeşitleri ve Nedenleri	29

3.6.1. Taşıyıcı Sistemin Tasarımından Kaynaklı Hasarlar	30
3.6.2. Döşemeler	30
3.6.3. Malzeme Seçiminden Kaynaklı Hasarlar	31
3.6.4. İşçilikten Kaynaklı Hasarlar	31
3.6.5. Doğadan Kaynaklı Hasarlar	32
4. MODELLEME TEKNİKLERİ	33
4.1.1. Yığma Minarenin Modellemesi ve İdealleştirmeleri	34
4.2. Makro Modelleme	34
4.3. Detaylı Mikro Modelleme	34
4.4. Basitleştirilmiş Mikro Modelleme	35
5. MATERYAL VE METOD	36
5.1. Yığma Minare.....	36
6. SAYISAL ÇALIŞMA.....	39
6.1. Yığma Minarelerin Statik Analizi	39
6.2. Yığma Minarelerin Modal Analizleri	42
6.3. Yığma Minarelerin Dinamik Analizleri.....	45
6.4. 30 m lik Yığma Minare için Dinamik Analiz Sonuçları (1999 Kocaeli Depremi)	47
6.5. 30 m lik Yığma Minare için Dinamik Analiz Sonuçları (2003 Bingöl Depremi).....	52
6.6. 30 m lik Yığma Minare için Dinamik Analiz Sonuçları (2011 Van Depremi).....	56
6.7. 35 m lik Yığma Minare için Dinamik Analiz Sonuçları (1999 Kocaeli Depremi)	61
6.8. 35 m lik Yığma Minare için Dinamik Analiz Sonuçları (2003 Bingöl Depremi).....	66
6.9. 35 m lik Yığma Minare için Dinamik Analiz Sonuçları (2011 Van Depremi).....	70
6.10.40 m lik Yığma Minare için Dinamik Analiz Sonuçları (1999 Kocaeli Depremi)	74
6.11.40 m lik Yığma Minare için Dinamik Analiz Sonuçları (2003 Bingöl Depremi).....	79
6.12.40 m lik Yığma Minare için Dinamik Analiz Sonuçları (2011 Van Depremi).....	84
7. SONUÇLAR.....	89
KAYNAKLAR.....	90
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Farklı Yüksekliklere Sahip Yığma Minarelerin Sismik Performansının İncelenmesi

Aysun GÖKÇEN YILDIZ

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat 2024, Sayfa: xiv + 92

Ülkemiz yığma yapı mimarisi, açısından oldukça zengin bir konumda bulunmaktadır. Yığma mimarilerin başında gelen yapılardan birisi, yığma minarelerdir. Yığma minareler, deprem açısından oldukça hassas yapılardır. Bu tezin amacı, yığma minarelerin, üç boyutlu sonlu elemanlar modelini oluşturmak, oluşturulan modellerin zaman tanım alanında dinamik analizleri ile elde edilen sonuçlar sayesinde, yığma minarelerin deprem altındaki davranışlarını daha gerçekçi ve güvenilir sonuçlarla tahmin edebilmektir. Analizler için 30 m, 35 m ve 40 m yüksekliğe ve aynı kesit özelliklerine sahip 3 yığma minare SAP2000 programı ile üç boyutlu olarak modellenmiştir. Minarelerin dinamik karakteristikleri modal analiz yöntemi ile belirlenmiştir. Daha sonra minarelerin sismik değerlendirilmesi amacıyla zaman tanım alanında dinamik analiz yöntemi kullanılmıştır. Dinamik analizler için 1999 Kocaeli, 2003 Bingöl ve 2011 Van depremlerinin ivme kayıtları dikkate alınmıştır. Analizler neticesinde yer değiştirme ve gerilme değerleri elde edilerek yığma minarelerin sismik tepkileri, yüksekliğe bağlı olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elemanlar yöntemi, Yığma minare, Deprem, Dinamik analiz.

ABSTRACT

Investigation of Seismic Performance of Masonry Minarets with Different Heights

Aysun GÖKÇEN YILDIZ

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

February 2024, Pages: xiv + 92

The masonry architecture in the region has a very rich distribution of perspectives. One of the most prominent structures in masonry architecture is masonry minarets. Masonry minarets are vulnerable structure in terms of earthquakes. The aim of this thesis is to create three-dimensional finite elements of masonry minarets and to evaluate earthquake behaviour of the minarets with time-history analysis. For the analysis, three masonry minarets, 30 m, 35 m and 40 m high and with the same cross-sectional features, were modeled in three dimensions with the SAP2000 program. The dynamic properties of the minarets were determined by the modal analysis method. For the dynamic analysis, time history analyses were used for the seismic evaluation of the minarets. For this purpose, the accelerations of the 1999 Kocaeli, 2003 Bingöl and 2011 Van earthquakes were considered. As a result of the analyses, displacement and stress values were obtained and the seismic responses of the masonry minarets were evaluated depending on the height.

Keywords: Finite element method , Masonry minaret, Earthquake, Dynamic analysis.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1.	Şahmerdan ile kazık çakımı, ahşap ızgara sistemi [43] 10
Şekil 3.2.	Farklı tipte inşa edilmiş yığma duvarlar [43]..... 10
Şekil 3.3.	Nur-u Osmaniye Cami avlu sütunları ve II. Bayezid Camii ayakları [46]..... 11
Şekil 3.4.	(a) Şenyuva Köprüsü (b) I. Mahmut su kemeri [46]..... 12
Şekil 3.5.	Tonoz çeşitleri [17]..... 12
Şekil 3.6.	Kubbede meydana gelen basınç ve çekme gerilmeleri [46]..... 13
Şekil 3.7.	Volta döşeme detayı [19]..... 13
Şekil 3.8.	Taşıyıcı sistemine göre minareler [1]..... 14
Şekil 3.9.	Karkas minare örnekleri (a) betonarme (b) çelik (c) ahşap [1] 15
Şekil 3.10.	Yığma taşıyıcı sistemli minare..... 16
Şekil 3.11.	Minarede oluşturulan kurun yapım aşamaları [1] 18
Şekil 3.12.	Yığma minarenin bölümleri [9] 19
Şekil 3.13.	Yığma minarenin ampatmanlı temeli [8]..... 20
Şekil 3.14.	Kaide örnekleri [9]..... 21
Şekil 3.15.	Pabuç örnekleri [27]..... 21
Şekil 3.16.	Gövde ve havalandırma boşluğu [27] 22
Şekil 3.17.	Şerefe örnekleri [27] 23
Şekil 3.18.	Petek iç ve dış bölümü [9] 23
Şekil 3.19.	Külâh örnekleri [27]..... 24
Şekil 3.20.	Alem örnekleri [27] 24
Şekil 3.21.	Merdiven örnekleri [27]..... 25
Şekil 3.22.	Oturma şekilleri ve yapıda oluşturduğu çatlaklar [14]..... 30
Şekil 3.23.	Harçta oluşan çatlaklar [14]..... 31
Şekil 3.24.	Yığma duvarın şişmesi ve duvarda oluşan yığma taşıyıcı eleman deformasyonu [14]..... 31
Şekil 4.1.	Yığma minare malzemesinin homojen duruma getirilmesi [27]..... 33
Şekil 4.2.	Makro modelleme [27] 34
Şekil 4.3.	Yığma yapıların modellenmesi, a) Yığma yapı, b) Detaylı mikro modelleme [27]..... 35
Şekil 4.4.	Yığma yapıların modellenmesi, a) Yığma yapı, b) Basitleştirilmiş mikro modelleme [27] 35
Şekil 5.1.	Yığma minarelerin geometrik özellikleri ve kesitleri 36
Şekil 5.2.	30 m'lik yığma minarenin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli, çekirdek kısmı ve merdivenler 38

Şekil 6.1.	Farklı yüksekliklere sahip yığma minarelerin ölü yükler altında şekil değiştirmiş üç boyutlu görüntüsü	39
Şekil 6.2.	Statik analiz sonucunda 30 m'lik yığma minarede meydana gelen gerilme kontur diyagramları (kPa)	40
Şekil 6.3.	Statik analiz sonucunda 35 m'lik yığma minarede meydana gelen gerilme kontur diyagramları (kPa)	41
Şekil 6.4.	Statik analiz sonucunda 40 m'lik yığma minarede meydana gelen gerilme kontur diyagramları (kPa)	42
Şekil 6.5.	30 m lik yığma minarenin mod şekilleri ve frekans değerleri.....	44
Şekil 6.6.	35 m lik yığma minarenin mod şekilleri ve frekans değerleri.....	44
Şekil 6.7.	40 m lik yığma minarenin mod şekilleri ve frekans değerleri.....	45
Şekil 6.8.	1999 Kocaeli depremi ivme grafikleri	46
Şekil 6.9.	2003 Bingöl depremi ivme grafikleri.....	46
Şekil 6.10.	2011 Van depremi ivme grafikleri	46
Şekil 6.11.	30 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için 434 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği.....	47
Şekil 6.12.	30 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa) .	48
Şekil 6.13.	30 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa) .	49
Şekil 6.14.	30 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)..	49
Şekil 6.15.	30 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)..	50
Şekil 6.16.	30 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)..	51
Şekil 6.17.	30 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa) ..	51
Şekil 6.18.	30 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için 434 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği.....	52
Şekil 6.19.	30 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)...	53
Şekil 6.20.	30 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)...	54
Şekil 6.21.	30 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa) ..	54
Şekil 6.22.	30 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa) ...	55
Şekil 6.23.	30 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa) ...	55
Şekil 6.24.	30 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)....	56
Şekil 6.25.	30 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için 434 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği.....	57
Şekil 6.26.	30 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)	57
Şekil 6.27.	30 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)	58
Şekil 6.28.	30 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)	58
Şekil 6.29.	30 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa).....	59

Şekil 6.30.	30 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa).....	59
Şekil 6.31.	30 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa).....	60
Şekil 6.32.	35 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için 1451 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği.....	61
Şekil 6.33.	35 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa) ..	62
Şekil 6.34.	35 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa) ..	63
Şekil 6.35.	35 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)..	63
Şekil 6.36.	35 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)..	64
Şekil 6.37.	35 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)..	65
Şekil 6.38.	35 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa) ..	65
Şekil 6.39.	35 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için 1451 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği.....	66
Şekil 6.40.	35 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)...	67
Şekil 6.41.	35 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)...	67
Şekil 6.42.	35 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa) ..	68
Şekil 6.43.	35 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa) ...	68
Şekil 6.44.	35 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa) ...	69
Şekil 6.45.	35 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)....	69
Şekil 6.46.	35 m lik minarede 2003 Van depremi için 1451 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği.....	70
Şekil 6.47.	35 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa).....	71
Şekil 6.48.	35 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa).....	71
Şekil 6.49.	35 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)	72
Şekil 6.50.	35 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa).....	72
Şekil 6.51.	35 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa).....	73
Şekil 6.52.	35 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa).....	73
Şekil 6.53.	40 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için 8672 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği.....	75
Şekil 6.54.	40 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)	75
Şekil 6.55.	40 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa) ..	76
Şekil 6.56.	40 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)..	76
Şekil 6.57.	40 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)..	77
Şekil 6.58.	40 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)..	78
Şekil 6.59.	40 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa) ..	78

Şekil 6.60.	40 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için 8672 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği.....	79
Şekil 6.61.	40 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)...	80
Şekil 6.62.	40 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)...	81
Şekil 6.63.	40 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa) ..	81
Şekil 6.64.	40 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa) ...	82
Şekil 6.65.	40 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa) ...	83
Şekil 6.66.	40 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)....	83
Şekil 6.67.	40 m lik minarede 2003 Van depremi için 8672 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği.....	84
Şekil 6.68.	40 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)	85
Şekil 6.69.	40 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)	85
Şekil 6.70.	40 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)	86
Şekil 6.71.	40 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa).....	86
Şekil 6.72.	40 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa).....	87
Şekil 6.73.	40 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)	87

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Kesme taş taşıyıcı duvarların karakteristik basınç dayanımı, f_k (MPa) [47]	26
Tablo 3.2. Farklı taşların mekanik özellikleri [47].....	26
Tablo 3.3. Ahşap malzemelerin TS 647'ye göre malzeme özellikleri [49].....	27
Tablo 3.4. Masif ahşap malzemenin emniyet gerilmeleri [49].....	27
Tablo 3.5. İstanbul'da yer alan bazı tarihi yapılardaki harçlara ait basınç dayanımları [50]	28
Tablo 3.6. Tuğla malzemenin ortalama mekanik özellikleri [4]	28
Tablo 3.7. Küfeki taşı özellikleri [18].....	28
Tablo 5.1. Yığma minare için dikkate alınan malzeme özellikleri.....	37
Tablo 6.1. Serbest titreşim periyotları ve kütle katılım oranları (30 m lik minare).....	42
Tablo 6.2. Serbest titreşim periyotları ve kütle katılım oranları (35 m lik minare).....	43
Tablo 6.3. Serbest titreşim periyotları ve kütle katılım oranları (40 m lik minare).....	43
Tablo 6.4. 30 m uzunluğa sahip yığma minarenin dinamik analiz sonuçları	60
Tablo 6.5. 35 m uzunluğa sahip yığma minarenin dinamik analiz sonuçları	74
Tablo 6.6. 40 m uzunluğa sahip yığma minarenin dinamik analiz sonuçları	88

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

f_b	: Kargir birim basınç dayanımı
f_m	: Harç birim basınç dayanımı
f_k	: Kesme taş taşıyıcı duvarların karakteristik basınç dayanımı
f_k	: Kesme taş taşıyıcı duvarların karakteristik basınç dayanımı
g	: İvme
σ	: Gerilme
DD-2	: 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi

Kısaltmalar

HHT	: Hilber Hughes Taylor
-----	------------------------



1. GİRİŞ

Ülkemizde geçmişten günümüze gelen pek çok yığma yapı bulunmaktadır. Geçmişten günümüze kadar ulaşan, günümüzde yenisi yapılan yığma yapıların tasarımı oldukça önemlidir. Yığma yapı tasarımları insanların kullanım amacına göre çeşitlilik göstermiştir. Genel olarak yığma yapılar barınma amaçlı kullanılmış ise de kemer, kale, cami, minare vb. yapılarda yığma yapı olarak yapılmıştır. Ülkemizin bölgelerinin birbirinden farklı oluşu yığma yapılarda kullanılan malzeme (taş, kerpiç vb.) üzerinde etkili olmuştur. Günümüzde daha çok betonarme sistemli minareler yapılsa da yığma minarelerde yapılmaktadır. Yığma yapının en büyük avantajı, ham madde olarak ülkemizde çeşitli alternatiflerin bulunması ve inşaat açısından çok fazla teknik bilgi gerektirmemesinden dolayı kolay ve ekonomik olmasıdır. Tarihi yığma yapıların korunması ülkemizdeki çeşitli kültürlerle sahip çıkılması demektir. Bu tür yığma yapılar ülkemizin tarihsel ve mimari özellikleri açısından, geçmişten günümüze kalan temsilcileri olduğundan, oldukça önemli yapılardır.

Geçmişte yığma duvarlar, büyük kaba yontulmuş taşların birbiri üzerine herhangi bir bağlayıcı olmadan basit yöntemlerle inşa edilmiştir. Zamanla teknolojinin gelişmesiyle bağlayıcı kullanılmaya başlanılmışsa da yığma yapılardaki malzemenin dayanım özelliklerinin güvenilirliğinin düşük olması, yığma yapılarda ki mevcut çatlaklar, yarıklar ve doğal afetlerin özellikle sismik olayların yaptığı etkilerin belirsiz oluşu, yığma yapılarda analiz sonuçlarını ciddi şekilde etkilemektedir. Ülkemiz de aktif deprem kuşakları bulunduğu için, sismik yüklemeleri taşıyabilecek yığma minare tasarımı önemlidir. Ancak yığma minarelerin tasarımında belli bir standart olmadığı için sismik yüklemelere dayanan bir sistem tasarımı zorlaşmaktadır [1]. Şu an ise geçmişte kullanılan teknikler yerine günümüzde daha da gelişen teknolojinin yardımıyla daha dayanıklı ve uzun ömürlü yığma yapı inşası mümkün olmuştur. Ancak genel olarak yığma yapının yapısal bir malzeme olarak sınırlı uygulanması ve ayrıca yığma yapının karmaşık davranışı nedeniyle, beton ve çelik gibi diğer malzemelerle karşılaştırıldığında donatısız duvar kullanımını azalmıştır. Hem yığma binalara hem de günümüzde popüler olan betonarme binalara aynı bilimsel yöntemlerle, (malzeme mukavemeti, deprem mühendisliği vb.) yaklaşılır. Her iki durumda da sorumlu mühendis öncelikle yapıları aşırı hasar görmeden, güvenli bir şekilde taşıyabileceği yüklerle dayanması için tasarlanmaktadır.

Kullanılan malzemenin parametreleri ve yığma yapının parametreleri sistemin doğru bir şekilde hesaplanması için oldukça önemlidir. Tasarımlar yapılırken çoğu zaman zemin rijit kabul edilerek çözümlenmeler yapılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, yığma yapının sismik performans analizi yapılmaktadır. Yapılan analizler yığma yapının insan hayatının korunması için bir yapının aldığı yüklerle dayanımıyla doğrudan bağlantılıdır. Ancak bu görevin yerine

getirilebilmesi için yığma yapı da kullanılan malzemenin, tekniklerin, mekaniğinin ve modellemelerin yükler altında davranışını ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, analizler için 30 m, 35 m, 40 m yüksekliğe sahip, kesit özellikleri aynı olan 3 yığma minarenin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar modeli ve analizler için SAP2000 programı kullanılmıştır. Oluşturulan modellerin malzeme özellikleri literatürden alınmıştır. Oluşturulan modellere farklı deprem yüklemeleri (1999 Kocaeli, 2003 Bingöl ve 2011 Van) yapılarak zaman tanım alanında analizleri yapılmıştır. Analizler neticesinde yığma minarelerin, farklı deprem yüklemeleri altında, yüksekliklerine göre elde edilen deplasman ve gerilme değerleri karşılaştırılmıştır.

Tez çalışması 6 bölümden meydana gelmektedir.

- Bölüm 1’de, tez çalışmasının giriş bölümü olup tezin konusu, amacı ve içeriği hakkında genel bilgiler verilmiştir.
- Bölüm 2’de, yığma minareler ve yapılarla ilgili daha önce yapılan çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.
- Bölüm 3’te, yığma yapılar ve yığma minareler ile ilgili bilgiler verilmiştir.
- Bölüm 4’te, yığma yapıların modelleme teknikleri hakkında bilgiler verilmiştir.
- Bölüm 5’te, SAP2000 programı ile elde edilen nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır.
- Bölüm 6’da tez çalışmaları neticesinde elde edilen genel sonuçlar ve öneriler verilmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalar için tavsiyelerde bulunulmuştur.

2. LİTERATÜR

Yığma minareler geçmişten beri ülkemizde mevcut olan yapılardır. Öneminin fazla oluşu bu yapıların kültürümüz açısından değerli olmasından kaynaklanmaktadır. Kültürümüzü yansıtan bu yapıların gelecek nesillere aktarılması oldukça önemlidir. Bunlardan dolayı yığma minareler, önemli bir çalışma konusu olmuştur. Literatüre bakıldığında çalışmaların çeşitli olduğu görülmektedir. Yığma minare ve yapılar ile ilgili yapılmış olan çalışmalar bu bölümde kısaca özetlenmiştir.

Çakmak vd. (1995), Ayasofya'nın dinamik davranışı ve deprem tepkisinin disiplinler arası incelenmesini yapmışlardır. Zemin-yapı etkileşiminin modellenmesini desteklemek amacıyla ön tomografi deneyleri yapılmıştır [2].

Oğuzmert (2002), SAP2000 programı kullanılarak yığma yapı modelleri oluşturmuştur. Oluşturduğu modellerde elemanları kabuk eleman olarak modellemiştir. Oluşturulan modellerin, Marmara bölgesinde meydana gelen tarihi depremler etkisi altındaki, analiz verilerini karşılaştırmıştır [3].

Dabanlı (2008), Hırka-i Şerif Camii detaylı olarak araştırmıştır. Caminin üç boyutlu sonlu eleman modelini oluşturmuştur. Oluşturduğu modele statik ve dinamik analizler yaparak, yapının güvenliği ve deprem performansını incelemiştir [4].

Ertek (2009), Osmanlı zamanında inşası yapılmış minarelerde kullanılan malzemeleri araştırmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellemeler yapmıştır. Modellemeler ile ilgili analizler yapmıştır. Analizler neticesinde kullanılan malzemelerin, minarenin dinamik performansına etkisini araştırmıştır [5].

Karabörk (2009), yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak yapıların doğrusal olmayan 3 boyutlu dinamik analizini gerçekleştirmiştir. Bu amaçla, aynı plan ve rijitliğe sahip 3, 6, 10 katlı yapı modelleri oluşturulmuş ve SAP2000 programı yardımıyla analizleri yapılmıştır [6].

Teomete ve Aktaş (2010), İzmir tarihi Komanlı Cami'nin yapısal analizi ve değerlendirilmesini yapmışlardır. Taş, tuğla ve harç üzerinde tahribatsız malzeme testleri yapılmış. 3 boyutlu sonlu eleman modeli ile yapının kendi ağırlığı, sismik yükü ve oturma yükü altındaki konumları araştırılmıştır [7].

Kuşüzümü (2010), cami minarelerinin ortaya çıktığı, değişim ve gelişim süreçlerini anlatmıştır. Minarelerle ilgili kapsamlı bir literatür taraması yapmıştır. Minarelerin yapım ve restorasyon teknikleri hakkında bilgiler vermiştir. İstanbul'da mimari miraslarından olan cami minarelerinin yapım teknolojilerinin ve bezeme tekniklerinin kavranarak, bu eserlerin gelecek nesillere aktarımının sağlanabilmesi ve doğru restorasyon işlemlerinin yapılabilmesi için, öneriler yapmıştır [8].

Baştürk (2013), seçilen minarelerin geometrik özellikleri, malzeme özellikleri ve yapım teknikleri hakkında bilgi vermiştir. Deneysel modal analiz yöntemlerinden birisi olan çevresel titreşim testleri yapmış, minarelere ait frekanslar ve mod şekillerini elde etmiştir. Minarelerin sayısal modellerini oluşturmuş, malzeme özelliklerinde ve mesnetlenme koşullarında kalibrasyon yapılarak sonlu eleman analizinden elde edilen sonuçlarla deneysel yaklaşımla elde edilen sonuçların karşılaştırılmasını yapmıştır [9].

Çakır vd. (2014), yığma tarihi bir caminin deneysel testler ve sonlu elemanlar analizleri ile sismik değerlendirmesini yapmışlardır. Erzurum’da bulunan Lala Paşa Camii değerlendirilmiştir. Çalışma iki kısımdan oluşmuştur. İlkinde malzemenin özellikleri tespit edilmiş, ikinci adımda ise caminin 3 boyutlu sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Modelin yapısal tepkileri analizlerle incelenmiştir [10].

Saygılı (2014), ayırık elemanlar yöntemi kullanılarak, yığma yapı modelleri oluşturmuştur. Oluşturulan modellere dinamik analizler yapmıştır. Ayırık eleman yöntemini kullanarak oluşturduğu model ile üç farklı durumun olduğu üç nümerik model sarsma tablası üzerinde, deprem yüklemesi yapılarak incelemiştir. Gerçek ve simüle edilmiş deprem hareketleri altında oluşan, deplasmanları ve sistemin enerji dengesini incelemiştir [11].

Denghanian (2015), kuvvetli yer hareketi zaman geçmişlerinin seçimine yönelik temel metodolojiler ve kriterler tartışmış ve özetlemiş, ayrıca bazı ölçekli kayıtlar, günümüz betonarme minareleri için Türk mevzuatıyla karşılaştırma amacıyla kullanmıştır [12].

Akbulut Taş (2015), seçilen yüksek betonarme bir minare ile bu minarenin ayarlı kütle sönümleyicisi (AKS) konumlandırılmış halinin, Rita kasırgasından elde edilen rüzgâr kuvvetleri, harmonik hareket ve seçilen deprem hareketleri etkisi altındaki dinamik davranışlarını incelemiştir [13].

Serhatoğlu (2015), Bursa ilindeki minarelerin dinamik parametrelerini belirlemiştir. Osmanlı Minarelerinin doğal titreşim periyodları için ampirik bir formülün temeli oluşturulmuştur. Bazı minarelerin deprem etkisi altındaki davranışları karşılaştırmıştır. Analizler sonucunda, ampirik formül geliştirilerek, ülkemizde uygulanabilecek, zamandan tasarruf sağlayan bir yöntem geliştirmeyi planlamıştır [1].

Tetik (2015), tarihi yığma yapıların eleman ve malzeme özelliklerini incelemiştir. Tarihi yığma yapılara uygulanabilen güçlendirme tekniklerini araştırmıştır. Yapı modelleri oluşturmuş ve model üzerinde statik ve dinamik analizleri uygulamıştır. Analizler sonucunda ise yığma yapının zayıf kısımları belirlenerek güçlendirme önerisi yapmıştır [14].

Lu (2016), çalışmasında performans dayalı tasarımda sismik zemin-yapı etkileşimini araştırmıştır. Analiz için sonlu fark sayısal modeli kullanılarak doğrulanmıştır [15].

Güllü ve Karabekmez (2017), fay hattına yakın ve uzak depremlerin 3 boyutlu dinamik zemin-yapı etkileşim yoluyla tarihi bir yığma camiye etkisini incelemiştir. Çalışmada

Gaziantep'te bulunan Kurtuluş Cami'si ele alınmıştır. Cami ve alt yapı zeminin 3 boyutlu sonlu eleman modellemesi katı elemanlarla inşa edilmiş ve ardından caminin sismik tepkileri zaman tanım alanı analizi ile değerlendirilmiştir [16].

Erdoğan vd. (2017), tarihi bir yığma minarenin sismik davranışının çevredeki yapılarla etkileşimini araştırmışlardır. Bu amaçla Sultan Ahmet Cami'nin minaresinin sismik davranışlarını incelemişlerdir. Çalışma esnasında sonlu/ayrık bir model geliştirilerek sismik analiz gerçekleştirilmiştir [17].

Calp (2018), Mimar Sinan tarafından inşa edilmiş camilere ait minarelerin sonlu elamanlar yöntemi ile SAP2000 programı kullanılarak dinamik analizlerini yapmıştır. Oluşturulan minarelere deprem yüklemesi yapılarak incelemiştir. Analizler neticesinde, çalışmasında minarelerde deprem etkisiyle oluşan riskleri değerlendirmiştir [18].

Erdoğan (2018), Türklerin yaptığı farklı dönemlere ait minarelerden yedi örnek seçmiştir. Seçtiği minarelerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizlerini yapmıştır. 1999 Kocaeli deprem ivme kayıtları kullanılarak zaman tanım alanında analizler yapmıştır. Analizler neticesinde, tarihi süreçte minarelerin malzeme, form ve yapım sistemi bakımından farklılıklarının deprem performansları üzerindeki etkisini incelemiştir [19].

Eren ve Beyen (2018), zemin davranışı ve mesnet koşullarının tarihi yapıların dinamik davranışına etkilerini araştırmıştır. Çalışmada, Fatih Külliyesi içinde bulunan Fatih Sultan Mehmet Han'ın kabrinin bulunduğu türbe incelenmiştir. Farklı enerji ve frekans içerikleri olan deprem kayıtları ile analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen modal bilgiler, elemanlarda oluşan iç kuvvetler, deplasmanlar karşılaştırılmıştır [20].

Bayraktar ve Hökelekli (2018), tarihi kâgir dikdörtgen minarelerin sismik hasar yayılımlarında düşey kuvvetli yer hareketlerini incelemişlerdir. Bu amaçla Diyarbakır'da bulunan Ulu Camii tercih edilmiştir. Minarenin sonlu elemanlar modeli, model analiz sonuçları ve ölçüm sonuçları kullanılarak geliştirilen ampirik frekans formülasyonu revize edilmiştir [21].

Tuna (2019), geçici ahşap destek iskelesinin tarihi bir minarenin deprem performansına etkilerini bilgisayar yardımıyla araştırmıştır. Geçici iskele, yığma minarenin yatay deplasmanlarını kısıtlamış ancak iskele ile minarenin birleştiği noktalar da fazladan yatay yüklemelerin oluştuğunu tespit etmiştir. Bu oluşan yatay deplasmanların minarenin deprem performansını etkilediğini söylemiştir [22].

Çelik (2019), Antalya Yivli Minare'nin depreme etkisi altındaki davranışını araştırmıştır. Yapılan analizler neticesinde, oluşan çekme gerilmelerin bazı bölgelerde sınırları aştığını gözlemlemiştir. Oluşan çekme gerilmelerinin karşılanması için belirtilen bölgelerde restorasyon yapılmasını tavsiye etmiştir [23].

Oğuzhanoglu (2019), tek şerefeli 19 m, iki şerefeli 28 m ve üç şerefeli 37 m yükseklikleri olan betonarme minare modelleri oluşturmuştur. Oluşturulan modellere, time history analizi ve pushover analizi uygulayarak, oluşan deformasyonları karşılaştırmıştır [24].

Altun (2019), yapmış olduğu çalışmada 2017-2018 deprem yönetmelikleri ışığında betonarme minarelerin zemin-yapı etkileşimini incelemiştir. Bu amaçla, betonarme minarelerin yapısal çözümlenmelerini Sta4Cad paket programı ile incelemiştir. Yapı-analiz yöntemi ile lineer analiz gerçekleştirmiş, zemin-yapı etkileşiminin maksimum yer değiştirmelerini ve düzlem gerilme değerlerinin nasıl etkilediğini araştırmıştır [25].

Çelik (2019), Yivli Minarenin depreme karşı dayanıklılığını araştırmıştır. Minarenin dinamik parametrelerini belirlemek amacıyla yapıya ivme-ölçer yerleştirilmiştir. Minarenin 3 Boyutlu modeli SOLIDWORKS programı ile oluşturulmuş, analizleri ise ANSYS Workbench programı ile analiz edilmiştir [26].

Altıok (2019), Manisa ilimizde bulunan Lala Mehmet Paşa ve İbrahim Çelebi camilerine ait yığma minarelerin, doğrusal ve doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizlerini yapmıştır. Analizler ile elde edilen veriler karşılaştırılmış, minarelerin deprem davranışlarını incelemiştir [27].

Akmaz Bilgiç (2020), Diyarbakır Hoca Ahmed Camii'nin Diyarbakır Suriçi'nde yer alan benzer yapılarla karşılaştırılmasını yapmıştır. Elde edilen verilerin ve yapı bilgilerinin yardımı ile yapının özgün mimari yapısı ile yapıda meydana gelen değişimlerin tespitini yapmıştır. Yapının korunması için sosyal ve mimari açıdan önerilerde bulunmuştur [28].

Oyguç (2020), yapmış olduğu çalışmada 24 Ocak 2020 Elazığ depreminde hasar gören yapıların sismik davranışlarını incelemiştir. Bu amaçla deprem sonrası bölgedeki yapı stoğu detaylı olarak incelenmiştir. Betonarme ve yığma minareler için yapım tekniklerine ait bir yönetmelik bulunmadığından ötürü uygulama esnasında çeşitli yanlışların ortaya çıktığı düşünülmektedir [29].

Hökelekli (2020), çalışmasında yapı-zemin etkileşiminin tarihi yığma minarelerin deprem davranışına etkilerini araştırmıştır. Çalışma kapsamında tarihi yığma minarenin esnek ve ankastre mesnetleme durumları için deprem davranışlarını araştırmıştır. Bu amaçla 3 boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve deney sonuçlarına göre kalibre edilmiştir [30].

Bayraktar vd. (2020), deprem girdi modellerinin minare-temel-zemin etkileşimini sistemlerin doğrusal olmayan sismik performanslarına etkilerini incelemiştir. Çalışmada, 3 boyutlu modellerde, zemin ve temel arayüzleri arasındaki bağ şeması ve zemin alanı için sonsuz elemanlar kullanılmıştır [31].

Hökelekli vd. (2020), tarihi yığma minarede doğrusal ve doğrusal olmayan sismik analizlerle sismik değerlendirme yapmışlardır. Bu çalışmada, uygulama olarak tarihi Alaca Minaresinin sonlu elemanlar modelleri ile hasar modeli incelenmiştir. Operasyonel Model Analiz yöntemi de kalibre edilerek kullanılmıştır [32].

Duman (2020), yüksekliğin ve şerefe sayısının yığma minarelerin dinamik davranışları üzerindeki etkilerini teorik olarak incelemiştir. Farklı yüksekliklere ve farklı şerefe sayılarına sahip minareler sonlu elemanlar yöntemine dayalı olan ANSYS Workbench yazılımı yardımıyla modellenmiştir. Yükseklikleri ve şerefe sayıları birbirinden farklı olan bu yığma minarelerin serbest titreşim ve spektrum analizleri yapılarak dinamik davranışlarını incelemiştir [33].

Durgut (2021), Hocaalızade Cami Minaresinin yedi farklı deprem kaydı altında doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri yapılarak modelin yapısal davranışını incelemiştir. Analizlerden elde edilen veriler neticesinde sınır şartları üzerinde, maksimum değerlerin olduğu bölgeler, kalıcı hasarların olduğu bölgeler hakkında bilgiler vermiştir [34].

Günay (2021), Bitlis'te bulunan beş minare hakkında detaylı bilgiler vermiştir. Günümüzdeki minarelerin durumunu gözleme dayalı bir şekilde göstermiştir. Bitlis için çok büyük değerlere sahip olan bu minarelerin bir sonraki nesillere güvenli olarak aktarılması tarihsel ve kültürel mirasın korunması adına çok önemli olduğundan bahsetmiştir [35].

Türker vd. (2021), tarihi eğik minarenin yakın ve uzak fay hareketleri altındaki sismik davranışları incelemiştir. Aksaray ve Sivas illerinde bulunan eğik minareler sayısal uygulama olarak seçilmiştir. Minarelerin 3 boyutlu sonlu eleman modelleri SAP2000 yazılımı ile oluşturulmuş ve sayısal dinamik karakteristikleri sayısal olarak tespit edilmiştir [36].

Altunışık vd. (2021), tarihi camilerin deprem sonrası hasar tespitleri ve fay yer hareketlerinin sismik tepkilerde etkisini araştırmışlardır. Van ilinde bulunan Hüsrev Paşa ve Kaya Çelebi camileri incelenmiştir. Camilerin deprem sonrası performansları ve hasar durumları için lineer zaman tanım alanı analizleri kullanılarak değerlendirilmeler yapılmıştır [37].

Maraş vd. (2022), tarihi Sütlü Minare Cami'nin sismik değerlendirilmesini yapmışlardır. Caminin üç boyutlu modeli ANSYS yazılımı ile yapılmış ve malzemelerin özellikleri deneysel olarak test edilmiştir. Yığma caminin sismik davranışını belirlemek amacıyla zaman tanım alanında analizler kullanılmıştır [38].

Yanık vd. (2022), tarihi yığma minarelerde çevresel ve zamana bağlı etkileri incelemiştir. Trabzon ilinde yer alan Tabakhane ve Hacı Kasım Muhittin Camii minarelerinin dinamik karakteristikleri deneysel olarak elde edilip karşılaştırılmıştır. Veriler CEVA ve ARTEMİS programları ile analiz edilmiştir [39].

Sekin Eronat (2022), tarihi yapıların önemli bir parçalarından birini incelemiştir. Sayısal uygulama için yığma malzeme ile Elazığ il merkezinde inşa edildiği düşünülen yığma bir minare örneği dikkate almıştır. Minare üç boyutlu olarak ANSYS sonlu eleman programı kullanılarak modellenmiş ve modellemede makro modelleme yöntemini seçmiştir. Minarenin ilk olarak kendi ağırlığı altında statik analizi yapmış daha sonra dinamik karakteristikleri elde etmek için modal analizini gerçekleştirmiştir. Minarenin dinamik analizi için zaman tanım alanında analiz yöntemini

kullanmıştır. Dinamik analizler neticesinde minarede elde edilen yer değiştirme ve gerilme değerlerini karşılaştırmıştır [40].

Aymelek (2022), minarelerin dinamik davranışlarının çevresel etkiler altındaki değişimlerini incelemiştir. Örnek olarak tercih edilen yığma ve betonarme minarelerin doğal frekansları Çevresel Titreşim Testi yöntemi kullanılarak, doğal frekanslarla sıcaklık ve nem arasındaki ilişkiyi araştırmıştır [41].

Yıldız ve Doğan (2022), Çelebi Cami'nin zemin-yapı etkileşimini dikkate alarak analizlerini gerçekleştirmiştir. Yığma caminin analizi SAP2000 sonlu elemanlar programı yardımı ile yapılmıştır [42].

Genç (2023), tarihi yığma yapıların deneysel dinamik özelliklerinin belirlenmesi, sonlu eleman modellerinin oluşturulması, sonlu eleman model güncelleme ve hasar tespit çalışmalarının yapılmasını amaçlamıştır. Mevcut yapılar üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar ve laboratuvar modeli üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar olmak üzere iki kısımda çalışmıştır. Deneysel Modal Analiz testleri gerçekleştirilmiş, sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve sonlu eleman model güncelleme işlemlerini yapmıştır. Elde edilen veriler sayesinde frekans ve mod verilerinin hasar tespitinde oldukça yararlı olduğunu tespit etmiştir. Ancak yapılardaki hasarın tespiti konusunda deneysel verilerin tek başına yetersiz kaldığı, sayısal modellere ve daha fazla deneysel ölçüm noktalarına ihtiyaç duyulduğunu söylemiştir [43].

Arık (2023), Hacı Turhan Kapan Camisinin minaresi, üzerinde testler yaparak, minarenin malzeme özelliklerini belirlemeye çalışmıştır. Elde edilen verilerle sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, modeller oluşturmuştur. İki farklı deprem kaydı kullanılarak yapılan zaman tanım alanı analizi ile elde ettiği verileri karşılaştırmıştır [44].

Al-Aswad (2023), İstanbul'da bulunan 7 Osmanlı minaresini değerlendirmiştir. Bu minarelerin beşi taş, geri kalanı ise hem taş hem de tuğla örgüyle inşa edilmiştir. Öncelikle kullanılan malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini Schmidt test çekici kullanarak belirlemiştir. Minarelerin temel periyodunu tahmin etmek için iki denklem türetmiştir. Yedi minare, SAP2000 yazılımı kullanarak kendi ağırlıkları, zaman tanım analizleri ve modal analizleri sonuçlarını karşılaştırmıştır [45].

3. YIĞMA YAPILAR VE YIĞMA MINARELER

Geçmişte olduğu gibi günümüzde de yığma yapılar önemli yapılar olarak yaşantımızda yerini almaktadır. İslam kültürünün geçmişten günümüze sembolü olan yığma minareler, eski medeniyetlerden kalan en güzel yapılardan biridir. Geçmişte yapılan bazı minareler çeşitli afetlerden dolayı günümüze kadar ulaşmamış, ulaşmışsa da kullanılmayacak kadar hasarlı durumda olmuşlardır. Bunun nedeni yapıldıkları zamanda mühendislik olarak eksik kalınması ve teknolojinin yeterince gelişmemiş olmasıdır. Günümüzde mühendislik bilgileri ile teknolojinin gelişmiş olması, kullanılan malzemeler hakkında daha fazla bilgiye sahip olmamız gibi durumlar bu tür minarelerin çeşitli yüklemeler (Deprem, sel, fırtına vb. olaylardan gelen yükler) altında daha dayanıklı yapılmasına imkân tanımaktadır. Bu bölüm de minareler ile ilgili genel bilgiler dışında, yığma yapıların taşıyıcı elemanları, taşıyıcı sistemine göre minareler, yığma minarenin yapım aşamaları, yığma minarenin bölümleri, yığma yapı malzemeleri ve yığma yapılarda meydana gelen hasarlar özetlenmiştir.

3.1. Yığma Yapılarda Taşıyıcı Elemanlar

Bu bölümde yığma yapıların taşıyıcı elemanları olan temel, duvar, payanda, sütun, ayak, kemer, tonoz, kubbe ve döşeme hakkında bilgi verilmiştir.

3.1.1. Temeller

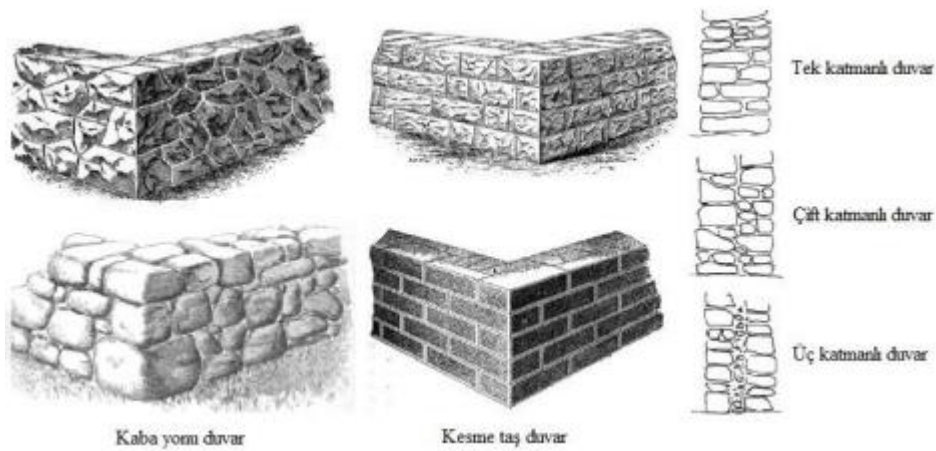
Yığma yapılarda temeller, yapıya gelen yatay ve düşey yüklerin zemine iletilmesini sağlayan yığma yapıya ait taşıyıcı elemanlardır (Şekil 3.1). Yığma yapının boyutlarına göre zeminin cinsine göre farklı planlarda tasarlanmaktadır. Sert zeminlerde temeller yüzeye yakın şekilde tasarlanırken, yumuşak zeminlerde kazıklar kullanılarak derin temeller tasarlanmaktadır. Yığma yapılarda derin ya da sığ yapılan temellerde kullanılan ana malzeme ahşaptır. Sığ temeller yatay şekilde ahşap elemanların birbirine kenetlenmesiyle oluşturulurken, derin temeller kazık ahşaplarının üst kısmının ahşap bir ızgara ile bağlanmasıyla oluşmaktadır. Zemin içerisindeki sıvının genellikle ahşapları sarmasıyla, ahşaplarda deformasyonlar azalmaktadır [43].



Şekil 3.1. Şahmerdan ile kazık çakımı, ahşap ızgara sistemi [43]

3.1.2. Duvarlar ve Payandalar

Duvarlar ve payandalar yığma yapılarda kolon, perde duvar gibi taşıyıcı elemanların görevini üstlenmektedir (Şekil 3.2). Yatay ve düşey yüklerin hepsi duvarlara geldiğinden boyutları oldukça büyük tercih edilmektedir. Ancak duvarların tam işlevsel olması, tek bir taşıyıcı sistem gibi çalışmasıyla mümkün olmaktadır. Bu yüzden duvar elemanları birbirlerine harç, kenet, zıvana ve hatıllar ile bağlanmıştır. Duvarlar sayesinde yığma yapılar düzlem içi yükleri karşılamada yeterli performansı göstermektedir. Ancak kubbe, kemer, tonoz gibi elemanlar duvarlara düzlem dışı yükler yüklemektedir. Bu düzlem dışı yüklemeleri karşılamada duvarlar yetersiz kaldığından, duvara destek olan payandalar devreye girmektedir. Yığma yapılarda düzlem dışı yükler yıkıcı etkiye sahip olduğundan, payanda dışında demir hatıl ve kuşak türü berkitme elemanları kullanılmaktadır. Duvarlar malzemeye göre moloz taş duvar, kesme taş duvar, kaba taş duvar, tuğla duvar olarak gruplandırılmaktadır. Duvarların tasarlanışına göre ise tek, çift ve üç katmanlı olarak gruplandırılmaktadır [43].



Şekil 3.2. Farklı tipte inşa edilmiş yığma duvarlar [43]

3.1.3. Sütunlar ve Ayaklar

Yığma yapılarda düşey yükleri temele ileten diğer bir taşıyıcı eleman sütunlardır (Şekil 3.3). Düşeyden gelen yükler kemerlere, kemerlerden sütunlara, sütunlardan temele aktarılarak sistemin işlemesi sağlanmaktadır. Diğer bir taşıyıcı eleman ise ayaklardır. Düşeydeki yükleri taşımak için kullanılan ayaklar farklı geometrik şekilde oluşturulmaktadır. Sütun için malzeme olarak genellikle granit ve mermer tercih edilirken, ayaklarda ise kireç taşı tercih edilmektedir. Sütun ve ayaklar tek bir parçadan oluşmak yerine yığma bir şekilde yapılarak oluşturulmaktadır [46].



Şekil 3.3. Nur-u Osmaniye Cami avlu sütunları ve II. Bayezid Camii ayakları [46]

3.1.4. Kemer

Yığma yapılarda kirişe benzer şekilde çalışan taşıyıcı elemanlara kemer denilmektedir (Şekil 3.4). Kemerler geniş açıklıkları geçmek gibi önemli görevlerde kullanılsa da kapı ve pencere üstlerinde de kullanılmaktadır. Kemerlerin, kirişlerdeki gibi çekme dayanımını arttıran bir donatı elemanı olmadığından sadece düşeyden gelen basıncı sütunlardan temele iletmektedir. Çekme gerilmelerine maruz kalındığında kemerler hasar almaktadır. Çekme gerilmesinden kaynaklı bu hasarı önlemek için kemer ayakları arasına gergi elemanı yerleştirilmektedir. Genellikle ahşap ve metalden yapılan bu gergi elemanının diğer bir özelliği ise itki kuvvetini azaltmasıdır [46].



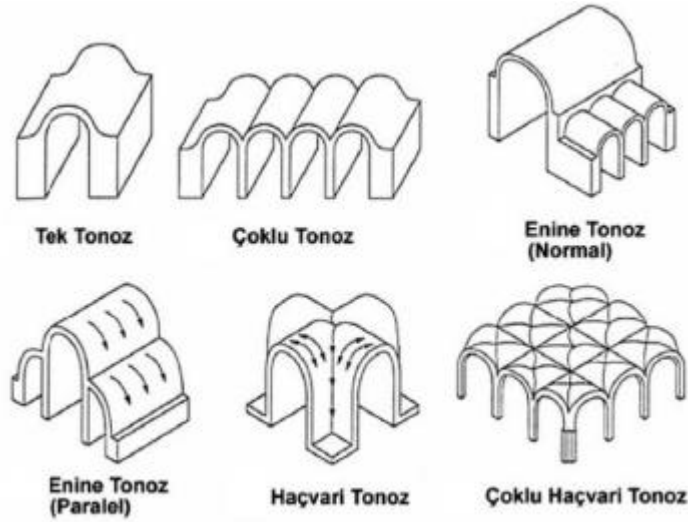
(a)

(b)

Şekil 3.4. (a) Şenyuva Köprüsü (b) I. Mahmut su kemeri [46]

3.1.5. Tonozlar

Yığma yapılarda kemerlere benzeyen tonozlar basıncı sütunlardan temele aktaran bir örtü elemanıdır (Şekil 3.5). Tonoz yapımında genellikle malzeme olarak tuğla kullanılsa da, taşın kullanıldığı tonozlar da bulunmaktadır. Tonozlar, beşik (tek), sivri, aynalı, çapraz (haçvari) gibi farklı geometrik şekillere göre gruplandırılmaktadır. Tonozlar yalnızca basıncı karşıladığı için yanal yüklerde yetersiz kalmaktadır. Bu yetersizliği ortadan kaldırmak için gergiler ve payandalar gibi elemanlar kullanılmaktadır [46].

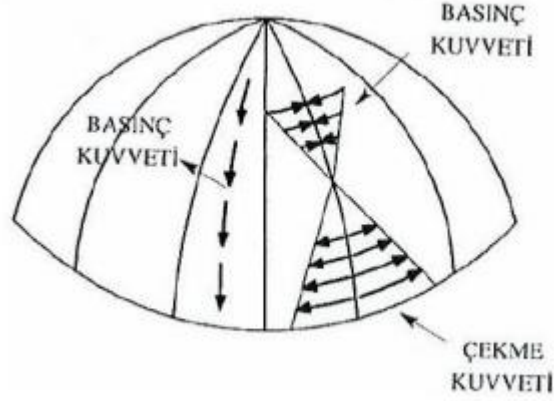


Şekil 3.5. Tonoz çeşitleri [17]

3.1.6. Kubbeler

Kemerin kendi etrafında tam tur döndürülmesiyle oluşturulan ana örtü elemanına kubbe denilmektedir (Şekil 3.6). Kubbenin, temelin de kemerler bulunduğu için kubbelerde kemerler gibi basınca çalışmaktadır. Bundan dolayı çekme gerilmelerine karşı dayanımı az olmaktadır. Ayrıca

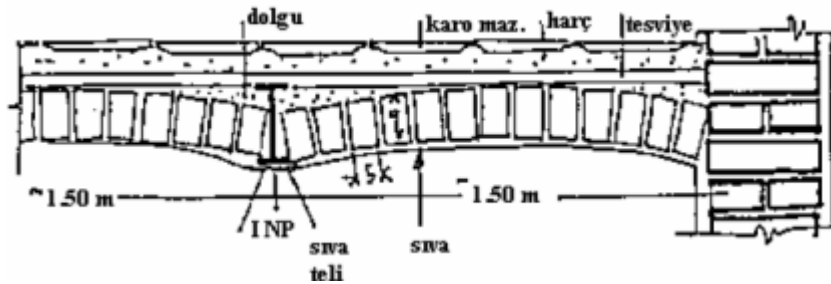
açılan pencere boşluklarının bulunduğu bölgelerde bu çekme gerilmelerinin etkileri daha çok hissedilmektedir. Çekme gerilmesinin etkisini azaltmak için kubbe kasnağının oturduğu bölgeler payandalar, ağırlık kuleleri ve kuşaklarla güçlendirilmektedir [46].



Şekil 3.6. Kubbede meydana gelen basınç ve çekme gerilmeleri [46]

3.1.7. Döşemeler

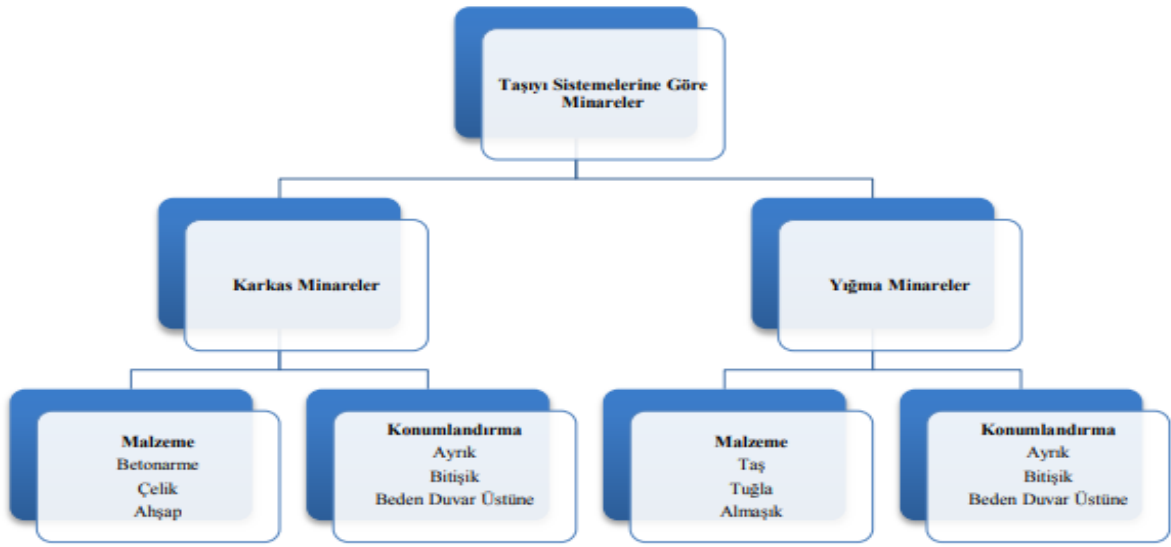
Yığma yapılarda, yapıyı yatay olarak bölümlere ayıran taşıyıcı sistem elemanıdır (Şekil 3.7). Döşemelere gelen sabit ve hareketli yükleri karşılamakla görevli iken sismik yüklerden kaynaklı yatay yükleri de diyafram etkisiyle taşıyıcı elemanlara aktarmaktadır. Döşemenin sürekliliği yığma yapının daha rijit davranması için önemli olmaktadır. Yığma yapıya gelecek yüke göre döşemeler tasarlanmaktadır. Döşemeye gelecek yüke göre kiriş kesitleri ve sayıları (ızgara) yeterli olmalıdır. Çelik sanayisinin teknolojik olarak ilerlemesiyle volta döşeme (putrelli) sistemi geliştirilmiştir. I profil ve tuğlalarla sarmal bir döşeme sistemi oluşturularak volta döşeme sistemi meydana getirilmiştir [46].



Şekil 3.7. Volta döşeme detayı [19]

3.2. Taşıyıcı Sistemine Göre Minareler

Minarenin tasarımı yapılırken genellikle yüksek bir yapı gibi düşünülerek tasarlanmaktadır. Minarelerde yüksekliğin fazla oluşu, minarenin ağırlığını yani düşey yüklerini arttırmaktadır. Minarenin sahip olduğu bu düşey yükler, yatay yükler (deprem vb.) altında yapıyı daha çok zorlamaktadır. Bu yüzden minareler de taşıyıcı sistem seçimi oldukça önemli olmaktadır. Minareler taşıyıcı sistem olarak karkas taşıyıcı sistem ve yığma taşıyıcı sistem olmak üzere iki gruba ayrılmıştır (Şekil 3.8) [1].



Şekil 3.8. Taşıyıcı sistemine göre minareler [1]

3.2.1. Karkas Taşıyıcı Sistemli Minareler

Günümüzde yığma minareler için yaygın olarak tercih edilen karkas taşıyıcı sistemlerdir. Karkas taşıyıcı sistemler kullanılan malzemeye göre üç gruba ayrılmıştır [1]. Bunlar betonarme karkas, ahşap karkas ve çelik karkastır (Şekil 3.9).



(a)

(b)



(c)

Şekil 3.9. Karkas minare örnekleri (a) betonarme (b) çelik (c) ahşap [1]

Günümüzde yapılaşmada en çok tercih edilen taşıyıcı sistem betonarme olduğu için minarelerde de bu sistem yaygın olmaktadır. Ülkemizde minarenin tasarım şartları veya yapım süreci hakkında mevcut bir yönetmelik bulunmamaktadır. Bundan dolayı minarelerin tasarımı yapılırken, minare modelleri belli kalıplara sokulup deprem standartlarındaki yüklemeler etki ettirilerek analizleri yapılmaktadır. Analiz modellerinde minare temelleri genellikle ankastre olarak tasarlanır, minareler ise cami ile bir bütün sistem olarak ele alınmaz, minareler tek başına bir yapı sistemi olarak kabul edilmektedir. Günümüzde yapılan çoğu minareler geçmişteki minareleri taklit ederek tasarlanıp, inşası yapılmaktadır [1].

Betonarme karkaslardan sonra popülerliği hızla artan çelik karkaslı minarelerde tercih edilmektedir. İnşaatının hızlı olması, yapım aşamasındaki kolaylık, kullanım ömrünün uzun olması, mimari açıdan betonarmeye göre daha kullanışlı olması gibi nedenlerin dışında hasar aldığına

onarım yapılmasının kolay oluşu çelik karkas taşıyıcı sistemli minarelere yönelimi arttırmıştır. Çelik karkaslı minareler yapılışının ekonomik oluşu ve deprem etkisi altındaki dayanımının fazla oluşu da çelik karkaslı minarelerin tercih edilmesini arttıran sebeplerdendir.

Diğer bir karkas taşıyıcı sistem ise ahşap karkas taşıyıcı sistemlerdir. Ahşap malzeme olarak dayanımının beton ve çeliğe göre az oluşu, minare yapımında tercih edilmesini engellemektedir. Çeşitli hava koşullarına, doğal afetlere (deprem, yangın vb.) dayanıksız oluşu, ahşap karkaslı minarelerin ömrünü kısılmasına sebep olmaktadır. Ayrıca ahşap karkaslı minarelerin estetik görünüşleri olmasına rağmen, ahşabın dayanıksız bir malzeme oluşunda dolayı minarenin boyutları betonarme ve çelik minarelere göre küçük olmaktadır. Ahşap karkas taşıyıcı sistemli minareler genellikle ahşap mimarisinin ön planda olduğu Karadeniz Bölgesinde görülmektedir [1]

3.2.2. Yığma Taşıyıcı Sistemli Minareler

Yığma taşıyıcı sistemli minareler günümüzde karkas taşıyıcı sistemli minarelere göre çok az tercih edilmektedir (Şekil 3.10). Geçmişte yapılan minarelerde yaygın olan bu taşıyıcı sistemler genellikle tarihi niteliği olan yapıları oluşturmaktadır. Yığma taşıyıcı sistemli minareler de taşıyıcı eleman olarak kullanılan malzemelerin bazıları taş, tuğla vb. malzemelerdir. Taşıyıcı eleman olan bu malzemeler, bağlayıcılarla birleştirilerek bir araya gelmesiyle yığma taşıyıcı sistemi oluşturmaktadır [1].



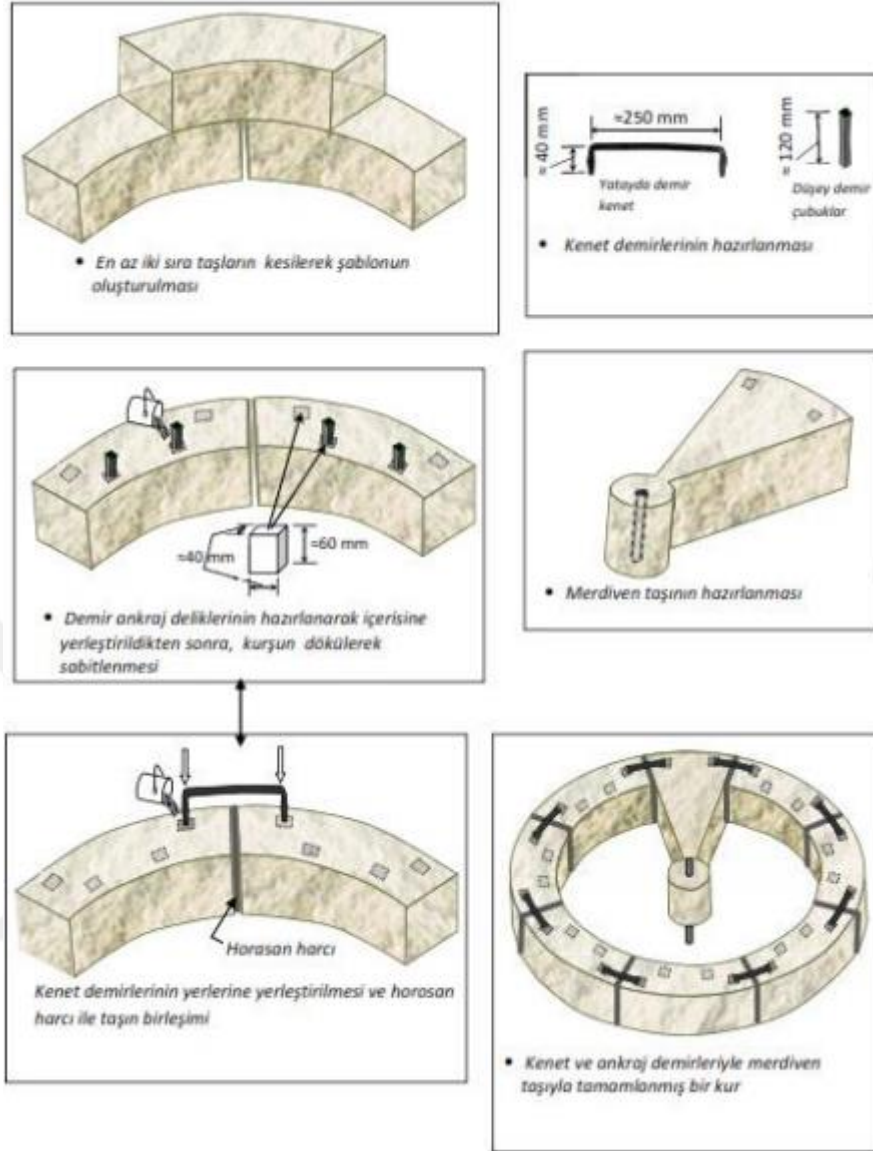
Şekil 3.10. Yığma taşıyıcı sistemli minare

Kullanılan malzemenin dayanımı ile bağlayıcının dayanımının düşük olması, yığma taşıyıcı sistemli minarelerin yatay ve düşey yüklemelerden oluşan kesme ve eğilme kuvvetlerinin etkisiyle yığma minarelerin kritik bölümlerinde hasarlar meydana gelmektedir. Geçmişte yaşanan yıkıcı depremlerden dolayı yığma minarelerde olan eksiklikler görülmüş, bu eksiklerin iyileştirme çabaları ise yığma minarenin gelişmesini sağlamıştır. Bu gelişmeler daha çok dayanımı zayıf olan

bağlayıcılar üzerine olmuştur. Taşıyıcı eleman olarak kullanılan malzemelerin çekme dayanımları zayıf olması sebebiyle, demir çubuklarla birbirine bağlanılarak çekme dayanımı arttırılmıştır. Bu sistem günümüzdeki demir-beton uyumuna benzemektedir. Bu demir çubukların düşey olanına zıvana, yatay olanına kenet adı verilmiştir. Ayrıca cami ve minare yapımında yumuşak zeminlerde, zeminin taşıma gücünü arttırmak için ahşap kazıklar ve ahşap ızgaralar kullanılmıştır. Bu ahşap ızgaralar günümüzdeki raylı sisteme benzemektedir. Bu tür elemanlar sayesinde yığma taşıyıcı sistemli minarelerin zemin oturması, deprem gibi etkilerle oluşan düşey ve yatay yüklemelere karşı dayanımı artmıştır. Böylece yığma taşıyıcı sistemli minareler yüzyıllar boyunca doğal afetlere yenik düşmeden günümüze kadar gelebilmiştir [1].

3.3. Yığma Minarelerin Yapım Aşamaları

Yığma minare yapımında kullanılacak taşıyıcı malzemeler, önceden hazır hale getirilerek inşaat alanına taşınmaktadır. İnşaat için minarenin boyutlarına göre iskele kurulma işlemine başlanmaktadır. İlk önce yığma minarenin temel inşaatı tamamlanmaktadır. Temel inşaatı biten yığma minarenin, üst yapı inşaatına başlanmadan önce giriş kısmında kapı boşluğu bırakılmaktadır. Yığma minarenin taşıyıcı elemanı ile merdiven inşaatı ayrı yapılmaz, birlikte ilerlenerek yapılmaktadır. Merdivenler her zaman sağdan çıkması gerekmektedir. Böylece merdivenlerde yığma minarenin taşıyıcı sistem elemanları iç içe girmektedir. Düşey olarak bir çizgi halinde sıralanmış taşlara kur denilmektedir. Kurlar birbirine kenetler ve zıvanalar yardımıyla bağlanarak yığma yapının taşıyıcı elemanlarının deprem esnasında birlikte hareket etmesini sağlamaktadır. Kenetler ve zıvanalar malzeme üzerine yerleşeceği noktadaki delikler açılmalı ve delik boyutları aynı olmak zorundadır. Taşıyıcı elemandaki bu deliklere demir ankraj koyulup kurşun dökülerek taşıyıcı elemanlar birleştirilmektedir. Bu işlemler yapılırken taşıyıcı malzemeye zarar verilmemelidir. Kurların her birinde iki merdiven taşının arası harç ile doldurulmalıdır. Merdivenin yapılışı, zıvana ve kenetlerin kullanımı ve kurşun dökülerek demir ankrajların sabitlenmesi Şekil 3.11’de gösterilmiştir [1].

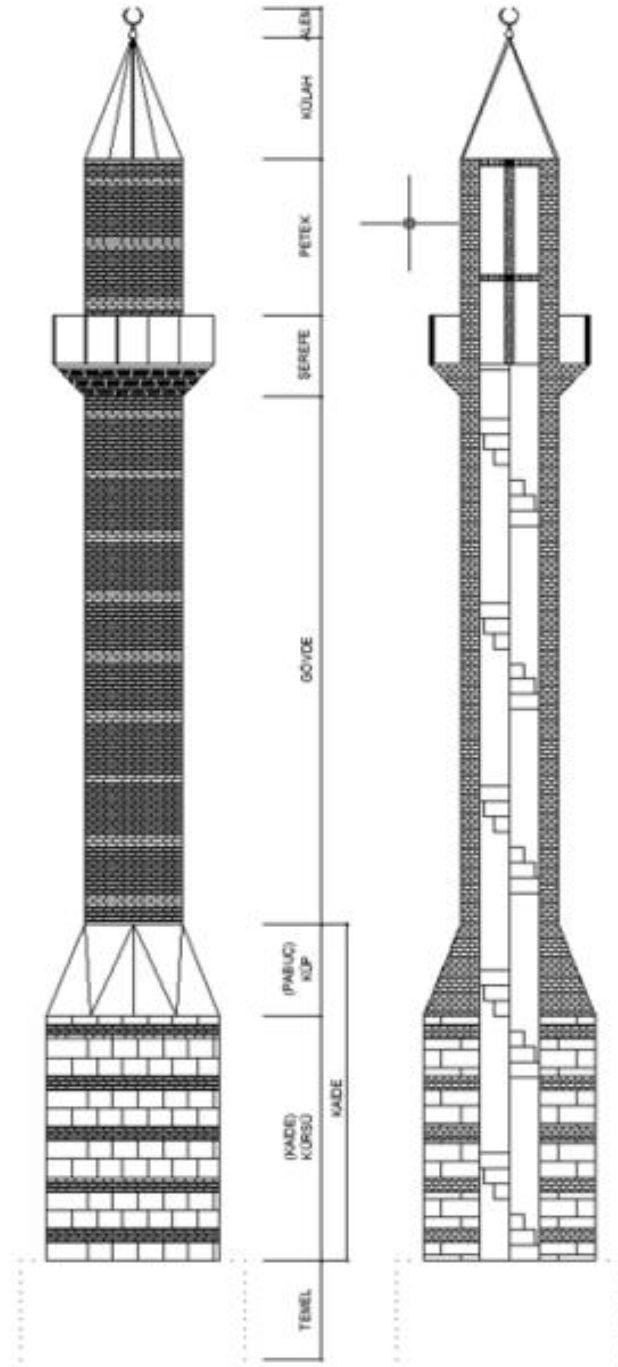


Şekil 3.11. Minarede oluşturulan kurun yapım aşamaları [1]

Sarmal bir şekilde taşıyıcı sisteme yerleştirilen merdivenlerin basamakları çekirdekli veya çekirdeksiz olarak yapılmaktadır. Çekirdekli basamak ile çekirdeksiz basamağın farkı, çekirdekli basamağın birbirine demir çubuklarla birleştirilmesidir. Merdivenler genellikle yığma minarenin şerefesine kadar yapılmaktadır. Şerefe bölümü ise gövdedeki taşların konsol oluşturacak şekilde yapılmasıyla oluşmaktadır. Külah kısmını taşıma görevini üstlenen serin direği, son basamağın merkezine sabitlenen genellikle ahşaptan olan bir direktir. Yığma minarenin son kısmında külah yapılır, külahın üstü kurşunla kaplanır ve üstüne bakırdan yapılan alem bölümü yerleştirilir. Böylece yığma minarenin yapım aşaması son bulur [1].

3.4. Yığma Minarenin Bölümleri

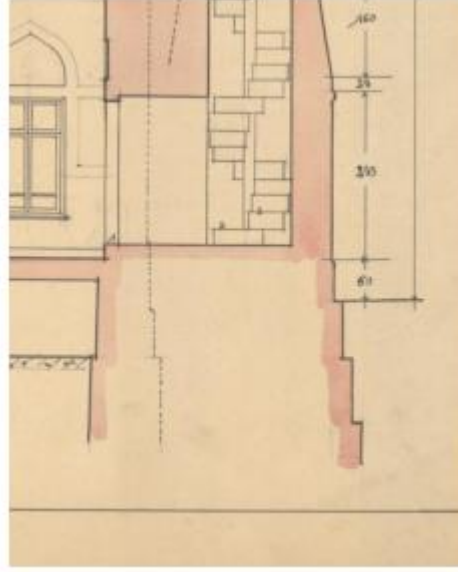
Yığma minareler Şekil 3.12’de görüldüğü gibi 9 bölümden oluşur. Bunlar temel, kaide, pabuç, gövde, şerefe, petek, külah, alem ve merdivenlerdir [8].



Şekil 3.12. Yığma minarenin bölümleri [9]

3.4.1. Temel

Yığma minarelerin temelleri zemin altında kaldığı için, temeller hakkında bilgimiz oldukça az olmaktadır. Yığma minare temelleri, minarenin boyutuna, planına ve zeminin cinsine göre değişiklik göstermektedir. Yığma minare temelleri yaygın olarak ampatmanlı şekilde geniş ve kademeli büyüyerek yapılmaktadır [8]. Şekil 3.13'te temel gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Yığma minarenin ampatmanlı temeli [8]

Yığma minarenin temel kazısı, sert zemine kadar yapılmaktadır. Sert zemine ulaşıldığında temel malzemesi olarak iri taşlar kullanılmaktadır. Çünkü temelde kullanılan taş, topraktaki neme ve suya diğer malzemelere göre daha dayanıklıdır. Yığma minareler genellikle doğal afetlerden kaynaklı hasarlar meydana gelmektedir. Ancak hasarın en az meydana geldiği kısım ise temeller olmaktadır. Çoğunlukla toprak altında kalışı ve restorasyon yapılamaması temeli yığma minarenin en az bilinen bölümü yapmaktadır [8].

3.4.2. Kürsü (Kaide)

Yığma minarenin görülen en alt bölümü olmakla birlikte, temel ile pabuç arasındaki kısma denir. Minare girişi içeride olduğu gibi dışarıda da olabilir. Dışarıdaki girişler genellikle batı cephesinde bulunmaktadır. Minare kapı girişinde sadelik ön planda tutulmaktadır. Tüm yükü taşıyan kürsü, temel ile eşit ya da daha küçük boyutta olurken, diğer bölümlerden ise büyük olmaktadır. Çeşitli geometrik şekillerde (kare, çokgen, altıgen, sekizgen gibi) yapılmaktadır. Bazı durumlarda sistemin dayanımını arttırmak için kürsüler, payanda görevini üstlenmektedir. Taşıyıcı

malzemenin birbirine kenetlenmesi ve zıvalanmasıyla, oluşturulan kürsüler yığma minarenin taşıyıcı eleman olarak önemli kısımlarından biri olmaktadır (Şekil 3.14) [8].



Şekil 3.14. Kaide örnekleri [9]

3.4.3. Geçiş Bölgesi (Pabuç, Küp, Yedisekiz)

Statik açıdan yığma minarenin en önemli kısımları temel ve kürsü olurken, mimari açıdan ise en önemli kısmı geçiş bölgesidir. Kürsünün geniş bölümünden minare gövdesinin dar bölümüne geçişi sağladığından pabuç (Geçiş Bölgesi) denilmektedir [8]. Geçişin başından sonuna kadar korniş bulunmaktadır. Malzeme olarak kürsü gibi taşların birbirine kenetlenmesi ve zıvalanmasıyla oluşturulmaktadır. Ancak kürsüden farklı olarak işçilik gerektiren bir bölüm olmaktadır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Pabuç örnekleri [27]

3.4.4. Gövde

Yığma minarelerde bulunan en uzun bölüm olarak bilinmektedir (Şekil 3.16). Yığma minareler basamaklara göre yedekli veya yedeksiz olmakla birlikte, dış duvarına göre ise de gmlekleli veya gömleksiz olarak yapılmaktadır. Yığma minarelerin gövdeleri silindirik, çokgen, dilimli, yivli, burmalı, karma gibi Şekillere sahip olsa da en yaygın olanları silindirik ve okgen Őekilli yığma minarelerdir. Gövdeler taş duvarlarını merdiven basamaklarıyla sarmal bir yapı oluşturulması, yığma minarenin taşıma kapasitesini arttırmaktadır [8].



Şekil 3.16. Gövde ve havalandırma boşluğu [27]

3.4.5. Şerefe

Yığma minarenin gövdesinde bulunan, müezzinin ezan okumak için kullandığı 360 derece dönen konsol Őeklindeki balkona Şerefe denilmektedir (Şekil 3.17). Sayısı birden fazla olabileği gibi kapıları da kible yönünde açılmaktadır [9]. Őerefeler, döşeme, çıkmalar ve korkuluk olmak üzere e ayrılmaktadır:

- Döşemeler yani taban, müezzinin üzerinde durması için yapılan, gövdeden dışarı doğru genişleyen, 360 derece yapılan yığma minare elemanıdır.
- Çıkmalar, gövdeden dışarıya doğru kademe kademe yapılarak oluşturulan konsolların üst üste gelmesiyle oluşan, tabanı destekleyen yığma minarenin en süslü elemanıdır.
- Korkuluk, döşemenin u kısmının etrafını saran bölümdür. Çeşitli malzemeler kullanılarak yapılmaktadır.



Şekil 3.17. Şerefe örnekleri [27]

3.4.6. Petek

Şerefe çıkış kapısının olduğu, şerefe tabanı ile külah arasında bulunan bölümdür (Şekil 3.18). Yığma minarenin son basamağına yerleştirilen seren direği, petek bölümündeki petek duvarı ile ahşap gerği ile bağlanarak taşıyıcı sistemle birlikte hareket etmesi sağlanmıştır [9].



Şekil 3.18. Petek iç ve dış bölümü [9]

3.4.7. Külah

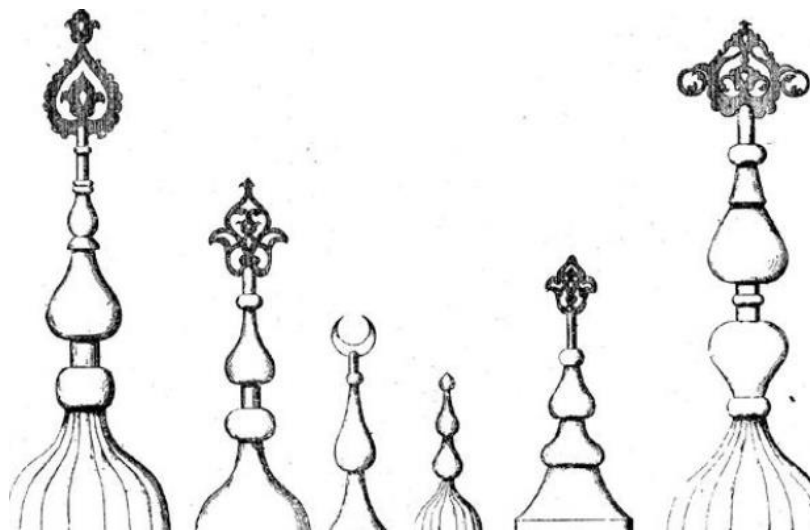
Seren direğine bağlanan, çeşitli malzemelerden yapılabilen yığma minareye ait çatı bölümüdür (Şekil 3.19). Ahşap iskelet şeklinde yapılan külahın, iskelet kısmı kurşunla kaplanırken, yalıtım malzemesi olarak da çamur sıva kullanılmıştır. Eğim doğrultusunda sıvanın akmaması için keçe kullanılmıştır [9].



Şekil 3.19. Klah rnekleri [27]

3.4.8. Alem

Estetik açıdan yapılan bir eleman olması dışında, külah örtüsündeki kurunun rüzgarda kalkmaması için de yapılmış yıgma minare elemanıdır (ekil 3.20). Geleneksel Türk mimarisinde yukarı bakan hilal Őeklinde olan Alemler, ŐeŐitli malzemelerden yapılmaktadır. Tunć ve bakır olanları, altın yaldızla kaplanırken, pirinć olanlarına kaplama yapılmamaktadır. Alemi oluşturan öğeler: kaide, kp, alt bilezik (simit), armut boyun, üst bilezik(simit) ve ay (veya boynuz)'dır. Tepelik kısımları genellikle ay-yıldız olması dışında lale, yaprak gibi Őekillerde kullanılmıştır [9].



Şekil 3.20. Alem rnekleri [27]

3.4.9. Merdivenler

Yığma minarenin kürsü kısmından başlayıp seren direğine kadar, bazen de seren direğinden 7- 8 basamak yukarı yapılan yığma minare taşıyıcı elemanıdır (Şekil 3.21). İlk basamak ile son basamağın yerinin hesaplanması, son basamağın kibleye gelmesi için çok önemli olmaktadır. Yığma minareyi betonarme bir sistem olarak düşünürsek, merdivenler yığma minare sisteminin kirişlerini oluşturmaktadır. Merdiven basamakları yedeksiz veya yedekli yapılmaktadır. Yedekli yapılmasının amacı merdivenin rijtliğini arttırmak istenilmesidir. Basamaklar gövde boyunca orta kısımda tek çizgi halin de birleştirilerek bir sütun oluşturulmaktadır. Basamaklar yapılırken genellikle taş malzeme kullanılırken, bazen de tuğla ve ahşap (karma) ikisi birlikte kullanılarak yapılmaktadır [9].



Şekil 3.21. Merdiven örnekleri [27]

3.5. Yığma Yapı Malzemeleri

Yığma yapılarda çok çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Malzemenin cinsine göre yığma yapının performansı, ömrü değişkenlik göstermektedir. Yığma yapılarda kullanılan malzemeler basınç dayanımı olarak oldukça yüksek değerlere sahiptirler. Ancak çekme dayanımı olarak dayanıksız olan bu malzemeler, ahşap ve metal elemanlarla çekme dayanımları artırılarak kullanılmaktadır. Bu bölümde yığma yapılarda kullanılan malzemelerin özellikleri anlatılmıştır.

3.5.1. Taş Malzeme

Yığma yapılarda tercih edilen başlıca malzemelerden biridir. Taşın elde edilmesi, işlenmesi kolay olduğu için tercih edilmiştir. Taşın yüksek basınç dayanımı sayesinde yığma yapıya gelen düşey yükler kolaylıkla karşılanabilmektedir. Çekme dayanımının düşük olması sebebiyle taş genellikle basınca çalışacak şekilde tasarlanmaktadır. Taşlarda oluşabilecek çekme gerilmeleri dışında, sıcaklık değişimleri, donma-çözülme gibi olaylar malzeme üzerinde çatlaklar oluşturmakta

basınç dayanımını da düşürmektedir. Taşlara, granit, mermer, kireç taşı, kum taşı, kuvars, serpantin vb. örnekler verebilmekteyiz [33].

TBDY 2018’de taş duvarların karakteristik basınç dayanımı ve başlangıç kesme dayanımları Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de verilmiştir. Farklı taşların mekanik özellikleri ise Tablo 3.3’te gösterilmiştir [47].

Tablo 3.1. Kesme taş taşıyıcı duvarların karakteristik basınç dayanımı, f_k (MPa) [47]

Birim sınıfı	Harç sınıfı	Harç basınç dayanımı f_m (MPa)	Kargir birim basınç dayanımı f_b					
			5	10	15	20	25	30
Grup II ve kesme taş	Genel amaçlı harçlar	M10-M20	2.8-3.4	4.5-5.5	6.0-7.4	7.3-9.0	8.5-10.5	9.7-12.0
		M2.5-M9	1.8-2.7	3.0-4.4	3.9-5.8	4.8-7.1	5.6-8.3	6.4-9.4
		M1-M2	1.4-1.7	2.3-2.8	3.0-3.7	3.7-4.5	4.3-5.3	4.9-6.0

Tablo 3.2. Farklı taşların mekanik özellikleri [47]

Taşın cinsi	Basınç mukavemeti (MPa)	Kayma mukavemeti (MPa)	Çekme mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
Granit	30-70	14-33	4-7	30-55
Mermer	25-65	9-45	1-15	25-70
Kireç taşı	18-35	6-20	2-6	10-55
Kum taşı	5-30	2-10	2-4	13-50
Kuvars	10-30	3-10	3-4	15-55
Serpantin	7-30	2-10	6-11	23-45

3.5.2. Ahşap Malzeme

Uzun yıllar boyunca aksenal çekme veya eğilmeye maruz kalan çatı, tabliye, duvar makası, kemer bağı ve benzeri diğer yapı elemanlarının yapımında uygun miktarda ve uygun boyutta kullanılmakta olan ahşap, gerilme ve basınca dayanabilmektedir. Hem çekme hem de basınca dayanabilmesi tarih boyunca ahşabın tercih edilme sebebi olmuştur. Yapının üst kısmında kullanıldığı gibi yapının temelinde de kazık ve ızgaralar olarak karşımıza çıkmaktadır. Ahşap duvarlarda kirişler, kemerlerde gergiler, döşemelerde, kaplamalarda ve bunun gibi birçok yerde kullanılmaktadır. Ağaçtan elde edilen bir ürün olan ahşap, yapı malzemesine dönüştükten sonra içyapısında önemli değişikliklere uğrar. Bu nedenle dikkatli ve sürekli olarak kontrol edilmelidir. Bir yapının ahşap bölümleri, taş veya duvar bölümlerine kıyasla en savunmasız olanlarıdır. Bu

nedenle, yapının yapısal bölümünde, yapının önemine ve bölgedeki ahşap mevcudiyetine bağlı olarak, dayanıklılığı yüksek ahşap kullanılmalıdır. Ahşap yapıların hassas noktaları elemanların birleşim yerleri olarak düşünülmelidir. Burada kesme ve delme yoluyla enine kesitlerin ve derz formülasyonlarının zayıflaması nedeniyle ahşap daha savunmasız hale gelir. Bu noktalar, yüksek neme ve yüksek sıcaklık dalgalanmalarına maruz kalmalarıyla birlikte, eski yapılar da bu ahşap bölümleri çürüme belirtileri göstermektedir [48]. Ahşap malzemelerin mekanik özellikleri ve güvenliği Tablo 3.3 ve Tablo 3.4'teki değerler TS647 (1979)'de gerilme için önerilen değerlerdir.

Tablo 3.3. Ahşap malzemelerin TS 647'ye göre malzeme özellikleri [49].

Ahşap malzeme türü	Elastisite Modülü (kg/cm ²)		Kayma modülü (kg/cm ²)
	Liflere paralel	Liflere dik	
İğne yapraklı	100000	3000	5000
Meşe, kayın	125000	6000	10000

Tablo 3.4. Masif ahşap malzemenin emniyet gerilmeleri [49].

Gerilme türü	Emniyet gerilmeleri (kg/cm ²)			
	İğne yapraklılar			Meşe, kayın
	I. sınıf	II. sınıf	III. sınıf	
Eğilme	130	100	70	110
Liflere paralel çekme	105	85	0	100
Liflere paralel basınç	110	85	60	100
Liflere dik basınç	20	20	20	30
Makaslama	9	9	9	10

3.5.3. Harç Malzeme

Taş, tuğla vb. taşıyıcı malzemeleri birbirine bağlayan, gelen yüklemeleri bir sistem halinde almasını sağlayan malzeme harç olarak tanımlanmaktadır. Harç, su ve dolgu malzemesi ve bağlayıcı malzemenin belli oranla birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Geçmişte ilk kullanılan bağlayıcı malzeme çamur olsa da yaygın olarak kireç kullanılmaktadır. Bağlayıcı malzemeye göre çeşitlilik gösteren harçlar, kullanıldıkları yere göre de çeşitlilik göstermektedir. Yığma yapılarda bulunan harçlar, yapının ve dış kaplamalarının işleyişinde hayati bir rol oynamaktadır. Her şeyden önce, birimler (tuğla-taş) arasındaki boşlukları doldurmaya hizmet ederler ve böylece taşların hassas bir şekilde kesilmesine veya şekillendirilmesine gerek kalmadan düzgün bir yatak sağlarlar. Tablo 3.5'te İstanbul'da yer alan bazı tarihi yapılardaki harçların basınç dayanımları sunulmuştur [50].

Tablo 3.5. İstanbul'da yer alan bazı tarihi yapılardaki harçlara ait basınç dayanımları [50]

Tarihi yapılar	Nokta yükleme testi basınç dayanımı (MPa)	Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)
Bukoleon Sarayı derz harcı	0.8	8
Lausos Sarayı derz harcı	0.6	6
Aya İrini derz harcı	0.5	5
Acem Ağa Mescidi derz harcı	0.5	5
Aspar Su Sarmıcı çekirdek harcı	0.4	4

3.5.4. Tuğla Malzeme

Çok eskiden, basit yapıların (çoğunlukla konutların) inşası için çamur, saman ve resif kullanılmıştır. Daha sonra, yüksek kaliteli ve normal boyutta güneşte kurutulmuş tuğlalar kullanılmaya başlanmıştır. Pişmiş tuğlalar, genellikle 750°-850°C aralığında bir sıcaklığa kadar pişirilen kil kıvamındadır, böylece sert, dayanıklı ve estetik açıdan çekici hale gelmektedirler. Tuğla iyi bir şekilde pişirildiğinde dayanımı (mukavemeti) artmaktadır. Tuğla malzeme, taş malzeme gibi çalışmakta yani basınç dayanımı çekme dayanımına göre yüksek olmaktadır. Dolayısı ile yapıda basınç dayanımı etkisinde çalışacak bölgelerde kullanılmalıdır. Tuğlanın mekanik özelliklerine ait yaklaşık değerler Tablo 3.6'da sunulmaktadır [4].

Tablo 3.6. Tuğla malzemenin ortalama mekanik özellikleri [4]

	Basınç mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Tuğla	3-10	0.2-0.5	1000-5000

3.5.5. Küfeki Taşı

Osmanlı dönemi boyunca, İstanbul civarlarında yığma yapının ana taşıyıcı malzemesi küfeki taşı olmuştur. Küfeki taşının tercih edilmesini sağlayan sebepler arasında, hafif oluşu ve kolay şekil verilmesi vardır. Küfeki taşının parametreleri Tablo 3.7'de verilmiştir [18].

Tablo 3.7. Küfeki taşı özellikleri [18]

Basınç dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (kN/m ²)	Birim hacim ağırlık (gr/cm ³)	Poisson oranı
32	0.36	24000	2.19	0.2

3.5.6. Agrega

Yığma yapılar da harçlar, temel bileşen olarak belli oranlar da agregalara sahip olmaktadır. Kum, çakıl ve bazen kırılmış tuğla, agrega yığınının oluşturmaktadır. Bağlayıcı, çağdaş harçlarda olduğu gibi, agregalar arasındaki boşlukları doldurmak ve bunları basınç ve kayma gerilmelerine dayanacak kadar güçlü bir bileşik halinde birleştirmek gibi ana role sahip olmaktadır. Tarihi harçlar genel olarak modern standartlara uymamaktadır, çünkü agregalar önemli sayıda ince bileşen içermekle kalmaz, aynı zamanda nispeten yüksek oranlarda > 4 mm iri taneler içermektedir [48].

3.5.7. Katkılar

Eski dönemler de harçların içinde birçok katkı maddesi bulunmaktadır. Bunlar yumurta akı, kan, incir sütü vb. etkisi kanıtlanmamış katkı maddeleridir. Aslında, kullanımda olan bu tür katkı maddelerin yığma yapılarda yapının sağlamlığına etkisi olduğu düşünülse bile tam olarak laboratuvar ortamında test edilmemiştir [48].

3.5.8. Metal Bağlantı Elemanları

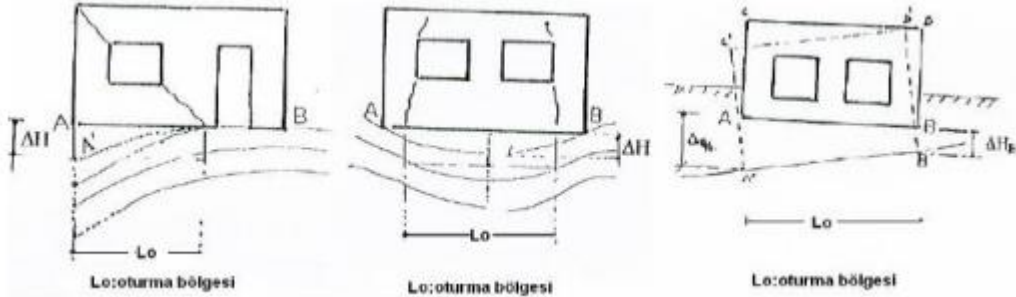
Tarihi yığma yapılarda kenet, zıvana ve gergi gibi elemanlara metal eleman denilmektedir. Metal elemanların kullanım amacı basınca çalışan sistemin çekme gerilmesindeki zayıflığını ortadan kaldırmaktır. Böylece yapıdaki çekme gerilmelerini metal elemanlar karşılamaktadır. Taşıyıcı elemanı birbirine yatay da bağlamak için kenet demiri kullanılmıştır. Kenet demirleri, duvarlarda, kemerlerde ve özellikle minarelerde yatay bağlantıyı sağlamak için sıklıkla kullanılmıştır. Zıvana demirleri ise hem yatay hem düşey bağlantıyı sağlamak için sütun, kemer ve minarelerde sıklıkla kullanılmıştır. Gergi demirleri ise genellikle kemer ve tonozlarda, kemer ve tonoz mesnetlerinin açılmasını önlemek amacıyla kullanılmıştır [48].

3.6. Yığma Yapılarda Meydana Gelen Hasar Çeşitleri ve Nedenleri

Yığma yapılar kendi ağırlıklarından, depremler gibi doğal afetlerden dolayı düşey ve yatay yüklemelere maruz kalmaktadırlar. Yatay ve düşey yüklemeler yığma yapının alabileceği maksimum yüklemelere yakın ya da daha fazla olabilmektedir. Bu tür yüklemeler yığma yapı da bazı hasarlar oluşturmakta, hatta yığma yapının göçmesine sebep olabilmektedir. Yatay ve düşey yüklerden dolayı yığma yapının taşıyıcı elemanlarında yarıklar, açıklıklar, çatlak ve ezilme gibi hasarlar meydana gelmektedir. Zamanla bu hasarlar büyümekte ve yığma yapının taşıyıcı elemanları arasındaki yük iletimini azaltmaktadır. Gelen yükün iletilmemesi taşıyıcı sistemin çalışmamasına sebebiyet vererek yığma yapının daha büyük hasar almasına, hasarın artarak yığma yapının yıkılmasına neden olabilmektedir. Bu bölümde yığma yapılarda görülecek hasar sebepleri incelenmiştir.

3.6.1. Taşıyıcı Sistemin Tasarımından Kaynaklı Hasarlar

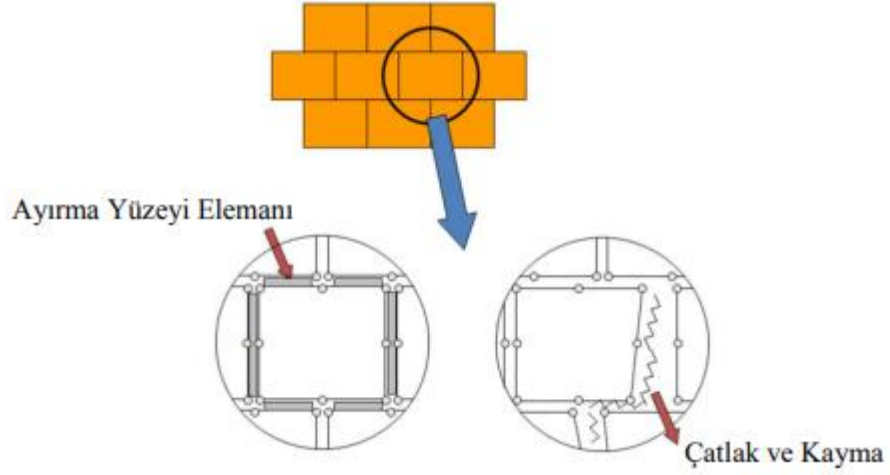
Yığma yapılarda düşey ve yatay yüklerden dolayı temelde aşırı oturmalar, temelin bütünlüğünün bozulması ve temelin kayması gibi hasarlar meydana gelerek temelin hasar alması dolayısıyla yığma yapının üst bölümlerinde hasar oluşması kaçınılmaz olmaktadır (Şekil 3.22). Yığma yapının aşırı oturmalar yaşatan durumlardan bazıları, temelin altındaki taşların deformasyonu, yer altı su seviyesinin değişimi, temelin zamanla deforme olması, temel altındaki zeminin boşalması, zemin gerilmelerin aşırı artması, donma-çözülme olayı, kimyasal etkiler gibidir. Bu tür durumlar yığma yapının temelinde hasarlar oluşturmaktadır. Zamanla artan hasarlar yığma yapının göçmesine neden olabilmektedir [14].



Şekil 3.22. Oturma şekilleri ve yapıda oluşturduğu çatlaklar [14]

3.6.2. Duvarlarda Oluşan Hasarlar

Yığma yapılarda yapıya gelecek olan yatay ve düşey yükler göz önüne alınarak, taşıyıcı sistem tasarlanmaktadır. Tasarlanan sistem de taşıyıcı elemanların taşıma kapasitelerindeki yanlış hesaplamalar nedeniyle yığma yapı hasar alabilmektedir. Ana taşıyıcı eleman olan duvarları oluşturan malzemenin taşıma kapasitesinin yanlış hesaplanması, yetersiz harç kullanımı, bu malzemenin birleştirilirken kullanılan kenetlenme ve harcın zamanla yıpranması gibi nedenlerle duvar örgü sisteminin taşıma kapasitesi azalmaktadır. Ana taşıyıcı eleman olan duvarları, oluşturan malzemenin taşıma kapasitesinin yanlış hesaplanması, duvarların birleştirilirken yetersiz harç kullanımı, kullanılan kenetlenme ve harcın zamanla yıpranması gibi nedenlerle duvar örgü sisteminin taşıma kapasitesi azalmaktadır. Bu azalmadan dolayı duvarın, düşey basınç taşıma kapasitesi ve kapasitesi azalmaktadır. Bu kapasitelerin azalmasıyla duvarlarda Şekil 3.23-Şekil 3.24'teki gibi çatlak, kayma, ayrılma deformasyonları meydana gelebilmekte, zamanla bu deformasyonlar yığma yapının çökmesine çekme gerilme neden olabilmektedir [14].



Şekil 3.23. Harçta oluşan çatlaklar [14]



Şekil 3.24. Yığma duvarın şişmesi ve duvarda oluşan yığma taşıyıcı eleman deformasyonu [14]

3.6.3. Malzeme Seçiminden Kaynaklı Hasarlar

Yığma Yapıların malzeme seçiminde gösterilen özen ile yığma yapının ömrü arasında doğru bir orantı vardır. Bulunduğu bölgeye uygun ve taşıma kapasitesi yüksek olan malzemeyle inşası yapılan bir yığma yapı kolayca deformasyona uğramamaktadır [43].

3.6.4. İşçilikten Kaynaklı Hasarlar

Yığma yapının inşası sırasında yapım aşamasındaki görevlilerin yaptığı ufak hatalar önemsiz görülse de bu hatalar zamanla yığma yapıya hasar verecek düzeye gelebilmektedir. Bu

yüzden en iyi şekilde inşası yapılan yığma yapının bile tam kapasite çalışması beklenilmemektedir [43].

3.6.5. Doğadan Kaynaklı Hasarlar

Doğal afetler (Deprem, sel, fırtına vb.) yığma yapıya direkt olarak ağır hasar verebildiği gibi ağır hasar vermeden yıllar boyunca ufak boyutlarda hasarlar da verebilmektedir. Bu boyutları önemsenmeyecek düzeyde olan hasarlar yığma yapının taşıma kapasitesini düşürmektedir. Taşıma kapasitesi azalan yığma yapı, kendi ağırlığını ve gelen yükleri taşıyamayacak hale gelene kadar deformasyona uğramaktadır. En sonunda yüklemelere dayanamayan yığma yapı göçme durumuna geçmektedir. Yığma yapılarda bu tarz çökmelerin önlenmesi için yığma yapının bakımının periyodik olarak yapılması gerekmektedir [43].



4. MODELLEME TEKNİKLERİ

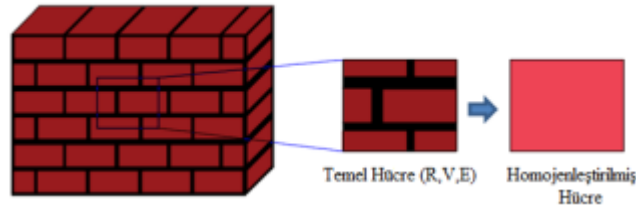
Yığma minareler genellikle, taş ve tuğla malzemesinin, harç malzemesinin yardımıyla birbirine bağlanmasıyla yapılmaktadır. Bu malzemelerin davranışları ise, matematiksel model oluşturularak belirlenmektedir. Bu model, esas model olarak da adlandırılmaktadır. Bu şekilde model oluşturmanın ana mantığı, lineer elastik davranıştan, yığma minarenin ileri davranışını belirleyebilecek çözüm yöntemleri oluşturmaktır. İleri davranışının tespiti sayesinde, yığma minarelerin güç tükenmesi durumuna geçmeden oluşacak çatlak ve kırılmalar belirlenebilmektedir. Böylece göçme durumu ve güvenlik seviyelerinin değerlendirilmesi yapılabilmektedir [27].

Yığma minarelerin mekanik özellikleri;

- Kullanılan malzemenin çeşitli oluşu ve malzeme özelliklerinin homojen olmayışı, yığma minarenin homojen özellik göstermemesine sebep olmaktadır.
- Kullanılan malzemelerin, basınç mukavemetleri, malzemenin çekme mukavemetlerine göre aşırı fazla olmaktadır.
- Eleman hasarları, yığma yapının rijitliğinin de etkisi olduğundan, analizlerde dikkate alınmalıdır.
- Mekanik davranış bazı durumlarda elastik, genelde ise lineer davranış göstermemektedir.

Yığma minarelerde malzeme idealleştirme yöntemleri;

- Kullanılan malzeme homojen kabul edilerek modellenmektedir (Şekil 4.1) [27].



Şekil 4.1. Yığma minare malzemesinin homojen duruma getirilmesi [27]

- Malzemeler, lineer-elastik davranış bakımından incelendiğinde, basınç durumlarında lineer-elastik davranış gösterdiği görülmüştür. Ancak çekme durumlarında ise böyle bir şeyden bahsetmemiz mümkün olmamaktadır.
- Malzemeler, çekme gerilmesini nispeten de olsa karşıladığı kabul edilerek, olası çatlakların konumları hakkında bilgi elde etmek mümkün olmaktadır.

- Lineer olmayan durumlarda ise Coulomb ve Drucker-Prager vb. yöntemler ile modellenmektedir.

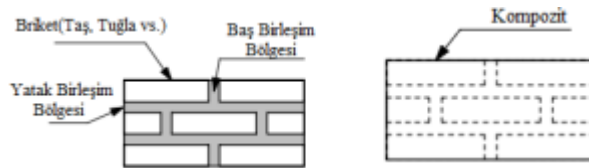
4.1.1. Yığma Minarenin Modellemesi ve İdealleştirmeleri

Yığma minareler, betonarme binalar gibi düz ve basit şekillerden ibaret olmadığından, modellenme aşamasında epey zorlanılmaktadır. Bu tür yapılar modellenirken, bütün elemanlar küçük parçalara bölünerek yani sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Yığma minarenin gerçeğe yakın modellenmesi aşamasında aşağıdaki durumların dikkate alınması gerekmektedir.

- Yığma minare geometrik şekillere bölünürken, olabildiğince basit hale getirilmelidir.
- Sonlu elemanlar sayısı artıka, analiz süresi uzamakta, bunun önüne geçmek için üç boyutlu modelleme yerine 2 boyutlu modelleme tercih edilebilir.
- Kabuk elemanlar, gerilme dağılımını yüzeysel gösterdiği için kalınlık boyunca gerilmeleri göstermemektedir. Bundan dolayı kabuk eleman seçilirken dikkatli olmak gerekmektedir.
- Geometrik olarak idealleştirme yapılırken, yığma minaredeki elemanların konumuna dikkat edilmelidir [27].

4.2. Makro Modelleme

Lourenço tarafından geliştirilen bu modelleme yönteminde, malzemenin homojen ve kompozit özellikler gösterdiği kabul edilmektedir. Modelleme yapılırken en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Doğrusal olmayan hesaplamalarda, bilinmeyen sayısı artıka çözüm süresi uzamaktadır. Bu durum modelin gerçeğe yakın sonuçlar vermesini sağlamakta ayrıca zamandan tasarruf sağlamaktadır (Şekil 4.2) [27].

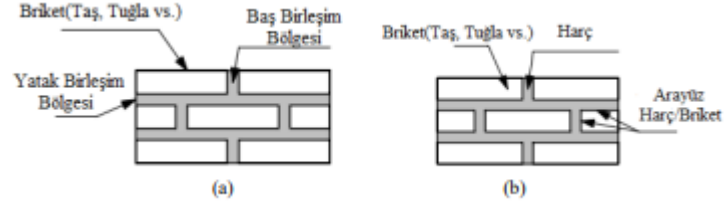


Şekil 4.2. Makro modelleme [27]

4.3. Detaylı Mikro Modelleme

En gelişmiş modelleme türlerinden biridir. Bu modelleme yönteminde, yığma minareyi oluşturan malzemelerin, çeşitli parametreleri (elastisite modülü, basınç dayanımı gibi) sisteme ayrı ayrı girilerek, modellemeler yapılmaktadır (Şekil 4.3). Detaylı veri girişi olduğundan, sonuçlar da

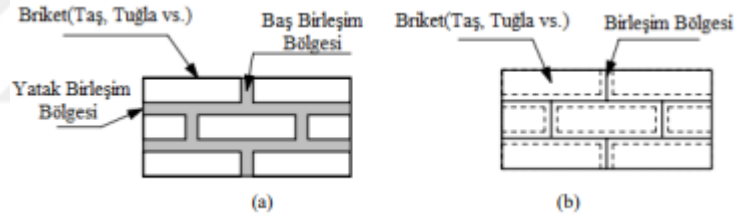
gerçeğe yakın olacak şekilde olmaktadır. Ancak detaylı modelleme aşırı zaman almakta, bundan dolayı büyük sistemlerde tercih edilmemektedir [27].



Şekil 4.3. Yığma yapıların modellenmesi, a) Yığma yapı, b) Detaylı mikro modelleme [27]

4.4. Basitleştirilmiş Mikro Modelleme

Basitleştirilmiş mikro modellemede, harçlar modellenmeyerek, harç modelinin yarı boyutu kadar yığma malzeme boyutu artırılması işlemi yapılmaktadır. Çatlak oluşumu ise yığma malzemelerin birbirine temas ettiği bölgelerde olduğu kabul edilmektedir (Şekil 4.4) [27].



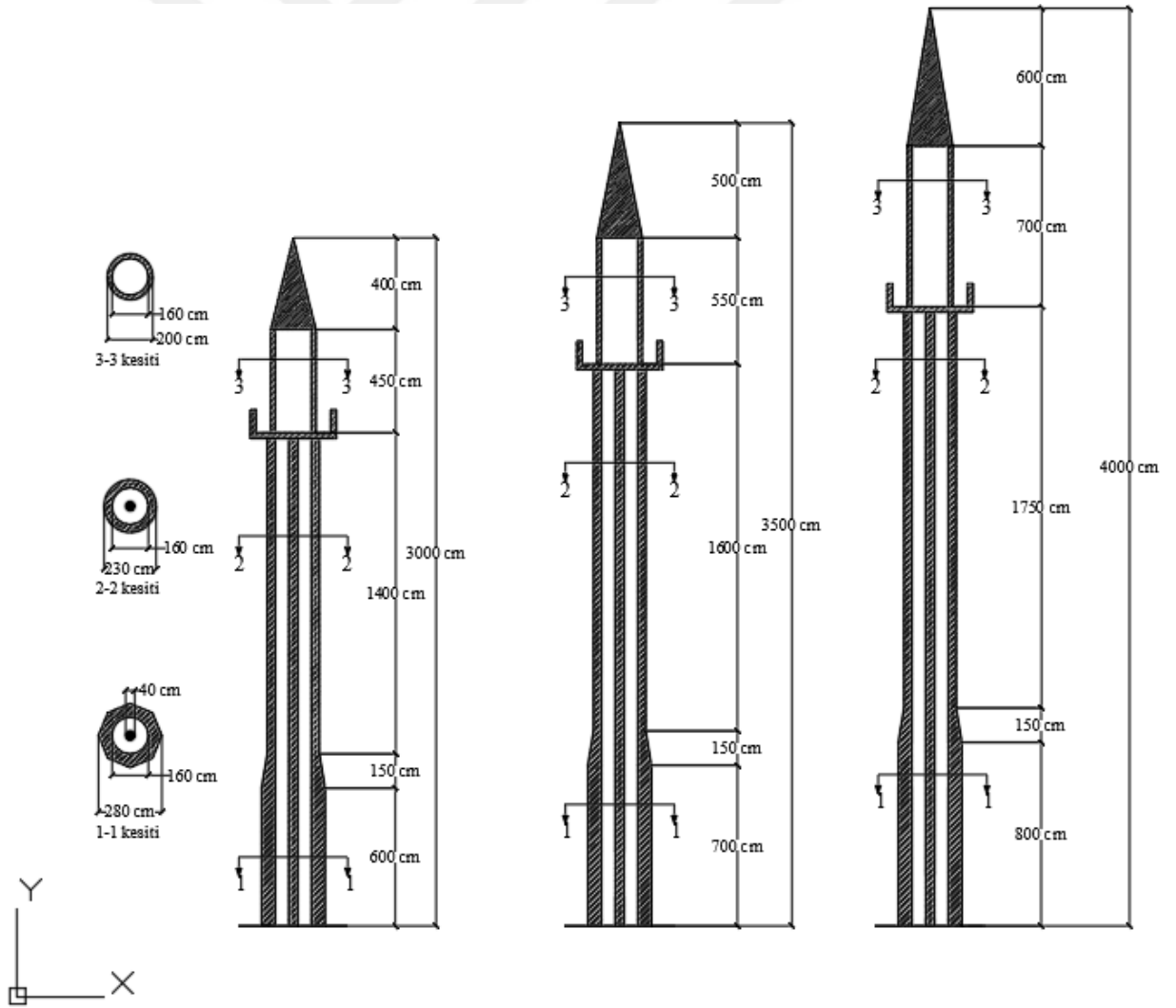
Şekil 4.4. Yığma yapıların modellenmesi, a) Yığma yapı, b) Basitleştirilmiş mikro modelleme [27]

5. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, yığma malzeme (taş) ile inşa edildiği varsayılan farklı yüksekliklere sahip üç yığma minarenin farklı deprem ivmeleri altında dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. İncelenen minarenin Elazığ il merkezinde olduğu varsayılmıştır. Minarenin üç boyutlu olarak modellenmesi ve dinamik analizleri SAP2000 [51] sonlu elemanlar programı ile yapılmıştır. Minare modellenirken makro modelleme yöntemi tercih edilmiştir.

5.1. Yığma Minare

Elazığ il merkezinde olduğu düşünülen minarelerin üç boyutlu olarak modellenmesinde dikkate alınan geometrik özellikler ve kesitler Şekil 5.1’de sunulmuştur.



Şekil 5.1. Yığma minarelerin geometrik özellikleri ve kesitleri

İncelenen yığma minareler 30 m, 35 m ve 40 m olmak üzere üç farklı yükseklikte olacak şekilde dikkate alınmıştır. Minarelerin üç farklı kesitten meydana geldiği düşünülmüştür.

Minare kesitlerinin dış çapları sırasıyla 2.80 m, 2.30 m ve 2.00 m iç çapı ise 1.60 m olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca, her üç minarede de 0.40 m çapında taş bir çekirdek kısmı olduğu (Osmanlı dönemine ait minarelerde kullanılan) düşünülmüştür. Merdivenler helezonik şekilde kaideden başlayarak şerefeye kadar uzanmakta olup minarenin çekirdek kısmı üzerinde yer almaktadır. Çekirdek kısmı ve merdivenler yatay rijitlikte minareye katkı sağlamaktadır. Minarelerde kullanılan helezon merdivenlerin basamak yükseklikleri 23-30 cm arasında (Tarihi yığma minarelerde) değişiklik gösterebilmektedir [8, 52]. Bu tez çalışmasında incelenen minarelerin merdiven basamak yükseklikleri 25 cm olarak alınmıştır. İncelenen yapılarda malzeme özelliklerinin mümkün olduğu kadar doğru belirlenmesi önemlidir. Çünkü sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri modellenen yapıya ne kadar doğru olarak atanırsa, oluşturulan sonlu eleman modeli modellenen gerçek yapıyı ve dolayısıyla yapı davranışını o derecede düzgün temsil edebilir. Tarihi yapıların malzeme özelliklerinin düzgün belirlenmesi bu yapılarda tahrip edici sonuçlara yol açabileceğinden oldukça zordur. Bu çalışmada, sonlu eleman modelleri oluşturulan tarihi yığma minareler için ilgili literatürde daha önceden yapılmış çalışmalar dikkate alınarak malzeme özellikleri seçilmiştir. Çalışmamızda yığma minareye ait malzeme özellikleri Tablo 5.1'de sunulmuştur [1, 53].

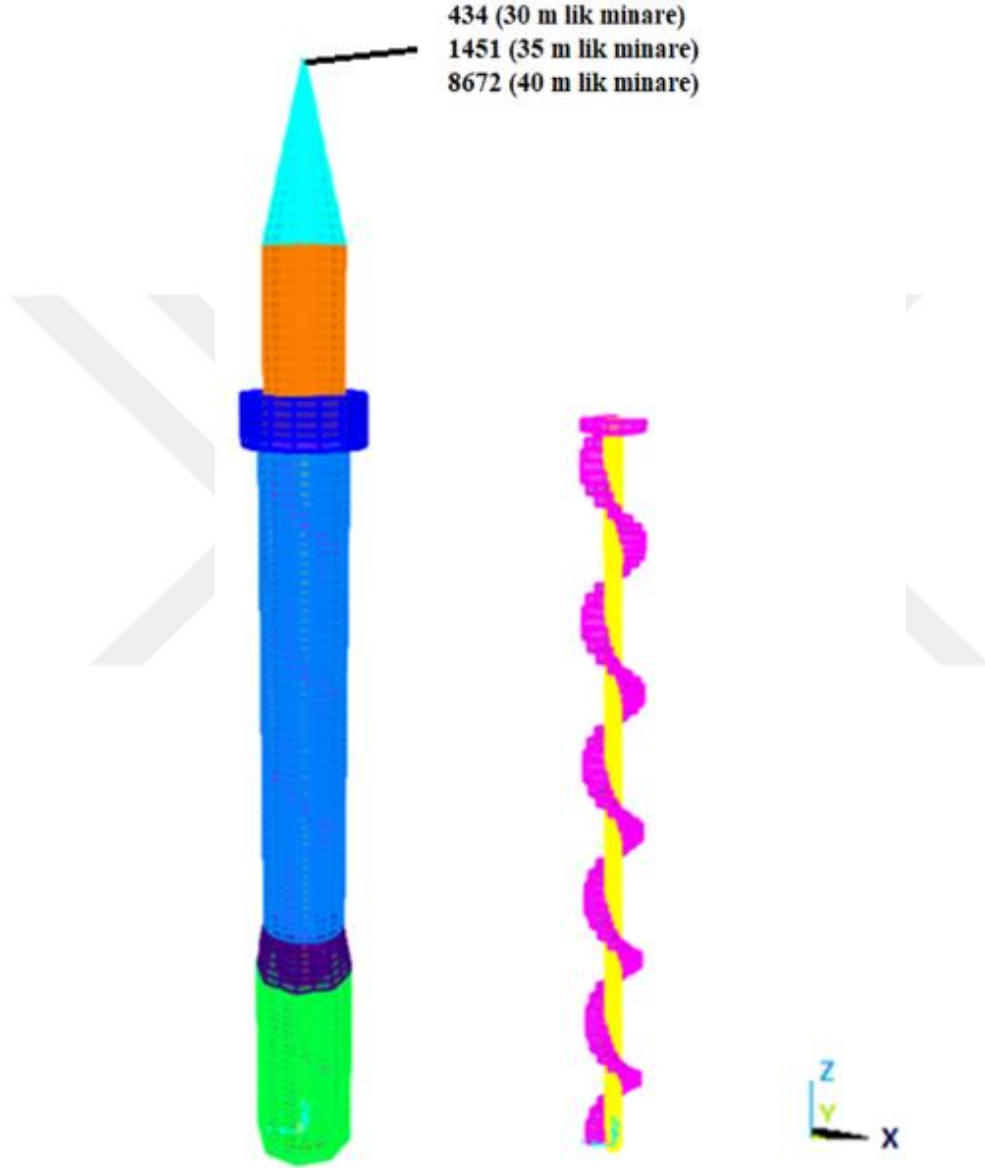
Tablo 5.1. Yığma minare için dikkate alınan malzeme özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)
Taş	10.000	0.2	2200

Yığma minarelerin üç boyutlu sonlu eleman modelleri SAP2000 sonlu elemanlar programı yardımıyla oluşturulmuştur. Minarelerin modellenmesinde makro modelleme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem büyük yığma yapıların modellenmesinde çoğunlukla tercih edilmektedir. Minarelerin sonlu elemanlar ağ modelinde 30 m, 35 m ve 40 m yükseklik için sırasıyla 6904 adet düğüm noktası ve 4880 adet sekiz düğüm noktalı katı eleman, 7940 adet düğüm noktası ve 5595 adet sekiz düğüm noktalı katı eleman, 8910 adet düğüm noktası ve 6245 adet sekiz düğüm noktalı katı eleman kullanılmıştır. Minarelerin zeminle temas eden bölgeleri ise ankastre mesnetli olarak dikkate alınmıştır.

İncelenen yığma minarelerin üç boyutlu sonlu eleman modelleri 30 m, 35 m ve 40 m yükseklikler için Şekil 5.2'de verilmiştir. Bu modelin yanında çekirdek kısmı ve helezon

merdivenlerde gösterilmiştir. Tepki büyüklüklerinin incelendiği düğüm noktaları her üç yığma minare modeli için minare külahının en üstünde seçilmiştir. Bu düğüm noktaları 30 m, 35 m ve 40 m lik minarelerde sırasıyla 435, 1451 ve 8672'dir.



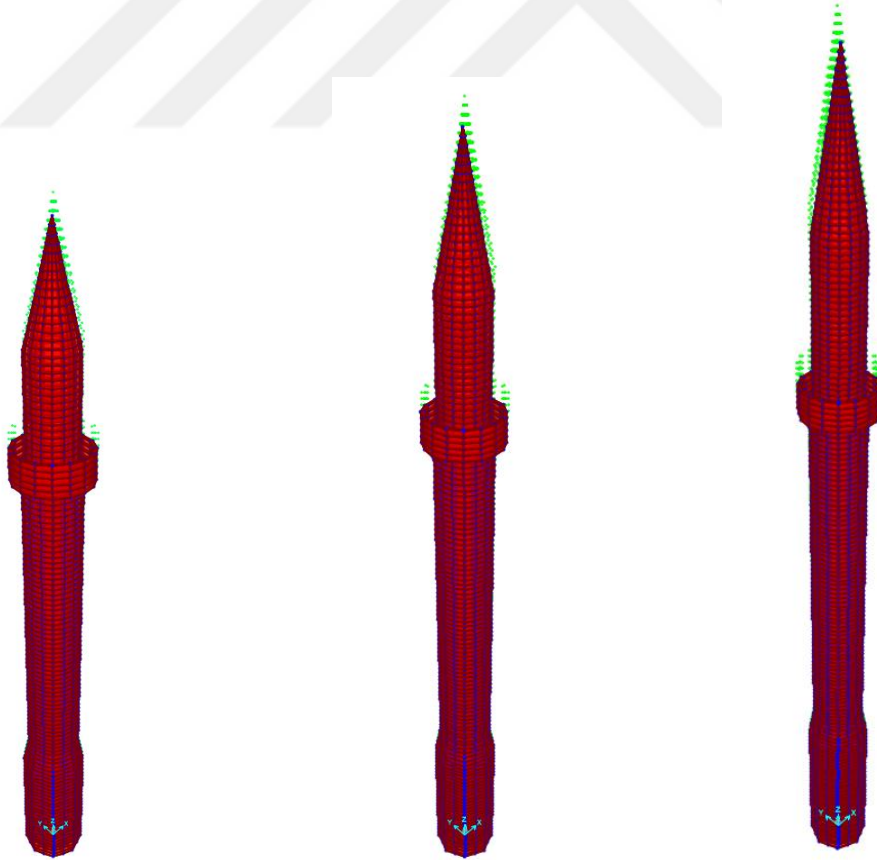
Şekil 5.2. 30 m'lik yığma minarenin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli, çekirdek kısmı ve merdivenler

6. SAYISAL ÇALIŞMA

Bu bölümde, üç boyutlu sonlu eleman modelleri hazırlanmış ve yığma malzeme (taş) ile inşa edildiğini kabul ettiğimiz farklı yüksekliğe sahip üç yığma minare sayısal uygulama için dikkate alınmıştır. İncelenen yığma minarelerin öncelikle kendi ağırlığı altında statik analizleri yapılmıştır. Minarelerin dinamik parametrelerini elde etmek amacıyla modal analiz yöntemi kullanılmıştır. Farklı yüksekliklere sahip üç minarenin de Elazığ il merkezinde olduğu varsayılmıştır. Minarelerin dinamik analizleri için ise üç farklı deprem ivmesi (1999 Kocaeli, 2003 Bingöl ve 2011 Van) dikkate alınmıştır. Üç minare için dinamik analizler sonucunda elde edilen gerilme grafikleri ve yer değiştirme değerleri sunulmuştur.

6.1. Yığma Minarelerin Statik Analizi

Yığma minarelerin SAP2000 programı yardımı ile sonlu eleman modelleri hazırlanarak kendi ağırlığı altında statik analizleri yapılmıştır. Statik analiz sonunda farklı yüksekliğe sahip yığma minarelerin şekil değiştirmiş görüntüleri Şekil 6.1’de verilmiştir.



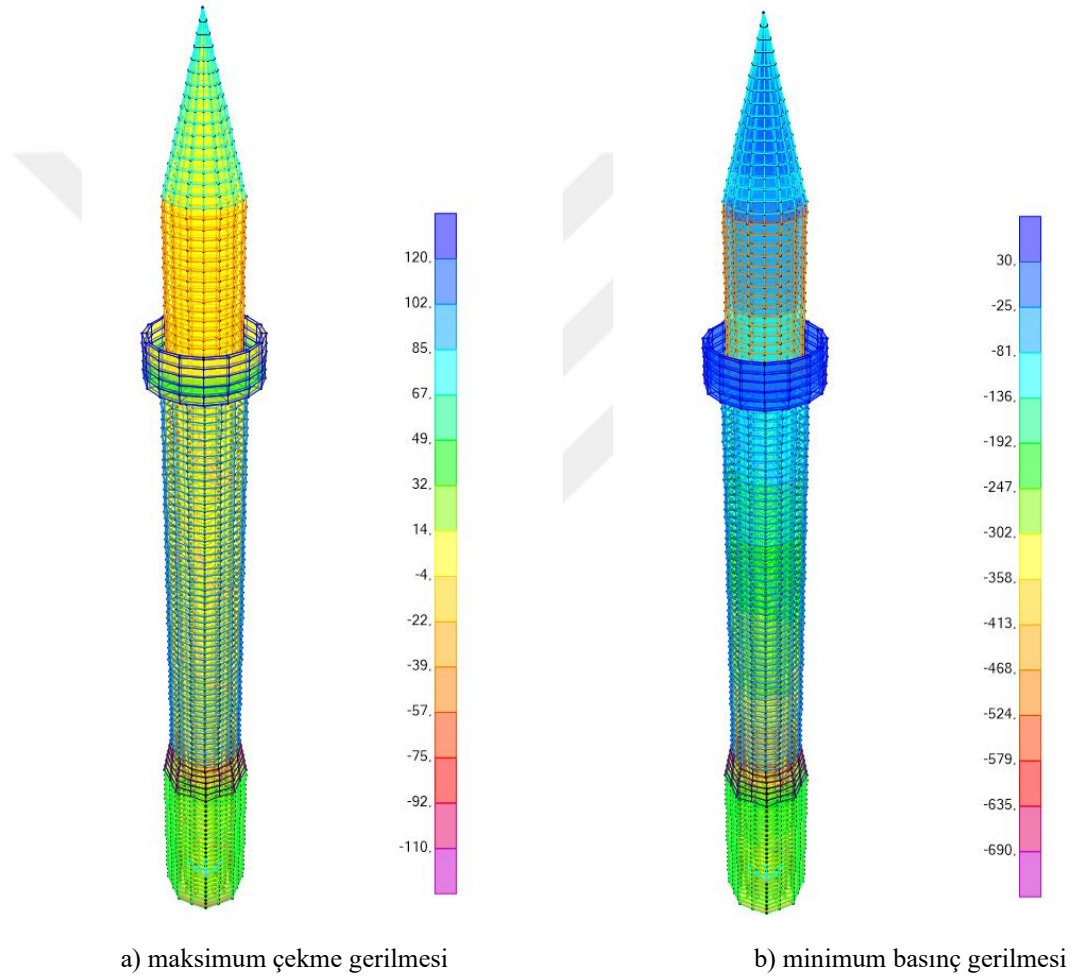
a) 30 m yükseklik

b) 35 m yükseklik

c) 40 m yükseklik

Şekil 6.1. Farklı yüksekliklere sahip yığma minarelerin ölü yükler altında şekil değiştirmiş üç boyutlu görüntüsü

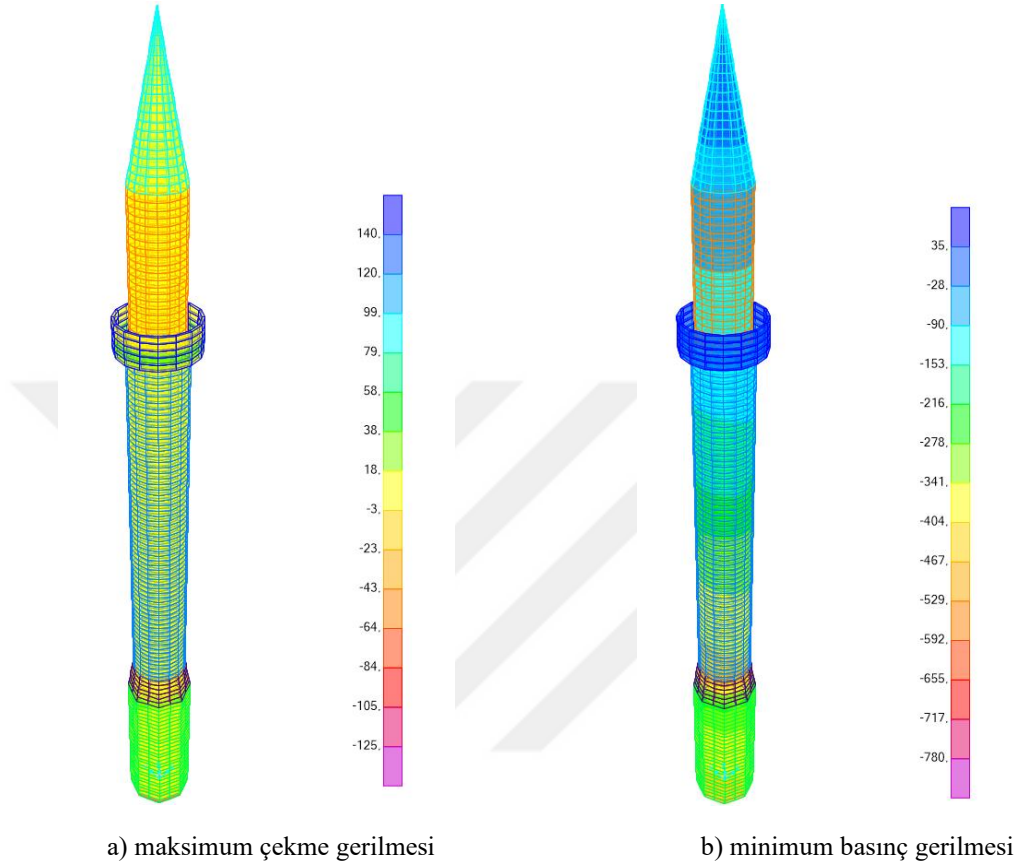
Analizler sonucunda minarelerde meydana gelen maksimum yer değiştirme değerleri 30 m, 35 m ve 40 m yükseklikteki minareler için düşey ekseninde (z ekseni) sırasıyla 0.61 mm, 0.81 mm ve 1.03 mm olarak elde edilmiştir. Düşey yükler etkisi ile 30 m lik minarede oluşan maksimum çekme ve minimum bası gerilme grafikleri ve elde edilen değerler Şekil 6.2’de verilmiştir. Statik analiz sonucu 30 m lik minarede meydana gelen maksimum çekme gerilmesi 118.39 kPa, maksimum bası gerilmesi ise 683.83 kPa olarak bulunmuştur.



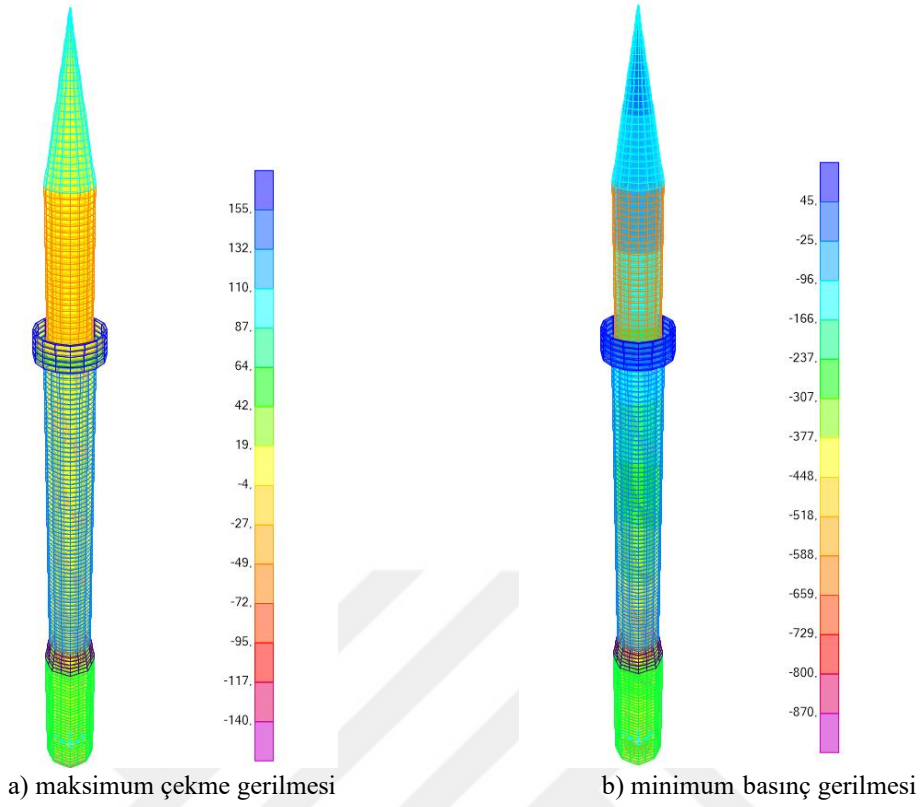
Şekil 6.2. Statik analiz sonucunda 30 m’lik yığma minarede meydana gelen gerilme kontur diyagramları (kPa)

Düşey yükler etkisi ile 35 m lik minarede oluşan maksimum çekme ve minimum bası gerilme grafikleri ve elde edilen değerler Şekil 6.3’de verilmiştir. Statik analiz sonucu 35 m lik minarede meydana gelen maksimum çekme gerilmesi 135.94 kPa, maksimum bası gerilmesi ise 778.56 kPa olarak bulunmuştur. 40 m lik minarede oluşan maksimum bası ve minimum çekme grafikleri ve elde edilen değerler ise Şekil 6.4’de verilmiştir. Statik analiz sonucu 40 m lik minarede

meydana gelen maksimum çekme gerilmesi 152.40 kPa, maksimum basınç gerilmesi ise 869.40 kPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.3. Statik analiz sonucunda 35 m'lik yığma minarede meydana gelen gerilme kontur diyagramları (kPa)



Şekil 6.4. Statik analiz sonucunda 40 m'lik yığma minarede meydana gelen gerilme kontur diyagramları (kPa)

6.2. Yığma Minarelerin Modal Analizleri

Dinamik karakteristiklerini elde etmek için minarelerin SAP2000 programında modal analizleri yapılmıştır. Minarelerin dinamik karakteristikleri ilk 40 mod için hesaplanmıştır. Hesaplanan kütle katılım oranı ilk 30 mod için minarenin toplam kütlelerinin %90'ından fazladır. 30 m, 35 m ve 40 m lik minareler için modal analizden elde edilen ilk 5 mod sırasıyla Tablo 6.1 – Tablo 6.3'de verilmiştir.

Tablo 6.1. Serbest titreşim periyotları ve kütle katılım oranları (30 m lik minare)

Modlar	Periyot (s)	Toplam Kütle Katılım Oranı	
		(x eksen)	(y eksen)
1	0.65004	0.48112	0.01590
2	0.649857	0.49701	0.49689
3	0.131895	0.67586	0.52872
4	0.131819	0.70772	0.70749
5	0.066233	0.70772	0.70749

Tablo 6.2. Serbest titreşim periyotları ve kütle katılım oranları (35 m lik minare)

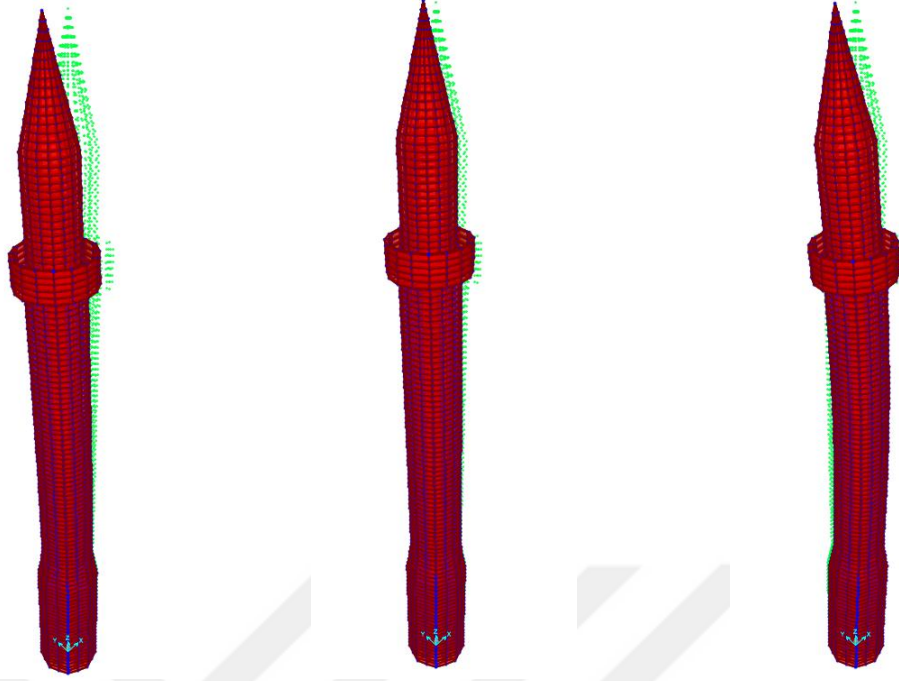
Modlar	Periyot (s)	Toplam Kütle Katılım	
		Oranı (x eksen)	Oranı (y eksen)
1	0.856248	0.27713	0.21485
2	0.85598	0.49194	0.4919
3	0.175229	0.6838	0.50811
4	0.175174	0.69996	0.69998
5	0.07746	0.78661	0.70266

Tablo 6.3. Serbest titreşim periyotları ve kütle katılım oranları (40 m lik minare)

Modlar	Periyot (s)	Toplam Kütle Katılım	
		Oranı (x eksen)	Oranı (y eksen)
1	1.079928	0.3502	0.13464
2	1.079677	0.4848	0.48478
3	0.226539	0.63656	0.53814
4	0.2264	0.6899	0.68992
5	0.100519	0.76121	0.7115

Analiz sonuçları incelendiğinde farklı yüksekliğe sahip minareler için elde edilen kütleli olarak serbest titreşim hareketine katılan etkin modların, birinci ve ikinci modlar olduğu görülebilir. 30 m lik minare için elde edilen periyot değerleri sırasıyla 0.65004 s ve 0.64985 s olarak elde edilmiştir. 35 m lik minare için elde edilen periyot değerleri sırasıyla 0.85624 s ve 0.85598 s olarak bulunmuştur. 40 m lik minare için elde edilen periyot değerleri ise sırasıyla 1.07992 s ve 1.07967 s olarak elde edilmiştir.

Minareler için elde edilen ilk 3 doğal titreşim mod şekilleri ve frekans değerleri Şekil 6.5 - Şekil 6.7’de sunulmuştur. İlk 3 mod incelendiğinde bu modların yatay yönde (x ve y doğrultusunda) olduğu görülmektedir.

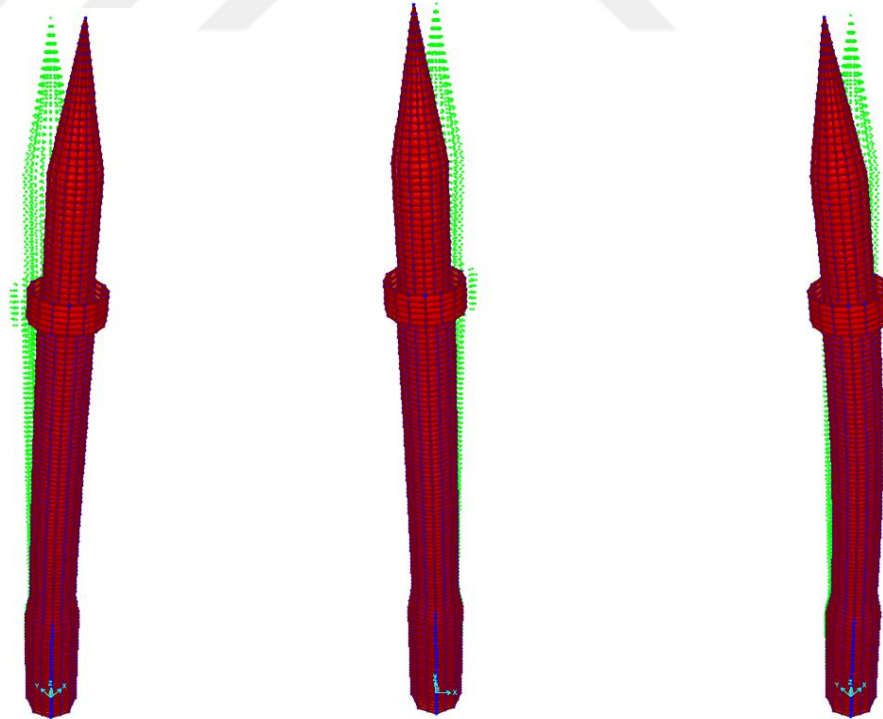


a. 1.Mod ($f_1 = 1.5384$ Hz)

b. 2.Mod ($f_2 = 1.5388$ Hz)

c. 3.Mod ($f_3 = 7.5818$ Hz)

Şekil 6.5. 30 m lik yığma minarenin mod şekilleri ve frekans değerleri

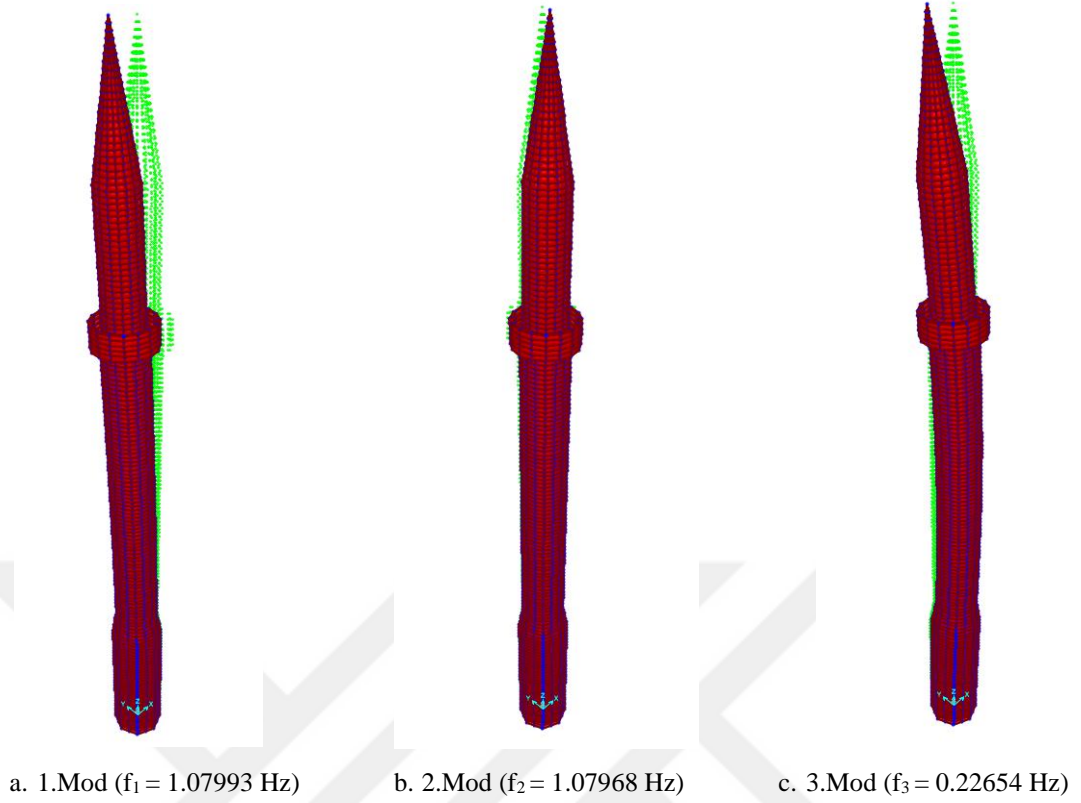


a. 1.Mod ($f_1 = 1.16789$ Hz)

b. 2.Mod ($f_2 = 1.16825$ Hz)

c. 3.Mod ($f_3 = 5.70683$ Hz)

Şekil 6.6. 35 m lik yığma minarenin mod şekilleri ve frekans değerleri

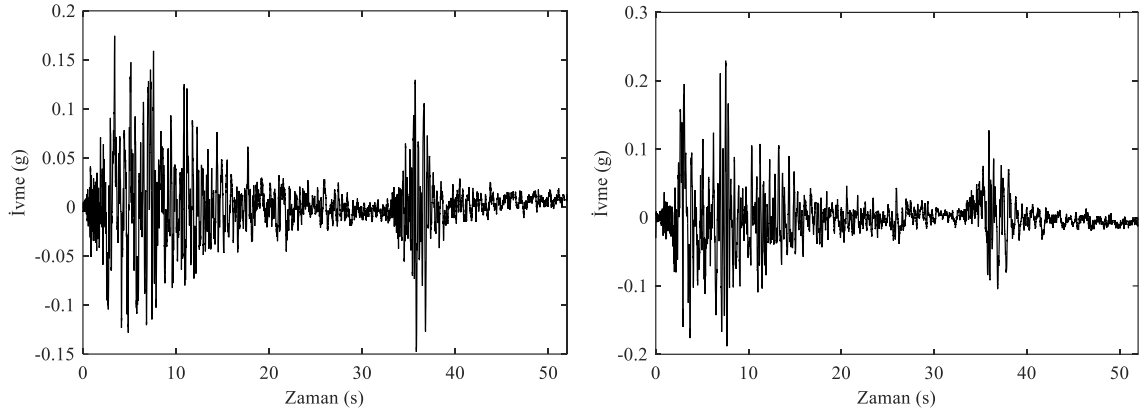


Şekil 6.7. 40 m lik yığma minarenin mod şekilleri ve frekans değerleri

6.3. Yığma Minarelerin Dinamik Analizleri

Yığma minarelerin dinamik analizlerinde 1999 Kocaeli, 2003 Bingöl ve 2011 Van depremlerinin ivme kayıtları dikkate alınmıştır. Dinamik analizlerde depremlerin doğu-batı bileşenleri minarelere x doğrultusunda, kuzey-güney bileşenleri ise minarelere y doğrultusunda uygulanmıştır. Tüm minarelerin temel ortamları rijit olarak kabul edilmiştir. İncelenen minarelerin Elazığ il merkezinde bulunduğu düşünülerek dinamik analizlerde kullanılan tüm deprem ivmeleri deprem yer hareketi düzeyi DD-2 ye göre (50 yılda aşılma olasılığı %10, tekrarlanma periyodu 475 yıl) ölçeklendirilmiştir. Deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi işleminde SeismoArtif yazılımı kullanılmıştır [54]. Analizlerde integrasyon zaman adımı 0.01 s olarak alınmıştır. Dinamik analizler için HHT algoritması kullanılmıştır. Analizlerde Rayleigh tipi sönüm kullanılmış ve sönüm oranı %5 olarak dikkate alınmıştır.

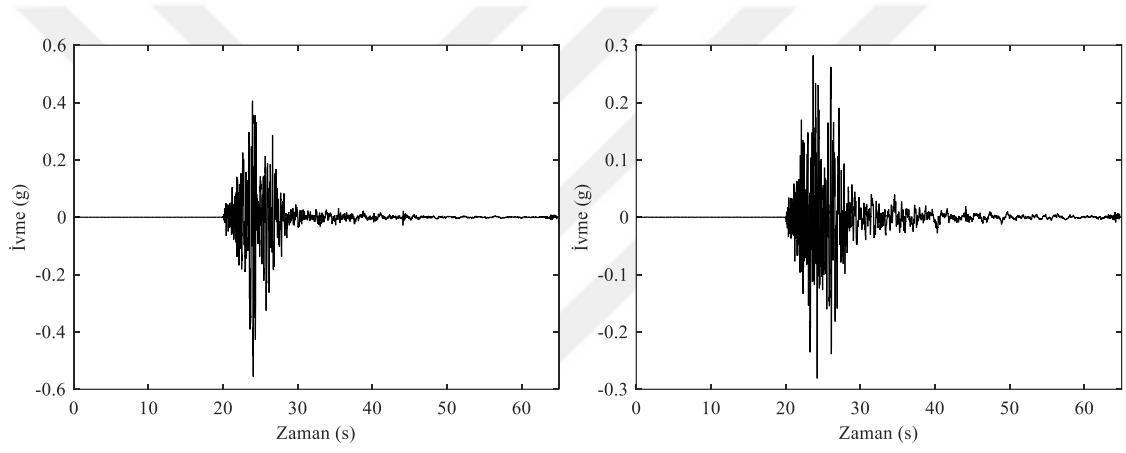
Dinamik analizlerde dikkate alınan Kocaeli, Bingöl ve Van depremlerinin ivme kayıtları sırasıyla Şekil 6.8 - Şekil 6.10'da sunulmuştur. Dinamik analizlerde tüm deprem ivmelerinin kayıt süreleri kısaltılmadan kullanılmıştır. Yapılan dinamik analizlerde yapının kendi ağırlığı deprem ivmeleri ile birlikte alınmıştır. Dinamik analizler sonucunda minarelerde meydana gelen maksimum ve minimum gerilme diyagramları ile minarelerin külahının tepesinde yer alan işaretli düğüm noktalarının yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir.



a. Kuzey-güney bileşeni

b. Doğu-batı bileşeni

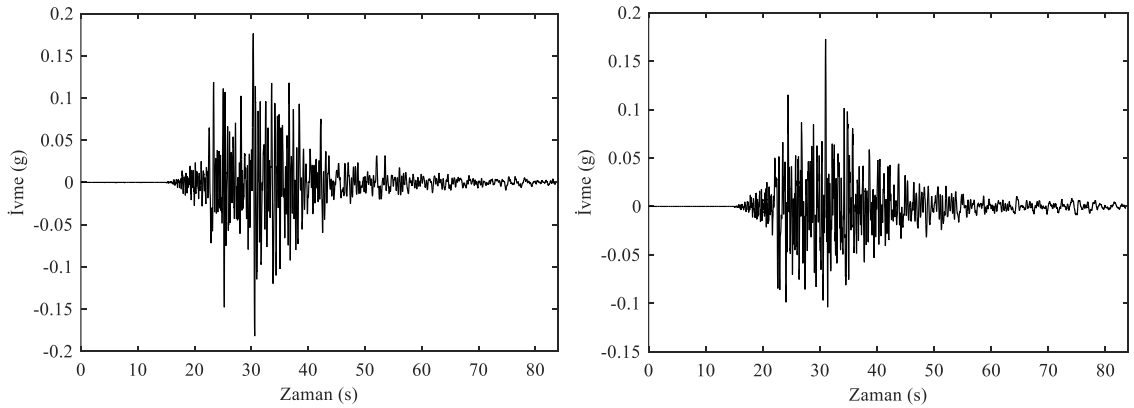
Şekil 6.8. 1999 Kocaeli depremi ivme grafikleri



a. Kuzey-güney bileşeni

b. Doğu-batı bileşeni

Şekil 6.9. 2003 Bingöl depremi ivme grafikleri



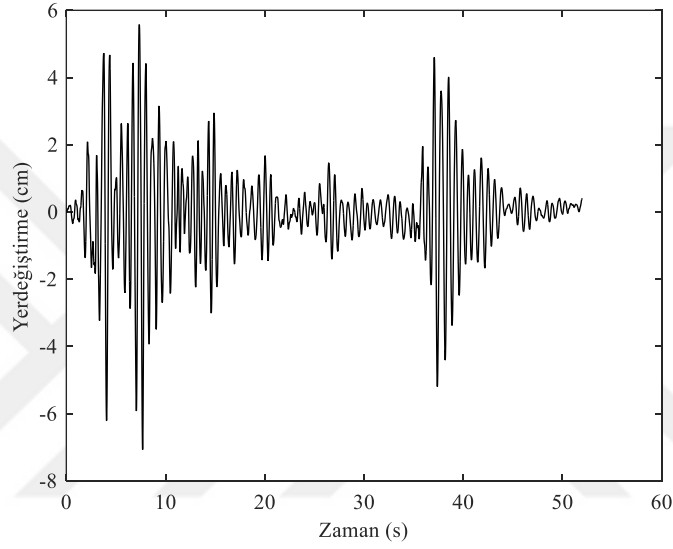
a. Kuzey-güney bileşeni

b. Doğu-batı bileşeni

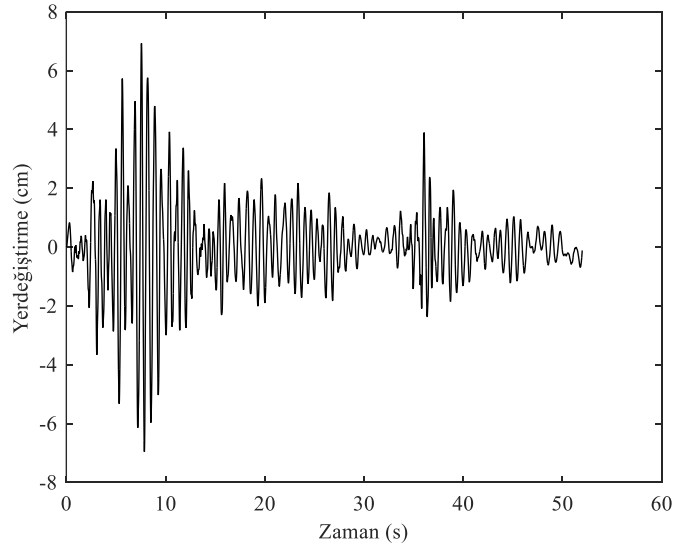
Şekil 6.10. 2011 Van depremi ivme grafikleri

6.4. 30 m lik Yığma Minare için Dinamik Analiz Sonuçları (1999 Kocaeli Depremi)

Zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde 1999 Kocaeli depremi altında 30 m lik yığma minarenin üç boyutlu modeli üzerinde işaretlenmiş 434 nolu düğüm noktası için x ve y doğrultularında elde edilen yer değiştirme grafikleri Şekil 6.11’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde x ve y doğrultularındaki mutlak maksimum yer değiştirme değerlerinin sırasıyla 7.07 cm ve 6.96 cm olduğu görülebilir.



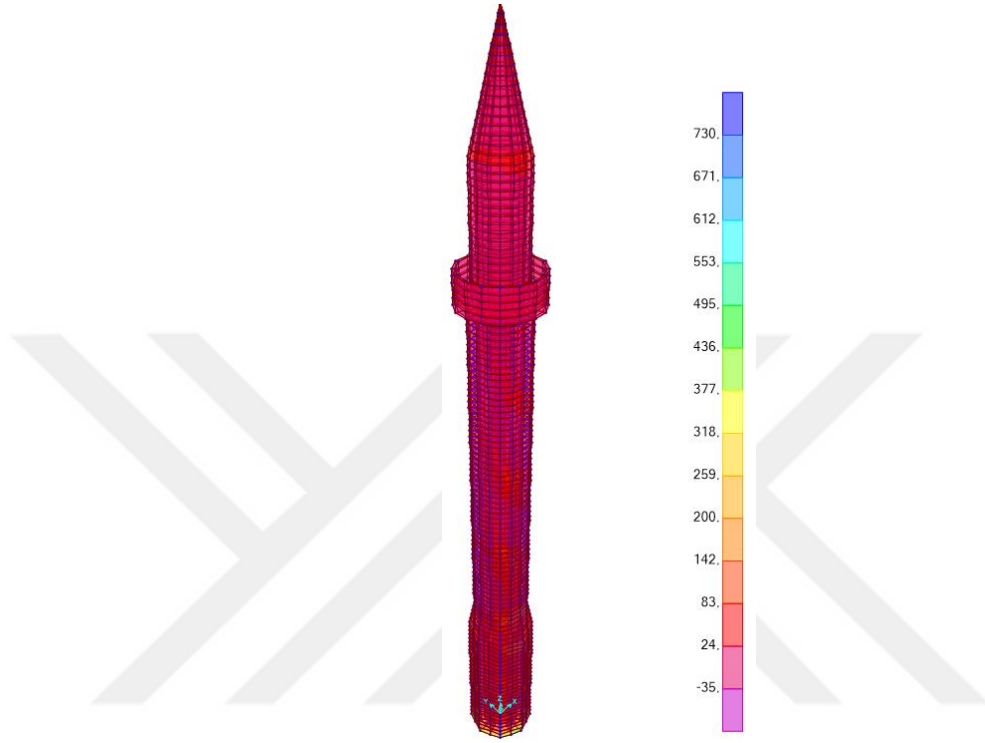
a. x doğrultusu



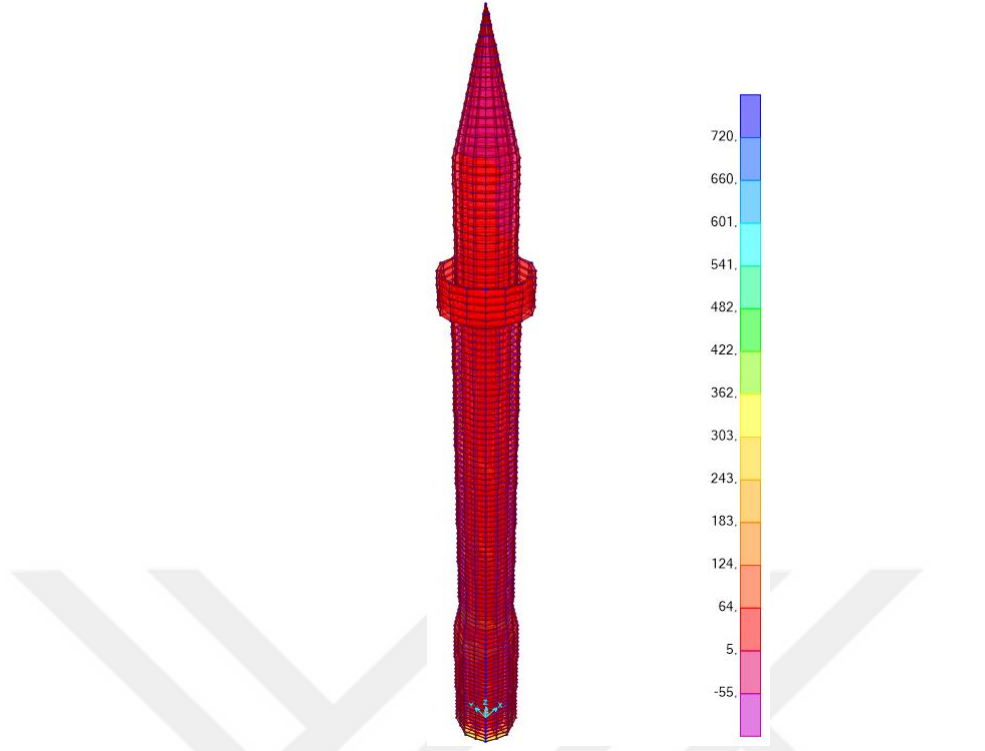
b. y doğrultusu

Şekil 6.11. 30 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için 434 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği

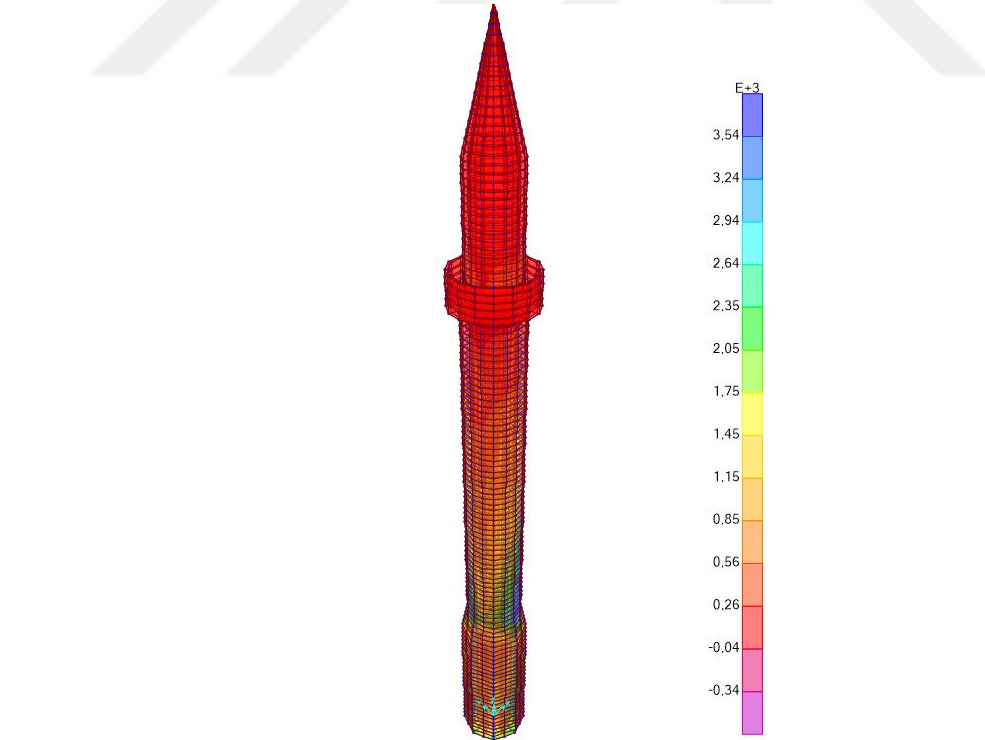
1999 Kocaeli depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu Envelope max. için elde edilen normal gerilme diyagramları Şekil 6.12 - Şekil 6.14’de verilmiştir. Analizler sonucunda maksimum çekme gerilmesi 3531.109 kPa, olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.12. 30 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

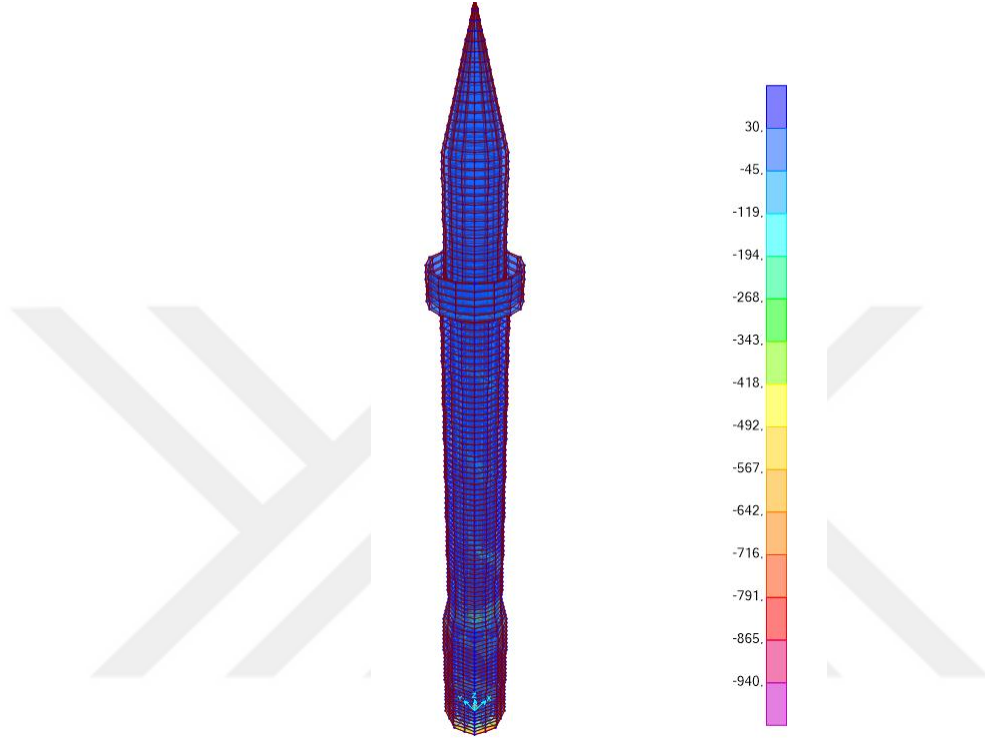


Şekil 6.13. 30 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

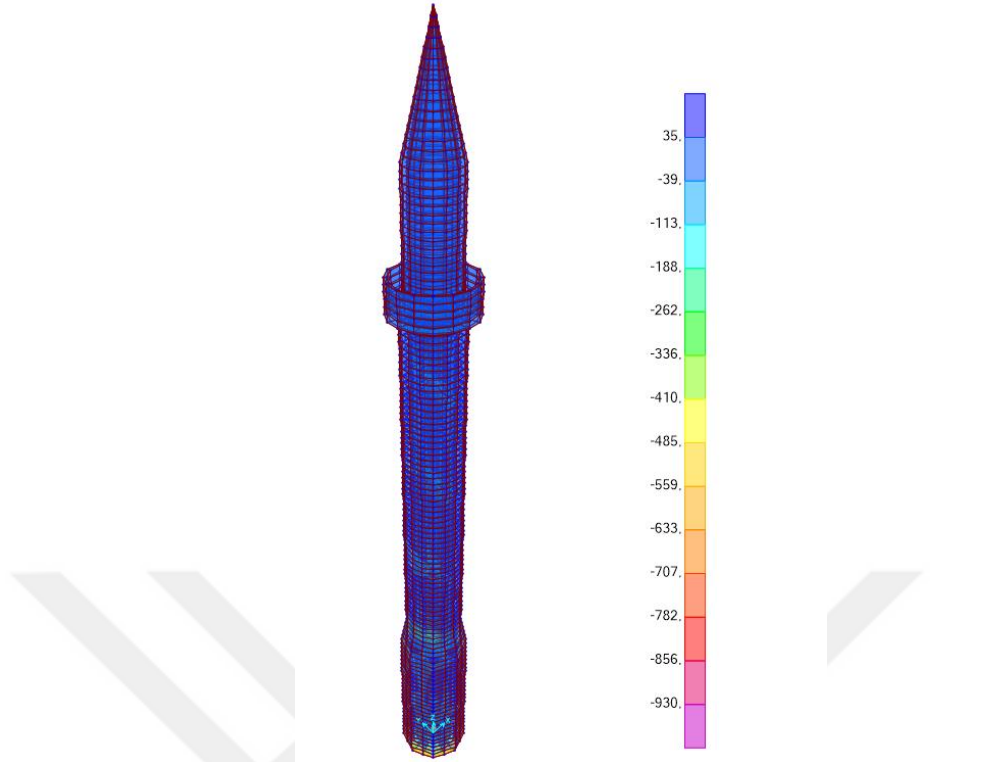


Şekil 6.14. 30 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

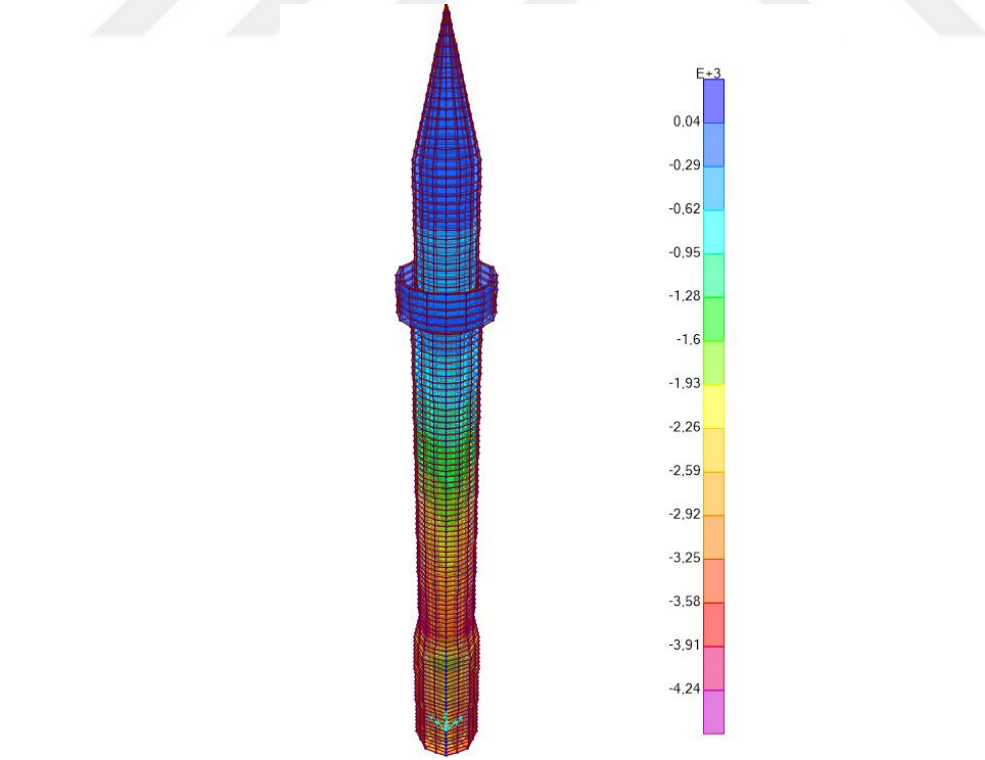
1999 Kocaeli depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu Envelope min. için elde edilen normal gerilme diyagramları Şekil 6.15 - Şekil 6.17’de verilmiştir. Analizler sonucunda maksimum basınç gerilmesi 4234.685 kPa, olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.15. 30 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



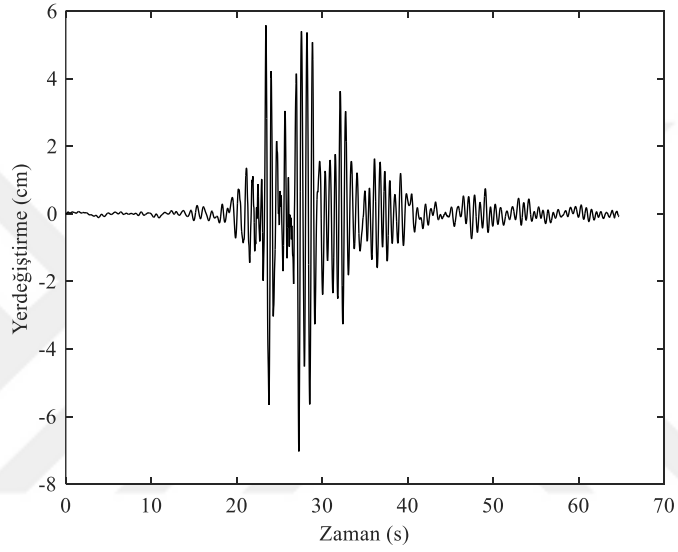
Şekil 6.16. 30 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



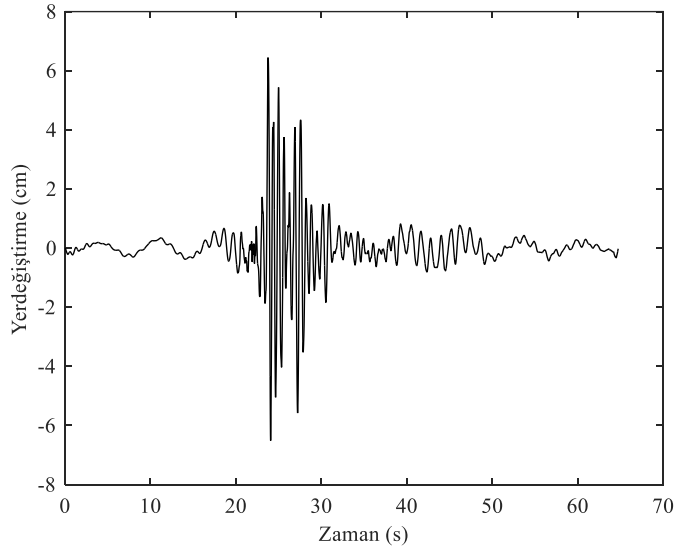
Şekil 6.17. 30 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)

6.5. 30 m lik Yığma Minare için Dinamik Analiz Sonuçları (2003 Bingöl Depremi)

Zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde 2003 Bingöl depremi altında 30 m lik yığma minarenin üç boyutlu modeli üzerinde işaretlenmiş 434 nolu düğüm noktası için x ve y doğrultularında elde edilen yer değiştirme grafikleri Şekil 6.18'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde x ve y doğrultularındaki mutlak maksimum yer değiştirme değerlerinin sırasıyla 7.03 cm ve 6.51 cm olduğu görülebilir.



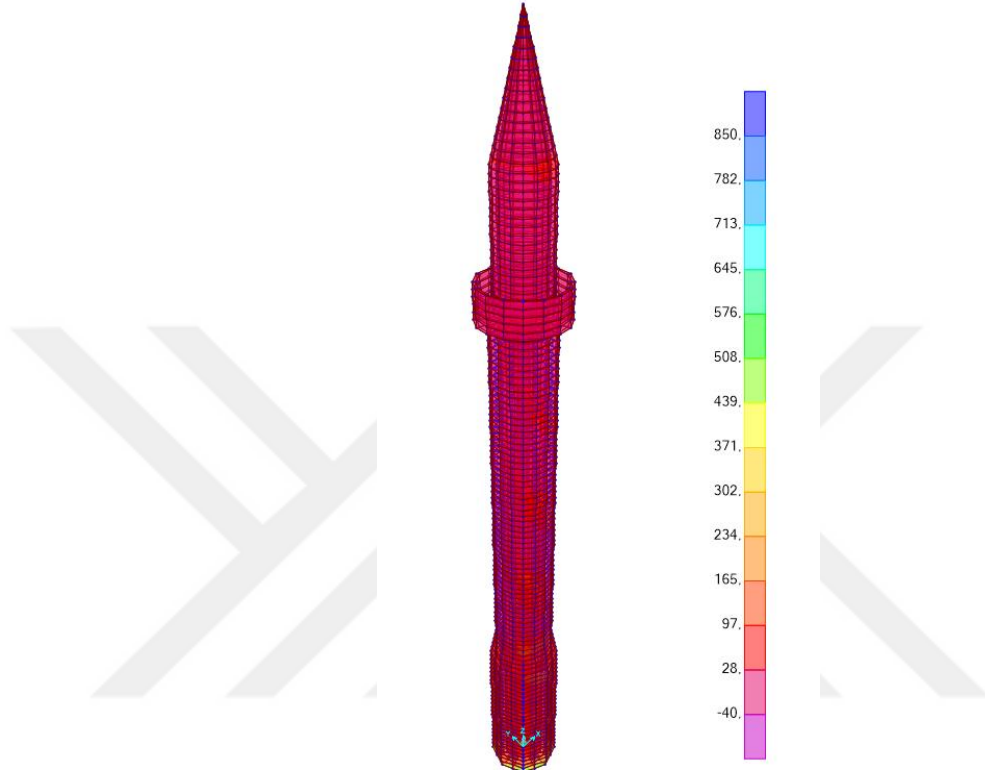
a. x doğrultusu



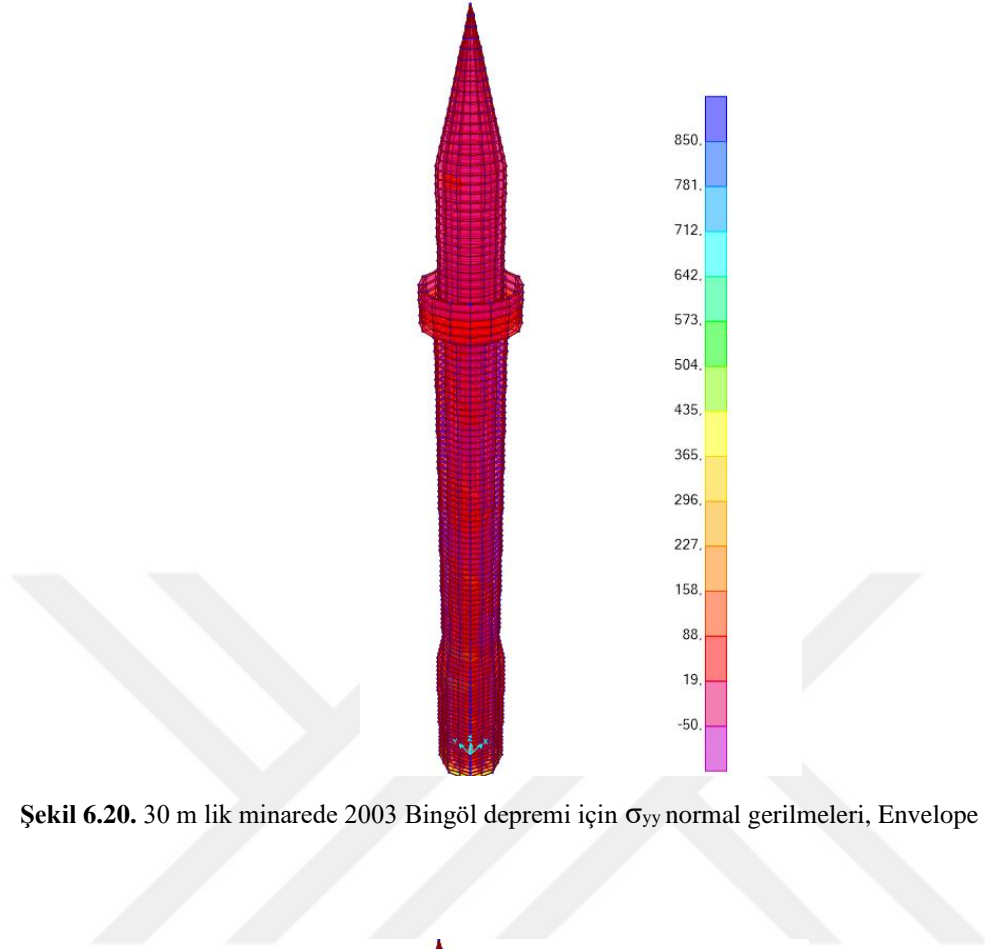
b. y doğrultusu

Şekil 6.18. 30 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için 434 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği

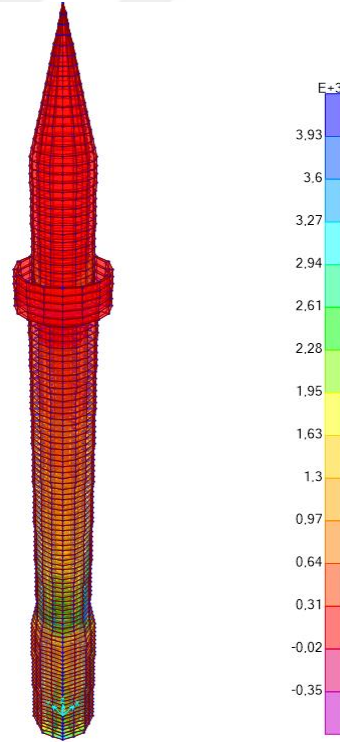
2003 Bingöl depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu Envelope max. için elde edilen normal gerilme diyagramları Şekil 6.19 - Şekil 6.21’de verilmiştir. Analizler sonucunda maksimum çekme gerilmesi 3920.822 kPa, olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.19. 30 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

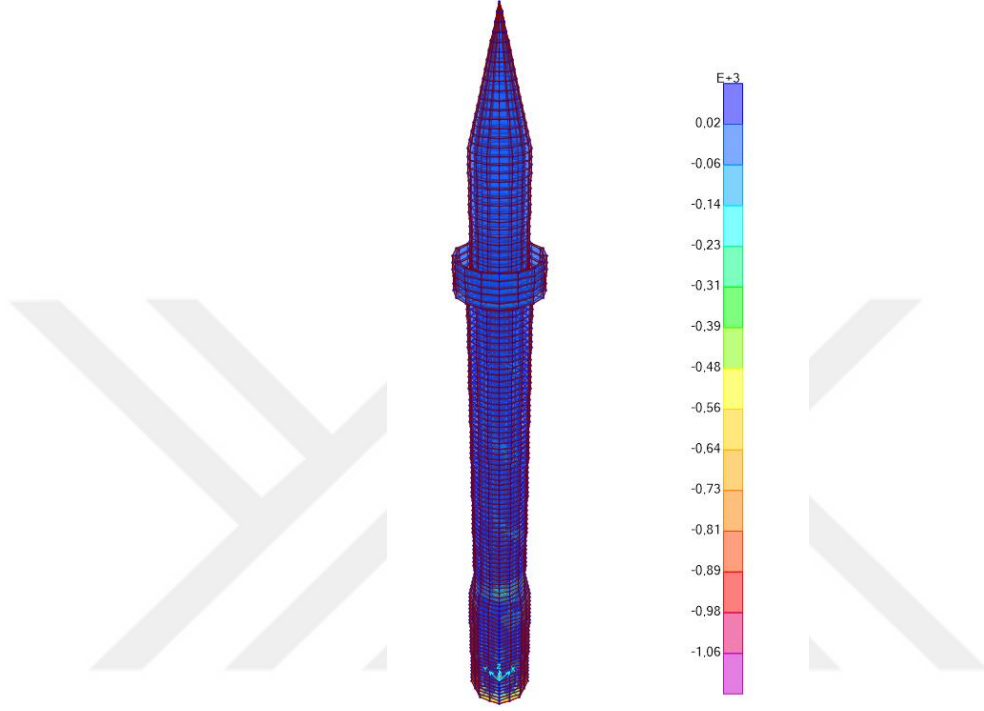


Şekil 6.20. 30 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

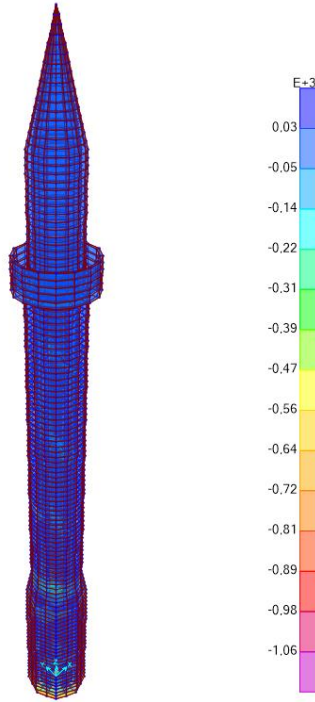


Şekil 6.21. 30 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

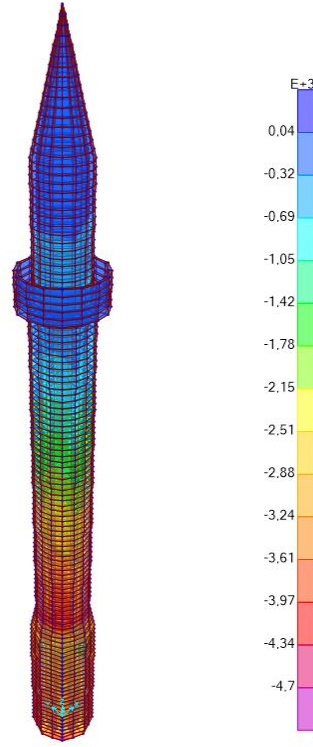
2003 Bingöl depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu Envelope min. için elde edilen normal gerilme diyagramları Şekil 6.22 - Şekil 6.24’de verilmiştir. Analizler sonucunda maksimum basınç gerilmesi 4680.720 kPa, olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.22. 30 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



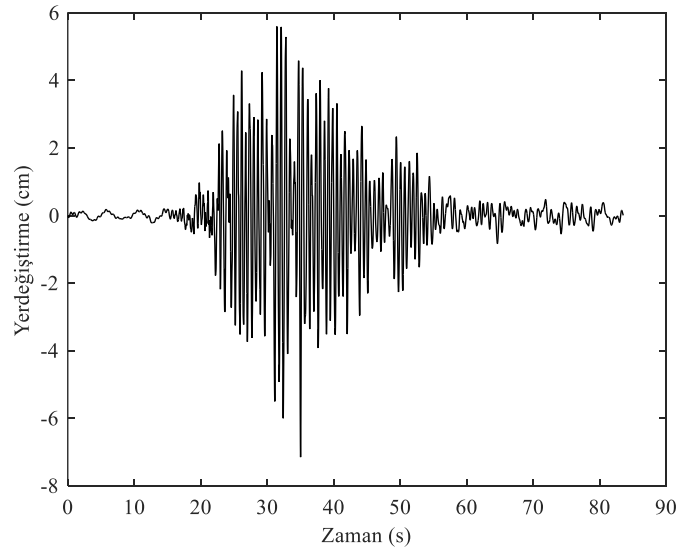
Şekil 6.23. 30 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)

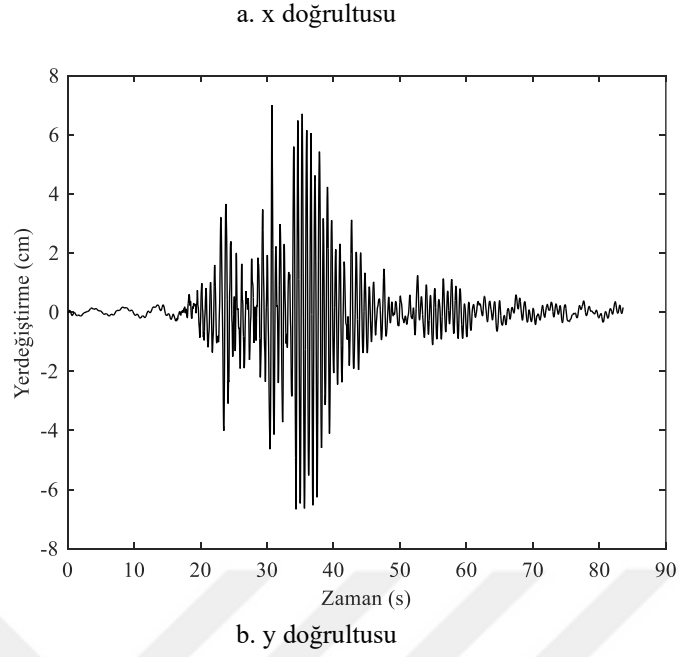


Şekil 6.24. 30 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)

6.6. 30 m lik Yığma Minare için Dinamik Analiz Sonuçları (2011 Van Depremi)

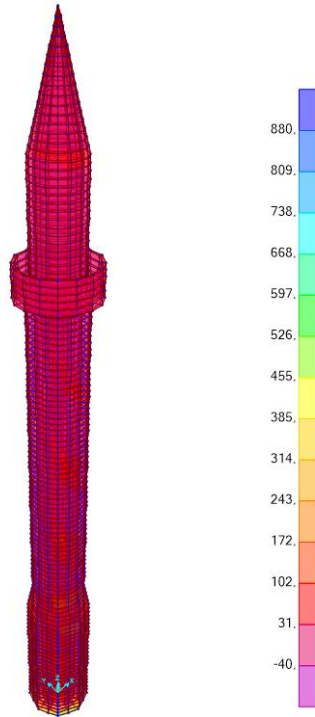
Zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde 2011 Van depremi altında 30 m lik yığma minarenin üç boyutlu modeli üzerinde işaretlenmiş 434 nolu düğüm noktası için x ve y doğrultularında elde edilen yerdeğiştirme grafikleri Şekil 6.25’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde x ve y doğrultularındaki mutlak maksimum yerdeğiştirme değerlerinin sırasıyla 7.15 cm ve 7 cm olduğu görülebilir.



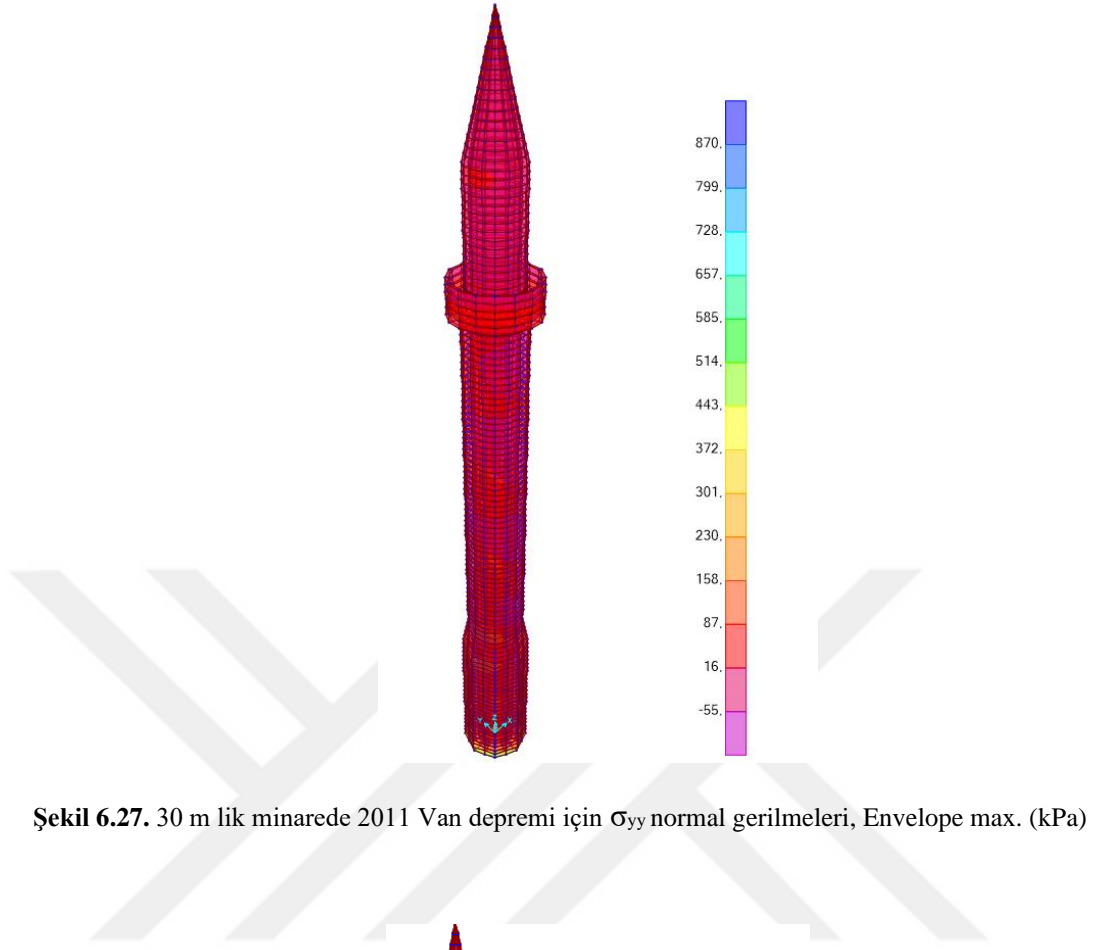


Şekil 6.25. 30 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için 434 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği

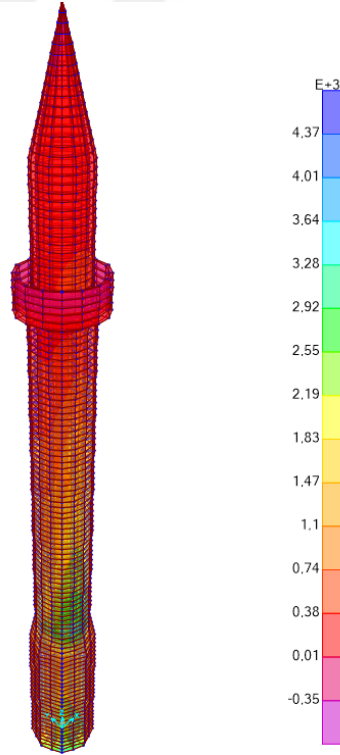
2011 Van depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu Envelope max. için elde edilen normal gerilme diyagramları Şekil 6.26 - Şekil 6.28'de verilmiştir. Analizler sonucunda maksimum çekme gerilmesi 4360.831 kPa, olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.26. 30 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

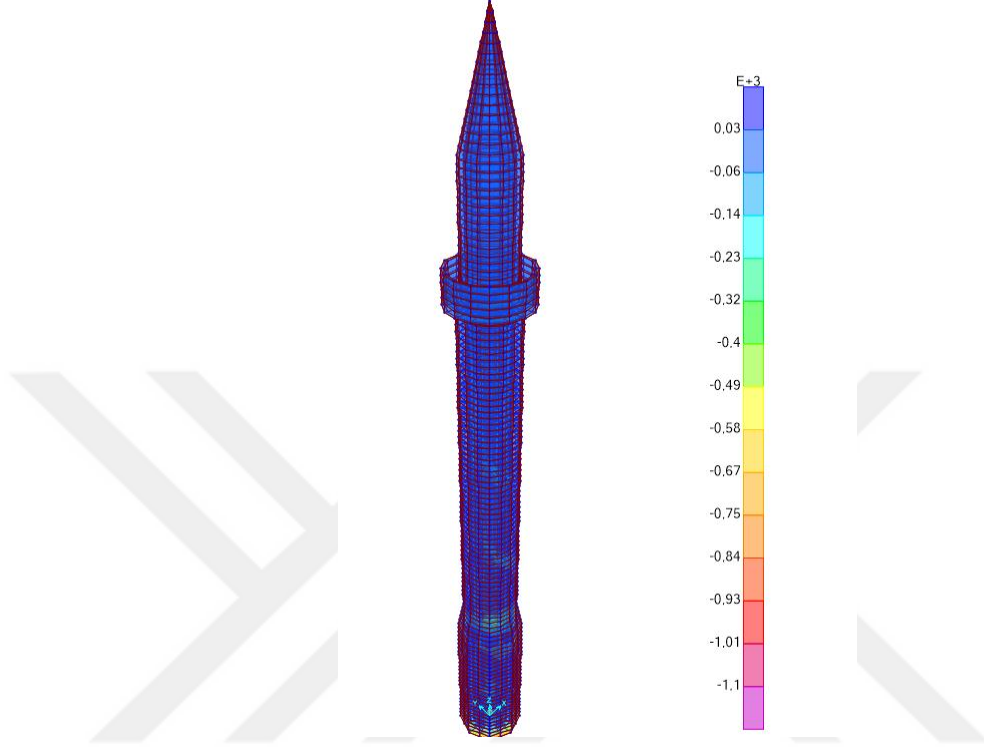


Şekil 6.27. 30 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

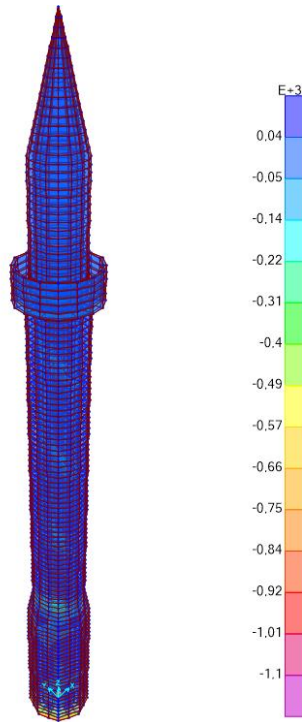


Şekil 6.28. 30 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

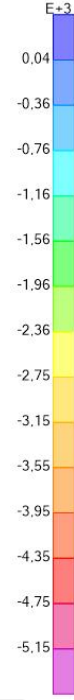
2011 Van depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu Envelope min. için elde edilen normal gerilme diyagramları Şekil 6.29 - Şekil 6.31’de verilmiştir. Analizler sonucunda maksimum basınç gerilmesi 5111.779 kPa, olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.29. 30 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



Şekil 6.30. 30 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



Şekil 6.31. 30 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)

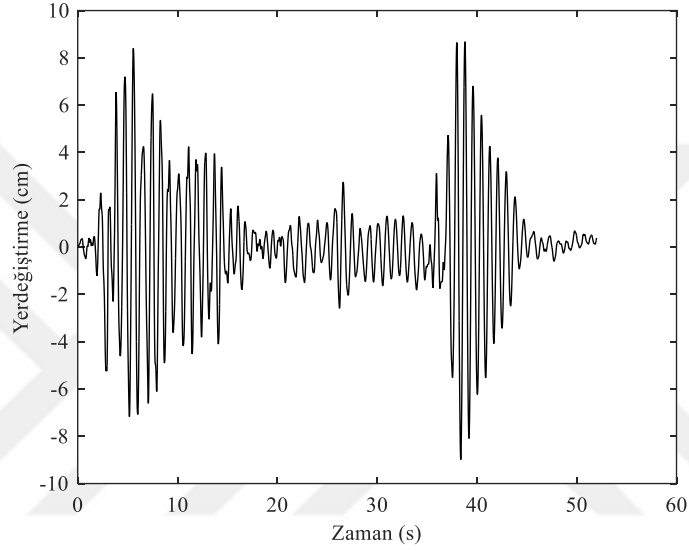
Tablo 6.4'te 30 m uzunluğa sahip yığma minarenin 1999 Kocaeli depremi, 2003 Bingöl depremi ve 2011 Van depremi etkisindeki mutlak maksimum yer değiştirme, maksimum çekme ve basınç değerleri verilmiştir.

Tablo 6.4. 30 m uzunluğa sahip yığma minarenin dinamik analiz sonuçları

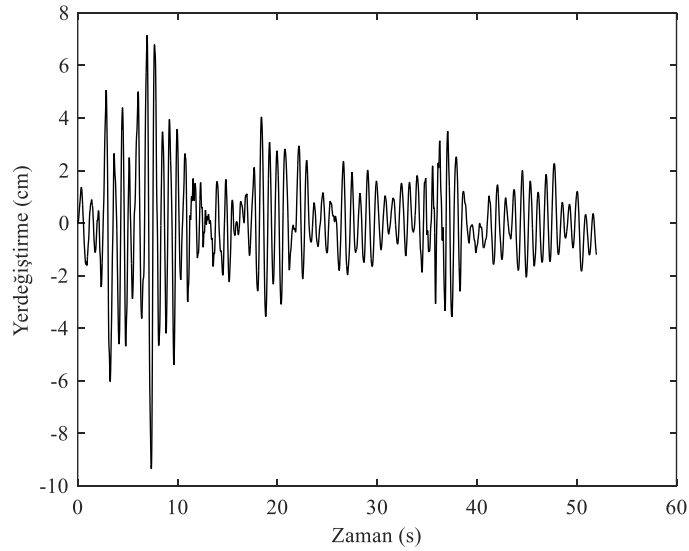
Deprem kayıtları	Mutlak maksimum yer değiştirme (cm)		Maksimum çekme gerilmesi (kPa)	Maksimum basınç gerilmesi (kPa)
	X yönü	Y yönü		
1999 Kocaeli depremi	7.07	6.96	3531.109	4234.685
2003 Bingöl depremi	7.03	6.51	3920.822	4680.720
2011 Van depremi	7.15	7	4360.831	5111.779

6.7. 35 m lik Yığma Minare için Dinamik Analiz Sonuçları (1999 Kocaeli Depremi)

Zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde 1999 Kocaeli depremi altında 35 m lik yığma minarenin üç boyutlu modeli üzerinde işaretlenmiş 1451 nolu düğüm noktası için x ve y doğrultularında elde edilen yerdeğiştirme grafikleri Şekil 6.32’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde x ve y doğrultularındaki mutlak maksimum yerdeğiştirme değerlerinin sırasıyla 8.99 cm ve 9.35 cm olduğu görülebilir.



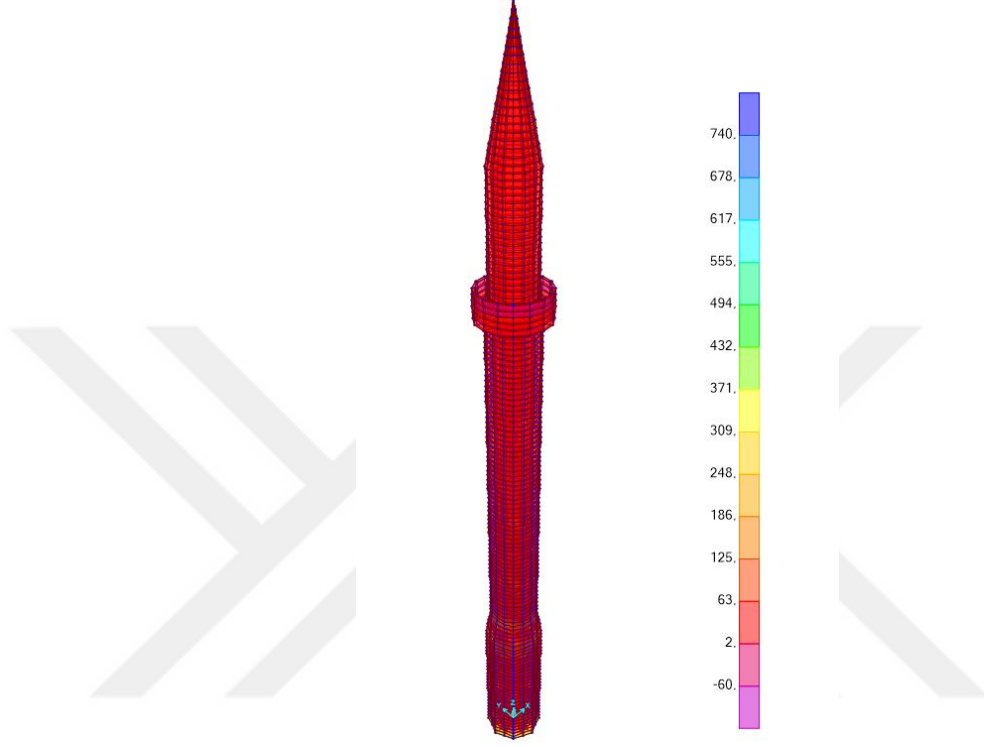
a. x doğrultusu



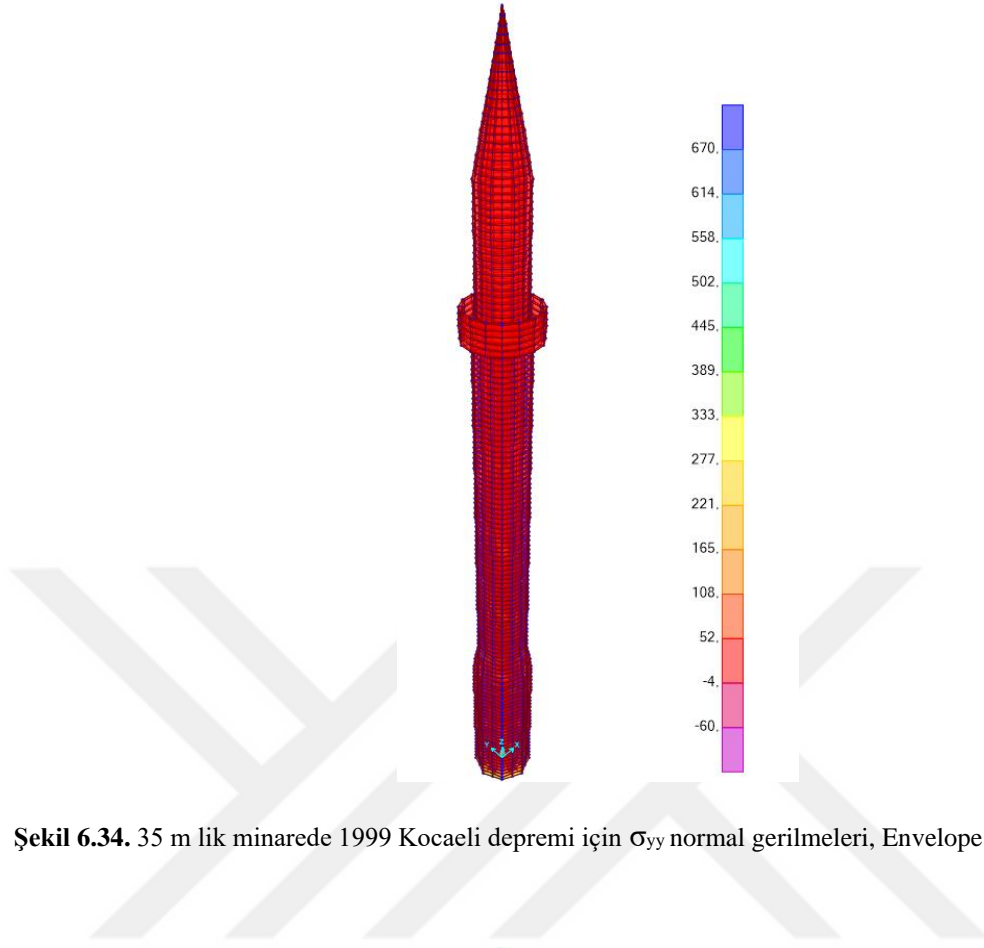
b. y doğrultusu

Şekil 6.32. 35 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için 1451 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği

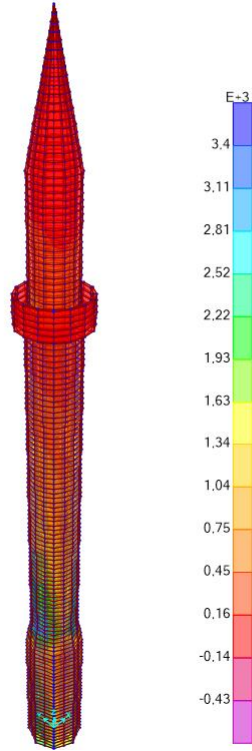
1999 Kocaeli depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu Envelope max. için elde edilen normal gerilme diyagramları Şekil 6.33 - Şekil 6.35’de verilmiştir. Analizler sonucunda maksimum çekme gerilmesi 3383.53 kPa, olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.33. 35 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



Şekil 6.34. 35 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



Şekil 6.35. 35 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

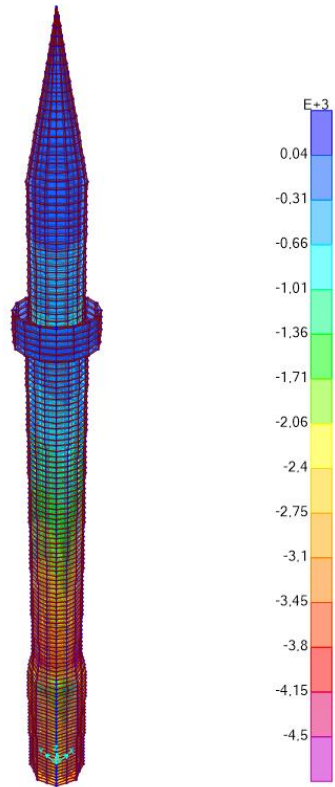
1999 Kocaeli depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu Envelope min. için elde edilen normal gerilme diyagramları Şekil 6.36 - Şekil 6.38’de verilmiştir. Analizler sonucunda maksimum basınç gerilmesi 4459.66 kPa, olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.36. 35 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



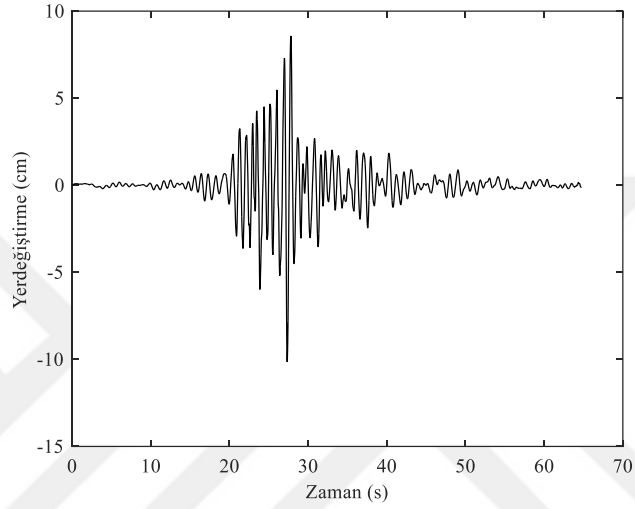
Şekil 6.37. 35 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



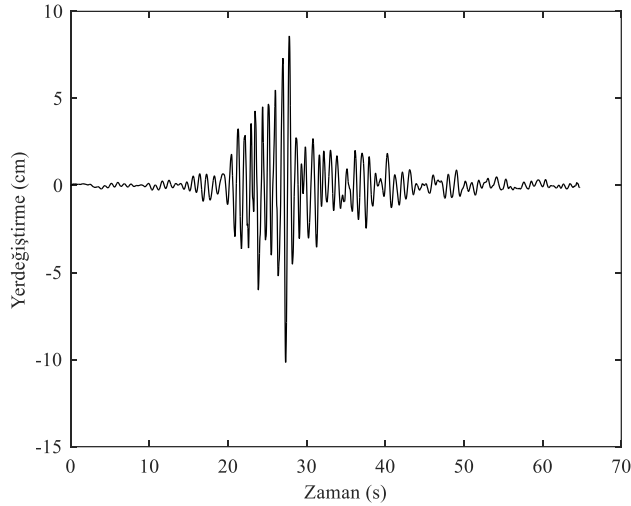
Şekil 6.38. 35 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)

6.8. 35 m lik Yığma Minare için Dinamik Analiz Sonuçları (2003 Bingöl Depremi)

Zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde 2003 Bingöl depremi altında 35 m lik yığma minarenin üç boyutlu modeli üzerinde işaretlenmiş 1451 nolu düğüm noktası için x ve y doğrultularında elde edilen yer değiştirme grafikleri Şekil 6.39'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde x ve y doğrultularındaki mutlak maksimum yer değiştirme değerlerinin sırasıyla 10.15 cm ve 10.16 cm olduğu görülebilir.



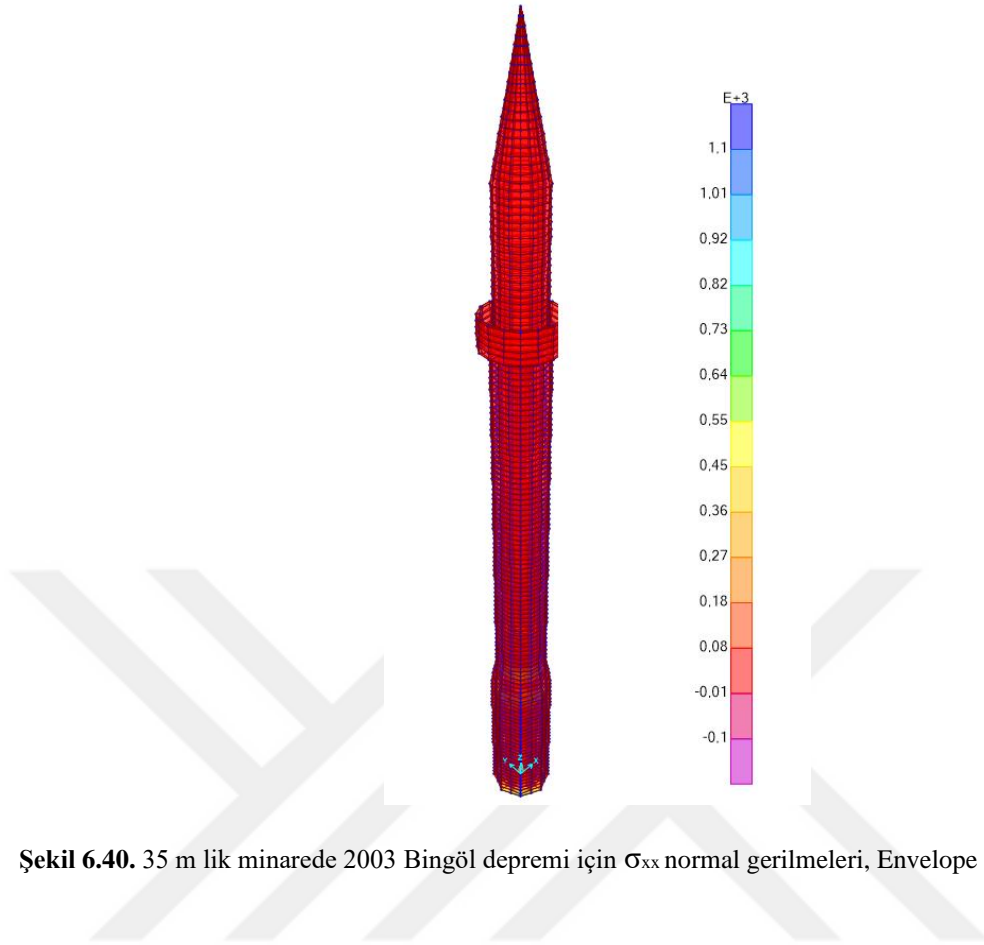
a. x doğrultusu



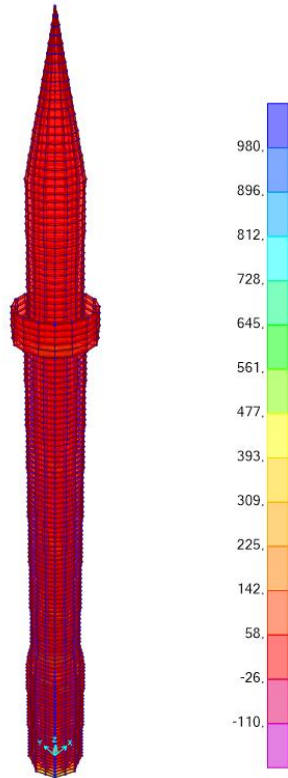
b. y doğrultusu

Şekil 6.39. 35 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için 1451 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği

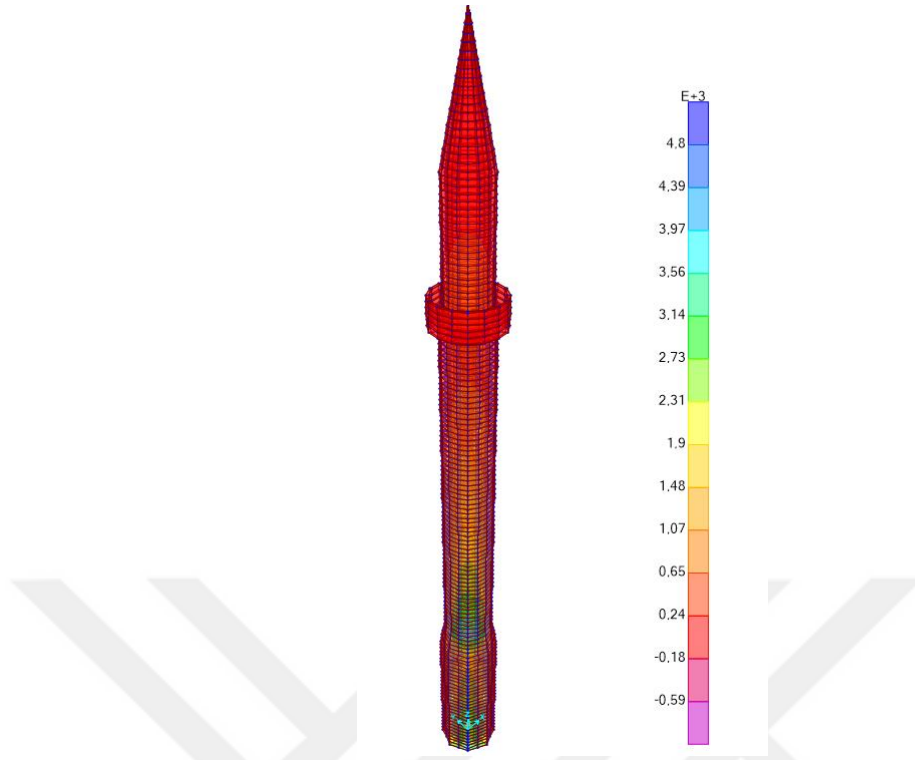
2003 Bingöl depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu Envelope max. için elde edilen normal gerilme diyagramları Şekil 6.40 - Şekil 6.42'de verilmiştir. Analizler sonucunda maksimum çekme gerilmesi 4787.874 kPa, olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.40. 35 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

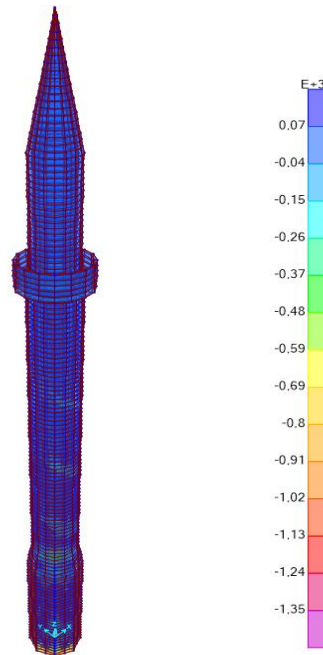


Şekil 6.41. 35 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



Şekil 6.42. 35 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

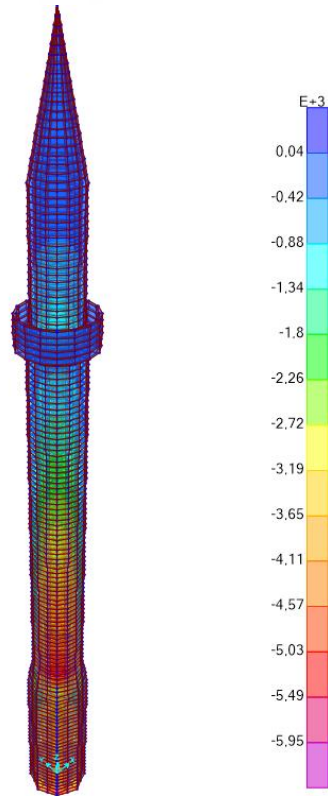
2003 Bingöl depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu Envelope min. için elde edilen normal gerilme diyagramları Şekil 6.43 - Şekil 6.45'te verilmiştir. Analizler sonucunda maksimum basınç gerilmesi 5935.775 kPa, olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.43. 35 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



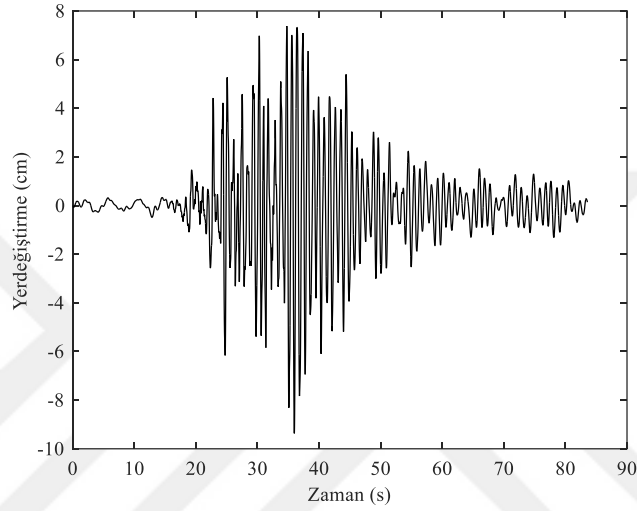
Şekil 6.44. 35 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



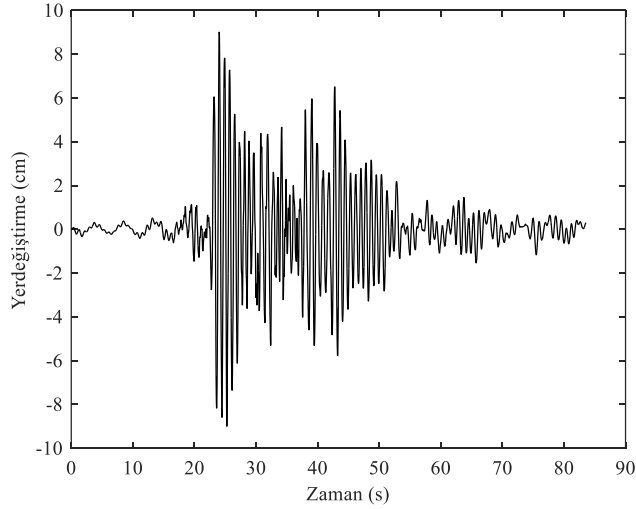
Şekil 6.45. 35 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)

6.9. 35 m lik Yığma Minare için Dinamik Analiz Sonuçları (2011 Van Depremi)

Zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde 2011 Van depremi altında 35 m lik yığma minarenin üç boyutlu modeli üzerinde işaretlenmiş 1451 nolu düğüm noktası için x ve y doğrultularında elde edilen yerdeğiştirme grafikleri Şekil 6.46'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde x ve y doğrultularındaki mutlak maksimum yerdeğiştirme değerlerinin sırasıyla 9.37 cm ve 9.02 cm olduğu görülebilir.



a. x doğrultusu



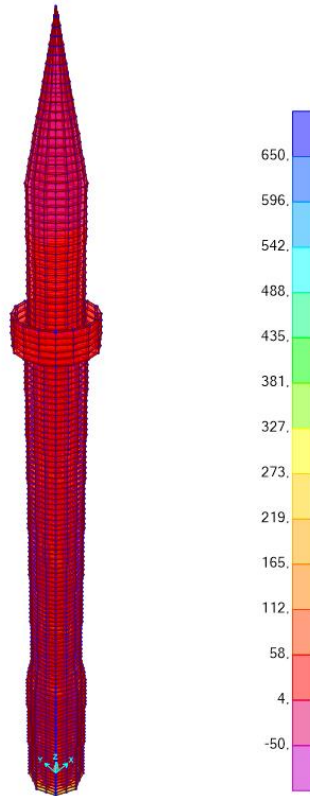
b. y doğrultusu

Şekil 6.46. 35 m lik minarede 2011 Van depremi için 1451 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği

2011 Van depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu Envelope max. için elde edilen normal gerilme diyagramları Şekil 6.47 - Şekil 6.49'da verilmiştir. Analizler sonucunda maksimum çekme gerilmesi 3052.39 kPa, olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.47. 35 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

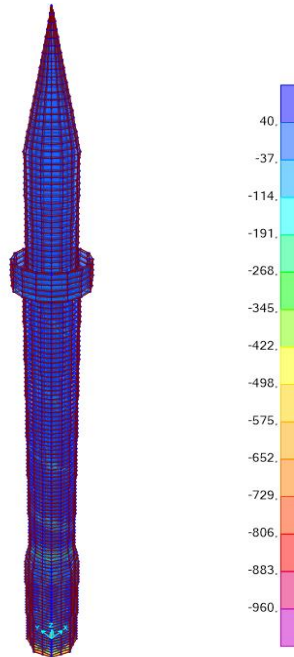


Şekil 6.48. 35 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

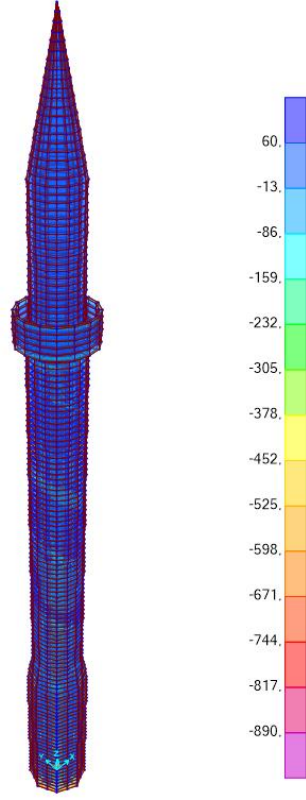


Şekil 6.49. 35 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

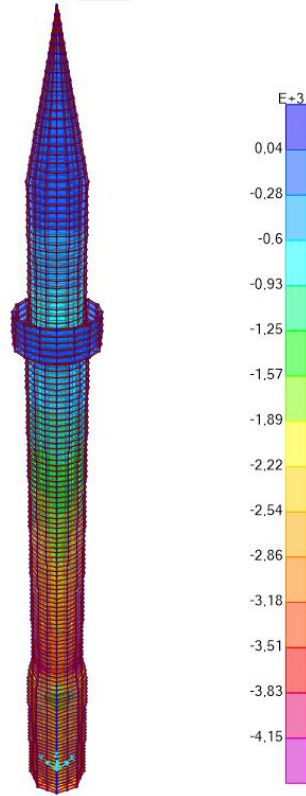
2011 Van depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu Envelope min. için elde edilen normal gerilme diyagramları Şekil 6.50 - Şekil 6.52’de verilmiştir. Analizler sonucunda maksimum basınç gerilmesi 4120.786 kPa, olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.50. 35 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



Şekil 6.51. 35 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



Şekil 6.52. 35 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)

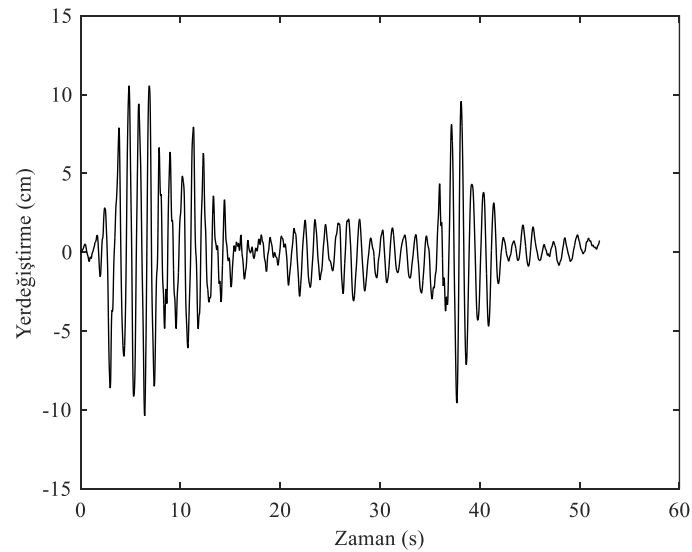
Tablo 6.5'te 35 m uzunluğa sahip yığma minarenin 1999 Kocaeli depremi, 2003 Bingöl depremi ve 2011 Van depremi etkisindeki mutlak maksimum yer değiştirme, maksimum çekme ve basınç değerleri verilmiştir.

Tablo 6.5. 35 m uzunluğa sahip yığma minarenin dinamik analiz sonuçları

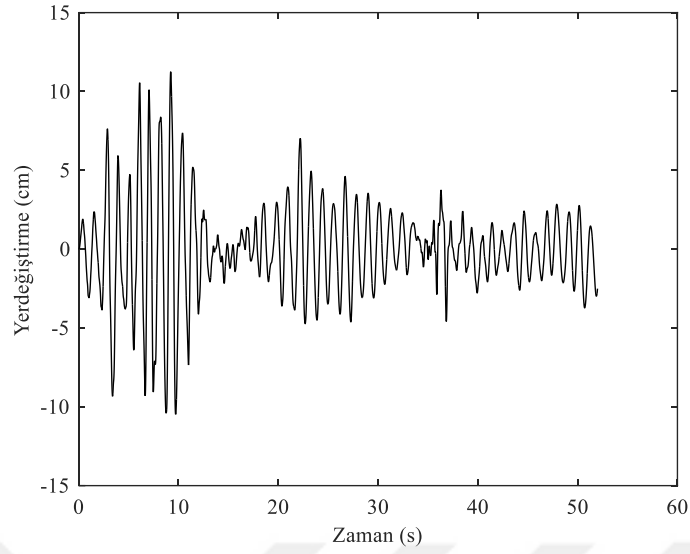
Deprem kayıtları	Mutlak maksimum yer değiştirme (cm)		Maksimum çekme gerilmesi (kPa)	Maksimum basınç gerilmesi (kPa)
	X yönü	Y yönü		
1999 Kocaeli depremi	8.99	9.35	3383.53	4459.66
2003 Bingöl depremi	10.15	10.16	4787.874	5935.775
2011 Van depremi	9.37	9.02	3052.39	4120.786

6.10. 40 m lik Yığma Minare için Dinamik Analiz Sonuçları (1999 Kocaeli Depremi)

Zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde 1999 Kocaeli depremi altında 35 m lik yığma minarenin üç boyutlu modeli üzerinde işaretlenmiş 8672 nolu düğüm noktası için x ve y doğrultularında elde edilen yerdeğiştirme grafikleri Şekil 6.53'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde x ve y doğrultularındaki mutlak maksimum yerdeğiştirme değerlerinin sırasıyla 10.56 cm ve 11.25 cm olduğu görülebilir.



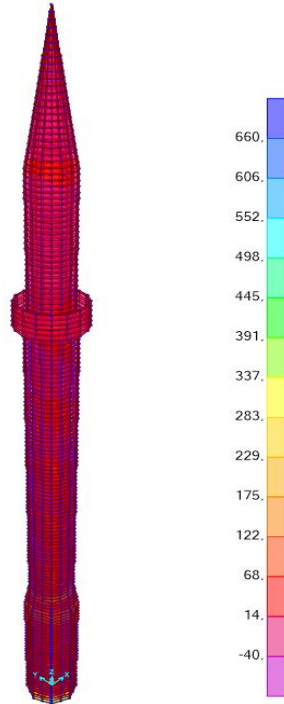
a. x doğrultusu



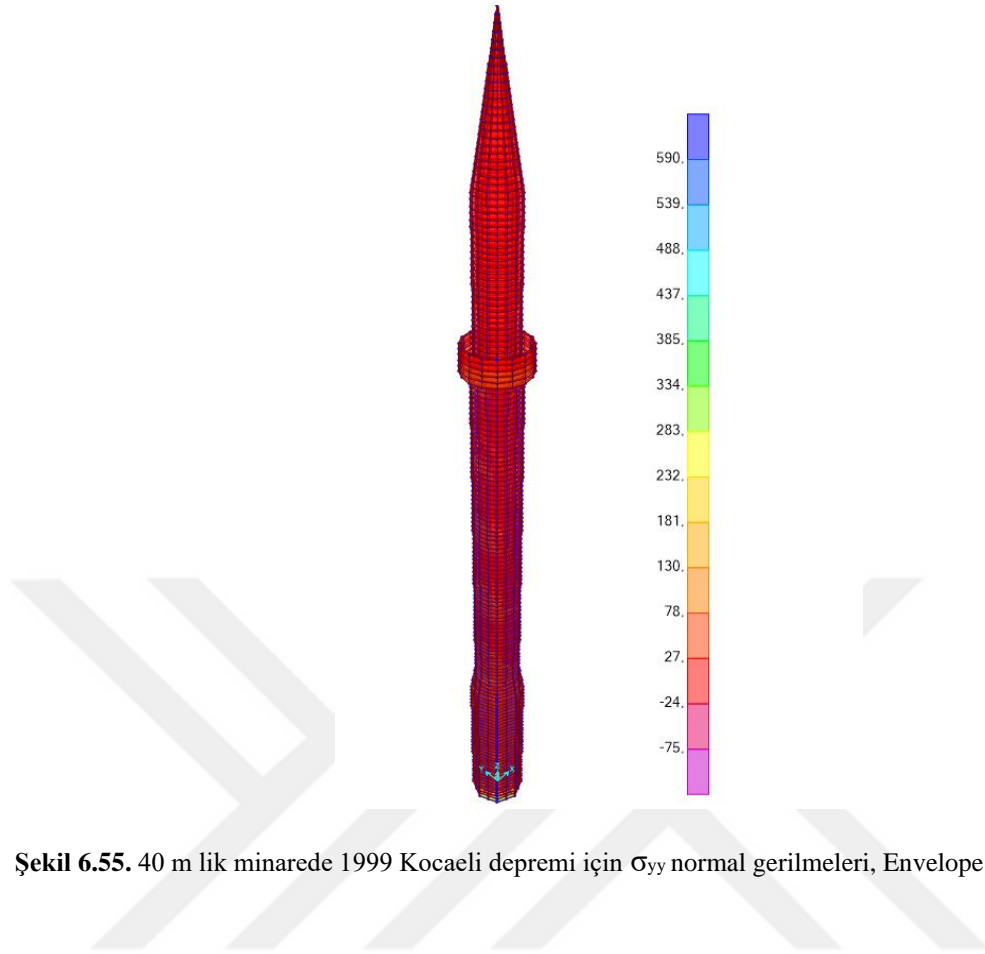
b. y doğrultusu

Şekil 6.53. 40 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için 8672 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği

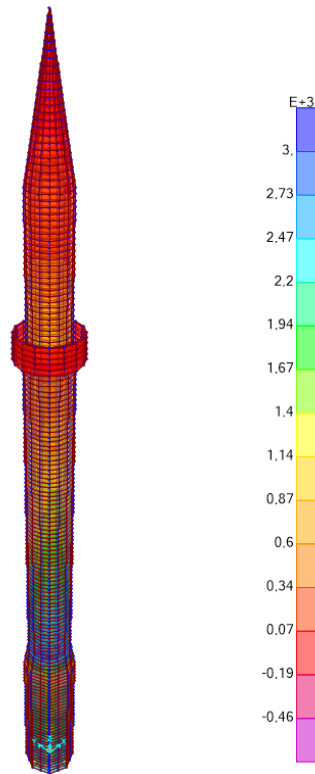
1999 Kocaeli depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu Envelope max. için elde edilen normal gerilme diyagramları Şekil 6.54 - Şekil 6.56'da verilmiştir. Analizler sonucunda maksimum çekme gerilmesi 2939.092 kPa, olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.54. 40 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

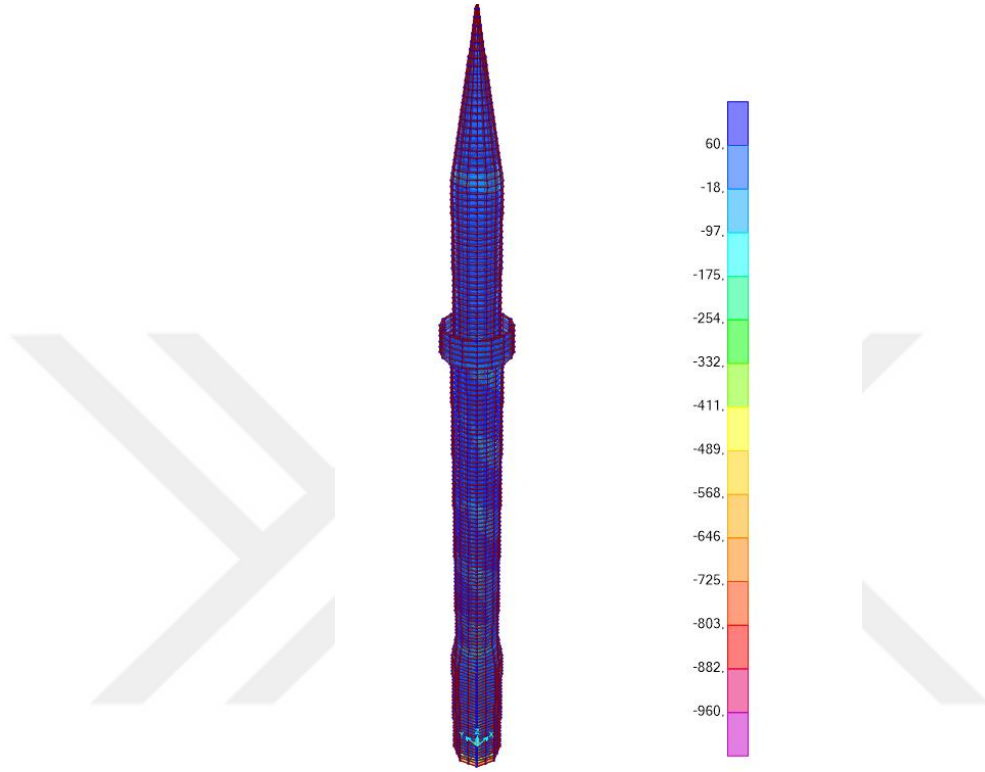


Şekil 6.55. 40 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

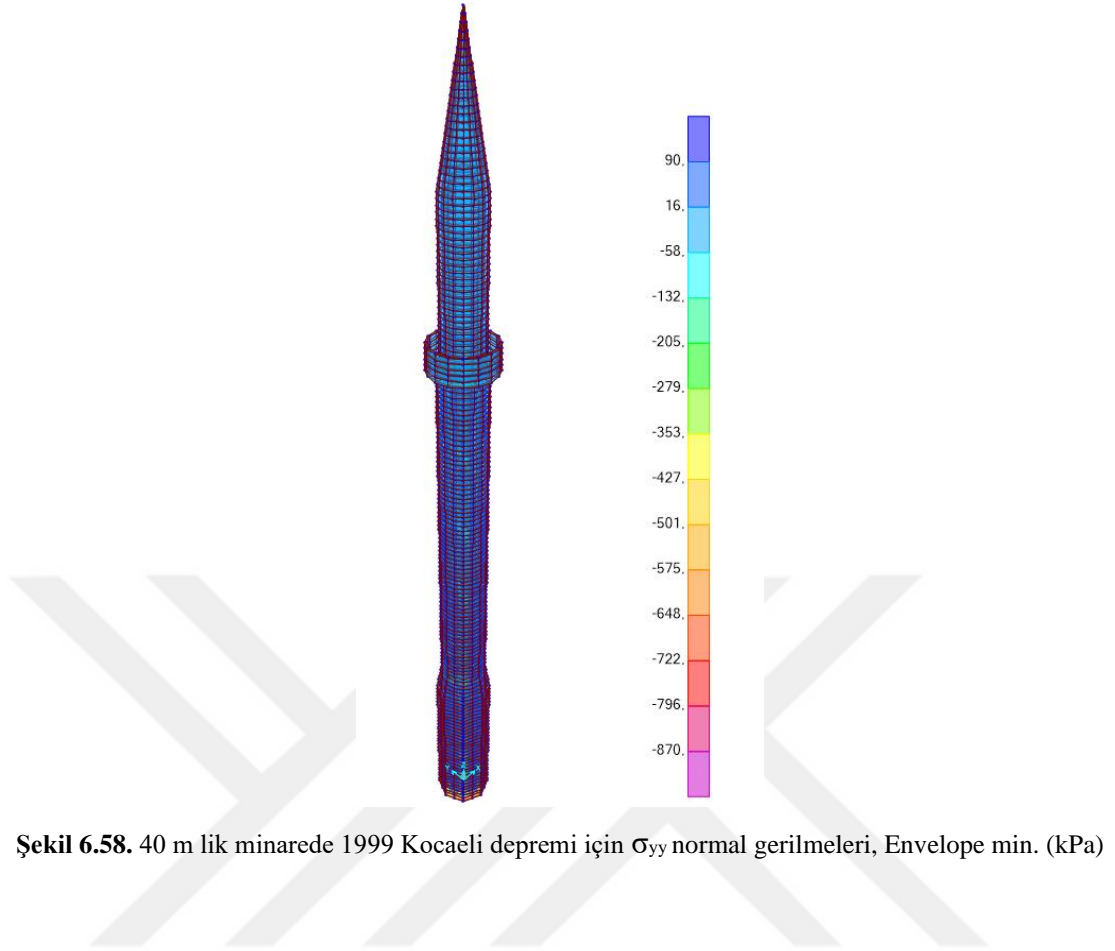


Şekil 6.56. 40 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

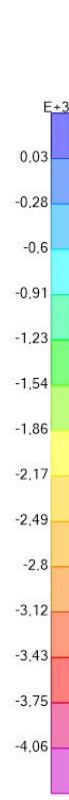
1999 Kocaeli depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu Envelope min. için elde edilen normal gerilme diyagramları Şekil 6.57 - Şekil 6.59'da verilmiştir. Analizler sonucunda maksimum basınç gerilmesi 4055.785 kPa, olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.57. 40 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



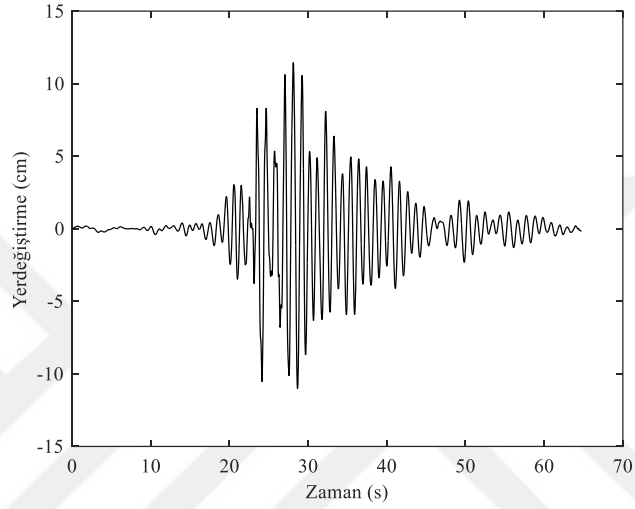
Şekil 6.58. 40 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



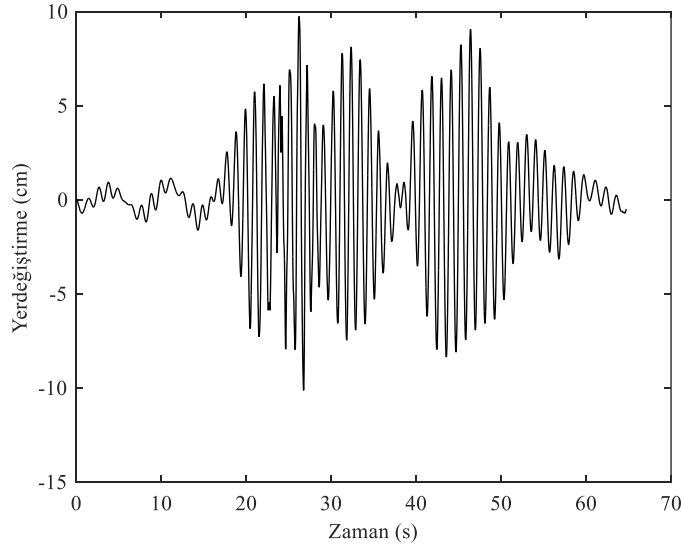
Şekil 6.59. 40 m lik minarede 1999 Kocaeli depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)

6.11. 40 m lik Yığma Minare için Dinamik Analiz Sonuçları (2003 Bingöl Depremi)

Zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde 2003 Bingöl depremi altında 40 m lik yığma minarenin üç boyutlu modeli üzerinde işaretlenmiş 8672 nolu düğüm noktası için x ve y doğrultularında elde edilen yer değiştirme grafikleri Şekil 6.60'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde x ve y doğrultularındaki mutlak maksimum yer değiştirme değerlerinin sırasıyla 11.45 cm ve 10.21 cm olduğu görülebilir.



a. x doğrultusu



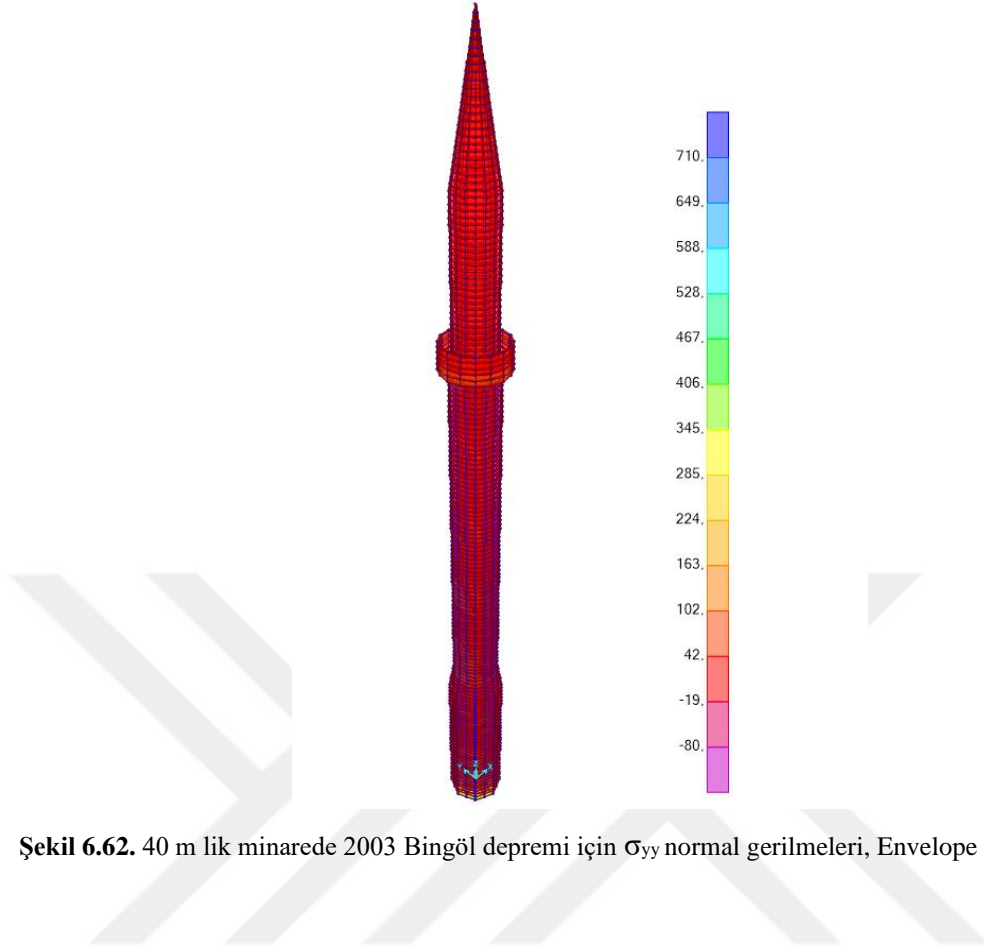
b. y doğrultusu

Şekil 6.60. 40 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için 8672 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği

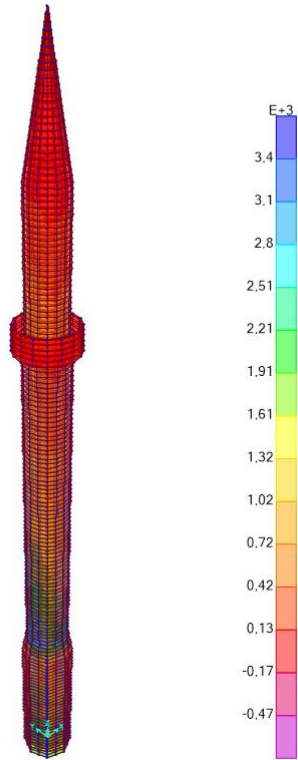
2003 Bingöl depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu Envelope max. için elde edilen normal gerilme diyagramları Şekil 6.61 - Şekil 6.63’de verilmiştir. Analizler sonucunda maksimum çekme gerilmesi 3338.269 kPa, olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.61. 40 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



Şekil 6.62. 40 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



Şekil 6.63. 40 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

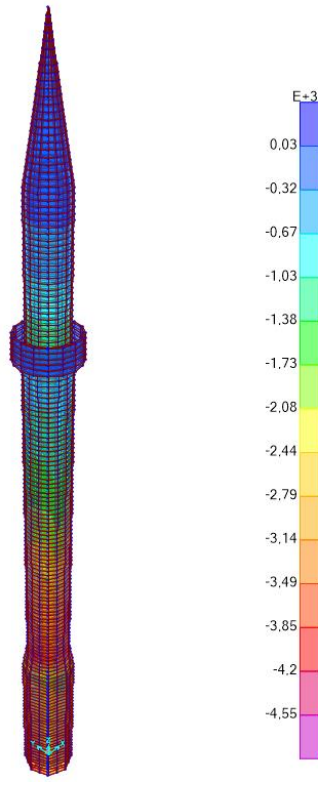
2003 Bingöl depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu Envelope min. için elde edilen normal gerilme diyagramları Şekil 6.64 - Şekil 6.66'da verilmiştir. Analizler sonucunda maksimum basınç gerilmesi 4503.74 kPa, olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.64. 40 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



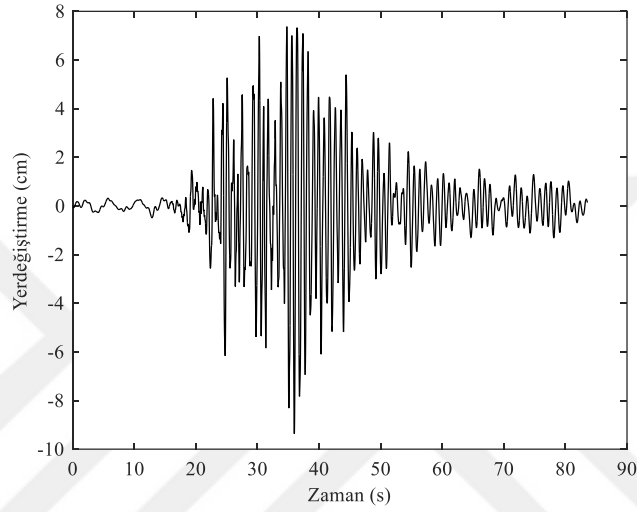
Şekil 6.65. 40 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



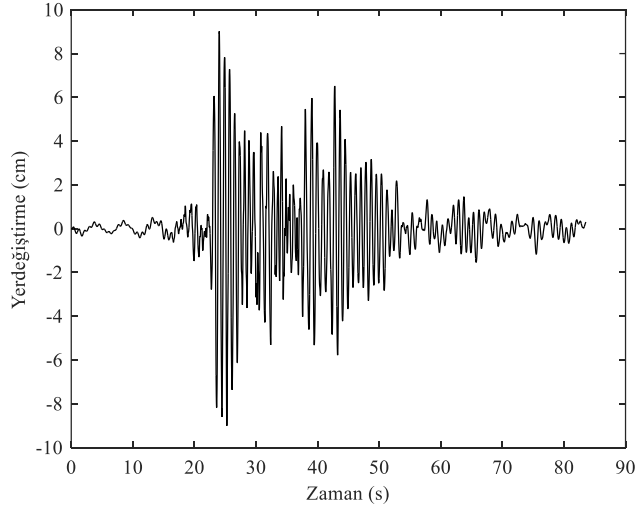
Şekil 6.66. 40 m lik minarede 2003 Bingöl depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)

6.12. 40 m lik Yığma Minare için Dinamik Analiz Sonuçları (2011 Van Depremi)

Zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde 2011 Van depremi altında 40 m lik yığma minarenin üç boyutlu modeli üzerinde işaretlenmiş 8672 nolu düğüm noktası için x ve y doğrultularında elde edilen yerdeğiştirme grafikleri Şekil 6.67'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde x ve y doğrultularındaki mutlak maksimum yerdeğiştirme değerlerinin sırasıyla 12.01 cm ve 12.03 cm olduğu görülebilir.



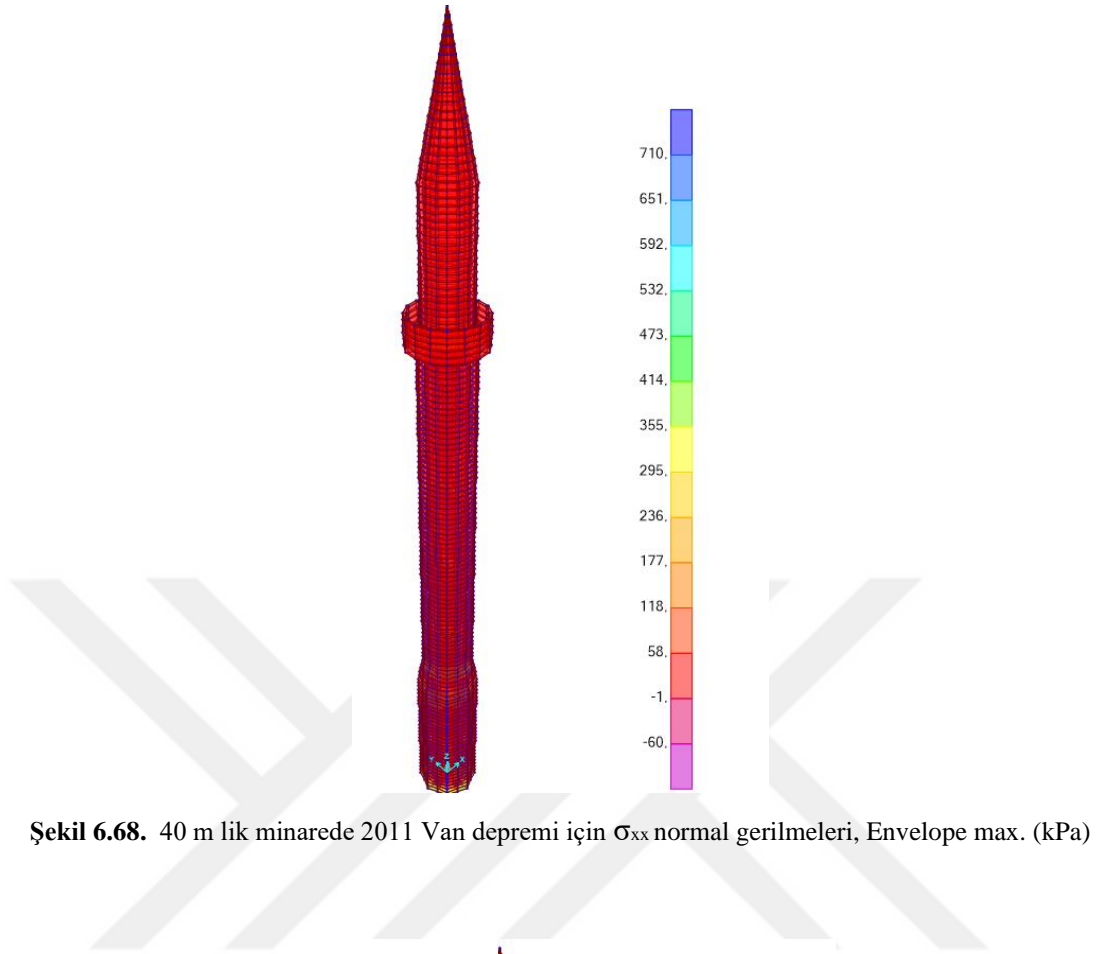
a. x doğrultusu



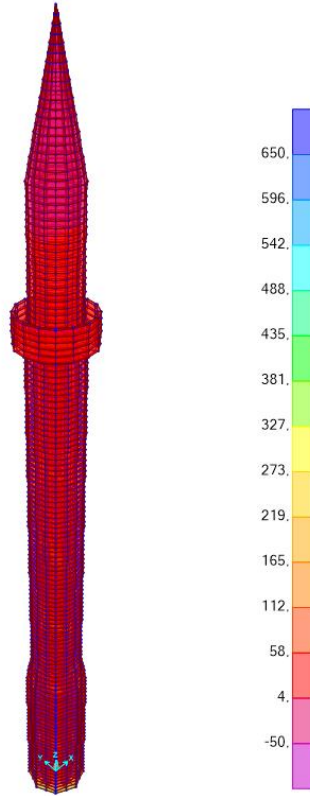
b. y doğrultusu

Şekil 6.67. 40 m lik minarede 2003 Van depremi için 8672 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği

2011 Van depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu Envelope max. için elde edilen normal gerilme diyagramları Şekil 6.68 - Şekil 6.70'de verilmiştir. Analizler sonucunda maksimum çekme gerilmesi 5069.264 kPa, olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.68. 40 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

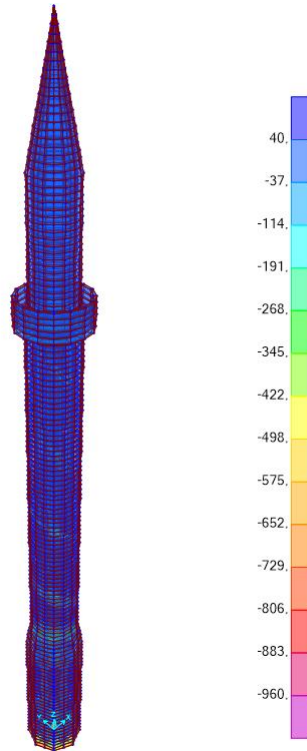


Şekil 6.69. 40 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

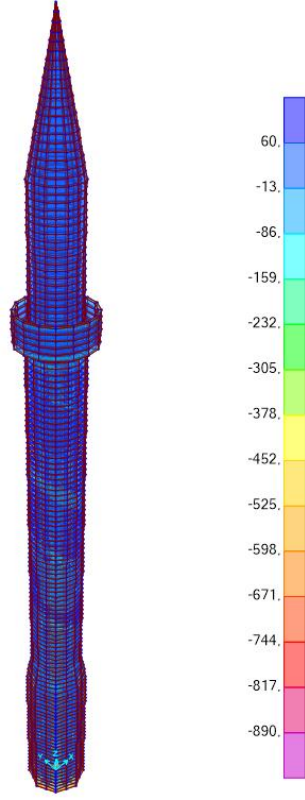


Şekil 6.70. 40 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

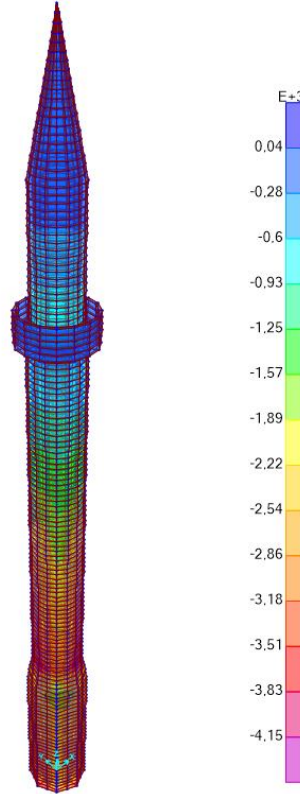
2011 Van depremi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu Envelope min. için elde edilen normal gerilme diyagramları Şekil 6.71 - Şekil 6.73’de verilmiştir. Analizler sonucunda maksimum basınç gerilmesi 6424.501 kPa, olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.71. 40 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{xx} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



Şekil 6.72. 40 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{yy} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)



Şekil 6.73. 40 m lik minarede 2011 Van depremi için σ_{zz} normal gerilmeleri, Envelope min. (kPa)

Tablo 6.6’da 40 m uzunluğa sahip yığma minarenin 1999 Kocaeli depremi, 2003 Bingöl depremi ve 2011 Van depremi etkisindeki mutlak maksimum yer değiştirme, maksimum çekme ve basınç değerleri verilmiştir.

Tablo 6.6. 40 m uzunluğa sahip yığma minarenin dinamik analiz sonuçları

Deprem kayıtları	Mutlak maksimum yer değiştirme (cm)		Maksimum çekme gerilmesi (kPa)	Maksimum basınç gerilmesi (kPa)
	X yönü	Y yönü		
1999 Kocaeli depremi	10.56	11.25	2939.092	4055.785
2003 Bingöl depremi	11.45	10.21	3338.269	4503.740
2011 Van depremi	12.01	12.03	5069.264	6424.501

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, üç farklı yüksekliğe sahip yığma olarak inşa edildiği farz edilen üç minarenin farklı deprem ivmeleri altında dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. İncelenen minarelerin Elazığ ilinde bulunduğu düşünülmüş ve üç boyutlu sonlu eleman modelleri SAP2000 sonlu elemanlar programı ile oluşturulmuştur. Minarelerin modellenmesinde makro modelleme yöntemi kullanılmıştır. Minarelerin doğal titreşim frekansları, periyot ve mod şekilleri modal analiz yöntemi ile bulunmuştur. Analizlerde sönümün Rayleigh tipi bir sönüm olduğu düşünülerek sönüm katsayıları elde edilmiştir. Dinamik analizler için 1999 Kocaeli, 2003 Bingöl ve 2011 Van depremlerinin ivme kayıtları kullanılmıştır. Bu analizlerde sönüm oranı %5 olarak dikkate alınmıştır. Analizler sonucunda minarede oluşan yer değiştirme ve gerilme değerleri incelenmiştir.

Dinamik analizler sonucunda gerilme yığılmalarının en büyük değerlerinin eleman kesitlerinin değişiklik gösterdiği küp ile gövdenin birleşim bölgesinde yoğunlaştığını söylemek mümkündür. Bu sebeple minarelerin deprem yükleri altında en çok zorlanan bölgelerinin kesit değişikliğinin (daralma) meydana geldiği küp kısmının biterek gövde kısmının başladığı yer olduğunu söylemek yanlış olmaz. Kendine özgü bir mimariye sahip ve narin olan bu yapıların ciddi hasarlarla karşı karşıya kalmasını önlemek için özellikle küp ile gövdenin birleşim bölgesinde çekme gerilmelerine karşı minarenin doğal yapısını bozmadan uygun şekilde güçlendirme yapılması faydalı olacaktır. Ayrıca yığma minarelerle ilgili çalışmaların sayısının artarak farklı çözüm teknikleriyle deprem yükleri altında benzer çalışmaların yapılması yığma minareler konusunda bulunan literatür eksikliğini azaltılmasına yarar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Serhatoğlu, C., 2015. Bursa Tarihi Minarelerinin Dinamik Davranışlarının ve Performanslarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [2] Çakmak, A.Ş., Moropoulou, A., & Mullen, CL (1995). Ayasofya'nın dinamik davranışı ve deprem tepkisinin disiplinler arası incelenmesi. Zemin dinamiği ve deprem mühendisliği, 14 (2), 125-133.
- [3] Oğuzmert, M., 2002. Dynamic Behavior of Masonry Minarets, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] Dabanlı, Ö., 2008. Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [5] Ertek, E., 2009. Osmanlı Minarelerinin Yapısal Modellenmesi ve Deprem Analizi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] Karabörk, T. 2009. Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Betonarme Yapıların Doğrusal Olmayan 3 Boyutlu Dinamik Analizi. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 5(1), 25-36.
- [7] Teomete, E. ve Aktaş, E. (2010). İzmir, Türkiye'deki tarihi Kamanlı Camii'nin yapısal analizleri ve değerlendirilmesi. İnşaa edilen tesislerin performans günlüğü, 24 (4), 353-364.
- [8] Kuşüzümü, K., H., 2010. İstanbul Minarelerinin Geleneksel Yapım Teknikleri ve Günümüzdeki Restorasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [9] Baştürk, M., H., 2013. Bursa Tarihi Yığma Minarelerinin Dinamik Davranışlarının Modal Analiz Yöntemi ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [10] Çakır, F., Şeker, BS, Durmuş, A., Doğangün, A. ve Uysal, H. (2015). Tarihi bir yığma caminin deneysel testler ve sonlu elemanlar analizleri ile sismik değerlendirmesi. KSCE İnşaat Mühendisliği Dergisi, 19, 158-164.
- [11] Saygılı, Ö., 2014. Use of Distinct Element Method In The Assessment of Earthquake Behavior of Masonry Structures, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [12] Dehghanian, K., 2015. Modern Betonarme Minareler İçin Ölçekli Gerçek Deprem Kayıtlarının ve Türk Deprem Yönetmeliği Tasarım Spectrum Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [13] Akbulut Taş, G., 2015. Ayarlı Kütle Sönümleyici Yerleştirilmiş Yüksek Minarelerin Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- [14] Tetik, T., 2015. Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansı ve Güçlendirme Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [15] Y Lu, Nottingham Üniversitesi 2016 eprints.nottingham.ac.uk.
- [16] Güllü, H. ve Karabekmez, M. (2017). Yakın fay ve uzak fay depremlerinin 3B dinamik zemin-yapı etkileşimi yoluyla tarihi bir yığma cami üzerindeki etkisi. Mühendislik Yapıları, 152, 465-492.
- [17] Erdoğan, YS, Kocatürk, T. ve Demir, C. (2019). Tarihi bir yığma minarenin sismik davranışının çevre yapılarla etkileşimi dikkate alınarak incelenmesi. Deprem Mühendisliği Dergisi, 23 (1), 112-140.

- [18] Calp, C., 2018. Tarihi Minarelerin Dinamik Özellikleri ve Deprem Performansları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [19] Erdoğan, H., A., 2018. Türk Minarelerinin Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemiyle Deprem Performanslarının Karşılaştırılması, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [20] Günel, E., Beyen, K. (2018). Zemin Davranışı ve Mesnet Koşullarının Tarihi Yapıların Dinamik Davranışına Etkisi. Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B-Teorik Bilimler, 6, 244-252.
- [21] Bayraktar, A. ve Hökelekli, E. (2020). Minare-temel-zemin etkileşim sistemlerinin doğrusal olmayan sismik performanslarına deprem girdi modellerinin etkileri. Zemin Dinamiği ve Deprem Mühendisliği, 139, 106368.
- [22] Tuna, E., 2019. İskele ile Desteklenen Tarihi Bir Minarenin Yapısal Davranışının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [23] Çelik, L., F., 2019. Yivli Minarenin Depreme Karşı Dayanıklılığının Araştırılması, Akdeniz Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya.
- [24] Oğuzhanoglu, M., A., 2019. Betonarme Minarelerin Doğrusal Olmayan Modellemesi ve Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- [25] Altun, N. 2019. 2007 Ve 2018 Deprem Yönetmelikleri Işığında Betonarme Minarelerin Zemin-Yapı Etkileşimi Göz Önünde Bulundurularak Projelendirilmesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [26] Çelik, L. F. 2019. Yivli Minare'nin depreme karşı dayanıklılığının araştırılması.
- [27] Altıok, T., Y., 2019. Tarihi Minarelerin Dinamik Özelliklerinin Deneysel ve Nümerik Yöntemler ile Araştırılması, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- [28] Akmaz Bilgiç, E., 2020. Diyarbakır Hoca Ahmed Camii Restorasyon Önerisi, Dicle Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- [29] Oyuğ, R. A. 24 Ocak 2020 Elâzığ Depreminde Hasar Gören Yapıların Sismik Davranışlarının İncelenmesi. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 11(1), 140-155.
- [30] Hökelekli, E. 2020. Yapı-Zemin Etkileşiminin Tarihi Yığma Minarelerin Deprem Davranışına Etkisi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 11(2), 825-838.
- [31] Bayraktar, A., Hökelekli, E., Halifeoğlu, FM, Mosallam, A., & Karadeniz, H. (2018). Dikdörtgen kagir tarihi kagir minarelerin sismik hasar yayılımları üzerindeki düşey güçlü yer hareketi etkileri. Mühendislik Hatası Analizi, 91, 115-128.
- [32] Hökelekli, E., Demir, A., Ercan, E., Nohutçu, H., & Karabulut, A. (2020). Tarihi bir yığma minarede doğrusal ve doğrusal olmayan sismik analizlerle sismik değerlendirme. Periodica Polytechnica İnşaat Mühendisliği, 64 (2), 438-448.
- [33] Duman, C., 2020. Yüksekliğin ve Şerefe Sayısının Yığma Minarelerin Dinamik Davranışlarına Etkisi, Adıyaman Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adıyaman.
- [34] Durgut, E., 2021. Bursa Hacaalızade Cami Minaresi Davranışının Farklı Deprem Kayıtları Altında Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analiz Yaklaşımları İle İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [35] Günay, M., 2021. Bitliste Beş Minarenin Yapısal Analizi, Bitlis Eren Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bitlis.

- [36] Türker, T., Demirtaş, B., Ural, A., & Kömür, MA (2022). Tarihi eğimli minarelerin yakın ve uzak fay yer hareketleri altındaki sismik davranışları. *Deprem Mühendisliği Dergisi*, 26 (11), 5866-5880.
- [37] Altunışık, AC, Sunca, F., Genç, AF ve Tavşan, C. (2021). Tarihi camilerin deprem sonrası hasar değerlendirmeleri ve yakın fay ve uzak fay yer hareketlerinin sismik tepkiler üzerindeki etkileri. *Uluslararası Mimari Miras Dergisi*, 1-36.
- [38] Maraş, MM, Özmen, A., Sayın, E. ve Ayaz, Y. (2022). Tarihi Sütlü Minare Camii'nin sismik değerlendirmesi. *Periodica Polytechnica İnşaat Mühendisliği*, 66 (2), 445-459.
- [39] Yanık, Y., Türker, T., Çalık, İ., & Yıldırım, Ö. (2022). Tarihi yığma minarelerde çevresel ve zamana bağlı etkilerin titreşim testi yardımıyla incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 37(2).
- [40] Sekin Eronat, Ş., 2022. Yığma Minarelerin Dinamik Analizi, Fırat Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.
- [41] Aymelek, A., 2022. Minarelerin Sıcaklık ve Nem Gibi Çevresel Etkilere Bağlı Olarak Yapısal Davranışlarının Takibi ve Değerlendirilmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [42] Yıldız, Ö. ve Doğan, E. (2022). Çelebiaga Camii'nin zemin-yapı etkileşim analizi, *Pertek-Türkiye. İnşaatın Gözden Geçirilmesi. Yapı Dergisi*, 21 (3), 749-766.
- [43] Genç, A., F., 2023. Tarihi Yığma Yapılarda Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi, Sonlu Eleman Model İyileştirmesi ve Hasar Tespiti, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [44] Arık, B., 2023. Tarihi Bir Cami Minaresi Yapısal Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [45] Al-Aswad, M., 2023. Assessment of The Dynamic Properties and Response of Masonry Minarets In İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, Altınbaş Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [46] Dabanlı, G., 2016. Nur-u Osmaniye Camii'nin Deprem Performansının Belirlenmesi ve Koruma Önerileri, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [47] İstanbul Türkiye Deprem Yönetmeliği, "Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar," 2018.
- [48] George G. Penelis, Gregory G. Penelis - *Structural Restoration of Masonry Monuments Arches, Domes and Walls-CRC Press*, 2020
- [49] TS 647 :1979
- [50] Kahraman, G., 2008. Erken Bizans Dönemi Horasan Harçlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [51] SAP2000, *Structural Analysis and Design*, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, 2023.
- [52] Uysal, A. O. Anadolu Selçuklularından erken Osmanlı dönemine minaret biçimindeki gelişmeleri. *Ankara Üniversitesi Coğrafya Fakültesi Dergisi*. 1990, Cilt 33, Sayı 1-2, 505-533.
- [53] Alamehmet, Z. Bursa Ulucami Doğu Minaresinin Davranışının Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analizler ile İncelenmesi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [54] SeismoMatch, SeismoSoft (2022) SeismoStruct a computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures.

