

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



YIĞMA MİNARELERİN DİNAMİK ANALİZİ

Şule SEKİN ERONAT

Yüksek Lisans Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mekanik

HAZİRAN 2022

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

YIĞMA MİNARELERİN DİNAMİK ANALİZİ

Tez Yazarı
Şule SEKİN ERONAT

Danışman
Doç. Dr. Erkut SAYIN

HAZİRAN 2022
ELAZIĞ

T. C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: Yığma Minarelerin Dinamik Analizi
Yazarı: Şule SEKİN ERONAT
İlk Teslim Tarihi: 27.5.2022
Savunma Tarihi: 23.6.2022

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:	Doç. Dr. Erkut SAYIN Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	İmza Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Yusuf CALAYIR Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Senem YILMAZ ÇETİN Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım

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

İmza
Prof. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Yığma Minarelerin Dinamik Analizi” 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.

23/6/2022

Şule SEKİN ERONAT



ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez danışmanlığını yapan, lisans eğitimim de ve yüksek lisansa başlama sürecimde beni yönlendiren, konu seçimimden kaynak bulmama kadar tezimin her aşamasında yardımlarını ve desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen, Sayın Doç. Dr. Erkut SAYIN hocama teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Yaşantım boyunca maddi manevi desteğini esirgemeyen, hayatımın her alanında yanımda olan, beni yönlendiren, zorluklarla mücadele edebilmeyi öğreten kıymetli aile üyelerim annem Aynur SEKİN, babam Mehmet SEKİN, abim Emre SEKİN'e ve eşim Mehmet ERONAT'a teşekkür ederim.

Şule SEKİN ERONAT

ELAZIĞ, 2022



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Taraması	2
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı	8
2. TARİHİ MİNARELER, MİNARELERİN TAŞIYICI SİSTEM SEÇİMLERİ, KULLANILAN MALZEMELER VE MİNARE ÇEŞİTLERİ.....	10
2.1. Tarihi Minareler.....	10
2.1.1 Tarihi Minarelerin Bölümleri.....	12
2.2. Tarihi Minarelerin Taşıyıcı Sistem Seçimleri.....	13
2.3. Tarihi Yığma Minarelerde Kullanılan Yapı Malzemeleri.....	18
2.4. Tarihi Yığma Minare Çeşitleri.....	26
3. TARİHİ YIĞMA YAPILARDA MODELLEME VE ANALİZ YÖNTEMLERİ.....	28
3.1. Modelleme Yöntemleri ve İdealleştirmeler	28
3.1.1. Geometrinin İdealleştirilmesi	29
3.1.2. Malzemenin İdealleştirilmesi	29
3.2. Yığma Yapı Modelleme Yöntemleri	32
3.2.1. Ayrıntılı Mikro Modelleme Yöntemi	33
3.2.2. Basitleştirilmiş Mikro Modelleme Yöntemi.....	34
3.2.3. Makro Modelleme Yöntemi	34
3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi	35
3.4. Analiz Yöntemleri	39
KAYNAKLAR.....	64
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Yığma Minarelerin Dinamik Analizi

Şule SEKİN ERONAT

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2022, Sayfa: xi + 66

Ülkemizde farklı dönemlere ait birçok tarihi eser döneminin üslup ve mimari anlayışını yansıtan önemli kaynaklar olarak günümüze kadar ulaşmıştır. Günümüze kadar ulaşan bu eserlerden yığma minareler kültürel mirasın önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu kültürel mirası korumak ve gerekli önlemleri alarak gelecek nesillere aktarmak önemlidir. Tarihi yığma yapıların sonlu elemanlar metodu ile modellerinin oluşturulması ve analizlerinin yapılması zor ve karmaşıktır. Bu sebeple tarihi yapılar çok özenli ve dikkatli modellenmeli, uygun analizler yapılarak en doğru sonuca ulaşmaya çalışılmalıdır.

Bu tez çalışmasında, tarihi yapıların önemli bir parçası olan yığma minareler incelenmiştir. Sayısal uygulama için yığma malzeme ile Elazığ il merkezinde inşa edildiği düşünülen yığma bir minare örneği dikkate alınmıştır. Minare üç boyutlu olarak ANSYS sonlu eleman programı kullanılarak modellenmiş ve modellemede makro modelleme yöntemi tercih edilmiştir. Minarenin ilk olarak kendi ağırlığı altında statik analizi yapılmış daha sonra dinamik karakteristikleri elde etmek için modal analizi gerçekleştirilmiştir. Minarenin dinamik analiz için zaman tanım alanında analiz yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla 1999 Kocaeli, 2003 Bingöl ve 2011 Van depremlerinin ivme kayıtları kullanılmıştır. İvme kayıtları minarenin bulunduğu konum dikkate alınarak ölçeklendirilmiştir. Dinamik analizler neticesinde minarede elde edilen yerdeğiştirme ve gerilme değerleri sunulmuştur. Analizler sonunda minarenin x ve y doğrultularında en büyük yerdeğiştirme değerleri sırasıyla 2011 Van ve 2003 Bingöl depremlerinde elde edilmiştir. Gerilme için en büyük değerler ise 2003 Bingöl depremi altında bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Tarihi yığma minare, Üç boyutlu sonlu elemanlar, Dinamik analiz

ABSTRACT

Dynamic Analysis of Masonry Minarets

Şule SEKİN ERONAT

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

June 2022, Pages: xi + 66

Many historical structures belonging to various periods in Turkey have survived to the present day as significant sources and artifacts of the style and architecture of their time. Masonry minarets, one of these structures that have survived today, constitute an important part of the cultural heritage. That is important to protect this cultural heritage and transfer it to future generations by taking the necessary precautions. It is difficult and complex to model and analyse historical masonry structures using the finite element method. For this reason, historical buildings should be modelled very carefully, and appropriate analyses should be made to reach the most accurate result.

In this thesis, masonry minarets, which are an important part of historical structures, were examined. For the numerical application, a masonry minaret, which is thought to have been built in the city centre of Elazığ, was taken into account. The minaret was modelled in three dimensional using the ANSYS finite element program and macro modelling method was preferred in the modelling. Firstly, the static analysis of the minaret under its own weight was performed, and then the modal analysis was carried out to obtain the dynamic characteristics. Time history analysis method was used for the dynamic analysis of the minaret. For this purpose, acceleration records of 1999 Kocaeli, 2003 Bingöl and 2011 Van earthquakes were used. All acceleration records were scaled according to location of the minaret. Displacement and stress values obtained in the minaret as a result of dynamic analysis were presented. At the end of the analysis, the largest displacement values in the x and y directions of the minaret were obtained in the 2011 Van and 2003 Bingöl earthquakes, respectively. Also, the highest values for stress were found under the 2003 Bingöl earthquake.

Keywords: Historical masonry minaret, Three dimensional finite elements, Dynamic analysis

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Bazı tarihi minareler	11
Şekil 2.2. Minare bölümleri	12
Şekil 2.3. Minarelerin sınıflandırılması	15
Şekil 2.4. Karkas minare örnekleri.....	16
Şekil 2.5. Yığma minare örnekleri.....	18
Şekil 3.1. Yapısal analizlerin doğruluklarının tarih boyunca gösterimi	30
Şekil 3.2. Gerilme – şekil değiştirme diyagramı.....	31
Şekil 3.3. Yığma minarelerin homojenleştirilmesi.....	32
Şekil 3.4. Modelleme yöntemleri.....	33
Şekil 3.5. Basitleştirilmiş mikro modelleme yönteminin şematik gösterimi.....	34
Şekil 3.6. Sonlu eleman türleri.....	35
Şekil 3.7. Bir boyutlu sonlu eleman modeli	31
Şekil 3.8. İki boyutlu sonlu eleman modeli.....	36
Şekil 3.9. Üç boyutlu sonlu eleman modeli	37
Şekil 3.10. Amorf bir şeklin sonlu eleman ağı.....	37
Şekil 3.11. Sonlu eleman sayısı ile yaşlaştık sonuçların yakınsama ilişkisi.....	37
Şekil 3.12. Farklı sonlu eleman modelleri	38
Şekil 4.1. Yığma minarenin geometrik özellikleri ve kesitleri.....	41
Şekil 4.2. Yığma minarenin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli, çekirdek kısmı ve merdivenler	43
Şekil 5.1. Ölü yükler altında yığma minarenin şekil değiştirmiş üç boyutlu görüntüsü (m).....	44
Şekil 5.2. Statik analiz sonucunda yığma minaredeki gerilme dağılımı (kPa).....	46
Şekil 5.3. Yığma minarenin mod şekilleri	47
Şekil 5.4. 1999 Kocaeli depremi ivme kayıtları.....	48
Şekil 5.5. 2003 Bingöl depremi ivme kayıtları	49
Şekil 5.6. 2011 Van depremi ivme kayıtları	50
Şekil 5.7. 1999 Kocaeli depremi için 7434 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği	51
Şekil 5.8. 1999 Kocaeli depremi için maksimum asal gerilme (kPa)	52
Şekil 5.9. 1999 Kocaeli depremi için minimum asal gerilme (kPa).....	52
Şekil 5.10. Maksimum asal gerilme diyagramının zamana bağlı değişimi	53
Şekil 5.11. Minimum asal gerilme diyagramının zamana bağlı değişimi	53
Şekil 5.12. 2003 Bingöl depremi için 7434 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği.....	54

Şekil 5.13.	2003 Bingöl depremi için maksimum asal gerilme (kPa)	55
Şekil 5.14.	2003 Bingöl depremi için minimum asal gerilme (kPa)	56
Şekil 5.15.	Maksimum asal gerilme diyagramının zamana bağlı değişimi	56
Şekil 5.16.	Minimum asal gerilme diyagramının zamana bağlı değişimi	57
Şekil 5.17.	2011 Van depremi için 7434 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği	57
Şekil 5.18.	2011 Van depremi için maksimum asal gerilme (kPa)	59
Şekil 5.19.	2011 Van depremi için minimum asal gerilme (kPa)	59
Şekil 5.20.	Maksimum asal gerilme diyagramının zamana bağlı değişimi	60
Şekil 5.21.	Minimum asal gerilme diyagramının zamana bağlı değişimi	60
Şekil 5.22.	Tüm deprem ivmeleri için 7434 nolu düğüm noktasının x doğrultusundaki yer değiştirme grafiği	61
Şekil 5.23.	Tüm deprem ivmeleri için 7434 nolu düğüm noktasının y doğrultusundaki yer değiştirme grafiği	61

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Doğal taşlarda yaklaşık mekanik özellikler	20
Tablo 2.2. Tuğlalara ait yaklaşık mekanik özellikler	23
Tablo 2.3. Ahşabın ortalama mekanik özellikleri	24
Tablo 3.1. Analiz tiplerinin karşılaştırılması.....	40
Tablo 4.1. Yığma minare için dikkate alınan malzeme özellikleri.....	42
Tablo 5.1. Serbest titreşim periyotları ve kütle katılım oranları.....	47
Tablo 5.2. 1999 Kocaeli depremi için seçili noktalardaki x ve y doğrultularındaki yer değiştirme değerleri	51
Tablo 5.3. 2003 Bingöl depremi için seçili noktalardaki x ve y doğrultularındaki yer değiştirme değerleri	56
Tablo 5.4. 2011 Van depremi için seçili noktalardaki x ve y doğrultularındaki yer değiştirme değerleri	60
Tablo 5.5. Dinamik analizlerden elde edilen maksimum ve minimum gerilme değerleri.....	62

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ε	: Şekil değiştirme
E	: Elastisite modülü
σ	: Gerilme
g	: Yerçekimi ivmesi
kPa	: Kilopaskal
MPa	: Megapaskal
Hz	: Hertz
GPa	: Gigapaskal
fb	: Basınç mukavemeti
fç	: Çekme mukavemeti
f	: Frekans
T	: Periyot
{u}	: Yer değiştirme vektörü

Kısaltmalar

2D	: İki Boyutlu
3D	: Üç Boyutlu
AKS	: Ayarlı Kütle Sönümleyici
ÇTTY	: Çevresel Titreşim Testi Yöntemi
DBYBHY 2007	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik
DD-2	: Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2
FE	: Finite Element
FEM	: Finite Element Method
HHt- α	: The Hilber-Hughes-Taylor- α
SAP2000	: Structural Analysis Program 2000
TBDY 2018	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

1. GİRİŞ

Yaşadığımız coğrafya pek çok farklı kültür ve medeniyete ev sahipliği yapmıştır. Her medeniyet farklı bir yaşam tarzıyla coğrafyamıza renk katmıştır. Yaşadığı dönem ve yaşam şekillerinden izler bırakmıştır. Bu coğrafyada yaşamak için temel ihtiyaçlarımız bulunmaktadır. Bu ihtiyaçlarımız (barınma, ibadet, seyahat vb.) çeşitli yapıların ortaya çıkmasına vesile olmuştur. Bu yapıların büyük çoğunluğu yüzyıllardır ayakta kalmayı başarmıştır. Ortaya çıkan bu yapıların bir kısmı geçmişte bazı dönemlerde tahrip olmuş ancak bir kısmı günümüze kadar ulaşmıştır. Geçmişten günümüze kadar ulaşabilen bu yapılara tarihi yapılar denmektedir. Rüzgâr, sel, yangın, heyelan, deprem gibi doğal afetler ve çeşitli beşeri faktörlerle bu tarihi yapılar gerek yapı elemanlarının hasar almasıyla gerekse bulunduğu zeminin zarar görmesiyle tahribata uğramış, mimari ve statik yapılarında bozulmalar meydana gelmiştir. Bu hasarlar kimi zaman onarılmış kimi zaman da onarılmadan günümüze kadar gelmiştir. Ancak kimisi de onarılamadan ne yazık ki tamamen yok olmuştur.

Sürekli gelişen ve değişen dünyamızda değişim her zaman iyi anlamda bir durum değildir. Tahrip olan yapılar da maalesef değişimin bir parçasıdır. Bu değişimler tarihi yapılarımızın ayakta kalma şekillerini ve sürelerini etkilediği için belirli bir zaman sonra müdahale ihtiyacı doğurur. Kullanım ömrü uzayan tarihi yapının kültür ve turizme kattığı değer şüphesiz son dönemlerde yapılan yapılardan çok daha fazladır. Tarihi yapılar kültürümüzün ve turizmin temel yapı taşlarını oluşturmaktadır.

Tarihi yapıların değeri onların çok daha uzun yıllar ayakta kalma süresiyle artacağından oldukça iyi restore edilmeleri şarttır. Bu nedenle bu yapıların gelecek nesillere aktarılabilmesi için güçlendirilmesi veya restorasyonu zorunludur. Günümüz şartlarında çok iyi projelendirme, doğru zemin etütleri ve uygun modelleme yöntemleri ile tarihi yapıların eski haline en yakın şekilde restore edilebilmeleri mümkündür. Gelişen teknoloji ve programlar bizlere bu imkânları sunmaktadır. Güçlendirme ve restorasyon sırasında yapılacak hesaplar oldukça önemlidir. Yapılan bu hesaplarla beraber çok iyi bir yerinde uygulama ile tarihi yapıların kullanım ömrü uzamaktadır. Tarihi yapının kullanım ömrünün uzaması için iyi bir modelleme tekniği, restorasyon için kullanılacak malzemelerin gerçeğe uygun seçilmesi ve yapının bulunduğu zeminin iyi analiz edilmesi, yapıya uygun bir analiz yönteminin kullanılması ve yapılan bu hesaplamaların, projelendirmenin yerinde gerçeğe uygun bir şekilde uygulanması daha doğru sonuçların ortaya çıkmasını sağlayacaktır. Tarihi yapıları; köprüler, cami ve minareler, hanlar, hamamlar, su kemerleri, kiliseler, sinagoglar ve kümbetler şeklinde sınıflandırmak mümkündür.

1.1. Literatür Taraması

Tarihi yığma yapılar geçmişi günümüze taşıyan çok önemli kültürel miraslarımızdır. Bu önemli yapılar geçmiş ve günümüz arasında kurulan köprü niteliğindedir. Bu köprü sosyal, kültürel, dini yönden güçlü temellere sahiptir. Tarihi yapılarımızın önemli bir kısmını da bu dini yapılar oluşturmaktadır. Bu yapılar geçmişin izlerini görmek korumak ve gelecekte insanlara yansıtmak adına çok fazla araştırmaya konu olmuştur. Tarihi yığma yapıların bir bölümünü de tarihi minareler oluşturmaktadır. Literatür göz önüne alındığında birçok araştırmacı tarihi yığma minareleri, kendilerinden önce yapılan araştırmalardan elde edilen bulgular ışığında kendi dönemlerine göre ya yeniden yorumlamış ya da yapım yöntemlerinin daha anlaşılır ve geliştirilebilir olması için farklı yönleriyle incelemiştir. Konuyla alakalı daha önce yapılmış teorik ve deneysel bazı bilimsel çalışmaların içerikleri hakkında aşağıda kısaca bilgiler verilmiştir.

Oğuzmert (2002), çalışmasında rüzgâr ve deprem yüklerine karşı dayanıksız olan yığma minarelerin dinamik davranışlarını araştırmıştır. Toplamda altı bölümden oluşan çalışmada; ilk bölümde yığma yapılarda kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri ve yığma yapıların analizlerinde kullanılan yöntemler anlatılmıştır. İkinci bölümde bilgisayarda yapılan modellemeler ve bunların uygulamalarından bahsedilmiştir. Sonlu elemanlar yönteminin bu alandaki uygulamaları ve teknik uygulanırken ki kısıtlamalardan bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde Osmanlı döneminde yapılan yığma minarelerin yapım teknikleri anlatılmış, bunun yanında Sinanpaşa ve Fındıklı camilerinin minarelerinin yeniden yapımı esnasındaki gözlemlere fotoğraf ve şekiller ile yer verilmiştir. Devamında Marmara Bölgesinde meydana gelen depremlerin minareler üzerindeki etkisi anlatılmış, Dolmabahçe Camisi minareleri üzerine araştırmalar kabuk elemanlar kullanılarak SAP2000 programında modellenmiştir. Sonuçlar analiz edilmiştir.

Nuhoğlu ve Şahin (2005), yaptıkları çalışmada sanayi bacaları ve minareler gibi narin, içi boş yapıların tasarım standartlarından bahsetmişlerdir. Farklı yüksekliklere sahip minare ve baca gibi kule tipi yapıların farklı deprem bölgesi ve farklı zemin koşullarındaki statik ve dinamik davranışlarını araştırmışlardır. Teorik analizde çeşitli şartnameler kullanılmış, sayısal işlemler için SAP2000 paket programı kullanılmıştır. Farklı verilerle tasarlanmış farklı geometrilere sahip kule tipi yapıların zati, deprem ve rüzgar yükleri gibi yükler etkisindeki statik ve dinamik analizlerinden elde edilen sonuçları kıyaslanmışlardır.

Şen (2006), tez çalışmasında tarihi yığma yapıların modelleme ve analiz yöntemlerinden bahsetmiştir. Modelleme kısmında üç boyutlu sonlu elemanlar (3D FEM) ve lineer elastik analiz üzerinde yoğunlaşmıştır. Sayısal çalışma için 105 yaşında yığma bir yapı olan Hemdat Israil Sinagogu tercih edilmiştir. Devamında ise sinagog düşey ve yatay deprem yükleri altında incelenmiştir. Binanın lineer elastik analizleri SAP2000 programı kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca yığma binalarda bulunabilen geniş pencere boşluklarının binanın sismik davranışı

üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bu amaçla pencere boşluklu ve pencere boşluksuz olmak üzere iki farklı model oluşturmuş ve analizlerini yapmıştır. En son aşamada ise yapının elemanlarının gereken dayanımı malzemelerin varsayılan elastik kapasiteleri ile kıyaslanmış ve sonuçları değerlendirmiştir.

Temüz (2007), çalışmasında minarelerin zaman içindeki gelişimlerinden, yapım amaçlarından, minare elemanlarından, minareye etkiyen yük ve hesap yöntemlerinden bahsetmiştir. Genel olarak ve örnek olarak seçilen minarelerin yapısal özelliklerini anlatmıştır. Bu yapılara ilişkin olarak yayınlanan çeşitli esas ve standartlara değinmiştir.

Dabanlı (2008), tarafından 2008 yılında yapılan çalışmada, Hırka-i Şerif Camii hakkında bilgiler verilmiş daha sonra sonlu elemanlar programı ile yapının üç boyutlu modeli caminin rölöve çizimleri yardımı ile oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin statik ve dinamik analizleri yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda analizler değerlendirilerek Hırka-i Şerif Camii hakkında bir takım güçlendirme önerileri sunulmuştur.

Ertek (2009), çalışmasında Osmanlı döneminde yapılan minareler için kullanılan farklı yapım teknikleri ve malzeme çeşitlerini araştırmıştır. Modelleme yapmak için minare boyutları ve geometrilerini belirlemiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak farklı minare sistemlerini modellemeye çalışmıştır. Minarede geometrik özellikler olan dış kabuk ve iç merdivenler için farklı sonlu elemanlar modellenmeye çalışılmış ve karşılaştırılmıştır. Beraberinde malzeme özellikleri ve mesnet koşulları için de farklı modeller oluşturulmuştur. Geçmişte yaşanan büyük depremlerin ivme kayıtlarının bu koşullara göre dinamik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir.

Çarhoğlu ve arkadaşları (2013), yaptıkları çalışmada farklı boyutlara sahip Ayasofya minarelerini incelemiş ve bu minarelere zaman tanım alanında analizler yapmışlardır. Bunun sonucunda minare yüksekliğinin periyot, mod şekilleri, yer değiştirme ve gerilme değerlerini farklı şekillerde etkilediği gözlemlemişlerdir.

Baştürk (2013), yaptığı çalışmada incelediği minarelerin geometrik özellikleri, malzeme özellikleri ve yapım yöntemleri hakkında bilgiler vermiş, minarelerin dinamik karakteristiklerini belirlemiştir. Bunlar yapılırken beraberinde hassas ivmeölçerler ve uygun yazılımlar kullanılarak dinamik karakteristiklerinin belirlenmesine dayalı deneysel modal analiz yöntemlerinden birisi olan çevresel titreşim testleri yapılmış ve minarelere ait mod şekilleri ve frekanslar elde edilmiştir. Daha sonra incelenen minarelerin sayısal modelleri oluşturulmuş, malzeme özelliklerinde ve mesnetlenme koşullarında ölçümleme yapılarak sonlu eleman analizinden elde edilen sonuçlarla deneysel yaklaşımla elde edilen sonuçların yakınsaklığı sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında dinamik karakteristikler üzerinde etkili olan faktörler ve minarelerin deprem davranışları konusunda değerlendirmeler yapmıştır.

Serhatoğlu (2015), yapmış olduğu çalışmada tarihi minarelerin yapısal davranışını temsil edebilecek sayısal modelleri, üç boyutlu sonlu elemanlar yaklaşımıyla oluşturmuş ve modal

testten elde edilen değerler sayesinde kalibrasyonlarını gerçekleştirmiştir. Kalibrasyon neticesinde sayısal modellerin modal analiz sonuçları ile modal test arasındaki hata oranını %10'un altında tutarak, araştırılan tarihi minarelerin dinamik davranışlarını mümkün olduğunca mevcut yapı davranışına yakın çözümlemeye çalışmıştır. Ayrıca, incelenen tarihi minarelerin birinci mod periyotları ile periyota etkiyen parametreler arasında ilişki kurarak regresyon analizi yapmıştır. Son olarak incelenen minarelere doğrusal olmayan itme analizi uygulanarak talep ve kapasite diyagramları elde edilmiş ve deprem performansları değerlendirilmiştir. Bu durumlar neticesinde tarihi minarelerdeki deprem hasarlarının genellikle minare elemanlarının birleşim bölgelerinde olduğu belirlenmiştir.

Taş (2015), yapmış olduğu çalışmada seçtiği yüksek betonarme bir minare ile bu minarenin ayarlı kütle sönümleyicisi (AKS) yerleştirilmiş halinin, Rita kasırgasından elde edilen rüzgâr kuvvetleri, harmonik hareket ve seçilen deprem hareketleri etkisi altında dinamik davranışlarını araştırmıştır. Analizler için zaman tanım alanında analiz yöntemini tercih etmiştir. Minaredeki yapısal sönüm artışı, harmonik ve deprem hareketleri için yatay tepe yer değiştirmelerini belirlemiştir.

Mutlu (2015), çalışmasında yığma yapıların davranışları ve tarihi yapıların taşıyıcı sistem elemanlarını incelemiştir. Bursa Ulu Camii ve Bursa Yeşil Camii hakkında bilgiler vermiştir. Tarihçesi, konumu ve yapısal özelliklerini anlatmış, yapısal modellerini oluşturmuş ve oluşturduğu bu modellerin analizlerini yapmıştır. Elde ettiği analiz sonuçlarını değerlendirmiştir.

Denghanian (2015), yaptığı çalışmada günümüzde inşa edilen modern betonarme minarelerin Türk deprem yönetmenliğine göre dizayn edilip, gerçek ivme kayıtları ile mukayese edilmesi için temel metodolojileri ve kriterleri özetlemiştir. Zaman alanı ölçekleme işlemi farklı sismik bölgelerde ve zemin tipleri için Türk Deprem Yönetmeliğinde (DBYBHY, 2007) verilen elastik tasarım spektrumu ile uyumlu ölçeklenmiş gerçek kayıtları kullanmıştır. Bu amaçla, deprem büyüklüğü, odak mekanizması ve saha şartlarına bakarak uygun yer hareketleri seçilerek analizler yapılmış ve minare performansı her kayıt için ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Hacıefendioğlu ve Maraş (2016), çalışmalarında yığma tipindeki bir tarihi minarenin mod parametrelerini sayısal ve deneysel analizler yaparak araştırmışlardır. Yapılan bu çalışmada deneysel analiz için Samsun Büyük Camii tercih edilmiştir. Minarenin mod parametrelerini bulabilmek için Operasyonel Modal Analiz metodu kullanılmıştır. Minarenin fotoğraflarını gerekli bilgilere dönüştürerek veri analizi yapmak ve sonlu eleman modelini oluşturmak için fotogrametri yöntemini kullanmıştır.

Şentürk ve Özkaynak (2017), çalışmalarında İstanbul ili Kasımpaşa ilçesinde bulunan Kapıüstü Mescidinin yenileme projesi kapsamında inşa edilen yedek basamaklı minarenin modal analizi ve itme analizini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak hazırladıkları model üzerinde gerçekleştirmişlerdir. İki aşama olarak yapılan çalışmada ilk aşamada mescid minaresinde

uygulanan geleneksel yapım yöntemleri ve yapıda kullanılan malzemelerle yapının inşa süreci detaylı olarak açıklanmıştır. İkinci aşamada ise bu minarenin yapı mühendisliği açısından lineer olmayan davranışı incelenmiştir. Minarelerin yapısal davranışlarına çok önemli etkisi olduğu varsayılan basamak sayısının ve minare boyunun yapıya etkileri bu araştırmada çalışmanın temel parametresi olarak seçilmiştir. Sonuç olarak ise minare boyundaki artışın minaredeki yer değiştirme kapasitesini arttırdığı ancak dayanımın büyük ölçüde azalmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Basamak sayısında meydana gelen artışın ise kesit artışına sebep olduğu ancak kütlenin de beraber artmasıyla minarenin doğal titreşim periyotlarını çok fazla etkilemediği görülmüştür.

Çalık (2017), yaptığı çalışmada çeşitli taşıyıcı sistemli tarihi camiler ve minarelerin deneysel dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi için Çevresel Titreşim Testi Yöntemi (ÇTTY) ile verileri toplamış ve yapıların dinamik karakteristiklerini belirlemiştir. Restorasyon yapılmadan önce ve yapıldıktan sonra ortaya çıkan veriler araştırılarak restorasyonun yapıya etkileri ortaya konulmuştur. Öncelikle, tarihi eser çeşitleri, tespit edilen hasar türleri ve sebepleri, restorasyon yöntemleri, kullanılan deneysel metotlara ait formülasyonlar, cami ve minareler hakkında bilgiler verilmiştir. Örnek olarak seçilen farklı taşıyıcı sisteme sahip otuz bir adet cami ve otuz iki adet minarenin tanıtları, restorasyon sırasında yapılan işlemler ve yapılan deneysel ölçümler ile ilgili saha uygulamalarına ilişkin bilgiler sunulmuştur. Deneysel sonuçlar değerlendirilerek, ahşap çatılı yığma, kâgir kubbeli yığma ve ahşap taşıyıcı sistemli camiler ile yığma taş ve betonarme minarelerin yaklaşık doğal frekanslarının analitik olarak tespitine ilişkin formüller geliştirilmekte, sönüm oranı ve modal davranışlarına yönelik değerlendirmeler yapılmakta ve restorasyon işlemlerinin eserler üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur. Çalışma sonucunda, tarihi cami ve minarelerin analitik doğal frekanslarının deneysel yöntemlere dayalı geliştirilen formülasyonlar ile yaklaşık olarak elde edilebileceği, sönüm oranı ve modal davranışlarının tahmin edilebileceği ve restorasyon uygulamalarının yapıların dinamik karakteristiklerine önemli derecede etkisinin olduğu belirlenmiştir.

Çalık ve arkadaşları (2017), yaptıkları çalışmada yığma taş minarelerin deneysel ölçümlerinden elde edilen deneysel doğal frekanslarından yola çıkılarak çeşitli parametrelerle bağıntısı ortaya konulmuş ve yığma taş minarelerin analitik modellerinin iyileştirilmesine esas doğal frekanslarının belirlenmesi üzerine çalışılmıştır. 19 yığma taş minarenin çevresel titreşim testleri yardımıyla doğal frekansları belirlenmiş ve bu deneysel veriler kullanılarak yığma taş minareler için yaklaşık doğal frekans tespitine yönelik basitleştirilmiş formülasyon önerileri verilmiştir. Çalışmada sunulan basitleştirilmiş formülasyon sonuçlarının gerçeğe oldukça yakın olduğu saptanmıştır. Bu formülasyonlarla elde edilen referans değerlerinin, yığma taş minarelerin deneysel ölçümleri ve analitik modellerinin kalibre edilmesinde kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Taher (2018), yaptığı çalışmada, geleneksel camide minarenin ortaya çıkışı ve gelişiminin tarihini incelemiştir. Çağdaş cami mimarisi ile geleneksel cami minaresi özelliklerin karşılaştırılması üzerine çalışmıştır. Bunlar üzerine örnek yapılar incelenmiştir. İlgili cami hakkında toplanan bilgileri sunmuştur. Ayrıca, vaka çalışmalarının minareleri analiz edilmiş ve geleneksel minarenin özellikleri ile karşılaştırılmıştır.

Eren ve Beyen (2018), çalışmalarında tarihi yapıların deprem performansında zemin ve mesnet koşullarının etkisinin nümerik modelde dikkate alınarak ortaya çıkan sonuçları zeminin göz ardı edildiği durumdaki sonuçlarla karşılaştırılmışlardır. Bu amaçla, Fatih Külliyesi içerisinde bulunan Fatih Sultan Mehmet Han'ın kabrinin bulunduğu türbe yapısı üzerine çalışılmıştır. Analitik modelde üst yapı kabuk elemanlarla, zemin tabakaları ise üç boyutlu katı elemanlar ile oluşturulmuştur. Birinci uygulamada zemin etkisi ihmal edilerek üst yapı ankastre olarak modellenmiştir. İkinci uygulamada üst yapı sadece basit mesnet olarak modellenmiştir. Üçüncü uygulamada ise yapı yerel zemin şartları dikkate alınmıştır. Yapı ve zemin malzemesinin lineer-elastik davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Analizler zaman tanım alanında yürütülmüştür. Analiz sonucunda elde edilen modal bilgiler, gerilmeler, taban kesme kuvvetleri, deplasmanlar mukayese edilmiştir. Yapıda zemin ve mesnet koşullarının etkisi modellemeye göz önüne serilmiş, sonuçlara göre ise ankastre ve basit mesnetli durumların mevcut tarihi yapının zemine bağlantısının mesnetlemeye alakalı kayda değer değişiklikler oluşturmadığı görülmüştür. Fakat zeminle beraber modellenen yapıda zemin tabakasının modele dahil edilmesiyle beraber farklı sonuçlar çıkmıştır. Elde edilen sonuçlarla mevcut tarihi yapıların deprem durum değerlendirmesinde zemin etkisinin önemli olduğu, zeminin yapıya yakın olan bölgelerinde sağlam zemin oluşturulmasıyla deprem etkilerinin azaltılabileceği ve gözlenen bu durumların güçlendirme çalışmalarında güvenilir ve yapıcı kararların alınmasına katkı sağlayacağı söylenmiştir.

Calp (2018), yaptığı çalışmada minarelerin bölümleri hakkında bilgi vermiş ve modellemesi yapılacak minarelerin röleve çizimlerini yaparak ölçülendirmiştir. Ölçülendirilmiş minareler sonlu eleman programı ile katı cisim olarak üç boyutlu olarak modellenmiştir. Daha sonra minarelerin seçilen üç farklı deprem yükü altındaki dinamik analizleri ve bunun sonucunda göstereceği performans elde edilmiştir. Minarelere ait kütle katılım oranları, periyot ve frekanslarını belirten çizelgeler oluşturulmuş, yapıya ait şekil değiştirme halleri ortaya konmuştur. Yapıların periyotları ve depremlere bağlı olarak oluşan zemin hâkim periyotları kıyaslanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Minarelerin kendi ölü yükleri ve deprem etkisi altındaki durumlarda çekme ve basınç gerilmeleri incelenmiştir. Ayrıca minare tepelerinde meydana gelen ötelemelerin hangi limitlerde gerçekleştiği belirlenerek çizelge halinde sunulmuştur.

Döven ve arkadaşları (2018), çalışmalarında ülkemizde çok nadir olarak görülen kapalı şerefeli minarelerin muhtemel depremlere karşı dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Bu amaçla Kütahya ilinde bulunan kapalı şerefeli Yeşil cami minaresinin mevcut durumu hakkında genel bilgiler vermiş ve çalışmalarında bu cami minaresini incelemişlerdir. Deneysel analizlerinde çevresel titreşim deneyini kullanılmışlardır. Deney, iki farklı tipte ivmeölçer kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Tarihi minarenin sayısal olarak dinamik davranışını değerlendirmek için ise yapının sonlu elemanlar modeli ABAQUS programında oluşturulmuştur. Model, çevresel titreşim deneyi sonuçlarıyla güncellenerek mevcut minarenin malzeme özellikleri ve mesnet koşulları belirlenmiştir. Daha sonra aynı malzeme ve geometrik boyutlar kullanılarak minare açık şerefeli olarak modellenmiş ve modal analiz yapılmıştır. Her iki modelden elde edilen mod şekilleri ve modal frekansları kıyaslanarak kapalı ve açık şerefelin minarenin dinamik davranışına etkisi yorumlanmıştır. Ayrıca seçilen elastik ivme spektrumları dikkate alınarak, birinci ve ikinci mod için iki minare türünde oluşacak yatay yük değişim oranları karşılaştırılmıştır.

Çelik (2019), yapmış olduğu çalışmada Antalya’da bulunan Yivli minarenin depreme karşı dayanıklılığını incelemiştir. Bu amaçla, Yivli Minare’nin üç boyutlu modeli, sonlu eleman programı ile modellenmiştir. Minarenin statik ve dinamik analizleri ANSYS sonlu elemanlar programı yardımıyla yapılmıştır. Modal analiz ile yapının dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Çalışmada yapı; düşey yükler altında statik analiz, eşdeğer deprem kuvveti yöntemine göre analiz ve mod birleştirme yöntemine göre dinamik analiz yöntemleriyle incelenmiştir.

Alamehmet (2019), yapmış olduğu çalışmada Bursa Ulu cami minaresinin modelinin doğrusal olmayan dinamik analizlerini yapmıştır. Bu amaçla minareyi üç boyutlu olarak sonlu elemanlar programı ile modellemiş ve zaman tanım alanında analizlerini gerçekleştirmiştir. Analiz sonunda gerilme dağılımı, kesme dayanımı kontrolü ve öteleme oranlarını tespit etmiştir.

Altıok (2019), tez çalışmasında, tahribatsız testler ile nümerik analizleri birlikte kullanarak tez çalışması kapsamındaki minarelerin sonlu elemanlar modelini oluşturmuştur. Tahribatsız testler kapsamında çevresel titreşim yöntemi olarak da bilinen Operasyonel Modal Analiz yöntemini kullanmıştır. Deneysel ve nümerik yöntemlerin birlikte kullanılmasıyla iyileştirilmiş sonlu elemanlar modeli elde edilmeye çalışılmıştır. Daha sonra minarelerin başlangıç malzeme parametrelili, iyileştirilmiş malzeme parametrelili ve yapı-zeminin birlikte düşünüldüğü modeller olmak üzere üç ayrı tip modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller üzerinde doğrusal ve doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları ilgili bölümlerde detaylı olarak tablolar halinde sunulmuştur.

Oğuzhanoglu (2019), çalışmasında dış kuvvete maruz kalan bir minarede oluşan yanal deformasyonlar yani eğilme deformasyonu, kesme deformasyonu ve sıyrılma deformasyonu gibi deformasyonların her biri için SAP2000 programı kullanılarak, tek şerefeli 19 m, iki şerefeli 28 m

ve üç şerefeli 37 m yüksekliğe sahip betonarme minare modellerini oluşturmuştur. Oluşturulan minare modellerine time history ve pushover analizlerini uygulamıştır. Öngörülen minare davranışı deprem etkisinden dolayı yıkılan minareler ile karşılaştırıldığında önerilen modeller betonarme minarelerin yanal yüklere tepkisini tahmin etmede iyi bir performans göstermiştir.

Gündoğan ve arkadaşları (2020), Kırklareli ilinin merkezinde bulunan Hızırbey Camii minaresinin lineer dinamik analizini yapmışlardır.

Bu minarede dinamik analiz, mod birleştirme yöntemi kullanılarak 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerine (DBYBHY 2007 VE TBDY 2018) uygun olarak SAP2000 programı kullanılarak yapılmıştır ve çıkan sonuçlar kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslama neticesinde TBDY 2018 yönetmeliğine göre çıkan kuvvet ve yer değiştirme sonuçlarının DBYBHY 2007 yönetmeliğine oranla daha büyük olduğu tespit edilmiştir.

Duman (2020), çalışmasında yığma minarelerin yüksekliğinin ve şerefe sayılarının dinamik davranışları üzerindeki etkilerini teorik olarak incelemiştir. Bu temel ilke doğrultusunda farklı yükseklikte ve farklı şerefe sayılarına sahip minareler sonlu elemanlar metodu esasına dayanan ANSYS Workbench bilgisayar yazılım programı yardımıyla modellenmiştir. ANSYS Workbench yazılımı ile minarelerin serbest titreşim ve spektrum analizleri yapılmış, minarenin yüksekliği baz alınarak minare bölümlerine aynı yükseklik değeri eklenerek veya çıkarılarak minarenin farklı yükseklik değerlerine sahip yeni modelleri elde edilmiştir. Elde edilen farklı yüksekliklerdeki minarelere ise yeni şerefeler eklenerek farklı şerefe sayısına sahip yeni minare uyarlamaları elde edilmiştir. Yığma minareler için yapılan serbest titreşim analizleriyle minarenin fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlı olarak, doğal frekansları ve minarenin mod şekilleri gibi dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Yükseklikleri ve şerefe sayıları birbirinden farklı olan bu yığma minarelerin serbest titreşim ve spektrum analizleri yapılarak dinamik davranışları incelenmiştir. Ayrıca minarelerin doğal frekansları, mod şekilleri ve spektrum analizi sonuçları birbirleri ile mukayese edilmiştir.

1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı

Ülkemizin her köşesinde varlığını gösteren birbirinden farklı dönemlere ait birçok tarihi eser dönemin üslup ve mimari anlayışını yansıtan önemli kaynaklar olarak günümüze kadar ulaşmıştır. Günümüze kadar ulaşan eserlerden yığma minareler bu mirasın önemli bir kısmını teşkil etmektedir. Bu kültürel mirası korumak ve gerekli önlemleri alarak gelecek nesillere aktarmak bizim için büyük bir sorumluluk doğurmaktadır. Bu sebeple tarihi yapılar çok özenli ve dikkatli modellenmeli, doğru ve yerinde analizler yapılarak en doğru sonuca ulaşmaya çalışılmalıdır. Tarihi yığma yapıların sonlu elemanlar metodu ile modellerinin oluşturulması zor ve karmaşıktır.

Bu çalışmada tarihi yapıların önemli bir parçası olan yığma minareler incelenmiştir. Minareler geçmişten günümüze kadar dünyanın birçok yerinde inşa edilirken bulundukları bölgenin kültürel ve dini değerlerini yansıtmaktadır. Geçmişten günümüze kule tipi yapılar olarak uzun ve ince tasarlanmalarından dolayı narin bir yapıya sahip minareler, yataydan gelen yüklere karşı oldukça zayıf ve hassastırlar. Bu hassasiyet sebebiyle ülkemiz de dâhil olmak üzere dünyanın farklı birçok yerinde minarelerin doğal ya da beşeri sebeplerle ya tamamen yıkıldığı ya da kısmi yıkılmaların meydana geldiği görülmektedir. Bu yıkılmalar zaman zaman can ve mal kaybına da sebep olmaktadır.

Günümüzde mevcut deprem yönetmeliği incelendiğinde cami ve minarelerin inşası için diğer yapı türleri gibi minarelere özgü yapım ve modelleme yöntemi belirlenmemiştir. Literatür incelendiğinde minarelerin üç boyutlu modellenmesi ve analizi konusu üzerinde yapılan çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülebilir. Yığma tarzda inşa edilen tarihi minarelerin daha iyi restore edilebilmesi ve bu yapıların gelecek nesillere aktarılması için daha çok çalışmaya ve yenilikler üretmeye ihtiyaç duyulduğu açıkça görülmektedir.

Yığma minarelerin üç boyutlu modellenmesi ve dinamik analizlerinin yapılması ve deprem esnasında bu yapıların davranışlarına daha gerçekçi ve güvenilir sonuçlarla karar verebilmek amacıyla bu çalışma kaleme alınmıştır. Yığma yapıların nümerik modellenmesinde 3 farklı metod sıklıkla kullanılır. Bu tez çalışmasında yığma minarenin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli makro modelleme yaklaşımı ile oluşturulmuştur. Minarenin yığma malzeme ile inşa edildiği ve Elazığ il merkezinde olduğu düşünülmüş ve ANSYS (ANSYS, 2015) sonlu elemanlar programı kullanılarak modellenmiştir. İlk olarak minarenin kendi ağırlığı altında statik analizi yapılmış, sonrasında dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Minarenin dinamik analizleri için üç farklı deprem ivmesi dikkate alınmıştır. Dinamik analizler neticesinde elde edilen gerilme dağılımları ve yer değiştirme değerleri sunulmuş ayrıca olası depremler karşısında minarelerin hasar alma riski yüksek olan bölgeleri gözlemlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar bu tür yapıların restorasyon ve güçlendirme projeleri için de fikir vermesi bakımından faydalıdır.

2. TARİHİ MİNARELER, MİNARELERİN TAŞIYICI SİSTEM SEÇİMLERİ, KULLANILAN MALZEMELER VE MİNARE ÇEŞİTLERİ

Dünya üzerinde geçmişten günümüze kadar inşa edilmiş birçok yığma minare bulunmaktadır. Yapılan çalışmalarda çeşitli yerlerde, çeşitli malzemelerle, çeşitli boyut ve sayılarda yapılan çok farklı minare örneklerine rastlamak mümkündür. Bu bölümde tarihi yığma minareler hakkında bilgiler verip; bu minarelerin taşıyıcı sistem elemanları, yapımında kullanılan malzemeler ve özellikleri ile çeşitleri hakkında bilgiler verilmiştir.

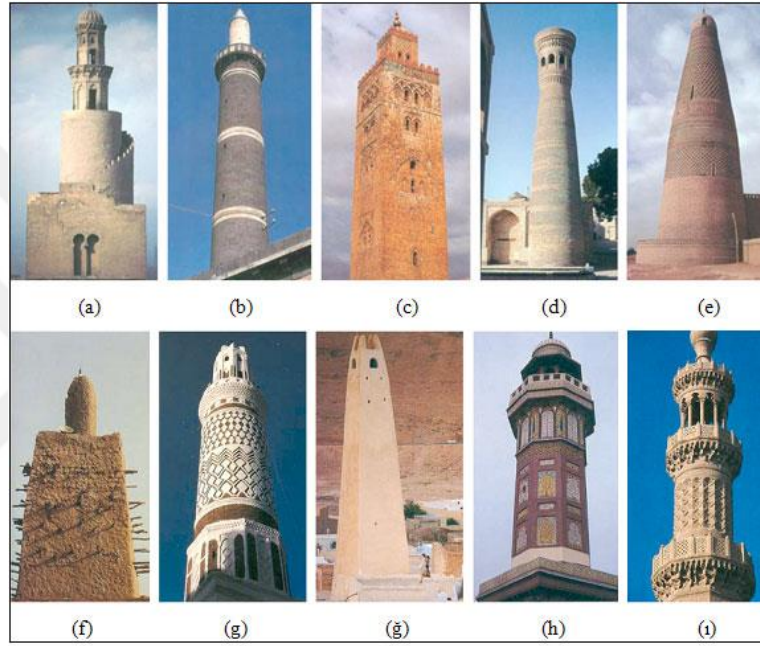
2.1. Tarihi Minareler

Camilerle bitişik veya ayrı şekillerde bulunan, cami denildiğinde beraberinde ilk düşünülen, namaza davet amacıyla okunan ezanın çevreye kolaylıkla duyurulabilmesi için yapılan yapılar minare olarak adlandırılır. Geçmiş zamanlardan günümüze kadar insanoğlu dini inanışları ve yaşayışları gereği ibadet edebilmek amacıyla özel mekânlar inşa etmişlerdir. Yahudiler sinagogları, Hristiyanlar kiliseleri, Puta tapanlar çeşitli tapınakları, Müslümanlar ise camileri ibadet yerleri olarak benimsemişlerdir (Serhatoğlu, 2015). İslamiyet'ten sonra yaşanan kültürel gelişmeler içerisinde İslam Mimarisinin önemi küçümsenemez. Özellikle minareler çeşitleri, şekilleri, süslemeleri ve kullanılan malzemeleri ile İslam Mimarisinde önemli bir yer tutmaktadır. Gelişen mimari ile artık minareler de şehirler için ciddi mimari örneklerini oluşturmaktadır. Küçük mescitlerden devasa camilere kadar birçok yapıda farklı şekillerde minarelere rastlanır. Bu minareler tek ve basit yapıları oldukları gibi çok ve gösterişli yapılarda olabilmektedir. Ezanı çevreye duyurma amacı taşıdığı için genellikle çevresine göre yüksekte olması minarelerin çoğunun genel özelliğidir. İslamiyet'in ilanı ve daha sonra yayılması ile birlikte çeşitli minare örnekleri görülmeye başlanmıştır. Şekil ve inşaları bölgeden bölgeye değişen minareler silindirik, dörtgen veya daha fazla köşeli olarak yapılmıştır. İslam mimarisinin ilk minaresi M.S. 673 te Muaviye zamanında Mısır Valisi Müslime tarafından Amr Camisinde inşa ettirilmiştir (Yücel, 1966). İslam inancına sahip ülkelerde minareleri genellikle doğu ve batı minareleri şeklinde iki grupta ele almak mümkündür. Batı İslam minareleri, Kuzey Afrika ve İspanya'dan Suriye'ye kadar yayılan bölgelerde inşa edilen dört köşe kulelerdir. Bu köşeli minareler kornişlerle katlara ayrılmış, pencere vasıtasıyla da iç mekânla ilişkileri sağlanmıştır. Doğudaki İslam minareleri ise çoğunlukla silindirik ve ince olup, saf, abidevi yapılardır (Diez ve Aslanapa, 1955).

On altıncı yüzyıl başı ile on yedinci yüzyılın son dönemlerinde Osmanlı mimarisi öz yapısını bulmuştur (Temüz, 2007). Selçuklu mimarisinde kullanılan tuğla malzeme yerini taş bırakmış, böylece minareler hem incelmış, hem de sadeleşmiştir.

Osmanlı döneminde öz şeklini alan kaide, pabuç, gövde, şerefe, petek, külah ve alem şeklinde bölümlerden oluşan minare, günümüze kadar aşamalı olarak teknik ve estetik özellikler yönüyle önemli aşamalar kaydetmiştir (Ülgen, 1996).

M.S. 1000 yıllarından itibaren İslam coğrafyalarında devamlı olarak yapılmaya başlayan minareler önceleri sadece camilere inşa edilirken daha sonraları türbe ve medreselere de eklenmeye başlamıştır. Şekil ve formlarıyla ve çeşitli süslemeleri ile farklı bölgelerde bölgeye has özellikleri ile çeşitlilikler göstermiştir (Ülgen, 1996). Bazı minare örnekleri Şekil 2.1’ de verilmiştir.



Şekil 2.1. Bazı tarihi minareler

Bu minareler; (a) Cairo, Ahmad ibn Tulun Cami (Tulunid Devri, 876), (b) Diyarbakır, Ayni Cami (Osmanlı Devri, c. 1489), (c) Marrakesh, Morocco, Kutubiyya Cami (Almohad Devri, 12. yüzyıl), (d) Bukhara, Özbekistan, Kalyan Cami (1514), (e) Turfan, Xinjiang Şehri, Kuzey Çin, Amin Cami, (1778), (f) Timbukte, Mali, DjinguereBer Cami (Songhay Devri, 14. yüzyıl), (g) San'a Yemen, Al-Bakiriyya Cami (Osmanlı Devri, 1598), (ğ) Beni-Isguen, Algeria, Mzab Saharan Köyü Cami, (h) Lahore, Pakistan, Wazir Khan Cami (Mughal Devri, 1634), (ı) Cairo, Amir Qurqumas Cami (Memlûk zamanı sonrası, 1506)' dir (Temüz, 2007).

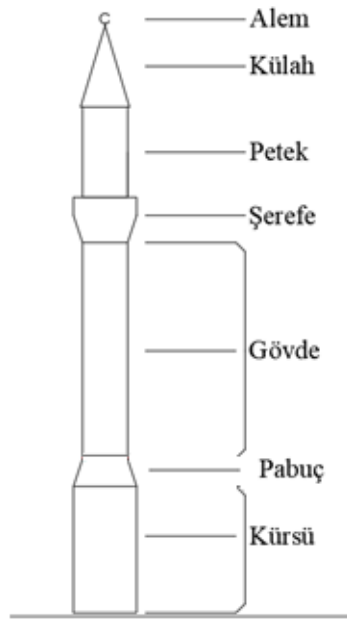
Gerek betonarme gerek yığma minareler taşıyıcı sistem özellikleri yönüyle diğer yapı türlerinden farklıdır. Bundan dolayı kullanım ömürleri süresince karşılaşmaları çok yüksek ihtimal olan deprem, rüzgâr gibi dinamik yükleri güvenli bir şekilde karşılayabilecek ölçüde tasarlanmaları gerekmektedir (Serhatoğlu, 2015). Minareler bir hayli uzun ve narin kule tipi yapılar olduklarından minarelere etkiyen bu yüklerden kaynaklı özellikle petek ve pabuç bölgelerinden sıklıkla hasar alabilmektedirler.

Bu durumun önüne geçebilmek amacıyla yatay ve düşeyde birliktelik sağlayan kenet ve zıvana elemanları tercih edilmiştir. Ayrıca böylesi yapılarda yapının kendi ağırlığı da yapıda büyük gerilmeler oluşturabileceğinden dolayı bu etki de göz ardı edilmemelidir (Altıok, 2019). Minareler yapımı gereği özel uğraş ve işçilik gerektiren yapılardır. Kule tipi yapı olmalarından dolayı her bir malzeme yerinde ve konulacağı yere uygun olarak kesilmelidir.

Ülkemizde bu tarzda inşa edilen kule tipi yapıların hesapları ve tasarımları için hazırlanmış herhangi bir standart ve yönetmelik bulunmamaktadır. Bu tarz yapıların inşası için Diyanet İşleri Başkanlığı'nın 1999 Kocaeli depreminden hemen sonra acil bir şekilde hazırladığı "Minarelerin Yapımında Uygulanacak Esaslar" talimatı bulunmaktadır. Hazırlanmış bu esaslar ise yalnızca betonarme minareleri kapsamaktadır. Bu durum beraberinde bazı sorunlar meydana getirmektedir. Çünkü ülkemizdeki tarihi yapıların önemli bir kısmı betonarme yapı statüsünde değildir. Yönetmeliği bulunmayan diğer yapılar kendi kaderlerine mahkûm edilmiştir. Durum böyle iken, önemli bir kültürel miras ve anıtsal değere sahip tarihi minareler hakkında bu türden bir yönergenin gerekliliğini ifade etme gerekliliği açıktır (Serhatoğlu, 2015).

2.1.1 Tarihi Minarelerin Bölümleri

Minarelerde ya dışarıdan ya da içeriden merdiven sistemleri bulunmakla beraber yeni inşa edilen minarelerde asansör sistemleri de bulunmaktadır. Yüksek uzun bir yapı olan minareler toplamda 7 bölümden oluşur (Başar, 1988). Bu bölümler; kürsü (kaide), pabuç (küp), gövde, şerefe, petek, külâh ve alem olarak isimlendirilir. Ayrıca iç kısımda şerefeye ulaşımı sağlayan birde merdiven bulunmaktadır. Minarenin bölümleri Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Minare bölümleri

-Kürsü (Kaide): Minarenin cami ana kitlesiyle bağlantısının kurulduğu, prizmatik biçimli en alt bölümüdür. Minarenin giriş kapısı genellikle burada yer almaktadır (Doğangün vd, 2006).

Kaideler zaman içinde birçok şekilde yapılmışlardır. Küp, 8 köşeli, 12 köşeli, 16 köşeli ve daire şekillerinde tasarlanmışlardır. Kaidelerin boyları ise genel olarak zaman içinde gittikçe uzamıştır (Bektaşoğlu ve Yıldırım, 2006).

-Pabuç (Küp): Minarenin bu ögesi, boyutları ve geometrisi birbirinden farklı olan kaide ve gövde arasında, akıcı ve kesintisiz bir geçişi sağlamak amacıyla yapılmaktadır. Dolayısıyla bunların geometrik şekilleri, kaidenin ve gövdenin şekline göre farklılık göstermektedir. Küplerin uzunlukları kaidelerde olduğu gibi zaman içerisinde uzamıştır (Başar, 1988).

-Gövde: Gövdeler Anadolu Selçuklularından beri on altıgen şeklinde yapılmıştır. Daha sonraları silindirik gövdelere dönmüştür. Fakat Fatih devrinden itibaren yine 16 yüzlü gövdelerin kullanımı artmıştır. Önceleri çapı gittikçe azalan gövdeler kullanılırken daha sonra sabit bir şekilde yükselen gövdeler kullanılmıştır (Başar, 1988).

-Şerefe: Daha önceleri müezzinin yüksekten ezan okuyabilmesi amacıyla yapılan, küçük balkon şeklindeki minare ögesidir. Şerefeler şerefe gövdesi, şerefe döşemesi (tabliyesi) ve şerefe korkuluğu olmak üzere üç kısımdan oluşur (Tayla, 2006). Şerefeler de fitil, püskül, badem gibi süslemeler de yapılabilmektedir (Başar, 1988).

-Petek: Son şerefe ile külah arasında kalan minare ögesidir. Bu kısım genellikle gövdeye benzer özellikler göstermektedir (Doğangün vd, 2006).

-Külah: Peteğin üst kısmında bulunur. Kulelerin ya da minarelerin üzerini örten, genelde koni ya da piramit biçiminde, adından da anlaşılacağı üzere külah şeklinde sivri çatılara denir. Kule ve minare gibi yapıların üstlerini örtmek için kullanılır. Bu yapılara minare külahı ya da kule külahı da denir. Minarelerin külahlarının içi ahşap, dışı da kurşunla örtülüdür. Külah şadırvanda da kullanılır (URL-1).

-Alem: Alem, külahın ucunda örtüyü bitiren elemandır (Ödekan, 1997). Alem dikey bir eksene geçirilmiş, yuvarlak kısımlar ve bunların üzerine yerleştirilmiş bir tepelikten ibarettir. Bunlar aşağıdan yukarıya doğru; kova, büyük küp, bilezik, armut, boyun, küçük küp diye isimlendirilmiştir (Başar, 1988).

2.2. Tarihi Minarelerin Taşıyıcı Sistem Seçimleri

Minareleri taşıyıcı sistemlerine göre karkas ve yığma minareler olarak iki temel gruba ayırmak mümkündür (Şekil 2.3). Minareler inşa edilme tekniği olarak çok özel ve ustalık gerektiren yapılardır. Minarelerde birden fazla iş kalemi bulunmaktadır. Minareler bu kalemlerin bir araya getirilmesiyle oluşan ve özelleştirilmiş yapım yöntemlerinin kullanıldığı bir yapı türüdür.

Minareler yapıları gereği uzun ve narin yapılar olduğundan projelendirilirken dikkat edilmesi gereken pek çok faktör bulunmaktadır.

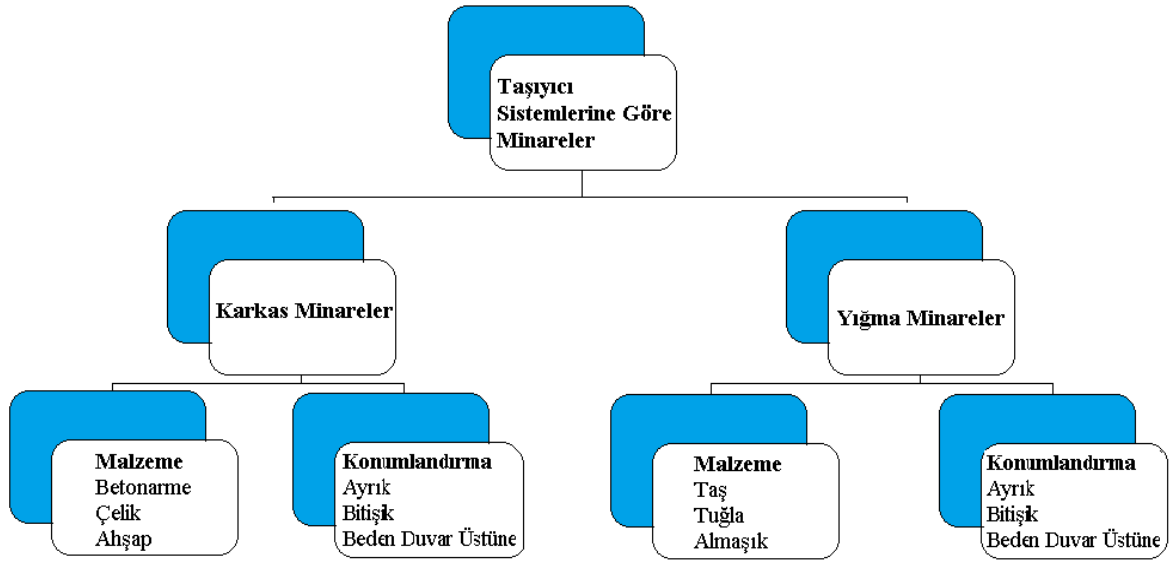
Bunlar minareye etkiyen kalıcı yükler, rüzgâr yükleri ve deprem yükleri şeklindedir. Kalıcı yükler diye ifade edilen minare taşıyıcı elemanlarının kendi ağırlıkları ve eğer kaplama yapılmışsa ondan kaynaklı yüklerdir.

Rüzgâr yükü, rüzgâr hızının ve yönünün değişmesiyle zamanla artıp eksilen bir yüküdür. Öte yandan yapı şekilleri de rüzgâr yüklerinin değişmesinde büyük bir rol oynamaktadır. Genelde yapılan hesapları rüzgâr yükünün en fazla olan değerine göre yapmak yeterli olmaktadır. Kule, minare gibi yüksek yapılarda rüzgâr; yüklerin temel kaynağını oluşturmaktadır. Rüzgâr böylesi yapılarda en genel ifade ile “enine rüzgâr etkisi” ve “boyuna rüzgâr etkisi” şeklinde iki farklı şekilde etkisini göstermektedir (Temüz, 2007).

Deprem yükleri için ise Türkiye’de ki deprem gerçeği göz önüne alınmalıdır. Türkiye deprem bölgeleri haritası göz önüne alındığında ülkenin %96’sının aktif deprem bölgesinde olduğu bilinmektedir (Durmuş, 1989). Bu nedenle ülkedeki diğer yapı türleri gibi minarelerin de çok önemli bir kısmı ciddi deprem riski ile karşı karşıyadır. Bu durum göz önüne alındığında minarelerin deprem etkisi altındaki davranışları ile standart yapıların deprem etkisi altındaki davranışları birbirinden oldukça farklıdır. Çünkü bunlar uzun ve narin yapılar olduklarından titreşim periyotları ve zeminle etkileşimleri binalarinkine göre farklıdır (Temüz, 2007).

Türkiye’de minarelerin tasarlanması ve inşası ile alakalı ayrıntılı herhangi bir standart ve yönetmeliğin bulunmadığı daha önce de ifade edilmişti. Yönetmelikte bulunmayan bu durumdan kaynaklı günümüzde yapılan minarelerde, rüzgâr yükünün tespit edilebilmesi için TS498 ve deprem hesabı için de "Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik" kısmen kullanılmaktadır. Bu durum sonucunda minareler genellikle standart kalıp boyutlarında, birbirlerine benzer şekillerde inşa edilmektedir (Serhatoğlu, 2015).

Minareler kendi ağırlıkları dışında herhangi bir zati yüke maruz kalmazlar. Fakat minareler tasarım, tür ve boyutlarına göre oldukça ağır ve yüksek yapılar oldukları için üzerine gelen yatay kuvvetler bu duruma paralel olarak artmaktadır. Bundan dolayı inşa edilecek minarenin taşıyıcı sistem seçimi, konumlandırılması ve inşa teknikleri oldukça büyük önem kazanmaktadır.



Şekil 1.3. Minarelerin sınıflandırılması (Serhatoğlu, 2015).

- **Karkas Minareler**

Karkas taşıyıcı sistem genel olarak günümüz minarelerinde en çok uygulanan tasarım biçimidir. Karkas yapı sistemlerini betonarme, ahşap ve çelik karkas olmak üzere üç grupta toplamak mümkündür.

Bunlar arasında en çok kullanılanı betonarme minarelerdir. Günümüz şartlarında yapıların inşasında en fazla kullanılan taşıyıcı sistemin betonarme olması sebebiyle minarelerde kullanılan taşıyıcı sistem bu doğrultuda gelişen bir ivme kazanmıştır. Betonarme minarelerde temel ankastre olmakta ve kayar kalıp uygulaması kullanılarak inşa edilmektedir. Günümüzde yapıyı tamamlanan bazı özel minareler hariç yapılmış betonarme minareler birbirinin aynısı veya çok benzeri tasarıma sahiptir. Genellikle cami projelendirmeleri ile beraber tasarlanıp, konumlandırılmaktadır.

İkinci karkas taşıyıcı sistem çelik konstrüksiyonlu minarelerdir. Çelik taşıyıcı sisteme sahip minarelere talep gelişen teknoloji ile günümüz şartlarında hızla artmaktadır. Bu hızlı talep artımına betonarme yapılara göre çelik yapıların inşasında yaşanan kolaylıklar sebep olarak gösterilebilir. Betonarme yapıya göre inşaat süresinin az inşaat süresinin hızlı olması, kolay montaj imkânı, hizmet ömrünün daha uzun olması, istenilen mimari tasarım ve istenilen yükseklikte yapı inşası, oluşabilecek herhangi bir hasar veya acil durum anında kolay ve çabuk müdahale imkânı gibi artı özelliklere sahiptir. Bu durumlara ek olarak deprem riskine karşı da dayanıklı yapılardır. Çelik konstrüksiyonlu minarelerin dış cephesi siding kaplama, alüminyum sac kaplama, fiberglass kaplama, poliüretan kaplama ile örtülerek estetik bir görüntü meydana getirilmektedir. Çelik malzemeden yapılan minareler genellikle betonarme camilerle birlikte kullanılmaktadır. Bu yüzden çelik minareler genellikle cami beden duvarından ayrık ya da beden duvarının üzerinde inşa edilirler (Serhatoğlu, 2015).

Üçüncü ve son olan karkas taşıyıcı sisteme sahip yapılar ahşap karkas minarelerdir. Ahşap karkas yapılar hem geçmişte hem de günümüzde çok fazla tercih edilmeyen yapılardır. Bazı doğal ve beşeri etkiler ahşabın kullanım alanını daralttığı gibi minare de kullanım alanını da kısıtlamaktadır. Her iklimde tercih edilmeyen ahşap yağmur, kar, rüzgâr gibi doğa olaylarında dayanıklılığını yitirebilen bir malzemedir. Yangına dayanıksız olmasından kaynaklı güvenlik açısından pek tercih edilmemektedir. Kule tipi yapıların tasarlanmasında ahşap malzemesi pek kullanılmamaktadır. Bu nedenle yapılsa bile boyları kısa tutulmaktadır. Bazen de hafif bir malzeme olması avantaj sağlamaktadır. Ağır iklim koşullarından dolayı kullanımı, tedariki, taşınması zor malzemelerin kullanılmadığı yerlerde tercih edilebilmektedir. İstanbul'un ilk selâtin camii, yani fetih yapılan yerde elde edilen ganimetlerle yapılan padişah camii, fetihten hemen sonra camiye çevrilen Ayasofya'dır ve ilk minaresi önce ahşaptan yapılmıştır. Sonraları ahşap minarelerin daha çok ormanlık alanlarda ve küçük mescitlerde inşa edildiği görülmektedir. Camiye bitişik olarak yapılan bu tür minarelere özellikle ülkemizde tedariki kolay ve engebesi bol olmasından dolayı en çok Karadeniz Bölgesinde, Bolu gibi ormanlık alanı çok ağacın bol olduğu yerlerde rastlanır. Çatının ortasında yer alan ve sadece gövde ile külâhtan oluşan bu minarelere müezzine ayrılmış yer olan mahfilden dayanan merdiven yardımı ile çıkılır. Ahşap minareler genellikle kâgır cami inşası ile birlikte kullanılmaktadır. Bu yüzden ahşap karkas minareler cami beden duvarından ayrık ya da beden duvarı üzerinde konumlandırılmaktadır. Şekil 2.4'de karkas minare örnekleri sunulmuştur.



Şekil 2.4. Karkas Minare örnekleri (a) betonarme (b) çelik (c) ahşap

- **Yığma Minareler**

Minarelerin geçmişte çoğunlukla yığma olarak inşa edildikleri bilinmektedir. Yığma yapıların çok eski dönemlerden kalan kısmı tarihi yapı statüsünde olduğundan kullanılan malzemeler de o dönemlerde çok fazla kullanılan ve rahat bir şekilde temin edilebilen yığma malzemelerdir.

Bunlar taş, tuğla ve almaşık denilen taş ile tuğla şeklinde iki farklı malzemenin beraber kullanıldığı ya da iki aynı malzemenin farklı boyut ve renklerde kullanılarak bir düzen yarattığı malzemeler ve son olarak bağlayıcı malzeme olan harçtır.

Bağlayıcı malzemenin dayanımı düşüktür bu nedenle minarelere etki eden özellikle yatay yüklere karşı yeterli dayanımı gösteremeyebilirler. Bu durum minarelerde çeşitli hasarların meydana gelmesine yol açabilir.

1509 yılında Osmanlı devleti döneminde yıkıcı bir deprem yaşanmış ve bu depremin ardından Mimar Sinan yeni çalışmalar ortaya koymuştur. Depremden sonra depreme dayanıklı ve tam olarak yığma olmayan yeni bir taşıyıcı sistem geliştirmiştir. Geliştirilen bu sistemde kullanılan taş malzemelerin arası sadece harçla doldurulmamış aynı zamanda elemanlar demir çubuklarla birbirine bağlanmıştır. Demir çubukların böylesine düşey elemanları ve yatay elemanları birbirine bağlayanlarına sırasıyla zıvana ve kenet denilmektedir. Bu uygulama günümüz şartlarında betonarme elemanlar kadar dayanıklı olmasa da taşıyıcı elemanları beraber çalıştıran ve yüklerin birbirine düzgün aktarılmasını sağlayan kendi döneminin en başarılı ve güçlü yapım teknolojisidir. Bu teknolojiler göz önüne alındığında asırlar önce yapılan yapıların doğal afetler ve iklim koşullarına rağmen hala nasıl ayakta durduğunu görmek bizleri şaşırtmamalıdır (Serhatoğlu, 2015).

Yapılan araştırmalardan elde edilen sonuçlar göstermiştir ki Osmanlı döneminde cami ve minareler ciddi sistematik çalışmalar sonucunda inşa edilmiştir. Bu sistematik çalışma beraberinde bir düzen ve gelenekselleşen çalışmalar ortaya çıkarmıştır. Cami inşaatı henüz başlamış ve çok ilerlenmemişken minarelerin inşaatına başlanır. Çünkü caminin beden duvarları yükseldikçe minare merdivenleri yardımıyla üst seviyelere insan ve malzeme çıkartılabilmesi kolaylaşmaktadır. (Baştürk, 2013).

Tarihi yığma minarelerin temeli toprak altında olduğu için geometrisi, derinliği ve örgüsü hakkında bilgimiz yeterli değildir. Zemin şartlarına göre temel inşası yapılması dayanıklı bir yapı inşa etmenin temel kurallarındandır. Selçuklu ve Osmanlı Dönemi çeşitli yapılarının taşıma gücü zayıf ve tabanı gevşek malzemelerden oluşan zeminlerde inşa edildiğini görmekteyiz. Ancak temel sistemlerinde, ahşap kazıklar ve günümüz raylı sistem özelliğine sahip ahşap ızgaralar kullanılmıştır. Bu bilgiler ışığında tarihi yığma minare temellerinde de ahşap kazıklı ve ahşap ızgaralı sistem kullanıldığı ve kullanılan bu sistemin de minareleri oturma ve yatay yüklerden daha fazla koruduğu söylenebilir (Serhatoğlu, 2015).

Yığma minarelerin inşasında çoğunlukla taş kullanılmaktadır. Taş malzeme olarak sert ve kırılğan bir yapıda olduğundan işlenmesi de özel emek ve çaba gerektirir. Yığma minarelerde kullanılan doğal taşlar istenilen büyüklükte ve konulacağı yere göre şekil alması istendiğinden her bir taş için ayrı bir ustalık gerekmektedir. Her taş özel olarak işlenerek yerinde monte edilir. Taşınması ve tedarik edilmesi de yine ayrı bir malzeme koludur. Yığma taş minareleri oluşturan

her taş, taşıyıcı özellik göstermekte olup, aynı hizadaki taşların oluşturduğu taş dizisine “kur” denilmektedir (Acar, 2009). Bir kur, basamak ve çevresindeki duvarlardan oluşur ve her bir taş düşeydeki komşu taşlara zıvanalara, yatay taşlara kenetli demir ankrajlarla sabitlenir.

Bu ankraj ve zıvanaların taşlardaki oyuklara sabitlenmesi, eritilen kurşunun dökülerek soğuyup sertleşmesiyle elde edilir. Ayrıca, ince bir tabaka halinde harçla da taş elemanların birbirine yapışması sağlanır. Minare merdiveni minarenin üst bölmelerine ulaşımı sağlamanın yanında minare taşıyıcı sistemine destek vererek minare rijitliğini de artırır.

Tuğla minare örneklerine önceki dönemlerde Osmanlı minarelerinde rastlanmaktaydı. İstanbul’un fetih edilmesiyle beraber yerini taş minarelere bırakmıştır. Tuğla minareler incelendiğinde sırlı tuğlalı, çini kaplamalı veya düz sıvalı olmak üzere üç şekilde karşımıza çıkmaktadır. Almasıklık “aynı malzeme almasıklığı” ve “farklı malzeme almasıklığı” olarak iki farklı şekilde karşımıza çıkar. Aynı malzemenin farklı renklerinin veya boyutlarının bir araya getirilerek oluşturulduğu haline aynı malzeme almasıklığı denir. Farklı renkli taşların belirli bir düzene göre sıralanıp aynı düzene devam ederek oluşturulduğu yapılar bunlara örnek verilebilir. Farklı malzeme almasıklığı da en az iki farklı malzemenin birlikte kullanılarak oluşturulduğu almasıklık türüdür. Genel olarak taş ve tuğla malzemelerin ayrı ayrı değil de beraber kullanıldığı durumlardır (Kutlu, 2017). Şekil 2.5’ de yığma minare örnekleri verilmiştir. Bu minareler (a) Mardin Ulu Cami (b) Antalya Yivli Minare ve (c) Tokat Takyeciler Cami minareleridir.



Şekil 2.5. Yığma minare örnekleri (a) taş (b) tuğla (c) almasıklık

2.3. Tarihi Yığma Minarelerde Kullanılan Yapı Malzemeleri

Ülkemizde yığma yapılar en az betonarme yapılar kadar önemlidir. Ancak literatür incelendiğinde betonarme yapılar kadar çalışılmadığı görülmektedir. Ülkemizde eski yığma yapılar olduğu gibi yeni yığma yapılar da tasarlanmaya devam etmektedir. Eski yapıların korunması ve güvenilirliği yeni yapıların ise dayanıklılığı ve emniyeti oldukça önemlidir. Bu eski

yapıların bir kısmı günümüzde tarihi yapılar sınıfındadır. Köprüler, hanlar, hamamlar, camiler, kiliseler ve medreseler gibi birçok yapıdan günümüze kadar gelebilen çok sayıda tarihi eser mevcuttur.

Bu tarihi yapıların restorasyonu ve deprem güvenirliliği oldukça önemlidir. Gelecek nesillere aktarımı ve daha uzun süre ayakta kalmalarını sağlamak şüphesiz çok önemlidir. Doğru bir deprem analizi ve yapılacak restorasyon çalışmalarının sağlıklı olabilmesi için kullanılan malzemelerin çok iyi bir şekilde analiz edilmesi ve malzeme özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir.

Yığma yapılarda kullanılan malzemeler yapının taşıma gücünü direkt olarak etkilemektedir. Bu malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri günümüzde yapılan çeşitli deneylerle belirlenebilmektedir.

Analitik yöntemlerle ve taşıyıcı elemanların laboratuvar ortamında deneylerinin yapılması ile taşıma gücü, dayanım, şekil değiştirme gibi özelliklerinin belirlenmesi zor ve gerçekten uzak olabilecek bir yöntemdir. Ancak, tarihi yapılar incelenirken yapının tarihi dokusuna ve mimari görüntüsüne zarar vermeyecek biçimde alınabilecek küçük çaplı numuneler üzerinde yapılacak çalışmalar ile veya aynı özellikler tasarlanan modeller kullanılarak laboratuvar ortamında taşıma gücü yaklaşık bir değerle belirlenebilir. Ancak yapılardan alınan küçük numuneler ve bazen homojenlik göstermeyen numuneler tamamen gerçeği yansıtamayacağı gibi küçük numunelerin büyük sistemlerde aynı etkiyi gösteremeyebileceği de göz önüne alınmalıdır. Çünkü malzemeler yapının her noktasında aynı şekilde bulunmayabilir. Çalışmanın bu bölümünde, tarihi yığma yapılarda kullanılan doğal taş, tuğla, ahşap ve harç malzemelerinin genel özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir.

- **Doğal Taş**

Doğada bulunan, içerisindeki maden tuzlarının ve bunların oksitlerinin etkisiyle rengini, şeklini ve sertliğini alan, fiziksel ve kimyasal değişimler gösteren katı maddelere taş denir. Yığma yapılarda kullanılan en önemli malzemedir. Temin edilebilme kolaylığı ve nakliye imkânı taşın kullanım alanını arttırmıştır. Yapıların inşasında kullanıldığı gibi günümüzde restorasyon ve dekoratif amaçla da kullanılan taşlar mevcuttur. Önceki dönemlerde yapılar inşa edilirken çağımızdaki teknolojik imkânlar bulunmadığından taşın kolaylıkla işlenip şekil verilmesi önem teşkil etmiştir. Bu sebepten dolayı çoğunlukla tortul ve metamorfik kayalar tercih edilmiştir (Şener, 2004). Bu maddeler şekil ve büyüklük bakımından farklılıklar gösterirler. Çünkü sıcaklık değişimleri, kayma, düşme, yuvarlanma gibi fiziksel sebepler ile donma-çözülme olayı gibi çevresel sebepler çekme dayanımı çok düşük olan bu maddeleri etkileyerek boyut farklılıklarına sebep olabilir. Öte yandan çekme dayanımı düşük olan bu maddelerin basınç dayanımı oldukça yüksektir. Basınç dayanımlarının yüksek olması tarihi yapıların günümüze kadar gelebilmelerini

sağlamıştır. Doğal taşlar, inorganik kökenli, kristal yapılı, gözenekli ve gevrek malzemelerdir. Taşın cinsi, kesilme şekli, işçiliği, kullanım alanı vb. gibi etkenler malzemenin; çekme, basınç, elastisite modülü ve eğilme dayanımları gibi mekanik özelliklerini etkiler. Genel olarak doğal taşların ortalama mekanik özellikleri Tablo 2.1’de sunulmuştur.

Tablo 2.1. Doğal taşlarda yaklaşık mekanik özellikler (Tetik, 2015)

Taşın Cinsi	Basınç Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
Granit	30-70	14-33	4-7	15-70
Mermer	25-60	9-45	1-15	25-70
Kireç Taşı	18-65	6-20	2-6	10-55
Kumtaşı	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

Doğal taşlar oluşum durumlarına göre; magmatik (püskürük) kayalar, tortul (çökelik) kayalar ve başkalaşmış (metamorfik) kayalar olmak üzere üç temel grupta sınıflandırılır. Taşlar, renklerini içinde bulunan madensel tuzlar ve oksitlerden alır. Taşların mekanik ve fiziksel özellikleri, elde edildiği kayacın oluşum durumuna, içerisinde bulunan minerallerine, bulunma oranına ve kristal yapısına göre çok ciddi farklılıklar gösterir. Yapılarda kullanılan taşların özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir (Eldem, 1976).

Tarihi yapılarda kullanılan taşların bir kısmı aşağıda verilmiştir.

-Küfeki: Deniz kabuğu veya küçük istiridye kabuklarının birikmesiyle meydana gelen doğal bir taştır. Diğer bir ifadeyle boşluk oranı fazla bir çeşit kireç taşıdır. Doğadan çıkarıldığı andan itibaren havayla teması sayesinde bünyesine karbondioksiti alarak sertleşmeye başlar. Dayanıklı ve güçlü bir malzemedir. İstanbul civarında çıkarıldığı için “İstanbul taşı” olarak da bilinmekte olup çok uzun ömürlü bir malzemedir. 2000-2500 yıl ömrü olduğu söylenmektedir. Kolay işlenebilme özelliğine sahiptir. Yazın çok sıcak havayı kışın ise çok soğuk havayı bünyesinde absorbe ederek doğal yalıtım sağlamaktadır. Küfeki, yüksek boşluk oranına sahip bir kireç taşıdır. Yüksek boşluk oranına sahip olması küfekiğin sünek davranış göstermesini ve hafif olmasını sağlar. Basınç mukavemetinin çekme mukavemetine oranı $f_b/f_c = 11-12$ civarında tespit edilmiş olup bu değer küfekiğin enerji yutma kapasitesi yüksek, sünek bir malzeme olduğunu gösterir. Elastisite modülünün basınç mukavemetine oranı olan $E/f_b=720$ olarak elde edilmiştir ki bu da günümüzde üretilen betonlarla iyi bir uyumu ortaya koyar. Küfeki taşı; Ayasofya, Yukarıkapı Surları, Süleymaniye Külliyesi, Topkapı Sarayı, Su Kemerleri gibi İstanbul da önemli yeri olan tarihi eserlerin yapımında kullanılan önemli malzemelerden bir tanesi olmuştur. Mimar

Sinan'ın eserlerinde ustalıkla kullandığı bu taş günümüzde bile sağlamlığını korumaktadır. Ayrıca küfeki taşının 1986 yılında Moskova Üniversitesinde yapılan bir araştırmada nükleer dalgaları geçirmediği de bulunmuştur. Küfeki taşının İstanbul Teknik Üniversitesi'nde (İTÜ) yapılan kimyasal analizlerinde beyaz çimento, kireç, alçı, toz deterjan, pudranın yapımında da ham madde olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir (URL-2).

-Mermer: Kireç taşının zaman içerisinde sıcaklık ve basınç etkisinde başkalaşım geçirerek kristal bir yapıya dönüşmesi ile oluşur. Bu oluşan yapı doğal yani “hakiki mermer” olarak isimlendirilir. Doğada kendiliğinden kırılan taşların arasına giren doğal bir çimentonun bağlayıcı özellik göstermesiyle oluşan malzemelere de “yapay mermer” denir. Mermerlerin birbiriyle renk, sertlik, işlenebilirlik, desen gibi yönleriyle farklılıkları vardır. Çok fazla renk yelpazesi olan mermerler genel olarak gri ve beyaz olarak bilinir. Bu renkler mermer içerisindeki maddelerin çeşitlerine ve oranlarına göre değişkenlik gösterir.

Beyaz, siyah, gri, yeşil, sarı, kırmızı, pembe mermer renklerine örnek verilebilir. Başkalaşım geçirerek oluşmasından kaynaklı mermerler homojen yapıda olmayabilirler. Çeşitli şekil ve desenlerde oluşabilmektedirler. Çıkarılma durumları ise mermerin cinsine göre farklılık göstermektedir. Granit, serpantin, diyabaz, breş mermer çeşitlerine örnek verilebilir.

-Andezit: Volkanik hareketler sonucunda meydana gelmiş olan bir püskürük kayadır. Çok eski zamanlarda beri yapı sektöründe çok fazla kullanılan bir malzemedir. Bu nedenle günümüzde birçok tarihi yapıda görebileceğimiz bir doğal taştır. Ülkemizde İç Anadolu Bölgesinde özellikle de Ankara'da çok fazla rastlanan bu taş Ankara taşı da denilmektedir.

Selçukludan Osmanlı'ya kadar uzanan derin bir tarihe sahip Andezit taşı, birçok tarihi binada kullanılmıştır. Köprülerde, kervansaraylarda, camilerde, kümbetlerde, şifahanelerde, medreselerde ve daha sayılabilecek birçok tarihi yapıda bu taşlara rastlanabilmektedir. Ankara Kalesi başta olmak üzere Sümerbank, Çevre ve Orman Bakanlığı, Dil Tarih ve Coğrafya Fakültesi, Merkez Bankası binaları gibi Cumhuriyet tarihine mal olmuş binalarda da Andezit taşları kullanılmıştır. Günümüzde de birçok devlet yapısında ve tarihi eser restorasyonlarında Andezit taşı kullanılmaktadır (URL-3, 2017).

Andezit taşı, bölge coğrafi özellikleri ve püskürme yaşına göre farklı renklerde ve şekillerde çıkarılmaktadır. Genel olarak siyah, gri ve pembe tonları mevcuttur. Kullanım alanı oldukça fazla olan, dış duvardan iç süslemelere kadar her yerde karşımıza çıkabilecek bir yapı malzemesidir. Bu kadar çok kullanım alanının olmasının en temel nedeni ise dayanıklılığı ve aşınmaya karşı dirençli olmasıdır. Yaz aylarında serin, kış aylarında sıcak tutan bir malzeme oluşu doğal yalıtım özelliğine sahip olmasından kaynaklıdır. Kaymaz bir yapısı olduğundan ıslak zeminlerde kullanılabilir. Yüzyıllardır yapılarda kullanılan bu malzemenin aşınma direnci yüksek nem ve don olaylarından etkilenme oranı oldukça düşüktür. İşlenerek istenilen şekle sokulabilir.

Yapıların yanında asitten etkilenmediği için yol ve kaldırımlarda, oluklarda, merdivenlerde, çatılarda, duvarlarda da kullanılan bir malzemedir.

-Bazalt: Yeraltında volkanik hareketler sonucunda lavların buldukları çatlaklardan yeryüzüne çıkarak soğuyup katılaşması sonucu oluşan doğal taşlara denir. Yani bir dış püskürük kayadır. Yerkabuğunda oluşan ilk kayaç olarak söylenmektedir. Doğadaki fiziki şartlardan etkilenmeyen, sert, yüksek basınca karşı dirençli, aşınmayan bir taştır. Malzeme özelliği bakımından homojen yapıda olması dayanıklılığını ve kullanım alanını arttıran bir özelliktir.

Yapısı gereği fazla su emmemesi donma-çözünme sıklığını azaltmakta ve bu nedenle daha sağlam bir malzeme olmasını sağlamaktadır.

Bu gibi nedenlerle köprü, yapı ve kaldırım gibi birçok tarihi yapıda kullanılan bir malzemedir. Genellikle siyah ve fume rengindedir. Günümüzde farklı işlerde de kullanılmakta ve kullanım alanı giderek yaygınlaşmaktadır. Ülkemizde bazalt taşı kullanılarak yapılmış ünlü tarihi binaların sayısı oldukça fazladır. Kars’ da bulunan Kümbet Camii, Diyarbakır’daki Deliler Hanı, Diyarbakır merkezde yoğun olarak bulunan tarihi evler, Diyarbakır Surları bazalt taşı kullanılarak yapılmış önemli tarihi yapılardandır.

- **Tuğla**

Kil oranı fazla toprağın kalıplanarak fırında yüksek sıcaklıklar altında pişirilmesiyle elde edilen bir yapı malzemesidir. İlk ortaya çıktığı dönemlerde tuğlalar kerpicing güneşte kurutulmasıyla elde edilmiştir. İlerleyen dönemlerde daha güçlü ve gelişmiş bir malzeme haline gelmiş olmasına rağmen önceki dönemlerde basit haliyle bulunan pişirilmemiş tuğlalara kerpiç adı verilmektedir. Killi toprağın saman ve su ile karıştırılıp kalıplanarak güneşte kurutulmasıyla elde edilen ilkel tuğlalara denir. Hammaddesi toprak olan bu maddelere su temas etmemesi oldukça önemlidir. Su alan kerpiç bozulmaya uğrayarak şeklini kaybedebilir. Aynı zamanda iklim koşulları da kerpiç için tehlikeli olabilmektedir. Kerpiç malzemeler yine topraktan yapılan bir çamur yardımı ile birbirine tutturulur. Bu bağlayıcı malzemenin kıvamının çok iyi ayarlanması gerekmektedir. Aksi takdirde birbirine yapışmayan kerpiçler üst üste duramaz ve yıkılır. Bu da yapı inşasında istenmeyen bir durumdur. Güneşte kuruyan malzemenin yeterli dayanımda olmadığı fark edilince 1000°C’ye kadar pişirilerek dayanımları arttırılmıştır. Çünkü iyi pişirilmiş malzemenin dayanıklılığı pişirilmemiş olana göre çok daha yüksektir. Bu nedenle iyi fırınlanması mukavemetinin yüksek olması açısından çok önemlidir. Basınç mukavemeti çekme mukavemetine göre daha yüksektir. Bu özellikleri ile taş malzemelere benzeseler dahi mukavemet yönünden kıyaslandığında tuğlaların mukavemeti taş malzemenin mukavemetinden düşüktür. Ancak taşa göre avantajı ise yapay yolla elde edildiğinden istenilen şekil ve boyutta üretilebilme kolaylığıdır.

Üretimi kolay ve maliyeti düşüktür. Kullanım kolaylığı nedeniyle kullanım alanı oldukça fazladır. Genel olarak bir tuğlaya ait yaklaşık mekanik özellikler Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Tuğlalara ait yaklaşık mekanik özellikler (Tetik, 2015)

Malzeme	Basınç Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
Tuğla	3-10	1-3	0.2-0.5	1-5

Tuğlalar boyutları, kullanım yerleri ve görünüşleri ile sınıflara ayrılırlar. Taşıyıcı özelliğe sahip olan tuğlalar olduğu gibi dekoratif ve mimari açıdan kullanılan tuğlalarda mevcuttur. Kullanım amacına, yerine ve izolasyon sağlama durumuna göre yapım tekniği, ısı derecesi ve şekilleri değişmektedir.

- **Ahşap**

Çok eski zamanlardan beri insanoğlunun barınma ve tehlikelerden korunma ihtiyacını karşılamak için kullandığı doğal bir malzemedir. Yenilenebilir olma özelliğinden kaynaklı ahşap malzeme çevreye zarar vermez ve doğada devamlılığı mümkündür. Çok çeşitli alanlarda kullanılan ahşap zamanla farklı yöntemlerle farklı yapı elemanlarına dönüştürülmüştür. Bina temelleri, taşıyıcı sistemleri, iskeleler, duvarlar, döşemeler, çatılar, köprüler, camiler, medreseler, kümbetler, hanlar, hamamlar ahşabın kullanıldığı yapılardır. Aynı zamanda içyapı ve dekorasyon ürünü olarak da kullanılan bir malzemedir. Malzeme özelliği olarak hafif olmasına rağmen dayanıklı bir malzemedir. Yapısındaki lifler sayesinde hem çekme hem de basınç dayanımı olan ahşabın göçmeden önce çatlama ile haber vermesi güvenilirliği açısından oldukça önemli bir tercih nedenidir. Aynı zamanda bu özelliği sayesinde tarihi yapılarda döşemelerin taşıyıcı elemanı olarak kullanılmaktadır. Kimyasal madde içermediği için sağlık yönünden de avantajlı bir malzemedir. Aynı zamanda diğer yapı malzemelerinin birçoğundan da ekonomik olarak daha uygundur. Çivi, tutkal, vida gibi bağlayıcı elemanlarla kolaylıkla monte edilebilirler. Yapılarda ahşap kullanılırken ağaç gövdesinin budaksız olduğu malzemeler tercih edilir. Budaklı gövde malzemesinin ömrü kısadır. Ancak ahşap haşere ve böceklerin tahrip edebileceği ve aynı zamanda zamanla bozulmalara uğrayabilecek bir malzeme olduğu için bakımının yapılması gerekmektedir. Su ile temasının da önlenmesi önemlidir. Çünkü su ile temas eden ahşap çürüyerek mukavemetini kaybetmektedir. Ahşap, basınç ve çekme gerilmelerine karşı çalışabildiğinden eğilme elemanıdır. Özellikle büyük açıklıkları geçebilmek amacıyla döşemelerde kullanılır. Tablo 2.3'te ahşap malzemelerin ortalama mekanik özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 2.3. Ahşabın ortalama mekanik özellikleri (Tetik, 2015)

Dayanım Türü	Liflere Olan Yönü	I.Sınıf (MPa)		II.Sınıf (MPa)		III.Sınıf (MPa)		Elastisite Modülü (GPa)	
		Çam	Kayın (Meşe)	Çam	Kayın (Meşe)	Çam	Kayın (Meşe)	Çam	Kayın (Meşe)
Çekme	Paralel	-	-	8.5	10.0	10.5	11.0	1.0	12.5
Basınç	Paralel	6.0	7.0	8.5	10.0	11.0	12.0	1.0	12.5
Basınç	Dik	2.0	3.0	2.0	3.0	2.0	3.0	0.3	0.6

- **Harç**

Yapıyı meydana getirecek elemanların bir arada durabilmesi için elemanlar arasına konulan; su, dolgu malzemesi ve bağlayıcı malzemenin belirli bir oranda karıştırılmasıyla elde edilen hamura denir. İlk defa harç kullanımı çamur ile başlamıştır. Katılaşma, yapışma ve şekil verilebilme gibi özelliklere sahiptir. İçerisinde kullanılan bağlayıcı malzemeye göre; alçı, çimento, kireç harcı vb. harçlar gibi çeşitlilik gösterirler. Kullanıldıkları yere göre de sıva veya duvar harcı olarak adlandırılırlar (Şimşek, 2001). En ilkel yöntemlerden günümüze kadar pek çok harç çeşidi bulunmaktadır. Harçlar hazırlanırken çok farklı malzemeler kullanılabilir. Kil, kireç, tuğla tozu, yumurta akı, süt, hayvan tüy ve kılı, su, taş parçaları harçlarda kullanılan maddelere örnektir.

Tarihi yapılarda kullanılan harçların miktarları çok olmasa da yapıların dayanıklılığı için oldukça önemlidirler. Harçla birleştirilen malzemeler bir bütün olarak hareket etmeye başlayacağından harcın yapı performansına etkisi göz ardı edilemez. Bir bütün olarak davranan yapı üzerine gelen yükleri de bir bütün olarak alır ve harç aslında yapıya gelen yükleri de üstlenmiş olur. Gelen yükü birleştirdiği elemanlara dağıttığı için de yapıda önemli bir rol üstlenmiş olur. Aynı zamanda çevre koşullarına karşı yapı elemanlarının üzerini kaplayarak elemanların bozulmalarını da engeller. Harçlar içerisinde tarihi yapılarda önemli bir yeri olan horasan harcıdır.

Osmanlı ve Selçuklu dönemi başta olmak üzere ülkemizdeki tarihi yapılar ele alındığında harç malzemesi olarak genelde horasan harcı kullanıldığı görülmektedir. Horasan harcı kireç, tuğla ve kiremit kırıkları ve kil gibi toprak malzemeden oluşur.

Ülkemizin de içerisinde bulunduğu bu coğrafyada horasan harç ve sıvaları, Roma, Bizans, Selçuklu ve Osmanlı dönemi yapılarında ve genellikle su kanalları, hamamlar ve su sarnıçlarında sıklıkla kullanılmıştır. Bölgesel olarak farklı kültürlerin farklı bağlayıcılar kullandığı, benzeri bağlayıcıların bugün dahi halen kullanımda olduğu bilinmektedir (Kılıç, 2007).

Tarihi yapılarda kullanılan horasan harcının bölgelerden ve malzemelerden farklı karışımlarla oluşturulduğu görülmüştür. Bunlar;

1. Kum horasan harcı:

a) kum + dövülmüş kireç + horasan pirinci + yumurta akı + su olup, karma süresi uzundur.

2. Geleneksel horasan harcı:

a) 1 horasan + bir miktar dişli kum + 2 kireç + bir miktar meşe külü + su

b) 1 kireç kaymağı + ½ alçı + 1 yıkanmış kavrulmuş kum + su

c) Dinlendirilmiş kireç + horasan pirinci + yumurta akı + su

3. Lökün:

a) Dövme kireç + keten elyafı + zeytinyağı + su

b) Dövme kireç + üç ayda suda çürütülmüş pamuk + su

c) Dövme kireç + kızgın zeytinyağı + Koyunyünü elyafı + su

4. Horasan sıvası:

a) ½ perdah kumu + 2 horasan + ½ beyaz çimento + ½ kireç şerbeti

b) Tuz + yumurta akı + alçı + kireç, olarak sınıflandırılmıştır (Mahrebel, 2006).

Horasan harçları genel olarak hidrolik özelliklere sahiptir. Suya ve neme karşı dayanıklı harçlardır. Hatta deniz suyuna karşı dayanıklı olduklarından dolayı sahil kentlerinde sıkça kullanılmıştır. Bu özelliğinden dolayı horasan harçları ile ilgili bazı deneysel çalışmalar da yapılmıştır. Horasan harcı ve betonun mekanik özelliklerini karışım oranı ve ilave su miktarına göre deneysel olarak incelenmiştir (Canbaz vd, 2005).

-Kireç harcı: Çok eski zamanlardan beri kullanılan bir bağlayıcı malzemedir. Sönmüş kireç, dere kumu ve suyun belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen plastik yapıda bir bağlayıcıdır. Bu plastik özelliğinden dolayı şekil değiştirme yönüyle yapılarda çatlama oranı düşüktür. Ancak sönmemiş kireç kullanımı yapılarda çatlaklara neden olabilir. Çünkü kirecin sönme işlemi yapının üzerinde gerçekleşir bu esnada da bu kısımlarda çatlamalar olabilir. Kirecin hammaddesi olarak kalsiyum karbonat (CaCO_3) kullanılır.

• Katkı Maddeleri

Katkı malzemeleri, harcın prizlenme süresini azaltarak ve suyun izolasyonunu sağlayarak daha hızlı sertleşmesine imkân sunan ek malzemelerdir. Harçlardaki fiziksel ve kimyasal özellikleri değiştirerek geliştirir. Harca çekme ve basınç mukavemeti kazandırır. Geçmiş zamanlardan beri harçlara çok farklı katkı malzemeleri konulmaktadır. Bitkisel ve hayvansal ürünlerin yanında az da olsa yapay malzemeler de kullanılmıştır.

Arap zıncı, hayvan tutkalı, incirin sütlü suyu gibi doğal reçineler yapıştırıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Çavdar hamuru, kesik süt, kan ve yumurta beyazı kirecin daha çabuk sertleşmesini sağlamaktadır. Arpa ve hayvan tüyleri malzemenin dayanıklılığı artırmaktadır. Şeker, suyun donma erime aralığında harçtaki bozulmaları yavaşlatmaktadır. Balmumu, harçtaki rötreyi engellemektedir. Yumurta akı, hayvan tutkalı, fleker, süt, mineral ve keten tohumu gibi

malzemeler de kirecin plastik özelliğini artırıp gevrek kırılmasını engellemektedir (Böke vd, 2004).

- **Agrega**

Agregalar; kum, çakıl taşı ve kırma taşların karışımına verilen addır. Harçların yapımı esnasında kullanılan bir malzemedir. Kireçle reaksiyona giren agregalar ve girmeyen agregalar olarak iki gruba ayırmak mümkündür. Kireçle reaksiyona giren agrega puzolanik, girmeyen ise etkisiz agrega olarak isimlendirilir. Puzolanik agrega da kendi içerisinde iki gruba ayrılır. Doğal yolla elde edilenler ile doğal yolla elde edilmeyenler şeklindedir. Puzolanik agregalar kireç ile asit-baz reaksiyonu veren silikatlarla alimünatlardan meydana gelmiştir. Harçların her ortamda kuruması ve sertleşmesini asidik yapıdaki puzolanlar sağlamaktadır (Böke vd, 2004). Bu yöntemle elde edilen harçlar kimyasal tepkimeye girmeyen harçlara nazaran daha dayanıklıdır.

- **Sıva**

Sıva, yapılarda dış kabuğu ve yapıda taşıyıcı nitelikte bulunan sistem ve elemanları dışardan gelecek etkilere karşı korumak, atmosferden gelen nem ve suyun engellenmesi gibi etkilerle yapının daha uzun ömürlü olmasını sağlamak amacıyla yapılan kaplama yöntemidir. Aynı zamanda ısı, ses ve bazen de yangın yalıtımı için de yapılır.

Bazen de yapı pürüzlerini örtmek amacıyla da kullanılır. Sıva yapışkan yapıda olmasından kaynaklı, uygulandığı yüzeylerdeki yapı malzemesiyle uyumlu olması şartıyla o yüzeyde uzun süre dökülmeden kalabilir. Sıva, çeşitlerine, yapıda kullanım alanına, tabaka olarak yapısına, sıva harcındaki bağlayıcı malzemelere, yüzeyinin değerlendiriliş şekline ve uygulamasına göre çeşitlere ayrılır.

2.4. Tarihi Yığma Minare Çeşitleri

Tarihi yığma minareler yapıldığı malzeme özelliklerine göre, minarenin konumuna göre, şekillerine göre, minarelerin yapıldığı dönemin özelliklerini yansıtmaya göre ya da bir başka yönüyle şerefelerinin sayısına göre de sınıflandırılabilir.

Yapıldıkları malzemelere göre daha önceden de belirttiğimiz gibi taş, tuğla ahşap minareler şeklinde sınıflara ayrılabilir.

Minarenin konumuna göre müstakil yani beraberindeki yapıya birleştirilmeden kendi kaidesi üzerinde yükselen minareler, bitişik minareler yani kendi kaidesi üzerine yükselse bile yapının planı içerisinde olan veya yapıyla ortak bir duvar ya da kenarı olan minarelerdir. Bir diğeri ise dam üstüne yükselen minarelerdir. Bu tarz minarelerde minarenin kaidesi ait olduğu yapının duvarı olarak bulunur. Cami damının üzerine inşa edilirler. Bu grubun son minare çeşidi ise portal üzerinden yükselen minarelerdir. Cami veya medreselerin üst köşelerinden yükselirler. Portal aynı zamanda minarenin kaidesini oluşturmaktadır.

Şekillerine göre minareleri gövde biçimlerine göre gruplara ayrılabilir. Bunlar kare planlı minareler, çokgen planlı minareler, silindirik şeklindeki minareler şeklindedir (Başar, 1988).

Bulundukları dönemin özelliklerini yansıtmaya göre ise minareleri Osmanlı minareleri, Selçuklu minareleri vs şeklinde ya da bölgelerine göre Türk, İran, Mısır, Hint, Arap vs minareleri şeklinde sınıflandırmak mümkündür.

Osmanlı minareleri bulundukları bölgelerde zamanın şartlarına göre ve bulundukları döneme göre biçim olarak farklılıklarıyla gruplara ayrılabilir. Örneğin İstanbul'da bulunan minareleri 3 farklı döneme göre sınıflandırmak mümkündür. İstanbul'un fethiyle başlayan ve Mimar Sinan dönemine kadar olan kısım birinci devir, Mimar Sinan ile başlayıp Lale devrine kadar geçen zaman ikinci devir, Lale devri ile başlayarak günümüzü de kapsayan ve devam eden ise üçüncü devir olarak isimlendirilebilir (Eyice, 1963).

Birinci devir de 1453 de İstanbul'un fethinden sonra mevcut Bizans kiliselerine minareler eklenerek camiler oluşturulmuş ve beraberinde de yeni camiler inşa edilmeye başlanmıştır. Bu devir minarelerinin gövdeleri kalın, kürsüleri ise sadedir. Minarelerin küp bölümleri geçiş baklavaları ile kendini gösterir. Bayezit, Murat Paşa, Koca Mustafa Paşa, Firuzağa, Atik Ali Paşa camilerinin minareleri bu devir minarelerine örnek gösterilebilir.

İkinci devir Osmanlı - Türk mimarisinin klasik dönemi olarak isimlendirilebilir. Mimar Sinan ile başlayan bu devir, mimar Davud, mimar Dalgıç Ahmed, mimar Mehmed Ağa ile devam etmiştir. Bu devir mimarları eski usulü geliştirip güzelleştirerek değiştirmişlerdir. Minareler önceki dönem minarelerine göre incelmıştır. Bu devirde yapılan minarelerin ortak özelliği cami ile beraber zeminden itibaren tüm kısımları ile bir bütün oluşturmalarıdır. Süleymaniye, Sultanahmet, Şehzade, Selimiye, Yeni, Ahmet Paşa, Sinan Paşa, Rüstem Paşa, Kılıç Ali Paşa, Şemsi Paşa, İskender Paşa camilerinin minareleri bu devir minarelerine örnek olarak verilebilir.

Son devirde ise başlarda Türk sanatının Batı etkisinde kaldığı Lale Devri dönemi itibari ile yapılan eserler de bu etki altında kalmıştır. Batı etkisinde kalan yapılardan bu devir minareleri, oldukça ince ve bol süslemeli olarak inşa edilmişlerdir. Minare küp kısımları kürevi bir şekil almıştır. Nusretiye, Yıldız, Nuru Osmaniye, Ayazma, Laleli, Beylerbeyi, Dolmabahçe Valide Sultan camilerinin minareleri bu devir minarelerine örnek verilebilir (Ertek ve Fahjan, 2007).

Son olarak minareleri sahip olduğu şerefelerinin sayısına göre sınıflandırmakta mümkündür. Bu durumda minareler tek şerefeli, iki şerefeli, üç veya daha fazla şerefeli minareler şeklinde çeşitlere ayrılabilir (Başar, 1988).

3. TARİHİ YIĞMA YAPILARDA MODELLEME VE ANALİZ YÖNTEMLERİ

Mevcut yapıların güç ve performans analizleri ile yeni yapılacak olanların tasarım ve analizleri için uygun şekillerde modelleme yapmak çok önemlidir. Tarihi yapılar geometri ve malzeme özelliği olarak oldukça karmaşık yapılardır. Tarihi yapıların büyük bir kısmı geleneksel kurallara ve tecrübeye göre yapılmış olsa da günümüz şartlarında modellenmesi bilimin de gelişimi ile beraber matematiksel hesaplamalarla çok daha sağlıklı ve güvenilir bir şekilde yapılmaktadır. Eskiden ustaların el hesapları geçmiş tecrübe ve becerileri ile yapı inşası ve güçlendirmesi yapılırken teknolojinin gelişmesiyle beraber yığma yapıların analiz ve modellemelerinde kullanılan yöntemler de giderek artmıştır.

Yapılardaki yükleme şartlarına bağlı olarak, çeşitli modellemeler söz konusudur. Bu duruma örnek olarak düşey ve yatay yüklemeler için birbirinden farklı modellemeler yapılması gösterilebilir. Genelde yapının farklı elemanları seçilerek düşey yük altında bu elemanlar veya alt sistem olarak modellenip, incelenebilir. Bunun aksi durumda ise yatay yükler altında sistemin bütünü modellenmesi çoğunlukla tercih edilmektedir. Yapının modellenmesi, yapı türüne bağlı olarak da değişiklik gösterir. Yığma yapı türünden olanlar için kullanılan teknikle, ahşap, demir/çelik veya betonarme bir tarihi yapının modellenmesi doğal olarak farklılık gösterir. Bu nedenle model seçimi yapılmadan önce, yapıda taşıyıcı elemanlar arasında düşey ve yatay yük aktarımının ve bu yüklerin zemine nasıl iletilildiğinin belirlenmesi incelenmelidir. Yapıda taşıyıcı sistem elemanlarının ve bağlantılarının belirlenmesi, model seçiminde önemli olan hususlardan bir diğeridir (Vakıflar Kılavuzu, 2017). Bu nedenle yığma yapıların modellenmesi malzemelerin özellikleri, bağlanma ve oluşturma şekilleri ve analiz etme yöntemleri göz önüne alındığında diğer yapı türlerine göre oldukça farklıdır.

3.1. Modelleme Yöntemleri ve İdealleştirmeler

Yığma yapılar farklı maddelerin kompozisyonu yapılar olduklarından doğrultuya göre davranış biçimleri de farklılıklar gösterebilmektedir. Kullanılan malzemelerin farklı karakterlerde olması ve birbirinden bağımsız hareket edebilme durumundan kaynaklı tanımlanacak sonlu eleman çeşidi de artmaktadır. Malzeme ve harcın beraber bir eleman gibi çalışması veya ayrı ayrı elemanlar olarak tanımlanması farklı modelleme kabullerinin kullanılmasına yol açar. Yani modellemede esas amaç bu kabullerle gerçeğe en yakın modellemenin yapılabilmesidir. Yapıdaki tüm durumlar modellemede olduğu gibi gösterilemez. Her ibarenin modellemede bir karşılığının olabilmesi için bazı kabullerin yapılması zorunludur. Bu idealleştirmeler malzeme ve geometrinin idealleştirmesi olarak 2 ayrı şekilde ifade edilebilir.

3.1.1. Geometrinin İdealleştirilmesi

Yığma yapılarda tüm elemanlar basit yapıda değildir. Karmaşık yapıya sahip oldukça fazla eleman bulunmaktadır. Karmaşık bileşenli elemanlar genellikle taşıyıcı sistem elemanları, süsleme ve dekor amacıyla yapılan elemanlar, sürekliliği sağlanmayan mimari elemanlar şeklindedir. Tarihi yapılar çeşitli şekil ve modellerde birbirinden farklı geometrilerde bulunur. Gerçeğe en yakın modellemenin yapılabilmesi için bu elemanların da en doğru şekilde modellenmesi gerekir. Bu nedenle karmaşık geometriye sahip yapıların modellenmesinde bazı idealleştirme işlemleri yapılması önemli bir kriterdir. Geometrinin basite indirgenebilmesi için üç boyutlu (3D) karmaşık yapılar yerine iki boyutlu(2D) tasarımlar yapılabilir veya yapılacak 3D tasarımda mimari yönden abartıya kaçmadan daha basit ve sade modelleme sağlanabilir. Kabuk elemanların kullanımı kısıtlanabilir. Çünkü kabuk elemanlarda eleman kalınlığı boyunca gerilme değerleri dikkate alınamaz. Kemer, tonoz ve kubbe gibi karmaşık ve 3D elemanlarda daha kolay modelleme için basitleştirmeler yapılabilir, bu elemanlar doğrusal parçalara bölünerek modellenebilir (Dabanlı, 2008).

Geometrik idealleştirmeler için esas ve önemli şart yapı elemanlarının yapıdaki mevcut konumlarının ve boyutlarının uygun şekilde idealleştirilmesidir. Gerçekten uzaklaşan idealleştirmeler doğru sonucu yakalamayı zorlaştırır. Yapı davranışını en iyi şekilde ifade edecek modeli bulmak amacıyla çeşitli analitik modeller arasında alternatif çözümler uygulanarak kıyaslama yapılmalı ve uygun model seçilmelidir.

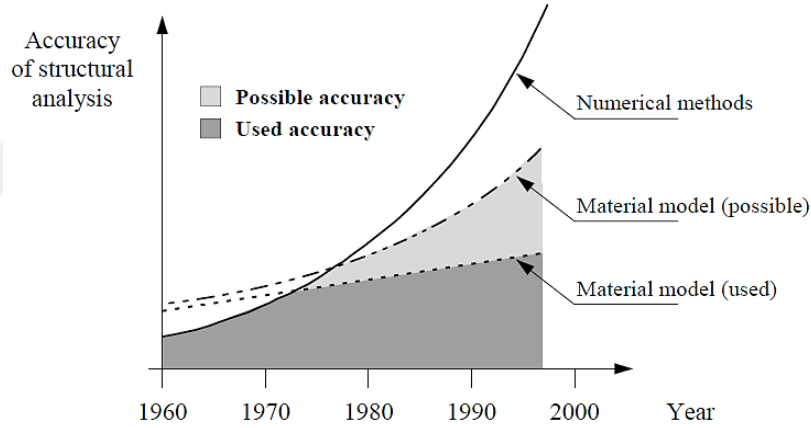
3.1.2. Malzemenin İdealleştirilmesi

Diğer bir idealleştirme yöntemi malzemenin idealleştirilmesidir. Yığma yapılarda malzeme tanımlaması yapılırken malzemenin homojen yapıda olmaması mecburi bir idealleştirme gerektirmektedir. Malzemeye ait matematiksel modeller, doğru bir analiz modelinin oluşturulmasında en büyük öneme sahip bölümü oluşturur. Bu matematiksel modele malzeme modeli (constitutive model) adı verilmektedir (Dabanlı, 2008). Bu yöntemle malzemenin gerçek davranışı sadeleştirilerek idealleştirilmiş şekli oluşturulur. Bir yapının gerçek davranışını belirleyebilmek için detaylı ve karmaşık modellerde kullanılabilir. Ancak bu modellerin göçme yüküne yakın olmayan sonuçlar verdiği görülmüştür.

Malzemenin homojen olmaması yapının farklı doğrultularında malzeme kaynaklı farklı etkiler meydana getirebilir. Bu durum malzemeyi homojen olarak kabullenme gereksinimi doğurabilir. Beton da heterojen yapıya sahip bir malzemedir ancak betonarme yapılar tasarlanırken malzemenin her tarafta eşit özellik gösterdiği kabulü yapılır ve tanımlanan sonlu eleman çeşidi her yapı için bir tanedir. Aynı türden yapılar farklı elemanlara ihtiyaç duymaz. Ancak yığma yapılar da durum çok farklı olabilmektedir.

Bu da çok fazla sonlu eleman tanımlanması demektir ve oldukça karmaşık bir modelleme söz konusu olabilir. Bu da modelleme sırasında dikkat edilmesi gereken önemli bir olgudur. Bu farklılıklar sebebiyle yapının modellemesinde meydana gelebilecek hataları minimum düzeye çekmek iyi bir modellemenin gereğidir. Yapının davranışının gerçeğe uygun şekilde modellenebilmesi için modelleme yönteminin ve malzeme özelliklerinin iyi tayin edilmesi gerekmektedir.

Günümüz şartlarında en fazla seçilen yaklaşım lineer elastik davranıştan, yapıya ait gerçek davranışı tahmin etme yeteneğine sahip sağlam nümerik araçların kullanılmasıdır. Bu araçların kullanılması gücün tamamen tükenmesi durumuna ulaşılmadan önce oluşacak kırılma ve çatlakların tespitiyle, göçme mekanizmalarına, kullanılabilirlik seviyesine ve yapıda emniyet değerlendirmelerinin yapılmasına imkân sağlamaktadır. (Lourenço, 1998). Sayısal yöntemler ve yapısal analizler için son yıllarda büyük gelişmeler yaşanmıştır. Günümüzde şartların gelişmesi ve teknolojinin ilerlemesi ile yapılan analizlerde görülen sonuçlara göre doğruluk ve güvenilirlik seviyeleri artmıştır (Şekil 3.1).

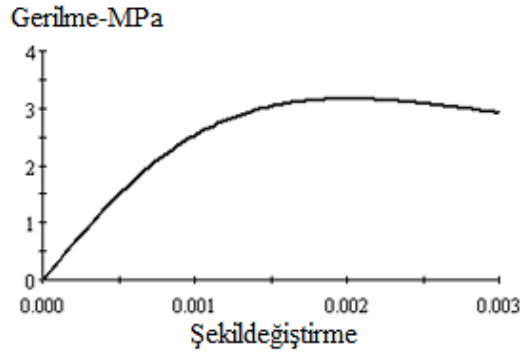


Şekil 3.1. Yapısal analizlerin doğruluklarının tarih boyunca gösterimi (Lourenço, 1998)

Ancak günümüzde büyük gelişmeler yaşanmasının yanında yapı mühendisliği malzeme bilimi gibi statik, mekanik ve analiz yöntemlerine göre yeterli önemi görememiştir. Yeteri kadar önem görmeyen bu alandan yeteri kadar verim de beklenemeyeceğinden bu alanda da ciddi çalışmalar yapılması gerekmektedir. Anlaşılabileceği üzere malzeme davranışının, yapısal analiz kısmındaki gelişmelere yetersiz kaldığı açıkça ortadadır. Buna göre yapısal analiz doğruluğunun belirlenmesinde büyük etkenlerden biri de günümüzde kullanılan malzeme modelleridir. Robert Hooke tarafından bilime sunulan yapı davranışı ile göçme yükünü tespit edebilmek amacıyla $\sigma/E = \epsilon$ şeklinde, homojen-elastik cisimleri ifade eden ve malzemedeki her gerilmenin bir şekil değiştirme durumuna karşılık geldiğini anlatan lineer elastik davranış modeli genellikle kullanılmaktadır.

Yığma yapı malzemeleri homojen özellikte olmadıklarından birbirinden ayrı davranışlar sergileyebilirler. Bunun yanında, yapım esnasındaki süreksizliklerden dolayı farklı türdeki malzemeler esas malzemelerin yerine kullanılmış olabilmektedir. Bu yüzden malzeme, aynı mekanik özellikleri göstermeyecektir. Aşağıda yığma yapıların mekanik davranışları sıralanmıştır.

- Mekanik davranış homojen özellikte değildir.
- Malzeme izotropik değildir, doğrultuya göre farklı davranışlar gösterir.
- Özellikle uzun vadeli yükler için çekme dayanımı sıfır kabul edilir.
- Basınç gerilmeleri etkisinde davranışlar kırılğan özelliktedir. Akma bölgesi bulunmaz.
- Kayma gerilmeleri etkisinde belirli bir oran dâhilinde sünek davranış görülür.
- Elemanların gerçek rijitlikleri hesaplanırken çatlaklar ve elemanlar arasındaki bağlar göz ardı edilmemelidir.
- Mekanik davranış lineer karakterde ve genelde elastik değildir (Şekil 3.2) (Oğuzmert, 2002).

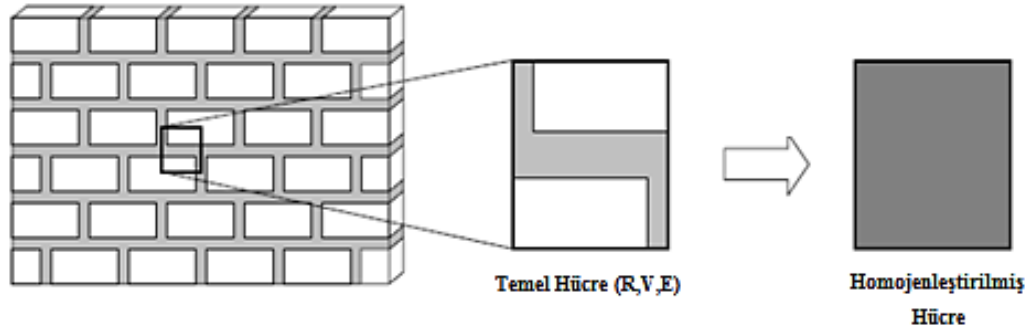


Şekil 3.2. Gerilme – şekil değiştirme diyagramı (Peker, 2003)

Yer değiştirme-yük veya gerilme-şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi gösteren diyagramlardan elastisite modülü, deformasyonlar altındaki rijitlik değişimi, malzemenin başlangıç rijitliği, varsa tersinir yükleme etkisindeki elemanın rijitlik değişimi ve enerji sönümleme karakteristikleri hakkında bilgiler çıkarılabilir.

Malzemelerin idealleştirilmesi yapılırken aşağıdaki basitleştirme ve idealleştirmeler tatbik edilebilir:

- İzotrop ve Homojen Malzeme: Malzemenin homojen olduğu varsayılır. Bu sayede tüm doğrultularda aynı davranışı sergilediği kabulü edilebilir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Yığma malzemelerin homojenleştirilmesi (Lourenço, 2000)

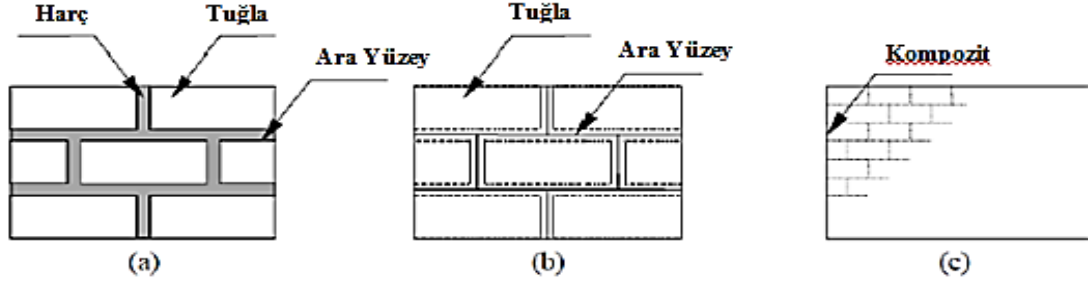
- **Lineer-Elastik Davranış:** Malzemenin, gerilmenin az olduğu seviyelerde lineer elastik davranış sergilediği varsayılır. Yapılan bu varsayım sonucunda basınç gerilmeleri altında oldukça uygundur. Çünkü ölü yükler etkisindeki yığma yapıların kesitleri oldukça düşük seviyelerde gerilmelere sahiptir. Ancak çekme gerilmeleri düşük seviyelerde de olsa çatlak oluşumuna sebebiyet verebilir.
- **Çekme Mukavemeti:** Yığma yapı malzemelerinde çekme gerilmesi olduğu da varsayılır. Bu durum asıl davranışa zıt gibi düşünülse de çekme gerilmesi oluşan bölümleri saptama ve muhtemel çatlakların yerlerinin belirlenmesi doğrultusunda bilgi sağladığı için yararlıdır. Bununla beraber çekme gerilmesi oluşan bölgedeki malzemeleri modelden çıkarmak koşulu ile lineer olmayan davranışı belirlemek de olası olabilmektedir.
- **Lineer Olmayan Davranış:** Malzemenin doğrusal olmayan davranışı, yüksek gerilme seviyelerinde dikkate alınmalıdır. Genelde doğrusal olmayan davranış Drucker-Prager ve Mohr-Coulomb kriteri olarak iki şekilde modellenilebilir (Dabanlı, 2008).

Yığma yapılar hakkında yapılan çalışmalardan görülmektedir ki malzemenin lineer kabul edildiği çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Bu çalışmaların bazılarında harç elasto-plastik bir birleşim malzemesi olarak değerlendirilirken, tuğla elastik bir malzeme olarak dikkate alınmıştır. Yığma malzemelerin, betonun akma durumuna benzeyen bir davranış sergilediği kabulü yapılarak hazırlanmış çalışmalar da literatür incelendiğinde karşımıza çıkmaktadır.

3.2. Yığma Yapı Modelleme Yöntemleri

Malzeme özelliği, arasındaki harçla ilişkisi, aderansı, çeşitli yükler altındaki durumları göz önüne alındığında yığma yapıların modellenmesinde mikro ve makro modelleme yaklaşımı olmak üzere iki temel yaklaşım kullanılmaktadır. Mikro modelleme tekniğinde bağlayıcı maddeler olan taş ile harç veya tuğla ile harç malzemeleri ayrı olarak modellemede tanımlanır. Makro modelleme de ise malzeme tek bir malzeme olarak kabul edilir ve bu şekilde tanımlanır.

Mikro modelleme yöntemi kendi içerisinde ayrıntılı mikro modelleme ve basitleştirilmiş mikro modelleme olmak üzere ikiye ayrılır. Genel anlamda üç temel yaklaşım yöntemi bulunmaktadır (Şekil 3.4).



a. Detaylı mikro model

b. Basitleştirilmiş mikro model

c. Makro model

Şekil 3.4. Modelleme yöntemleri (Lourenço, 2000; Sayın 2009)

3.2.1. Ayrıntılı Mikro Modelleme Yöntemi

Mikro modelleme yaklaşımında yığma yapı birimleriyle bağlayıcıların mekanik özellikleri tam anlamıyla bilinmelidir. Bu nedenle mikro modelleme yapılamadan önce detaylı bir malzeme çalışması yapmak zorunludur. Mikro modellemede, tüm doğrusal olmayan davranış ara yüzlerde, muhtemel düşey kırılmalar da birimin ortasında yoğunlaştırılabilir. Bu yaklaşımda genel anlamda büyük bir hesap yüküyle karşılaşılır. Bu sebeple mikro modelleme yaklaşımı yerel analizlerde yaygın olarak tercih edilirken, büyük ölçekli yapının tamamını değerlendiren çalışmalarda ise tercih edilmemektedir. Genel olarak basit ölçekli elemanların modellenmesinde kullanılmaktadır.

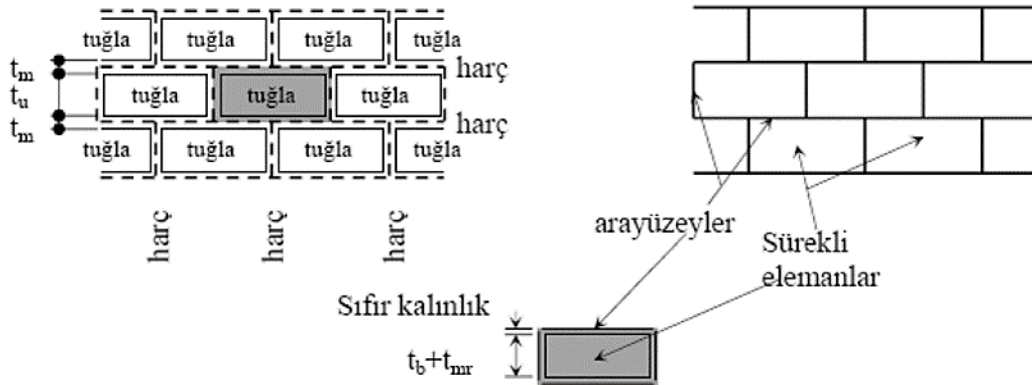
Ayrıntılı mikro modelleme de yığma duvar tasarlanırken kullanılan yığma birim ve harcın mekanik özellikleri birbirinden farklı olduklarından ayrı ayrı ele alınır. Birbirinden ayrı ele alınan bu elemanlar sistemde bağımsız çalışırlar. Yapıda zamanla ya da çeşitli dış nedenlerle çatlaklar meydana gelir. Bu çatlakların yığma birim ile harç arasındaki ara yüzeyde olduğu kabulü yapılır (Sayın, 2009; Ural, 2009).

Yığma yapılarda kullanılan derzler rijitliğin azaldığı düzlemler olarak bilinmektedir. Detaylı bir modellemede, taştan veya tuğladan yapılmış yığma birimlerle derzi oluşturan harcın farklı modellenmesinden kaynaklı davranışlarındaki değişimler dikkate alınır. Derz dolgusunu oluşturan harç yığma birimlere göre kısmen daha az mukavemetli olduğundan, derzlere yoğunlaşan bir yaklaşım olan mikro modelleme, daha çok boyutları küçük olan yapılarda ve çoğunlukla yapıların bir bölümünün veya yapı elemanlarının detaylı çözülmesinde tercih edilen bir yöntemdir. Bu modelleme yaklaşımında, doğrusal olmayan tüm davranış ara yüzeylerde yoğunlaştırılırken olası düşey kırılmalar ise birimin orta bölümünde yoğunlaştırılmıştır (Lourenço, 2000).

3.2.2. Basitleştirilmiş Mikro Modelleme Yöntemi

Basitleştirilmiş mikro modelleme de durum ayrıntılı mikro modellemeye göre daha farklıdır. Bu modellemede yığma birimin beraberindeki harç tabakasının kalınlığı beraberindeki yığma birimlere bölünerek harcın sisteme etkisi yok edilir. Yani elemanla harç birimlerinde süreklilik olduğu kabul edilir.

Basitleştirilmiş mikro modelleme yönteminde harç tabakası göz ardı edilir. Harç tabaka kalınlığının yarısı kadar yığma birimlerin ebatları arttırılır ve bu eklenen bölümle beraber boyutları büyüyen yığma birimlerin ara yüzeyleri çizgilerle birbirlerinden ayrılır (Şekil 3.5). Sistemde muhtemel oluşabilecek çatlakların bu ara yüzey çizgilerinde oluşacağı öngörülür. Harç malzemedeki Poisson oranı ihmal edildiğinden bu modelleme yönteminin doğruluk payı diğer modelleme yöntemlerine göre daha düşüktür (Kaya, 2010). Elemanların harç ile değil yığma birimler arasındaki ara yüzeylerle birbirinden ayrıldığı varsayılır. Bu nedenle de yığma duvarda çekme kuvveti ve kayma kuvveti sebebiyle meydana gelen çatlakların bu ara yüzde oluşacağı kabulü yapılır. Yığma birimde oluşabilecek çatlakların ise elemanın ortasında düşey yönde olduğu kabul edilir (Sayın, 2009; Ural, 2009). Bu durumlar göz önüne alındığında göçme mekanizmasının önemsizmemesi basitleştirilmiş mikro modelleme yönteminin bir dezavantajıdır. Tuğlada oluşacak hasarın tuğlanın orta kısımlarında düşey doğrultuda meydana geleceği varsayılır.



Şekil 3.5. Basitleştirilmiş mikro modelleme yönteminin şematik gösterimi (Kaya, 2010)

3.2.3. Makro Modelleme Yöntemi

Makro modelleme yöntemi genel anlamıyla büyük ölçekli ve karmaşık geometriye sahip yığma yapıların analiz edilmesi için kullanılan bir modelleme yöntemidir. Bu yöntemle modelleme yapılırken yığma birim ile harç arasındaki ilişki ihmal edilir. Yığma birimin homojen yani tek bir malzeme gibi davrandığı kabul edilir. Modelleme de büyük sistem elemanları uygun sonlu elemanlara ayrılarak modellendiği için hem zaman açısından hem de uygulama kolaylığı

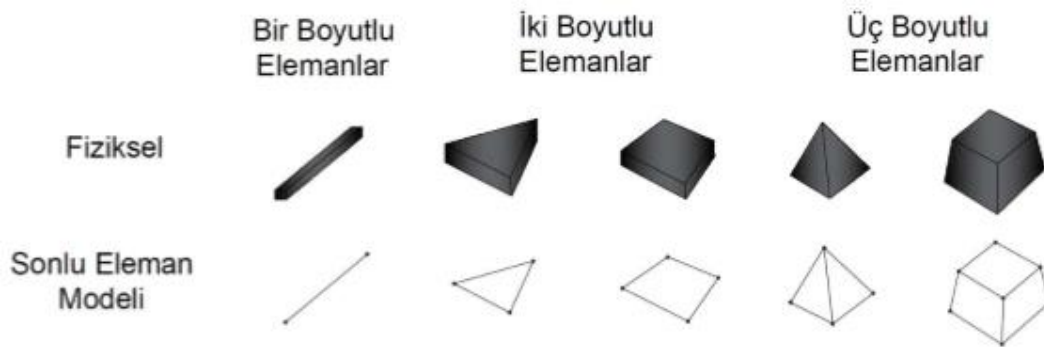
açısından avantaj sağlar. Analiz sonucunda sorunlu elemanlar oluşursa bunlar ise mikro modelleme ile eleman bazında modellenenebilir (Sayın, 2009; Ural, 2009). Küçük ayrıntıların incelenip modelleneceği çalışmalar bu yöntemle modellenmemelidir. Her modellemenin kendisine özgü bir kullanım alanı mevcut olup modellemeler arasında bireysel bir ayırım yapılması, birinin diğerinden daha iyi ya da kötü olduğunun söylenmesi söz konusu değildir.

3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Elemanlar Yöntemi ya da Sonlu Elemanlar Metodu (Finite Element Method) (FEM), mühendislik ve matematiksel modellerde sıklıkla kullanılan bir sayısal analiz yöntemidir. FEM, özellikle yapı statiği, ısı aktarımı, akışkanlar mekaniği, kütle aktarımı ve elektrik potansiyeli problemlerinde kullanılır. Yöntem özellikle iki veya üç boyutlu kısmi diferansiyel denklemleri ve sınır değer problemlerinin çözümünde uygulanır (Zienkiewicz ve ark 2013).

Başka bir deyişle sonlu elemanlar yöntemi, mühendislikte sınır değer problemleri için yaklaşık sonuçlar elde etmeyi sağlayan sayısal hesaplama yöntemlerinden biridir (Hutton, D.V., 2004). Bu yöntem sayesinde yapıların statik, dinamik, doğrusal ile doğrusal olmayan analizleri doğru bir yaklaşımla yapılabilir. Diğer bir taraftan bu yöntem sayesinde analiz sonuçları sayısal veya grafiksel şekilde elde edilebilir.

Sonlu eleman yönteminde, statik ve dinamik yapısal davranışın analizinde, malzemeye ait gerilme ve şekil değiştirme arasındaki bağıntıyı, mesnet şartlarını ve varsa başlangıç koşullarını temsil eden denklemler kullanılır. Bu yöntem, gelişmiş sayısal yöntemlerin kullanılarak daha karmaşık analizlerin yapılmasını sağlayan yazılımlar yardımıyla daha da ayrıntılı bir yapısal analiz yapmaya olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda faydalı sonuçlara ulaşabilmek için etkin modelleme büyük önem taşımaktadır. Sonlu eleman analizlerinde, bir boyutlu elemanlar (doğrusal çubuklar veya eğrisel elemanlar, kirişler ve kolonlar), iki boyutlu elemanlar (yüzeyel duvarlar, eğrilikli yüzeye sahip kabuklar) veya üç boyutlu katı elemanlar (kalın yapısal elemanlar) kullanılarak modelleme yapmak mümkündür (Şekil 3.6). Eleman türünün seçilmesinde taşıyıcı sistem elemanının geometrisi oldukça önemlidir (Vakıflar Kılavuzu, 2017).



Şekil 3.6. Sonlu eleman türleri (Vakıflar Kılavuzu, 2017).

Bir boyutlu sonlu elemanlar; çerçeve sistemlerinde de kullanılan çubuk eleman, kullanımı en genel olan elemanlardan biridir. Tarihi yapılarda bulunan yapı elemanlarını modellemek maksadıyla, eğilme momenti, kesme kuvveti ve burulma momenti etkisi altında bulunan kiriş elemanlar kullanılabilir. Tarihi yapılarda yapı kararlılığına katkıda bulunan gergiler ve kirişler, tek boyutlu çubuk veya kiriş eleman olarak modellemeleri yapılabilir. Küçük çubuk elemanlar birleştirilerek tek boyutlu eğrisel elemanlar oluşturulabilir (Şekil 3.7) (Alamehmet, 2019).

**Bir Boyutlu
Sonlu Elemanlar**

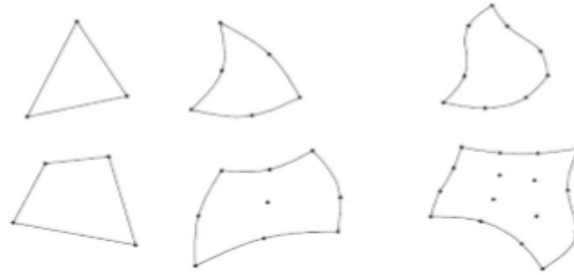


Şekil 3.7. Bir boyutlu sonlu eleman modeli

İki boyutlu sonlu elemanlar; levha, plak ve kabuk elemanlarda kullanılabilir. Düzlem içi kuvvetlere ve burulma momentine sahip elemanlar levha olarak isimlendirilirken, düzlem dışı kuvvet ve eğilme momenti alan elemanları ise plak olarak adlandırılmaktadır. Bu iki eleman birleştirilerek daha kapsamlı olan düzlemsel kabuk elemanlarda tanımlanmaktadır.

Çoğunlukla denge ve şekil değiştirme koşullarının sağlanması bakımından kabuk eleman yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. İki doğrultuda eğrilğe sahip yüzeysel taşıyıcı sistemler için küçük boyutlu düzlemsel elemanlar birleştirilerek modelleme yapılabilir (Şekil 3.8) (Alamehmet, 2019).

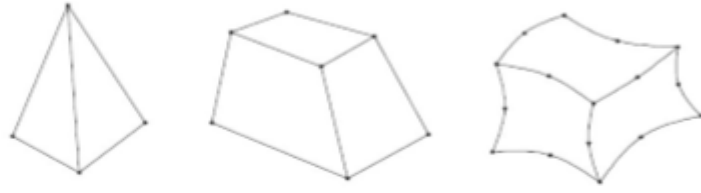
**İki Boyutlu
Sonlu Elemanlar**



Şekil 3.8. İki boyutlu sonlu eleman modeli

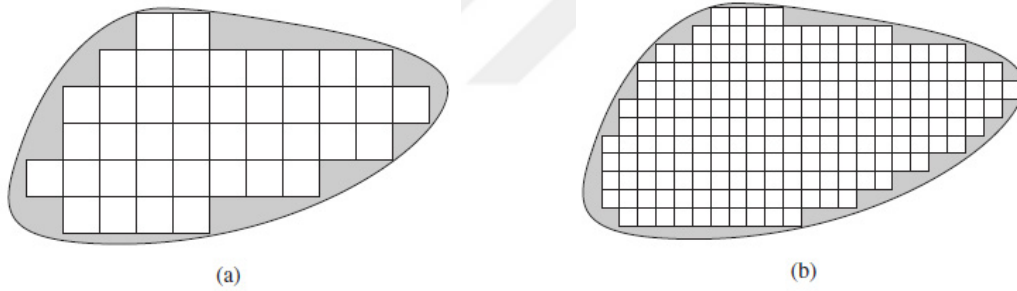
Son olarak sonlu elemanlar yönteminde üç boyutlu sonlu elemanlar da kullanılmaktadır. Bunlar, yapıların üç boyutlu olarak modellenmesinde kullanılan, hacimsel (katı eleman) sonlu elemanlardır. Taşıyıcı duvarlar gibi, kalın taşıyıcı elemanlar için kullanılmak amacıyla bu üç boyutlu hacimsel sonlu elemanlar geliştirilerek bu sayede çeşitli geometrilerde bu elemanlar kullanılabilir (Şekil 3.9) (Alamehmet, 2019).

Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar



Şekil 3.9 Üç boyutlu sonlu eleman modeli

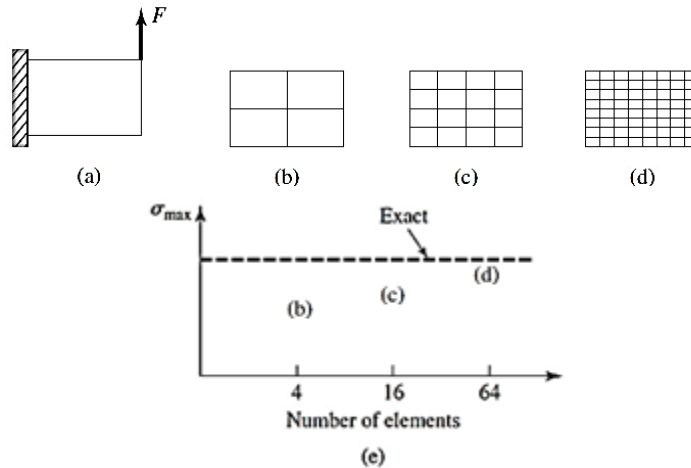
Sonlu elemanlar ile oluşturulan matematiksel modelin gerçeğe uygunluğu veya yaklaşıklık durumu, eleman sayısına, seçilen eleman tipine ve elemanın davranışına uygun varsayılan kabullere bağlıdır. Bu yöntem yardımıyla sonlu sayıda elemana ayrılan ve bu şekilde modellenen yapı sisteminde problemin hata oranını azaltmak için elemanın sonlu eleman boyutları küçültülerek sayıları artırılabilir (Şekil 3.10). Bu sayede sonuçların doğruluk oranları artırılabilir (Şekil 3.11). Ancak bu durumda da bilinmeyen sayısında artma meydana geleceğinden problem çözümü için geçen süre artacaktır. Yer değiştirmeler ile gerilmeler bilinmeyen olarak ayrı ayrı veya beraber seçilerek hesap yapılabilir. Beraberinde diğer bilinmeyenler ise çözümden bulunarak elde edilir. Bu duruma örnek olarak ise yer değiştirmelerin bilinmeyen olarak seçilmesi durumunda, sonuç değerlerinin türevlerinden gerilme değerleri bulunur (Koçak, 1999).



a. 41 kare sonlu eleman

b. Eleman boyutlarını değiştirerek hassasiyetin artırılması

Şekil 3.6. Amorf bir şeklin sonlu eleman ağı (Hutton, 2004)

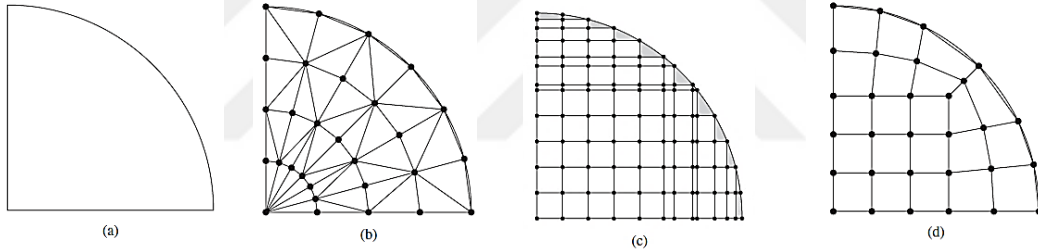


Şekil 3.7. Sonlu eleman sayısı ile yaklaşık sonuçların yakınsama ilişkisi (Hutton, 2004)

Sonlu elemanlar yönteminin en önemli aşaması modelleme aşamasıdır. Problem doğru tanımlanmalı ve buna uygun olan sonlu eleman tipi ve büyüklüğü özenle seçilmelidir. Yapı ne kadar gerçeğe uygun modellenirse analizler sonucunda elde edilecek sonuçlarda o kadar gerçeğe yakın olacaktır. Yapının modellenmesinin yanlış olduğu durumda sonuçlar gerçekten uzaklaşacağı için beklenen olası durumların hiçbiri gerçekleşmeyecektir. Bu da hem yapı için tehlikeli hem de yapan için bir o kadar sıkıntılı bir durumdur. Yapı davranışının gerçeği en uygun şekilde ifade edebilmesi, iyi oluşturulmuş sonlu eleman ağı ve taşıyıcı sistemin hesap modelinin doğru bir şekilde oluşturulmasından geçer. Sonlu elemanlar bizlere modellemede bazı kolaylıklar sağlar. Zamandan ve ekonomik açıdan avantaj sağladığı için tercih edilen bu yöntemin farklı avantajları da vardır.

Bu yöntem aşağıda maddeler halinde sıralanan kolaylıkları beraberinde getirmektedir:

- Eğrisel geometri ve belirli bir düzgün şekli olmayan yapı elemanları sonlu elemanlar yöntemiyle kolaylıkla modellenebilir.
- Modelleme ve analiz sonunda istenilen hassasiyette sonuçlar elde edebilmek için elemanlar istenilen şekil ve ebatlarda parçalara bölünebilir (Şekil 3.12).



a. Model alanı b. Üçgen elemanlar c. Dörtgen elemanlar d. Dörtgen ve yamuk elemanlar

Şekil 3.8. Farklı sonlu eleman modelleri (Hutton, 2004)

- Sınır değerlerini belirleyerek tanımlamak ve işlemin belirlenen bir aşamasında hesaplara dâhil etmek oldukça kolaydır.
- Bu yöntem sayesinde eş malzemedan meydana gelmeyen değişik özelliklere sahip yapı elemanları birleştirilebilir.
- Aynı yapı elemanı içerisinde uygun sonlu eleman ağı seçilmişse, değişik malzeme özellikleri kullanılmasına olanak tanır.
- Birden fazla elemanın birbirine birleştirilmesiyle ortaya çıkan yığma yapı sistemlerinin gerçek inşa yöntemine uygun bir modelleme yöntemidir.
- Modelleyen kişi, eleman boyutları üzerinde oynamalar yapabilir. Bu nedenle de hassas çözüm yapılmak istenilen bölgede küçük elemanlar oluşturulabilir. Fakat hassas bölge dışında aynı elemandan bulunması durumunda da bu parçanın diğer bölgelerde büyük eleman olarak kullanılması analiz hızını artırılabilir (Dabanlı, 2008).

Bu yöntemin esnekliği sayesinde karmaşık ve çok yönlü yapılarda, sürekli ortam, alan ve diğer problemlerde neden-sonuç ilişkilerini çözümlemede de aktif şekilde kullanılır.

3.4. Analiz Yöntemleri

Tarihi yapı çözümlemelerinde genellikle kullanılan 3 farklı analiz yöntemi mevcuttur. Bu yöntemleri plastik, doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemleri olarak sınıflandırmak mümkündür.

- **Plastik Analiz:** Yapıların plastik davranış gösterdiği kabul edilir. Yapıların limit yük çözümlemelerinde kullanılır. Bu metot plastik mafsallı hipotezini esas alan yapısal davranış modeli olup, genellikle doğrulama çalışmalarında kullanılır. Plastik analiz yönteminde daha önce yapılan yüklemelere ait etkiler dikkate alınmazken, yüklerin yoğunlaşması hesaplamalara dâhil edilebilir ve yüklerin aynı şekilde değişmeden arttığı varsayılır. Plastik analizde üst veya alt sınır teoremleri birbirlerine göre uygulanabilir. Plastik mafsallı analizi karşımıza kinematik üst sınır teoremi olarak çıkarken, itki çizgisi analizi statik bir alt sınır uygulamasıdır (Dabanlı, 2008).
- **Doğrusal (Lineer) Analiz:** *Yapılarda en yaygın kullanılan analiz yöntemi doğrusal statik analiz yöntemidir. Malzemenin lineer-elastik davranışını başlıca konu alan bu yöntemle yapıda sınır durum ve lineer davranış analizi yapılabilir. Olası hasar bölgeleri belirlenebilir. Bu statik analizin tek modlu ve çok modlu olarak iki farklı türü bulunmaktadır. Tek modlu olanına “Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi”, çok modlu olanına ise “Mod Birleştirme Yöntemi” denilmektedir. Bu yöntemlerin yanında bir de “Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analiz Yöntemi” bulunur. Bu analizde yapının kütle, sönüm ve rijitlik değerleri göz önüne alınarak yazılan hareket denkleminin, seçilen uygun bir ivme kaydı altında sayısal çözümlemesi yapılır. Yapının bulunduğu yer ve zemin özellikleri dikkate alınarak yapıya ait yatay elastik tasarım spektrumu oluşturulduktan sonra bu spektruma uygun olarak yeterli sayıdaki deprem kaydı yapıya etkitilmektedir. Bu yöntemde de yapının elastik ötesi davranışını göz önüne almak amacıyla deprem yükü azaltma katsayısı gerilme ve iç kuvvetlerinin hesabında kullanılırken şekil değiştirme ve yer değiştirmeler ise azaltılmamış deprem kuvvetlerinden elde edilir. Bu değerler zamana bağlı olarak hesaplandığı için, hem analiz süresi uzun hem de değerlendirilecek sonuç oldukça fazladır (Alamehmet, 2019; Vakıflar Kılavuzu, 2017).
- **Doğrusal Olmayan (Non-Lineer) Analiz:** Yapıların deprem yükleri altındaki doğrusal olmayan davranışlarının belirlenmesinde birkaç analiz yönteminden söz etmek mümkündür. Bunlar, doğrusal olmayan tek ve çok modlu itme analizi ile ve doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analiz yöntemleridir. Doğrusal olmayan zaman

tanım alanında dinamik analiz, sismik davranışı belirlemede kullanılan en iyi yöntem olarak kabul edilmektedir. Buna ek olarak doğrusal olmayan artımsal itme analizleri de kolay olmaları sebebiyle uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğrusal olmayan dinamik analiz yönteminin tarihi yapılarda uygulanmasında dikkat edilmesi gereken hususlar vardır. Öncelikle doğrusal olmayan analizin kullanılacağı yapının yeterli süneklik yani elastik ötesi şekil değiştirme yapabilme özelliği bulunmalıdır. Tarihi yapıların sünekliği diğer yapı türlerine göre sınırlı olarak kabul edilir. Öte yandan analiz sonuçlarını daha çok etkileyen parametreler olan analiz ve malzeme özelliklerinin doğru belirlenmesi, elde edilecek sonuçların doğruya yakın olması açısından oldukça önemlidir. Analizde bu parametrelerin değişim aralığının da doğru bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap, deprem yer hareketinin etkisi altında taşıyıcı sistemin hareket denklemlerini ifade eden diferansiyel denklem takımının zaman artımları ile adım adım doğrudan integrasyonuna karşı gelir. Bu analiz sırasında, doğrusal olmayan davranış nedeni ile sistem rijitlik matrisinin zamanla değişimi dikkate alınır (Alamehmet, 2019).

Malzeme davranışları ve sonuçlar açısından, analiz yöntemleri arasında farklılıklar meydana gelebilir. Basit yapılarda çekme mukavemeti sıfır kabul edilerek, limit yük analizi ile non-lineer analiz, göçme mekanizmaları için yakın sonuçlar verir. Ancak limit yük analizinin daha kompleks yapılarda uygulanması güçtür ve bu nedenle sonuçlarda hatalar olabilir. Çekme mukavemeti, tarihi yapıların analizlerinde oldukça önemli bir etkidir. Analizlerde çekme mukavemeti sıfırdan farklı, düşük veya azalarak dikkate alındığı zaman sonuçların güvenilirliği artmaktadır (Dabanlı, 2008). Tablo 3.1’de plastik, doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemleri için giriş ve sonuç verileri verilmiştir.

Tablo 3.1. Analiz tiplerinin karşılaştırılması (Dabanlı, 2008)

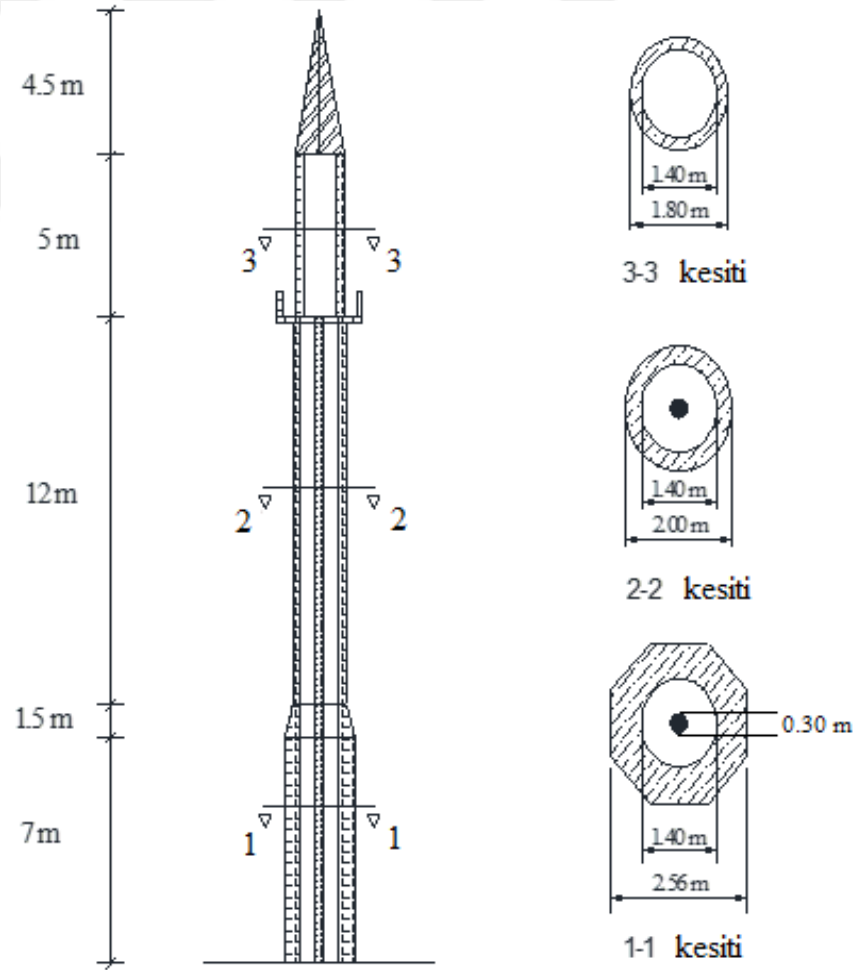
ANALİZ TİPİ	GİRİŞ VERİLERİ	SONUÇ VERİLERİ
Plastik Analiz	Malzeme Mukavemeti	Göçme Mekanizması
Doğrusal Analiz	Lineer Elastik Malzeme Özellikleri	Şekil Değiştirme
	Güvenlik Gerilmeleri	Gerilme Dağılımı
Doğrusal Olmayan Analiz	Malzemenin Elastik ve Mukavemet Özellikleri	Şekil Değiştirme
	Malzemenin Elastik Olmayan Özellikleri	Gerilme Dağılımı ve Göçme Mekanizması

4. MATERYAL VE METOD

Bu tez çalışmasında, yığma malzeme kullanılarak inşa edildiği varsayılan örnek tarihi yığma bir minarenin dinamik analizleri yapılmıştır. Yığma minarenin Elazığ il merkezinde olduğu varsayılmış üç boyutlu olarak modellenmesi ve dinamik analizleri ANSYS (ANSYS, 2015) sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılmıştır. Dinamik analizler için üç farklı deprem ivmesi dikkate alınmıştır. Minare modellenirken makro modelleme yöntemi tercih edilmiştir.

4.1. Yığma Minare

Bu çalışmada üç boyutlu olarak modellenen tarihi yığma minarenin Elazığ il merkezinde olduğu düşünülmüştür. Yığma minarenin üç boyutlu olarak modellenmesinde dikkate alınan geometrik özellikler ve kesitler Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Yığma minarenin geometrik özellikleri ve kesitleri

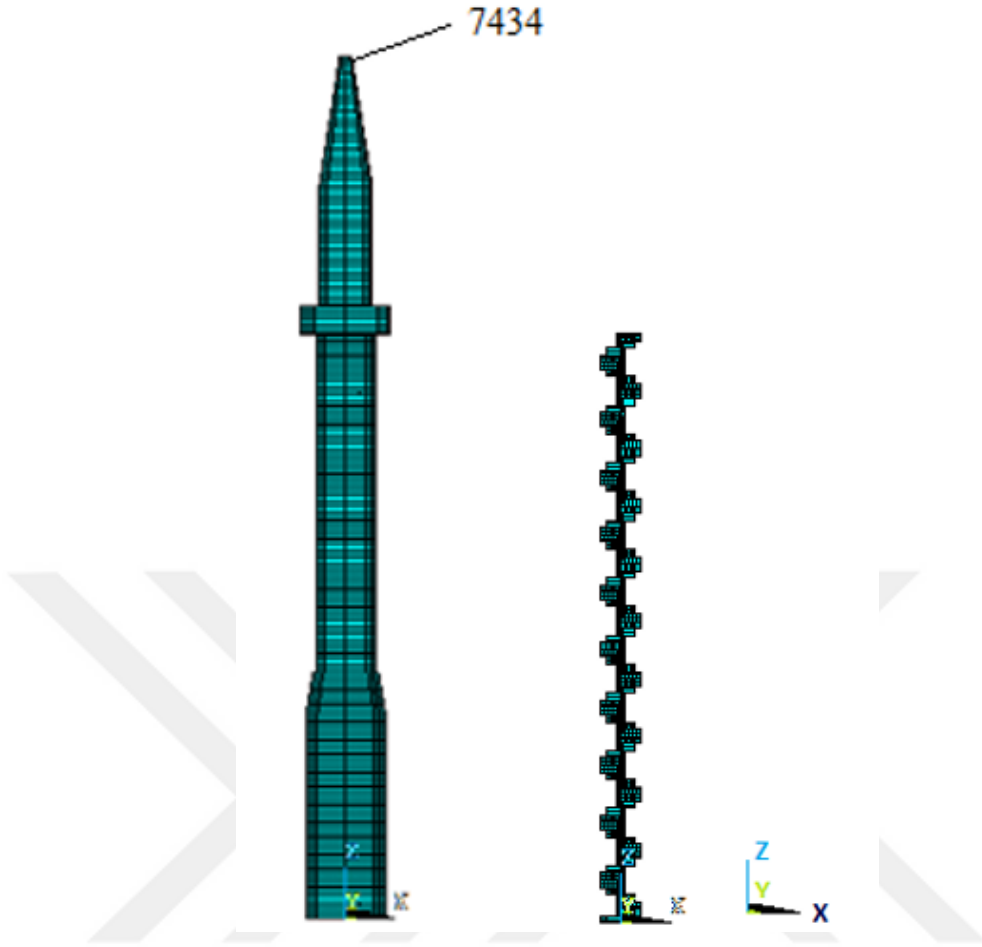
Şekil 4.1 incelendiğinde yığma minarenin 30 m uzunluğunda olduğu ve üç farklı kesitten meydana geldiği görülebilir. Minare kesitlerinin dış çapları sırasıyla 2.56 m, 2.00 m ve 1.80 m iç çapı ise 1.40 m dir. Ayrıca minarede tarihi yığma minarelerde kullanılan (Osmanlı dönemine ait minarelerde) 0.30 m çapında taş bir çekirdek kısım olduğu düşünülmüştür. Bu çekirdek kısım üzerinde helezonik şeklinde merdivenler bulunmaktadır. Bu merdivenler kaideden başlayarak şerefeye kadar uzanmakta olup özellikle yatay rijitlikte çekirdek kısım ile birlikte minareye katkı sağlamaktadır. Tarihi yığma minarelerde helezon merdivenlerin basamak yükseklikleri 23-30 cm arasında değişiklik gösterebilmektedir (Uysal, 1999; Kuşüzümü, 2010). Üç boyutlu modelimizde basamak yüksekliği 25 cm olarak dikkate alınmıştır. Tarihi yapılarda malzeme özelliklerinin mümkün olduğu kadar doğru belirlenmesi büyük önem taşır. Çünkü sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri ne kadar doğru belirlenirse, hazırlanan 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, tarihi yığma bir minare olarak dikkate aldığımız üç boyutlu modelimizin malzeme özellikleri tarihi yığma minareler için daha önceden yapılmış ilgili literatür dikkate alınarak oluşturulmuştur. Çalışmamızda yığma minareye ait malzeme özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir (Serhatoğlu, 2015; Alamehmet, 2019). Yığma minarede kullanılan taşın basınç dayanımının 30 MPa, çekme dayanımı ise basınç dayanımının 1/10 ile 1/20 arasında alınabileceği dikkate alınarak 3 MPa olduğu kabul edilmiştir.

Tablo 4.1. Yığma minare için dikkate alınan malzeme özellikleri

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

Yığma minarenin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ANSYS sonlu elemanlar programı yardımıyla elde edilmiştir. Minarenin modellenmesinde büyük yığma yapıların modellenmesinde sıklıkla tercih edilen makro modelleme yöntemi kullanılmıştır. Minarenin sonlu elemanlar ağ modelinde 14058 adet düğüm noktası ve 9673 adet sekiz düğüm noktalı katı eleman kullanılmıştır. Minarenin zeminle temas eden bölgeleri ankastre mesnetli olarak dikkate alınmıştır.

Yığma minarenin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli, çekirdek kısmı ve üzerindeki helezon merdivenler Şekil 4.2 de verilmiştir. Ayrıca bu model üzerinde tepki büyüklüklerinin incelendiği 7434 nolu düğüm noktası da işaretlenmiştir. Bu düğüm noktası minare külahının en üst noktasında seçilmiştir.



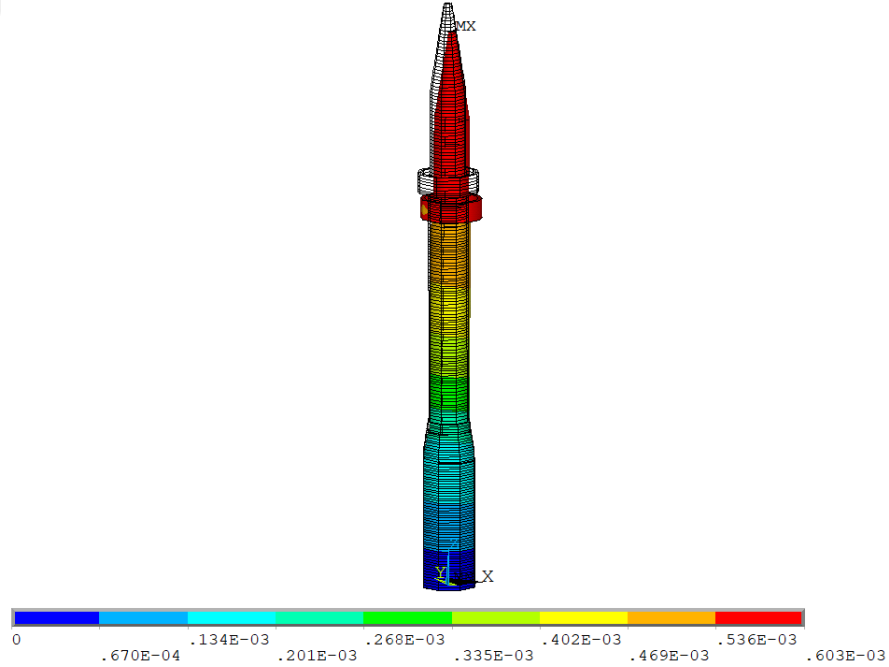
Şekil 4.2. Yığma minarenin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli, çekirdek kısmı ve merdivenler

5. SAYISAL ÇALIŞMA

Bu bölümde, yığma malzeme ile inşa edildiğini kabul ettiğimiz üç boyutlu sonlu eleman modeli ile hazırlanmış tarihi bir minare sayısal uygulama için dikkate alınmıştır. Yığma minarenin öncelikle kendi ağırlığı altında statik analizi yapılmıştır. Daha sonra dinamik parametreleri elde etmek amacı ile modal analiz yöntemi kullanılmıştır. Üç boyutlu olarak sonlu elemanlar metodu ile hazırlanan örnek yığma minarenin Elazığ il merkezinde olduğu varsayılmıştır. Minarenin dinamik analizleri için üç farklı deprem ivmesi (1999 Kocaeli, 2003 Bingöl ve 2011 Van) dikkate alınmıştır. Deprem ivmeleri minarenin bulunduğu konum dikkate alınarak 2018 Deprem yönetmeliğindeki yatay elastik tasarım spektrumuna göre ölçeklendirilmiştir. Dinamik analizler sonucunda farklı deprem ivmeleri altında minarede oluşan gerilme grafikleri ve yer değiştirme değerleri sunulmuştur.

5.1. Yığma Minarenin Statik Analizi

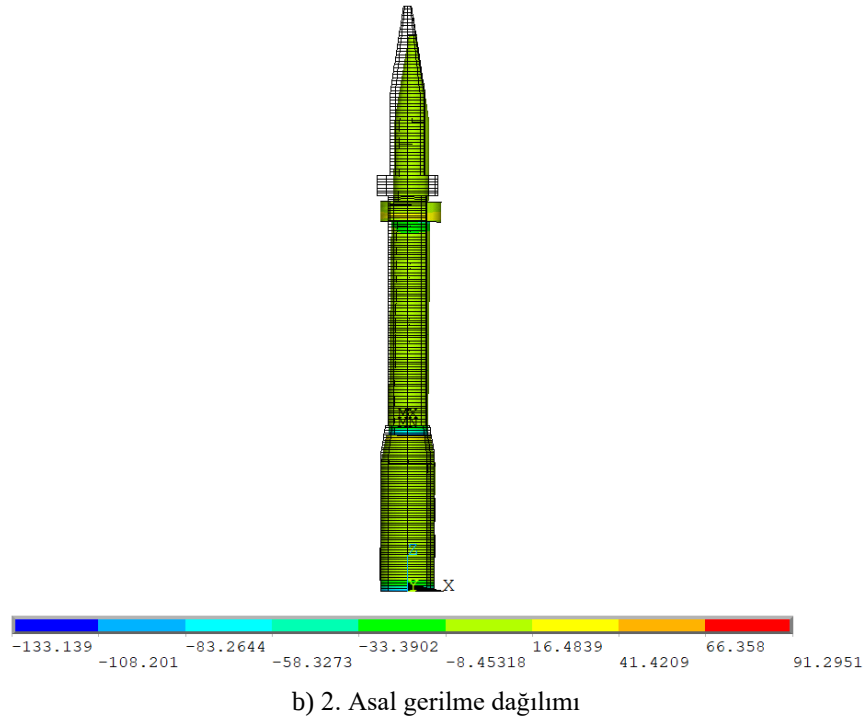
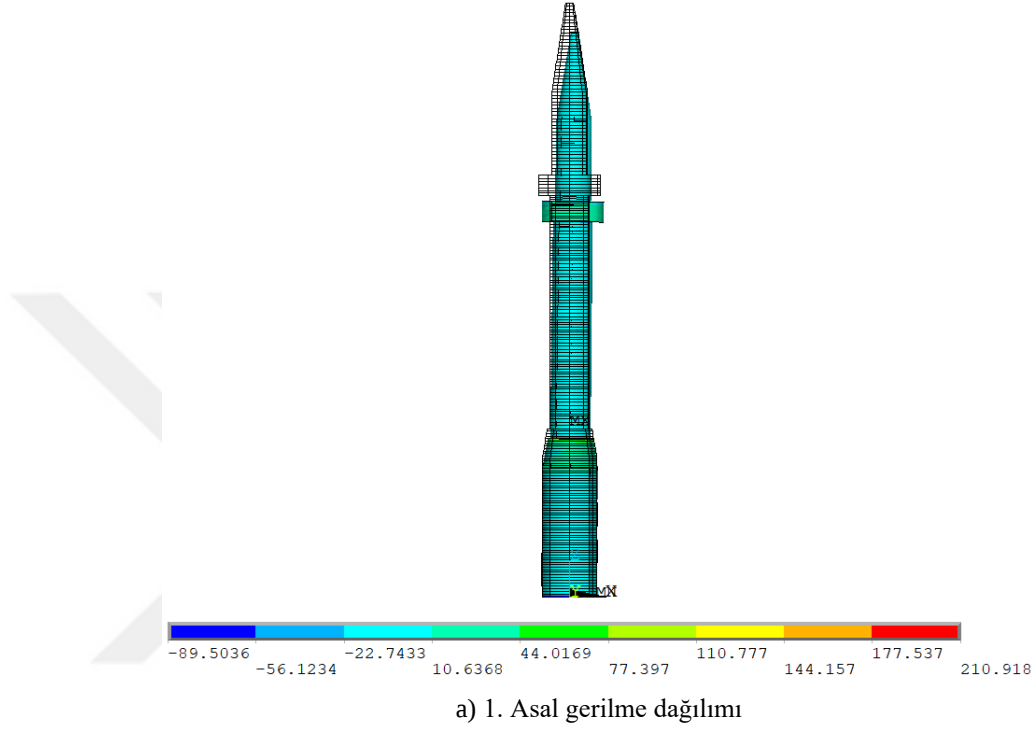
Bu kısımda, üç boyutlu sonlu eleman modeli hazırlanan yığma minarenin kendi ağırlığı altında statik analizi yapılmıştır. Statik analiz sonunda minarenin şekil değiştirmiş görüntüsü Şekil 5.1’de verilmiştir.



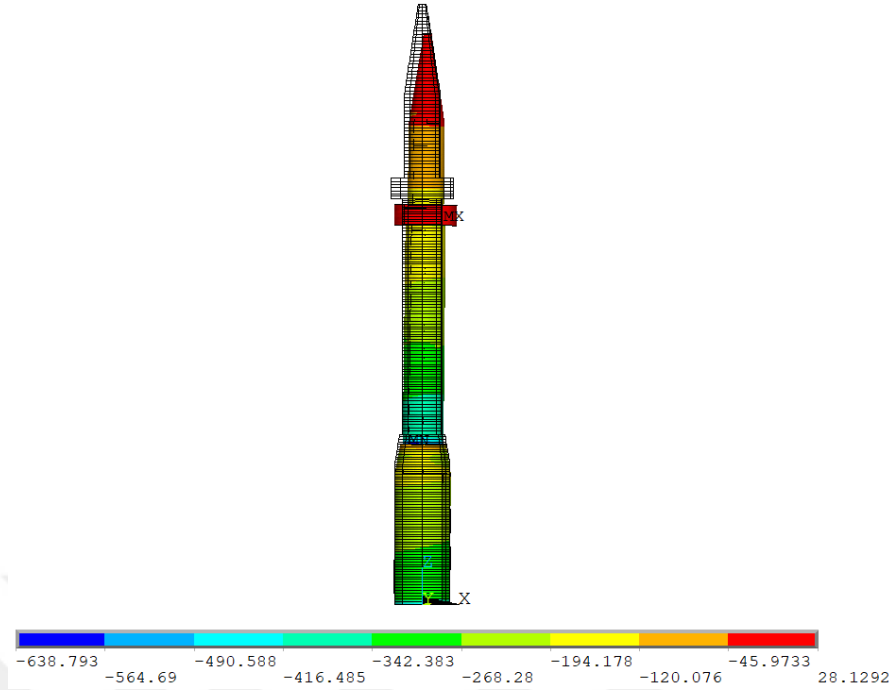
Şekil 5.1. Ölü yükler altında yığma minarenin şekil değiştirmiş üç boyutlu görüntüsü (m)

Minarede meydana gelen maksimum yer değiştirme miktarı minarenin düşey ekseninde (z eksen) 0.60 mm olarak elde edilmiştir. Düşey yükler etkisi ile minarede meydana gelen asal

gerilme grafikleri ve değerleri ise Şekil 5.2 de verilmiştir. Statik analiz sonucu minarede meydana gelen maksimum çekme gerilmesi 210.92 kPa, minimum basınç gerilmesi ise 638.79 kPa olarak bulunmuştur. Statik analiz sonucunda maksimum ve minimum gerilmelerin minarenin kürsü ile gövde kısmını bağlayan geçiş kısmında (küp) yoğunlaştığı görülmüştür. Elde edilen değerler minarede kullanıldığı düşünölen taşın basınç ve çekme dayanımlarının altındadır.



Şekil 5.2. Statik analiz sonucunda yığma minaredeki gerilme dağılımı (kPa)



c) 3. Asal gerilme dağılımı

Şekil 5.2. Statik analiz sonucunda yığma minaredeki gerilme dağılımı (kPa) (devam)

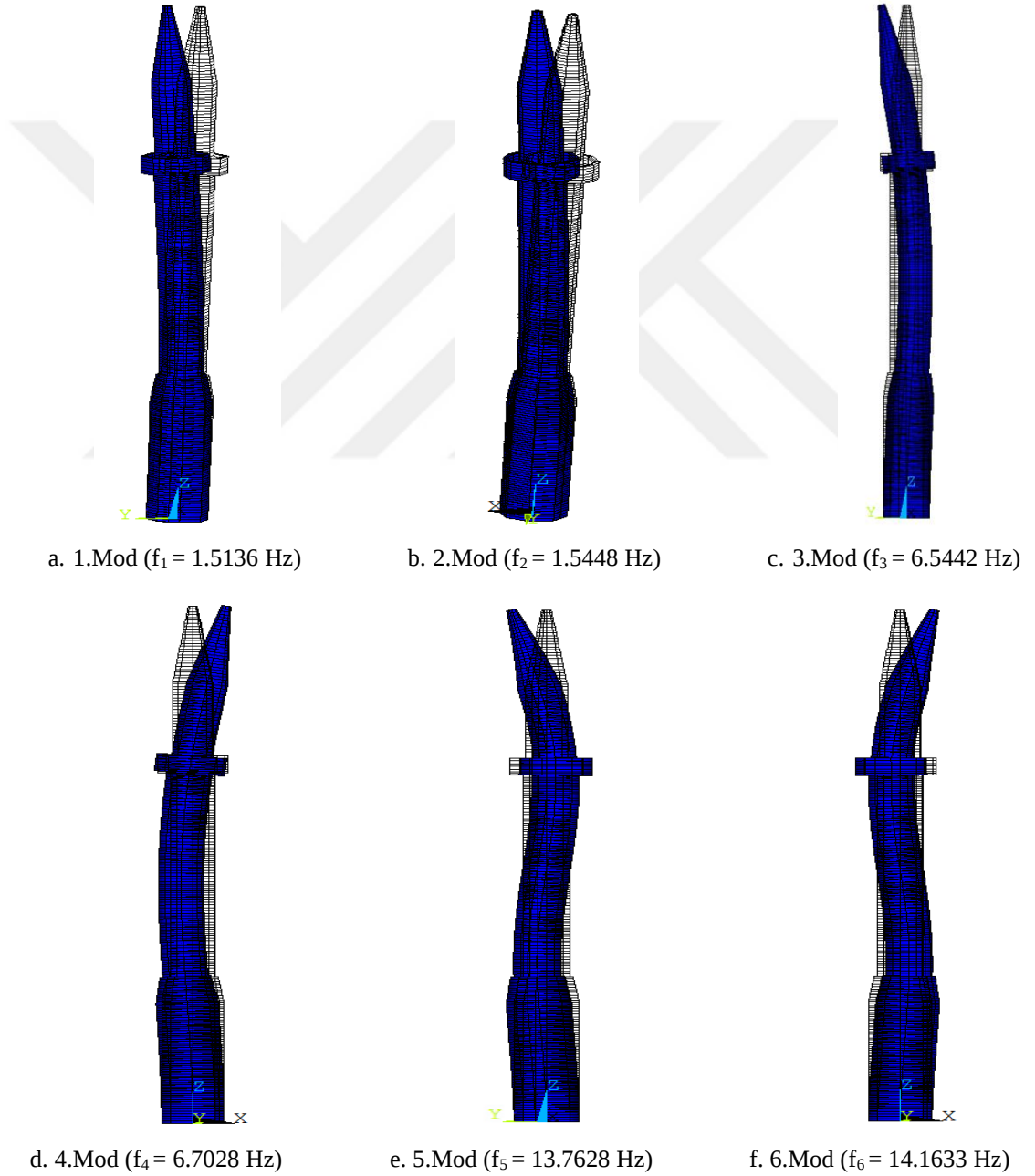
5.2. Yığma Minarenin Modal Analizi

Minarenin dinamik karakteristiklerini elde etmek için üç boyutlu minare modelinin ANSYS programında modal analizi yapılmıştır. Minarenin dinamik karakteristikleri (serbest titreşim periyotları, kütle katılım oranları ve mod şekilleri) ilk 20 mod için hesaplanmıştır. Hesaplanan kütle katılım oranı ilk 20 mod için minarenin toplam kütlelerinin %90'ından fazladır. Modal analizden elde edilen ilk 10 mod Tablo 5.1'de sunulmuştur.

Tablo 5.1. Serbest titreşim periyotları ve kütle katılım oranları

Modlar	Periyot (s)	Toplam Kütle Katılım Oranı (x eksen)	Toplam Kütle Katılım Oranı (y eksen)
1	0.66067	0.675293E-02	0.422868
2	0.64733	0.435476	0.429721
3	0.15281	0.439528	0.681921
4	0.14919	0.691299	0.685977
5	0.07266	0.693464	0.819143
6	0.07061	0.824409	0.821274
7	0.06228	0.824410	0.821274
8	0.04133	0.824434	0.821287
9	0.04012	0.825468	0.891644
10	0.03910	0.895634	0.892675

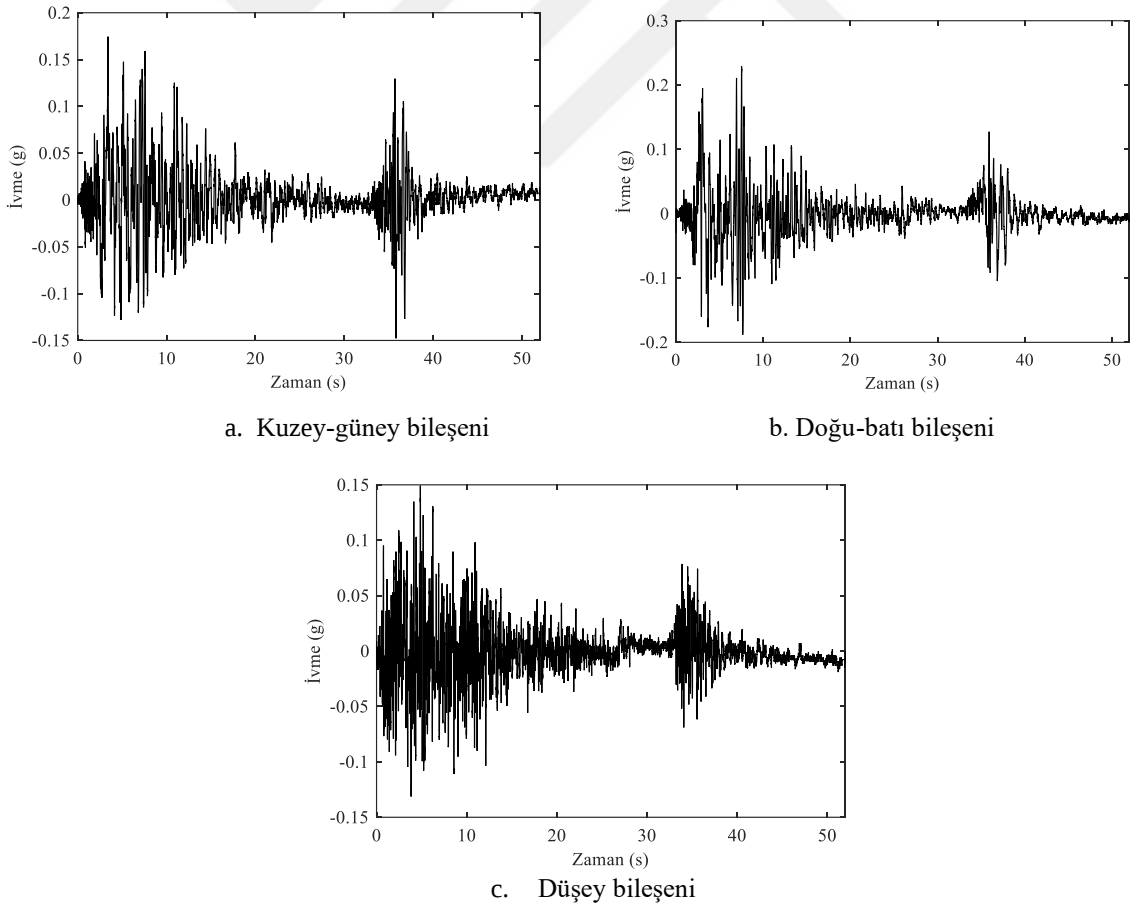
Analiz sonuçları incelendiğinde minarenin kütsel olarak serbest titreşim hareketine katıldığı etkin modların, birinci ve ikinci modlar olduğu görülebilir. Minarenin y doğrultusunda yer değıştirme hareketini gösteren birinci modun kütle katılım oranı %42.29, x doğrultusunda yanal yer değıştirme hareketi gösteren ikinci modun kütle katılım oranı ise %43.55 olarak hesaplanmıştır. Bu iki mod için elde edilen periyot değeri ise sırasıyla 0.66067 s ve 0.64733 s olarak elde edilmiştir. Minare için elde edilen ilk 6 doğal titreşim mod şekilleri ve frekans değeri Şekil 5.3'te sunulmuştur. İlk 6 mod incelendiğinde bu modların yatay yönde (x ve y doğrultusunda) olduğu görülmektedir.



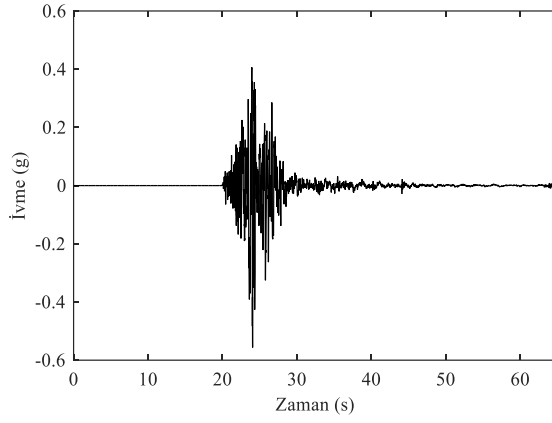
Şekil 5.3. Yığma minarenin mod şekilleri

5.3. Yığma Minarenin Dinamik Analizi

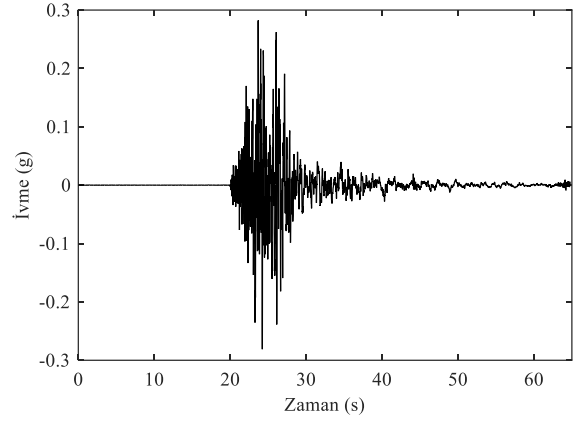
Minarenin dinamik analizlerinde 1999 Kocaeli, 2003 Bingöl ve 2011 Van depremlerinin ivme kayıtları kullanılmıştır. Dinamik analizlerde depremlerin doğu-batı bileşenleri minareye x doğrultusunda, kuzey-güney bileşenleri ise minareye y doğrultusunda etki ettirilmiştir. Temel ortamı rijit olarak kabul edilmiştir. Minarenin 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. Analizlerde integrasyon zaman adımı 0.01 s olarak seçilmiştir. Dinamik analizler için HHT- α algoritması dikkate alınmıştır. Sönüm tipinin Rayleigh tipi bir sönüm olduğu kabul edilerek rijitlik ve kütle orantılı sönüm katsayıları hesaplanmıştır. Analizlerde sönüm oranının %5 olduğu kabul edilmiştir. Dinamik analizlerde dikkate alınan deprem ivme kayıtları Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 da sunulmuştur. Kocaeli, Bingöl ve Van depremleri için ivme kayıt süreleri sırasıyla 52 s, 64.5 s ve 83.5 s dir. Analizlerde tüm deprem ivmelerinin kayıt süreleri kısaltılmadan kullanılmıştır.



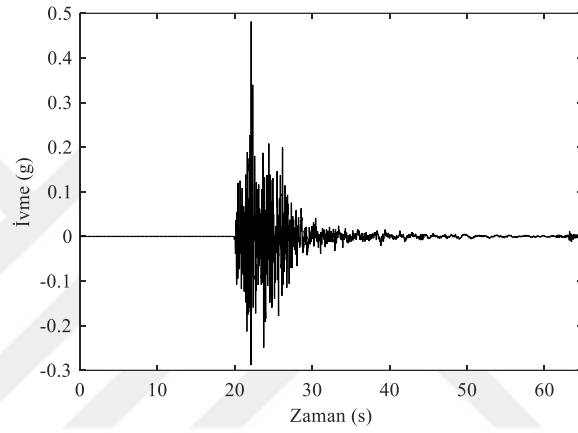
Şekil 5.4. 1999 Kocaeli depremi ivme kayıtları



a. Kuzey-güney bileşeni

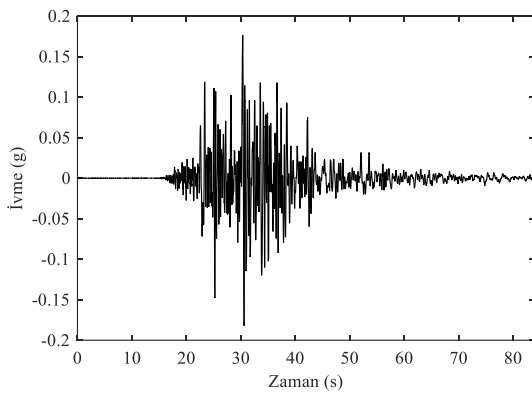


b. Doğu-batı bileşeni

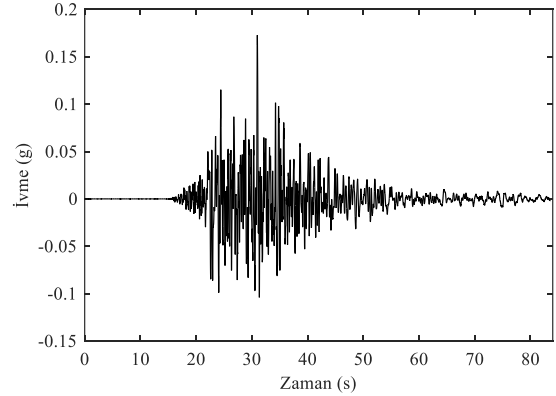


c. Düşey bileşeni

Şekil 5.5. 2003 Bingöl depremi ivme kayıtları

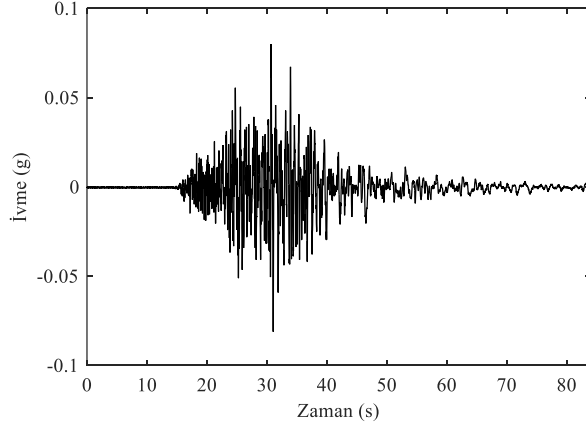


a. Kuzey-güney bileşeni



b. Doğu-batı bileşeni

Şekil 5.6. 2011 Van depremi ivme kayıtları



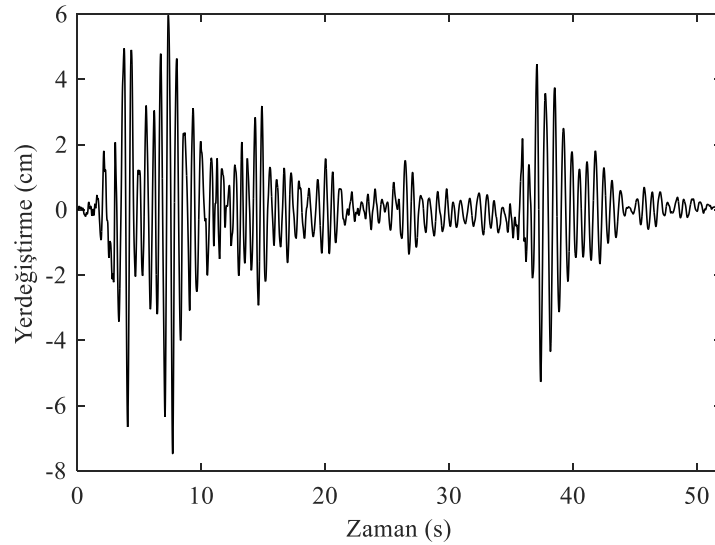
c. Düşey bileşeni

Şekil 5.6. 2011 Van depremi ivme kayıtları (devam)

Yapılan dinamik analizlerde yapının kendi ağırlığı 1999 Kocaeli, 2003 Bingöl ve 2011 Van deprem ivmeleri ile birlikte dikkate alınmıştır. Dinamik analizler sonucunda minarede meydana gelen maksimum ve minimum gerilme diyagramları ile minare kûlahının tepesinde yer alan 7434 nolu noktanın yer değıştirme grafikleri elde edilmiştir.

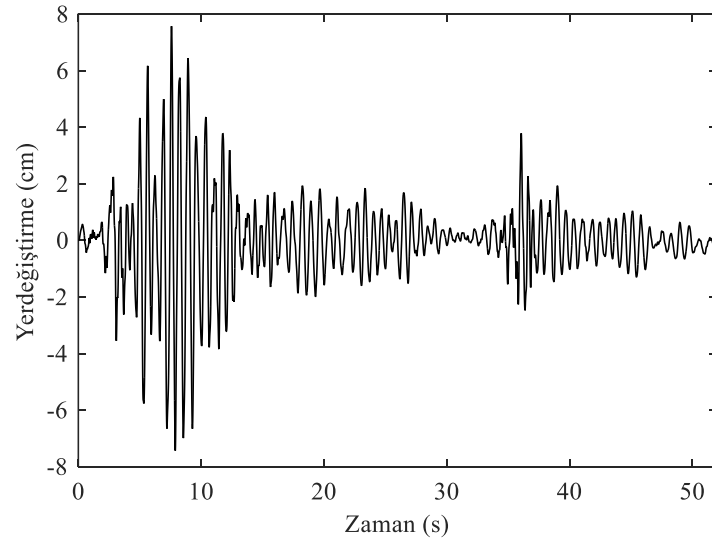
5.4. 1999 Kocaeli Depremi için Dinamik Analiz Sonuçları

Zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde 1999 Kocaeli depremi altında üç boyutlu model üzerinde işaretlenmiş 7434 nolu düğüm noktası için x ve y doğrultularında elde edilen yerdeğıştirme grafikleri Şekil 5.7 de verilmiştir. Şekil 5.7 incelendiğinde x ve y doğrultularındaki mutlak maksimum yerdeğıştirme değeri sırasıyla 7.48 cm ve 7.58 cm olduğu görülebilir.



a. x doğrultusu

Şekil 5.7. 1999 Kocaeli depremi için 7434 nolu düğüm noktasının yer değıştirme grafiğı

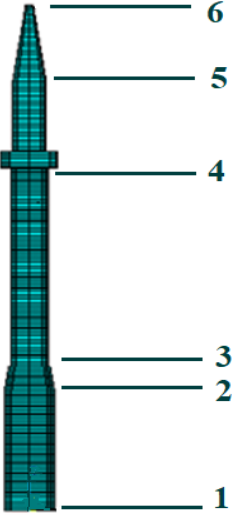


b. y doğrultusu

Şekil 5.7. 1999 Kocaeli depremi için 7434 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği (devam)

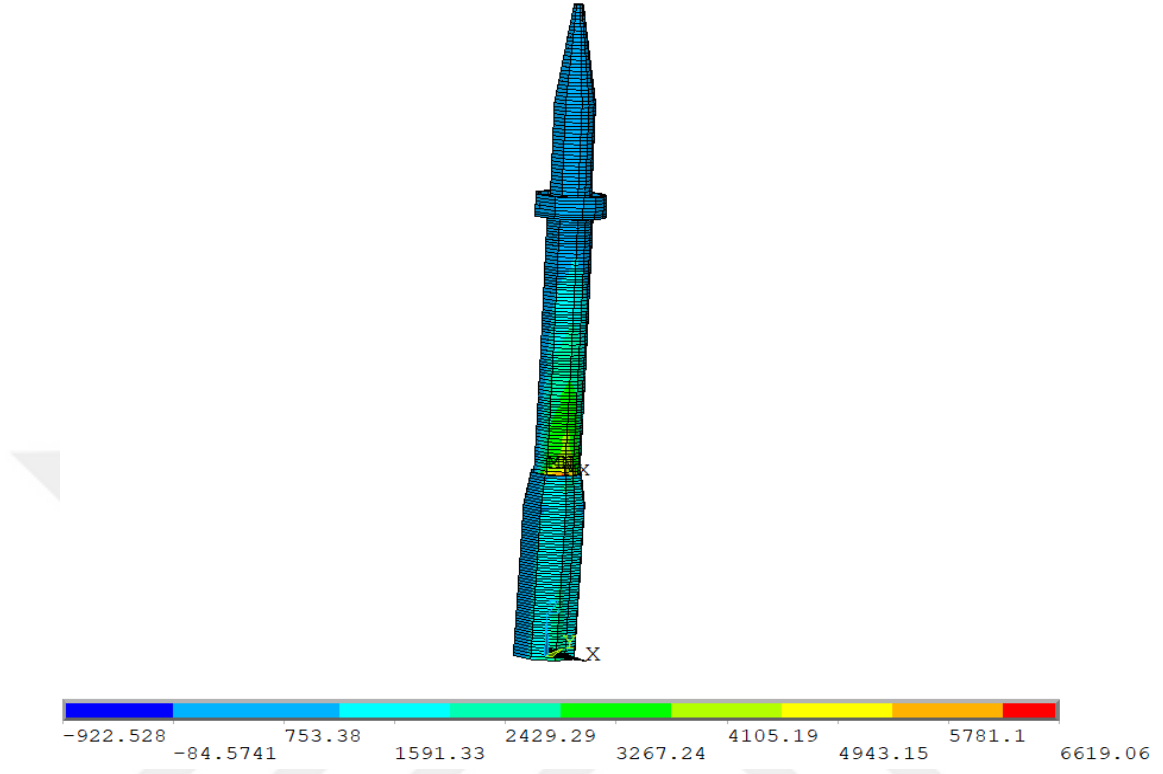
Minare üzerinde işaretli noktalar için 1999 Kocaeli depremi kullanılarak zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde elde edilen x ve y doğrultularındaki mutlak maksimum yer değiştirme değerleri Tablo 5.2 de verilmiştir.

Tablo 5.2. 1999 Kocaeli depremi için seçili noktalardaki x ve y doğrultularındaki yer değiştirme değerleri

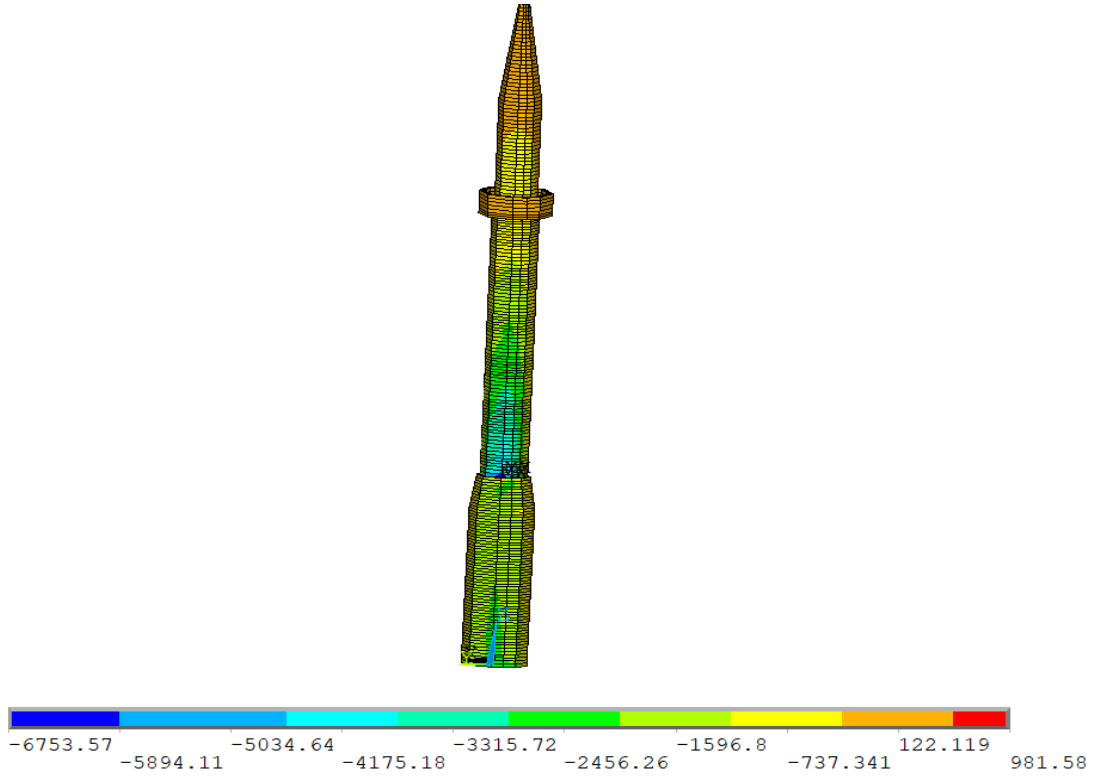
	Yeri	Yüksekliği (m)	x doğrultusundaki yer değiştirme (cm)	y doğrultusundaki yer değiştirme (cm)
	1	0	0	0
	2	7	0.31	0.38
	3	8.5	0.45	0.52
	4	20.5	3.39	3.41
	5	25.5	5.66	5.71
	6	30	7.48	7.58

1999 Kocaeli depremi kullanılarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu elde edilen maksimum ve minimum gerilme diyagramları Şekil 5.8 ve 5.9'da verilmiştir. Analizler sonucunda minarede oluşan maksimum asal gerilme 6619.06 kPa, minimum asal gerilme ise 6753.57 kPa olarak elde edilmiştir. Analizler sonucu elde edilen gerilme değerleri minarede kullanıldığı düşünülen taşın basınç dayanımının altında kalırken çekme dayanımının ise üstündedir.

Çekme ve basınç gerilmelerinin minarenin küp ile gövdesinin birleştiği bölgede en yüksek değerlerine ulaştığını söylemek mümkündür.

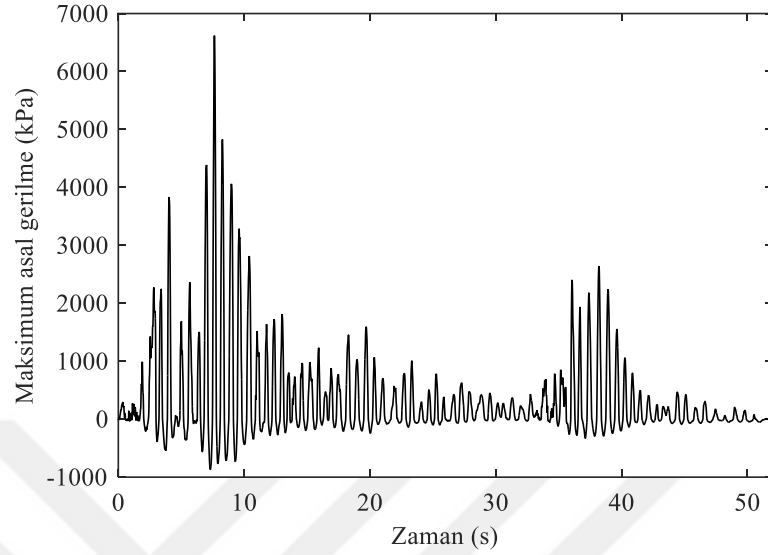


Şekil 5.8. 1999 Kocaeli depremi için maksimum asal gerilme (kPa)



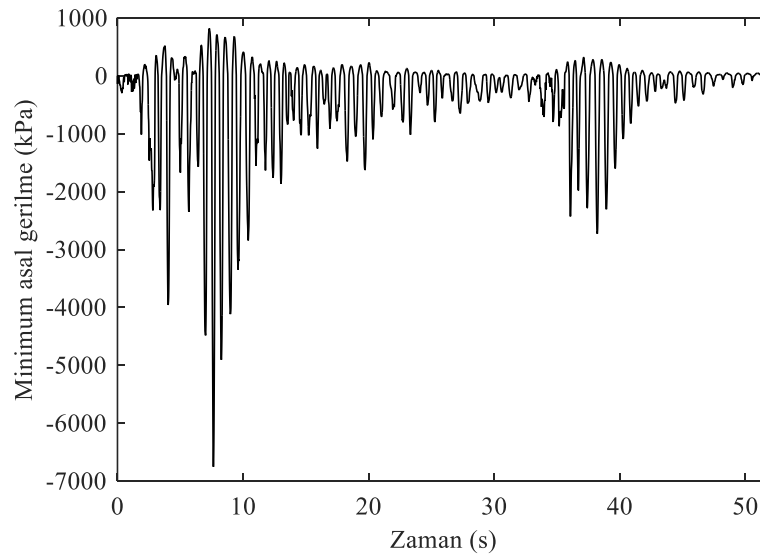
Şekil 5.9. 1999 Kocaeli depremi için minimum asal gerilme (kPa)

Maksimum asal gerilmenin elde edildiği minarenin küp ile gövdesinin birleştiği bölgede bulunan 9765 nolu düğüm noktasının zamana bağlı değişimi Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10. Maksimum asal gerilme diyagramının zamana bağlı değişimi

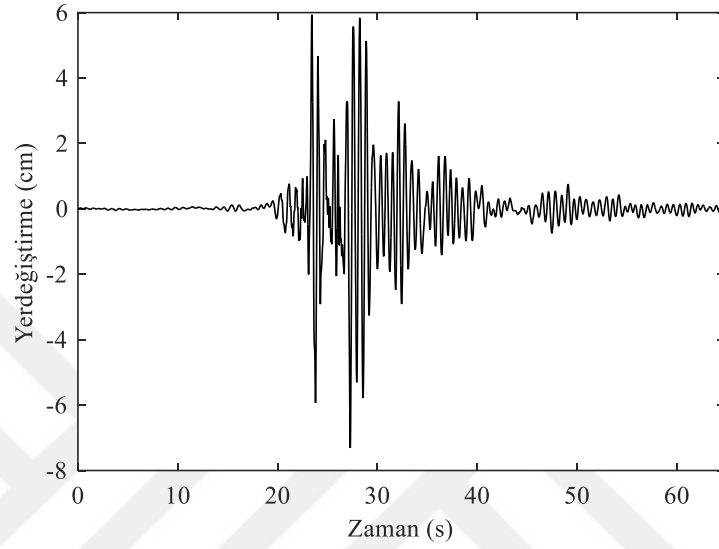
Minimum asal gerilmenin elde edildiği minarenin küp ile gövdesinin birleştiği bölgede bulunan 9719 nolu düğüm noktası için zamana bağlı değişimi grafiği ise Şekil 5.11'de sunulmuştur.



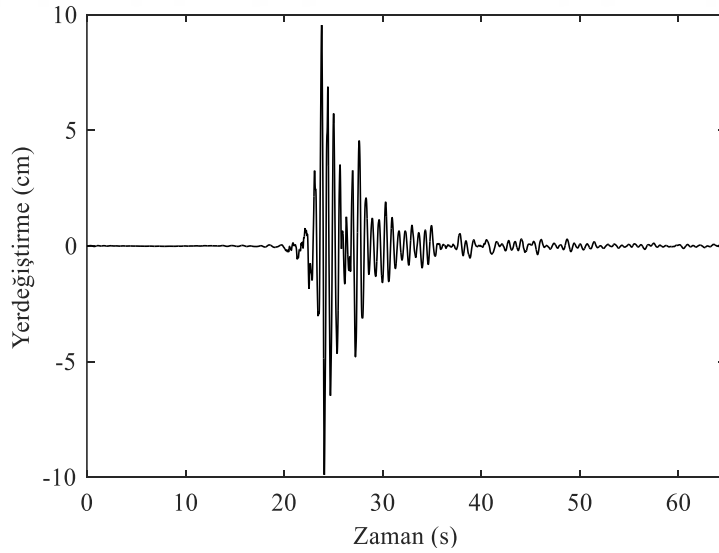
Şekil 5.11. Minimum asal gerilme diyagramının zamana bağlı değişimi

5.5. 2003 Bingöl Depremi için Dinamik Analiz Sonuçları

2003 Bingöl depreminin ivme kaydı altında zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde minare üzerinde işaretlenmiş 7434 nolu düğüm noktası için x ve y doğrultularında elde edilen yer değiştirme grafikleri Şekil 5.12’de verilmiştir. Mutlak maksimum yer değiştirme değerleri x ve y doğrultularında sırasıyla 7.32 cm ve 9.90 cm olarak elde edilmiştir.



a. x doğrultusu

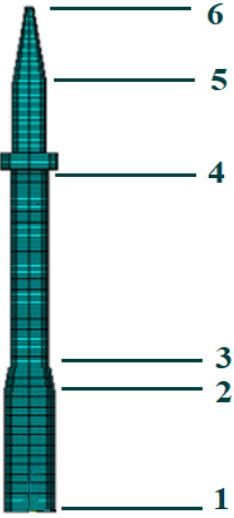


b. y doğrultusu

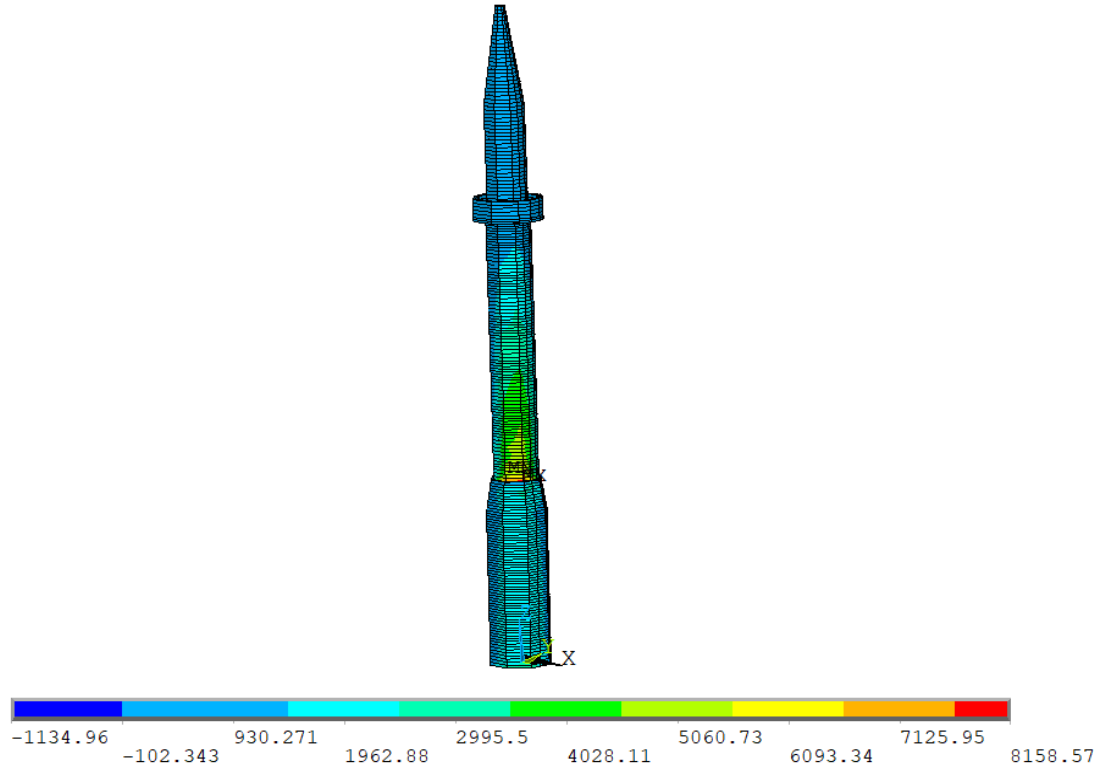
Şekil 5.12. 2003 Bingöl depremi için 7434 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği

Minare üzerinde işaretlenmiş noktalar için 2003 Bingöl depremi kullanılarak zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde elde edilen x ve y doğrultularındaki mutlak maksimum yer değiştirme değerleri ise Tablo 5.3’de verilmiştir.

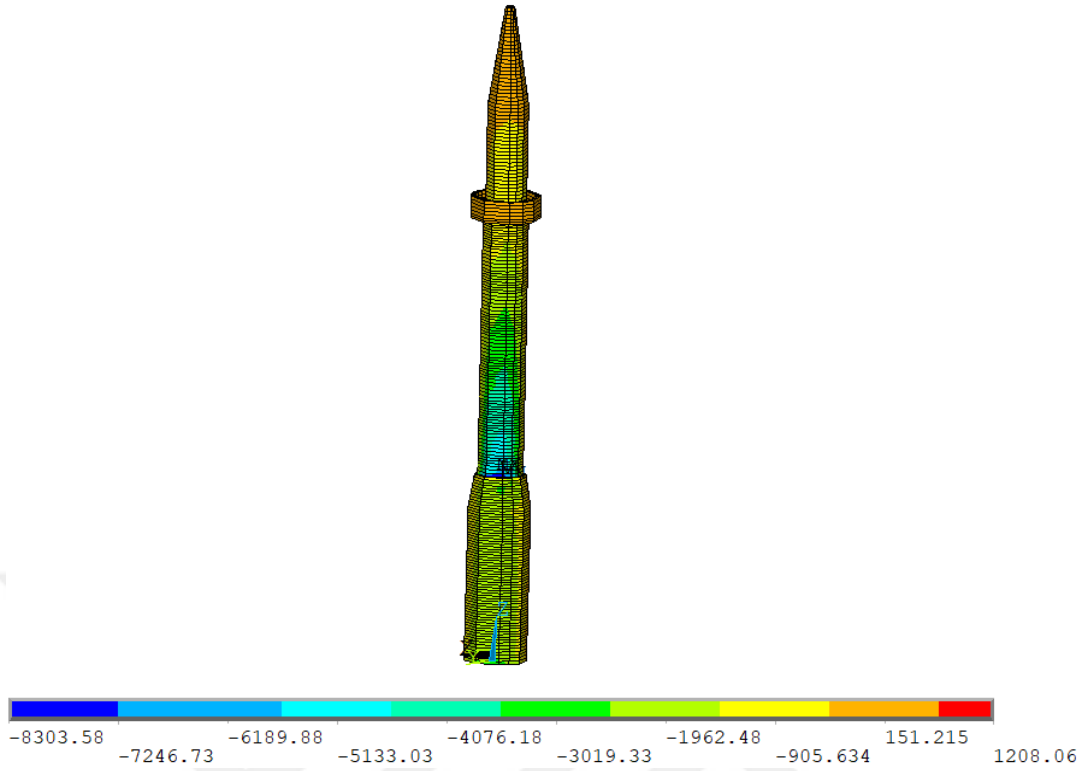
Tablo 5.3. 2003 Bingöl depremi için seçili noktadaki x ve y doğrultularındaki yerdeğiştirme değerleri

	Yeri	Yüksekliği (m)	x doğrultusundaki yerdeğiştirme (cm)	y doğrultusundaki yerdeğiştirme (cm)
	1	0	0	0
	2	7	0.38	0.46
	3	8.5	0.53	0.64
	4	20.5	3.24	4.33
	5	25.5	5.49	7.27
	6	30	7.32	9.90

Bingöl depremi ivme kaydı altında zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu elde edilen maksimum ve minimum gerilme diyagramları sırasıyla Şekil 5.13 ve 5.14’de verilmiştir. Yapılan dinamik analizler sonucunda minarede meydana gelen maksimum asal gerilme 8158.57 kPa, minimum asal gerilme ise 8303.58 kPa olarak elde edilmiştir. Analizler sonucu elde edilen gerilme değerleri minarede kullanıldığı düşünülen taşın basınç dayanımının altında elde edilirken çekme dayanımının ise üstünde bulunmuştur.

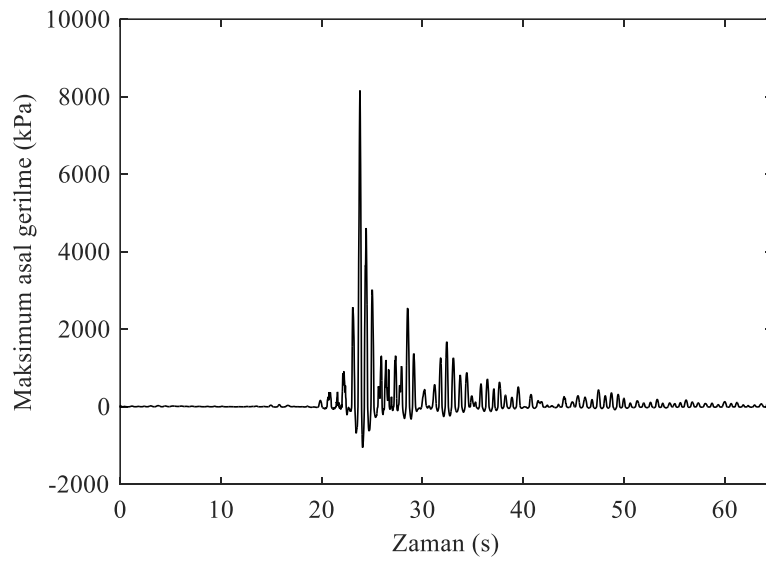


Şekil 5.13. 2003 Bingöl depremi için maksimum asal gerilme (kPa)



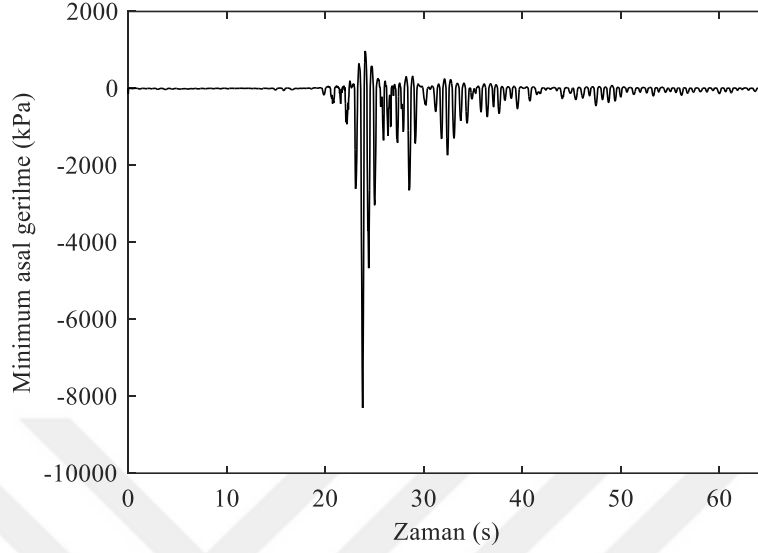
Şekil 5.14. 2003 Bingöl depremi için minimum asal gerilme (kPa)

Çekme ve basınç gerilmelerinin eleman kesitlerinin değiştiği minarenin küp ile gövdesinin birleşim bölgesinde en yüksek değerlerine ulaştığını söylemek mümkündür. Maksimum asal gerilmenin elde edildiği minarenin küp ile gövdesinin birleştiği bölgede bulunan 9765 nolu düğüm noktasının zamana bağlı değişimi Şekil 5.15’de gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Maksimum asal gerilme diyagramının zamana bağlı değişimi

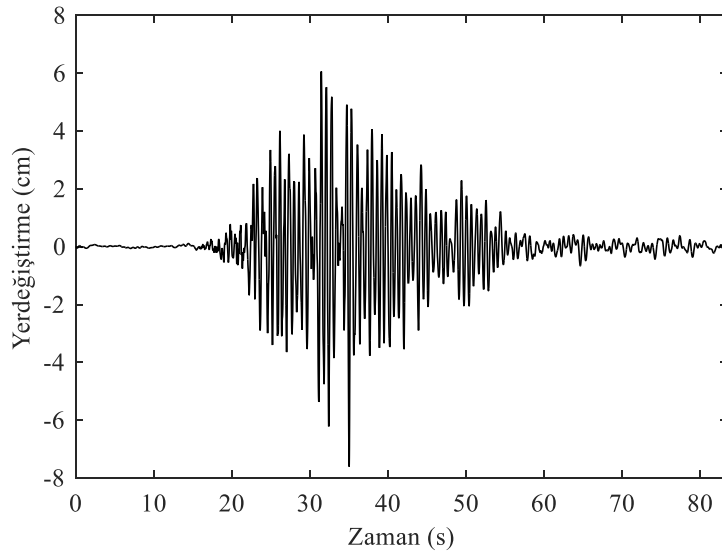
Minimum asal gerilmenin elde edildiği minarenin küp ile gövdesinin birleştiği bölgede bulunan 9719 nolu düğüm noktasının zamana bağlı değişimi ise Şekil 5.16’da verilmiştir.



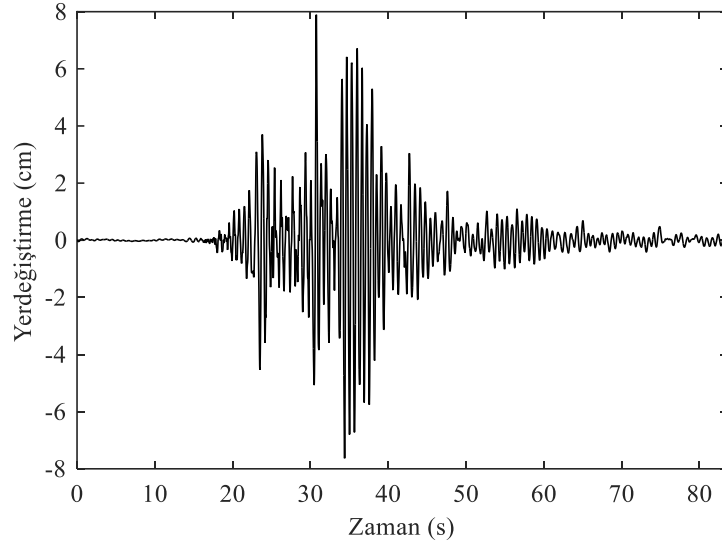
Şekil 5.16. Minimum asal gerilme diyagramının zamana bağlı değişimi

5.6. 2011 Van Depremi için Dinamik Analiz Sonuçları

2011 Van depreminin ivme kaydı kullanılarak zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde minare kulehi üzerinde işaretlenmiş 7434 nolu düğüm noktası için x ve y doğrultularında elde edilen yerdeğiştirme grafikleri Şekil 5.17’de verilmiştir. Şekil 5.17 incelendiğinde minarenin x ve y doğrultularında elde edilen mutlak maksimum yerdeğiştirme değerleri sırasıyla 7.60 cm ve 7.89 cm olarak elde edilmiştir.



a. x doğrultusu

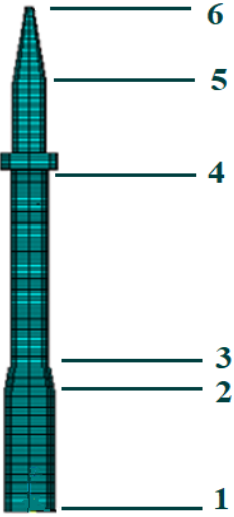


b. y doğrultusu

Şekil 5.17. 2011 Van depremi için 7434 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiği (devam)

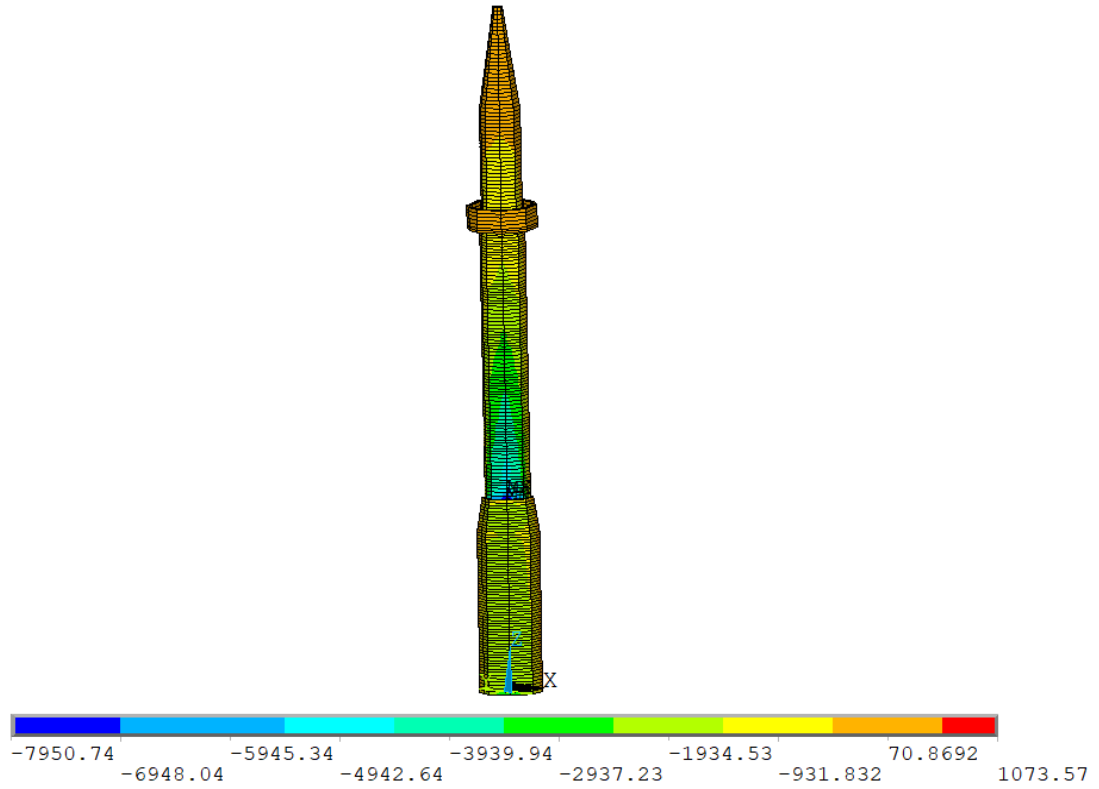
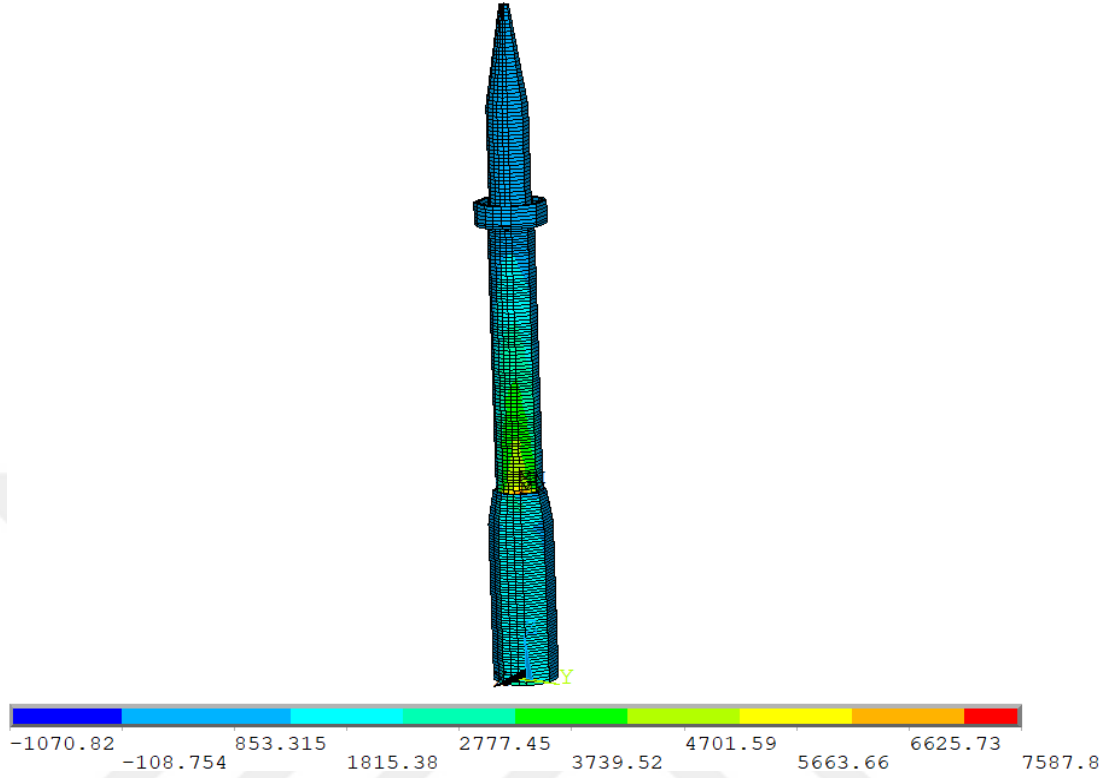
Minare üzerinde işaretli noktalar dikkate alınarak 2011 Van depremi altında zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde elde edilen x ve y doğrultularındaki mutlak maksimum yerdeğiştirme değerleri Tablo 5.4’de verilmiştir.

Tablo 5.4. 2011 Van depremi için seçili noktadaki x ve y doğrultularındaki yerdeğiştirme değerleri

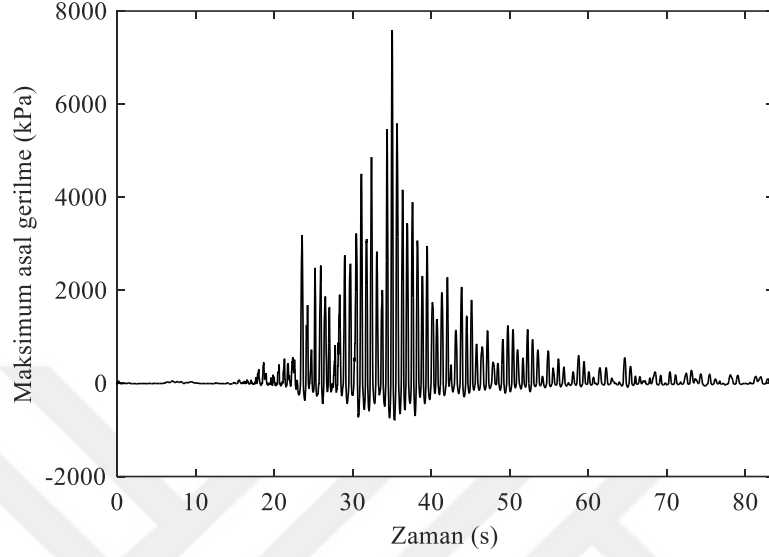
	Yeri	Yüksekliği (m)	x doğrultusundaki yerdeğiştirme (cm)	y doğrultusundaki yerdeğiştirme (cm)
	1	0	0	0
	2	7	0.34	0.37
	3	8.5	0.49	0.52
	4	20.5	3.43	3.40
	5	25.5	5.73	5.79
	6	30	7.60	7.90

Van depremi ivme kaydı kullanılarak zaman tanım alanında yapılan dinamik analizler sonucu elde edilen maksimum ve minimum gerilme diyagramları ise sırasıyla Şekil 5.18 ve 5.19’da sunulmuştur. Yapılan dinamik analizler sonucunda minarede meydana gelen maksimum asal gerilme 7587.80 kPa, minimum asal gerilme ise 7950.74 kPa’dır. Analizler sonucu elde edilen gerilme değerleri minarede kullanıldığı düşünülen taşın basınç dayanımının altında kalırken çekme dayanımının ise üstünde bulunmuştur.

Çekme ve basınç gerilmelerinin yığma minarenin küp ile gövdesinin birleşim bölgesinde en yüksek değerlerine ulaştığını söylemek mümkündür.

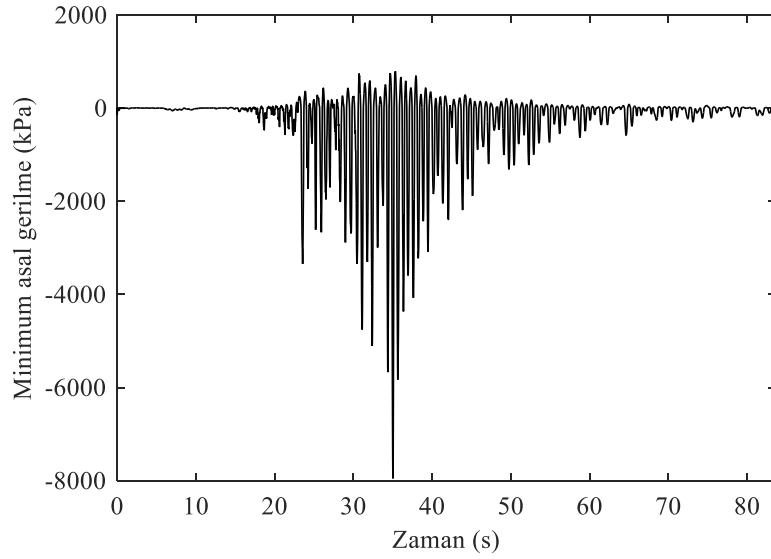


Maksimum asal gerilme eleman kesitlerinin değiştiği minarenin k p ile gövdesinin birleştiği bölgede bulunan 11059 nolu düğüm noktasında elde edilmiştir. Bu noktanın zamana bağlı değişim grafiği şekil 5.20’de verilmiştir.



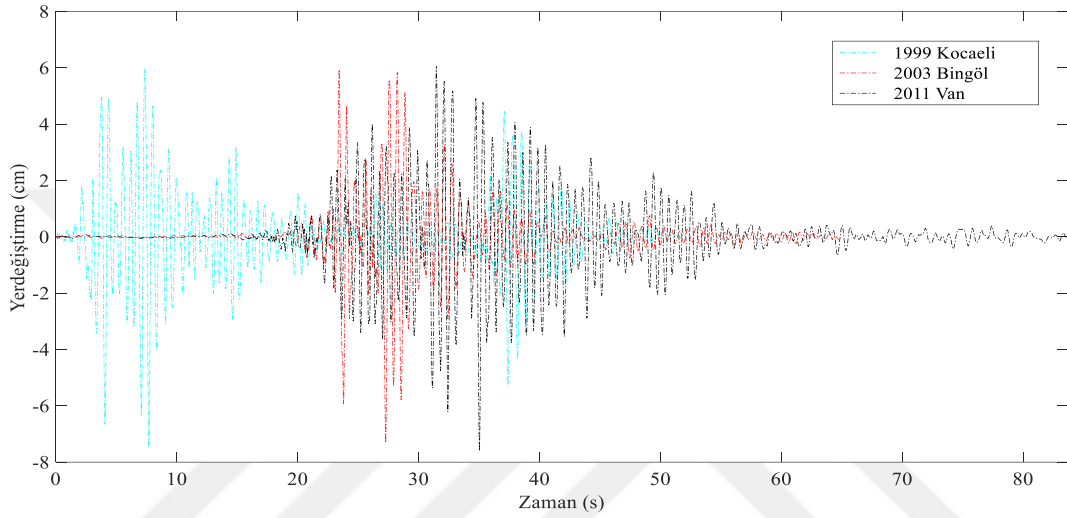
şekil 5.20. Maksimum asal gerilme diyagramının zamana bağlı değişimi

Minimum asal gerilmenin elde edildiği minarenin k p ile gövdesinin birleştiği bölgede bulunan 9796 nolu düğüm noktası için zamana bağlı değişim grafiği ise şekil 5.21’de sunulmuştur.



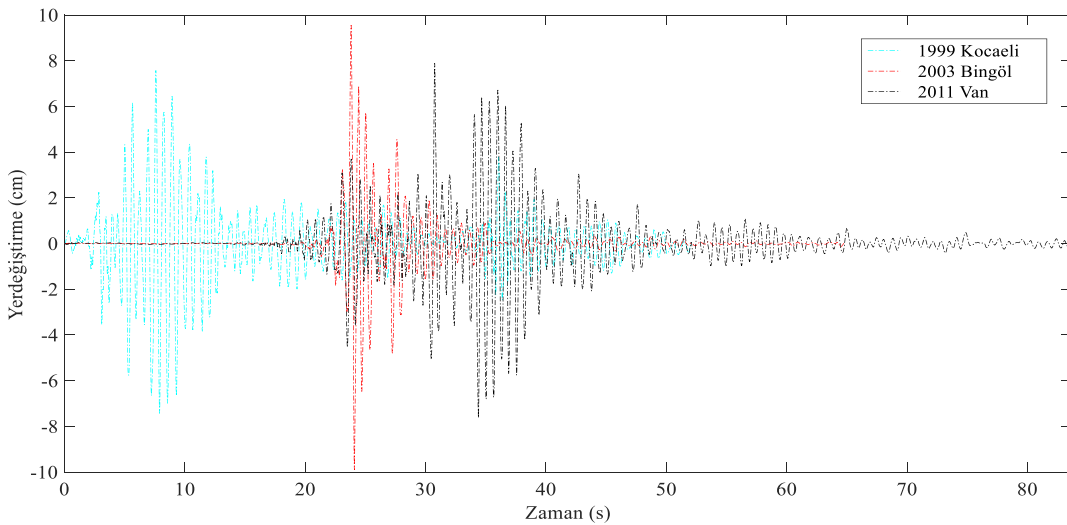
şekil 5.21. Minimum asal gerilme diyagramının zamana bağlı değişimi

Bu çalışmada modellenen yığma minare için zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde minare külâhının tepe noktasında bulunan 7434 nolu düğüm noktasının analizlerde kullanılan tüm deprem ivmeleri için x ve y doğrultusundaki yerdeğiştirme grafikleri toplu halde Şekil 5.22 ve Şekil 5.23 de sunulmuştur. Şekiller incelendiğinde minarenin x doğrultusunda elde edilen en büyük mutlak maksimum yerdeğiştirme değeri 7.60 cm olarak 2011 Van depremi ivme kayıtlarından elde edilmiştir. Kocaeli ve Bingöl depremi ivme kayıtlarından x doğrultusunda elde edilen mutlak maksimum yer değıştirme değeri ise sırasıyla 7.48 cm ve 7.32 cm dir.



Şekil 5.22. Tüm deprem ivmeleri için 7434 nolu düğüm noktasının x doğrultusundaki yer değıştirme grafiğı

Minarenin y doğrultusunda elde edilen en büyük mutlak maksimum yerdeğıştirme değeri ise 9.90 cm olarak 2003 Bingöl depremi ivme kayıtlarından elde edilmiştir. Kocaeli ve Van depremi ivme kayıtlarından y doğrultusu için elde edilen mutlak maksimum yer değıştirme değeri ise sırasıyla 7.58 cm ve 7.89 cm dir.



Şekil 5.23. Tüm deprem ivmeleri için 7434 nolu düğüm noktasının y doğrultusundaki yer değıştirme grafiğı

Dinamik analizler sonucunda minarede meydana gelen çekme ve basınç gerilmelerinin maksimum ve minimum değerleri toplu halde Tablo 5.5’de sunulmuştur. Tablo 5.5 incelendiğinde analizde kullanılan üç deprem ivmesi için en büyük gerilme değerleri 2003 Bingöl depremi ivme kaydı altında bulunmuştur. Analizler sonucu tüm deprem ivmeleri için elde edilen gerilme değerleri minarede kullanıldığı düşünülen taşın basınç dayanımının altında bulunurken çekme dayanımının ise üstünde bulunmuştur.

Tablo 5.5. Dinamik analizlerden elde edilen maksimum ve minimum gerilme değerleri

Deprem ivmeleri	Maksimum asal gerilme (kPa)	Minimum asal gerilme (kPa)
1999 Kocaeli	6619.06	6753.57
2003 Bingöl	8158.57	8303.58
2011 Van	7587.80	7950.74

Dinamik analizleri yapılan her üç deprem kaydı için elde edilen maksimum ve minimum gerilme değerleri minarenin küp ile gövdesinin birleşim bölgesinde (geçiş bölgesinde) elde edilmiştir. Geçmiş deprem tecrübelerine bakıldığında minarelerin özellikle bahsedilen bölgeden yoğun hasar gördüğünü görmek mümkündür.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yığma malzeme kullanılarak inşa edildiği düşünülen tarihi yığma bir minarenin dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Minarenin Elazığ il merkezinde olduğu varsayılmış ve üç boyutlu sonlu eleman modeli ANSYS sonlu elemanlar programı ile makro modelleme yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Modal analiz ile minarenin doğal titreşim frekansları, periyot ve mod şekilleri tespit edilmiştir. Minaredeki sönümün Rayleigh tipi bir sönüm olduğu düşünülerek sönüm katsayıları elde edilmiştir. Dinamik analizler için üç farklı deprem ivme kaydı (1999 Kocaeli, 2003 Bingöl ve 2011 Van) kullanılmıştır. Deprem ivmeleri minarenin bulunduğu konum dikkate alınarak 2018 Deprem yönetmeliğindeki yatay elastik tasarım spektrumuna göre ölçeklendirilmiştir. Bu analizlerde sönüm oranı %5 olarak dikkate alınmıştır. Analizler sonucunda minarede oluşan yer değiştirme ve gerilme değerleri incelenmiştir.

Minarenin kendi ağırlığı altında yapılan statik analizi sonucunda maksimum çekme gerilmesi 210.92 kPa, minimum basınç gerilmesi ise 638.79 kPa olarak elde edilmiştir. Dinamik analizler sonunda maksimum ve minimum asal gerilme değerleri Bingöl deprem ivme kaydından elde edilmiştir. Analizler sonucu tüm deprem ivmeleri için elde edilen gerilme değerleri minarede kullanıldığı düşünülen taşın basınç dayanımının altında kalırken çekme dayanımının ise üstünde bulunmuştur. X ve y doğrultularındaki mutlak maksimum yer değiştirme değerleri ise sırasıyla Van ve Bingöl deprem kaydında bulunmuştur. 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 eksikliğinin azaltılmasına yarar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Acar, R., (2009) Anıtsal Kule Türü Yapıların Deprem Davranışlarının İncelenmesi ve Alternatif Sistemlerin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Alamehmet, A. (2019). Bursa Ulucami Doğu Minaresinin Davranışının Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analizler İle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Altıok, T. Y., (2019). Tarihi Minarelerin Dinamik Özelliklerinin Deneysel ve Numerik Yöntemler ile Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi.
- ANSYS, (2015). Finite Element Software, Swanson Analysis System. Inc., Houston, TX, USA.
- Başar, M.E., (1988) Konya Selçuklu Minarelerinde Restorasyon Denemeleri, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi
- Baştürk, M., (2013). Bursa Tarihi Yığılma Minarelerinin Dinamik Davranışlarının Modal Analiz Yöntemi İle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bektaşoğlu, M. ve Yıldırım, H., 2006, T.C. Başbakanlık Diyanet İşleri Başkanlığı, <http://www.diyaret.gov.tr/turkish/default.asp>, Kubbe ve Minarelerin Vazgeçilmez Unsuru Alemler, 4 Nisan 2006.
- Böke, H., Akkurt, S., ve İpekoğlu, B., (2004). Tarihi Yapılarda Kullanılan Horasan Harcı ve Sıvaların Özellikleri, Yapı Dergisi, 69, 90-95.
- Calp, C., (2018). Tarihi Minarelerin Dinamik Özellikleri Ve Deprem Performansları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Canbaz, M., Karanfil, H., Topçu, İ.B. 2005. Horasan harç ve betonunun özellikleri. Yapı mekaniği semineri , Temmuz 2005, Eskişehir.
- Çalık, İ., (2017). Tarihi Camii ve Minarelerin Deneysel Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi ve Restorasyon Etkilerinin Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çalık, İ., Bayraktar, A., Türker, T., (2017). Tarihi Yığılma Taş Minareler İçin Deneysel Yöntemlere Dayalı Basitleştirilmiş Doğal Frekans Formülleri, Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu, Trabzon, pp. 523-532.
- Çarhoğlu, A.I., Usta, P., Korkmaz, K.A., (2013). Ayasofya Örneğinde Tarihi Minare Yapılarının Sismik Davranışlarının İncelenmesi, International Technologic Science, Vol.5, No 1, pp. 36-43.
- Çelik, L., (2019). Yivli Minarenin Depreme Karşı Dayanıklılığının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Dabanlı, Ö., (2008). Tarihi Yığılma Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Denghanian, K., (2015). Modern Betonarme Minareler için Ölçekli Gerçek Deprem Kayıtlarının ve Türk Deprem Yönetmeliği (DBYBHY, 2007) Tasarım Spektrum Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Diez, E. ve Aslanapa, O., 1955, Türk sanatı, İ. Ü. Edebiyat Fakültesi Yayın no:627, Doğan Kardeş Bas., İstanbul, 166s.
- Doğangün, A., Tuluk, Ö.İ., Livaoğlu, R. ve Acar, R., 2006, Traditional Turkish Minarets on the Basis of Architectural and Engineering Concepts, Proceedings of the First International Conference on Restoration of Heritage Masonry Structures, Kahire, Mısır, 24-27 Nisan
- Döven, M.S., Serhatoglu, C., Kaplan, O., (2018). Kütahya Yeşil Minarenin Kapalı ve Açık Şerefeli Dinamik Davranışlarının Karşılaştırılması, 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı Özel Sayısı, Eskişehir, Cilt:6, pp. 192-203.
- Duman, C., (2020). Yüksekliğin ve Şerefeye Sayısının Yığılma Minarelerin Dinamik Davranışlarına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Adıyaman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Durmuş, A., 1989, Deprem Mühendisliği Ders Notları. (Yayınlanmamış)
- Eldem, N.P. (1976), Mühendislik Jeolojisi, İ.D.M.M. Akademisi Yayınları Sayı:156, Kutulmuş Matbaası.
- Eren, G., Beyen, K., 2018. Zemin Davranışı ve Mesnet Koşullarının Tarihi Yapıların Dinamik Davranışına Etkisi., Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı Özel Sayısı, Eskişehir, Cilt:6, pp. 244-252.
- Ertek, E., (2009). Osmanlı Minarelerinin Yapısal Modellenmesi ve Deprem Analizi,
- Eyice, S., (1963) İstanbul Güzel Sanatlar Akademisi Türk Sanatı Araştırma ve İncelemeleri, I. Berksoy Matbaası, İstanbul
- Gündoğan, S., Kılıç, İ., Bozdoğan, K.B., Aydın, S., Gök, S.G., (2020). Kule Tipi Yapıların Dinamik Davranışlarının Belirlenmesi: Kırklareli Hızırbey Camii Minaresi Örneği, Politeknik Dergisi, Cilt 23, Sayı 1, pp. 19-26.
- Hacıfendioglu, K., Maraş, E.E., 2016. Tarihi Yığma Minarelerinin Dokümantasyonunda ve Ortam Titreşim Testinde Fotogrametri, Experimental Techniques, vol. 40, pp. 1527-1537.
- Hutton, D.V., (2004). Fundamentals of The Finite Element Analysis, The Mc-Graw Hill Companies, London.
- Kaya, Ç., (2010). Yığma Duvarların Elastik-Plastik Hesabı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kılıç, İ., (2007). Horasan Harç ve Sıvaları. Tarihi eserlerin güçlendirilmesi ve geleceğe güvenle devredilmesi sempozyumu-1 27-28-29 Eylül, 2007, Ankara.
- Koçak, A., (1999). Tarihi Yapıların Statik ve Dinamik Yükler Altında Lineer ve Non-Lineer Analizi: Küçük Ayasofya Camii Örneği, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kuşüzümü, K.H., (2010). İstanbul Minarelerinin Geleneksel Yapım Teknikleri ve Günümüzdeki Restorasyonu, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Restorasyon Anabilim Dalı, İstanbul, 237 s.
- Kutlu, M., XIV-XV. Yüzyıllara Ait Osmanlı Camilerinde Görülen Tuğla-Taş Almaşıklığı Üzerine Gözlemler, Sanat Tarihi Dergisi, Dergipark, 1 Nisan 2017
- Lourenço, P.B., (2000). Structural behavior of civil engineering structures: Highlight in historical and masonry structures, Universidade do Minho, Portugal.
- Mahrebel, H. A., (2006). Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistem Özellikleri, Hasarlar, Onarım ve Güçlendirme Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Mutlu, Ö., (2015). Bursa Ulu Camii ve Yeşil Camii'nin Dinamik Davranışlarının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Nuhoğlu, A., Şahin, S., (2005). Sanayi Bacalarının ve Minarelerin Dinamik Davranışlarının İncelenmesi, Deprem Sempozyumu, Kocaeli, pp. 433-443.
- Oğuzhanoglu, M.A., (2019). Betonarme Minarelerin Doğrusal Olmayan Modellenmesi ve Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi.
- Oğuzmert, M., (2002). Yığma Minarelerin Dinamik Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ödekan, A., 1997, "Minare" maddesi, Eczacıbaşı Sanat Ansiklopedisi, Cilt:2, İstanbul, 1259s.
- Sayın, E., (2009). Yığma Yapıların Lineer Olmayan Statik ve Dinamik Analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Serhatoğlu, C., (2015). Bursa Tarihi Minarelerinin Dinamik Davranışlarının ve Performanslarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Şen, B., (2006). Tarihi Yığma Yapıların Modelleme ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi.
- Şener, İ.N., (2004). An Innovative Methodology And Structural Analysis for Relocation of Historical Masonry Monuments A Case Study İn Hasankeyf, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Şentürk, M., Özkaynak, H., (2017). Kapıüstü Mecsidi Minaresinin Yapı Mühendisliği Açısından Değerlendirilmesi, Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu, Trabzon, s. 619-628.
- Şimşek, O., (2001). Yapı Malzemesi II, Beta Basım Yayın Dağıtım, Ankara.
- Şimşek, O., Sancak, E., Fırat, S., (2001) Kerpiç Özelliklerini İyileştirme Yönünde Bir Araştırma. Türkiye İnşaat Mühendisliği XVI. Teknik Kongre.
- Taher, M., (2018). Çağdaş Cami Mimarisinde Minarenin Formunun Karşılaştırmalı Bir Analitik Çalışma, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Mimarlık Yüksek Lisans Programı.
- Tayla, H., (2006). Sinan Minarelerinin Mimaride ve Şehircilikteki Yeri, T.C. Başbakanlık Diyanet İşleri Başkanlığı, <http://www.diyamet.gov.tr/turkish/default.asp>, 4 Nisan 2006
- Temüz, H.T., (2007). Minarelerin Rüzgar Yükleri Altında Davranışlarının İncelenmesi ve Bunların Rüzgara Göre Hesabı, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Tetik, T., (2015). Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansı ve Güçlendirme Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü.
- Ural, A., 2009, Yığma Yapıların Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon..
- URL-1, <https://www.camiminaresi.com/minareler-ve-uzerindeki-bolumlerin-isimleri/>
- URL-2, <http://www.barshanmadencilik.com/kufeki-tasi-nedir.html>
- URL-3. 2017, <https://www.makaleler.com/andezit-tasi-nedir>
- Uysal, A.O., (1990). Anadolu Selçuklularından Erken Osmanlı Dönemine Minare Biçimindeki Gelişmeleri, Ankara Üniversitesi Coğrafya Fakültesi Dergisi, Cilt 33,Sayı 1-2, 505-533.
- Ülgen, A., 1996, Klasik Devir Minareleri, Alfa Basım Yayın Dağıtım, İstanbul
- Vakıflar Genel Müdürlüğü (2017). Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu
- Yücel, E., 1966, “Minareler ve Hoparlörler Konusu”, Arkitekt, İstanbul, 28s
- Zienkiewicz, Olek. C., Taylor, Robert. L., Zhu, J. Z., (2013). The Finite Element Method, Its Basis and Fundamentals

ÖZGEÇMİŞ

Şule SEKİN ERONAT

[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]