T.C.

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÖRT AYAKLI MİNARENİN ANALİTİK MODELİ VE YAPISAL HASARLARININ İNCELENMESİ

Murat Arda UĞURLU

DOKTORA TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR

Ocak-2019

T.C. DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

DİYARBAKIR

Murat Arda UĞURLU tarafından yapılan "Dört Ayaklı Minarenin Analitik Modeli ve Yapısal Hasarlarının incelenmesi" konulu bu çalışma, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Abdulhalim KARAŞİN (Danışman)

Üye : Prof. Dr. Ahmet YAKUT

Üye : Prof. Dr. Taha TAŞKIRAN

Üye : Doç. Dr. Burak YÖN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Emine DAĞTEKİN

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 25/01/2019

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

.../...../.....

Prof. Dr. Sevtap SÜMER EKER

Enstitü Müdür V.

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmamda değerli bilgilerini, yardımlarını esirgemeyen, cesaretlendiren ve yol gösteren değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Abdulhalim KARAŞİN'e;

Bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren ve tez izleme komitemde yer alan Prof. Dr. Taha TAŞKIRAN ve Yrd. Doç. Dr. Emine DAĞTEKİN'e;

Lazer tarama çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan Mimar Salih İNAL'a;

Çalışmam süresince beni sabırla ve koşulsuz destekleyen sevgili anne, babama ve kardeşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tarihi yapıların korunması ve geleceğe güvenle aktarılması gerektiğini bütün hassasiyetiyle, bu tezin de çalışma konusu olan Dört Ayaklı Minare'nin önünde, dile getirirken öldürülen Tahir ELÇİ'ye minnetle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR…… I

İÇİNDEKİLER……..... II

ÖZET……..... IV

ABSTRACT..…….. V

ÇİZELGE LİSTESİ..……. VI

ŞEKİL LİSTESİ..…….……... VII

1. GİRİŞ....…….…….. 1

2. KAYNAK ÖZETLERİ…...…….……... 11

2.1. Yığma Yapılar ve Sayısal Analizleri.....……..... 11

2.2. Tarihi Yığma Kuleler ve Minare Modelleri....…….. 22

2.3. Dört Ayaklı Minare.....…… 40

2.4. Lazer Tarama.....…… 41

3. MATERYAL VE METOT……..…….……. 47

3.1. Tarihi Yapıların Mevcut Durumlarının Belirlenmesi.....…… 47

3.1.1. Yapının Tarihçesi, Mimari Özellikleri ve Taşıyıcı Sisteminin Belirlenmesi...…… 47

3.1.1.1 Yapının Tarihçesi ve Mimari Özellikleri ……..……...……..... 47

3.1.1.2 Yapının Taşıyıcı Sisteminin Belirlenmesi …...…….....……... 47

3.1.2. Yapısal Hasar Biçimlerinin Tanımlanması ve Bozulmaların İzlenmesi..…… 48

3.2. Tarihi Yığma Yapıların Yapı Güvenliğinin Belirlenmesi İçin Yapısal Analizleri.. 49

3.2.1. Tarihi Yapıların Yapısal Analizleri…...…… 49

- Malzeme..... 50

- Geometri..... 51

- Morfoloji..... 51

- Etki Eden Yükler..... 51

- Hasar ve Müdahaleler..... 51

- Yapı Geçmişi..... 52

3.2.2. Tarihi Yapıların Sayısal Modellemesi.....……..…… 52

3.2.2.1 Mikro Modelleme..... 54

3.2.2.2 Makro Modelleme …..... 57

3.2.3. Tarihi Yapıların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi..... 57

3.2.4. Lazer Tarama..... 64

- Nokta Bulutu..... 66

4. BULGULAR VE TARTIŞMA..... 69

4.1. Dört Ayaklı Minarenin Mevcut Durumunun Belirlenmesi..... 69

4.1.1. Dört Ayaklı Minarenin Tarihçesi, Mimari Özellikleri ve Taşıyıcı Sisteminin Belirlenmesi..... 69

4.1.1.1 Dört Ayaklı Minarenin Tarihçesi 69

4.1.1.2 Dört Ayaklı Minarenin Mimari Özellikleri..... 72

4.2. Dört Ayaklı Minarenin Analitik Modeli..... 109

4.2.1. Malzeme Modeli..... 110

4.2.2. Geometrik Modeli..... 111

4.2.3. Zemin Modeli..... 113

4.2.4 Analizler için Kullanılan Deprem Kayıtları..... 118

4.3. Dört Ayaklı Minarenin Yapısal Analiz Sonuçları..... 121

4.3.1. Sütun Davranışı..... 121

4.3.2. Kiriş Davranışı 123

4.3.3. Yapının Modlara göre Davranışı..... 126

4.3.4. Zemin Davranışı..... 128

4.3.5. Tepe Ötelenmesi..... 130

5. SONUÇ VE ÖNERİLER..... 131

6. KAYNAKLAR..... 133

ÖZGEÇMİŞ..... 141

ÖZET

DÖRT AYAKLI MİNARENİN ANALİTİK MODELİ ve YAPISAL HASARLARININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Murat Arda UĞURLU

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2018

Türkiye çok sayıda mimari ve kültürel olarak, farklı medeniyetlerden kalma tarihi yapılara ev sahipliği yapan bir ülkedir. Diyarbakır şehrinde 16. yüzyılın başlarında inşa edilen Şeyh Mutahhar Cami ile Protestan Kilisesi arasında yer alan Dört Ayaklı Minare bunun en önemli örneklerinden biridir. İsminden de anlaşıldığı üzere alt bölümünü dört bağımsız bazalt silindirin oluşturduğu minarede silindirlerin üzerinde kareye yakın büyük bir gövde bulunmaktadır. Böylesine narin bir tarihi yapının yüzyıllar boyunca küçük çatlaklar haricinde herhangi bir hasar tespit edilmemesi üzerinden, Diyarbakır'da minarenin yapıldığı dönemden beri büyük bir depremin meydana gelmediği söylenebilir. Bu çalışmanın amacı, Dört Ayaklı Minarenin yapısal hasarlarını incelemek ve detaylı bir sonlu eleman modelini ortaya çıkarmaktır. Detaylı bir sonlu eleman modeli ortaya koymak için minarenin gerçeğe en yakın ölçümlerini almak amacıyla lazer tarama yöntemiyle yapının nokta bulutu oluşturulmuştur. Zemin modelini oluşturmak için çeşitli elastik yaylar kullanılmış, sütunlar ve zemin arasındaki etkileşimi gerçekleştirerek, minarede oluşan yapısal idiopatik çatlakların sebepleri araştırılmıştır. Minareye deprem ivmeleri etkitilmiş ve minare yakınlarından geçen araç trafiğine açık yoldan kaynaklı titreşimlerin oluşturduğu negatif etki göz önüne alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dört Ayaklı Minare, tarihi miras, analitik modelleme, yay modellemesi, lazer tarama.

ABSTRACT

ANALYTICAL MODEL of THE FOUR-LEGGED MINARET and EVALUATION of ITS STRUCTURAL DAMAGES

Ph.D. THESIS

Murat Arda UĞURLU

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF DICLE

2018

Plenty of civilizations legated a lot of architecturally and culturally significant structures in Turkey. Beyond any doubt one of these is four-legged minaret of Seikh Mutahhar Mosque placed in Diyarbakır which is constructed during the Akkoyunlu period in the early 16th century. As it is evident from its name; four-legged masonry minaret formed by four independent basaltic cylindrical pillars on the lower section, and a rigid square cross sectioned body. For such a slender historical structure that has no significant structural damages except the cracks developed in recent years, it is possible to indicate that there have been no occurrences of any major earthquake in last 500 years in Diyarbakır. The purpose of this study is to determine reasons of existing idiopathic structural damages of minaret using software suites to build a macro model includes soil structure interaction between ground and pillars by means of various elastic springs. On the other hand, the ground motions applied to three-dimensional analytical model of the minaret including local material properties evaluated to discuss negative effect of vehicle vibration on the vulnerary of the four-legged minaret.

Key Words: Four-legged minaret, historical heritage, analytical model, spring model, laser scanner.

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No		Sayfa
Çizelge 4.1.	Malzeme modelinin oluşturulması için kullanılan regresyon denklemleri	111
Çizelge 4.2.	Araştırma çukurlarından alınan numunelerin zemin parametreleri	116
Çizelge 4.3.	Zemin modellerinde kullanılan yayların bölgelere göre rijitlik katsayıları	118

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No		Sayfa
Şekil 1.1.	Diyarbakır şehri tarihi kent alanı ve bu alanı çevreleyen şehir surları	1
Şekil 1.2.	Tarihi yığma kuleler	5
Şekil 1.3.	Tarihi yığma minareler	7
Şekil 2.1.	Antik Yakın Doğu'dan tarih öncesi yığma yapı örnekleri	11
Şekil 2.2.	Yığma yapılar için modelleme stratejileri	13
Şekil 2.3.	Sayısal yöntemlerle deneysel yöntemin karşılaştırılması	16
Şekil 2.4.	Arouca manastırı bacası geometrisi ve çatlak şablonları	18
Şekil 2.5.	Yığma desteğin olası hasar mekanizmaları	20
Şekil 2.6.	Olcay El-Yusufi minaresi	24
Şekil 2.7.	Düzce ve Kocaeli yer hareketleri için minarelerin boyları üzerinde yer değiştirme dağılımları	27
Şekil 2.8.	Çatlak haritası	29
Şekil 2.9.	On kule için sonlu elemanlar üst sınır limit analizleri ile elde edilen göçme mekanizmaları	34
Şekil 2.10.	Analizi yapılmış göçme mekanizmaları	37
Şekil 2.11.	Bina cephesi için lazer tarama sonrası verilerin işlenmesi	42
Şekil 2.12.	Mastio kulesinin üç boyutlu modelleri	43
Şekil 2.13.	Sonlu elemanlar ayrıklaştırma karşılaştırması	44
Şekil 2.14.	Sarnıçtan bir kolonun en kesiti	45
Şekil 3.1.	Modelleme teknikleri diyagramı	53
Şekil 3.2.	Yığma yapılar için modelleme stratejileri	54
Şekil 3.3.	Mikro modelleme için tanımlanan göçme mekanizmaları	55
Şekil 3.4.	Mikro modellemede kullanılan uzunluğu olmayan elemanların birleşim ve birim elemanlarla kullanımı	56
Şekil 3.5.	Lazer tarayıcının çalışma prensibi	65
Şekil 3.6.	Colleseum'un nokta bulutu	67
Şekil 4.1.	Dört Ayaklı Minareye ait 1900'lü yılların başında çekilmiş bir fotoğraf	71

Şekil 4.2.	Şeyh Mutahhar Cami ve Dört Ayaklı Minarenin Diyarbakır, Suriçindeki konumu	73
Şekil 4.3.	Dört Ayaklı Minarenin +1.00 kot planı	73
Şekil 4.4.	Dört Ayaklı Minarenin +4.00 kot planı	74
Şekil 4.5.	Dört Ayaklı Minarenin +17.00 kot planı	74
Şekil 4.6.	Dört Ayaklı Minarenin sütun planı	75
Şekil 4.7.	Dört Ayaklı Minarenin B-B ve C-C kesitleri	76
Şekil 4.8.	Dört Ayaklı Minarenin Güney-Doğu ve Kuzey-Doğu cephe görünümleri	77
Şekil 4.9.	Lazer taramadan elde edilen ham nokta bulutu görüntüsü	78
Şekil 4.10.	FARO marka lazer tarayıcı ve bu cihazın tarama için yerleştirildiği bazı lokasyonlar	79
Şekil 4.11.	Ham nokta bulutundan elde edilen minare kesitleri	80
Şekil 4.12.	Sütun planı	81
Şekil 4.13.	Sütun ve sütun başlıkları detayları	82
Şekil 4.14.	Dört Ayaklı Minarenin sütunları	83
Şekil 4.15.	1 nolu sütunda bulunan lateral çatlak	84
Şekil 4.16.	Sütun başlarının üzerine oturan ahşap lentoların ve bazalt kirişlerin detayı	85
Şekil 4.17.	Sütun başlarına oturan bazalt kirişler	85
Şekil 4.18.	Kirişlerde bulunan yapısal çatlakları	86
Şekil 4.19.	Yapısal çatlağı olan kirişlerden B4'e FRP bandı ile uygulanan sargı	87
Şekil 4.20.	Kirişlerle aynı seviyede bulunan ahşap lentolar	88
Şekil 4.21.	Batı cephesinin detaylı çizimi-1	89
Şekil 4.22.	Batı cephesinin detaylı çizimi-2	90
Şekil 4.23.	Batı cephesinin fotoğrafı-1	91
Şekil 4.24.	Batı cephesinin fotoğrafı-2	92
Şekil 4.25.	Güney cephesinin detaylı çizimi-1	93
Şekil 4.26.	Güney cephesinin detaylı çizimi-2	94
Şekil 4.27.	Güney cephesinin fotoğrafı-1	95
Şekil 4.28.	Güney cephesinin fotoğrafı-2	96

Şekil 4.29.	Doğu cephesinin detaylı çizimi-1	97
Şekil 4.30.	Doğu cephesinin detaylı çizimi-2	98
Şekil 4.31.	Doğu cephesinin fotoğrafı-1	99
Şekil 4.32.	Doğu cephesinin fotoğrafı-2	100
Şekil 4.33.	Kuzey cephesinin detaylı çizimi-1	101
Şekil 4.34.	Kuzey cephesinin detaylı çizimi-2	102
Şekil 4.35.	Kuzey cephesinin fotoğrafı-1	103
Şekil 4.36.	Kuzey cephesinin fotoğrafı-2	104
Şekil 4.37.	Balkon planı	105
Şekil 4.38.	Balkon bölümü, silindirik gövde, kurşun külah	106
Şekil 4.39.	Parapet duvarda bulunan kurşun kenet	107
Şekil 4.40.	Dört Ayaklı Minarenin ve Şeyh Mutahhar Caminin önceden yapılan bir çalışmada oluşturulan çizimleri	108
Şekil 4.41.	Ticari program SAP2000'de oluşturulan minarenin geometrik modeli	112
Şekil 4.42.	Trafiğin yol açtığı titreşimlerden etkilenen yığma yapı modeli, AB doğrusu boyunca, yoldan geçen araç sayısına bağlı olarak değişen, modelin düşey deplasmanları	113
Şekil 4.43.	Minare yakınlarında açılan sondaj çukurlarının lokasyonu	115
Şekil 4.44.	Sondaj kuyularından çıkan zemin yapısının derinliğe göre dağılımı	115
Şekil 4.45.	SAP2000 paket programında oluşturulan zemin modeli için rijitlik bölgeleri	117
Şekil 4.46.	Bingöl (2003) depreminin ivme bileşenleri	119
Şekil 4.47.	Van (2011) depreminin ivme bileşenleri	120
Şekil 4.48.	Bingöl (2003) depremine maruz kalan sütunların Zemin modeli 1'e göre gösterdiği tepkiler.	121
Şekil 4.49.	Bingöl (2003) depremine maruz kalan sütunların Zemin modeli 2'ye göre gösterdiği tepkiler.	122
Şekil 4.50.	Van (2011) depremine maruz kalan sütunların Zemin modeli 1'e göre gösterdiği tepkiler.	122
Şekil 4.51.	Van (2011) depremine maruz kalan sütunların Zemin modeli 2'ye göre gösterdiği tepkiler.	123
Şekil 4.52.	Bingöl (2003) depremine maruz kalan B3 ve B4 kirişlerinin ZM1 modelinde oluşan eksenel kuvvetleri.	124

Şekil 4.53.	Bingöl (2003) depremine maruz kalan B3 ve B4 kirişlerinin ZM2 modelinde oluşan eksenel kuvvetleri.	124
Şekil 4.54.	Van (2011) depremine maruz kalan B3 ve B4 kirişlerinin ZM1 modelinde oluşan eksenel kuvvetleri.	125
Şekil 4.55.	Van (2011) depremine maruz kalan B3 ve B4 kirişlerinin ZM2 modelinde oluşan eksenel kuvvetleri.	125
Şekil 4.56.	Minarenin ZM1'e göre modal davranışları ve periyotları	126
Şekil 4.57.	Minarenin ZM2'ye göre modal davranışları ve periyotları	127
Şekil 4.58.	Zati yüklere göre sütun altlarında oluşan zemin oturmaları	128
Şekil 4.59.	Bingöl Depremine göre sütun altlarında oluşan zemin oturmaları	129
Şekil 4.60.	Van Depremine göre sütun altlarında oluşan zemin oturmaları	129
Şekil 4.61.	Bingöl Depremine göre minare tepesinde x- yönünde oluşan tepe ötelenmeleri	130
Şekil 4.62.	Bingöl Depremine göre minare tepesinde y- yönünde oluşan tepe ötelenmeleri	130

1. GİRİŞ

Türkiye coğrafyasına tarih öncesi devirlerden günümüze kadar Hitit, Roma, Selçuklular ve Osmanlılar gibi birçok büyük medeniyet ev sahipliği yapmış ve kültürel miras olarak değerlendirilebilecek kendi dönemlerini ve kültürlerini simgeleyen yapılar bırakmışlardır. Bu yapıların en önemli örneklerini; camiler, kiliseler, hanlar, şehir duvarları ve kaleler teşkil etmektedir. Tarihi kent alanı büyük oranda korunan bir şehir olarak bu konuda oldukça önemli bir yere sahip olan Diyarbakır, tüm insanlığın kültür mirası olarak kabul edilen Dünya Kültür Mirası Listesinde bulunan Surlar ve Hevsel Bahçeleri başta olmak üzere, sayısız han, kilise, cami, yörenin iklimsel ve sosyal özelliklerine sahip ev, konak gibi günümüzde hala kullanılmaya devam eden pek çok tarihi yapıya ev sahipliği yapmaktadır. Şekil 1.1.'de tarihi kent alanı ve bu alanı çevreleyen Diyarbakır surlarından bir görünüm verilmiştir.



Şekil 1.1. Diyarbakır şehri tarihi kent alanı ve bu alanı çevreleyen şehir surları (Diyarbakır Belediyesi, 2015)

Diyarbakır, Güneydoğu Anadolu Bölgesinin orta kısmında, Mezopotamya'nın kuzeyindedir. Doğu'da Siirt, Batman ve Muş'la, Güney'de Mardin'le, Batı'da Şanlıurfa, Adıyaman ve Malatya'yla ve Kuzey'de ise Elazığ ve Bingöl illeri ile komşudur. Yüzölçümü 15354 km^2 olan şehrin etrafı dağlarla çevrili, ortası çukurca bir görünümdedir. Şehrin rakımı 650 m'dir.

1. GİRİŞ

Diyarbakır'ın şehir olarak ne zaman kurulduğu bilinmemektedir. Ancak Dicle nehrinin üzerinde bulunan Fiskayası olarak adlandırılan kayalığın üzerinde İç kale kesiminde ilk yerleşimlerin yapıldığı tahmin edilmektedir. Diyarbakır çevresinde ise çok eski devirlerden kalma şehirleşmeler bulunmuştur. Çayönü tepesinde 6-7 devire ait kalıntıyla beraber dünyanın en eski köyünün bulunduğu iddia edilmektedir. Diyarbakır'dan 65 km. uzakta Ergani İlçesinde bulunan antik kentte, Cilalı Taş Devrinden kalma öğütme taşları, çakmak taşı, kemik ve bakırdan yapılan çeşitli aletler bulunmuştur.

Milattan önce 3000 yıllarında bugün El cezire ve Mezopotamya denilen Dicle ve Fırat nehirleri arasına Subartu ve bu bölgeye yerleşenlere ise Subaru denmekteydi. Diyarbakır'ı da içine alan yukarı Dicle boylarının ilk ahalisi Subarulardan sayılan Hurrilerdir. Hurri krallığını ise Mitanniler, M.Ö. 16. yüzyılda ortadan kaldırmış ve Diyarbakır şehrinin de bulunduğu bölgeye hâkim olmuşlardır. Şehir, M.Ö. 1400 yıllarında Asurlular ve Babil arasında el değiştirmiş, Asurlular döneminde valilik merkezi olmuştur. Bölgeye daha sonra Medler ve Persler hâkim olmuş, M.Ö. 4. yüzyılda ise Büyük İskender, Makedonya'ya geçirmiştir. Şehir İskender'in ölümüyle Selevkoslar İmparatorluğunun hakimiyetine, Partlar bölgeyi ele geçirene kadar girmiş, Partlar ve Romalılar arasında birçok kanlı savaş yaşanmıştır. Bölgeyi ele geçiren Roma İmparatorluğu, M.S. 395 yılında parçalanınca Anadolu'nun kalanı gibi bu bölge de Doğu Roma İmparatorluğunun sınırları dahilinde kalmıştır. M.S. 639 yılında Hazret-i Ömer'in emri ile İslam Ordusu Diyarbakır'ı fethetmiştir. Emir İsa, M.S. 869 yılında vali tayin edilmiş ancak isyan edip bağımsızlığını ilan etmiştir. Şeyhiler Hanedanı olarak hüküm süren Emir İsa'nın hanedanı 30 yıl sürmüştür. Daha sonra bölgeye Hamdaniler hakim olmuş, M.S. 990 yılında ise Mervaniler ele geçirmiş ve onlar da sonradan Selçuklulara tabi olmuşlardır. M.S. 1183'te Selahaddin Eyyubi, Diyarbakır'ı alıp Artuklulara vermiştir. 1232 yılında Eyyubi Sultanı Melik Kâmil şehri ele geçirmiş ve 1240 yılında ise ondan Anadolu Selçukluları şehrin yönetimini almışlardır. Melik Kâmil 1258'de Diyarbakır'ı geri alsa da 1259 yılında İlhanlılara kaptırmış, İlhanlılar da Artukoğlularına bırakmışlardır. 1401'de Timur Diyarbakır'ı, Akkoyunlulara vermiş, İran Safevi Sultanı Şah İsmail 1507'de Akkoyunlu devletini ortadan kaldırarak şehrin hakimi olmuştur. 1515 yılında Osmanlı hükümdarı Yavuz Sultan Selim Diyarbakır'ı ve bölgeyi Osmanlı topraklarına katmış ve Osmanlı İmparatorluğu yıkılana kadar onun hakimiyetinde kalmıştır (Beysanoğlu, 1990).

Diyarbakır'da hüküm süren bütün yönetimler şehre kendi kültürlerini ve mimarilerini katmıştır. Şehrin en önemli nişanı, 2015 yılında UNESCO Dünya Mirası listesine dahil edilen Diyarbakır Surlarıdır. Dünya üzerinde Çin Seddinden sonraki en uzun duvar olan Surlar, kalkan balığı şeklindedir. Şehri savaşlarda koruma amacıyla yapılmış olan Surların, Dağ Kapı, Urfa Kapı, Mardin Kapı ve Saray (Yeni) Kapı olarak isimlendirilen dört kapısı bulunmaktadır. Kentin büyümesi ve sur dışına taşması sonucu araç ve yaya trafiğini rahatlatmak amacı ile Tek Kapı ve Çift Kapı diye isimlendirilen yeni kapılar açılmıştır.

Yaklaşık 5.5 km uzunluğunda olan Diyarbakır Surları, yüksekliği 10-12 m, kalınlığı 3-4 m olan 82 burçtan oluşmaktadır. Surlar üzerinde hüküm süren 12 farklı devlete ait kitabelere ve motiflere rastlanmaktadır.

Tarihi yapıların büyük bir bölümünü oluşturan yığma yapı sistemi günümüzde hala kullanılmaktadır. Bilinen en eski yöntemlerden biri olan bu sistem, bulunulan yere göre farklılık gösterebilen belirli ölçülerdeki blokların üst üste dizilmesi ve aralarına konulan, birimleri birbirleri ile birleştiren, çeşitli harçlar ya da kilitlerle sabitlenerek oluşturulur. Yığma yapı sistemlerinde kullanılan blokların ve harçların türünün bölgesel ve dönemsel olarak değiştiğini söylemek güç değildir. Bununla birlikte yığma yapı sistemlerinin en büyük özelliği uygulanmasının kolaylığıdır. Doğal olarak, sayısız çeşidi olan yığma yapı malzemeleri, teknikleri ve işçiliği zamanla gelişmiştir. Bu duruma etki eden esas faktörleri bölgesel kültür ve varlık, malzeme ve teçhizat bilgisi, malzemenin ulaşılabilirliği ve mimari olarak saymak mümkündür (Roca, 1998).

Kuşkusuz, Diyarbakır şehir merkezinin Sur ilçesinde yer alan ve 16. yüzyılda inşa edilen Şeyh Mutahhar Cami yakınında yer alan Dört Ayaklı Minarenin hem kültürel ve mimari eser olarak, hem de yığma yapı sistemleri için yapısal olarak tarihi miras içinde önemli bir yeri vardır. Cami, Şeyh Mutahhar'ın türbesinin bulunduğu arsa üzerinde inşa edildiği için bu ismi almıştır. Halk arasında "Şeyh Matar Cami" olarak bilinmektedir. Minaresindeki kitabesinden Caminin H. 906 (MS 1500) tarihinde Akkoyunlu Sultanı Kasım Beg zamanında yaptırıldığı anlaşılmaktadır. Bu nedenle bazı çalışmalarda "Kasım Bey Cami" ya da "Kasım Padişah Cami" denilmektedir.

Tarihsel süreç içinde farklı bölgelerde farklı medeniyetlere ait yapıların birbirlerinden etkilendikleri aşikardır. Minare ve kuleler de birbirlerine yapım tekniği

açısından benzerlikler gösterir. Tabanıyla orantılı olarak nispeten uzun olan yapılara kule denilmektedir. Bu yapılar başka bir yapıya yaslanabilir, onun parçası olabilir veya tamamen kendi kendilerine ayakta durabilirler. İsimlerine göre amacı öğrenilebilecek pek çok kule tipi vardır (gözlem kulesi, su kulesi, çan kulesi, savunma kulesi, saat kulesi). Romalılar, Bizanslar ve Orta Çağ Avrupası'nda şehir duvarlarına bağlı kapılara bitişik olarak bu kuleler inşa edilmiştir. Daha sonra şehir kuşatmaları esnasında, şehir duvarlarını aşmak için kullanılan saldırı kulelerine rastlanmaktadır. Dini olarak ise çan kuleleri olarak karşımıza çıkar ve Romanesk ve Gotik dönemde önemli örneklerine rastlanır. Sivil mimaride ise genellikle saat taşımaları için kullanılır ve bu örneklere özellikle Fransa ve Almanya'daki otellerde rastlanabilir. Tarihi kulelerin yapımına Rönesans'ta ara verilmiş olsa da 17. ve 18. Yüzyıllarda karşımıza Barok mimari ile tekrar çıkar. Tarihi kuleler genel olarak yığma taş ya da tuğladan yapılmış olup, 19. yüzyıl sonları ve 20. yüzyıl başlarında ise bu yapım malzemeleri yerini çeliğe ve betonarmeye bırakmıştır. Tarihi yığma kulelerin en belirgin ortak özelliklerinden biri üst kısımlara gidildikçe narinleşen rijit gövdeleridir. 1845 yılında Manchester, İngiltere'de yapılmış Haigh Yel Değirmeni, Şekil 1.2a'da; 1827 yılında Maryland, ABD'de yapılmış Concord Point Deniz Feneri, Şekil 1.2b'de; 13. yüzyılda, Napoli, İtalya'da yapılmış Santa Maria del Carmine Kilisesi çan kulesi Şekil 1.2c'de ve 1500 yılında Diyarbakır, Türkiye'de yapılmış Dört Ayaklı Minare Şekil 1.2d'de görülmektedir. Bu yapılar arasından, kule tipi yapılara tezat bir örnek olan Dört Ayaklı Minare, en alt kısmında bulunan narin sütunların üzerindeki rijit gövdesi ile özel bir yapıdır.



Şekil 1.2. Tarihi yığma kuleler; a) Haigh Yel Değirmeni, b) Concord Point Deniz Feneri, c) Santa Maria del Carmine Kilisesi Çan Kulesi, d) Dört Ayaklı Minare

Kule tipi yapılara önemli bir örnek olarak minareler gösterilebilir. Minareler, İslam dininde, Müslümanları namaza çağırmak için kullanılan ezanın okunması amacıyla inşa edilen kulelerdir. Ezanın daha uzaklardan duyulabilmesi için müezzine yüksek bir platform sağlar. Camilerin yanlarındaki kubbe şekilli uzun, silindirik yapılardır ve genellikle cami ile fiziksel bir bağlantıları vardır. İlk minare M.S. 673 yılında Kahire'de yapılan Amr Cami minaresidir ve Emeviler döneminde Muaviye tarafından yaptırılmıştır. Ülkemizdeki tarihi minarelerin büyük çoğunluğu Selçuklu ve Osmanlı zamanında yaptırılmıştır. Selçuklular döneminde yapılan minareler kalın gövdeli ve kısadır. Kullanılan yapı malzemesi ise genellikle tuğladır. Osmanlılarda ise taş ve tuğla örneklerine rastlamak mümkündür. Minarelerin çeşitli bölümleri vardır; kürsü, minarenin yerleştiği en alt bölümüdür; pabuç, onun üzerindeki gövdeyi kürsüye birleştiren bölümdür; gövde, şerefeden sonra gelen petekle genellikle aynı çapta olan en uzun bölümdür; şerefe, müezzinin ezan ya da sala okuduğu balkonumsu yapıdır; petek, külahın altındaki kısmın ilk şerefeye kadar olan bölümüdür; külah, minarenin en tepesinde çatı görevi görüp yapıyı yağışlardan koruyan koni biçimindeki kısımdır; alem, külahın üstünde hilal şekilli metaldir. Minareler, fiziksel bağlantıları olduğu durumlarda aynı zamanda camiyi havalandırma etkisine de sahiplerdir. Yapılış zamanlarına ve yapıldıkları bölgelere göre faklı mimari tarzlarda gözlemlemek mümkündür. Şekil 1.3a'da, 8. yüzyılda Guangzhou, Çin'de yapılmış Huisheng Cami minaresi; Şekil 1.3b'de, 1648 yılında, Agra, Hindistan'da yapılmış Taj Mahal minaresi; Şekil 1.3c'de, ayakta kalmış bilinen en eski minare olan 670 yılında Kaiouran, Tunus'ta yapılmış Kaiouran Ulu Cami minaresi ve Şekil 1.3d'de 1914 yılında Tarım, Yemen'de yapılmış Muhtar Cami minaresi görülmektedir. Yapı fizyolojisiyle akustik performansı artırmak için minareler genellikle silindirik olarak inşa edilseler dahi kare ya da dikdörtgen planlı minarelere rastlamak da mümkündür. Bununla beraber Dört Ayaklı Minarenin alt bölümünü oluşturan birbirinden bağımsız dört ayağı yapının esas özgünlüğünü sağlamaktadır.



Şekil 1.3. Tarihi yığma minareler; a) Huisheng Cami Minaresi b) Taj Mahal Minaresi, c) Kaiouran Ulu Cami Minaresi, d) Muhtar Cami Minaresi

Çalışmanın konusu; Dört Ayaklı Minarenin analitik modelini paket programlar yardımıyla oluşturarak, sonlu elemanlar yöntemiyle statik ve dinamik yükler altındaki analizlerini yaparak, yapısal davranışının incelenmesidir. Diyarbakır, Sur ilçesinde bulunan Şeyh Mutahhar Cami yakınında olan Dört Ayaklı Minare ile ilgili yapılacak bu çalışmada öncelikle yapının tarihçesi, uğradığı hasar ve deformasyonlar, taşıyıcı elemanların yük taşıma mekanizması, malzeme karakteristikleri ve mukavemetleri, zemin ve geoteknik özellikleri incelenecektir. Yapı hakkında ilgili kurumlardan gerekli bilgiler alınmış (mimari çizimler, raporlar, rölöveler) daha sonra detaylı bir geometrik model oluşturmak için yapının lazer tarama cihazı ile ölçümleri yapılmıştır. Yapıda kullanılan bazaltın mekanik özellikleri belirlenerek yapının analitik modeli paket programlar yardımıyla oluşturulup sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır.

Sonlu elemanlar modelinde yapı sonlu sayıda elemana bölünerek, değerlendirilir. Bu bölünen elemanlara malzeme modeli tayini yapıldıktan sonra yapı önce kendi ağırlığı altında analiz edilir ve sonra yapının dinamik analizleri gerçekleştirilir. Bu çalışmada da benzer yöntemler yürütülmüş ve yapılan analizler sonunda yapıda bulunan mevcut hasarların sebepleri araştırılmış, bu hasarlara neden olabilecek yapısal problemlere dikkat çekilmiştir.

Dört Ayaklı Minare cami bölümünden bağımsız ayrık bir yapıdır. Günümüzde şehirleşmenin artması sebebiyle doğan geniş yol ihtiyacı yüzünden cami avlusu içeri çekilmiş ve minare dışarıda kalmıştır. Minarenin hemen yanından geçen yolda ciddi bir trafik yükü söz konusudur.

Tarihi yapıların gelecek nesillere aktarılması, onların özgün ve yapısal bütünlüklerinin korunması ile sağlanır. Pek çok tarihi eser deprem ve benzeri doğal afetler sonucu ya da insan kaynaklı nedenlerle yok olduğunu tarih bize göstermiştir. Bununla birlikte, sadece bu felaketler bu yapıların günümüze ulaşmamasının sebepleri değildir. Yorulma ve dayanım azalması, rüzgâr ve sıcaklık yükleri, zemin oturmaları, şehirleşme, eksik yapı bilgisi de mimari miras için yüksek risk faktörleridir

Bir ülkenin, bulunduğu bölgeyi ve tarihini en kolay yolla sonraki çağlara aktarabilen kültür varlıklarının başlarında gelen geleneksel yığma yapılar, yapıldıkları dönemlerin özelliklerini, sanatını, tekniğini ve teknolojik imkanlarını geleceğe sunmaktadırlar. Bu yapılarda genellikle gözlenen en büyük problem taşıyıcı sistemlerinde

oluşan zeminlerine, temellerine, malzeme özelliklerinin bozulmasına ve hatalı restorasyon müdahalelerine bağlı hasarlardır.

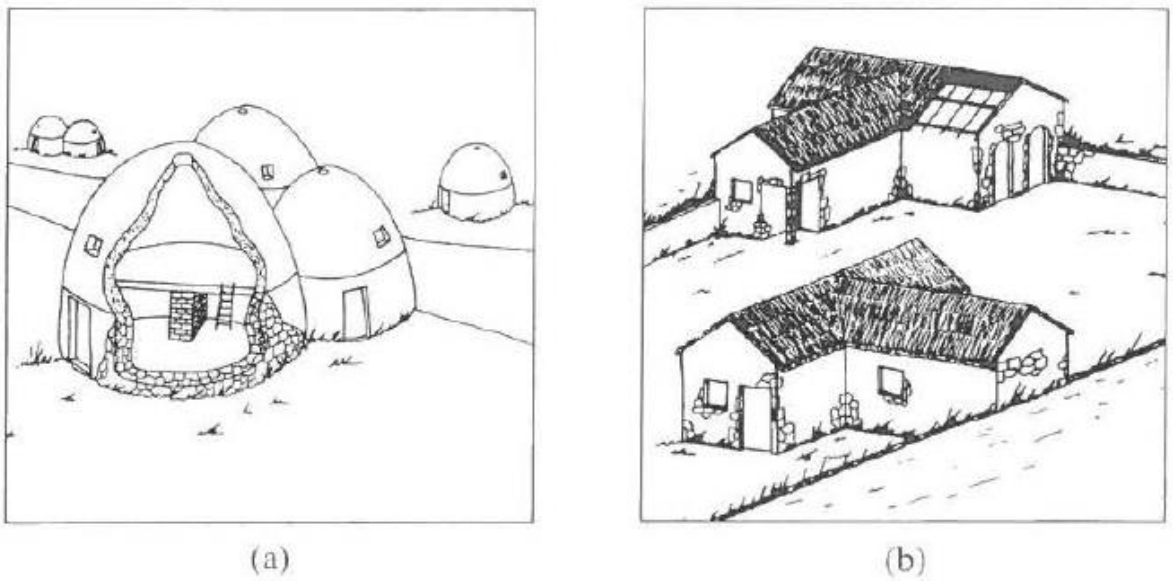
Tarihi yapılar için yapılan analitik çalışmalar, ülkemizin büyük bir bölümünün deprem kuşağında yer alması sebebiyle oldukça önem arz etse de tarihi yapıların korunmasına ilişkin çalışmalarda bir analiz yöntemi kullanılmadığı gözlemlenmektedir. Sayısal analiz yöntemlerinin eksikliği, tarihi yapılara uygulanacak restorasyon çalışmalarının başarı şansını azaltmaktadır. Sayısal analizleri yapılmamış restorasyon çalışmaları yanlış uygulamalara sebep olup yapıya kısa ve uzun vadede zarar vermektedir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Yığma Yapılar ve Sayısal Analizleri

Yaklaşık on bin yıl önce, ilk uygarlıklarla beraber, mimari tarih resmen başlamış ve yığma yapı sistemleri ortaya çıkmıştır. İnsanlığın ilkel yabani mücadelesi, dış etkilere ve saldırılara karşı korunmayı sağlamak için mağaralarda barınak aramayı, kabuk, deri ya da çalılardan nasıl çadır ve kulübe yapılacağını öğrenmeyi gerektirmekteydi. Bu yapılardan bazıları, taş, kil ya da ahşap evlerle açıklığa kavuşmuştur. Bu açıdan, insanlığın evrimi, mimari tarih ve yapım malzemeleri tarihi ile bağlantılıdır.

Kullanılan ilk yapı malzemesinin taş olması oldukça muhtemeldir. Antik Yakın Doğu'da konaklamanın evrimi, kulübelerden önce kubbesel evlere oradan dikdörtgen evlere varmıştır (Şekil 2.1a-b). Kalıcı evlerin ilk örnekleri Hullen Gölü (İsrail) yakınlarında dairesel ve yarı-yeraltı kuru duvar kulübeler olarak bulunmuştur (M.Ö. 9000-8000). Bu taşlar, basit anlamda üst üste konularak ilk yığma yapı sistemleri oluşturulmuştur. Yığma yapılar, düğümleri ve birimleri olan heterojen elemanlardır. Tuğlalar, bloklar, kesme taşlar, kerpiçler, düzensiz taşlar vb. birimlere örnek olarak gösterilebilir. Harçlara örnek olarak da kil, bitüm, çimento ve yapıştırıcı benzerleri gösterilebilir. Birimlerin dizilmesi, sonsuz sayıda geometri oluşturabileceği gibi harcın karakteristik özelliklerinin kesin olmaması da yığmayı muğlak kılmaktadır.

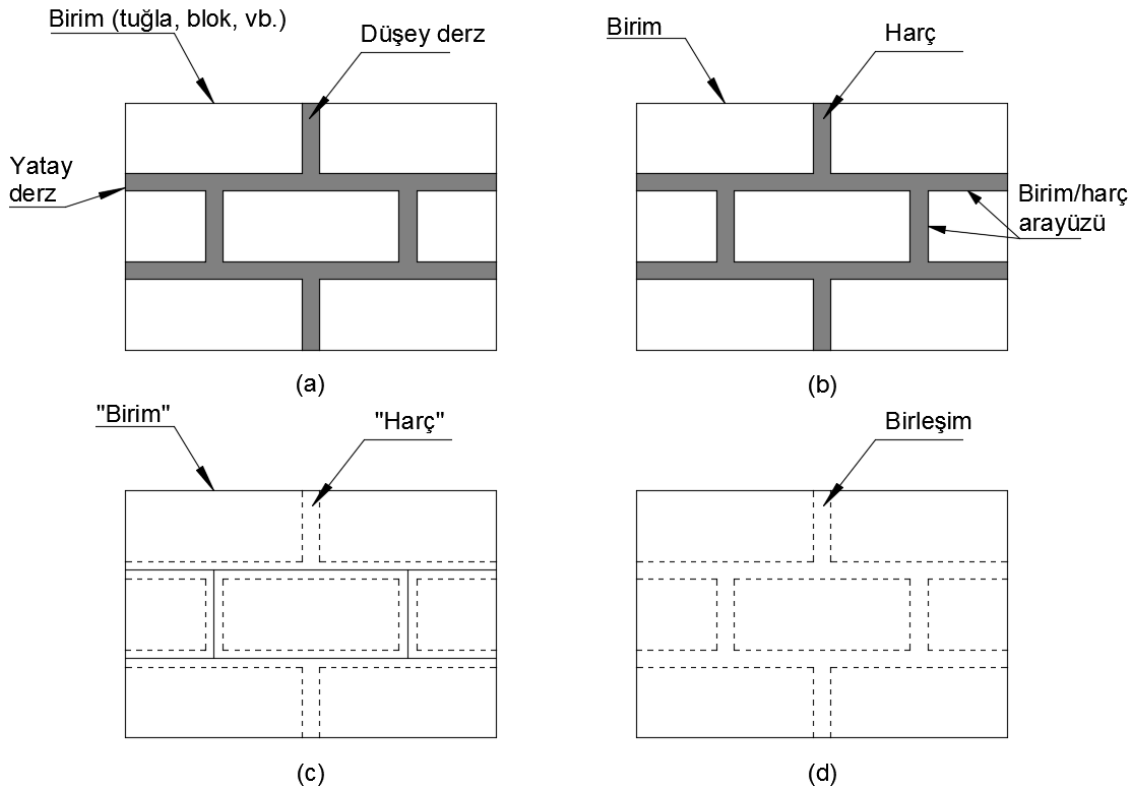


Şekil 2.1. Antik Yakın Doğu'dan tarih öncesi yığma yapı örnekleri; a) Kıbrıs'ta, bir köyde bulunan kovan evler (M.Ö. 5650), b) Irak'ta bir köyde bulunan dikdörtgensel evler (Roca, 1998).

Yığmanın dayanıksızlık düzlemi gibi davranan harç, düğüm noktalarına bağlı olarak belirli doğrusal özellikler sergileyen bir eleman olarak hareket eder. Genel olarak, sayısal gösterime yönelik yaklaşım, münferit bileşenlerin mikro modellemesine ya da bir kompozit olarak yığmanın makro modellemesine odaklanabilir. İstenen hassasiyet ve sadelik seviyelerine bağlı olarak, aşağıdaki model stratejisi türlerini kullanmak mümkündür:

- Detaylı mikro-modelleme – düğümlerdeki birimler ve harç sürekli elemanlarla tanımlanırken, birim harç etkileşimi süreksiz elemanlarla tanımlanır.
- Basitleştirilmiş mikro-modelleme – genişletilmiş birimler, sürekli elemanlarla tanımlanırken, harç düğümleri ve birim harç etkileşimi davranışları süreksiz elemanlarla tanımlanır.
- Makro-modelleme – birimler, harç ve birim harç etkileşimi sürekli elemanlarla tanımlanır (Şekil 2.2).

İlk yaklaşımda hem birimlerin hem de harcın elastisite modülü, Poisson oranı ve isteğe bağlı olarak elastik olmayan özellikleri hesaba katılır. Birim harç etkileşimi, ara yüz sürekliliğinin iç içe geçmesini önlemek için yapay rijitlikle olası bir hasar/kayma düzlemi olarak temsil edilir. Bu, birim, harç ve etkileşimlerinin birlikte hareketlerini daha detaylı inceleme fırsatı verir. İkinci yaklaşımda, harcı da içeren her düğüm ve iki birim-harç etkileşimi, geometrinin değişmeden kalması için birimler büyütülürken ortalama bir ara yüzey ile tanımlanır. Dolayısı ile yığma, düğümlerde olası hasar/kayma doğruları tarafından bağlanan elastik blok dizileri olarak kabul edilir. Üçüncü yaklaşım münferit birimler ile düğümler arasında ayrım gözetmeden yığmayı homojen bir eleman olarak kabul eder. Mikro ve makro-modellemeler farklı uygulama alanlarına hitap ettiği için mutlak doğru bir modelleme stratejisinden bahsedilemez. Mikro-modellemeler genellikle yığmanın lokal davranışlarını hesaplamada başarılı sonuçlar verir. Bu tip modellemeler özellikle sadece yapısal detaylara değil aynı zamanda, beton ve kalsiyum silikat blokları gibi modern yapı sistemlerine de uygulanır. Makro-modellemeler ise gerilmelerin bir makro-boyut boyunca temelde uniform olmalarına yeter büyüklükteki boyutlarda rijit duvarlardan oluşuyorsa uygulanırlar. Açıkça, makro-modelleme, analiz süresi ve hafıza gerekliliklerine bağlı olarak tecrübeye daha bağlı, kullanıcı dostu bir ağ metodudur. Bu tip modellemeler, hassasiyet ve verimlilik arasında bir uzlaşma gerektiği durumlarda en tercih edilirdir (Lourenço, 1995).



Şekil 2.2. Yığma yapılar için modelleme stratejileri; a) Yığma örneği, b) Detaylı mikro-modelleme, c) Basitleştirilmiş mikro-modelleme, d) Makro-modelleme (Lourenço, 1995).

Tarihi yığma yapıların analizi oldukça karmaşık bir husustur. İlk olarak, hasarsız, yerinde test yöntemleri, uygun laboratuvar deneyleri ve güvenilir sayısal araçların geliştirilmesini içeren yığmanın mekanik davranışının araştırılmasına sınırlı kaynaklar aktarılmaktadır. İkincisi ve en önemlisi, tarihi yapıların analizinin doğasında var olan bilginin kullanılmasındaki zorluklardır. Genel olarak göze çarpan hususlar şöyledir:

- Geometri verilerinin eksik olması;
- Yapı elemanlarının iç çekirdekleri hakkında bilginin yetersiz olması;
- Kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin nitelendirilmesinin zor ve pahalı olması;
- Mekanik özelliklerin işçiliğe ve doğal malzemelerin kullanımına bağlı olarak önemli ölçüde değişken olması;
- Uzun yapım periyotlarına bağlı olarak çekirdekte ve yapı elemanlarının karakterindeki önemli değişiklikler;
- Yapım sırasının bilinmemesi;
- Yapıdaki mevcut sebebi bilinmeyen hasarlar;

- Düzenlemelerin ve yönetmeliklerin uygulanabilir olmaması (Lourenço, 2002, 2004).

Lourenço ve ark. (1995), yığma yapıların mikro- ve makro-analizleri için iki model sunmuşlardır. Yığmanın mikro-modellemesi için, doğrudan gerilim kesmesi, Coulomb sürtünme yasası ve eliptik başlık içeren bir ara yüzey bozukluğu kriteri önerilmiştir. Elastik olmayan davranış, çekme dayanımı yumuşamasını, kohezyon yumuşamasını, basınç dayanımı sertleşmesi/yumuşamasını ve çekme ve kesme göçmesi arasındaki bağlantıyı içerir. Modelin, hem yığmanın bileşenlerinin lokal etkileşimini, hem de ayrıntılı bir şekilde gözlemlenen deneysel davranışı yeniden üretme kapasitesini tanımlayabildiğini göstermiştir. Makro-model için, çekme için Rankine tipi ve basınç için Hill tipi akma yüzeyini içeren anizotropik süreklilik modeli sunulmuştur. Anizotropik elastisite, hem çekmede hem basınçta, malzeme aksları boyunca tahmin edilebilen tamamen farklı bir davranışla anizotropik plastisiteyle birleştirilmiştir. Yeterli büyüklükteki yapılar için, yığmanın genel davranışı, yığma birimleri arasında lokal ilişkinin katkısı olmadan bile iyi tahmin edilebildiği gösterilmiştir. Birimler ile harç arasındaki etkileşim zayıflık düzlemi gibi davranır ve büyük bir ölçüde, elastik olmayan davranışın sorumlusudur. Detaylı bir modelleme stratejisi birimleri, harcı ve etkileşimlerini içermek zorundadır. Bununla birlikte, böyle bir modelleme stratejisi uygun olmaz ve büyük yapıların analizinde hesapsal yetersizlikler engelleyici rol oynar. Sadeleştirilmiş yaklaşımlar bu çalışmada tercih edilmiştir. Bu sadeleştirilmiş yaklaşımlar, homojen malzeme yaklaşımı altında, kalınlığı olmayan ara yüzey elemanları ile modellenen düğümleri olan bir mikro-modelleme stratejisi ve ortalama yığma gerilmeleri ve ortalama yığma şekil değiştirmeleri arasında kurulan ilişkiye sahip makro-modelleme stratejisidir. Mikro-model yaklaşımında, birimler sürekli elemanlar ile, düğümler ara yüzey elemanları ile modellenir. Makro-model yaklaşımında ise birimler ve düğümler, ortalama yığma gerilmeleri ve ortalama yığma şekil değiştirmeleri arasında kurulan ilişkideki homojen süreklilik ile tanımlanır.

Brencich ve ark. (1998), iki düğüm noktalı makro-elemana dayanan ve yığma panellerde deneysel olarak gözlemlenmiş devrilme, hasar ve sürtünme kesmesi mekanizmalarını hesaba katarak formüle edilmiş, yığma yapılar için üç boyutlu sadeleştirilmiş bir analiz yöntemi sunmuşlardır. Önceden kullanılan yöntem, sütunları, dolguları ve rijit elemanları simgeleyen ve perde duvarın kinematik parametrelerini

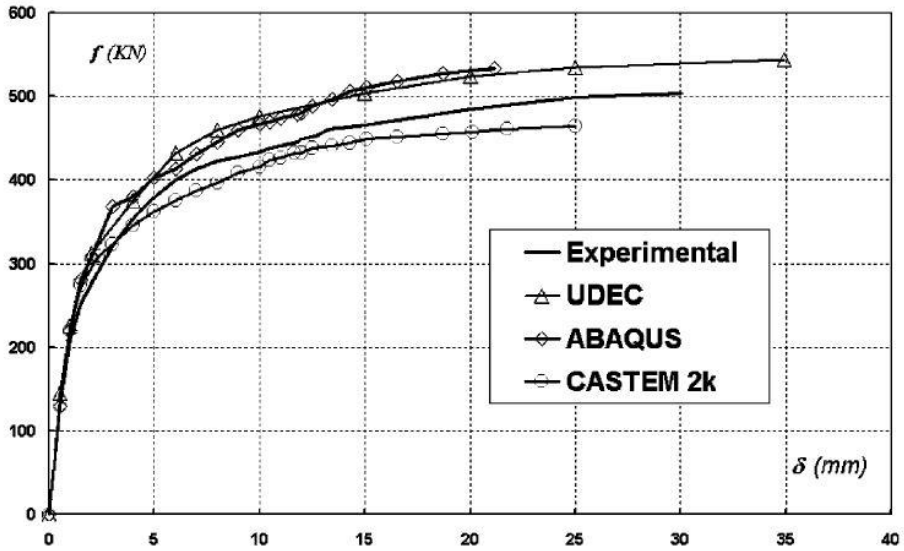
kontrol eden yer değiştirmeleri olan duvarın hasarsız parçalarını temsil eden makro-elemanlardan oluşmakta olduğunu belirtip, hem kuvvet hem de yer değiştirme kontrollü yükleme işlemlerini temsil edebilen indirgenmiş lineer olmayan bir problemi, artan-tekrarlı bir yöntemle çözüp kendisi ve zemin diyaframı arasındaki perde duvar bağlantısından elde edilen kısıtlamalardan sonra formüle etmişlerdir. Yığma yapıların yanal dayanımı ve tepe noktası sonrası histeretik davranışı hakkında bilgi, monotonik ve tekrarlı yük geçmişinden elde edilebileceği savunulmuş, son olarak da sunulan yöntemin kapasitesi bir örnekle gösterilmiştir.

Fanning ve Boothby (2001), hala servis veren yığma kemer köprülerin tam ölçekli deney sonuçlarını kullanarak, bu yapı tipinin modelini, uygun malzeme özelliklerini elde etmek için oluşturmuşlardır. Üç yığma kemer köprünün üç boyutlu lineer olmayan sonlu elemanlar modeli, ticari bir sonlu elemanlar paket programı kullanılarak oluşturulmuştur. Yığma davranışını kopyalayan katı elemanın, çatlaklar ve göçmelere göre kendi rijitliğini ayarlayabildiği belirtilmiş, dolgu, Drucker-Prager malzemesi ile modellenmiş ve yığma ile dolgu arasındaki yüzey, sürtünmeli temas yüzeyi olarak özellikleri belirlenmiştir. Köprüler, servis yükleri altında modellenmiş ve model sonuçları ile yapıların arazi testlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Kemer beşiğinin genel kalınlığı, dolgu malzemesinin yapısı ve desteklerin boyutu gibi yığma kemer yapıların değerlendirilmesinde bilinmeyen bazı faktörlerin işi zorlaştırmasına rağmen, makul bir dizi kabuller ile yığma kemer yapının üç boyutlu doğrusal olmayan modeli oluşturulabileceğini aktarmışlardır. Yapı malzemelerinin ve yapımının görsel gözlemlerine dayanarak makul bir seçimi yapılan malzeme özelliklerinin kullanıldığı üç boyutlu lineer olmayan sonlu elemanlar programı yardımıyla, yığma kemer köprülerin davranışı hakkında kesine yakın tahminler yürütülebilmekte olduğunun sonucuna varmışlardır.

D'Ayala ve Sperenza (2002), çalışmalarında depreme maruz kalmış tarihi yığma yapıların depremsel hassasiyetlerini değerlendirmeyi hedefleyen bir yöntem sunmuşlardır. Uygulanabilir göçme mekanizma ve göçme yük faktörleri ile bağlantılı hesabın belirlenmesi yoluyla yapıların göçme analizlerine bağlı yaklaşım seçilmiştir. Mekanizmalar, tek duvarların sınır koşulları ve malzeme kalitesine bağlı olarak, meydana gelme olasılıklarına bağlı olarak sıralanmışlardır; sonuçlar, daha sonra, bir hassasiyet ölçümü belirlemek için ayarlanmıştır. Elektronik formu ve veri tabanı ara yüzü olan bir

bilgisayar programı, daha geniş bir olası göçme mekanizması yelpazesini ve ortogonal duvarlar arasındaki sürekliliğin yaklaşık modelini içerecek şekilde geliştirilmiştir. Yöntemin kapasitesi, İtalya'da, Marş bölgesinin tarihi merkezlerinde bulunan bir grup yapıya uygulanarak tartışılmıştır.

Giordano ve ark. (2002), çalışmalarında, yığma yapıların analizi için farklı sayısal tekniklerin uygulanabilirliğini araştırmış, tam ölçekli yığma numunesinden elde edilen deneysel verileri, hesaplanmış sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Üç yaklaşım hesaba katılıp, tek türe indirgenmiş malzeme kavramı ve yayılı çatlak kanununa dayanan, standart sonlu elemanlar modelleme stratejisi, ticari program ABAQUS'de kullanılmıştır. Visual CASTEM 2000 paket programı, yatay ve düşey harç birleşimlerini simüle eden, süreksiz elemanlarla oluşturulan sonlu elemanlar yönteminin uygulanması için kullanılmıştır. Son olarak, ITASCA grubuna ait UDEC paket programı, ayrık eleman modellemesi için kullanılmıştır. Kendi teorik bakış açılarından kısa bir tanım ile beraber, bu sayısal yöntemlerin genel bir açıklaması ile kolaylıkla karşılaştırılabileceği iddiasında bulunmuşlardır. Ayrıca, genellikle karar verilmesi zor olan kullanıma hazır girdi parametresi değerleri, kapsamlı hassasiyet analizleri ve deneysel sağlamaya dayanarak seçilmesi önerilmiştir. Bazı değerlerin, monoton artan yükler altında yığma yapının modellemesinde makul sonuçlar verdiği ispatlanmıştır ve bu nedenle pratikte uygulama yapılmasının faydalı olduğu belirtilmiştir. Yukarıda anlatılan deneysel ve farklı sayısal yöntemlerle elde edilen sonuçlar Şekil 2.3'de karşılaştırıldıkları haliyle gösterilmiştir.

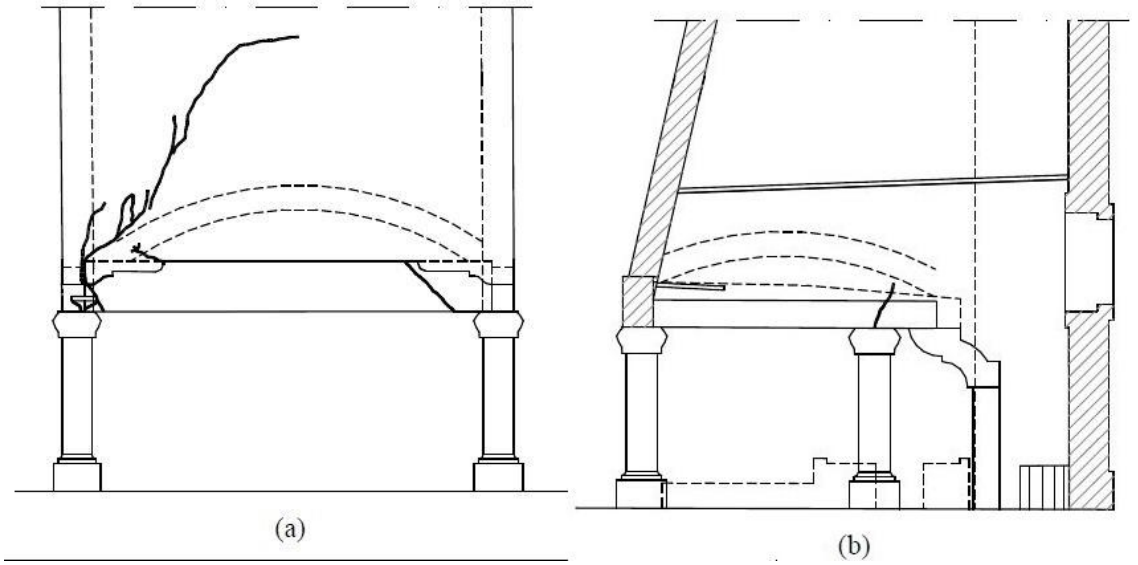


Şekil 2.3. Sayısal yöntemlerle (ABAQUS, CASTEM 2000 UDEC) deneysel yöntemin karşılaştırılması **(**Giordano ve ark., 2002).

Lourenço (2005), çalışmasında Arouca manastırının bacasındaki çatlakları incelemiştir. Baca, Şekil 2.4.'de görüleceği üzere, manastırın kalın bir duvarına yaslanan üç yığma tuğla duvardan yapılmış, yukarıya gidildikçe incelen ve granit taştan yapılma üç adet lentosu olan bir yapıdır. Lentolar, taş kolonlar ve bindirmelerle desteklenip, sıvanın kapattığı 0.25 m kalınlığında iç tuğla kemerleri olduğu ve bu kemerlerin esas amacının, taş lentolara gelen eğilme/bağlama yüklerini, duvarlardan gelen bir kısım yükü doğrudan kolonlara aktararak azaltmak olduğu belirtilmiştir.

Bacada gözlemlenen ana hasarın, ana lentoda bulunan sağ desteğe yakın diyagonal çatlaktan oluşmakta olduğu ve yapının geçici olarak desteklenmesine mahal verdiği, sol desteğinde de çatlaklar görünmekte olan ana lentonun, bunun haricinde, üzerindeki yığma duvarda da bir takım diyagonal çatlaklar olduğu görsel gözlemlerle teyit edilmiştir. Duvarın sıvasında aralanan gözlem açıklıklarında, çatlakların gizli kemerlerle çakışmadığı ancak kemer sırtlarında olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.4a). Bu tip çatlaklar çok önemlidir ve sağ destekte mafsal oluşmasıyla duvarın dönmesini kapsayan hasar mekanizmasıyla, sol desteğin göçme öncesi durumunu göstermekte olduğu belirtilmiştir. Şekil 2.4b'de görülebilecek, sol lento ve duvarda da bindirme bölgesinde, taş lentonun uzunluğunun azalmasına bağlı oluşmuş eski bir çatlak sebebiyle iki sütun kolon, lentoda bulunan çatlakların altına, bilinmeyen bir tarihte eklendiği ifade edilmiştir.

Kemer ve kemer-lentolar arasındaki boşluğu dolduran malzemenin ayrık olmadığını hesaba katıp olağanüstü durumları simüle eden bacanın iki farklı üç boyutlu modeli teşhis ve güvenlik değerlendirmelerini tamamlamak için yapılmıştır. Duvarlarda kemer hareketine ilişkin iki farklı olağanüstü olasılık durumu değerlendirilmiştir.



Şekil 2.4. Arouca manastırı bacası geometrisi ve çatlak şablonları a) Ana duvar, b) Duvarın sol tarafı (Lourenço, 2005).

Clemente ve ark. (2006), büyük yapıların analizi için malzemenin mekanik olarak bozulmasını simüle edebilen ve belirli yük koşulları altında potansiyel hasarını tahmin edebilen bir model sunmuşlardır. Model, lokal bir çatlak izleme algoritması yardımıyla elde edilmiş, her bir çatlağı ayrı ayrı simüle edecek şekilde geliştirilmiş yayılı-çatlak hasar modeli baz alınarak oluşturulmuştur. Model, yer çekimi ve depremsel yükler etkisindeki Mallorca Katedrali'nin tepkilerini analiz etmek için kullanılmıştır. Yayılı çatlak yaklaşımı ile karşılaştırıldığında, izleme yönteminin, gerçekçi göçme mekanizmalarını daha isabetli tahmin etme kapasitesine sahip olduğu sonucuna varılmıştır; nihai durumda oluşan sonuç hasarı, gerçek plastik mafsallara benzer davranış gösteren tekil çatlaklarda lokalize olarak ortaya çıkar, hesaplanan nihai yükler çekme mukavemetinin ve diğer malzeme parametrelerinin değişmesine daha az duyarlıdır. Yayılı-çatlak hasar modeli, bir noktadaki hasar elastik temel matrisi etkileyen ve malzemenin bozunma seviyesini, bozulmamış malzemeden tamamen hasarlanmış malzemeye rijitlik olmadan belirleyen skaler bir değerle tanımlanmıştır.

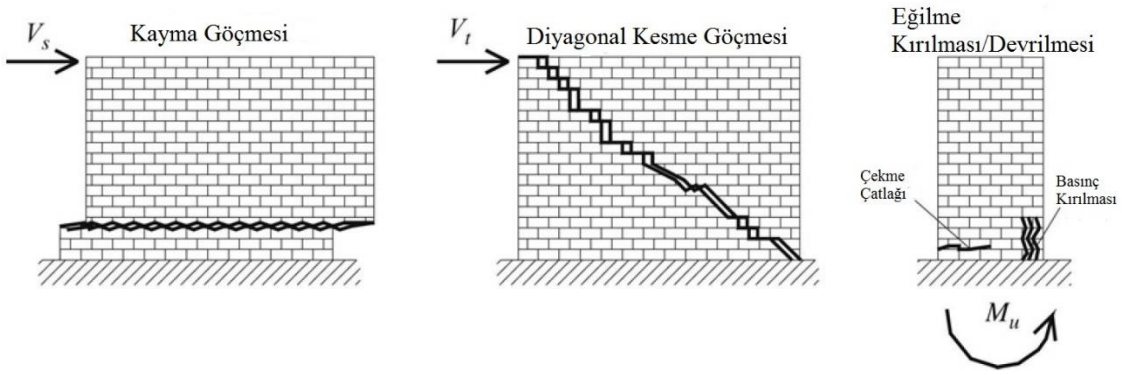
İlki ve ark. (2006), restore edip güçlendirmek kadar tarihi yapıları korumanın da oldukça kapsamlı ve disiplinler arası bir çalışma gerektirdiğini ve tarihi yapıları gelecek için koruma arzusunun da şu anki durumlarını iyi anlamaktan geçtiğini belirtmişlerdir. Tarihsel depremselliği ve yapılara olan etkilerini inceleyen araştırmalar, araştırılan alanların deprem tehlikelerini, deprem performansını ve bu yapıların yapısal eksiklerini değerlendirmek için faydalı bilgiler sağlamaktadır. Tamamı İstanbul tarihi yarımadası

içerisinde inşa edilmiş üç tarihi dini yapı, Ayasofya Müzesi, Kariye Müzesi ve Fatih Cami çalışma için seçilip, Türkiye'de, en yüksek ve ikinci depremsel aktivite riski taşıdığını Türkiye Deprem Kuşağı Haritasına göre gösteren, sırasıyla ilk ve ikinci deprem kuşağı sınırında yer aldıklarını belirtmişlerdir. Yapılan çalışmanın amacı, Kuzey Batı Anadolu'yu etkileyen dört deprem hareketini ve bu depremlere bağlı oluşan hasarı uygun referansları kullanarak araştırmaktır. Bu yapıların tarihi ile alakalı günümüzdeki bilginin, yapıların geçmiş ve/veya gelecek depremsel performanslarını tam anlamıyla değerlendirmek için yetersiz olduğu sonucuna varılmıştır.

Keypour ve ark. (2007), tarihi yapıların geometrik zorlukları, iç yapılarındaki malzeme ve yığma yapıların çekme kuvveti taşımamalarına bağlı olarak yapıdaki ölü yüklerin aktarım mekanizmalarının, yatay yüklere karşı dirençlerinin belirlenmesinin zor olduğunu belirtmiş ve çalışmalarında tarihi yığma yapıların yönetmelikler ve mühendislik prensipleri dahilinde sismik olarak güçlendirilmesinin zorunluluğunu anlatmışlardır. Bu yapıların hem ölü yük aktarım mekanizmalarını hem de yanal yüklere karşı direnimlerini daha iyi anlamanın ve kapsamlı yapısal analiz yapıp sonuçlarını yorumlamanın bu tip yapılara uygun bir müdahalede bulunabilmek için kilit rol taşıdığını belirtmişlerdir. Günümüzde, hesap yöntemlerinin gelişmesiyle, tarihi yapıların analizi içim genellikle sonlu elemanlar metodunun kullanıldığını ve bu karmaşık yapıların sonlu elemanlar modelini oluşturmak için uygun bir geometrik sadeleştirmeye gidileceği ve bilinmeyen iç çekirdekteki malzemenin doğru tahminini yapabilmek için iyi bir mühendislik tecrübesi gerektirdiğini aktarmışlardır. Bu çalışmada, tarihi yığma yapıların sismik güçlendirmeleri için tasarım ve yapım prensiplerini detaylı olarak tanımlayıp farklı elemanlar (temeller, yük taşıyan duvarlar, kemerler, kubbeler) için sismik hasar özellikleri tartışılmış ve uygun sismik güçlendirme yöntemleri önerilmiştir. Sisteme minimal temasın önemi ve yapının tüm tarihi ve mimari niteliklerini koruyacak güçlendirme yöntemini planlamanın ne denli önemli olduğu vurgulanmıştır. Detaylı bir güçlendirme yöntemi, İstanbul'da bulunan tarihi bir binanın analizi ve güçlendirilmesi için değerlendirilmiştir.

Mallardo ve ark. (2008), çalışmalarında Ferrara, İtalya'daki önemli bir Rönesans sarayı olan, Palazzo Renata di Francia'nın depremsel davranışını incelemişlerdir. Başlangıç olarak yapının performansının belirlenmesi için üç boyutlu lineer olmayan analizler yapılmış daha sonra yapının ön bölümü gerçekleştirilen üç farklı iki boyutlu lineer olmayan analizlerle detaylı şekilde karşılaştırılıp, değerlendirilmiştir. İlk model

eşdeğer çerçeve yaklaşımına bağlıyken, ikinci yaklaşımda elasto-plastik hasarlı sonlu elemanlar baz alınmış, ve üçüncü model için, homojenleştirilmiş sınırlı bir yüzey vasıtasıyla kinematik göçme analizinden faydalanılmıştır. Yapının cephesi, üç boyutlu sonlu elamanlarla analiz edilirken, düşük yoğunluklu yatay hareketlerle dahi bütün yapı düzlem dışı kısmi göçmeye maruz kalmış, iki boyutlu düzlem gerilme sonlu elemanlarla analiz edildiği sırada yeterli bir düzlem içi dayanımı göstermekte olduğu belirtilmiştir. Şekil 2.5'de bu çalışmaya ait yığma kirişlerin (buradaki durumda desteklerin) olası hasar mekanizmaları gösterilmiştir. Bütün durumlarda, elde edilen sonuçlardan, münferit duvarların düzlem dışı kısmi göçmesini önlemek için kat rijitliği ve zemin-duvar birleşimlerini güçlendirmeyi hedefleyen restorasyon planlamasının gerekliliğine üzerinde çalışılmış modellerin dikkat çektiği aktarılmıştır.



Şekil 2.5. Yığma desteğin olası hasar mekanizmaları; kayma göçmesi, diyagonal kesme çatlağı, eğilme hasarı (Mallardo ve ark., 2008).

Casolo ve Sanjust (2009), yaptıkları çalışmada, güçlü depremlere maruz kalan büyük bir yapının depremsel analizlerini gerçekleştirmişler ve Sirakuza'da (İtalya) yer alan Maniace Sarayının yer hareketlerine karşı tepkisi, lineer olmayan deprem analizleri için mekaniğe bağlı bir hesaplama modeli ile birlikte geleneksel sonlu elemanlar modelini kullanan çok seviyeli bir yaklaşımla incelemişlerdir. İlk olarak, yapının doğrusal davranışı, binanın global tepkisini, zayıf noktalarını ve karşılık gelen göçme mekanizmasının kinematik davranışını anlamak için üç boyutlu iki farklı sonlu elemanlar modeli yardımıyla çalışılmıştır. Daha sonra, bu sonuçlar, azaltılmış serbestlik dereceli yığma duvarların büyük ölçekli davranışına yakınsama amacıyla özellikle formüle edilmiş, mekaniksel iki boyutlu düzlem rijit gövde ve yay modeli, RBSM, kalibre etmek ve yığma yüzeyin ve malzemenin enerji yutma kapasitesini hesaba katmak için kullanılmıştır. Malzemenin verilen bilinmeyen ve değişken özellikleriyle, kapsamlı

parametrik lineer olmayan statik analizi ve yapay ve doğal ivme ölçerli dinamik analizi, EC8 sismik yönetmeliğine uygun olarak gerçekleştirilip, birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın aynı zamanda dikkate değer başka bir çıktısı, lineer olmayan dinamik sonuçlar ile statik itme analizi ile elde edilen sonuçların oldukça tatmin edici şekilde birbirlerine yakın olmasıdır.

D'altri ve ark (2018), çalışmalarında sonlu eleman limit analizi yaklaşımına dayanarak (FELA), eğilmiş tarihi duvar yapılarının stabilite analizlerini yapmak için, kullanımının kolay olduğunu belirttikleri bir yöntem sunmaktadırlar. Bu çalışmada önerilen yöntem, otomatik nokta bulutu işlemesini, yapısal amaçlar için gerçek geometrinin üç boyutlu mesh oluşumunu ve sadece aktif birkaç elemanı varsayarak büyük ölçüde optimizasyon değişkenlerini azaltan iki aşamalı bir FELA'yı içeren kapsamlı bir iş akışından oluşmaktadır. Bu yöntemin etkinliğini göstermek için, Caerphilly Kalesinin (Galler, İngiltere) Güney Batı eğik kulesi incelenmiş ve ciddi devrilme açılarına sahip göçme mekanizmaları FELA aracılığıyla değerlendirilmiştir.

Saba ve Meloni (2018), çalışmalarında İtalya'nın Sardunya şehrinde bulunan tarihi bir yığma binanın, iki farklı modelleme yaklaşımının karşılaştırılması için statik ve sismik analizlerini yapmışlardır. Yazarlar sonuçların karşılaştırılması için farklı modelleme yaklaşımlarına sahip iki farklı program kullanmışlardır. Tarihi yığma yapının yapısal davranışını modellemek için kullandıkları SismiCAD12, sonlu elemanlar yöntemini kullanır ve çoğu üç boyutlu yapının modellenmesine ve analizine olanak sağlamakla beraber, yığma yapılar için de uygundur. Bunun haricinde, yığma yapıların doğrusal olmayan ve sismik davranışlarını değerlendirmek için özel olarak tasarlanmış 3Muri programı kullanılarak çerçeve makro elemanlar (FME) ismi verilen inovatif bir modelleme yaklaşımının kullanıldığını belirtmişlerdir. İki farklı modelleme yaklaşımının hem niteliksel hem de niceliksel olarak çok farklı sonuçlara yol açtığını ve statik kontroller sonucu, iki algoritma arasındaki belirgin fark nedeniyle, her bir yığma elemanına etki eden düşey etkilerin farklı olduğuna dikkat çekmişlerdir. Son olarak mevcut yığma yapıların modellenmesinin oldukça karmaşık ve külfetli olduğunun sonucuna varmışlardır. Ticari paket programların, yapıların gerçek davranışına dair makul yaklaşımlar sağladığını ancak yapı hakkında yüksek düzeyde bilgi sahibi olmanın, programın kabul ettiği modelleme türlerini bilmenin ve sonuçlarını değerlendirmenin çok önemli olduğunu altını çizmişlerdir.

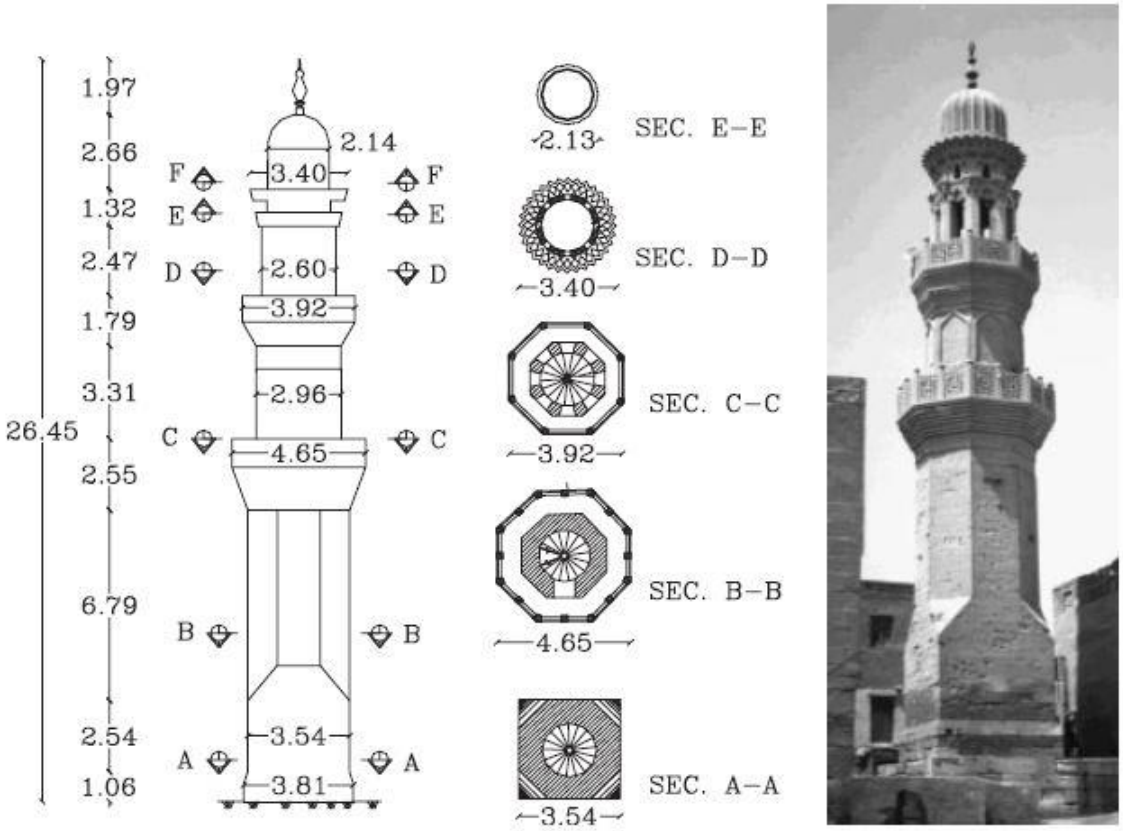
2.2. Tarihi Yığma Kule ve Minare Modelleri

Riva ve ark. (1998), şehrin sembolü olması dışında, depremsel hasara yapı düzeni olarak yatkınlığı olan Orta Çağ tarihinin miras değeri taşıyan Bologna, İtalya'daki Asinelli Kulesinin depremsel davranışını incelemişlerdir. Çalışmada, Bologna'nın depremselliği değerlendirilmiş ve kentsel bölgede sahih bir tarihi araştırmaya dayanan gözlenmiş hasar sentezi, şehirde yer alan etkilerin çerçevesi dahilinde Asinelli Kulesinin davranışının objektif değerlendirmesi ile verilmiştir. Basitleştirilmiş bir modelde yapılan lineer olmayan dinamik analizler yardımıyla niteliksel olarak, uygun depremsel olaylara göre kulenin stabilitesinin değerlendirmesi yapılmıştır. Analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Kulenin kendi ağırlığına bağlı olarak, bu noktada dolgu tuğla yığması için kabul edilen basınç akma sınırına oldukça yakın olan yapı tabanındaki maksimum basınç gerilmesi değerleri 1.5 MPa'ya eşittir.
- Geçmişte Bologna'da yaşanmış (I=7) sınırlı yoğunlukluktaki depremsel hareketlerin, kulenin genel stabilitesiyle uyuştuğu görülmemektedir.
- Düşük yoğunluklu sismik hareketlerde bile, kulede, yığma tipolojisi süreksizliğine yakın bölgelerde hasar gelişme olasılığı gözlenmiştir. Çoklu hareketlerde kümülatif olarak artması söz konusudur.
- Verilen dinamik özellikleri ile kule, depremsel hareketlerden sadece yer hareketi frekans bileşenleri 4 Hz altında ve en yüksek frekans değeri 2 Hz'in altındaysa etkilenmektedir.
- Analizler, kulede var olan yığma tipolojilerini temsil eden malzeme akma sınırlarının kabulüyle gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, bazı değerler, kabul edilenlerden düşük ya da yüksek olarak gerçek malzeme sınırlarından farklılık gösterebilir. Sonraki çalışmalarda kulenin davranışı, bu çalışmada gözlemlenenden daha kritik çıkabilir.
- Dinamik modeli oluşturmak için kabul edilen geometrik basitleştirme kriterleri yapılan analizin hatırı sayılır etkinliğinin ve gerçekçiliğinin yolunu açmıştır. Buna ek olarak, elde edilen sonuçların, kulenin yerinde gözlemleri ve Bologna'nın bölgesel depremsel geçmişi ile oldukça uyumluluk taşıdığı görülmüştür.

Bongiovanni ve ark. (2000), hasar almış yığma bir çan kulesinin dinamik davranışını analiz etmişlerdir. Yanındaki yığma binalara alt kısmından bağlı olan yapı 1996 Reggio Emilia depreminde hasarlar almıştır. Hasar mekanizmasının oluşmasında kule ve yanındaki yapının dinamik etkileşimlerinin önemli bir rol oynadığına dikkat çekilmiştir. Kule üzerinde yapılan deneysel çalışmalar şu sırayla gerçekleştirilmiştir; öncelikle yapının dinamik özelliklerinin belirlenmesi hem çevresel hem de cebri titreşim deneyleri ile ortaya çıkarılmıştır, daha sonra ivme görüntüleme sistemi ile artçı deprem etkileri ölçülmüştür. Maksimum zemin ivmesi baz alınarak sınıflandırılmış düşük değerli 67 depremi iki ayda kaydedip kulenin dinamik nitelendirmesi yapılmış ve depremsel tepki değerleri karşılaştırılmıştır. Yapının yüksek yoğunluklu depremler altında değişen dinamik özelliklerine dikkat çekilip son olarak, yapının sismik tepkisi, kaydedilen esas hareketler esnasındaki ani tepki frekansları detaylı olarak çizilerek analiz edilmiştir. Kulenin dinamik özelliklerinin belirlenmesi, yapısal özelliklerinin değerlendirilmesi ve yapının sağlıklı olup olmadığının tespiti için bir ön bilgi oluştuğu aktarılmıştır.

El-Attar ve ark. (2001), 1992 yılında Dahshur, Mısır'da meydana gelen depremde hasar almış Memlük tarzı bir minarenin (Olcay El-Yusufi, M.S. 1349) dinamik davranışını araştırmışlardır. Minarenin sonlu elemanlar tekniği ile modeli yapılmış ve farklı tipte yer hareketleri etkisi altında dinamik karakteri hesaplanmıştır. Sonuçlar, bu tip minarelerin orta ve yüksek şiddetli depremler sırasında büyük hasarlar almaya yatkın olduğunu ve depremler sırasında kütle ve rijitliğin düzensiz dağılımı sebebiyle hasar alma kapasitesine sahip olduklarını göstermiştir. Buna ek olarak, yıllanma ve çevresel etkilere bağlı olarak yapı malzemelerindeki dayanım kayıplarının da bu durumu tetiklediği belirtilmiştir. Bu minarelerin gövdelerinde bulunan en zayıf noktanın ağır başlığı taşıyan kolonlar olduğu belirlenmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Olcay El-Yusufi minaresi (El-Attar, 2005).

Higazy (2004), tarihi eserlerin, insanlığın kültürel ve sanatsal mirasının elle tutulur ögeleri olduğunu ve her ne kadar güvenlikleri ve korunmaları insanlığa dair bütün meslek disiplinlerinin toplu sorumluluğunda olsa da yapı mühendisliğinin bir adım öne çıkarak, geçmişin materyalisttik yorumunun refahını korumada ilk sırada yer aldığını belirtmişlerdir. Mısır'da, İslam sanatının ruhunu oluşturan, tarihi ve modern camilerin sanat yapılarının ana ögeleri olan minarelerin ince uzun olan doğal yapısının, konsol performansı ile, deprem esnasında minareyi en hassas kılan şey olduğunu aktarmışlardır. Bu çalışmada, farklı dönemlere ait, Kahire'nin tarihi yapılarının depremsel tepkileri incelenmiş, mimari ve yapısal düzenin etkileri, yapım malzemesi ve minare/temel ilişkisi araştırılmıştır. Son olarak, incelenen minarelerin güçlendirme önerileri, aşırı ya da yıkıcı hasar riskini azaltmayı hedefleyen Performans Odaklı Dizayn (PBD) bakış açısıyla yeniden değerlendirilmiştir.

Menon ve ark. (2004), UNESCO'nun tehlike altındaki Dünya Mirasları Listesi'ne eklediği, dünyanın, Kutub Minar'dan sonraki en uzun (~60 m.) ve en eski (~800 yıllık) minarelerinden biri olan Afganistan'da Hindikuş bölgesinin Gor şehrinde yer alan Cam Minaresini incelemişlerdir. Cam Minaresinin yapısal durumu kritik olan tuğla yığması ile birlikte yüksek gerilmeleri tetikleyen kuzeye doğru 3.4°'lik eğimine bağlı olarak göçme tehlikesi altında bulunmasıyla, depremlere karşı oldukça hassas bir hale geldiği ifade edilmiştir. Bu çalışmada, Cam koruma alanının depremsel risk değerlendirmesinin sonuçları, hem olasılıksal tanımlama (PSHA), hem de belirleyici tanımlama (DSHA) yaklaşımları kullanılarak verilmiştir. PSHA'daki belirsizlikler, mantık-ağacı çerçevesinde çözülmüş ve uniform risk tepki spektrumu, dönüş aralığı olarak 72, 224, 475 ve 975 yıl olarak ölçülmüştür. Cam'ın depremsel risk değerlendirmesi tarafından tanımlanan deprem verisi, minarenin dinamik analizleri için kullanılmış olup parçalı kütle yaklaşımı ve üç boyutlu sonlu eleman modeli kullanılarak her iki durum için de dinamik yapı-zemin ilişkisi hesaba katılarak uygulanmıştır.

El-Attar ve ark. (2005), Mısır'da 1992 yılında yaşanan deprem sonucunda, çok sayıda, Memlukler döneminden kalma tarihi minarenin hasar aldığını belirtmişlerdir. Memluk tipi minarelerde hasar kademesi, büyük boyutlarına ve uzunlukları boyunca kütle ve rijitliklerinin düzensiz dağılmasına bağlıdır. Yapılan çalışmada Şekil 2.6.'da görülen Memluk tipi bir minarenin (Olcay El-Yusufi, M.S. 1349) depremsel hassasiyeti belirlenmiş ve bazı sismik koruma teknikleri sunulup, değerlendirilmiştir. Geometrik, malzeme ve geoteknik veriler arazide belirlenmiştir. Belirlenen bu özelliklere sahip gerçekçi üç boyutlu bir sonlu eleman modeli yapılmıştır. Çevresel titreşim deneyinin sonuçları sonradan sonlu eleman modelini güncellemek için kullanılmıştır. Minare bölgesindeki depremsel tehlike değerlendirilmiş ve orta dereceli depremler esnasında oldukça hassas olan minarelerin depremsel risk çalışması yapılmıştır. Bu değerlendirme ve risk çalışmaları neticesinde Yüksek Sönümlü Sismik İzolatör ve düşey çelik ankraj çubukları kullanımını içeren bir depremsel koruma tekniği sunulmuştur.

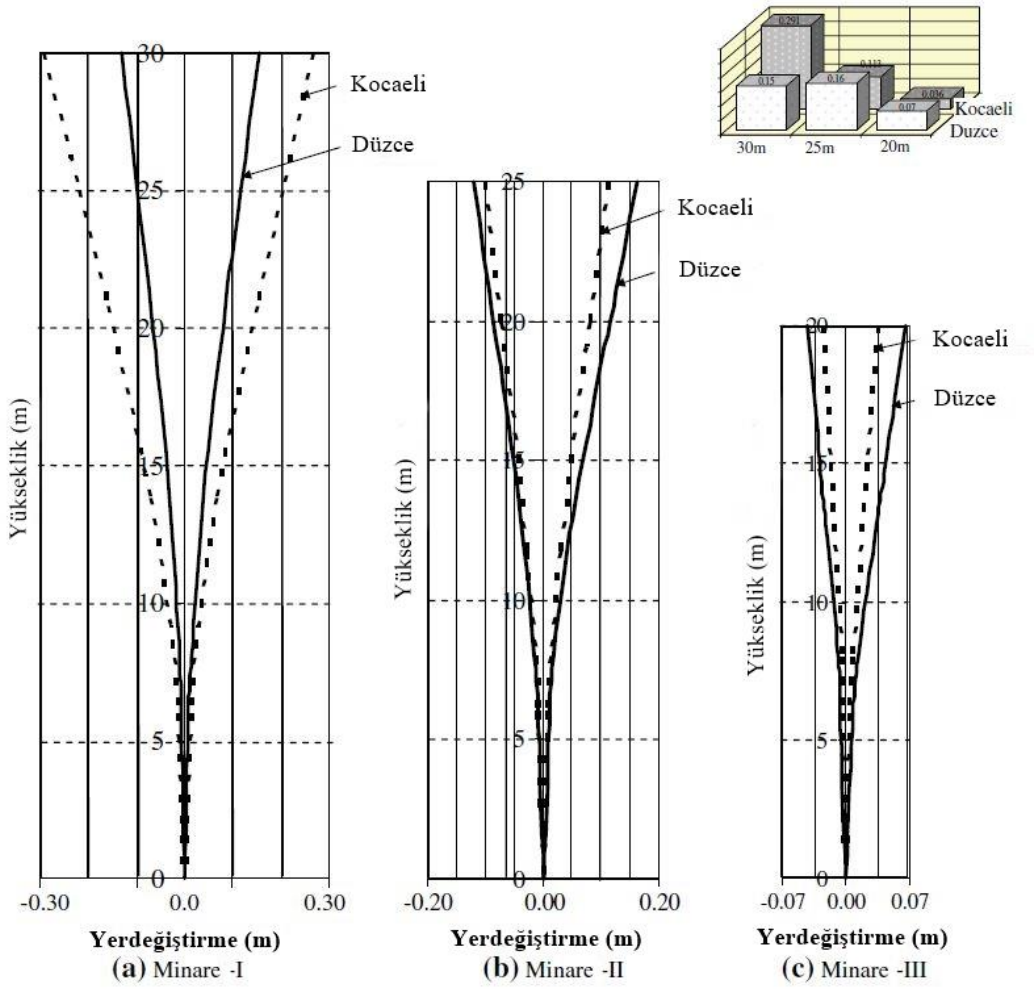
Doğangün ve ark. (2006), Türkiye'de sık sık şiddetli depremlerin meydana geldiğini ve bazı minarelerin bu yıkıcı olaylarda hasar alıp devrildiğini ve hatta pek çok insanın bu devrilen minarelerin altında kalarak hayatlarını kaybettiğini belirtmişlerdir. Öncelikle yazarlar, minarelerin depreme dayanıklı tasarımları için uygulama

yönetmeliklerine ve araştırma çalışmaları neticesinde minarelerin analizleri ve tasarımlarıyla doğrudan ilgili Türkiye'de bir standart ya da şartnamenin olmadığına dikkat çekmişlerdir. Çalışmanın ilk amacı, deprem ve rüzgar etkilerine bağlı olarak yığma minarelerin hasar tiplerini sunmaktır. İkinci ise tipik tarihi Türk yığma minarelerin depremsel analizlerini gerçekleştirmektir. Bu amaçla, öncelikle, deprem ve güçlü rüzgarlar sırasında hasar alan minarelerin fotoğrafları sunulmuş, daha sonra sismik analizlerden elde edilen bölgesel gerilme yoğunlukları ve yer değiştirme davranışı kısaca sunulup, değerlendirilmiştir.

Yığma minareler, Türkiye'de genellikle kesme taş kullanılarak yapılmaktadır. Deprem bölgelerinde yapılmış pek çok tarihi minarede sadece Horasan harcı değil aynı zamanda iyi performans gösteren çelik kenetler de kullanılmıştır. Ancak yeni inşa edilen minareler, çelik elemanlar kullanılmadan sadece zayıf harç ile inşa edildikleri için tarihi minareler kadar iyi performans gösterememektedirler. Yıkıcı depremler sırasında yığma minarelerin ciddi hasar aldıkları farklı bölgeleri vardır. Bu çalışmada yapılan tespitlerle hasarlar genellikle çokgen gövdenin, kesitin küçülmesi ve rijitliğin minarenin bu bölgesinde önemli bir düzeyde azalması sebebiyle alt kısmında gözlenmiştir. Konik başlık ve balkon seviyesinde ise hasarlara daha seyrek rastlanıldığı bildirilmiştir. Analiz sonuçları ve gözlenen hasarlar, çokgen ya da silindirik gövdenin alt kısımlarında gerilme birikmeleri oluştuğunu göstermekte olup maksimum gerilme değerinin, tahmin edilen malzeme dayanım sınırlarını geçmiş olduğu gözlenmiştir. Bununla beraber yüksek yanal yer değiştirmelerin de gözlenmesi ile birlikte örnek yığma minarenin, değerlendirilen depremler için gerekli performansı sağlayamadığı sonucuna varılmıştır. Her ne kadar, pek çok cami ve bina depreme dayanıklı yapısal sisteme sahip olsalar da yakınlarındaki minarelerin yıkılıp üzerlerine devrilmesi ile ciddi hasarlar almakta olduğu belirtilmiş, minare yükseklikleri ile ilgili bazı kısıtlamalar, örneğin minare boyunun, minarenin yakınındaki binaya uzaklığından daha az olması zorunluluğu gibi öneriler teklif edilmiştir.

Doğangün ve ark. (2008), Türkiye'deki hemen hemen bütün tarihi yığma minarelerin kesme taş ya da bloklardan veya bu iki birimin terkibinden yapıldığını belirtmişlerdir. Yığma minarelerin ya da kule tipi narin yapıların yapısal ve geometrik özellikleri, yapım zamanında yapı bilgisi ve uygulanmasına, mühendis ya da mimarın tecrübesine, bölgenin depremselliği ve yapı malzemelerinin o alandaki bulunma

durumunu içeren pek çok faktöre bağlı olduğunu aktarmışlardır. Türkiye'de son yıllarda yaşanan depremlerin, yüksek sismisitesi olan bölgelerdeki pek çok yığma minarenin yapısal hasar almaya ve göçmeye savunmasız durumda olduğunu gösterdiğini belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, donatısız tarihi yığma minarelerin dinamik davranışlarını araştırmak için, 20, 25 ve 30 m. boyları olan üç farklı minare modellenmiş ve 1999 Kocaeli ve Düzce depremlerinden elde edilen veriler kullanılarak analiz edilmiştir. Modellerin modal analizlerinin, yapısal periyotların ve genel yapı tepkisinin, minarenin yüksekliğinden ve girdi hareketinin spektral özelliklerinden etkilendiğini belirtmişlerdir. Dinamik yer değiştirme ve eksenel gerilme tanım zamanı, minareler için kritik noktalarda hesaplanmıştır (Şekil 2.7). Yaşanan son depremlerde, pek çok minarenin tabanının üst tarafından hasar almış olduğu göze çarptığını ve gözlenen tepkiyle tutarlı olarak, en büyük gerilmelerin aynı bölgede hesaplandığını aktarmışlardır.

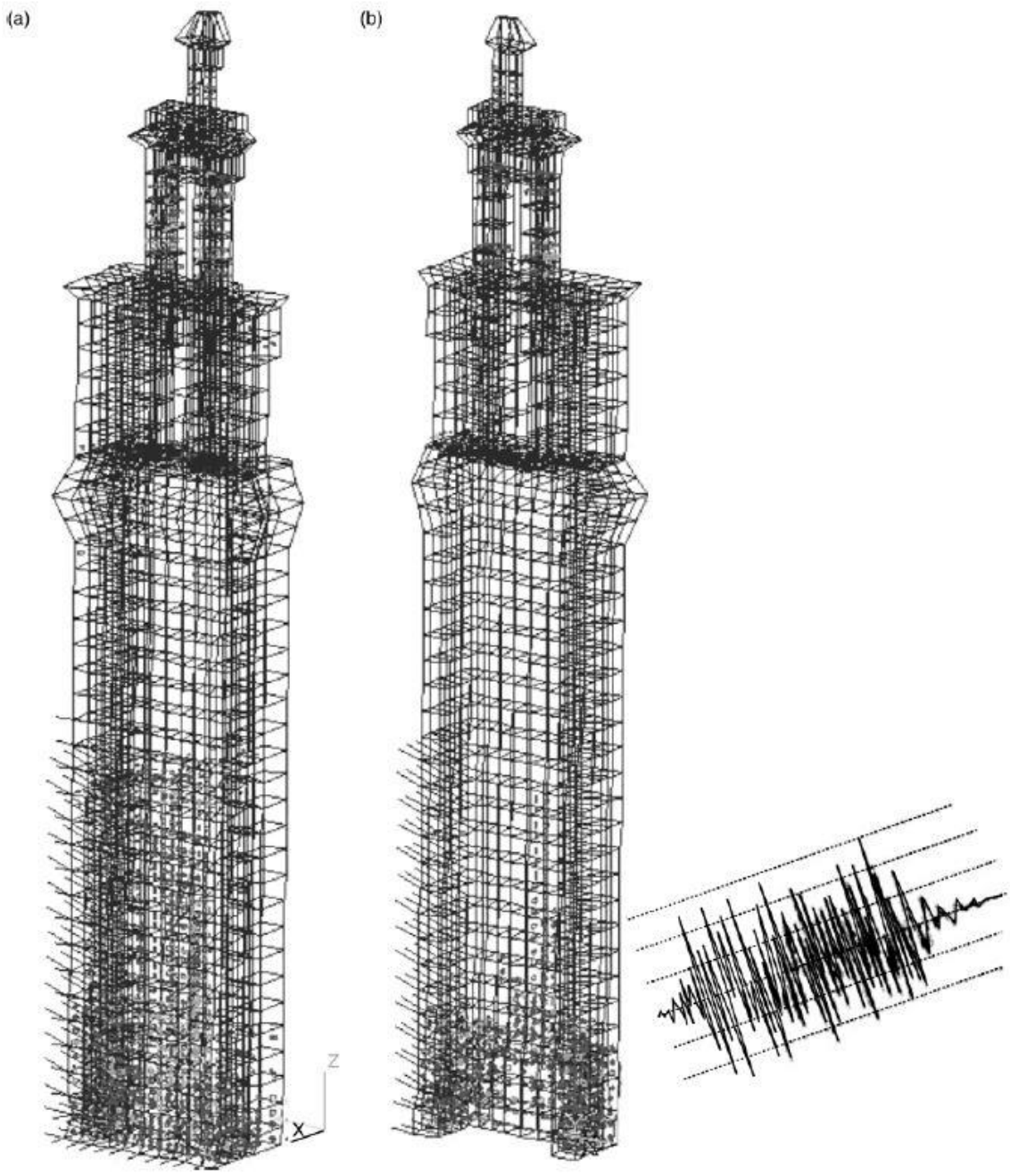


Şekil 2.7. Düzce ve Kocaeli yer hareketleri için minarelerin boyları üzerinden yer değiştirme dağılımları: a) Minare-I (30 m), b) Minare-II (25 m), c) Minare-III (20 m) (Doğangün, 2008).

Sezen ve ark. (2008), oldukça fazla sayıda minarenin, etraflarındaki binalara hasar verip, çok sayıda can kaybına mal olarak 1999 Kocaeli ve Düzce depremlerinde göçtüğünü belirtmişlerdir. Dinamik tepki esnasında, sonradan gözlenen zayıf donatı detaylandırmasının potansiyel etkileri tartışılmıştır. Betonarme minarelerin ciddi hasar almasının olası sebepleri, gözlenen hasar modları, depremsel performansları ve sunulan bir minarenin dinamik analizleri ile gözlenmiştir. Spiral merdivenlerin, kapı açıklıklarının ve balkonların dinamik davranıştaki etkisi incelenmiştir. Maksimum dinamik iç kuvvet talebi, hesaplanan kapasitelerle karşılaştırılmıştır. Maksimum eksenel, kesme ve eğilme istemlerinin yeri, kritik noktalarda gözlenen deprem hasarıyla uyumlu minare modelinin sonlu elemanlar analizlerinden saptanmıştır. Yakın zamanda yaşanan depremlerde hasar alan minarelerin gözlemlerinden ve örnek minarenin analizinden gözlenmiştir ki, silindirik minarenin geçiş bölümünün hemen üstündeki tabanının depremsel yükler altında en hassas kısmı olduğunu sonucuna varılmıştır. Yetersiz dizayn uygulamalarının şunları içerdiği belirtilmiştir: (1) nervürsüz donatı, (2) yatay ve düşey donatı etriyeleri kancalarının 180° ile bitmesi, (3) aşamasız ve kısa bindirme boyları, (4) fret yerine yetersiz etriye uygulaması ve (5) kare taban ile silindirik gövde arasındaki kısa geçiş mesafesi.

Ivorra ve ark. (2009), yaptıkları çalışmada 17. ve 18. yüzyıllar arasında yığma yapı tekniği ile yapılan, Valencia'daki (İspanya) San Nicolas çan kulesinin depremsel davranışının karakterize etmişlerdir. Çan kulesinin kapsamlı bir geometrik tanımı yapılmış ve depremsel tepkiyi ve onun İspanyol Standartları ile ilişkisini ortaya çıkarmak için sayısal bir model geliştirilmiştir. Model, öncelikle, gerçek yapıda doğrudan gerçekleştirilen dinamik deneyler ile kalibre edilmiştir. Hesaplamalar, lineer olmayan davranışa ve yayılı çatlakları içeren bir hasar mekanizmasına uyum gösterip, kuledeki model çatlakları dikkate alarak uygulanmıştır. Beş farklı yapay ivmeölçer, deprem kuvvetlerinin benzeşimi için kule taban seviyesine yerleştirilmiştir. Sayısal simülasyonlar, İspanyol Standartlarında sunulan temel depremsel ivmelere dair kulenin performansının tatmin edici olduğunu göstermiştir. Depremler yüksek hasarlara ulaşılana kadar etkitilmeye devam edilmiştir. Kulenin ayakta kalabileceği nihai deprem etkisini hesaplamak için, yapay ivmeölçerler 0.09 g'ye ölçeklendirilmiş (İspanyol Standartlarında 700 yıllık bir periyota tekabül etmektedir) ve sonuçlar Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Şeklin daha iyi anlaşılması için kuledeki çatlaklar iki kısma ayrılmıştır (Şekil 2.8a, b).

İvmeölçerler her iki yönde de (doğu-batı, kuzey-güney) yerleştirilmiş ve çatlakların oluştuğu ilk yön olan doğu-batı cepheleri gösterilmiştir. Kuzey-güney yönünde de çatlaklar oluşmasına rağmen şekilde gösterilen kadar geniş çaplı olmadığı ve her iki sonucun da kulenin doğu batı yönünde depremsel yüklerle ilişkisi bakımından zayıflık gösterdiği belirtilmiştir.



Şekil 2.8. Çatlak haritası. Deprem yükleri doğu-batı yönlerinde verilmiştir: a) doğu cephesi, b) batı cephesi (Ivorra ve ark., 2009).

Pena ve ark. (2010), Delhi, Hindistan'da bulunan Kutub Minar'ın depremsel değerlendirmesini sunmuş ve farklı komplekslik ve basitleştirme seviyeleri olan yapıya ait üç farklı model geliştirmişlerdir. Bu modellerin kullanımı, tarihi yığma minarelerin depremsel davranışının çalışma zorluğunun üstesinden farklı modellerden toplanan sonuçlarla, depremsel davranışın daha kapsamlı yorumlanmasını sağlayacağını belirtmişlerdir. Modeller lineer olmayan statik (statik itme) ve lineer olmayan dinamik analizler için kullanılmıştır. Statik ve dinamik analizler farklı davranışlar göstermiş ve yığma yapıların depremsel olarak değerlendirilmesinde statik itme analizinin dikkatlice yapılması gerektiği saptanmıştır. Statik analiz için en kritik bölge kulenin alt kısmı iken dinamik analiz için üst kısmı olduğu ve modellerin aynı yükleme ve analiz tipleri altında benzer davranışlar gösterdiği belirtilmiştir. Bununla birlikte, lineer olmayan statik ve dinamik analizlerden alınan sonuçların, depreme karşı yapının farklı tepkiler verdiğine işaret ettiği ve lineer olmayan analizlerin, yapının alt kısmında dağılma çatlağı ve taban devrilme mekanizması oluşturabileceğine dikkat çektiği ifade edilmiştir. Öte yandan, lineer olmayan dinamik analizlerle, Kutub Minar'ın en yüksek ivme ve kaymaların bulunduğu üst iki bölgesine denk gelen kısmının depremsel hasara daha yatkın olduğunu sonucunu çıkarmışlardır.

Bayraktar ve ark. (2011), çalışmalarında, tam ölçekli çevresel titreşim testinden alınan sonuçları kullanarak oluşturdukları sonlu eleman modeliyle, tarihi bir yığma minarenin deprem davranışlarını sunmuşlardır. Trabzon şehri yakınlarında, 21 m. yüksekliğe sahip olan, 16. yüzyıl civarı yapılmış olan İskenderpaşa tarihi yığma minaresi bu çalışma için seçilmiştir. Analitik modal analizler, minarenin üç boyutlu sonlu eleman modelinde, analitik frekansları ve mod şekillerini elde etmek için mühendisliki değerlendirmeler ve yerinde araştırmalar dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Rüzgar yükü ve yaya hareketi gibi doğal uyarıcıların altında minare üzerinde, yerinde çevresel titreşim testi yürütülmüştür. Tepe seçme ve olasılıksal alt uzay tanımlama teknikleri, modal parametreleri çevresel titreşim testinden çıkarmak için kullanılmıştır. Farklı iki teknikten elde edilen modal parametrelerin birbirleriyle iyi bir uyum gösterdiği belirtilmiştir. Minarenin sonlu eleman modeli, malzeme özellikleri ve sınır koşulları gibi bazı kesin olmayan modelleme parametreleri değiştirilerek, analitik ve deneysel olarak hesaplanan modal özellikler arasındaki farkları minimize etmek için güncellenmiştir. Bu model, bulunduğu konumun yakınlarında, 1992 yılında gerçekleşen Erzincan depremi

verileri kullanılarak, minarenin deprem davranışını ortaya çıkarmak için analiz edilmiştir. Çalışmanın sonunda, doğal frekanslardaki maksimum farklar ortalama %27'den, %5'e indirilmiştir ve analitik ve deneysel olarak bulunan doğal frekanslar ve mod şekilleri iyi bir uyum göstermiştir. Aynı zamanda minare boyunca yer değiştirmelerin arttığı ve maksimum ve minimum asal gerilmelerin silindirik gövdenin geçiş bölgesinde oluştuğu deprem analizlerinden gözlemlendiği belirtilmiştir.

Altunışık (2011), FRP malzemesiyle yapılan güçlendirmelerin mühendislik dünyasında popülerleştiğini ve bu malzemenin kullanıldığı yapıların uygulama öncesi ve sonrası davranışlarının anlaşılmasına olan ihtiyacın ortaya çıktığını belirtmiştir. Yaptığı çalışmada, FRP malzemesi ile güçlendirilmiş yığma minarelerin dinamik tepkilerini güçlendirme öncesi ve sonrası olarak değerlendirmiştir. Uygulama olarak, Trabzon'da bulunan 16. yüzyılda yapılıp 21 m yüksekliği olan tarihi İskenderpaşa camisinin bir minaresi seçilmiştir. Öncelikle, ANSYS paket programı yardımıyla minarenin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Daha sonra, bölgenin yakınlarında olan 1992, Erzincan deprem kayıtları kullanılarak, minarenin analitik modeli dinamik davranışını belirlemek için analiz edilmiştir. Bundan sonra da, farklı düzenlemeler kullanılarak minarenin silindirik gövdesi FRP malzemesi ile güçlendirilmiş ve dinamik analizler yapılmıştır. Son olarak, minarenin dinamik tepkileri FRP öncesi ve sonrası olmak üzere, yer değiştirmeler ve maksimum-minimum asal gerilmeler yönünden karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda, yer değiştirmelerin minare boyunca arttığı, maksimum ve minimum asal gerilmelerin ise geçiş bölümünde ve silindirik gövdede oluştuğu bütün analizlerde görülmüştür. Ayrıca, FRP güçlendirmesin minarenin dinamik tepkileri üzerinde oldukça etkili olduğu deprem analizlerinden ortaya çıkarılmıştır.

Türk ve Coşgun (2011), İstanbul'da bulunan yığma bloktan oluşan tarihi bir minarenin dinamik davranışını analiz etmiş ve depremsel bir güçlendirme yöntemi önermişlerdir. Bölgenin faal depremsel hareketlerine bağlı olarak, üç boyutlu sonlu elemanlar modeli yanal yer değiştirmeleri ve deprem yükleri altındaki hasar modlarını saptamak için kullanılmıştır. Analizlerin, en fazla hasarın genellikle minarenin taban ve alt bölgelerinde oluşmakta olduğunu ve yanal davranış FRP plakaları ile bu bölgelerde güçlendirme yapılarak dayanımın artırılabileceğini gösterdiğini belirtmişlerdir. Çalışmada sunulan üç boyutlu analizler göstermiştir ki, göçme modlarının belirlenmesi ile depremsel etkiye maruz kalan minarelerin yapısal davranışı değerlendirilebilir ve olası

hasar modları tanımlanabilir. İlave araştırmalar, bu tip yapılara özellikle uyarlanmış tasarım tepki spektrumlarının hesaplanması için yürütülmesi gerektiğini aktarmışlar ve R katsayısının (depremsel azaltma katsayısı) daha gerçekçi değerlerini ve sönüm oranını, hem deneysel, hem de analitik olarak çalışılması gerektiğine dikkat çekmişlerdir.

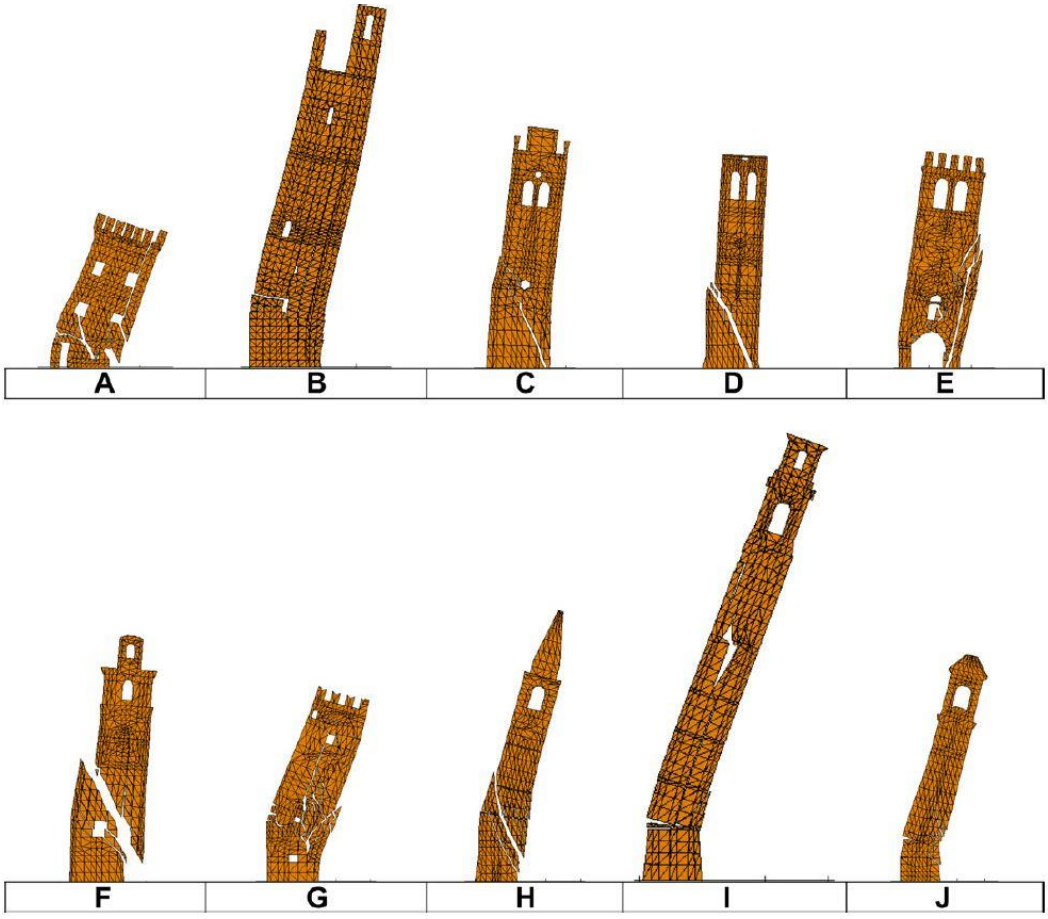
D'Ambrisi ve ark. (2012), deprem etkilerine karşı savunmasız olan tarihi yığma kuleler ve çan kulelerinin depremsel davranışının değerlendirmesini ve dinamik özelliklerinin belirlenmesini çalışmışlardır. Çalışmanın temel amacı, uygulanan modellerin detaylandırma seviyesinin ve seçilen analiz türünün tarihi yapıların depremsel değerlendirmesini nasıl etkilediğini araştırmaktır. Kültürel miraslarda depremsel riskin değerlendirilmesi ve azaltılması hakkında İtalyan Yönetmeliğinin içerdiği bazı şartların etkililiği de değerlendirilmiştir. Bahsedilen yığma yapı sınıfında bulunan Orta Çağda yapılan Soncino Şehir Kulesi (Cremona, İtalya) bu çalışmaya konu olmuştur. Yığma kulenin dinamik ve mekanik özellikleri çevresel titreşim testleriyle hesaplanmıştır. Yapılan dinamik tanımlama sonuçlarına göre kalibre edilmiş farklı detaylandırma seviyeleri olan kulenin analitik modellerine lineer olmayan statik ve dinamik analizler uygulanmıştır. Lineer olmayan dinamik analizlerle elde edilen sonuçlar lineer olmayan statik analizlerle elde edilenlerle yakın değerler vermektedir. Bununla birlikte, lineer olmayan dinamik analizlerin, yer değiştirme kapasitesi seviyesinin lineer olmayan statik analizlerin sonuçlarından daha az olmasını sağladığı ve taban kesmesi gibi bazı tepki parametrelerinde yüksek frekansların önemli etkisini göz önünde bulundurulmasına izin verdiği belirtilmiştir. Kulenin hassasiyeti, lineer olmayan statik analizlerin sonuçlarına göre kültürel miraslarda depremsel riskin değerlendirilmesi ve azaltılması hakkında İtalyan Yönetmeliğine göre değerlendirilmiştir.

Milani ve ark. (2012), Kuzey İtalya'da yer alan 12. yüzyıla ait bir yığma kulenin karşılaştırmalı sayısal çalışmasını yapmışlar ve deprem yükleri altında kulenin güvenliğinin değerlendirilmesi için farklı türde sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir; lineer olmayan statik, limit ve lineer olmayan tam dinamik. İlk iki durum için, üç boyutlu detaylı bir sonlu eleman modeli uygulanmış, deprem yükü yönleri değiştirilmiş ve çekirdek ile dış duvarlar arasındaki ara bağlantı için farklı hipotezler düşünülmüştür. Artımlı sonlu elemanlar analizi ile ilgilenirken, yığma için yayılı çatlaklı izotropik model ticari bir paket programda kullanılmıştır. Limit analizler için, ticari olmayan kapsamlı bir üç boyutlu paket program kullanılmıştır ve standart sonlu elemanlar analizi ile

karşılaştırıldığında, limit yükler ve hasar mekanizması için iyi hesaplamalar yaptığı gözlenmiştir. Dinamik analizler ise hem dış, hem iç duvarların kalınlıkları boyunca asimetrileri ve düzensizlikleri de yaklaşık fakat gerçekçi bir şekilde hesaba katan spesifik bir iki boyutlu rijit gövde ve yay modeli ile gerçekleştirilmiştir. Dört farklı ivmeölçer, dinamik yükler altında kulenin deprem performansını değerlendirmek için kurulmuştur. Sayısal sonuçlardan, kulenin asıl geometrisinin oynadığı rol öngörülmüş olmakla beraber artımlı sonlu elemanlar metodu ve limit analizler tarafından oluşturulan hasar mekanizmalarının detaylı bir karşılaştırması sağlanmıştır. Bütün durumlarda, sayısal analizler, yapısal görüntülemenin başlatılması için yararlı ipuçları sağlayan olası hasar mekanizmasının değerli bir resmini verdiği belirtilmiştir.

Casolo ve ark. (2013), deprem hareketleri altında, Po Valley (İtalya) sahil kesiminde bulunan günümüzde de ayakta kalmaya devam eden, on farklı yığma kulenin analizlerini, deprem hareketleri uygulayarak gerçekleştirmişlerdir. Bu kuleler, aynı bölgede yer almaları, benzer mekanik özellikleri olan yığma malzemelerden yapılmış olmaları ve büyük çoğunluğunun neredeyse tamamının aynı dönemde inşa edilmesiyle karşılaştırmalı bir analizin meşrulaştırıldığını belirtmişlerdir. Öte yandan, farklı geometrileri (örneğin, narinlik, dış duvarların kalınlıkları, yükseklikleri, açıklık yüzdesi gibi) sebebiyle aynı deprem hareketlerine farklı yapısal tepkiler göstermekte olduğuna dikkat çekmişlerdir. Böylece, çalışmanın amacı Po Valley sahil kesiminde var olan kuleler için teknik literatür tarafından sağlanan yığmanın mekanik özelliklerini hesaba katarak bu tip kulelerin depremsel davranışlarındaki geometrik etkiyi bulmaktır. Lineer olmayan tam dinamik analizler rijit gövde ve yay modeli ile gerçekleştirilmiştir. Kulelerin geometrileri hem hazırda bulunan belgelerden hem de sahada yapılan araştırmalardan elde edilmiştir. Bu geometrik verilere dayanarak kalınlıkların bitişik elemanlarla tanımlandığı eşdeğer bir iki boyutlu sonlu eleman modeli, iki boyutlu yaklaşım dahilinde yapının esas davranışını uygun bir şekilde gerektiği yerde hesaba katmak için tasarlanmıştır. Dört yapay dizayn uygun yatay ivmeölçer, iki boyutlu modellere uygulanmış ve göçme mekanizmaları ve kuvvet-yer değiştirme tanım alanı açısından tepki detaylı olarak analiz edilmiştir. Her ne kadar, bu çalışma, seçilen kulelerin tipolojik özellikleri arasındaki ilişkiyi ve deprem hareketleri altında sergiledikleri yapısal tepkileri analiz etmeye yönelik ilk adım olsa da, elde edilen sonuçlar ve karşılaştırmalı analizler, kulelerin yapısal davranışının, geometrik özelliklerine (narinlik, taban kesme alanı, çan

kulesinin varlığı, büyük delikler, iç tonozların var ya da yok olması gibi) güçlü olarak bağlı olduğunu net bir şekilde göstermiştir. Şekil 2.9'da bu on kule için, sonlu elemanlar üst sınır limit analizleri ile elde edilen göçme mekanizmaları görülmektedir.



Şekil 2.9. On kule için, sonlu elemanlar üst sınır limit analizleri ile elde edilen göçme mekanizmaları görülmektedir: a) gözlem kulesi (15. yy), b) orta çağ savunma kulesi (12-13. yy), c) tipik Rönesans çan kulesi (15. yy), d) çan kulesi (13.yy), e) anıtsal kapı (12. yy), f) şehir kulesi (17. yy), g) orta çağ savunma kulesi (13. yy), h) çan kulesi (17. yy), i) gözlem kulesi (ortaçağ), j) çan kulesi (tarih bilinmiyor) (Casolo ve ark., 2013).

Minghini ve ark. (2014), 2012 yılında gerçekleşen Emilia depreminde hasar gören bir yığma bacayı analiz edip, sonuçlarını sunmuşlardır. Yapılan araştırmayla, yapının üst bölgesinde diyagonal çatlaklar ve önemli bir harç bozunması olduğu ortaya çıkmıştır. Yanal yük yöntemi ve geleneksel yük tiplerini kullanan statik itme analizinin, bacanın depremsel davranışını ortaya çıkarmakta yetersiz kaldığı görülmüştür. Aksine, titreşimin altı farklı moduna bağlı yük dağılımlarını kullanan Modal Statik İtme Analizi (MPA) gözlemlenen hasarlarla uyumlu çatlak düzenleri gösterdiği gözlenmiştir. Son olarak, bir takım lineer olmayan tepki tanım alanı analizleri, doğal ivmeölçerler kullanılarak uygulanmıştır. Bilhassa, bir sonlu eleman modeli, uygun çekme, basınç ve kesme

yasalarını içeren doğrusal olmayan ara yüzler yardımıyla bağlanan rijit üçgensel elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Sonuçlar, bacanın üst bölümündeki kesme hasarı mekanizmasını sistemsel olarak vurgulamıştır. Analizlerden elde edilen artık deformasyonların, depremden sonra yapılan ölçümlere yakın olduğu görülmüştür.

Saisi ve Gentile (2015), Mayıs 2012'de İtalya'da gerçekleşen depremlerden sonra, Mantua'daki en yüksek kule olan, Gabbia Kulesinin, korunma durumunun değerlendirilmesi için uygulanan yöntemi açıklamışlardır. Geometrik incele, görsel gözlemler, ortama ait titreşim, ses dalgası ve yassı veren testlerini içeren geniş çaplı bir deneysel program planlanmış ve kulenin gelecekte de yapılabilecek korunma işlerini desteklemek için uygulanmıştır. Çalışma, özellikle yerinde yapılan deneyler ve dinamik testlerin sonuçlarına ve kulenin yapısal durumunu ve depremsel hassasiyetini hesaplamak için yapılan bu deneylerden elde edilen bilgileri birleştirmenin etkisine odaklanmıştır. Kullanılan deneysel metodoloji, genellikle hızlı tanılama yöntemi olarak kullanışlıdır, bununla birlikte bölgesel hassasiyetleri başarıyla ortaya çıkardığı gibi kulenin korunmasının genel durumuna ve sonraki gözlem evresine de değinir. Ana taşıyıcı duvarların görsel gözlemleri ilk olarak, Gabbia Kulesinin üst bölümünün, yapının tarihsel değişimine, bölgesel bağlantı eksikliklerine ve yaygın yığma bozulmasına bağlı birçok süreksizliğin var olması ile karakterize olduğunu ortaya çıkarmıştır. Aynı bölgenin zayıf korunma durumu, gözlenen dinamik özelliklerle de onaylanmıştır.

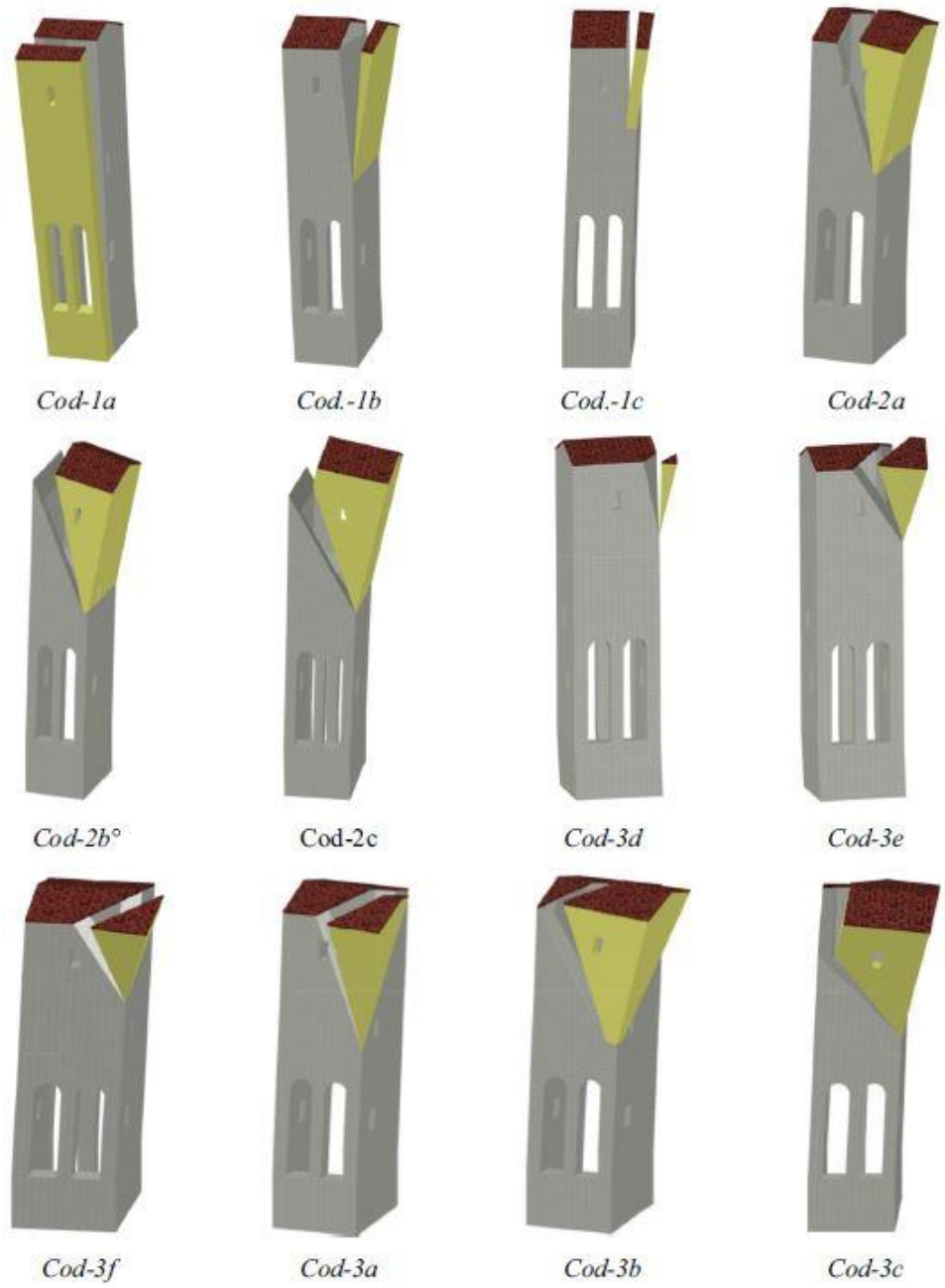
Salvatori ve ark. (2015), genel PEER (Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırması) çerçevesinde, yığma kulelerin depremsel performanslarının olasılıksal değerlendirmesi üzerine bir yöntem geliştirmişlerdir. Tüm prosedür için, yoğunluk ölçüsü (IM), mekanik model, depremsel yöntem, Mühendislik İstem Parametresi (EDP), belirsiz mekanik özellikler ve olasılıksal yöntem içerikleri tanımlanmıştır. Her bir içerik için, seçilen uygun bir yığma kule önerilmiştir. Bir kule, çekme kuvvetine çalışmayan sınırlı basınç dayanımı olan geometrik olarak lineer olmayan bir Timoshenko kirişi olarak modellenmiştir. Nihai basınç birim şekil değiştirmesinin ulaşacağı nokta ana göçme kriteri olarak düşünülmüştür. Statik itme analizleri uygulanmış ve depremsel yer değiştirme kapasitesi ve istemine dayanan performans ölçümü, EDP olarak kullanılmıştır. EDP'nin şartlı aşılma olasılığı, uç taban ivmesi olarak verilip, IM olarak kullanılıp, rastgele değişkenler olan mekanik parametreler yığmanın atalet, rijitlik, dayanım ve sünekliğini temsilen düşünülüp Monte Carlo simülasyonları ile hesaplanmıştır.

Hesaplamalar bir referans durum yardımıyla geliştirilmiştir. Yer değiştirme kapasitesinin dağılması belirsizliğin ana kaynağı olarak kabul edilmiştir. Mekanik parametrelere ilişkin basınç dayanımı ve birim şekil değiştirme sünekliği, hassaslık analizlerinde de dikkat çekildiği gibi, en kritik rolü oynadığı ve genellikle tarihi anıtsal yapılarda izin verilmeyen hasar verici deneylere rağmen en bilinmez olan bu parametrelerin, değerlendirilmeleri için gerekli olduğu aktarılmıştır. Aynı zamanda, lineer olmayan statik analiz için statik yükleme tiplerinin etkileri ve artımlı dinamik analizlerle karşılaştırılmasına da kısaca değinilmiştir.

Bartoli ve ark. (2016), araştırma projesi RiSEM'in (Anıtsal Yapıların Depremsel Riski) kısa bir tanımını yaptıktan sonra, yapı hakkında artan bilgiye göre üç farklı seviyede değerlendirmeye dayanan bir analiz metodolojisini tanımlayan İtalyan "kültürel mirasın depremsel riskinin değerlendirilmesi ve azaltılmasına dair prensipler "'ine göre tarihi yığma kulelerin depremsel değerlendirmesini sunmuşlardır. RiSEM projesi, depremsel güvenliklerini değerlendirmek için gerekli olan, anıtsal yapının bütün temel yapısal özelliklerini ölçmek için yenilikçi ve hızlı yöntemlerin (yığma yapı ile minimal bir direkt temas olsun, olmasın) geliştirilmesi ve denenmesini amaçlamaktadır. İlgili bir örnek çalışma olarak, UNESCO Dünya Kültürel Mirasları Listesinde bulunan, "Güzel kuleler şehri", San Gimignano seçilmiştir. Çalışmada San Gimignano'da bulunan Coppi-Campatelli seçilip analizleri yapılmıştır. Yapının depremsel hassasiyeti, yukarıda tanımlanan prensiplere ve raporlara bağlı olarak hesaplanmış ve sonuçlar üç farklı seviyede değerlendirilip karşılaştırılmıştır (LV1: karasal seviyede analiz, LV2: lokal analiz, LV3: global analiz).

Bu çalışmada, çoğu düzlem dışı mekanizmalar olan bir çok olası mekanizma, geçmiş çalışmalar referans alınarak hesaba katılmıştır. Dikkate alınan mekanizmalardan bazıları Şekil 2.10'da verilmiştir ve şöyle sınıflandırılmışlardır;

- basit devrilme mekanizmaları (Cod-1a; Cod-1b; Cod-1c);
- bir cephede birleşmiş devrilme mekanizmaları (Cod-2a; Cod-2b; Cod-2c);
- köşe devrilmesi mekanizmaları (Cod-3a; Cod-3b; Cod-3c; Cod-3d; Cod-3e; Cod-3f);



Şekil 2.10. Analizi yapılmış göçme mekanizmaları (Bartoli ve ark, 2016)

Fragonara ve ark. (2016), Emilia'da (İtalya), 20 ve 29 Mayıs 2012'de yaşanan depremsel aktiviteler sonrası bölgede bulunan tarihi ve anıtsal yapıların çoğunun ciddi olarak zarar gördüğünü tespit etmişlerdir. Bazı yapılarda, kısmi göçme mekanizmaları gözlenmiştir (örneğin cephe eğilmesi, panellerin düzlem dışı devrilmesi gibi). Bu çalışmada, Mirandola'da (İtalya) bulunan Santa Maria Maggiore Katedralinin çan kulesi incelenmiştir. Yapının dinamik tepkisi, çan kulesinin dinamik parametrelerini hesap eden hasarsız bir yöntem olan çevresel titreşimler kullanılarak, operasyonel modal analizle

ölçülmüştür. Dinamik deneyler, güvenlik müdahalelerine karşı dinamik ölçümlerin hassasiyetini anlamak için müdahale öncesi ve sonrası durumlar için yapılmıştır. Bununla birlikte, 6. moda kadar hasar görmemiş yığma kulelerin benzer durumları ile karşılaştırmalı bir çalışma yapılmıştır. Son olarak, sonlu eleman modeli çıkarılarak, yapının durumu değerlendirilmiştir. Müdahale öncesi ve sonrası yapılan deneylerden alınan sonuçlar, her iki senaryonun karşılaştırılmasını kolaylaştırmıştır. Bu kapsamda yazarlar, bir takım değerlendirmelerde bulunmuşlardır:

- Sonuçlar karşılaştırılarak, gerçekleştirilmiş güvenlik müdahalelerin sağladığı rijitleşme etkilerine doğrudan bağlı olan, modal frekanslar açısından genel bir artış gözlenmiştir.
- Çalışma ile literatürdeki diğer çan kuleleri çalışmaları arasındaki karşılaştırma deprem hareketinden sonra, ilk üç modun frekanslarının makul bir şekilde düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Güçlendirme müdahalesi sonrası, frekans değerleri, benzer yükseklikli hasar almamış çan kuleleri için beklenen değerlerle önemli derecede uyum gösterdiği görülmüştür.
- Titreşim bazlı gözlem, yığma yapının temel özelliklerinin değerlendirilmesi, yanındaki yapıyla yapısal ilişkisi, ve güvenlik ölçümlerinin ve güçlendirme müdahalesinin yapısal etkileri için kullanılabilecek sonlu eleman modelini kalibre etme imkanı vermektedir. Yapının önceki durumundaki (deprem öncesi) bir takım dinamik testin, elde edilen sonuçların kalitesini önemli derecede artırabileceğini eklemek gerekir.
- Model güncelleme yöntemi, karmaşık yapıların analizi gereğince, farklı yapısal parçaların önemli bir sayıda parametresinin kalibre edilmesini sağladığı görülmüştür.
- Modal frekansın değerlerinde gözlenen artış, eğilme mekanizmasını güvenli ölçümler tarafından sağlanan sargılamanın sınırlandırdığını ispatladığı belirtilmiş: deprem sonrası ölçümlerle alakalı yapının parçalarında Young modülünün artması, global eğilme rijitliğinin artışını ifade ettiği aktarılmıştır.

Minghini ve ark. (2016), 2012 Emilia depreminde ciddi hasar alan, İtalya'daki Ferrara Üniversitesi Mühendislik Fakültesine ev sahipliği yapan eski endüstriyel tesisteki 50 metre yüksekliğindeki yığma bacanın analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Sonradan, güvenlik sebepleriyle, 12.40m'lik üst kısım sökülmüştür (kısaltma işleminden önce ve

sonra, temel modun etkili kütlesi ile toplam kütle arasındaki oran yaklaşık %20'dir, başlangıç olarak standart statik itme analizi yöntemi, deprem talebini hesaplamada uygun değildir). Tutarlı tekil bir üç boyutlu sonlu eleman formülü kullanılarak, kısaltılmış ve orijinal bacalar için, Modal Statik İtme Analizinin (MPA) sonuçları ve dört farklı lineer olmayan Tepki Tanım Alanı Analizi (RHA) bu çalışmada sunulmuştur. Simülasyonda uygulanan yer hareketleri, yakın zamanlarda İtalya, Yeni Zelanda ve Japonya'da yaşanan yıkıcı depremlerde kaydedilen verilerden alınmıştır. Bacanın her iki durumu için, MPA ve RHA arasında yanal yer değiştirmeler kapsamında oldukça yakın benzerlikler gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, 50m yüksekliğindeki baca için, MPA ve RHA ile elde edilen hasar haritaları güçlü bir benzerlik göstermiştir. Bütün analizler yüksek modların önemli katkısını doğrulamıştır. Kısaltılmış baca yapısı için, temel modun yerine geçerli etkisi sebebiyle yığmanın alt bölümündeki (8-21m) hasarları, MPA ortaya çıkarmıştır. RHA'da ise, yüksek modların daha kesin katkıları, muhtemelen, MPA'da hesaplanmayan yer hareketinin düşey bileşeninin etkisi sebebiyle gözlenmiştir. Sonuç olarak, çalışmada kullanılan iki analiz yöntemi de, maksimum yer değiştirme talebi ve hasar tayini gibi narin yığma bacanın depremsel tepkisinin önemli özelliklerini belirleme kapasitesine sahiptir. Sadece RHA, deprem etkileri sonunda kalıcı yer değiştirmeleri ve hasar kalıbını ortaya çıkarabilmektedir. Daha az hesaplamaya ihtiyaç duyan MPA'nın kullanımı, ön hasar değerlendirmesi için tavsiye edilmektedir.

Sarhosis ve ark. (2017), mevcut yığma kulelerin depremsel hassasiyetleri için ortaya atılan basit, tahmini bir yaklaşım, İtalyan yönetmelikleri ve iki ticari paket programla (UDEC ve Tremuri) yürütülen statik itme analizi gibi farklı şekillerde sadeleştirilmiş yaklaşımlar kullanılarak, idealize edilmiş kıstas durumlar serisini değerlendirerek sunmuşlardır. UDEC'de geometri kasıtlı olarak, boş karesel kesiti düzgün bir şekilde oluşturmak için, farklı kalınlıkları olan dörtgen elemanlarla idealize edilmiştir. İki boyutlu yaklaşımın kullanımı, orta ölçekli sistematik hesaplamaların uygulanmasında, hesap için gereken süreyi ciddi şekilde azalttığı aktarılmıştır. Makro-elemanlar kullanılan Tremuri'de tahminlere kısa sürede ulaşılmıştır. Bu tür basitleştirilmiş sistemler dahilinde, pratikte karşılaşılabilecek 16 farklı durum, hassasiyet değerlendirmesi için önemli olan iki parametre olan narinlik ve çapraz kesme en kesiti değiştirilerek analiz edilmiştir. Modelleme safhasında sunulan basitleştirmeler, elastik olmayan bölgede hızlı hassasiyet analizleri ve pratik amaçlar için kullanışlı narinlik

aralığındaki ivme tahminine olanak sağladığı görülmüştür. Elde edilen depremsel hassasiyeti izafeten sadeleştirilmiş formüller de sunulmuş ve hesaplama yapmadan önce, kulelerin davranışının ön tahminini yapmakla ilgilenen uygulamacının emrine hazır halde olduğu belirtilmiştir. Doğrulama amacı için, yazarlardan birinin Kuzey İtalya'da yer alan var olan 25 kulenin detaylı üç boyutlu tam ABAQUS ayrıştırmaları vasıtasıyla elde edilen sonuçlar da çalışmada sunulmuştur. Sonuçlar önceki çalışma ile benzerlikler taşımaktadır.

Ercan ve ark. (2018), çalışmalarında 1894 yılında inşa edilen İzmir'de inşa edilen tarihi Rahmanlar Minaresinde depremsel hasar yayılımının Operasyonel Modal analize göre kalibre edilmiş sonlu elemanlar modeli kullanılarak farklı yer hareketleri altında incelenmesini amaçlamışlardır. Yığma minarenin üç boyutlu katı modelini oluşturabilmek ve malzeme özelliklerini belirlemek için ölçümler ve malzeme testleri yapmışlardır. İlk olarak, minarenin başlangıç sonlu elemanlar modeli analiz edilmiş ve minarenin dinamik özellikleri elde edilmiştir. Minarenin deneysel dinamik özelliklerini elde etmek için ise ortam titreşim testi olarak operasyonel modal analiz kullanılmıştır. Daha sonra minarenin başlangıçtaki sonlu elemanlar modelini deneysel dinamik sonuçlar kullanarak kalibre etmişler ve son olarak, minarenin güncellenmiş sonlu elemanlar modelinin lineer ve lineer olmayan zaman tanım analizini, Türkiye'de meydana gelen iki farklı depremin ivme kayıtlarını kullanarak yapmışlardır. Doğrusal analiz sonuçlarının doğrusal olmayan analiz sonuçları kadar gerçekçi olmadığını saptamışlardır. Doğrusal olmayan analizlere göre, deprem, minarenin geçiş bölümündeki bazı kısımlarına zarar verebilir sonucuna varmışlardır.

2.3. Dört Ayaklı Minare

Bedirhanoğlu ve İrfanoğlu (2009), Dört Ayaklı Minarenin dinamik analizlerini gerçekleştirmiş ve bu analizlerle minarenin sallanma davranışı göstereceğini tespit etmişlerdir. Bu davranışın, minarenin şiddetli depremlere karşı ayakta durmasını sağlayacağının altını çizmişlerdir. Bu hususta simülasyon esaslı bir program kullanılarak dinamik analizler gerçekleştirilmiş ve Türkiye'den seçilen 6 depremin kayıtları ile analizler yapılmıştır. Bu deprem hareketleri sonucunda hiçbir deprem kaydında, minare sallanmasına karşılık devrilme gerçekleşmemiştir.

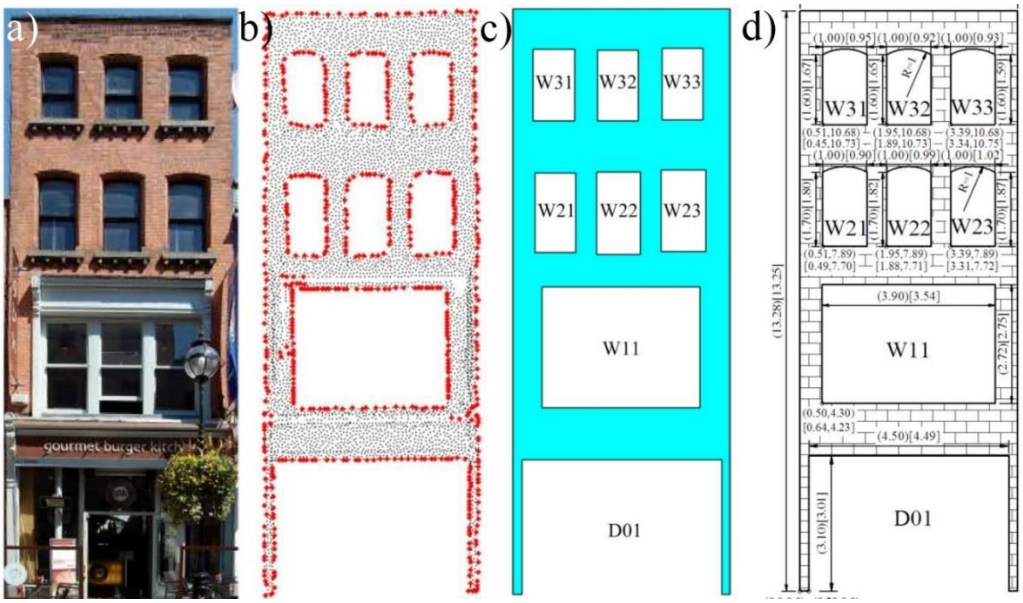
Kazaz ve ark. (2012), Dört Ayaklı Minarenin özel bir yapı olduğunu ve Doğu Anadolu Fay Hattı ile Bitlis Zagros Kenet Kuşağı arasında depremsellik yönünden oldukça tehlikeli bir bölgede kaldığının altını çizmişlerdir. Minarenin büyük ölçekli bir sismograf gibi düşünülebileceğini ve son 5 yüzyıldır Diyarbakır'da şiddetli bir deprem olmadığını minarenin hala ayakta olmasından anlayabileceğimizi belirtmişlerdir. Bölgede daha önce meydana gelen Lice depreminin kayıtları olmadığı için, bu depreme benzer özelliklerde bir deprem seçilerek onun kayıtları analizler esnasında kullanılmıştır. Analizlerde görülmüştür ki yer hareketinin yoğunluğu arttıkça bloklar birbirlerinden ayrışmaya başlamışlardır.

Işık (2017), yaptığı çalışmada Diyarbakır'ın tarihsel yapılar konusunda en zengin bölgesi olan Suriçindeki geleneksel yığma yapıların mimari özelliklerini, mevcut konumlarını, yapısal sorunlarını ve taşıyıcı sistem hasarlarını gözlemsel olarak incelemiştir. İncelenen bu yapılar arasında Dört Ayaklı Minare de bulunmaktadır. Yazar çalışmasında, minarenin 2011 yılında Vakıflar Bölge Müdürlüğü tarafından restorasyonunun yapıldığını belirtmiş, bu kapsamda zemin özelliklerinin belirlenmesi için yapının yakınlarında sondaj yapıldığını aktarmış ancak yapılan etüt çalışmaları sonucunda yapı temelinin hangi zemine oturtulduğu tespit edilemediğini ifade etmiştir.

2.4. Lazer Tarama

Truong-Hong ve Laefer (2013), tarihi cephelerin lazer tarama ile elde edilen verilerinden oluşturulan katı modellerinin gerçekçiliğini doğrulamak ve karşılaştırmak için bir yöntem önermişlerdir. Büyük ölçekli kentsel altyapı projelerinin bitişik binalara etkisini değerlendirmek için geometrik yapı modellerine ihtiyaç duyulduğu belirtilmiş, tarihi ve eski binalarda böyle bir model oluşturabilmek için gerekli bilgilerin yeterli olmadığı ya da mevcutta bulunmadığının altı çizilmiştir. Bu nedenle yapısal analiz için sonlu elemanlar programına aktarılacak model için gerekli ölçümler klasik yöntemlerle elde edildiği belirtilmiş ve böylesi bir yaklaşım pahalı ve zaman alıcı olduğuna dikkat çekilmiştir. Klasik ölçüm yöntemlerine alternatif olarak ortaya çıkan lazer tarama yöntemleri geliştirilirken, bu katı modellerin kalitesinin nasıl değerlendirileceği sorusunu gündeme getirmişlerdir. Bu yaklaşımın kullanılabilirliğini denemek için üç farklı yığma yapı lazer tarama cihazı ile taranmıştır. Veri, son zamanlarda sunulan bir dizi algoritma ile işlenmiş ve katı model sonuçlarının güvenilirliği, otomatik üretilen katı modellerden

alınan sonlu eleman sonuçları, ölçümlü çizimlerin karşılaştırılması ile değerlendirilmiştir (Şekil 2.11). Sunulan doğrulama işleminin global davranışı içerdiği gibi lokal davranışı da içermekte olduğunu aktarmışlardır. Sonuçlar, hem geleneksel değerlerin, hem proje spesifik parametrelerinin kullanımının önemini göstermiştir.



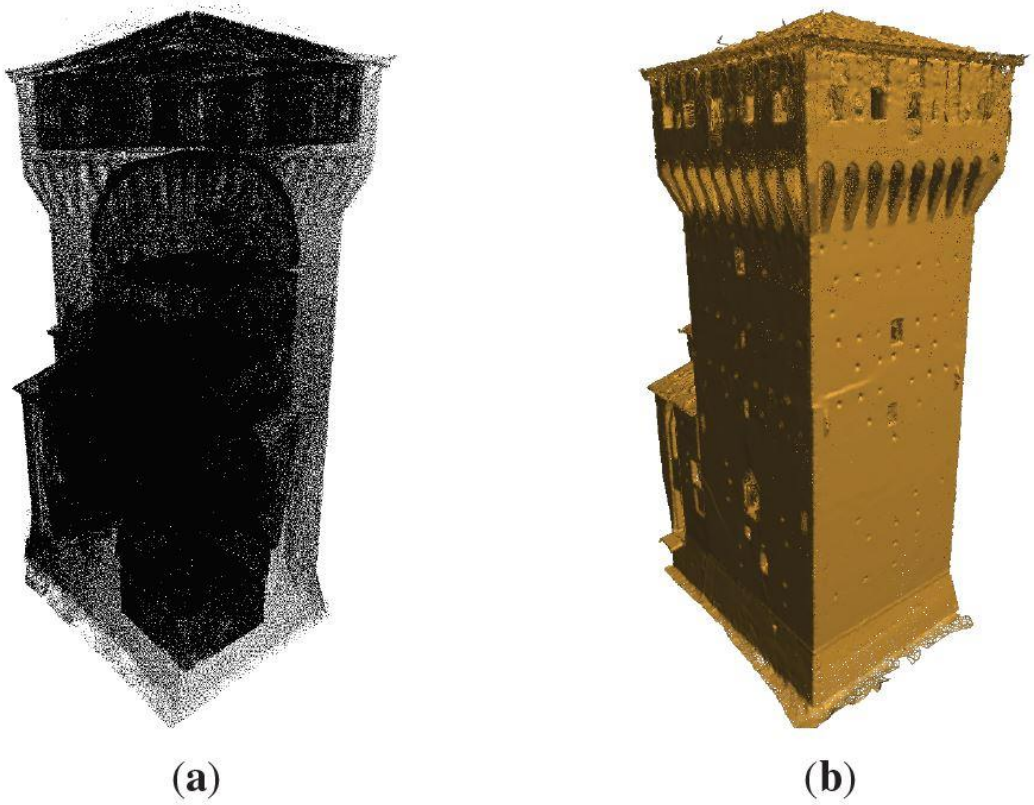
Şekil 2.11. Bina cephesi için lazer tarama sonrası verilerin işlenmesi: a) fotoğraf, b) Sadeleştirme veri seti ve başlangıç noktasının belirlenmesi, c) ANSYS katı modeli, d) CAD çizimi (Truong-Hong ve Laefer, 2013).

Pieraccini ve ark. (2014), anıtsal tarihi kulelerin hızlı ve temassız dinamik tanımlamaları için kullanılan lazer tarama ölçümü, radar interferometrik görüntüleme ve sonlu eleman sayısal modellemesi gibi sinerjik ve disiplinler arası bir yaklaşımı çalışmalarında sunmuşlardır. Bu yöntem, Siena'da (İtalya) bulunan "Torre del Mangia" 'ya (Mangia Kulesi) uygulanmıştır. Kule geometrisi Karasal Lazer Görüntüleme (TLS) tekniği ile elde edilmiştir. Kule salınımlarına, Mangia Kulesi'ne dönük bir meydandan üç hiza boyunca ve farklı yüksekliklerden interferometrik radar kullanılarak ulaşılmıştır. Deneysel sonuçların fiziksel anlamını yorumlamak ve sağlamasını yapmak için, TLS ile elde edilen geometriyi baz alarak oluşturulmuş bir sonlu eleman modeli kullanılmıştır.

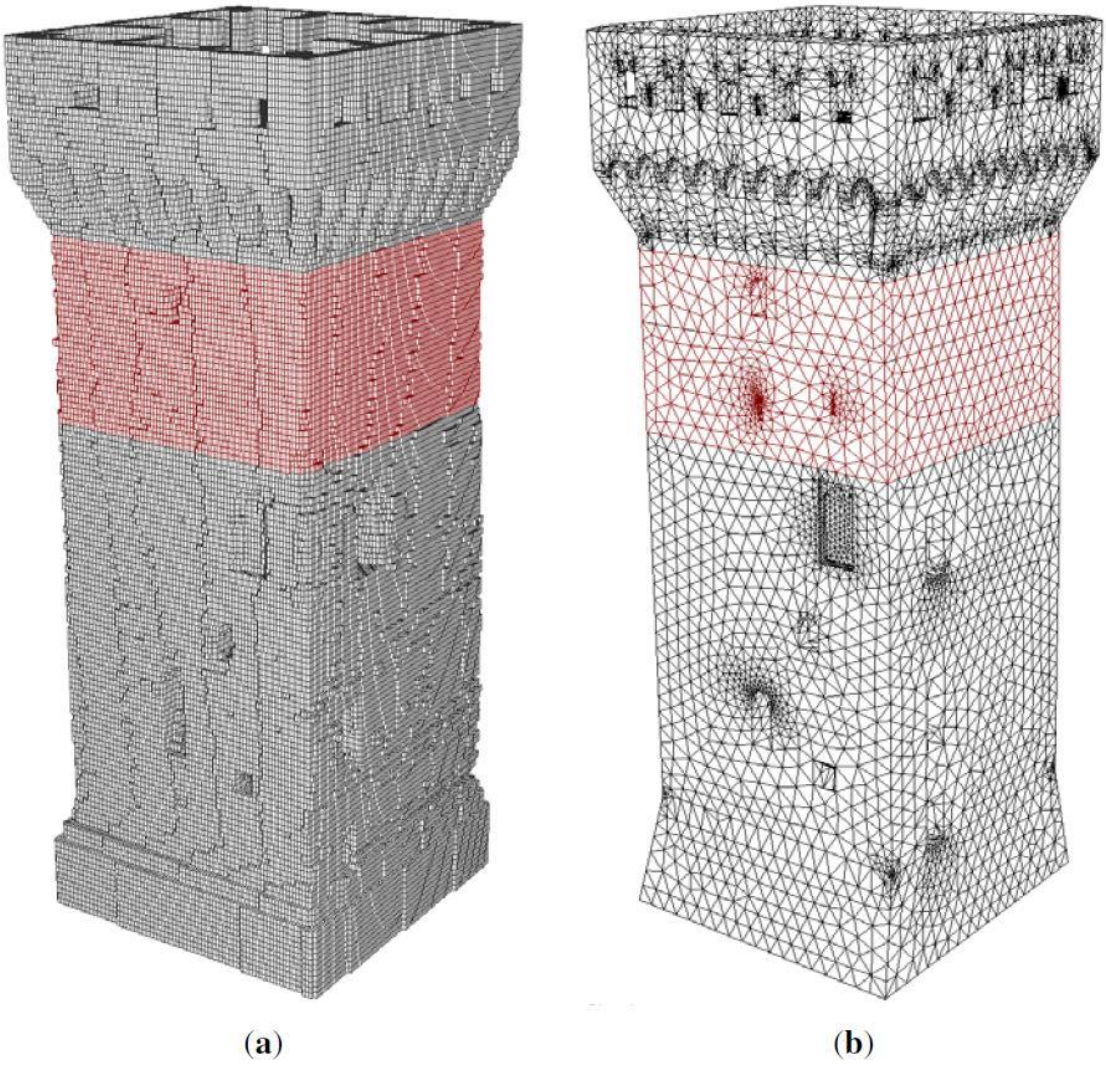
Castellazi ve ark. (2015), yaptıkları çalışmada, karmaşık yapıların üç boyutlu nokta bulutlarını, üç boyutlu sonlu eleman modeline çeviren yeni bir yarı-otomatik yöntem olan CLOUD2FEM'i sunmuş ve değerlendirmişlerdir. Yöntem, nokta bulutlarını, nokta kesitlerinin kümesi gibi düşünüp, bulutların karmaşıklığı rastgele olduğu için tarihi yapılar gibi düzensiz geometrili binalara uygulanan lazer tarama ölçümleri için

tasarlandığı belirtilmiştir. Aynı zamanda bu yöntem, yapısal analizlerde kullanılacak ve mümkün olduğunca kısa sürede oluşturulacak iyi ayrıştırılmış geometri kurarak bu tür karmaşık yapıların sonlu eleman modellerinin üretilmesi ile alakalı problemlerin çözümünü hedeflemektedir. Eğer başlangıç bulutları yapının iç ve dış yüzeylerini temsil ediyorsa, sonuç sonlu elemanlar modeli, voksel elemanlarla yapılan karmaşık bir katı şeklinde üreterek bütün üç boyutlu yapıyı isabetli olarak elde etmesi gerektiğini savunmuşlardır. CAD tabanlı bir model ile karşılaştırmalı bir analiz, sismik bir olaydan hasar görmüş bir tarihi yapıya uygulanmıştır. Sonuçlar, sunulan yöntemin etkili ve artmış seviyeli otomasyonla, daha kısa sürede kıyaslanabilir modeller elde ettiğini göstermiştir.

Bu çalışmanın esas amacı, Modena'da bulunan San Felice sul Panaro kalesinin ana kulesine (Mastio) sunulan yeni tekniğin kapasitesini deneyerek ortaya çıkarmaktır. Nokta bulutlarından, Mastio'ya ait 0.8 milyon alt küme ayıklanıp analiz edilmiştir (Şekil 2.12a). Şekil 2.12b'de gösterildiği gibi, araştırma, yapıyı en ince detayına kadar özenle tanımlamıştır. Son mesh'in ise Şekil 2.13'de gösterildiği gibi, 745,686 düğüm noktasından ve 661,105 elemandan oluştuğu belirtilmiştir.



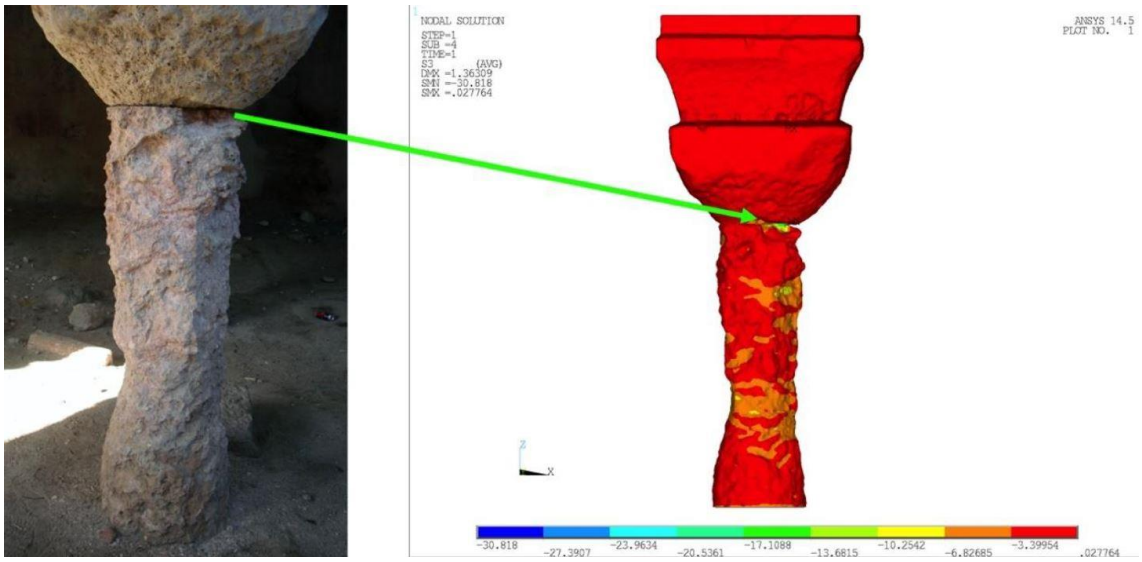
Şekil 2.12. Mastio kulesinin üç boyutlu modelleri: a) noktalar, b) üçgensel düzensiz ağ (TIN) meshi (Castellazi ve ark., 2015).



Şekil 2.13. Sonlu eleman ayrıklaştırma karşılaştırması; renkler malzeme özelliklerini belirtmek için verilmiştir; gri ve kırmızı renkler sırasıyla yığmayı ve donatılı yığmayı göstermektedir. a) CLOUD2FEM ayrıklaştırma, b) CAD tabanlı ayrıklaştırma (Castellazi ve ark., 2015).

Almaç ve ark. (2016), üç boyutlu lazer taramanın, yapısal sağlık gözlemi, yapısal hasarların değerlendirilmesi ve belgelendirilmesi, kazının hacim ve ölçüm kontrolleri, yapım çevresinin geometrik kaydı ve yapım ilerlemesi gözlemi gibi sayısız farklı alanda genel olarak kullanılan bir araç olduğunu ve yüksek hassasiyet kabiliyetine sahip olup kısa bir zamanda, nesnelerin yüzeylerinden milyonlarca nokta elde etme imkanı sunduğunu belirtmişlerdir. Bu noktalar, elemanların şeklinin ortaya çıkması için kullanılmakta olup, bu yolla, yapısal sonlu elemanlar analizinde kullanılacak üç boyutlu dijital modellerin toplanan verilerle elde edilebileceğini aktarmışlardır. Bu çalışmada, üç boyutlu nokta kümesi yardımıyla oluşturulan sonlu eleman modeliyle tarihi bir yapının

yapısal değerlendirilmesi sunulmuştur. Bu çalışmanın esas odağı tarihi bir sarnıcın taş sütunları üzerinedir. Bu, yük taşıyan yıpranmış sütunlar, ciddi gerilme yığılması düzeninin oluşmasına sebep olan şiddetli ve düzensiz erozyona uğramış olup, bu noktada, malzeme bozulması kaynaklı ciddi olarak aşınmış kolonların gerilme dağılımlarını değerlendirmede üç boyutlu geometrik verilerin vazgeçilmezliğinden bahsedilmiştir. Gerçek geometri kullanılarak elde edilen statik analiz sonuçlarına göre, basınçta oluşan maksimum gerilme, geometrik olarak idealize edilmiş modele kıyasla kolonlarda hatırı sayılır şekilde arttığı belirtilmiş ve bu değerlerin, noktasal yük deneyi sonuçlarından elde edilmiş malzeme basınç dayanımına yakınsadığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, analizler gerilme dağılımları, kolon ve başlıkları arasındaki bölgeye dikkat çekmektedirler. Çalışmada sunulan detaylı üç boyutlu dokümantasyona göre, yükleri aktarmada kolonlar ve başlıkları arasında temas yüzeyi azalmıştır. Şekil 2.14'de görüldüğü gibi, doğrusal statik analiz sonuçlarına göre basınçta maksimum gerilmeler her zaman kolon ve başlığı arasındaki alanda oluşmakta olduğu ifade edilmiştir.



Şekil 2.14. Sarnıçtan bir kolonun en kesiti, düzensiz erozyona bağlı (Almaç ve ark., 2016).

Bitelli ve ark. (2016), kültürel miras bağlamında, tarihi bir yapının kesin ve kapsamlı bir dijital araştırmasının, belgelendirme ve restorasyon amaçları için detaylı bir geometrisinin çıkarılması, malzemeye ve yapım özelliklerine dair özel çalışmaları desteklemek ve yapısal analiz için günümüzde oldukça önemli olduğunu belirtmişlerdir. Fotogrametri ve lazer tarama gibi bazı kanıtlanmış geomatik tekniklerin, farklı komplekslikleri ve ölçüleri olan yapıları araştırmak için kullanımının artmış olduğu

belirtilip, çalışmada, lazer taramadan ya da fotogrametriden elde edilen nokta bulutlarını, bütün yapının doldurulmuş hacimli bir modeline dönüştüren yarı otomatik bir yöntem sunulmuştur. Voksel formatında doldurulmuş hacimli model, taranan yapının sonlu eleman modelinin oluşturulması ve analizi için kullanışlı olabileceği aktarılmıştır. Bu çalışmada, iş akışında, operatörün müdahalesini azaltmak ve yapının daha iyi bir tanımını elde etmek hedeflenerek yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Bu sonuçlara ulaşmak için değişken çözünürlüklü bir voksel modeli oluşturulmuştur. Farklı parametreler karşılaştırılmış ve yöntemin farklı adımları 2012 yılında ki bir depremden etkilenen San Felice sul Panaro'da (Modena, İtalya) bulunan tarihi anıtsal bir yapı olan, San Felice sul Panaro kalesinin Kuzey Kulesinin çalışmasında test edilip, doğrulanmıştır.

D'altri ve ark (2018), çalışmalarında sonlu eleman limit analizi yaklaşımına dayanarak (FELA), eğilmiş tarihi duvar yapılarının stabilite analizlerini yapmak için, kullanımının kolay olduğunu belirttikleri bir yöntem sunmaktadırlar. Bu çalışmada önerilen yöntem, otomatik nokta bulutu işlemesini, yapısal amaçlar için gerçek geometrinin üç boyutlu mesh oluşumunu ve sadece aktif birkaç elemanı varsayarak büyük ölçüde optimizasyon değişkenlerini azaltan iki aşamalı bir FELA'yı içeren kapsamlı bir iş akışından oluşmaktadır. Bu yöntemin etkinliğini göstermek için, Caerphilly Kalesinin (Galler, İngiltere) Güney Batı eğik kulesi incelenmiş ve ciddi devrilme açılarına sahip göçme mekanizmaları FELA aracılığıyla değerlendirilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Tarihi Yapıların Mevcut Durumlarının Belirlenmesi

Yapı mirasının korunması toplumsal bir önem arz eder. Bunun en büyük sebebi kimlik, tarih ve önceki medeniyetlerden kalan mirası kaybetme tehlikesi gösterilebilir. Tarihi yapıyı korumak ve geleceğe güvenle aktarmak için yapıların mevcut durumlarının belirlenmesi anahtar faktördür. Özellikle yapının, yapım özellikleri ve kullanılan malzemelerin özelliklerini belirlemek, yapısal ve yapısal olmayan problemleri ortaya çıkarmak adına büyük önem taşır.

3.1.1. Yapının Tarihçesi, Mimari Özellikleri ve Taşıyıcı Sisteminin Belirlenmesi

3.1.1.1. Yapının Tarihçesi ve Mimari Özellikleri

Tarihi yapılar hakkında araştırmalar yapılırken, çalışmanın başında elde edilen bulgular yapının yapım tarihi ve mimarının ya da yaptıran kişinin kimliğinden öteye geçmeyebilir. Bu gibi durumlarda yapının bir yazıtı yoksa ya da yapıya dair net bir kaynak bulunmuyorsa, yapının tarihlendirilmesi için binanın şekli, kullanılan yapım tekniği, plan ve cephe düzeni benzeri özellikleri sayesinde yaklaşık olarak tahmin yürütülebilir (Ahunbay, 1996). Yapının özgün durumuna ait tarihi özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapıya ait kitap, eski kitap, mimarlık tarihi kitapları, eski dergi, gazete, film, eski fotoğraflar, minyatür, gravür, eskizler, sulu boya resimler, eski harita, vaziyet planı, daha önce yapılmış mimari çizimler, krokiler, tapu, çap, röperli kroki, kot-kesit, yazılı kaynak, satış belgeleri, Koruma Kurulu kararları vb. olup olmadığı araştırılmalıdır (Uluengin, 2002)

3.1.1.2. Yapının Taşıyıcı Sisteminin Belirlenmesi

Tarihi yapılara yaklaşımın çok disiplinli ve kapsamlı bir çalışmayı gerektirip bu yapılara müdahale ederken dikkat edilmesi gereken tek ölçüt yapının depremde ayakta kalması değildir. Tarihi yapılarda yapılacak olan her türlü işlemin 1964 tarihli Venedik Tüzüğü'ne uygun olması gerekmektedir. Bu tüzüğün maddeleri şu şekilde kısaca açıklanabilir:

1) Restorasyon ile ilgili tüm işlemler ayrıntılı bir arkeolojik ve tarih araştırmasını izlemelidir. Yapının tarihi ile ilgili çalışmalarda yapının hangi tarihlerde inşa edildiği, yapının ömrü boyunca uğradığı hasarların belirlenmesi ve yapıda gerçekleştirilen onarım ve güçlendirmenin neler olduğu, yapının çevresinin kullanımında değişiklik olup olmadığı gibi sorulara yanıt aranmalıdır.
2) Yapının onarım ve güçlendirilmesinde geleneksel yöntemlerin yetersiz kalması durumunda, yeterliliği bilimsel olarak kabul edilmiş deneylerle ispat edilmiş çağdaş yöntemler kullanılabilir.
3) Yapıda değişik periyotlara ait katkılar korunmalıdır. Restorasyonun amacı, tarzının ilk yapıldığı andaki şekline dönüştürülmesi değildir.
4) Yapıya, eksik parçalar ve bölümler, özgün yapıdan farklı anlaşılacak ve yanlış anlamaya neden olmayacak bir şekilde birleştirilebilir.
5) Restorasyon işlemi sırasında yapılan tüm işlemler ve uygulanan teknikler ayrıntılı biçimde belgelenmelidir.

Taşıyıcı bileşenlerin belirlenmesi için bu bileşenler hakkında fikir sahibi olmak gerekmektedir. Genellikle tek parçadan oluşup silindirik bir yapısı olan, malzeme olarak mermer, granit ya da farklı bir taşın kullanıldığı yapı elemanlarına sütun denir. Sütunlarda yapısal süreklilik, parçaların birbirlerine merkezi pimlerle bağlanmasıyla sağlanmaktadır. Tarihi yapılarda taşıyıcı duvarlar ise kesme taş, kaba yontu taş, moloz taş, tuğla ya da almaşık malzeme (taş ve tuğla) ile inşa edilen ve yapıdan gelen yükleri temele ya da başka bir birime ileten sürekli elemanlardır (Sesigür ve ark., 2007).

3.1.2. Yapısal Hasar Biçimlerinin Tanımlanması ve Bozulmaların İzlenmesi

Yapıların mevcut durumlarını belirlemek için yapının ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Tarihi yapılarda oluşan hasarları tanımlamak bu bağlamda oldukça önemlidir ve yapının belirli kontrollerden geçmesi gerekmektedir. Yığma yapılarda oluşan çatlaklarda öncelikle çatlağın ne zaman oluştuğuna karar verilmelidir. Yeni çatlaklar, daha net ve keskin kenarlı olurken, eski çatlaklar daha kirli ve yuvarlak kenarlıdır. Çatlak yerleri ve yapı üzerinde dağılımı, yapıdaki gerilme dağılımı ile çatlak oluşumunun nedeni hakkında fikir verecektir. Yığma yapı elemanlarında ezilme, basınç türü gerilme yığılması ya da yapı elemanlarının aşırı zayıflığından oluşur. Çatlaklar gibi yığma duvarlardaki dönmeler de yapı taşıyıcı sisteminin hareketi yönünden ipuçları verir.

Bu konuda unutulmaması gereken başka bir nokta ise dönmenin bazen yapım esnasındaki bir hatadan kaynaklanabileceğidir. Yapılarda gözlemlenen farklı oturmalar ise duvar düzlemi içinde oluşan eğik çatlaklarla belirlenebilir (Bağbancı, 2009).

Bozulma, dayanımın azalmasına, malzemenin gevrekleşmesine, malzeme kaybına yol açan ve yapı elemanında genelde dış yüzeyden başlayarak içe doğru işleyen, malzeme özelliklerinin değişmesine neden olan, fiziksel, kimyasal etkilerden kaynaklanan bir süreçtir. Yığma yapılarda oluşan hasarlar; malzeme yapısı, yapım şekli ve yapıya/yapı elemanına etkiyen kuvvet doğrultusuna göre farklılık göstermektedir. Bozulma ve hasar nedenleri çeşitli kaynaklarda farklı biçimlerde değerlendirilmiştir. Hasar nedenleri, genel olarak doğa etkileri ve insanlardan kaynaklanan nedenler olarak sınıflandırılabilir. Doğa etkilerine örnek olarak, doğal afetler, su ve nem etkisi, biyolojik etkiler, zemin türü ve zemin yapısı, insanlardan kaynaklanan nedenlere ise, çevre kirliliği, yapı geometrisi kusurları, hatalı müdahale (mimari ekler, yeni işlev verilmesi vs.), titreşim etkisi, Vandalizm, bakımsızlık ve ihmal gösterilebilir (Vatan, 2010).

3.2. Tarihi Yığma Yapıların Yapı Güvenliğinin Belirlenmesi için Yapısal Analizleri

3.2.1. Tarihi Yapıların Yapısal Analizleri

Tarihi yapıların sayısal modellemesi son dönemlerde akademik ilgi taşımakta olup konuyla ilgili birçok bilimsel araştırma yapılmaktadır. Tarihi yapıların yapısal analizleri, mevcut teknoloji ile yapılan binaların yapısal analizlerine göre oldukça farklılık göstermektedir. Tarihi yapıların taşıyıcı sistemlerinde genellikle kullanılan yığma taş, ahşap ve tuğla gibi malzemelerle, yapının kendi içinde dahi heterojen bir yapıda olduğu söylenebilir. Dolayısıyla, bu taşıyıcı sistem elemanları doğrusal elastik malzeme davranışı sergilemez.

Tarihi yapıların korunması ve restorasyonu odaklı çalışmalar, bu binaların kendine has yapısal özelliklerinin daha iyi anlaşılması için mevcut durumunun özelliklerinin saptanması ve çeşitli hareketlere (yer çekimi, zemin oturmaları, rüzgâr ve deprem gibi) karşı yapı güvenliğinin belirlenmesinde yapısal analizler büyük öneme sahiptir. Kısacası, yapısal analizler, anıtların ve tarihsel yapıların etkili olarak, saygıyla korunmasını sağlama odaklı müdahalelere (teşhis, güvenirlik değerlendirmesi ve

müdahale tasarımı) ve tüm diğer aşamalara katkı sağlar. Güvenilir yapısal analizler, hatalı ve yetersiz sonuçların doğurduğu, hem yapının fazladan güçlendirilip orijinal malzemenin gereksiz kaybına hem de yetersiz müdahale ile oluşacak risklerin önüne geçerek kültürel mirası korur. Beklenildiği gibi, tarihi yapılar, çalışıldıkları dönemlerinin en gelişmiş araçları ile analiz edilmektedir.

Tarihi yapıların analizlerinde, her bir yapının kendine özel durumları sebebiyle, geometrinin ve malzemelerin tanımlanması ile ilgili, bazı zorluklar yaşanmaktadır. Bununla beraber ek olarak, malzeme özelliklerine dair veri yakalamak, iç morfoloji ve hasarı belirlemek ve yapısal düzeni yorumlanmak kolay çalışmalar değildir. Dolayısıyla, tarihi bir yapının hakkında yapılan çalışma sadece hesaplamalara bağlı olarak değil, aynı zamanda detaylı tarihsel araştırmaya, hasarsız test yöntemleriyle derin bir incelemeye ve görüntülemeye dayalı çeşitli tamamlayıcı aktivitelerin yardımıyla yapılmalıdır. Bu yapıları incelerken karşılaşılan bazı problemler aşağıda daha detaylı olarak incelenebilir. Bu çerçevede malzeme, geometri, morfoloji, etki eden yükler, hasar ve müdahaleler, yapı geçmişi önemli parametrelerdir (Roca ve ark., 2010).

Malzeme

Toprak, tuğla, taş ya da ahşap gibi tarihi ve geleneksel malzemelerin mekanik ve dayanım özelliklerinin tanımlanması oldukça karışık olduğundan, bu tip malzemelerle modelleme yapmak günümüzde dahi zor bir süreçtir. Özellikle, yığma yapı kendi kompozit karakterini oluşturup, çekmede kırılgan (neredeyse çekme kuvvetlerini hiç taşımaz), sürtünmede kayma özellikleri gösteren anizotrop bir yapıdadır. Malzeme mekaniğinin ve dayanımının özelliklerinin belirlenmesine ve matematiksel olarak tanımlanmasına ciddi bir efor harcanmasına rağmen, yığma yapının tepkisinin güvenilir ve etkili simülasyonu hala gelişmekte olan deneysel ve teorik çalışmalara bağlı olarak ilerlemektedir. Tuğla ya da taşla oluşturulan tarihi binalar, aynı yapıda ya da birimde dahi heterojen özellikler gösterebilmektedir. Bununla beraber, bu yapılarda bir de farklı malzemelerle yapılmış, eklemeler ve tamirler bulunmaktadır. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi yapının kendisi ve orijinal malzeme yüzünden kısıtlanmaktadır. Bu malzemelerin tanımlanması yapısal analizler için oldukça önemli olup, bu malzemelerin karakteristikleri ile ilgili bilgi edinmek için hasarsız ya da az hasarlı test yöntemleri kullanılmalıdır. Pratikte ise sadece kısıtlı bilgi toplanabilmektedir.

Geometri

Tarihi yapılar genellikle karışık geometrilere sahiplerdir ve bu da taşıyıcı sistem elemanlarının temel yapısal davranış ilkeleriyle yapısal davranışın belirlenmesini zorlaştırır. Sık sık düz ya da eğimli elemanlara rastlanmaktadır. Bir boyutlu (kemerler), iki boyutlu (tonozlar, kubbeler) ve üç boyutlu elemanları (dolgu, sarkıt) aynı yapıda gözlemlemek mümkündür. Narin elemanların da iri elemanlarla beraber kullanıldığı görmek de sıradan değildir. Bununla beraber, günümüzde özellikle sonlu elemanlar analizi ile bu karışık geometrilerin isabetli çözümlemelerini yapmak mümkündür. Buna bağlı olarak geometri, tarihi yapıların analizlerinde belki de çözülmesi en kolay problemlerden biridir.

Morfoloji

Tarihi binaların, yapısal analizleri esnasında karşılaşılan bir başka problem de yapı elemanlarının ve bağlantılarının morfolojik tanımlanmasıdır. Tarihi yapılarda, elemanlar genellikle homojen değildir ve bu elemanlarda birden fazla tabakaya, dolguya, malzemeye, boşluklara ve metal eklentilere rastlanılabilinir. Dolayısı ile morfolojiyi ve bağlantıları detaylı olarak modellemek, hesaplama açışından oldukça zahmetli bir iştir. Yine de asıl zorluk, az hasarlı ya da hasarsız yöntemler yardımıyla fiziksel özelliklerin belirlenmesidir.

Etki Eden Yükler

Tarihi yapılar uzun sürede yer çekimi kuvvetlerinin de dahil olduğu, deprem, çevresel faktörler (ısıl etkenler, kimyasal ya da fiziksel etkiler), mimari değişiklikler, kasıtlı yıkımlar ve yetersiz restorasyonlar gibi insan faktörlerinin de dahil olduğu farklı türlerde hareketlere ve bu hareketlere bağlı yüklere maruz kalmaktadır ve kalmaya devam etmektedirler. Bu hareketlerin çoğu, zamanla tanımlanabilmektedir. Bazıları tersinir ve tekrarlı, bazıları ise uzun sürelerde gelişmekte olan hareketlerdir.

Hasar ve Müdahaleler

Genel olarak tarihi yapılara müdahale etmek yapının tepkilerinde ciddi değişikliklere sebep olmaktadır. Hasar ve deformasyonlar, yapının mevcut haline göre,

gerçekçi olarak modellenmelidir. Yapıların malzeme bütünlüklerini ve kapasitelerini bozan bu hasarlar göz ardı edilmemelidir.

Yapı Geçmişi

Doğru ve güvenilir bir yapısal analiz için binanın geçmişini araştırmak çok önemlidir. Binanın tarihi boyunca hangi tür yüklerin etkisi altında kaldığı ve taşıyıcı sistemini oluşturan yapı malzemelerinin mekanik ve dayanım özellikleri ile ilgili belirsizlik, yapısal analiz sonucunda tarihi binanın yapısal performansı hakkında elde edilen sonuçların güvenliğini azaltır. Yapı tarihi modellemede göz ardı edilmemesi gereken ana unsurlardan biridir. Yapı tepkilerinde ve mevcut hasarlar üzerinde söz sahibi olan yapı geçmişi ile ilgili unsurlar şunlardır: yapım işlemi, mimari müdahaleler, eklentiler, dışarıdan gelen etkiler, doğal afetler, ve uzun zamanlı çürüme ya da hasarlanma. Geçmiş bir bilgi kaynağıdır. Pek çok durumda, yapının tarihi performansı, mühendislere yapı performansı ve dayanımı ile ilgili bilgi verir. Örneğin, geçmiş depremlerde sergilenen performanslar sismik kapasitenin anlaşılmasında yardımcı olur.

Tarihi yapıların ve anıtların yapısal davranışı ve performansı sayısal hesap yöntemleriyle üç aşamada belirlenir. Öncelikle yapının matematiksel hesap modeli hazırlanır. Daha sonra uygun bir analiz yöntemiyle belirlenen yükler ve diğer etkilere karşı sayısal çözümleme gerçekleştirilir. Binanın yapısal davranışının ve performansının belirlenmesindeki en önemli adım hesap sonuçlarının değerlendirilmesidir. Bu aşamada yapılan yorumların mühendislik dışındaki diğer disiplinler tarafından da kolaylıkla anlaşılabilmesi sağlanmaktadır. (Can ve Ünay, 2012).

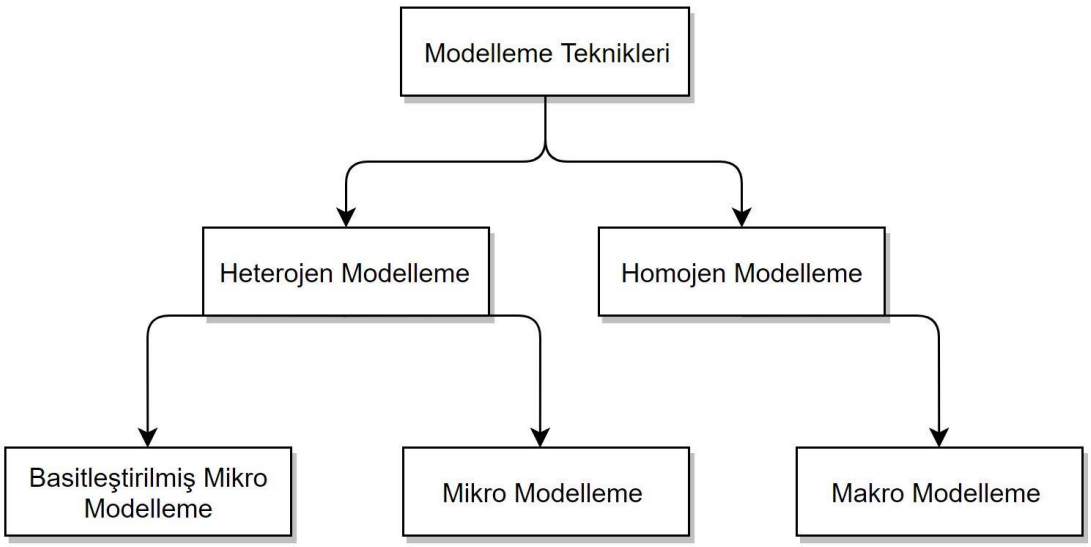
3.2.2. Tarihi Yapıların Sayısal Modellemesi

Tarihi binaların ve anıtların yapısal analizlerinin en önemli aşaması sayısal modellemeleridir. Farklı malzemelerden üretilmiş ve değişken kesit geometrisine sahip taşıyıcı sistem elemanlarının mekaniğin temel kurallarına göre doğru ve uyumlu bir şekilde matematiksel terimlere dönüştürülmesi olarak tanımlanabilir. Tarihi binaların ve anıtların yapısal analizleri için genellikle sonlu elemanlar yöntemi kullanılır. Bu yöntemle, katı mekaniği, sıvı mekaniği, akustik, elektromanyetizma, biyomekanik, ısı transferi gibi alanlarda karşılaşılan karmaşık sınır koşullu sistemlerin, düzgün geometriye

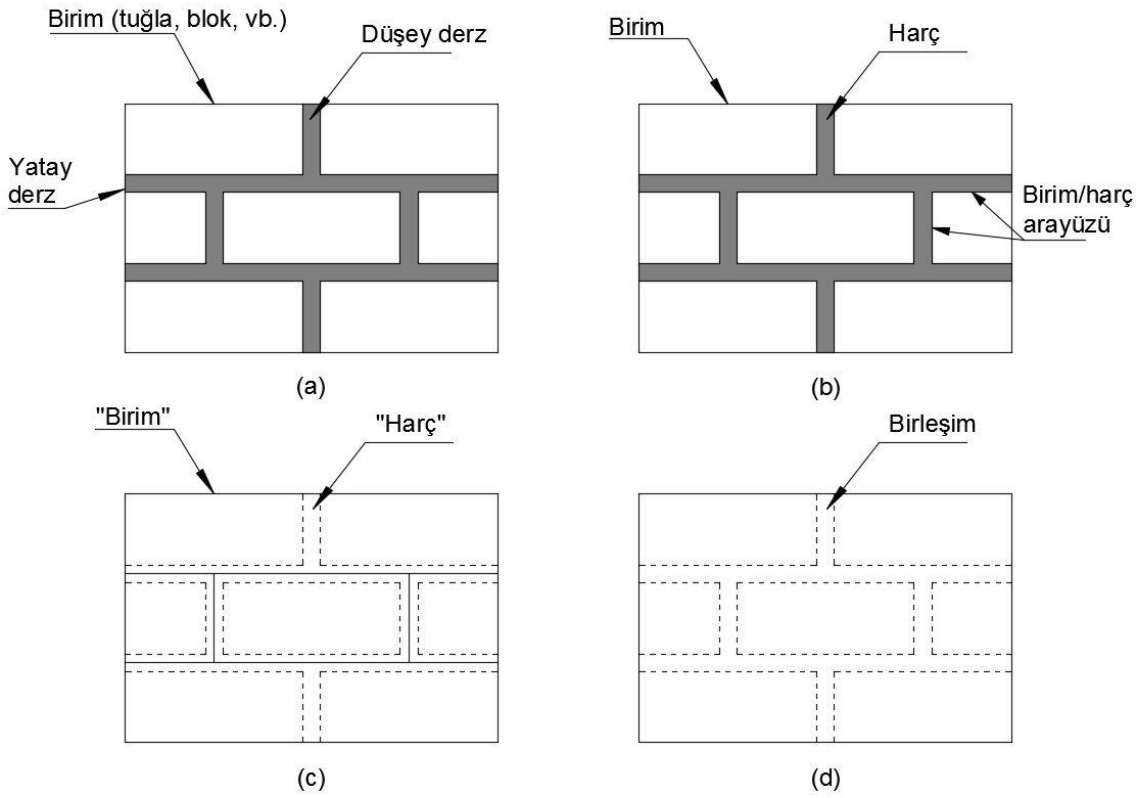
sahip olmayan sistemlerin, kararlı hal, zamana bağlı ve öz değer problemlerin, lineer ve lineer olmayan problemlerin çözümlerinde başvurulur.

Sonlu elemanlar analizi için oluşturulacak analitik modelin doğruluğu için yapının geometrik boyutları, mesnetler ve eleman birleşim noktaları, malzeme davranışları, sınır şartları, yapının taşıdığı ve maruz kaldığı yükler ve serbestlik derecelerinin gerçeğe yakın oluşturulması gerekmektedir. Şekil 3.1'de farklı modelleme tekniklerinin oluşturduğu diyagram verilmiştir. Tarihi yapılarda, sonlu elemanlar analizinin kullanımı esnasında, özellikle, mikro ve makro modelleme olmak üzere iki farklı yöntem öne çıkmaktadır. Mikro modellemede, yapının belirli bir parçası ve bu parçayı oluşturan malzemeler ayrı ayrı modellenirken, makro modellemede yapının tümü modellenerek ele alınır. Mikro modelleme aynı zamanda kendi içinde, detaylı ve basitleştirilmiş mikro modelleme diye ikiye ayrılır (Şekil 3.2).

Modelleme stratejilerinin biri, diğerinden iyi değildir çünkü farklı alanlarda farklı modelleme yapıları kullanılması doğrudur. Mikro modelleme stratejileri genellikle tarihi yapılarda lokal davranışın anlaşılmasında katkı verirken, makro modellemeler, gerilmelerin tamamında eşit oluştuğu kabul edilen büyük ölçülere sahip duvar elemanlarında kullanılması tercih edilir (Lourenço, 1999).



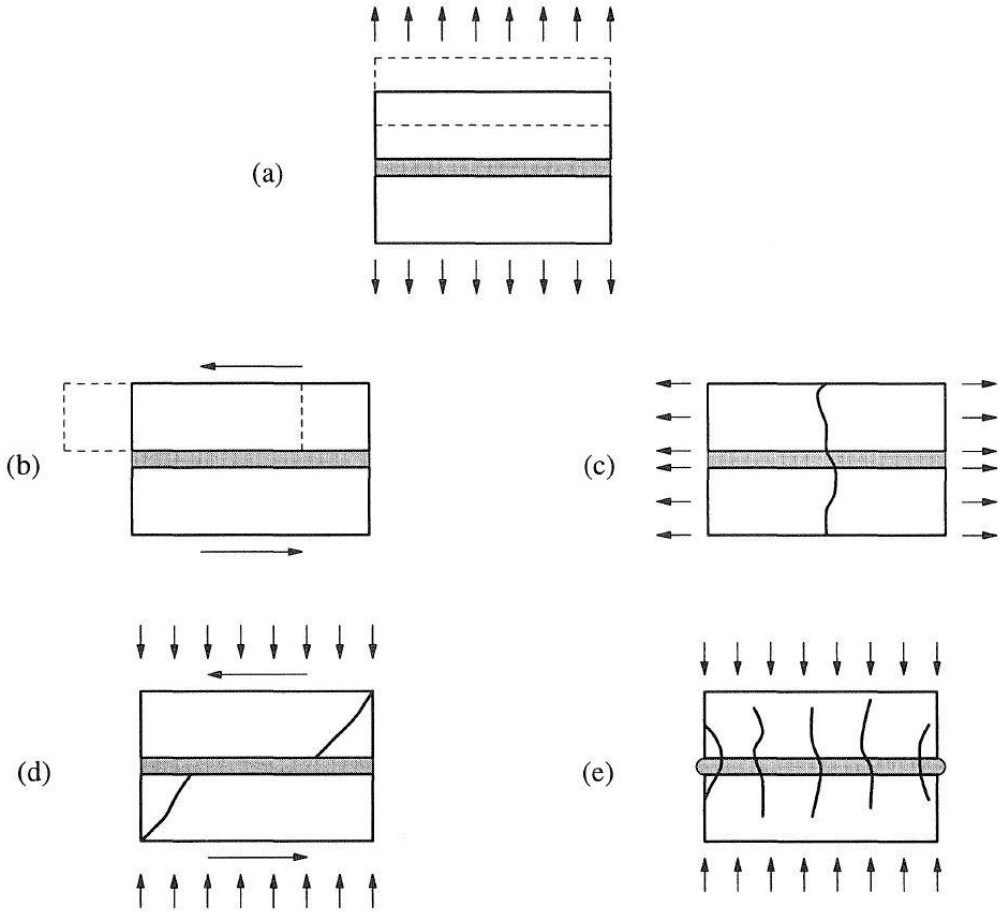
Şekil 3.1. Modelleme teknikleri diyagramı.



Şekil 3.2. Yığma yapılar için modelleme stratejileri; a) Yığma örneği, b) Detaylı mikro-modelleme, c) Basitleştirilmiş mikro-modelleme, d) Makro-modelleme (Lourenço, 1999).

3.2.2.1. Mikro Modelleme

Mikro modeller, muhtemelen yığma yapı davranışını anlamak için en iyi araçtır. Bu yaklaşımın en büyük avantajı bütün göçme mekanizmalarını hesaba katmasıdır. Güvenilir bir mikro model, yığma yapının özelliklerini belirlemek için temel tipte göçme mekanizmalarını içerir ve bunlar Şekil 3.3'de (a- birleşim çekme çatlağı, b- birleşim kayması, c- birim boyuna çekme çatlağı, d- birim diyagonal çekme çatlağı, e- yığma ezilmesi) verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, a ve b birleşim, c, birim, d ve e ise hem birleşim hem birim davranışları sonucu oluşmaktadır.

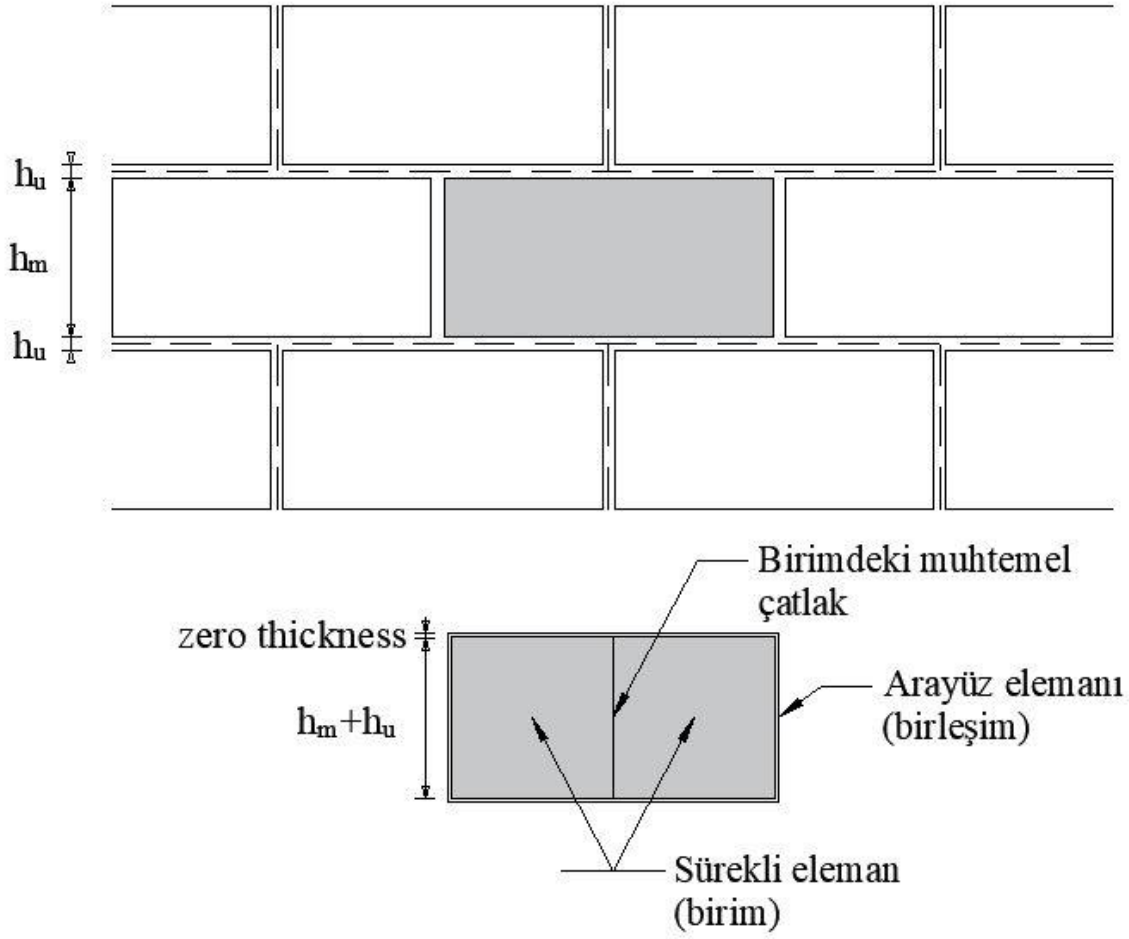


Şekil 3.3. Mikro modelleme için tanımlanan göçme mekanizmaları; a) Birleşim çekme çatlağı, b) Birleşim Kayması, c) Birim boyuna çekme çatlağı, d) Birim diyagonal çekme çatlağı, e) yığma ezilmesi (Lourenço, 1999).

Mikro modeli oluşturmak için bu hasarların tamamı aynı modelde toplanmıştır. Bunun için de, Şekil 3.4'de görüldüğü gibi, birimlerin birbirleriyle temas halinde olması için, birleşimler, uzunluğu olmayan elemanlar olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla birim ara yüzü akma kriteri yukarıda bahsedilen göçme mekanizmalarının tamamını, tek eksenli çekme hasarı hariç tanımlamaktadır. Gerilme ve şekil değiştirme için genelleştirilmiş lineer elastik bağıntı şu formda yazılabilir.

$$\sigma = D\varepsilon$$

iki boyutlu bir düzenleme için, $\sigma = \{\sigma, \tau\}^T$, $D = diag\{k_n, k_s\}$ and $\varepsilon = \{\Delta u_n, \Delta u_s\}^T$, n ve s sırasıyla, normal ve kayma modüllerini simgelemektedir. Elastik rijitlik matrisi D iki yığma bileşeninden (birim ve birleşim) ve harç (birleşim) kalınlığından elde edilebilir. Şekil 3.3.'de görüldüğü gibi, uzunluğu olmayan birleşim elemanına rağmen harç kalınlığı (h_u) birimlere (h_m) aktarılmıştır.



Şekil 3.4. Mikro modellemede kullanılan uzunluğu olmayan elemanların birleşim ve birim elemanlarla kullanımı (Lourenço, 1999).

Elastik rijitlik matrisi D 'nin bileşenleri şu şekilde yazılabilir,

$$k_n = \frac{E_u E_m}{h_m(E_u - E_m)}$$

$$k_s = \frac{G_u G_m}{h_m(G_u - G_m)}$$

burada E_u ve E_m elastisite modüllerini, G_u ve G_m sırasıyla, birim ve harç için kayma modüllerini, h_m ise birleşimin kalınlığını simgelemektedir.

3.2.2.2. Makro Modelleme

Çok sayıda elemanı olan yığma yapıların analizlerini yapmak ancak ortalama gerilme – şekil değiştirme ilişkisi kompozit olarak tanımlanan makro modellerle mümkündür. Yığma yapının etkin davranışı, kullanılan birimler (tuğla, taş, vb.) ve birleşimlerin (harç), bu elemanların özellikleri izotropik olsa bile, geometrik düzeninden ortaya çıkan anizotropik özellikleri taşımaktadır. Modern plastisite sistemi genel olarak hem izotropik, hem de anizotropik plastisite modellerini eşit derecede iyi uygulayacak kadar yeterlidir. Bununla beraber, birçok anizotropik plastisite modelinin sadece teorik ve deneysel bakış açılarından önerildiği görülmektedir (Hill, 1948; Tsai ve Wu, 1971).

Makro modelleme (ya da kompozit) perspektifinde, yığma yapıların gerçeğe yakın bir analizi, tüm gerilme durumları için malzeme tanımını gerektirir. Akma yüzeyi, her bir malzeme ekseni boyunca farklı sertleşme / yumuşama davranışını içeren anizotropik malzeme davranışının güçlü bir karşılığı ile modern plastisite kavramlarının avantajlarını birleştirir. Bir ortotropik akma yüzeyinin sadece ana gerilmeler açısından bir karşılığının mümkün olmadığı da belirtilmelidir.

Yığmanın yumuşama davranışı, hasarlı malzemenin gerilim ve gerilme kavramlarının geçerli olduğu bir süreklilik olarak kabul edildiği yığılı bir yaklaşımla modellenmiştir. Bu bakımdan, lokal hasar, birim çatlak alan, G_f, için harcanan enerjiye eşdeğer bir uzunlukla ilgili olan skaler, κ, ile tanımlanabilir. Bir sonlu elemanlar analizinde, bu eşdeğer uzunluk, eleman ağı (mesh) boyutuna referans olabilecek bir ölçüye karşılık gelmelidir. Böylece, elde edilen sonuçlar, eleman ağı hassasiyetini ayarlama konusunda yardımcı olabilir. h ile gösterilen eşdeğer uzunluk, genel olarak seçilen eleman tipine, eleman boyutuna, eleman şekline, integrasyon şemasına ve hatta söz konusu probleme bağlıdır (Bazant ve Oh, 1983).

3.2.3. Tarihi Yapıların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi

Sonlu elemanlar metodu ya da sonlu elemanlar analizi mühendislik problemlerini çözmek için oluşturulmuş sayısal bir metottur. Genel olarak, yapı analizlerinde, ısı transferi problemlerinde, akışkanlar ve benzeri alanlarda problemlerde kullanılmaktadır. Karmaşık geometriye, yüklemelere ve malzeme özelliklerine sahip problemler için kullanılır. Bu problemlerin analitik çözümü genellikle kısmi diferansiyel

denklemler için değer problemlerini sınırlayan bir çözümü gerektirir. Problemin sonlu elemanlar yöntemi formülasyonu, matematiksel bir denklem sistemi ile sonuçlanır. Bu metot, bilinmeyenlerin yaklaşık değerlerini, etki alanı üzerindeki farklı sayıdaki noktalarda verir. Problemi çözmek için, büyük bir sistemi sonlu elemanlar olarak adlandırılan daha küçük ve daha basit parçalara böler. Bu sonlu elemanları modelleyen basit denklemler daha sonra tüm problemi modelleyen daha büyük bir denklem sisteminde birleştirilir. Daha sonra sonlu elemanlar yöntemi, ilgili bir hata fonksiyonunu en aza indirerek, bir çözümün yaklaşık çözümüne ulaşmak için varyasyon analizinden varyasyonel yöntemleri kullanır. Sonlu elemanlar yöntemi ile bir olayı incelemeye ya da analiz etmeye sonlu elemanlar analizi denilir (Logan, 2011).

Bütün bir problemin daha küçük parçalara ayrılıp incelenmesinin bir takım avantajları vardır:

- Karmaşık geometrinin gerçeğe yakın gösterimi
- Farklı malzeme özelliklerinin dahil edilmesi
- Toplam çözümün kolay gösterimi
- Bölgesel etkilerin kolay gösterimi

Bu yöntem genel olarak, problemlerin alanlarını, bir dizi eleman denklemleriyle orijinal problemi temsil eden alt alanlara bölüp, ardından tüm eleman denklemlerini, son çözümde, sistematik olarak yeniden birleştirip global bir denklem sistemi oluşturur. Global denklem sistemleri, bilinen çözüm tekniklerine sahiptir ve sayısal bir çözüm elde etmek için orijinal problemin başlangıç değerlerinden hesaplanabilir (Reddy, 2006).

Sonlu elemanlar yöntemi, yapısal mekaniğin karmaşık problemlerinin çözümü için geliştirilen önemli bir tekniktir ve karmaşık sistemler için en tercih edilen yöntemlerden biridir. Sonlu elemanlar yönteminde, yapısal sistem düğüm adı verilen ayrı noktalarda birbirine bağlı bir dizi sonlu elemanlar tarafından modellenmiştir. Elemanlar kalınlık, ısıl genleşme katsayısı, yoğunluk, Young Modülü, kayma modülü ve Poisson oranı gibi fiziksel özelliklere sahip olabilir.

Bu yöntemin başlangıcı, yer değiştirme veya rijitlik matrisi yaklaşımı kavramlarının sunulduğu, yapıların matris analizi olarak düşünülebilir. Sonlu elemanlar kavramı, 1950'lerde mühendislik yöntemlerine dayanarak geliştirilmiştir.

Sonlu elemanlar yönteminde, genel kavramda, 4 farklı çeşit eleman vardır:

1- Eksenel, eğilme ve burulma rijitlikleri gibi özelliklere sahip düz ya da kavisli bir boyutlu elemanlar: bu tip elemanlar, kabloları, telleri, makasları, kirişleri, ızgaraları ve çerçeveleri modellemek için kullanılır. Düz elemanlar, genellikle her iki uçlarında birer tane olmak üzere, iki düğüm noktasına sahipken, kavisli elemanların uç düğüm noktalarını içeren en az üç düğüme sahip olması gerekmektedir.

2- Membran etkisiyle (düzlem gerilimi ve şekil değiştirmesi) sadece düzlemsel kuvvetlere ve enine kesme gerilmesi ve eğilme hareketinin (levhalar ve kabuklar) etkisiyle yatay yüklere direnen plaklara direnç gösteren iki boyutlu elemanlar: düz veya kavisli üçgenler ve dörtgenler gibi çeşitli şekillere sahip olabilirler. Düğüm noktaları genellikle eleman köşelerine yerleştirilir ve daha az hata payı gerektiren durumlarda, eleman kenarları boyunca ve hatta elemanın içinde ek düğüm noktalarına sahip olabilirler. Elemanlar, asal tabaka kalınlığının orta yüzeyinde konumlandırılmıştır.

3- Membranlar, kalın levhalar, kabuklar ve katılar gibi simetrik eksenli problemler için simit şekilli elemanlar: elemanların, enine kesiti, daha önce tarif edilen tiplere benzer, ince plaklar ve kabuklar için bir boyutlu ve katılar, kalın levhalar ve kabuklar için iki boyutlu.

4- Makine parçaları, barajlar, bentler veya zemin kütleleri gibi üç boyutlu katıların modellenmesi için üç boyutlu elemanlar: ortak eleman şekilleri tetrahedralleri ve hekzahedralleri içerir. Düğüm noktaları köşelere ve çoğunlukla eleman yüzlerine veya elemanın içine yerleştirilir.

Elemanlar yalnızca dış yüzeylerindeki düğümlerle birbirlerine bağlıdır ve hep birlikte modeli oluşturulan yapının tamamını kapsamalıdır. Düğüm noktaları, dönmeleri, burulmaları ve özel uygulamaları, yer değiştirmelerin yüksek mertebeden türevlerini içerebilen düğüm (vektör) yer değiştirmelerine veya serbestlik derecelerine sahiptir. Düğüm noktaları yer değiştirdiklerinde, elemanları, elemanın kendi denklemlerine göre

etkileyecektir. Başka bir deyişle, elemandaki herhangi bir noktanın yer değiştirmesi, düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin enterpolasyonuna uğrayacaktır (Przemieniecki, 1985).

Uygulama açısından bakıldığında, sistemi şu şekilde modellemek önemlidir:

- Modelin ebatlarını azaltmak için simetri ya da anti simetri koşulları kullanılır.
- Herhangi bir süreksizlik hali dahil yer değiştirmelere uyumluluk, özellikle birleşik elemanlar farklı tip malzeme ve kalınlıkta olduğunda, düğüm noktalarında ve tercihen eleman kenarları boyunca sağlanır. Pek çok düğüm noktasının yer değiştirmelere uyumluluğu genellikle sınır değerler ile uygulanır.
- Elemanların davranışları, hem lokal hem de global olarak asıl sistemin dominant etkileriyle benzeşmelidir.
- Eleman ağı (mesh), daha gerçekçi bir çözüm oluşturmak için, doğru hassasiyette olmalıdır. Gerçekçiliğin sağlanması için, eleman ağı hassasiyeti ile oynanır. Daha gerçekçi sonuçlar için elemanların en-boy oranı mümkün olduğunca birbirlerine yakın olmalı ve elemanın yüksek gradyanlı bölümlerinde daha hassas eleman ağı (mesh) kullanılmalıdır.
- Simetri eksenlerinde düğüm noktalarına özel hassasiyet gösterilerek uygun mesnetler kullanılmalıdır.

Sonlu elemanlar yöntemi, farklı bakış açılarıyla tanımlansa da, yapısal analiz için virtüel iş denklemleri ve enerji denklemlerini kullanarak daha geleneksel bir yaklaşım izler. Virtüel iş prensibi, hem doğrusal hem de doğrusal olmayan malzeme davranışlarına uygulanabilir olduğundan daha geniş bir kullanıma sahiptir ve enerjinin korunmasını ifade etmektedir: korunumlu sistemler için bir takım uygulanan kuvvetlerle sisteme eklenen iş, yapı bileşenlerinin şekil değiştirme enerjisi formunda sistemde depolanmış enerjiye eşittir. Yapısal sistemler için virtüel yer değiştirmeler ilkesi, dış ve iç virtüel işin matematiksel özdeşliği ile ifade edilir:

$$Harici\ virtüel\ iş = \int_V \ \delta\, \varepsilon^T \sigma\, dV \qquad (1)$$

Diğer bir deyişle, harici kuvvetler tarafından sistem üzerinde uygulanan işlerin toplamı, sistemi oluşturan elemanlarda şekil değiştirme enerjisi olarak depolanan işe

eşittir. Yukarıdaki denklemin sağ tarafındaki dahili virtüel iş, her bir eleman üzerinde oluşan virtüel işin toplamı ile bulunabilir. Ek olarak, her bir elemanın tepkisini tanımlayan kuvvet-yer değiştirme fonksiyonlarının kullanılması gerekir. Bu nedenle, yapının yer değiştirmesi her bir elemanın toplu olarak verdiği tepki ile tanımlanmaktadır. Denklemler, sadece sistemin bir bütün olarak tepkisini tanımlayan tek bir denklemden ziyade, yapının her bir elemanı için ayrı yazılır. Sonraki bölümlerde gösterildiği gibi, Denklem (1)'den aşağıdaki denge denklemi oluşur:

$$R = Kr + R^{\circ} \tag{2}$$

Burada **R**, düğüm noktalarındaki kuvvetlerin vektörü, sistem düğümlerine uygulanan harici kuvvetleri göstermekte; **K**, sistem rijitlik matrisi; **r**, sistem düğüm noktalarının vektörü; **R°**, eşdeğer düğüm noktaları kuvvetleri vektörü, R'de bulunan düğüm kuvvetleri dışındaki tüm harici etkileri temsil eder. Bu harici etkiler, yüzey kuvvetlerini, gövde kuvvetlerini, termal etkileri, başlangıç gerilmelerini ve şekil değiştirmeleri içerebilir.

Mesnetler dikkate alındığı zaman, düğüm yer değiştirmeleri doğrusal denklem sistemlerinin çözümüyle:

$$r = K^{-1}(R - R^{\circ}) \tag{3}$$

Daha sonra, her bir elemandaki şekil değiştirme ve gerilmeler şöyle bulunur:

$$\epsilon = Bq \tag{4}$$

$$\sigma = E(\epsilon - \epsilon^{\circ}) + \sigma^{\circ} = E(Bq - \epsilon^{\circ}) + \sigma^{\circ} \tag{5}$$

Burada, **q**, bir düğüm noktasının yer değiştirmelerinin vektörü, hesaba katılan elemanlara ait olan sistemin yer değiştirme vektörünün bir alt kümesi; **B**, düğüm deplasmanını (q) elemanın herhangi bir noktasında şekil değiştirmelere çeviren, şekil değiştirme – yer değiştirme matrisi; **E**, etkin şekil değiştirmeleri elemanın her hangi bir noktasında gerilmelere çeviren elastisite matrisi; **ϵ°**, elemanlardaki dahili şekil değiştirmelerin vektörü; **σ°**, elemanlardaki dahili gerilmelerin vektörüdür.

q, sıradan bir elemanın, düğüm deplasmanlarının vektörü olsun. Elemanın farklı herhangi bir noktasındaki yer değiştirmeler, interpolasyon fonksiyonlarının kullanımıyla:

$$u = Nq \tag{6}$$

Burada, **u**, elemanın herhangi bir noktasındaki deplasman vektörü; **N**, interpolasyon fonksiyonları olarak işlev gören şekil fonksiyonları matrisidir. Denklem (6)'dan

- Virtüel düğüm yer değiştirmelerinin bir fonksiyonu olan virtüel yer değiştirmeler:
  $$\delta u = N\delta q \tag{7}$$
- Eleman düğüm noktalarının yer değiştirmelerinden kaynaklanan elemanlardaki şekil değiştirmeler:
  $$\epsilon = Du = DNq \tag{8}$$
  Burada, **D**, lineer elastisite teorisi kullanılarak yer değiştirmeleri şekil değiştirmelere dönüştüren diferansiyel operatörlerin matrisi. Denklem 4 ile Denklem 8'i birleştirdiğimizde:
  $$B = DN \tag{9}$$
- Virtüel şekil değiştirme, elemanın virtüel düğüm deplasmanları ile tutarlı olarak:
  $$\delta\epsilon = B\delta q \tag{10}$$

V^e hacmine sahip tipik bir elemanın, dahili virtüel iş denklemi Denklem 5 ve 10'dan elde edilen sonuçların Denklem 1'de kullanılmasıyla:

$$dahili\ virt\ddot{u}el\ i\text{ş} = \int_{V^e} \delta\varepsilon^T \sigma\, dV^e = \delta q^T \int_{V^e} B^T\{E(Bq - \epsilon^\circ) + \sigma^\circ\}\, dV^e \tag{11}$$

Öncelikle referans kolaylığı için, tipik bir eleman ile ilgili aşağıdaki matrisler tanımlanabilir:

Eleman rijitlik matrisi $K^e = \int_{V^e} B^T EB\, dV^e$ (12)

Eşdeğer eleman yük vektörü $Q^{0\epsilon} = \int_{V^e} -B^T(E\epsilon^\circ - \sigma^\circ)\, dV^e$ (13)

Bu matrisler genellikle sayısal integrasyon için Gauss tümlevi kullanılarak sayısal olarak değerlendirilir. Kullanımları aşağıdaki şekilde Denklem 11'i sadeleştirir:

$$dahili\ virt\ddot{u}el\ i\text{ş} = \delta q^T(K^e q + Q^{0\epsilon}) \tag{14}$$

Düğüm yer değiştirme vektörü, **q**, sistem düğüm yer değiştirmelerinin bir alt kümesi olduğu için, eleman matrislerinin boyutlarını yeni kolon ve satırları 0'larla genişleterek r ile q'yu yer değiştirebiliriz:

$$dahili\ virtüel\ iş = \delta r^T(K^e r + Q^{0\epsilon}) \quad (15)$$

Basitlik açısından, satırları ve sütunları uygun şekilde yeniden düzenlemenin yanı sıra genişletilmiş bir boyuta sahip olan eleman matrisleri için aynı sembolleri kullanırız.

Tüm elemanlar için dahili virtüel işin toplamı (Denklem 13), Denklem 1'in sağ tarafını verir:

$$Sistem\ dahili\ virtüel\ iş = \sum_e \delta\, r^T(k^e r + Q^{0\epsilon}) = \delta r^T(\sum_e k^e)r + \delta r^T \sum_e Q^{0\epsilon} \quad (16)$$

Denklemin sol tarafı göz önünde bulundurularak, sistem harici virtüel işi aşağıdakilerden oluşur:

- Düğüm kuvvetlerinin yaptığı iş $R = \delta r^T R$ (17)
- Elemanların kenarları veya yüzeylerinin S^e kısmındaki dış kuvvetler T^e tarafından ve gövde kuvvetleri V^e tarafından yapılan iş

$$\sum_e \int_{s^e} \delta u^T T^e dS^e + \sum_e \int_{v^e} \delta u^T f^e dV^e$$

Denklem 7'den;

$$\delta q^T \sum_e \int_{s^e} N^T T^e dS^e + \delta q^T \sum_e \int_{v^e} N^T f^e dV^e$$

Ya da:

$$-\delta q^T \sum_e (Q^{te} + Q^{fe}) \quad (18)$$

Burada, aşağıdaki ek eleman matrisleri tanımlanır:

$$Q^{te} = -\int_{s^e} N^T T^e dS^e \quad (19)$$

$$Q^{fe} = -\int_{V^e} N^T f^e dV^e \quad (20)$$

Yine, sayısal integrasyon onların değerlendirmeleri için uygundur. Denklem 18'deki q ile benzer bir ikame, r ile Q^{te} ve Q^{fe} vektörlerinin yeniden düzenledikten ve genişlettikten sonra verir:

$$-\delta r^T \sum_e (Q^{te} + Q^{fe}) \quad (21)$$

Denklem 17 ve 18'i ekleyerek, Denklem 16'ya eşitlersek:

$$\delta r^T R - \delta r^T \sum_e (Q^{te} + Q^{fe}) = \delta r^T \left(\sum_e k^e \right) r + \delta r^T \sum_e Q^{0\epsilon}$$

Virtüel yer değiştirmeler δr, rastgele olduğu için, önceki denklem şu şekilde sadeleşir:

$$R = \left(\sum_e k^e \right) r + \sum_e (Q^{0e} + Q^{te} + Q^{fe})$$

3.2.4. Lazer Tarama

Lazer tarama cihazları nesne ile temas etmeden, o nesnenin nokta bulutlarını toplayan ölçüm cihazlarıdır. Ölçüm için konumlandığı pozisyondan gönderdiği lazer ışınlarıyla cisimleri, çok sık aralıklarda koordinatlı nokta kümeleri halinde bilgisayar ortamına aktarır. Her bir nokta, ölçümden sonra X, Y ve Z koordinatları değerleri ile atanır ve her noktanın aynı zamanda renk ve yansıma değeri de kaydedilir. Nispi hassasiyet, yani mutlak hassasiyet ile ölçüm aralığı arasındaki oran, 4/10'dan iyidir. Bu teknoloji, haritacılık ve ölçüm uygulamaları için giderek daha önemli bir hale gelmektedir. Lazer taramada nokta sıklığı ya da çözünürlüğü, tarayıcı odak noktasından çıkan iki ışın demeti arasındaki açı değerine göre, mesafe arttıkça sıklığı azalan bir yapıdadır.

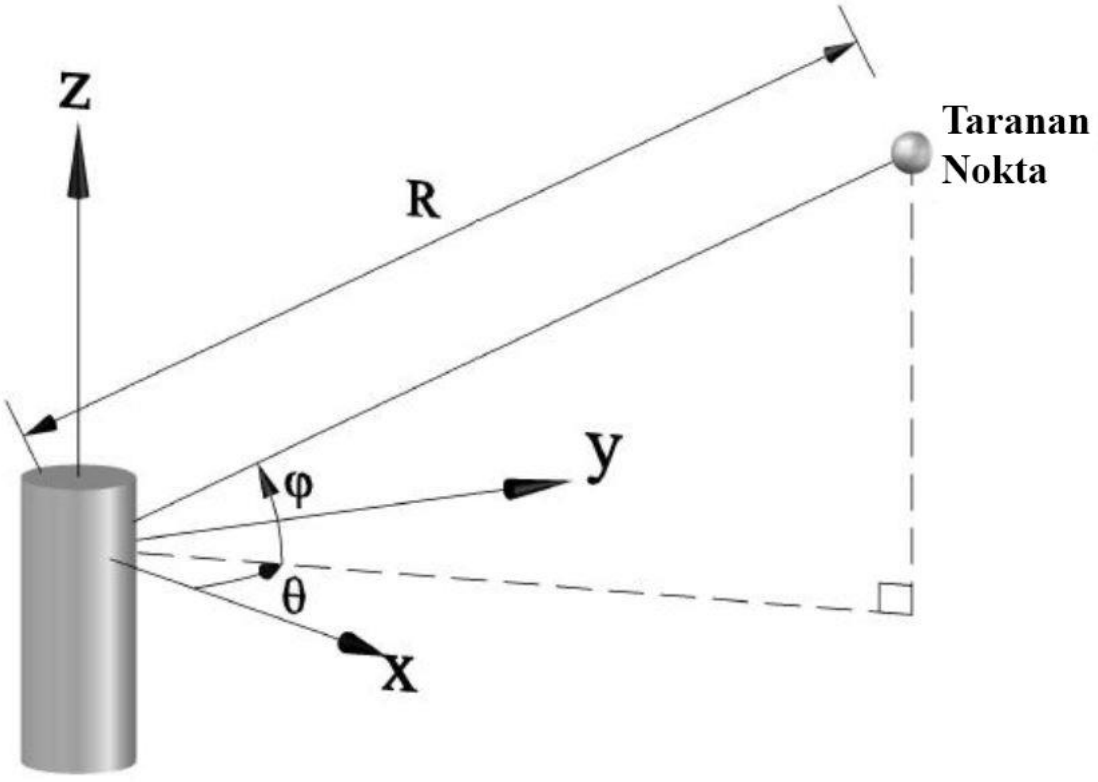
Lazerler, kolay anlaşılır ve tek renkli olan elektromanyetik radyasyon yayarlar. Yayılan ışınlar çok yönlüdür, çok fazla enerji içerir, yüzlerce metrelik uzunlukları birleştirir ve nesnelerin yüzeylerinden yansır. Bunlar çok kullanışlı özelliklerdir ve bu nedenle lazer, geniş bir boyut ve şekle sahip nesnelerin üç boyutlu modellerini oluşturabilen mesafe ölçüm cihazları arasında en kullanışlı olanıdır.

Klasik ölçme yöntemleriyle (manuel ya da Total Station) yapılan ölçümlerde insan faktörü önem taşırken, elde edilen ölçümlere ait verilerin güvenilirliği ölçümü yapan kişinin tecrübesine, algısına, mesleki bilgisine ve benzeri birçok faktöre bağlıdır. Bu verilerin sağlamasını yapmak ya da kontrol etmek çoğu zaman güçtür. Ancak üç boyutlu lazer tarama ile farklı konumlarda ve farklı zamanlarda yapılan ölçümler birlikte değerlendirmeye sokularak çok hızlı ve yüksek hassasiyette otomatik olarak bir araya getirilebilmektedir. Klasik yöntemlerdeki hata faktörleri bu teknikte ortadan kalkar.

Lazer sensörünün alıcı kısmı tarafından yakalanan geri dönen enerji, matematiksel anlamla ifade edilen bir nesnenin yüzeyinin yansıtıcı özelliklerine yani yansıma

katsayısına bağlıdır. Yansıma katsayısı, yansıyan enerji ile geri dönen enerji arasındaki orandır. Pürüzsüz ve parlak yüzeylerin yansıma katsayıları 70-100% arasındayken, sert ve karanlık yüzeylerin 20% civarındadır. Ölçüm yapmak için geri dönen enerjinin belirli bir eşiğin üzerinde olması gerekmektedir. Ölçüm hassasiyeti ise lazer sensörü ile nesne arasındaki mesafe, ışın sapması, nesnenin şekli ve yansıtıcılığı ve çevresel koşullara bağlıdır.

Tarayıcı, taranan noktaları belirli aralık ölçümüyle sağlar, burada taranan nokta desenleri, hem yatay hem de düşey düzlemlerde eşit ve açılı bir dağılımda toplanır. Bu toplama işlemi, dönebilen kafa mekanizmalarının içinde yine dönme kabiliyeti olan aynalar ile kontrol edilir (Lichti ve Gordon, 2004). Böyle her örneklenmiş nokta küresel koordinatlarla tanımlanır: R, aralık ölçümü, Θ, yatay yön ve φ, dikey açı (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Lazer tarayıcının çalışma prensibi (Lichti ve Gordon, 2004).

Vericiden yansıma yüzeyine olan mesafe R, olarak tanımlanır ve matematiksel olarak şöyle ifade edilir:

$$R = \frac{1}{2}ct$$

Burada, t, yayılım anı ve titreşim ile geri saçılan kısmından alınabilen ile arasında geçen zamanı simgelerken, c, ışığın havadaki hızıdır. Tarayıcının isabetli ölçüm yapabilmesi devreye entegre edilen elektronik tertibatın zaman ölçümünün doğruluğu ile bağlantılıdır. Ayrıca, girdi bant genişliği, arka plan radyasyonu ve amplifikatör gürültüsü gibi çeşitli faktörlere bağlı olan uzaklık ölçümü doğruluğu, sinyal gürültüsü oranıyla ters orantılıdır.

$$\Delta R = \frac{1}{2} c \Delta t$$

Lazer tarama yönteminin kazanımlarını aşağıdaki gibi listelemek mümkündür:

- Diğer mevcut ölçme yöntemleriyle birlikte kullanılabilmiş ve ölçüler diğer ölçme verileriyle entegre edilebilmiştir.
- Lazer tarayıcı ölçüleri, tarayıcı alet merkezli üç boyutlu nokta bulutları şeklinde olduğundan, yapının tek bir noktadan taranamadığı durumlarda, farklı noktalardan yapılan taramalarda, bir önceki taramada görülemeyen yüzeylerin görünmesiyle, eksik kalan çizimler tamamlanabilmiştir.
- Farklı günlerde gerçekleştirilen taramalar, yüksek kapasiteli bilgisayar ortamında birleştirilebildiğinden, yapının bütününe ilişki bilgi veren görüntüler alınabilmiştir.
- Belirli ve tanımlı bir alanını lazer tarama verisinin alınması, iş akışını süre, kalite ve doğruluk açısında olumlu etkilemiştir.
- Hızlı ve optimum maliyetle, yapının bütünü hakkında eksiksiz üç boyutlu geometrik ve görsel bilgiye ulaşmak, lazer tarama teknolojisinin sunduğu imkanlar ile gerçekleşmiştir.
- Yüzeye temas etmeden ölçüm yapılabildiğinden, tarihi yapılara ve eserlere zarar vermeden belgeleme yapılabilmektedir.

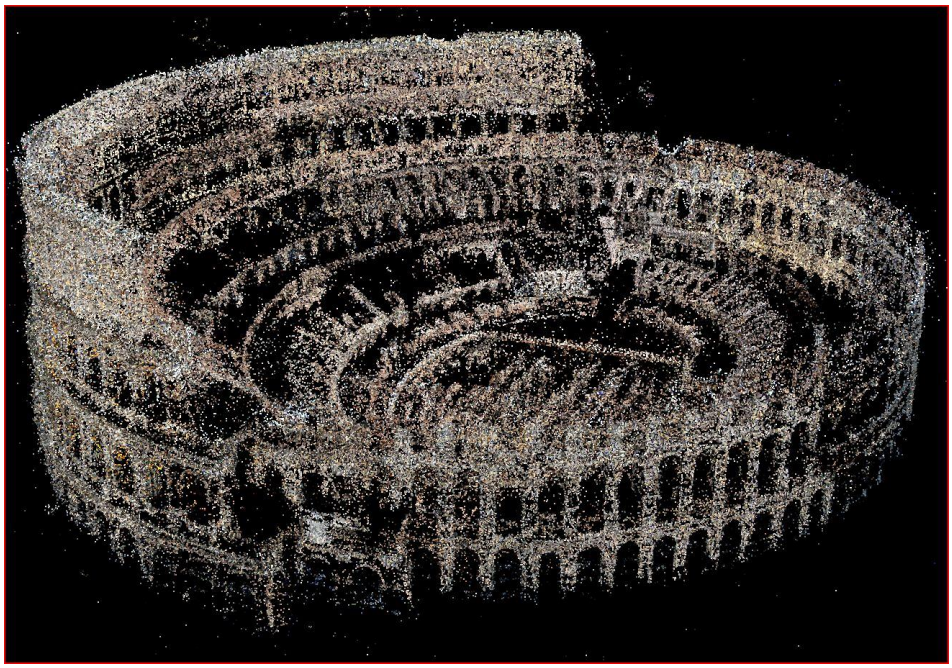
Nokta Bulutu

Nokta bulutu, uzayda bir veri noktası setidir. Genellikle etraflarındaki nesnelerin dış yüzeylerinden çok sayıda noktayı ölçen üç boyutlu tarayıcılar tarafından üretilir. Üç boyutlu tarama işlemlerinin çıktısı olarak nokta bulutları pek çok amaç için kullanılır; bunlar arasında üretilmiş parçalar için üç boyutlu CAD modelleri, metroloji ve kalite denetimi ve çok sayıda görselleştirme animasyon, modelleme ve toplu özelleştirme uygulamaları da vardır.

Nokta bulutları genellikle üç boyutlu modellerle veya diğer nokta bulutlarıyla, nokta seti kaydı olarak bilinen bir süreçle gruplandırılır. Endüstriyel metroloji veya endüstriyel bilgisayarlı tomografi kullanılarak yapılan muayene için, üretilen parçanın nokta bulutu mevcut bir modelle gruplanabilir ve farklılıkları kontrol etmek için karşılaştırılabilir.

Lazer tarama cihazı ile nokta bulutu taraması yapılan ve sayısal ortamda tüm bu noktaların birleştirildiği veri, ölçümü yapılan yapının tüm mimari özelliklerini bir arada görme, değerlendirme ve yorumlama imkanı sunmaktadır. Arazide rölöve alımında gözden kaçan mimari detaylar, sayısal ortamda bir arada görülebildiğinden, nokta bulutu üzerinden tanımlanabilirler. Yapıya ilişkin birleştirilmiş nokta bulutu verisi üzerinden istenilen noktadan kesit alma ve rölöveye aktarma imkanı bulunmaktadır.

Aynı zamanda önceleri sadece nokta bulutu verisi sağlayan lazer tarama cihazlarına son yıllarda eklenen renkli fotoğraf entegrasyonu, tarama yapılan yapı ya da yapılar grubundan oluşan alana ilişkin, kütle, hacim, renk, malzeme, doku, desen gibi tüm mimari özellikler ve mekânsal bilgiler üç boyutlu olarak sağlayabildiğinden, planlama ya da yeni tasarım konusunda çalışacak uzmanlara, çalışma alanını kısa zamanda ve bütün olarak kavrama ve algılama pratiğinde kazandırmaktadır (Benli ve Görmüş Ekizce, 2017).



Şekil 3.6. Colleseum'un nokta bulutu

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Dört Ayaklı Minarenin Mevcut Durumunun Belirlenmesi

Yapının mevcut durumunun belirlenmesi amacıyla yapının tarihçesi, mimari özellikleri, taşıyıcı sistemi, hasar biçimleri ve bozulmaları, malzeme ve zemin özellikleri, bölgenin sismik durumu incelenmiştir.

4.1.1 Dört Ayaklı Minarenin Tarihçesi, Mimari Özellikleri ve Taşıyıcı Sisteminin Belirlenmesi

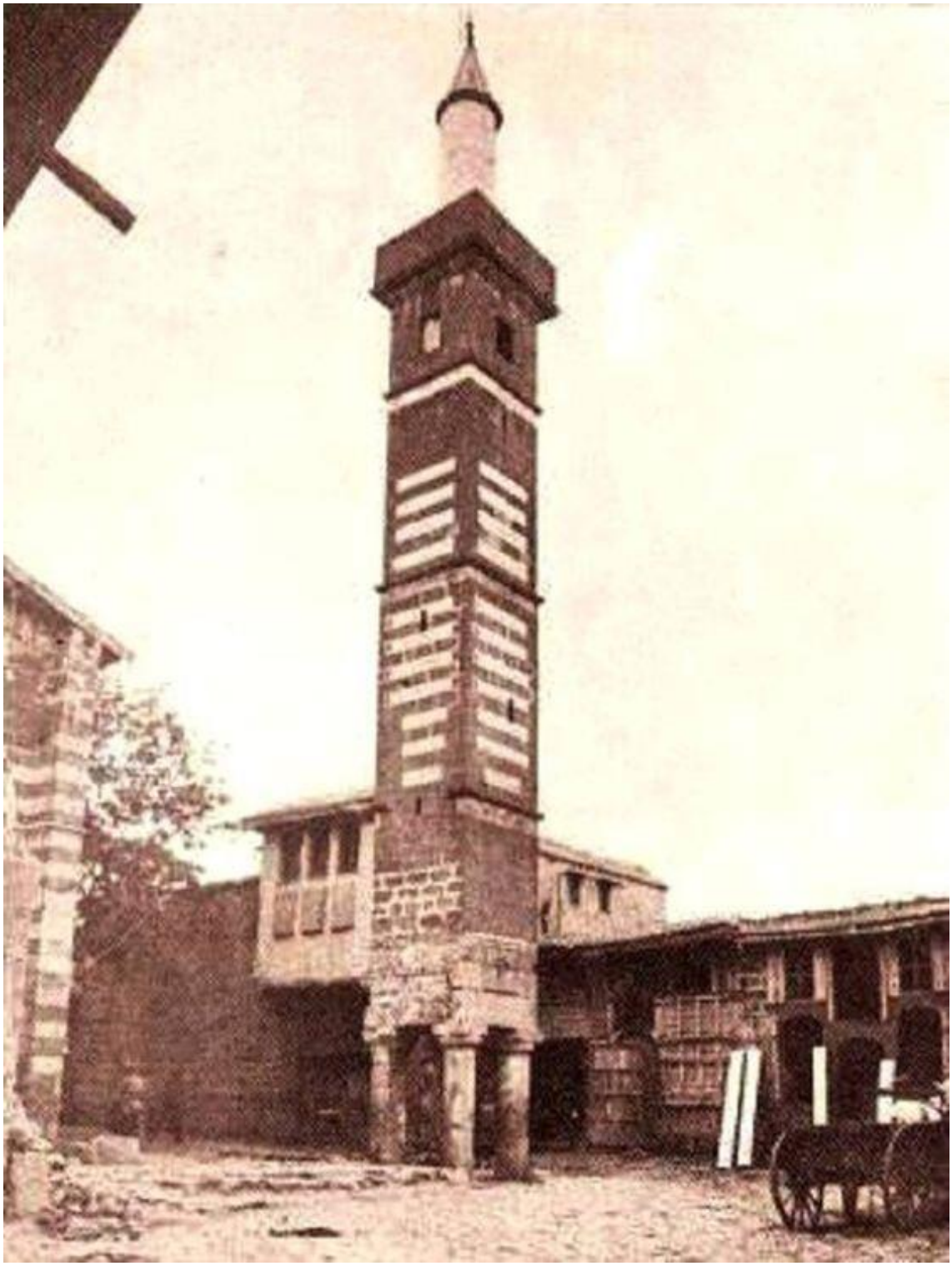
4.1.1.1 Dört Ayaklı Minarenin Tarihçesi

Dört Ayaklı Minareye ev sahipliği yapan Şeyh Mutahhar Cami yazıtlarından okunduğu üzere Akkoyunlu hükümdarı Sultan Kasım tarafından 906 Hicri (1500 MS) yılında inşa ettirilmiştir. Her ne kadar yerel halk kimi zaman Kasım Padişah Cami diye isimlendirse de cami adını inşası sırasında yapılacağı arazi üzerinde mezarı bulunan Şeyh Mutahhar'dan almıştır. Şeyh Mutahhar'ın şahsiyeti ile ilgili tarih kaynaklarında bir bilgiye rastlanmamıştır. Halk arasında "Şeyh Matar" cami olarak da bilinmektedir. Bazı çalışmalarda ise "Kasım Bey Cami" ya da "Kasım Padişah Cami" denilmektedir. Aynı dönemde Diyarbakır il sınırları içerisinde; Ergani Kalesi, Diyarbakır Kalesi, Safa Cami, Lala Bey Cami, Nebi Cami ve Seman Köşkü (Gazi Köşkü) gibi, Akkoyunlu mimarisine ait örnekler de bulunmaktadır.

Sözen (1981), Anadolu'da Akkoyunlu Mimarisi isimli kitabında camiyi ve minareyi şu şekilde gözlemlemiştir: "Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından 1960 yılında onarılan yapı bazı özellikleri yönünden Diyarbakır'ın en ilgi çekici yapılarından biridir. Gövde bölümü dışında minaresi, kesinlikle diğerlerinden ayrılmakta, dört yalın sütun ve başlıklar üzerine oturmaktadır. Minarenin kare gövdesi siyah-beyaz kesme taşlardan yapılmış, üzerinde yazıtı bulunmaktadır. En üst silindirik gövdeli bölüm ise, Diyarbakır'daki diğer kare gövdeli minarelerin bir benzeridir. Diyarbakır ve çevresinde kare gövdeli minarelere sık sık rastlanmasına karşın, bunların üzerinde dört sütun üzerine oturan yoktur. Bu yönden Şeyh Mutahhar Cami Minaresi tek örnek olarak kalmaktadır. Ancak başta Evliya Çelebi olmak üzere bazı kaynaklar, Diyarbakır'daki benzer nitelikte ikinci bir yapının varlığını duyuruyorlar. Deve Hamamının karşısında, dört yolun kesiştiği noktada Muallak Camisi, eski bir kilisenin yerine yapılmıştı. Bu yapının en ilgi

çekici yanı, beş sütun üzerine oturan minaresiydi. Evliya Çelebi bu yapı konusunda şu açıklayıcı bilgileri veriyor: 'Yapanını bilmiyorum. Ama Timurlenk yarısını yıkmıştır. Muallak Camisi adıyla şöhret bulmasının sebebi odur ki, bir dört köşe yüksek minaresi var. Yapan usta, uzun minareyi beş uzun sütun üzerine yapıp, minarenin dört köşe temelini dört sütun üzerine sihirli bir sanat ile öyle yapmış ki, akıl hayran kalır. Beşinci sütunu, minarenin temeli ortasına koyup, minarenin bütün ağırlığı bu sütun üzerindedir. Diğer sütunlar ihtiyaten koyulmuştur. İşte bu yüzden camiye Muallak cami demişler. Bu minarenin temelindeki beş sütun, bir demirci dükkanı içinde olmakla herkes göremez. Çok dikkat edilirse görülebilir. Fevkalade bir minaredir.' Caminin bir bölümünün Timur zamanında yıkıldığı anlaşılan bu yapının minaresinin ön örnek niteliği taşıdığı anlaşılmaktadır. Evliya Çelebi'nin tanımlamasından beş sütun üzerine oturduğu açıkça belirlenen minarenin, Şeyh Matar Cami minaresiyle sıkı ilişkisi bulunduğu, Şeyh Matar Camisi'nin minaresinin bu tür denemelerde Diyarbakır'da ikinci örnek olduğu görülmektedir. Vakıflarını da saptayabildiğimiz Muallak Camisi'nin minaresi, bazı araştırmacılara göre, eski bir kilisenin çan kulesi olarak kullanılmış, sonra minare görevi yapmıştı. Ancak başta Evliya Çelebi olmak üzere yapı konusunda bilgi verenlerin bir bölümü bu konuya değinmiyorlar. Timur döneminde bir bölümü yıkılan Muallak Camisi'nin kesin yapım tarihini bilmiyoruz. Birinci Dünya Savaşı sırasında belediye tarafından yıktırılarak yola katılmıştır. Şeyh Mutahhar Cami bir sıra beyaz, bir sıra siyah kesme taşlardan yapılmıştır. Malzemenin kullanımı açısından cami ve minare uyum içindedir."

Pek çok medeniyet Türkiye coğrafyasına ciddi sayıda, kültürel ve mimari olarak önemli yapılar bırakmışlardır. Bunlardan biri de kuşkusuz Diyarbakır'ın Sur ilçesinde yer alan Şeyh Mutahhar Caminin Dört Ayaklı Minaresidir. Minarelerin asıl amaçları Müslümanları namaza çağırmak için kullanılan ezanı okuması adına müezzine yüksek bir platform sağlamaktır. Bunun haricinde minarenin cami yapısına ile birleşik olduğu durumlarda minare, cami için bir havalandırma kanalı oluşmasını sağlamaktadır. Her ne kadar teknolojik gelişmeler minareleri camilerin etkisiz elemanları olarak kılmışsa da minareler camilerin sembolü ve vazgeçilmezi olmuştur. Dört Ayaklı Minarenin alt bölümünü oluşturan dört ayağı, minareyi eşsiz kılmaktadır. Minare cami yapısından bağımsız ayrık bir yapıdır. Şekil 4.1'de Dört Ayaklı Minarenin 1900'lerin başlarında çekilmiş bir fotoğrafı bulunmaktadır.



Şekil 4.1. Dört Ayaklı Minareye ait 1900'lü yılların başında çekilmiş bir fotoğraf. (Şeyh Mutahhar Cami, 2018)

Minarenin üzerindeki kitabelerde Arapça ayetler ve minare hakkında yapım bilgileri mevcuttur. Üst kemerin güney cephesinde: *Besmele ... Hüvellezi yusalliy*, Batı cephesinde: *Aleyküm ve melaiketühü liyuhriceküm minezzulümati ilennur, ve kane bilmü'minine rahiyma* (XXXIII/43). *Tehıyyetühüm yevme yelkavnehü selam, ve'adde* Kuzey cephesinde: *Lehüm ecren keriyma* (XXXIII/44). *Besmele ... Ma kane Muhammedün eba ehadin min ri*, Doğu cephesinde: *Caliküm, ve lakin resülallahi ve hatemennebiyyin, ve kanallahü bikülli şey'in aliyma* (XXXIII/40) ayetleri yazılıdır.

Minarenin alt kemerinin Batı cephesinde: *Besmele ... İnnallahe ve melaiketehü yusallüne allennebiyyi, ya eyyü*, kuzey Cephesinde: *Hellezine amenü sallü aleyhi ve sellimü tesliyma* (XXXIII/56) ayetinden sonra, *enşee hazihil minaret el-mübarekete fi eyyamil-sultan*, Doğu cephesinde: *el-adil Kasım Han bi sa'yi Hoca Hüseyin bini Hacı Ömer el-reşi fil-tarih seneti sitte ve tisamie.*

Kitabesinin tam metni, ayetler hariç, şöyle çevrilmiştir (Beysanoğlu, 1990): *Bu mübarek minare adil sultan Kasım Han'ın saltanatı zamanında Hacı Ömer oğlu Hacı Hüseyin'in emeğiyle 906 senesinde inşa edildi*.

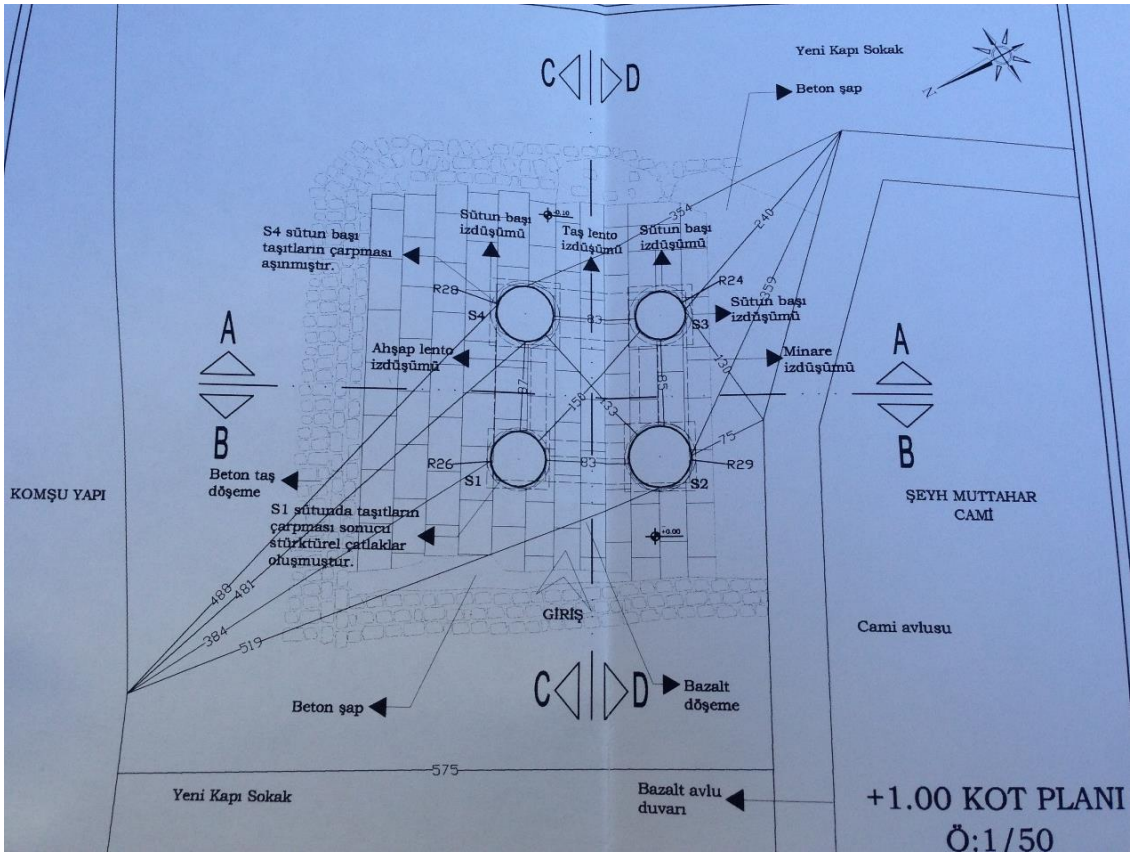
Minare ayakları, minarenin bulunduğu sokakta yıllar içinde üst üste yapılan yol çalışmaları nedeniyle kısa kalmıştır. Bununla beraber şehirleşmenin getirdiği yol ihtiyacıyla birlikte cami avlusu içeri çekilmiş ve minare cami avlusu dışında, yol ortasında kalmıştır. Büyük araçlar yol ortasında duran minarenin hemen yakınlarından geçerken çarpmalar sonucu minareye fiziksel zararlar vermişlerdir.

4.1.1.2 Dört Ayaklı Minarenin Mimari Özellikleri

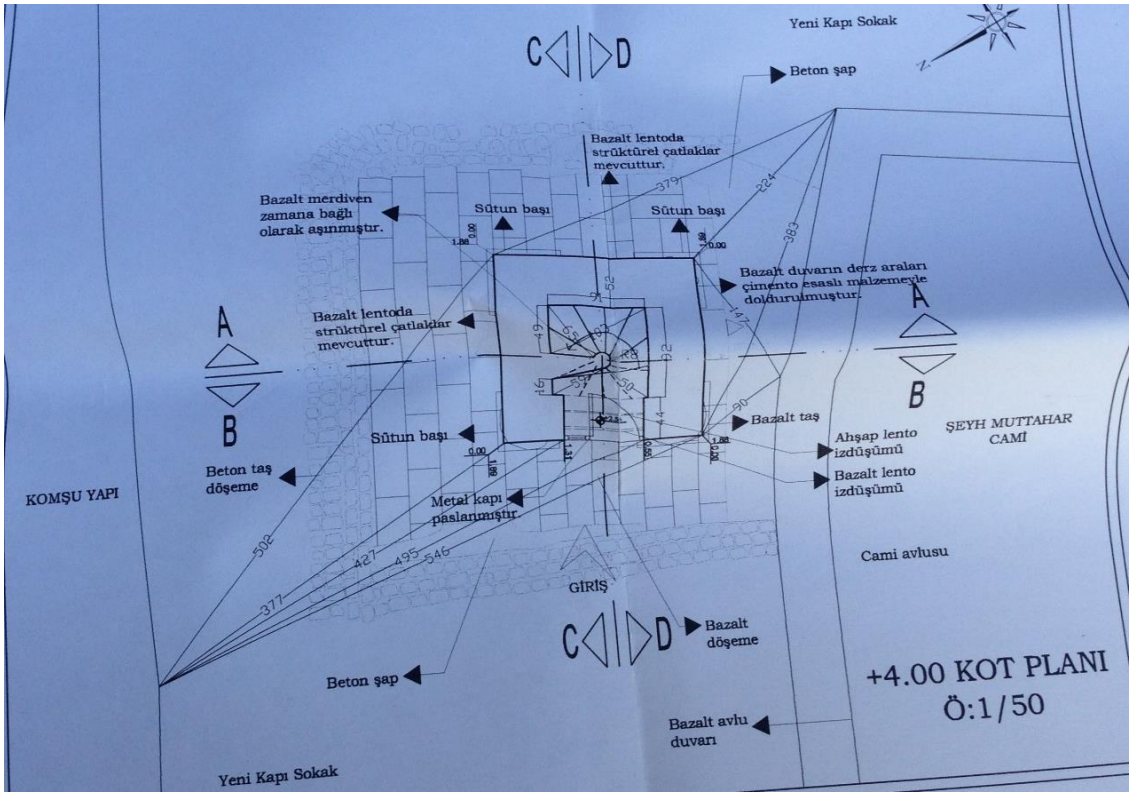
Minare, Diyarbakır'ın, şehir merkezinde yer alan, pek çok tarihi yapıya ev sahipliği yapan ve etrafında bulunan şehir duvarlarından adını alan Sur içinde bulunan Şeyh Mutahhar Caminin minaresidir. Cami ve minarenin Suriçi semtindeki konumu Şekil 4.2'de verilmiştir. Dört Ayaklı Minarenin mimari özelliklerini öğrenmek için Diyarbakır Vakıflar Bölge Müdürlüğünden minarenin 2012 yılında çizilen rölöveleri incelenmiştir. Bu rölöve çizimleri, +1.00 kot planı (Şekil 4.3), +4.00 kot planı (Şekil 4.4), +17.00 kot planı (Şekil 4.5), sütun planları (Şekil 4.6), B-B ve C-C kesitleri (Şekil 4.7), Güney-Doğu ve Kuzey-Doğu cephesi olarak fotoğraflanmıştır. Ancak bu çizimlerin minarenin yapısal analizi için oluşturulacak modelini tasarlamak üzere yeterli olmadığı görülüp, lazer tarama ile 5 Mayıs 2017 tarihinde ölçümler yapılmıştır.



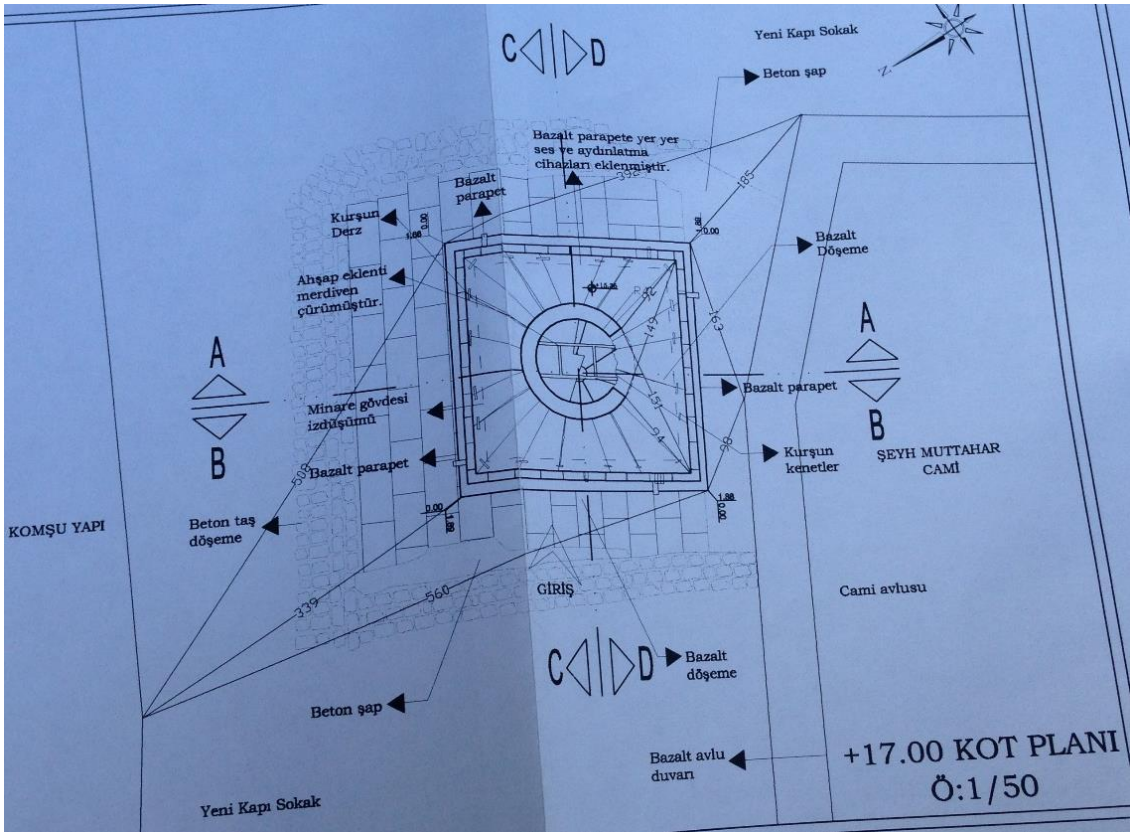
Şekil 4.2. Şeyh Mutahhar Cami ve Dört Ayaklı Minarenin Diyarbakır, Suriçindeki konumu (Google Maps, 2018).



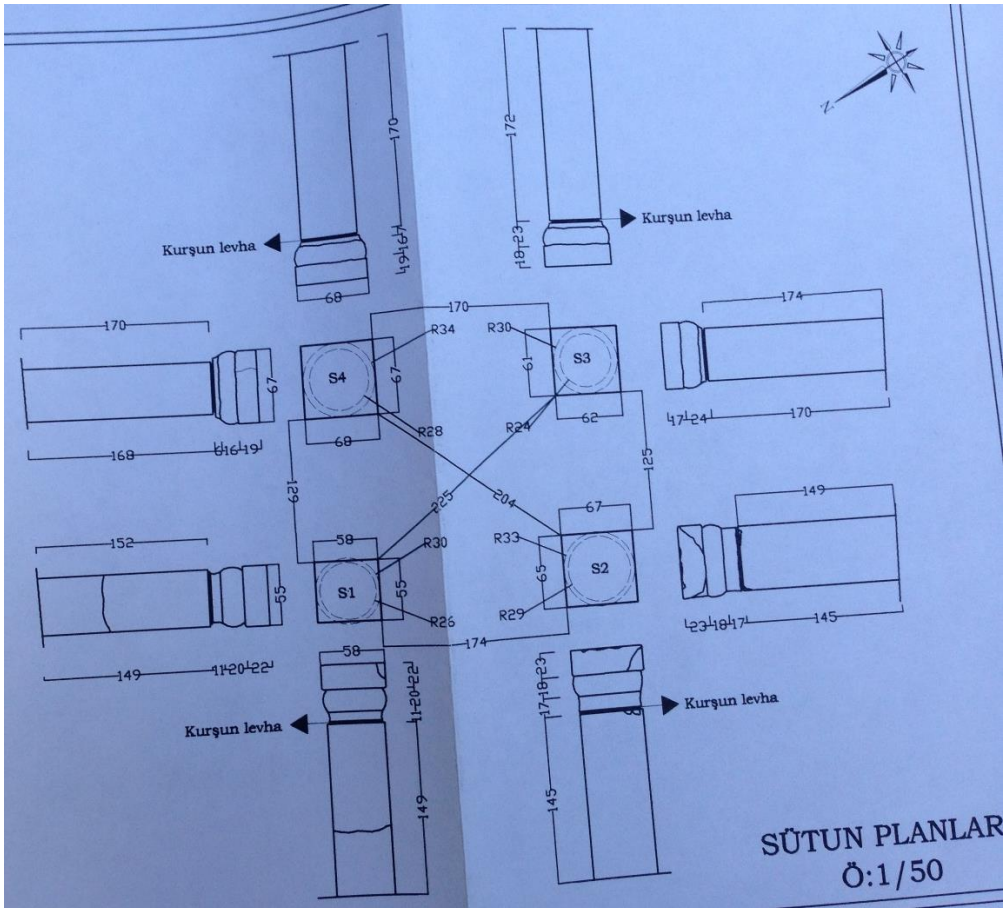
Şekil 4.3. Dört Ayaklı Minarenin +1.00 kot planı (Diyarbakır Vakıflar Böl. Müd., 2013).



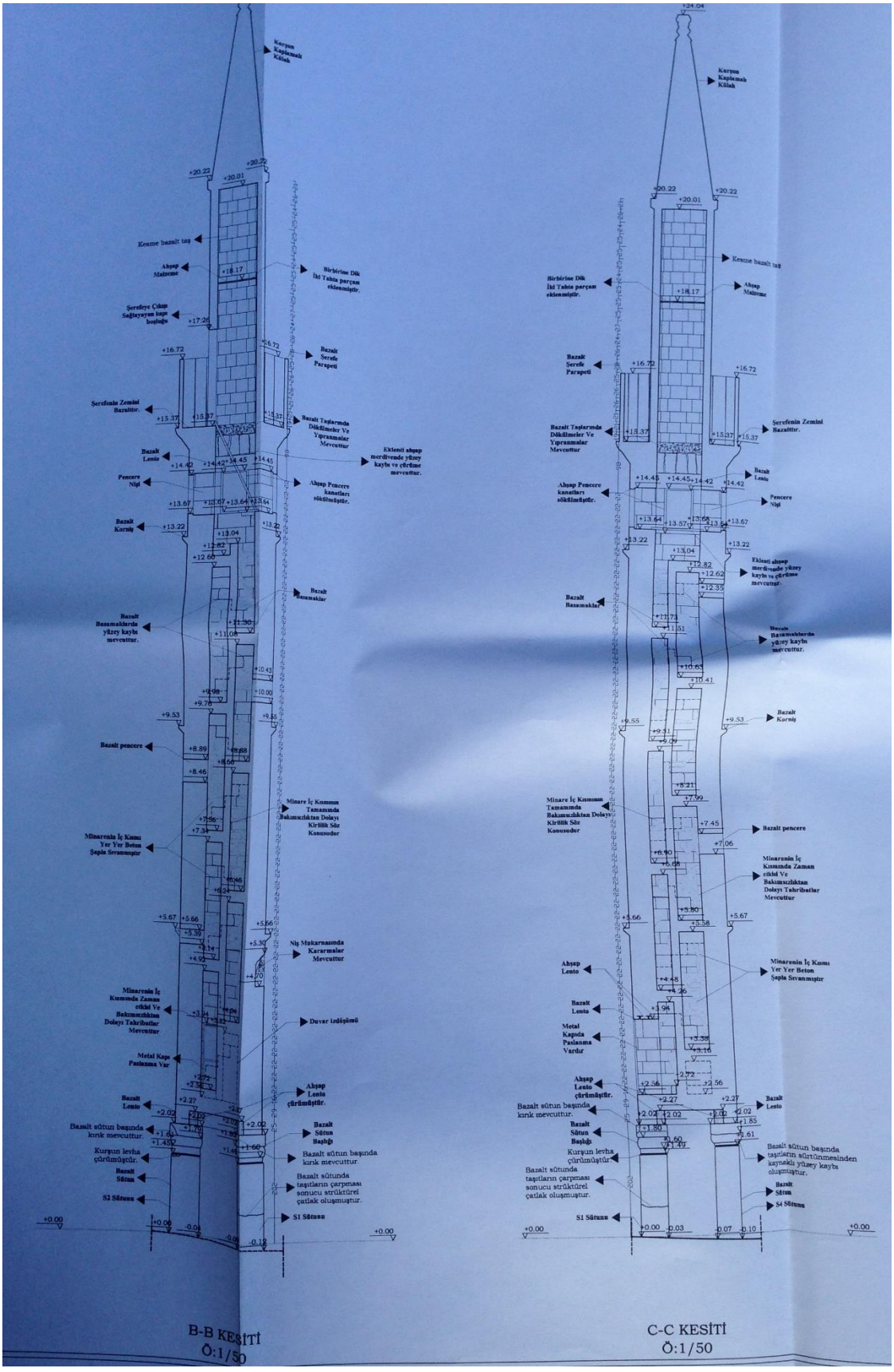
Şekil 4.4. Dört Ayaklı Minarenin +4.00 kot planı (Diyarbakır Vakıflar Böl. Müd., 2013).



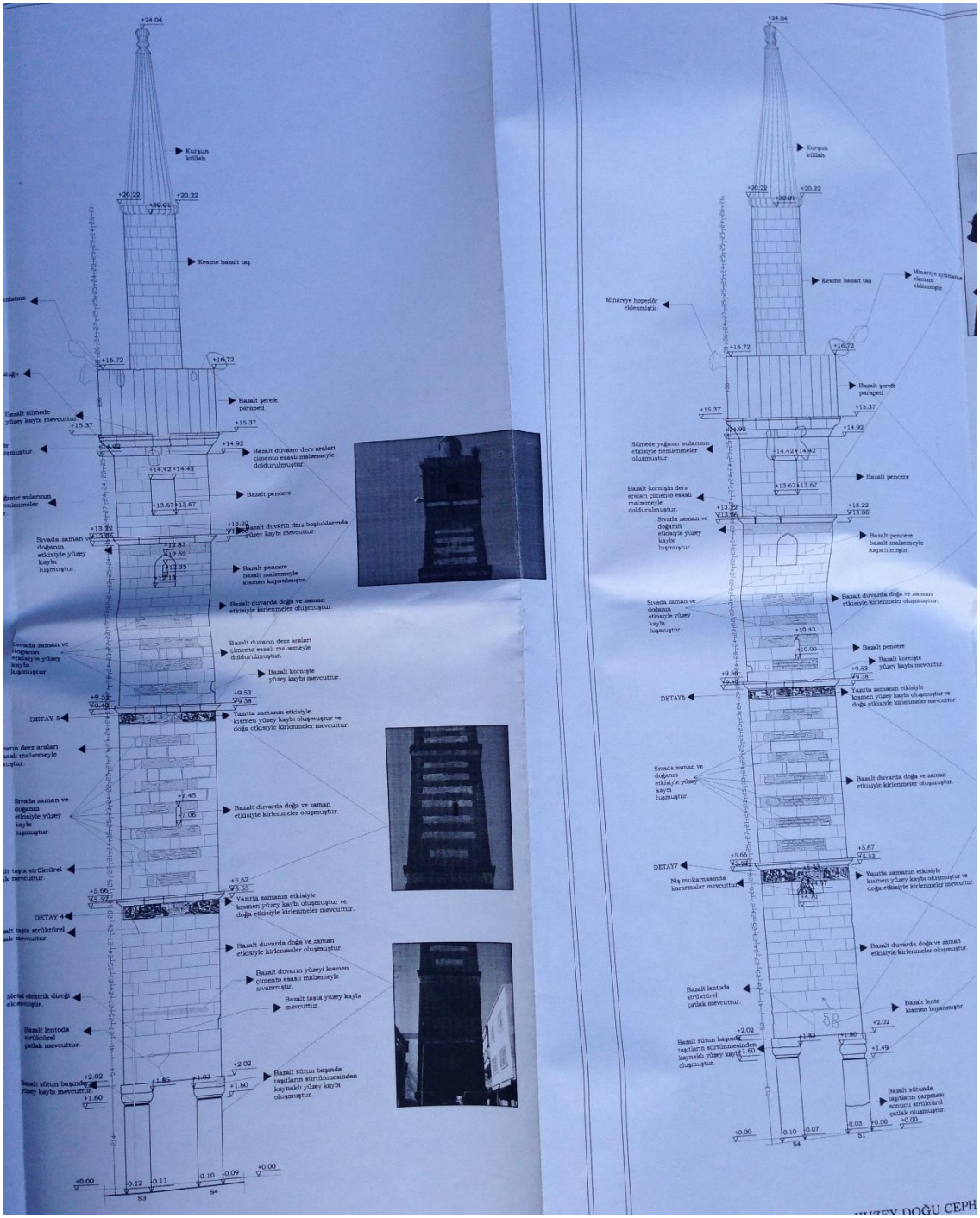
Şekil 4.5. Dört Ayaklı Minarenin +17.00 kot planı (Diyarbakır Vakıflar Böl. Müd., 2013).



Şekil 4.6. Dört Ayaklı Minarenin sütun planı (Diyarbakır Vakıflar Böl. Müd., 2013).



Şekil 4.7. Dört Ayaklı Minarenin B-B ve C-C kesitleri (Diyarbakır Vakıflar Böl. Müd., 2013).



Şekil 4.8. Dört Ayaklı Minarenin Güney-Doğu ve Kuzey-Doğu cepheleri görünümleri (Diyarbakır Vakıflar Böl. Müd., 2013).

Minarenin analitik modelini oluşturmak için gerekli ölçüleri elde etmek için lazer tarama yöntemine başvurulmuş bunun için İnal Mimarlık'tan yardım alınmıştır. 5 Mayıs 2017 tarihinde Mimar Salih İnal ile "FARO" marka "Focus 3D S 120" modelli lazer tarayıcı kullanılarak ölçümler yapılmıştır. Toplamda, 18 kurulum ve tarama ile minare ve çevresi taranmıştır.

Lazer tarayıcıdan alınan veriler Scene Process ticari yazılımı yardımıyla işlenip nokta bulutları oluşturulmuş ve bu nokta bulutlarının, Scene isimli ticari paket programla kesitleri alınıp minarenin çizimleri yapılmıştır (Scene Process, 2018; Scene, 2018). Bu paket programdan alınan ham nokta bulutu Şekil 4.9'da verilmiştir. Bu nokta bulutunu oluşturmak için minarenin çevresindeki, boş binalar ve cami kullanılmış ayrıca giriş ve balkon seviyelerinden de taramalar yapılmıştır. Bu lokasyonlar ve lazer tarama aygıtı Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Scene Process isimli ticari paket programda ham nokta bulutu işlenmiş ve minarenin detaylı çizimlerini elde edebilmek için Şekil 4.11'de görülen nokta bulutu kesitleri oluşturulmuştur.



Şekil 4.9. Lazer taramadan elde edilen ham nokta bulutu görüntüsü.



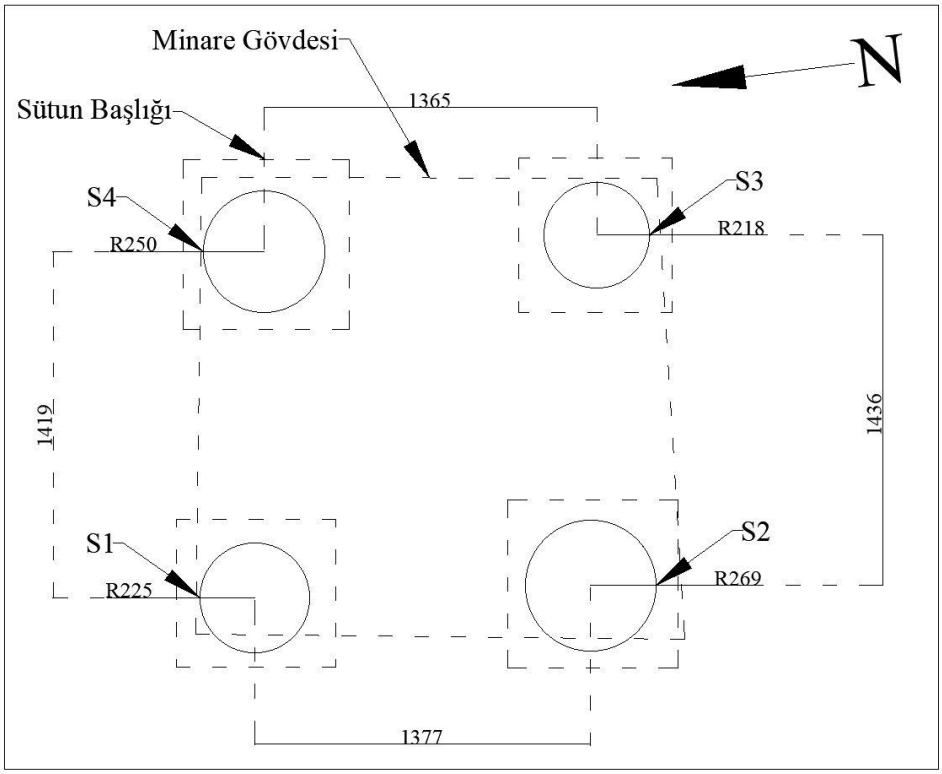
Şekil 4.10. FARO marka lazer tarayıcı ve bu cihazın tarama için yerleştirildiği bazı lokasyonlar.



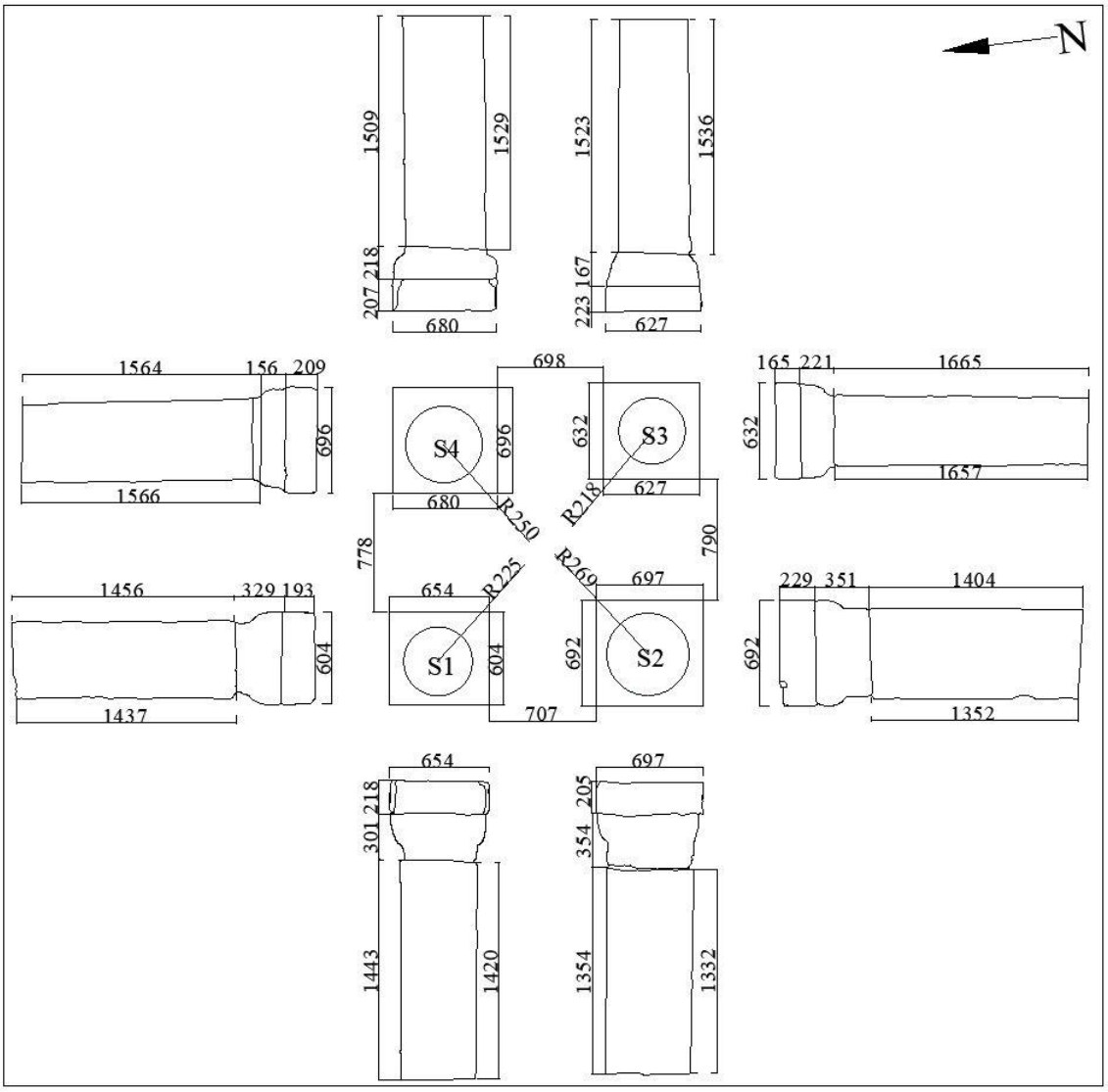
Şekil 4.11. Ham nokta bulutundan elde edilen minare kesitleri.

Minarenin nokta bulutu kesitleri elde edildikten sonra, kesitler AutoCAD adlı çizim programına aktarılmış ve minarenin çizimleri detaylı olarak milimetrik hassasiyetle yapılmıştır (Autocad, 2018). Minarenin çizimleri yapılırken, sadece nokta bulutları değil cephe fotoğrafları da incelenip çizimlerin doğruluğu kontrol edilmiştir.

Dört Ayaklı Minare, 1.83 m'ye 1.92 m bir plana kurulmuş dört bazalt sütuna sahiptir. Minarenin yola bakan cephesi 353° bir açıyla kuzeye bakmaktadır. Sütunların çapları sütun boyunca değişmektedir ve ortalamaları sırasıyla 45, 54, 43 ve 50 cm'dir. Sütunların üzerinde üst gövde ile bağlantıyı sağlayan sütun başlıkları bulunmaktadır. Sütun planı, sütun detayları ve sütun fotoğrafları sırasıyla Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te (a, 1 nolu sütun; b, 2 nolu sütun; c, 3 nolu sütun; d, 4 nolu sütun) verilmiştir. Bu sütunların nasıl bir temele nasıl oturtuldukları bilinmemektedir. Minarenin temel sistemini saptayabilmek gerek minarenin güncel konumu gerekse de tarihi yapısı nedeniyle tahribatsız yöntemler ile mümkün değildir. Işık (2017), yaptığı çalışmada Diyarbakır Vakıflar Bölge Müdürlüğü tarafından güçlendirme projesi hazırlanırken zemin özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla sondaj yaptırıldığını belirtmiş ancak etüt alanında yapılan çalışmalar sonucunda yapının temelinin hangi zemine oturtulduğunun tespit edilemediğini aktarmıştır.



Şekil 4.12. Sütun planı (+1.00 kot planı).



Şekil 4.13. Sütun ve sütun başlıkları detayları.



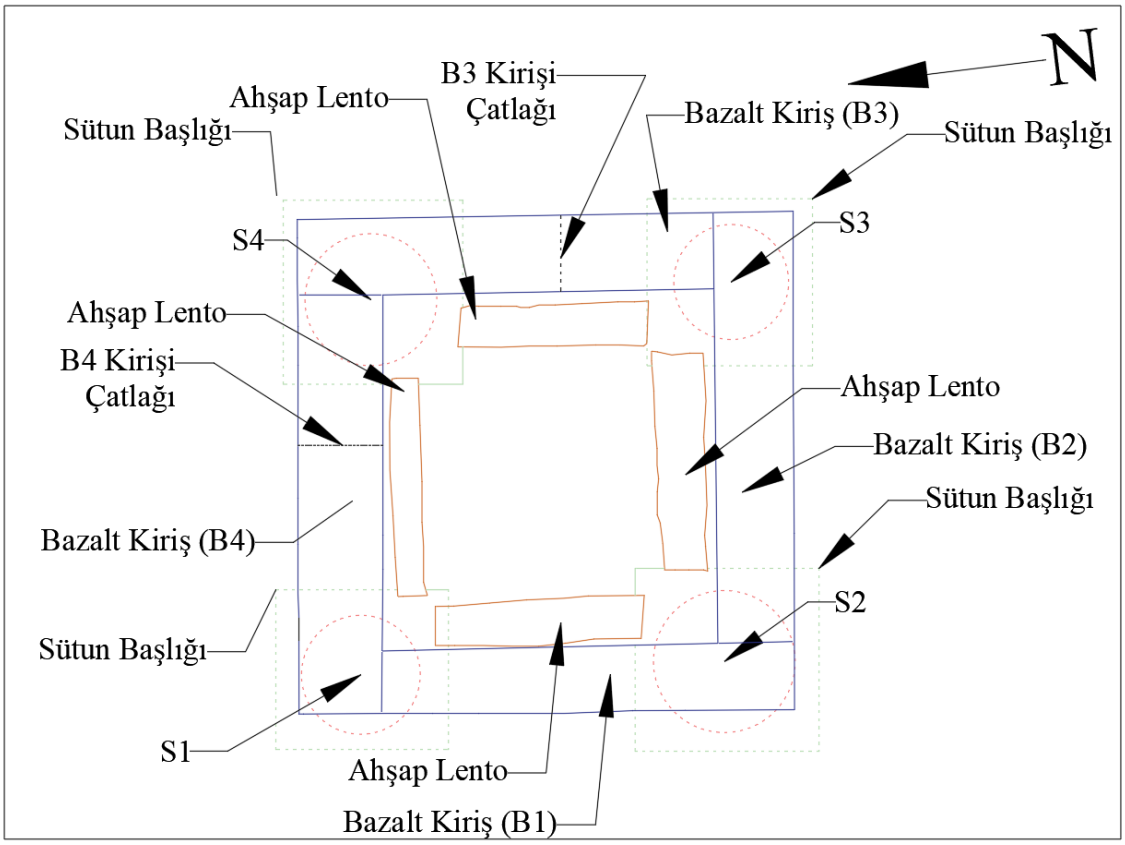
Şekil 4.14. Dört Ayaklı Minarenin sütunları: a) 1 nolu sütun, b) 2 nolu sütun, c) 3 nolu sütun, d) 4 nolu sütun

Şekil 4.12'de numaralandırılan sütunlardan, sütun 1'de 2~3 mm kalınlığında lateral bir çatlak mevcuttur (Şekil 4.15). Bu çatlak minare çevresindeki esnafların beyanlarına göre taşıt çarpması sonucu olmuştur. Yerden yüksekliği 60 cm olan bu çatlağın yapısal hareketler sonucu oluştuğu düşünülmemektedir.

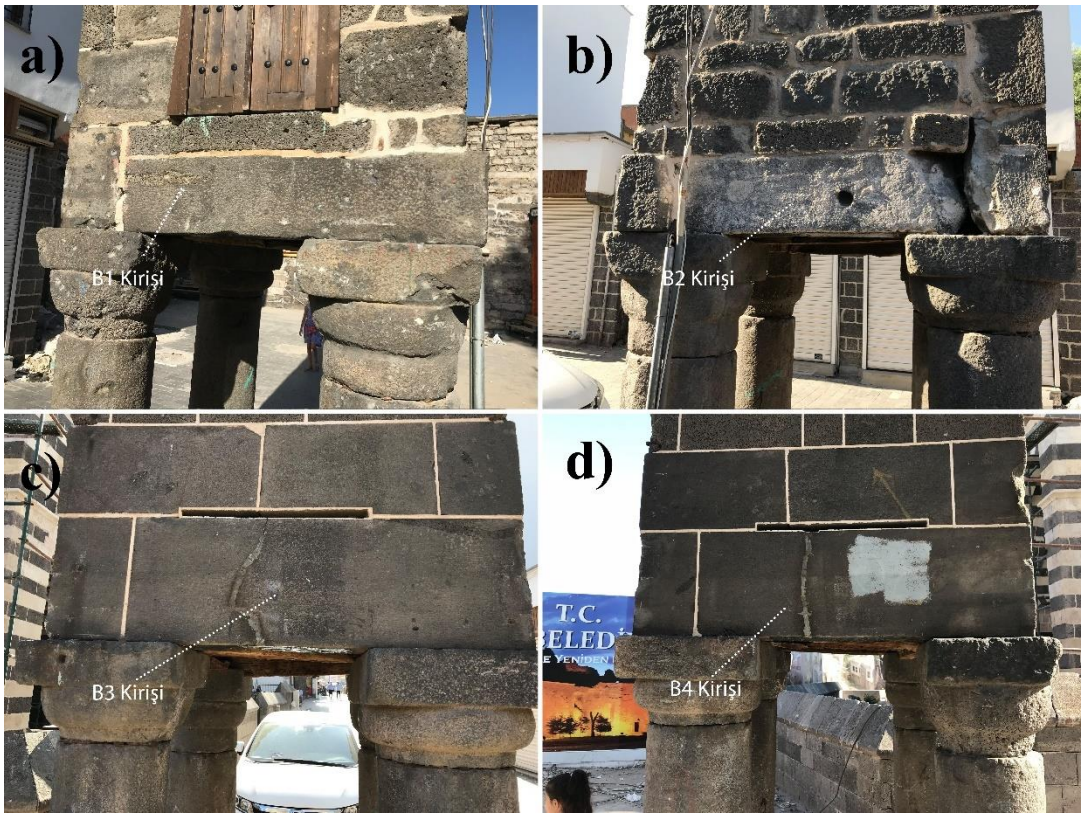


Şekil 4.15. 1 nolu sütunda bulunan lateral çatlak.

Sütunların üzerinde bulunan bazalt kirişlerin ve ahşap lentoların planı Şekil 4.16'da verilmiş ve kirişler şekil üzerinde numaralandırılmışlardır. Ortalama 52 cm yüksekliğe ve 31 cm derinliğe sahip bu kirişler Şekil 4.17'de (a, B1 kirişi; b, B2 kirişi; c, B3 kirişi; d, B4 kirişi) gösterilmiştir.

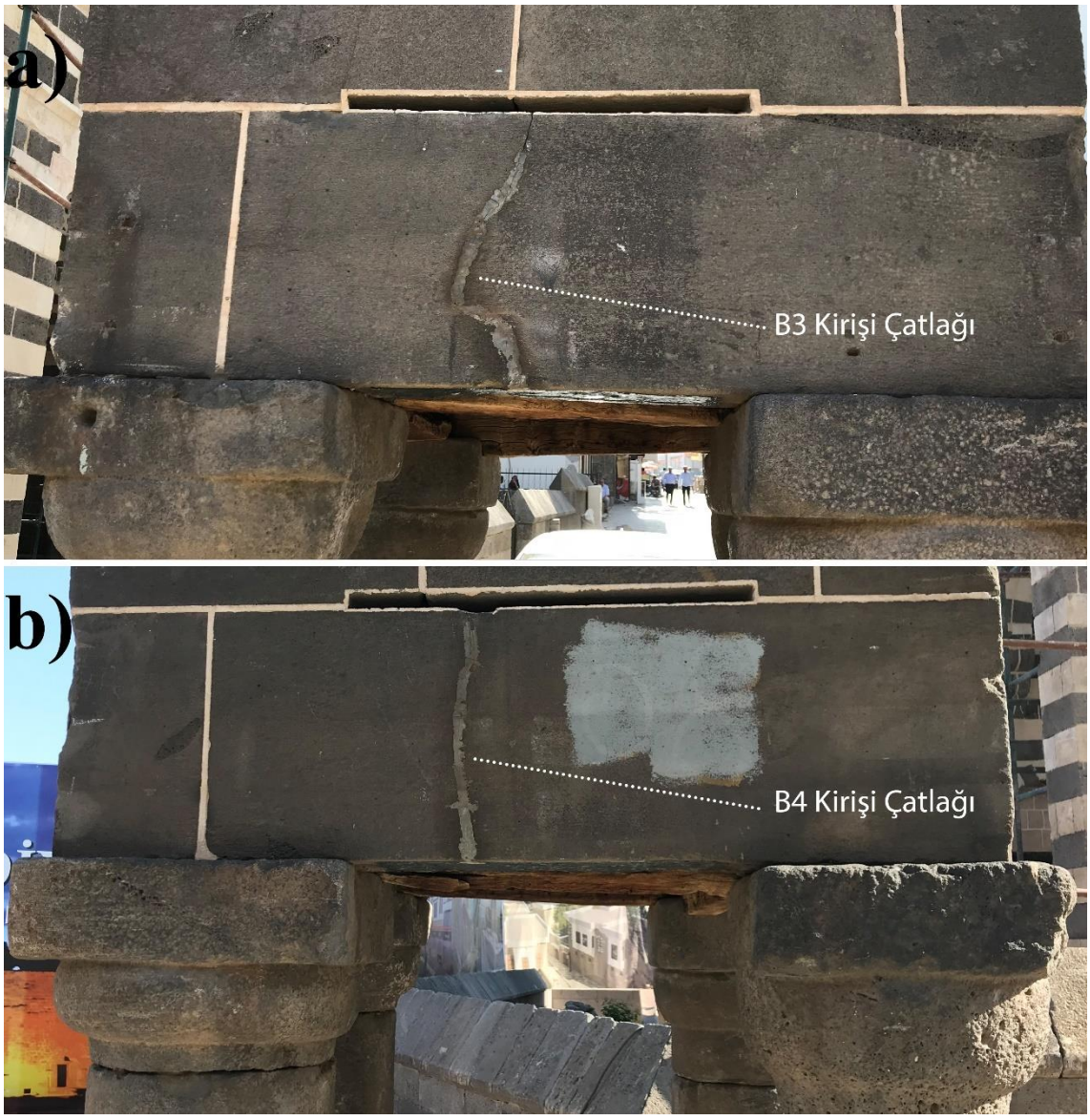


Şekil 4.16. Sütun başlarının üzerine oturan ahşap lentoların ve bazalt kirişlerin detayı (+2,00 kot planı).



Şekil 4.17. Sütun başlarına oturan bazalt kirişler: a) B1 kirişi, b) B2 kirişi, c) B3 kirişi, d) B4 kirişi.

Şekil 4.16'da etiketlenen kirişlerden B3 ve B4 üzerinde yapısal çatlaklar bulunmaktadır. Çatlaklar kiriş eksenine dik bir doğrultuda, orta bölgede kiriş boyunca gözlenmektedir (Şekil 4.18 a, b). Çatlaklara yakın zamanda yapılan restorasyon çalışmasında müdahale edilmiş, çatlak bölgelerinin dışa bakan yüzleri epoksi ile doldurulmuştur. Aynı zamanda bütün kirişlerin yere bakan yüzlerine bir güçlendirme malzemesi olan FRP bantları ile sargı yapılmıştır (Şekil 4.19).



Şekil 4.18. Kirişlerde bulunan yapısal çatlaklar: a) B3 kirişindeki çatlak, b) B4 kirişindeki çatlak.



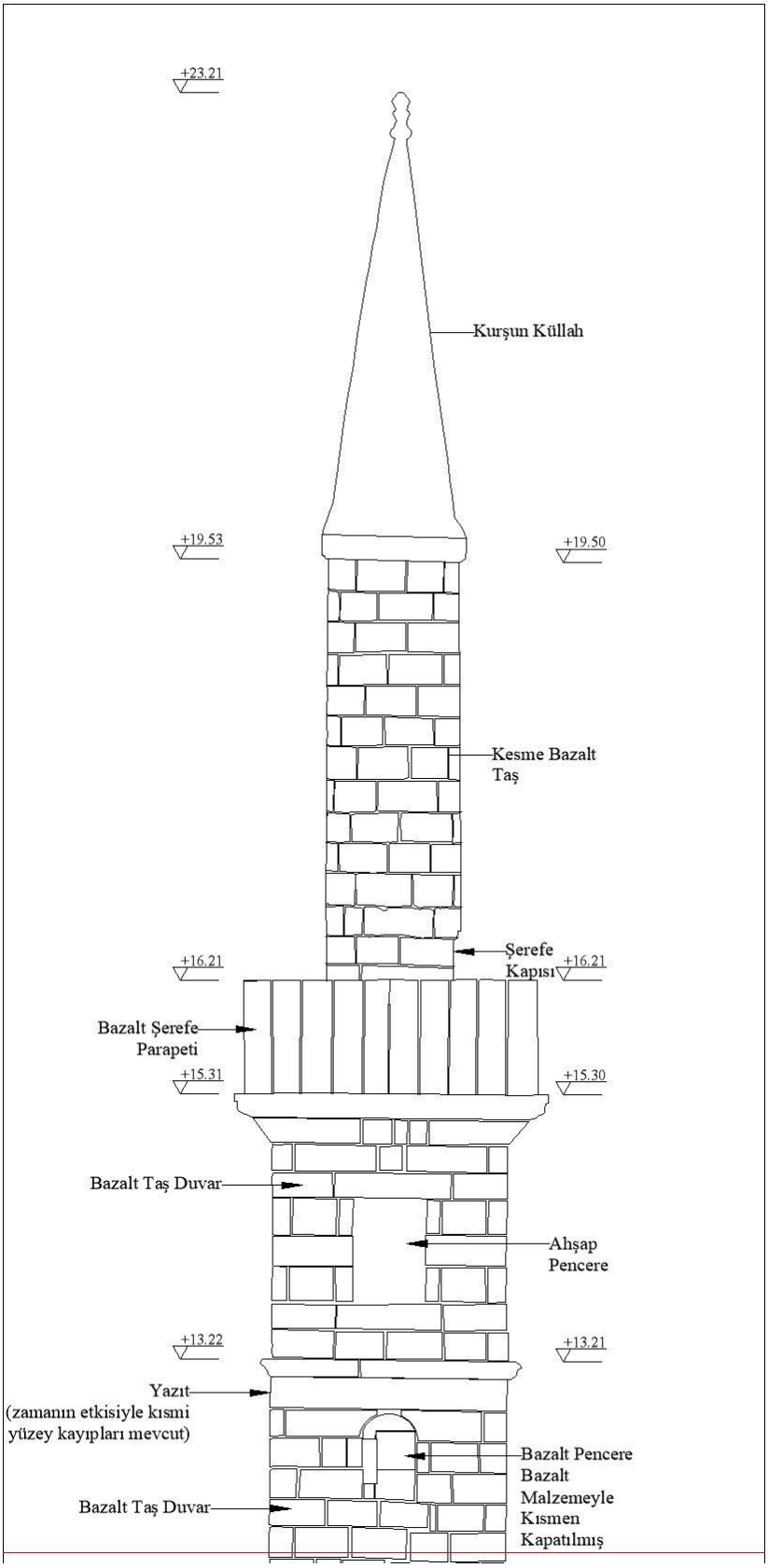
Şekil 4.19. Yapısal çatlak bulunan kirişlerden B4'e FRP bandı ile uygulanan sargı.

Şekil 4.18'de görüldüğü gibi çatlak olan B3 ve B4 kirişlerinin üzerindeki kirişlerin alt yüzlerinde 2.5 cm yüksekliğinde bir boşluk mevcuttur. Bu boşluk minare inşa edilirken minare gövdesinden gelen yükü direk olarak sütunlara aktarmak için ve kirişlerde eğilme çatlaklarına mahal vermemek için bırakılmıştır. Diğer kirişler üzerinde böyle bir boşluk bulunmamaktadır. Bunun sebebinin ise minarenin zaman içerisinde geçirdiği restorasyonlarda uğradığı özensiz yapısal değişiklikler yüzünden olması muhtemeldir. Yapılan restorasyon öncesi minarenin durumuna dair bir kayıt bulunmamaktadır. Buradaki kirişlere özgün taş yerine, hazır bulunmuş bazalt taş kullanılıp önceki kiriş yüksekliği olan 52 cm'e iki kademe taşla varılmıştır. B1 kirişindeki taş olması gerekenden uzun gelmiş ve S2 sütununun başlığını 2.5 cm aşmış, B2 kirişinde kullanılan taş ise kısadır. B2 kirişi üzerinde bulunan duvarın ilk yapım yönteminden farklı olarak örülmüştür. Sütün başlıklarının üzerinde, kirişlerle aynı seviyede ahşap lentolar bulunmaktadır (Şekil 4.20). Bu lentoların yaklaşık 25 x 25 cm kesitleri olup zamanla yük altında kalarak deforme oldukları gözlenmektedir. Bu deformasyonların uniform olmamasından ötürü bazalt kirişlerde mevcut çatlakların oluşumuna meydana gelen ek eksenel gerilmeler nedeniyle ortaya çıkmasına katkı verebileceği düşünülmektedir.

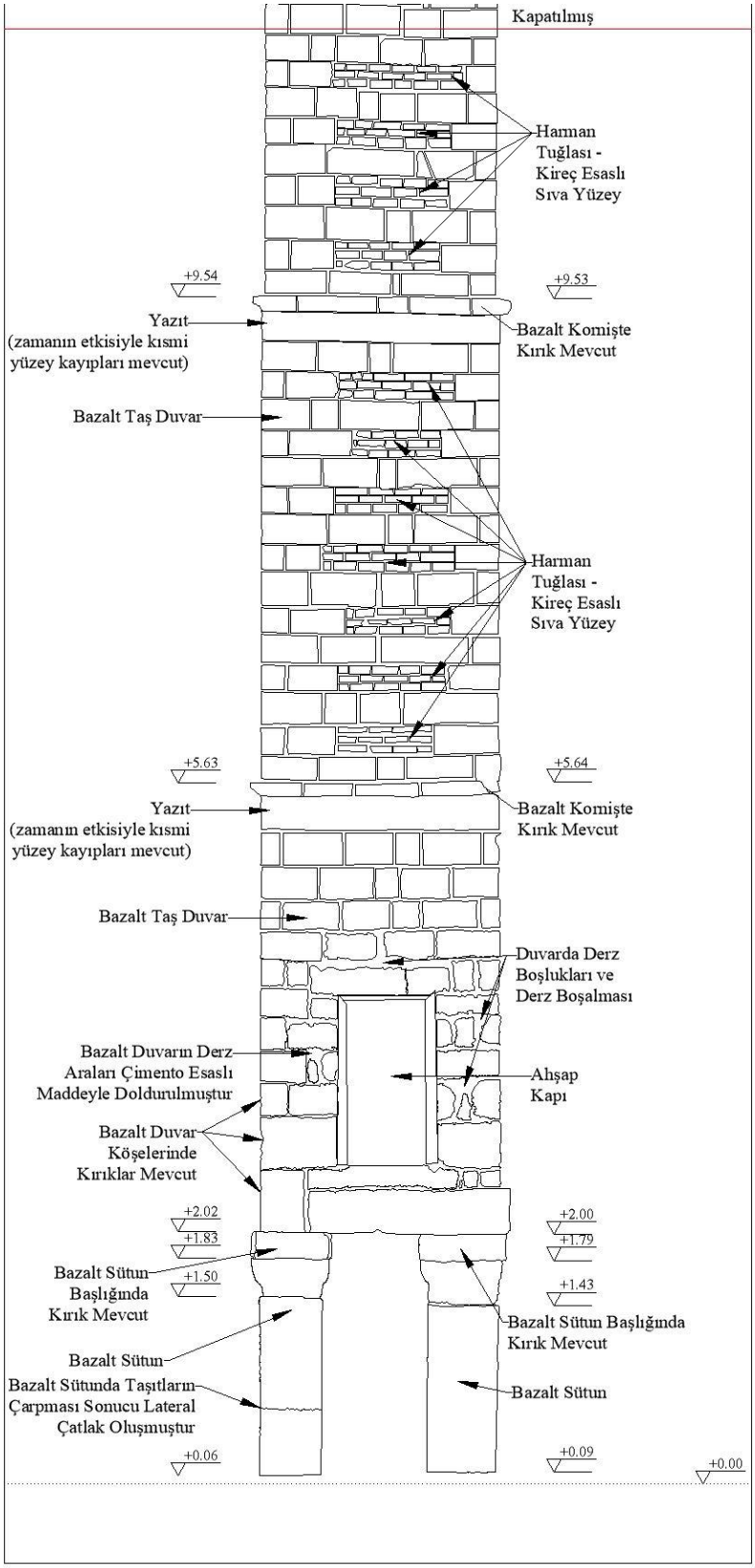


Şekil 4.20. Kirişlerle aynı seviyede bulunan ahşap lentolar.

Minareyi boyuna incelediğimiz zaman 3 kısma ayırmak mümkündür, bunlar; en alt kısmı oluşturan sütunlar, sütunların üzerinde gövde ve gövdenin de üzerinde balkon bölgesi. Minare gövdesi sütun başlıklarının bittiği yerden (+2.00) başlayıp, balkon zeminine (+15.30) kadar olan bölge olarak kabul edilmektedir. Gövde bölümünde, minarenin kapısı (+2.52), minare merdiveni, bu merdiveni aydınlatmak için bırakılmış pencereler ve yazıtlar bulunmaktadır. Gövde genel olarak bazalt duvardan inşa edilmiş olsa da bu duvarın arasında harman tuğlasından örülmüş bölümler de görülmektedir. Pencerelerden bazıları sonradan bazalt taşlarla kapanmıştır. Minare gövdesini üçe ayıran iki kornişte kırıklar gözlemlenmektedir. Gövdenin batı ve güney cephelerinde ise sonradan müdahalelere rastlanılmaktadır. Bu müdahaleler minarenin ilk yapımında gösterilen özenden oldukça uzaktır. Şekil 4.21-22'de Batı cephesinin detaylı çizimleri, Şekil 4.23-24'de Batı cephesinin fotoğrafları, Şekil 4.25-26'da Güney cephesinin detaylı çizimleri, Şekil 4.27-28'de Güney cephesinin fotoğrafları, Şekil 4.29-30'da Doğu cephesinin detaylı çizimleri, Şekil 4.31-32'de Kuzey cephesinin fotoğrafları, Şekil 4.33-34'de minarenin Kuzey cephesinin detaylı çizimleri, Şekil 4. 35-36'da Kuzey cephesinin fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 4.21. Batı cephesinin detaylı çizimi-1.



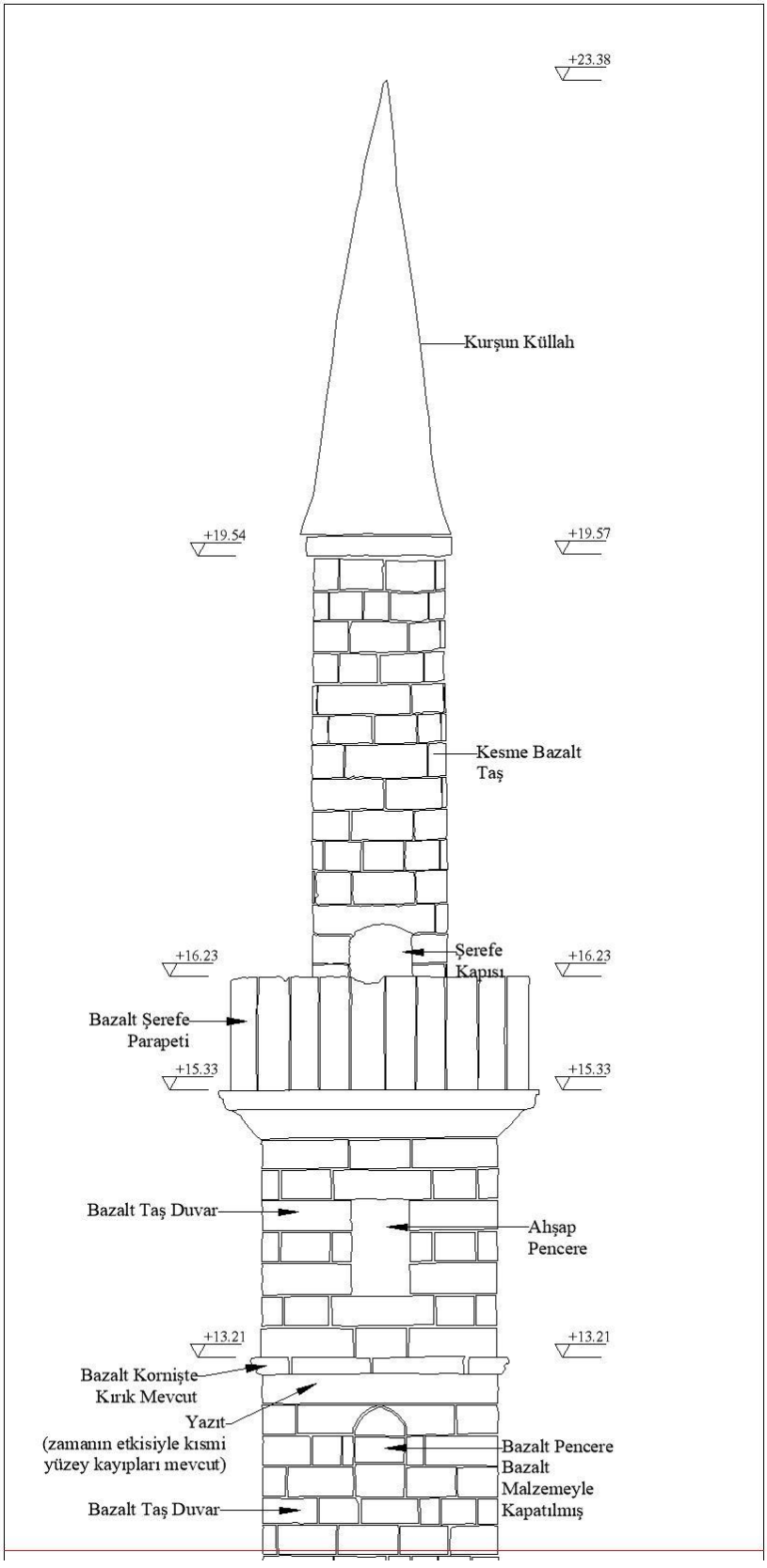
Şekil 4.22. Batı cephesinin detaylı çizimi-2.



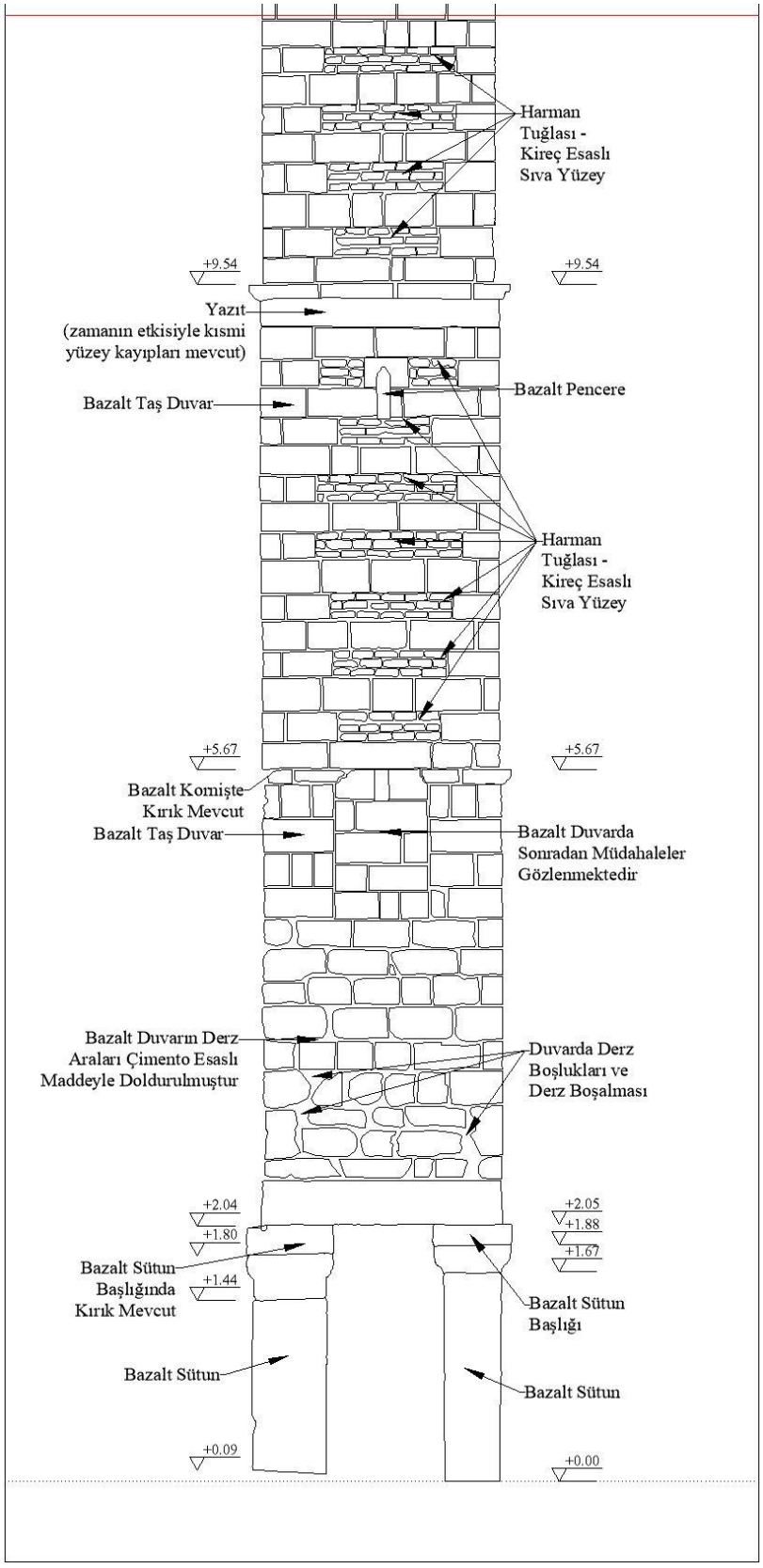
Şekil 4.23. Batı cephesinin fotoğrafı-1.



Şekil 4.24. Batı cephesinin fotoğrafı-2.



Şekil 4.25. Güney cephesinin detaylı çizimi-1.



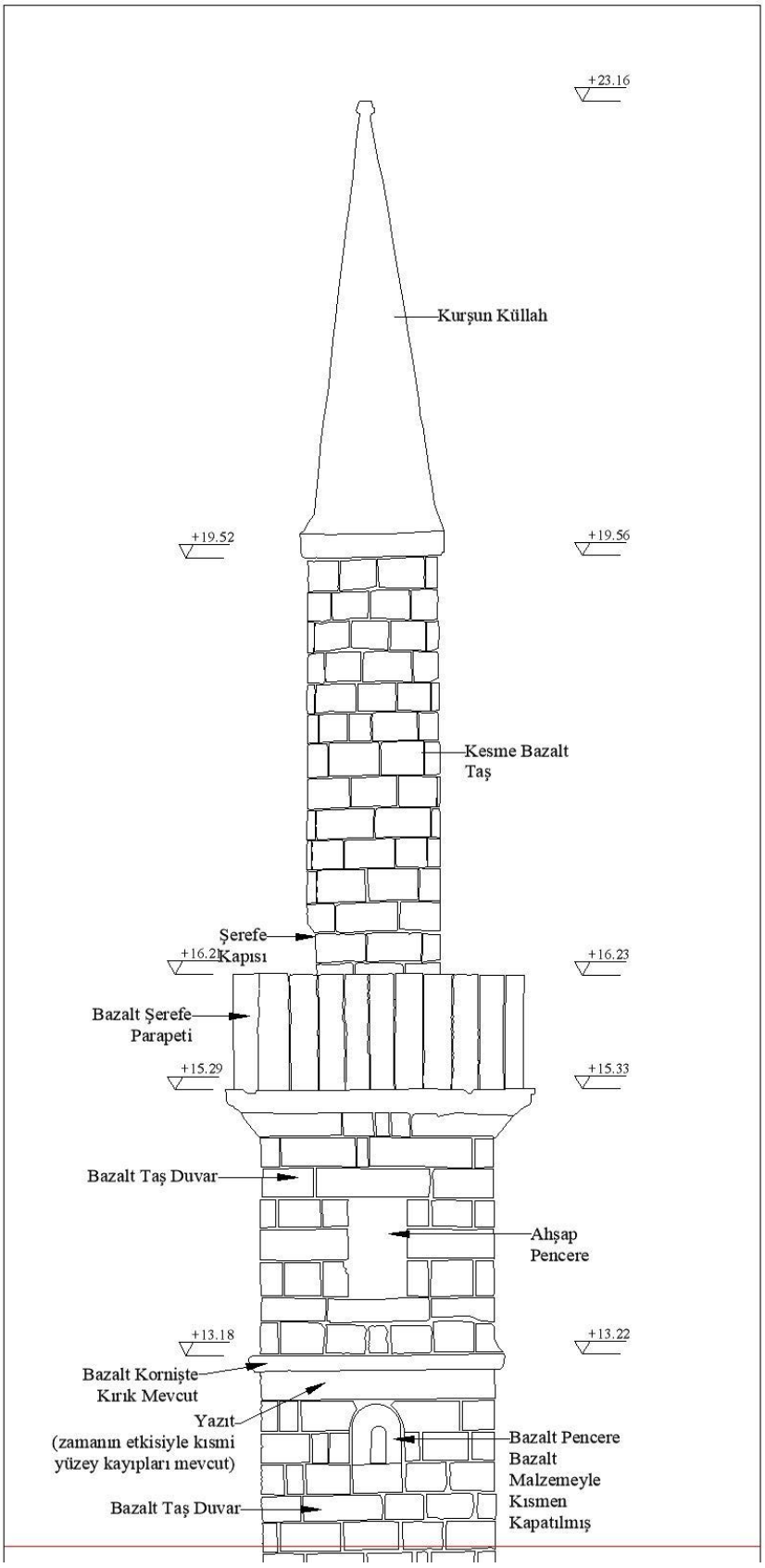
Şekil 4.26. Güney cephesinin detaylı çizimi-2.



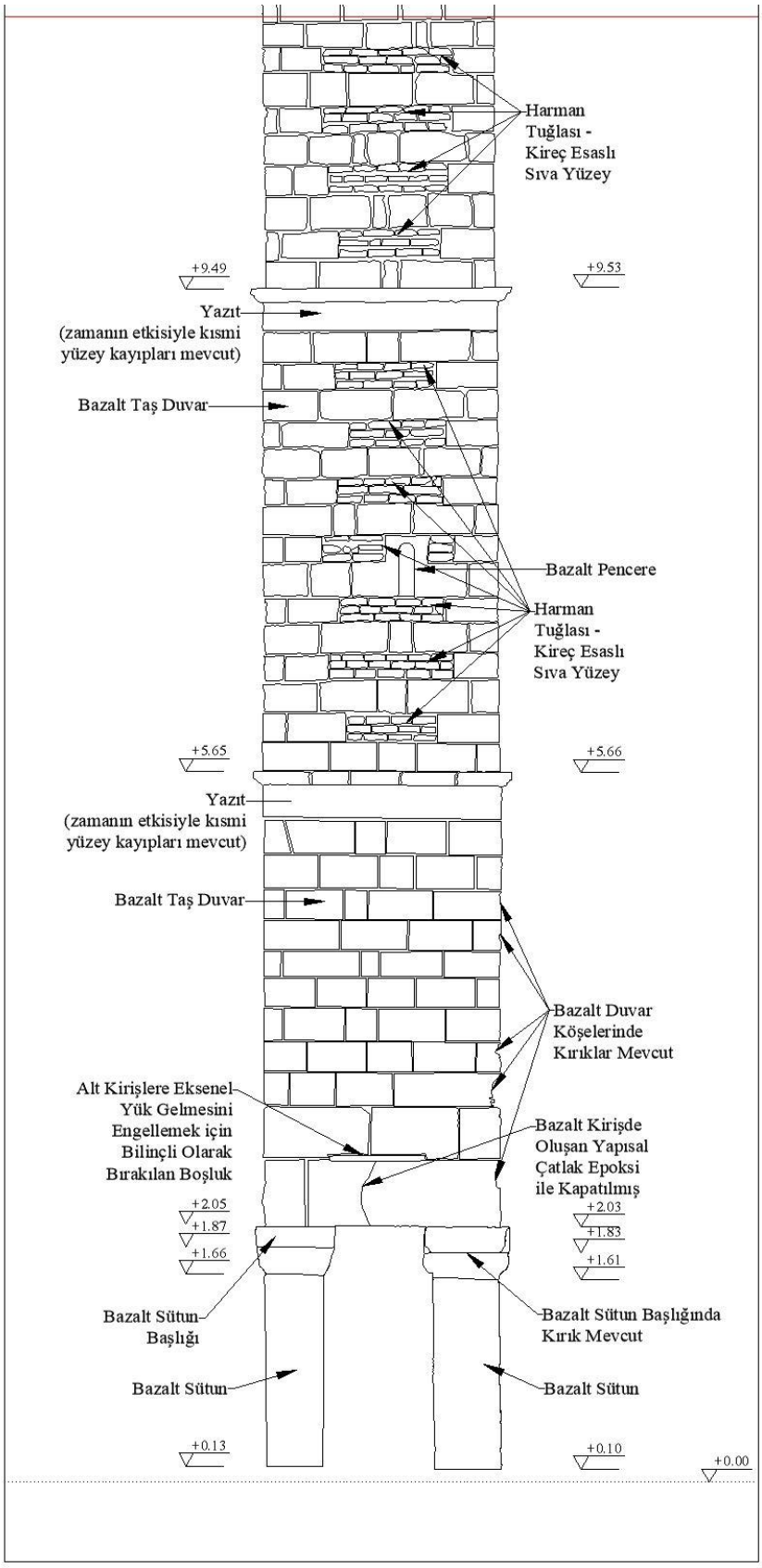
Şekil 4.27. Güney cephesinin fotoğrafı-1.



Şekil 4.28. Güney cephesinin fotoğrafı-2.



Şekil 4.29. Doğu cephesinin detaylı çizimi-1.



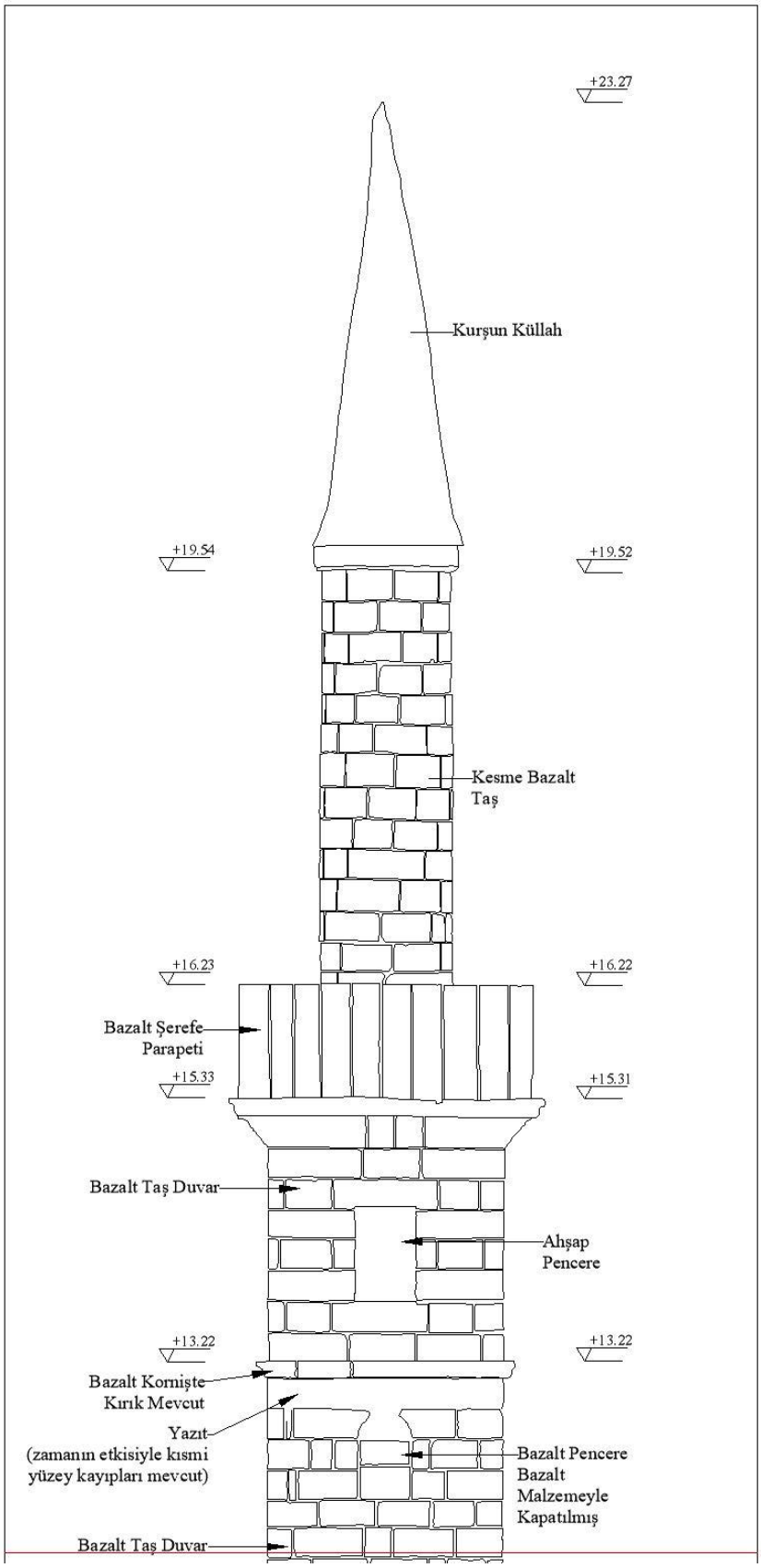
Şekil 4.30. Doğu cephesinin detaylı çizimi-2.



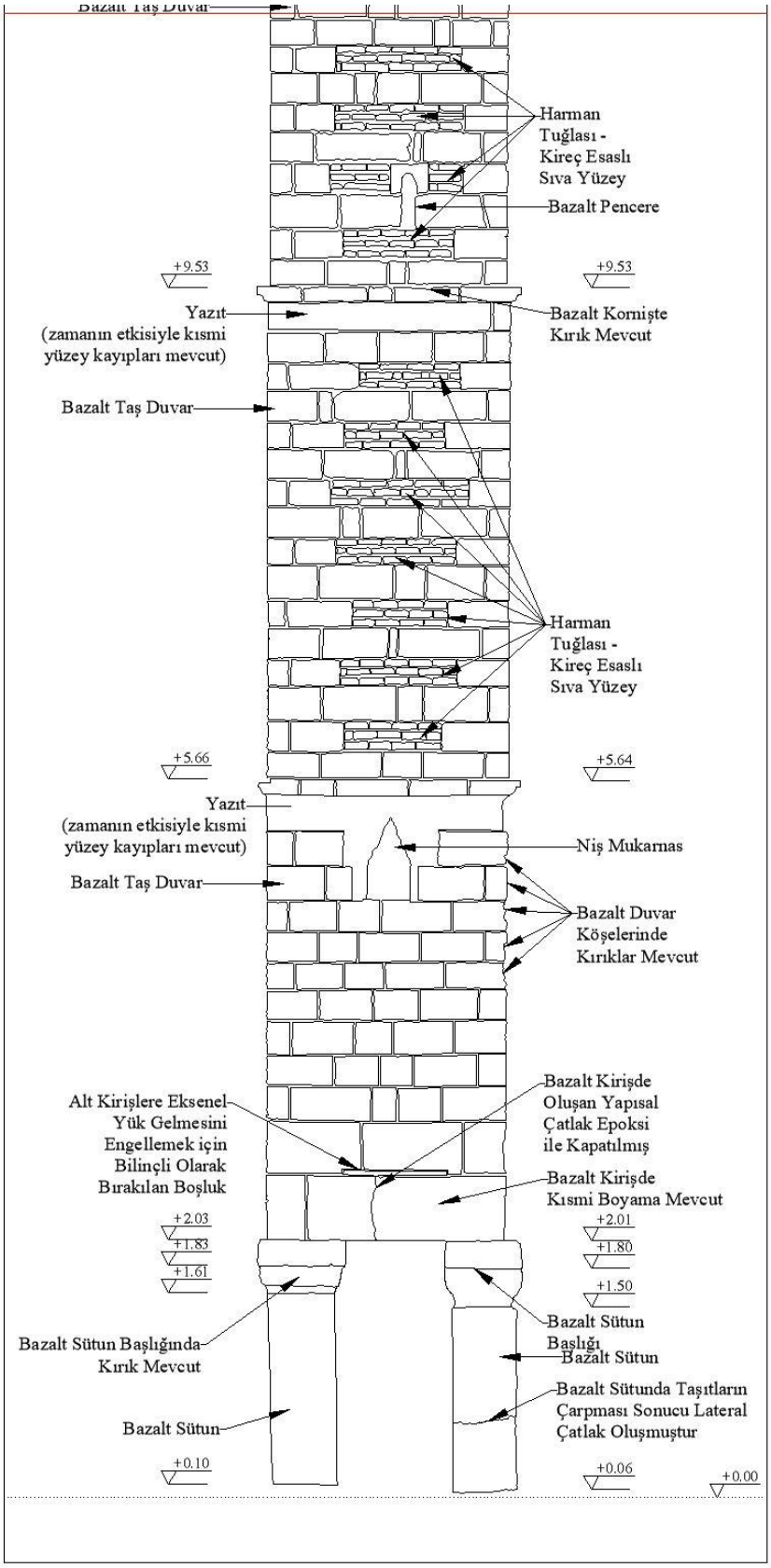
Şekil 4.31. Doğu cephesinin fotoğrafı-1.



Şekil 4.32. Doğu cephesinin fotoğrafı-2.



Şekil 4.33. Kuzey cephesinin detaylı çizimi-1.



Şekil 4.34. Kuzey cephesinin detaylı çizimi-2.

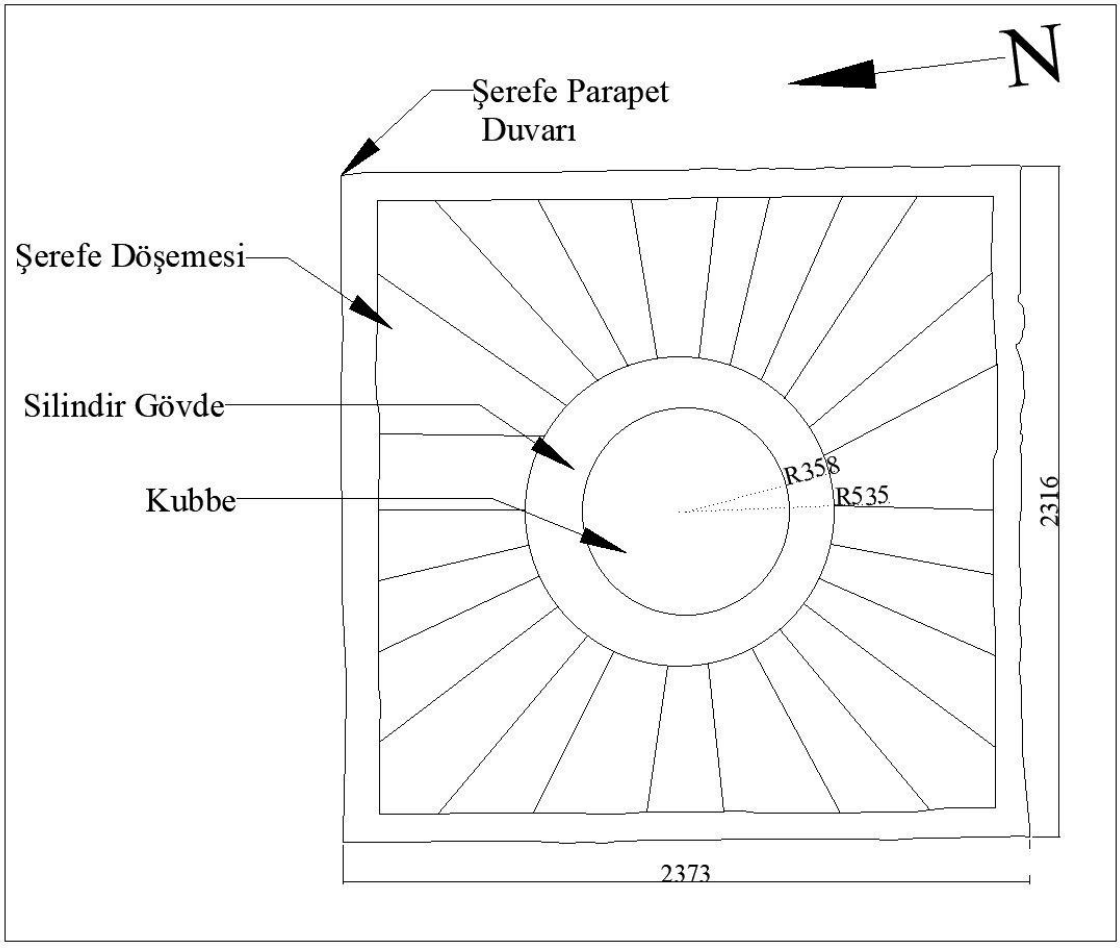


Şekil 4.35. Kuzey cephesinin fotoğrafı-1.



Şekil 4.36. Kuzey cephesinin fotoğrafı-2.

Gövdenin üzerinde bulunan balkon seviyesinde (+15,00), minare gövdesi 231 cm – 237 cm bir planla biterken, minarenin 107 cm çaplı silindirik gövdesi başlar. Bu silindirik gövde tamamen kesme bazalt taştan oluşmaktadır. Şekil 4.37'de minarenin balkon planı verilmiştir (+15,00 plan kotu). Bu gövdenin de üzerinde 71 cm çapla başlayan bir kurşun külah bulunmaktadır. Balkon seviyesinde bazalt parapet duvar dışında, bu duvarın üzerinde montelenmiş cami hoparlörü ve aydınlatma elemanları bulunmaktadır. Bu elemanlar minare ile ancak anakronik bir bağ kurabilmektedirler. Minare üzerinde yapısal olmayan başka bir eleman ise, en tepede kurşun külahın üzerinde olan minarenin paratoneridir (Şekil 4.38).



Şekil 4.37. Balkon planı (+15,00 kot planı)



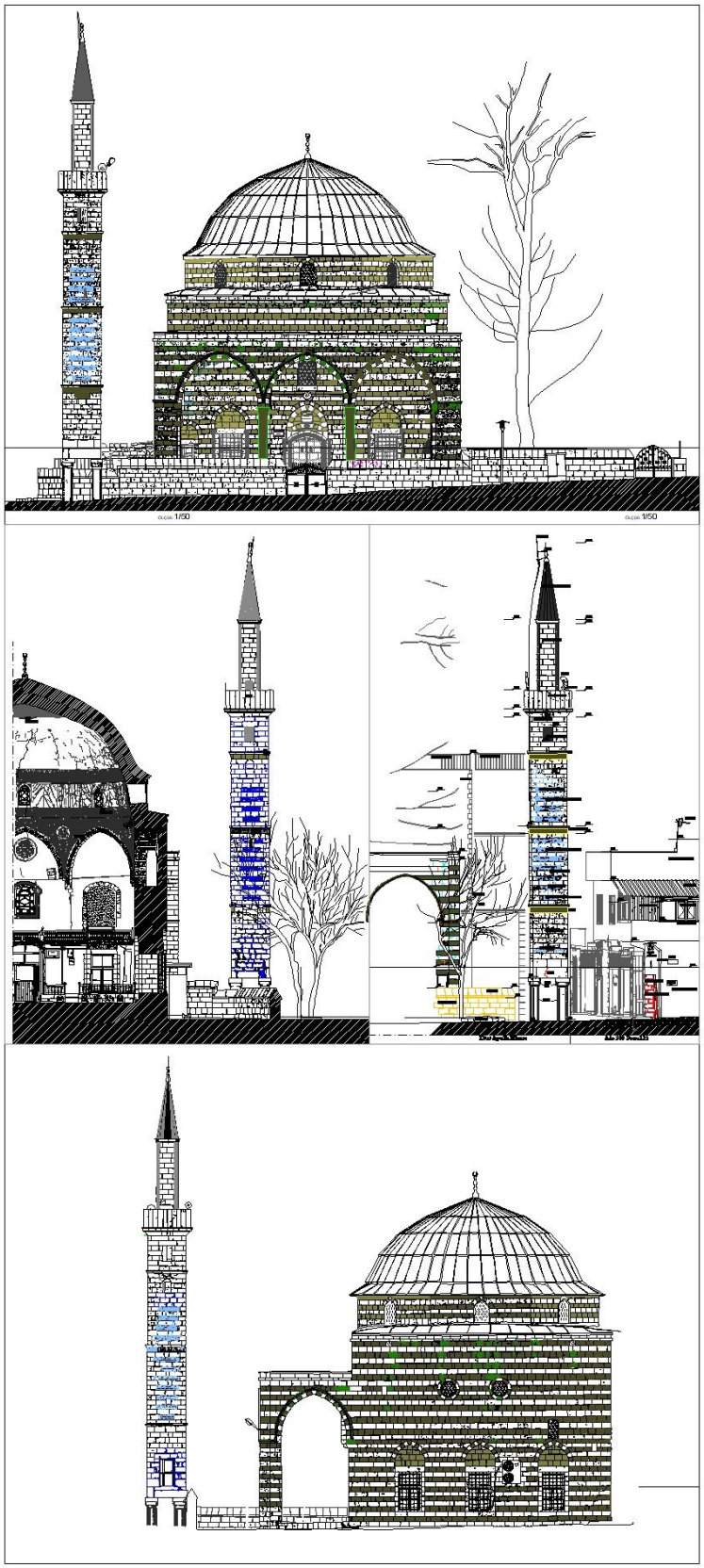
Şekil 4.38. Balkon bölümü, silindirik gövde, kurşun külah.

Balkon seviyesinde bulunan bazalt parapet duvarda ve balkon döşemesinde taşları birleştiren kurşun kenetler bulunmaktadır (Şekil 4.39).



Şekil 4.39. Parapet duvarda bulunan kurşun kenet.

İnal Mimarlık (2013) bu çalışmadan bağımsız olarak, 2013 yılında Dört Ayaklı Minare ve Şeyh Mutahhar Caminin lazer taramasını yapıp çizimlerini ortaya çıkarmıştır. Minarenin sadece cephelerini gösteren bu çizimler karşılaştırma amaçlı temin edilmiş ve Şekil 4.40'ta gösterilmiştir.



Şekil 4.40. Dört Ayaklı Minarenin ve Şeyh Mutahhar Caminin önceden yapılan bir çalışmada oluşturulan çizimleri (İnal Mimarlık, 2013).

4.2 Dört Ayaklı Minarenin Analitik Modeli

Minarenin modelleme süreci, diğer tarihi yığma yapılarda olduğu gibi, malzeme özelliklerinin net olarak bilinmemesi ve yığma yapının analitik modelinin oluşturulmasının zorlukları sebebiyle iterasyon yöntemleriyle ilerlemektedir. Bu çalışmada da ilk süreçte oluşturulan modellerde hatalar tespit edilmiş ve modeller güncellenerek daha gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir. Bütün modelleme süreci boyunca gerek minarenin karmaşık geometrisi gerekse kullanılan fazla çeşitte malzeme yüzünden makro modelleme yaklaşımı tercih edilmiştir.

Daha doğru bir model elde etmek için minarenin ilk olarak en basit analitik modeli oluşturulmuştur. Minarenin en narin bölgesi olan ayaklar ve ayakların üzerinde yer alan iki kat lento başlangıçta modellenmiş, lentoların üzerine gövde ve kubbeyi temsilen yayılı yük etkitilerek analizler yapılmıştır. Daha sonra gövde ve kubbe eklenerek minarenin basit geometrik modeli oluşturulmuştur. En sonda ise minarenin zemin modeli de oluşturularak modelleme tamamlanmıştır.

Dört Ayaklı Minarenin doğrusal olmayan analizleri sonlu elemanlar yazılımı SAP 2000 altında gerçekleştirilmiştir (Sap 2000, 2018). Yapının üç boyutlu modeli lazer taramadan elde edilen çizimler doğrultusunda oluşturulmuştur. Bu model oluşturulurken kesit, plan ve ölçüler hassasiyetle dikkate alınmış, mümkün olduğunca yapı gerçekçi olarak modele aktarılmaya çalışılmıştır. Öncelikle yapının sütunları yerleştirilmiş, daha sonra gövde sütun başlıkları üzerinde bulunan bazalt kirişler iki sıra olarak modellenmiş, bu kirişlerin üzerine kapı hizasında bulunan döşeme ve minarenin gövdesi ilave edilip, gövdenin içinde bulunan merdivenler ve şerefeyi oluşturan döşeme ile parapet duvar eklendikten sonra silindirik kubbe tanımlanmıştır. Yapının alt kısmını oluşturan sütunlar ve kirişler ayrı ayrı detaylı olarak modellenmiş ve bu elemanlardan istenilen verilerin toplanması kolaylaşmıştır.

Tarihi yığma yapıların sismik davranışının ve yapı zemin etkileşiminin analizi, yığma malzemesinin doğrusal olmayan davranışlarını belirlemenin güç olması sebebiyle oldukça zorlu bir iştir.

SAP2000'de kullanılan doğrusal olmayan zaman tanım alanı yöntemi, İbrahimbregovic ve Wilson'ın (1989) geliştirdiği hızlı doğrusal olmayan analiz yönteminin (FNA) bir uzantısıdır. Yöntem, özellikle, doğrusal elastik olan ancak sınırlı

sayıda önceden tanımlanmış doğrusal olmayan elemanlara sahip olan yapısal sistemler için son derece etkilidir. Yöntemin kısa bir tanımı aşağıdaki gibi yapılabilir. Rastgele bir yüke maruz kalmış, öncesinde tanımlanmış doğrusal olmayan bağlantı/destek elemanlar ile lineer elastik bir yapının dinamik denge denklemleri şöyle yazılabilir:

$$\boldsymbol{K}_L\,\boldsymbol{u}(t) + \boldsymbol{C}\,\dot{\boldsymbol{u}}(t) + \boldsymbol{M}\,\ddot{\boldsymbol{u}}(t) + \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{N}}(\boldsymbol{t}) = \boldsymbol{r}(\boldsymbol{t})$$

burada K_L, doğrusal elastik elemanlar için rijitlik matrisi; C, orantılı sönümleme matrisi; M, diyagonal kütle matrisi; r_N bağlantı/destek elemanlarındaki doğrusal olmayan serbestlik derecelerinden oluşan kuvvetlerin vektörü; u, $\dot{u}$ ve $\ddot{u}$, yapının sırasıyla, yer değiştirmesi, hızı ve ivmesi; r, uygulanan yüklerdir. Dört Ayaklı Minarenin SAP 2000 de oluşturulan analitik modeli, sütunlar ve kirişler göz ardı edildiğinde, gerçek yapıya göre daha basitleştirilmiş bir geometriye sahiptir.

4.2.1 Malzeme Modeli

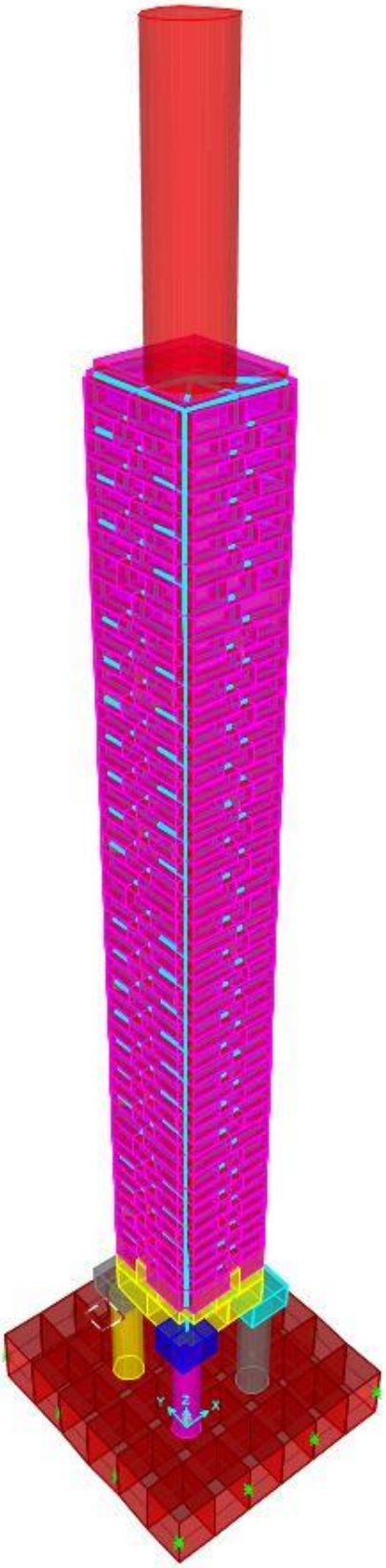
Dört Ayaklı Minarede de tıpkı Diyarbakır'daki pek çok başka tarihi yapıda olduğu gibi esas malzeme olarak bazalt kullanılmıştır. Bazaltın mekanik özellikleri ise yapıların çoğunda değişkendir. Bununla birlikte, tarihi yapılardan, onların malzeme özelliklerini öğrenmek için örnek toplamak mümkün değildir. Bu yüzden tarihi yapı modellenmesinde karşılaşılan en büyük güçlük malzeme modelinin oluşturulmasıdır. Bu tez kapsamında bazaltın malzeme özelliklerini belirlemek amacıyla önceki çalışmalardan yararlanılmıştır. Karakuş ve Akatay (2013), Çizelge 4.1'de verilen yoğunluğu, porozitesi, Brezilya gerilme mukavemetini, elastisite modülünü ve Poisson oranını, Diyarbakır bazalt taşının P-dalga hızlarının ölçümlerini yaparak hesaplanmasını sağlayan bir model önermiştir. Erçin Kahveci ve Kadayıfçı (2013), Diyarbakır bazaltının tek eksenli basınç dayanımını 86.2114 MPa olarak test etmişlerdir. Erçin Kahveci ve Kadayıfçı'nın bulduğu bu değer Çizelge 4.1'de yerine konularak, bazaltın P-dalga hızı (V_p) ve diğer mekanik parametreleri regresyon denklemleri ile belirlenerek bulunmuştur. Bu parametrelerden, özgül ağırlık, tek eksenli basınç dayanımı, elastisite modülü ve Poisson oranı kullanılarak, bazaltın lineer izotropik malzeme modeli oluşturulmuştur.

Çizelge 4.1. Malzeme modelinin oluşturulması için kullanılan regresyon denklemleri

Parametreler	Regresyon Denklemleri	σ_c=86.2114MPa için
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	ρ=0.0003098V_p+1.0058	2.5379
Boşluk Oranı (%)	n=17.911-0.002933V_p	3.4062
Brezilya Çekme Gerilmesi (MPa)	σ_{tb}=0.003078V_p-7.873	7.3490
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	σ_c=0.03467V_p-85.246	86.2114
Elastisite Modülü (GPa)	E_t=0.01286V_p-32.8773	30.7207
Poisson Oranı	ν_s=0.4802-0.00006814 V_p	0.1432

4.2.2 Geometrik Model

Minarenin geometrik modeli SAP 2000 paket programında aslına göre daha sade bir şekilde oluşturulmuştur. Sütunlar ve sütun başlıkları her dört ayak için farklı olarak tanımlanmıştır, bununla birlikte sütun ve başlıklarındaki amorf hasarlar göz ardı edilmiş sütunlar düzgün silindir, başlıklar ise prizmatik olarak oluşturulmuştur. Sütun ve başlıkları çerçeve eleman olarak modellenmiştir. Çerçeve elemanın meshi program tarafından otomatik olarak tanımlanmıştır. Sütun boyları sabitlenmiş, sütün başlıkları değişmemiş ve zemin, sabit ve +0,00 kotu olarak tanımlanmıştır. Sütunların üzerinde bulunan ilk iki sıra bazalt kirişler de sütunlar gibi çerçeve eleman olarak modellenmiş, ikinci sıra kirişlerden sonra duvar modeli alan kesitli elemanlar ile oluşturulmuştur. Bu alan elemanların meshi paket programın otomatik mesh tanımlaması ile yapılmıştır. Sadece yazıtların olduğu alan kesit boyları farklı alınmış, duvarın geri kalanında kullanılan elemanlar sabit yükseklikte düşünülmüştür. Kapı ve pencere açıklıkları ve gövdede bulunan harman tuğla bölgeler ihmal edilmiştir. Balkon seviyesindeki ve ilk sıra kiriş üzerinde bulunan döşeme taşları da çerçeve eleman olarak modellenmiştir. Minarenin kubbesi silindirik düşünülmüş ve balkonun üzerine ağırlığı dağıtılarak modellenmiştir. Bu bölgede kapı açıklığı ihmal edilmiştir. Şekil 4.41'de SAP2000 programında oluşturulan geometrik model gösterilmektedir.

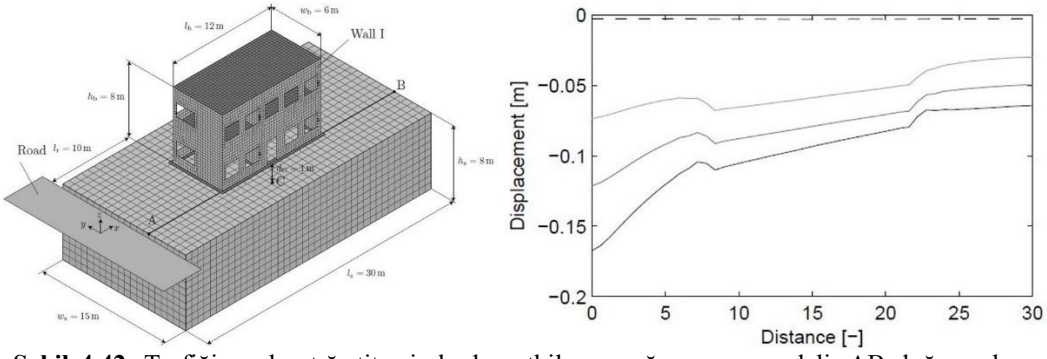


Şekil 4.41. Ticari program SAP2000'de oluşturulan minarenin geometrik modeli

4.2.3 Zemin Modeli

Kentsel bölgelerdeki yapılar düşük genlikli trafik kaynaklı dinamik yüklere maruz kalmaktadırlar. Korkmaz ve ark. (2011), trafik kaynaklı titreşim sorunlarına dikkat çekip, zemin stabilizasyonunun bu durum için bir önlem olduğunu ifade etmektedirler. Zemin stabilizasyon yöntemlerine örnek olarak, kara yolu taşıtları tarafından üretilen titreşimleri azaltan damper tipi elemanlar gösterilebilir. Günümüzde kentleşmenin artmasıyla doğan geniş yol ihtiyacı sebebiyle, Şeyh Mutahhar Cami avlusu küçülmüş ve camiden ayrık bir yapı olan Dört Ayaklı Minare avlunun dışında kalmıştır. Minarenin yanından geçen yolda önemli bir trafik yükü vardır.

Dört Ayaklı Minarenin zemini Winkler yay modeli ile tanımlanmıştır. Bununla ilgili daha önceki örnekleri, Kerr (1965), Bowles (1988), Karaşin ve Gülkan'ın (2008) çalışmalarında görmek mümkündür. Yüklerin transferi için temellerin, yapısal elemanlara bağlı düşey ve/veya rotasyonel yaylar olarak tanımlanmasını önerirler. Drabkin ve ark. (1995), temelin yakınlarında var olan zemin tekrarlı dinamik yüklenmesi, zeminde ciddi plastik deformasyonlara sebep olmakla birlikte zeminde oluşacak farklı oturmalar yapı iç yüklerinde ciddi artış oluşturacağını belirtmişlerdir. Ayrıca François ve ark. (2010), trafiğin sebep olduğu titreşimlerden etkilenmiş bir yığma yapının modelini oluşturup bir hat üzerinde, geçen araç sayısına bağlı olarak temelde oluşacak farklı oturmaları modellemişlerdir Şekil 4.42. Bu modelde zemin ve yapı farklı farklı modellenmiş, yapının yola olan mesafesi 10 m olarak gösterilmiştir. Yığma yapının yanındaki yoldan başlayan 30 m uzunluğunda bir AB doğrusu çizilmiştir. Bu yol üzerinden geçen araç sayısına (10000, açık gri; 500000, gri; 1000000, koyu gri) bağlı olarak AB doğrusunda oluşan farklı oturmalar ise yine şekilde gösterilmiştir.



Şekil 4.42. Trafiğin yol açtığı titreşimlerden etkilenen yığma yapı modeli, AB doğrusu boyunca, yoldan geçen araç sayısına bağlı olarak değişen, modelin düşey yer değiştirmeleri (François ve ark., 2010)

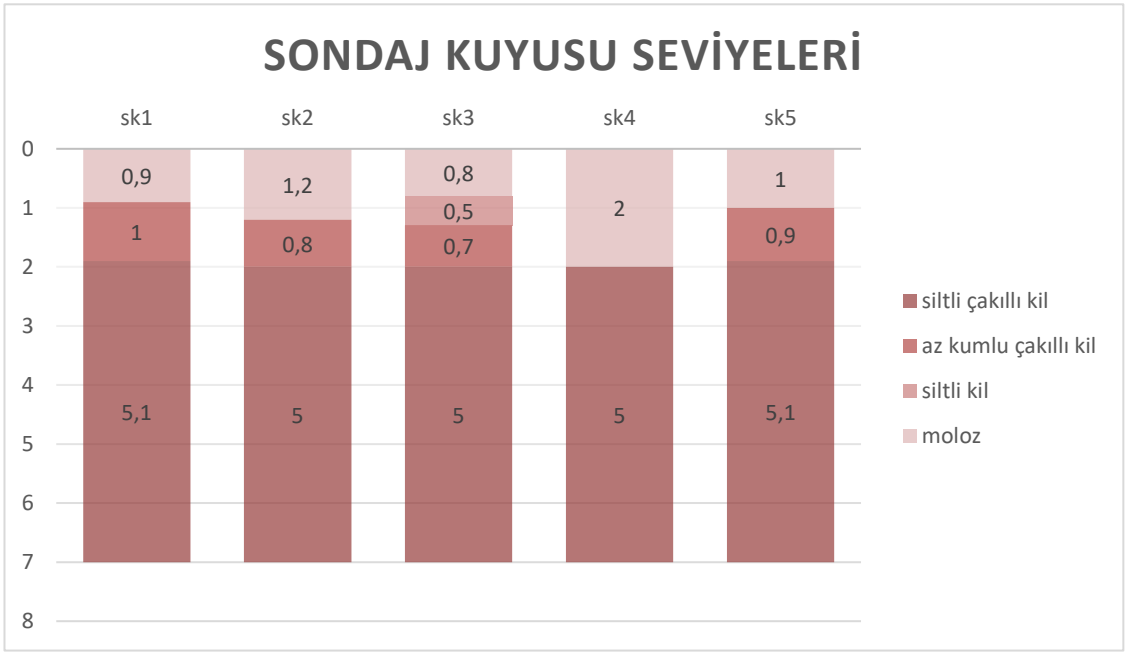
Yay rijitlikleri belirlenirken minare yakınlarında sondaj çalışması yapılarak zemin karakterlerinin incelenmesi düşünülmüş ancak Dört Ayaklı Minarenin yakınlarında sondaj çalışması yapılmasının minareye zarar vereceği öngörülerek bu fikirden vazgeçilmiştir. Bunun yerine daha önce minareye yakın bölgelerde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Baran (2017), Diyarbakır İli, Sur İlçesi, Özdemir Mahallesi 177 ve 158 adalarda jeolojik ve geoteknik özelliklerin tespit edildiği bir rapor yayınlamıştır. Rapor için gerekli olan arazi çalışmaları 19.08.2017'de tamamlanmış ve derinlikleri 7 metre olan 5 temel sondajı ve 8 adet araştırma çukuru yapılmıştır. Raporda geçen etüt alanı ve Dört Ayaklı Minarenin konumu Şekil 4.43'de verilmiştir. Etüt alanının Dört Ayaklı Minareye olan uzaklığı yaklaşık 375 m'dir. Sondajlar esnasında geçilen zeminlerin sıkılık ve kıvam durumunu belirlemek amacı ile teknik şartnamelere (ASTM-1586 VE TS-1901) uygun olarak 1.5 metre aralıklarla Standart Penetrasyon Deneyleri (SPT) yapılıp, örselenmiş ve örselenmemiş (UD) numuneler alınmıştır. Alınan numuneler üzerinde uygun deneyler, Baran zemin ve Kaya Mekaniği Laboratuvarında yaptırılmıştır.

Parsellere ait zeminlerin cinsi ve sağlamlık derecelerinin belirlenmesi için derinlikleri 7 metre olan 5 adet temel sondajı yapılmıştır. Zemin yapısının derinliğine göre dağılımı Şekil 4.44'de verilmiştir (SK: sondaj kuyusu). Bununla birlikte bu sondaj çukurlarında yer altı suyuna -2.30 ile -2.90 metre aralıklarında değişen seviyelerde rastlanılmıştır.

Raporda ayrıca Poisson oranı, yoğunluk, elastisite modülü, kayma modülü ve Bulk modülü gibi zemin tanımlamaları için gereken değerler, zemin dinamik parametreleri, açılan 8 araştırma çukurundan ölçülen sismik P ve S dalgalarına bağlı olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Araştırma çukurları, çizelgede 2 farklı tabakada incelenmiş (Tb-1, Tb-2), "AÇ" indisiyle gösterilmiştir. Dört Ayaklı Minarenin zemin modelleri için bu değerlerin ortalamaları kullanılmıştır.



Şekil 4.43. Minare yakınlarında açılan sondaj çukurlarının lokasyonu.



Şekil 4.44. Sondaj kuyularından çıkan zemin yapısının derinliğe göre dağılımı.

Çizelge 4.2. Araştırma çukurlarından alınan numunelerin zemin parametreleri

Hatlar	Tabaka	Elastisite Modülü (kg/cm^2)	Kayma Modülü (kg/cm^2)	Bulk Modülü (kg/cm^2)	Poisson Oranı	Yoğunluk (g/cm^3)
AÇ-1	Tb-1	917	353	759	0.3	1.3
	Tb-2	5677	2074	7216	0.37	1.64
AÇ-2	Tb-1	895	579	205	0.23	1.26
	Tb-2	3199	2627	598	0.39	1.48
AÇ-3	Tb-1	174	101	46	0.14	1.05
	Tb-2	4688	3491	943	0.33	1.53
AÇ-4	Tb-1	857	455	256	0.06	1.25
	Tb-2	3132	1483	1175	0.06	1.44
AÇ-5	Tb-1	864	1371	121	0.69	1.36
	Tb-2	5293	1939	6526	0.36	1.62
AÇ-6	Tb-1	326	405	49	0.6	1.19
	Tb-2	1549	672	744	0.15	1.34
AÇ-7	Tb-1	414	175	216	0.18	1.16
	Tb-2	1481	595	965	0.24	1.35
AÇ-8	Tb-1	236	664	30	0.82	1.25
	Tb-2	2114	915	1019	0.15	1.39
Ortalama	Tb-1	585.38	512.88	210.25	0.38	1.23
	Tb-2	3391.63	1724.5	2398.25	0.26	1.47

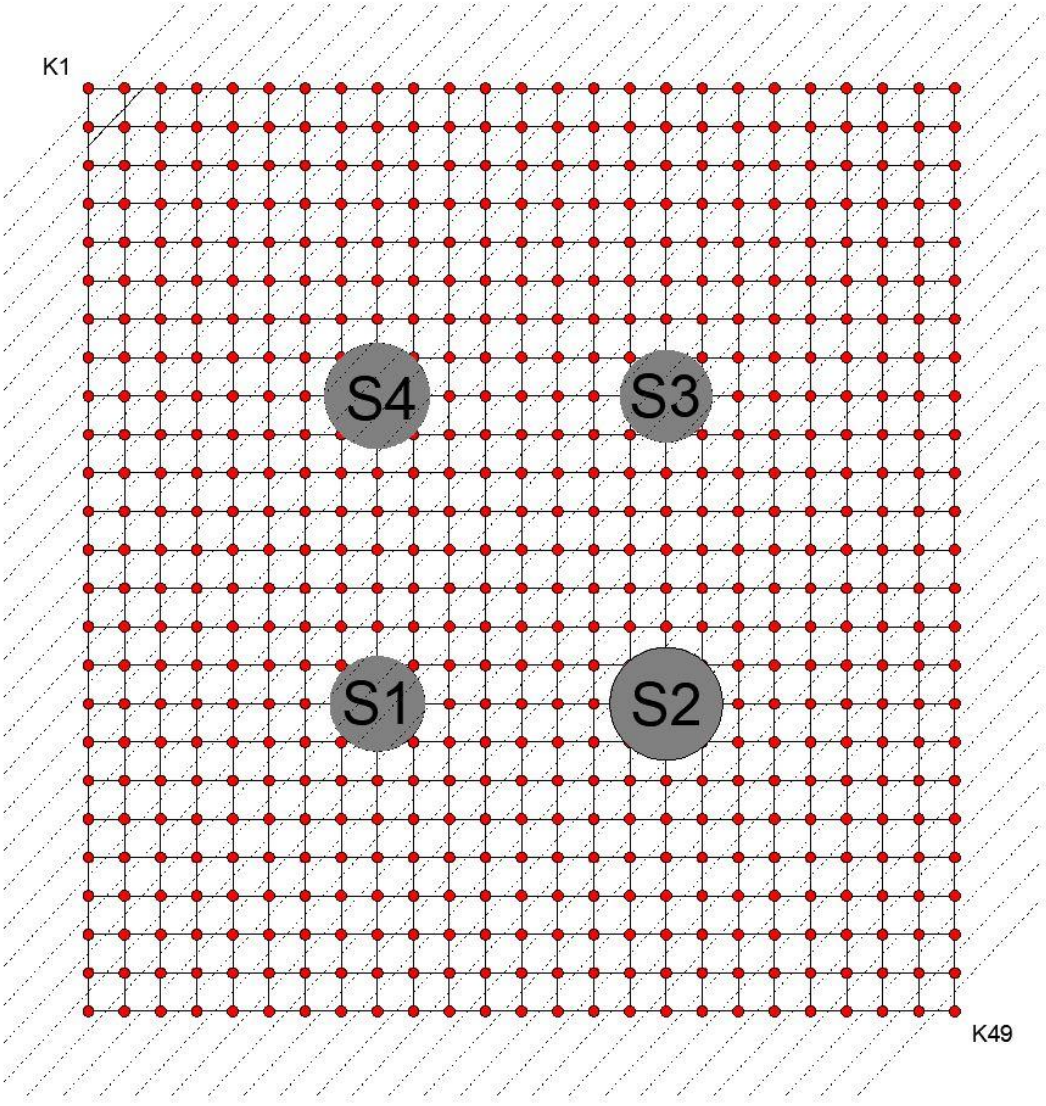
Raporda yapılan tüm arazi gözlemleri, sondaj verileri ve laboratuvar deneyleri sonucunda zemin parametreleri elde edilmiştir. Tüm hesaplamalar ve zemin özelliklerine dayanarak Q_{em}*=13.20~15.20 t/m²* aralığında alınmasının uygun olacağı belirtilmiştir. Yayların tanımlanması için gerekli olan düşey yatak katsayısı (K_v), zemin gerilmesi – deformasyon arasındaki ilişki olarak Bowles (1988)'da verilmiş olup,

$$K_v = Q_{em} * 40 * G_s$$

iken, Q_{em}, zemin emniyet gerilmesi, G_s, güvenlik katsayısını simgelemektedir. Buradan güvenli yönde kalarak K_v =13*40*3 ve K_v =1560 t/m^3 olarak alınmıştır.

Dört Ayaklı Minarenin zemini SAP2000 paket programında modellenmiştir. Zemin modeli 25x25'lik bir kafes olarak düşünülmüş, kafes boyutları sütunların arasındaki mesafe kadar sütunlardan uzaklaşılarak belirlenmiştir. Dolayısıyla, ±0 kotlarındaki düğüm noktaları da dahil olmak üzere 625 tane düğüm noktası oluşturulmuş ve bu düğüm noktaları birbirlerine rijit çubuklarla bağlanmıştır. Düğüm noktaları 5 serbestlik derecesinde tutulup (u_1, u_2, r_1, r_2, r_3), u_3'de yaylar ile modellenmiştir. Minare

zemini için yapılan modellemede kullanılan parametreler Baran (2017) raporundan alınmıştır. Yaylar için K_v =1560 t/m^3 tanımlanmış, her bir yaya bu değer, zemin alanı ile çarpılıp yay sayısına bölünerek etkitilmiştir. Yaylar arasındaki rijit çubuklar da yine zemin parametreleri ile belirlenmiştir (elastisite modülü, Poisson oranı, yoğunluk vs.). İki farklı zemin modeli kullanılmış olup bunlar ZM1 ve ZM2 diye adlandırılmıştır. ZM1, zemin modelinde bütün yayların rijitlik katsayıları aynı olup, ZM2 zemin modelinde yoldan uzaklıklarına bağlı olarak değişen toplam 49 farklı bölgeye ayrılmıştır (K1, K2, ..., K49). Bu kapsamda en güçlü yay rijitliğine sahip bölge yola en uzak K49'da tanımlanırken, en zayıf bölge yola en yakın K1'e karşılık gelmektedir. Oluşturulan bu zemin bölgelerinde kullanılan yayların rijitlik katsayıları Çizelge 4.3'de gösterilmiştir. Bu bölgeler ve SAP 2000'de uygulanan yay dağılımı Şekil 4.45'te verilmiştir.



Şekil 4.45. SAP2000 paket programında oluşturulan zemin modeli için rijitlik bölgeleri

Çizelge 4.3. Zemin modellerinde kullanılan yayların bölgelere göre rijitlik katsayıları

Yay No	ZM1	ZM2	Yay No	ZM1	ZM2	Yay No	ZM1	ZM2
K1	397	347	K18	397	381	K35	397	415
K2	397	349	K19	397	383	K36	397	417
K3	397	351	K20	397	385	K37	397	419
K4	397	353	K21	397	387	K38	397	421
K5	397	355	K22	397	389	K39	397	423
K6	397	357	K23	397	391	K40	397	425
K7	397	359	K24	397	393	K41	397	427
K8	397	361	K25	397	395	K42	397	429
K9	397	363	K26	397	397	K43	397	431
K10	397	365	K27	397	399	K44	397	433
K11	397	367	K28	397	401	K45	397	435
K12	397	369	K29	397	403	K46	397	437
K13	397	371	K30	397	405	K47	397	439
K14	397	373	K31	397	407	K48	397	441
K15	397	375	K32	397	409	K49	397	443
K16	397	377	K33	397	411			
K17	397	379	K34	397	413			

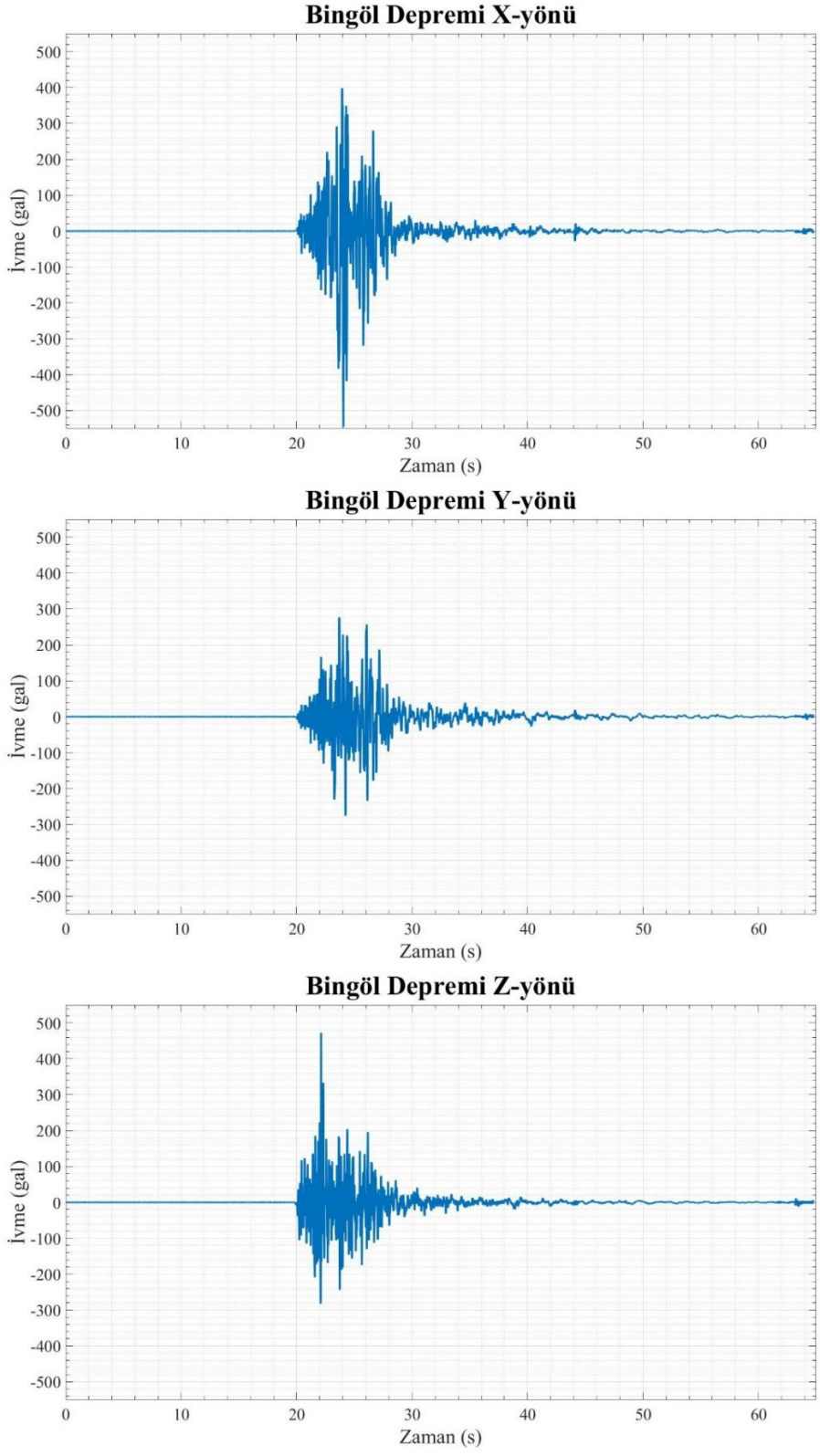
4.2.4 Analizler için Kullanılan Deprem Kayıtları

Dört Ayaklı Minarede yer hareketleri sonrası oluşan gerilme dağılımlarının kontrolleri ve ek eksenel yüklerin tespiti için Diyarbakır yakınlarında 1 Mayıs 2003'te Bingöl'de ve 23 Ekim 2011'de Van'da gerçekleşen depremlerin kayıtları sayısal analizlerde kullanılmıştır. Analizlerde iki yatay bileşen x- ve y- yönlerinde uygulanmış, yer çekimi yönünde (z-) düşey bileşen kullanılmıştır.

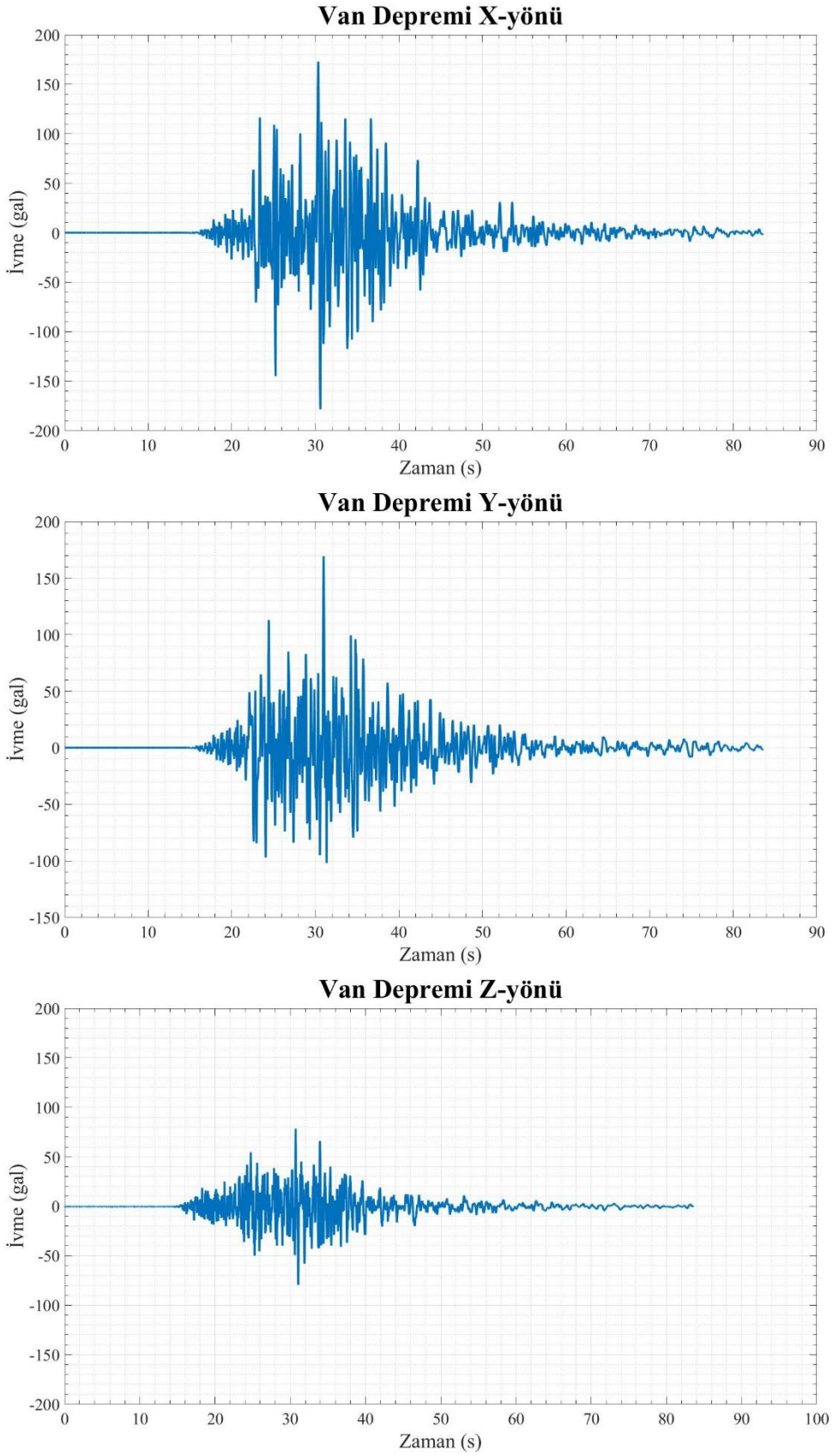
Bingöl Depremi kaydı AFAD (T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı) veri tabanından alınmış, 1 Mayıs 2003'te Bingöl Depreminde kaydedilmiştir. Richter Ölçeğine göre 6.1 büyüklüğünde olup, 6 km derinliğe sahip deprem, 38.94000N – 40.51000E koordinatlarında oluşmuştur. Bingöl Merkez Bayındırlık ve İskan Müdürlüğü istasyonunda kaydedilmiş depremin bileşenleri Şekil 4.46'da gösterilmiştir.

Van Depremi kaydı ise yine AFAD (T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı) veri tabanından alınmış, 23 Ekim 2011'de Van Depreminde kaydedilmiştir. Richter Ölçeğine göre 6.7 büyüklüğünde olup, 19.02 km derinliğe sahip deprem, 38.99011N – 43.46570E koordinatlarında oluşmuştur. Van Muradiye

Meteoroloji Müdürlüğü istasyonunda kaydedilmiş depremin bileşenleri Şekil 4.47'de gösterilmiştir.



Şekil 4.46. Bingöl (2003) depreminin ivme bileşenleri.



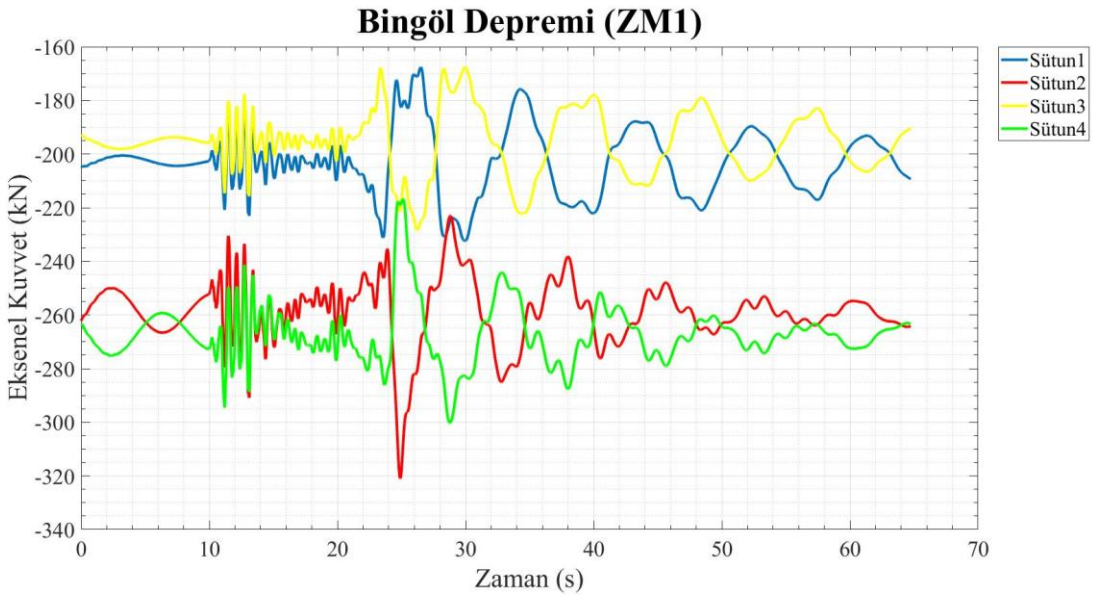
Şekil 4.47. Van (2011) depreminin ivme bileşenleri.

4.3 Dört Ayaklı Minarenin Yapısal Analiz Sonuçları

Dört Ayaklı Minarenin malzeme modeli, geometrik modeli ve zemin modeli oluşturulmuş ve bu modellere yapının kendi ölü yükü haricinde deprem ivmeleri etkitilerek yapının olası limitleri saptanmaya çalışılmıştır.

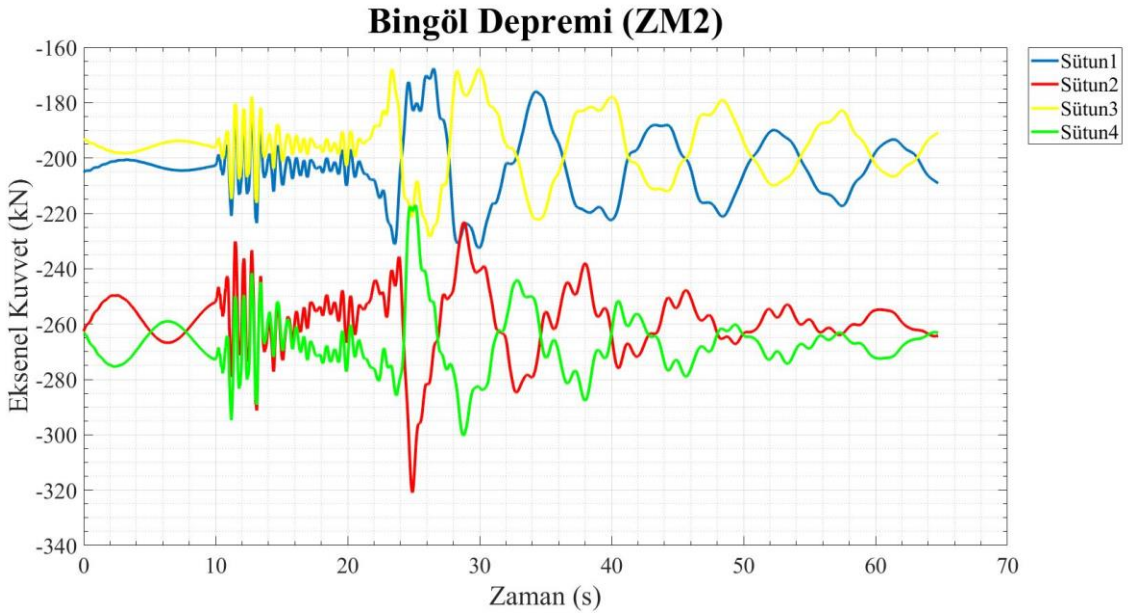
4.3.1 Sütun Davranışı

Minarenin geliştirilen modelinin yapısal tepkileri ortaya çıkarılmıştır. Farklı deprem ivmelerine, farklı zemin modellerinde maruz kalan sütunların bu depremlere karşı gösterdiği tepkiler incelenmiştir. Şekil 4.48'd3 Bingöl Depremine ait ivmelerde zemin modeli 1'e (ZM1) göre sütunların verdiği tepkiler incelenmiştir. Rijitlikleri en büyük olan 2 ve 4 nolu sütunların en fazla eksenel basınca maruz kaldıkları görülmektedir. Sütun2 maksimum 323 kN yüke maruz kalırken, Sütun4 maksimum 300 kN yüke maruz kalmaktadır.



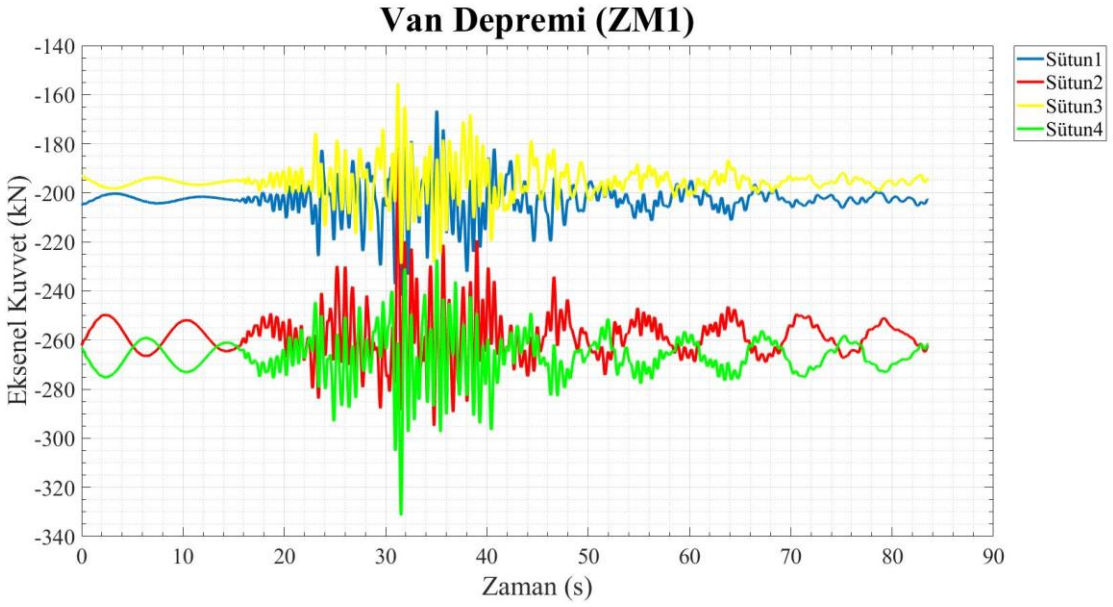
Şekil 4.48. Bingöl (2003) depremine maruz kalan sütunların Zemin modeli 1'e göre gösterdiği tepkiler.

Şekil 4.49'da Bingöl Depremine ait ivmelerde zemin modeli 2'ye (ZM2) göre sütunların verdiği tepkiler incelenmiştir. Rijitlikleri en büyük olan 2 ve 4 nolu sütunların en fazla eksenel basınca maruz kaldıkları görülmektedir. Sütun2 maksimum 320 kN yüke maruz kalırken, Sütun4 maksimum 305 kN yüke maruz kalmaktadır.



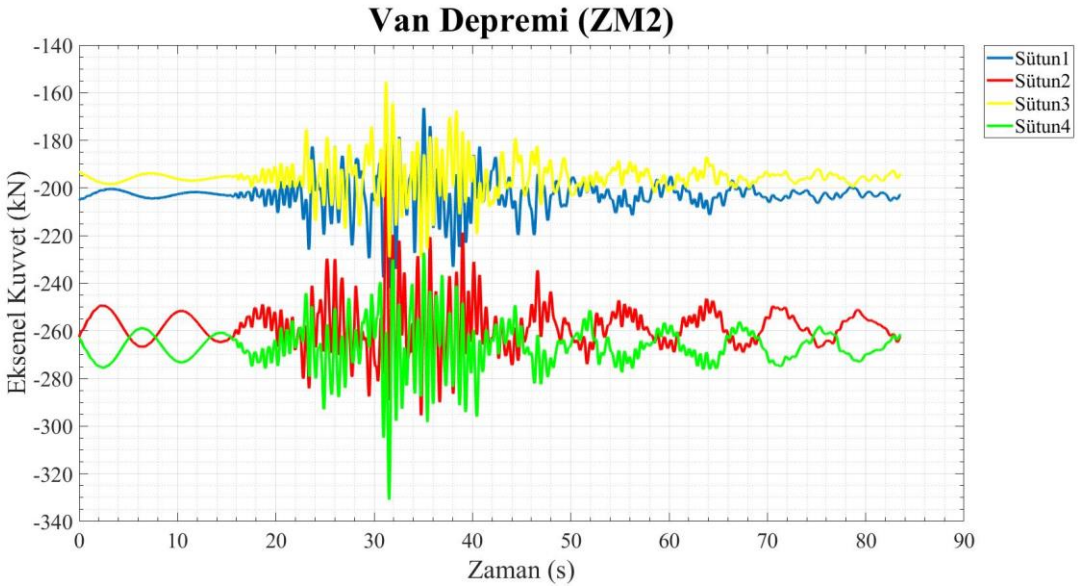
Şekil 4.49. Bingöl (2003) depremine maruz kalan sütunların Zemin modeli 2'ye göre gösterdiği tepkiler.

Şekil 4.50'de Van Depremine ait ivmelerde ZM1'e göre sütunların verdiği tepkiler incelenmiştir. Rijitlikleri en büyük olan 2 ve 4 nolu sütunların en fazla eksenel basınca maruz kaldıkları görülmektedir. Sütun2 maksimum 332 kN yüke maruz kalırken, Sütun4 maksimum 294 kN yüke maruz kalmaktadır.



Şekil 4.50. Van (2011) depremine maruz kalan sütunların Zemin modeli 1'e göre gösterdiği tepkiler.

Şekil 4.51'de Van Depremine ait ivmelerde ZM2'ye göre sütunların verdiği tepkiler incelenmiştir. Rijitlikleri en büyük olan 2 ve 4 nolu sütunların en fazla eksenel basınca maruz kaldıkları görülmektedir. Sütun2 maksimum 325 kN yüke maruz kalırken, Sütun4 maksimum 298 kN yüke maruz kalmaktadır.

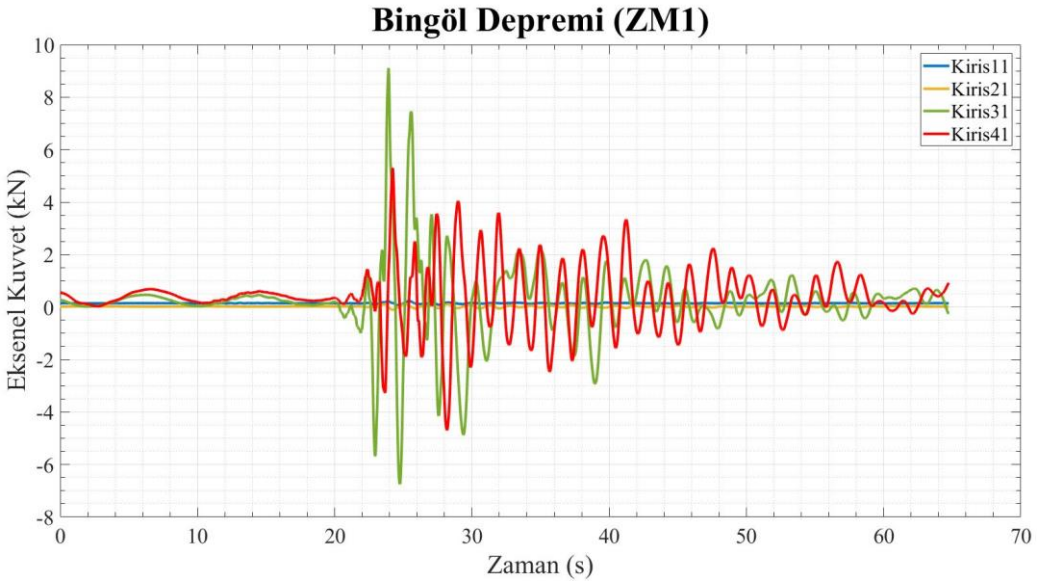


Şekil 4.51. Van (2011) depremine maruz kalan sütunların Zemin modeli 2'ye göre gösterdiği tepkiler.

Depremler sonucunda sütunlarda oluşan eksenel kuvvetlerin dağılımının sütün rijitlikleri ile benzeştiği görülmektedir. Zemin modellerine göre eksenel yükler incelendiğinde küçük miktarlarda değişimler gözlenmiş, depremlere göre incelendiklerinde ise sütunlarda oluşan maksimum yüklere depremlerin pik anlarında ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Depremlere göre sütunlarda oluşan maksimum yüklerde hatırı sayılır farklar oluşmuştur.

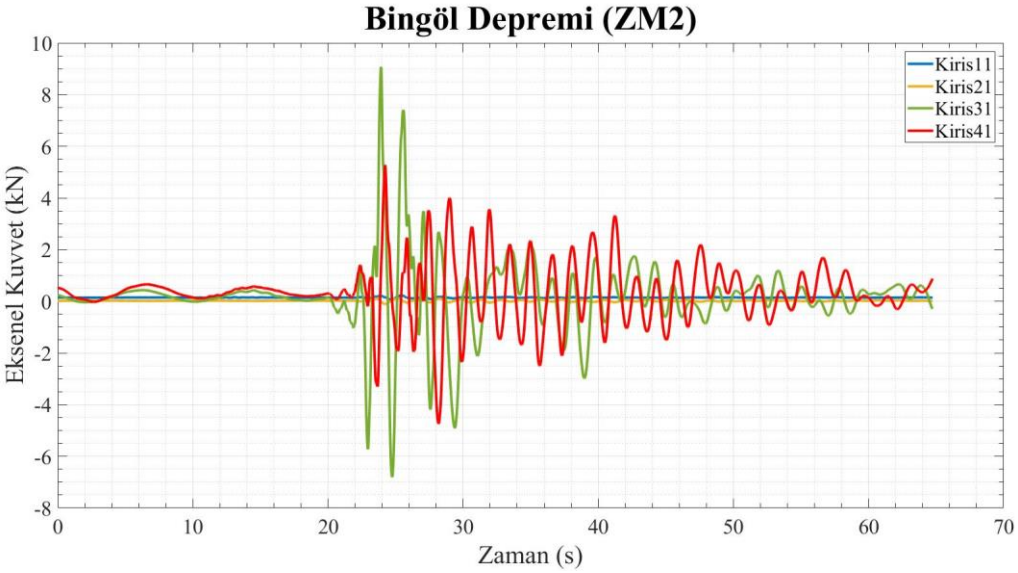
4.3.2 Kiriş Davranışı

Farklı deprem ivmelerine, farklı zemin modellerinde maruz kalan kirişlerin bu depremlere karşı gösterdiği tepkiler incelenmiştir. Minarede bulunan sütun başlıkları üzerinde yer alan bazalt kirişlerden, yapısal çatlakları olan B3 ve B4 kirişleri bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Şekil 4.52'de Bingöl Depremine ait ivmelerde ZM1'e göre kirişlerin üzerinde oluşan eksenel kuvvetler grafiğe dökülmüştür. Şekilden de anlaşılacağı üzere farklı deprem kayıtları için B3 ve B4 kirişleri üzerinde kayda değer eksenel kuvvetler oluşmamaktadır.



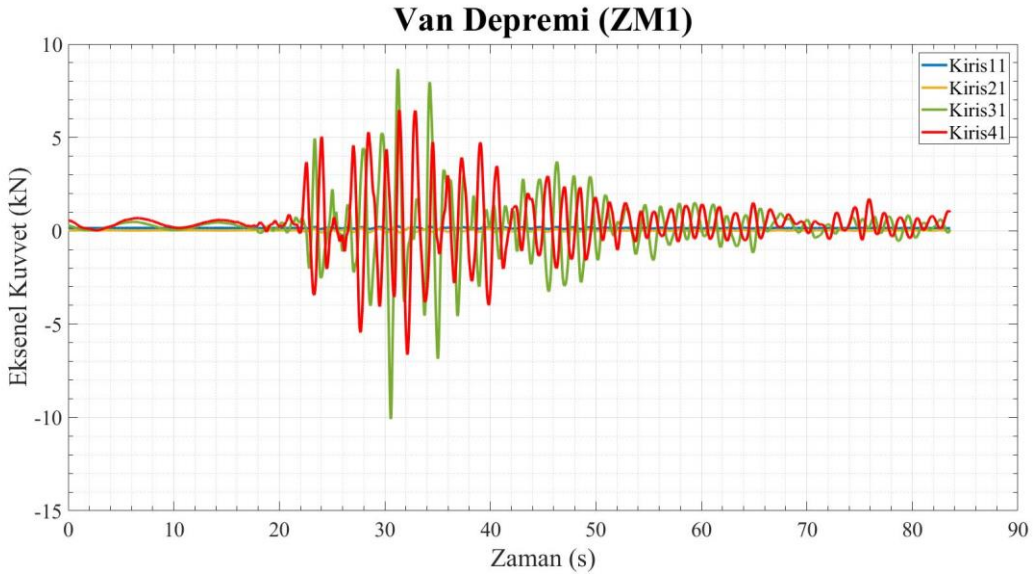
Şekil 4.52. Bingöl (2003) depremine maruz kalan B3 ve B4 kirişlerinin ZM1 modelinde oluşan eksenel kuvvetleri.

Şekil 4.53'te Bingöl Depremine ait ivmelerde ZM2'ye göre kirişlerin üzerinde oluşan eksenel kuvvetler grafiğe dökülmüştür. Şekilden de anlaşılacağı üzere farklı deprem kayıtları için B3 ve B4 kirişleri üzerinde kayda değer eksenel kuvvetler oluşmamaktadır.



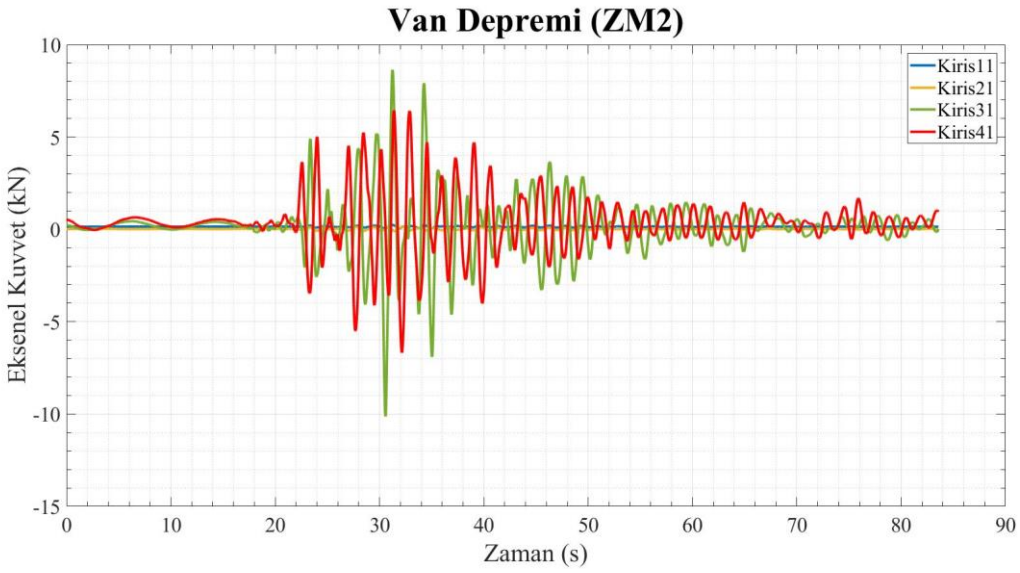
Şekil 4.53. Bingöl (2003) depremine maruz kalan B3 ve B4 kirişlerinin ZM2 modelinde oluşan eksenel kuvvetleri.

Şekil 4.54'te Van Depremine ait ivmelerde ZM1'e göre kirişlerin üzerinde oluşan eksenel kuvvetler grafiğe dökülmüştür. Şekilden de anlaşılacağı üzere farklı deprem kayıtları için B3 ve B4 kirişleri üzerinde kayda değer eksenel kuvvetler oluşmamaktadır.



Şekil 4.54. Van (2003) depremine maruz kalan B3 ve B4 kirişlerinin ZM1 modelinde oluşan eksenel kuvvetleri.

Şekil 4.55'te Van Depremine ait ivmelerde ZM2'ye göre kirişlerin üzerinde oluşan eksenel kuvvetler grafiğe dökülmüştür. Şekilden de anlaşılacağı üzere B3 ve B4 kirişleri üzerinde kayda değer eksenel kuvvetler oluşmamaktadır.

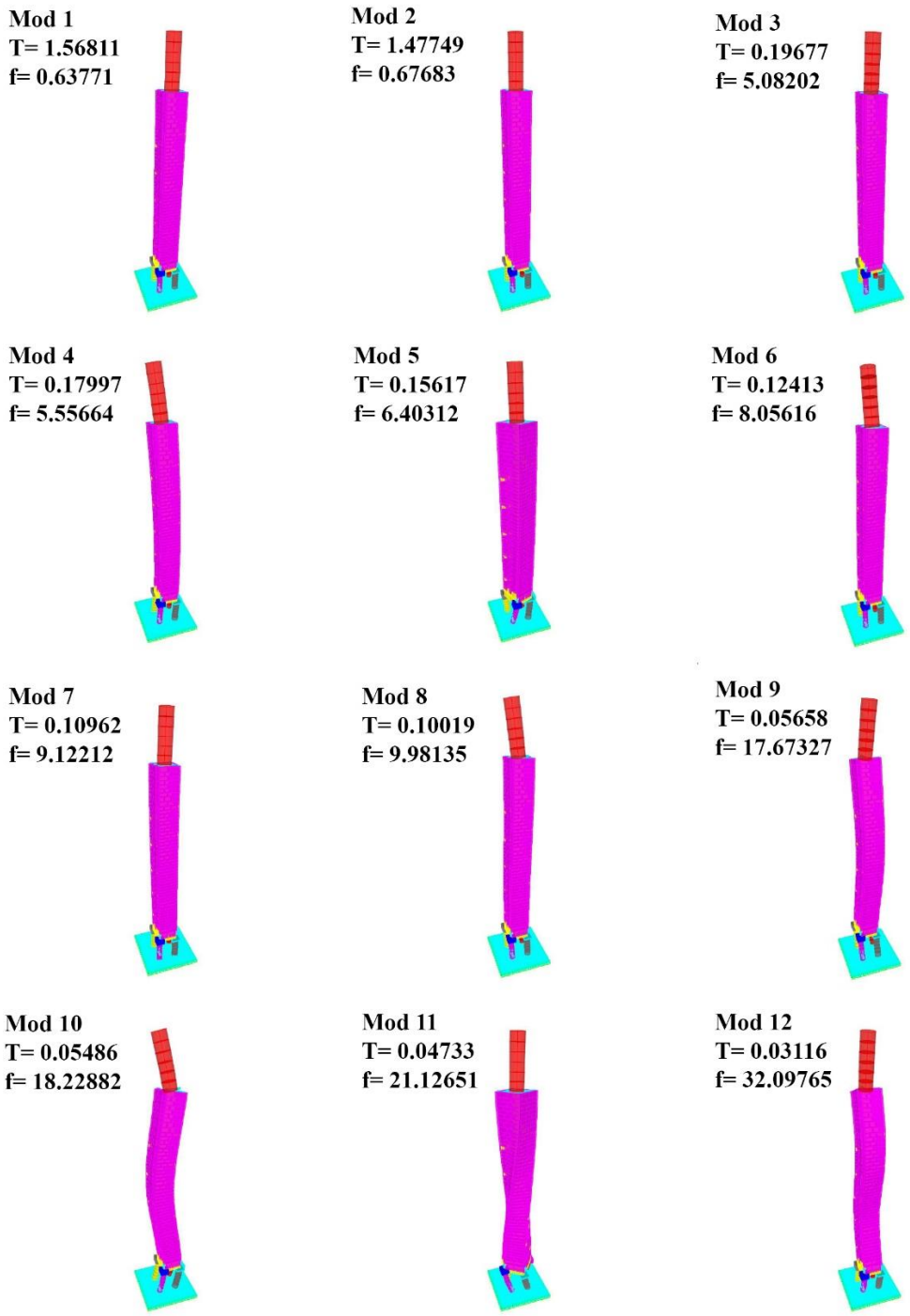


Şekil 4.55. Van (2003) depremine maruz kalan B3 ve B4 kirişlerinin ZM2 modelinde oluşan eksenel kuvvetleri.

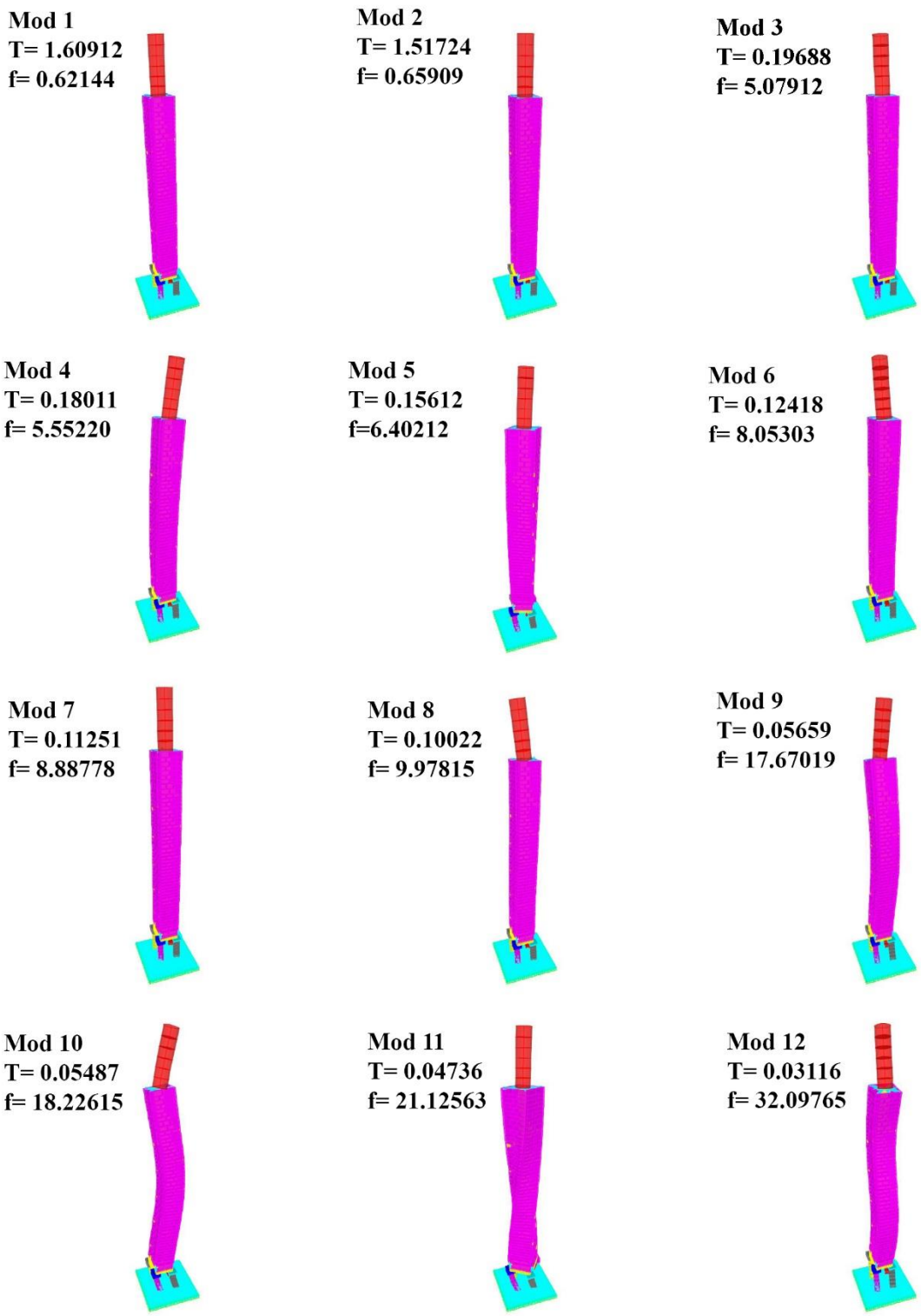
Çatlak bulunan 3 ve 4 kirişlerinde eksenel kuvvet gözlenmiş olsa da bu eksenel kuvvetlerin kirişlerde çatlağa sebebiyet verecek büyüklükte olmadığı görülmüştür. Kiriş eksenel kuvvetleri depremlerin pik anlarında maksimuma ulaşmıştır.

4.3.3 Yapının Modlara Göre Davranışı

Minarenin geliştirilen modelinin yapısal tepkilerinin yanı sıra, modal tepkileri de farklı zemin modellerine göre belirlenmiştir. 12 farklı moda göre oluşan minare davranışları, periyotları ve genlikleri ZM1 için Şekil 4.56'da ZM2 için Şekil 4.57'de gösterilmiştir.



Şekil 4.56. Minarenin ZM1'e göre modal davranışları ve periyotları.

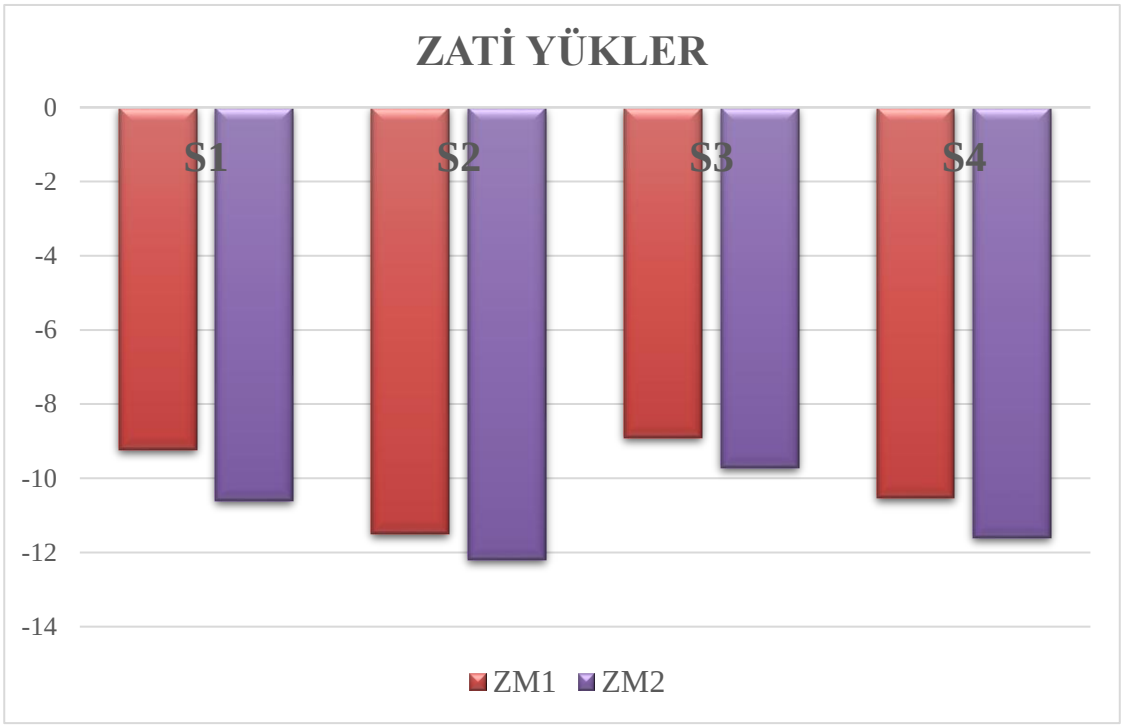


Şekil 4.57. Minarenin ZM2'ye göre modal davranışları ve periyotları.

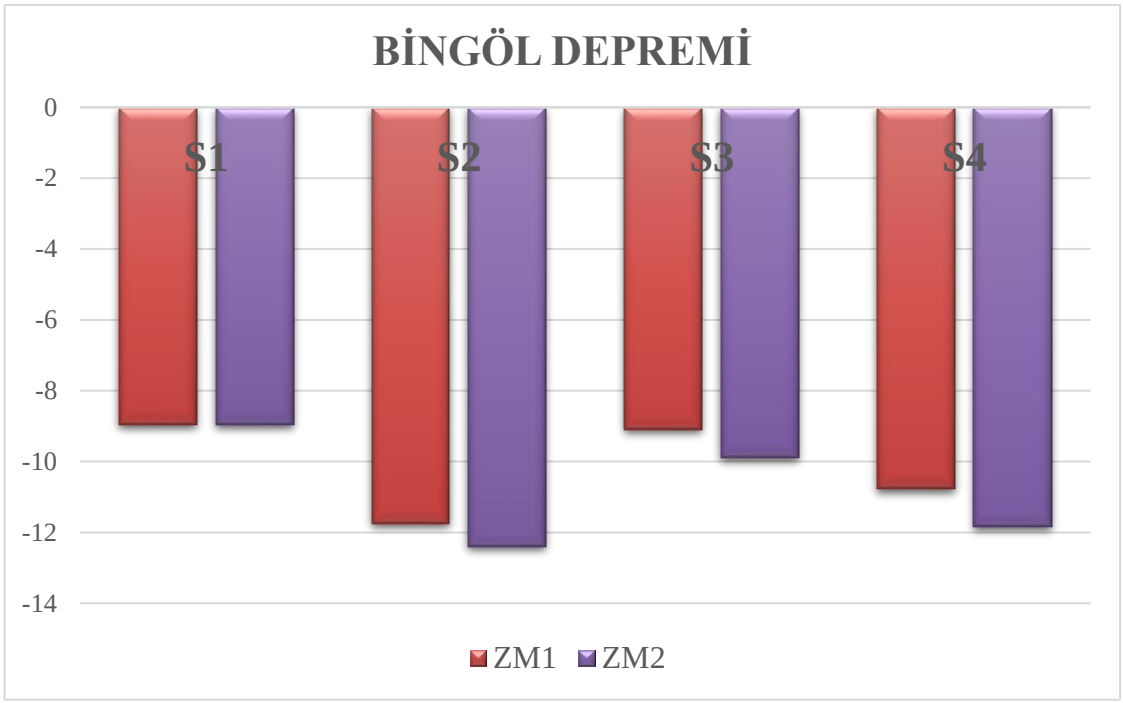
Dört Ayaklı Minarede kullanılan iki farklı zemin modeline bağlı oluşan modların periyotları ve frekansları özellikle ilk 2 modda birbirlerinden ayrışmış diğer modlarda birbirlerine yakın bir davranış göstermişlerdir. Şekil 4.56 ve 4.57'de görüldüğü üzere, 5. ve 11. modlarda burulma olduğu gözlemlenirken geri kalan modlarda yatay ötelenme davranışları gözlemlenmiştir.

4.3.4 Zemin Davranışı

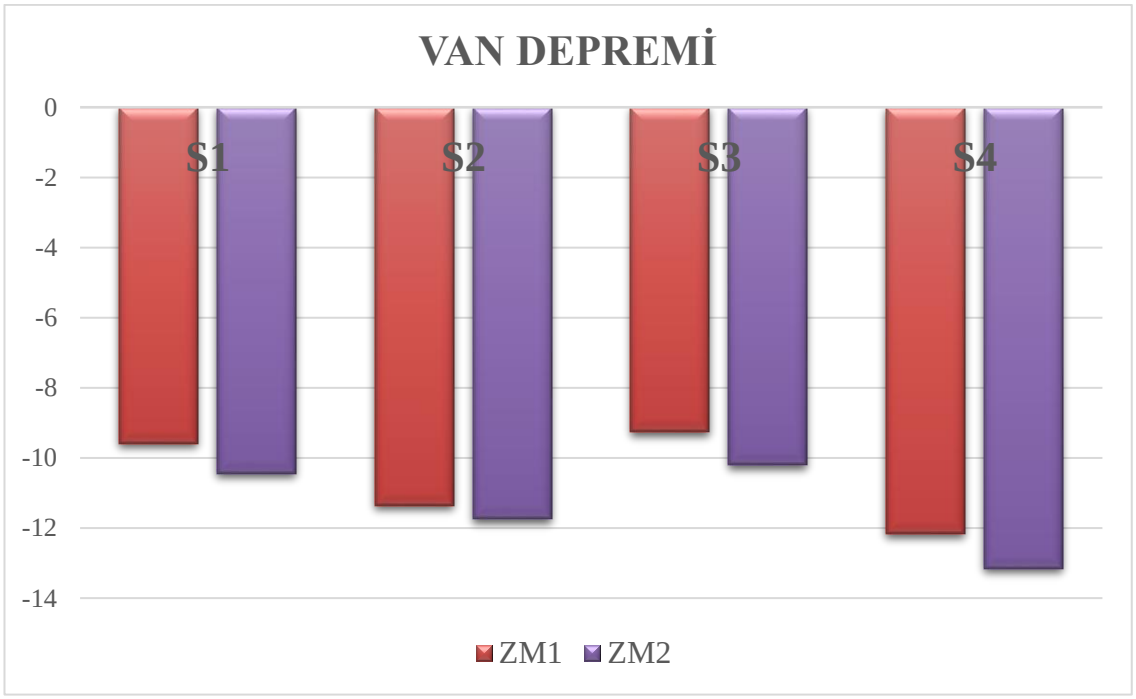
Dört Ayaklı Minarede kullanılan iki farklı zemin modeline göre zati yükler ve deprem etkileri altında sütun altlarında oluşan yer değiştirmeler Şekil 4.58'de zati yükler için, Şekil 4.59'da Bingöl Depremi ve Şekil 4.60'ta Van Depremi için gösterilmiştir. Grafiklerde S1, S2, S3 ve S4 sütunları nitelendirirken verilen değerler mm cinsindendir. Sütun altlarında oluşan zemin oturmaları ZM1 ve ZM2 için her üç durumda belli bir şablon izlemiş ve ZM2 durumunda ZM1'e göre oturma miktarları artmıştır, S4 sütununda ise bu artış daha belirgin olarak görülmüştür. Oturmalar en çok eksenel yük taşıyan S2 ve S4 sütunlarının altında daha fazla oluşmuştur.



Şekil 4.58. Zati yüklere göre sütun altlarında oluşan zemin oturmaları



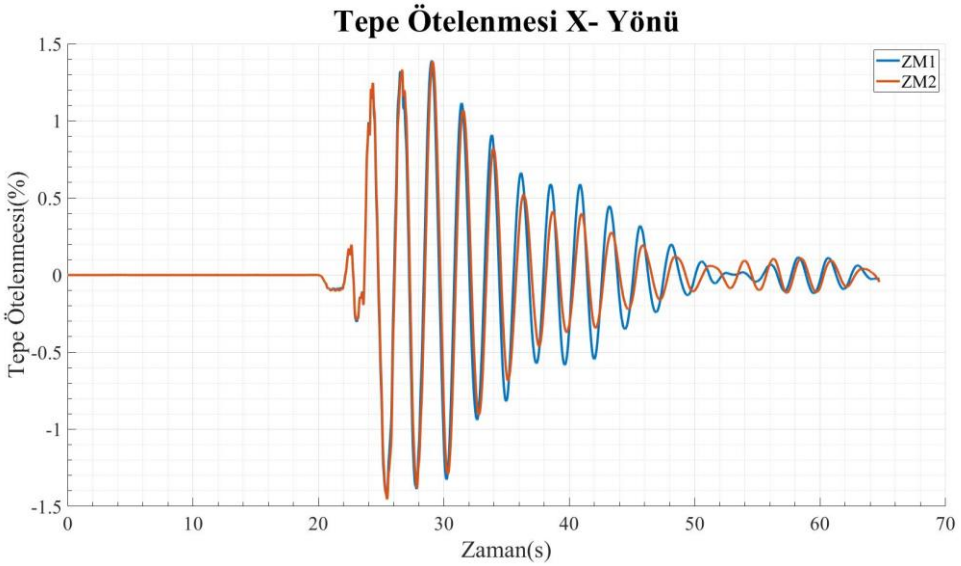
Şekil 4.59. Bingöl Depremine göre sütun altlarında oluşan zemin oturmaları



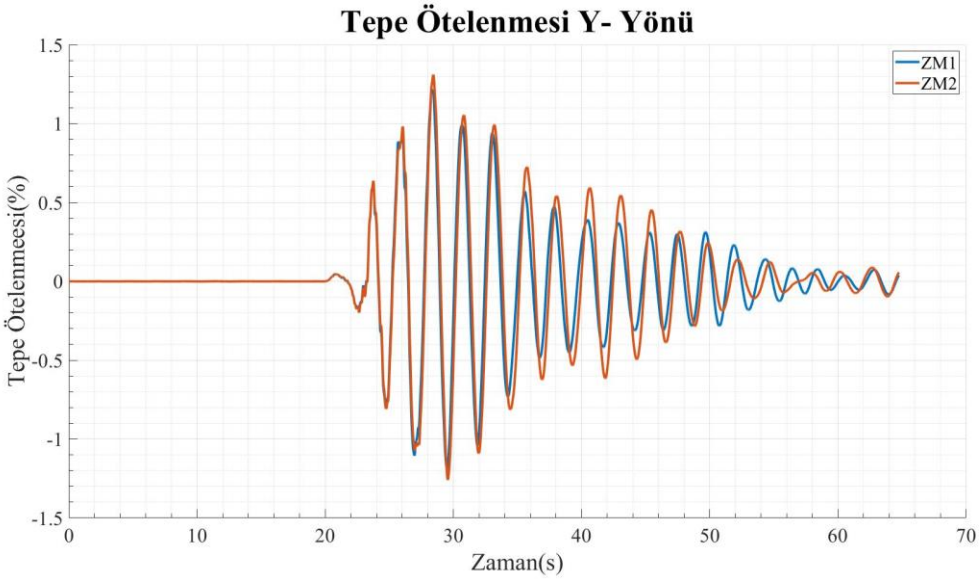
Şekil 4.60. Van Depremine göre sütun altlarında oluşan zemin oturmaları

4.3.5 Tepe Ötelenmesi

Dört Ayaklı Minarenin analizlerinde kullanılan Bingöl Deprem verisine göre, minarenin tepe noktasında oluşan x- ve y- yönündeki tepe ötelenmeleri Şekil 4.61 ve 4.62'de verilmiştir. Minarenin tepe noktası olarak kubbenin en üst noktası seçilmiştir. Analizlerde kullanılan x- yönü minarenin kuzey-güney doğrultusuna karşılık gelmekteyken, y- yönü doğu-batı doğrultusuna karşılık gelmektedir. ZM1 modelinde; x-yönünde 1.390%, y- yönünde 1.216%; ZM2 modelinde x- yönünde 1.384%, y- yönünde 1.310% tepe ötelenmeleri gözlemlenmiştir. Tepe ötelenmeleri iki model türü için de birbirlerine oldukça yakın bir davranış göstermişlerdir.



Şekil 4.61. Bingöl Depremine göre minare tepesinde x- yönünde oluşan tepe ötelenmeleri



Şekil 4.62. Bingöl Depremine göre minare tepesinde y- yönünde oluşan tepe ötelenmeleri

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Diyarbakır ilinin tarihi kent alanı olan Sur içinde yer alan Şeyh Mutahhar Caminin Dört Ayaklı Minaresi yapısal olarak incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Minarenin analizini yapabilmek için bir sonlu eleman programı yardımıyla malzeme modeli, geometrik modeli ve zemin modeli oluşturulmuştur.

Yapılan bu sonlu elemanlar analizlerinde Dört Ayaklı Minare sütunlarının hemen üzerinde yer alan kirişlerin çalışma mekanizması yapının konstrüktif olarak açılmasına karşı mukavemet göstermesi nedeni ile yapı stabilitesine önemli katkıda bulunduğu tespit edilmiştir. Bununla beraber planda hemen hemen simetrik olan bu yapıda sütunların farklı kesit alanlarına sahip olmaları ve tasarım sırasında hesaba katılması mümkün olmayan-araç trafiğinden kaynaklı titreşimler ile süregelen pek çok deprem neticesinde kirişlerin ikisinde oluşmuş çatlaklar önemli bir yapısal hasar başlangıcı olarak değerlendirilmektedir.

Oluşturulan bu modelden alınan sonuçların literatürde yer alan önceki çalışmalarla benzerlikler gösterdiği görülmüştür. Dört Ayaklı Minarenin sismik risk değerlendirilmesi yapılmış ve bu riskin azalması için yakınından geçen araçlara bağlı oluşan trafik kaynaklı titreşimlerin dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Trafik kaynaklı tekrarlı dinamik hareketlerin zeminde farklı oturmalara yol açması sebebi ile yapılarda bu davranışa karşı oluşan gerilme farklılıklarına Dört Ayaklı Minarede de rastlanmıştır. Dört Ayaklı Minarenin bazalt kirişlerinde bulunan mevcut çatlaklara bu gerilme farklılıkları neticesinde oluşan eksenel çekme kuvvetleri yol açmış olabilir.

Bazalt kirişlerin seviyesinde bulunan ahşap lentoların bozulmaya uğraması da yapıda gerilme farklılıklarına yol açmış ve bu deformasyonların uniform olmamasından ötürü bazalt kirişlerde mevcut çatlakların oluşumuna sebebiyet verebilecek ek eksenel gerilmeler oluşmasına katkı sağlamıştır.

Bununla beraber, aktif bir sismik bölgede yer alan minarede, yer hareketleri kaynaklı yatay gerilmelerinde ciddi değişimlerin oluşması sonucu, bazalt kirişlerde mevcut çatlakların oluşması muhtemeldir.

Bütün bu sebepler sıralandıklarında minarenin hasara uğraması kaçınılmazdır. Minare üzerinden değerlendirilen çatlak yapısı hakkında, minarenin gelecekteki olası depremler durumunda daha ciddi yapısal hasarlar almaması için sismik kapasitesinin artırılması birincil öneme sahiptir.

Tarihi yapıların korunması ve gelecek nesillere aktarılması, her dönemde ve çağda insanlığın kültürel ve tarihsel borcudur. Pek çok tarihi eserin deprem ve benzeri doğal afetler sonucu ya da çok katlı yapılaşmaların günümüz kent koşulları ile kısmi oturmalar gibi faktörler tarihi yapıların stabilitesini olumsuz yönde etkileme potansiyeline sahiptir.

Bu çalışmayla beraber geliştirilen Dört Ayaklı Minarenin makro modeli yerine, yine bu çalışmada oluşturulan minarenin nokta bulutu verilerinin direkt olarak sonlu elemanlar analizi yapan bir programa aktarılması ile minarenin mikro modeli ileriki çalışmalarda geliştirilebilir. Mikro modelleme ve malzemenin mekanik özellikleri dikkate alınarak oluşturularak bu çalışmada ihmal edilen detaylar modele eklenip doğrusal olmayan analiz yöntemleriyle minarede oluşan hasarların sebepleri daha detaylı biçimde incelenebilir.

6. KAYNAKLAR

Ahunbay, Z. 1996. Tarihi Çevre Koruma ve Restorasyon. YEM Yayını, s.60. İstanbul.

Almaç, U., Pekmezci, I. P., Ahunbay, M. 2016. Numerical Analysis of Historic Structural Elements Using 3D Point Cloud Data. ***The Open Construction and Building Technology Journal***, 10 (1).

Altunışık, A. C. 2011. Dynamic response of masonry minarets strengthened with Fiber Reinforced Polymer (FRP) composites. ***Natural Hazards and Earth System Sciences***, 11 (7).

Autocad 2018. Autodesk Inc., ABD.

Bağbancı, M. B. 2009. Tarihi yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle analizinin Bursa Ördekli Hamamı örneğinde incelenmesi. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Baran Jeolojik Jeoteknik. 2017. Diyarbakır ili, sur ilçesi, özdemir mahallesi 177 ve 158 adalarda yeniden yapılandırma çalışmaların jeolojik, jeoteknik ve jeofizik zemin etüt raporu.

Bartoli, G., Betti, M., Vignoli, A. 2016. A numerical study on seismic risk assessment of historic masonry towers: a case study in San Gimignano. ***Bulletin of Earthquake Engineering***, 14 (6): 1475-1518.

Bayraktar, A., Altunişik, A. C., Sevim, B., Türker, T. 2011. Seismic response of a historical masonry minaret using a finite element model updated with operational modal testing. ***Journal of vibration and control***, 17 (1): 129-149.

Bažant, Z. P., Oh, B. H. 1983. Crack band theory for fracture of concrete. ***Matériaux et construction***, 16 (3): 155-177.

Bedirhanoğlu, İ., İrfanoğlu, A. 2009. Diyarbakır Şeyh Mutahhar Camii dört ayaklı minaresinin deprem yer hareketine karşı davranışı. Uluslararası Katılımlı Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 2, Diyarbakır.

Benli, G., Görmüş Ekizce, E. (2017). Rölövede Yersel Lazer Tarayıcının Katkısı Üzerine Bir Örneklem; Tarihi Yarımada'daki Sarnıçlı Han ve Avlusundaki Sarnıç. ***Megaron***, 12(3): 420-428.

Beysanoğlu, Ş. 1990. Anıtlar ve kitabeleri ile Diyarbakır tarihi. Diyarbakır Büyükşehir Belediyesi Kültür ve Sanat Yayınları, Diyarbakır.

Bitelli, G., Castellazzi, G., D'Altri, A. M., De Miranda, S., Lambertini, A., Selvaggi, I. 2016. Automated voxel model from poınt clouds for structural analysıs of cultural herıtage. ***International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences***, 41.

Brencich, A., Gambarotta, L., Lagomarsino, S. 1998. A macroelement approach to the three-dimensional seismic analysis of masonry buildings.11th European Conference on Earthquake Engineering, Eylül, S, 6-11.

Bongiovanni, G., Clemente, P., Buffarini, G. 2000. Analysis of the seismic response of a damaged masonry bell tower. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Ocak.

Bowles, J. E. 1988. Foundation analysis and design. McGraw-Hill, New York.

Can, H., Ünay, A. İ. 2012. Tarihi Yapıların Deprem Davranışını belirlemek İçin Sayısal Analiz Yöntemleri. ***Journal of the Faculty of Engineering and Architecutre of Gazi University***, 27 (1): 211-217.

Casolo, S., Sanjust, C. A. 2009. Seismic analysis and strengthening design of a masonry monument by a rigid body spring model: The "Maniace Castle" of Syracuse. ***Engineering Structures***, 31 (7): 1447-1459.

Casolo, S., Milani, G., Uva, G., Alessandri, C. 2013. Comparative seismic vulnerability analysis on ten masonry towers in the coastal Po Valley in Italy. ***Engineering Structures***, 49: 465-490.

Castellazzi, G., D'Altri, A. M., Bitelli, G., Selvaggi, I., Lambertini, A. 2015. From laser scanning to finite element analysis of complex buildings by using a semi-automatic procedure. ***Sensors***, 15 (8), 18360-18380.

Clemente, R., Roca, P., Cervera, M. 2006. Damage model with crack localization–application to historical buildings. Structural Analysis of Historical Constructions, Yeni Delhi.

D'Altri, A. M., Milani, G., de Miranda, S., Castellazzi, G., Sarhosis, V. 2018. Stability analysis of leaning historic masonry structures. ***Automation in Construction***, 92: 199-213.

D'Ambrisi, A., Mariani, V., Mezzi, M. 2012. Seismic assessment of a historical masonry tower with nonlinear static and dynamic analyses tuned on ambient vibration tests. ***Engineering Structures***, 36: 210-219.

D'Ayala D, Speranza E. 2002 An integrated procedure for the assessment of the seismic vulnerability of historic buildings. 12th European conference on earthquake engineering, Londra.

Diyarbakır Belediyesi. 2015. Erişim: [http://www.diyarbakir.bel.tr/images/diyarbakir/surlar.jpg], Erişim tarihi: 16.03.2015

Doğangün, A., Acar, R., Livaoğlu, R., Tuluk, Ö. İ. 2006. Performance of masonry minarets against earthquakes and winds in Turkey. 1st international conference on restoration of heritage masonry structures, Nisan, Kahire.

Doğangün, A., Acar, R., Sezen, H., Livaoglu, R. 2008. Investigation of dynamic response of masonry minaret structures. ***Bulletin of Earthquake Engineering***, 6 (3): 505-517.

Drabkin, S., Lacy, H., Kim, D. S. 1996. Estimating settlement of sand caused by construction vibration. ***Journal of geotechnical engineering***, 122 (11): 920-928.

El-Attar, A. G., Saleh, A. M., Osman, A. 2001. Seismic response of a historical Marnluk style minaret. ***WIT Transactions on The Built Environment***, 57: 745-754.

El-Attar, A. G., Saleh, A. M., Zaghw, A. H. 2005. Conservation of a slender historical Mamluk-style minaret by passive control techniques. ***Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures***, 12 (2): 157-177.

Ercan, E., Arısoy, B., Hökelekli, E., Nuhoğlu, A. 2018. Estimation of seismic damage propagation in a historical masonry minaret. ***Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences***, 35 (4): 647-666.

Erçin Kahveci, A., Kadayıfçı, A. 2013. Diyarbakır yöresi bazalt taşının yapısal özelliklerinin incelenmesi. ***SDU International Technologic Science***, 5 (3): 56-69.

Fanning, P. J., Boothby, T. E. 2001. Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges. ***Computers & Structures***, 79 (29): 2645-2662.

Fragonara, L. Z., Boscato, G., Ceravolo, R., Russo, S., Ientile, S., Pecorelli, M. L., Quattrone, A. 2016. Dynamic investigation on the Mirandola bell tower in post-earthquake scenarios. ***Bulletin of Earthquake Engineering***, 15 (1): 313-337.

François, S., Karg, C., Haegeman, W., Degrande, G. 2010. A numerical model for foundation settlements due to deformation accumulation in granular soils under repeated small amplitude dynamic loading**.** ***International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics***, 34 (3): 273-296.

Giordano, A., Mele, E., De Luca, A. 2002. Modelling of historical masonry structures: comparison of different approaches through a case study. ***Engineering Structures***, 24 (8): 1057-1069.

Google Maps 2018. Erişim Adresi: [https://www.google.com/maps], Erişim Tarihi: 09.02.2018

Higazy, E. M. 2004. Vulnerability of historical minarets; investigation of their seismic assessment & retrofitting. ***Emirates Journal for Engineering Research***, 9 (2): 59-64.

Hill, R. 1948. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. ***Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences***, 193 (1033): 281-297.

Ibrahimbegovic, A., Wilson, E. L. 1989. Simple numerical algorithms for the mode superposition analysis of linear structural systems with non-proportional damping. ***Computers & Structures***, 33 (2): 523-531.

Işık, N. 2017. Geleneksel yığma yapılarda taşıyıcı sistem hasarları ve nedenlerinin tespiti ile güçlendirme ve tamamlayıcı müdahale önerileri; Diyarbakır; Suriçi örneği. Doktora Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.

Ivorra, S., Pallarés, F. J., Adam, J. M. 2009. Experimental and numerical results from the seismic study of a masonry bell tower. ***Advances in Structural Engineering***, 12 (2): 287-293.

İlki, A., Ispir, M., Demir, C., Kumbasar, N., Akman, S. 2006. An outline of the seismic behavior of historical structures in north western Anatolia. Proceedings of international conference on structural analysis of historical constructions,Yeni Delhi.

İnal Mimarlık Ltd. Şti. 2017. Diyarbakır, Türkiye.

Karakuş, A., Akatay, M. 2013. Determination of basic physical and mechanical properties of basaltic rocks from P-wave velocity. ***Nondestructive Testing and Evaluation***, 28 (4): 342-353.

Karaşin, A., Gülkan, P. 2008. Elastik zeminlere oturan plakların sonlu izgara yöntemi ile yaklaşık çözümü. ***İMO Teknik Dergi***, 293: 4445-4454.

Kazaz, İ., Akansel, V., Gülkan, P., Kazaz, E. 2012. Seismic behavior of a four-legged masonry minaret. 15th World Congress on Earthquake Engineering, Eylül 24-28, Lizbon..

Kerr, A. D. 1964. Elastic and viscoelastic foundation models. ***Journal of Applied Mechanics***, 31 (3): 491-498.

Keypour, H., Fahjan, Y. M., Bayraktar, A. 2007. Analysis and strengthening methods for historical masonry structures. 5th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering.

Korkmaz, K. A., Ay, Z., Keskin, S. N., Ceditoglu, D. 2011. Investigation of traffic-induced vibrations on masonry buildings in Turkey and countermeasures. ***Journal of Vibration and Control***, 17 (1): 3-10.

Lichti, D. D., Gordon, S. J. 2004. Error propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner point clouds for cultural heritage recording. Proc. of FIG Working Week, 22-27 Mayıs, Atina.

Logan, D. L. 2011. A first course in the finite element method. Cengage Learning.

Lourenço, P. B., Rots, J. G., Blaauwendraad, J. 1995. Two approaches for the analysis of masonry structures: micro and macro-modeling. ***HERON***, 40 (4).

Lourenço, P. B. 1999. Historical structures: models and modelling. EPMESC VII, 433-442.

Lourenço, P. B. 2002. Computations on historic masonry structures. ***Progress in Structural Engineering and Materials***, 4(3): 301-319.

Lourenço, P. B. 2004. Analysis and restoration of ancient masonry structures. Guidelines and Examples, Innovative Materials and Technologies for Construction and Restoration , Lecce.

Lourenço, P.B. 2005. From fracture mechanics to case studies: The issue of cultural heritage, Anales de Mecánica de la Fractura. Almagro, S, 10-17.

Mallardo, V., Malvezzi, R., Milani, E., Milani, G. 2008. Seismic vulnerability of historical masonry buildings: A case study in Ferrara. ***Engineering Structures***, 30 (8): 2223-2241.

Menon, A., Lai, C. G., Macchi, G. 2004. Seismic hazard assessment of the historical site of Jam in Afghanistan and stability analysis of the minaret. ***Journal of earthquake engineering***, *8*:, 251-294.

Milani, G., Casolo, S., Naliato, A., Tralli, A. 2012. Seismic assessment of a medieval masonry tower in Northern Italy by limit, nonlinear static, and full dynamic analyses. ***International Journal of Architectural Heritage***, 6 (5): 489-524.

Minghini, F., Milani, G., Tralli, A. 2014. Seismic risk assessment of a 50 m high masonry chimney using advanced analysis techniques. ***Engineering Structures***, 69: 255-270.

Minghini, F., Bertolesi, E., Del Grosso, A., Milani, G., Tralli, A. 2016. Modal pushover and response history analyses of a masonry chimney before and after shortening. ***Engineering Structures***, 110: 307-324.

Peña, F., Lourenço, P. B., Mendes, N., Oliveira, D. V. 2010. Numerical models for the seismic assessment of an old masonry tower. ***Engineering Structures***, 32(5): 1466-1478.

Pieraccini, M., Dei, D., Betti, M., Bartoli, G., Tucci, G., Guardini, N. 2014. Dynamic identification of historic masonry towers through an expeditious and no-contact approach: Application to the "Torre del Mangia" in Siena (Italy). ***Journal of Cultural Heritage***, 15(3): 275-282.

Przemieniecki, J. S. 1985. Theory of matrix structural analysis. Courier Corporation.

Reddy, J. N. 2006. Theory and analysis of elastic plates and shells. CRC press.

Riva, P., Perotti, F., Guidoboni, E., Boschi, E. 1998. Seismic analysis of the Asinelli Tower and earthquakes in Bologna. ***Soil Dynamics and Earthquake Engineering***, 17(7): 525-550.

Roca, P., González, J. L., Oñate, E., Lourenço, P. B. 1998. Experimental and numerical issues in the modelling of the mechanical behaviour of masonry. Structural Analysis of Historical Constructions II. CIMNE, Barselona, S, 57-91.

Roca, P., Cervera, M., & Gariup, G. 2010. Structural analysis of masonry historical constructions. Classical and advanced approaches. Archives of Computational Methods in Engineering, 17(3): 299-325.

Saba, M., Meloni, D. 2018. Comparison of seismic models for a historic masonry building. ***Revista UIS Ingenierías***, 17(2): 105-114.

Saisi, A., Gentile, C. 2015. Post-earthquake diagnostic investigation of a historic masonry tower. ***Journal of Cultural Heritage***, 16(4): 602-609.

Salvatori, L., Marra, A. M., Bartoli, G.,Spinelli, P. 2015. Probabilistic seismic performance of masonry towers: General procedure and a simplified implementation. ***Engineering Structures***, 94: 82-95.

SAP 2000 V19. 2018. Computers and Structures, INC. ABD.

Sarhosis, V., Fabbrocino, F., Formisano, A., Milani, G. 2017. Seismic vulnerability of different in geometry historic masonry towers. 6th International conference on computational methods in structural dynamics and earthquake engineering (COMPDYN 2017), Rodos.

Scene 2018.0. 2018. Faro Technologies. Florida, ABD.

Scene Process 2018.0. 2018. Faro Technologies. Florida, ABD.

Sesigür, H., Çelik, O. C., Çılı, F. 2007. Tarihi yapılarda taşıyıcı bileşenler, hasar biçimleri, onarım ve güçlendirme. ***İstanbul Bülten***, 89, 10-21.

Sezen, H., Acar, R., Doğangün, A., Livaoğlu, R. 2008. Dynamic analysis and seismic performance of reinforced concrete minarets. ***Engineering Structures***, 30 (8): 2253-2264.

Sözen, M. 1981. Anadolu'da Akkoyunlu mimarisi. Türkiye Turing ve Otomobil Kurumu.

Şeyh Mutahhar Cami. 2018. Erişim: [http://www.eskiturkiye.net/resimler/diyarbakir-seyh-mutahhar-camii.jpg], Erişim Tarihi: 01.04.2018

Truong-Hong, L., Laefer, D. F. 2013. Validating computational models from laser scanning data for historic facades. ***Journal of Testing and Evaluation***, 41 (3): 481-496.

Tsai, S. W., Wu, E. M. (1971). A general theory of strength for anisotropic materials. ***Journal of composite materials***, 5 (1): 58-80.

Türk, A. M., Coşgun, C. 2011. Seismic behaviour and retrofit of historic masonry minaret. ***Gradevinar***, 64: 39-45.

Uluengin, M. B. 2002. Rölöve. YEM Yayını, S, 27, İstanbul.

Vatan, M. (2010). Anıtsal Yığma Binalarda Risk Düzeyinin Tespitine İlişkin Bir Öndeğerlendirme Yöntemi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Adı : Murat Arda
Soyadı : Uğurlu
Doğum Tarihi : 31/05/1984
Doğum yeri : Diyarbakır
Adres : Ofis Cami Sok. Ay Apt. D:4 TR 21100 Yenişehir/Diyarbakır/Türkiye
Mobil : +90 533 3575999
E-mail : muratardaugurlu@gmail.com

EĞİTİM

- Yüksek Lisans: Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Anabilim Dalı, Tez Başlığı: **Cyclic Characterization of Locked and Standard Brick Infilled Reinforced Concrete Frames Under Quasi-Static Loading Conditions: Experimental and Analytical Work** (2009-2011).
- Lisans: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, (2002-2008).

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ İNTİHAL FORMU

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ	
ADI VE SOYADI	Murat Arda UĞURLU
ÖĞRENCİ NO	12806501
EĞİTİM – ÖĞRETİM YILI	2018-2019
YARIYIL	☒ Güz ☐ Bahar
ANABİLİM DALI	İnşaat Mühendisliği
PROGRAM	Doktora
TEZ KONUSU	DÖRT AYAKLI MİNARENİN ANALİTİK MODELİ VE YAPISAL HASARLARININ İNCELENMESİ
İNTİHAL RAPORU BİLGİLERİ	
RAPOR TÜRÜ	Tez Savunma Sınavı Sonrası
SAYFA SAYISI	151
BENZERLİK ORANI	%13
RAPORLAMA TARİHİ	04/03/ 2019

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın kapak sayfası, giriş, ana bölümler, sonuç ve tartışma kısımlarından oluşan toplam 151 sayfalık kısmına ilişkin, 04/03/2019 tarihinde tez danışmanım tarafından *iauthanticate* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 13 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

☐Kabul/Onay sayfaları hariç,
☐Kaynakça hariç
☐Alıntılar hariç/dâhil
☐Diğer

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Programlarda Tez Çalışması İntihal Raporu Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Murat Arda UĞRULU
04.03.2019

Doç. Dr. Abdulhalim KARAŞİN **Tez Danışmanı** 04.03.2019	Doç. Dr. Abdulhalim KARAŞİN **Anabilim Dalı Başkanı** 04.03.2019

Formdaki bilgiler bilgisayar ortamında doldurulmalıdır. El yazısı ile doldurulan formlar geçersiz sayılmaktadır.