

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARİHİ YIĞMA BİR MİNARENİN SİSMİK PERFORMANS ANALİZİ: VAİZ
BABA SUNULLAH MELİK CAMİ MİNARESİ ÖRNEĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Enes AY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Onur ONAT

TEMMUZ 2024

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARİHİ YIĞMA BİR MİNARENİN SİSMİK PERFORMANS ANALİZİ: VAİZ
BABA SUNULLAH MELİK CAMİ MİNARESİ ÖRNEĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Enes AY
(36203621079)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Onur ONAT

TEMMUZ 2024

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Onur ONAT'a,

Çalışmalarında ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmalarım süresince de benden her türlü desteklerini esirgemeyen aileme,

Çalışmamda malzeme özelliklerinin deneysel tespiti konusunda yardımını esirgemeyen Doç.Dr. Engin ÖZDEMİR'e,

Tezin deneysel ölçümleri aşamasında vermiş oldukları destekten dolayı, İnönü Üniversitesi BAP birimine teşekkür ederim.



ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Tarihi Yığma Bir Minarenin Sismik Performans Analizi: Vaiz Baba Sunullah Melik Cami Minaresi Örneği” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Enes AY



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
SEMBOL VE KISALTMALAR	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
3. VAİZ BABA SUNULLAH MELİK CAMİ VE MİNARESİ.....	8
4. OPERASYONEL MODAL ANALİZ.....	14
5. MALZEME ÖZELLİKLERİNİN ELDE EDİLMESİ.....	18
6. SONLU ELEMANLAR MODELİ VE MODELİN KALİBRASYONU.....	23
7. ZAMAN TANIM ALANINDA DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZ	27
7.1 Ayırık (Düşey Mesnetsiz) Durumda Yapılan Analiz Sonuçları	29
7.2 Bitişik (Düşey Mesnetli) Durumda Yapılan Analiz Sonuçları.....	34
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	40
KAYNAKÇA.....	42
ÖZGEÇMİŞ	45

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 : Operasyonel modal analiz sonucu elde edilen dinamik özellikler.....	17
Çizelge 5.1 : Traverten (Kaide).....	20
Çizelge 5.2 : Tüf (Kaide)	20
Çizelge 5.3 : Kaidenin malzeme özellikleri.	21
Çizelge 5.4 : Sonlu elemanlar modeli için elde edilen malzeme karakteristikleri	26
Çizelge 6.1 : Yığma elemana ait malzeme karakteristikleri	26
Çizelge 6.2 : Model kalibrasyon öncesi ve sonrasındaki frekanslar	26



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 : a) Minare üzerindeki kitabe, b) Türbe	8
Şekil 3.2 : Vaiz Baba Sunullah Melik Camii Minaresi.....	9
Şekil 3.3 : Restorasyon çalışmaları öncesinde Tarihi Sunullah Melik Camisi ve Minaresinin birleşim bölgesi.....	9
Şekil 3.4 :Restorasyon çalışmaları sonrasında Tarihi Sunullah Melik Camisi ve Minaresinin birleşim bölgesi	10
Şekil 3.5 : Sunullah Melik Camii Minaresinde yapılan restorasyon çalışmaları	11
Şekil 3.6 : Cami minaresinin geometrisi ve ölçüleri.....	12
Şekil 3.7 : a) Sunullah Melik Camii Minaresi, b) Minarenin Kısımları.	13
Şekil 3.8 : Sunullah Melik Camii Mescid, Cami ve Minarenin Yerleşimi	13
Şekil 4.1 : İvmeölçerlerin kaide köşelerine yerleştirilmesi.....	14
Şekil 4.2 : İvmeölçerlerin konumu ve minarenin görünümü	16
Şekil 4.3 : Minarenin farklı bölgelerine ivmeölçerlerin yerleştirilmesi.....	16
Şekil 4.4 : Frekans tanım alanında ayrıştırma yöntemi ile minareye ait frekanslar.....	16
Şekil 4.5 : Mod şekilleri ve frekanslar	17
Şekil 5.1 : Kayaçlar için kullanılan L tipi Schmidt çekici	18
Şekil 5.2 : Ultrasonik Ses Testi cihazının kalibre edilmesi.....	18
Şekil 5.3 : a)Ölçümün yapıldığı kaide kenarı, b)Ultrasonik Ses Testi cihazı ile ölçüm yapılması.	19
Şekil 5.4 : Ölçümden sonra kesme taş a ait görüntü.	19
Şekil 5.5: Görüntü işleme ile doğal taş ve harç oranlarının belirlenmesi (%)	21
Şekil 6.1: Tarihi Vaiz Baba Sunullah Melik Cami Minaresinin üç boyutlu modeli.....	27
Şekil 6.2: Minarenin önden görünüşü ve kısımları	25
Şekil 6.3: Üç eksenli durumda Drucker-Prager (D-P) Modeli.....	25
Şekil 6.4: Kalibre edilmiş sayısal modelin mod şekilleri.....	27
Şekil 7.1: Zaman tanım alanında analizlerde kullanılan deprem ivme kayıtları.....	28
Şekil 7.2: Mesnetsiz durumda Vaiz Sunullah Melik Minare’sinin 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ depremine ait taban kesme kuvveti-devrilme momenti tepki grafiği	29
Şekil 7.3: Mesnetsiz durumda Elazığ depremi sonrası Vaiz Baba Sunullah Melik Minare’sine ait şekil değiştirmeler.....	30
Şekil 7.4: Mesnetsiz durumda Vaiz Sunullah Melik Minare’sinin 23 Kasım 2011 Van-Edremit depremine ait taban kesme kuvveti-devrilme momenti tepki grafiği....	30
Şekil 7.5: Mesnetsiz durumda Van-Edremit depremi sonrası Vaiz Baba Sunullah Melik Minare’sine ait şekil değiştirmeler.....	31
Şekil 7.6: Mesnetsiz durumda Vaiz Sunullah Melik Minare’sinin 1 Mayıs 2003 Bingöl depremi sonrası taban kesme kuvveti-devrilme momenti tepki grafiği.....	32
Şekil 7.7: Mesnetsiz durumda Bingöl depremi sonrası Vaiz Baba Sunullah Melik Minare’sine ait şekil değiştirmeler.....	33
Şekil 7.8: Mesnetsiz durumda Vaiz Baba Sunullah Melik Minare’sine ait yatay ötelenme-minare yüksekliği arasındaki ilişki..	34
Şekil 7.9: Mesnetli Durumda Vaiz Sunullah Melik Minare’sinin 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ depremine ait taban kesme kuvveti-devrilme momenti tepki grafiği	34
Şekil 7.10: Mesnetli durumda Elazığ depremi sonrası Vaiz Baba Sunullah Melik Minare’sine ait şekil değiştirmeler.....	35
Şekil 7.11: Mesnetli durumda Vaiz Sunullah Melik Minare’sinin 23 Kasım 2011 Van-Edremit depremine ait taban kesme kuvveti-devrilme momenti tepki grafiği....	36

Şekil 7.12: Mesnetli durumda Van-Edremit depremi sonrası Vaiz Baba Sunullah Melik Minare'sine ait şekil değiştirmeler.....	36
Şekil 7.13: Mesnetli durumda Vaiz Sunullah Melik Minare'sinin 1 Mayıs 2003 Bingöl depremi sonrası taban kesme kuvveti-devrilme momenti tepki grafiği.....	37
Şekil 7.14: Mesnetli durumda Bingöl depremi sonrası Vaiz Baba Sunullah Melik Minare'sine ait şekil değiştirmeler.....	38
Şekil 7.15: Mesnetli durumda Vaiz Baba Sunullah Melik Minare'sine ait yatay ötelenme-minare yüksekliği arasındaki ilişki.	38
Şekil 7.16: 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinden sonra minarede oluşan çatlak ve şekil değiştirmeler.....	39



SEMBOL VE KISALTMALAR

MPa	: Megapaskal
GPa	: Gigapaskal
t	: Ton
m	: Metre
cm	: Santimetre
mm	: Milimetre
f	: Frekans
max	: Maksimum
min	: Minimum
sn	: Saniye
H	: Yükseklik
Hz	: Hertz
dB	: Desibel
UST	: Ultrasonik ses testi
P	: Primer
S	: Sekonder
UCS	: Tek eksenli basınç dayanımı
L	: L türü Schmidt çekici
SCH	: Schmidt çekici okumasından elde edilen geri tepme sayıları
V_{dyn}	: Dinamik poisson oranı
V_p	: Primer dalga hızı
V_s	: Sekonder dalga hızı
E_{dyn}	: Dinamik elastik modülü
E	: Elastik Modülü
h	: Yükseklik
f	: Kuvvet
f_c	: Yığılma malzemeye ait basınç dayanımı
PGA	: En büyük deprem yer ivmesi

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Tarihi Yığma Bir Minarenin Sismik Performans Analizi: Vaiz Baba Sunullah Melik Camii
Minaresi Örneği
Enes AY

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

45+ix sayfa

2024

Danışman: Doç. Dr. Onur ONAT

Tarihimizi oluşturan yapıların korunması ve bizden sonraki nesillere aktarılması deprem bölgesi olan ülkemizde ve Malatya özelinde çok önemli olup bu yapıların sismik performans analizlerinin yapılması ve değerlendirilmesi gereklidir. Malatyada önce 24 Ocak 2020 Elâzığ-Sivrice ve daha sonra 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin oluşması, tarihi yapıların mevcut sismik performansının belirlenmesini zorunlu kılmıştır. Çünkü olası bir deprem durumunda tarihi eserlerin daha büyük hasar almasına, can ve mal kaybına yol açabilir. Oluşabilecek hasarın minimuma indirilebilmesi, toptan göçmenin önüne geçilebilmesi için tarihi eserin mevcut durumdaki sismik performansının bilinmesi, deprem etkisi altındaki eserin davranışının analiz edilebilmesi ve bu analizler sonucunda eserde oluşması beklenen hasarları öngörmeye çalışarak tespit edilmesi ile uygulanacak güçlendirmeler ve onarımlar tarihi eserlerin ömrü uzatılması sağlanabilir.

Bu amaçla Malatya ili Battalgazi ilçesinde yer alan Vaiz Baba Sunullah Melik Camii Minaresi'nin 24 Ocak 2020 Elâzığ depremi sonrası mevcut durumunun sismik performansı analiz edilmiştir. Yapılan çalışma ile tarihi eserin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturulup, tahribatsız test yöntemleri ile malzeme karakteristikleri belirlenmiştir. Tarihi minarenin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi için çift eksenli beş adet ivmeölçer ve tek eksenli beş adet ivmeölçer kullanılmıştır. Minarenin sonlu elemanlar modelinde malzeme özellikleri değiştirilerek deneysel frekans ile sayısal frekans arasındaki farklar minimuma indirilmeye çalışılmıştır. Sayısal model kalibre edildikten sonra, doğrusal olmayan dinamik analiz yapılmıştır. Bu analizler için, 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ, 23 Kasım 2011 Van-Edremit ve 1 Mayıs 2003 Bingöl ve depremlerinin ivme kayıtları kullanılarak tarihi minarenin mescidden ayrılmadan önceki hali ile ayrıldıktan sonraki halini temsil eden iki farklı mesnet durumu göz önüne alınarak doğrusal olmayan analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları ile 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası oluşan hasarlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tarihi Vaiz Baba Sunullah Melik Camii Minaresi, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Tarihi Yığma Minare, Doğrusal Olmayan Deprem Analizi

ABSTRACT

Master Thesis

Seismic Performance Assessment of a Historical Masonry Minaret: A case study
Vaiz Baba Sunullah Melik Mosque Minaret
Enes AY

Inonu University
Institute of Science
Department of Civil Engineering

45+ix sayfa

2024

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Onur ONAT

Preserving the structures that make up our history and transferring them to next generations is very important, especially in Malatya, which is an earthquake zone, and it is important to conduct and evaluate the seismic performance of these structures. The impact of the January 24, 2020 Elâzığ-Sivrice earthquake on Malatya, as well as the February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquake, made it necessary to determine the current seismic performance of historical monuments. A potential earthquake could have a significant harmful effect on historical monuments, leading to a loss of life and property. In order to minimize the damage that may occur, to prevent wholesale migration, the seismic performance in the current situation should be clear, the element can be analyzed under the effect of the earthquake, and these works can be used to predict the damages expected to break in the structure, to increase the performance with permanent detection and to extend the product life of the repair date.

For this purpose, the seismic performance of the Minaret of Vaiz Baba Sunullah Melik Mosque in Battalgazi district of Malatya province was analyzed in its current state after the January 24, 2020 Elâzığ earthquake. In this study, a 3-axis finite element model of the structure was created and its material characteristics were determined using non-destructive testing methods. We used five biaxial accelerometers and five uniaxial accelerometers to determine the dynamic characteristics of the historical minaret. We tried to minimize the differences between the experimental frequency and the numerical frequency in the finite element model of the minaret by changing the material properties as low as 5%. We performed a nonlinear dynamic analysis after calibrating the numerical model. For these analyses, non-linear analyzes were performed by using the earthquake acceleration records of 24 January 2020 Sivrice-Elazığ, 23 November 2011 Van-Edremit and 1 May 2003 Bingöl earthquake, considering two different support situations representing the state of the historical minaret before and after leaving the masjid. We compare the results of the analyses with the damages caused by the earthquakes on February 6, 2023, in Kahramanmaraş.

Keywords: Historical Vaiz Baba Sunullah Melik Mosque Minaret, Finite Element Method, Historical Masonry Minaret, Nonlinear Earthquake Analysis

1. GİRİŞ

Geçmişte yaşamış topluluklardan günümüze kadar ulaşan yapılar, tarihi eser olarak isimlendirilmektedir. Bu tarihi yapılar geçmiş ve gelecek arasında kültürel bağlantı kurması nedeniyle önemlidir. Toplumların yaşamış olduğu dönemlerdeki kültürel değerlerini, yaşama biçimlerini ve değerlerini yansıtan bu kültürel mirasların fiziki yapılarının ve dokularının bozulmadan korunmasını sağlamak, kendilerinden sonraki kuşaklara aktarılması bizden sonraki kuşaklar için de yaşatılması tüm insanlığın sorumluluğudur [1]. Bu eserlerin gelecek nesillere aktarımı ancak doğa kaynaklı afetlere karşı dayanımlarını arttırmakla mümkündür. Tarihi yığma yapıların hasar almasına afet, yangın, savaş ve çevresel faktörler neden olsa da en büyük hasar nedenleri depremlerdir [2]. Ülkemizin ve coğrafyamızın büyük bir kısmı da deprem riski altındadır. Bu sebeple ülkemizin neresinde olursa olsun, tarihi eserleri depreme dirençli hale getirerek kültürel mirası korumak inşaat mühendisliği açısından en kritik ve karmaşık algoritmalar bütünüdür. Bunlardan ilki malzeme özellikleridir. Yığma yapılar, bulundukları bölgedeki çevresel özelliklere göre taş, kil, toprak, kerpiç gibi bölgesel malzemelerden yapılan ve uygulama zamanında değişik tekniklerden faydalandığı yapılardır. Yığma yapıların homojenlik taşımayan yapısı, komplike malzeme karakteristikleri ve değişik uygulama farklılıkları bu tarihi yapıların her birine özgünlük katmaktadır. Bu sebeple sismik performansı belirleme aşamasında hata oranı en yüksek süreç malzeme özelliklerinin belirlenmesi aşamasıdır [3]. Deprem etkisinde, davranışı öngörülemeyen bir yapının hasarlar alması veya toptan göçüp can ve mal kaybına sebep olması kaçınılmaz olabilmektedir. Tarihi miraslarımızın güvenli bir şekilde korunarak ayakta kalıp gelecek kuşaklara aktarılması için yapılacak çalışmalarda sayısal model oluşturma ve bu sayısal modelin tüm mimari detayları içermesi, depreme karşı dayanıklı hale getirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu sebeple genelde sonlu elemanlar yazılımları ile katı cisim modelleri oluşturulup, tüm mimari detaylar sayısal modele aktarılmaktadır [4]. Farklı zamanlarda yapılan onarım ve güçlendirme çalışmaları her ne kadar yapıların ayakta kalıp günümüze ulaşmasına yardımcı olsa da bu çalışmalar gerekli akademik çalışmalar ile desteklenmediği için ya da akademik olarak denetim altında yapılmamasından dolayı yetersiz kalmaktadır. Bunlar da yapının dinamik karakteristiklerini çok önemli düzeyde

etkilemektedir [5]. Günümüz teknolojisi de yapının dinamik karakteristiklerini yani frekans, mod şekli ve sönüm oranını çok küçük titreşimlerde bile belirleyebilecek cihazlara sahiptir. Bu cihazlar ile yapılacak ölçüm sonuçlarında ortaya çıkan deneysel veriler, sayısal modelin, malzeme özellikleri ile kalibre edilmesinde kullanılmakta ve gerçek yapının sanal ikizi oluşturulmaktadır. Bu sanal ikiz ile yapılacak performans analizlerinin sonuçları hem daha güvenilir olmakta hem de onarım ve güçlendirme çalışmaları açısından güvenilir sayısal değerler üretmektedir. Yapılacak performans analizleri, tarihi eserlerin deprem etkisi altındaki davranışlarını öngörme yöntemi olup, hasar oluşması beklenen bölgelerin tespit edilerek uygulanacak en uygun güçlendirme teknikleriyle ağır hasarların veya toptan göçmelerin engellenmesi durumlarını ortadan kaldırmak, bu alandaki bütün akademik çalışmaların başlangıcını oluşturmaktadır [6]. Bu çalışmalarda öncelikle can ve mal kayıplarının daha sonrasında ise kültürel miraslardaki kayıpları engellemek amaçlanmaktadır. Her ne kadar bu tür çalışmalar herhangi bir deprem görmemiş yapıtlar için yapılırsa bile, herhangi bir depremden sonra da gelişen çatlak ve hasar durumları da gözetilerek bu tür çalışmaların yapılması önem arz etmektedir. İşte tam da bu bakış açısıyla, Malatya ili Battalgazi ilçesinde yer alan Vaiz Baba Sunullah Melik Camii Minaresi'nin restorasyonu henüz bittikten sonra 2020 Elâzığ depremi gerçekleşmiş ve sonrasındaki mevcut durumunun sismik performansı değerlendirilmiştir. Değerlendirme esnasında 6 Şubat 2023, Kahramanmaraş depremleri de gerçekleştikten sonra biraz daha hasar gelişmiş olup, iki deprem arası oluşan rijitlik kaybını göz önüne alarak performans analizi yapılmış ve sonuçları yerindeki hasarlı durumla kıyaslanmıştır. Bu kıyas, geçmiş deprem kayıtlarının gelecekte olması muhtemel depremlerin temsil etme açısından önem arz etmektedir. Bu tez kapsamında yığma yapının üç boyutlu sayısal modeli oluşturulup, tahribatsız test yöntemleri ile malzeme karakteristikleri belirlenmiştir. Tarihi minarenin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi için çift eksenli beş adet ivmeölçer ve tek eksenli beş adet ivmeölçer kullanılmıştır. Minarenin sonlu elemanlar modelinde malzeme özellikleri değiştirilerek deneysel frekans ile sayısal frekans arasındaki farklar %5'in altına indirilmeye çalışılmıştır. Sayısal model kalibre edildikten sonra, doğrusal olmayan dinamik analiz yapılmıştır. Bu analizler için, 2003 Bingöl, 2011 Van-Edremit ve 2020 Sivrice-Elâzığ deprem ivme kayıtları kullanılarak tarihi minarenin mescidden ayrılmadan önceki hali ile ayrıldıktan sonraki halini temsil eden iki farklı mesnet durumu göz önüne alınarak doğrusal olmayan analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları ile 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası oluşan hasarlar karşılaştırılmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Tarihi eserlerin deprem tehlikesi fazla olan bölgelerde korunması öncelikli yapılar arasına alınıp geleceğe devredilmesine ışık tutacak için birçok çalışma literatürde yer almaktadır. Doğangün ve diğ. (2008) tarafından yapılan çalışmada tarihi yığma minarelerin dinamik davranışını araştırmak amacıyla 20, 25 ve 30 m yüksekliğinde üç temsili minare modellemiş ve 1999 Kocaeli ve Düzce deprem ivme kayıtları kullanılarak analiz edilmiştir. Modellerin modal analizlerinin yapısal periyotları ve yapısal tepkinin minare yüksekliğinden ve girilen özelliklerden etkilendiğini vurgulamışlardır. Eğilme ve eksenel gerilmelerin geçiş bölgelerinin hemen üzerinde en büyük değerleri aldığını göstermişlerdir [1].

Pena ve diğ. (2010) tarafından yapılan çalışmada Hindistan Delhi'deki Kutub Minaresinin sismik davranışı incelenmiştir. Karmaşık ve basitleştirilmiş farklı seviyelerde üç model geliştirmişlerdir. Modelleri doğrusal olmayan statik ve dinamik analizler için kullanmışlardır. Dinamik analizde kulenin üst kısmı hassas iken statik analizde kulenin tabanının hassas olduğunu belirtmişlerdir. Farklı davranışların yüksek modların titreşim etkisiyle açıklanabileceğini vurgulamışlardır. [2]

Bayraktar ve diğ. (2011) tarafından yapılan çalışmada tam ölçekli titreşim testinden elde edilen bilgiler kullanılarak sonlu eleman modeli ile 21 m yüksekliğinde tarihi 16.yy a kadar uzanan Trabzon şehir merkezinde yer alan İskenderpaşa Cami minaresi'nin deprem davranışı incelenmiştir. Analitik frekanslarını ve modal şekillerini tespit etmek için saha ortamı ve mühendislik hesaplamalarını dikkate alarak minarenin 3 boyutlu sonlu eleman modeli üzerinde modal analiz yapmışlardır. Rüzgâr yüklemesi ve insan hareketi gibi doğal etkiler altında minarede saha titreşim testleri yapmışlardır. Minarenin sonlu eleman modelinde sınır koşullarını ve malzeme özellikleri gibi kesin olmayan parametreleri değiştirerek deneysel ve analitik model arasındaki farkları en aza indirecek şekilde güncellemişlerdir. Modeli güncelledikten sonra minarenin deprem davranışını belirlemek amacıyla yakın çevresinde meydana gelen 1992 Erzincan deprem kayıtlarını kullanarak analiz etmişlerdir. Analiz sonucunda model güncellenerek sayısal ve deneysel frekans ve mod şekilleri arasındaki maksimum fark ortalama %27 den %5'e kadar düşürülmüştür.

Ayrıca sismik analizinden yerdeğiştirmelerin minare yüksekliği boyunca arttığını ve maksimum ve minimum asal gerilmelerin geçiş segmenti ve silindirik gövde bölgesinde meydana geldiğini gözlemlemişlerdir [3].

Mutlu ve şahin (2016) tarafından yapılan çalışmada tarihi eserlerin modelleme tekniklerinin sismik davranışına etkisinin değerlendirilmesi amacı ile Bursa Ulu Camii'nin doğu minaresinin dört çeşit modelini oluşturmuşlardır. Bu sayısal modeller, SAP 2000 yazılımında oluşturularak, analizlerini yapmışlardır. Akabinde 1999 Kocaeli depremi'nin Bursa Tofaş istasyonundan elde edilmiş olan ivme kayıtlarını kullanarak zaman tanım alanında dinamik analizlerini yapmışlardır. Analiz sonuçlarının karşılaştırmaları yapılarak, minarelerin deprem etkisi altındaki dinamik tepkileri ile modellemede göz önüne alınan yaklaşımların eserin davranışına olan etkilerini değerlendirmişlerdir. Modelleri incelediklerinde; merdivenli modellerin, merdivensizlere kıyasla daha uzun doğal titreşim periyotuna sahip olduğu görmüşlerdir. Ayrıca minaredaki kapı ve pencere boşluklarının yapısal davranışa etkisinin çok fazla olmadığı vurgulamışlardır [4].

Korumaz ve diğ. (2017) tarafından yapılan bir diğer çalışmada Aksaray'da bulunan orta ağ dönemine ait olan Eğri Minare 3 farklı modelleme birleşimi ile tarihi yapının yapısal durumunu araştırmışlardır. Birkaç yüzyıl boyunca ayakta duran minare eğimli hale gelmiş ve günümüzde minare elik kablolarla desteklenmektedir. Minarenin eğim yönünü, eğim açısını, detaylı 3 boyutlu ağ modeli ile yüksek doğrulukta elde etmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemindeki geleneksel yaklaşımdan farklı olarak tarihi yapıların yapısal durumunu yorumlamak için yüksek doğrulukta lazer tarama tabanlı 3 boyutlu modeli sonlu elemanlar yazılımına direk tranfer edecek bir yöntem üzerinde çalışmışlardır. Çalışma sonucunda bu farklı tekniklerin tarihi yapıların sağlıklı değerlendirilebilmesi için uygun olduğunu vurgulamışlardır [5].

Bayraktar ve diğ. (2018) tarafından yapılan bir diğer çalışmada titreşim testleri kullanılarak restorasyonun yığma taş duvarların dinamik özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla Trabzon Vakıflar Müdürlüğü tarafından restore edilen üç adet yığma taş minareyi seçmişlerdir. Seçtikleri üç minarede derzlerin onarılması, bozulmuş taşların yenilenmesi, imento esaslı sıva tabakasının kazınması, minare şerefesinin üst duvarının yeniden inşa edilmesi, ahşap külahın temizlenmesi ve yenilenmesi gibi restorasyon çalışmaları yapılmıştır. Minarelerin deneysel dinamik özelliklerini restorasyondan önce ve sonra belirlemişlerdir. Restorasyon öncesi ve sonrası mod şekilleri ve doğal frekanslarını karşılaştırmışlardır. Minarelerin restorasyonun dikkatli bir süreçten geçirilmesi gerektiğini,

bazı restorasyon tekniklerinin minarenin dinamik davranışına olumlu bazılarının da olumsuz sonuçlar olduğunu vurgulamışlardır [6].

Erdoğan ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada tarihi Sultan Camisinin kuvvetli deprem hareketi altındaki sismik davranışını incelemişlerdir. Minarelerin narin ve yüksek olmasına rağmen depreme dayanıklı kule benzeri yapılar olduğunu vurgulamışlardır. Minarelerin genel olarak ana yapıya veya onun bileşenine bitişik olarak yapıldığını ifade etmişlerdir. Bu nedenle minarenin dinamik davranışının bağlantı koşullarının dışında bitişik yapının dinamik özelliklerinden de etkilendiğini düşünmüşlerdir. 6 adet minaresi bulunan Sultan Ahmet Camii'sinin dinamik davranışını avluyu çevreleyen revakla bağlantısını araştırmışlardır. Revakla caminin ayrık ve bitişik durumda titreşim modlarını tanımlamak için ortam titreşim testleri gerçekleştirmişlerdir. Sonlu model oluşturarak analizlerini yapmışlardır. [7].

Nohutçu (2019) tarafından yapılan çalışmada Afyon İli Bolvadin İlçesi'ndeki İmaret Cami Minaresi'ni saha titreşim verilerini temel alarak sonlu elemanlar modeli güncellenmiş ve farklı seviyelerdeki yer hareketleri altında kil tuğlalı minarede sismik hasarın yayılımını tahmin etmeyi amaçlayan bir çalışma yapılmıştır. Malzeme özelliklerini, hasarsız malzeme testlerini kullanarak belirlemiştir. Saha titreşim testleriyle minarenin deneysel dinamik özellikleri elde edilmiştir. Sınır koşullarını ve malzeme özelliklerini değiştirerek güncellenen minarenin modeli ve minarenin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ile elde edilen sayısal veriler ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır. 1995 Afyon-Dinar ve 2002 Çay-Sultandağı deprem kayıtlarını kullanarak doğrusal ve doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler yapılmıştır. İki deprem kaydına göre minarenin hasar durumunu elde etmiş ve şiddetli bir deprem sırasında göçme tehlikesi altında olduğunu belirlemiştir [8].

Erdoğan ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada Sultan Ahmet Cami minaresinin kuvvetli deprem hareketi altındaki sismik davranışını incelemişlerdir. Caminin revağının ve minaresinin temas yüzeyleri olduğu için birlikte modellemiş ve saha titreşim testi ile dinamik karakteristikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar modeli oluşturulup, sismik performans analizi yapmışlardır. Farklı modellerin güçlü deprem ve çok güçlü deprem hareketleri altında önemli düzeyde farklı tepkiler verdiğini açığa çıkarmışlardır [9].

Serhatoğlu ve Livaoğlu (2019) tarafından yapılan çalışmada incelenmek üzere Bursa'da bulunan Osmanlı dönemine ait 18 adet minare seçilmiştir. Seçilen tarihi minarelerin,

deneyisel ve sayısal tekniklerle dinamik ve yapısal karakterlerini araştırmışlardır. Minarelerin sayısal modellerine modal analiz yapılırken UST ve saha titreşim testlerini yerinde uygulamışlardır. Frekans sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Ayrıca araştırmalarının bir diğer amacı da ilk periyot ve periyottan etkilenen her bir parametre arasındaki ilişkiyi belirlemektir. On sekiz minareden çıkan sonuçları kullanarak ilk periyotlarını elde etmek için iki farklı ampirik formül geliştirmişlerdir [10].

Çaktı ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada İstanbul’ da bulunan üç farklı minarenin (Mihrimah Sultan, Ayasofya ve Süleymaniye Camilerinin minareleri) ilk harmonik hareketi ve yapısal tepki parametreleri arasındaki ilişkisi değerlendirilmiştir. Minarelerin boyları sırasıyla 40, 73, ve 74 m, narinlikleri ise 12, 6, ve 12 olarak hesaplanmıştır. Doğrusal olmayan dinamik analizlerde ayırık elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Modelleri ölçülen doğal frekaslar ile sayısal modeller kalibre edilmiştir. Bir dizi sinüs dalgası uyarımları ile 0,4 Hz ve 10 Hz ve 0,1 m/s ve 1 m/s arsında farklı frekans-genlik çiftleri oluşturmuşlardır. Dinamik simülasyonun sonuçlarından yığma minareler için genel bir trend gözlemlemişlerdir. Özellikle narinlik ve duvar kalınlığının minarelerin dinamik davranışlarında ve hasarlı modellerinde önemli rol oynadıklarını belirtmişlerdir. Minarelerin dinamik davranışlarının doğrusal olmayan statik analizlerle güvenilir bir şekilde ölçülemeyeceğini ifade etmişlerdir [11].

Bayraktar ve Hökelekli (2020) tarafından yapılan çalışmada zemin ve yapısal davranışların doğrusal olmayışını düşünerek uzun ve ince minarelerin doğrusal olmayan deprem performanslarını farklı depremlere göre performanslarını araştırmışlardır. Uygulama için betonarme, yığma tuğla ve taş olmak üzere üç farklı malzeme seçmişlerdir. Doğrusal olmayan analizler için üç farklı deprem kaydı seçmişler ve geri dönüşüm periyodu 475 yıl olan deprem ile hedef spektrumu karşılaştırmışlardır [12].

Bayraktar ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmada tarihi yığma taş silindirik minareler için ortam titreşim testlerine dayanan basitleştirilmiş bir frekans formülü geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla on dokuz tane yığma taş silindirik minare seçmişlerdir. Yığma taş silindirik minarelerin sayısal modellerini doğrulamak için minarenin boyutlarına dayanan deneyisel doğal frekans kullanılarak basitleştirilmiş bir temel doğal frekans formülü önermişlerdir. Ayrıca ikinci ve üçüncü frekansların tahminine yönelik katsayılarla sunmuşlardır. Önerilen formülle elde edilen sonuçların literatür ve ölçüm sonuçlarıyla tutarlı sonuçlar verdiğini vurgulamışlardır [13].

Türker ve diğ. (2022) tarafından yapılan çalışmada yakın ve uzak fay yer hareketinin tarihsel eğimli minarelerin sismik davranışındaki etkisini incelemişlerdir. Sayısal uygulama olarak Sivas ve Aksaray'daki eğimli minareleri seçmişlerdir. Minarelerin eğimlerini sırasıyla 1,97 derece ve 2,45 derece olarak ölçmüşlerdir. Minarelerin üç boyutlu modelini SAP2000 yazılımını kullanarak oluşturmuşlar ve sayısal dinamik karakteristik özelliklerini sayısal olarak bulmuşlardır. Analizler için yakın ve uzak fay yer hareketi olarak 1992 Erzincan ve 1999 Kocaeli deprem yer kayıtlarını seçmişlerdir. Maksimum deplasmanlarını, taban eğime momentlerini, taban kesme kuvvetlerini ve asal gerilmeleri sonlu elemanlar programını kullanarak belirlemişlerdir. Her iki deprem sonuçların elde ettikleri değerleri karşılaştırmışlardır. Her iki minare modeli içinde geçiş segmentlerinde maksimum gerilmeleri karşılaştırdıklarında yakın fay zemin hareketinin uzak fay zemin hareketinden daha büyük değerler aldığını vurgulamışlardır [14].

Onat ve diğ. (2023) tarafından yapılan çalışmada Malatya'da bulunan Alacakapı minaresinin sismik performansını, mevcut durumunu en iyi temsil eden homojenize edilmiş değişken malzeme özellikleri açısından incelemişlerdir. Minarenin mevcut durumunu tespit etmek için ilk olarak beş adet ivmeölçer kullanarak dinamik tanımlama yapmışlardır. Daha sonra malzeme özelliklerini belirlemek için tahribatlı ve tahribatsız test yapmışlardır. Sonrasında katı model oluşturup model kalibrasyonu yapmışlardır. Tuğla ve harç birimlerini modele homojen olarak tanıtmak için literatürdeki sekiz farklı formülizasyonu dikkate almışlardır. Minarenin gerçek durumunu gösteren en iyi malzeme özelliklerini üç farklı harç dayanımı dikkate almışlardır. Son olarak güçlendirme çözümleri elde etmek için altı farklı deprem kaydı seçerek minarenin deprem davranışını belirlemeye çalışmışlardır [15].

Literatürde özeti geçilen yukarıdaki çalışmalar perspektifinde, bu tez çalışması kapsamındaysa Vaiz Baba Sunullah Melik Camii Minaresi'nin sismik performans değerlendirmesi yapılmış, bu amaçla üç adet gerçek deprem kaydı kullanılarak yapının Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'teki durumlarını analiz etmek için düşey mesnetli ve mesnetsiz modellerinin zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizleri yapılmıştır. Sayısal modelden elde edilen şekil değiştirmeler, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinden sonra yapıda meydana gelen çatlaklar ile kıyaslanmıştır.

3. VAİZ BABA SUNULLAH MELİK CAMİİ VE MİNARESİ

Malatya ili merkez Battalgazi ilçesi Meydanbaşı Mahallesiinde yer alan Vaiz Baba Sunullah Melik Camisi üç kitabesinden birisi olan minare üzerindeki kitabede; 1394 yıllarında Memlûklü Sultanı Melikü'z Zahir Berkuk zamanında, Aleattin Hüsnü oğlu Çerkez tarafından yaptırıldığı belirtilmiştir. Bina ayrı, minare ayrı tipte inşa edilmiştir. Kitabede binanın daha sonra tamirâtı yapılarak minareye eklendiği anlatılmaktadır. Mescit içerisinde 3 mezar bulunmaktadır. Tevabil Gazi, Koca Vaiz Baba ve Battal Gazi'nin yakınlarından birinin (hanımı veya kızı) mezarı bulunmaktadır [16]. Şekil 3.1'de restorasyon öncesi, minare üzerindeki kitabe (a) ve türbe (b) görülmektedir.



Şekil 3.1: a) Minare üzerindeki kitabe [17], b) Türbe [18].

Cami birbirine bitişik kare planlı tek kubbeli cami, türbe ve minareden meydana gelmektedir. Cami ve türbe kısımları harebe hale geldikten sonra onarılmış ve hiçbir özelliği bulunmazken, minaresi aslına uygun biçimde korunmuştur. Şekil 3.2'de gösterilen minare kısmı sekizgen papuçlu ve silindirik gövdelidir. Kaide özensiz kesilmiş taşlarla kare şeklinde örülmüş olup papuç ve gövde kısımları ateş tuğlasından inşa edilmiştir.



Şekil 3.2: Vaiz Baba Sunullah Melik Camii Minaresi [19].

Yapının orjinalinde minare ile bitişik nizamda mescid inşa edilmiş olsa da (Şekil 3.3) daha sonra restorasyon çalışmalarının akabinde mescid ile minare Şekil 3.4’te gösterildiği gibi ayrılmıştır.



Şekil 3.3: Restorasyon çalışmaları öncesinde Tarihi Sunullah Melik Camisi ve Minaresinin birleşim bölgesi [18].

Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’te gösterilen farklı mesnetlenme şekilleri bu tez çalışması kapsamında ayrı ayrı analiz edilerek, mesnet koşulları deprem davranışına etkisi incelenmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.4: Restorasyon çalışmaları sonrasında Tarihi Sunullah Melik Camisi ve Minaresinin birleşim bölgesi.

Yapının sadece minaresinin günümüze kadar orijinali gelmiş, fakat mekanik aşınma sebebiyle ağır bir tahribat almıştır. 2006 yılında yapılması planlanan onarım ve restorasyon proje çalışmaları sırasında mescit ve türbenin orijinal olmadığı anlaşılmıştır. Minaredeki çatlakların ve derzlerin açılması nedeniyle projelerin uygulanamayacağı anlaşılmış ve çalışmalar durdurulmuştur.

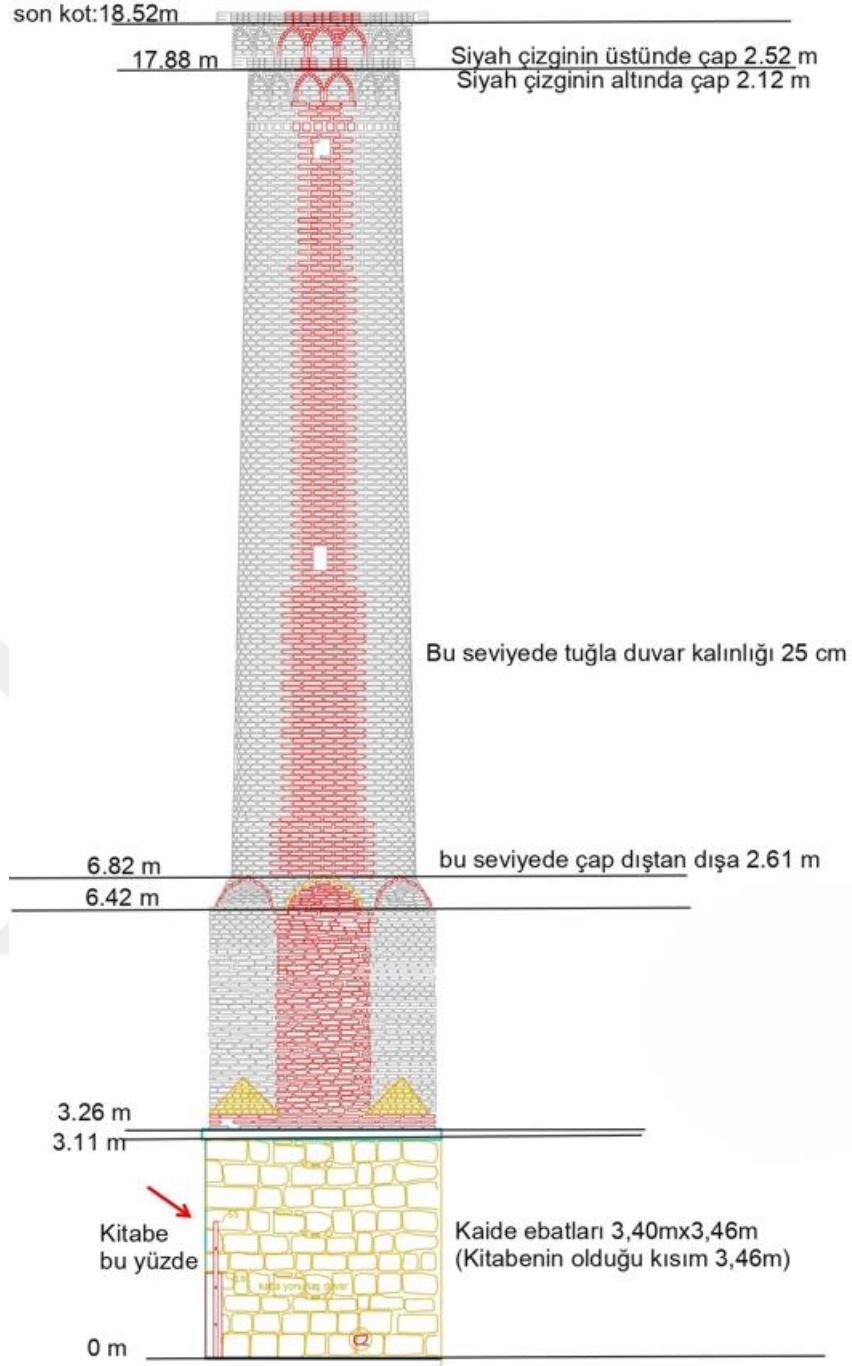
2016 yılında yeniden restorasyon çalışmalarına başlanmış, mescidi aslına uygun olarak yapmak için kaldırılınca altında büyük odalar ve odaların altında dört metre derinlikte tandırlar ortaya çıkmıştır. Daha sonra çalışmalar tekrar durdurulmuştur.

2020’de restorasyon çalışmalarına tekrardan başlanmış, mescid ve türbe günümüzdeki haline getirilmiştir [20].



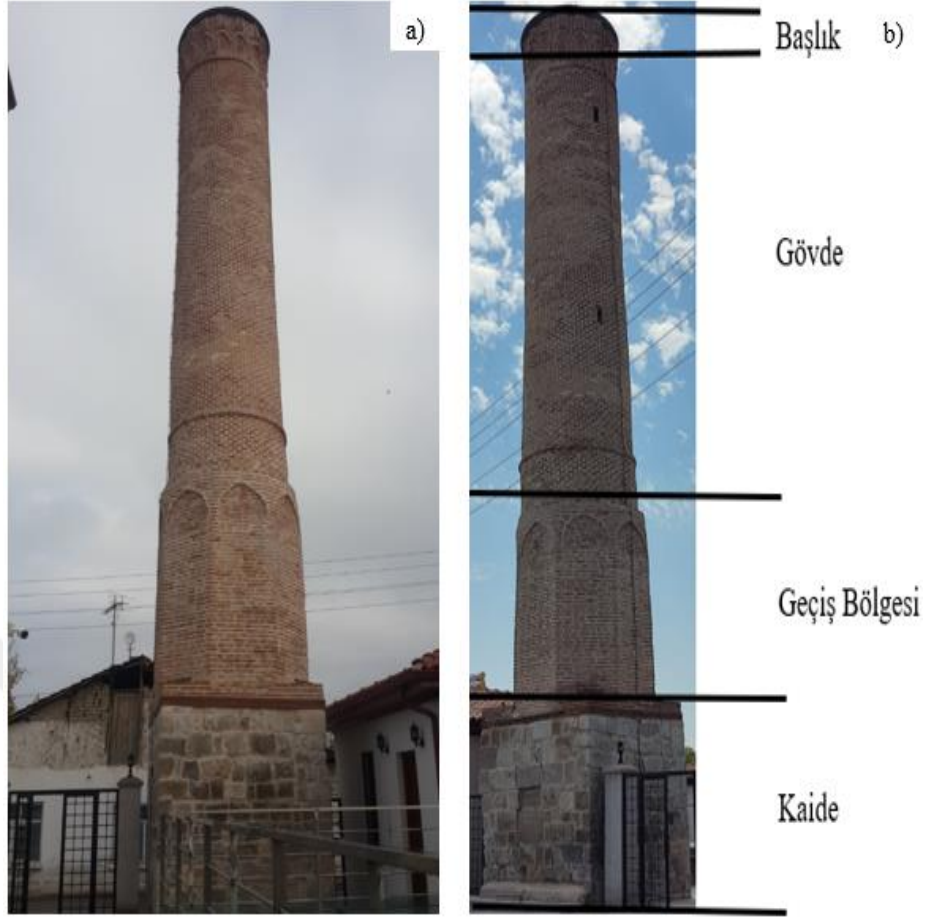
Şekil 3.5: Sunullah Melik Camii Minaresinde yapılan restorasyon çalışmaları [20].

Minare kaidesi çeşitli malzeme özelliğindeki kesme taşlardan yapılmış olup kaide ebatları 3,40 m x 3,46 m'dir. Kaide üzerinde altıgen şeklinde ve ateş tuğlasından yapılmış olan geçiş bölgesi bulunmaktadır. Geçiş bölgesinin üzerinde dıştan dışa çapı 2,61 m ile başlayan silindir şeklinde örülmüş kalınlığı 25 cm'yi bulan ateş tuğlasından duvar bulunmaktadır. 17,88 m kot yüksekliğine kadar çapı 2,12 m kadar düşen silindirik gövde yapılmıştır. Minare içerisinde rıht yüksekliği ortalama 25 cm olan 61 adet merdiven basamağı bulunmaktadır. Minare içerisini havalandırmak için belli yüksekliklerde pencere boşluğu bırakılmıştır. Meydana gelen depremler sonucunda şerefe kısmının üstünde kalan bölgesi yıkılıp, kaybolmuş bu yüzden de gövdeden kesilmiş bir minareyi andırmaktadır. Son basamaktan sonra 64 cm boşluk bırakacak şekilde çelik şapka yapılmıştır. Minarenin mevcut halinin toplam yüksekliği 18,52 m'dir. Şekil 3.6'da minarenin geometrisinin görseli sunulmuştur.



Şekil 3.6: Cami minaresinin geometrisi ve ölçüleri.

Mevcut son durumda minare Şekil 3.7’de; mescid, türbe, tandırların olduğu muhafaza edilmiş alan ve minarenin yerleşimi Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Sekil 3.7: a) Sunullah Melik Camii Minaresi, b) Minarenin Kısımları.



Şekil 3.8: Sunullah Melik Camii Mescid, Cami ve Minarenin Yerleşimi [21].

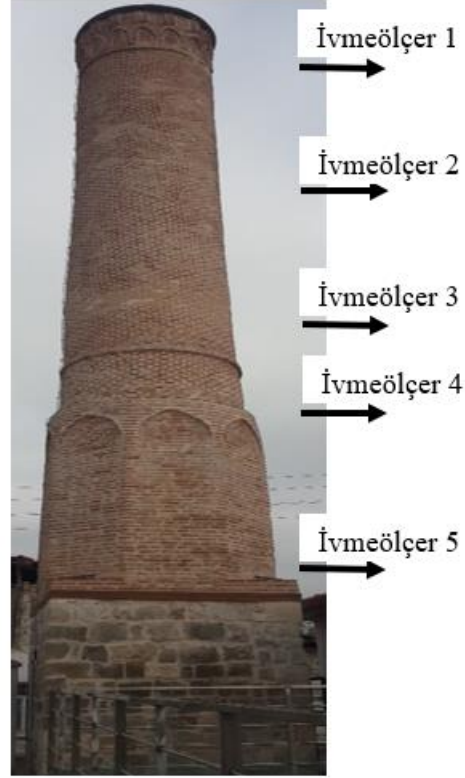
4. OPERASYONEL MODAL ANALİZ

Bu bölümde tarihi yığma minarelerin deprem sırasındaki performansına etki eden dinamik karakteristiklerin deneysel yollarla belirlenmesine yer verilmiştir. Dinamik tanımlama için yapıya beş adet iki eksenli ve beş adet de tek eksenli ivmeölçer yerleştirilmiştir. Bu ivmeölçerlerden iki eksenliler minarenin basamaklarına, tek eksenliler de minarenin kaide kısmının hareketini yakalamak için dıştan köşelere yerleştirilmiştir.



Şekil 4.1: İvmeölçerlerin kaide köşelerine yerleştirilmesi.

Kaidenin üzerinde, geçiş bölgesinin başladığı seviyeye yerleştirilmiş tek eksenli ivmeölçer Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Tek eksenli ivmeölçerleri seviyesinde içeriden kapının önüne ilk iki eksenli ivmeölçer yerleştirilmiştir ve bu seviye 3,20 m’dir. İki eksenli ilk ivmeölçerin 3,05 m üzerine ikinci ivmeölçer, ikinci ivmeölçerin 2,25 m üzerine üçüncü ivmeölçer, üçüncü ivmeölçerin 2,75 m üzerine dördüncü ivmeölçer ve dördüncü ivmeölçerin 4,0 m üzerine son ivmeölçer yerleştirilmiştir. Şekil 4.2’de iki eksenli ivmeölçerlerin minaredeki konumları gösterilmiştir.



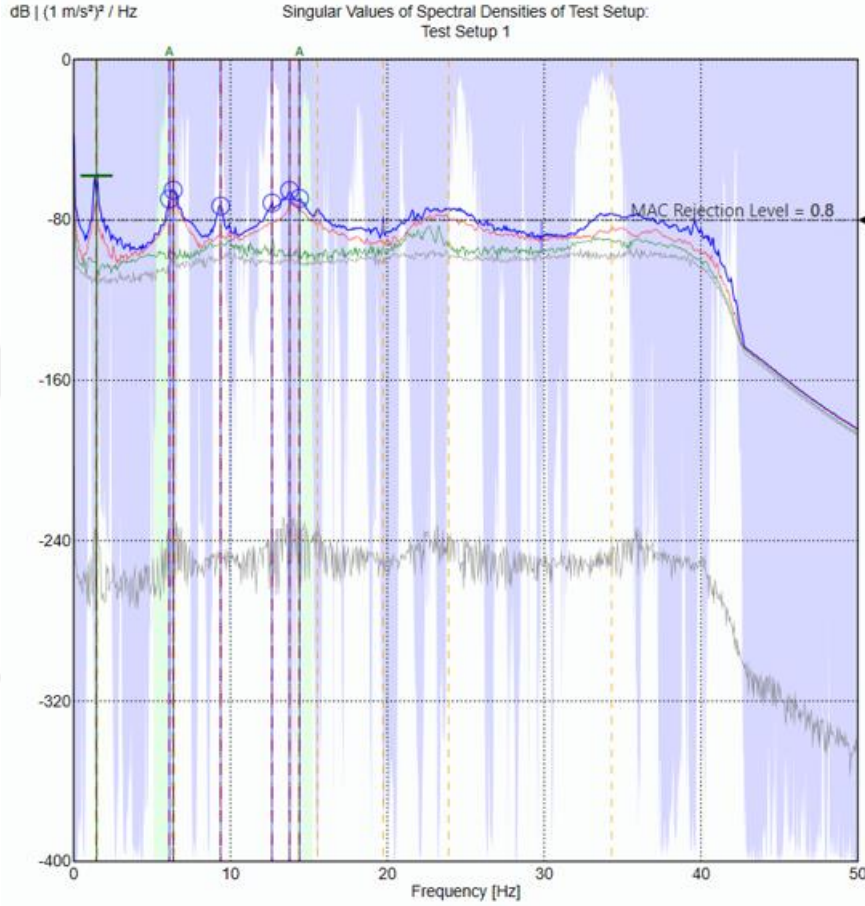
Şekil 4.2: İvmeölçerlerin konumu ve minarenin görünümü.

Şekil 4.3'te ivmeölçerlerin basamaklar üzerine yerleştirilmesi (Şekil 4.3a) ve ölçüm ile ilgili örnek görsel (Şekil 4.3b) yer almaktadır.



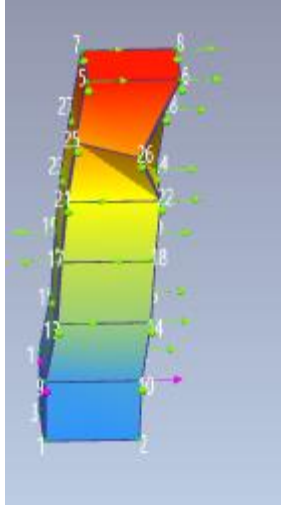
Şekil 4.3: Minarenin farklı bölgelerine ivmeölçerlerin yerleştirilmesi.

Çevresel titreşimler ile yapılan ölçümlerin akabinde alınan veriler önce Scream 4.6 [30] yazılımı ile işlenmiş daha sonra Geopsy [31] programı aracılığıyla filtrelenip ayrılmış ve ARTEMİS [22] programı kullanılarak yapıya ait elde edilen veriler işlenerek dinamik özellikler bulunmuştur. Hesaplamalar yapılırken frekans tanım alanında ayrıştırma yöntemi ile dinamik özellikler elde edilmiş ve elde edilen veriler Şekil 4.4'te görülmektedir.

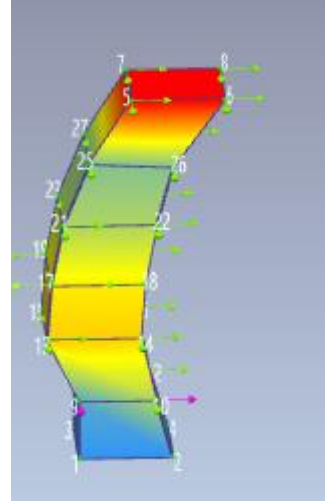


Şekil 4.4: Frekans tanım alanında ayrıştırma yöntemi ile minareye ait frekanslar.

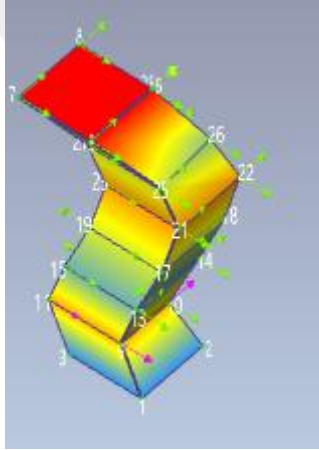
Bu yöntem ile frekans tanım alanında ayrıştırmalarının akabinde, minareye ait dört mod Şekil 4.5'te görülmektedir.



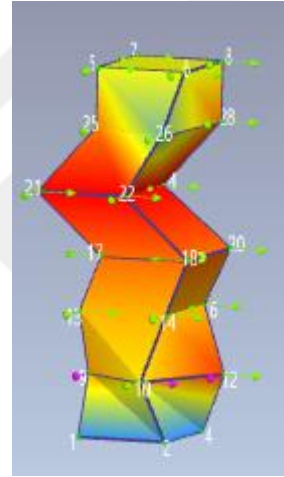
a) $f_1 = 1,46$ Hz



b) $f_2 = 6,10$ Hz



c) $f_3 = 6,35$ Hz



d) $f_4 = 9,37$ Hz

Şekil 4.5: Mod şekilleri ve frekanslar

Operasyonel modal analiz ile bulunan frekanslar ve sönüm oranları Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1: Operasyonel modal analiz sonucu elde edilen dinamik özellikler.

Frekans Numarası	Frekans [Hz]	Sönüm Oranları [%]
1	1,46	2,35
2	6,10	1,42
3	6,35	1,40
4	9,37	1,13

5. MALZEME ÖZELLİKLERİNİN ELDE EDİLMESİ

Bu tez kapsamında incelenen tarihi Vaiz Baba Sunullah Melik Camii Minaresinin malzeme karakteristiklerinin elde edilmesi için tahribatsız test metodları kullanılarak sahada çalışmalar yapılmış ve aşağıdaki sıra izlenerek bulunmuştur.

Önce L tipi kayaçlar için Schmidt Çekici (Şekil 5.1) yardımıyla geri tepme değerleri bulunmuştur. Ardından bu geri dönüş sayılarının ortalamaları bulunup, bulunan değer alınarak literatürde Aydın ve Basu'nun önerdiği formül yardımıyla [23] basınç dayanımına çevrilmiştir.



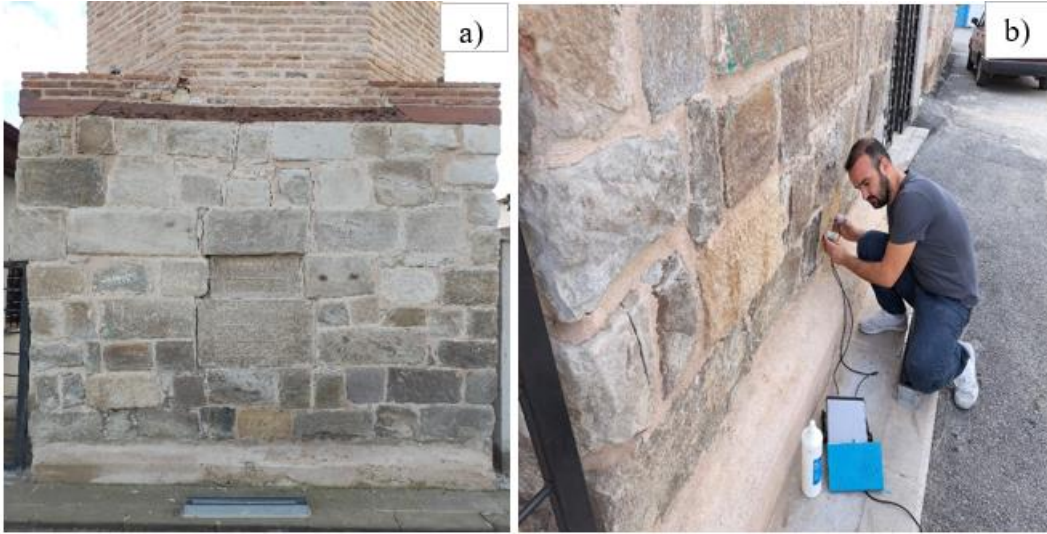
Şekil 5.1: Kayaçlar için kullanılan L tipi Schmidt çekici.

Proceq marka UST cihazı yardımıyla ilk önce P dalgası sonra S dalgası ölçümü yapılmıştır. Bulunan dalga değerleri yardımıyla, literatürdeki ampirik formüller kullanılarak doğal taşın birim hacim ağırlık ve poisson oranı bulunmuştur. UST cihazı kullanılarak sahada ölçümler yapılmadan önce cihazın kalibrasyonu yapılmıştır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2: Ultrasonik Ses Testi cihazının kalibre edilmesi.

Kalibrasyon yapıldıktan sonra minarede ölçüm işlemine geçilmiştir. UST cihaz başlıkları aynı ekseninde birbirlerine paralel olacak şekilde tutulmuş, ilk olarak “P” daha sonra başlık değiştirilerek “S” dalgası gönderilerek ölçüm yapılmıştır.



Şekil 5.3: a) Ölçümün yapıldığı kaide kenarı, b) Ultrasonik Ses Testi cihazı ile ölçüm yapılması.



Şekil 5.4: Ölçümden sonra kesme taşa ait görüntü.

Genel anlamda minarede üç değişik malzeme kullanılmıştır. Bu malzemeler ateş tuğlası, düzensiz kesilmiş doğal taş malzeme ve çelik başlık olarak sıralanabilir. Şekil 3.4’te görülen minarenin kaidesi taştan, gövdesi ateş tuğlasından ve başlık kısmı ise çelik malzemeden yapılmıştır. Kaide tuf ve traverten malzemeden oluşmaktadır. Kaide de traverten kısımlar için yedi; siyah ve yeşil tüfler için ikişer ve kırmızı tuf olan kısım için bir adet olmak üzere toplam beş adet okuma yapılmıştır. Schmidt çekici ve UST cihazı kullanılarak bulunan sayısal veriler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1: Traverten (Kaide).

S. No	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Birim hacim ağırlık (kN/m3)	E dyn (Gpa)	Vdyn (Dinamik poisson oranı)	Schmidt okuması(küp)
1	4131	3305	24,9	331.8	0,26	41
2	3585	2832	24,0	257.7	0,27	37
3	4000	3196	24,7	310.9	0,27	39
4	3515	2812	23,9	230.7	0,26	36
5	3676	3014	24,1	207.8	0,25	32
6	4125	3424	24,8	228.8	0,24	34
7	3376	2724	23,6	198.7	0,26	32
Ort.	3772	2406	24,3	252.3	0,26	36

Çizelge 5.2: Tüf (Kaide).

S. Numarası	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Birim hacim ağırlık (kN/m3)	E dyn (Gpa)	Vdyn (Dinamik poisson oranı)	Schmidt okuması
Siyah 1	3053	2442	22,9	166.9	0,26	40
Siyah 2	3098	2448	23,0	184.6	0,27	42
Ort.	3076	2445	23,0	175.8	0,27	41
Yeşil 1	3049	2440	23,0	167.3	0,25	41
Yeşil 2	2869	2267	22,6	155.6	0,26	40
Ort.	2959	2354	22,8	161.4	0,26	41
Kırmızı	3277	2556	23,4	221.1	0,28	44

Hesaplanan veriler Schmidt Çekici yardımıyla bulunmuş olup geri tepme değerleri literatürde yer alan ve Denklem 1’de verilen bağıntı yardımı ile [23], geri tepmelerinin ortalamaları alınarak taş malzemenin basınç dayanımı hesaplanmıştır.

$$UCS = 1.4459e0.0706SCH(L) \quad (5.1)$$

Denklem 5.1’de UCS, tek eksenli basınç dayanımını; L, kayaları test etmek için L tipi Schmidt çekicini; SCH ise Schmidt çekici okuması sonucunda bulunan ortalama geri tepme değerlerini ifade etmektedir. Malzemelerin kaidede hangi oranda alana sahip olduklarını belirleyebilmek için görüntü işleme yapılmıştır. Görüntü işleme için kaidenin dört bir tarafından görsel alınıp Şekil 5.5’te görüldüğü gibi doğal taşlar ve harç birimleri için ayrıştırma işlemi yapılmıştır.



Şekil 5.5: Görüntü işleme ile doğal taş ve harç oranlarının belirlenmesi (%).

Kaidenin malzeme özellikleri belirlenirken kırmızı, yeşil ve siyah tüf ve traverten oranları kaidenin tüm görünen yüzleri göz önüne alınarak Çizelge 5.3'teki gibi hesaplanmıştır.

Çizelge 5.3: Kaidenin malzeme özellikleri.

Elemanın cinsi	Birim hacim ağırlığı (kN/m ³)	Taşın Poisson oranı	Taşın Basınç Dayanımı (Mpa)	Yüzdesi (%)
Traverten	24,3	0,26	18,18	15
Kırmızı Tüf	23,4	0,28	32,30	1
Yeşil Tüf	22,8	0,26	25,26	57
Siyah Tüf	22,0	0,27	26,20	27
Toplam	23,1	0,26	24,51	100

Çizelge 5.1 ve 5.2'de verilen birim hacim ağırlık Denklem 5.2'de verilen formül ile bulunmuştur.

$$\rho = 0.31V_p^{0.25} \quad (5.2)$$

ρ : Birim hacim ağırlık, V_p : Primer dalga hızı gösterilmektedir [24].

Dinamik poisson oranı ise Denklem 5.3'teki formülizasyon ile hesaplanmıştır.

$$\nu_{dyn} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (5.3)$$

Denklem 3'te yazan v_{dyn} , Dinamik poisson oranı; V_p , primer dalga hızı, V_s ise sekonder dalga hızını ifade etmektedir (Çizelge 5.3) [25].

Dinamik elastik modül ise Denklem 5.4'te verilen formülizasyon yardımıyla hesaplanmıştır.

$$E_{dyn} = \frac{pV_s^2(3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (5.4)$$

E_{dyn} , Dinamik elastisite modülü [26] ifade etmektedir.

Daha sonra bulunan bu basınç dayanımı, Dayaratnam (2008)'in [27] önerdiği formül yardımıyla Denklem 5.5'te gösterilen formülizasyon kullanılarak yığma yapıya ait basınç dayanımına çevrilmiştir.

$$f_{yığma} = 0.275 * f^{0.5} \text{basınç, taş} * f^{0.5} \text{basınç, harç} \quad (5.5)$$

Denklem 5.1'de verilen formülde bulunan parametreler arasında sadece doğal taşı oluşturan elemanın basınç dayanımı değil ayrıca kullanılan harç malzemeye ait dayanım da bulunmaktadır. Harç malzemenin basınç dayanım değeri Schmidth çekici yardımıyla çok fazla çıktığından dolayı gerçeği yansıtmadığı düşünülmüştür. Bu sebepten dolayı harç malzemenin basınç dayanım değeri 1 MPa olarak hesaba katılmıştır. Denklem 1'den bulunan sayısal değer yardımıyla yığma malzemenin elastik modül değeri Denklem 5.6 kullanılarak elde edilmiştir.

$$E_{yığma} = 1000 * f \text{basınç, yığma} \quad (5.6)$$

Sayısal modelde kullanılan malzeme karakteristikleri Çizelge 5.4'te verilmiştir.

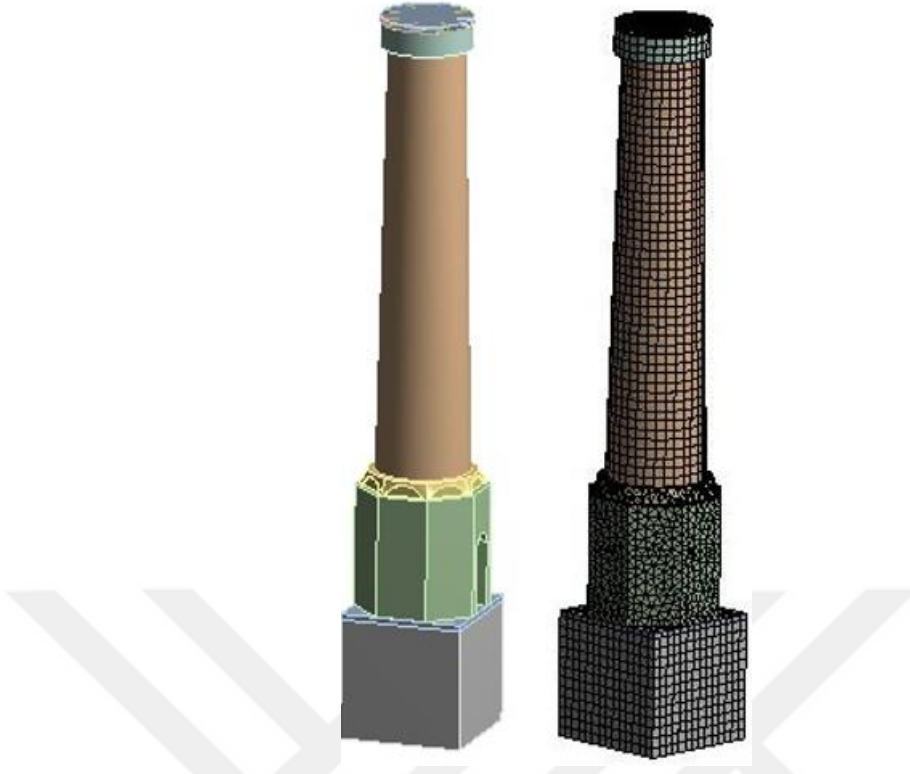
Çizelge 5.4: Sonlu elemanlar modeli için elde edilen malzeme karakteristikleri.

Malzemenin cinsi	Birim hacim ağırlığı (kN/m ³)	Dinamik Poisson Oranı (Taş İçin)	Dinamik Poisson oranı (Harç için)	Taşın Basınç Dayanımı (Mpa)	Harçın Basınç Dayanımı (Mpa)	Elastisite Modülü (MPa) Dayaratnam et al. (2007)	Kırılma Enerjisi (N/m)
Kaide	23,1	0,20	0,05	24,51	1,0	294	15,64
Ateş Tuğlası	17,4	0,16	0,05	4,75	1,0	1398	16,20

Sahadaki çalışmalar ile bulunan malzeme özellikleri, sayısal modelin oluşturulmasının ardından yapılan modal analizler yardımıyla güncellenmiştir.

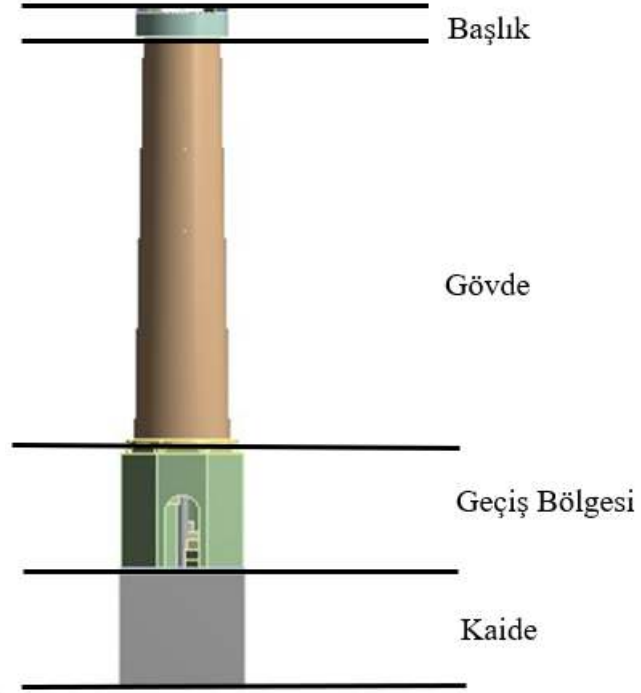
6. SONLU ELEMENLAR MODELİ VE MODELİN KALİBRASYONU

Vaiz Baba Sunullah Melik Camii Minaresinin sayısal modeli ANSYS [28] yazılımında bulunan Space claim aracılığıyla üç boyutlu olarak modellenmiştir. Akabinde, model ANSYS [28] sonlu eleman yazılımına gönderilerek 25 cm ağ aralığında, 66708 düğüm noktası ile 34137 eleman oluşturularak ve analizlere uygun duruma getirilmiştir.



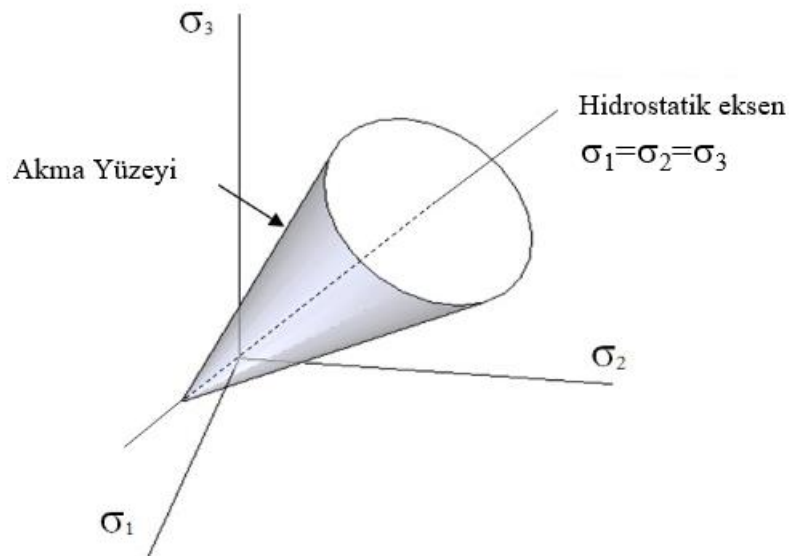
Şekil 6.1: Tarihi Vaiz Baba Sunullah Melik Cami Minaresinin üç boyutlu modeli.

Modelin oluşturulmasının ardından malzeme karakteristikleri modele tanıtılmıştır. Homojen malzeme değerleri sayısal modelde üç farklı malzeme özelliği olarak göz önüne alınmıştır. Bu malzemeler minarenin kaide, gövde ve başlık kısmının malzeme özellikleridir. Bunların model üzerinde temsil edilen elemanlardaki görüntüleri Şekil 6.2’de verilmiştir. Şekil 6.2’de gösterilen minarenin kaide kısmı taş malzemedir, gövde kısmı ateş tuğlasından ve başlık kısmı ise çelikten oluşmaktadır.



Şekil 6.2: Minarenin önden görünüşü ve kısımları.

Vaiz Baba Sunullah Melik Camii Minaresinin sayısal modelinde malzeme kanunu olarak yığma yapılarda literatürde sık kullanılan malzeme modeli olan “Drucker-Prager Modeli”nden yararlanılmıştır. Kullanılan malzeme kanununda hesaplamalara eklenen homojen özellikteki yığma elemana ait akma yüzeyi Şekil 6.3’te verilmiştir.



Şekil 6.3: Üç eksenli durumda Drucker-Prager (D-P) Modeli [18].

Ateş tuğlası için Onat ve diğ. [15]'nin karakterize ettiği malzeme özellikleri kullanılmıştır. Kaideye ait yığma malzeme için ise tahribatsız yöntemle hesaplanan doğal taşların özellikleri, harcın basınç dayanımı 1,0 MPa alınarak hesaplanmıştır. Sunullah Melik Camii Minaresinde kullanılan homojen malzeme karakteristikleri Tablo 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1: Yığma elemana ait malzeme karakteristikleri.

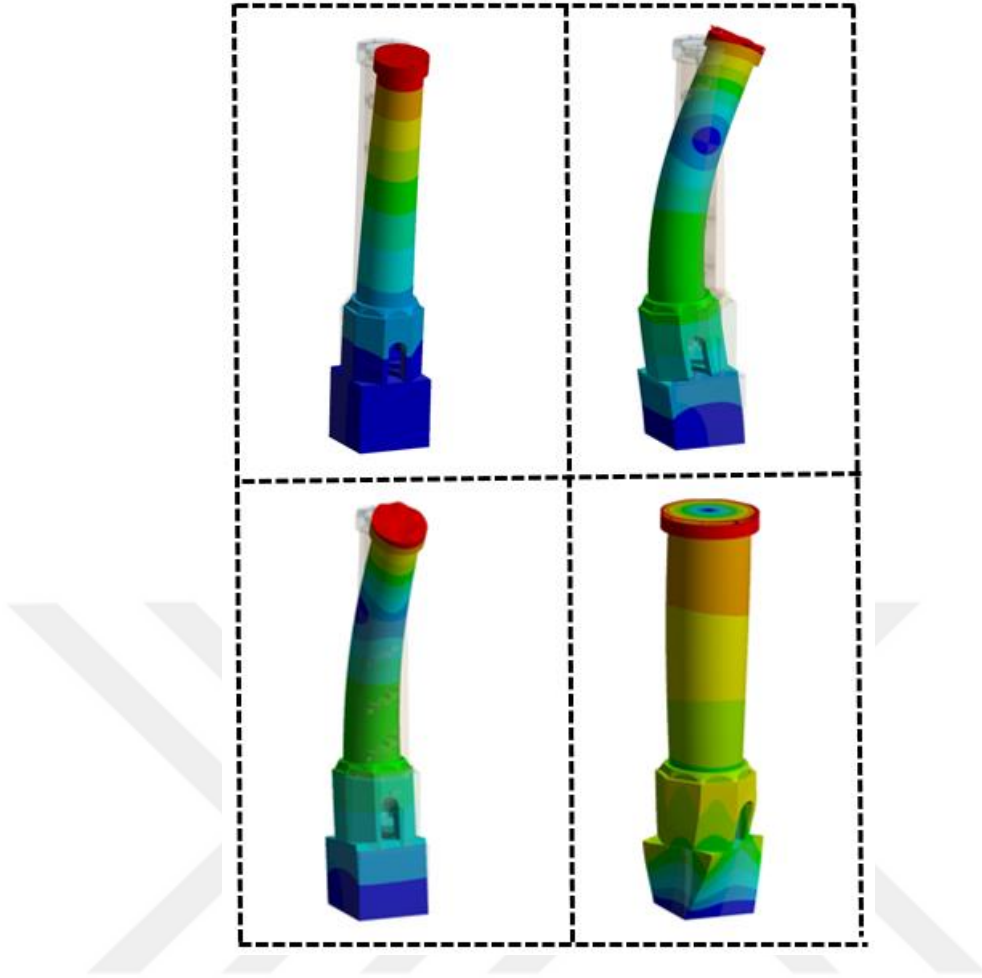
Eleman	Birim hacim ağırlık (kN/m ³)	E _{din} (MPa) Kalibrasyon öncesi	Dinamik Poisson oranı (Taş İçin)	Dinamik Poisson Oranı (Harç İçin)	Taşın Basınç Dayanım Değeri (Mpa)	Harcın Basınç Dayanımı Değeri (Mpa)	Yığma Minarenin Basınç Dayanımı Değeri (MPa)
Kaide	23,1	748	0,20	0,05	24,51	1,0	1,36
Gövde	17,4	1747	0,16	0,05	4,75	1,0	4,75
Başlık	78,5	2E5	0,30	---	---	---	---

Tablo 6.1'deki homojen değerler hesaplanırken önce kaidenin basınç değerleri 500 ile çarpılmış daha sonra kalibrasyon sırasında aşamalı olarak 195'e düşürülmüştür. Kalibre edilmiş homojen elastik modül değerleri kaide için 294 MPa değerinde, ateş tuğlası için de 1398 MPa değerinde sabitlenmiştir. Anılan malzeme özellikleri kullanılarak model kalibre edilmiş kalibre edilen modelin frekans değerleri deneysel değerlere ortalama %5,3 hata oranı ile yakınsamıştır.

Çizelge 6.2: Model kalibrasyon öncesi ve sonrasındaki frekanslar.

Frekans (Hz)	Deneysel frekanslar	Kalibrasyonda n önceki frekanslar	Kalibrasyon öncesi fark (%)	Kalibre edilmiş frekanslar	Kalibrasyon sonrası fark (%)
f1	1,46	1,95	33,6	1,46	0,0
f2	6,10	7,13	16,9	5,59	8,36
f3	6,35	7,21	13,5	5,88	7,40
f4	9,37	11,99	27,9	8,86	5,44
		Ortalama	22,9	Ortalama	5,30

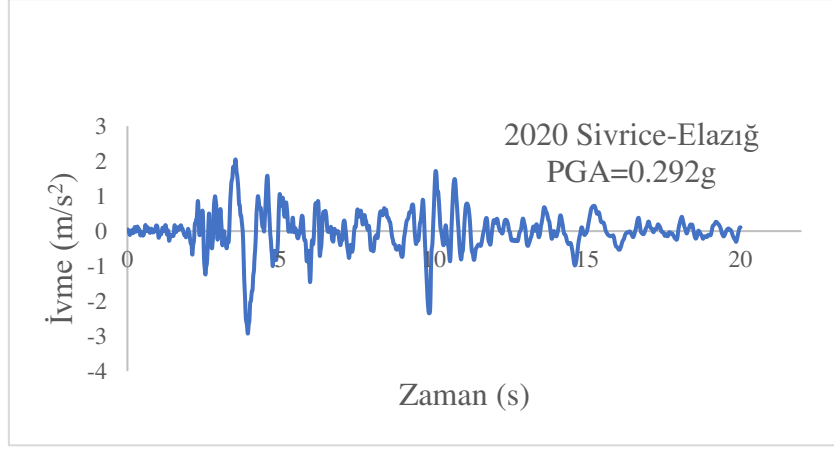
Mod şekilleri ise Şekil 6.4'te gösterilmiştir.



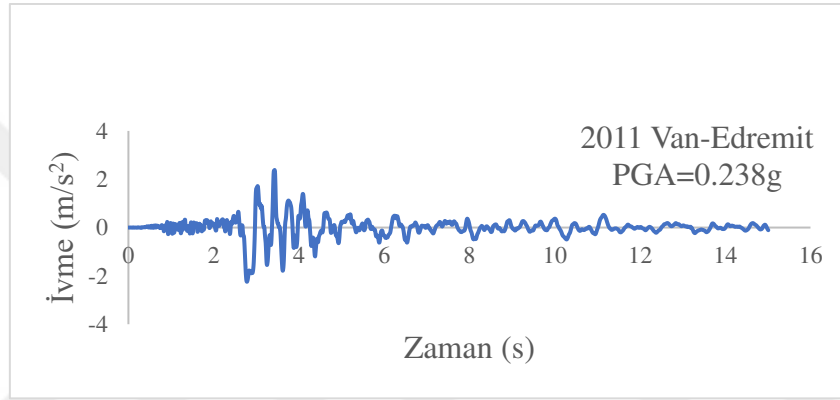
Şekil 6.4: Kalibre edilmiş sayısal modelin mod şekilleri.

7. ZAMAN TANIM ALANINDA DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZ

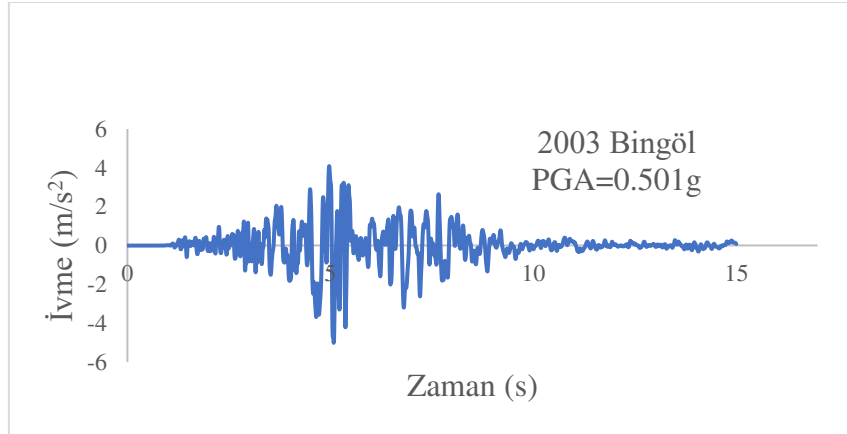
Sonlu elemanlar modeli kalibre edildikten sonra mesnetsiz ve düşey mesnetli durumlarda ayrı ayrı 1 Mayıs 2003 Bingöl, 9 Kasım 2011 Van-Edremit ve 24 Ocak 2020 Sivrice-Elâzığ deprem ivme kayıtları yardımıyla toplamda altı adet zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yapılmıştır. Bu ivme kayıtları Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı'nın (AFAD) açık erişim internet adresinde var olan veri tabanından alınmıştır [29]. Yatay doğrultudaki en büyük yer ivme kaydı seçilmiş ve bu en büyük ivme kaydı çift yönlü olarak yapıya etki ettirilmiştir. Analizlerde düşey ivme de kullanılmış olup programa üç doğrultuda analiz yaptırılmıştır. Bu üç depreme ait yataydaki ivmeler Şekil 7.1'de verilmiştir.



a) 24 Ocak 2020 Sivrice-Elâzığ Deprem Kaydı.



b) 9 Kasım 2011 Van-Edremit Deprem Kaydı.



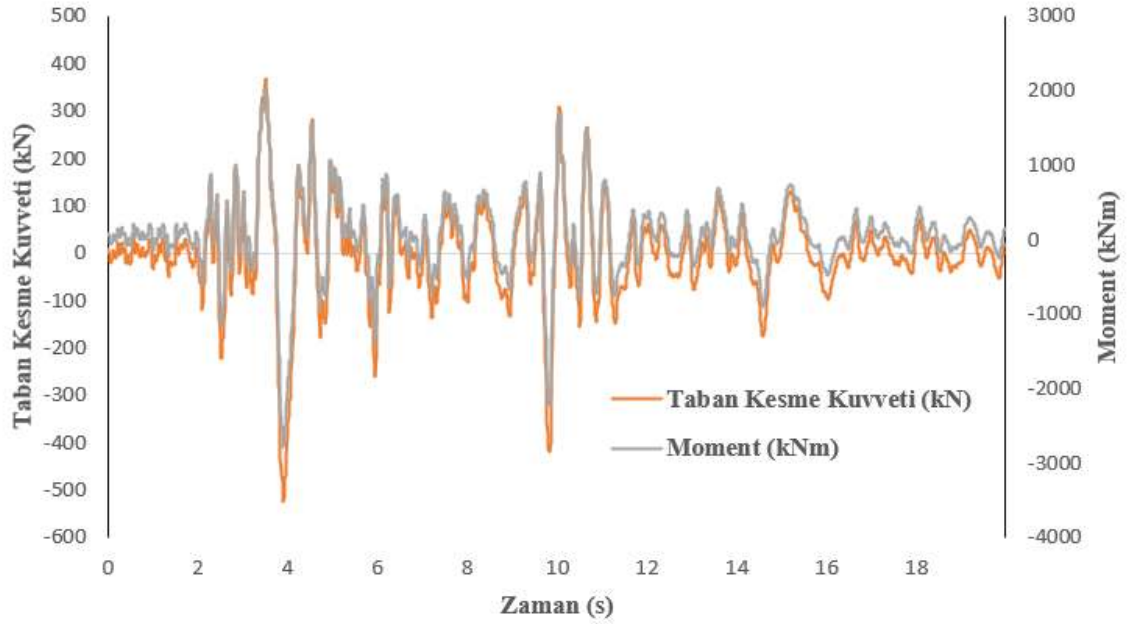
c) 1 Mayıs 2003 Bingöl Deprem Kaydı.

Şekil 7.1: Zaman tanım alanında analizlerde kullanılan deprem ivme kayıtları.

Zaman tanım alanındaki sismik kayıtlar, analizlerde 0.01sn zaman dilimi hassasiyetiyle analizlerde göz önüne alınmıştır.

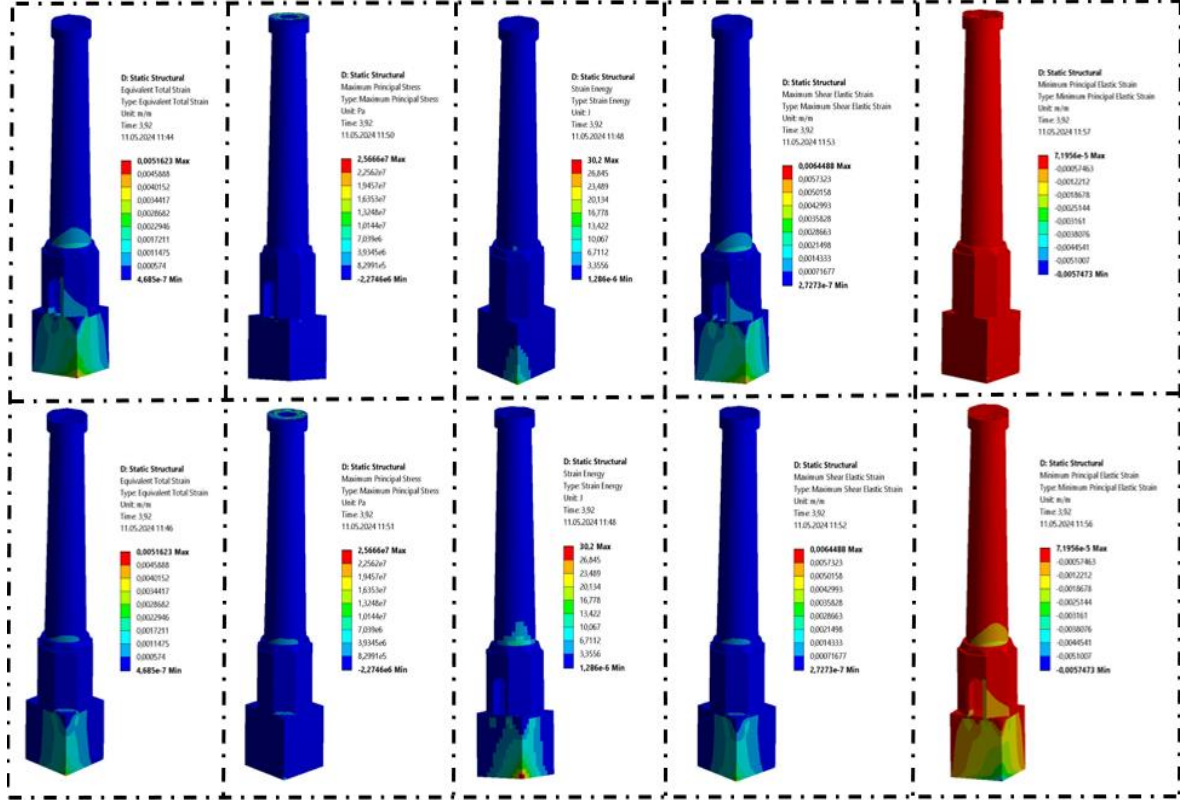
7.1 Ayrık (Düşey Mesnetsiz) Durumda Yapılan Analiz Sonuçları

Ayrık durumda Elâzığ deprem kaydı kullanılarak yapılan doğrusal olmayan analizden sonra minarenin tepki ve şekil değiştirmeleri (gerilme-çatlak ilerleme durumu) Şekil 7.2 ve Şekil 7.3'te verilmiştir.



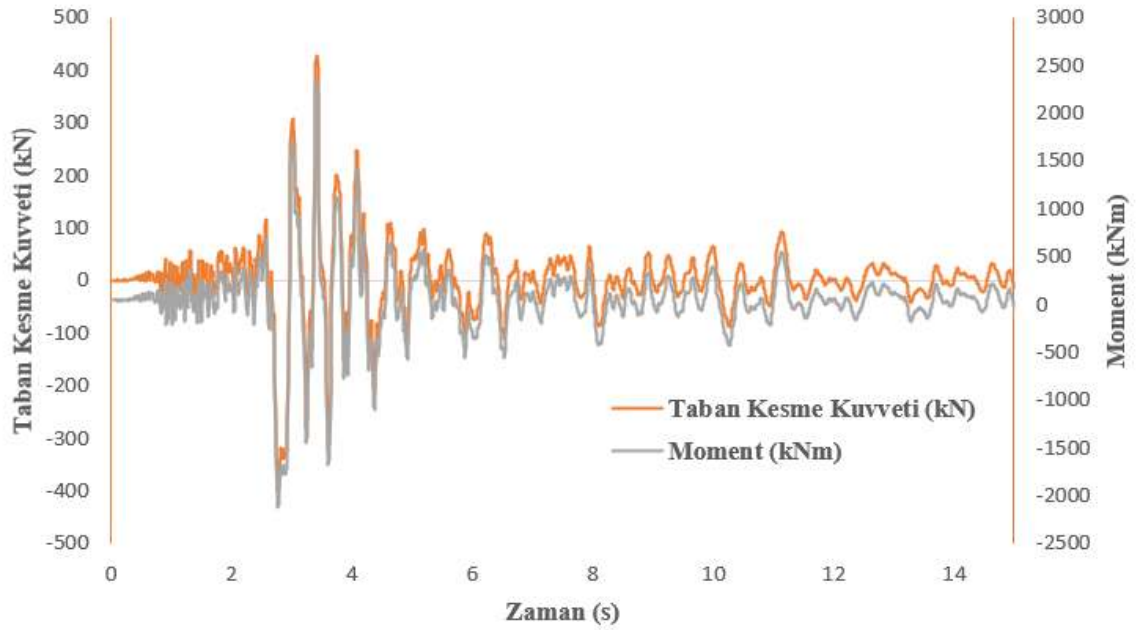
Şekil 7.2: Mesnetsiz durumda Vaiz Sunullah Melik Minare'sinin 24 Ocak 2020 Sivrice-Elâzığ depremine ait taban kesme kuvveti-devrilme momenti tepki grafiği.

Elâzığ deprem kaydı ile yapılan analizde maksimum tepki değeri 3,92'nci saniyesinde meydana gelmiş olup yatay ötelenme değeri 95,43 mm olarak bulunmuştur. 3,92'inci saniyedeki çatlak ilerleme ve gerilme dağılımı görselleri Şekil 7.3'te verilmiştir.



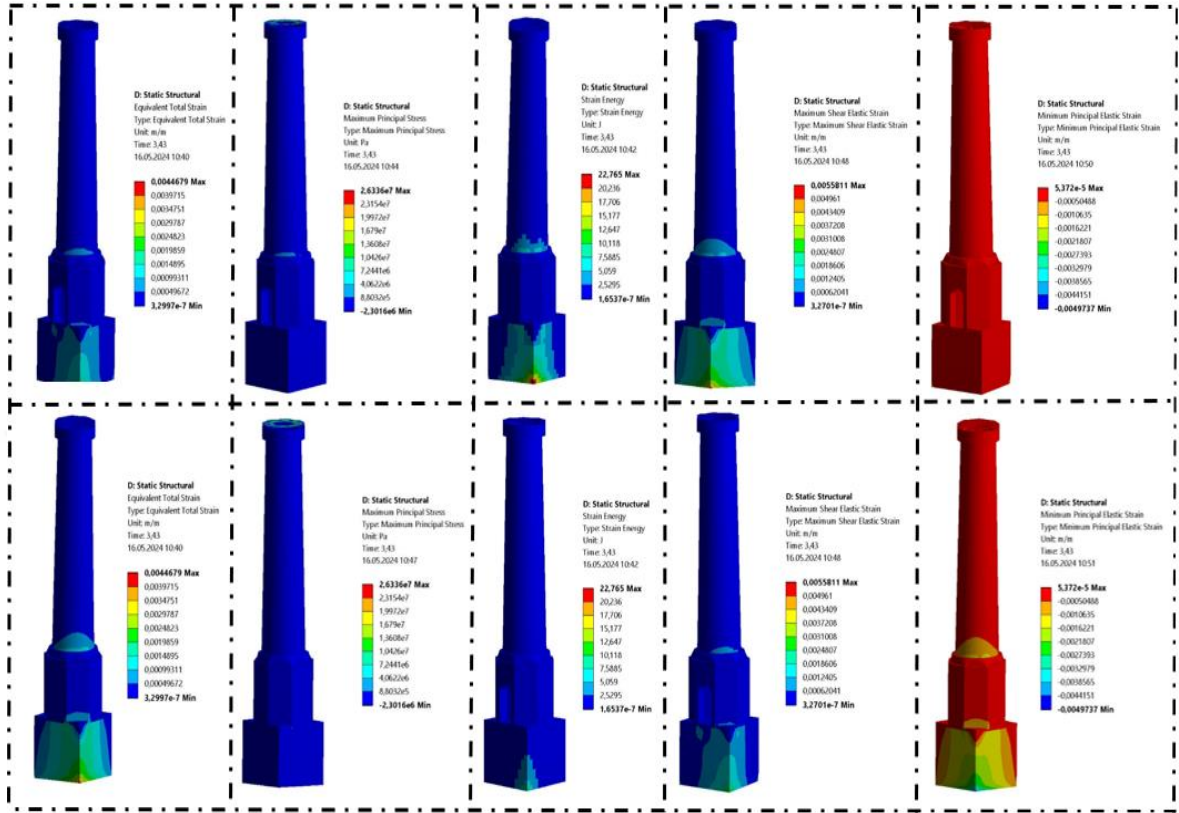
Şekil 7.3: Mesnetsiz durumda Elâzığ depremi sonrası Vaiz Baba Sunullah Melik Minare'sine ait şekil değıştirmeler.

Ayrık durumda Van-Edremit deprem kaydına ait minarenin taban kesme kuvveti ve devrilme momenti tepkileri Şekil 7.4'te verilmiştir.



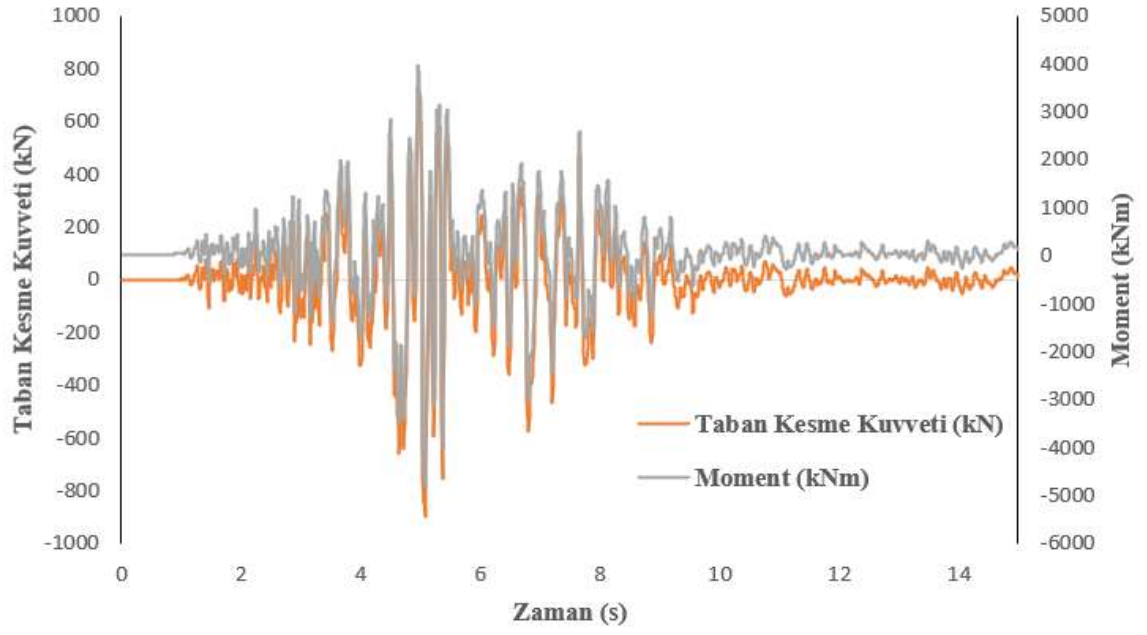
Şekil 7.4: Mesnetsiz durumda Vaiz Sunullah Melik Minare'sinin 23 Kasım 2011 Van-Edremit depremine ait taban kesme kuvveti-devrilme momenti tepki grafiğı.

Bu analizlerin azami tepkisi 3,43'üncü saniyede bulunmuş olup yatay ötelenme değeri 77,85 mm olarak elde edilmiştir. 3,43'üncü saniyeye ait gerilme değerleri dağılım verileri ve çatlak ilerlemesi Şekil 7.5'te verilmiştir.



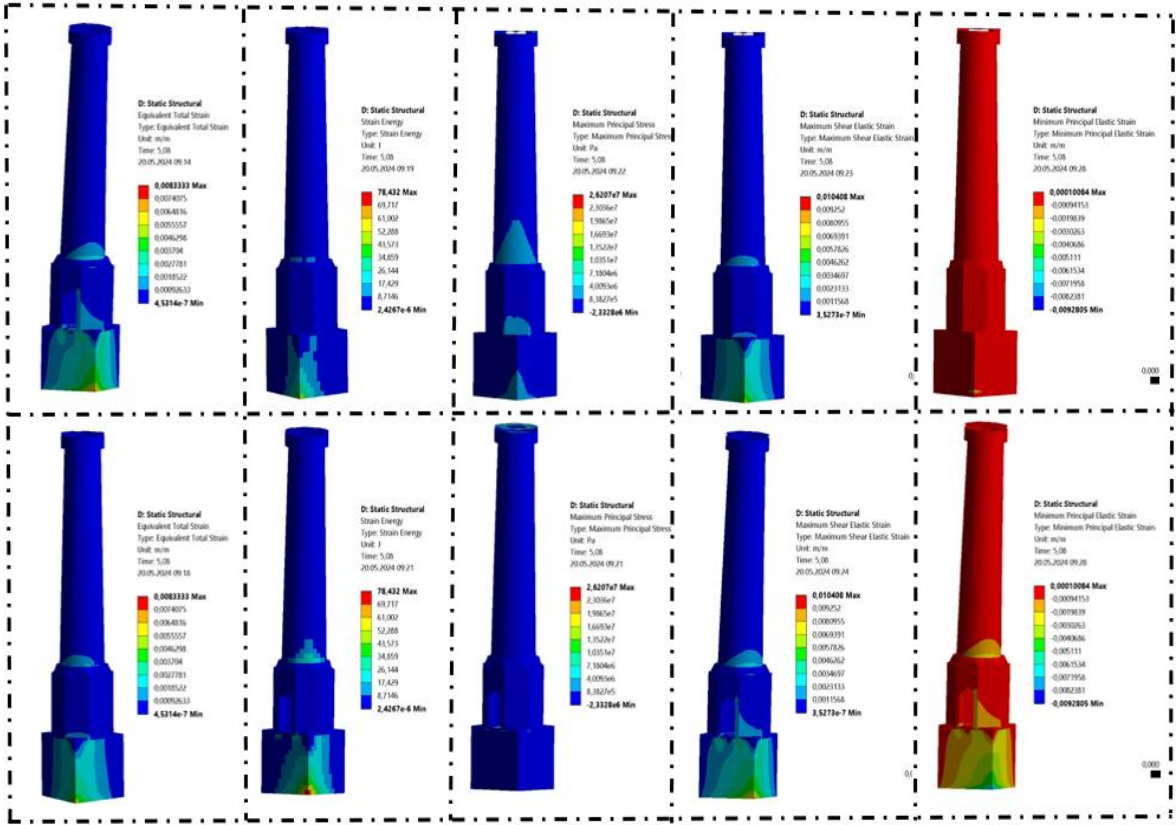
Şekil 7.5: Mesnetsiz durumda Van-Edremit depremi sonrası Vaiz Baba Sunullah Melik Minare'sine ait şekil değiştirmeler.

Düşey mesnetsiz durumda yapılan son analizde Vaiz Sunullah Melik Cami Minaresi 1 Mayıs 2003 Bingöl deprem ivme kaydı etki ettirilerek tepki değerleri bulunmuştur. Bingöl depremine ait yapılan analizlerde bulunan taban kesme kuvveti-devrilme momenti tepki grafiği Şekil 7.6'daki gibi elde edilmiştir.



Şekil 7.6: Mesnetsiz durumda Vaiz Sunullah Melik Minare'sinin 1 Mayıs 2003 Bingöl depremi sonrası taban kesme kuvveti-devrilme momenti tepki grafiği.

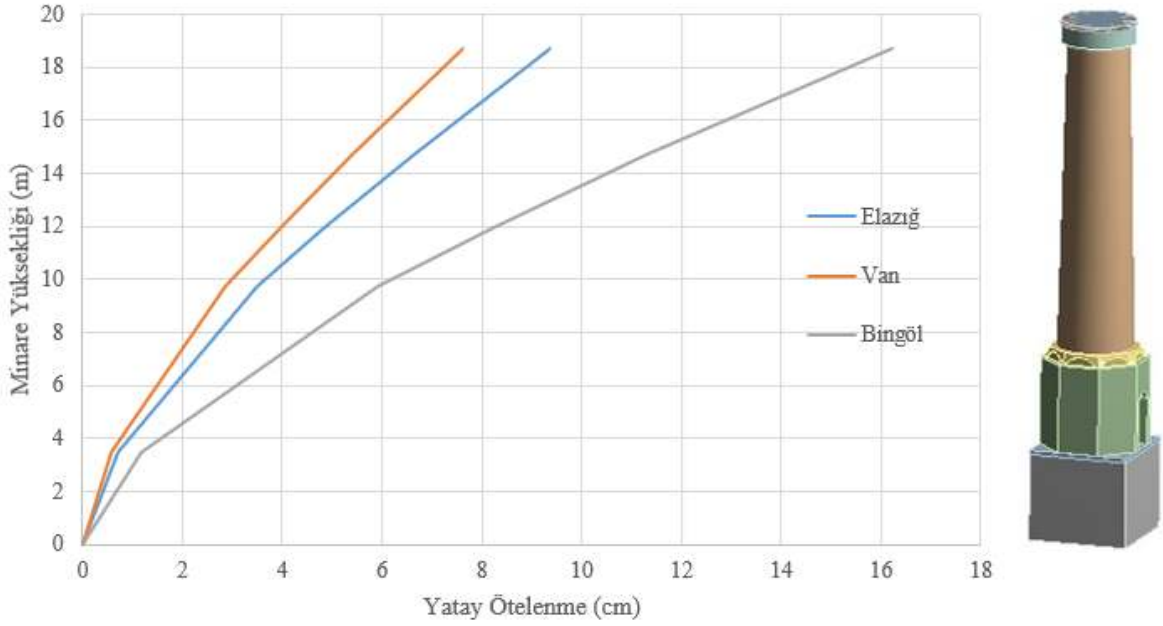
Bingöl deprem ivme kayıtları kullanılarak yapılan analizlerde ise azami tepki değerleri 5,08'inci saniyede bulunmuş olup sayısal yatay ötelenme değeri 162,1 mm olarak elde edilmiştir. 5,08'inci saniyede oluşan çatlak ilerleme ve gerilme dağılım değerleri Şekil 7.7'de verilmiştir.



Şekil 7.7: Mesnetsiz durumda Bingöl depremi sonrası Vaiz Baba Sunullah Melik Minare'sine ait şekil değiştirmeler.

Bu analizler ile birlikte mesnetsiz durumda tarihi Vaiz Baba Sunullah Melik Cami Minaresine uygulanan doğrusal olmayan analizler de tamamlanmıştır.

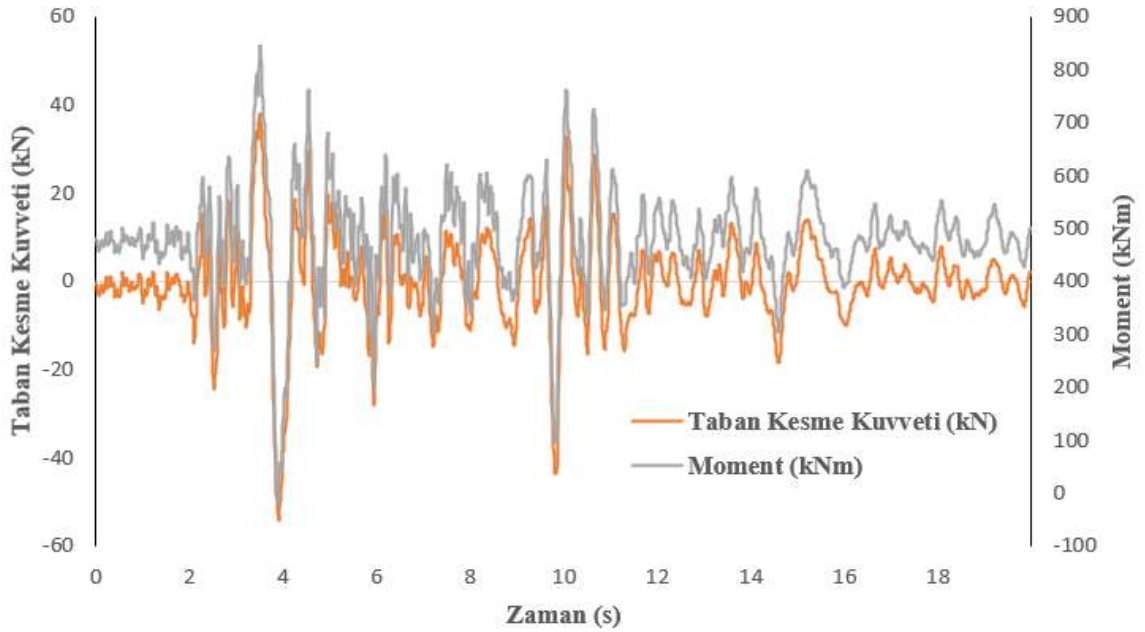
Düşey mesnetsiz durumda analizler sonucunda elde edilen tepeler yer değiştirmesinin minarenin yüksekliği ile olan ilişkisini gösteren grafik Şekil 7.8'da gösterilmiştir.



Şekil 7.8: Mesnetsiz durumda Vaiz Baba Sunullah Melik Minare'sine ait yatay ötelenme-minare yüksekliği arasındaki ilişki.

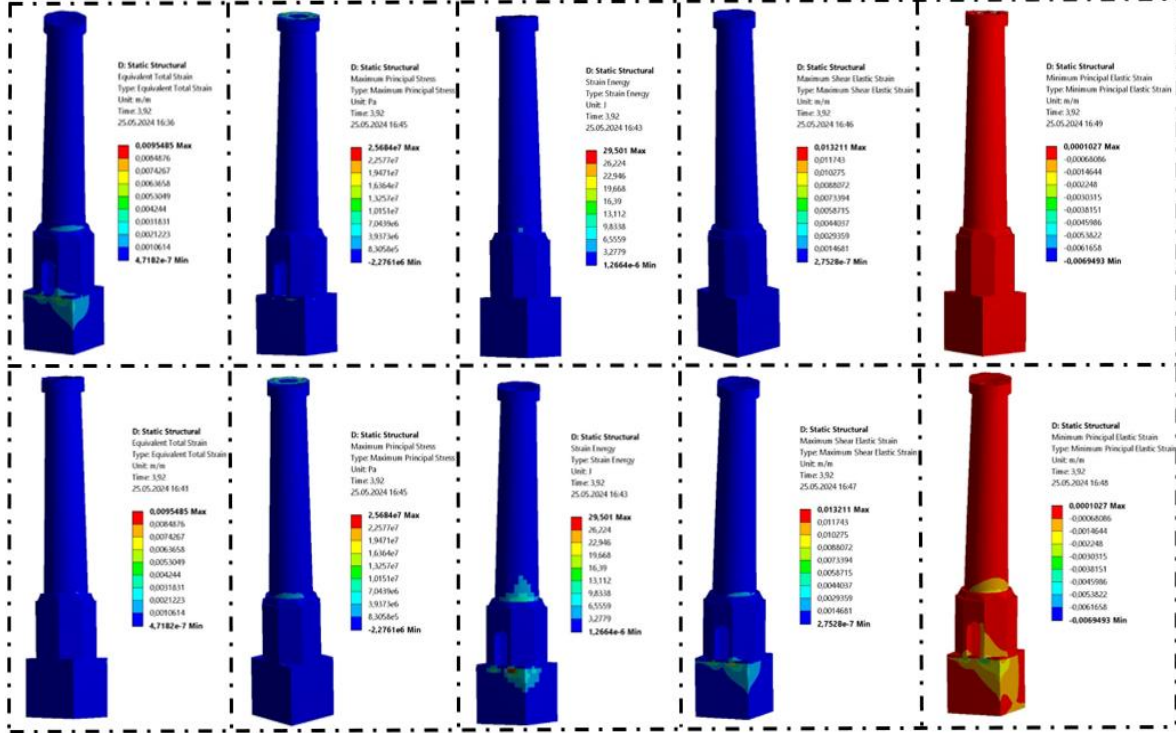
7.2 Bitişik (Düşey Mesnetli) Durumda Yapılan Analiz Sonuçları

Düşey mesnetli durumda Elâzığ deprem ivme kaydı kullanılarak yapılan doğrusal olmayan analizlerden sonra minarenin tepki, şekil değiştirmeleri (gerilme-çatlak ilerleme durumu) Şekil 7.9 ve Şekil 7.10'da verilmiştir.



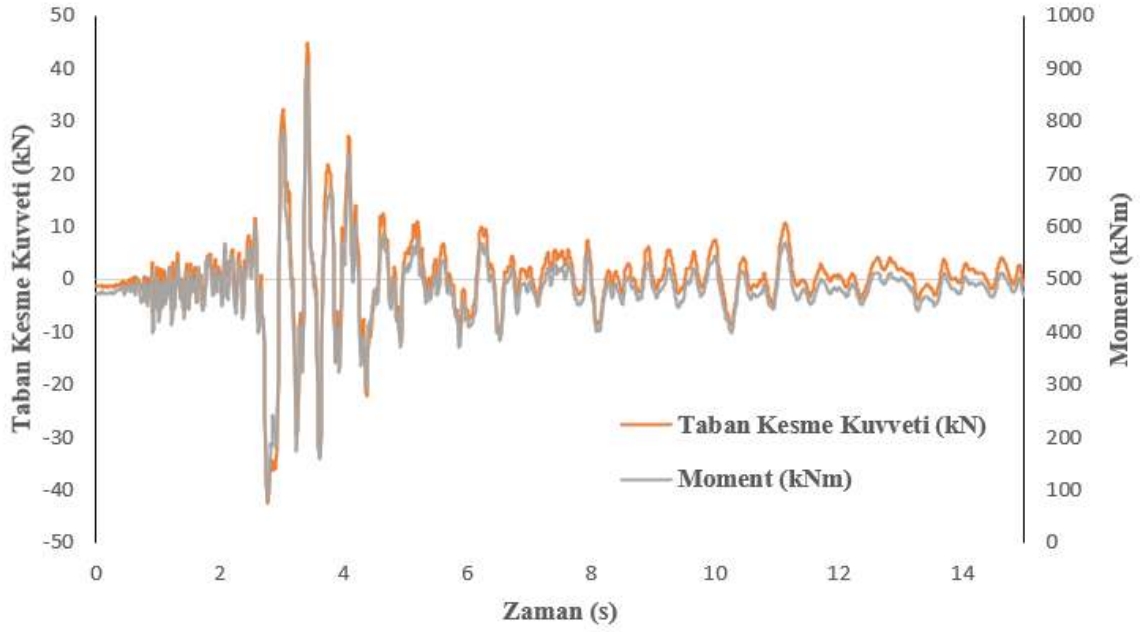
Şekil 7.9: Mesnetli Durumda Vaiz Sunullah Melik Minare'sinin 24 Ocak 2020 Sivrice-Elâzığ depremine ait taban kesme kuvveti-devrilme momenti tepki grafiği.

Elâzığ deprem kaydı ile yapılan analizde maksimum tepki değeri 3,92’nci saniyede meydana gelmiş olup yatay ötelenme değeri 62,98 mm olarak bulunmuştur. 3,92’nci saniyedeki çatlak ilerleme ve gerilme dağılımı görselleri Şekil 7.10’da verilmiştir.



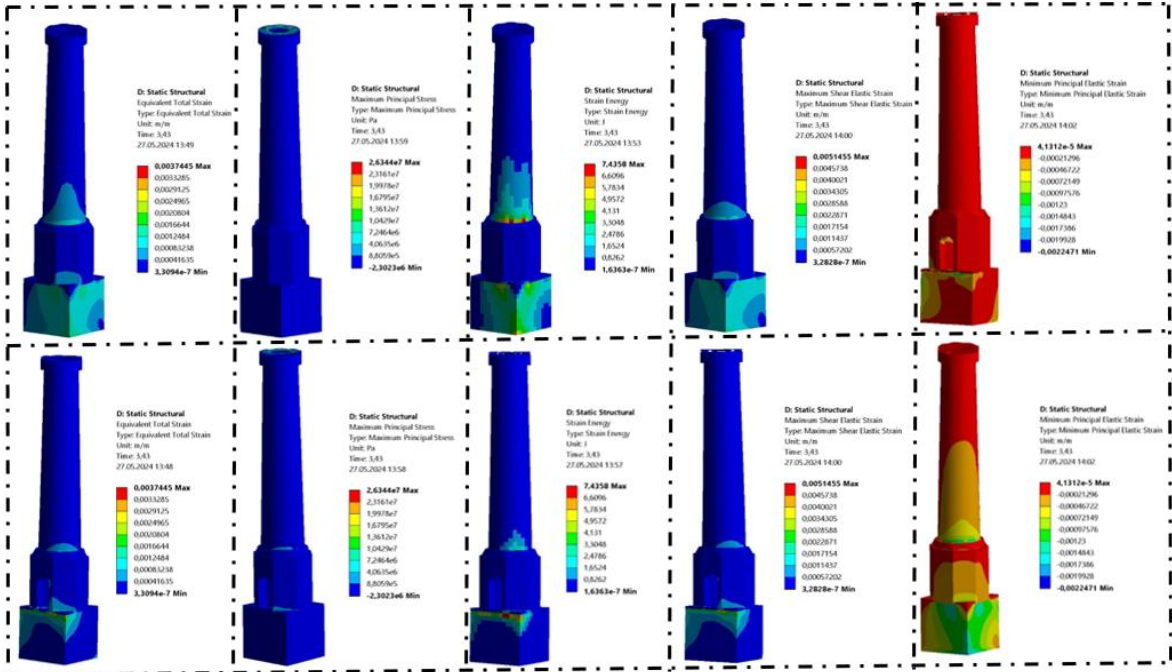
Şekil 7.10: Mesnetli durumda Elazığ depremi sonrası Vaiz Baba Sunullah Melik Minare’sine ait şekil değiştirmeler.

Düşey mesnetli durumda Van-Edremit deprem kaydına ait minarenin taban kesme kuvveti ve devrilme momenti tepkileri Şekil 7.11’de verilmiştir.



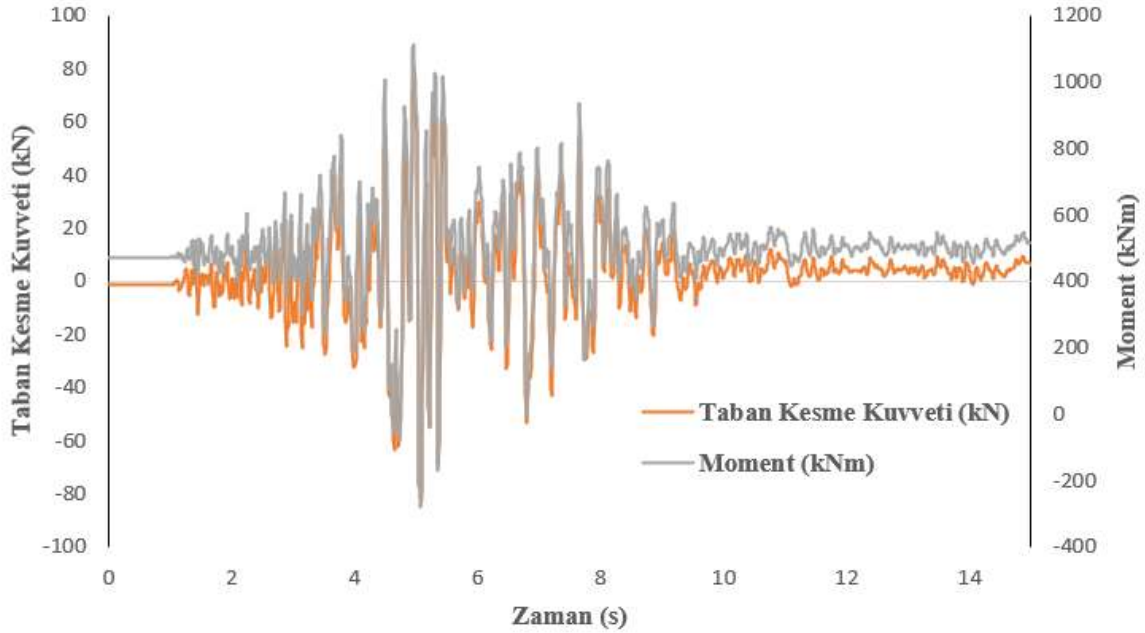
Şekil 7.11: Mesnetli durumda Vaiz Sunullah Melik Minare'sinin 23 Kasım 2011 Van-Edremit depremine ait taban kesme kuvveti-devrilme momenti tepki grafiği.

Bu analizlerin azami tepkisi 3,43'üncü saniyede bulunmuş olup yatay ötelenme değeri 58,16 mm olarak elde edilmiştir. 3,43'üncü saniyeye ait gerilme değerleri dağılım verileri ve çatlak ilerlemesi Şekil 7.12'de verilmiştir.



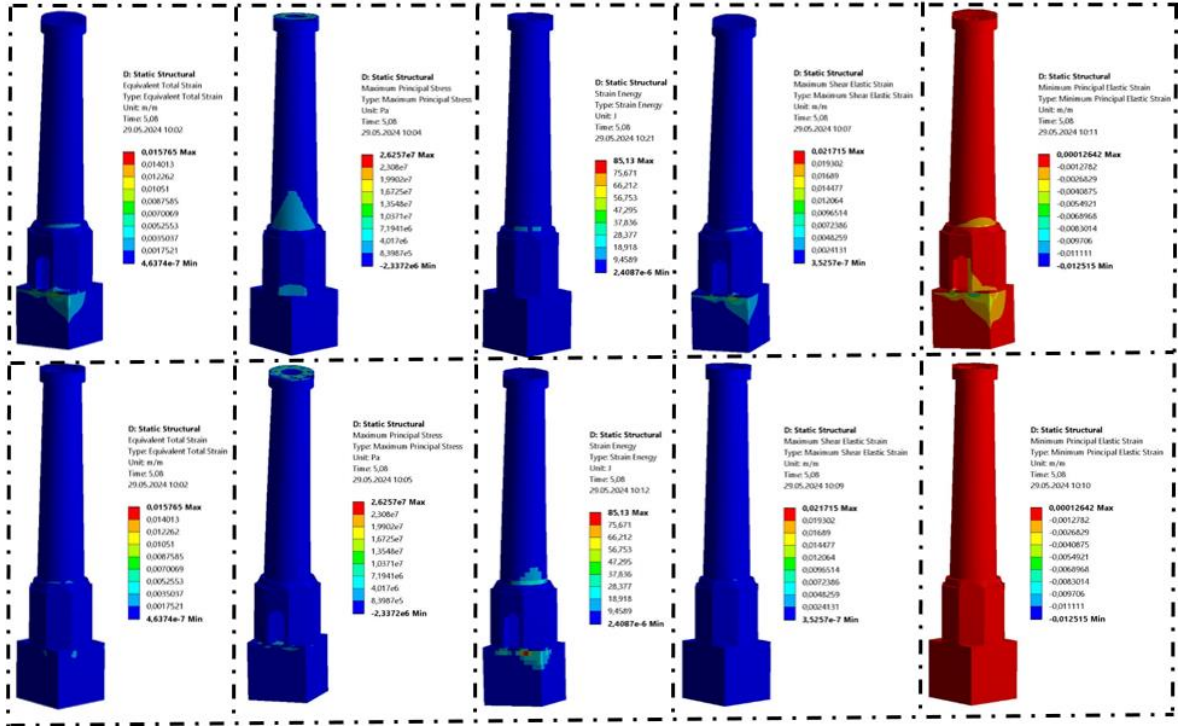
Şekil 7.12: Mesnetli durumda Van-Edremit depremi sonrası Vaiz Baba Sunullah Melik Minare'sine ait şekil değiştirmeler.

Düşey mesnetli durumda yapılan son analizde Vaiz Sunullah Melik Cami Minaresi 1 Mayıs 2003 Bingöl deprem ivme kaydı etki ettirilerek tepki değerleri bulunmuştur. Bingöl depremine ait yapılan analizlerde bulunan taban kesme kuvveti-devrilme momenti tepki grafiği Şekil 7.13'teki gibi elde edilmiştir.



Şekil 7.13: Mesnetli durumda Vaiz Sunullah Melik Minare'sinin 1 Mayıs 2003 Bingöl depremi sonrası taban kesme kuvveti-devrilme momenti tepki grafiği.

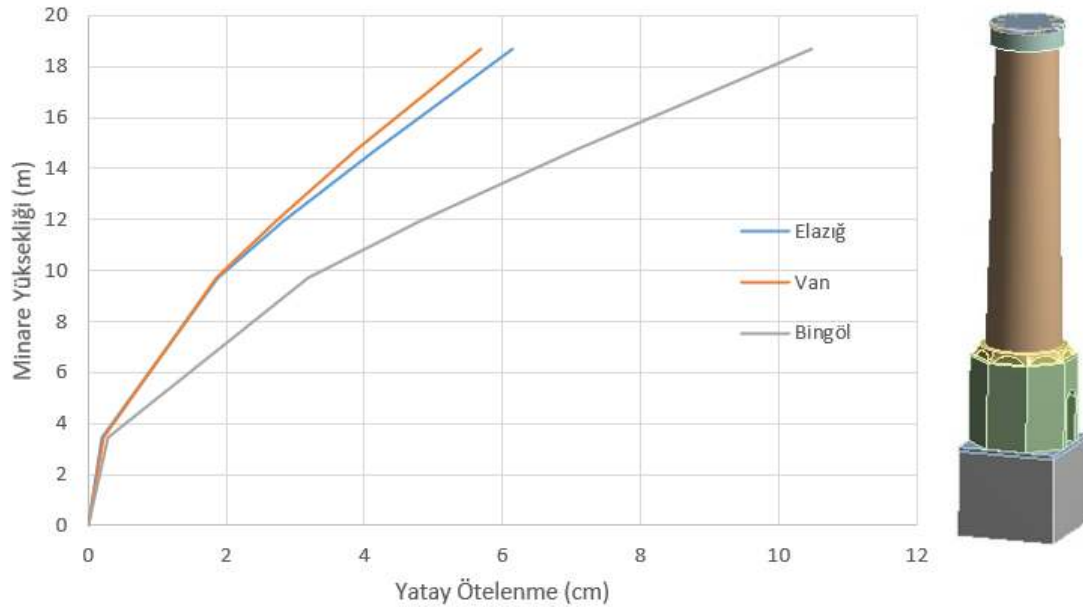
Bingöl deprem ivme kayıtları kullanılarak yapılan analizlerde ise azami tepki değerleri 5,08'inci saniyede bulunmuş olup sayısal yatay ötelenme değeri 107,0 mm olarak elde edilmiştir. 5,08'inci saniyede oluşan çatlak ilerleme ve gerilme dağılım değerleri Şekil 7.14'te verilmiştir.



Şekil 7.14: Mesnetli durumda Bingöl depremi sonrası Vaiz Baba Sunullah Melik Minare'sine ait şekil değiştirmeler.

Bu analizler ile birlikte düşey mesnetli durumda tarihi Vaiz Baba Sunullah Melik Cami Minaresine uygulanan doğrusal olmayan analizler de tamamlanmıştır.

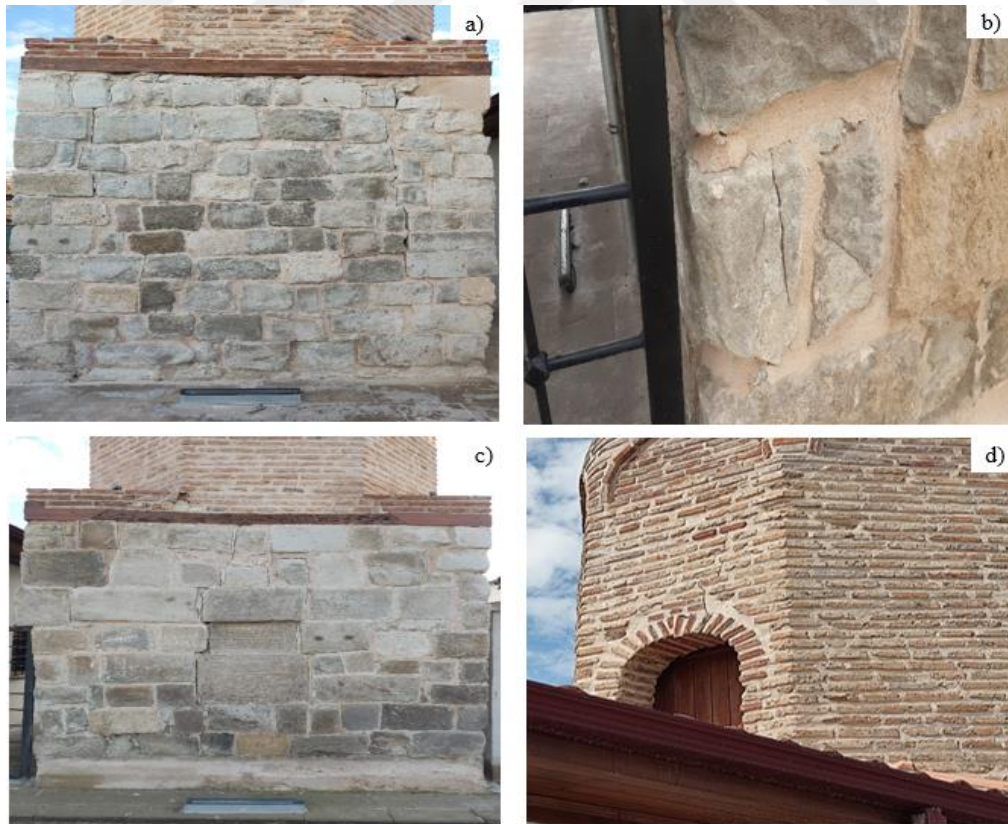
Mesnetsiz durumda analizler sonucunda elde edilen tepe depasmanının minarenin yüksekliği ile olan ilişkisini gösteren grafik Şekil 7.15'te gösterilmiştir.



Şekil 7.15: Mesnetli durumda Vaiz Baba Sunullah Melik Minare'sine ait yatay ötelenme-minare yüksekliği arasındaki ilişki.

Şekil 7.8 ve Şekil 7.15 incelendiğinde minarenin yanındaki herhangi bir yapıya mesnetlenmesi durumunda daha az deplasman yaptığı görülmektedir. Bu da yapının hasar almasını engellemektedir. Fakat yapının mesnetlendiği yüzeyde kaidenin üst kısımlarında önemli düzeyde hasarlar başlamakla birlikte yapının korunması açısından önem arz etmektedir. Ayırık yapının düşük ivme düzeylerinde kaidenin altından itibaren harekete katıldığı ve bu durumun da hasar oluşuna olumsuz katkıda bulunduğu görülürken, düşey mesnetli modelin ise 0,3g'nin altındaki ivme düzeylerinde minarenin ortalarına kadar önemli bir fark oluşturacak kadar hareket etmediği görülmüştür. Bu durumun da kaidenin rijitliğinin düşmesine engel olmasına katkıda bulunduğu görülmektedir. Fakat 0,5g'nin üzerindeki ivmelerde kaidenin üzerinden itibaren önemli miktarda deplasman oluşturduğu için yapının hasarlarının kesit değişiminin olduğu kısımlarda çok fazla yoğunlaşmasına sebebiyet verdiği gözlenmiştir.

6 Şubat 2023'te meydana gelen Kahramanmaraş depremlerinden sonra minarede özellikle kaide kısmında oluşan hasar durumları şekilde gösterilmiştir. Depremler sonrasında oluşan hasar durumları ile yapılan analizler sonucunda elde edilen hasar durumlarının benzer şekilde kaidede, kapı girişinde ve gövde içinde boyuna çatlak olarak kendini göstermiştir.



Şekil 7.16: 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinden sonra minarede oluşan çatlak ve şekil değiştirmeler.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında Malatya ili, Battalgazi ilçesi, Meydanbaşı Mahallesinde yer alan Vaiz Baba Sunullah Melik Camii Minaresinin Sismik Performans Değerlendirmesi yapılmıştır. Minare kaidesi çok özenli olmayan kesme taşlarla gövde kısmı ise ateş tuğlasından inşa edilmiştir. Minarenin gövde kısmının üzerinde ise çelik şapka bulunmaktadır. Çalışma kapsamında hasarsız test metodu ile malzemelerin karakteristik özellikleri bulunmuştur. Ölçümlerden sonra deneysel mod analizleri yapılarak minarenin dinamik özellikleri elde edilmiştir. Bulunan malzemeye ait özellikler modele tanıtıldıktan ve deneysel modal analizleri yapıldıktan sonra bulunan frekans verileri ile deneysel yöntemler yardımıyla bulunan frekans verileri karşılaştırılmış ve frekanslar arasındaki farkın kalibrasyondan önce ortalaması %22,9 iken, kalibrasyondan sonra bu fark %5,30'a kadar düşürülmüştür. Deneysel modal analizin tarihi eserlerin malzemelerinin kalibrasyonu konusunda çok önemli olduğunun altı çizilmektedir. Tarihi eserlerin performans analizi süreçlerinde, malzeme özellikleri en fazla belirsizlik içeren adım olarak karşımıza çıkmaktadır. Daha önce olmuş depremlerden kısmen hasar almış ve bu hasar gözle görünür düzeyde olmayan eserlerin malzeme özellikle sadece literatüre göre belirlendiği zaman çok yüksek malzeme özellikleri alınabilir.

Sayısal modelin güncellenme süreçlerinden, yapının 2020 Elazığ-Sivrice depremi sonrası hasar aldığı ve bu hasarın kaidede yoğunlaştığı yüksek frekans oranlarında hareketin ortaya çıktığı görülmektedir.

Zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde 3 farklı depreme ait ivme kayıtları kullanılmıştır. Bu deprem kayıtları 1 Mayıs 2003 Bingöl, 9 Kasım 2011 Van-Edremit ve 24 Ocak 2020 Sivrice-Elâzığ depremlerine ait kayıtlardır. Analizlerde şu an ki durumun dışında minarenin restorasyon yapılmadan, minarenin mescidden ayrılmadan önceki durumunu simüle etmek için, modele düşey ankastre mesnet tanıtılıp, analizler yapılmış ve yapılan analizlerle kullanılan deprem ivme kayıtlarının sonucunda oluşan azami tepkiler ile el edilen tepkilerin oluşturduğu deplasmanlar bulunmuştur. Doğrusal olmayan dinamik analizlerde meydana gelen çatlak ve hasarların da 6 Şubat tarihinde Kahramanmaraş'ta olan depremlerin hasar ve çatlakları ile benzer bölgelerde olduğu gözlemlenmiştir.

Minareye bitişik yapılmış olan mescidin aslında yapıya payanda görevi gördüğü ve bu durumunda tepe deplasmanını sınırladığı görülmüştür.

Bu 3 depremde de mesnetli ve mesnetsiz durumlarda maksimum tepkinin olduğu zamanların birbiriyle aynı, depremlerin türüne göre farklı olduğu görülmüştür. Bu durumun sebeplerini ise depremin odak noktasına olan uzaklığı-yakınlığı, depremin şiddeti ve büyüklüğünün etki ettiğini söyleyebiliriz. Ayrıca minarede maksimum deplasmanın oluşturan depremin ise Bingöl deprem ivmesi olduğu tespit edilmiştir.

Analizler sonucunda maksimum gerilmelerin kaide geçiş bölgesi ve geçiş bölgesi gövde birleşimlerinde olduğu görülmüştür. Ayrıca kaide de gerilme yığılmalarının ve çatlakların oluşumlarının fazla olduğu gözlenlenmiştir. Hasarların yerleri ve boyutu irdelendiğinde kaidenin etrafının çelik payandalarla desteklenmesinin minarenin performansını ve rijitliğini arttıracak değerlendirilmektedir.

Minarenin mescidden ayrılmasının Şekil 7.16 (b) dekinde benzer burulma çatlaklarına sebep olduğu anlaşılmaktadır. Restorasyon çalışması ile mescidin minareden ayrılmasının minarenin rijitliğine katkısı olmadığı değerlendirilmiştir.

Ülkemizde genellikle orta büyüklükte fakat kuvvetli depremlerin olduğu ve gelecekte de bu tarz depremlerin oluşma ihtimalinin kuvvetli olduğunu söyleyebiliriz. Yaptığımız bu çalışma ile özellikle deprem riskinin yüksek olduğu bölgelerinde bulunan kısmen hasar almış ya da almamış tarihi yığma minarelerin gelecekte yapılacak olan restorasyon, onarım ve güçlendirme çalışmalarında alternatif bir bakış açısı oluşturabileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Dogangun, A., Acar, R., Sezen, H., Livaoglu, R., (2008). "Investigation of dynamic response of masonry minaret structures". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6, 505-517.
- [2] Peña, F., Lourenço, P. B., Mendes, N., Oliveira, D. V., (2010). "Numerical models for the seismic assessment of an old masonry tower". *Engineering Structures*, 32(5), 1466-1478.
- [3] Bayraktar, A., Altunişik, A. C., Sevim, B., Türker, T., (2011). "Seismic response of a historical masonry minaret using a finite element model updated with operational modal testing". *Journal of vibration and control*, 17(1), 129-149.
- [4] Mutlu, Ö., Şahin, A., (2016). "Investigating the effect of modeling approaches on earthquake behavior of historical masonry minarets-Bursa Grand Mosque case study". *Sigma*, 7(2), 123-136.
- [5] Korumaz, M., Betti, M., Conti, A., Tucci, G., Bartoli, G., Bonora, V., ... Fiorini, L., (2017). "An integrated Terrestrial Laser Scanner (TLS), Deviation Analysis (DA) and Finite Element (FE) approach for health assessment of historical structures. A minaret case study". *Engineering Structures*, 153, 224-238.
- [6] Bayraktar, A., Çalik, İ., Türker, T., Ashour, A., (2018). "Restoration effects on experimental dynamic characteristics of masonry stone minarets". *Materials and Structures*, 51(6), 141.
- [7] Erdogan, Y. S., Kocatürk, T., Demir, C., (2019). "Investigation of the seismic behavior of a historical masonry minaret considering the interaction with surrounding structures". *Journal of Earthquake Engineering*, 23(1), 112-140.
- [8] Nohutcu, H., (2019). "Seismic failure pattern prediction in a historical masonry minaret under different earthquakes". *Advances in civil engineering*, 2019, 1-16.
- [9] Erdogan, Y. S., Kocatürk, T., Demir, C., (2019). "Investigation of the seismic behavior of a historical masonry minaret considering the interaction with surrounding structures". *Journal of Earthquake Engineering*, 23(1), 112-140.
- [10] Serhatoğlu, C., Livaoğlu, R., (2019). "A fast and practical approximations for fundamental period of historical Ottoman minarets". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 120, 320-331.
- [11] Çaktı, E., Saygılı, Ö., Lemos, J. V., Oliveira, C. S., (2020). "Nonlinear dynamic response of stone masonry minarets under harmonic excitation". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18, 4813-4838.
- [12] Bayraktar, A., Hökelekli, E., (2020). "Influences of earthquake input models on nonlinear seismic performances of minaret-foundation-soil interaction systems". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 139, 106368.

- [13] Bayraktar, A., Çalik, I., Türker, T. E. M. E. L., (2022). “A simplified fundamental frequency formulation based on in-situ tests for masonry stone minarets”. *Experimental Techniques*, 46(2), 225-238.
- [14] Türker, T., Demirtaş, B., Ural, A., Kömür, M. A., (2022). “Seismic behavior of historical inclined minarets under near and far fault ground motions”. *Journal of Earthquake Engineering*, 26(11), 5866-5880.
- [15] Onat, O., Toy, A. T., Özdemir, E., (2023). “Block masonry equation-based model updating of a masonry minaret and seismic performance evaluation”. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 13(6), 1221-1241.
- [16] Sever, R. (2016). “History and faith tourism in terms of cultural landscape in Battalgazi (Old Malatya) town Battalgazi (Eski Malatya) ilçesinin kültürel peyzajında tarih ve inanç turizmi”. *Journal of Human Sciences*, 13(1), 2135-2157.
- [17] Malatya Gazeteciler Cemiyeti. “Koca Vaiz Baba Türbesi”. Erişim: 01 Haziran 2024, <https://www.malatyagazetecilercemiyeti.org/makale/254/koca-vaiz-baba-turbesi>
- [18] Türkiye'nin Tarihi Eserleri. “Battalgazi-Melik Sunullah Cami ve Vaiz Baba Türbesi – Malatya”. Erişim: 30 Mayıs 2024, <https://turkiyenintarihieserleri.com>
- [19] Haberler.com. “Melik Sunullah Mescidi ve Türbesi Restore Edilecek”. Erişim: 09 Mayıs 2024, <https://www.haberler.com/melik-sunullah-mescidi-ve-turbesi-restore-edilecek-12437050-haberi/>
- [20] Blogger.com. “Malatya/ Battalgazi Melik Sunullah Camii ve Koca Vaiz Baba Türbesinde Yenileme (Restorasyon) Çalışması”. Erişim: 10 Nisan 2024 <https://fikridemirtas44.blogspot.com/2021/01/koca-vaizbaba-turbesinde-yenileme.html>
- [21] alamy.com. “Melik Sunullah Mosque and Vaiz Baba Tomb are located in Battalgazi district of Malatya. The mosque and tomb were built in the 13th century.” Erişim: 16 Mayıs 2024 <https://www.alamy.com/melik-sunullah-mosque-and-vaiz-baba-tomb-are-located-in-battalgazi-district-of-malatya-the-mosque-and-tomb-were-built-in-the-13th-century-image558871455.html>
- [22] Artemis Modal Pro, Structural Vibration Solutions A/S NOVI, [computer program] Available at: <http://www.svibs.com>, Science Park Niels Jernes Vej 10 DK-9220 Aalborg East Denmark
- [23] Aydın, A., ve Basu, A. (2005). The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, 81, 1-14.
- [24] Gardner GHF, Gardner LW, Gregory AR (1974). Formation velocity and density - the diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics* 39(6):770–780
- [25] 2845-05. AD (2005). Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International

- [26] **1996-1-1:2005. BE.** Eurocode 6—Design of masonry structures. UK: British Standards Institution; 2005
- [27] **Dayaratnam, P. (2008).** *Design of steel Structures*. S. Chand Publishing.
- [28] **Tickoo, S. (2020).** ANSYS Workbench 2020 R1: A Tutorial Approach.
- [29] **TADAS. (n.d.).** Türkiye Afet Arama Kurtarma ve Afetlerde Sağlık Hizmetleri Ulusal İçin Destek Sistemi. Erişim tarihi: 10 Temmuz 2023, <https://tadas.afad.gov.tr/map>.
- [30] **Scream 4.6., (2017).** Seismometer Configuration, Real Time Acquisition and Monitoring. Güralp System Ltd.
- [31] **Wathelet M, Chatelain J-L, Cornou C, Di Giulio G, Guillier B, Ohrnberger M et al. Geopsy, (2020).** “A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing.” *Seismological Research Letters*, 91:1878-89.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Enes AY

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mekanik Anabilim Dalı (2021-)

MESLEKİ DENEYİM:

- Türk Silahlı Kuvvetleri Hava Kuvvetleri Komutanlığı'nda üsteğmen olarak çalışıyor. (2019-)