

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ERKEN DÖNEM OSMANLI TARİHİ MİNARE MODELİNİN SARSMA
TABLASI TESTLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Birdal KOÇAK

Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

AĞUSTOS 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ERKEN OSMANLI DÖNEMİ TARİHİ MİNARE MODELİNİN SARSMA
TABLASI TESTLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Birdal KOÇAK
(802201212)**

Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Medine İSPİR ARSLAN

AĞUSTOS 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 802201212 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Birdal KOÇAK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ERKEN DÖNEM OSMANLI TARİHİ MİNARE MODELİNİN SARSMA TABLASI TESTLERİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Medine İSPİR ARSLAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Engin ORAKDÖĞEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üy. Erdem DAMCI
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Teslim Tarihi : 3 Temmuz 2024
Savunma Tarihi : 2 Ağustos 2024





Sevgili aileme,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam süresince bana kıymetli vaktini ayıran, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Medine İSPİR ARSLAN'a teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Hoşgörüsü ve çok değerli katkıları için Prof. Dr. Alper İlki'ye teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışması, AFAD-UDAP tarafından desteklenen “Bursa Tarihi Minarelerinin Deprem Performanslarının Analitik ve Deneysel Yaklaşımlar ile İncelenmesi ve Hasargörebilirlik Eğrilerinin Elde Edilmesi” isimli proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Desteklerinden dolayı AFAD-UDAP'a ve çalışmanın yürütülmesi için gerekli desteği esirgemeyen; T.C. Vakıflar Genel Müdürlüğü, DASK, Allianz Teknik Deprem & Yangın Test ve Eğitim Merkezi, Mesa İmalat Sanayii ve Ticaret A.Ş., Erk Yapı Proje ve Mühendislik İnşaat San. Tic. Ltd. Şti, Alacalı İnş. San. ve Tic. A.Ş., Bil-Sa İnşaat Turz. San. ve Tic. Ltd. Şti., Kültür Yapı Restorasyon İnşaat San. ve Tic. Ltd. Şti., Oftek İnşaat, Orion Ağır Çelik Yapı Müh. İnşaat San. ve Tic. Ltd. Şti. ve Kadioğlu İnşaat'a minnettarlığımı bildirmek isterim.

Çalışma süresince değerli katkılarından dolayı Yük. İnş. Müh. Fikret KURAN, Yük. İnş. Müh. Osman Fatih BAYRAK, Yük. İnş. Müh. Berkay ALDIRMAZ ve Yük. İnş. Müh. Elif DURGUT'a teşekkür ederim. Ayrıca, tez jürimde olmayı kabul eden Prof. Dr. Engin ORAKDÖĞEN ve Dr. Öğr. Üyesi Erdem DAMCI'ya teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Her zaman beni destekleyen ve bu süreçte de hep yanımda olan başta sevgili annem Hazal KOÇAK ve babam Şah Murat KOÇAK başta olmak üzere kardeşlerime, yüksek lisans hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen arkadaşım Ayşenur BİREL AKAY'a ve her anımda yanımda olan Ufuk İŞLEYEN'e teşekkür ederim.

Ağustos 2024

Birdal KOÇAK
İnşaat Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Minarenin Gelişimi	1
1.2 Minare Bölümleri	4
2. BURSA TARİHİ VE TARİHİ CAMİLER	11
2.1 Bursa'nın Tarihi Gelişimi.....	11
2.2 Bursa'nın Depremselliği	11
2.3 Bursa-Tarihi Depremler ve Etkileri.....	12
2.4 Bursa Hocaalızade Cami Minaresi	13
3. SARSMA TABLASI DENEYLERİ VE HAZIRLIK.....	19
3.1 Sarsma Tablası Özellikleri ve Laboratuvar Koşulları	21
3.2 Numunenin Tasarımı ve Ölçeklenmesi	23
3.3 Ölçüm Sistemi, Ölçüm Çerçevesi, Koruma Sisteminin Tasarımı	26
3.4 Deprem Kaydının Seçilmesi ve Ölçeklendirilmesi	34
3.5 Minare Numunesinin Üretimi	36
3.6 Minare Numunesinin Laboratuvara Taşınması	42
3.7 Sarsma Tablası Testleri	45
4. SONUÇLAR	61
KAYNAKLAR	73
EKLER.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	73



KISALTMALAR

AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
ASI	: İvme Spektrumu Şiddeti
DAF	: Doğu Anadolu Fayı
DB	: Doğu-Batı
IZIIS	: Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology
KAF	: Kuzey Anadolu Fayı
KG	: Kuzey-Güney
MÖ	: Milattan Önce
MS	: Milattan Sonra
PEER	: Pacific Earthquake Engineering Research Center
PGA	: Maksimum yer ivmesi
PGD	: Maksimum yer değiştirme
PGV	: Maksimum yer hızı
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
UDAP	: Ulusal Deprem Araştırma Programı



SEMBOLLER

E_r	: Elastisite modülü
S	: Ölçek
T_p	: Baskın periyot
T_m	: Ortalama periyot
g	: Yerçekimi ivmesi
I_c	: Karakteristik şiddet
t	: Zaman



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Hocaalızade Cami minaresi boyut ve malzeme özellikleri.	16
Çizelge 3.1 : Sarsma tablası teknik özellikleri.....	22
Çizelge 3.2 : Ölçekleme yaklaşımları.	24
Çizelge 3.3 : Testte kullanılan ölçüm cihazları listesi.	30
Çizelge 3.4 : Bursa/Tofaş istasyonu deprem ivme kaydı parametreleri.	36
Çizelge 3.5 : Test ve yükleme adımları.	46
Çizelge 3.6 : Yapıda oluşan maksimum tepe ivmesi ve yerdeğiştirmesi.	48
Çizelge 3.7 : Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu performans sınırlarına uygun olarak öteleme oranlarının kontrol edilmesi (%30)..	59
Çizelge 3.8 : Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu performans sınırlarına uygun olarak öteleme oranlarının kontrol edilmesi (%70)..	59
Çizelge 3.9 : Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu performans sınırlarına uygun olarak öteleme oranlarının kontrol edilmesi (%100).	60



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Dünya minareleri: (a)Samarra Ulu Cami-Irak (b)Burana Kulesi-Kırgızistan (c)Kutluğ Timur Minaresi-Türkmenistan (d)Hassan Cami-Fas (e)Kutub Minar-Hindistan ve (f)Yivli Minare-Türkiye..	2
Şekil 1.2 : Selçuklu minareleri: (a)Burmali Minare, Türkiye (b)Âlî Minare, Irak (c)Sahip Ata Külliyesi, Türkiye.	3
Şekil 1.3 : Osmanlı minareleri: (a)Koca Mustafa Paşa Cami (b)Dolmabahçe Cami (c)Süleymaniye Cami.	4
Şekil 1.4 : Modern minareler: (a)Alacaatlı Uluyol Camii-Ankara [7] (b)Ahmet Hamdi Akseki Camii-Ankara [8] (c)İTÜ Abdülhakim Sancak Camii-İstanbul [9].	4
Şekil 1.5 : Minare bölümleri [10].	5
Şekil 1.6 : Alem çeşitleri.	6
Şekil 1.7 : Külâh örnekleri: (a)Hocaalızade Cami (b)Tirilye Fatih Cami (c)Üftade Cami (d)Molla Fenari Cami (e)Acem Reis Cami.	7
Şekil 1.8 : Petek içi ahşap bağlantılar [12].	7
Şekil 1.9 : Şerefe örnekleri: (a)Tahta Minare Cami (b)Yoğurtluoğlu Cami (c)Ali Efendi Cami.	8
Şekil 1.10 : Kûp örnekleri: (a)Edirne Eski Cami (b)Selçuklu Minaresi.	9
Şekil 1.11 : Kaide örnekleri: (a)Karacabey Kümbetli Cami (b)Balaban Paşa Cami (c)Kırk Direkli Ulu Cami.	9
Şekil 2.1 : Türkiye'nin levha hareketleri.	11
Şekil 2.2 : Türkiye deprem tehlike haritası [18].	12
Şekil 2.3 : Bursa aktif fay hattı [19].	12
Şekil 2.4 : Hocaalızade Cami ve Minare görünüşü.	14
Şekil 2.5 : Hocaalızade Cami minaresi görünüş ve enkesiti [4].	15
Şekil 2.6 : Hocaalızade Cami ortalama tuğla boyutları ve derz kalınlığı (boyutlar cm).	16
Şekil 2.7 : Hocaalızade Cami merdiven görünüşü.	16
Şekil 2.8 : Prototip (gerçek) minare (boyutlar cm).	17
Şekil 3.1 : Test merkezi planı (boyutlar cm).	21
Şekil 3.2 : Test merkezinin üç boyutlu çizimi.	22
Şekil 3.3 : Hocaalızade Cami Minare bölümleri.	23
Şekil 3.4 : Model (¼ ölçekli) minare (boyutlar cm).	25
Şekil 3.5 : Temel detayları (boyutlar cm).	26
Şekil 3.6 : Ölçüm cihazlarının minare üzerindeki yerleşimi.	27
Şekil 3.7 : Potansiyometrik cetvel yerleşimi.	28
Şekil 3.8 : İpli potansiyometrik cetvel yerleşimi.	28
Şekil 3.9 : Temel potansiyometrik cetvel yerleşimi.	29
Şekil 3.10 : İvmeölçer yerleşimi.	29
Şekil 3.11 : Lazer deplasman sensörü ve kamera.	30
Şekil 3.12 : Ölçüm çerçevesi.	31

Şekil 3.13 : Ölçüm çerçevesi: (a)planı (b)ayak detay çizimi.	31
Şekil 3.14 : Ölçüm çerçevesi profil detayları.	32
Şekil 3.15 : Ölçüm sistemi: (a)bulonlu (b)kaynaklı kesit.	32
Şekil 3.16 : Koruma sistemi.....	33
Şekil 3.17 : Bursa/Tofaş istasyonunun minare ve deprem merkez üssüne uzaklığı. .	35
Şekil 3.18 : Bursa/Tofaş istasyonu deprem ivme kaydı (mavi:tam ölçekli , siyah :¼ ölçekli).	35
Şekil 3.19 : Bursa/Tofaş istasyonu deprem ivme kaydı tepki spektrumları (mavi:tam ölçekli , siyah :¼ ölçekli).	36
Şekil 3.20 : Minare üretimi için kullanılan tuğla malzeme.....	37
Şekil 3.21 : Harç numuneleri: (a)üç noktalı eğilme testi (b)basınç testi.....	37
Şekil 3.22 : Minare üretimi için kullanılan tuğla birimleri.	38
Şekil 3.23 : (a)Temel kalıplarının hazırlanması (b)Delik yerlerinin belirlenmesi (c)Temellerin teraziye alınması (d) Taşıma için köpük yerleşimi.	39
Şekil 3.24 : Temel donatıların üretim ve yerleşimi.	39
Şekil 3.25 : Temel terazi kontrolü.	40
Şekil 3.26 : Tuğla birimlerin yerleştirilmesi.	40
Şekil 3.27 : Tuğla malzemelerin düzenlenmesi.	41
Şekil 3.28 : Minare gövde bölümünün üretimi.	41
Şekil 3.29 : Minare petek bölümünün üretimi.	42
Şekil 3.30 : Ölçüm cihazlarının sabitlenmesi için tij yerleşimi.	42
Şekil 3.31 : Taşıma sistemi detayları.	43
Şekil 3.32 : Minarenin laboratuvara alınması.	44
Şekil 3.33 : Minarenin sarsma tablasına yerleştirilmesi.	44
Şekil 3.34 : Betonarme temelin sarsma tablasına ankrajı.	45
Şekil 3.35 : Frekansın ivme artım oranı ile değişimi.	47
Şekil 3.36 : Sönümün ivme artım oranı ile değişimi.	47
Şekil 3.37 : İvme-yükseklik değişimi (%30).	48
Şekil 3.38 : İvme-yükseklik değişimi (%100).	48
Şekil 3.39 : İvme-yükseklik değişimi (%112.5).	48
Şekil 3.40 : Öteleme oranı-yükseklik değişimi (%30).....	49
Şekil 3.41 : Öteleme oranı-yükseklik değişimi (%100).....	49
Şekil 3.42 : Öteleme oranı-yükseklik değişimi (%112.5).....	49
Şekil 3.43 : Tüm artım oranında yatay yerdeğişiminin yükseklik boyunca değişimi.	50
Şekil 3.44 : K�p-gövde geçiş bölgesi düşey deplasman-zaman grafiği (-x,y,x,-y) (%112.5).....	50
Şekil 3.45 : Şerefe-petek geçiş bölgesi düşey deplasman-zaman grafiği (-x,y,x) (%112.5).....	51
Şekil 3.46 : Petek bölgesi yatay deplasman-zaman grafiği (x,y) (%112.5).....	51
Şekil 3.47 : Temel kayma kontrolü için yatay deplasman-zaman grafikleri (-x,y) (%112.5).....	52
Şekil 3.48 : Şerefe-petek hasarları (%70).	53
Şekil 3.49 : Şerefe-petek ve küp-gövde hasarları (%100).	54
Şekil 3.50 : Şerefe-petek ve küp-gövde hasarları (%125).	55
Şekil 3.51 : Şerefe-petek ve küp-gövde hasarları (%112.5).	56
Şekil 3.52 : Lazermetre ve potansiyometrik cetvel petek bölgesinde yerdeğiştirme-zaman değişimi (%50) (X-Y).....	57
Şekil 3.53 : Lazermetre ve potansiyometrik cetvel şerefe bölgesinde yerdeğiştirme-zaman değişimi (%50) (X-Y).....	57

Şekil 3.54 : Lazermetre ve potansiyometrik cetvel petek bölgesinde yerdeğiştirme-zaman değişimi (%70) (X-Y).	58
Şekil 3.55 : Lazermetre ve potansiyometrik cetvel şerefe bölgesinde yerdeğiştirme-zaman değişimi (%70) (X-Y).	58
Şekil A.1 : Referans numunesi ivme-yükseklik değişimi (%10).....	66
Şekil A.2 : Referans numunesi ivme-yükseklik değişimi (%20).....	66
Şekil A.3 : Referans numunesi ivme-yükseklik değişimi (%30).....	66
Şekil A.4 : Referans numunesi ivme-yükseklik değişimi (%50).....	66
Şekil A.5 : Referans numunesi ivme-yükseklik değişimi (%70).....	67
Şekil A.6 : Referans numunesi ivme-yükseklik değişimi (%100).....	67
Şekil A.7 : Referans numunesi ivme-yükseklik değişimi (%112.5).....	67
Şekil A.8 : Referans numunesi ivme-yükseklik değişimi (%125).....	67
Şekil B.1 : Referans numunesi öteleme oranı-yükseklik değişimi (%10).....	68
Şekil B.2 : Referans numunesi öteleme oranı-yükseklik değişimi (%20).....	68
Şekil B.3 : Referans numunesi öteleme oranı-yükseklik değişimi (%30).....	68
Şekil B.4 : Referans numunesi öteleme oranı-yükseklik değişimi (%50).....	68
Şekil B.5 : Referans numunesi öteleme oranı-yükseklik değişimi (%70).....	69
Şekil B.6 : Referans numunesi öteleme oranı-yükseklik değişimi (%100).....	69
Şekil B.7 : Referans numunesi öteleme oranı-yükseklik değişimi (%112.5).....	69
Şekil B.8 : Referans numunesi öteleme oranı-yükseklik değişimi (%125).....	69
Şekil C.1 : Referans numunesi lazermetre ve potansiyometrik cetvel petek bölgesinde yerdeğiştirme-zaman değişimi (%30) (X-Y).....	70
Şekil C.2 : Referans numunesi lazermetre ve potansiyometrik cetvel petek bölgesinde yerdeğiştirme-zaman değişimi (%100) (X-Y).....	70
Şekil D.1 : Referans numunesi lazermetre ve potansiyometrik cetvel şerefe bölgesinde yerdeğiştirme-zaman değişimi (%30) (X-Y).....	71
Şekil D.2 : Referans numunesi lazermetre ve potansiyometrik cetvel şerefe bölgesinde yerdeğiştirme-zaman değişimi (%100) (X-Y).....	71



ERKEN DÖNEM OSMANLI TARİHİ MİNARE MODELİNİN SARMSA TABLASI TESTLERİ

ÖZET

Tarihi mirasımızın anıtsal değerdeki önemli bir kımını oluşturan minareler, simgesel ve estetik görünümüleriyle şehir silüetlerinin önemli bir ögesi konumundadırlar. Tarihi minareler, malzeme mekanik özelliklerinin düşük olması ve narin yapıları nedeniyle depremlerde en çok hasar gören yapı grubu arasında yer almaktadır. Bu minarelerin geleceğe taşınması ve dolayısıyla tarihi kent dokusunun korunması için gerekli çalışmaların ilk adımı, bu yapı grubunun deprem etkileri altındaki performansının ve yapısal güvenliğinin belirlenmesidir. Bu nedenle, bu çalışmada, Bursa-Erken Dönem Osmanlı tarihi tuğla minarelerini temsil etmek üzere üretilen bir model minarenin sarsma tablası testlerinin yapılması ve bu testlerden elde edilen sonuçların irdelenmesi hedeflenmiştir. Sunulan tez çalışması dört bölümden oluşmaktadır.

Çalışmanın birinci bölümünde Türk-Osmanlı dönemlerindeki tarihi minarelerin zamanla gelişimleri ve minareleri oluşturan bölümler anlatılmıştır. İkinci bölümde, Erken Dönem Osmanlı tarihi tuğla minare örneklerinin yer aldığı Bursa ilinin depremselliği, geçmiş depremleri ve bu depremlerin yapılar üzerindeki etkilerine kısaca değinilmiştir. Çalışma kapsamında literatür araştırması yapılmış ve TC. Vakıflar Genel Müdürlüğü'nün arşivlerinden derlenen belgelere ek olarak saha çalışmaları yapılmıştır. Bursa ilinde Erken Osmanlı Dönemi mimarisi özelliklerini taşıyan bu dönemde inşa edilmiş tarihi Hocaalızade Cami minaresi prototip olarak seçilmiştir. Minare yaklaşık 27 m yüksekliğinde, kaide kısmı almalı (taş, tuğla ve düşey/yatay harç derzleri ile oluşturulmuş) yapı olup diğer tüm bölümleri ise tuğla malzemeden oluşmaktadır. Minare çekirdeksiz bir merdivene sahiptir ve tek şerefelidir.

Üçüncü bölüm, model minare üretimini, sarsma tablası testlerini ve sonuçlarını içermektedir. Ayrıca, sarsma tablasının özellikleri ve test laboratuvarının koşulları; minare numunesinin tasarım ve ölçeklenmesi; ölçüm sistemi ve koruma sisteminin tasarımı ve testte kullanılan deprem kaydının özellikleri anlatılmıştır.

Minarenin kaide bölümü diğer bölümlere göre daha rijit olduğu için geçmiş depremlerde çoğunlukla bu bölümde hasar oluşmadığı bilinmektedir. Erken Dönem Osmanlı cami minarelerinin külah kısmı büyük çoğunlukla ahşaptan oluşmaktadır. Rijit kaide ve ahşap külahın minare davranışını değiştirmeyeceği dikkate alınarak model minare, külah ve kaide içermeksizin inşa edilmiştir.

Sarsma tablası testleri Türk-Alman Üniversitesi Yerleşkesinde bulunan Allianz Teknik Deprem & Yangın Test ve Eğitim Merkezi'ndeki iki eksenli sarsma tablasında gerçekleştirilmiştir. Sarsma tablasının özellikleri ve laboratuvarın fiziksel sınırları dikkate alınarak prototip minare, Yerçekimi Kuvvetlerinin İhmal Edildiği yaklaşım kullanılarak ¼ geometrik ölçek oranı benimsenerek üretilmiştir.

Model minarenin sarsma tablası testleri, 17 Ağustos 1999 depreminin ürettiği ve Bursa/Tofaş istasyonunda kaydedilen yer hareketi ivme kaydı altında yapılmıştır. Bu istasyonun Hocaalızade Camisine mesafesi 8,92 km ve merkez üssüne mesafesi ise 99,01 km'dir. Benimsenen model yaklaşımı nedeniyle deprem kaydının zamana karşı gelen ivme değerleri 4 ile çarpılarak arttırılmış ve zaman 4'e bölünerek azaltılmıştır. Model minarenin davranışını gözlemlemek ve gerekmesi durumunda deneyi durdurmak için gerçek ivme kaydı artımsal olarak model yapıya etkilmiştir.

Laboratuvar fiziksel ortam kısıtlarından dolayı minare dış ortamda üretilmiştir. Üretim sahasından test merkezine taşınması sırasında meydana gelebilecek hasarı engellemek için bir taşıma sistemi tasarlanmış ve kontrollü şekilde taşıma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Minarenin deprem etkileri altındaki davranışını sayısal olarak ifade etmek için model minare yüksekliği boyunca çok sayıda yerdeğiştirmeölçer ve ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Test öncesi yapılan ön analiz sonucuna göre cihazların minare yüksekliği boyunca kesit değişiminin bulunduğu kritik bölgelere yerleştirilmesine dikkat edilmiştir.

Bu bölümün son kısmında sarsma tablası testleri anlatılmaktadır. Her bir deprem yükleme adımı öncesi model minarenin dinamik karakteristiklerindeki değişimi anlamak için çevresel titreşim ve white noise (beyaz gürültü) testleri yapılmıştır. Her bir yükleme adımı; çevresel titreşim, beyaz gürültü ve ivme kaydının etkilmesi olmak üzere üç test adımından oluşmaktadır. Testler süresince elde edilen veri eş zamanlı olarak bir veri toplayıcı aracılığıyla toplanmış ve bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Elde edilen deneysel verinin işlenmesi ile yatay yerdeğiştirme ve ivmenin zamanla değişim ilişkileri; her bir yükleme adımında uygulanan yer hareketi ivme kaydının en büyük ivmesi (PGA) ile bu adımda meydana gelen en büyük yerdeğiştirme (ivme) değerlerinin minare yüksekliği boyunca değişimi vb. ilişkiler elde edilmiştir. Ayrıca, beyaz gürültü testleri ile minarenin dinamik özellikleri (frekans ve sönüm oran) elde edilmiş ve bu özelliklerin artımsal uygulanan ivme kaydıyla değişimi ortaya konulmuştur.

Dördüncü bölümde ise tez çalışmasından elde edilen sonuçlar özetlenerek verilmiştir. Model minarede ilk hasar küp-gövde ve şerefe-petek geçiş bölgesinde meydana gelmiştir. İlerleyen adımlarda petek orta bölgesi civarında da çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Hasarın yayılı olmadığı ve kesit değişiminin olduğu bölgelerde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Deneysel olarak tespit edilen bu hasarların gerçek deprem sonrası hasar gözlemleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Testler, ivme ve yatay yerdeğiştirmenin minare yüksekliği boyunca artış eğilimi gösterdiğini ve bu artışın artımsal uygulanan ivme kaydının büyüklüğünün artmasıyla arttığını göstermektedir. Her bir test aşamasından sonra gerçekleştirilen beyaz gürültü testleri, artan hasar dolayısıyla azalan rijitlik etkisiyle frekansın azaldığını ve sönümün arttığını ortaya koymaktadır.

SHAKING TABLE TESTS OF HISTORICAL MINARET MODEL FROM THE EARLY OTTOMAN PERIOD

SUMMARY

Minarets, which constitute a significant part of our monumental heritage, are great of importance due to their symbolic and aesthetic appearances. Historical minarets are among the structures most vulnerable to earthquakes due to their slender structures and the low mechanical properties of their materials.

The first step in preserving these minarets for future generations and thus protecting the historic urban fabric is to determine the seismic performance and structural safety of them. Therefore, this study aims to conduct shaking table tests on a model minaret representing the early Ottoman brick minarets of Bursa and to analyze the results obtained from these tests. The thesis presented consists of four chapters.

In the first chapter of the study, the historical development of minarets during the Turkish-Ottoman periods and the components of the minarets are explained. In the second chapter, the seismicity of the city of Bursa, which includes examples of early Ottoman brick minarets, past earthquakes, and the effects of these earthquakes on structures are briefly explained.

A literature review was conducted as part of the study, and fieldwork was carried out in addition to documents compiled from the archives of the Turkish General Directorate of Foundations.

The minaret of the Hocaalizade Mosque, a historical structure built during the Early Ottoman Period and reflecting the architectural features of this period in Bursa, was chosen as a prototype. The minaret is approximately 27 meters tall, with a base constructed in an alternating (stone, brick, and vertical/horizontal mortar joints) pattern, while all other sections consist of brick material. The minaret has stairs without a core and a single balcony.

The third chapter includes the production of the model minaret, the shaking table tests, and their results. Additionally, the characteristics of the shaking table, the conditions of the test laboratory, the design and scaling of the minaret specimen, the instrumentation and protection systems, as well as the characteristics of the earthquake record used in the test, are explained.

It is known that the base section of the minaret, being more rigid than the other sections, generally did not sustain damage in past earthquakes. The spire of Early Ottoman mosque minarets is mostly made of wood. Considering that the rigid base and the wooden spire would not significantly affect the overall behavior of the minaret, the model minaret was constructed without including the spire and base.

The shaking table tests were conducted on a two-axis shaking table at the Allianz Technical Earthquake & Fire Testing and Training Center located on the Turkish-German University campus. Taking into account the characteristics of the shaking

table and the physical limitations of the laboratory, the model minaret was produced using a geometric scale ratio of 1/4, applying the approach where gravitational forces are neglected.

The shaking table tests of the model minaret were conducted using the ground motion acceleration record produced by the August 17, 1999 earthquake, which was recorded at the Bursa/Tofaş station. This station is located 8.92 km from the Hocaalızade Mosque and 99.01 km from the earthquake's epicenter.

Due to the adopted modeling approach, the acceleration values corresponding to time in the earthquake record were amplified by multiplying by 4, and the time was reduced by dividing by 4. To observe the damage development of the model minaret the actual acceleration record was applied incrementally to the model structure.

Due to the physical constraints of the laboratory environment, the minaret was produced outside the laboratory. To prevent any potential damage during the transportation from the production site to the testing center, a transportation system was designed, and the transportation process was carried out in a controlled manner.

To numerically express the behavior of the minaret under seismic effects, numerous displacement sensors and accelerometers were placed along the height of the model minaret. Based on a preliminary finite element analysis conducted before the tests, the positions of the measurement devices were determined. The results of the analysis show that the regions where the section change occurs are critical sections.

The final part of this section describes the shaking table tests. Ambient vibration and white noise tests were conducted before each earthquake loading step to understand the changes in the dynamic characteristics of the model minaret. Each loading step consists of three test phases: ambient vibration test, white noise test, and the application of the acceleration record. During each test, all the measured data was transmitted simultaneously to a datalogger and then collected in a computer.

By processing the obtained experimental data, horizontal displacement-time and acceleration-time relationships, the maximum displacement and acceleration values along the height of the minaret were determined. Additionally, the dynamic properties of the minaret (frequency and damping ratio) were obtained through processing white noise test data, and the variation of these properties with the applied incremental acceleration record was demonstrated.

In the fourth chapter, the results obtained from the thesis work are summarized. The first visible damage in the model minaret occurred in the cube-body and balcony-upper part transition sections. In subsequent steps, a separation was also observed around the mid-height of the upper part.

It was noted that the damage was concentrated in areas where there were changes in cross-section and did not spread. The damage identified experimentally was found to be consistent with post earthquake damage observations.

The tests indicate that acceleration and horizontal displacement show an increasing trend along the height of the minaret, and this increase corresponds to the magnitude of the incrementally applied acceleration record. White noise tests conducted after

each test phase reveal that, due to increasing damage, the frequency decreases and the damping increases as a result of the reduced rigidity.





1. GİRİŞ

Ülkemiz şehirleri Roma, Bizans ve Osmanlı gibi farklı medeniyetlerin tarihi ve kültürel mirasının birçok örneğini barındırmaktadır. Osmanlı İmparatorluğunun başkentlerinden biri olması nedeniyle Erken Dönem Osmanlı mimari örneklerinin çokça bulunduğu şehirlerimizden biri de Bursa İlimizdir. Şehrin silüetinin ayrılmaz bir parçasını oluşturan cami ve minarelerin büyük bir bölümü, Erken Dönem Osmanlı mimarisi örnekleridir. Bursa'nın deprem riskinin yüksek olması, minarelerin uzun ve narin yapıları ve malzeme mekanik özelliklerinin düşük olması tarihi minarelerin deprem performansının ve güvenliğinin belirlenmesini ve gerekmesi durumunda deprem güvenliğin sağlanmasına yönelik tedbirlerin alınmasını zorunlu kılmaktadır.

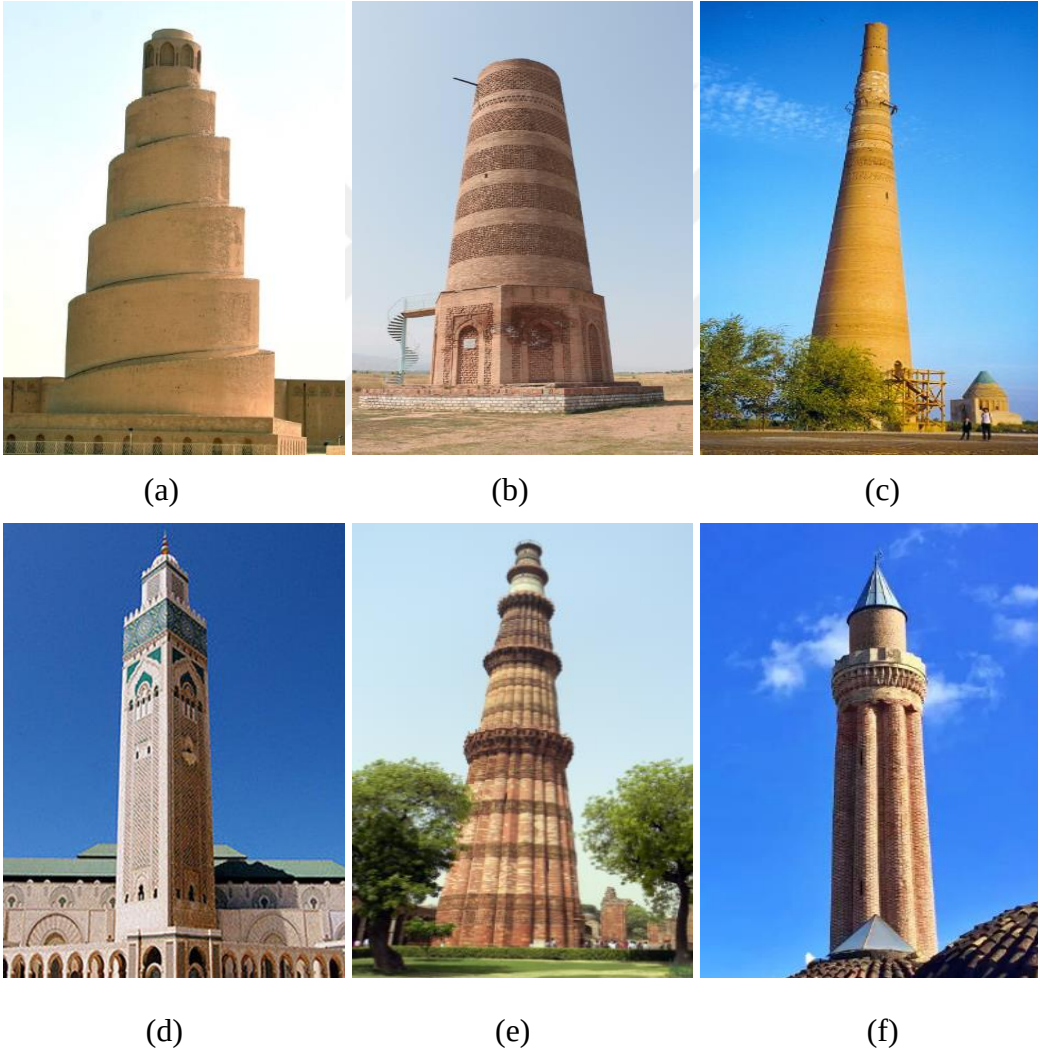
Bu nedenle, tez çalışması, Erken Dönem Osmanlı tuğla minarelerini temsil etmek üzere seçilen minarenin (Hocaalızade Cami minaresi) gerçek ivme kaydı altında sarsma tablası testlerinin gerçekleştirilmesini amaçlamıştır. Test verisi ve testler sırasında yapılan gözlemler, minarenin deprem etkileri altındaki davranışını ve hasar gelişimini ve bu hasarla dinamik özelliklerdeki değişimi anlamayı sağlayacaktır. Tarihi tuğla minarelerin deprem performansının iyileştirilmesi ve artırılması yönünde atılacak adımların belirlenmesi için bu çalışmada elde edilen veri ve belirlenen hasar dağılımı/kritik kesit bilgisinin faydalı olacağı düşünülmektedir.

1.1 Minarenin Gelişimi

Minareler; ezan okumak ve ezanı duyurmak için, cami beden duvarlarının bitişiğinde veya camiden ayrı olarak inşa edilen ince bir kule şeklinde bir veya birden fazla şerefesi bulunan dini yapılardır [1]. Minare yapılarının şekilleri ateş kuleleri, gözetleme ve çan kuleleri, deniz fenerleri ve zafer abidelerine dayanmaktadır [2].

Minare, sözlükte “ışık veya ateş çıkan” anlamlarındaki Arapça kökenli “menare” kelimesinden gelmekte, bazı bölgelerde ezanın okunduğu yer anlamına gelen “mi’zene” denilmektedir.

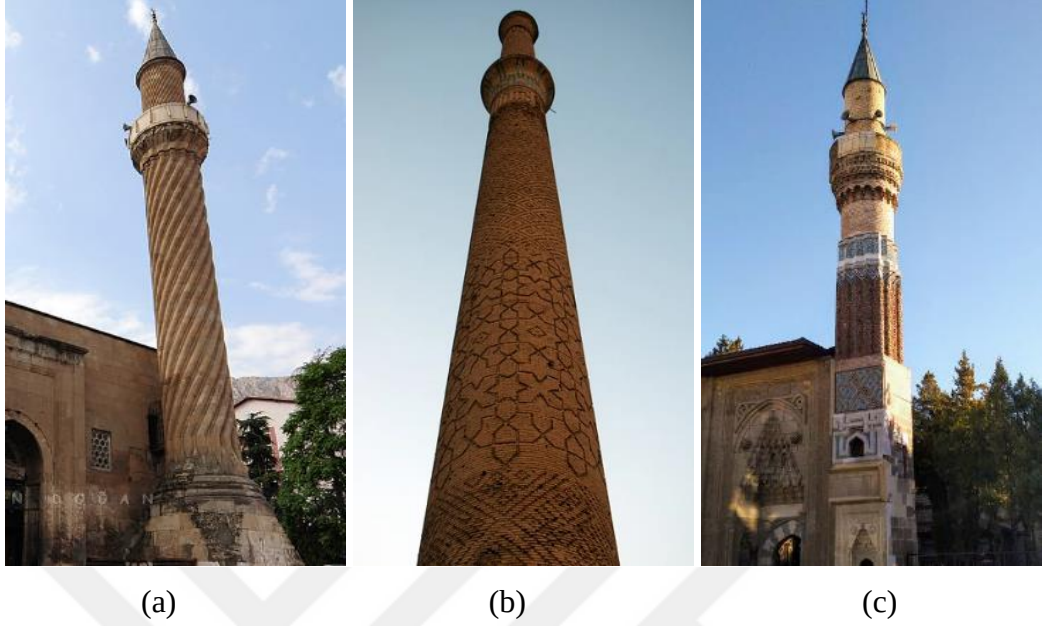
İlk minare Emevi Halifesi I. Muaviye döneminde Mısır Valisi Mesleme b. Muhallebe tarafından Mısır’da 673 yılında Amr İbn-ul As Cami’nde dört tarafına inşa ettirilmiştir. İlk zamanlarda özel bir tarza sahip olmayan minareler dini mimaride önemli bir unsur olmuş farklı bölge ve kültürlerde özel biçimlerde genellikle taş, tuğla ve ahşaptan yapılmıştır (Şekil 1.1). Minareler İslam dünyasının doğu ve batısında farklı olarak silindirik ya da dört köşeli formda yapılmıştır [2]. Batı minareleri Tunus, Fas, Cezayir, Mısır ve Suriye’de görülen dört veya çok köşeli ezan okumanın yanı sıra konut olarak kullanılan minarelerdir. İran, Irak ve Anadolu’daki minareler bölgeleri itibarı ile doğu minareleridir [3].



Şekil 1.1 : Dünya minareleri: (a)Samarra Ulu Cami-Irak (b)Burana Kulesi-Kırgızistan (c)Kutluğ Timur Minaresi-Türkmenistan (d)Hassan Cami-Fas (e)Kutub Minar-Hindistan ve (f)Yivli Minare-Türkiye.

Karahanlılar döneminde inşa edilen silindirik, köşeli ve yivli gövdeli minarelerinin yerini Selçuklular Dönemi’nde daha ince ve uzun minareler almıştır. Selçukluların

İran'da yaptıkları tuğla minareler ilerleyen süreçlerde, Anadolu'da taş minareler olarak değişmektedir (Şekil 1.2) [4,5].



Şekil 1.2 : Selçuklu minareleri: (a)Burmali Minare, Türkiye (b)Âlî Minare, Irak (c)Sahip Ata Külliyesi, Türkiye.

Erken Osmanlı Dönemindeki minarelerin yanı sıra Klasik Dönem minarelerinde belirli bir üslup oluşmaya başlanmıştır. Klasik Dönem Osmanlı camilerinde minareler, boyut, inşa edildiği yer, sayı ve biçime bağlı olarak standarda kavuşmuştur [4].

Osmanlı minarelerini üç ayrı devirde; Mimar Sinan devrine kadar, Mimar Sinan'dan Lale devrine kadar ve Lale devrinden Cumhuriyet devrine kadar tanımlanabilir (Şekil 1.3) [6]. Mimar Sinan'dan önceki minarelerin gövdeleri kalın, kürsüleri sade, küp bölümleri geçiş baklavaları ile süslenmiştir. Beyazıt, Murat Paşa, Koca Mustafa Paşa, Firuzağa, Atık Ali Paşa cami minareleri bu devir minarelerine örnek gösterilebilir. Mimar Sinan'dan Lale devrine kadar inşa edilen minareler, geliştirilerek önceki devirlere göre daha da incelmış ve tüm cami elemanlarıyla bir kompozisyon oluşturmuştur. Bu devir; Mimar Davut, Mimar Ahmet, Mimar Mehmet Ağa ile devam etmiştir. Süleymaniye, Sultanahmet, Şehzade, Selimiye, Yeni, Ahmet Paşa, Sinan Paşa, Rüstem Paşa, Kılıç Ali Paşa ve Şemsi Paşa cami minarelerini bu devir minarelerine örnek verebiliriz [4].

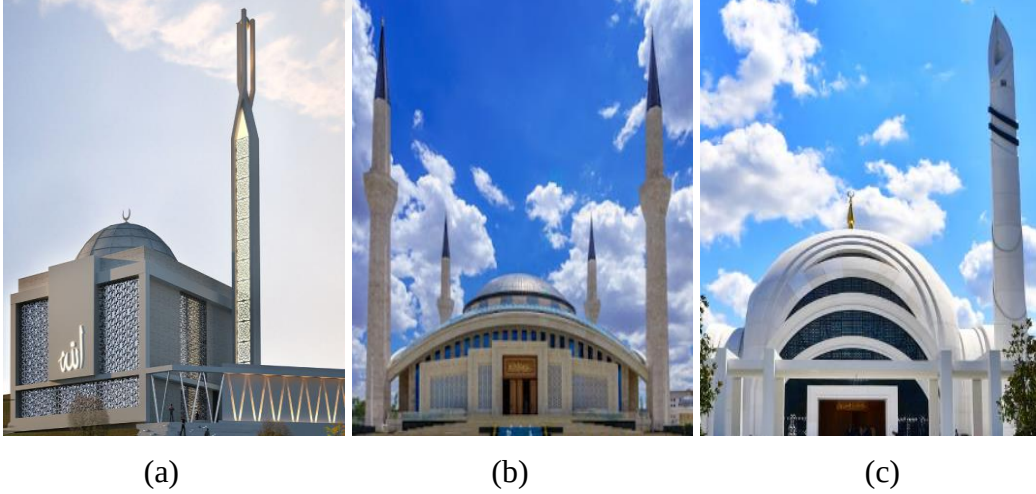
Lale devrinden Cumhuriyet devrine kadar inşa edilen minareler, batı anlayışı etkisi altında oldukça ince ve bol süslemeli hale gelmiş ve küp kısmı kürevi şeklini almıştır.

Nusretiye, Yıldız, Nur-u Osmaniye, Ayazma, Laleli, Beylerbeyi, Dolmabahçe ve Valide Sultan Cami minareleri bu devir minarelerine örnek verilebilir, (Şekil 1.3) [4].



Şekil 1.3 : Osmanlı minareleri: (a)Koca Mustafa Paşa Cami (b)Dolmabahçe Cami (c)Süleymaniye Cami.

Ülkemizde son dönemlerde inşa edilen minareler Osmanlı dönemi mimarisine benzemekte ve genellikle modern mimariye uygun olarak betonarme olarak inşa edilmektedir (Şekil 1.4).

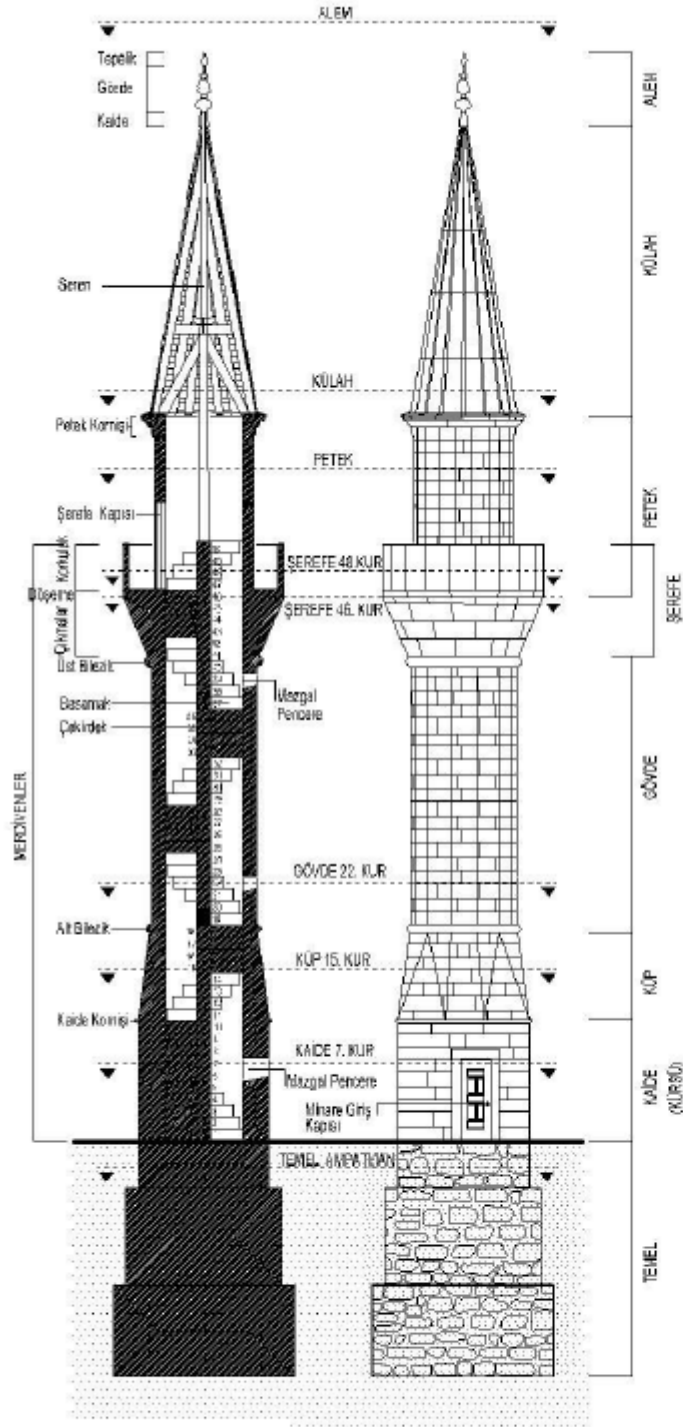


Şekil 1.4 : Modern minareler: (a)Alacaatlı Uluyol Camii-Ankara [7] (b)Ahmet Hamdi Akseki Camii-Ankara [8] (c)İTÜ Abdülhakim Sancar Camii-İstanbul [9].

1.2 Minare Bölümleri

Mimari ve kullanılan yapı malzemesi anlamında farklılıklar gösterebilen minareler âlem, külah, petek, şerefe, gövde, küp(pabuç), kaide (kürsü) ve temel olmak üzere yedi bölümden oluşur (Şekil 1.5).

MINARENİN BÖLÜMLERİ



KESİT

GÖRÜNÜŞ

0 1 m. 2 m. 5 m.



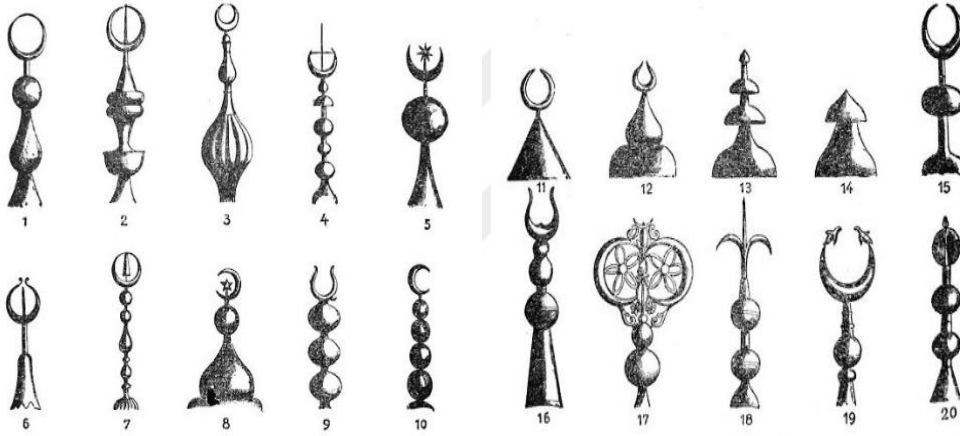
PLANLAR

Şekil 1.5 : Minare bölümleri [10].

1. Alem:

Arapça kökenli alem bayrak, işaret ve alamet anlamlarını taşımaktadır. Bayrakların, minare ve kubbelerin tepelerine takılan Ay'a (Hilal) benzeyen bu süslemenin menşei eski Türklerin ve hattâ başka milletlerin, kuvvet remzi olarak kullandıkları boynuzdan gelmektedir. Alemler, madenî, taş veya seramikten yapılabilmektedir. Küp, alt bilezik, armut, boyun, üst bilezik ve ay (veya boynuz) parçalarından meydana getirilir.

Estetik anlamda önemli bir unsur haline gelen alem kişinin dikkatini tepede tutarak kubbeye bir yükseliş tesiri verir [11]. Minareye rüzgar ve yağmur girmeyecek şekilde külâhın uç kısmında kurşunların tepede birleştikleri yerde ağırlık oluşması istenir. Alem tepelikleri giderek, ay, lâle, yaprak, ay-yıldız, ay-güneş ve hattâ hokka-kalem şeklini almıştır (Şekil 1.6) [1].



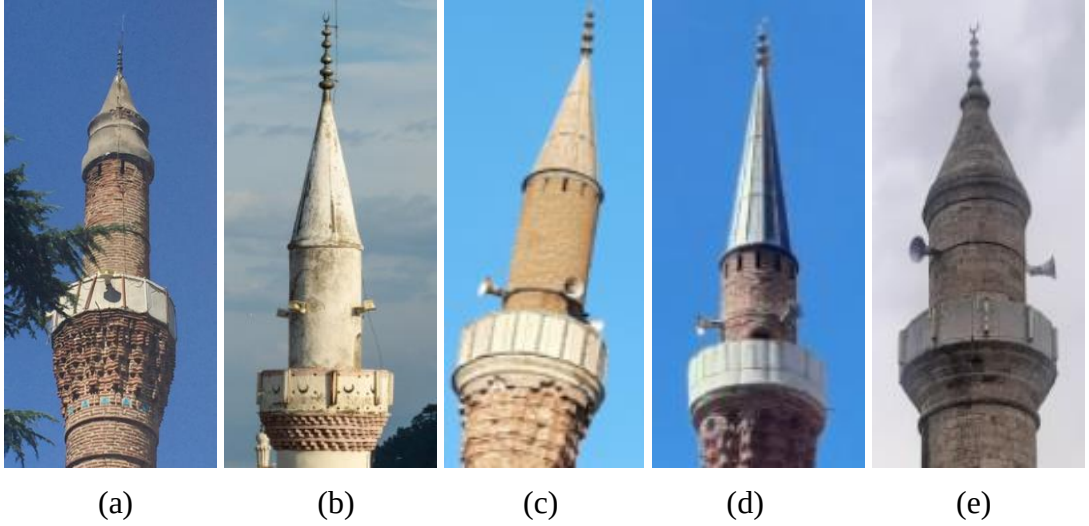
Şekil 1.6 : Alem çeşitleri.

2. Külâh:

Minarelerde külâh; peteği örten ve taş, tuğla veya ahşap karkas üzerine kurşun kaplanarak inşa edilen kısımdır (Şekil 1.7) [12].

Taş veya tuğla malzeme kullanılarak yapılan külâhların petekle bağlantısının iyi olmadığı durumlarda minareye gelen yatay yükler, alemin devrilmesine yol açabilir. Bu durumun önlenmesi için tasarımcılar külâhın hafif ve bağlantısının kolay yapılabildiği ahşap karkas sistem üzerini kurşunla kaplamışlardır [12].

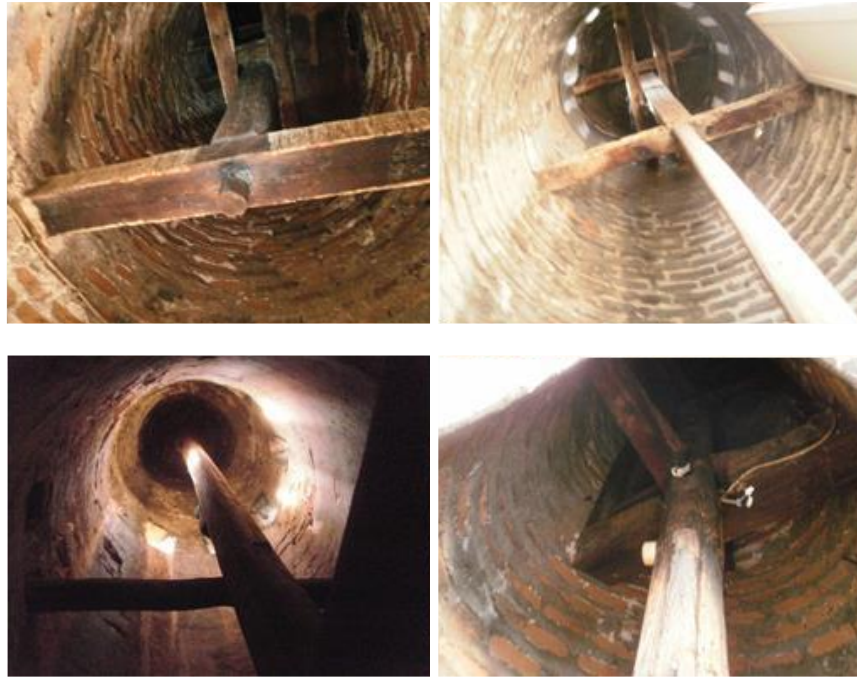
Osmanlı döneminde de, genellikle ahşaptan inşa edilmiş külâhlar kullanılmıştır [1].



Şekil 1.7 : Külâh örnekleri: (a)Hocaalizade Cami (b)Tirilye Fatih Cami (c)Üftade Cami (d)Molla Fenari Cami (e)Acem Reis Cami.

3. Petek:

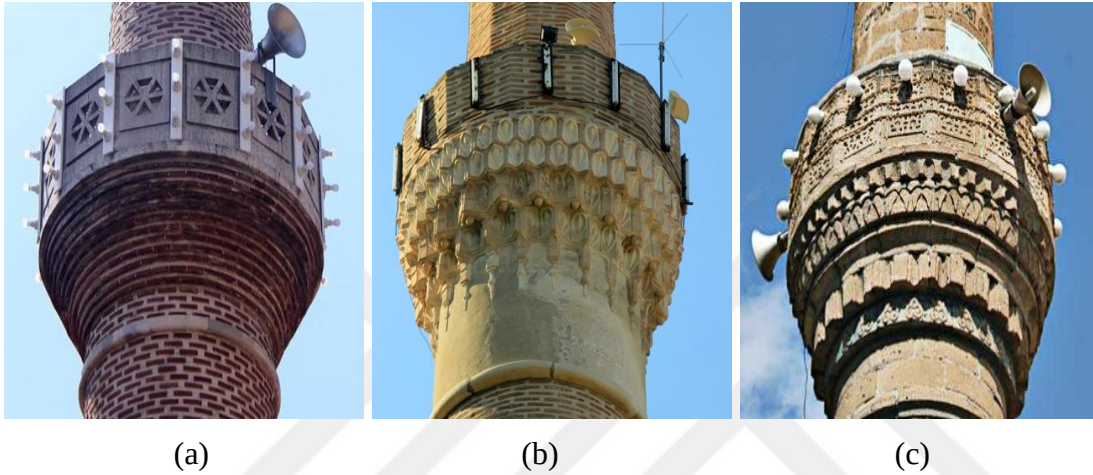
Minarenin şerefe ile külâh kısmı arasında kalan bölümdür. Yapı malzemesi, gövde malzemesiyle aynı olarak devam ettirilir ve çoğunlukla gövde duvarından daha ince duvar kalınlığıyla örülür [12]. Minare merdivenin bittiği yerde başlaması nedeniyle petek bölümünde karşılıklı duvarlar arasında bağlantı olmadığı için ciddi bir rijitlik kaybı olabilmektedir [13]. Bu durumdan kaynaklı riski en aza indirmek için petek içerisine şerefe döşemesinden başlamak üzere ahşap dikmeler ve bunlara bağlı yatayda ahşap bağlantı elemanları kullanılmaktadır (Şekil 1.8).



Şekil 1.8 : Petek içi ahşap bağlantılar [12].

4. Şerefe:

Şerefe, “çıkıntılı yer, burç” anlamındaki arapça “şürfe” kelimesinden gelmektedir. Minarede müezzinin üzerinde ezan okuduğu şerefe üç kısımdan oluşmaktadır: Müezzinin üstünde yürüdüğü taban, tabanı taşıyan çıkmalar ve tabanın etrafında bulunan kagir veya ahşap korkuluklar. İnşa edildikleri dönemin mimari karakteristiklerini yansıtan şerefeler minare üzerinde birden fazla olabilmektedir (Şekil 1.9) [14].



Şekil 1.9 : Şerefe örnekleri: (a)Tahta Minare Cami (b)Yoğurtluoğlu Cami (c)Ali Efendi Cami.

5. Gövde:

Gövde, küp ile şerefe arasında kalan ve genellikle minarenin en uzun bölümüdür [13]. Taş, tuğla veya almasıık olarak oluşturulan minarenin bu bölümü çoğunlukla silindirik formda olup düşeyde çekirdek çevresinde helezonik basamaklarla yükselen merdivenleri içerir.

Silindirik gövdeli minarelere, Yenişehir Orhan Cami, Bursa Şehadet Cami, Bursa Ulu Cami-Doğu, Hocaalızade Cami, Alaaddin Cami ve İznik Yeşil Cami minareleri örnek verilebilir [15]. Minare içerisinin aydınlatılması ve havalandırılması için gövde boyunca belirlenen yerlere mazgallar açılmış ve dönemlerini yansıtan süslemeler yapılmıştır [1].

6. Küp:

Mimari anlamda minarenin en önemli bölümüdür. Kaidenin kare veya geniş poligonal planından, minare gövdesinin daha dar çaplı dairesel planına geçiş ancak geçiş elemanları ile mümkün olabilmekmiştir (Şekil 1.10) [11]. Kaideden gövdeye geçişi

yumuşatan bu bölüm, taş veya tuğla malzeme kullanılarak inşa edilir almasıklığa pek rastlanılmaz [1].



(a)

(b)

Şekil 1.10 : K p  rnekleri: (a) Edirne Eski Cami-Edirne ve (b) Selçuklu Minaresi- zmir.

7. Kaide:

Çoğunlukla ta  veya ta -tuğla alması k örgü ile oluşturulan kaideler, temel ile k p arasında konumlanmaktadır ve minarenin en alt bölümüdür. Minarelerin ilk örneklerinde bu bölüm, silindirik olmasına rağmen daha sonra kare, çokgen, altıgen, sekizgen ve ongen formlarında inşa edilmiştir ( ekil 1.11) [1].

Minareye giriş kapısı çoğunlukla kaide kısmından açılır. Bu kapı, kaidenin genellikle batı cephesindedir [11].



(a)

(b)

(c)

Şekil 1.11 : Kaide  rnekleri: (a) Karacabey Kümbetli Cami-Bursa (b) Balaban Pa a Cami- zmir (c) Kırk Direkli Ulu Cami-Afyonkarahisar.

8. Temel:

Kaideden gelen yükleri zemine aktaran yapı elemanıdır. Toprak altında kaldığı için temel boyutları ve malzemesi hakkında kesin bilgimiz yoktur. Temeller, zemin yapısına, deprem bölgesine ve kaide şekline bağlı olarak farklılık gösterir. Genellikle 2 veya 3 kademeli olarak genişleyerek inşa edilirler [10].



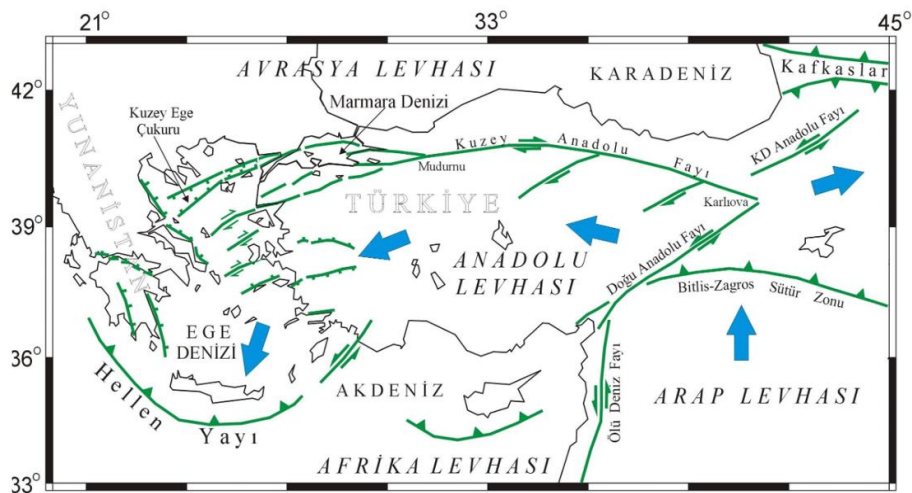
2. BURSA TARİHİ VE TARİHİ CAMİLER

2.1 Bursa'nın Tarihi Gelişimi

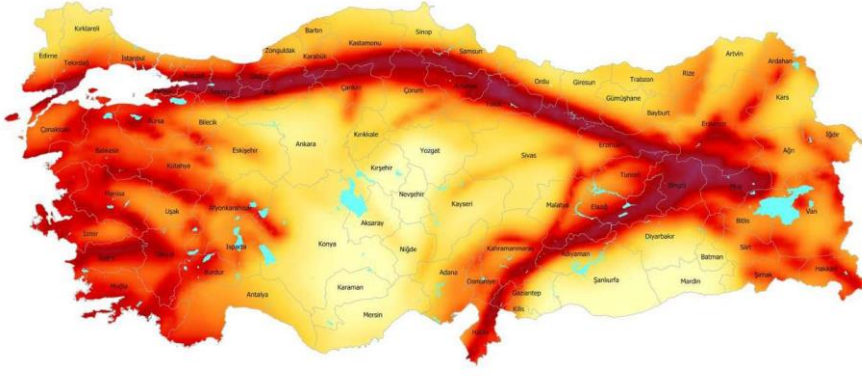
Bursa ili ve çevresindeki eski uygarlık alanların yerleşim alanı olarak seçilmesi, arkeolojik kaynaklara göre M.Ö. 5200 yıllarına dayanmaktadır. Bursa, Sultan Orhangazi tarafından 1326 yılında Osmanlı İmparatorluğunun başkenti yapılmıştır, [16]. Bursa'da tarihi cami, türbe, medrese, kilise, han, hamam ve çarşı vb gibi yapılar bulunmaktadır. Geçmişteki önemini koruyarak Bursa, günümüzde de Türkiye'nin önemli kentleri arasında yer almaktadır.

2.2 Bursa'nın Depremselliği

Türkiye; Kuzey Anadolu Fayı (KAF), Doğu Anadolu Fayı (DAF) ve Batı Anadolu Fayı (BAF) hatları ve birçok aktif fay kırıkları üzerinde yer almaktadır. Bursa ili ve çevresi Türkiye' deki en uzun fay hattı KAF'ın güney kolu üstünde yer almaktadır. KAF, yaklaşık 1100 km uzunluğunda ve yeryüzünün en hızlı hareket eden sağ-yanal atımlı faylarından biridir (Şekil 2.1) [17] . Türkiye deprem tehlike haritası ve aktif fay bölgeleri Şekil 2.2'de ve Bursa aktif fay hatları Şekil 2.3'de görülmektedir.



Şekil 2.1 : Türkiye'nin levha hareketleri.



Şekil 2.2 : Türkiye deprem tehlike haritası [18].



Şekil 2.3 : Bursa aktif fay hattı [19].

2.3 Bursa-Tarihi Depremler ve Etkileri

Cami, medrese, mektep, türbe, zaviye ve dergâh, han ve hamam gibi birçok tarihi yapıya ev sahipliği yapan Bursa klasik bir Osmanlı şehri görünümündedir. Bursa tarih boyunca birçok yıkıcı depremler yaşamıştır. Osmanlı Döneminde Bursa ve çevresini etkileyen depremler; 1508, Mayıs 1556, Ağustos 1668, 1674, Ağustos 1705, Mayıs 1719, 1754, Mayıs-Ağustos 1766, 1794 ve son olarak 1855 depremleridir. 1855 tarihli iki şiddetli deprem, Bursa tarihindeki en yıkıcı ve etkili depremlerden biri olup tarihi yapıları, ev ve dükkân gibi binaların büyük bir kısmının hasar görmesine ve bir kısmının da tamamen yıkılmasına sebep olmuştur. İlki 2 Mart, ikincisi 12 Nisan 1855 tarihlerinde görülen şiddetli yer sarsıntıları, yaklaşık üç buçuk ay kadar tedirgin edici

özelliğini devam ettirmiş, hafif sarsıntılar ise Aralık ayı ortalarına kadar sürmüştür [20].

1855 Depremlerinde, Sultan Orhan Gazi Cami minaresinin şerefeye kadar üst kısmının tamamen yıkıldığı; Ulu Cami'nin iki minaresinin şerefeye bölümlerinin yıkıldığı ve yirmi kubbeli caminin üç kubbesinde çatlaklar oluştuğu; Hocaalızade Cami minaresinin şerefeye kısmının hasar aldığı; Emir Sultan Cami'nin fazla hasar görmediği ve minarelerinde çatlaklar oluştuğu; Çelebi Mehmed Cami'nin (Yeşil Camii) minaresinin şerefeye kısmının yıkıldığı ve alt kısımlarında çatlaklar oluştuğu; Muradiye Cami'de birinci depremde küçük hasarlar oluştuğu, minare ve türbesinin kubbesinde çatlaklar meydana geldiği; Hüdavendigar (I. Murat) Cami minaresinin şerefeye üstünden yıkıldığı; Üftade Cami'nde çatlaklar meydana geldiği ve minaresinin şerefeye üst kısmının yıkıldığı; Kayhan Cami ve Hayreddin Paşa Camilerinin tamamen yıkıldığı ve minarelerinin şerefeye üst kısımlarının yıkıldığı; Yıldırım Caminin ilk depremde fazla hasar görmediği fakat minaresinin büyük bir kısmının yıkıldığı [20]'de raporlanmıştır.

2.4 Bursa Hocaalızade Cami Minaresi

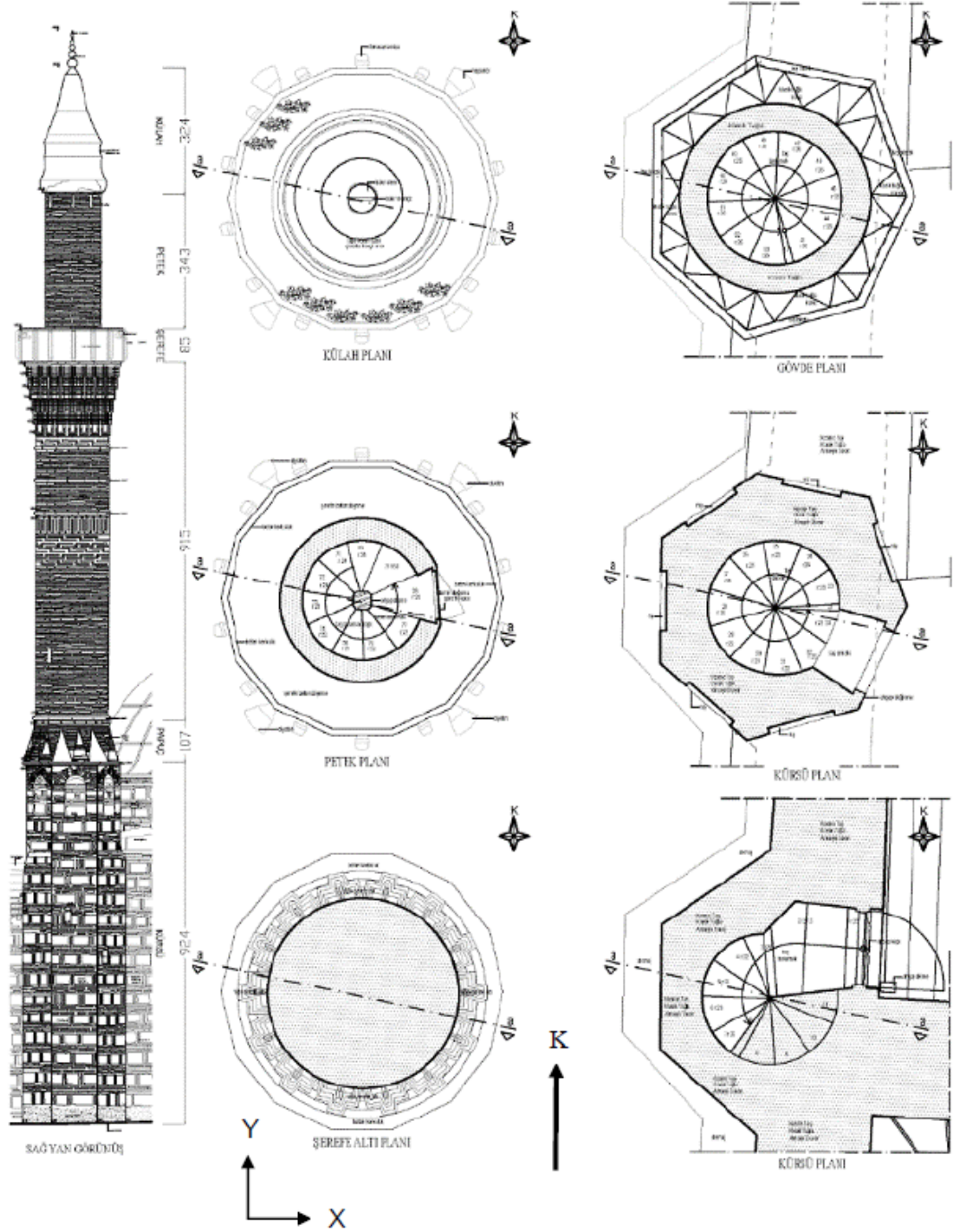
Hocaalızade Cami, Osmangazi ilçesi Hocaalızade Mahallesi Alioğlu Sokak'ta yer almaktadır. Cami bahçesindeki mezar taşlarındaki yazıtlara göre, 1439 yılında Hoca B. Ömer ile Hoca Ahmet adlı tüccar kardeşler tarafından yaptırılmıştır.

Hocaalızade Cami'nin minaresi caminin batı köşesinde konumlanmaktadır. Minare yaklaşık 27 m yüksekliğe sahiptir. Günümüze kadar birçok depreme maruz kalan minarenin Bursa civarını etkileyen, 1855 yılındaki iki büyük depremde yalnızca şerefesinin hasar gördüğü düşünülmektedir (Şekil 2.4) [21].

Minare kaidesinin bir kısmı cami duvarına bitişiktir. Kaide bölümü yedigen diğer tüm bölümleri ise silindirik formda inşa edilmiştir. Minare tek şerefeli olup şerefeye çıkış kapısı petekten açılmaktadır. Şerefeye çıkış için çekirdeksiz bir merdiven yapısı mevcuttur. Minare görünüş ve enkesit çizimleri, Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.4 : Hocaalizade Cami ve Minare görünüşü.

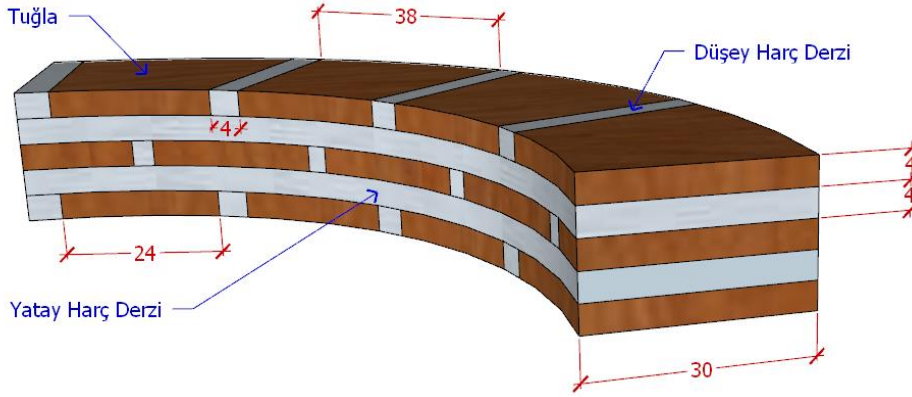


Şekil 2.5 : Hocaalizade Cami minaresi görünüş ve enkesiti [4].

Minarenin kaidesi taş ve tuğla malzemeden yapılmıştır. Tuğla kalınlığı genellikle 4 cm olup 20-25 cm enindedir. Taş boyutları değişkendir. Almasıklı yapılı kaide üzerinde tuğla gövde bulunmaktadır. Tuğla kalınlıkları 3.5-4 cm arasında olup 20-40 cm enindedir. Minare boyunca düşey/yatay harç derz kalınlığı ise 3-5 cm civarındadır. Minare boyutları ve malzeme bilgisi Çizelge 2.1’de ve ortalama tuğla boyutları Şekil 2.6’da sunulmuştur.

Çizelge 2.1 : Hocaalizade Cami minaresi boyut ve malzeme özellikleri.

Özellik	Külah	Petek	Gövde	Küp	Kaide
Malzeme	Tuğla	Tuğla	Tuğla	Tuğla	Almaşık
Cidar Kalınlığı (m)	0.21	0.21	0.30	0.50-0.30	0.50
İç çap (m)	1.10-0.10	1.10	1.24	1.24	1.24
Dış çap (m)	1.52-0.52	1.52	1.84	2.24-1.84	2.24
Yükseklik (m)	3.24	4.28	9.15	1.07	9.24

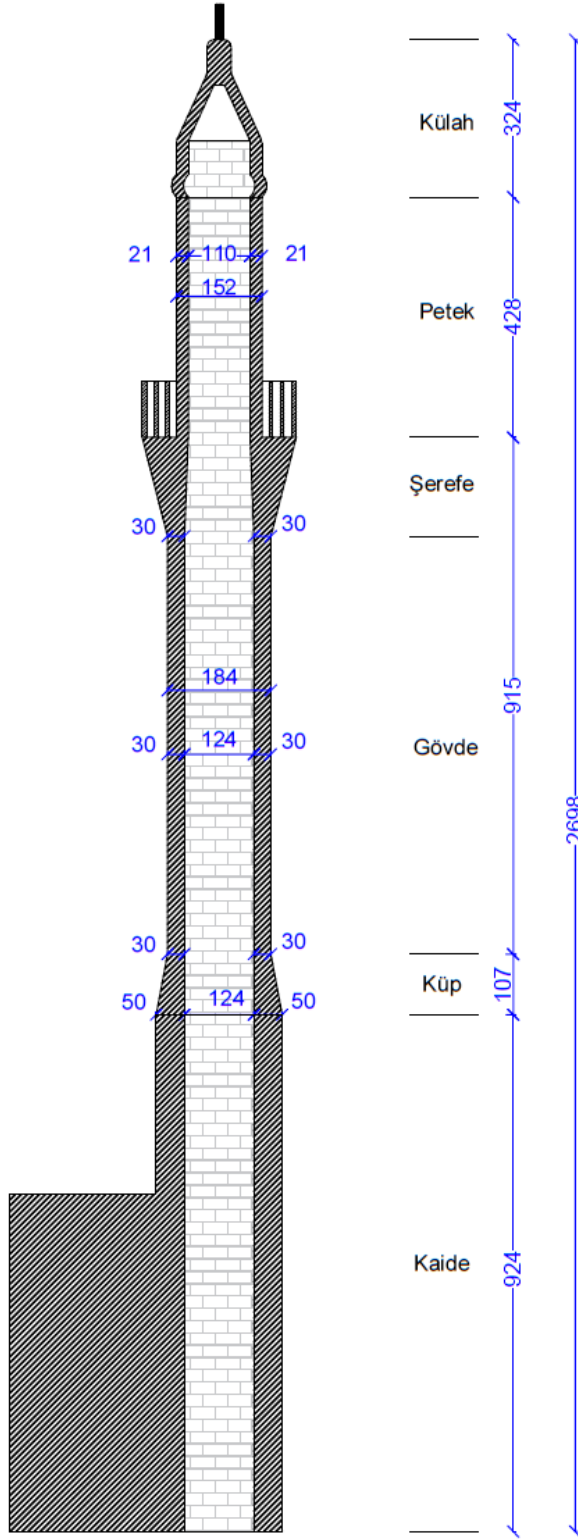


Şekil 2.6 : Hocaalizade Cami minaresi ortalama tuğla boyutları ve derz kalınlığı (boyutlar cm).

Minarenin merdiveni toplamda 82 basamak içermektedir. Merdiven basamakları, iki kayrak taşı ve bu taşlar arasını dolduran tuğla ve harç derzleri ile oluşturulmuştur. Merdiven basamakları rıht yüksekliği 23-29 cm arasında değişmekte olup 20° dönüş açısıyla çekirdeksiz yapılıdır. Basamak genişlikleri 26-31 cm'dir. Minare şerefesi 90 cm genişliğe, 15 cm parapet kalınlığı ile birlikte 95 cm yüksekliğe sahiptir. Merdiven görünüşü Şekil 2.7'de ve Hocaalizade Cami Minare çizimi boyutları ile birlikte Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.7 : Hocaalizade Cami minaresi merdiven görünüşü.



Şekil 2.8 : Prototip (gerçek) minare (boyutlar cm).



3. SARSMA TABLASI DENEYLERİ VE HAZIRLIK

Tarihi minareler, İslam mimarisinin estetik ve sembolik birer örneği olarak değerlendirilir. Her biri farklı bir tarih, mimari tarz veya kültürel özelliklere sahiptir. Minareler narin yapılarından dolayı düşey yüklere dayanıklı olmasına rağmen yatay kuvvetlere karşı savunmasız ve kırılgan yapılardır. Muhtemel depremler altında ciddi hasar görmeleri olasıdır. Depremde hasar görmüş tarihi yapıların onarılması ve güçlendirilmesi, benzer depremlerde hasar görmemesi için vazgeçilmezdir. Deprem riski yüksek bölgelerde tarihi minarelerin yapısal güvenilirliğinin incelenmesi, kültürel mirasın sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşır ve gelecek kuşaklara aktarılmaları için yapısal önlemler alınmalıdır.

Minarelerin sismik etkiler altında davranışını anlamak ve performansını değerlendirmek için sarsma tablası deneysel çalışmaları en güvenilir yöntemler arasında yer almaktadır. Tarihi yığma minarelerinin sarsma tablası testlerini konu alan bir çalışmaya literatürde bulunmamaktadır. Diğer yapı türlerine oranla oldukça az sayıda olan tarihi minare çalışmaları, minare formuna benzer yapıların nümerik ve sınırlı sayıda sarsma tablası testleri ile desteklenmiştir.

Doğangün vd. (2006) yığma minarelerin deprem ve rüzgar etkilerine karşı gösterdiği davranışı açıklamışlardır. Deprem veya rüzgar etkileri nedeniyle minarelerde en sık hasar oluşan bölgeleri belirlenmiş ve geçmiş doğal afetlerde minarelerin nasıl etkilendiği gösterilmiştir. Rızvaniye Cami minaresi için oluşturulan sayısal model üzerinde modal analiz yapılarak minarenin dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Çalışma kapsamında, Düzce 1999 ve Kocaeli 1999 depremlerine ait ivme kayıtları kullanılarak yapılan deprem analizi sonuçları, gözlemlenen hasarları ve hasar bölgelerini doğrular nitelikte olup, aynı bölgelerde gerilme yığılmalarının meydana geldiğini göstermiştir [22].

Bayraktar vd. (2010) tarihi yapıların deprem güvenliklerinin tahribatsız deneysel yöntemlerle belirlenmesine odaklanmıştır. Bu kapsamda, Osmanlı Köprüsü, İskenderpaşa Cami minaresi ve Trabzon'daki Ayasofya Kulesi gibi yapılar üzerinde yerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilerek dinamik özellikleri belirlenmiştir. Daha

sonra, yapıların geometrik özellikleri kullanılarak üç boyutlu sayısal modeller oluşturulmuştur [23].

Bayraktar vd. (2011) minarelerin deprem performanslarının çevresel titreşimlerle modal analiz yoluyla belirlenmesine odaklanmıştır. Minarelerde çevresel etkiler nedeniyle meydana gelen tepkiler, hassas ivme ölçerler yardımıyla ölçülmüş, minarenin geometrik ve yapısal özellikleri dikkate alınarak sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan sayısal model üzerinde modal analiz yapılarak doğal frekanslar ve mod şekilleri belirlenmiştir. Sayısal model için Erzincan 1992 depreminin ivme kayıtları kullanılarak deprem analizi yapılmış ve maksimum yer değiştirmeler, konumları, maksimum gerilmeler ve oluşan bölgeler sunulmuştur [24].

Oliveira vd. (2012) İstanbul'da yer alan yedi adet minarede çevresel titreşim testlerini yaparak dinamik karakteristiklerinin belirlenmesini amaçlamıştır. Bu minarelerin yükseklikleri 23 ila 67 metre arasında değişmektedir. Çalışmada, minarelerin geometrik özellikleri ve bulundukları zemin sınıfları belirlenerek sayısal modelleme yapılmıştır. Sayısal model, minarelerde yapılan çevresel titreşim testlerine göre kalibre edilmiş ve minarelerde deprem analizleri yapılmıştır. Bu çalışma ile minarelerin dinamik davranışları ve bu davranışları etkileyen faktörler açıklanmıştır [25].

Krstevska (2010) ve Tashkov (2012) tarafından Üsküp'te yer alan Tarihi Koca Mustafa Paşa camii ve minaresi, 1/6 ve 1/10 ölçeğinde farklı tarihlerde ayrı ayrı model olarak inşa edilerek sarsma tablası testleri gerçekleştirmişlerdir. 1/6 ölçekli model Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS) laboratuvarında ve 1/10 ölçekli model Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü laboratuvarında sarsma tablası testleri yapılmıştır. Modeller 1979 Karadağ Depremi etkisi altında test edilmiş, dinamik özellikleri ve hasar dağılımları birbiriyle uyumlu bulunmuş ve ivme ve yer değiştirme değerlerinde kabul edilebilir düzeyde farklar olmuştur [26,27].

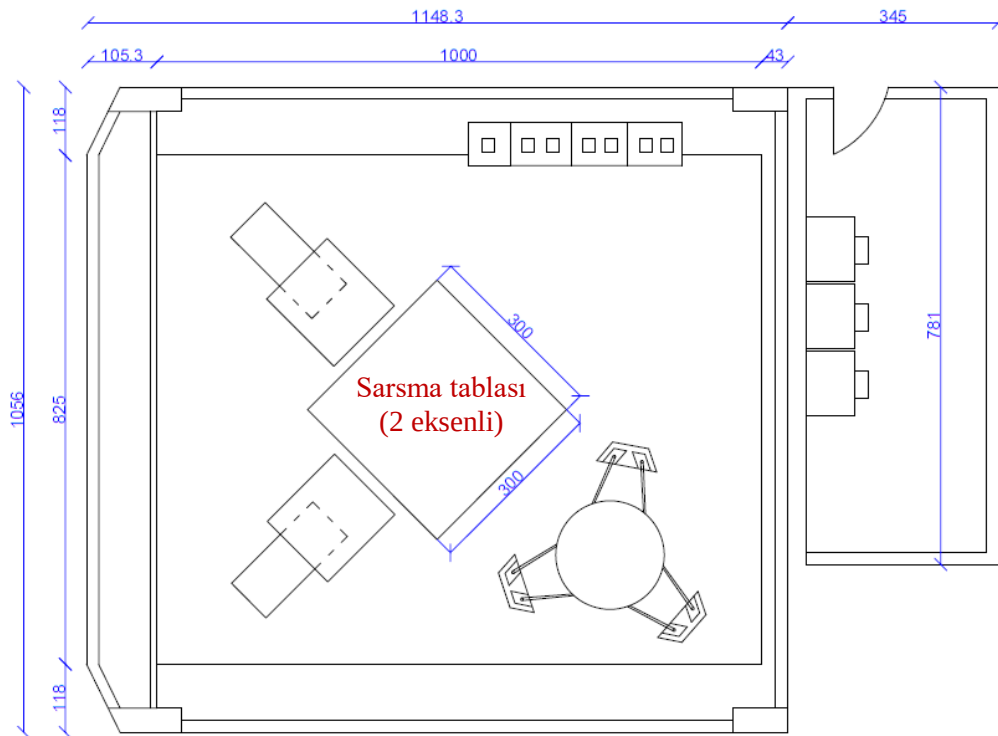
Xie vd. (2020) tarihi yığma bir Çin tapınağını temsil eden 1/8 ölçekli modeli 2 doğrultuda dört farklı deprem kaydı etkisi altında sarsma tablası testlerini yapmıştır. Modellerin dört deprem kaydı altındaki tepkileri karşılaştırıldığında, yapının doğal titreşim periyoduna en yakın ana periyoda sahip depremin etkisi diğer depremlere kıyasla daha fazla hasara yol açmıştır [28].

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) Ulusal Deprem Araştırma Programı (UDAP) G-18-07 projesi ‘‘Bursa Tarihi Minarelerinin Deprem Performanslarının Analitik ve Deneysel Yaklaşımlar ile İncelenmesi ve Hasargörebilirlik Eğrilerinin Elde Edilmesi’’ isimli proje kapsamında sarsma tablası testleri gerçekleştirilmiştir. 1 adet referans, 1 adet güçlendirilmiş, 1 adet hasar verildikten sonra onarılmış ve 1 adedi yedek olmak üzere 4 adet ölçekli minare numunesi üretilmiştir. Artımsal olarak uygulanan deprem kaydı altındaki davranışları elde edilmiştir.

Sarsma tablası testleri, Türk-Alman Üniversitesi-Allianz Teknik Deprem & Yangın Test ve Eğitim Merkezi’ndeki iki eksenli sarsma tablasında gerçekleştirilmiştir. Sarsma tablasının özellikleri, laboratuvarın koşulları, numunenin tasarımı ve ölçeklenmesi, ölçüm sistemi/ölçüm çerçevesi/koruma sisteminin tasarımı, deprem kaydının seçilmesi/ölçeklenmesi ve diğer tüm detaylara değinilmiştir.

3.1 Sarsma Tablası Özellikleri ve Laboratuvar Koşulları

Model minare sarsma testleri, Türk-Alman Üniversitesi Yerleşkesinde bulunan Allianz Teknik Deprem & Yangın Test ve Eğitim Merkezi’nde yapılmıştır. İki eksenli sarsma tablasının test merkezindeki konumu, Şekil 3.1’de verilmiştir.

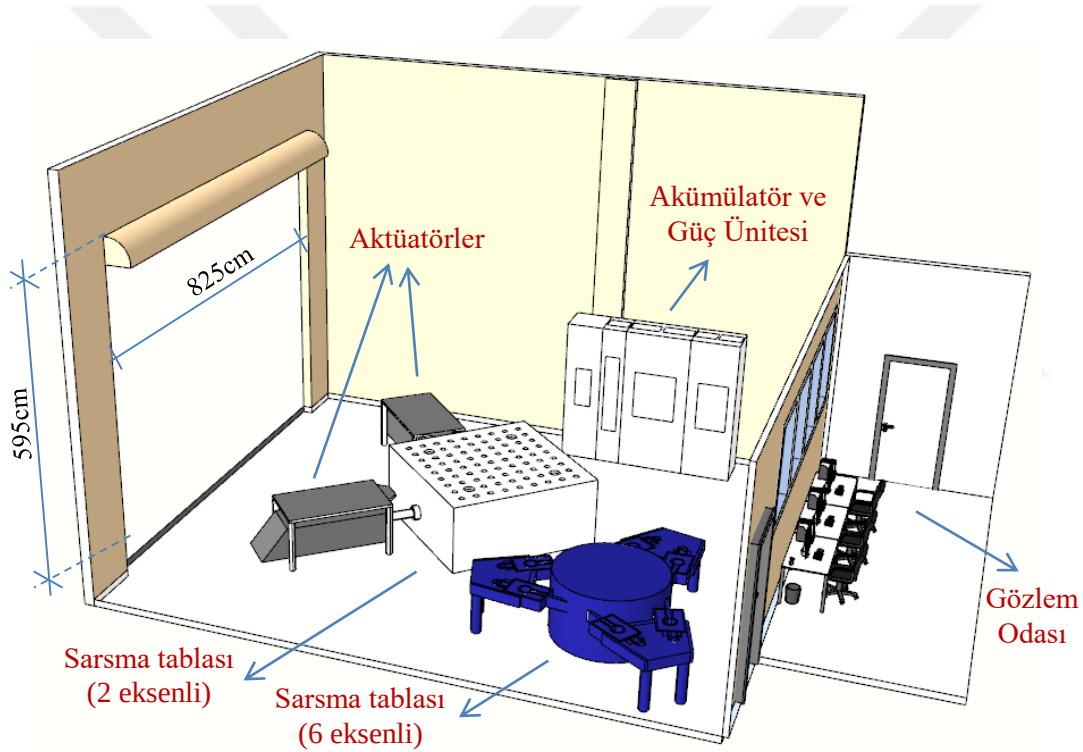


Şekil 3.1 : Test merkezi planı (boyutlar cm).

İki eksenli sarsma tablasının boyutları 3x3m'dir. Sarsma tablasına ait teknik bilgiler Çizelge 3.1'te sunulmuştur. Model minarenin tasarımında ve deprem kayıtlarının seçiminde bu teknik özellikler dikkate alınmıştır.

Çizelge 3.1 : Sarsma tablası teknik özellikleri.

Özellik	Değer
Deplasman (mm)	± 250
Moment taşıma kapasitesi (tm)	30
Maksimum yük taşıma kapasitesi (t)	10
Maksimum ivme kapasitesi (g)	1
Maksimum hız kapasitesi (m/s)	1
Test frekans aralığı (Hz)	0-50



Şekil 3.2 : Test merkezinin üç boyutlu çizimi.

Test laboratuvarı içerisinde numuneleri üretecek alan olmadığı için model minare dışarıda üretilmiştir. Minare, test öncesi sarsma tablası üzerine konumlandırmak için taşınmıştır. Bu nedenle, test merkezi fiziksel koşulları ve dış kapı boyutları dikkate alınarak numune boyutları belirlenmiştir. Dış kapı yüksekliği 595 cm ve genişliği 825 cm olarak ölçülmüştür (Şekil 3.2).

3.2 Numunenin Tasarımı ve Ölçeklenmesi

Erken Dönem Osmanlı tuğla minarelerini temsil etmek üzere Hocaalızade Cami minaresi model minarenin prototipi olarak seçilmiştir (Şekil 3.3). Hocaalızade Cami minaresi; kaide, küp, gövde, şerefe, petek, külah ve alem kısımlarına sahiptir. Kaidenin plandaki boyutları, diğer bölüm boyutlarına göre daha büyük olup kaidenin bir kısmı cami beden duvarlarına bitişik olarak bulunmaktadır. Bu nedenle, kaide görece olarak diğer bölümlere göre daha rijit bir yapıya sahiptir ve depremlerde hasar görme olasılığının diğer bölümlere göre daha düşük olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, gerçek deprem sonrası gözlemler bunu doğrular niteliktedir.

Hocaalızade Cami minaresinin külah kısmı tuğla olmasına rağmen Erken Dönem Osmanlı cami minarelerinin külah kısmı daha çok ahşaptan yapılmıştır. Ahşap malzemeli külahın, minarenin deprem etkileri altındaki davranışını etkilemeyeceği düşünülmektedir.

Olabildiğince büyük ölçekli bir minare modeli üretme ve test etme isteği ve yukarıda açıklanan sebeplerden dolayı model minare kaide ve külah içermeyecek şekilde üretilmiştir.



Şekil 3.3 : Hocaalızade Cami Minare bölümleri.

Minare numunelerini tam ölçekli üretmek; yüksek maliyet, sarsma tablasının kapasitesi ve laboratuvar koşullarından dolayı genellikle mümkün olamamaktadır. Bu nedenle model numuneler, ölçekleme yaklaşımları kullanılarak üretilir. Sarsma tablası testleri için True Replica (Tam Kopya Modeli), Artificial Mass Simulation (Yapay Kütle Benzeştirme Modeli) ve Gravity Forces Neglected (Yerçekimi Kuvvetlerinin İhmal Edildiği Model) model yaklaşımları kullanılmaktadır (Çizelge 3.2) [29].

True Replica modeli; model ile prototip yapı arasındaki kütlelerin korunumu ile sağlanmaktadır. Ancak bu modelin uygulanması oldukça güçtür. Artificial Mass Simulation yaklaşımı; ölçekleme sonrası gerekli olan kütlelerin model numuneye sonradan eklenmesi olarak ifade edilebilir. Bu yaklaşımda, sonradan eklenen ek kütlelerin, yapısal davranışı değiştirmemesi önem arz etmektedir. True Replica ve Artificial Mass Simulation modellerinin uygulanamadığı durumlarda Gravity Force Neglected yaklaşımı uygulanabilmektedir. Bu çalışmada, ek kütlelerin davranışı değiştirmeyecek şekilde yerleştirilebileceği bir hacim model minarede bulunmadığı için Gravity Forces Neglected yaklaşımı tercih edilmiştir.

Çizelge 3.2 : Ölçekleme yaklaşımları.

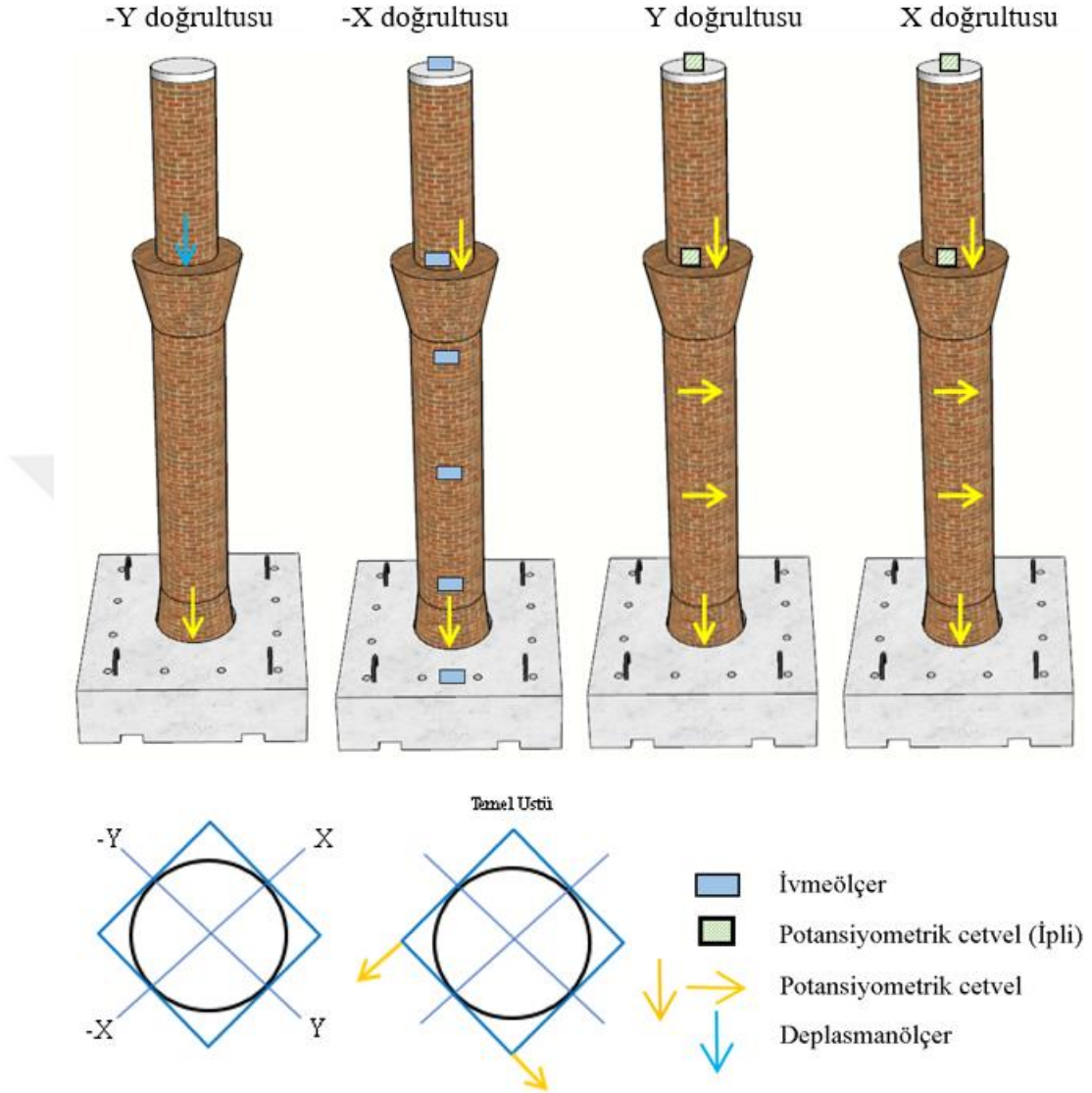
Ölçeklendirme Parametreleri	Model Tipi		
	True Replica	Artificial Mass Simulation	Gravity Forces Neglected
Uzunluk	S	S	S
Zaman	$S^{1/2}$	$S^{1/2}$	S
Frekans	$S^{-1/2}$	$S^{-1/2}$	S^{-1}
Hız	$S^{1/2}$	$S^{1/2}$	1
Yer İvmesi	1	1	Neglected
İvme	1	1	S^{-1}
Kütle	E_r/S	**	1

S:Ölçek (Model/Prototip oranını belirtir.), E_r :Elastisite modülü.

**Ek kütle gerektirir.

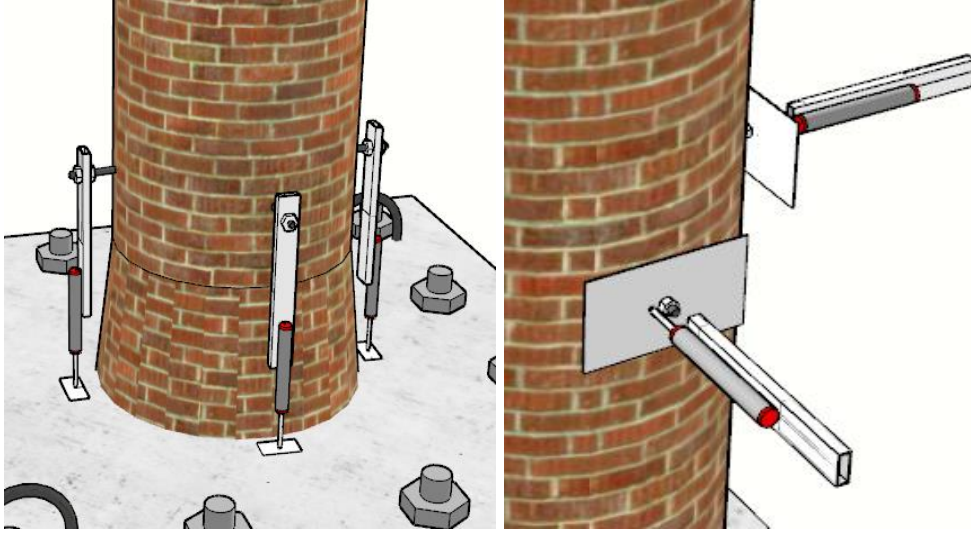
Laboratuvar fiziksel koşulları ve sarsma tablası kapasitesi dikkate alınarak model numune, $1/4$ geometrik oranı benimsenerek üretilmiştir. Model minarenin geometrik boyutları Şekil 3.4'te verilmiştir. Model minarenin temel hariç nominal yüksekliği 372.5 cm olarak öngörülmüştür.

SketchUp [32] programı kullanılarak çizilmiş ve ölçüm cihazlarının konumları çizimler üzerinde işaretlenmiştir.



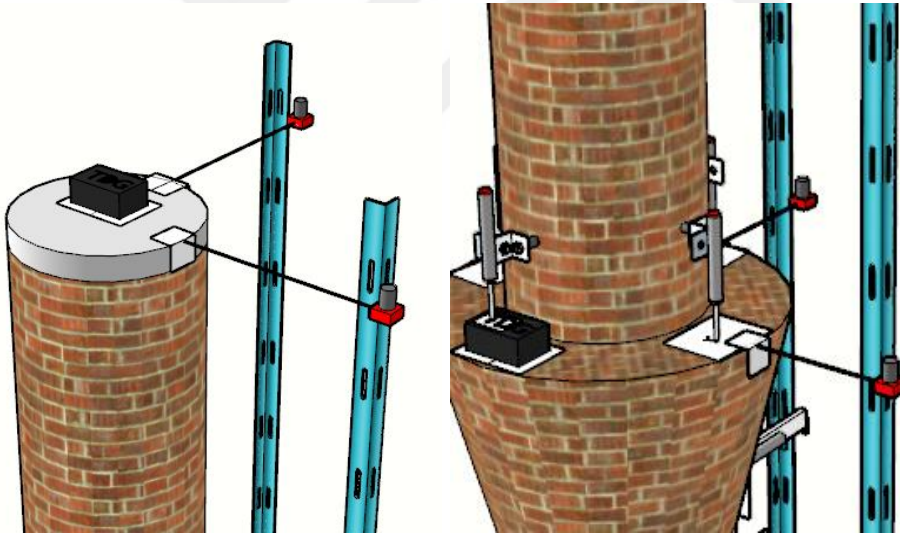
Şekil 3.6 : Ölçüm cihazlarının minare üzerindeki yerleşimi.

İvme kaydının model minareye iki doğrultuda uygulanmasından dolayı yerdeğiştirmeölçer cihazları, bu doğrultulara paralel olacak şekilde konumlandırılmıştır. Minarenin hasar alma olasılığı daha yüksek, kesit değişiminin olduğu küp-gövde geçiş ve şerefe-petek geçiş bölgesine 4 adet 100 mm kapasiteye sahip dikey potansiyometrik cetveller yerleştirilerek dönmeler incelenmiştir. Gövde ortası ve gövde üst kısmına 2 adet 100 mm kapasiteye sahip yatay potansiyometrik cetvel yerleştirilmiştir (Şekil 3.7).



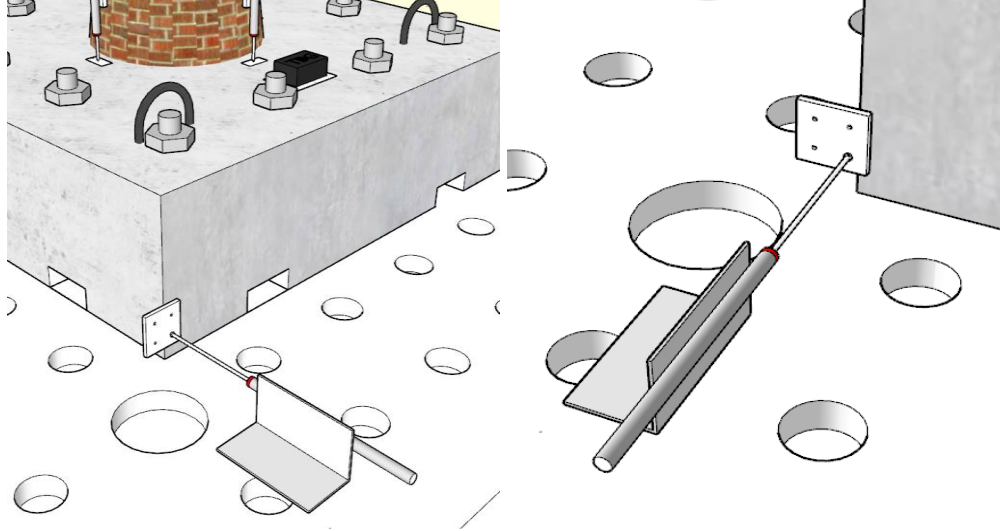
Şekil 3.7 : Düşey ve yatay konumlandırılan potansiyometrik cetveller.

Şerefe ve petekte yatay doğrultuda daha fazla öteleme beklendiği için bu bölgelere iki doğrultuda ipli 1000 mm kapasiteye sahip potansiyometrik cetveller ve lazer deplasman sensörleri yerleştirilmiştir (Şekil 3.8).



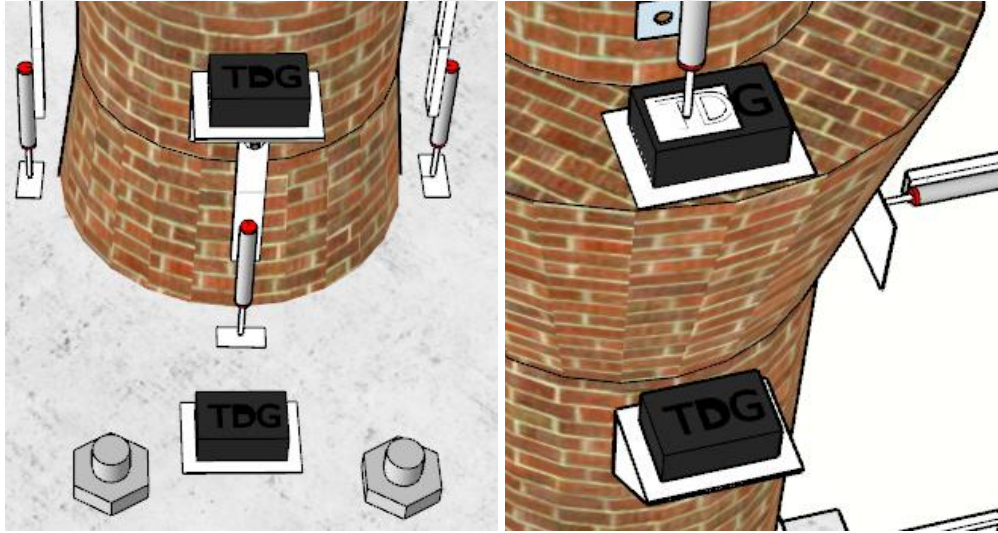
Şekil 3.8 : İpli potansiyometrik cetvel yerleşimi.

Test sırasında minare temelinin yatayda görelî hareketini önlemeye yönelik tedbirler alınmış ve ayrıca yatayda birbirine dik iki doğrultuya (X ve Y) paralel potansiyometrik cetveller yerleştirilerek olası bir görelî hareket olup olmadığı kontrol edilmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 : Temel hareketini kontrol etmek için yatay doğrultularda yerleştirilen potansiyometrik cetveller.

Model minare boyunca ivmenin değişimini anlamak ve sayısal değerlerini ölçmek için 6 adet $\pm 4g$ kapasiteye sahip ivmeölçer kullanılmıştır. Bu ivmeölçerler, farklı konumlarda Şekil 3.6 ve Şekil 3.10’da gösterildiği gibi numune üzerine yerleştirilmiştir. Ölçüm sistemini oluşturan cihazların listesi, ayrıca, Çizelge 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.10 : İvmeölçer yerleşimi.

Çizelge 3.3 : Testte kullanılan ölçüm cihazları listesi.

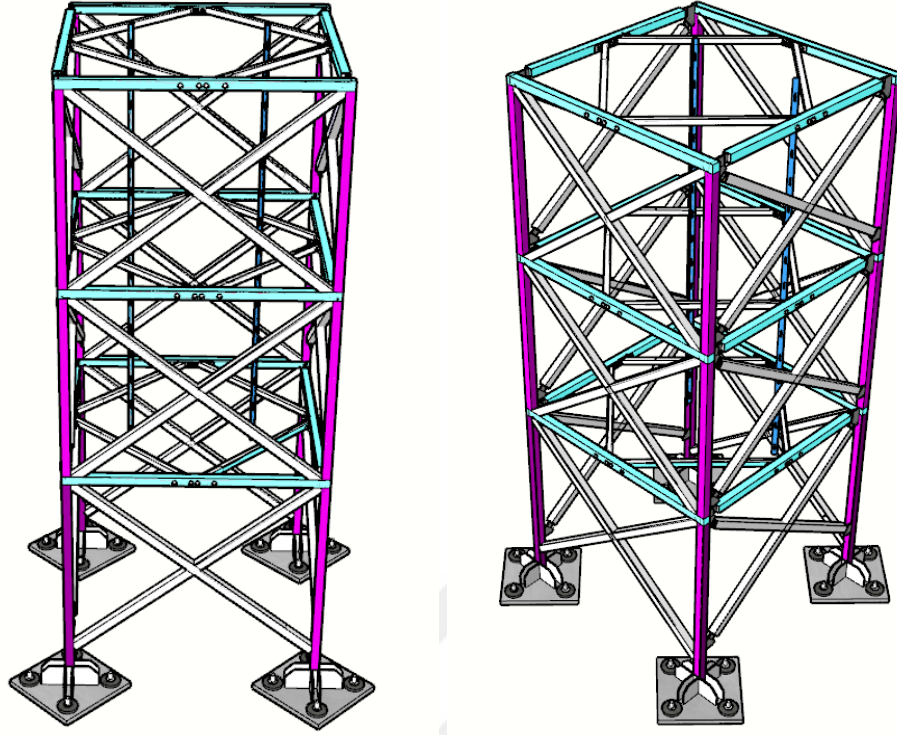
Ölçüm Cihazı	Adet	Kapasite	Doğrultu
İvmeölçer	6	$\pm 4g$	-X
Potansiyometrik cetvel	2	100 mm	Y
Potansiyometrik cetvel	1	100 mm	-Y
Potansiyometrik cetvel	2	100 mm	X
Potansiyometrik cetvel	2	100 mm	-X
Deplasmanölçer	1	250 mm	-Y
Potansiyometrik cetvel	1	300 mm	-X
Potansiyometrik cetvel	1	300 mm	-Y
Potansiyometrik cetvel (İpli)	2	1000 mm	Y
Potansiyometrik cetvel (İpli)	2	1000 mm	X
Lazer deplasman sensörü	1	-	Y
Lazer deplasman sensörü	1	-	X
Lazer deplasman sensörü	1	-	X/-Y arası
Lazer deplasman sensörü	1	-	-Y/-X arası

Çizelge 3.3'te verilen ölçüm sistemine ek olarak, minare davranışını test sırasında kayıt altına almak için koruma sistemi üzerine 2 adet kamera çapraz şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 3.11'de kamera ve lazermetrenin görüntüsü verilmiştir.



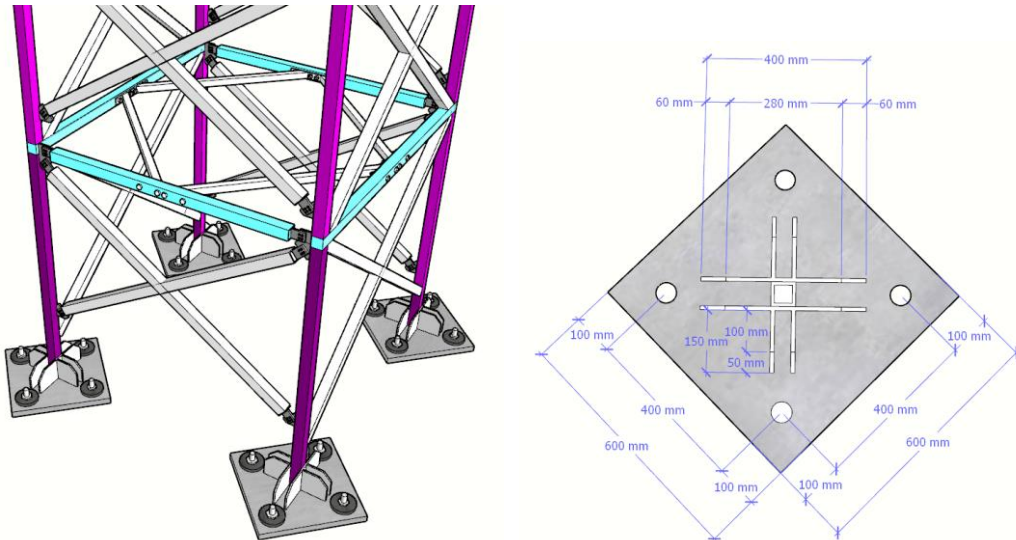
Şekil 3.11 : Lazer deplasman sensörü ve kamera.

Potansiyometrik cetvel ve lazerleri sabitlemek için test merkezinde hazır bir sistem bulunmadığı için numune davranışı ve sarsma tablası boyutları dikkate alınarak bir ölçüm çerçevesi tasarlanmıştır. Ölçüm çerçevesi, sarsma tablası üzerine monte edilmiştir (Şekil 3.12).



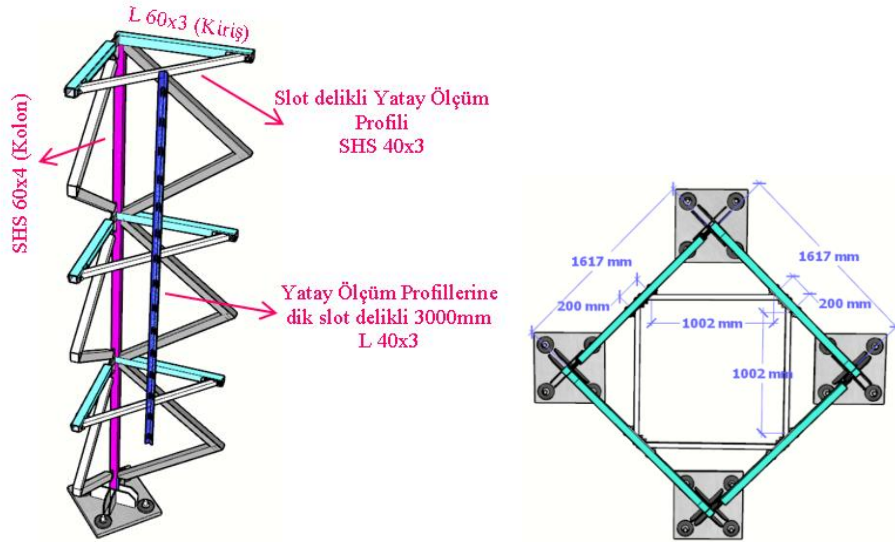
Şekil 3.12 : Ölçüm çerçevesi.

Ölçüm çerçevesinin taşıyıcı kolon elemanları, sarsma tablası kısıtları ve numune temelinin konumu nedeniyle sarsma tablasının orta bölümüne çapraz olacak şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 3.13 (a)). Ölçüm çerçevesini sarsma tablasına sabitlemek için 30 mm boyutlarına sahip kayma kama plakaları kullanılmıştır (Şekil 3.13 (b)).



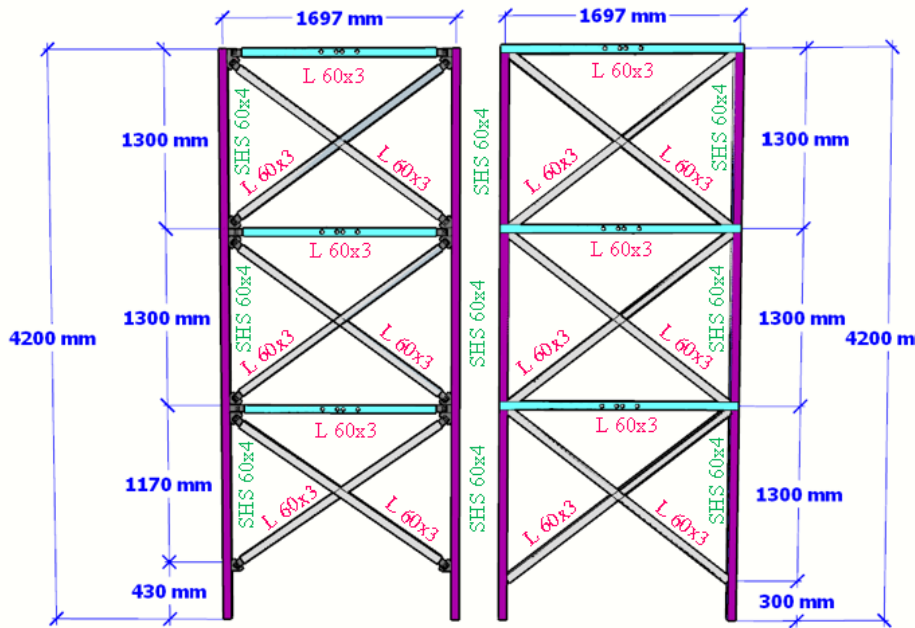
Şekil 3.13 : Ölçüm çerçevesi: (a) plan ve (b) ayak detay çizimi.

Ölçüm çerçevesi tasarımında, taşıyıcı kolonlar SHS 60x4 kutu profil ve taşıyıcı kirişler L60x3 profil olarak belirlenmiştir. Kirişlere yatay olarak eklenen tali kirişler SHS 40x3 slot delikli kare profil şeklindedir. Bu tali kirişlere ölçüm sistemini konumlandırmak için L40x3 slot delikli çelik profil eklenmiştir (Şekil 3.14).



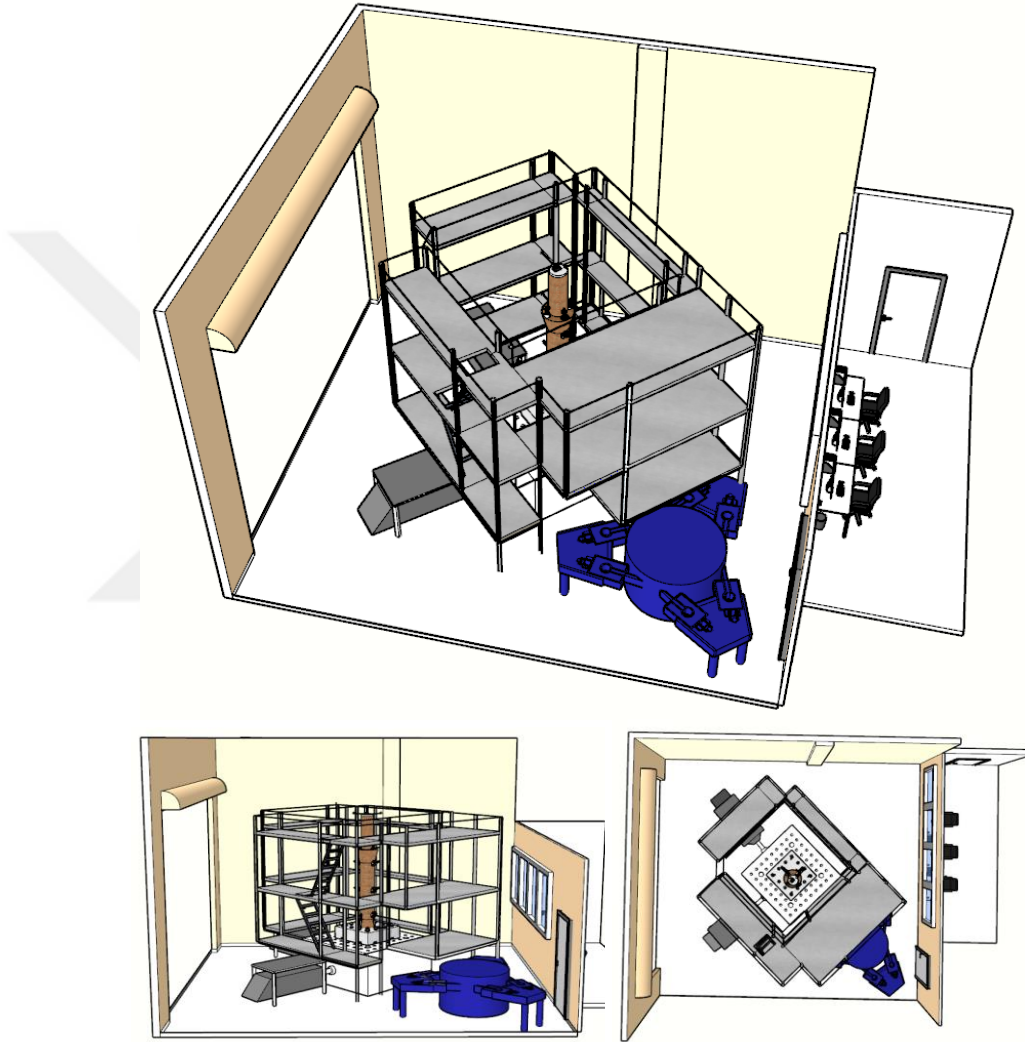
Şekil 3.14 : Ölçüm çerçevesi profil detayları.

Ölçüm çerçevesi sisteminin montaj ve demontaj işleminin rahatça yapılması için sistemin iki yönünde kaynak diğer doğrultularında ise bulonlu birleşim yapılmıştır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 : Ölçüm sistemi: (a) bulonlu ve (b) kaynaklı kesit.

Test merkezi cihazlarını/fiziksel ortamını ve minare ölçüm sistemini olası numune hasarlarına karşı korumak için minare çevresi, sarsma tablasını da içerecek şekilde iskele sistemi ile koruma altına alınmıştır. İskele sistemi, her test aşaması sonrası gözlem yapmaya imkan veracak şekilde üç kat ve merdivenli olarak tasarlanmış ve ayrıca yürüme platformları oluşturulmuştur. Ölçüm sisteminin bazı bileşenleri ve kameralar iskele sistemi bileşenlerine sabitlenmiştir. (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 : Koruma sistemi.

3.4 Deprem Kaydının Seçilmesi ve Ölçeklendirilmesi

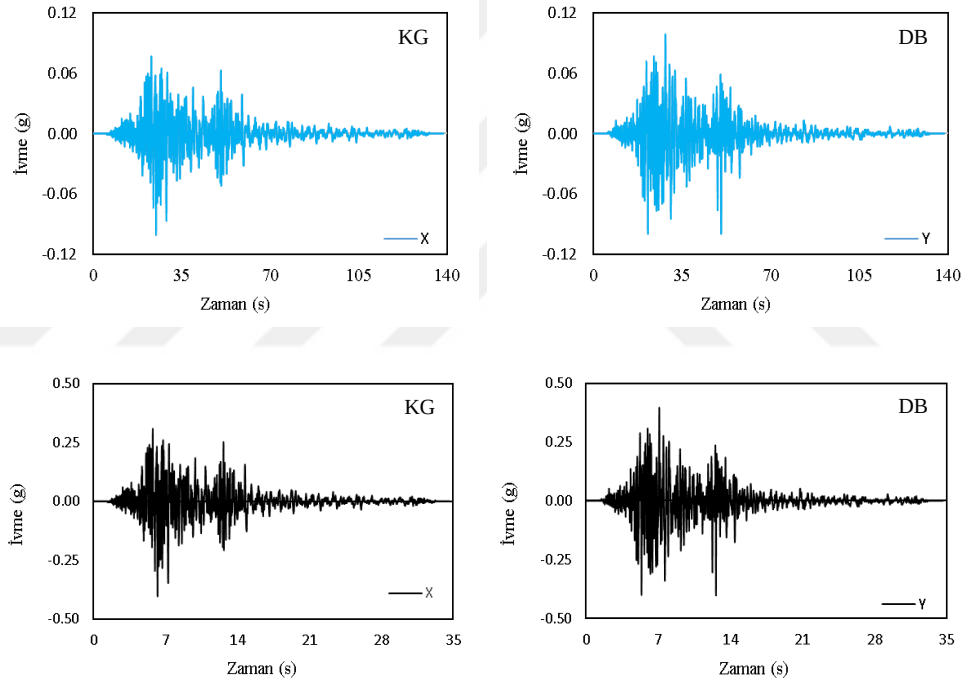
Deprem kaydı, tez çalışması Bursa-Erken Dönem Minareleri üzerine olduğu için Bursa'da konumlandırılan istasyonlardan elde edilen bir kayıt seçimi uygun görülmüştür. Sarsma tablasının kapasitesi dikkate alınarak, testlerin, 17 Ağustos 1999 depreminin ürettiği Bursa/Tofaş istasyonunda kaydedilen deprem ivme kaydı altında gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. Bu istasyon, Hocaalızade Cami'ne 8,92 km ve merkez üssüne 99,01 km uzaklıkta bulunmaktadır (Şekil 3.17). İvme kayıtları, PEER (Pasific Earthquake Engineering Research Center) NGA West-2 veri tabanından alınmıştır [33] ve bu kaydın kayıt numarası RSN1155'dir, Şekil 3.18. Doğu-Batı (DB) ve Kuzey-Güney (KG) doğrultusunda en büyük ivmeler yaklaşık 0.1g olup toplam kayıt süresi 140 s'dir. ARTeMIS [32] yazılımı kullanılarak deprem kaydına ait parametreler belirlenmiş ve Çizelge 3.4'te verilmiştir. Çizelgede PGA maksimum yer ivmesini, PGV maksimum yer hızını ve PGD maksimum yer değiştirmesini göstermektedir.

Arias şiddeti, bir depremin enerji boşalımının bir ölçüsüdür ve depremin sarsıntı süresi ve frekans içeriğini dikkate alır. Depremin ne kadar süreyle ve hangi frekansta enerji ürettiğini belirlemek için kullanılır. Baskın Periyot (T_p), %5 sönüm oranı ile hesaplanan ivme tepki spektrumunda maksimum spektral ivmenin meydana geldiği periyottur. Ortalama periyot (T_m), Fourier genlik spektrumunda en yüksek genlik değerine karşılık gelen titreşim periyodu olarak tanımlanır.

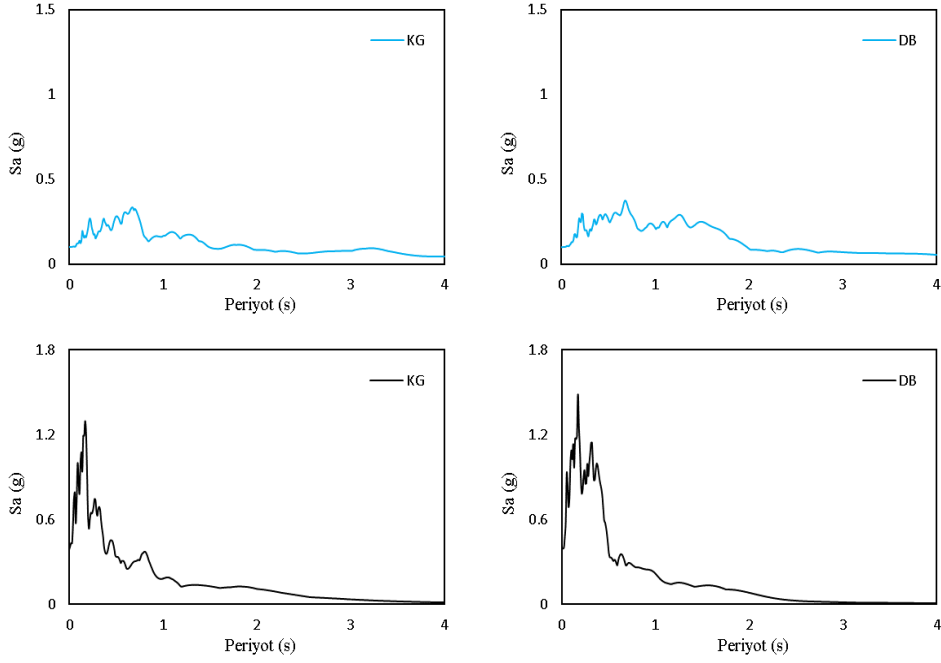
Numune üretimi için 1/4 geometrik ölçeği benimsendiği için, seçilen deprem kaydı, kullanılan yaklaşıma uygun olarak ölçeklendirilmiştir: ivmeler 4 ile çarparak artırılmış ve zaman 4'e bölünerek azaltılmıştır (Şekil 3.18). Ölçeklenmiş deprem kayıtlarında; Kuzey-Güney (X) doğrultusunda maksimum ivme 0.396 g, minimum ivme 0.400 g ve Doğu-Batı (Y) doğrultusunda maksimum ivme 0.308 g, minimum ivme 0.404 g olarak hesaplanmıştır. Ölçekleme yaklaşımına bağlı olarak zaman 140 s'den 35 s'ye azaltılmıştır (Şekil 3.19). Deprem kayıtlarına ait tepki spektrumları, Şekil 3.19'da verilmiştir.



Şekil 3.17 : Bursa/Tofaş istasyonunun minare ve deprem merkez üssüne uzaklığı.



Şekil 3.18 : Bursa/Tofaş istasyonu deprem ivme kaydı (mavi: tam ölçekli , siyah : 1/4 ölçekli).



Şekil 3.19 : Bursa/Tofaş istasyonu deprem ivme kaydı tepki spektrumları (mavi: tam ölçekli , siyah : $\frac{1}{4}$ ölçekli).

Çizelge 3.4 : Bursa/Tofaş istasyonu deprem ivme kaydı parametreleri.

Özellikler	Kuzey-Güney	Doğu-Batı
Maksimum yer ivmesi (PGA) (g)	0.101	0.100
Maksimum yer ivmesinin zamanı(s)	24.860	50.450
Maksimum yer hızı (PGV) (cm/s)	17.236	18.260
Maksimum yer hızının zamanı (s)	24.680	28.235
Maksimum yerdeğiştirme (PGD) (cm)	20.107	10.397
Maksimum yerdeğiştirmenin zamanı(s)	21.010	23.035
Arias Şiddeti (m/sec)	0.350	0.492
Karakteristik Şiddet (I _c)	0.017	0.022
İvme Spektrumu Şiddeti (ASI) (g*sec)	0.081	0.092
Baskın Periyot (T _p) (s)	0.680	0.680
Ortalama Periyot (T _m) (s)	0.957	0.926

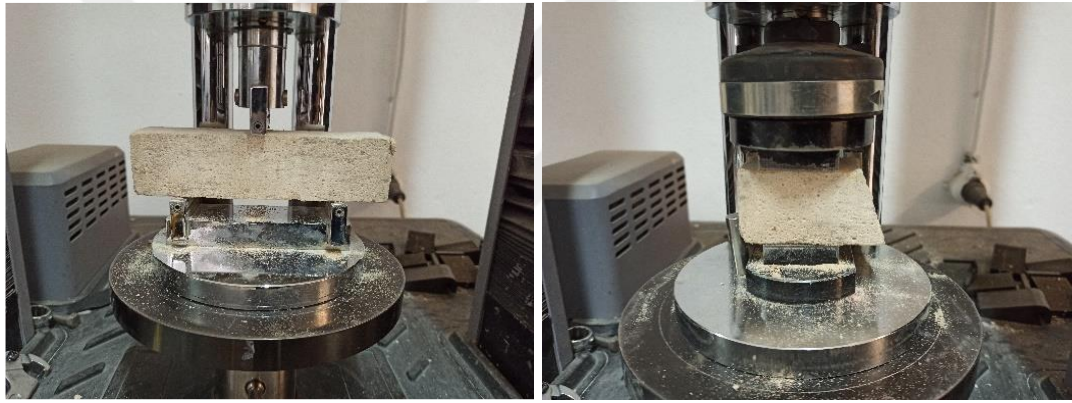
3.5 Minare Numunesinin Üretimi

Minare numunesi, tuğla ve harç malzeme bileşenleri kullanılarak test merkezinin dışında üretilmiştir. Minare boyunca boyut ve geometrisi değişen tuğla birimleri, Çorum ilindeki bir yerel üretici tarafından üretilmiştir (Şekil 3.20). TS EN 771-1+A1 (2015) standardı kullanılarak tuğla basınç dayanımı testi yapılmıştır [33]. 5 adet tuğla üst üste konulup epoksiyle birbirine yapıştırılmış ve 3 adet numune üretilmiştir. Test sonunda ortalama basınç dayanımı 18 MPa olarak hesaplanmıştır. Düşey ve yatay derzler, ağırlıkça 1.55 (hazır harç):1.55 (kum):1.00 (su) karışım oranına sahip harç ile

üretilmiştir. Numune üretimi sırasında harç örnekleri alınmış ve TS EN 1015-11 (2020) 'ye göre üç noktalı eğilme ve basınç testleri, sırasıyla, 10 N/s ve 25 N/s yükleme hızlarında yapılmıştır (Şekil 3.21) [34]. Numunelerin ortalama basınç dayanımı 7.1 MPa ve eğilmede çekme dayanımı ise 0.4 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.20 : Minare üretimi için kullanılan tuğla birimleri.



(a)

(b)

Şekil 3.21 : Harç numuneleri: (a) üç noktalı eğilme testi ve (b) basınç testi.

TS EN 1052-1 (2000) standardı dikkate alınarak tuğla birim ve düşey/yatay derzlerle duvar numuneleri örülmüştür. Bu numuneler, 9 sıra tuğla ve düşey/yatay derz içermektedir. Kompozit yığma malzemesinin basınç dayanımını belirlemek üzere bu numuneler, 5000 kN yükleme kapasitesine sahip Instron cihazı kullanılarak test edilmiştir (Şekil 3.22) [35]. Numunelerin ortalama basınç dayanımı 6.2 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.22 : Minare üretimi için kullanılan tuğla birimleri.

Minare numunesi, tarihi minarelerin inşası konusunda tecrübeli iki usta tarafından üretilmiştir. Minare numunesi 400 mm yüksekliğinde betonarme temel üzerine inşa edilmiştir. Numuneyi sarsma tablasına sabitlemek için temel üzerinde uygun bölgelere boşluk bırakılmıştır. Temel tabanının düz olması için eğimli yüzeyler ızgara sistemi ile teraziye alınmış ve kalıplar üzerine koyulmuştur. Numunenin taşınma işlemi sırasında oluşabilecek sorunların gecikmeye yol açmaması için yeni bir çözüm olarak düşünülen forklift ayakları için köpükler yerleştirilmiştir (Şekil 3.23).



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.23 : (a) Temel kalıplarının hazırlanması (b) Delik yerlerinin belirlenmesi (c) Temellerin teraziye alınması (d) Taşıma için köpük yerleşimi.

Temel donatıları kalıp dışında üretilmiş, tamamlanan donatılar temel kalıbının içerisine pas payları kontrol edilerek yerleştirilmiştir (Şekil 3.24).



Şekil 3.24 : Temel donatıların üretim ve yerleşimi.

Minarenin test merkezine taşınması ve test sırasında temelden ayrılmaması için temelin içine 15 cm kadar gömülü olacak şekilde inşa edilmiştir. Minare tablaya ankraj çubukları ile sabitleneceğinden, temelde ankraj delikleri için PVC plastik borular yerleştirilmiştir (Şekil 3.25). Taşıma sistemi için temel üst kotu üzerinde konumlandırılan dört adet kanca yapılmıştır (Şekil 3.26).



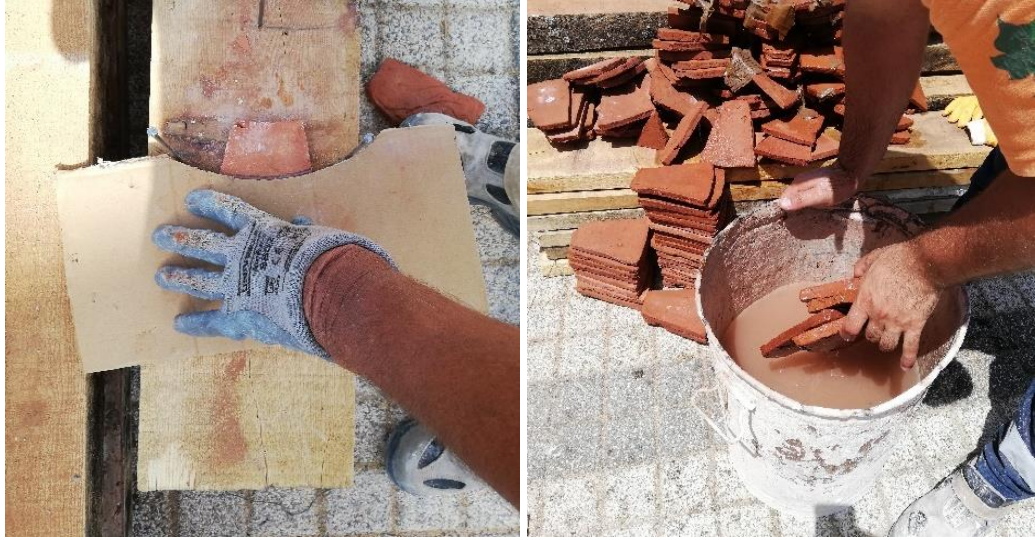
Şekil 3.25 : Temel terazi kontrolü.

Temel betonu prizini tamamladıktan sonra temeldeki yuvadan köpükler sökülüş ve minare üretimine başlanmıştır (Şekil 3.26).



Şekil 3.26 : Minare üretimi için temelde bırakılan yuva.

Düşey ve yatay derzleri oluşturmak için kullanılacak harcın bileşenleri el mikseri yardımıyla karıştırılmıştır. Tuğla bileşenlerinin su emmesini engellemek için tuğlalar bir süre suda bekletildikten sonra minare üretiminde kullanılmıştır (Şekil 3.27). Minare üretimi boyunca harç örnekleri alınmıştır.



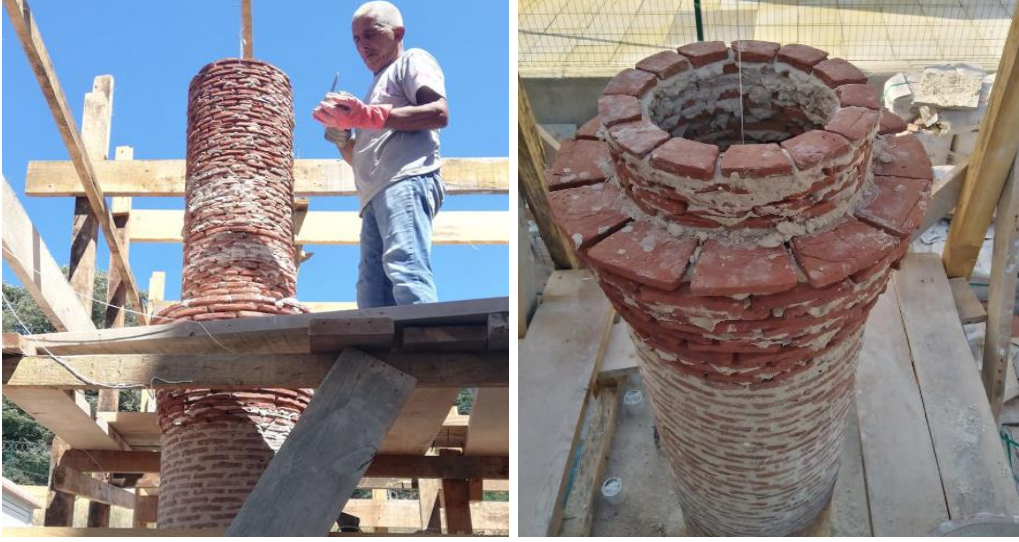
Şekil 3.27 : Tuğla malzemelerin düzenlenmesi.

Minare üretimi, küp bölümü inşası ile başlamıştır. Küp üretiminin tamamlanmasından sonra gövde üretimine başlanmıştır. Minare numunesinin düzgün ve dengeli bir şekilde üretilmesi için minare merkezinden ve dışından minare yüksekliği boyunca ipler çekilmiş ve yatay/düşey doğrultuda terazi ile sık sık kontroller yapılmıştır. Üretim kolaylığı için numunenin dışına iskele sistemi kurulmuştur (Şekil 3.28).



Şekil 3.28 : Minare gövde bölümünün üretimi.

Minarenin gövde bölümünden sonra, sırasıyla şerefe ve petek bölümlerinin üretimi yapılarak minarenin inşası tamamlanmıştır (Şekil 3.29). Ölçüm cihazlarının minareye konumlandırılması için belirlenen konumlarda minare üzerinde delikler açılmış ve tijler epoksi ile bu deliklere yerleştirilmiştir (Şekil 3.30).



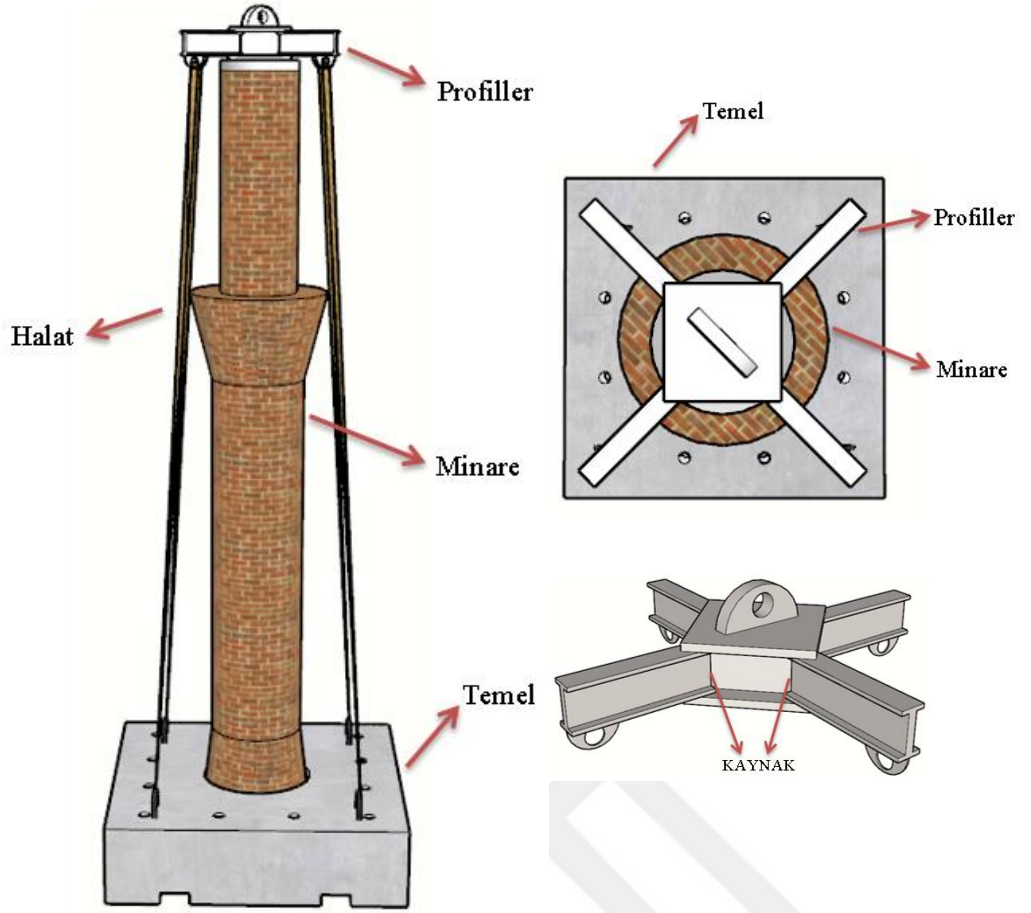
Şekil 3.29 : Minare petek bölümünün üretimi.



Şekil 3.30 : Ölçüm cihazlarının sabitlenmesi için tij yerleşimi.

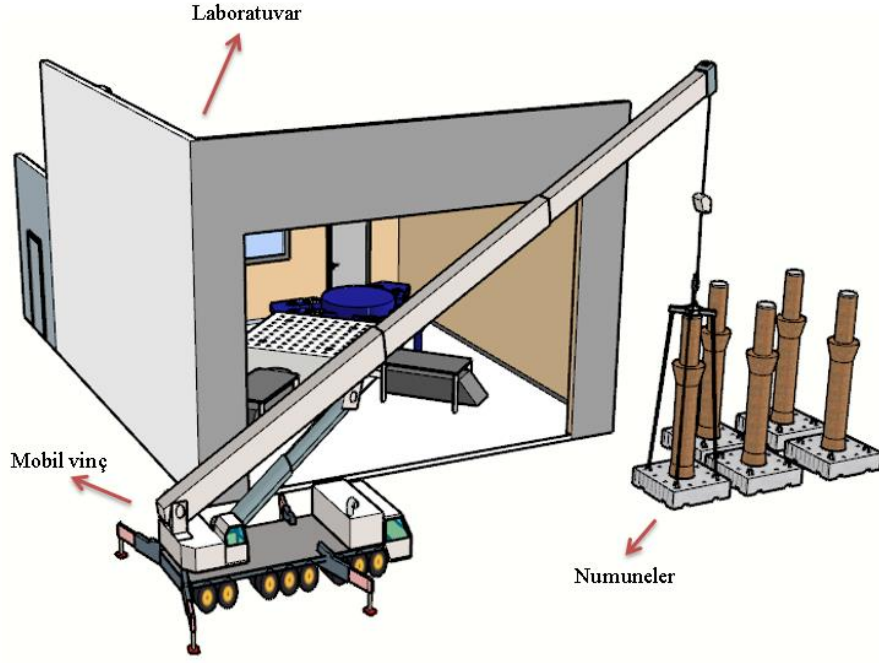
3.6 Minare Numunesinin Laboratuvara Taşınması

Model minareyi, üretim sahasından test merkezine taşımak için bir taşıma sistemi tasarlanmıştır (Şekil 3.31). Amaç, taşıma işlemi sırasında numunenin hasar almasını engellemek ve numuneyi kolayca test merkezine taşımak. Taşıma sistemi iki farklı sistemden oluşmaktadır. İlk aşamada çelik halatlar minare temelindeki 4 adet kutu profile ve minare üzerinde bulunan çapraz çelik profile bağlanmaktadır. Minare temelinde karşılıklı iki yöne M16 delikler açılmış ve M14 tijler ile birlikte epoksi kullanılarak kutu profiller temele ankrajlanmıştır.

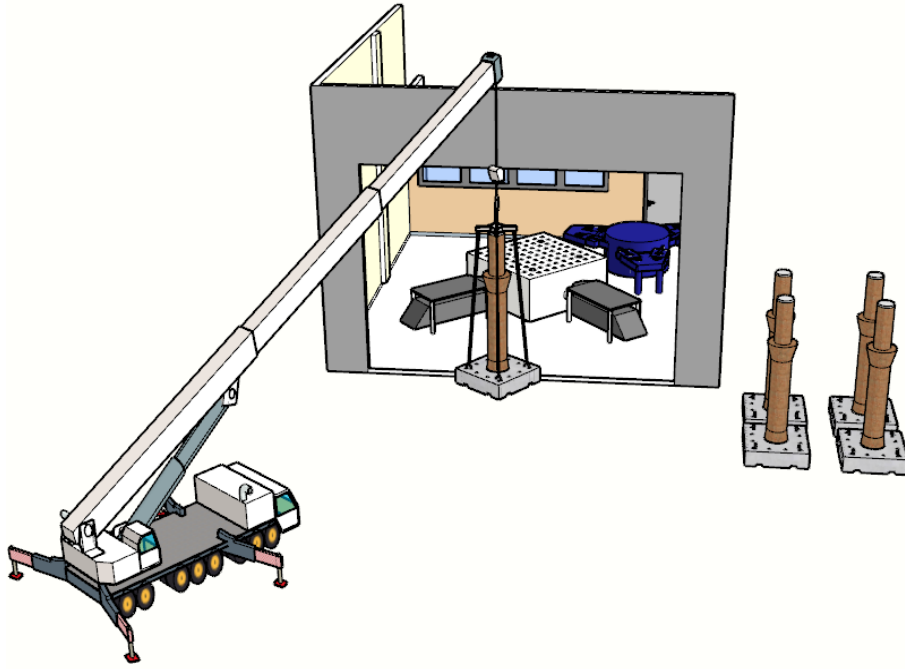


Şekil 3.31 : Taşıma sistemi detayları.

Sonraki aşamada, temel köşelerinde bırakılan kancalar ve çelik çapraz profil arasına spanzetler geçirilmiştir (Şekil 3.32). İşlemler tamamlandıktan sonra minare numunesi test merkezinin girişine vinç yardımı ile hassas bir şekilde taşınmıştır. Daha sonra, test merkezi tavanına sabitli mobil vinç yardımı ile sarsma tablasının üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 3.32 ve Şekil 3.33).

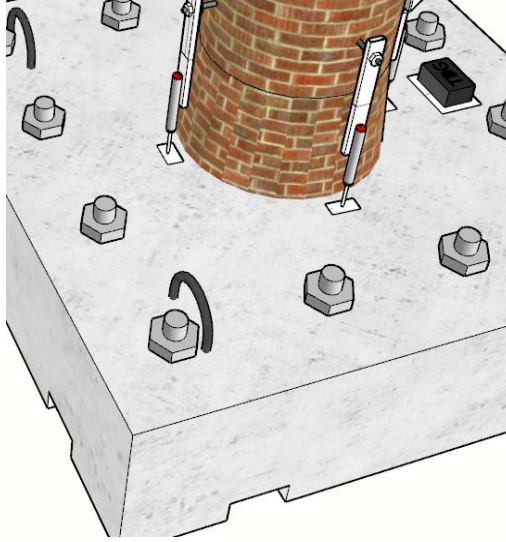


Şekil 3.32 : Minarenin laboratuvara alınması.



Şekil 3.33 : Minarenin sarsma tablasına yerleştirilmesi.

Numunenin sarsma tablasına sabitlenmesi, 12 adet M24 ankraj çubuğu aracılığıyla yapılmıştır (Şekil 3.34). Sabitleme işlemi için tork anahtarı kullanılmıştır. Bu işlemden sonra, ölçüm sistemi minare üzerine yerleştirilmiştir.



Şekil 3.34 : Betonarme temelin sarsma tablasına ankrajı.

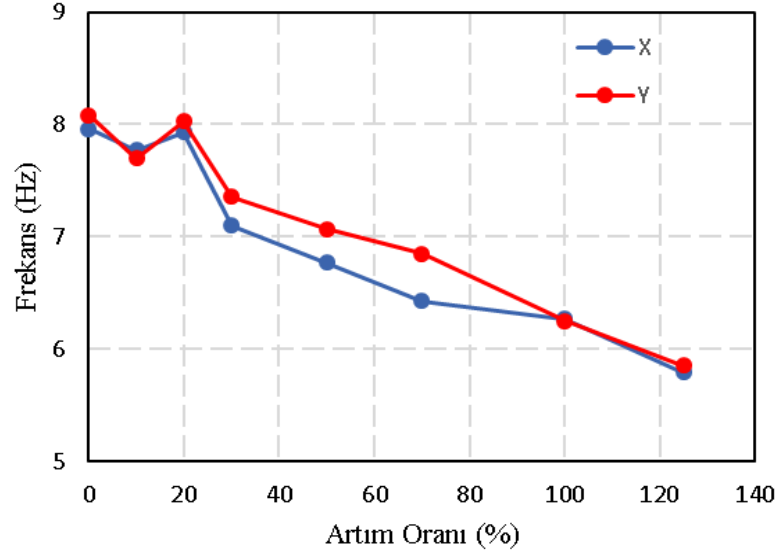
3.7 Sarsma Tablası Testleri

Bu çalışma kapsamında minaredeki hasar gelişimini gözlemlemek, ölçüm sistemi ve sarsma tablasını olası durumlara karşı korumak için seçilen deprem ivme kaydı artımsal olarak yapıya etkilmiştir. Her yükleme adımından önce hasar gelişimi ve dolayısıyla giderek azalan rijitlik etkisinin frekans, mod şekilleri ve sönüm gibi dinamik karakteristiklerdeki etkisini görmek için çevresel titreşim ve white noise (beyaz gürültü) testleri yapılmıştır. Laboratuvar ortamı çevreden izole; rüzgar, sıcaklık, insan ve araç trafiğinden uzak bir konumda olduğu için çevresel titreşim testlerinden sağlıklı veri elde etmeme olasılığına karşı beyaz gürültü testleri de yapılmıştır. Numuneye hasar vermeyecek şekilde, beyaz gürültü (maksimum 0.02g ivme) numuneye etkilmiştir. Çevresel titreşim ve white noise testleri sonrası ölçeklendirilmiş deprem ivme kaydı minare numunesine artımsal olarak uygulanmıştır. Yani her bir yükleme adımı; çevresel titreşim, white noise ve ivme kaydı olmak üzere üç testi içermektedir (Çizelge 3.5).

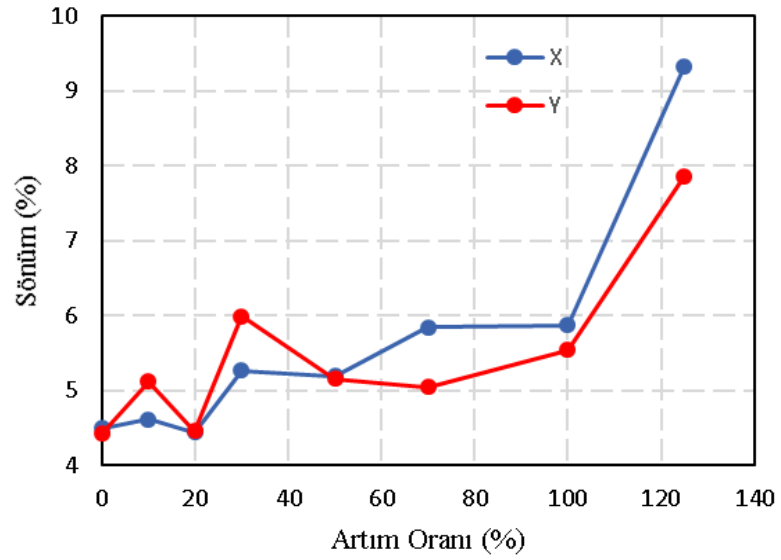
Çizelge 3.5 : Test ve yükleme adımları.

Test Adımları	Artım Oranı (%)	Maksimum ivme- PGA (g) - X	Maksimum ivme- PGA (g) - Y
1. Çevresel titreşim	-	-	-
1. White Noise	-	-	-
1. Yükleme	10	0.04	0.04
2. Çevresel titreşim	-	-	-
2. White Noise	-	-	-
2. Yükleme	20	0.08	0.08
3. Çevresel titreşim	-	-	-
3. White Noise	-	-	-
3. Yükleme	30	0.12	0.12
4. Çevresel titreşim	-	-	-
4. White Noise	-	-	-
4. Yükleme	50	0.20	0.20
5. Çevresel titreşim	-	-	-
5. White Noise	-	-	-
5. Yükleme	70	0.28	0.28
6. Çevresel titreşim	-	-	-
6. White Noise	-	-	-
6. Yükleme	100	0.40	0.40
7. Çevresel titreşim	-	-	-
7. White Noise	-	-	-
7. Yükleme	125	0.50	0.51
8. Çevresel titreşim	-	-	-
8. White Noise	-	-	-
8. Yükleme	112.5	0.45	0.45

Tez çalışmasında, çevresel titreşim testinde sağlıklı veri elde edilemediği için white noise testi sonuçları sunulmuştur. White noise testi sonrası elde edilen verilerin artım oranlarına bağlı olacak şekilde frekansın ivme artım oranıyla değişimi Şekil 3.35'te verilmiştir. İlk moda karşılık gelen frekans X yönünde 7.96 Hz ve Y yönünde 8.08 Hz ölçülmüş ve ileriki adımlarda yapıda oluşan hasarla birlikte azalan rijitliğe bağlı olarak frekansta düşüş yaşanmıştır (Şekil 3.36). Model minarenin sönüm oranı X doğrultusunda %4.5 ve Y doğrultusunda %4.4 olarak hesaplanmıştır. sönüm oranı hasar gelişimine paralel olarak artmış ve testin son adımında, sırasıyla, %9.3 ve %7.9 değerlerini almıştır (Şekil 3.37). Çizelge 3.6'da yapıda oluşan maksimum mutlak tepe ivmesi ve maksimum mutlak tepe yerdeğiştirme değerleri sunulmuştur. Maksimum tepe yerdeğiştirme ve ivme değerlerinde artış olduğu görülmektedir.



Şekil 3.35 : Frekansın ivme artım oranı ile değişimi.

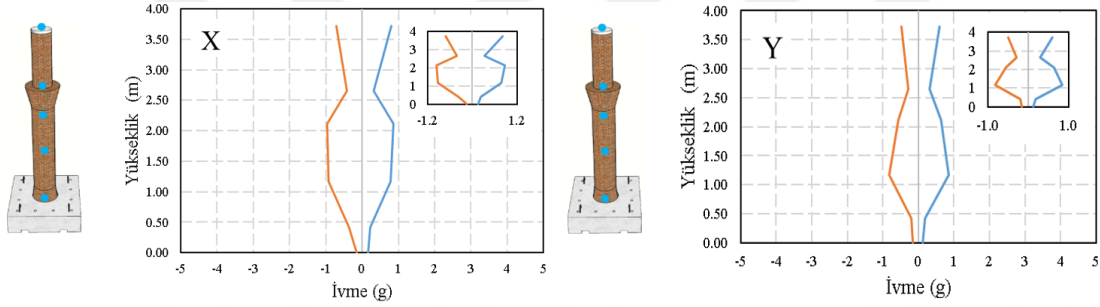


Şekil 3.36 : Sönümün ivme artım oranı ile değişimi.

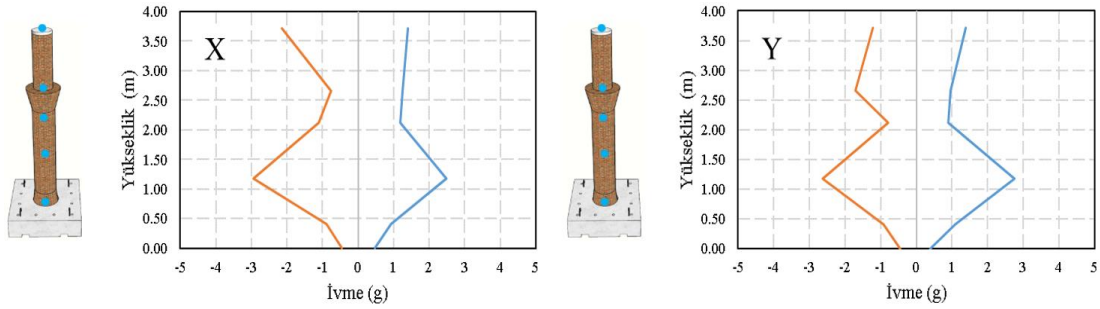
Çizelge 3.6 : Yapıda oluşan maksimum tepe ivmesi ve yerdeğiştirmesi.

Artım Oranı (%)	Maksimum ivme-PGA (g)	Maksimum Tepe İvmesi (g) X	Maksimum Tepe İvmesi (g) Y	Maksimum Tepe Yerdeğiştirmesi (mm) X	Maksimum Tepe Yerdeğiştirmesi (mm) Y
10	0.04	0.42	0.44	3.40	2.25
20	0.08	0.66	0.46	3.85	5.30
30	0.12	0.81	0.60	11.03	14.94
50	0.20	0.95	0.72	15.67	24.65
70	0.28	1.84	1.29	28.00	41.08
100	0.40	2.15	1.34	110.04	83.24
125	0.50	1.57	1.61	115.50	141.10
112.5	0.45	2.42	1.92	132.29	89.84

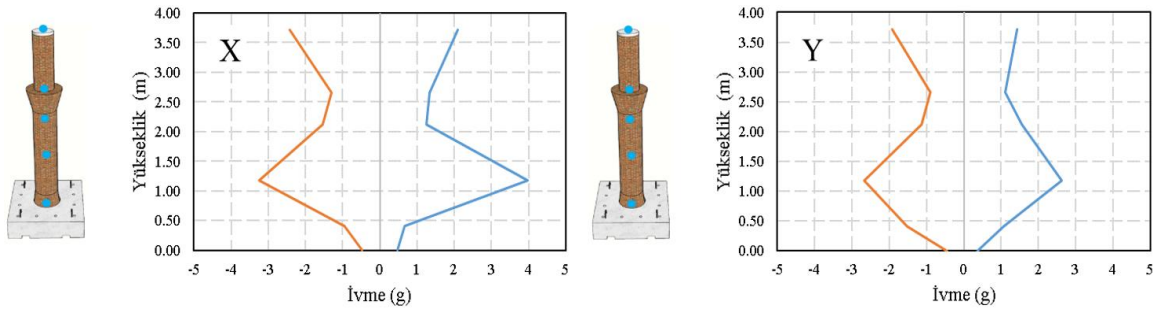
İvme ve öteleme oranının yükseklik boyunca değişimleri %30, %100, %112.5 artım oranları için Şekil 3.37-3.39 ve Şekil 3.40-3.42’te verilmiştir.



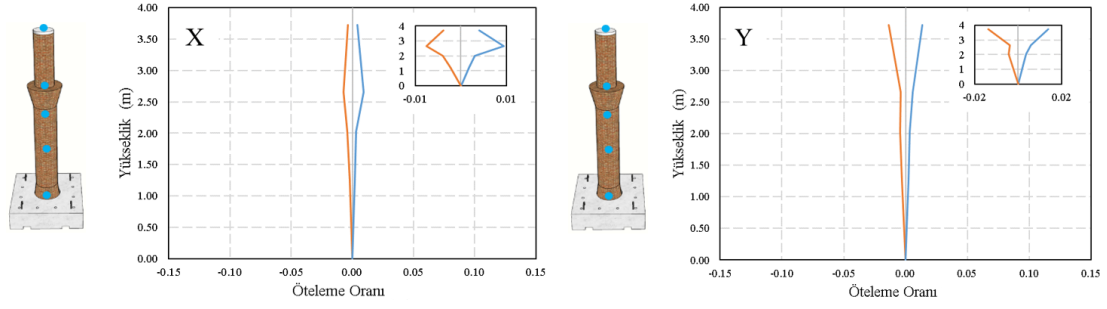
Şekil 3.37 : İvme-yükseklik değişimi (%30).



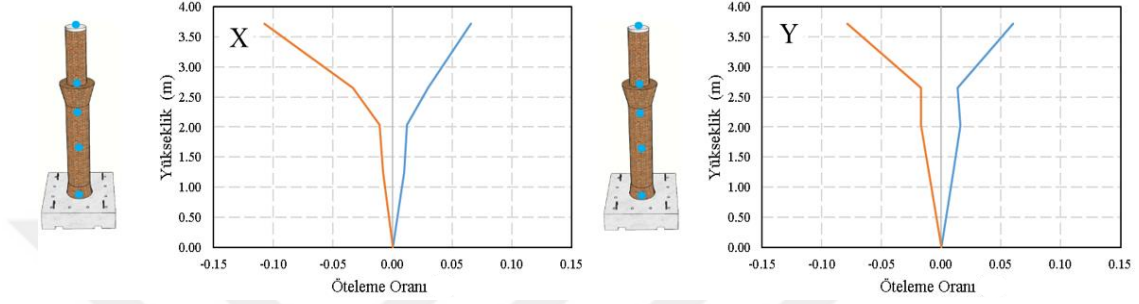
Şekil 3.38 : İvme-yükseklik değişimi (%100).



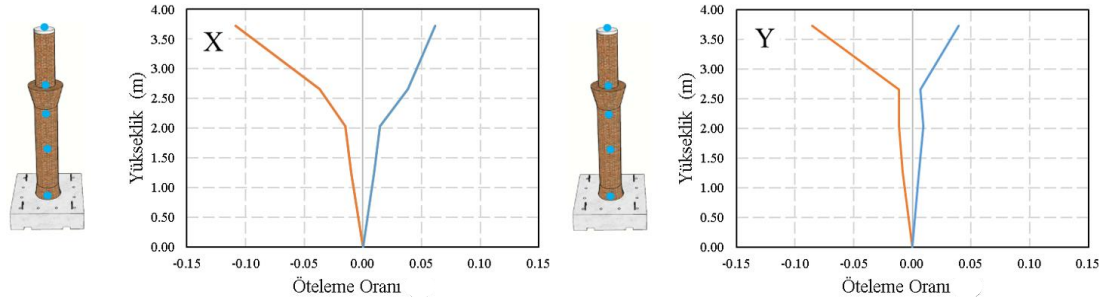
Şekil 3.39 : İvme-yükseklik değişimi (%112.5).



Şekil 3.40 : Öteleme oranı-yükseklik değişimi (%30).

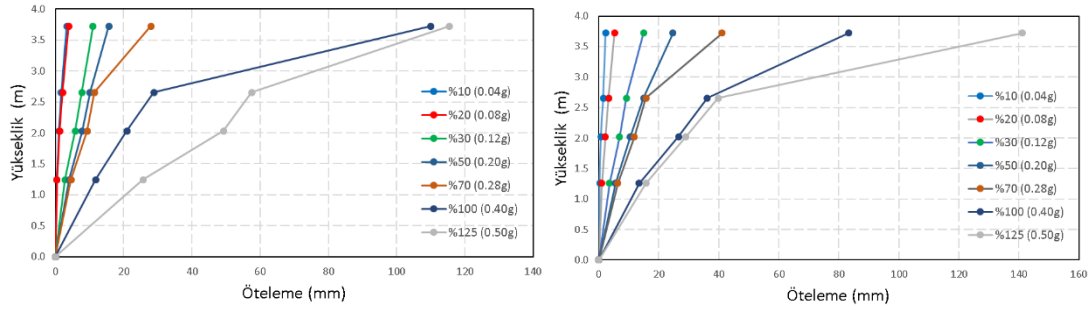


Şekil 3.41 : Öteleme oranı-yükseklik değişimi (%100).



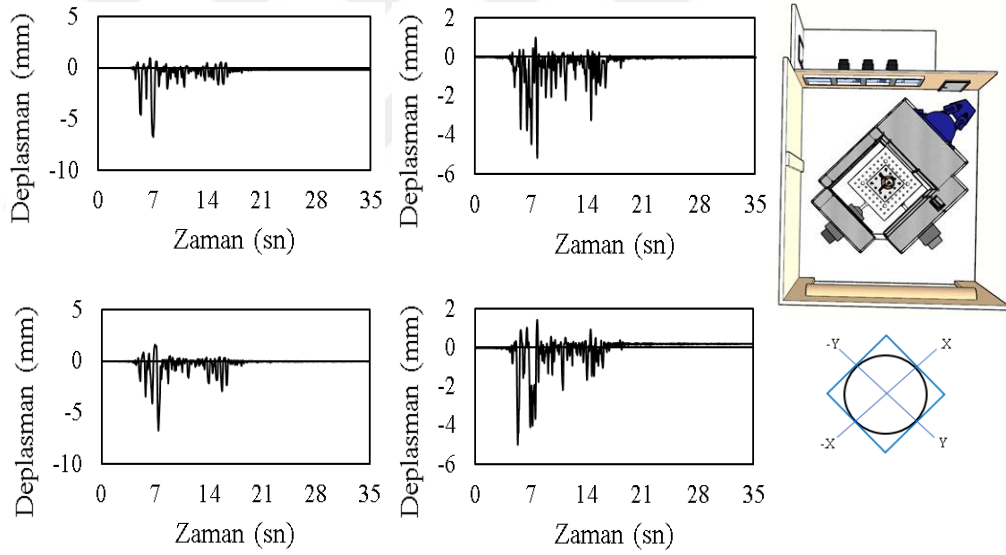
Şekil 3.42 : Öteleme oranı-yükseklik değişimi (%112.5).

Minarenin gövde ortası ve gövde üstünde yer alan yatay potansiyometrik cetveller ile şerefe ve petek üstünde bulunan yatay ipli potansiyometrik cetvel ölçümleri kullanılarak minarenin öteleme oranları hesaplanmıştır. Kritik kesitlerdeki yer değiştirmelerin zamanla değişimi incelenerek öteleme oranları hesaplanmıştır. Öteleme oranının maksimum değerleri; %30 artım oranı için X doğrultusunda 0.008 iken Y yönünde için 0.014'dür. %100 artım oranı için sırasıyla 0.107 ve 0.079, %112.5 artım oranı için sırasıyla 0.109 ve 0.085 olarak elde edilmiştir. Tepe ivmesi maksimum değerleri ise %30 artım oranı için X doğrultusunda 0.81g iken Y doğrultusunda 0.60g, %100 ve %112.5 artım oranları için sırasıyla 2.15g -1.35g ve 2.42g-1.92g olarak elde edilmiştir.

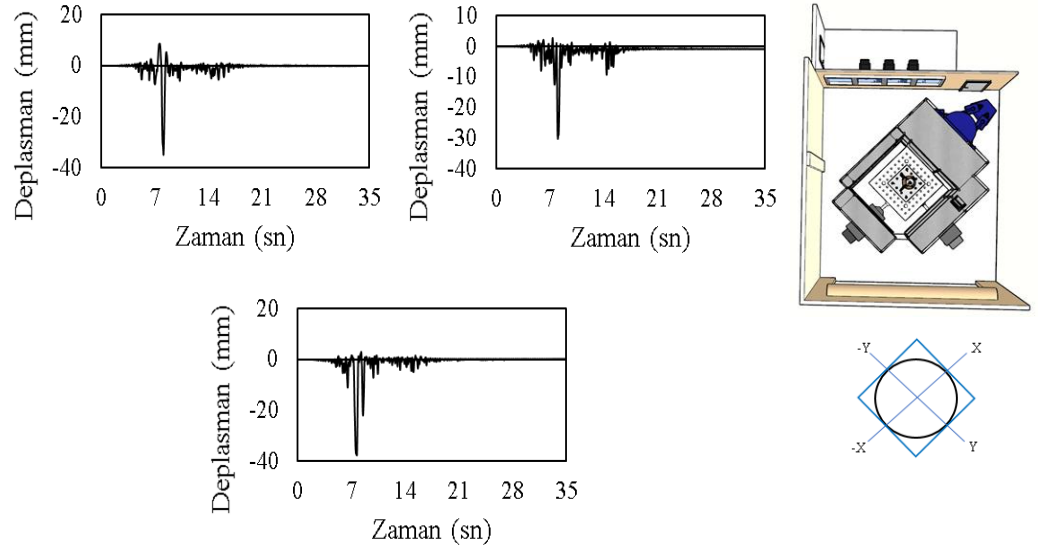


Şekil 3.43 : Yatay yerdeğişiminin yükseklik boyunca değişimi.

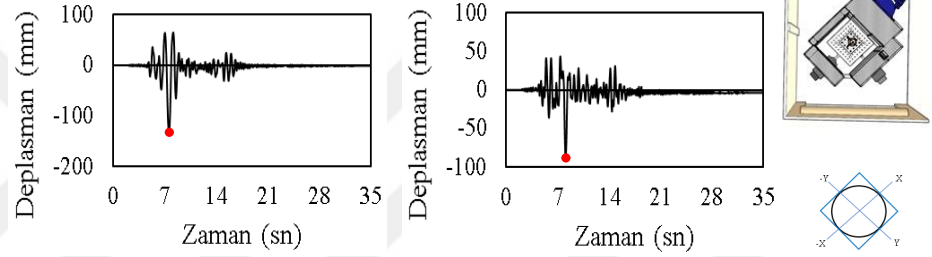
Model numunenin artım oranlarına karşı gelen yatay yer değiştirmelerin mutlak değerlerinin maksimumları, Şekil 43'te X ve Y doğrultuları için sunulmuştur. Petek üst seviyesinde meydana gelen maksimum yerdeğiştirme %125 artım oranında X doğrultusunda 115.50 mm ve Y doğrultusunda 141.15 mm olarak elde edilmiştir. Tüm artım adımları için öteleme oranı ve ivmenin yüksekliğe bağlı değişimleri Ek 1'de verilmiştir.



Şekil 3.44 : Küp-gövde geçiş bölgesi düşey deplasman-zaman grafiği (-X, Y, X, -Y) (%112.5).

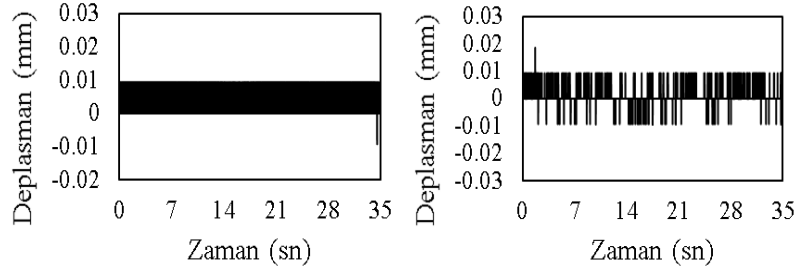


Şekil 3.45 : Şerefe-petek geçiş bölgesi düşey deplasman-zaman grafiği (-X, Y, X) (%112.5).



Şekil 3.46 : Petek bölgesi yatay deplasman-zaman grafiği (X, Y) (%112.5).

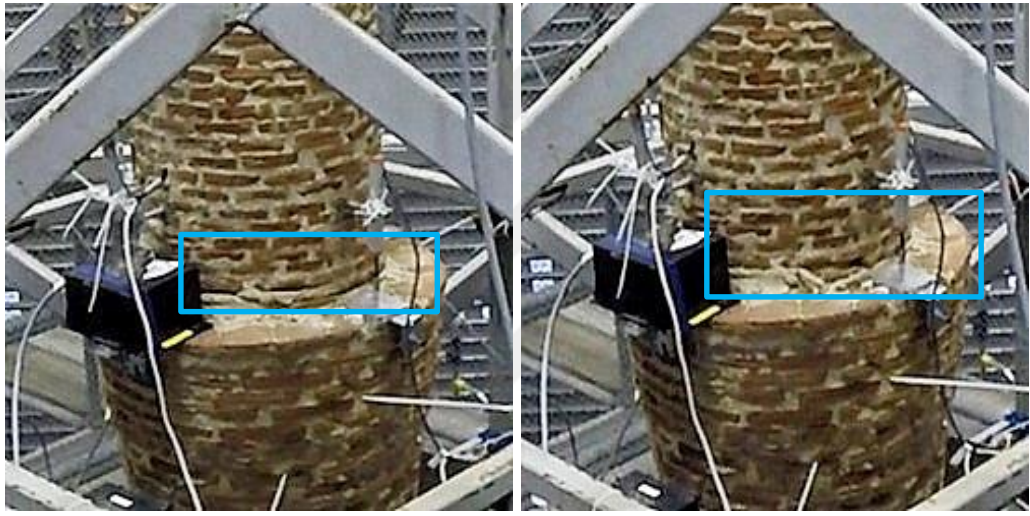
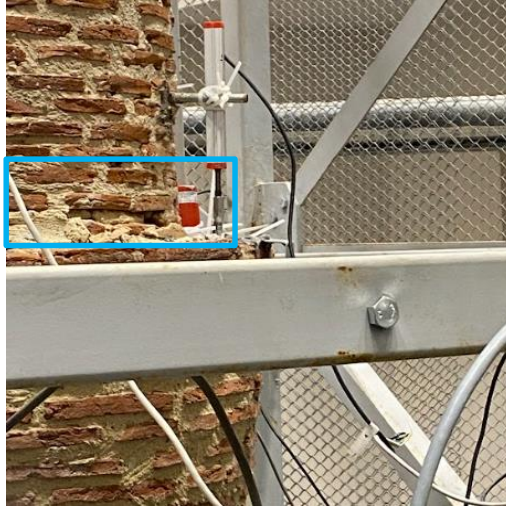
Minarenin %112.5 artım oranında, küp-gövde geçiş ve şerefe-petek bölgesindeki kalıcı düşey doğrultudaki yerdeğiştirme ve açılmanın ve petek bölgesindeki yatay deplasmanın zamana bağlı değişimi, Şekil 3.44, Şekil 3.45 ve Şekil 3.46'da verilmiştir. Küp-gövde geçiş bölgesinde -X, Y, X ve -Y doğrultularında kalıcı yerdeğiştirmeler, sırasıyla, 0.21 mm, 0.16 mm, 0.02 mm ve 0.003 mm, şerefe-petek geçiş bölgesinde -X, Y, X doğrultularında, sırasıyla, 0.03 mm, 0.84 mm ve 0.18 mm olarak belirlenmiştir. Petek bölgesi için X ve Y doğrultularında maksimum yerdeğiştirme, sırasıyla, 132.29 mm ve 89.84 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.47 : Temel kayma kontrolü için yatay deplasman-zaman grafikleri (-X, Y) (%112.5).

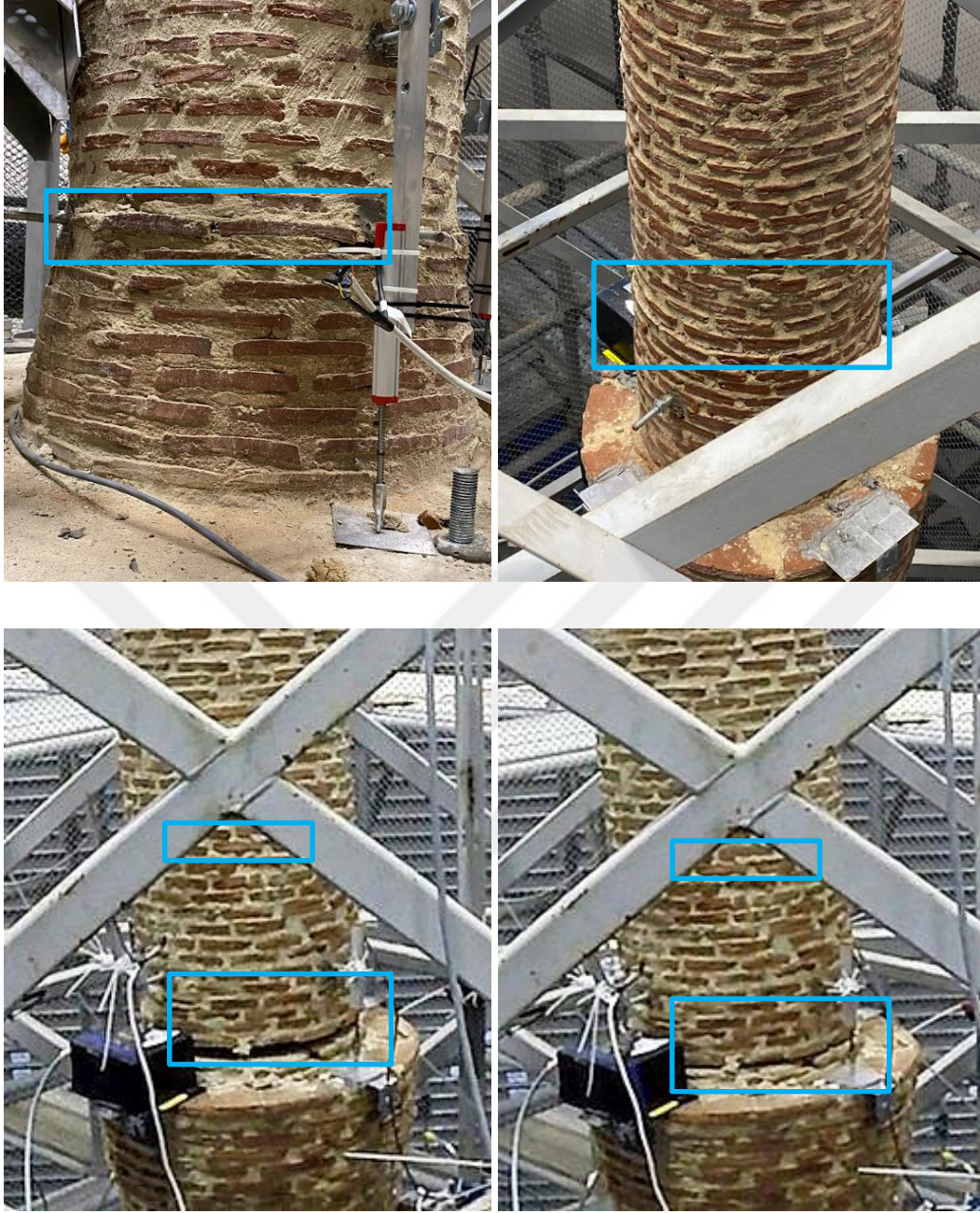
Minare temeline yerleştirilen yatay potansiyometrik cetveller ile test sırasında X ve Y doğrultularında deplasmanlar ölçülmüştür. Temelin -X ve Y doğrultularında ölçülen maksimum deplasman 0.02 mm civarında olup ihmal edilebilecek düzeydedir (Şekil 3.47).

Numunede %10 (PGA=0.04g) ve %20 (PGA=0.08g) artım oranlarında gözle görülür herhangi bir hasar oluşmamıştır. İlk çatlak %30 (PGA=0.12g) artım adımında küp-gövde geçiş bölgesinde ve şerefe-petek geçiş bölgesinde başlamıştır. Küpten gövdeye ve şerefeden peteğe geçişte hem geometrik formun değişmekte hem cidar kalınlığı azalmaktadır. Bu nedenle, bu iki kesitte hasar meydana geldiği düşünülmektedir. Ayrıca, normal kuvvet düzeyinin petekte göreceli olarak az olması da diğer bir hasar nedeni olabilir. %50 (PGA=0.20g) artım adımında maksimum açılmalar birer milimetre daha artarak küp-gövde geçiş bölgesinde 3 mm ve şerefe-petek geçiş bölgesinde 2 mm değerlerine ulaşmıştır. Yapıya artımsal uygulanan deprem ivme kaydıyla açılmalar tüm kesit boyunca artarak ilerlemiştir. %70 (PGA=0.28g) artım adımında küp-gövde geçiş 3 mm ve şerefe-petek geçiş bölgesinde 10 mm maksimum açılma meydana gelmiş ve şerefe-petek geçiş bölgesindeki derzlerden harç parçacıklarının düştüğü görülmüştür (Şekil 3.48).



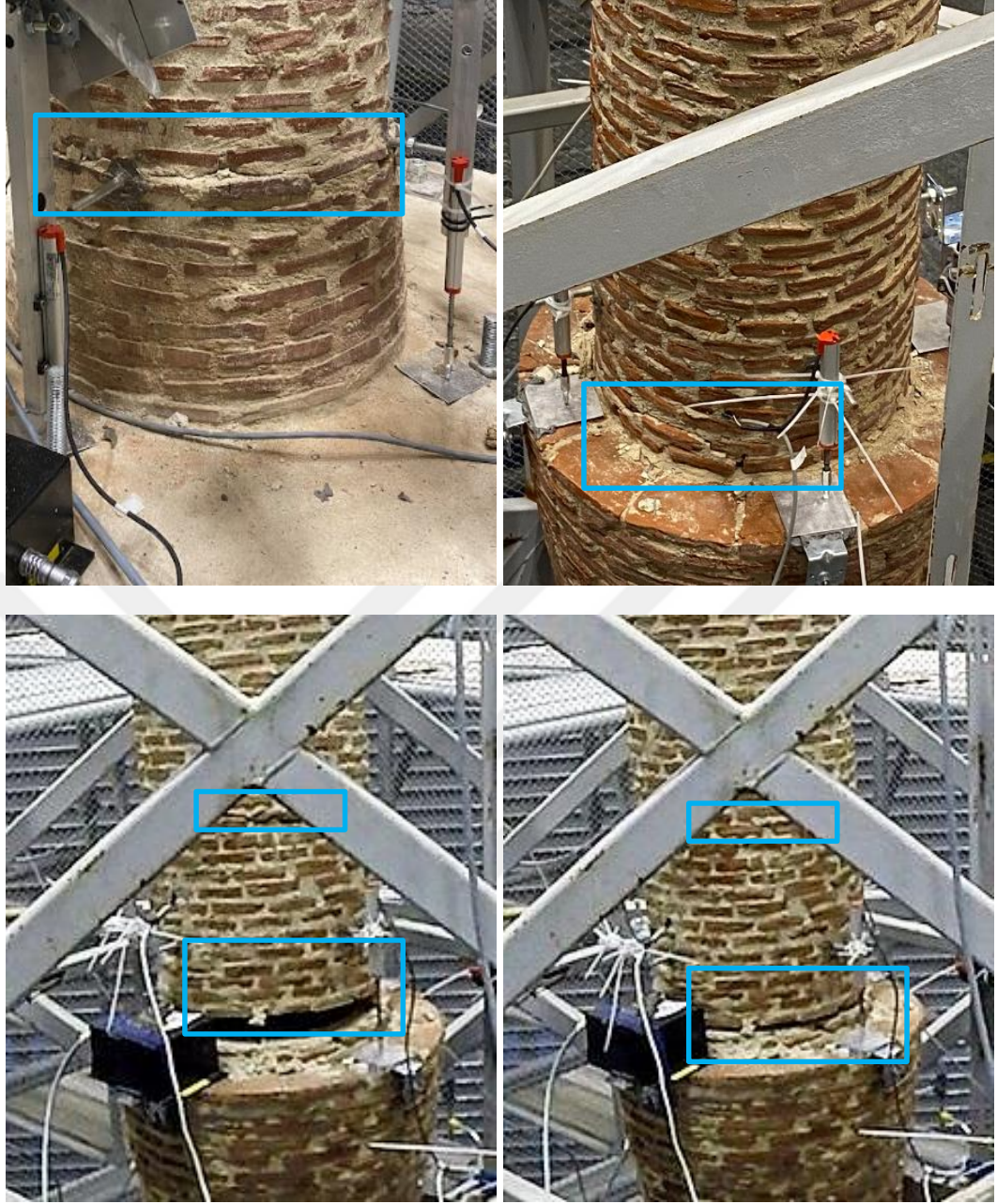
Şekil 3.48 : Şerefe-petek hasarları (%70).

%100 (PGA=0.40g) artım adımıında açılmalar oldukça artmış şerefe-petek bölgesinin petek alt kısmındaki maksimum açılma 45 mm'yi bulmuş ve petek ortasında ikinci bir ayrılma gerçekleşmiştir. Küp-gövde bölgesindeki açılma 8 mm olarak ölçülmüştür, (Şekil 3.49).



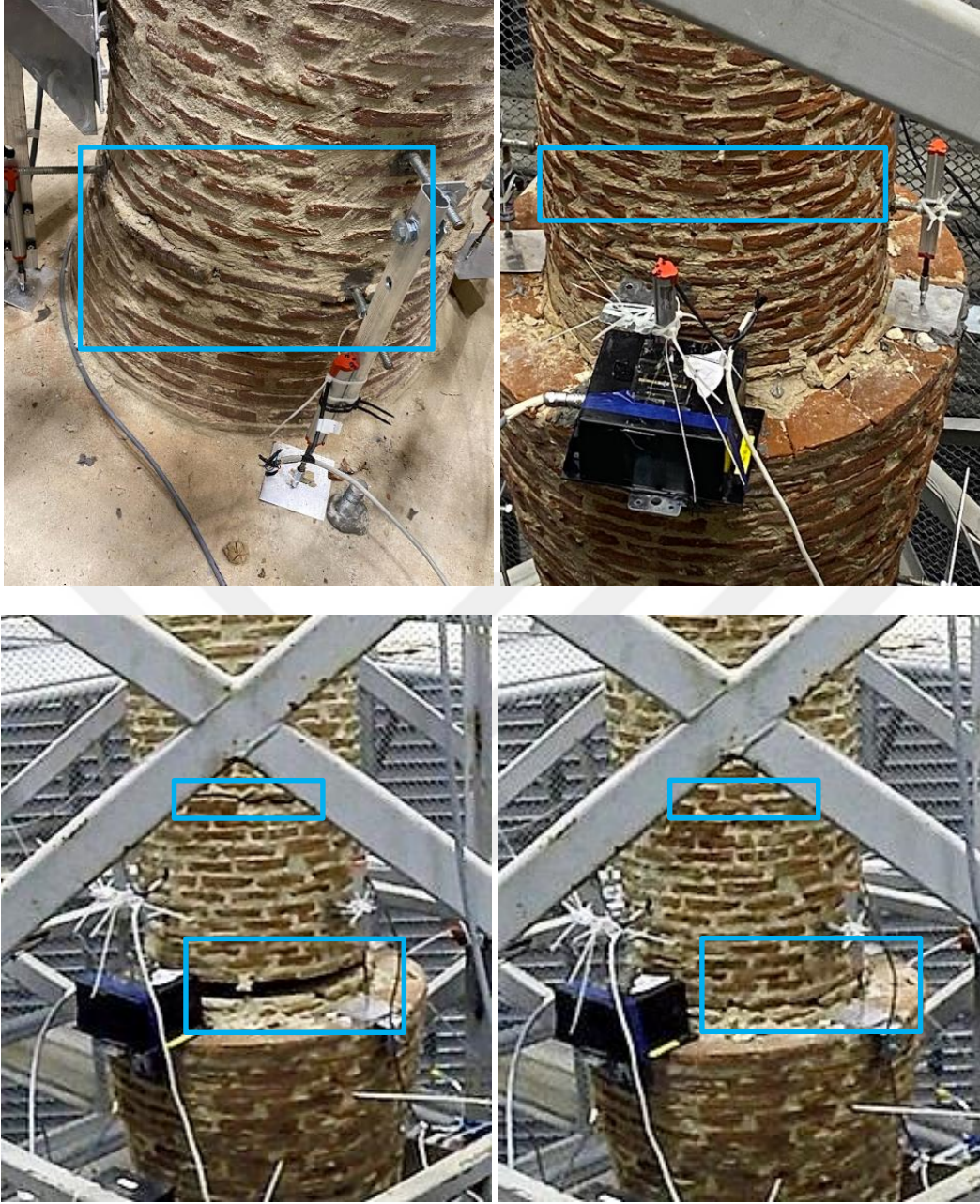
Şekil 3.49 : Şerefe-petek ve küp-gövde hasarları (%100).

%125 (PGA=0.50g) artım adımında petek ortasındaki açılma miktarı artmış: şerefe-petek ve küp-gövde geçiş bölgelerinde, maksimum açılma, sırasıyla, 50 mm ve 15 mm olarak tespit edilmiştir (Şekil 3.50).



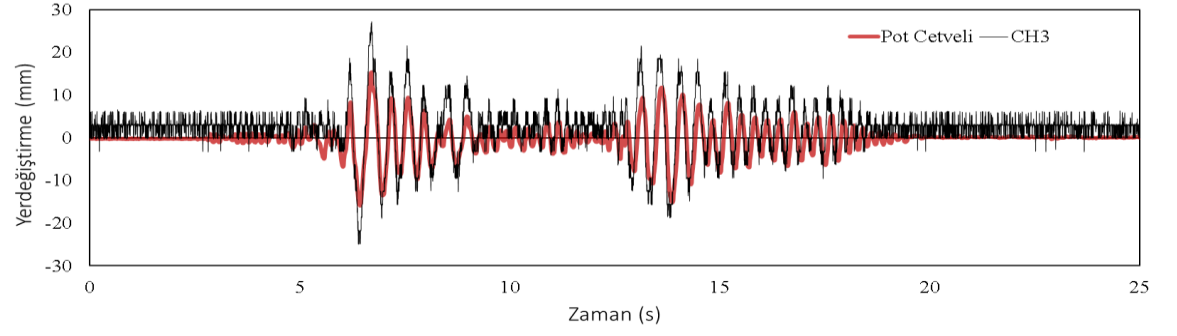
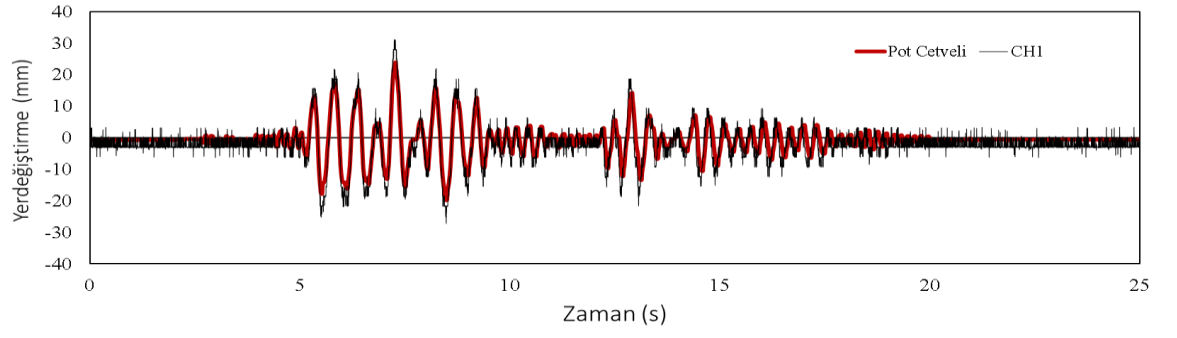
Şekil 3.50 : Şerefe-petek ve küp-gövde hasarları (%125).

Ölçüm sistemine ve test merkezi cihazlarına zarar vermemek için %112.5 (PGA=0.45g) artım adımı model minareye uygulandıktan sonra test sonlandırılmıştır. Test sonrası test verisinin incelenmesi ve gözle yapılan inceleme petek orta yüksekliği civarında çatlak, şerefe-petek geçiş bölgesinde (38 mm) ve küp-gövde bölgesinde (10 mm) açılma olduğunu göstermektedir (Şekil 3.51).

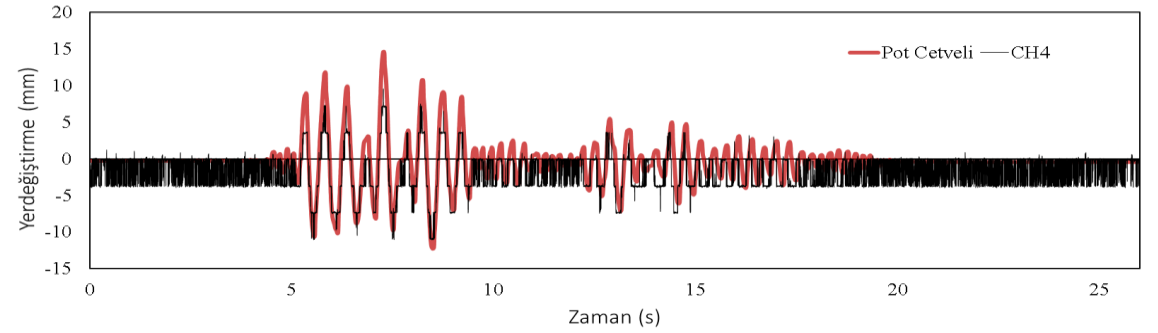
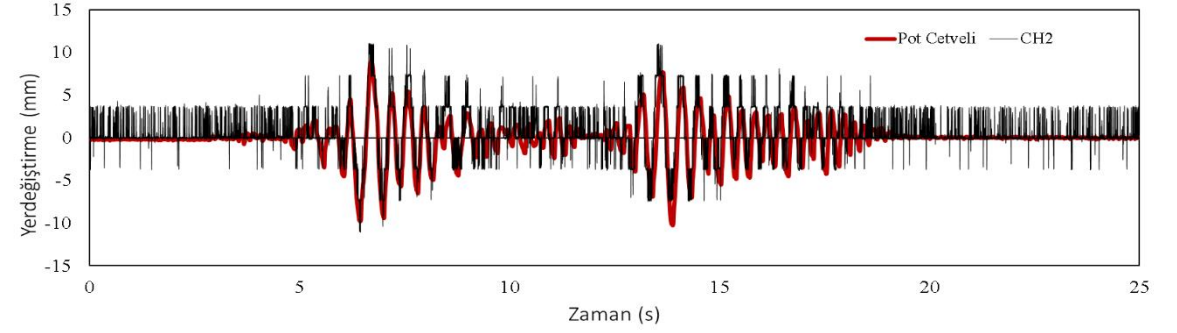


Şekil 3.51 : Şerefe-petek ve küp-gövde hasarları (%112.5).

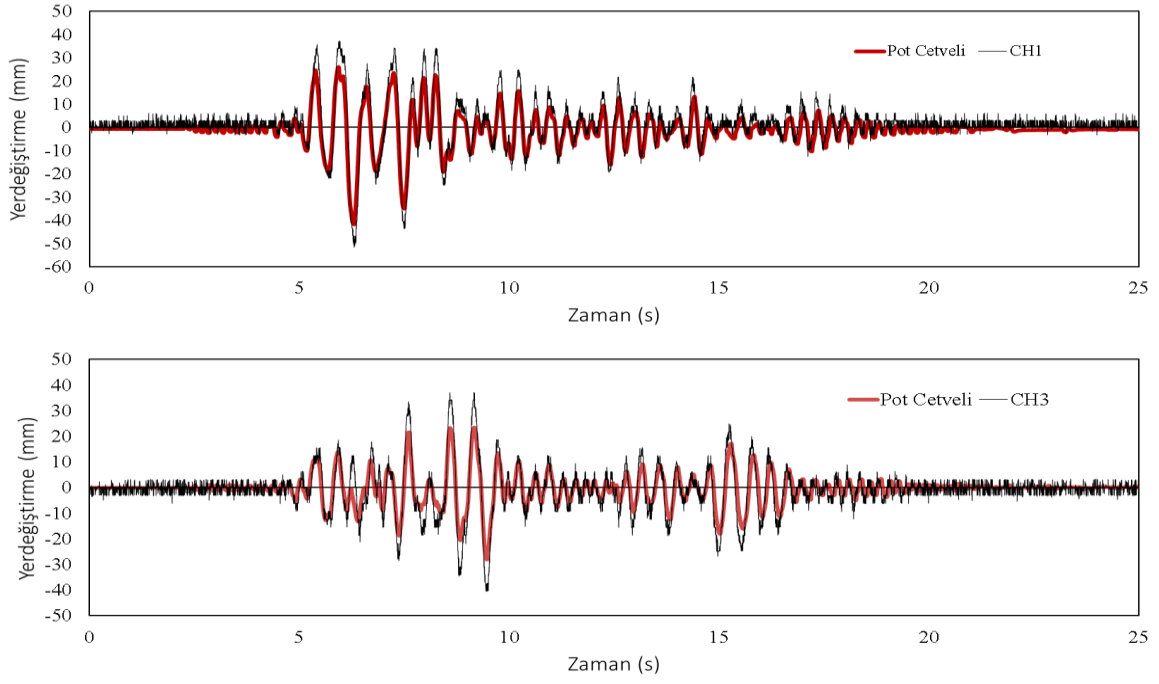
Fazla öteleme yapması beklenen şerefe ve petek kısmına yerleştirilen lazermetrelerin yanısıra potansiyometrik cetveller ile mümkün mertebe veri kaybının önüne geçilmiştir. Lazermetre ve potansiyometrik cetvellerden elde edilen yanal öteleme verisinin uyumlu olduğunu, %50 ve %70 artım oranları için Şekil 3.52-3.55 göstermektedir. %30 ve %100 artım adımları için yerdeğiştire-zaman değişimleri Ek 2’de sunulmuştur.



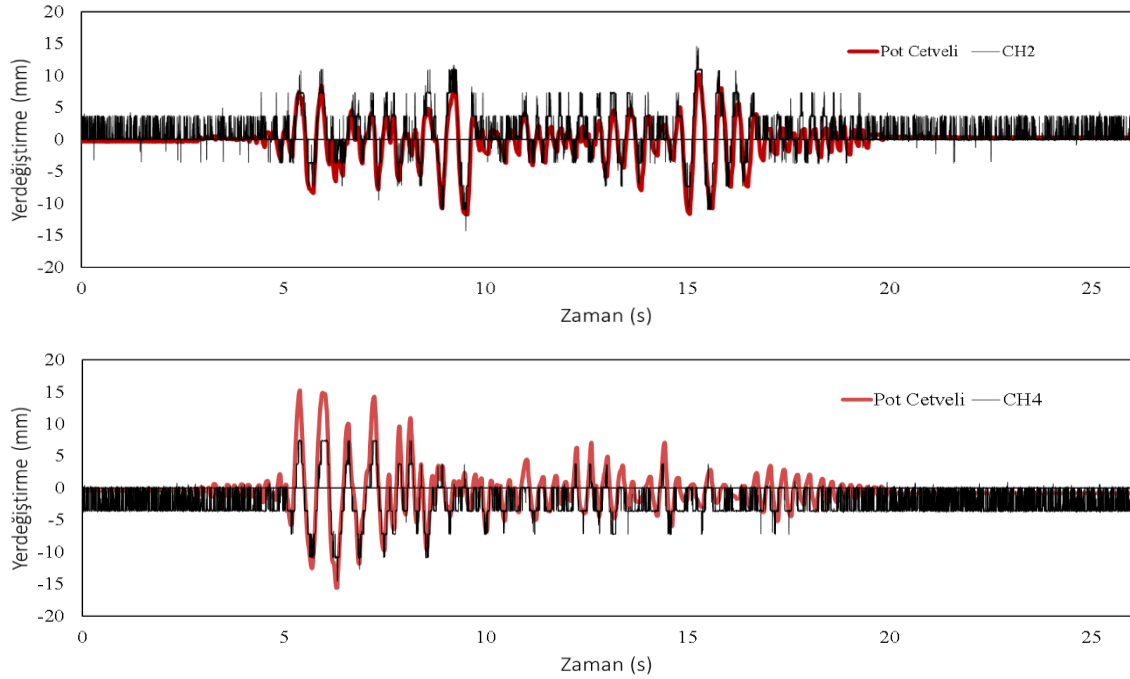
Şekil 3.52 : Lazermetre ve potansiyometrik cetvel petek bölgesinde yerdeğiştirme-zaman değişimi (%50) (X-Y).



Şekil 3.53 : Lazermetre ve potansiyometrik cetvel şerefe bölgesinde yerdeğiştirme-zaman değişimi (%50) (X-Y).



Şekil 3.54 : Lazermetre ve potansiyometrik cetvel petek bölgesinde yerdeğiştirme-zaman değişimi (%70) (X-Y).



Şekil 3.55 : Lazermetre ve potansiyometrik cetvel şerefe bölgesinde yerdeğiştirme-zaman değişimi (%70) (X-Y).

Yanal yerdeğiştirmenin yüksekliğe oranı olarak hesaplanan öteleme oranı, prototip ve model minare için aynı değeri alır çünkü prototipe karşı gelen oran için test sırasında ölçülen yerdeğiştirme ve yüksekliğin aynı oranda (4 kat) büyütülmesi gerekmektedir (Çizelge 3.7).

Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda [36] verilen performans sınırlarına göre öteleme oranları kontrol edilmiştir. Yapıya etkitilen deprem kaydı için numune %30 artım adımıyla Sınırlı Hasar Sınır Durumu'nu, %70 artım adımıyla Kontrollü Hasar Sınır Durumu'nu ve %100 artım adımıyla Göçme Öncesi Sınır Durumu'nu aşmış ve minare göçme durumuna ulaşmıştır, (Çizelge 3.7-3.9).

Çizelge 3.7 : Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu performans sınırlarına uygun olarak öteleme oranlarının kontrol edilmesi (%30).

Minare Bölümleri		Öteleme Oranları		Performans Sınırları		
				Sınırlı Hasar (0.003)	Kontrollü Hasar (0.007)	Göçme Öncesi (0.01)
	Petek	X	0.003 -0.003	x		
	Şerefe		0.002 -0.003	x		
	Gövde Üst		0.002 -0.003	x		
	Gövde Orta		0.002 -0.002	x		
	Petek	Y	0.004 -0.004	x		
	Şerefe		0.003 -0.004	x		
	Gövde Üst		0.003 -0.003	x		
	Gövde Orta		0.002 -0.003	x		

Çizelge 3.8 : Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu performans sınırlarına uygun olarak öteleme oranlarının kontrol edilmesi (%70).

Minare Bölümleri		Öteleme Oranları		Performans Sınırları		
				Sınırlı Hasar (0.003)	Kontrollü Hasar (0.007)	Göçme Öncesi (0.01)
	Petek	X	0.007 -0.008	x	x	
	Şerefe		0.004 -0.004	x	x	
	Gövde Üst		0.004 -0.004	x	x	
	Gövde Orta		0.004 -0.004	x	x	
	Petek	Y	0.007 -0.011	x	x	
	Şerefe		0.006 -0.006	x	x	
	Gövde Üst		0.006 -0.006	x	x	
	Gövde Orta		0.005 -0.005	x	x	

Çizelge 3.9 : Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu performans sınırlarına uygun olarak öteleme oranlarının kontrol edilmesi (%100).

Minare Bölümleri		Öteleme Oranları		Performans Sınırları		
				Sınırlı Hasar (0.003)	Kontrollü Hasar (0.007)	Göçme Öncesi (0.01)
	Petek	0.018	-0.035	x	x	x
	Şerefe	0.011	-0.011	x	x	x
	Gövde Üst	0.011	-0.011	x	x	x
	Gövde Orta	0.010	-0.011	x	x	x
	Petek	0.011	-0.025	x	x	x
	Şerefe	0.006	-0.010	x	x	x
	Gövde Üst	0.007	-0.009	x	x	x
	Gövde Orta	0.006	-0.009	x	x	x

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, tarihi tuğla minarelerin deprem etkileri altındaki davranışını anlamak üzere bir model minare üzerinde gerçekleştirilen sarsma tablası testlerini kapsamaktadır. Bursa-Erken Dönem Osmanlı minare örneklerinden Hocaalızade Cami minaresi prototip olarak alınarak model minare üretimi yapılmıştır. Model minare, yerçekimi etkisinin ihmal edildiği modelleme yaklaşımı benimsenerek ve laboratuvar kısıtları ve sarsma tablası kapasitesi dikkate alınarak $\frac{1}{4}$ geometrik ölçeğinde tasarlanmıştır. Modele, 17 Ağustos 1999 depreminin ürettiği ve Bursa-Tofaş istasyonunda kaydedilen deprem ivme kaydı artımsal olarak etkililerek sarsma tablası testleri yapılmıştır. Ayrıca, model minarenin dinamik özelliklerinde oluşacak değişimi belirlemek üzere her bir yükleme adımı öncesi çevresel titreşim ve white noise testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerden elde edilen verilerin işlenmesi ve test sırasında yapılan gözlemler aşağıda özetlenerek verilen sonuçların elde edilmesini sağlamıştır.

- Model minarede oluşan hasarın deprem sonrası yapılan gözlemlerle uyumlu olduğu görülmüştür. Testler, minarenin çap ve cidar kalınlığı açısından kesit değişikliklerinin olduğu geçiş bölgelerinin hasar açısından kritik kesitler olduğunu göstermektedir.
 - Minarede oluşan ilk hasar, ivme kaydının %30 (PGA=0.12g) artım adımında küp-gövde ve şerefe-petek geçiş bölgesinde küçük açılma değerleri ile başlamıştır. Devam eden adımlarda çatlak iki geçiş bölgesinin kesiti boyunca artarak yayılmıştır.
 - %100 (PGA=0.40g) artım adımında şerefe-petek bölgesindeki açılmanın yanısıra petek ortasında ikinci bir ayrılma meydana gelmiştir.
 - Hasarların kesitlerde toplandığı ancak hasarın minare boyunca yayılmadığı gözlemlenmiştir. Sarsma tablasının kapasitesi dolayısıyla minare göçmeye ulaşmadan test programı sonlandırılmıştır. Ancak testler sırasında yapılan gözlemler ve hasarın belli bölgelerde

toplanması göçme modunun devrilme şeklinde bekleneceğine işaret etmektedir.

- Testler, ivme ve yatay yerdeğiştirmenin minare yüksekliği boyunca artış eğilimi gösterdiğini ve bu artışın artımsal uygulanan ivme kaydının büyüklüğünün artmasıyla arttığını göstermektedir.
 - Minarenin petek üst seviyesinde ölçülen en büyük yatay yerdeğiştirme %125 (PGA=0.50g) artım oranında 147 mm olarak elde edilmiştir.
 - En büyük kalıcı yerdeğiştirme %112.5 (PGA=0.45g) artım oranında küp-gövde geçiş bölgesinde 0.21 mm olarak belirlenmiştir. İlk yükleme adımına göre deney sonunda kaydedilen en büyük kalıcı yerdeğiştirme şerefe-petek geçiş bölgesinde 0.84 mm kadar olmuştur.
 - Elde edilen en büyük öteleme değerleri, Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda belirtilen öteleme sınır şartlarına göre değerlendirilmiş ve Göçme Öncesi Sınır Durumunun sağlanmadığı görölmüştür.
- Her bir test aşamasından sonra geręekleřtirilen beyaz gürültü testleri, artan hasar nedeniyle (azalan rijitlik etkisiyle) frekansın azaldığını ve sönümün arttığını ortaya koymaktadır.
 - Laboratuvar ortamında araç ve insan trafiği, rüzgar, sıcaklık vb. çevresel şartlar olmadığı için çevresel titreşim testlerinden sağlıklı veri elde edilememiştir. Bu yüzden white noise test sonuçları kullanılarak minarenin frekans değerleri ve sönüm oranları elde edilmiştir.
 - Model minarenin birinci moda karşılık gelen frekansı 7.86 Hz olarak ölçölmüştür. En son yükleme adımından sonra frekans değeri 5.99 Hz olarak ölçölmüştür. Dolayısıyla birinci moda karşı gelen frekans değerindeki azalmanın %24 civarında olduğu anlaşılmaktadır.
 - Birinci moda karşı gelen sönüm oranı %4.5 iken en son yükleme adımından sonra elde edilen deneysel verinin işlenmesi ile % 9.3 olarak elde edilmiştir. Bu değerlerin karşılaştırılması, sönüm oranında yaklaşık %100'e varan bir artışın olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Güleç, E. (2006). *Kayseri Minareleri (Cumhuriyet Dönemine Kadar)*. (Yüksek lisans tezi). Sosyal Bilimleri Enstitüsü - Erciyes Üniversitesi.
- [2] Gündüz, F. (2005). *Minare, İslam Ansiklopedisi*.
- [3] Ertek, E. (2009). *Osmanlı Minarelerinin Yapısal Modellenmesi Ve Deprem Analizi*. (Yüksek lisans tezi). Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü - Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- [4] Durgut, E. (2021). *Bursa Hocaalızade Cami minaresi Davranışının Farklı Deprem Kayıtları Altında Doğrusal Ve Doğrusal Olmayan Analiz Yaklaşımları İle İncelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). Lisansüstü Eğitim Enstitüsü - İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [5] Acar, R. (2009). *Anıtsal Kule Türü Yapıların Deprem Davranışlarının İncelenmesi Ve Alternatif Sistemlerin Geliştirilmesi*. (Yüksek lisans tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü - Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- [6] Eyice, S. (1963). *İstanbul Güzel Sanatlar Akademisi Türk Sanatı Araştırma ve İncelemeleri, I. Berksoy Matbaası, İstanbul*.
- [7] Url-1.< <https://www.esramoza.com/>>.
- [8] Url-2.< <https://www.duybunu.com.tr/>>.
- [9] Url-3.< <http://istanbul.gov.tr/>>.
- [10] Kuşüzümü, K. H. (2010). *İstanbul Minarelerinin Geleneksel Yapım Teknikleri Ve Günümüzdeki Restorasyonu*.
- [11] Eyice, S. (1962). *İstanbul Minareleri*.
- [12] Baştürk, M. H. (2013). *Bursa Tarihi Yığma Minarelerinin Dinamik Davranışlarının Modal Analiz Yöntemi İle İncelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü - Uludağ Üniversitesi.
- [13] Serhatoğlu, C. (2015). *Bursa Tarihi Minarelerinin Dinamik Davranışlarının Ve Performanslarının İncelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü - Uludağ Üniversitesi.
- [14] Türkiye Diyanet Vakfı. (2005). Türkiye Diyanet Vakfı İslam Ansiklopedisi. *Türkiye Diyanet Vakfı Yayınları*, 30, 98-101.
- [15] Tayla, H. (1996). Uluslararası Mimar Sinan Sempozyumu bildirileri: Ankara, 24-27 Ekim 1988. *Türk Tarih Kurumu Basımevi*.
- [16] Alamehmet, A.Z. (2019). *Bursa Ulucami Doğu Minaresinin Davranışının Doğrusal Ve Doğrusal Olmayan Analizler İle İncelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). Lisansüstü Eğitim Enstitüsü - İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [17] Url-4.< <https://www.jmo.org.tr/>>.
- [18] Url-5.< <https://tdth.afad.gov.tr/>>, AFAD (2018).

- [19] MTA. Maden Tetkik Arama Müdürlüğü.
- [20] Özcan, B. (1999). Bursa Depremleri (2 Mart-12 Nisan 1855). *Güzel Sanatlar Enstitüsü Dergisi*, 5.
- [21] Özaydın, N. (2017). *Arşiv Belgeleri Işığında 1855 Depremi ve Bursa Yapılarına Etkisi*. (Doktora tezi). Sosyal Bilimler Enstitüsü - Uludağ Üniversitesi.
- [22] Doğangün, A., Acar, R., Livaoğlu, R., Tuluk, İ. (2006). Performance of Masonry Minarets against Earthquakes and Winds in Turkey. 1st International Conference on Restoration of Heritage Masonry Structures, 24-27 April, 2006, Cairo, Egypt.
- [23] Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C., Sevim, B., Şahin, A., Özcan, D.M. (2010). Binaların dinamik parametrelerinin operasyonel modal analiz yöntemiyle belirlenmesi. İMO Teknik Dergi, Yazı 337:5185-5205.
- [24] Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Türker, T., Sevim, B., (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.
- [25] Oliveira C. S., Çaktı, E., Stengel, D., Branco, M. (2012). Minaret behavior under earthquake loading: The case of historical İstanbul. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; (41):19–39.
- [26] Krstevska L., Şafak E, Caktı E, Erdik M. (2012). Comparative study of large and medium scale mosque models tested on seismic shaking table. 15th World Conference on Earthquake Engineering (15 WCEE), Lisboa, Portugal.
- [27] Krstevska L., Tashkov, L., Gramatikov, L., Kiril, R., Mammanna, O., Portioli, F., Mazzolani, F. (2010). Large-Scale Experimental Investigation on Mustafa Pasha Mosque, *Journal of Earthquake Engineering*, 14:6, 842-873, DOI:10.1080/13632460903338528
- [28] Xie, Q., Xu, D., Zhang, Y., Yu, Y. ve Hao, W. (2020). Shaking table testing and numerical simulation of the seismic response of a typical China ancient masonry tower. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(1), 331-355. doi:10.1007/s10518-019-00731-z
- [29] Moncarz, P. D. ve Krawinkler, H. (1981). *Theory And Application Of Experimental Model Analysis In Earthquake Engineering*.
- [30] SketchUp 2023 Manuel
- [31] Url-6. <<https://ngawest2.berkeley.edu/site>>, PEER Ground Motion Database.
- [32] ARTEMIS EXtractor Pro software (2010).
- [33] TS EN 771-1 Türk Standardı. (2005).
- [34] TS EN 1015-11 Türk Standardı. (2020).
- [35] TS EN 1052-1 Türk Standardı. (2000).
- [36] Tarihi Yapılarda Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu. (2013).

EKLER

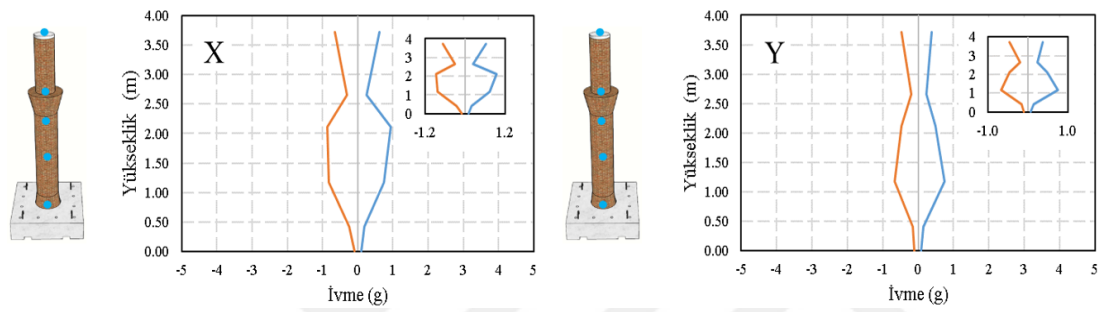
EK A : Model minareye Bursa/Tofaş deprem kaydı uygulanması sonrası elde edilen ivmenin yükseklikle değişimi grafikleri

EK B : Model minareye Bursa/Tofaş deprem kaydı uygulanması sonrası elde edilen öteleme oranının yükseklikle değişimi grafikleri

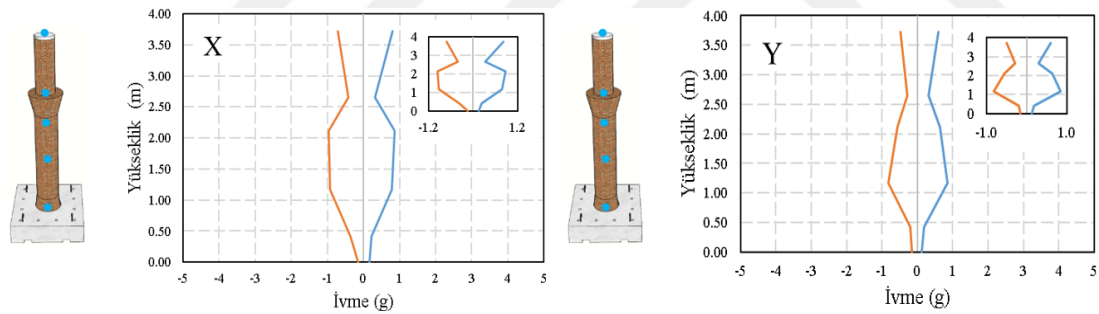
EK C : Model minareye Bursa/Tofaş deprem kaydı uygulanması sonrası elde edilen lazermetre ve potansiyometrik cetvelin petek bölgesinde yerdeğiştirme-zaman değişimi grafikleri

EK D : Model minareye Bursa/Tofaş deprem kaydı uygulanması sonrası elde edilen lazermetre ve potansiyometrik cetvelin şerefe bölgesinde yerdeğiştirme-zaman değişimi grafikleri

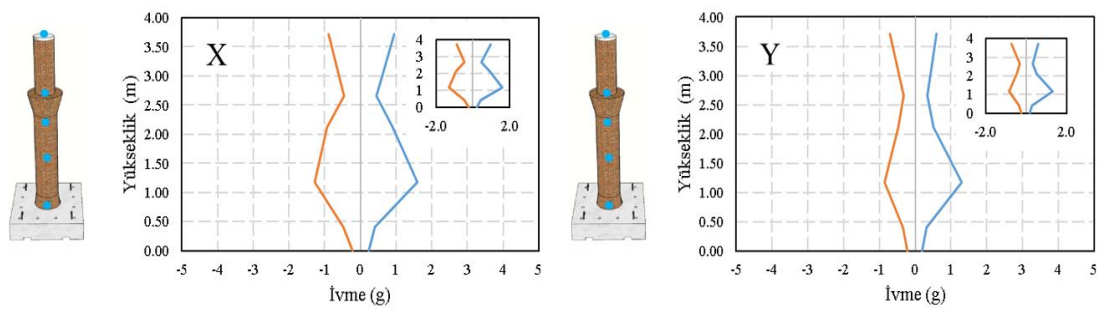
Şekil A. 1 : Referans numunesi ivme-yükseklik değişimi (%10).



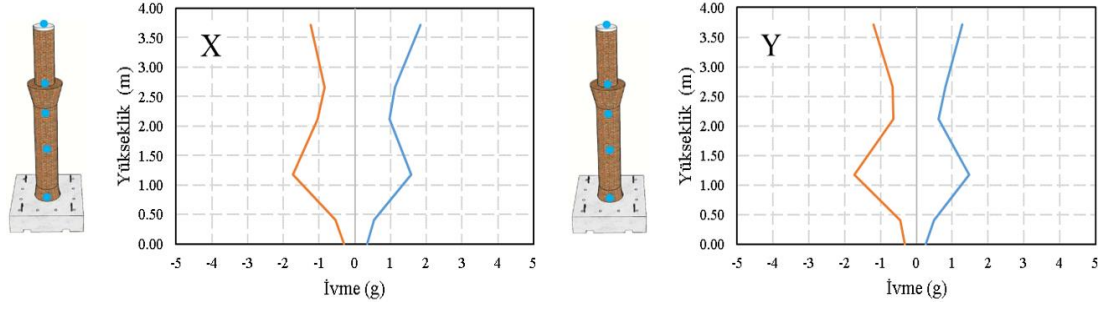
Şekil A. 2 : Referans numunesi ivme-yükseklik değişimi (%20).



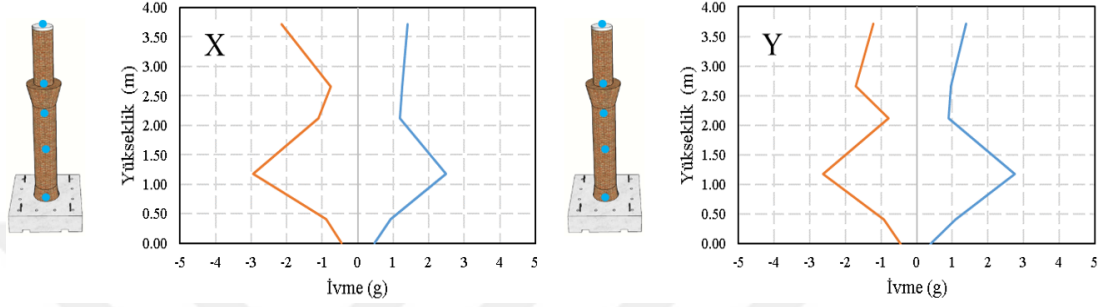
Şekil A. 3 : Referans numunesi ivme-yükseklik değişimi (%30).



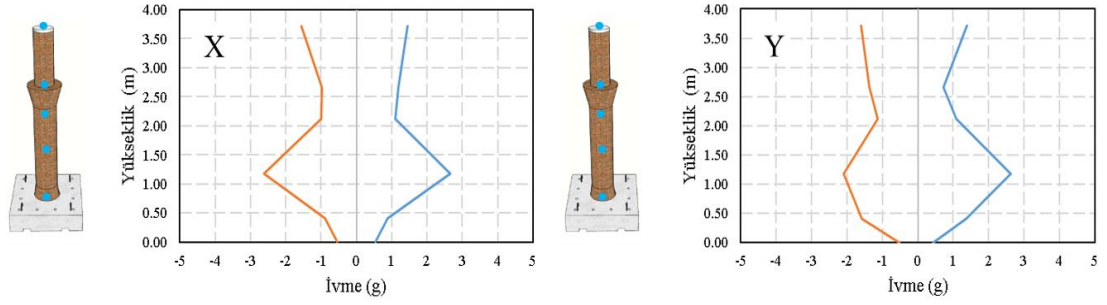
Şekil A. 4 : Referans numunesi ivme-yükseklik değişimi (%50).



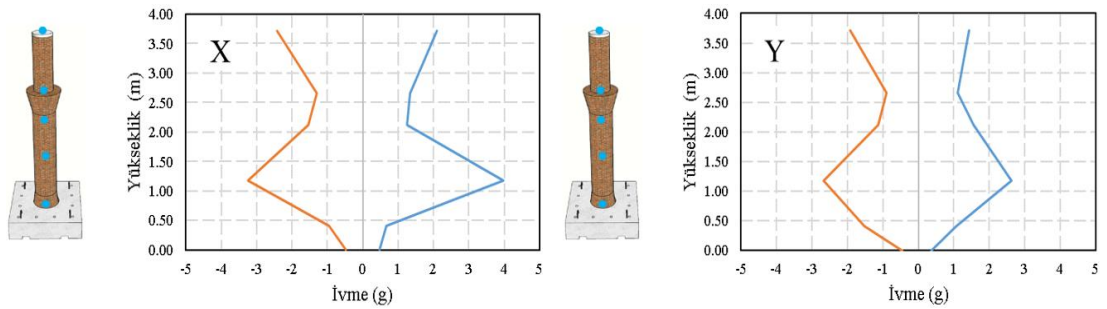
Şekil A. 5 : Referans numunesi ivme-yükseklik değişimi (%70).



Şekil A. 6 : Referans numunesi ivme-yükseklik değişimi (%100).

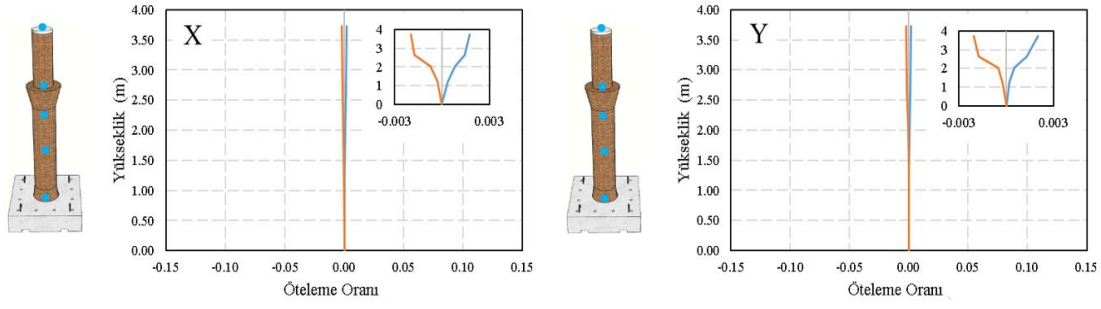


Şekil A. 7 : Referans numunesi ivme-yükseklik değişimi (%125).

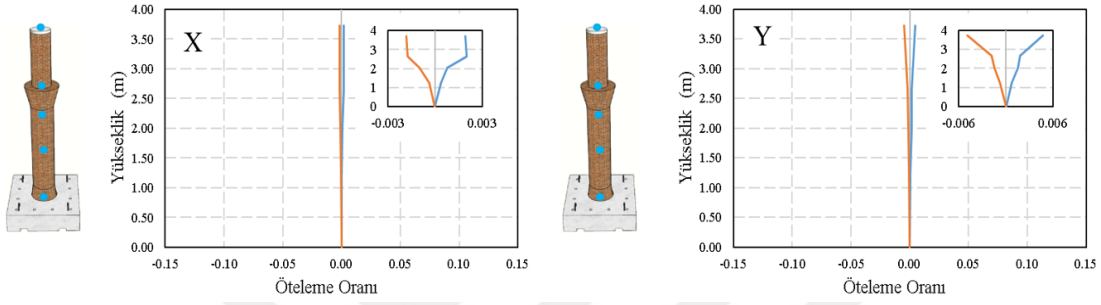


Şekil A. 8 : Referans numunesi ivme-yükseklik değişimi (%112.5).

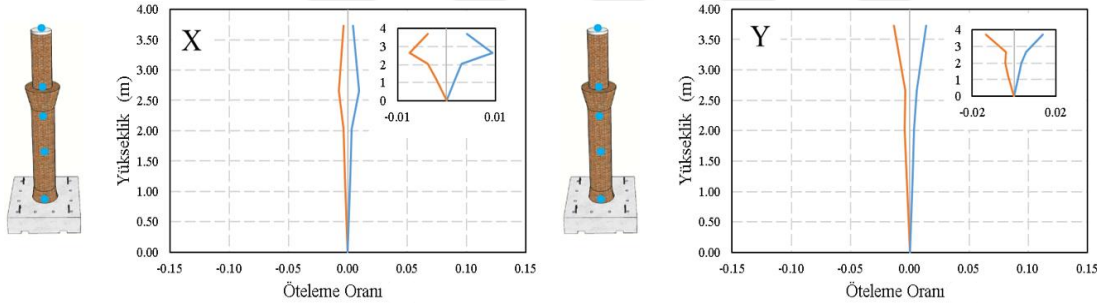
EK B



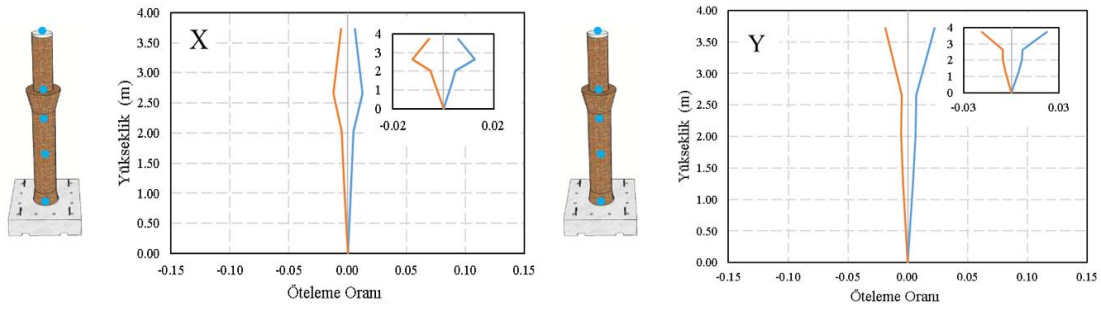
Şekil B. 1 : Referans numunesi öteleme oranı-yükseklik değişimi (%10).



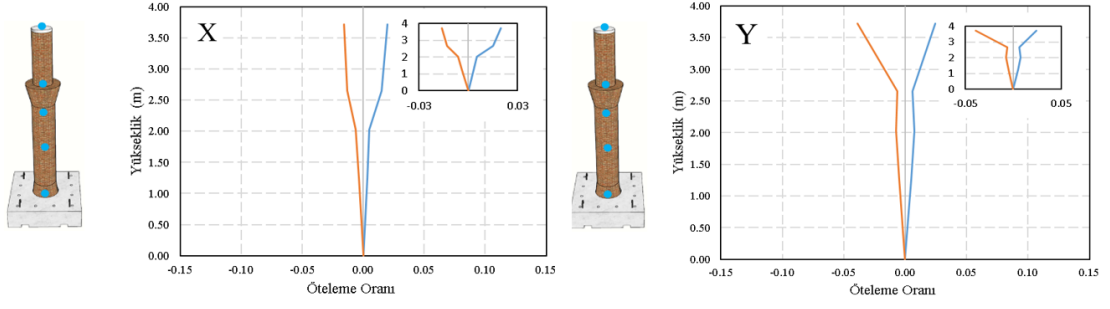
Şekil B. 2 : Referans numunesi öteleme oranı-yükseklik değişimi (%20).



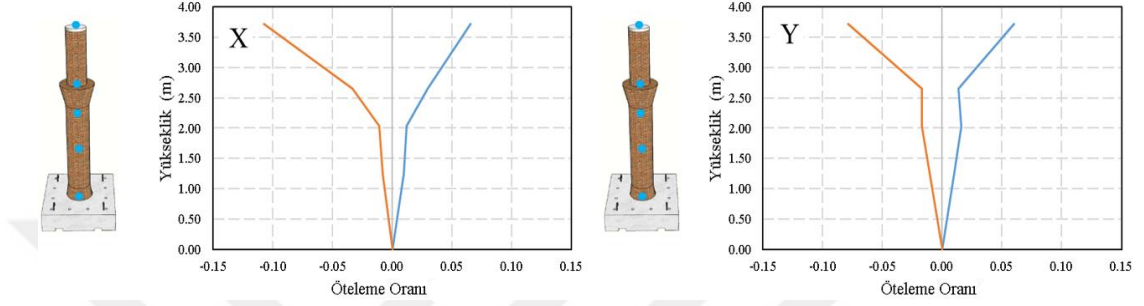
Şekil B. 3 : Referans numunesi öteleme oranı-yükseklik değişimi (%30).



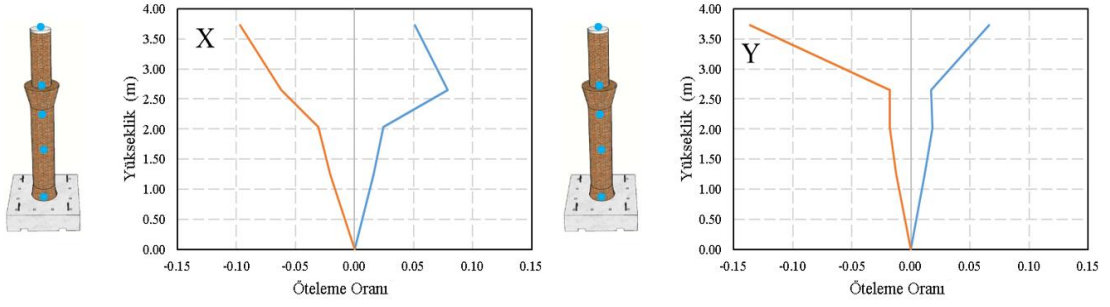
Şekil B. 4 : Referans numunesi öteleme oranı-yükseklik değişimi (%50).



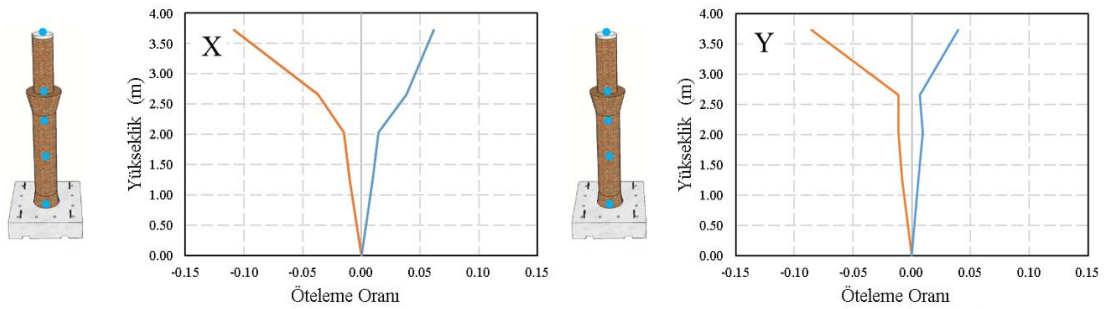
Şekil B. 5 : Referans numunesi öteleme oranı-yükseklik değişimi (%70).



Şekil B. 6 : Referans numunesi öteleme oranı-yükseklik değişimi (%100).

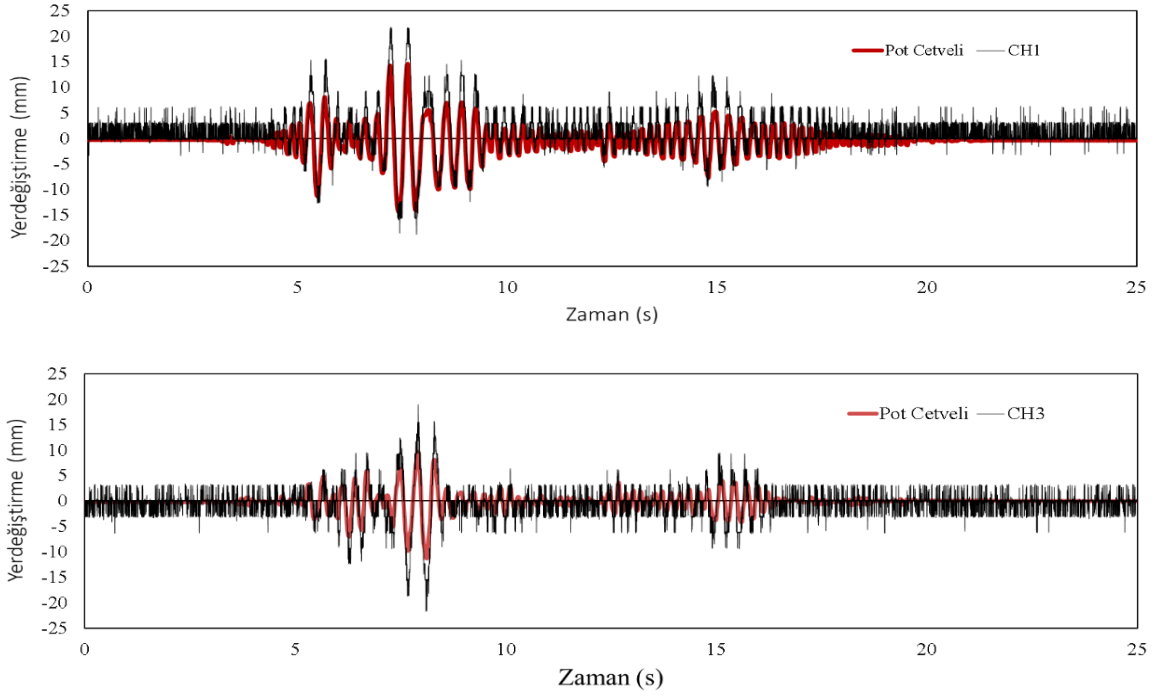


Şekil B. 7 : Referans numunesi öteleme oranı-yükseklik değişimi (%125).

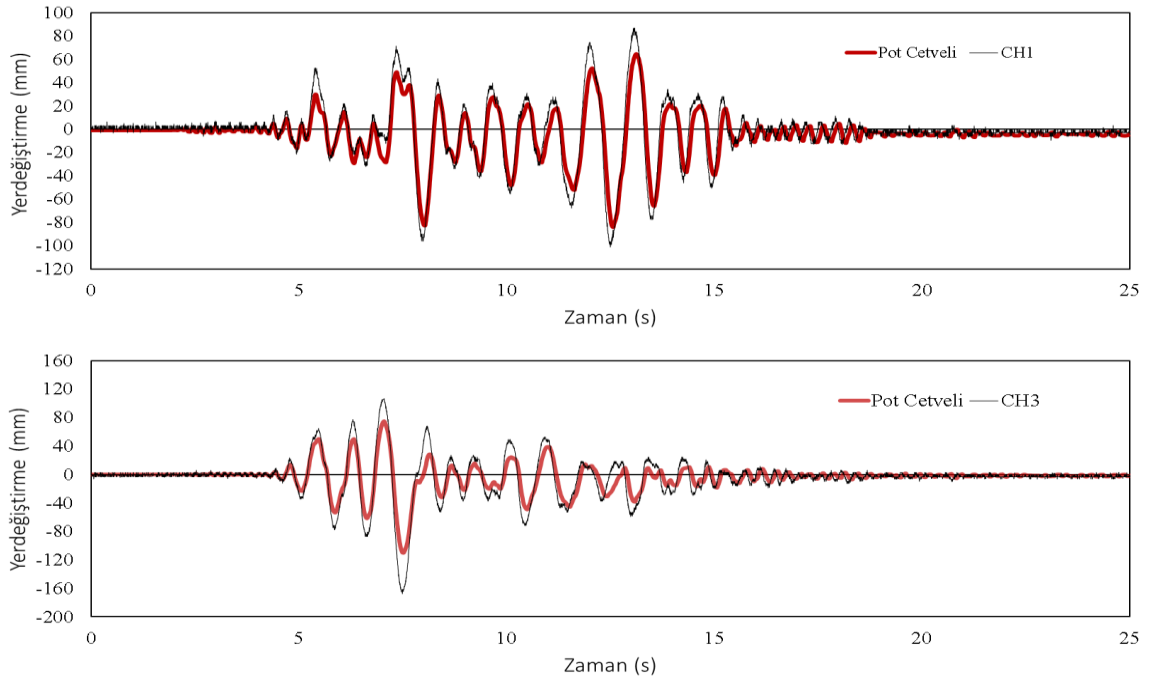


Şekil B. 8 : Referans numunesi öteleme oranı-yükseklik değişimi (%112.5).

EK C

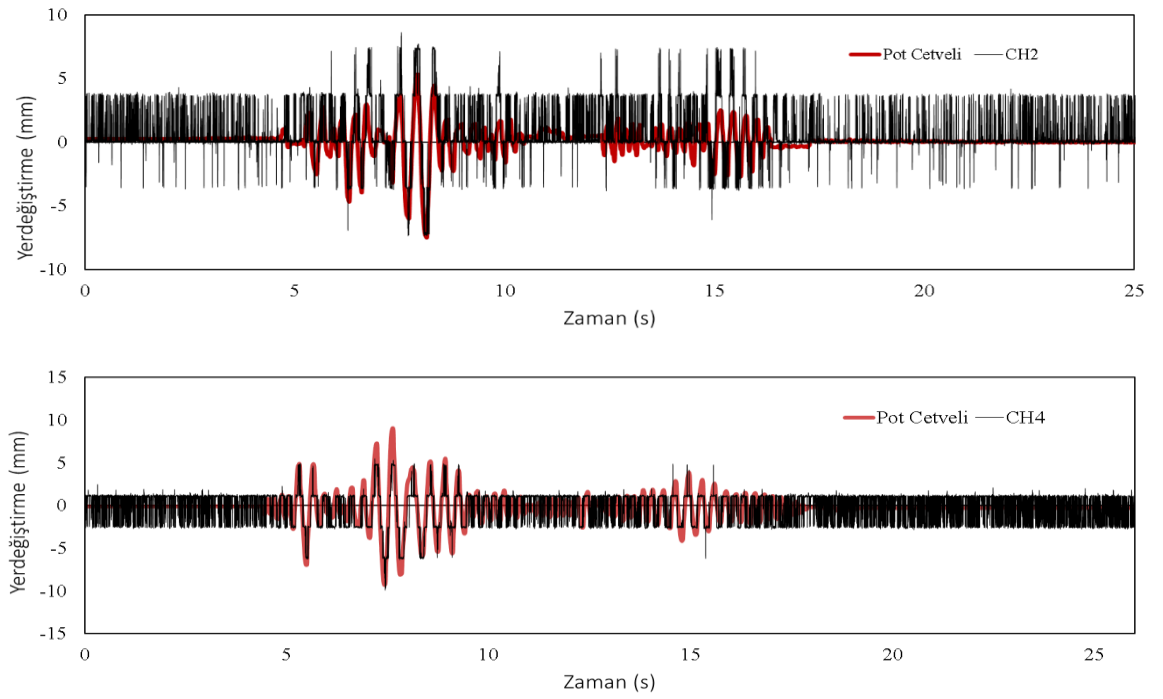


Şekil C. 1 : Referans numunesi lazermetre ve potansiyometrik cetvel petek bölgesinde yerdeğiştirme-zaman değişimi (%30) (X-Y).

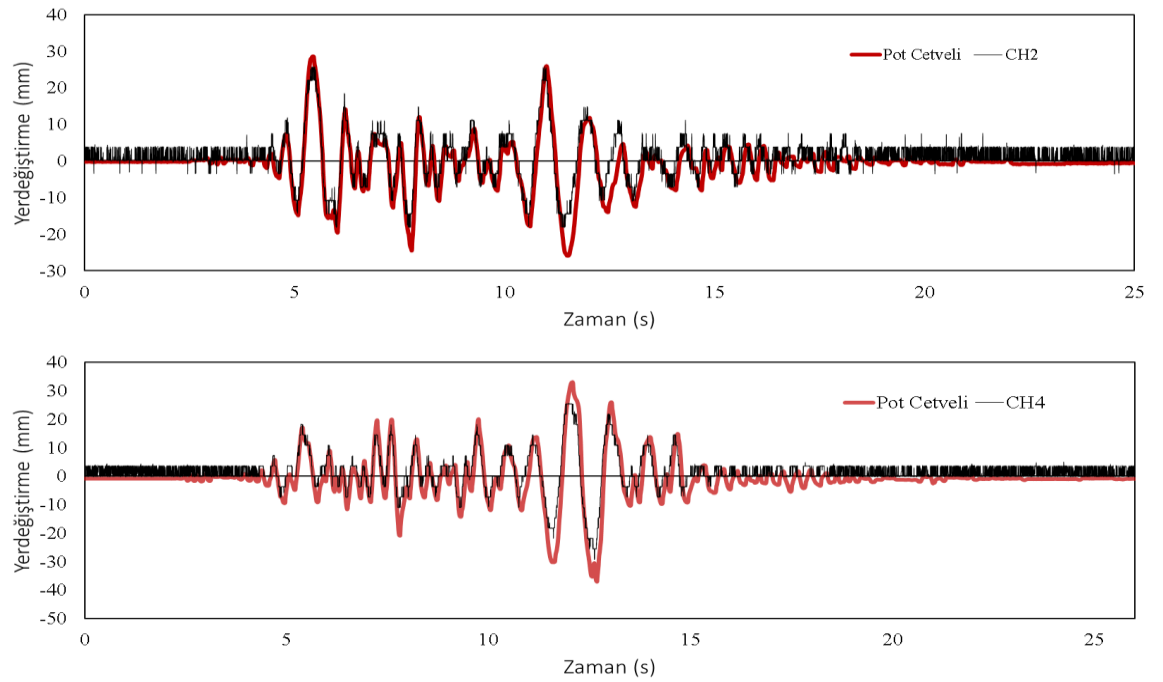


Şekil C. 2 : Referans numunesi lazermetre ve potansiyometrik cetvel petek bölgesinde yerdeğiştirme-zaman değişimi (%100) (X-Y).

EK D.



Şekil D. 1 : Referans numunesi lazermetre ve potansiyometrik cetvel şerefe bölgesinde yerdeğiştirme-zaman değişimi (%30) (X-Y).



Şekil D. 2 : Referans numunesi lazermetre ve potansiyometrik cetvel şerefe bölgesinde yerdeğiştirme-zaman değişimi (%100) (X-Y).



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Birdal KOÇAK

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2024, İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı, Deprem Mühendisliği Programı

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Ayşenur Birel, **Birdal Koçak**, Osman Fatif Bayrak, Elif Durgut, Medine İspir, Alper İlki 2022. Planing the Shaking Table Tests of a Historical Brick Minaret Representing Mid-Height Early Ottoman Period Architecture, *International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures* (pp.71-83).
- Medine İspir, Fikret Kuran, Elif Durgut, Osman Fatih Bayrak, Berkay Aldırmaz, **Birdal Koçak**, Ayşenur Birel, Cem Demir, Ömer Dabanlı, İlknur Dalyan, Ömer Tuğrul Turan, Alper İlki 2023. Bursa Tarihi Minarelerinin Deprem Performanslarının Analitik ve Deneysel Yaklaşımlar ile İncelenmesi ve Hasargörebilirlik Eğrilerinin Elde Edilmesi, *2023 UDAP Çalıştayı - On Yılın Ardından Ulusal Deprem Araştırma Programı* (pp. 24-28).
- İsmail Sencar, **Birdal Koçak**, Medine İspir, Korhan Deniz Dalgıç, Alper İlki 2024. Axial Behaviour of Rectangular Low-Strength Concrete Prisms Confined with Recycled PET-FRP, *International Graduate Research Symposium - IGRS'24*.