

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**YİVLİ MİNARE’NİN DEPREME KARŞI DAYANIKLILIĞININ
ARAŞTIRILMASI**

Levent Furkan ÇELİK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2019

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**YİVLİ MİNARE’NİN DEPREME KARŞI DAYANIKLILIĞININ
ARAŞTIRILMASI**

Levent Furkan ÇELİK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2019

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YİVLİ MİNARE'NİN DEPREME KARŞI DAYANIKLILIĞININ
ARAŞTIRILMASI

Levent Furkan ÇELİK
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 02/07/2019 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / ~~Oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN

Dr. Öğr. Üyesi Barış ERDİL



ÖZET

YİVLİ MİNARE’NİN DEPREME KARŞI DAYANIKLILIĞININ ARAŞTIRILMASI

Levent Furkan ÇELİK

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Temmuz 2019; 47 sayfa

Tarihi yağma yapıların korunması ve gelecek nesillere güvenle aktarılması günümüzde popülerliğini gittikçe arttıran disiplinler arası bir çalışma dalıdır. Hangi yapıların korunmaya veya güçlendirilmeye ihtiyacının olduğunun tespiti yapıların güvenliği ve kaynaklarımızın verimli kullanımı açısından önem arz etmektedir. Deprem, tarihi yapılar için en büyük risklerden biridir, ülkemizin deprem kuşağında olması bu alanda yapılacak risk analizlerinin önemini arttırmaktadır. 13. yüzyılda Anadolu Selçuklu Devleti tarafından Antalya’da yaptırılan Yivli Minare, sıra dışı mimarisi ile günümüzde kentin sembol yapılarından biri haline gelmiştir. Literatürde, Yivli Minare’nin detaylı üç boyutlu modeli üzerinde deneysel çalışmalardan elde edilen veriler de kullanılarak yapının depreme karşı dayanıklılığının araştırıldığı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, Yivli Minare’nin depreme karşı dayanıklılığının ve yapının risk altında olup olmadığının araştırılması dolayısıyla literatürdeki açığın kapatılması hedeflenmektedir.

Yivli Minare’nin dinamik parametrelerin belirlenmesi için yapıya ivme ölçer yerleştirilmiştir. Fourier dönüşümü ile veriler frekans-zaman grafiğine çevrilmiş ve yapı frekansı tespit edilmiştir. Yapıyı meydana getiren taş, tuğla, harç, kalas gibi malzemeler yapılan analitik çalışmada tek bir kompozit malzeme olarak tanımlanmıştır. Kompozit malzemenin elastisite modülü ile yapı periyodu arasındaki ilişki kullanılarak elastisite modülü değeri elde edilmiştir.

Analitik çalışma kapsamında Yivli Minare’nin üç boyutlu modeli, SOLIDWORKS programında oluşturulmuştur. Yapının statik ve dinamik analizleri sonlu elemanlar yöntemine göre çözüm yapabilen ANSYS Workbench isimli analiz programı kullanılarak yapılmıştır. Modal analiz ile yapının hakim periyotları belirlenmiş, kütle katılım oranları irdelenmiştir. Çalışmada yapı; düşey yükler altında statik analiz, eşdeğer deprem kuvveti yöntemine göre analiz ve mod birleştirme yöntemine göre dinamik analiz gibi yöntemlerle incelenmiştir. Analiz sonucu elde edilen gerilme değerleri, literatürde yağma yapılar için verilen emniyet gerilmeleri ile kıyaslanmıştır. Sonuçlara göre gerilmelerin sınır değerleri aştığı tespit edilmiş ve yapıda muhtemel hasar oluşması beklenen bölgeler belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda elde edilen kayma gerilmesinin sınırlar dahilinde olduğu, ancak basınç ve çekme gerilmelerinin emniyet gerilmesini aştığı görülmüştür. Daha doğru gerilme kıyaslamalarının yapılabilmesi için Yivli Minare’yi oluşturan malzemelerin emniyet gerilmelerinin laboratuvar ortamında yapılacak deneylerle tespit edilmesi gerekmele birlikte yapılan analizler sonucunda yapının güçlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Yivli Minare, Yapısal Sağlık Takibi, Deprem, Sonlu Elemanlar Metodu, Modal Analiz

JÜRİ: Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN

Dr. Öğr. Üyesi Barış ERDİL

ABSTRACT

INVESTIGATION OF YIVLİ MİNARET'S EARTHQUAKE RESISTANCE

Levent Furkan ÇELİK

MSc Thesis in Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

July 2019; 47 pages

The preservation of historic masonry structures and the adaptation to future generations with confidence is an interdisciplinary field of study that is becoming increasingly popular today. Whether the historical structures need retrofitting or not is important in terms of the safety of the structures and the efficient use of our resources. The earthquake is one of the biggest risks for the buildings. It is a fact that our country is within the earthquake zone and this increases the importance of the risk analysis in this area. The Yivli Minaret, built in the 13th century by the Anatolian Seljuks in Antalya, has become one of the symbolic structures of the city with its extraordinary architecture design. There is no study supported by 3D model and experimental study in the literature about the resistance of the Yivli Minaret to the earthquake. In this study, it is aimed to investigate the earthquake resistance of Yivli Minaret by using finite element modelling (FEM) and health monitoring technique.

In order to determine the dynamic properties of the Yivli Minaret, an accelerometer was placed on the top of the structure. With Fourier transform, the data were converted to frequency time domain and the frequency of the structure was determined. Materials such as stone, brick, mortar and plank are defined as a single composite material in the FEM. The modulus of elasticity was obtained by using the relationship between the elasticity module of the composite material and the building period.

The three dimensional model of the Yivli Minaret was created in the SOLIDWORKS program. Static and dynamic analysis of the structure is performed by using the analysis program called ANSYS Workbench which can make solutions according to the FEM. With modal analysis, the dominant periods of the structure were determined and mass participation ratios were examined. In this study, the different analysis methods such as static analysis under vertical loads, analysis according to the equivalent earthquake force method and dynamic analysis according to the mode superposition method were done. The stress values which obtained from the FEM analysis were compared with limit stresses which taken from studies in literature. As a result of the analysis, the shear stress was determined within the limits. On the other hand, the tensile and compressive stress exceeds the limit values taken from the literature. It is clear that to make a better comparison between FEM and existing structure in term of stress capacity the in situ tests should be performed. As a result of this study, the Yivli Minaret should be strengthened with a suitable technique.

KEYWORDS: Yivli Minaret, Health Monitoring, Earthquake, Finite Element Method, Modal Analysis

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Asst. Prof. Engin EMSEN

Asst. Prof. Barış ERDİL

ÖNSÖZ

Tarihi yapılarımıza gereken önemin verilmesinde Avrupa ülkelerine kıyasla daha geride kaldığımız aşikardır. Anadolu uygarlıklarından günümüze kalan tarihi yapıların risk analizlerinin yapılması deprem kuşağında olan ülkemiz için önem teşkil etmektedir. Yapılan çalışmada, Antalya Yivli Minare'nin depreme karşı dayanıklılığının araştırılmıştır. Analizler sonucu deprem etkisiyle yapıda meydana gelen çekme gerilmelerinin bazı bölgelerde sınırları aştığı gözlemlenmektedir. Oluşan çekme gerilmelerinin karşılanması için belirtilen bölgelerde çalışma yapılması önerilmektedir. Daha doğru gerilme kıyaslamalarının yapılabilmesi için Yivli Minare'nin yapı malzemelerinin laboratuvar ortamında incelenip emniyet gerilmelerinin tespit edilmesi tavsiye edilmektedir.

Çalışmamda bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, bu konuyu seçmeme vesile olan değerli danışman hocam Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK'e teşekkür ederim. Her anımda bana destek olan, bu günlere gelmemde en büyük emeği veren canım ailem Nihal ÇELİK ve Kadir ÇELİK'e sonsuz teşekkürler. Çalışmaya resmi olarak izin veren ve ellerindeki bilgiyi paylaşan Antalya Vakıflar Bölge Müdürlüğüne teşekkür ederim. Beni destekleyen ve ANSYS Workbench programını öğrenmeme yardım eden Rahime YILDIZ'a teşekkür ederim. İvme ölçer ekipmanlarını kullanmamız için yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Tuba EROĞLU AZAK'a teşekkürler. Bana ivme ölçeri kullanmayı öğreten ve deney sırasında yardımcı olan Mücahit ÇAM'a teşekkür ederim. Tez yazım formatı ve kuralları hakkında yardımlarını esirgemeyen kuzenim Pelin SARIKAYA'ya teşekkürler. Bana ivme kayıtlarını işlemem için gerekli olan Scream programını öğreten ve yol gösteren Süleyman TUNÇ'a sonsuz teşekkürler. Yivli Minare'nin restorasyonunda görev alan ve röleve konusunda yardım eden Şeyda GÜVENÇ DURAN'a teşekkür ederim. Yivli Minare'nin görsel çalışmasının yapılmasında desteğini esirgemeyen Umut ASLAN'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
AKADEMİK BEYAN	viii
KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Yivli Minare	2
1.1.1. Yivli Minare'nin tarihi ve yeri.....	2
1.1.2. Yivli Minare'nin mimari özellikleri.....	3
1.1.3. Yapının geçirdiği onarımlar.....	5
2. KAYNAK TARAMASI.....	8
3. MATERYAL VE METOT.....	15
3.1. Yivli Minare'nin Üç Boyutlu Modellenmesi	15
3.1.1. Röleve.....	16
3.2.1. İvme ölçer	21
3.2.2. Yivli Minare ivme ölçüm çalışmaları ve verilerin işlenmesi	21
3.3. Yivli Minare'nin Sonlu Elemanlar Yöntemine Göre Analizi	24
3.3.1. Sonlu elemanlar yöntemi	25
3.3.2. Modal analiz ve elastisite modülünün belirlenmesi	25
3.3.3. Düşey yükler altında statik analiz	29
3.3.4. Eşdeğer deprem yükü yöntemi	30
3.3.5. Eşdeğer deprem yükü hesabı ve yapıya uygulanması.....	30
3.3.6. Mod birleştime yöntemi ile analiz (spektrum analizi)	34
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	38
5. SONUÇLAR.....	44
6. KAYNAKLAR	46
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yivli Minare’nin Depreme Karşı Dayanıklılığının Araştırılması” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

Levent Furkan ÇELİK
[Signature]
02/07/2019

KISALTMALAR

Kısaltmalar

MPa	: Megapascal
kN	: Kilo newton
cm	: Santimetre
sn	: Saniye
Hz	: Hertz
D_f	: Zemin derinliği
G	: Ölü yük
Q	: Hareketli yük
E	: Deprem yükü
I	: Bina önem katsayısı
T_A	: Periyot aralığının alt sınırı
T_B	: Periyot aralığının üst sınırı
$S_{(T)}$: Spektrum katsayısı
$R_{(T)}$: Deprem yükü azaltma katsayısı
V_t	: Taban kesme kuvveti
W	: Ağırlık

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. a) Kaleiçi ve Yivli Minare'nin konumu (Çizim: Y. Mimar Ü. AVCI, 2014); b) Yivli Minare Külliyesi'nin vaziyet planı (Çizim: Y. Mimar Ş. GÜVENÇ DURAN, 2007).....	3
Şekil 1.2. Antalya Kaleiçi ve Yivli Minare.....	4
Şekil 1.3. Antalya Saat Kulesi ve Yivli Minare	5
Şekil 1.4. Yivli Minare plan ve kesiti (Çizim: Y. Mimar Ş. GÜVENÇ DURAN, 2007)	6
Şekil 1.5. a) Yivli Minare'nin 1930; b) 1940-1945; c) 1953 Onarımı Sonrası; d) 1969 Yılı Görünümleri (Akdeniz Medeniyetleri Araştırma Enstitüsü arşivi)	7
Şekil 2.1. Yivli Minare'nin SAP2000 programı ile analiz sonuçları (Örmecioglu 2011).....	9
Şekil 2.2. Hırka-i Şerif Camii üç boyutlu sonlu eleman modelleme aşamaları (Çizim: İnş. Müh. – Mimar Ö. Dabanlı, 2008).....	10
Şekil 2.3. Küçük Mustafa Paşa Camii'nin deprem yükleri altındaki X ve Y yönündeki deplasmanları (Can 2012)	12
Şekil 2.4. Farklı yükleme değerleri için minarede oluşan gerilme diyagramı (Işık 2018)	13
Şekil 3.1. Yığma yapı modelleme yaklaşımları a) Detaylı mikro modelleme; b) Basit mikro modelleme; c) Makro modelleme (Lourenço 2000).....	15
Şekil 3.2. Yivli Minare'nin kaidesinin SOLİDWORKS programında üç boyutlu modellenmesi.....	17
Şekil 3.3. Yivli Minare'nin gövdesinin SOLİDWORKS programında üç boyutlu modellenmesi.....	18
Şekil 3.4. Yivli Minare'nin merdiven modellenmesi ve kesit görünümü.....	19
Şekil 3.5. Yivli Minare üç boyutlu görsel çalışma	20
Şekil 3.6. İvme ölçer çalışma prensibi (Karabela 2016).....	21
Şekil 3.7. Yivli Minare ivme ölçüm deneyi (02.02.2019)	22
Şekil 3.8. Yivli Minare ilk ve ikinci deney ivme kayıtları, mm/s ² -zaman grafikleri	23
Şekil 3.9. Yivli Minare ilk ve ikinci ivme kayıtlarına göre yapı frekans değerleri	24

Şekil 3.10. Yivli Minare'yi sonlu elemanlara ayırma işlemi (mesh uygulaması).....	26
Şekil 3.11. Yivli Minare 1. ve 2. mod için şekil değiştirme ve deplasman değerleri.....	28
Şekil 3.12. Yivli Minare G yüklemesi için Y ekseninde basınç ve çekme gerilmeleri ile XZ düzleminde kayma gerilmeleri.....	29
Şekil 3.13. Elastik ivme spektrum grafiği (Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007).....	30
Şekil 3.14. Yivli Minare'ye etkiyen eşdeğer deprem kuvvetleri.....	32
Şekil 3.15. Yivli Minare G+EZ yüklemesi için Y ekseninde basınç ve çekme gerilmeleri ile XZ düzleminde kayma gerilmeleri.....	33
Şekil 3.16. Yivli Minare G+EZ yüklemesi için yer değiştirme ve von-Mises gerilmeleri.	34
Şekil 3.17. Yivli Minare için elastik ivme spektrum grafiği.....	35
Şekil 3.18. ANSYS analiz diyagramı	35
Şekil 3.19. Yivli Minare mod birleştirme analizi için Y ekseninde basınç ve çekme gerilmeleri ile XZ düzleminde kayma gerilmeleri.....	36
Şekil 3.20. Yivli Minare mod birleştirme analizi için yer değiştirme ve von-Mises gerilmeleri	37
Şekil 4.1. Yivli Minare G+EZ yüklemesi için Y ekseninde basınç ve çekme gerilmeleri ile XZ düzleminde kayma gerilmeleri.....	39
Şekil 4.2. Yivli Minare mod birleştirme analizi için Y ekseninde basınç ve çekme gerilmeleri ile XZ düzleminde kayma gerilmeleri.....	41

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Küçük Mustafa Paşa Camii için kabul edilen malzeme grupları emniyet gerilmeleri (Can 2012).....	12
Çizelge 2.2. Yığma yapı numuneleri deney sonuçları (Çobanoğlu 2014).....	14
Çizelge 3.1. Kompozit malzemenin elastisite modülü için yapı frekans değerleri.....	26
Çizelge 3.2. Yivli Minare kütle katılım oranları	27
Çizelge 3.3. Eşdeğer deprem yükü hesabı için yapı özellikleri	31
Çizelge 3.4. Eşdeğer deprem yükü hesabı	31
Çizelge 4.1. Analizler sonucu elde edilen maksimum basınç, çekme, kayma gerilmeleri ve yer değiştirmeler.....	42
Çizelge 4.2. Yığma yapı numuneleri deney sonuçları (Çobanoğlu 2014).....	43

1. GİRİŞ

İnsanlık, varoluşundan günümüze hayatta kalmak ve yaşamını kolaylaştırmak için sürekli üretmiş ve inşa etmiştir. Onların yaşamlarından günümüze kalan değerler, aletler ve yapılar geçmiş ile geleceği birbirine bağlayan miraslardır. Tarihi eserler ait olduğu dönemin ruhunu, kültürünü, inancını ve yaşam tarzını yansıtmaktadır.

Anadolu; Asya, Avrupa ve Afrika kıtaları arasında stratejik bir konumda olması, ticaret ve göç yollarının üzerinden geçmesi, iklimi ve doğal güzellikleri sebebiyle tarih boyunca hep sahip olunmak istenen bir coğrafya olmuştur. Anadolu, hem pek çok köklü uygarlığın doğum noktası olmuş hem de defalarca zamanın güçlü devletleri tarafından fethedilip el değiştirmiştir. Bu sebeplerle sayısız medeniyete ev sahipliği yapmış olan Anadolu; tarihsel, etnik, dini ve kültürel anlamda zengin olduğu kadar konumuz olan tarihi eserlerde de eşsiz örneklerle sahiptir.

Tarihi eserleri kabaca taşınabilir tarihi eserler ve taşınamaz tarihi eserler olarak ikiye ayrılabilir. Taşınabilir tarihi eserlere örnek olarak çanak, çömlek, silah, tablo gibi eserler verilebilir. Konumuz gereği üzerinde duracağımız taşınmaz tarihi eserlere ise kale, camii, kilise, su kemeri, köprü gibi örnekler vermek mümkündür.

Tarihi eserler bir ülkenin, ulusun ya da ırkın genetik şifrelerini barındırmaktadır. Tarihi eserlerin geleceğe sağlıklı bir şekilde aktarılması çağımızın ortak sorunudur. Tarihi eserlerin korunması, 21. yüzyılda başta mühendislik olmak üzere pek çok branştan insanın bir arada uyumla çalıştığı popülerliğini gittikçe arttıran disiplinler arası bir çalışma dalı olmuştur. Özellikle Avrupa devletleri tarihi yerleşkelerini koruma konusunda oldukça ileri konumdadır. Tarihi yapıların bir arada bulunduğu eski şehir (oldtown) bölgesi korunarak turistik cazibe merkezleri haline getirilmiştir. Yeni yerleşim yerleri ise ya eski mimari ile uyumlu ya da eski yerleşkeye uzak yerlere inşa edilmiştir.

İnsanlık tarihinin başlangıcından beri üretilen eserler düşünüldüğünde savaşlar, depremler, yangınlar ya da yapıların belli bir ömrü olması gibi sebeplerle günümüze pek azı ulaşabilmiştir. Bunun yanında yakın geçmişimize değinecek olursak tarihi eserlere gereken önemin verilmemesi, bakımsızlık ya da eserleri tehlikeye atacak yerleşim planları sebebiyle de pek çok eserimiz yıkılmış, hasar görmüş ve yok olma tehlikesi ile karşı karşıya kalmıştır. Hem hasar görmüş tarihi yapıların onarılması ya da güçlendirilmesi hem de henüz hasar görmemiş tarihi yapıların risk analizlerinin yapılması konusunda mühendislere büyük sorumluluklar düşmektedir. Ülkemizde binlerce tarihi esere güçlendirme ve restorasyon çalışmaları yapılmaktadır. Ancak tarihi yapıların korunması ve güçlendirilmesi hakkında bir yönetmeliğin, belirli bir standardın olmayışı günümüz Türkiye'si için önemli bir eksiktir.

Ülkemizin deprem kuşağında olması tarihi yapılar için en büyük risklerden biridir. Günümüze kadar olan afetleri atlatan tarihi yapılarımızın bundan sonraki afetleri atlatabileceğinin garantisi yoktur. Yapı malzemeleri yıllar içerisinde yağmur, sıcak-soğuk etkisi ve nem gibi doğal etkenler sebebi ile özelliklerini kaybeder. Yapı; deprem, rüzgâr gibi yatay kuvvetler sonucu yıkılmasa dahi yapı malzemelerinin zamanla dayanımını yitirmesi sebebiyle önemli hasarlar alabilir bu sonraki sarsıntılarda yapının aynı performansı sergileyememesine hatta yapının yıkılmasına dahi sebep olabilmektedir. Bu noktada tarihi yapılarımızın korunmaya, güçlendirilmeye ihtiyacı olduğu açıktır ancak

tarihi yapıların güçlendirilmesi için yapılan çalışmalar oldukça maliyetlidir ve bütün tarihi yapılarımızın güçlendirilmesi gibi bir durum maliyeti göz önüne alındığında uygulanabilir değildir. Bunun yerine kaynaklarımızı olabildiğince verimli kullanmak adına hangi tarihi yapıların riskli olduğu tespit edilmelidir.

Yapının riskli olup olmadığına karar verilmesi için bir dizi araştırma, hesaplama ve yorumlama yapılmalıdır. Bu kapsamda araştırılacak yapı hakkında detaylı tarih araştırması yapılmalıdır. Sonrasında ise mimari inceleme ve röleve çalışması, yapıyı meydana getiren malzemelerin neler olduğu ve özellikleri, yapının oturduğu zeminin özellikleri, bölgenin depremselliği ve varsa yapının hasarları, onarımları, restorasyon, güçlendirme çalışmaları araştırılmalıdır. Sonraki aşama ise yapının üç boyutlu olarak modellenmesidir. Günümüzde tarihi yapıların modern analizi için en güvenilir hesap yöntemi sonlu elemanlar prensibine dayalı hesaptır. Tasarladığımız üç boyutlu model sonlu elemanlar prensibine göre hesap yapabilen bilgisayar programına aktarılır. Yapının özellikleri de programa tanımlandıktan sonra statik ve dinamik analizler yapılır. Yapılan analizler sonucu hasar görmesi en muhtemel yerler ve yapının göçme tehlikesinin olup olmadığı sonuçlara bakılarak yorumlanabilmektedir. Bu noktadan hareketle yapının güçlendirilmeye ihtiyacının olup olmadığı varsa nasıl bir güçlendirme yönteminin uygulanabileceği belirlenebilmektedir.

1.1. Yivli Minare

1.1.1. Yivli Minare'nin tarihi ve yeri

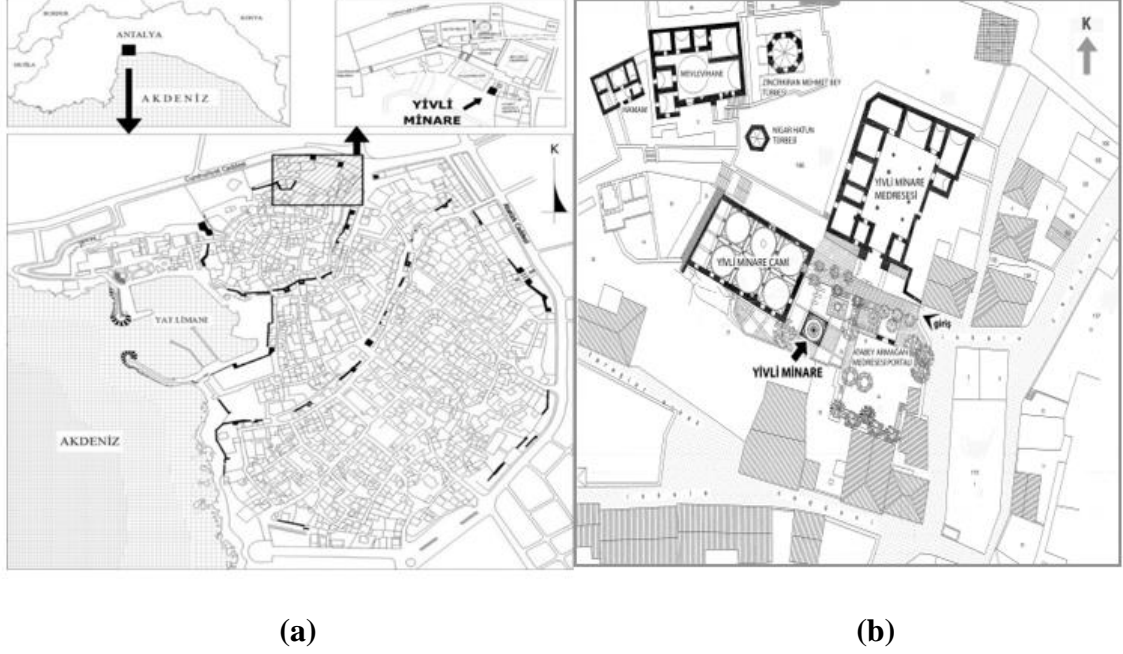
1071 Malazgirt Savaşı sonrasında Anadolu'nun kapıları Türklere açılmış Bizans İmparatorluğu'nun zayıf olması sebebiyle fetihler hızla gerçekleşmiştir. Büyük Selçuklu devleti yıkıldıktan sonra Anadolu'da 1075 tarihinde kurulan Anadolu Selçuklu devleti Anadolu'nun çehresini kısa sürede değiştirmiştir.

Ordunya ve ticarete önem veren devlet bu kapsamda Antalya, Alanya ve Sinop'u fethetmiş bu şehirlerdeki limanlarla ticarete gelişmiştir. Fethedilen yerleşkelerde yoğun inşa faaliyetlerine başlayan Türkler, Türk-İslam mimarisiyle Anadolu kültürünün harmanlanmasından oluşan yeni bir sanat anlayışıyla, Türk toplum yapısının geleneklerine uygun, kültürel, dini ve ticari ihtiyaçlarına göre bir mimari ortam inşa etmişlerdir (Kemaloğlu 2013).

Anadolu Selçuklu devleti, en parlak dönemini yaşadığı 13. yüzyılda günümüzde de önemli bir kısmı ayakta kalan ve hemen hepsi buldukları şehirlerin simgesi haline gelmiş medrese, han, cami, minare, kervansaray, saray, köşk, kümbet, türbe gibi pek çok sosyal amaçlı yapı inşa etmiştir. Antalya Yivli Minare, Erzurum Çifte Minare, Sivas Çifte Minare, Sivas Gök Medrese, Kayseri Sahabiye ve Gevher Nesibe Medreseleri, Tokat Çukur Medrese gibi 13. yüzyıl eserleri şehir plancısı olarak nitelendirilen I. Alaeddin Keykubad döneminde yapılmıştır (Avcı 2015).

Bir kentin meydanları, sokakları, tarihi yapıları ve mimarisi o kentin kimliğini oluşturan unsurlardandır. Şehir, Antalya adını antik dönemlerdeki kurucusu olan Attalos'dan almıştır. Antalya kentinin tarihi merkezi Kaleiçi'dir. Şehirde Türk hakimiyetinden önce pek çok uygarlık hüküm sürmüştür. Yüzyıllar içerisinde şehir gelişip Kaleiçi dışına taşıp yeni merkezler kurulsa da Kaleiçi canlılığını hiçbir zaman

kaybetmemiştir. Şekil 1.a’da Kaleiçi’nin Antalya ili içerisindeki yeri gösterilmiştir. Şekil 1b’de ise Yivli Minare’nin Kaleiçi’ndeki yeri gösterilmiştir. Antalya Kaleiçi’nin göz kamaştırıcı yapılarından olan Yivli Minare, Antalya kent merkezi için sembol yapı kabul edilmiş ve her yıl binlerce turist tarafından ziyaret edilmektedir.



Şekil 1.1. a) Kaleiçi ve Yivli Minare'nin konumu (Çizim: Y. Mimar Ü. AVCI, 2014); **b)** Yivli Minare Külliyesi'nin vaziyet planı (Çizim: Y. Mimar Ş. GÜVENÇ DURAN, 2007)

1.1.2. Yivli Minare’nin mimari özellikleri

Yivli Minare 1230 yılında inşa edilmiştir. Yapıya adını veren “yiv” kısmı yarım daire profillerin gövde boyunca yükselmesi ile oluşmaktadır. Bu örgü düzeni, yığma yapılar tarihi düşünüldüğünde oldukça eskidir. Anadolu Selçuklu Mimarisinin günümüze ulaşmış nadide eserlerinden biri olan Yivli Minare, yivlerinden dolayı bu adı alan bir mimari geleneğin temsilcisi konumundadır (Mülayim 1987).

Yivli Minare, mimarisi ile diğer minarelerden ayrılrsa da kaide, pabuç, tambur, gövde, şerefe, petek ve külah gibi temel minare bölümlerinden oluşmaktadır. Minarenin en altında bulunan temelle bağlantılı kaide kısmı, kareye yakın geometride taş ve tuğla malzemeler kullanılarak inşa edilmiştir. Taş blokların üzerinde ise kırmızı ateş tuğlasından yapılmış bölüm, taş kaidenin hizasında düz bir doğrultuda yükselmekte ve daha sonra pahlanarak sekizgene dönüşmektedir. Sekizgen planlı pabuçtan sonra, yapı daha dairesel bir form kazanmakta ve silindirik tambur bölümü başlamaktadır. Gövde, bu bölüm üzerinde yükselmektedir. Silindirik gövde yukarı doğru gittikçe daralmakta ve merkezden kaymalar görülmektedir. Daralan gövde, sırsız ateş tuğlasından imal edilmiş sekiz yarım daire profilli dilim tarafından kuşatılmaktadır (Avcı 2015). Gövdeden sonra 4 sıra taş örgülü silindirik bir bölüm üzerinde şerefe bulunmaktadır. Şerefenin korkuluğu

zikkazk Şeklinde yerleŐtirilmiŐ mermer blokların yan yana dizilmesiyle oluşturulmuştur (Yılmaz 2002).

Minarenin petek b6l6m6 kırmızı ateş tuğlasından inşa edilmiştir ve 6zerinde kurŐun kaplı k6lah b6l6m6 bulunmaktadır. Minarenin zeminden en 6st noktasına kadar olan y6ksekliği 39.72 metredir. Kuzey cephesinde bulunan giriş kapısından Őerefeye 92 basamaklı helezonik merdiven bulunmaktadır. Zeminden 30.48 metre yukarıda bulunan Őerefeye minarenin g6neydoğu y6n6nde bulunan 6zeri kemerli kapıdan 6ıkılmaktadır (Avcı 2015).



Şekil 1.2. Antalya Kaleiçi ve Yivli Minare

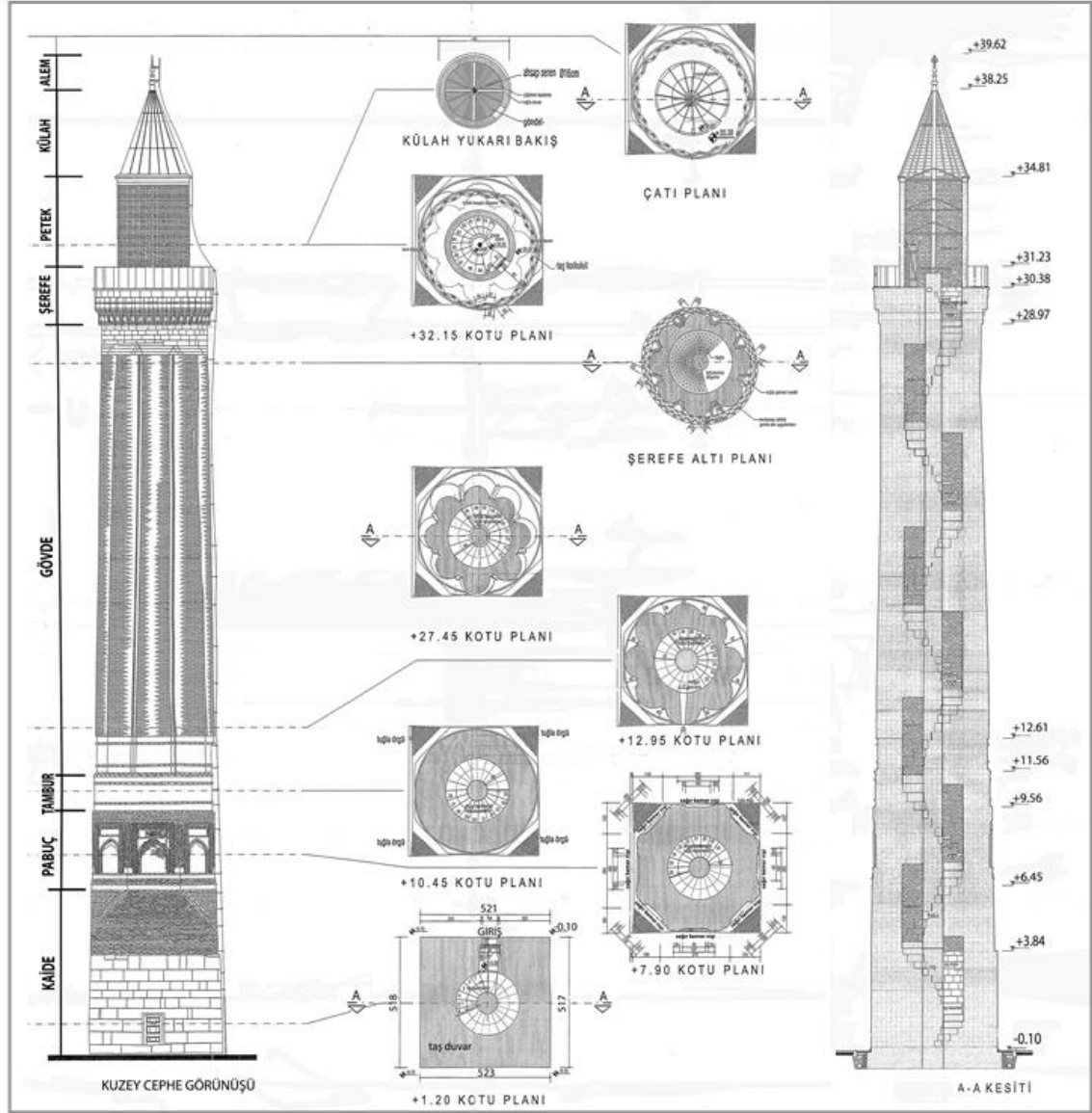


Şekil 1.3. Antalya Saat Kulesi ve Yivli Minare

1.1.3. Yapının geçirdiği onarımlar

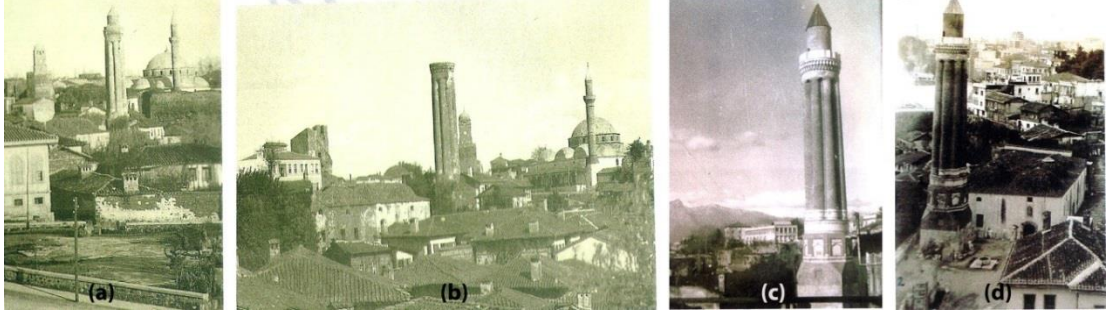
Yüzyıllar içerisinde Antalya’da yaşanan fırtına, yangın ve depremlerden dolayı hasar gören minare günümüze kadar pek çok onarım geçirmiştir. Diğer yandan zamanın yıpratıcı etkisi, iklimsel etkenler ve hatalı restorasyonlar yapı malzemeleri üzerinde tahrip edici etkilere sebep olmuştur. Onarımlar sonucunda yapının bazı mimari detaylarının ve süslemelerinin ortadan kaldırıldığı ya da kaybolduğu düşünülmektedir. 1972 yılında Yivli Minare Cami’sinin yakınındaki evlerin yanması sırasında minarenin başlık kısmı da yanmış ve çini süslemeler büyük ölçüde tahrip olmuştur. 1973 yılında Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından yapı tekrar onarılmıştır (Sönmez 2009). Kültür ve Turizm

Bakanlığı, Antalya Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu'nun 28.08.2007 tarih ve 1850 sayılı onayı ile restorasyon projesi uygun bulunmuş ve bu doğrultuda kapsamlı bir restorasyon çalışması yapılmıştır. Bu restorasyon çalışması ile yapıda bozularak işlevini yitirmiş taş kaplama ve tuğlalar değiştirilmiş, yüzey temizliği yapılmıştır (Avcı 2015).



Şekil 1.4. Yivli Minare plan ve kesiti (Çizim: Y. Mimar Ş. GÜVENÇ DURAN, 2007)

Araştırmalar sonucunda yapı için herhangi bir güçlendirme çalışmasının yapılmadığı tespit edilmiştir. Yapının oturduğu zeminin araştırılması için cami çevresinde derinliği 40 metre olan iki sondaj yapılmıştır. Zemin ile ilgili yapılan araştırmalar kapsamında yapıda meydana gelen oturmalar ve yerel zemin sınıfı tespit edilmiştir (Yılmaz ve Tek 2018).



Şekil 1.5. a) Yivli Minare'nin 1930; **b)** 1940-1945; **c)** 1953 Onarımı Sonrası; **d)** 1969 Yılı Görünümleri (Akdeniz Medeniyetleri Araştırma Enstitüsü arşivi)

Antalya şehir merkezi için sembol yapı kabul edilen ve tarihimizin önemli eserlerinden biri olan Yivli Minare'nin detaylı üç boyutlu modeli üzerinde deneysel çalışmalardan elde edilen veriler de kullanılarak yapının depreme karşı dayanıklılığının araştırıldığı bir çalışma bulunmamaktadır. Literatürdeki bu açığı kapatmak amacıyla Yivli Minare üç boyutlu çizim programında modellenmiş sonrasında bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan bir program yardımıyla risk altında olup olmadığı bu tez kapsamında araştırılmıştır.

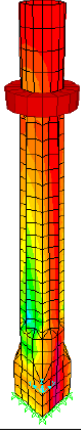
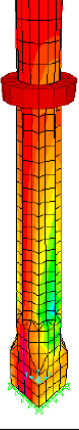
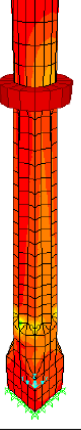
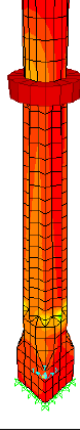
2. KAYNAK TARAMASI

Literatürde, Yivli Minare'nin detaylı üç boyutlu modeli üzerinde deneysel çalışmalardan elde edilen veriler de kullanılarak yapının depreme karşı dayanıklılığının araştırıldığı detaylı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu sebeple yığma tarihi eserlerin özellikle minarelerin depreme karşı dayanıklılığının araştırıldığı çalışmalar incelenmiştir.

Yılmaz ve Tek (2018) tarafından yapılan çalışmada Yivli Minare ve Camii'nin mevcut durumu ve hasarları tespit edilmiş, zemin özelliklerinin belirlenmesi için çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada yapı malzemelerinin zamanla yıpranmalarının yanı sıra yapıda meydana gelen kayma ve oturmalar neticesince çatlaklar ve yarıkların olduğu belirtilmiştir. Yivli Minare'nin güneye doğru 35 cm yatık olduğuna yer verilmiştir. Yapılan statik incelemede minare gövdesinin iç duvarlarında ve tuğla çekirdek kolonda tuğlaları bölen yapısal çatlaklara rastlanmıştır. Zemin etüt raporu için derinliği 40 metreyi bulan iki sondaj açılmıştır. Sondajlardan alınan numunelere göre 1.5 metre derinliğe kadar dolgu malzemesi 20 metre derinliğe kadar ise kırıklı, mikro çatlaklı ve erime boşluklu Antalya travertenini tespit edilmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı 250 kg/cm²'nin altında olan kayalar çok düşük dayanımlı kayaç olarak tanımlanmaktadır (Deere ve Miller 1966). Bu bilgiye göre inceleme yapılan Antalya Yivli Minare zemininin çok düşük dayanımlı kayaç olduğu tespit edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda zemin taşıma gücü $D_f = 1.5$ metre için 5.86 kg/cm², $D_f = 3$ metre için 11.18 kg/cm² ve $D_f = 4.5$ metre için 14.25 kg/cm² olarak hesaplanmıştır. Taşıma gücü kaynaklı herhangi bir sorun tespit edilmediği ifade edilmiştir. Türkiye Deprem Bölgeleri Haritasına göre Antalya 2. derece deprem bölgesinde yer almaktadır. Çalışmada yerel zemin sınıfı Z2 olarak belirlenmiş bu durumda spektrum karakteristik periyotları $T_A = 0.15$ - $T_B = 0.40$ sn ve etkin yer ivmesi $A = 0.30$ - 0.40 , bina önem katsayısı $I = 1.2$ olarak tespit edilmiştir.

Yılmaz ve Tek (2018) tarafından yapılan çalışmalar sonucunda Yivli Minare zemininde ve temelinde taşıma gücü kaynaklı herhangi bir sorun tespit edilememiştir. Minare gövdesinde tespit edilen çatlakların onarılması ve çeper duvarlarının güçlendirilmesi için grout harcı ile enjeksiyon uygulaması ve metal kenetler ile dikiş uygulaması tavsiye edilmiştir.

Örmecioğlu ve arkadaşları (2011), Yivli Minare'nin yapısal analizi ve sismik davranışı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada Yivli Minare'nin tarihi, konumu, mimari özellikleri ile ilgili bilgiler verilmiştir. Yivli Minare'nin üç boyutlu modeli ve analizi için SAP2000 programı kullanılmıştır. Üç boyutlu model 530 düğüm noktası, 764 kabuk eleman ve 16 katı eleman kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmada yapının malzeme özelliklerinin tespitine yönelik herhangi bir deneysel yaklaşım söz konusu değildir, malzeme özelliklerinin literatürde bulunan çalışmalardan elde edildiği belirtilmiştir. Yapı modellenmesi için makro modelleme esas alınmıştır. O tarihte zemin ile ilgili herhangi bir çalışma yapılmadığı için yerel zemin sınıfı Z4 olarak kabul edilmiştir. Yapı malzemesi taş olarak kabul edilmiş ve elastisite modülü 450 MPa alınmıştır. Modal analizle yapı periyodu yaklaşık olarak 2 saniye olarak hesaplanmıştır. Verilen parametreler ile yapılan analiz sonucu elde edilen gerilme değerleri Şekil 2.1'de verilmiştir.

S22 G+EQx (MPa)	S22 G+EQy (MPa)	S12 G+EQx (MPa)	S12 G+EQy (MPa)
Min -0.497 Max 3.770	Min -0.497 Max 3.777	Min -0.178 Max 1.816	Min -0.178 Max 1.819
			

Şekil 2.1. Yivli Minare'nin SAP2000 programı ile analiz sonuçları (Örmecioğlu 2011)

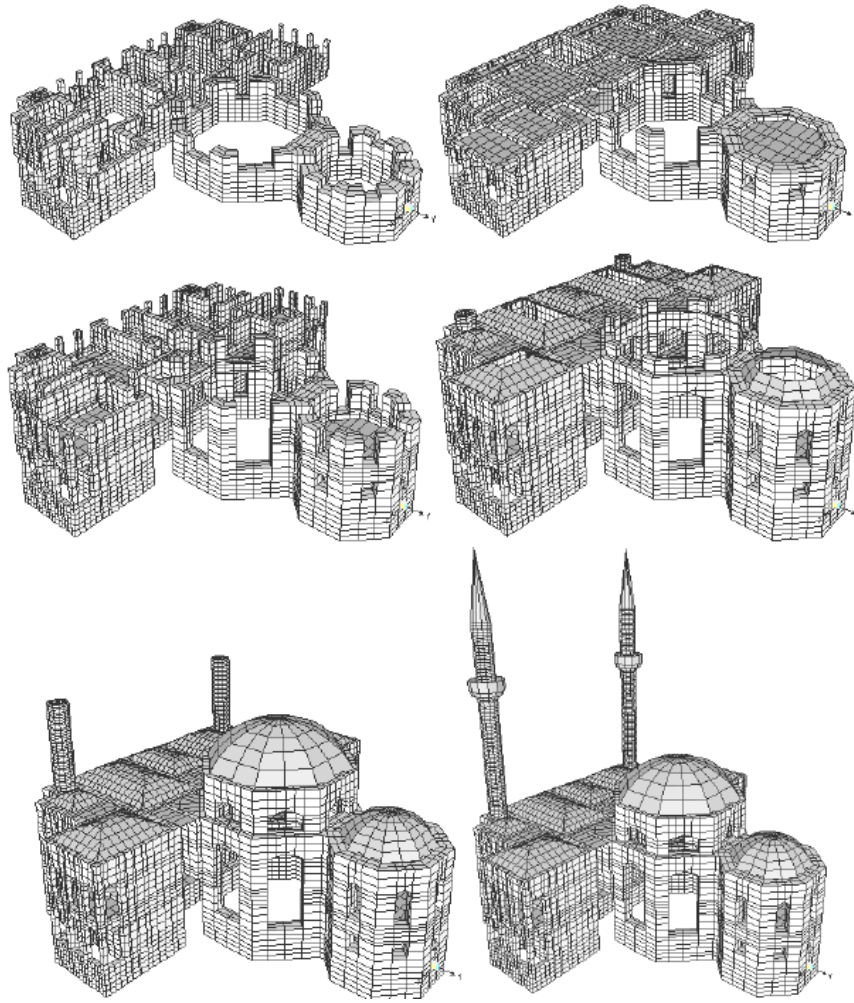
Analizlerde $G+E_x$ ve $G+E_y$ kombinasyonları baz alınmıştır. Sonuçlara göre maksimum basınç gerilmesi 3.7 MPa, maksimum çekme gerilmesi 0.5 MPa ve maksimum kayma gerilmesi 1.8 MPa olarak tespit edilmiştir. Çalışmanın sonuçlar bölümünde yapının rijit olduğu ve analiz sonucu elde edilen maksimum gerilmelerin yapı için risk oluşturmadığı yorumu yapılmıştır. Yapı malzemelerinin literatürden alındığı tekrar belirtilmiştir.

Dabanlı (2008) tarafından yapılan çalışmada tarihi yapıların bilgisayar ortamında üç boyutlu modellenmesi konusunda dikkat edilmesi gereken bazı noktalar üzerinde durulmuştur. Özellikle konumuz olan minarelerin modellenmesinde minare merkezindeki dönen merdivenin mutlaka üç boyutlu çizimde yer alması gerektiği, merdivenlerin rijitliğe katkı sağladığı ifade edilmiştir. Minarelerde hasarların genellikle merdivenin bittiği şerefe kısmı ve sonrasında meydana geldiği bunun sebebinin ise merdiven bitimi sonrası ani rijitlik değişiminden kaynaklandığı vurgulanmıştır.

Yığma yapıların analizlerinde farklı yükleme şartlarına ve yatay yüklere maruz kalan yapının gerilme seviyeleri, göçme mekanizmaları ve deplasmanların tespiti hedeflenir. Yapının analizinin temel faktörleri; yapı malzemelerinin gerilme şekil değiştirme davranışları, deprem yüklerinin yapıya etkisi buna bağlı olarak mod ve periyot değerleri, zemin taşıma gücü, yapı zemin etkileşimi ve zeminin karakteristik özellikleri olarak tanımlanmaktadır.

Dabanlı (2008) çalışmasında İstanbul Hırka-i Şerif Camii'nin depreme dayanıklılığının hesaplanması üzerine çalışmıştır. Yapının zemin özelliklerinin belirlenmesi için derinlikleri 30.45 metre olan 7 adet sondaj yapılmış ve 3 adet muayene

kuyusu açılmıştır. Sondaj çalışmasında standart penetrasyon deneyi yapıldığı belirtilmektedir. Sahada yapılan deneylerden alınan veri ve numunelerin laboratuvar ortamında incelenmesi ile zemin etüt raporu hazırlanmış ve bu bilgiler analiz aşamasında kullanılmıştır. Çalışmada yapının rölevesi elde edildikten sonra yapının üç boyutlu modeli sonlu elemanlar yöntemine göre çözüm yapan SAP2000 programına katı eleman, kabuk eleman ve düğüm noktaları şeklinde tanımlanmıştır. Şekil 2.1’de Hırka-i Şerif Camii’nin modellenme aşamaları gösterilmiştir. Model, analiz programına aktarılırken daha verimli sonuçların elde edilebilmesi için bir dizi geometrik düzeltme ve kabul yapıldığı gözlenmektedir. Çalışmada yapı malzemelerinin özelliklerinin nasıl elde edildiğine dair bilgi bulunmayıp tuğla ve taş elemanlar için kabul edilen malzeme özellikleri verilmiştir.



Şekil 2.2. Hırka-i Şerif Camii üç boyutlu sonlu eleman modelleme aşamaları (Çizim: İnş. Müh. – Mimar Ö. Dabanlı, 2008)

Model oluşturulduktan sonra yapının G ve Q (G: Zati yük, Q: Hareketli yük) düşey yükleri altında statik analizin yapılmış ve analiz sonucunda yapının düşey yükler altında güvenli olduğu kanısına varılmıştır. Sonrasında yapının dinamik yükler altındaki davranışının belirlenmesi amacıyla modal analiz yapılmıştır. Modal analiz için 50 mod üzerinden hesaplamalar yapılmış ve sonuçlara göre kütle katılım oranları dikkate alındığında 9. ve 10. modların yüksek katılım oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Hesaplamalara göre 1. ve 2. hakim periyotlar yaklaşık olarak 0.1 saniye civarındadır.

Dabanlı (2008), çalışmasında yapının hakim periyotları, yerel zemin sınıfı gibi parametreleri belirlemiş ve 2007 deprem yönetmeliğine göre yapının yatay yükler etkisindeki davranışının belirlenmesi üzerine çalışmıştır. Deprem yönetmeliğinde yığma yapıların spektrum katsayısının $S(T)= 2.5$ ve deprem yükü azaltma katsayısının $R(T)= 2$ alınması önerilmiştir. Analiz sonucunda yapının X ve Y ekseninde deprem yükleri altında (G+Q+E) yer değiştirmeleri, basınç ve gerilme değerleri elde edilmiştir. Analiz sonuçları üç boyutlu model üzerinde gösterilmiştir. Yapının bazı yerlerinde 1.0 MPa civarında gerilme yığılmalarının meydana geldiği ve bu bölgelerde büyük çatlakların oluşacağı tahmin edilmektedir. Minarelerde ise gerilmelerin 3.0 MPa mertebelerine ulaştığı gözlemlenmiş ve minarelerin güvensiz olduğu yorumu yapılmıştır.

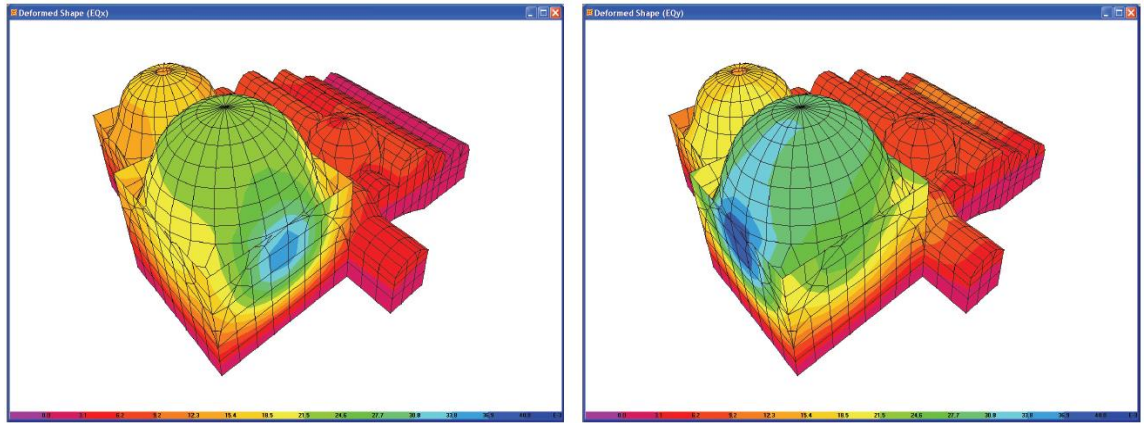
Dabanlı (2008), Hırka-i Şerif Camii için yaptığı çalışmalar neticesince yapının performansı ile ilgili bir dizi sonuca varmıştır. Yapıda meydana gelen hasarların çoğunun sebebinin zemin hareketinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Düşey yükler altında yapılan analiz sonucunda yapının düşey yükleri güvenli olarak taşıdığı sonucuna ulaşılmıştır. Ancak büyük açıklıklı bazı bölgelerin yeterli rijitliğe sahip olmaması nedeniyle normalden fazla sehim yaptığı vurgulanmıştır. Analizler neticesinde minareler hariç yapının risk altında olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Ancak minarelerin tepe noktaları için 15-20 cm'yi bulan deplasmanlar ve kaidelerdeki 3 MPa civarı gerilmeler göz önüne alındığında minarelerin göçmenin önlenmesi performans düzeyinde olduğu yorumu yapılmıştır.

Başka bir çalışmada Can ve arkadaşları (2012) İstanbul'daki Küçük Mustafa Paşa Hamamı'nın depreme karşı dayanıklılığını araştırmışlardır. Röleve temin edildikten sonra yapının sonlu elemanlar modeli SAP2000 programı kullanılarak hazırlanmıştır. Yapı modeli, programa shell (kabuk) elemanlar kullanılarak tanımlanmıştır. Yapı malzemelerinin özellikleri, uluslararası literatürde kabul gören ve deprem şartnamesinde yığma yapılar için önerilen değerler dikkate alınarak seçildiği belirtilmiştir. Yapının; tuğla, taş ve harç ile tek bir malzeme özelliği gösterdiği kabulü yapılmış bu sebepten tek bir elastisite modülü ve birim ağırlık tanımlanmıştır. Spektral hesap için 40 mod dikkate alınmıştır. Analizler sonucunda elde edilen basınç, çekme ve kayma değerleri, emniyet gerilmelerinin 3 kat büyütülmesi ile elde edilen sınır değerler ile mukayese edilmiştir. Yapının dinamik analizi için 17 Ağustos 1999 deprem kayıtları kullanılmıştır.

Çizelge 2.1. Küçük Mustafa Paşa Camii için kabul edilen malzeme grupları emniyet gerilmeleri (Can 2012)

Malzeme Tipi	Basınç Gerilmesi (MPa)	Çekme Emniyet Gerilmesi (MPa)	Kayma Emniyet Gerilmesi (MPa)
Tuğla Kubbe ve Pandantifler	2,4	0,36	1,05
Taş Duvarlar ve Kemerler	0,9	0,135	0,53

Çalışmada yapının toplam ağırlığı 111502 kN olarak verilmiştir. Deprem kuvvetleri etkisinde toplam taban kesme kuvveti X yönü için 33591 kN, Y yönü için 36078 kN olarak hesaplanmıştır. Analiz sonucunda deprem yükleri etkisinde yapının X yönünde 36 mm, Y yönünde 38 mm maksimum deplasman yaptığı Şekil 2.2’de model üzerinde görülebilmektedir.

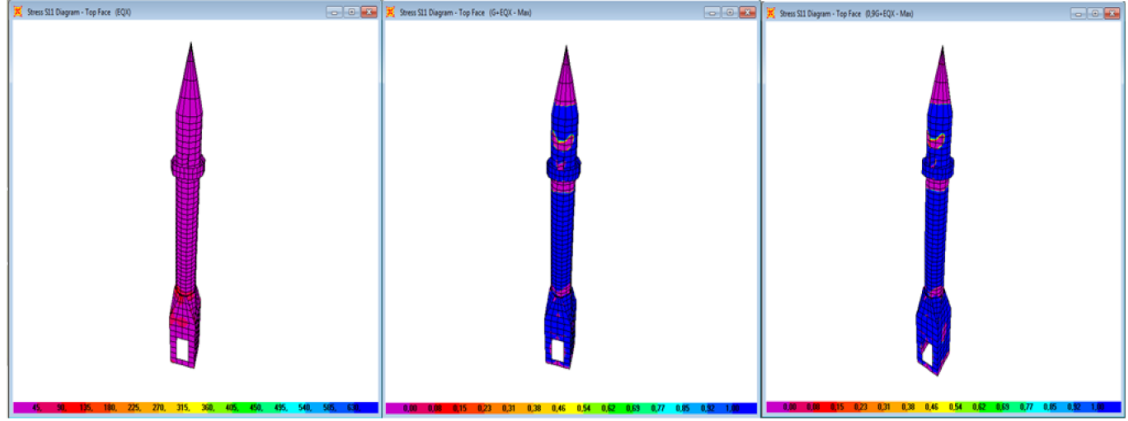


Şekil 2.3. Küçük Mustafa Paşa Camii’nin deprem yükleri altındaki X ve Y yönündeki deplasmanları (Can 2012)

Çalışmanın sonuç kısmında bir dizi değerlendirmede bulunulmuştur. Yapıda meydana gelen deplasman değerlerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu gene de yapı malzemelerinin durumuna bağlı olarak çatlakların oluşabileceği bilgisi verilmiştir. Yapısal analizler sonucunda Küçük Mustafa Paşa Hamamı’nda meydana gelen basınç ve kayma gerilmelerinin Türk Deprem Yönetmeliğinde yığma yapılar için önerilen değerleri geçmediği gözlemlenmiştir. Ancak boşluk köşelerinde ve duvar alt köşe bölgelerinde çekme gerilmesi değerinin, çekme emniyet gerilmesini aştığı gözlemlenmektedir.

Işık (2018), Bitlis ilinin Ahlat ilçesinde bulunan Kadı Mahmut Camii minaresinin analizi üzerine çalışmıştır. Minarenin yapımında kesme Ahlat taşı kullanılmıştır. Sayısal modelleme ise Ahlat taşı ve harç yapıyı oluşturan tek malzeme olarak tanımlanmıştır.

Ahlat taşı malzeme özellikleri çalışmada verilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemine göre hesap yapan SAP2000 programının kullanıldığı çalışmada sabit yükler ve deprem yüklerinin yer aldığı iki yükleme durumu uygulanmıştır. Yapı 1. dereceden deprem bölgesinde ve yerel zemin sınıfı Z2'dir. Modal analiz için ilk 18 mod dikkate alınmış, kütle katılım oranları incelenerek hakim periyot belirlenmiştir. Analiz ölü yüklerden faydalanılmıştır, hareketli yük girilmemiştir. X ve Y yönünde deprem kuvveti yapıya etki ettirilmiştir. Analiz sonucunda yapıya etki eden maksimum basınç, çekme ve kayma gerilmeleri bulunmuştur.



Şekil 2.4. Farklı yükleme değerleri için minarede oluşan gerilme diyagramı (Işık 2018)

Analiz sonucu hesaplanan değerler, deprem yönetmeliğindeki emniyet gerilmeleri ile kıyaslanmak yerine Ahlat taşının basınç, çekme ve kayma değerleri ile kıyaslanmıştır. Çalışmada Ahlat taşı emniyet gerilmeleri basınç için 11.16 MPa, çekme için 8 MPa ve kayma için 5.68 MPa olarak verilmiştir. Analiz sonucu bulunan maksimum gerilme değerleri ise basınç için 2.8 MPa, çekme için 1.2 MPa ve kayma için 1.3 MPa civarındadır. Görüldüğü üzere deprem yönetmeliğindeki emniyet gerilmeleri ile kıyaslanmadığı için yapı oldukça emniyetli tarafta kalmış gibi gözükmektedir. Bu değerler ışığında minarenin oldukça güvenli tarafta kaldığı yorumu yapılmıştır.

Çobanoğlu (2014), Türkiye'deki yığma binaların malzeme özelliklerinin incelenmesi isimli çalışmasında on adet yığma yapı belirlemiştir. Sonrasında bu yapılardan 1mx1m boyutunda numuneler alınmış ve laboratuvar ortamında aksel basınç, diyagonal çekme, kayma deneyleri yapılmıştır. Elde edilen gerilme değerleri 2007 deprem yönetmeliğinin yığma yapı malzeme özellikleri bölümünde verilen gerilmelerle kıyaslanmıştır. Deneylerde kullanılan numuneler, gerçek yapılardan alınmış yığma duvarlar olduğu için elde edilen deneysel sonuçların güvenilirliği bir kat daha artmıştır. Çizelge 2.2'de numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen gerilme değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.2. Yığma yapı numuneleri deney sonuçları (Çobanoğlu 2014)

Properties	Masonry Unit Type					
	Hollow Clay Brick		Solid Clay Brick		Cellular and Solid Concrete Brick	
	Test results	TEC (2007)	Test results	TEC (2007)	Test results	TEC (2007)**
Compressive Strength (MPa)	0.9-2.3 (0.9-1.7)*	1.0-2.0	1.55-3.98 (0.95-1.1)*	1.60	0.49-1.51 (0.95-1.93)*	1.60
Shear Strength (MPa)	0.09-0.23	0.24-0.50	0.06-0.35	0.30	0.17-0.19	0.40
Diagonal Tension Strength (MPa)	0.17-0.31	NA	0.08-0.36	NA	0.14-0.29	NA

*: The compressive strength along the axis perpendicular to the load bearing direction of the wall

** : TEC (2007) provides capacities only for solid concrete brick

Mevcut on adet yapıdan alınan numuneler boşluklu kil tuğla, boşluksuz kil tuğla ve beton briket olarak sınıflandırılmıştır. Tablo 2.2’de, test sonuçlarına göre elde edilen gerilme aralıkları MPa cinsinden verilmiştir. Örneğin boşluksuz kil tuğlanın deneyler sonucunda elde edilen basınç gerilmesi 1.55 ile 3.98 MPa arasında çıkmıştır. Çalışmada çekme ve kesme gerilme kapasiteleri için belirleyici faktörün tuğla veya taş blokların özelliklerinden çok aralarındaki bağlayıcı harcın özellikleri olduğu belirtilmiştir. Bu yüzden deneylerde taş, tuğla ve harç bloklarının kullanılması önem arz etmektedir.

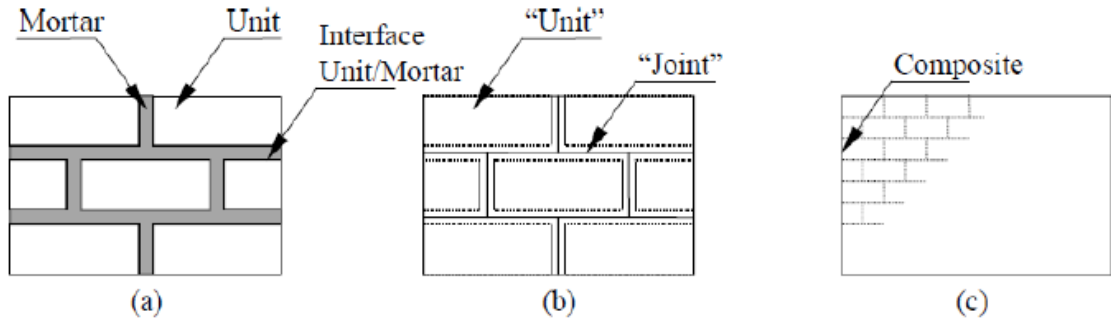
3. MATERYAL VE METOT

Yivli Minare Camii, 1230 yılında dönemin Anadolu Selçuklu hükümdarı I. Alaeddin Keykubad tarafından yaptırılmıştır. İhtişamı, kendine has mimarisi ile Antalya'nın ilk İslam eserlerinden olan yapı, günümüze kadar olan süreçte defalarca hasar almış ve onarım görmüştür (Avcı 2015). Bu çalışmada, Yivli Minare'nin depreme karşı dayanıklılığının ve yapının risk altında olup olmadığının araştırılması dolayısıyla literatürdeki açığın kapatılması hedeflenmektedir.

3.1. Yivli Minare'nin Üç Boyutlu Modellenmesi

Son yıllarda gelişen bilgisayar teknolojisi ile analiz yapmak kolaylaşmış buna bağlı olarak yığma yapıların sayısal modellerle incelenmesi de yaygınlaşmıştır. Sayısal modelleme önemli olan yapı davranışının doğru şekilde temsil edilebilmesidir. Yükler altındaki yapının davranışının doğruya yakın olması için bazı idealleştirmelerin yapılması gerekebilmektedir. Tarihi yığma yapıları oldukça karmaşık geometrilere sahip olabilmektedir. Zaman, maliyet, bilgisayar kapasitesi gibi sınırlayıcı etkiler ile yapının ne kadar detaylı modellenip analiz edileceğinin kararı verilmektedir (Dabanlı 2018).

Yığma yapıların modellenmesinde mikro modelleme ve makro modelleme olmak üzere iki temel yaklaşım vardır. Mikro modelleme yönteminde yığma yapıyı oluşturan taş, tuğla, harç gibi elemanlar ayrı ayrı modellenir. Makro modelleme yönteminde ise yapıyı oluşturan tüm malzemeler tek bir kompozit malzeme olarak modellenmektedir.



Şekil 3.1. Yığma yapı modelleme yaklaşımları a) Detaylı mikro modelleme; b) Basit mikro modelleme; c) Makro modelleme (Lourenço 2000)

Yivli Minare ve Camii, Antalya Vakıflar Bölge Müdürlüğüne bağlıdır. Yivli Minare'nin depreme dayanıklılığı konusunda yüksek lisans tez çalışması yapmak amacıyla kuruma resmi başvuru yapılmıştır. Kurum söz konusu çalışma için gerekli izinleri vermiş ve röleve çalışmalarını paylaşmıştır.

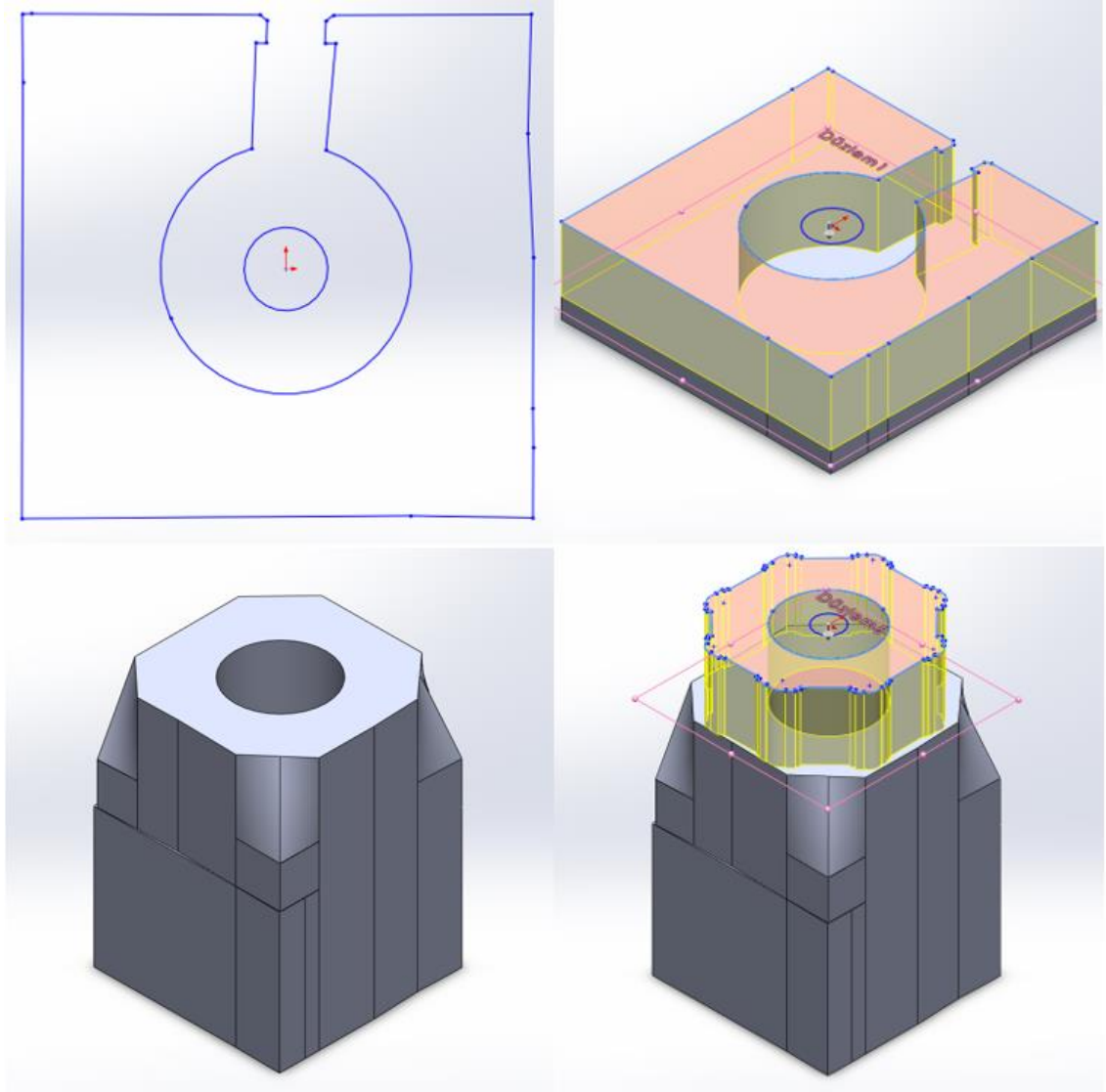
3.1.1. Röleve

Tarihi yığma yapıların analiz edilip deprem performanslarının belirlenmesinden önce üç boyutlu olarak modellenmesi gerekmektedir. Bu işlemin yapılabilmesi için ise yapının rölevesinin elde edilmesi şarttır. Röleve basitçe yapının tüm detaylarının yerinde ölçülerek yapının planının çıkarılması olarak tanımlanabilmektedir. Bu süreçte yapı geometrisinin, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanların çizim ortamına gerçek boyutlarıyla aktarılması önem taşımaktadır. Röleve çalışması sonrasında yapılacak üç boyutlu modelleme ve analiz çalışmalarına temel oluşturmaktadır. Ancak yapı analizinin uygun sonuçlar verebilmesi için bazen üç boyutlu çizimde idealleştirmelerin yapılması gerekebilmektedir.

Yivli Minare'nin bilgisayar ortamında üç boyutlu modelinin oluşturulabilmesi için yapının detaylı röleve çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Röleve çalışması, Antalya Vakıflar Bölge Müdürlüğünden temin edilmiştir. Söz konusu röleve çalışması, 2007 yılında Kültür ve Turizm Bakanlığı tarafından yapılan restorasyon ve onarım projesi kapsamında hazırlanmıştır.

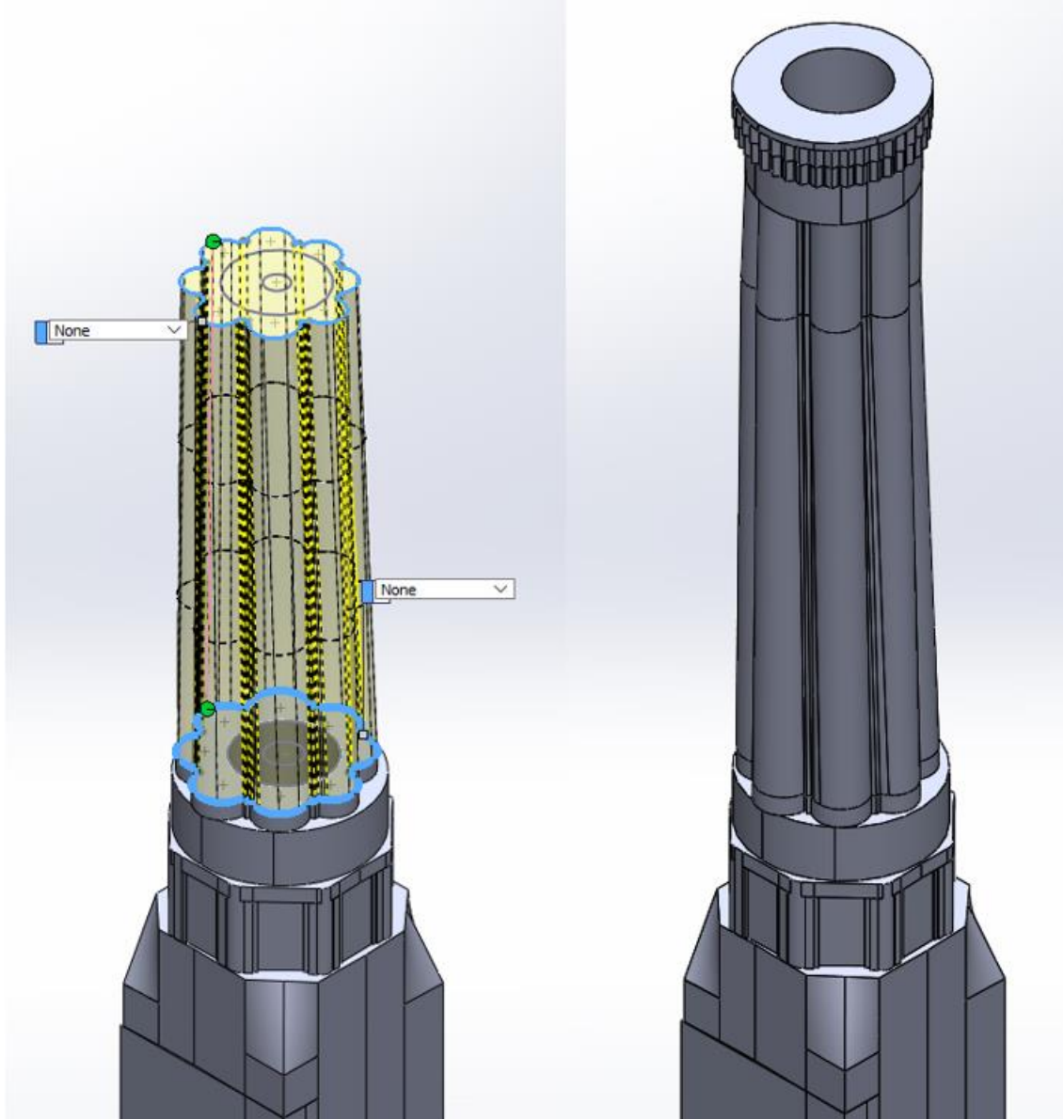
3.1.2. Üç boyutlu model

Yivli Minare'nin sonlu elemanlar yöntemi ile analizlerinin doğru sonuçlar vermesi için yapının üç boyutlu tasarımının doğru yapılması hayati önem taşımaktadır. Yapının modellenmesi için SOLİDWORKS isimli üç boyutlu katı modelleme programı kullanılmıştır. Bu bölümde yapının üç boyutlu modelleme aşamaları anlatılmıştır. Sıra dışı mimarisi ile Yivli Minare modellenmesi zor bir yapıdır. Yapı aşağıdan yukarıya kesitler halinde çizilip katılaştırılarak modellenmiştir.



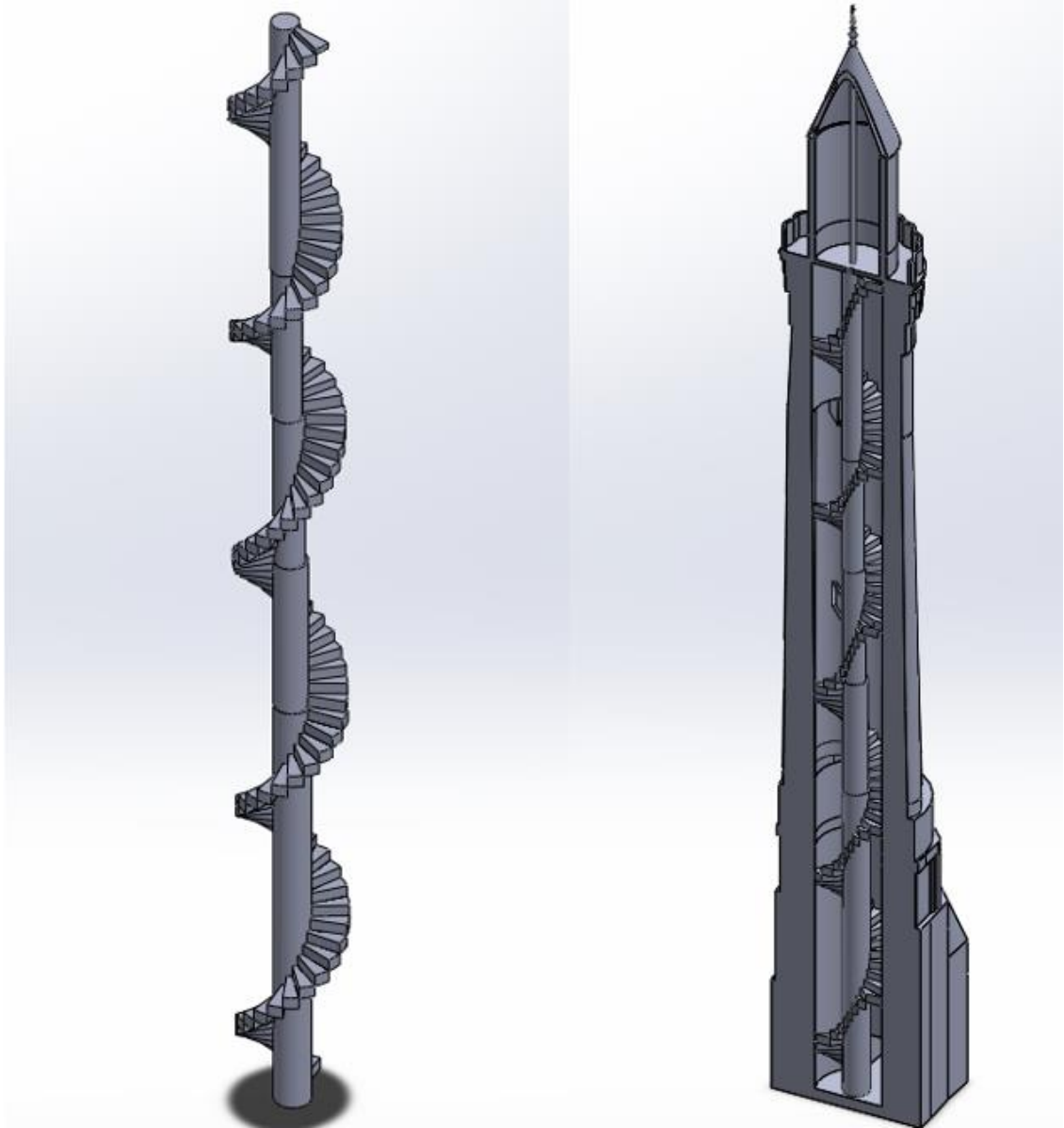
Şekil 3.2. Yivli Minare'nin kaidesinin SOLİDWORKS programında üç boyutlu modellenmesi

Yivli Minare'nin daralarak yukarı çıkan gövdesi aynı zamanda güneğe doğru kayma göstermektedir. Röleve incelendiğinde bu kayma görülebilmektedir, tasarım kayma dikkate alınarak gerçeğe uygun şekilde yapılmıştır.



Şekil 3.3. Yivli Minare'nin gövdesinin SOLİDWORKS programında üç boyutlu modellenmesi

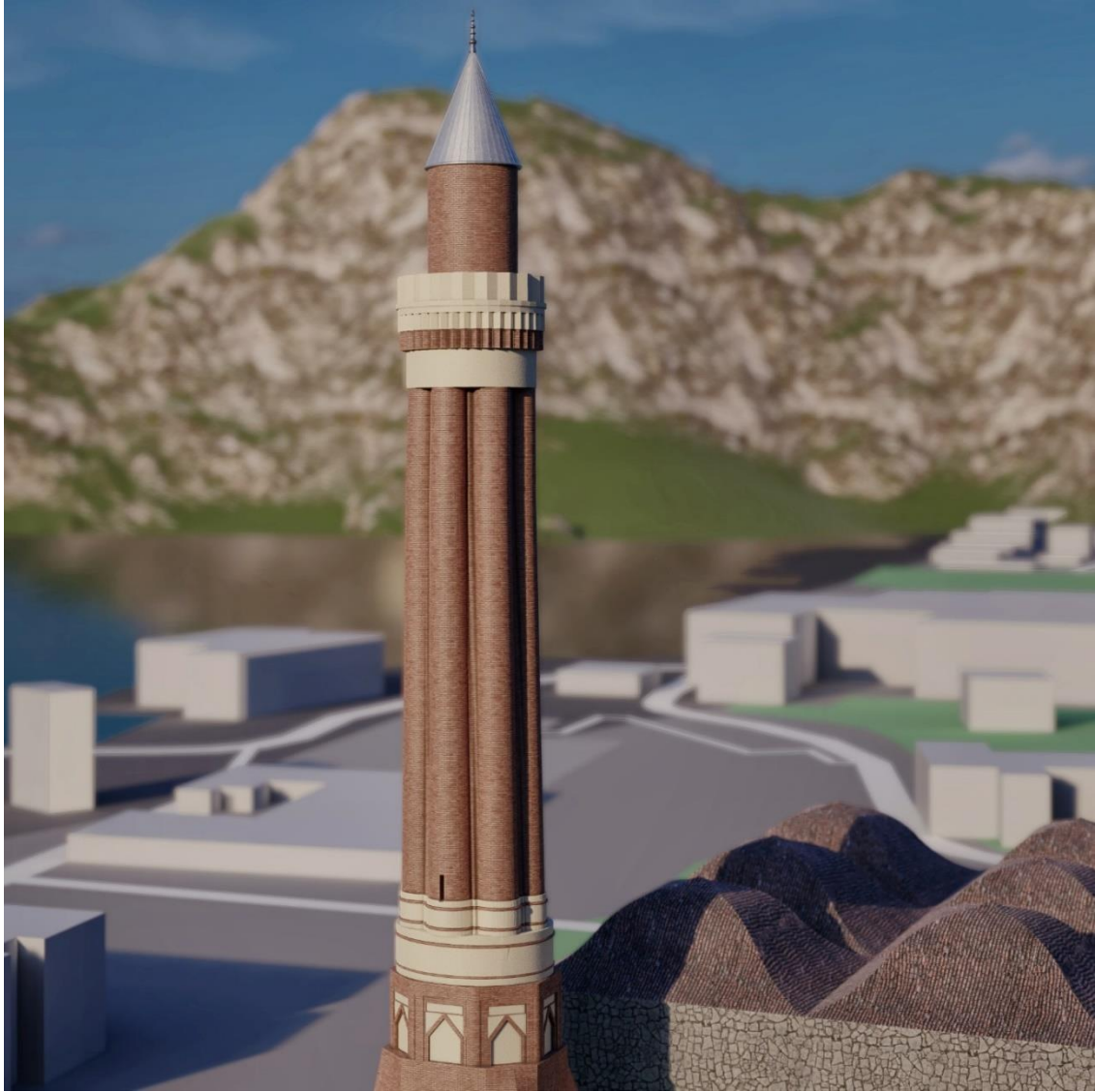
Minare merkezinde bulunan döner merdiven yapı rijitliği açısından önemli bir faktördür. Yapılacak analizlerde gerçeğe yakın sonuç alınması için merdivenler de modellenmiştir. Döner merdiven ve minare kesiti Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Yivli Minare'nin merdiven modellenmesi ve kesit görünümü

Yivli Minare'nin döner merdiven basamak ölçüleri (rıht, basamak) değişkendir. Döner merdiven modelleme yöntemi düşünüldüğünde her basamağın farklı ölçülerle modellenmesi oldukça zor olacağından basamaklar için ortalama bir değer belirlenmiş ve tüm basamaklar buna göre modellenmiştir. Döner merdiven, minare içerisine montaj unsurları kullanılarak sabitlenmiştir.

Yivli Minare'nin üç boyutlu modeli SOLIDWORKS programında modellenmiştir. Model, LUMION 9 mimari görselleştirme ve render programına aktarılmış, oluşturulan gerçekçi görsel Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Yivli Minare üç boyutlu görsel çalışma

3.2. Yivli Minare'nin Dinamik Parametrelerinin Belirlenmesi

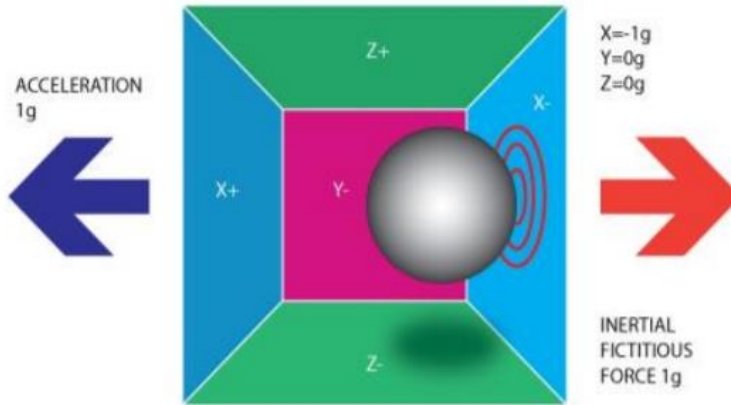
Yapı malzemelerinin özelliklerinin belirlenmesi yapılacak çalışmanın doğruluğu bakımından hayati öneme sahiptir. Bu özelliklerin belirlenmesi için pek çok teknik geliştirilmiştir. Yığma yapılar için amaç yapıyı meydana getiren taş, tuğla, harç gibi bileşenlerin mukavemet özellikleri ve elastisite modülü gibi parametrelerin belirlenmesidir. Deneyler tahribatlı ve tahribatsız olmak üzere ikiye ayrılır. Numunelerin alınıp laboratuvar ortamında incelendiği deneyler daha kesin sonuçlar vermektedir. Ancak söz konusu tarihi yapıların malzeme özelliklerinin belirlenmesi olduğunda yapıya zarar verilmemesi adına tahribatlı muayene yöntemleri tercih edilmez. Tahribatsız muayene yöntemleri genellikle kesin sonuçlar vermez ancak çeşitli metotlarla yaklaşık değerler elde edilebilir. Tarihi yapı malzemeleri zaten zaman içerisinde özelliklerini kaybettiklerinden tek, kesin bir değer bulunması gerçeğe uzaktır. Yapı malzeme

özelliklerinin, sonlu elemanlar modeline tanımlanmasında daha doğru sonuçların alınabilmesi için yığma yapıyı meydana getiren taş, tuğla, harç gibi elemanlar tek bir kompozit malzemeymiş gibi tanımlanabilmektedir.

Analizler, yapı malzemelerinin lineer elastik davranış sergiledikleri kabulüne göre yapılacaktır. Lineer davranışla yapının limit durumları analiz edilebilmektedir.

3.2.1. İvme ölçer

Tahribatsız muayene yöntemlerinden biri de yapıya ivme ölçer yerleştirilerek ivme kaydının alınmasıdır. İvme ölçerler üzerlerine etki eden yer çekimi etkisi (statik) ve hız değişiminden kaynaklanan ivmeyi (dinamik) ölçebilmektedirler (Karabela 2016). İvme ölçerlerin çalışma mantığı eylemsizlik prensibine dayanmaktadır. Şekil 3.6'da yerçekimsiz ortamda bir küp içerisindeki bilye, küpün hiçbir yüzeyine temas etmeden durmaktadır. Küp herhangi bir yöne hareket ettirildiğinde merkezdeki kürede hızlanmaya bağlı olarak hareketin tersi yönünde ivme oluşacaktır. İvme ölçerler de benzer prensiple çalışmaktadır.



Şekil 3.6. İvme ölçer çalışma prensibi (Karabela 2016)

Kullanılacakları yere göre ivme ölçerler oldukça hassas ölçüm yapabilirler. Tahribatsız muayene için yapıya yerleştirilen ivme ölçerler; yer hareketleri, rüzgâr hatta yapı çevresinde meydana gelen titreşimler ile bile ivme kaydı oluşturabilmektedir. İvme ölçer, ivme verilerini üç ekseninde de birim zamanda gerçekleşen ivme (m/s^2) değişimi olarak kaydeder. İvme verileri paket programlar ve dönüşümler uygulanarak yapı periyoduna dönüştürülür. Periyot hesaplandıktan sonra yapının üç boyutlu modeli üzerinde yapılan analizler ile yapıyı meydana getiren kompozit malzemenin elastisite modülü tespit edilebilmektedir.

3.2.2. Yivli Minare ivme ölçüm çalışmaları ve verilerin işlenmesi

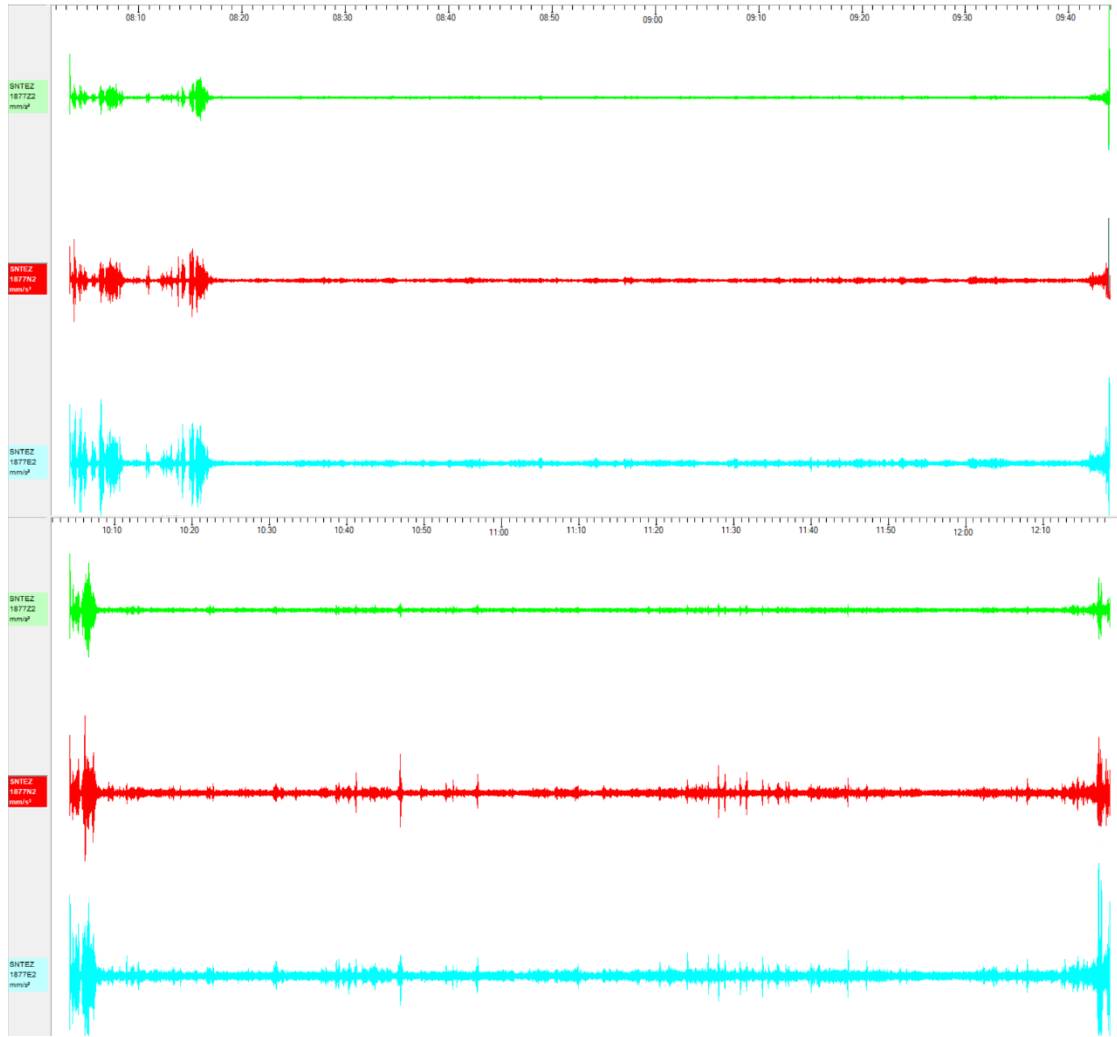
Çalışmalarda Sara Acebox-SL06 model ve marka ivme ölçer kullanılmıştır. Cihazın yerleştirileceği yer ve terazide olması doğru ölçüm alınabilmesi açısından önemlidir. İvme ölçer, Yivli Minare'nin merkezindeki döner merdiven kolonunun

bitimine yerleştirilmiştir. İlki 1 saat 40 dakika, ikincisi 2 saat olmak üzere farklı tarihlerde iki kez ivme kaydı alınmıştır. Veriler cihaz hafızasına birim zamanda gerçekleşen ivme değişimi olarak kaydedilmektedir.



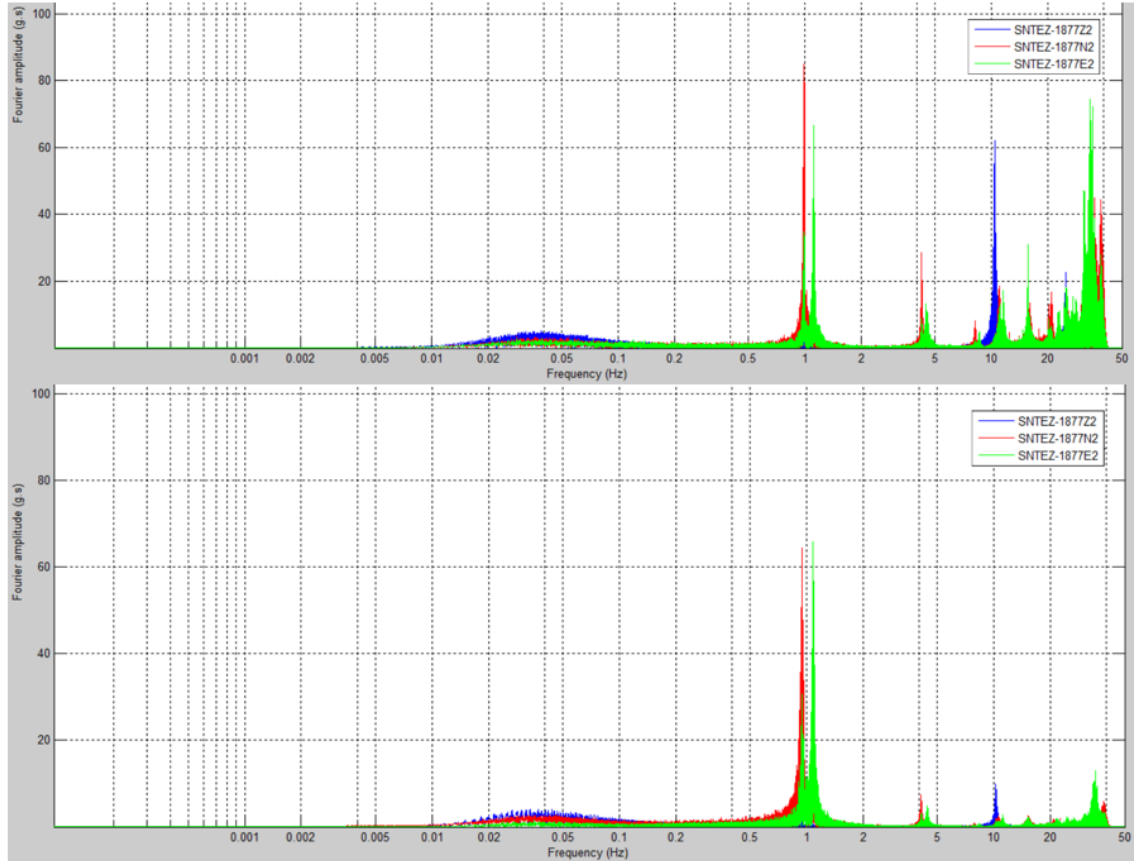
Şekil 3.7. Yivli Minare ivme ölçüm deneyi (02.02.2019)

Elde edilen ivme zaman verilerinin bilgisayar ortamında işlenebilmesi için SCREAM 4.6 isimli program kullanılmıştır. Cihazdan alınan dosyaların açılabilmesi için uzantıların .gcf olarak değiştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 3.8. Yivli Minare ilk ve ikinci deney ivme kayıtları, mm/s²-zaman grafikleri

Her iki ölçümden alınan ivme kaydı grafikleri Şekil 3.8’de gösterilmiştir. İki ölçüm için de X, Y ve Z eksenlerindeki ivme verileri görülebilmektedir. Özellikle ilk ölçümün Z eksenini incelendiğinde grafiğin merkez ekseninden uzaklaştığı görülebilmektedir. İvme ölçerden kaynaklanan bu sorunun çözümü için her iki deney verilerine Band Pass Filter uygulaması yapılmış, grafikler düzeltilmiştir. Band Pass Filter uygulaması, kısaca eksenden kayan verilerin yeniden eksene alınmasıdır. Sonraki aşama ise ivme zaman domainindeki verilerin frekans domainine dönüştürülmesidir. Frekans verilerine dönüşüm yapılması için Fourier faz dönüşümü adı verilen integral transformasyonu uygulanmıştır.



Şekil 3.9. Yivli Minare ilk ve ikinci ivme kayıtlarına göre yapı frekans değerleri

Yivli Minare ivme kayıtlarına uygulanan Fourier faz dönüşümü sonucu elde edilen frekans değerleri Şekil 3.9’da verilmiştir. Grafikler incelendiğinde her iki deney için de benzer sonuçlar gözlemlenebilmektedir. Grafik sonuçları tek bir frekans değeri vermediği için yorumlanması gerekmektedir. Her iki deney için de 1 Hz frekans değerinde yığılma olduğu gözlemlenmektedir. Yivli Minare ivme ölçüm çalışmaları ve yapılan hesaplamalar sonucu yapının periyodu $T=1.00$ sn olarak belirlenmiştir. Periyot değerinden yola çıkılarak yapıyı meydana getiren kompozit malzemenin elastisite modülü hesaplanacaktır.

3.3. Yivli Minare’nin Sonlu Elemanlar Yöntemine Göre Analizi

Yivli Minare’nin sonlu elemanlar yöntemine göre analizi için ANSYS Workbench 19.2 isimli pek çok mühendislik dalına hitap eden kapsamlı bir analiz programı tercih edilmiştir. Yapının üç boyutlu çizimi SOLIDWORKS programından Parasolid .x_t formatında export edilmiştir. Bu format SOLIDWORKS ile ANSYS arasında çizim transferi için uygundur.

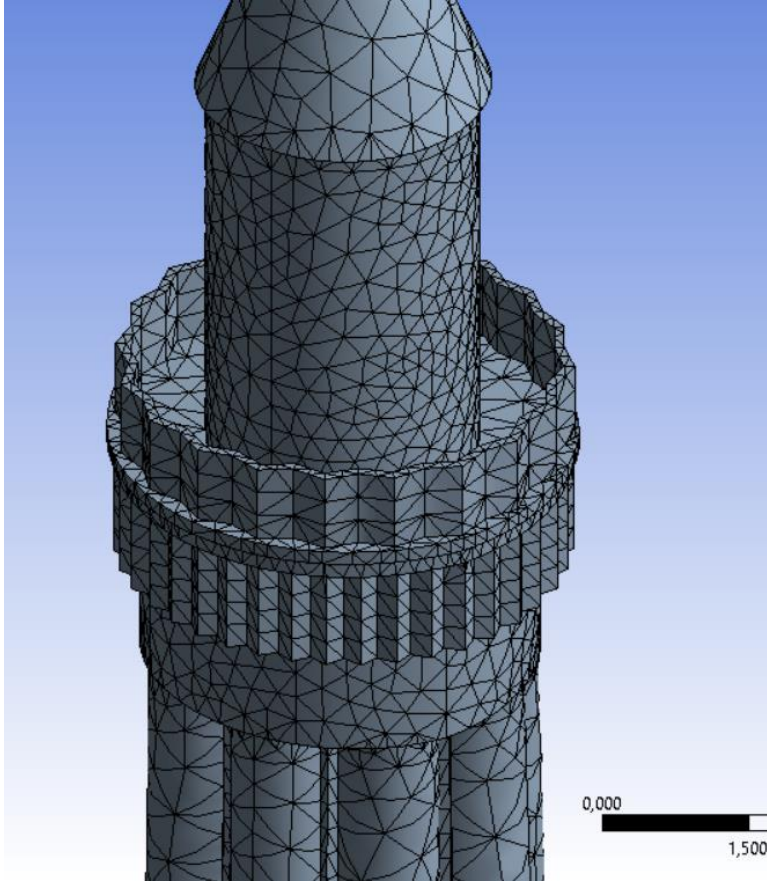
3.3.1. Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, genel olarak mühendislikteki sınır değer problemleri için yaklaşık sonuçlar elde etmeye yarayan bir sayısal hesaplama yöntemidir (Hutton 2004). Sonlu elemanlar yöntemi, yapıların iki veya üç boyutlu modellerinin statik ve dinamik analizlerinin yapılmasına imkân sağlayan, sonuçların sayısal, grafik ve üç boyutlu model üzerinde görüntülenebildiği modern bir analiz metodudur. Yakın tarihimizde teknolojinin gelişip bilgisayar ortamında analiz yöntemlerinin gelişmesi çok karmaşık yapıların dahi statik hesaplarının hızla yapılabilmesine imkân sağlamaktadır. Yöntem sayesinde statik ve dinamik yükler altındaki yapı elemanlarının davranışları, yapı elemanlarının birbirleri ile etkileşimleri, yapının deplasmanı ve periyodu hesaplanabilmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminde sistem ağ sistemi oluşturularak ifade edilir. Ağ oluşturan çizgilerin kesim noktaları düğüm noktalarını oluşturur. Ağ çizgileri arasında kalan iki veya üç boyutlu parçalara sonlu eleman denmektedir. Mesh adı verilen ağ çizgilerinin sıklığı sonlu elemanların boyutunu dolayısıyla çözümün hassasiyetini etkilemektedir. Her sonlu eleman için denklemler oluşturulur sonrasında sistemin bir bütün halinde çalışması için düğüm noktaları ile elemanların birbirlerine olan etkileri hesaplamalara yansıtılmaktadır. Sonlu elemanların birbirleri ile ilişkisi esas alınarak oluşturulan bu sisteme matematik model denir (Dabanlı 2008).

3.3.2. Modal analiz ve elastisite modülünün belirlenmesi

Üç boyutlu çizim ANSYS programına aktarıldıktan sonra programın SpaceClaim ögesi kullanılarak birbiri ile temas halinde olmayan katı modeller irtibatlandırılır. Sonlu elemanlar yöntemi analizinin kritik adımlarından biri de yapıyı mesh adı verilen sonlu elemanlara bölmektir. Programın Mesh ögesi kullanılarak sonlu elemanlar oluşturulmaya çalışılmış ancak özellikle mimari detaylarda bulunan küçük yüzeyler sebebiyle olumlu bir sonuca ulaşılammıştır. Analizin doğru yapılabilmesi için bazı mimari detaylar kaldırılmış ve küçük yüzeyler giderilmeye çalışılmıştır. Yapının sadeleştirilmiş ve başarılı bir şekilde sonlu eleman parçalarına ayrılmış hali Şekil 3.10'da verilmiştir. Çözümün ne kadar hassas olacağını mesh boyutları belirlemektedir, bu sebeple mesh kalitesi yüksek tutulmuş çizgiler sık yerleştirilmiştir.



Şekil 3.10. Yivli Minare’yi sonlu elemanlara ayırma işlemi (mesh uygulaması)

Mesh işlemi tamamlandıktan sonra programın Modal ögesi kullanılarak yapı elastisite modülü periyot ilişkisi irdelenmiştir. Bölüm 3.2’de yapılan hesaplamalarda yapının periyodu 1.0 sn olarak bulunmuştu, bu bölümde yapılan modal analizlerle yapı periyodunu 1.0 sn yapan elastisite modülü hesaplanmıştır. Yapı malzemesinin elastisite modülüne karşılık, yapı frekans değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kompozit malzemenin elastisite modülü için yapı frekans değerleri

Elastisite Modülü (MPa)	Frekans (Hz)	Periyot (sn)
20000	2.8	0.36
2000	0.9	1.11
2300	0.97	1.03
2500	1.00	1.00

Elastisite modülü 2500 MPa olarak hesaplanmıştır. Yapıyı oluşturan kompozit malzemenin yoğunluğu 2.5 t/m^3 , poisson oranı ise 0.2 seçilmiştir. Çobanoğlu (2014), çalışmalarında çeşitli yığma yapı malzemelerinin özelliklerini incelemiştir. Hesaplanan

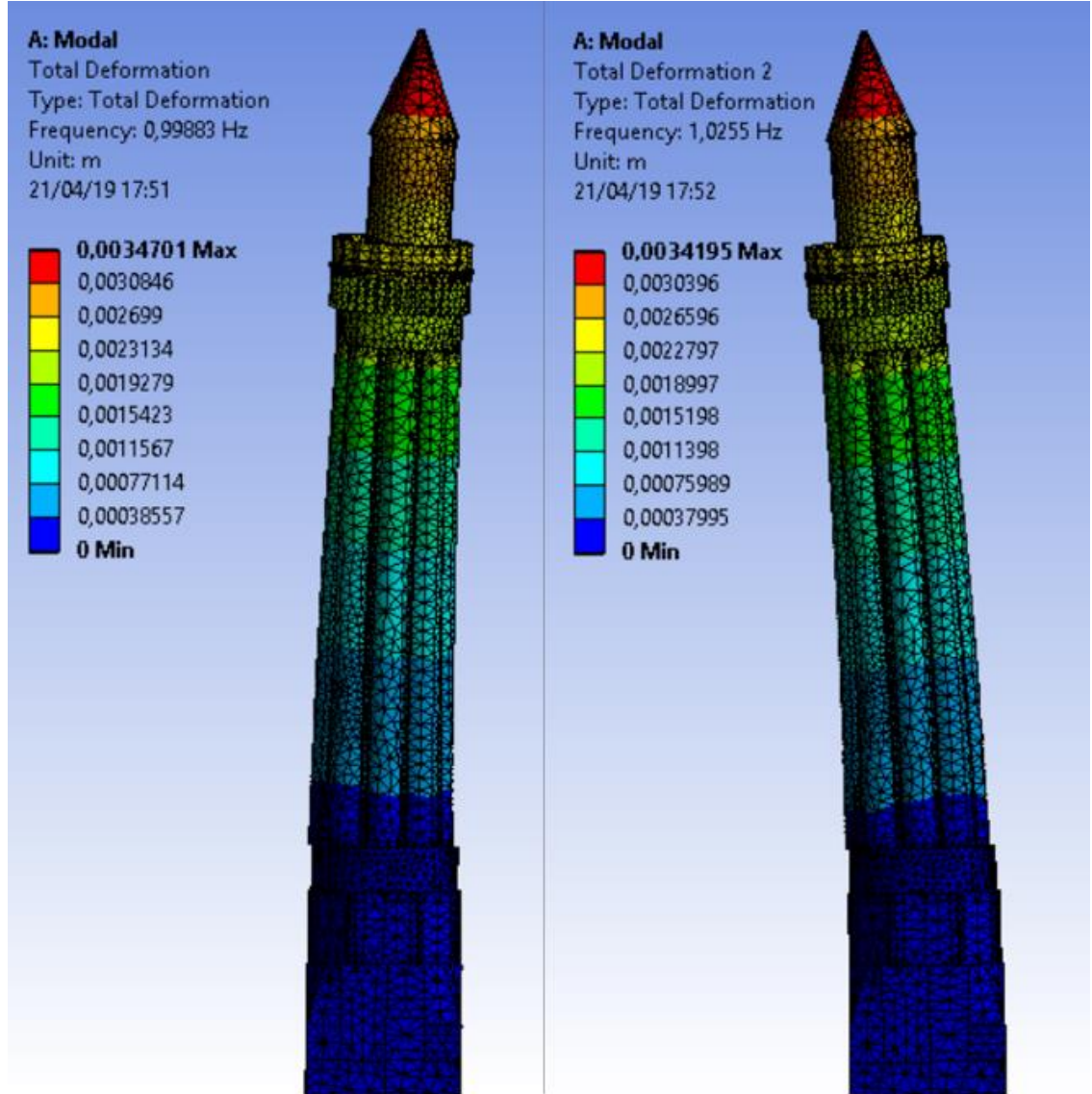
elastisite modülüne göre yapı malzemesi boşluksuz kil tuğlanın malzeme özellikleri ile yakınlık göstermektedir.

Modal analiz yapının serbest titreşim periyotlarını ve mod şekillerini belirlemek için kullanılmaktadır. Bir serbest titreşim modunun yapının toplam kütle kütle oranını ifade etmektedir. Deprem yönetmeliğimize göre işleme sokulacak mod sayısı, yapının toplam kütle kütle oranının en az %90'ının hesaba katılması ile sınırlandırılmıştır. Ancak bu durum tarihi yığma yapılarda çok fazla modun hesaba katılması ile sağlanabilmektedir. Çizelge 3.2'de ilk 20 modun kütle katılım oranları verilmiştir. 40 mod baz alınarak yapılan modal analizde X yönü için toplam kütle katılım oranı %90 seviyesinde olsa da Y yönü için %85'lerde kalmıştır. Her iki mod için toplam kütle katılım oranlarının %90'ın üzerine çıktığı mod sayısı 110'dur. 110 mod baz alınarak yapılan modal analizde X yönü için toplam kütle katılım oranı %94, Y yönü için toplam kütle katılım oranı ise %90 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.2. Yivli Minare kütle katılım oranları

Mod	Periyot (Saniye)	X Yönü Kütle Katılım Oranı %	Y Yönü Kütle Katılım Oranı %
1	1	24.353	14.32
2	0.97	14.452	24.992
3	0.24	11.805	11.655
4	0.24	11.719	11.464
5	0.16	0.137	0
6	0.12	4.722	6.175
7	0.12	6.179	0.045
8	0.11	0.027	0
9	0.08	3.261	0.028
10	0.08	2.857	0.031
11	0.07	0.018	0
12	0.06	3.357	0.017
13	0.06	1.768	0.031
14	0.05	0.041	0.001
15	0.05	0.021	0.002
16	0.04	0.158	0.003
17	0.04	1.597	0
18	0.04	0.14	0.002
19	0.04	0.516	0.005
20	0.04	0.001	0
	Toplam	87.1	68.7

ANSYS Workbench programında yapılan modal analiz sonucuna göre elde edilen kütle katılım oranları Çizelge 3.2’de verilmiştir. Çizelgeden görülebileceği gibi $T=1.0$ sn için X ve Y yönlerinde kütle katılım oranı %24’ler seviyesinde çıkmaktadır. Sonraki modlarda da kütle katılım oranı giderek düşmektedir dolayısıyla en yüksek kütle katılım oranına sahip 1. ve 2. mod baz alınmıştır.

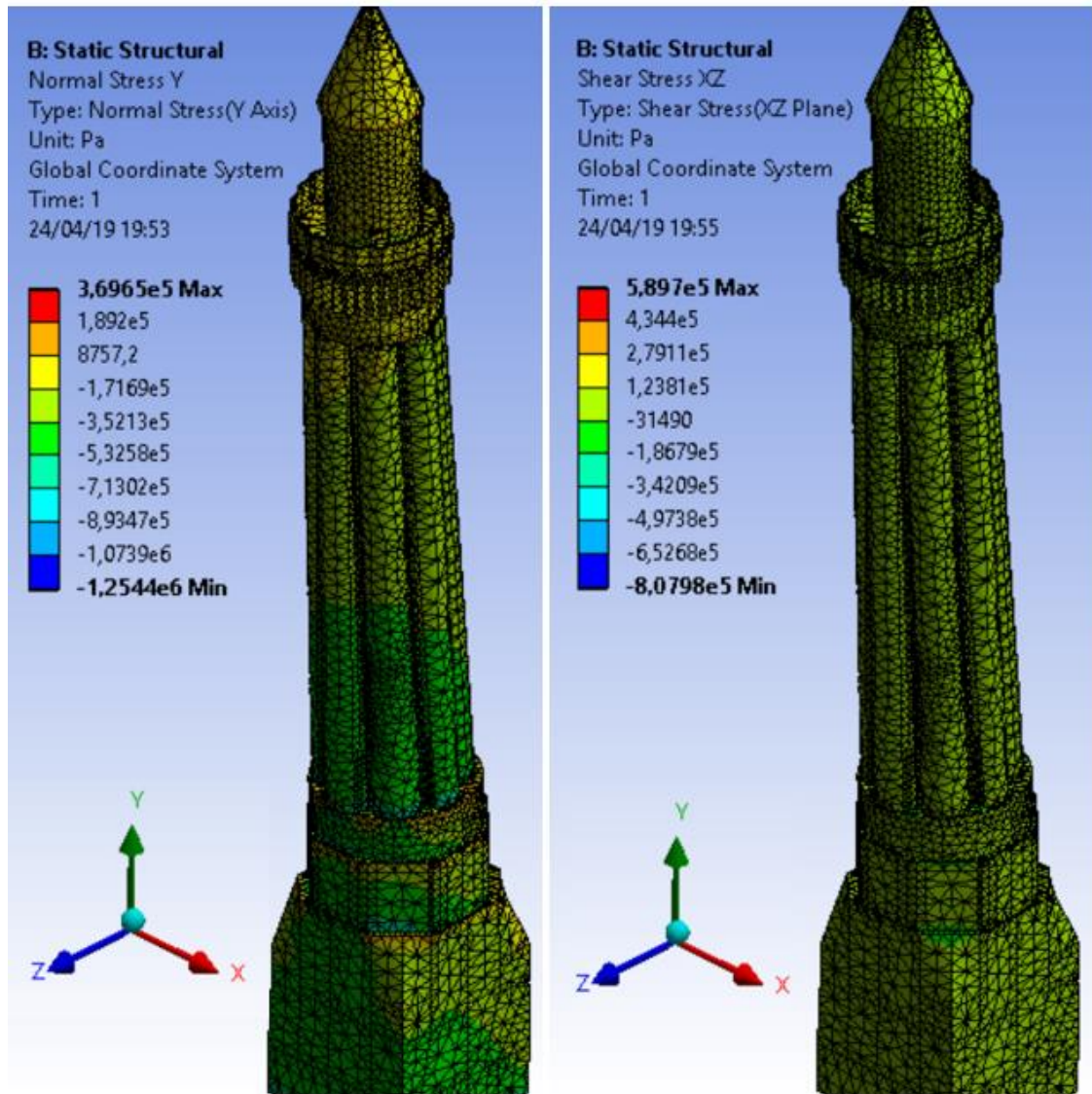


Şekil 3.11. Yivli Minare 1. ve 2. mod için şekil değiştirme ve deplasman değerleri

Modal analiz sonuçlarına göre yapının hakim periyotlarda yaptığı yer değiştirme Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Hakim periyotlarda burulma yoktur, X ve Y yönlü ötelemedir. Yivli Minare, simetriğe yakın bir yapı olduğundan dolayı X ve Y yönlü hakim periyotlar birbirine yakın çıkmıştır.

3.3.3. Düşey yükler altında statik analiz

Yivli Minare'nin düşey yükler altında statik analizi, zati ve hareketli yükler altındaki gerilme dağılımının elde edilmesi, oluşabilecek çatlakların yerlerinin tespiti açısından önemlidir. Deprem, rüzgar gibi yatay yüklerin hesaba katılmadığı bu yükleme aslında yapının olağan yükleme halidir ve sorunsuz olarak taşınması beklenmektedir. Statik analizlerde ölü ve hareketli yükler hesaba katılır ancak söz konusu yapı minare olduğu için yalnızca ölü yükler ile hesap yapılmıştır. Statik analizin yapılabilmesi için ANSYS programının Static Structural ögesi kullanılmıştır. Standart earth gravity komutu ile 9.81 m/s^2 'lik yerçekimi ivmesi yapı kütlesine etki ettirilmiştir.



Şekil 3.12. Yivli Minare G yüklemesi için Y ekseninde basınç ve çekme gerilmeleri ile XZ düzleminde kayma gerilmeleri

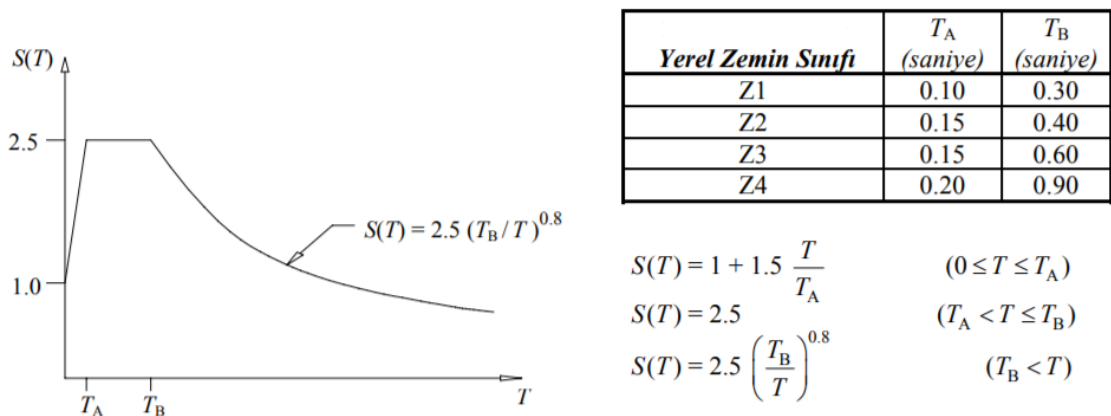
Yivli Minare'nin yalnızca ölü yüklerden kaynaklanan statik analiz gerilme değerleri Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Analize göre Y eksenindeki maksimum basınç gerilmesi 1 MPa, maksimum çekme gerilmesi ise 0.14 MPa civarındadır. XZ düzlemindeki maksimum kayma gerilmesi 0.2 MPa civarında olduğu tespit edilmiştir.

3.3.4. Eşdeğer deprem yükü yöntemi

Eşdeğer deprem yükü yöntemi, Türkiye Deprem Yönetmeliği'nde verilen deprem hesabında kullanılabilecek üç yöntemden biridir. Yöntem, deprem sebebiyle yapıya etkiyecek olan taban kesme kuvvetinin bütün yapıya dağıtılmasıdır. Deprem sebebi ile oluşacak taban kesme kuvvetinin büyüklüğü yapının oturduğu zemin sınıfı, periyodu, ağırlığı, hangi deprem bölgesinde bulunduğu, yapı önem katsayısı, deprem yükü azaltma katsayısı gibi pek çok değişkene bağlıdır. Deprem kuvvetleri kat hizalarına etki, kat hizalarına etki edecek kuvvetin hangi bağıntılarla hesaplanacağı deprem yönetmeliğinde verilmiştir.

3.3.5. Eşdeğer deprem yükü hesabı ve yapıya uygulanması

Eşdeğer deprem yükü hesabı, yer ivmesinin yapı kütlelerine etkisi sonucu oluşan yatay deprem kuvvetinin katlara dağıtılması esasına dayanmaktadır. Çoğu yapı için uygulanabilen basit bir yöntemdir. Deprem yükleri, katlı yapılarda kat hizalarına etki ettirilir. Bu yöntemi Yivli Minare gibi katlara sahip olmayan yapıya uygulamak için bazı kabullerin yapılması gerekmektedir. Yapı tabandan itibaren 10'ar metrelik parçalara ayrılmış gibi hesap yapılmıştır. Hesaplamalar sonucu elde edilen yatay kuvvetler bölünmüş parçaların ortalarına etki ettirilecektir. Yılmaz ve arkadaşları (2018) tarafından yapılan çalışmada Yivli Minare'nin yerel zemin sınıfı Z2 olarak tespit edilmiştir. Z2 yerel zemin sınıfı için spektrum karakteristik periyotları $T_A = 0.15$ - $T_B = 0.40$ saniyedir. Antalya, Türkiye Deprem Bölgeleri Haritasına göre 2. Dereceden deprem bölgesindedir, etkin yer ivmesi $A = 0.30$ alınmıştır. Yivli Minare için yapı önem katsayısı $I = 1.2$, deprem yükü azaltma katsayısı $R = 2$ olarak seçilmiştir. Yapı periyodu yaklaşık $T = 1$ saniye olarak bulunmuştu, Şekil 3.13'teki elastik ivme spektrum grafiğine göre $S(T) = 1.2$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.13. Elastik ivme spektrum grafiği (Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007)

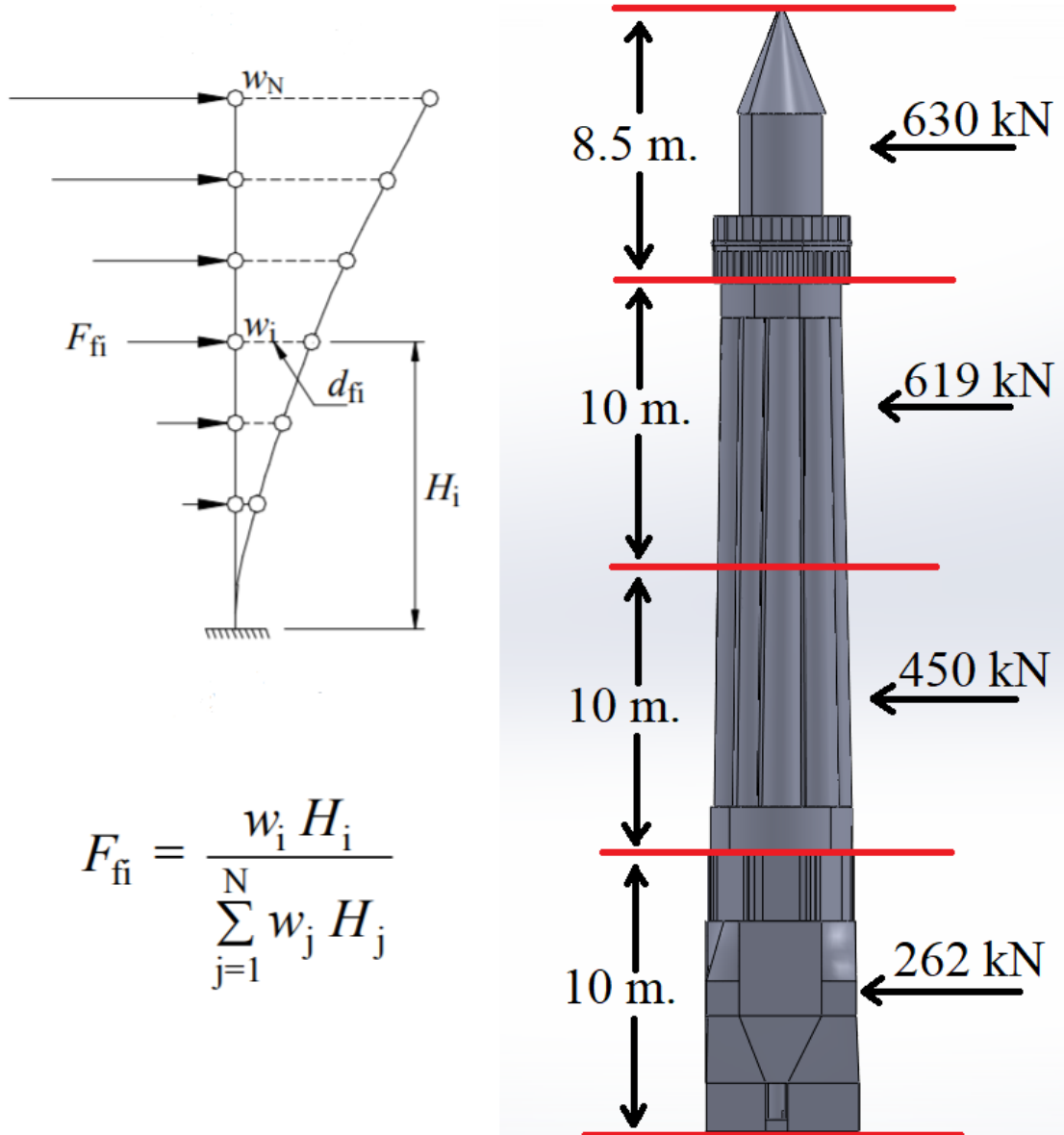
Üç boyutlu model özelliklerine bakılarak yapının toplam hacmi belirlenmiş ve yoğunlukla (2.5 t/m^3) çarpılarak toplam kütle 1017.4 ton bulunmuştur. Toplam ağırlık, toplam kütle ile yerçekimi ivmesinin (9.81 m/s^2) çarpımından 9980.45 kN olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.3. Eşdeğer deprem yükü hesabı için yapı özellikleri

W=	9980.45	(kN)	$T_A=$	0.15
$A_o=$	0.3		$T_B=$	0.4
Zemin sınıfı	Z2		$S_{(T1)}=$	1.2
Önem Katsayısı (I)	1.2		$R_a=R=$	2
$V_t= W * A_{(T1)} \setminus R_{a(T1)} = W * A_o * S_{(T1)} \setminus R_{a(T1)}$				
$V_t=$	1798.16	kN		
$\Delta FN= 0,0075 * N * V_t$				
$\Delta FN=$	53.94	kN		

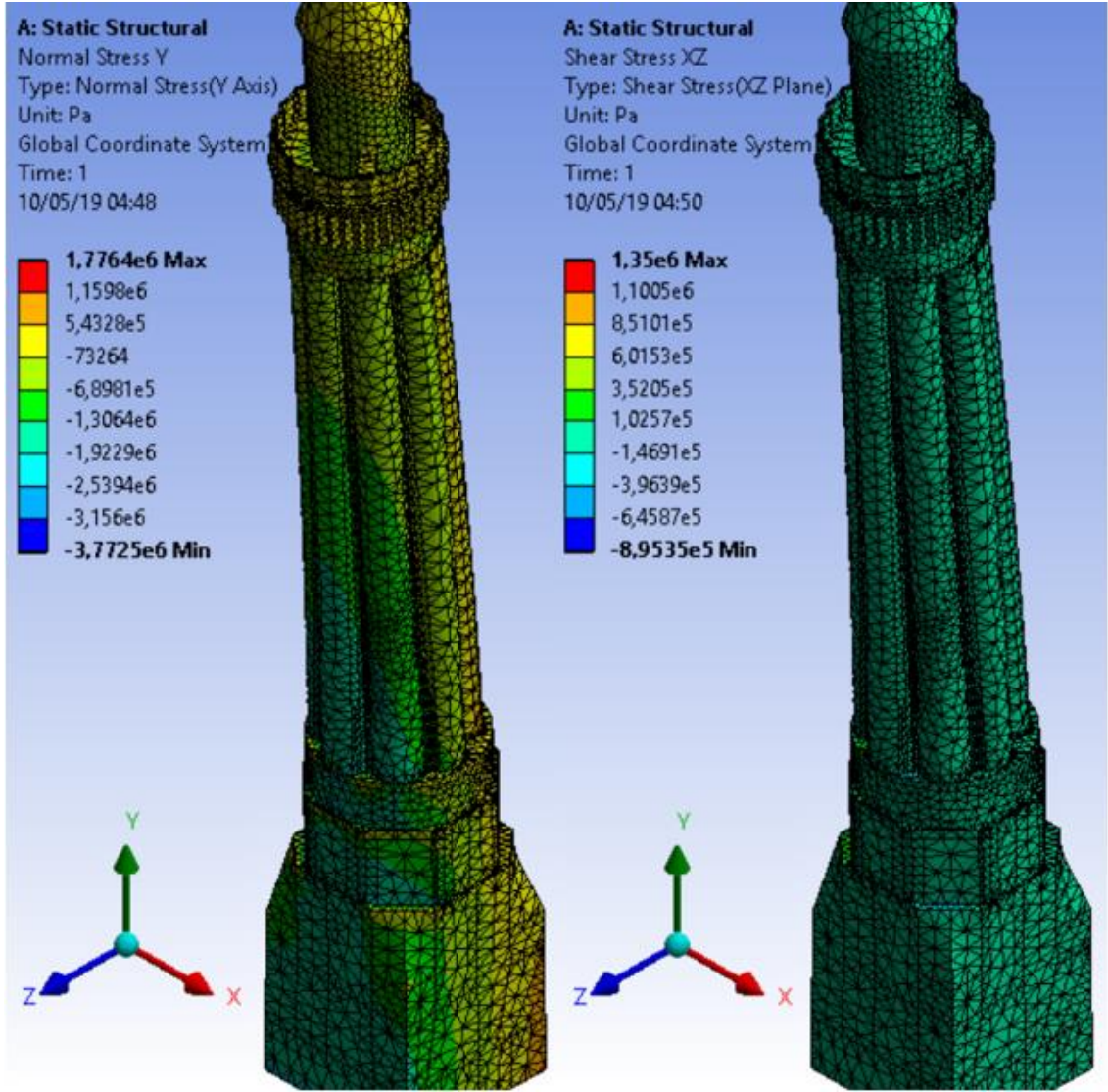
Çizelge 3.4. Eşdeğer deprem yükü hesabı

					$F_i=(V_t-\Delta FN)*(w_i*H_i)/(\sum w_i*H_i)$			
Parça No.	G_i (kN)	$w_i=G_i$	H_i (m)	w_i*H_i	F_{fi}	m_i (t)	F_i	$V_i=\Delta FN+F_i$
4.	2007.17	2007.17	38.5	77276.0	0.330	204.60	575.67	629.61
3.	2527.62	2527.62	30	75828.6	0.324	257.66	564.89	618.83
2.	2657.76	2657.76	20	53155.2	0.227	270.92	395.98	449.93
1.	2787.90	2787.90	10	27879.0	0.119	284.19	207.68	261.63
	W=	9980.45	$\sum w_i*H_i=$	234138.8				



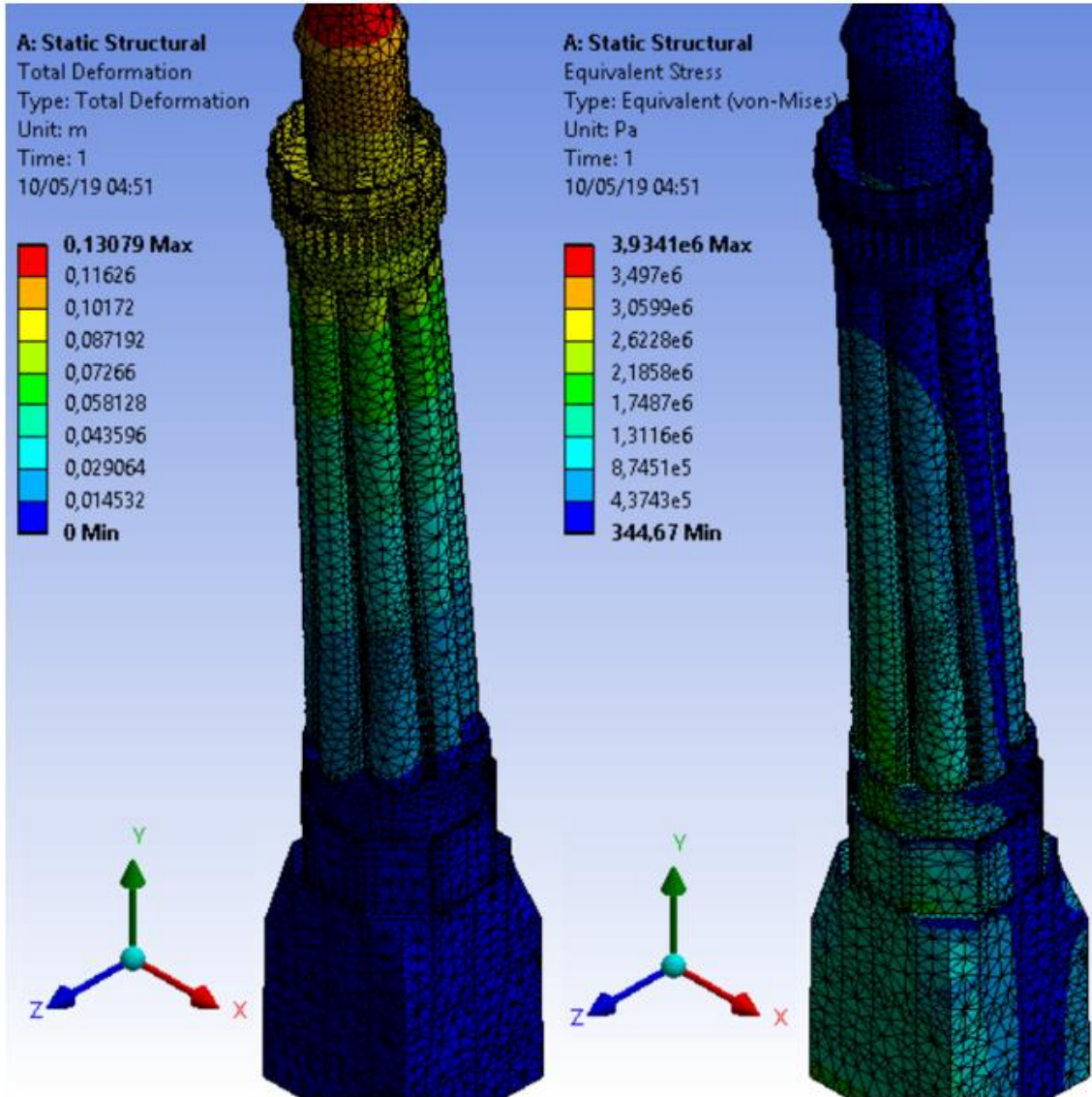
Şekil 3.14. Yivli Minare'ye etkiyen eşdeğer deprem kuvvetleri

Eşdeğer deprem yükü hesabı için Yivli Minare'nin dört parçaya ayrıldığı varsayılmıştır. Şekil 3.14'de parçaların orta noktalarına etkiyen eşdeğer deprem kuvvetleri gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Yivli Minare G+EZ yüklemesi için Y ekseninde basınç ve çekme gerilmeleri ile XZ düzleminde kayma gerilmeleri

Hesaplanan deprem kuvvetleri ve ölü yükler, ANSYS programında yapıya etki ettirilerek yapının yatay ve düşey yükler etkisindeki performansı irdelenmiştir. Hesaplanan eşdeğer deprem yükü ve ölü yükler altında yapılan analiz sonuçları Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da görülmektedir. Y eksenindeki maksimum basınç gerilmesinin 2.5 MPa, maksimum çekme gerilmesinin ise 1.1 MPa civarında olduğu gözlemlenmektedir. XZ düzlemindeki maksimum kayma gerilmelerinin 0.3 MPa mertebelerine ulaştığı tespit edilmiştir. Yivli Minare'nin külah kısmı 13 cm ile maksimum deplasmanın gerçekleştiği yer olarak görülmektedir.



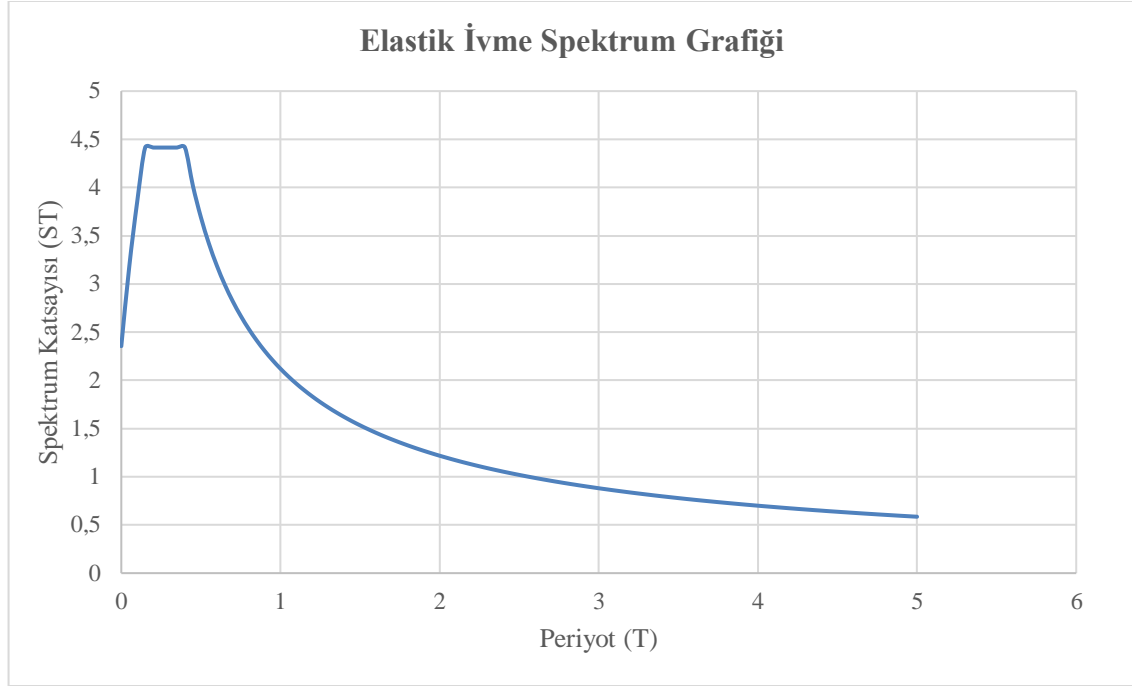
Şekil 3.16. Yivli Minare G+EZ yüklemesi için yer değiştirme ve von-Mises gerilmeleri

Eşdeğer deprem yükü hesabı 40 metreden kısa ve burulma düzensizliği katsayısının 2'den küçük olduğu yapılarda kullanılan basit bir deprem yükü hesabıdır. Yivli Minare, alem başlangıcına kadar 38.5 metredir. Eşdeğer deprem yükü hesabında her 10 metre için hesaplanan deprem kuvvetleri yapıya yüzeyler vasıtası ile uygulandığında gerilme artışlarına sebep olabilmektedir. Yapısal analizlerde daha doğru sonuçlar veren mod birleştirme yöntemi ile hesap tavsiye edilmektedir. Bu durumda yapının burulma düzensizliği katsayısına bakılmaksızın mod birleştirme yöntemi ile de hesap yapılmasına karar verilmiştir.

3.3.6. Mod birleştirme yöntemi ile analiz (spektrum analizi)

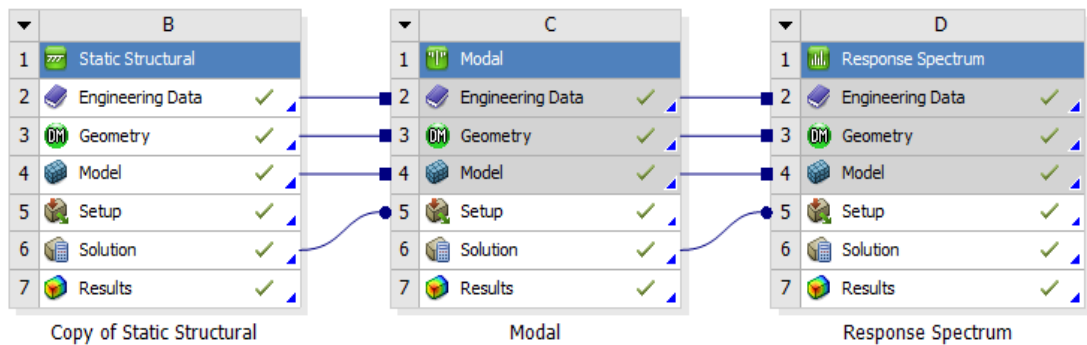
Deprem yönetmeliğimizde verilen diğer bir dinamik analiz yöntemi mod birleştirme yöntemidir. Yöntem, her bir serbest titreşim modunun katkılarının belirlenip

belirli yöntemlerle birleştirilerek yapı davranışına etki ettiği esasına dayanmaktadır. Mod birleştirme yönteminin uygulanabilmesi için bir spektral eğrinin tanımlanması gerekmektedir. Yivli Minare için yerel zemin sınıfı Z2, yapı önem katsayısı 1.2, taşıyıcı sistem davranış katsayısı 2 ve etkin yer ivmesi katsayısı 0.3 olarak verilmiştir. Bu parametreler kullanılarak oluşturulan spektral eğri Şekil 3.17’de verilmiştir.

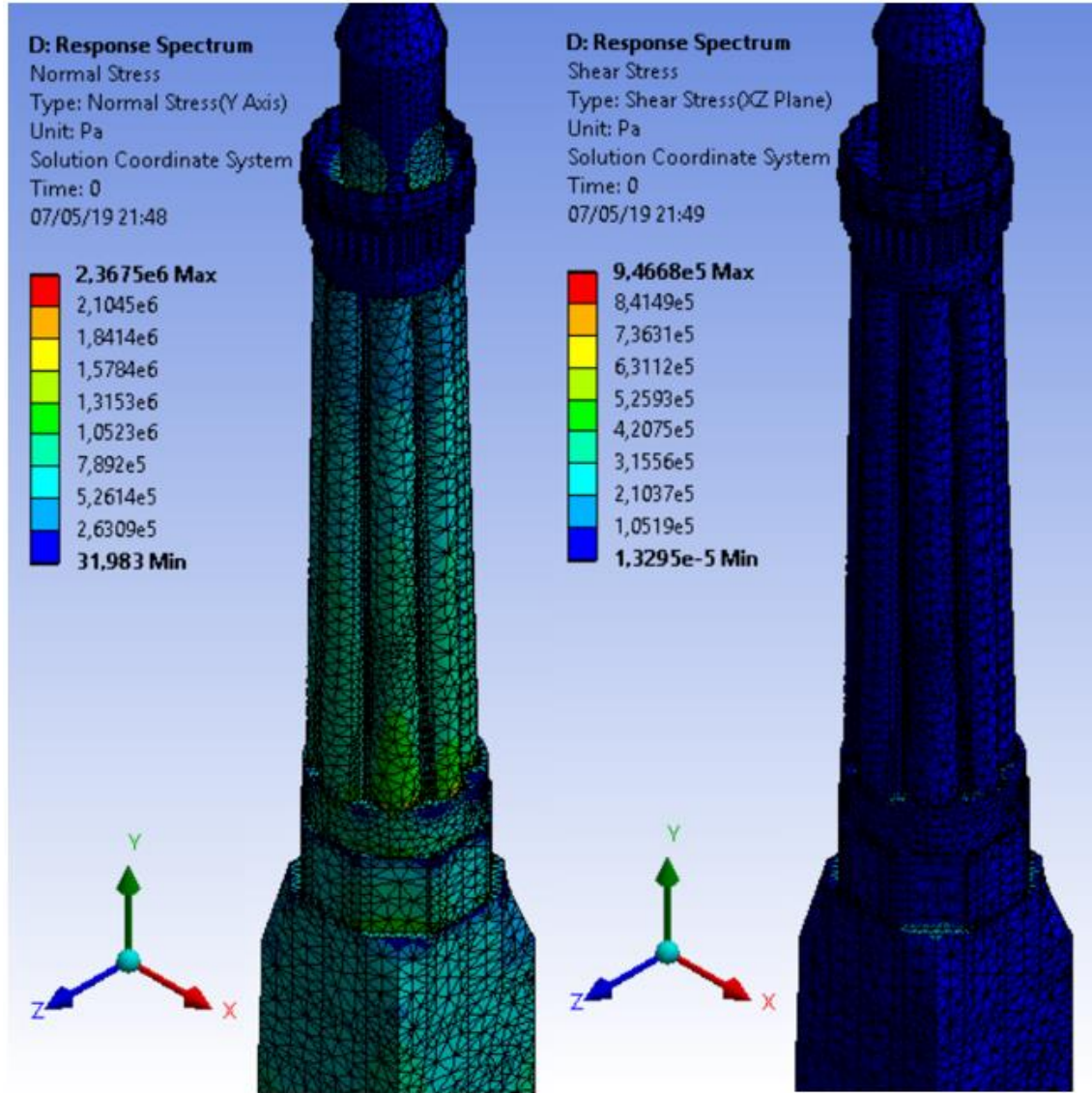


Şekil 3.17. Yivli Minare için elastik ivme spektrum grafiği

ANSYS programında mod birleştirme yöntemi ile analizin yapılabilmesi için öncesinde statik yapı analizi ve modal analizin yapılması gerekmektedir. Statik yapı analizinde yapı alttan sabitlenmekte ve yapının kendi ağırlığının etki etmesi için yer çekimi ivmesi eklenmektedir. Modal analiz her iki yönde de toplam kütle katılım oranının %90’ın üzerinde olduğu 110 mod baz alınarak yapılmıştır. ANSYS Workbench programında analizlerin diyagramı Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



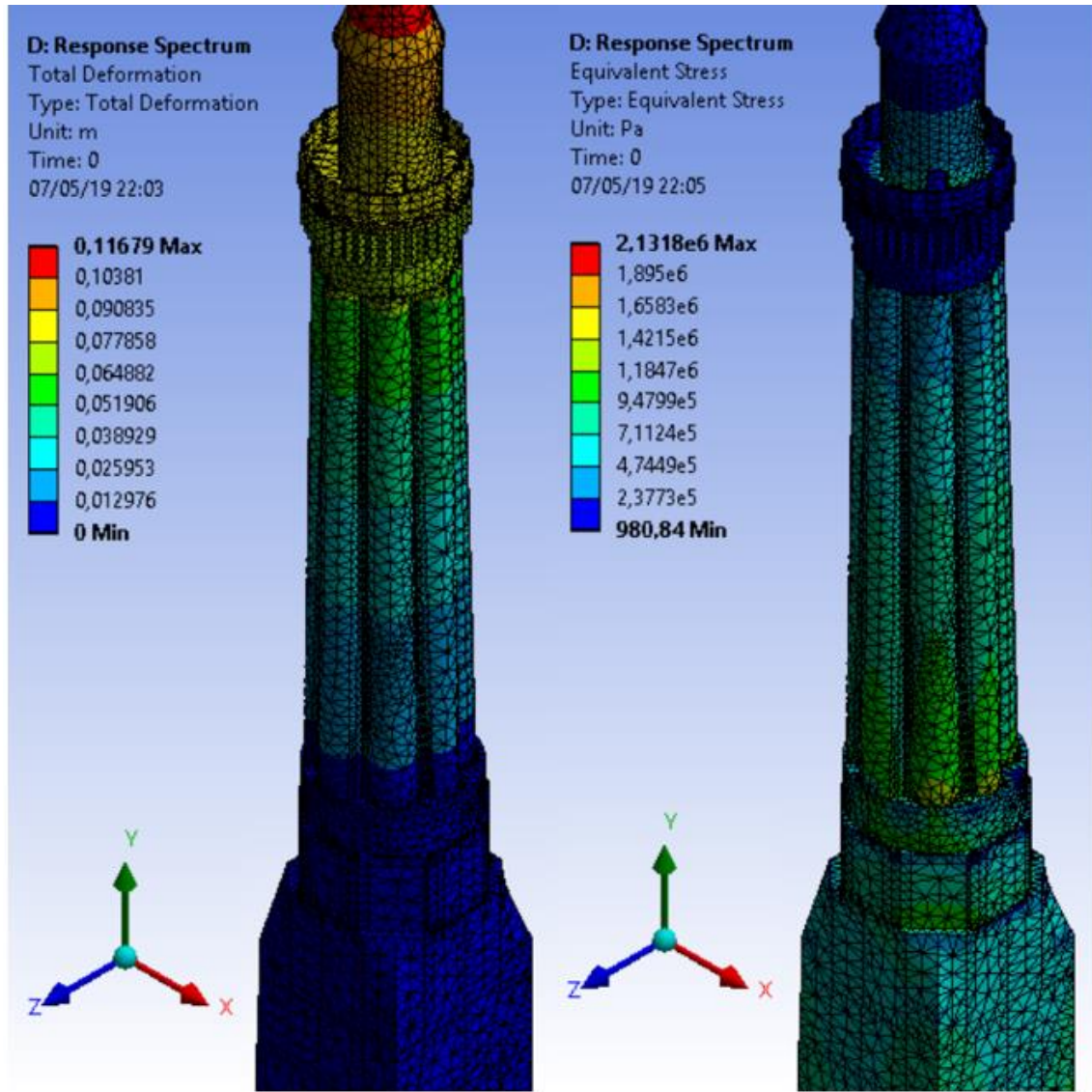
Şekil 3.18. ANSYS analiz diyagramı



Şekil 3.19. Yivli Minare mod birleştirme analizi için Y ekseninde basınç ve çekme gerilmeleri ile XZ düzleminde kayma gerilmeleri

Programın response spectrum ögesine elastik ivme spektrum eğrisi değerleri frekans ivme olarak tanımlanmıştır. Mod birleştirme yöntemi analiz metodu olarak kareleri toplamının karekökü (SRSS) kullanılmıştır.

Yivli Minare'nin mod birleştirme yöntemi ile analiz sonuçları Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de verilmiştir. Yapının düşey Y eksenindeki maksimum basınç gerilmesinin 2.3 MPa, maksimum çekme gerilmesinin ise 1.0 MPa seviyesine ulaştığı görülmektedir. XZ düzlemindeki maksimum kayma gerilmesinin ise 0.3 MPa civarındadır. Yapının maksimum deplasmanı 11 cm'dir.



Şekil 3.20. Yivli Minare mod birleştirme analizi için yer değiştirme ve von-Mises gerilmeleri

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yivli Minare'nin depreme dayanıklılığının araştırılması ile ilgili yapılan çalışmalar sonucu elde edilen bulgular şu şekildedir.

Yivli Minare'nin dinamik parametrelerinin tespiti amacıyla farklı tarihlerde iki kez ivme kaydı alınmıştır. İvme kayıtlarını SCREAM isimli programda işlenmiş ve Fourier faz dönüşümü ile frekans domainine çevrilmiştir. Grafik sonuçları tek bir frekans değeri vermediği için yorumlanması gerekmektedir. Her iki deney için de 1 Hz frekans değerinde yığılma olduğu gözlemlenmektedir. Yapılan araştırmalar sonucu yüksekliği yaklaşık 40 metre olan minare gibi narin bir yapı için 1 Hz frekans değerinin uygun olduğu kanaatine varılmıştır. Yivli Minare ivme ölçüm çalışmaları ve yapılan hesaplamalar sonucu yapının periyodu $T=1.0$ sn olarak belirlenmiştir.

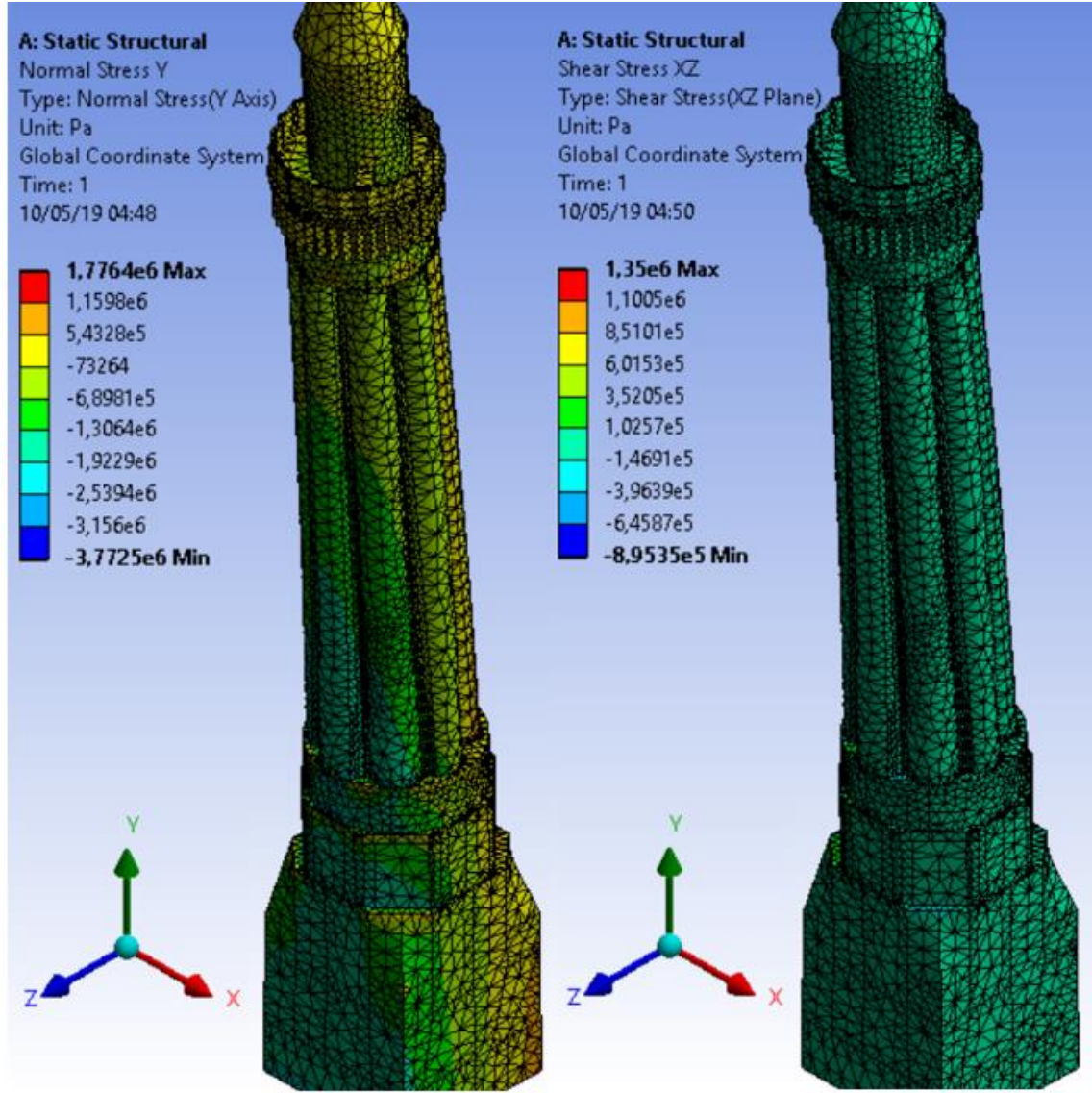
Yapıyı meydana getiren taş, tuğla, harç, kalas gibi malzemeler tek bir kompozit malzeme olarak tanımlanmıştır. Kompozit malzemenin elastisite modülü direkt yapının periyodu ile ilişkilendirilebilmektedir. Analizlere göre yapı periyodunu 1.0 sn yapan kompozit malzemenin elastisite modülü 2500 MPa olarak hesaplanmıştır.

Belirlenen malzeme özellikleri kullanılarak 20 mod için modal analiz yapılmış, X yönü için toplam kütle katılım oranı %87.1, Y yönü için ise %68.7 bulunmuştur. Yığma tarihi yapıların toplam kütle katılım oranlarının %90'ı geçtiği mod sayısı çok fazla olabilmektedir. 40 mod için X yönü toplam kütle katılım oranı %90'ı geçse de Y yönü için istenen orana ulaşamamıştır. 110 mod ile yapılan modal analiz sonucu X yönü için toplam kütle katılım oranı % 94, Y yönü için ise %90 olarak elde edilmiştir. $T=1.0$ sn için X ve Y yönlerindeki maksimum kütle katılım oranları %24'ler seviyesindedir. Sonraki modlarda da kütle katılım oranı giderek düşmektedir dolayısıyla en yüksek kütle katılım oranına sahip 1. ve 2. mod baz alınmıştır.

Yapıyı meydana getiren malzemelerin emniyet gerilmelerinin tespit edilmesi ve yükler altında meydana gelen değerlerle kıyaslanması yapının risk altında olup olmadığının yorumlanması açısından önem taşımaktadır. Malzemelerin basınç, çekme ve kayma emniyet gerilmeleri laboratuvar ortamında yapılan deneylerle tespit edilebilmektedir. Yivli Minare'nin tarihi yapı olması sebebiyle yapı malzemelerin laboratuvarında incelenmesi için özel izinlerin alınması gerekmektedir. Bu sebeple malzeme emniyet gerilmeleri için deprem yönetmeliği ve literatürdeki veriler incelenmiştir. Deprem yönetmeliğinin yığma yapılar bölümünde, farklı yığma yapı malzemeleri ve harçlar için hesap yükleri altında yapıda oluşan basınç, çekme ve kayma emniyet gerilmeleri verilmiştir. Can ve arkadaşları (2012), yığma yapı malzemelerinin emniyet gerilmelerinin belirlenmesinde deprem yönetmeliğindeki tuğla yığma duvarlar için verilen emniyet gerilmelerini üç katsayısı ile çarparak sınır gerilme değerleri elde etmişlerdir. Buna göre basınç emniyet gerilmesini 2.4 MPa, çekme emniyet gerilmesini 0,36 MPa ve kayma emniyet gerilmesini de 1.05 MPa olarak belirlemişlerdir.

Yatay yük analizlerinden önce yapının düşey yükler altında analizinin yapılması deprem yönetmeliğimizce tavsiye edilmiştir. Yapının statik analizinde hareketli yükler göz ardı edilmiş, yalnızca zati (ölü) yükler kullanılmıştır. Analize göre Y eksenindeki maksimum basınç gerilmesi 1 MPa, maksimum çekme gerilmesi ise 0.14 MPa civarındadır. XZ düzlemindeki maksimum kayma gerilmesi ise 0.2 MPa civarında olduğu

görülmüştür. Yapının kendi kütlesi sebebiyle oluşan bu gerilmeleri yapının sorunsuzca karşılaması beklenmektedir. Analiz sonucu elde edilen gerilme değerleri beklendiği gibi sınırlar dahilinde çıkmıştır.

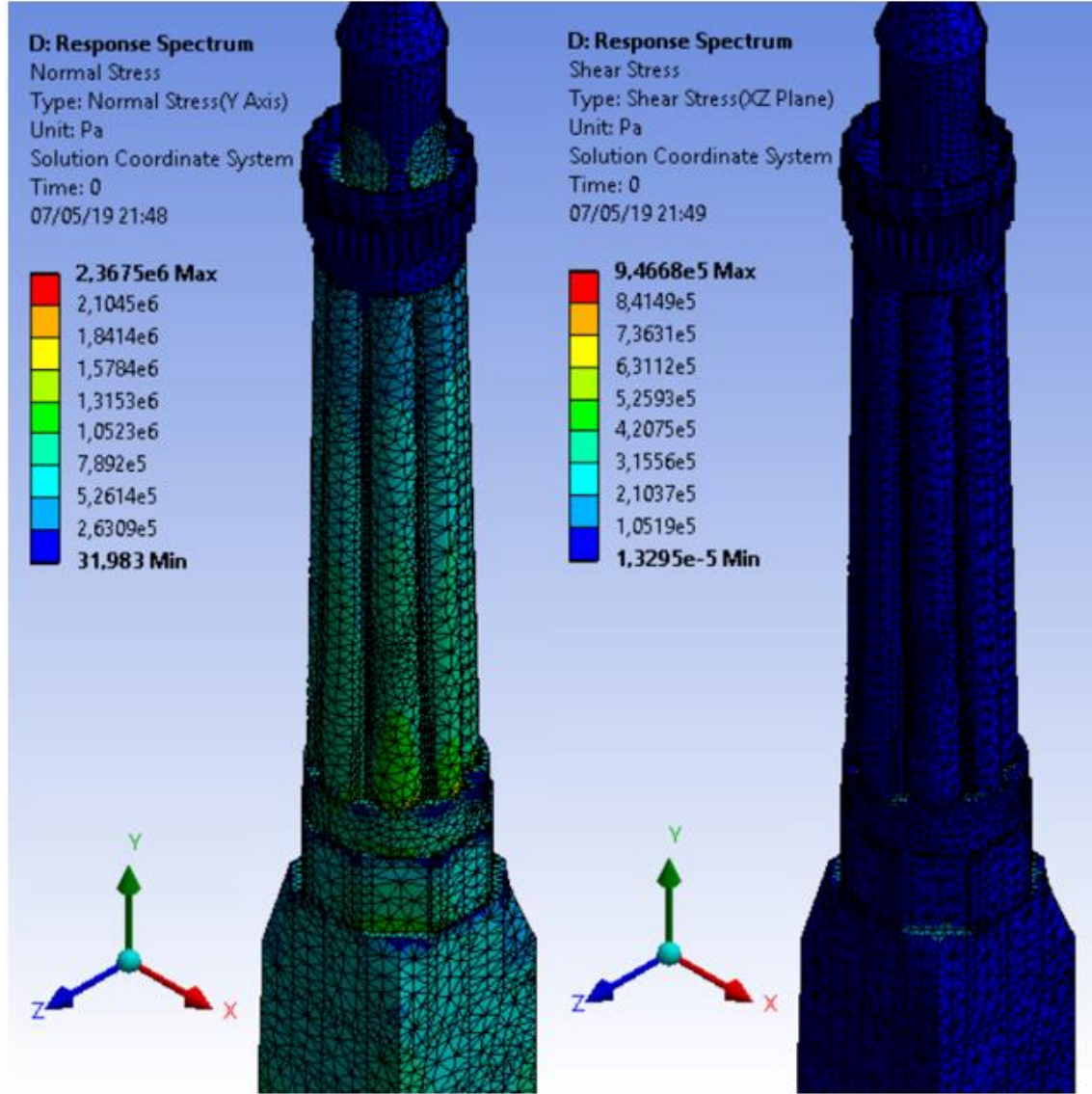


Şekil 4.1. Yivli Minare G+EZ yüklemesi için Y ekseninde basınç ve çekme gerilmeleri ile XZ düzleminde kayma gerilmeleri

Yapı periyodunun belirlenmesinden sonra eşdeğer deprem yükü yöntemi ile 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan, yapıya etki etmesi muhtemel deprem kuvveti hesaplanmıştır. Hesaplanan deprem kuvvetleri belirli aralıklarla yapıya etki ettirilmiştir. Eşdeğer deprem yükleri ve zati yükler ile yapılan analize göre elde edilen gerilmeler Şekil 4.1’de verilmiştir. Eşdeğer deprem yükü hesabına göre elde edilen yatay kuvvetler ile zati yüklerin etkisi altında yapının Y eksenindeki maksimum basınç gerilmesi 2.5 MPa ve maksimum çekme gerilmesi 1.1 MPa mertebelerine ulaşmaktadır. XZ ekseninde kayma

gerilmelerinin ise 0.3 MPa mertebelerine ulaştığı görülmüştür. Yivli Minare'nin külah kısmı 13 cm ile maksimum deplasmanın gerçekleştiği yer olarak görülmektedir. Minarenin; tambur, pabuç ve kaide bölümlerinde ani kesit değişiminin olduğu bölgelerde basınç gerilmesi 2.5 MPa mertebelerine kadar yükselmektedir. Söz konusu maksimum basınç gerilmesinin sınırlı bölgelerde olduğu görülmektedir. Yığma yapılar, çekme ve kayma gerilmelerine kıyasla daha yüksek aksenal basınç kuvvetleri taşıyabilmektedirler. Bu yığma yapıların çekme ve kayma gerilmelerini karşılamada daha zayıf kaldıkları ve söz konusu gerilmelere daha fazla dikkat edilmesi gerektiği anlamına gelmektedir. Tambur ile gövdenin kesiştiği, yapının yivlerinin başladığı bölgede meydana gelen ve 1.1 MPa değerine kadar çıkan çekme gerilmesi bölgede ciddi çatlaklara sebep olabileceği, tuğlaları bir arada tutan harcın bu gerilmeyi karşılamakta yetersiz kalacağı düşünülmektedir. Maksimum kayma gerilmesi olan 0.3 MPa sınırlı bölgelerde oluşmuştur, olağan bir gerilmedir. Yapının külah kısmında meydana gelen 13 cm'lik maksimum deplasman yaklaşık 40 metrelik bir yapı için sorun teşkil etmemektedir.

Eşdeğer deprem yükü hesabında her 10 metre için hesaplanan deprem kuvvetleri yapıya yüzeyler vasıtası ile uygulandığında gerilme artımlarına sebep olabilmektedir. Yapısal analizlerde mod birleştirme yöntemi ile analizin daha gerçekçi sonuçlar verebileceği düşünülmektedir. Bu çalışma için mod birleştirme yöntemi ile analiz sonuçları nihai sonuçlar olarak kabul edilmiştir ancak sonuçlar eşdeğer deprem yükü analiz sonuçları ile de kıyaslanmıştır.



Şekil 4.2. Yivli Minare mod birleştirme analizi için Y ekseninde basınç ve çekme gerilmeleri ile XZ düzleminde kayma gerilmeleri

Mod birleştirme yöntemi ile analiz için yapı ve bulunduğu ortam özellikleri dikkate alınarak spektrum eğrisi oluşturulmuş ve programa tanımlanmıştır. Mod birleştirme yöntemi ile analiz sonuçlarına göre elde edilen gerilme değerleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Mod birleştirme yöntemi ile analiz eşdeğer deprem yükü yöntemi analizine göre daha kapsamlı ve doğru sonuçlar verebilmektedir. Bu sebeple sonuçlar mod birleştirme yöntemi baz alınarak irdelenecektir. Mod birleştirme yöntemi ile analize göre yapının düşey Y eksenindeki maksimum basınç gerilmesinin 2.3 MPa, maksimum çekme gerilmesinin ise 1.0 MPa seviyelerine ulaştığı görülmektedir. XZ düzlemindeki maksimum kayma gerilmesi ise 0.3 MPa civarındadır. Yapının maksimum deplasmanı 11 cm’dir.

Analiz sonucunda meydana gelen maksimum 2.3 MPa'lık basınç gerilmesi, minarenin yiv başlangıç bölgesinde sınırlı alanlarda görülmektedir, bu gerilme Can ve arkadaşları (2012) tarafından belirlenen sınırlar dahilinde kaldığından sorun teşkil etmeyebileceği düşünülmektedir. Maksimum 1.0 MPa'lık çekme gerilmesi tambur ile gövde arasında, yivlerin başladığı ani kesit değişiminin olduğu bölgede gözlemlenmektedir. Eşdeğer deprem yükü analiz sonucunda olduğu gibi çekme gerilmesi Can ve arkadaşları (2012) tarafından belirlenen sınırlar üzerinde çıkmıştır. Deprem sırasında yapının bu bölgesinde çatlakların ve ayrılmaların oluşması beklenmektedir. Oluşan 0.3 MPa'lık maksimum kayma gerilmesi Can ve arkadaşları (2012) tarafından belirlenen sınırlar dahilindedir. Maksimum deplasman 11 cm olarak elde edilmiştir, yapı yüksekliği düşünüldüğünde yapı için tehlike arz etmediği şeklinde yorumlanmıştır. Bu kısımdaki değerlendirme yapılırken Can ve arkadaşlarının (2012), yığma yapı malzemelerinin emniyet gerilmelerinin belirlenmesinde deprem yönetmeliğindeki tuğla yığma duvarlar için verilen emniyet gerilmelerini üç katsayısı ile çarparak sınır gerilme değerleri elde edilmesi esasına dayanmaktadır.

Çizelge 4.1. Analizler sonucu elde edilen maksimum basınç, çekme, kayma gerilmeleri ve yer değiştirmeler

	Basınç gerilmesi (Mpa)	Çekme gerilmesi (Mpa)	Kayma Gerilmesi (Mpa)	Yer Değişime (cm)
G yüklemesi	1.0	0.14	0.2	0.8
Eşdeğer deprem yükü yöntemi G+Ez yüklemesi	2.5	1.1	0.3	13
Mod birleştirme yöntemi G+Ez yüklemesi	2.3	1.0	0.3	11

Analizler sonucu elde edilen gerilme değerleri, literatürdeki bir diğer çalışma olan Türkiye'deki yığma binaların malzeme özelliklerinin incelenmesi isimli çalışma sonuçları ile kıyaslanacaktır (Çobanoğlu, 2014). Çizelge 4.1'de Yivli Minare modeli üzerinde yapılan analizler sonucu elde edilen gerilme değerleri, Çizelge 4.2'de ise yığma yapı numuneleri üzerinde laboratuvar ortamında yapılan deneyler sonucu elde edilen gerilme değerleri verilmiştir. Yivli Minare'nin analizlerinde kullanılan malzeme bir kompozit malzeme olarak kabul edildiğinden sadece taş ya da sadece ateş tuğlasından oluştuğu kabul edilemez, yine de elde edilen gerilme değerleri yaklaşık sonuçlar elde edilmesi bakımından literatürdeki çalışmalarla kıyaslanmıştır.

Çizelge 4.2. Yığma yapı numuneleri deney sonuçları (Çobanoğlu 2014)

Properties	Masonry Unit Type					
	Hollow Clay Brick		Solid Clay Brick		Cellular and Solid Concrete Brick	
	Test results	TEC (2007)	Test results	TEC (2007)	Test results	TEC (2007)**
Compressive Strength (MPa)	0.9-2.3 (0.9-1.7)*	1.0-2.0	1.55-3.98 (0.95-1.1)*	1.60	0.49-1.51 (0.95-1.93)*	1.60
Shear Strength (MPa)	0.09-0.23	0.24-0.50	0.06-0.35	0.30	0.17-0.19	0.40
Diagonal Tension Strength (MPa)	0.17-0.31	NA	0.08-0.36	NA	0.14-0.29	NA

*: The compressive strength along the axis perpendicular to the load bearing direction of the wall

** : TEC (2007) provides capacities only for solid concrete brick

Çobanoğlu'nun (2014) çalışmasında yaptığı deneylere göre çekme gerilmeleri boşluklu kil tuğlada 0.17 - 0.31 MPa aralığında, boşluksuz kil tuğlada 0.08 - 0.36 MPa aralığında ve beton brikette 0.14 - 0.29 MPa aralığındadır. Yivli Minare'nin mod birleştirme yöntemi ile analizinden elde edilen maksimum çekme gerilmesi 1.0 MPa civarındadır. Bu çekme değeri söz konusu deneydeki bütün malzemelerin çekme gerilmesi değerlerinin oldukça üzerindedir. Burada önceki yorumları destekler nitelikte yapının şiddetli bir depremde oluşacak çekme gerilmelerini karşılayamayabileceği veya yapıda ciddi hasalar oluşabileceği sonucuna varılmıştır. Basınç gerilmeleri boşluklu kil tuğlada 0.9 - 2.3 MPa aralığında, boşluksuz kil tuğlada 1.55 - 3.98 MPa aralığında ve beton brikette 0.49 - 1.51 MPa aralığındadır. Yivli Minare'nin analizinde elde edilen maksimum basınç gerilmesi 2.3 MPa'dır. Söz konusu basınç gerilmesi değeri yapının büyük bölümünü oluşturan boşluksuz kil tuğlada 1.55 - 3.98 MPa aralığında çıkmıştır. Kayma gerilmeleri boşluklu kil tuğlada 0.09-0.23 MPa aralığında, boşluksuz kil tuğlada 0.06 - 0.35 MPa aralığında ve beton brikette 0.17 - 0.19 MPa aralığındadır. Yivli Minare'nin analizinde elde edilen maksimum kayma gerilmesi 0.3 MPa'dır. Söz konusu kayma gerilmesi değeri yapının büyük bölümünü oluşturan boşluksuz kil tuğlada 0.06-0.35 MPa aralığında çıkmıştır. Yivli Minare'nin analizinden elde edilen basınç ve kayma gerilmeleri, Çobanoğlu'nun (2014) yığma yapı numuneleri üzerinde yaptığı deneylerden elde edilen boşluksuz tuğlanın basınç ve kayma gerilme aralığı içinde kalsa da Yivli Minare'nin analizinde deprem yükü azaltma katsayısı olan R'nin 2 alındığı unutulmamalıdır. Bu durumdan yapının şiddetli bir depremde oluşacak basınç gerilmesi değerlerini karşılamakta da zorlanabileceği çıkarımı yapılabilir.

Tarihi yapıların malzeme özelliklerinin belirlenmesi oldukça zordur. Yapı malzemeleri zamanın yıpratıcı etkisi, yangınlar ve depremler gibi çeşitli sebeplerle kendilerinden beklenen performansı göstermeyebilir. Yivli Minare'den alınacak örneklerin laboratuvar ortamında yapılacak deneylerle basınç, kayma ve çekme emniyet gerilmelerinin tespit edilmesi ve analiz sonuçları ile kıyaslanması çok daha sağlıklı sonuçlar verecektir.

5. SONUÇLAR

Tarihi eserler ait olduğu dönemin ruhunu, kültürünü, inancını ve yaşam tarzını yansıtmaktadır. Tarihi eserlerin geleceğe sağlıklı bir şekilde aktarılması çağımızın ortak sorunudur. Tarihi eserlerin korunması, 21. yüzyılda başta mühendislik olmak üzere pek çok branştan insanın bir arada uyumla çalıştığı popülerliğini gittikçe arttıran disiplinler arası bir çalışma dalı olmuştur. Ülkemizin deprem kuşağında olması tarihi yapılar için en büyük risklerden biridir. Tarihi yapılarımızı korumak adına hangi tarihi yapıların riskli olduğunun tespiti kaynakların verimli kullanımı açısından önemlidir.

Yivli Minare Camii, 13. yüzyılda dönemin Anadolu Selçuklu hükümdarı I.Alaeddin Keykubad tarafından yaptırılmıştır. İhtişamı, kendine has mimarisi ile Antalya'nın ilk İslam eserlerinden olan yapı, günümüze kadar olan süreçte defalarca hasar almış ve onarım görmüştür. Minare, günümüzde Antalya için sembol yapı kabul edilmiş her yıl binlerce turist tarafından ziyaret edilmektedir.

Literatürde, Yivli Minare'nin detaylı üç boyutlu modeli üzerinde deneysel çalışmalardan elde edilen veriler de kullanılarak yapının depreme karşı dayanıklılığının araştırıldığı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, Yivli Minare'nin depreme karşı dayanıklılığının ve yapının risk altında olup olmadığının araştırılması dolayısıyla literatürdeki açığın kapatılması hedeflenmiştir.

Yivli Minare'nin dinamik parametrelerinin belirlenmesi için ivme ölçer deneyi yapılmıştır. İvme kayıtları işlenerek yapının periyodu $T=1$ sn olarak tespit edilmiştir. Minarenin üç boyutlu modeli üzerinde yapılan modal analizlerle yapının periyodunu 1 sn yapan yapı malzeme elastisite modülü $E=2500$ MPa olarak bulunmuştur.

Yivli Minare güneye doğru 35 cm yatıktır ve yükseldikçe ekseninden kaymaktadır. Üç boyutlu model tasarımında bu düzensizlikler dikkate alınmıştır. Yapının düşey yükler altındaki statik analizi sonucu maksimum basınç gerilmesi 1 MPa, maksimum çekme gerilmesi 0.14 MPa ve maksimum kayma gerilmesi 0.2 MPa olarak elde edilmiştir. Elde edilen gerilme değerleri beklendiği gibi literatürde belirtilen sınırlar dahilindedir.

Eşdeğer deprem yükü hesabı ile yapıya etki edecek taban kesme kuvveti hesaplanmıştır. Deprem kuvveti yapının dört parçaya ayrıldığı varsayılarak parçaların ortalarına kat hizalarına etkiyen deprem kuvvetleri gibi etki ettirilmiştir. Eşdeğer deprem yükü hesabına göre elde edilen kuvvetler ile yapılan analiz sonucunda maksimum basınç gerilmesi 2.5 MPa, maksimum çekme gerilmesi 1.1 MPa ve maksimum kayma gerilmesi 0.3 MPa olarak elde edilmiştir. Minarenin; tambur, pabuç ve kaide bölümlerinde ani kesit değişiminin olduğu bölgelerde basınç gerilmesi 2.5 MPa mertebelerine kadar yükselmektedir. Söz konusu maksimum basınç gerilmesinin sınırlı bölgelerde olduğu görülmektedir. Tambur ile gövdenin kesiştiği, yapının yivlerinin başladığı bölgede meydana gelen ve 1.1 MPa değerine kadar çıkan çekme gerilmesi bu bölgede ciddi çatlaklara sebep olabileceği, tuğlaları bir arada tutan harcın bu gerilmeyi karşılamakta yetersiz kalacağı öngörülmektedir. Maksimum kayma gerilmesi olan 0.3 MPa sınırlı bölgelerde oluşmuştur, bu gerilme değeri literatürdeki verilere göre kabul edilebilir seviyedir. Yapının külah kısmında meydana gelen 13 cm'lik maksimum deplasman yaklaşık 40 metrelik bir yapı için sorun teşkil etmeyeceği kanaatine varılmıştır.

Hem eşdeğer deprem yükü hesabına göre elde edilen analiz sonuçlarının karşılaştırılması hem de Yivli Minare'nin analizinde daha doğru sonuçlar elde edilmesi amacıyla mod birleştirme yöntemine göre analiz yapılmıştır. Mod birleştirme yöntemine göre yapılan analiz sonuçları eşdeğer deprem yükü yöntemi ile yapılan analiz sonuçları ile paralellik göstermektedir. Analiz sonuçlarına göre maksimum basınç gerilmesi 2.3 MPa, maksimum çekme gerilmesi 1.0 MPa ve maksimum kayma gerilmesi 0.3 MPa olarak elde edilmiştir. Meydana gelen maksimum 2.3 MPa'lık basınç gerilmesi, minarenin yiv başlangıç bölgesinde sınırlı alanlarda görülmektedir. Bu gerilme değeri Can ve arkadaşları (2012) tarafından belirlenen sınırlar dahilinde kalmasına rağmen Çobanoğlu (2014) verilerine göre sınır değeri aşmıştır. Maksimum 1.0 MPa'lık çekme gerilmesi tambur ile gövde arasında, yivlerin başladığı ani kesit değişiminin olduğu bölgede gözlemlenmektedir. Eşdeğer deprem yükü analiz sonucunda olduğu gibi çekme gerilmesi hem Can ve arkadaşları (2012) hem de Çobanoğlu (2014) tarafından belirlenen sınırların üzerinde çıkmıştır. Deprem sırasında yapının bu bölgesinde çatlakların ve ayrılmaların oluşması beklenmektedir. Oluşan 0.3 MPa'lık maksimum kayma gerilmesi sınırlar dahilindedir. Maksimum deplasman 11 cm olarak elde edilmiştir, yapı yüksekliği düşünüldüğünde deplasmanın sorun teşkil etmeyeceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak bu çalışma kapsamında Yivli Minare'nin depreme karşı dayanıklılığı analitik olarak incelenmiştir. Analitik çalışmada, yapının dinamik parametrelerinin belirlenebilmesi için deneysel çalışma (ivme ölçümü) yapılmıştır. Yivli Minara'nın tarihi eser olmasından dolayı malzeme dayanımı deneysel olarak belirlenememiştir. Yapılan analizler sonucunda yapıda meydana gelen gerilme değerleri literatürdeki benzer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalara göre yapının basınç ve çekme gerilme değerlerinin literatürdeki limitlerin üzerinde olduğu kanaatine varılmıştır. Dolayısı ile Yivli Minare'ye ait güçlendirme projesinin hazırlanarak ivedi olarak uygulanması sonucuna varılmıştır.

6. KAYNAKLAR

- Avcı Ü., 2015. Antalya Kaleiçi'nde Bir Simge Yapı: Yivli Minare, Süleyman Demirel Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Hakemli Dergisi Sayı:15
- Can H., Kubin J., Ünay A., 2012. Düzensiz Geometrik Şekle Sahip Tarihi Yığma Binaların Sismik Davranışı, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt 27 No 3.
- Çobanoğlu B., 2014. Investigation Of Material Properties For The Turkish Masonry Buildings. A Thesis Submitted To The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University
- Dabanlı Ö., 2008. Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Deere-Miller 1966: Deere D.U., Miller, R.P., *Engineering classification and indexproperties for intact rock* , Air Force Weapons Lab. Tech. Report, AFWL-TR-65-116, Kirtland Base, New Mexico, 1966, 90-101.
- Güvenç Duran Ş. ve Çelik Okur Z., (2007). Antalya Yivli Minare Değerlendirme ve Rölöve Analiz Raporu, Biz Mimarlık Müh. Hiz. İnş. San. Tic. Ltd. Şti., Antalya.
- Hutton D.V., 2004, *Fundamentals of The Finite Element Analysis*, The Mc- Graw Hill Companies, London.
- Işık E. ve Antep B., 2018. Ahlat İlçesinde Yer Alan Tarihi Yığma Minarenin Yapısal Analizi, BEÜ Fen Bilimleri Dergisi
- Karabela B., 2016. Su Terazisi, Şakül, Gönye. Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Tasarım Projesi.
- Kemaloğlu, M., 2013. "XI.-XIII. Yüzyıl Türkiye Selçuklu Devletinde Dini Eserlerinden Kümbet-Türbe-Ziyaretgah-Namazgah ve Camiler", Akademik Bakış Uluslararası Hakemli Sosyal Bilimler E-Dergisi, Sayı:39, Kırgızistan.
- Lourenço, P.B., 2000, Current experimental and numerical issues in masonry research, Universidade do Minho, Portugal.
- Mülayim, S., 1987. Yivli Minare ve Geleneği, Antalya 2. Selçuklu Semineri Bildiriler ve Seçkiler, Antalya İl Kültür Müdürlüğü Yayınları, 11-25, Antalya.
- Örmecioğlu H. T., AKAN A. E., BEESON S. T., ÖZMEN C., 2011. Yivli Minare'nin Yapısal Analizi ve Sismik Davranışı, SDU International Technological Science Vol. 3, No 3, December 2011, 52-61.
- Sönmez, C. C., 2009. Antalya Kaleiçi Selçuklu ve Beylikler Dönemi Eserleri, Mimarlar Odası Antalya Şubesi Yayınları 12/4, Antalya.

- Yılmaz M. ve Tek S., 2018. Antalya Yivli Minare ve Camisinin Restorasyon, Güçlendirme ve Zemin Etüt Çalışmaları, Mimarlar Arkeologlar Sanat Tarihçileri Restoratörler Ortak Platformu E-Dergi, Cilt 12.1
- Yılmaz L., 2002. Bir Ortaçağ Türk Şehrinin Mimarlık Mirası ve Şehir Dokusunun Gelişimi (16. Yüzyılın Sonuna Kadar), Türk Tarih Kurumu Basımevi, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

LEVENT FURKAN ÇELİK

leventfcelik@hotmail.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2016-2019	Fen Bilimler Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans	Erciyes Üniversitesi
2011-2016	Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Kayseri
Lisans	Erciyes Üniversitesi
2012-2016	Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri