



Technical evaluation of abscissa damage of Erzincan Değirmenliköy church

Semi Emrah Aslay^{1*} , Dilek Okuyucu² 

¹Department of Constuction, Erzincan Binali Yıldırım University, 24100, Erzincan, Turkey

²Department of Civil Engineering, Erzurum Technical University, 25050, Erzurum, Turkey

Highlights:

- Historic masonry structure
- Operational modal analysis
- Earthquake damage investigation

Keywords:

- Erzincan Degirmenlikoy Church
- Historic masonry structure
- Macro modelling
- Operational modal analysis
- Earthquake damage

Article Info:

Research Article
Received: 08.10.2018
Accepted: 31.08.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.468158

Acknowledgement:

Authors present sincere thanks to Mr. Gokce Kaan Savas, Mr. Fatih Susarlioglu, Mr. Taha Kalayci and villagers of Degirmenlikoy.

Correspondence:

Author: Semi Emrah Aslay
e-mail: seaslay@erzincan.edu.tr
phone: +905054771374

Graphical/Tabular Abstract

Erzincan is an Anatolian city that has experienced numbers of destructive earthquakes throughout its history. The strong ground motions like 1939 and 1992 Erzincan earthquakes caused loss of thousands of lives and total collapse of lots of buildings at the city centre; including historic buildings. From this point of view, Erzincan Değirmenliköy Church deserves a special attention. Being located very close to active faults, this historic masonry church is one of the rare historical buildings that survived these earthquakes. Although the main body of the building is completely standing, it is rumoured that the abscissa was destroyed during the 1939 Erzincan Earthquake. The authors of this article have carried out this study to examine the accuracy of this narration from a technical point of view.

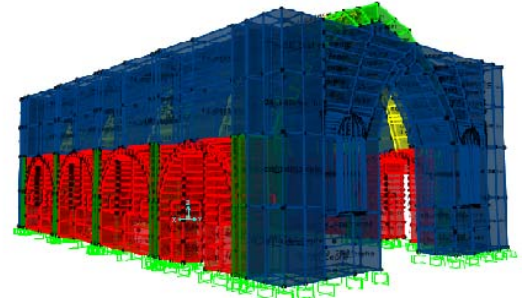


Figure A. Current situation of Erzincan Degirmenlikoy Church and the related structural model

Purpose: The main purpose of the study is to understand dynamic behavior and technical reason of the loss of abscissa of Erzincan Degirmenlikoy church.

Theory and Methods:

Technical information was collected about the church and a structural model that represents the current situation was created by using macro modelling technique. Mechanical properties of the masonry were obtained mainly by non-destructive tests and equations provided by Eurocode 6. Structural analysis model was calibrated via operational modal analysis through the dynamic behaviour parameters; the destroyed abscissa was speculated and added to the model. Dynamic analyses were performed by using earthquake records on the model with abscissa attachment. The seismic behaviour of the church was then evaluated over calculated deformation and stress values.

Results:

As a main result of the research; it was concluded that the church abscissa may have been damaged over the connection zones with the whole body of the structure during the earthquake and then separated from the structure by the time passed.

Conclusion:

Erzincan Değirmenliköy Church was studied for the first time from the technical point of view and its structural features were examined. As such, technical resources have been created for a possible restoration work in the future. It is thought that repeating the analysis with the synthetic earthquake record to be produced for the 1939 Erzincan earthquake will allow a more reliable examination of the structural behavior.



Erzincan Değirmenliköy Kilisesi apsis hasarının teknik olarak araştırılması

Semi Emrah Aslay^{1*}, Dilek Okuyucu²

¹Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, İnşaat Bölümü, 24000 Erzincan, Türkiye.

²Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 25050 Erzurum, Türkiye.

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Tarihi yapı
- Operasyonel modal analiz
- Deprem kaynaklı hasar incelemesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 08.10.2018

Kabul: 31.08.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.468158

Anahtar Kelimeler:

Erzincan Değirmenliköy
kilisesi,
tarihi yapı,
makro modelleme,
operasyonel modal analiz,
deprem hasarı

ÖZET

Erzincan ili yakın tarihi boyunca çok sayıda yıkıcı deprem yaşamış bir Anadolu şehridir. Bu depremlerde ayakta kalan nadir tarihi yapılarından birisi Erzincan Değirmenliköy Kilisesi'dir. Yapının ana gövdesi bütünüyle ayakta olmakla birlikte; apsis kısmının 1939 Erzincan Depremi'nde yıkıldığı rivayet edilmektedir. Makale yazarları bu rivayetin doğruluğunu teknik açıdan incelemek üzere bu çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. Kilise hakkında teknik bilgi toplanmış, makro modelleme tekniği kullanılarak yapısal model oluşturulmuştur. Yapısal model; operasyonel modal analiz çalışması neticesinde kalibre edilmiş ve yıkık olan apsis kısmı kurgulanarak modele eklenmiştir. Apsis eklentili model üzerinde deprem kayıtları kullanılarak dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Araştırma neticesinde; kilise apsisinin depremde yapı gövdesi ile birleşim noktasından hasar almış ve daha sonra yapıdan ayrılmış olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Technical evaluation of abscissa damage of Erzincan Değirmenliköy church

H I G H L I G H T S

- Historic masonry structure
- Operational modal analysis
- Earthquake damage investigation

Article Info

Research Article

Received: 08.10.2018

Accepted: 31.08.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.468158

Keywords:

Erzincan değirmenliköy
church,
historic masonry structure,
macro modelling,
operational modal analysis,
earthquake damage

ABSTRACT

Erzincan is an Anatolian city that has experienced numbers of destructive earthquakes throughout its history. Erzincan Değirmenliköy Church is one of the rare historical buildings that survived these earthquakes. Although the main body of the building is completely standing; it is rumoured that the abscissa was destroyed during the 1939 Erzincan Earthquake. The authors of this article have carried out this study to examine the accuracy of this narration from a technical point of view. Technical information was collected about the church and a structural model was created by using macro modelling technique. Structural model was calibrated via operational modal analysis and the destroyed abscissa was speculated and added to the model. Dynamic analyses were performed by using earthquake records on the model with abscissa attachment. As a result of the research; it has been concluded that the church abscissa has been damaged over the connection zones with the whole body of the structure during the earthquake and then separated from the structure by the time passed.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: seaslay@erzincan.edu.tr, okuyucu@erzurum.edu.tr / Tel: +90 505 477 1374

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tarihi yapıların korunması ve güvenli bir şekilde geleceğe aktarılması ciddi bir mühendislik konusudur. Zira tarihi binalar sadece eski yapı özelliği taşımazlar, aynı zamanda bulunduğu dönemin kültürel yapısını da yansıtır. Bu özellikleri nedeniyle yapıya hasar verilmeden mevcut durumunun analizi önem arz etmektedir. Dolayısıyla da bu yapıların; hassas yapılar olduğu her aşamada dikkate alınmalı ve incelenme sürecinde büyük bir özen gösterilmelidir.

Mimari kültür mirasımızın korunması ve geleceğe devredilmesi amacıyla yapılan çalışmalarda tahribatsız yöntemlerle yapısal hasar tespiti yapılmalı ve çalışma sonuçları doğrultusunda teknik kararlar verilmelidir. [1]

Operasyonel modal analiz uygulaması, son yıllarda, tarihi yapıya zarar verilmeksizin mevcut durum analizi yapılması ve dinamik kimliklendirme çalışmalarında sıklıkla kullanılan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. [2-10]. 2000’li yılların başlarında nispeten daha düşük bir teknoloji ile titreşim yöntemleri kullanılmış ve dinamik karakteristiklerin (mod şekilleri, modal frekanslar, sönüm) deneysel olarak belirlenmesi yoluna gidilmiştir [11, 12]. Daha sonraki yıllarda ise doğal titreşim altında ivme kayıtlarının alınması, yapının frekans, mod şekillerinin elde edilmesi ve hasarların analizine dair uygulamalar çoğalmıştır [13, 14].

Tarihi yapıların yapısal davranışlarının incelenmesine yönelik olarak yapılan çalışmaların birçoğunda sonlu eleman yöntemi ile oluşturulan yapısal modeller kullanılmış ve analiz için oluşturulan modal operasyonel modal analiz yönteminden elde edilen veriler doğrultusunda kalibre edilerek değerlendirilmiştir [15-18]. Bina türü tarihi yapıların haricinde; köprü ve benzeri farklı yapı formları üzerinde yöntemlerin kombine edilerek kullanılmasına ilişkin birçok çalışma bulunmaktadır [19-24]. Tarihi yapıların korunması, sismik kapasitelerinin tayini ve belirli zaman aralıklarında sismik takibinin yapılmasına yönelik çalışmalar inşaat mühendisliği araştırmacıları tarafından titizlikle yapılmaktadır [25-27].

Bu çalışmada ise Erzincan il sınırları içerisinde bulunan Değirmenliköy Kilisesi’nin hâlihazırda yapı bünyesinde bulunmayan apsis kısmının 1939 Erzincan Depremi’nde yıkıldığına ilişkin beyanların teknik açıdan incelenmesine yönelik yapılan çalışma detayları sunulmaktadır. Çalışma kapsamında öncelikle Değirmenliköy Kilisesi hakkında bilgi toplanmış; yapının mevcut halini temsil eden yapısal analiz modeli SAP2000 yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur [28]. Malzeme dayanımları belirlenerek modele tanımlanmış ve teorik modal analiz yapılarak dinamik karakteristikler hesaplanmıştır. Sonrasında, yapıda operasyonel modal analiz çalışması yapılarak mod şekilleri ve frekanslar deneysel olarak elde edilmiştir. Bilgisayar modeli bu doğrultuda kalibre edilmiş ve ikinci aşamada apsisin

eklendiği model kurgusal olarak oluşturulmuştur. Ap sis içeren model üzerinde dinamik analizler yapılarak apsis hasarının 1939 Erzincan depreminde oluşup oluşmadığı konusunda değerlendirmeler yapılmıştır.

2. YÖNTEM (METHOD)

Çalışmanın temel gayesi Erzincan Değirmenliköy Kilisesi apsisinin 1939 Erzincan Depremi’nde yıkıldığı yönündeki söylemin teknik olarak araştırılmasıdır. Burada takip edilen yöntem maddeler halinde sıralanmış olup, ilerleyen bölümlerde detay bilgiler sunulmaktadır.

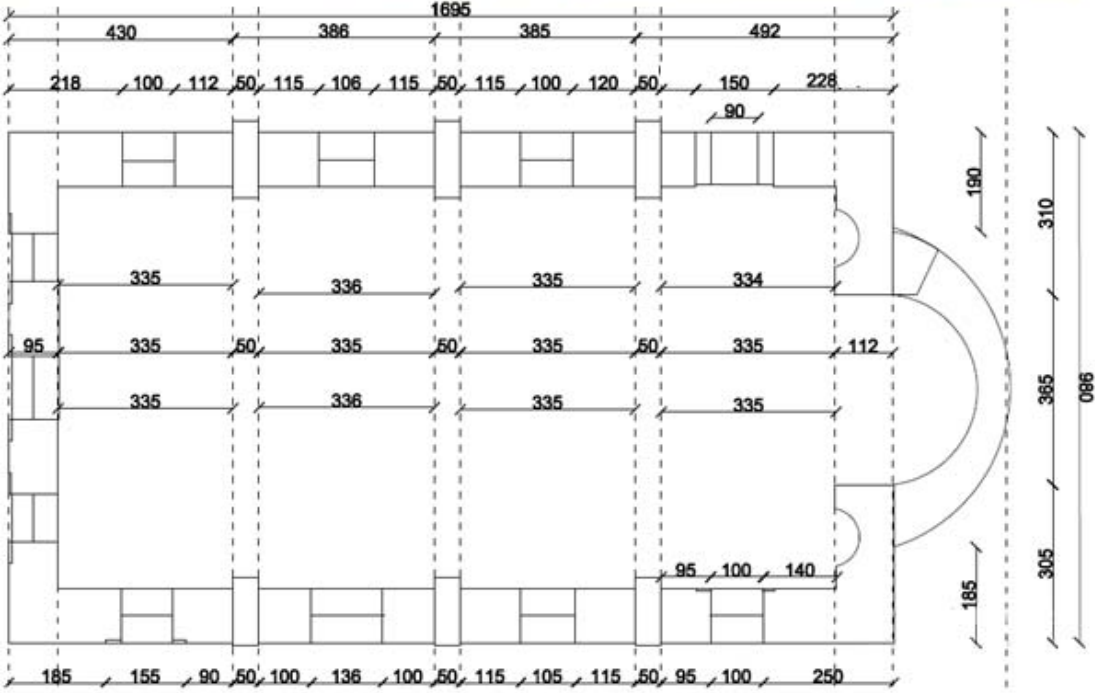
- Yapı hakkında teknik ve tarihi bilgi toplanması
- SAP2000 yazılımı ve katı elemanlar kullanılarak mevcut durumu yansıtır yapısal model oluşturulması
- Operasyonel Modal Analiz çalışması yapılarak dinamik davranış parametrelerinin elde edilmesi
- Mevcut duruma ilişkin yapısal modelin, deneysel olarak elde edilen modal parametrelerle uyumlu olacak şekilde kalibre edilmesi
- Kalibre edilen yapısal modele kilise mimarisine ve sanat tarihi kayıtlarına uygun olacak şekilde apsisin eklenmesi
- Ap sis eklenen model üzerinde deprem kayıtları kullanılarak dinamik analiz yapılması
- Dinamik analiz sonuçları üzerinden apsis hasarına ilişkin değerlendirme yapılması

3. ERZİNCAN DEĞİRMENLİKÖY KİLİSESİ (ERZİNCAN DEĞİRMENLİKÖY CHURCH)

3.1. Kilise Hakkında (About the Church)

Değirmenliköy Kilisesi Erzincan ilinin güney doğusunda, Çağlayan mevkiinde yer almaktadır. Kilise 1800’lü yıllarda Ermeniler tarafından inşa edilmiştir. Yapı kendi alanı dâhil, bahçesi ile birlikte 280 m² alana sahiptir. Değirmenliköy Kilisesi’nin yaklaşık oturma alanı 165 m² ve yapı plan ölçüleri 9,80x16,90 m olarak belirlenmiştir. Tarihi yapı tek katlı ve yağma yapı sisteminde inşa edilmiştir. Yapı yüksekliği kemerlerin başlangıcında 3,45 m olmak üzere, tonozlarda 7,35 m ile en büyük değerine ulaşmaktadır. Duvar kalınlıkları 1,20 m, 1,05 m ve 0,95 m olmak üzere farklı değerler almaktadır. 1,20 m kalınlıkla en kalın duvarlar binanın uzun doğrultusunda yer almaktadır. Yapıya ait röleve bu çalışma kapsamında çıkarılmıştır (Şekil 1). Yapı birbirlerine eşit açıklıklarda oluşturulan aks sistemi üzerinde oluşturulmuştur. Düşey taşıyıcı eleman olarak 0,5 m genişlikte ve duvarların içerisine uzanan sütunlar kullanılarak 5 çerçeveli olarak imal edilmiştir. Bu çerçeveler arası mesafeler eşit olup 3,35 m açıklık kullanılmıştır. Sütunlar birbirlerine iç kemerlerle bağlıdır. Her bir sütun üzerinde kavisli kemerler bulunmaktadır. Bu kemerlerin arasında ise yapı üst örtüsünü oluşturan tonoz elemanlar yer almaktadır.

Yapıda çoğunlukla tüfleşmiş kireç taşı kullanılmıştır. Bunun dışında andezit ve serpantin türü kayalar da tercih



Şekil 1. Yapıya ait fotoğraflar ve oluşturulan röleve çalışması (Photos of building and generated survey work)

edilmiştir. Andezit; taşıyıcı sütunlarda ve bu sütunlara destek olan iç kemerlerde; serpantin ise kemerleri birleştiren çatı kaplamasında ve kemerlere denk gelen dış yüzeylerde kullanılmıştır. Tüfleşmiş kireçtaşı ise özellikle yörede çok bulunması, hafif olması ve kolay şekil verilebilmesi nedeniyle yapıda en fazla kullanılan malzemedir. Üst örtü kemerlerin tamamında ve tonozlarda tüfleşmiş kireç taşı kullanılarak imalat yapılmıştır. Dolayısıyla çatıyı oluşturan elemanlarda hafif malzeme tercih edildiği görülmektedir. Öyle ki; yapıda kullanılan tüfleşmiş kireç taşı üzerinde yapılan fiziksel incelemeler neticesinde taş birim ağırlığı $1,3 \text{ gr/cm}^3$ olarak belirlenmiştir. Bu özelliği ile yığma yapı tarzındaki binanın toplam ağırlığının azaltılmış olmasının

depreme karşı önemli bir önlem olduğu söylenebilmektedir. Yapıya ait iç ve dış görüntüler Şekil 1'de sunulmaktadır. Hâlihazırda Değirmenliköy Kilisesi'nin apsisi yıkılmış durumdadır. Yıkılarak yapıdan ayrılan apsizin izleri yapı gövdesinde ve zeminde açıkça görülmektedir. Apsisin yıkıldığı bölge, köy halkı tarafından metal bir kapı ile kapatılmıştır. Hakkında gerek literatürde gerekse resmi kayıtlarda yeterli bilgiye ulaşılamayan kiliseye ait apsizin, 1939 Erzincan Depremi'nde yıkıldığı rivayet edilmektedir. Gerek 1939 ve gerekse 1992 Erzincan depremlerini geçirdiği halde ayakta kalan bu tarihi yığma yapının, apsis bölümünün depremde yıkılmış olabileceği hususunun teknik olarak araştırılması bu çalışmanın konusudur.

3.2. Malzeme Dayanımları

Yapısal elemanları oluşturan yığma unsurların basınç dayanımı EUROCODE 6'dan faydalanılarak hesaplanmıştır [29]. Hesaplamalarda kullanılan bağıntı denklem – 1'de sunulmaktadır.

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (1)$$

Denklemden f_k parametresi yığma birimlere ait basınç dayanımını; f_b taşın basınç mukavemetini ve f_m değeri ise yığma birimler arasındaki harcın basınç mukavemetini ifade etmektedir. f_m değeri 20 MPa'dan daha büyük ve f_b değerinin iki katından daha büyük olmayacaktır. K , α , β değerleri sabit katsayılardır. K değeri yığma yapıya ait özelliklerden morfolojik yapıya bağlı olarak alınan bir değerdir ve 0,4 ile 0,6 arasında bir değer alınabilmektedir. α değeri düzgün şekilli yığma yapılarda 0,7 olarak, kaba örülmüş yığmalarda ise 0,65 olarak alınabilmektedir. β Değeri ise düzgün şekilli yığma sistemlerinde 0,30 olarak, kaba örülmüş yığma yapılarda 0,25 olarak alınabilmektedir. Yapı içerisinde tüfleşmiş kireçtaşı, andezit ve serpantin olmak üzere üç çeşit taş kullanılmıştır. Yığma birim mekanik özelliklerinin eldesi çalışmasında öncelikle; yapısal elemanlar içerisinde bulunan taş oranları tespit edilmiştir. Yapıyı oluşturan kayaçların basınç dayanımlarının belirlenmesinde, yapının inşasında kullanılan taşlardan tüfleşmiş kireçtaşı üzerinde ağırlıklı olarak çalışmalar yürütülmüştür. Bunun nedeni ise literatürde tüfleşmiş kireçtaşının dayanım değerleri ile ilgili çok değişken değerlerin yer alıyor olmasıdır. Bu kayacın tufik yapısı nedeniyle içerisinde miktarı bilinmeyecek kadar boşluklar bulunmaktadır. Bu nedenle; yapı malzemesinin büyük çoğunluğunu oluşturan kireç taş dayanımının deneysel olarak belirlenmesi yoluna gidilmiştir. Bu amaçla, yapı duvarlarının hasarlı bölümlerinde dökülmek üzere olan kayaç numuneleri değerlendirilmiş ve bu taş üzerinde basınç dayanımı ve CBR deneyleri yapılmıştır. Tüfleşmiş kireçtaşının ilk belirlemelere göre basınç dayanımı 7,32 MPa olmasına rağmen, model güncellemesi ve yapılan CBR deneyi sonucunda 2 MPa olarak değerlendirilmiştir. Andezit ve serpantin türü taşların özelliklerinin eldesinde daha önce yapılmış olan bir çalışmadan yararlanılmıştır. Buna göre kayaçlara ait basınç dayanımları, andezit için 86,06 MPa ve serpantin ise 38,10 MPa olarak değerlendirilmiştir. [30].

Yığma birim elastisite modülü hesabında Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik 2007'de sunulan bağıntı kullanılmıştır. [31]. Buna göre, elastisite modülü yığma birim basınç dayanımı değerinin 200 katı olacak şekilde alınmıştır. Çekme mukavemeti değeri ise basınç mukavemeti değerinin %10'u olarak alınmıştır [32-34]. Yığma birimlerine ait basınç mukavemeti, çekme mukavemeti ve elastisite modülü değerleri Tablo 1'de özet olarak verilmiştir.

Bu çalışmalara ek olarak; yapıda kullanılmış olan harçtan numune alma imkanı olmuştur. İlerleyen dönemlerde

yapılması muhtemel restorasyon çalışmalarında değerlendirilebileceği düşünülerek bu numunelerin bileşimlerinin tespiti için elektron mikroskobu analizleri yapılmıştır. Harcın basınç dayanımı için 6-8 MPa değerlerinden tarihi bir yapı olması ve güçlendirme görmemesi gibi hususlar nedeniyle en düşük olan 6 MPa değeri alınmıştır [34].

Tablo 1. Yapı Elemanlarına Ait Mukavemet Değerleri (Strength value of building elements)

Yapı Elemanı	Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Sütunlar	5,750	0,575	1150
İç Kemer	7,615	0,761	1523
Kemer	3,450	0,345	690
Tonoz	5,675	0,567	1135
Dış Cephe	6,470	0,647	1294

3.3. 1939 Erzincan Depremi (1939 Erzincan Earthquake)

Değirmenliköy Kilisesi'nin bulunduğu şehir olan Erzincan, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik 2007'ye göre Türkiye'de deprem açısından en riskli iller grubunda yer almaktadır [31]. Geçmiş dönemlerde son derece yıkıcı depremlerin yaşandığı Erzincan ilinde günümüzde de sıklıkla depremler yaşanmaktadır. Son 1000 yıla bakıldığında; bölgede büyük can ve mal kayıplarına yol açan yıkıcı yer sarsıntılarının olduğu görülmektedir [35]. 1939 Erzincan Depremi, ilin yakın tarihinde yaşanan ve dünya deprem literatüründe de en yıkıcı depremlerden biri olarak kabul edilen bir depremdir. Bu depremde yaklaşık 33000 insan hayatını kaybetmiş ve sonrasında Türkiye'de deprem zararlarının azaltılmasına yönelik çalışmaların başlangıcı olmuştur [36]. 27 Aralık gece saat 23:57 gerçekleşen bu depremin büyüklüğü magnitüd olarak 7,8 olarak ifade edilmektedir ve aynı zamanda bu deprem ile geçtiğimiz yüzyılda Kuzey Doğu Anadolu fay hattının sismik açıdan diri olduğu ilk kez tespit edilmiştir [37].

Kilise yapısının 1939 Erzincan Depremi davranışının incelenmesi için, tarihi depremin ivme kayıtlarına ulaşılmaya çalışılmıştır. Ancak, depremin çok eski bir tarihte yaşanmış olması nedeniyle sayısal ivme kayıtları yoktur. Zamanın şartlarına göre depreme ait ivme kaydı alınması oldukça zor olduğu bilinmektedir. Yaşanan depreme ait bilgi olarak sadece depremin şiddeti ve büyüklüğü bilgisi bulunmaktadır. Bu deprem etkisinde yapı davranışının incelenmesi amacıyla 1939 yılındaki depremden yaklaşık elli yıl sonra 1992 yılında yine Erzincan'da yaşanmış depremin kayıtlarının elde edilmesi ve bu çalışma kapsamında kullanılması uygun görülmüştür. Nedeni ise 1992 Erzincan Depreminin özellikle oluşan fay hattına yakın bölgelerde etki gücünün fazla olması, aynı coğrafyada cereyan etmesi ve 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem kabulünün yapılmasıdır. Burada temel çıkış noktası, esasen yapının dinamik etkiler altındaki davranışını görmek ve apsis bölgesinin hasar alıp alamayacağı konusunda kestirim

yapmaya çalışılmadığından 1992 Erzincan Deprem kayıtlarının kullanılmasının hatalı olmayacağı düşünülmüştür.

4. YAPISAL ANALİZE ESAS MODELLER (STRUCTURAL ANALYSIS MODELS)

Yapısal analizlere esas bina modelleri SAP2000 yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Modellemede makro modelleme yaklaşımı benimsenmiş ve katı (solid) elemanlar kullanılmıştır. Makro modelleme yönteminde harç, yığma elemanı (taş, tuğla, vb.) ve ara yüzeyler ayrı ayrı modellenmemekte; yığma birim homojenleştirilmiş tek bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Malzeme mekanik özellikleri belirlenirken bu yaklaşım benimsenmiştir.

Yapısal analize esas model oluşumunun birinci aşamasında; yapının hâlihazırdaki durumu dikkate alınarak bir model oluşturulmuştur. Mevcut durumda yapıdaki apsis kısmı yıkılmış haldedir. (Şekil 1). Yapı elemanları sütun, iç kemer, kemer, tonoz ve dış cephe elemanları olarak gruplandırılmış; gerekli eleman ve malzeme tanımlamaları yapılmıştır. Mevcut durumu yansıtan model 2275 katı (solid) eleman ile 5800 düğüm noktasından oluşmakla birlikte; toplam ağırlık 850 ton olarak hesaplanmıştır (Şekil 2).

Birinci model üzerinde teorik modal analiz yapılmış ve dinamik davranış parametreleri hesaplanmıştır. Sonraki bölümde detayları sunulacak olan operasyonel modal analiz çalışması yapıldıktan sonra kalibre edilen modele kurgusal olarak apsis bölümü eklenmiştir. Kurgusal olarak apsisin eklenmesi aşamasında yapı zemininde çıkma yapılan kısımdan ve duvar üzerindeki izlerden yararlanılmıştır (Şekil

1). Bu çalışma süresince Ermeni kilise mimarisi özellikleri de sanat tarihi bakışı açısından incelenmiştir. Apsisin modele eklenmesi ile bina ağırlığı 42 ton artmıştır. Yeni oluşturulan modelde 3116 katı (solid) eleman ve 6632 düğüm noktası bulunmaktadır (Şekil 3).

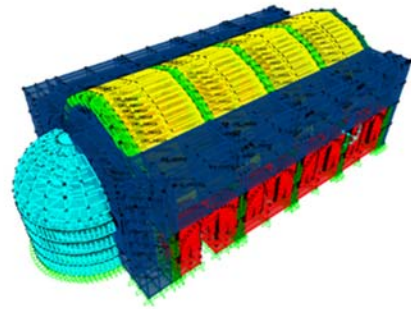
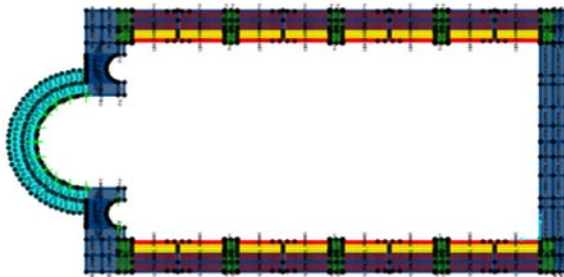
5. OPERASYONEL MODAL ANALİZ ÇALIŞMASI (OPERATIONAL MODAL ANALYSIS STUDY)

Yapıdan alınacak titreşim ölçümleri değerlendirilerek mevcut yapıların dinamik davranış parametrelerinin elde edilmesi günümüz teknolojileri varlığında mümkün hale gelmiştir. Genel olarak deneysel modal analiz adı verilen yöntemler; çevresel titreşim yöntemi ve zorlanmış titreşim yöntemi olarak iki grupta toplanmaktadır [38]. Zorlanmış titreşim yönteminde incelenen yapıya mekanik titreştiriciler ya da darbe çekici gibi aygıtlarla kuvvet uygulanır, yapının bu etkiye karşı gösterdiği tepki titreşim ölçümleri alınarak kaydedilir ve tepki ile ilgili bir dizi frekans tepki fonksiyonu kullanılarak dinamik davranış parametreleri hakkında tahmin yapılır. Zorlanmış titreşim yönteminin tarihi yapılara zarar vermesi söz konusu olduğundan; bu çalışmada çevresel titreşim yöntemi (operasyonel modal analiz) benimsenmiştir. Bu yöntemde çevresel, doğal etkiler altında yapının verdiği tepkinin ölçülmesi ve titreşim kayıtlarının uygun yöntemlerle işlenerek yapının dinamik davranış parametrelerinin elde edilmesi yoluna gidilir.

Değirmenliköy Kilisesi'nde gerçekleştirilen çalışmada titreşim ölçümleri için toplam 7 adet 3 eksenli kablosuz ivme ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bunlar kendi içerisinde kayıt ünitesine sahip, GPS anten bağlantılarıyla kendi aralarında senkronize olarak eş zamanlı ölçüm alabilen, ultra hassas



Şekil 2. Mevcut durumu yansıtan model. (The model that represents the current situation)



Şekil 3. Apsis eklenmiş durumu yansıtan model. (The model with abscissa addition)

ivme kayıt cihazlarıdır (Şekil 4). Cihazlar teorik modal analiz sonuçları dikkate alınarak belirlenen ölçüm krokisi dâhilinde yapıya dış duvar üst noktalar ve çatı hizasında yerleştirilerek ölçüm alınmıştır (Şekil 5).

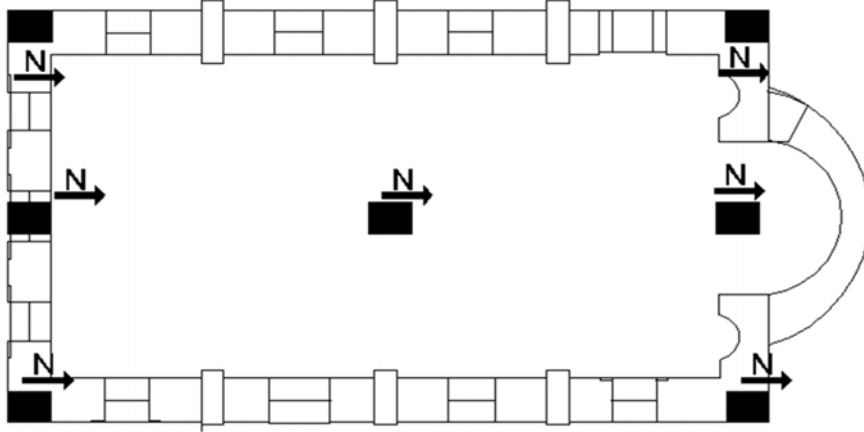
Tüm ölçümler g cinsinden, 0,01 saniye aralıklarla alınmıştır. Genel olarak 5'er dakikalık ölçüm dosyaları Artemis Modal Pro 2017 yazılımı [39] ile işlenmiş; frekans ortamında ayrışma yöntemi ile ilk 3 mod şekli ve modal frekanslar elde edilmiştir. Farklı veri setlerinden elde edilen spektral yoğunluk fonksiyon grafikleri oluşturulmuştur. Söz konusu spektral yoğunluk fonksiyonlarına ait örnek grafikler Şekil 6'da sunulmaktadır.

Deneysel mod şekillerinden ilki yapının kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi olarak hesaplanmıştır; bu moda ait frekans 3,56 Hz olarak belirlenmiştir. İkinci mod çatı örtüsünde düşey hareket olarak oluşmuş; frekans 5,18 Hz olarak hesaplanmıştır. 3. mod ise binanın düşey eksen etrafındaki burulma hareketi olarak belirlenmiş ve ilgili

frekans 6,89 Hz olarak tespit edilmiştir. Teorik ve deneysel modal analiz sonucunda belirlenen ilk 3 mod şekli birbirinin aynısı olmuştur (Şekil 7). Ancak, modal frekanslar arasında farklılık tespit edilmesi teorik modelin kalibre edilmesini gerektirmiştir.

6. TEORİK MODELİN KALİBRE EDİLMESİ ve APSİS KISMININ EKLENMESİ (CALIBRATION OF THE THEORETICAL MODEL and ADDITION OF ABCISSA)

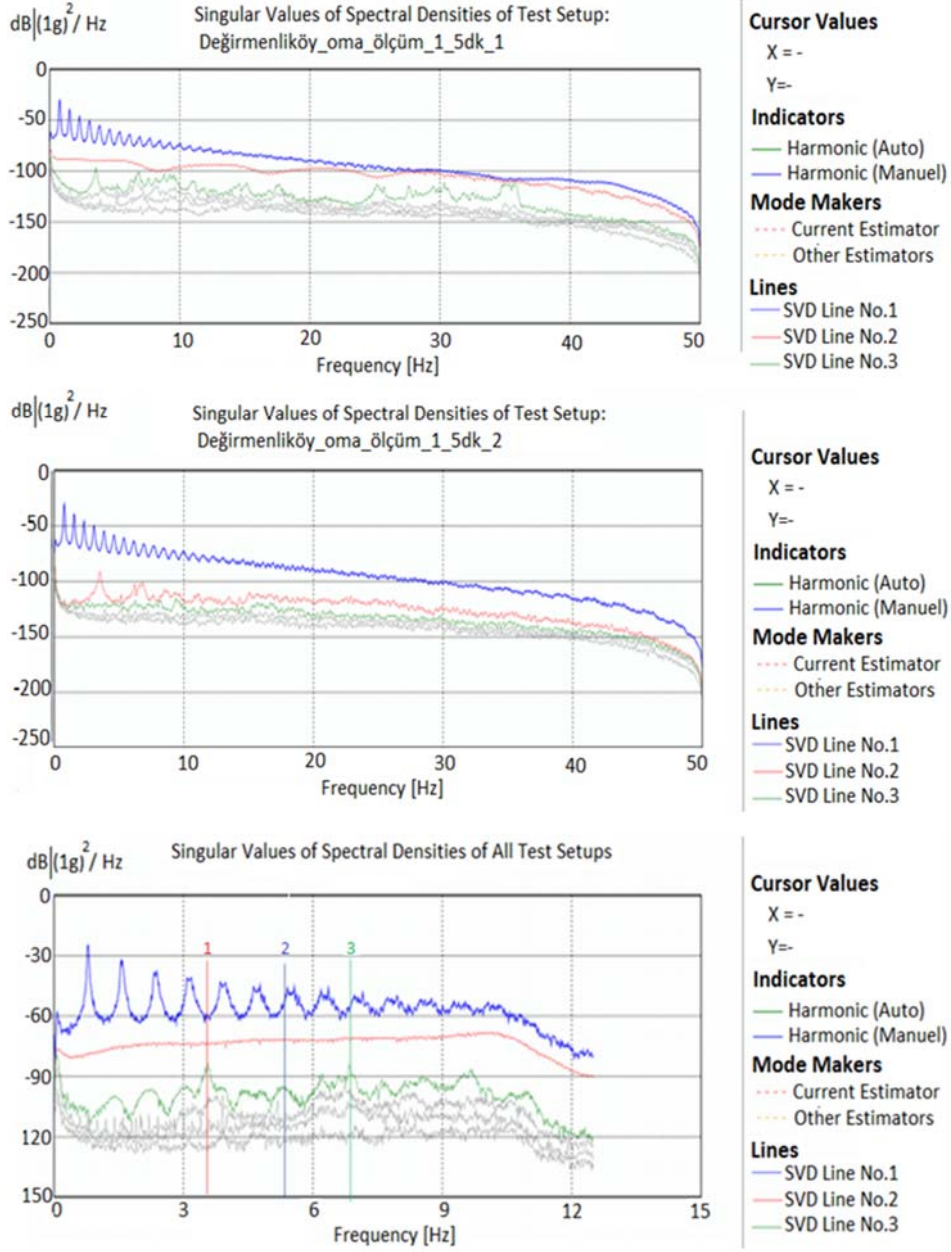
Deneysel modal analiz çalışması neticesinde elde edilen ilk 3 mod şeklinin yapının mevcut durumunu yansıtan model için hesaplanan mod şekilleri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir (Şekil 7). Bununla birlikte, incelenen her bir mod şekli için teorik ve deneysel frekansların farklı olduğu belirlenmiştir. Teorik modal analiz yapılırken, başlangıçta Tablo 1'de sunulan elastik modül değerleri kullanılmıştır. Malzeme özelliklerinin tayinine ilişkin detaylı bilgi [32]'de sunulmaktadır. Duvarlarda farklı yapıdaki kayaçlar karışık



Şekil 4. Değirmenliköy Kilisesi titreşim ölçüm krokisi. (Değirmenliköy Church vibration measurement sketch)



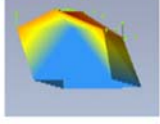
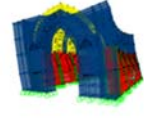
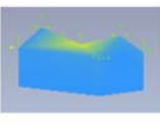
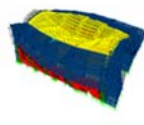
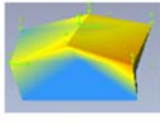

Şekil 5. Saha çalışmalarına ait fotoğraflar. (Photos of field work)



Şekil 6. Farklı veri setlerinden elde edilen spektral yoğunluk grafikleri. (Spectral density graphs obtained from different data sets)

olarak kullanılmıştır. Duvar mekanik özellikleri belirlenirken duvarların yapı içinden ve dışından alınan görüntüleri üzerinden ortalama kayaç dağılımları tayin edilmeye çalışılmıştır. Ancak, duvar içyapısı hakkında değerlendirme yapmak mümkün olamamıştır. Duvar mekanik özelliklerinin belirlenmesinde bu durumun göz ardı edilmesinin hatalı bir yaklaşım olduğu düşünülmektedir. Makro modelleme yaklaşımında peşinen yapılan homojenleştirme kabulleri de bu açıdan değerlendirilmelidir. Bununla birlikte, yapının muhtelif yerlerinde gözlemlenen hasar dikkate alınmamıştır. Sıralanan hususların teorik ve deneysel modal analiz sonuçlarının farklı çıkmasının temel gerekçeleri olduğu kabulüyle; sonraki analizlerde kullanılacak olan modelin deneysel frekanslara yakın

frekans değerleri verecek şekilde güncellenmesi gerekmektedir. Model güncellemesi ya da kalibrasyonu çalışmasında; yapı geometrisinin tekrar gözden geçirilmesi, mesnet koşullarının yeniden tanımlanması ya da yapıyı oluşturan malzeme elastik modüllerinin güncellenmesi gibi uygulamalar yapılması mümkündür. Bu çalışmada; başlangıçta tanımlanan malzeme elastik modüllerinin değiştirilmesi suretiyle deneysel frekansların teorik model üzerinde hesaplanması yoluna gidilmiştir. Bu çalışma yapılırken; yapının bütünü ele alınmış ve özellikle yapının tahrip olmuş yerleri ve bozunmuş olan kısımları üzerinde durulmuştur. Başlangıç teorik model için elastisite modülü [31]'de belirtilen şekilde basınç dayanımının 200 katı olacak şekilde $200f_k$ olarak hesaplanmıştır ve Tablo 1'de bu durum

Mod	Açıklama	Deneyisel Mod Şekli	Deneyisel Modal Frekans (Hz)	Teorik Mod Şekli	Teorik Modal Frekans (Hz)
1	kısa doğrultuda yatay hareket		3.56		3.57
2	çatı örtüsünün düşey hareketi		5.18		5.07
3	burulma		6.89		5.29

Şekil 7. Teorik ve deneysel mod şekillerinin karşılaştırılması (Comparison of theoretical and experimental mode shapes)

özetlenmiştir. Güncellenen modelde; zamana bağlı deformasyonların ve tahribatın olduğu yapı elemanlarında elastik modül değerleri daha düşük değerler olacak şekilde tanımlanmıştır. Deneysel modal frekansları verecek şekilde yapılan düzenlemede; özellikle tahrip olmuş olan iç kemerlerde elastisite modülü $27f_k$, çoğunlukla zamana bağlı deformasyonların olduğu düşünülen kemer, sütun ve dış cephe elemanlarında $41f_k$ alınmıştır. Bu durum Tablo 2’de özetlenmiştir. Mevcut durumu yansıtan model için hesaplanan modal frekans değerleri de Tablo 3’te sunulmaktadır.

7. APSİS EKLENTİLİ YAPISAL MODELİN OLUŞTURULMASI VE ANALİZLER (CREATION OF STRUCTURAL MODEL WITH ABSCISSA ATTACHMENT AND ANALYSIS)

Mevcut duruma ait modelin kalibrasyon çalışmasının ardından apsis kısmının yıkılma nedeninin deprem olup olmadığının araştırılabilmesi için öncelikle modele apsis kısmı eklenmiş ve malzeme olarak yapıda ağırlıklı olarak kullanılan, tüfleşmiş kireçtaşı kullanılmıştır. Devamında dinamik analizler yapılmıştır. Apsis eklentisi yapılırken, yıkılan apsisin yapı duvarları ve zemindeki izleri dikkate alınarak geometrisi kurgulanmıştır. Buna ek olarak; Ermeni kilise mimarisi özellikleri sanat tarihi disiplini açısından ele alınmış ve apsis oluşturma çalışma esnasında değerlendirilmiştir. Apsis eklentili model üzerinde öncelikle

teorik modal analiz yapılmıştır. Sonuçlar özet olarak Tablo 4’te sunulmaktadır.

Apsis eklentisiyle birlikte yapının ilk 3 mod şeklinde değişiklik olmadığı; bununla birlikte birinci ve üçüncü modal frekansında artış olduğu görülmüştür. Bu hususun yapıdaki toplam kütle artışıyla ilişkilendirilebileceği düşünülmektedir. Ancak; çatı örtüsünün düşey yöndeki hareketi olarak hesaplanan ikinci mod şekline ait frekansta azalma hesaplanmıştır. Bu azalmanın sebebinin; apsis eklentisinin çatı örtüsünün düşey yöndeki rijitliğini artırması olduğu düşünülmektedir.

Apsisli model üzerinde doğrusal elastik hesap yöntemiyle dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Kilise yapısının 1939 Erzincan Depremi davranışının belirlenmesi için, tarihi depremin ivme kayıtlarına ulaşılmaya çalışılmıştır. Ancak, depremin çok eski bir tarihte yaşanmış olması nedeniyle sayısal ivme kayıtları yoktur. Zamanın şartlarına göre depreme ait ivme kaydı alınması oldukça zor olduğu bilinmektedir. Yaşanan depreme ait bilgi olarak sadece depremin şiddeti ve büyüklüğü bilgisi bulunmaktadır. Bu deprem davranışının yapıya yansıtılması amacıyla bu depremden yaklaşık elli yıl sonra 1992 yılında yine Erzincan’da yaşanmış depremin kayıtlarının elde edilmesi ve bu çalışma kapsamında kullanılması uygun görülmüştür. Nedeni ise 1992 Erzincan Depreminin özellikle oluşan fay hattına yakın bölgelerde etki gücünün fazla olması, aynı

coğrafyada cereyan etmesi ve 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem kabulünün yapılmasıdır. Burada temel çıkış noktası, esasen yapının dinamik etkiler altındaki davranışını görmek ve apsis bölgesinin hasar alıp alamayacağı konusunda kestirim yapmaya çalışmak olduğundan 1992 Erzincan Deprem kayıtlarının kullanılmasının hatalı olmayacağı düşünülmüştür. Her iki depreme ait hasar ve şiddet değerleri Tablo 5'te sunulmaktadır.

Kilise dinamik davranışı zaman tanım alanında (time history) lineer analizler gerçekleştirilmek suretiyle incelenmiştir. Analizlerde kullanılan deprem kayıtları Şekil 8 'de sunulmaktadır. Dinamik analizler neticesinde yapıda oluşan gerilmeler ve deformasyonlar hesaplanmıştır. En büyük basınç gerilmelerinin dış cephede nişlerin üzerinde ve iç kemerlerin en üst kısımlarında olduğu görülmüştür. Bu basınç gerilmesi aralığı ise 5 MPa ve altı olarak tespit edilmiştir. Hesaplamalarda iç kemer için öngörülen basınç dayanım değeri ise 7,33 MPa olup; oluşan en büyük basınç gerilmesi değerleri de bu sınır değerinin altında kalmaktadır. İç kemerlerde üstten dış cephe elemanı ile birleşim bölgesi

nişlerden sonra en çok gerilmeyi alan kısmı oluşturmaktadır. Buradaki en büyük basınç gerilmesi 5,12 MPa olarak hesaplanmıştır. Tonzlardaki basınç gerilmesine bakıldığında orta ve üçüncü kemeri oluşturan kısımda en büyük gerilmelerin yoğunlaştığını söylemek mümkün olmaktadır. Bu bölgeden sonra kuzey yönünde ilk kemer çevresinde gerilmelerin yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Tonzlarda oluşan en büyük basınç gerilmesi değeri ise 1,83 MPa olmaktadır ki; bu değer yine tonozlar için hesaplanmış olan 4,96 MPa basınç dayanım değerinin altında kalmaktadır. Sütunlarda basınç gerilmesinin maksimum 0,78 MPa değerine ulaştığı hesaplanmıştır. Sütunlarda güneyden itibaren ikinci kemerin olduğu kısımlarda bu gerilmelerin olduğu gözlenmiştir. Bu değer sütunlar için hesaplanan basınç dayanım değeri olan 4,41 MPa'nın yine çok altında kalmaktadır. Çatı kemerleri ve apsis için belirlenen basınç dayanım değeri 1,39 MPa olmasına karşılık bu kısımlarda oluşan basınç gerilmesi de oldukça düşük değerler almaktadır. Basınç gerilmelerinin; çatı kemerlerinde güney cepheden itibaren ikinci kemerde yoğunlaştığı ve en fazla 0,17 MPa değerine ulaştığı görülmektedir. Apsiste ise dış

Tablo 2. Yapı Elemanlarına Ait Güncellenen Mukavemet Değerleri
(Updated Strength Values of Building Elements.)

Yapı Elemanı	Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Sütunlar	4,412	0,441	882
İç Kemer	7,329	0,732	1466
Kemer	1,390	0,139	278
Tonoz	4,962	0,496	1002
Dış Cephe	6,118	0,611	1224

Tablo 3. Mevcut Durumu Yansıtan Model için Mod Şekilleri ve Modal Frekans Değerleri
(Mode Shapes and Modal Frequency Values for the Model Representing the Existing Situation)

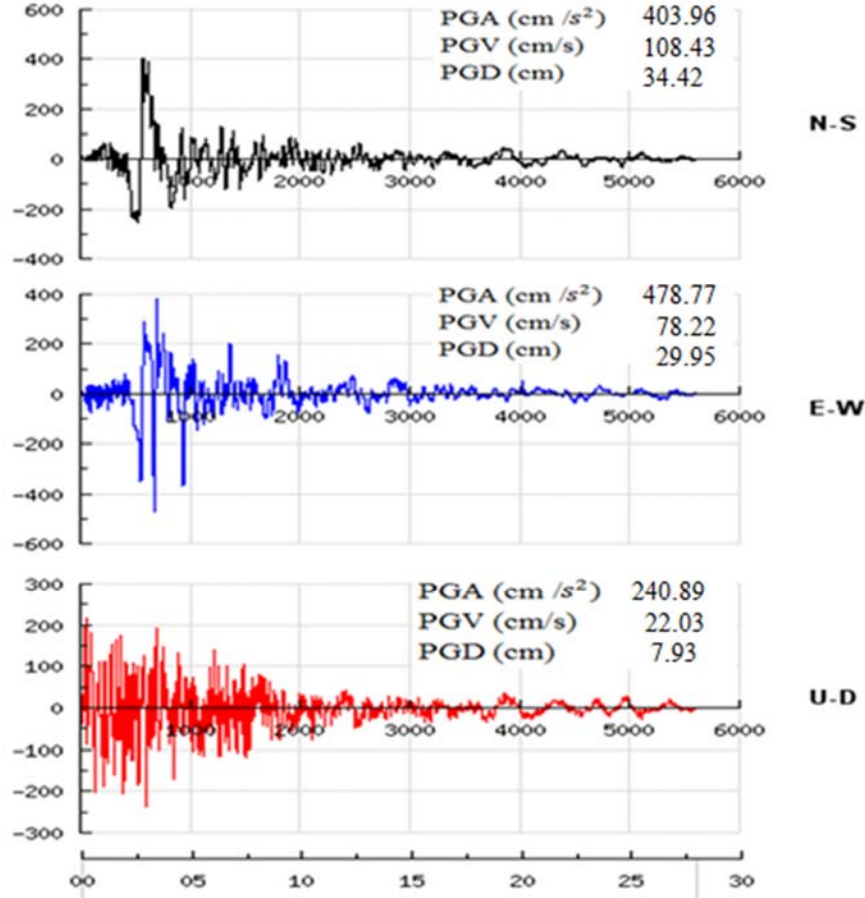
Mod	Açıklama	Modal Frekans (Hz)		
		Başlangıç Teorik Modal Analiz Sonucu	Operasyonel Modal Analiz Sonucu	Elastisite Modülü Değişimi Sonucunda Teorik Modal Analiz Sonucu
1	kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi	6,38	3,56	3,57
2	çatı örtüsünün düşey hareketi	7,71	5,18	5,07
3	düşey eksen etrafında burulma	8,78	6,89	5,29

Tablo 4. Mevcut Durumu Yansıtan Model ve Apsisli Modeller için Mod Şekilleri ve Modal Frekans Değerleri
(Mode Shapes and Modal Frequency Values for the Model Representing the Existing Situation and Addition of Abscissa)

Mod	Açıklama	Modal Frekans (Hz)	
		Mevcut Durum	Apsisli Eklentili Durum
1	kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi	3,57	3,60
2	çatı örtüsünün düşey hareketi	5,07	4,47
3	düşey eksen etrafında burulma	5,29	5,48

Tablo 5. 1939 ve 1992 Erzincan Depremlerinin Karşılaştırılması [40] (Comparison of 1939 and 1992 Erzincan Earthquakes)

Tarih	Saat	Yer	Şiddet	Mag (Ms)	Can Kaybı	Hasarlı Bina
1939	01:57	Erzincan	X-XI	7,9	32968	116720
1992	19:18	Erzincan	VII	6,8	653	2189



Şekil 8. 1992 Erzincan Depremi İvme Kayıtları (1992 Erzincan Earthquake Acceleration Records)

cepheye yakın olan bölgelerde basınç gerilmeleri yoğunlaşmakta ve maksimum 0,34 MPa değerine ulaşmaktadır. Bu değer ise apsis için hesaplanan basınç dayanımı değerinin altında kalmaktadır.

Dinamik analizlerde en büyük çekme gerilmelerinin özellikle binanın kısa doğrultusu olan doğu-batı yönünde uygulanan deprem için hesaplandığı görülmektedir. Çekme gerilmelerinin en fazla iç kemerlerin üst kısımlarında yoğunlaştığı belirlenmiştir. Bu değer 4,78 MPa gibi bir değere ulaşmaktadır ve hesaplanan 0,73 MPa dayanım değerinin üstünde kalmaktadır. Dolayısıyla da çekme gerilmelerine bağlı olarak iç kemerlerin üst kısımlarında hasar oluşmuş olması beklenebilir. Bu durum tek bir iç kemerin sadece bir yerinde cereyan etmemektedir, iç kemerlerin tamamına yakınında çekme dayanımını aşan bölgeler bulunmaktadır. Dış cephede oluşan maksimum çekme gerilmesi, yine nişlerin üzerinde 3,09 MPa'dan başlamak üzere azalmaktadır. Bu rakam ise yine hesap sonucu elde edilmiş olan çekme dayanımı olan 0,61 MPa'nın çok üzerindedir. Yani apsis – yapı birleşim bölgesi olarak adlandırılan nişlerde hesaplanan çekme gerilmeleri çekme dayanımının çok üstündedir. Bu nedenle; nişlerin de iç kemerlerdeki benzer şekilde hasar aldığı ve çatlaklar oluşmuş olabileceği sonucu çıkarılabilmektedir. Yapıda deprem neticesinde ve mevcut durumda oluşan çekme ve

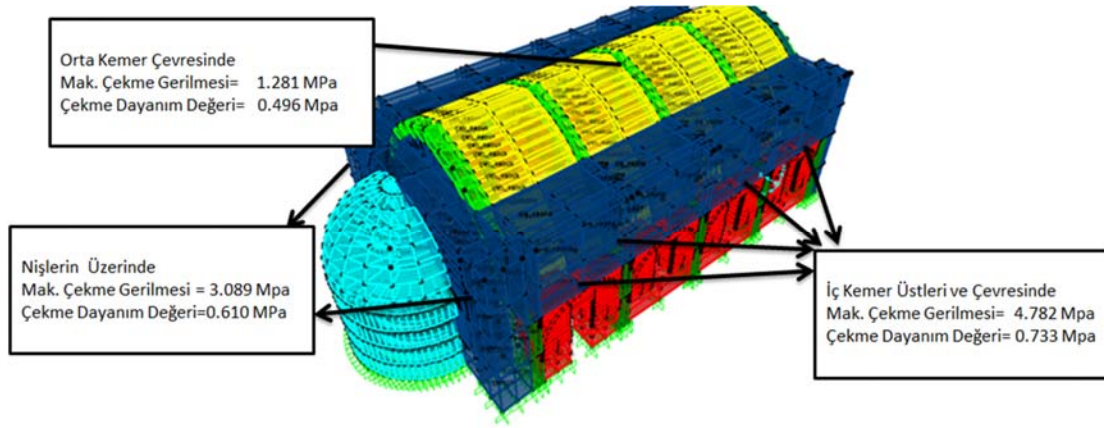
basınç gerilmeleri ile hesap sonucu elde edilen dayanım değerleri Tablo 6'da sunulmaktadır. Yapının mevcut durumu üzerinde yapılan statik analiz neticesinde hesaplanan en büyük gerilme değerlerinin ilgili dayanım değerlerinin altında olduğu görülmüştür. Bununla birlikte; tonoz için hesaplanan en büyük çekme gerilmesinin öngörülen malzeme dayanımından düşük ama bu değere oldukça yakını olduğu belirlenmiştir. Gelecekte muhtemel bir restorasyon çalışmasında bu durumun dikkate alınmasının yapısal güvenlik açısından önemli olduğu düşünülmektedir.

1992 Erzincan Depremi kayıtları kullanılarak yapılan dinamik analiz neticesinde hesaplanan gerilme dağılımlarına bakıldığında, basınç dayanımını aşan yapı elemanlarına rastlanmadığı söylenebilmektedir. Ancak çekme gerilmeleri için durum farklıdır. Özellikle iç kemerlerin hepsinin üzerinde ve çevresinde çekme dayanımlarının aşıldığı bölgeler olduğu görülmektedir. Yine nişlerin üzerinde ve orta çatı kemeri çevresinde çekme gerilmelerinden kaynaklı hasar oluşmuş olabileceği düşünülmektedir. Dayanım değerlerinin aşıldığı bölgeler özet olarak Şekil 9'da sunulmaktadır.

Dinamik analizler neticesinde en büyük yatay yer değiştirme değerleri yapı kısa doğrultusunda hesaplanmış ve düşey çökme değerleri ile birlikte Şekil 10'da özetlenmiştir. Yığma

Tablo 6. Oluşan En büyük Gerilmeler Ve Dayanım Değerleri (Maksimum Stresses and Strength Values)

Yapı Elemanı	Basınç Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Basınç Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
	Mevcut Durum		1992 Depremi ve Apsis Birlikte			
Tonoz	1,170	0,415	1,828	1,281	4,960	0,496
Çatı Kemerleri	0,274	0,047	0,170	0,140	1,390	0,139
Sütun	0,209	0,048	0,777	0,088	4,410	0,442
İç Kemer	0,453	0,314	5,118	4,782	7,330	0,733
Dış Cephe	1,436	0,396	6,361	3,089	6,120	0,610
Apsis	-	-	0,337	0,0316	1,390	0,139



Şekil 9. Dinamik analiz neticesinde yapı üzerinde dayanımların aşıldığı bölgeler.
(Regions on the structure over which strength values are exceeded as a result of dynamic analysis)

yapılar için birim şekil değiştirme hasar limiti değerleri oldukça tartışmalıdır. Bununla birlikte; literatürde yığma yapılar için önerilen şekil değiştirme limitleri genel olarak 0,003-0,0045 arasındadır [41, 42]. Simoes vd. [43], tarafından yapılan çalışmaya göre mevcut yığma yapılar için önerilen şekil değiştirme limit değeri 0,0006 mertebesindedir. Dinamik analizler neticesinde yapı dış duvarlarında hesaplanan en büyük düşey çökme değeri 10,50 mm değerine ulaşmaktadır. Bu durumda birim kısalma oranı $\varepsilon = 10,50 / 7350 = 0,0014$ değerine ulaşmaktadır ki; hesaplanan değer literatürde önerilen hasar sınırının (0,0006) üzerinde bir değerdir.

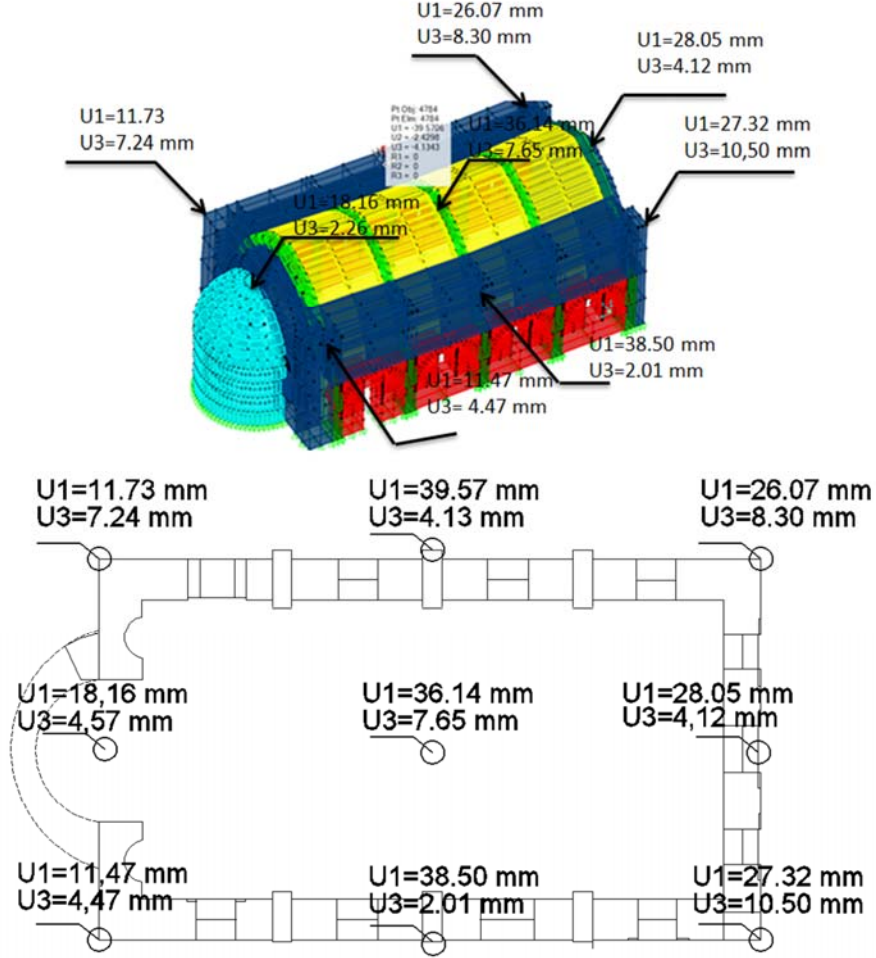
Dinamik analizler neticesinde en büyük yatay yer değiştirmelerin yapının kısa doğrultudaki ivme kaydı etkisindeki analizinden elde edildiği görülmektedir. En büyük yatay yer değiştirmeler tam binanın orta noktasındaki kemere yakın bölgelerde oluşmaktadır. Elemanlar açısından oluşan deplasman değerlerine bakıldığında en fazla yer değiştirme değeri gerilme dağılımının da fazla olduğu dış cephede oluşmaktadır. En büyük yatay yer değiştirme dış cephede; duvar üst noktasında 39,57 mm değerine ulaşmaktadır. Yatay öteleme değerleri ile ilgili sınır koşullarına bakıldığında, Deprem Bölgelerinde Yapılacak

Yapılar Hakkında Yönetmelik 2007 'de minimum hasar sınırı, güvenlik sınırı ve göçme sınırı olmak üzere üç farklı aşama için şartlar tanımlandığı görülmektedir. Yapının herhangi bir katında görel kat öteleme değerleri minimum hasar sınırı için 0,01, güvenlik sınırı için 0,03 ve göçme sınırı için 0,04 olarak öngörülmüştür. Ancak Önal vd. [44], yapılan çalışmada yığma duvarda kat yüksekliğinin 1 / 250 (0,004) oranında öteleme oluşursa bunun duvarda çatlamalara neden olduğu ifade edilmektedir.

Bu çalışmada elde edilen en büyük yatay görel kat öteleme oranı $\delta_{ji}/h_{ji} = 39,57 / 6850 = 0,0057$ olarak; ortadaki çatı kemerinin hizasındaki dış duvar tepe noktası için hesaplanmıştır. Hesaplanan değer ise yukarıda belirtilen 0,004 sınır değerinin üzerindedir. Bu durum dış duvar üst noktalarında deprem neticesinde çatlakların oluşması ve hasar almış olabileceğini düşündürmektedir. Bu değerden sonraki en fazla yatay yer değiştirme tonozlarda ve kemerlerde 36,00 - 38,00 mm'lere kadar ulaşmaktadır. Burada ise elde edilen görel kat öteleme değeri $\delta_{ji}/h_{ji} = 36,00 / 7350 = 0,0048$ olarak elde edilmektedir ve bu bölgede de yığma yapılar için sınır öteleme değeri olarak önerilen 0,004'ü aşmaktadır. Dolayısıyla yapı için hesaplanan yatay öteleme değerlerine baktığımızda binanın orta kısmında dış

cephe, tonoz ve kemerlerde çatlakların oluşmuş olabileceği ve özellikle bu bölgelerde göçmelerin yaşanmış olabileceği düşünülmektedir. Yapıda herhangi bir restorasyon ya da onarım çalışması yapıldığına dair resmi bir kayda ulaşılamamıştır. Bununla birlikte; yapı dış cephe duvarları dikkatle incelendiğinde duvar üst bölgelerinde farklı

türde/rengte kayaçlar kullanıldığı görülmektedir (Şekil 11). Bu bölgeler, dinamik etkiler altında hesaplanan yatay öteleme değerlerinin hasar oluşturmuş olabileceğinin düşünüldüğü bölgelerdir. Dış duvar üst noktalarında farklı renkli taş kullanımı; deprem sonrası hasarın onarıldığı düşüncesini tartışmaya açmaktadır.



Şekil 10. Dinamik analiz neticesinde hesaplanan en büyük yer değiştirmeler. (Maximum displacement values calculated as a result of dynamic analysis)



Şekil 11. Kilise dış cephe duvar görüntüsü (Outer façade wall view of the church)

Buna karşılık apsisde oluşan en fazla yer değiştirme ise yatay yönde 14,14 mm olarak belirlenmiştir. Bu değer $\delta_{ji}/h_{ji} = 14,14 / 6300 = 0,0022$ olarak sınır değerinin oldukça altında olmakta ve apsisin kendi içerisinde herhangi bir çatlak oluşmadığı yorumunun yapılmasına imkan sağlamaktadır.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapsamında, Erzincan Değirmenliköy Kilisesi apsis bölümünün 1939 Erzincan Depremi'nde yıkıldığı yönündeki söylemin teknik olarak araştırılması amaçlanmıştır. Erzincan ilinin yakın tarihi boyunca yıkıcı depremler yaşamış olmasına rağmen Değirmenliköy Kilisesi'nin ayakta kalmış olması yapının incelenmesi için makale yazarlarını teşvik etmiştir. Çalışma neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Erzincan ilinde meydana gelmiş 1992 Erzincan Depremi düzeyindeki bir depremde; kilise apsisi ile yapının birleşim bölgesinde hasar oluşmuş olabileceği ve bu hasarın zamanla ilerleyerek apsis yapısının kiliseden ayrılmış olabileceği sonucuna ulaşılmıştır. 1939 Erzincan Depremi'nin şiddet ve büyüklük olarak 1992 Erzincan Depremi'nden daha büyük olduğu düşünüldüğünde apsis birleşiminin 1939'da apsisin yapıdan ayrılmasına sebep olacak şekilde hasar almış olabileceği düşünülmektedir.

Yapısal analizler, dikkate alınan depremde, kilise dış duvar üst bölgelerinde hasar oluşmuş olabileceği sonucunu ortaya koymaktadır. Bu bölgelerdeki farklı türde taş kullanımı, duvara sonradan müdahale edilmiş izlenimi vermektedir. Her ne kadar; kayıtlarda olmasa da bu durum muhtemel bir tamirat izi olarak değerlendirilebilmektedir. Kilise gövdesinin, gözle görülür hasarlara rağmen, ayakta kalabilmiş olmasının nedenlerinden birisi olarak yapı inşasında büyük oranda tüfleşmiş kireç taşı kullanılmış olması olduğu düşünülmektedir. Zira bu malzemenin birim ağırlığı diğer volkanik kayaların neredeyse yarısı kadardır ve yapı ağırlığını önemli ölçüde azaltmıştır.

Erzincan Değirmenliköy Kilisesi bu çalışma ile birlikte ilk kez teknik açıdan ele alınmış ve yapısal özellikleri incelenmiştir. Bu haliyle, ilerleyen dönemlerde yapılması muhtemel bir restorasyon çalışması için teknik kaynak oluşturulmuştur. 1939 Erzincan Depremi için üretilecek sentetik deprem kaydıyla analizlerin tekrarlanması yapısal davranışın daha güvenilir bir şekilde irdelenmesine olanak sağlayacağı düşünülmektedir. Operasyonel modal analiz neticesinde yapısal modelin kalibre edilmesi gerekmiştir. Bu durum; yığma yapılar için tahribatsız yöntemlerle, daha gerçekçi bir şekilde malzeme özelliklerinin belirlenmesini hedefleyen çalışmalara gereksinim duyulduğunu ortaya koymuştur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu araştırmanın daha çalışmaları süresince katkı sağlayan genç araştırmacılar Sayın Gökçe Kaan Savaş'a, Sayın Fatih

Şuşarlıoğlu'na ve Sayın Taha Kalaycı ile Değirmenliköy halkına teşekkürü borç biliriz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Masciotta M. G., Ramos L.F., Lourenço P. B., The importance of structural monitoring as a diagnosis and control tool in the restoration process of heritage structures: A case study in Portugal, *Journal of Cultural Heritage*, 27, 36-47, 2017.
2. Diaferio M., Foti D., Mongelli M., Giannoccaro P., Andersen, Operational modal analysis of a historic tower in Bari, Part of the series conference proceeding of the experimental mechanics series, 335-342, 2011.
3. Saisi A., Gentile, C., Guidobaldi M., Post-earthquake continuous dynamic monitoring of the Gabbia Tower in Mantua, Italy, *Construction and Building Materials*, 81 101-112, 2015.
4. Altunışık A.C., Adanur S., Genç A.F., Günaydın M., Okur F.Y., Non-destructive testing of an ancient Masonry Bastion, *Journal of Cultural Heritage*, 6-12, 2016.
5. Ceroni F., Sica S., Pecce M. R., Garofano A., Evaluation of the natural vibration frequencies of a historical masonry building accounting for SSI, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 64, 95-101, 2014.
6. Compan V., Pachón P., Cámara M., Ambient vibration testing and dynamic identification of a historical building: Basilica of the Fourteen Holy Helpers (Germany), *Procedia Engineering*, 199, 3392-3397, 2017.
7. Pepi C., Gioffrè M., Comanducci G., Cavalagli N., Bonaca A., Ubertini F., Dynamic characterization of a severely damaged historic masonry bridge, *Procedia Engineering*, 199, 3398-3403, 2017.
8. Sancibrian R., Lombillo I., Sarabia E.G., Boffill Y., Wong H., Villegas L., Dynamic identification and condition assessment of an old masonry chimney by using modal testing, *Procedia Engineering*, 199, 3410-3415, 2017.
9. Çalık İ., Bayraktar A., Türker T., Betonarme kubbelerin taş yığma duvarlı camilerin dinamik davranışına etkisinin çevresel titreşim yöntemiyle incelenmesi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(3), 621-630, 2016
10. Clementi F., Pierdicca A., Formisano A., Catinari F., Lenci S., Numerical model upgrading of a historical masonry building damaged during the 2016 Italian earthquakes: the case study of the Podesta' palace in Montelupone (Italy), *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 703-717, 2017.
11. Brincker J.S., Zang L., Andersen P., Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition, 18th International Modal Analysis Conference, San Antonio, USA, 4062, 2, 625-630 2000.
12. Lourenço P.B., and Ramos L.F., Analysis of Historical Constructions: From Thrust-Lines to Advanced Simulations, *Proceedings of the 3rd International*

- Seminar on Historical Constructions, Guimarães, Portugal, 91-116, 2001.
13. Ramos L.F., Damage identification on masonry structures based on vibration signatures, Ph.D. Thesis, University of Minho, Minho, Portekiz, 2007.
 14. Alaboz M., Dynamic Identification and modal updating of S.Torcato Church, Master's thesis, University of Minho, Minho, Portekiz 2009.
 15. Mendes P., Baptista M.A., Lagomarsino S. S., Structural and dynamic analysis of N. Sra. do Carmo Church, Lagos Portugal, EURODDYN, Sixth European Conference on Structural Dynamics, Paris, Fransa, 2005.
 16. Foti D., Diaferio M., Gianoccaro N.I., Mongelli M., Ambient vibration testing, dynamic identification and model updating of a historic tower, NDT&E international, 47, 88-95, 2012.
 17. Sánchez-Aparicio L. J., Riveiro B., González-Aguilera D., Ramos L. F., The combination of geomatic approaches and operational modal analysis to improve calibration of finite element models: A case of study in Saint Torcato Church (Guimarães, Portugal), Construction and Building Materials, 70, 118-129, 2014. ,
 18. Genç A.F., Ergün M., Günaydin M., Altunişik A.C., Ateş Ş., Okur F.Y., Mosallam A.S., Dynamic analyses of experimentally-updated FE model of historical masonry clock towers using site-specific seismic characteristics and scaling parameters according to the 2018 Turkey building earthquake code, Engineering Failure Analysis, 105, 402-426, 2019.
 19. Costa C., Arede A., Costa A., Caetano E., Cunha A., Magalhaes F., Updating numerical models of masonry arch bridges by operational modal analysis, International Journal of Architectural Heritage, 760-774 2015.
 20. Costa C., Ribeiro D., Jorge P., Arede, A., Calçada R., Calibration of the numerical model of a stone masonry railway bridge based on experimentally identified modal parameters, Engineering Structures, 123. 354-371, 2016.
 21. Gentile C., Saisi A., Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment, Construction and Building Materials, 21:6, 1311-1321, 2007.
 22. Gentile C., Saisi A., Ambient vibration testing and condition assessment of the Paderno iron arch bridge (1889), Construction and Building Materials, 25:9, 3709-3720, 2011.
 23. Conde B., Ramos L.F., Oliveira D.V., Riveiro B., Solla M., Structural assessment of masonry arch bridges by combination of non-destructive testing techniques and three-dimensional numerical modelling: Application to Vilanova bridge, Engineering Structures, 148, 621-638, 2017.
 24. Bautista-De Castro Á., Sánchez-Aparicio L.J., Ramos L.F., Sena-Cruz J., González-Aguilera D., Integrating geomatic approaches, Operational Modal Analysis, advanced numerical and updating methods to evaluate the current safety conditions of the historical Bôco Bridge, Construction and Building Materials, 158, 961-984, 2018.
 25. Çelebi M., Eeri M., Sanli A., Sinclair M., Gallant S., Radulescu D., Real-Time seismic monitoring needs of a building owner and solution: A cooperative effort, Earthquake Spectra, 20 (2), 333-346, 2004.
 26. Kazaz İ., Kocaman İ., Taş yığma camilerin sismik yük kapasitelerinin değerlendirilmesi, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33(2), 557-573, 2018.
 27. Ramos L.F., Marques L., Lourenço P.B., De Roeck G., Campos-Costa A., Roque J., Monitoring historical masonry structures with operational modal analysis: Two case studies, Mechanical Systems and Signal Processing, 24:5, 1291-1305, 2010.
 28. SAP2000, Yapısal Analiz Programı, 2017.
 29. Eurocode 6: Design of masonry structures, 1995.
 30. Altındağ R., Güney A., Predicting the relationships between brittleness and mechanical properties (UCS, TS and SH) of rocks, Scientific Research and Essays, 5, 2107-2118, 2010.
 31. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, 2007.
 32. Aslay S.E., Evaluation of 1939 Erzincan Earthquake Dynamic Behaviour of Erzincan Değirmenliköy Church Over the Abscissa Damage, Master's thesis. Erzurum Technical University, Erzurum, Türkiye, 2017.
 33. Koçak A., Tarihi yığma yapıların statik ve dinamik yükler altında lineer ve non-lineer analizi: Küçük Ayasofya Camii örneği, Ph.D. Thesis, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 1999.
 34. Eurocode 6: Design of masonry structures, 1995.
 35. Haçin Ğ., 1939 Erzincan Büyük Depremi, Cumhuriyet Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 88,38-69, 2014.
 36. Özmen B., Türkiye Deprem Bölgeleri Haritalarının Tarihsel Gelişimi, Türkiye Jeoloji Bülteni, 51. 43-55, 2012.
 37. Gürsoy H., Akpınar Z., Tatar O., Koçbulut F., Sezen T.F., Mesci B.L., Polat A., Kavak K., Tuncer D., Yaman S., 1939 Erzincan Depremi yüzey kırığı haritalama çalışmaları Reşadiye Batısı Koyulhisar arası ilk gözlemlere ait bulgular, Aktif Tektonik Araştırma Grubu 10. Toplantısı, 37-38, 2006.
 38. Cunha A., Caetano E., Magalhaes F., Moutinho C., From input output to output only modal identification of civil engineering structures. SAMCO, Structural Assessment Monitoring and Control, 2006.
 39. Artemis Modal Pro, Operasyonel Analiz Programı, 2017.
 40. Doğan M., Yapıların Deprem Analizi, Yazarın Kendi Yayını, Eskişehir, Türkiye.
 41. Mosalam K., Glacoe L., and Bernier J., Mechanical Properties of Unreinforced Brick Masonry, Section 1, Kaxrence Livermore National Laboratory, LLNL-TR-417646, Usa, 2009.
 42. BBC, Bangladesh Building National Coda, Part6, 2012.

43. Simoes A., Gago A., Lopes M., and Bento R., Characterization of old Masonry Walls: Flat-Jack Method, 15 WCCE, Lisboa, Portugal, 2012.
44. Önal M.M. ve Koçak A., Yapı Hasarları ve Onarım Güçlendirme Yöntemlerinin Ayrıntıları. Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, 91-106, 2006.