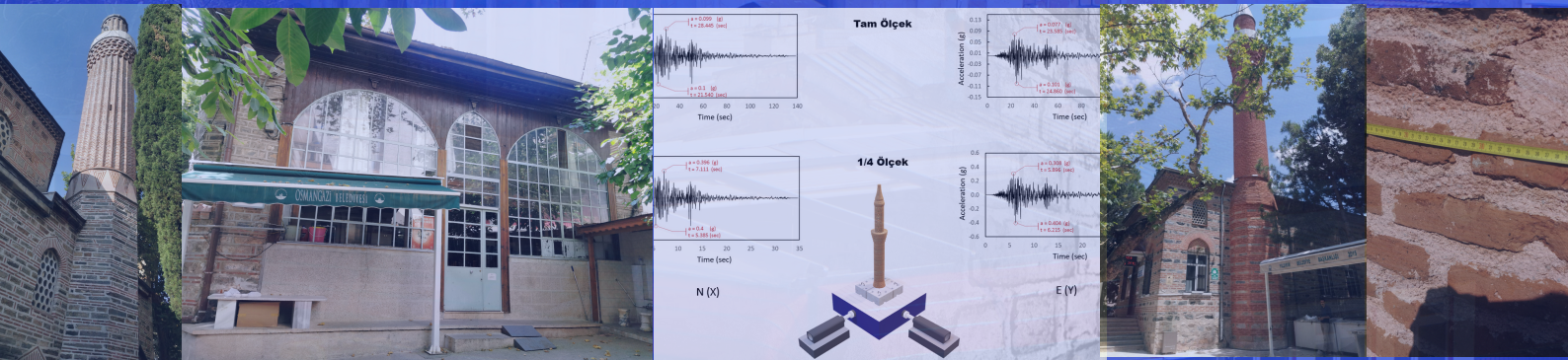


Bursa Tarihi Cami Minarelerinin Deprem Davranışı Çalıştayı

27 Kasım 2021

Bildiriler Kitabı

Editörler
Medine İspir
Alper İlki





© 2022, İstanbul Teknik Üniversitesi

© 2022, Istanbul Technical University

ISBN: 978-975-561-534-9

Bu kitabın her hakkı saklıdır ve tüm yayın hakları "İTÜ Rektörlüğü'ne" aittir.

Bu kitabın tamamı ya da herhangi bir bölümü yayınevinin izni olmaksızın yayınlanamaz, basılamaz, mikrofilme çekilemez, dolaylı dahi olsa kullanılamaz. TEKSİR, FOTOKOPİ veya başka teknikle çoğaltılamaz, bilgisayarda, dizgi makinalarında işlenebilecek bir ortama aktarılamaz. Kitapta yayınlanan tüm yazı ve görsellerin sorumluluğu yazar/yazarlara aittir.

All rights of this book are reserved and all publication rights belong to "ITU Rectorate". All or any part of this book cannot be published, printed, filmed or used indirectly without the permission of the publisher. It cannot be reproduced by DUPLICATION, PHOTOCOPY or any other technique, and cannot be transferred to an environment that can be processed on computers or typesetting machines. The responsibility of all texts and visuals published in the book belongs to the author(s).

Bursa Tarihi Cami Minarelerinin Deprem Davranışı Çalıştayı Bildiriler Kitabı

27 Kasım 2021, İstanbul, Türkiye

Editörler/Editors: Medine İspir, Alper İlki

İstanbul Teknik Üniversitesi yayınları. Yayın no. 2022.2KNF/2

Istanbul Technical University publications. No.2022.2KNF/2

ÖNSÖZ

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından Ulusal Deprem Araştırma Programı (UDAP) kapsamında desteklenen “*Bursa Tarihi Minarelerinin Deprem Performanslarının Analitik ve Deneysel Yaklaşımlar ile İncelenmesi ve Hasargörebilirlik Eğrilerinin Elde Edilmesi*” adlı projenin “*Bursa Tarihi Cami Minarelerinin Deprem Davranışı*” çalıştay 27 Kasım 2021 tarihinde çevrimiçi olarak gerçekleştirilmiştir.

Projenin ana amacı; tarihi ve kültürel bir mirasa sahip Bursa İlimizde yer alan tarihi yığma minarelerin yapısal ve geometrik özelliklerine göre sınıflandırılması ve bu yapıların deprem performanslarının gerçekçi bir şekilde tespiti için uygun yapısal değerlendirmelerin sarsma tablası deneyleri ve analitik çalışmalar ışığında yapılması, uygulanabilir iyileştirme yöntemlerinin önerilmesi ve farklı minare sınıfları için kırılgenlik eğrilerinin elde edilmesi olarak özetlenebilir. İstanbul Teknik Üniversitesi yürütücülüğünde gerçekleştirilen projenin hedeflerine; Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Vakıflar Genel Müdürlüğü, Gazi Üniversitesi, FSM Vakıf Üniversitesi ve Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi’nden araştırmacıların yer aldığı bir proje ekibinin çalışmaları ile ulaşılmıştır.

“*Bursa Tarihi Cami Minarelerinin Deprem Davranışı*” adlı çalıştaya konularında ulusal/uluslararası literatüre katkı sunan 10 konuşmacı davet edilmiştir. Değerli sunuşları ile çalıştaya katkıda bulunan konuşmacılara çok teşekkür ederiz. Çalıştayı düzenlemesine vesile olan proje kapsamında yürütülen çalışmalar 3 sunuşla özetlenmiş ve değerli katılımcılarla paylaşılmıştır. Çalıştay kapsamında yapılan bu katkıların yayılımını sağlamak amacıyla “*Bursa Tarihi Minarelerinin Deprem Davranışı-Bildiriler Kitabı*” hazırlanmış ve e-kitap olarak basılmıştır. Bildiriler kitabı ve çalıştay sunum videoları, “<https://www.ituafadbursatarihiminarelercalistayi.org/>” web adresinde ilgi duyan araştırmacıların ve meslektaşlarımızın erişimine açılmıştır.

Projeyi resmi olarak destekleyen AFAD-UDAP’a, T.C. Vakıflar Genel Müdürlüğü’ne, DASK’a ve Allianz Teknik’e ve ayrıca proje çerçevesinde yürütülen çalışmalar sırasında karşılan problemlerin giderilmesinde çok değerli katkılar sunan MESA İMALAT Sanayii ve Ticaret A. Ş’ye, ALACALI İNŞ. SAN. ve TİC. A. Ş’ye, BİL-SA İNŞAAT TURZ. SAN. ve TİC. LTD.

ŒTİ'ne, KÜLTÜR YAPI RESTORASYON İNŒAAT SAN. ve TİC. LTD. ŒTİ'ne, OFTEK İNŒAAT'a ve ORION Ağır Çelik Yapı Müh. İnş. San. ve Ticaret Ltd. Œti.'ne teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca, Yük. İnş. Müh. Yavuz CAVUNT'a çalıştay web sayfasını hazırladığı için çok teşekkür eder

Doç. Dr. Medine İSPİR

Prof. Dr. Alper İLKİ

İÇİNDEKİLER

Önsöz

Osmanlı Minareleri-Yapım ve Onarım Teknikleri	1-3
--	------------

Zeynep Ahunbay

Kagir Tono ve Kubbeler	4-8
-------------------------------	------------

Görün Arun

Bursa'nın Güncel Deprem Etkinliği ve Yapılan Çalışmalar	9-17
--	-------------

Şerif Barış

Bursa İlinde Tarihi Camilerin Yer Aldığı Hanlar Bölgesi Yerel Zemin Koşulları	18-21
--	--------------

Recep İyisan, M. Emre Haşal ve Merve Akbaş

Yığma Kargir Tarihi Yapıların Deprem Güvenliği ve Yapısal Modellenmesi	22-28
---	--------------

Oğuz Cem Çelik, Vildan Gizem Menteşe ve Melika Salman

Bursa Tarihi Minarelerinin Dinamik Karakteristikleri ve Hızlı Değerlendirilme için Doğal Titreşim Periyodu Tahmini	29-34
---	--------------

Cavit Serhatoğlu ve Ramazan Livaoğlu

Bursa İlindeki Tarihi Yığma Minarelerin Çevresel Titreşim Altında Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi	35-41
--	--------------

Fikret Kuran, Berkay Aldırmaz, Serdal Kaya, Ömer Tuğrul Turan, Medine Ispir, Cem Demir ve Alper İlki

Yığma Yapıların Kırılma Analizi	42-47
--	--------------

Murat Altuğ Erberik

Bursa İlindeki Tarihi Minarelerin Kırılma Eğrilerinin Elde Edilmesi	48-52
--	--------------

Elif Durgut, Fikret Kuran, Medine Ispir, Cem Demir, Ömer Tuğrul Turan ve Alper İlki

**Tarihi Yığma Binalarda Tünel Kazılarında Kaynaklı Hasar Değerlendirmesi
Konusunda Saha Deneyleri ve Yapı Sağlığı İzleme Verileri** 53-58

Derya Burcu Gülen, Yiyan Liu, Sinan Açıkgöz, Harvey Burd, Korhan Deniz Dalgıç ve Alper İlki

**Erken Dönem Osmanlı Yığma Minare Karakteristiklerine Sahip Minarelerin Sarsma
Tablası Deneyleri** 59-65

Osman Fatih Bayrak, Berkay Aldırmaz, Medine Ispir, Fikret Kuran, Cem Demir ve Alper İlki

Yazar İndeksi 66-67

OSMANLI MİNARELERİ-YAPIM VE ONARIM TEKNİKLERİ

Zeynep Ahunbay¹

¹*Prof. Dr. İTÜ*

**zahunbay@gmail.com*

Abstract

Ottomans built mosques of varying sizes and types. The simplest plan was a quadrangle with a portico. As they moved their capital from Iznik to Bursa, the inverted T plan emerged. Ulu Cami in Bursa was their first multi-domed mosque. All the mosques had a minaret, the height of which depended on the size and significance of the mosque it was attached to. Imperial mosques could have more than one minaret. The position of the minaret varied. Some were attached the portico; some placed next to a corner of the main body. The construction technique depended on the budget and the availability of material.

Ottoman minarets have square or polygonal bases. The shaft is round or polygonal in plan. Balconies were used to call the believers to pray. Minarets terminate with conical or pyramidal caps. As tall structures, they are susceptible to earthquakes. In Edirne, the earthquake of 1752 damaged almost all of the minarets. In Bursa, the earthquake of 1855 caused serious losses. Some old photos provide information about the scale of the destruction. The repairs were implemented with the style of the period and usually changed the form and construction technique of the upper parts of the minarets.

Keywords: Ottoman minarets, construction techniques, earthquake damage, restoration

Anahtar kelimeler: Osmanlı minareleri, yapım teknikleri, deprem hasarı, restorasyon

Erken İslam döneminden bu yana, Müslümanlar günde beş kere ezan okunarak namaza davet edilmektedir. Müezzinin sesinin geniş bir alandan duyulabilmesi amacıyla, camilerin yanında minareler yükselmektedir. Asya'da Türkistan'dan batıda İspanya'ya kadar geniş bir alana yayılan İslam dininin etkili olduğu ülkelerde inşa edilen camiler ve minareleri, yörenin yapı geleneklerine ve çevrede bulunan malzemelere bağlı olarak, farklı biçim ve tekniklerde yapılmıştır. Mısır, İran ve Hindistan'da özenle tasarlanmış, bezenmiş anıtsal minareler bulunmaktadır. İşlevsel yönleri yanında, simge değeri de taşıyan minareler, kentlerin genel görünüşünü etkilemekte ve silüetlerinde önemli yer tutmaktadır. Osmanlılarda önemli külliyelerin camileri birden fazla minareyle vurgulanmıştır.

Erken Osmanlı döneminde cami tasarımı, Selçuklu mimarisinden etkilenmiştir. Iznik'teki Yeşil Cami'nin (1378-1392) minaresi Orta Asya ve İran'dakiler gibi sırlı tuğladan yapılmıştır. Caminin giriş duvarının güneybatı köşesi üzerinde yükselen mütevazı boyutlu minare çatı seviyesinden başlamaktadır. Kısa kaidesi ve kürsüsü taş örgülüdür. Bursa'da Orhan Bey'in ardından giderek güçlenen devlet yapısıyla birlikte, yüksek minareli sultan camileri inşa edilmiştir. Bursa'da Ulu Cami iki anıtsal minaresi olan önemli bir anıttır. II. Murat döneminde Edirne'de ve daha sonra İstanbul'da yapılan sultan camilerinin görünüşlerine de önem verilmiş;

Osmanlı mimarları minareleri renkli taşlarla, özel motiflerle bezemişlerdir. Klasik dönem minareleri kaide, kürsü, gövde, şerefe, petek ve külah bölümlerinden oluşmaktadır. Minareler genel olarak tek şerefelidir; sultan camilerinde şerefe sayısı üçe kadar çıkmaktadır. Minare yapımında kenet ve zıvanalar kullanılarak, basamak ve cidarı oluşturan taş blokların bağlantıları güçlendirilmiştir.

Osmanlıların Balkanlarda Bulgaristan, Makedonya, Kosova, Bosna-Hersek'te yaptıkları camilerde, merkezden giden mimarların katkılarıyla, kargir minare yapımı ile ilgili temel bilgiler bu bölgelere de ulaştırılmış ve yöredeki yapı ustaları tarafından sürdürülmüştür. Geniş ormanlık alanları olan Karadeniz Bölgesinde, Toroslarda ve Bosna'da çok sayıda ahşap minareli cami bulunmaktadır. İstanbul'dan başlayarak, güneye inen ve Payas'tan geçerek Hac'a doğru ilerleyen kervan yolu üzerinde, Halep ve Şam'da yapılan anıtsal camiler, hassa mimarlarının katkılarıyla İstanbul'dakilere benzer biçim ve üslupta inşa edilmiştir. Şam'daki Süleymaniye Külliyesi çifte minareli camisiyle 16. yüzyıl Osmanlı mimarlığının izlerini taşımaktadır.

Bursa'daki erken dönem Osmanlı camilerinde minarenin konumu ve malzemesi çeşitlilik göstermektedir. Cami içinden çatı üstüne çıkan merdivenlerle ulaşılan minarelerin zeminden başlayan bir altyapıları bulunmamaktadır. I. Murat tarafından yaptırılan Hüdavendigar Camii'nde (1363- 1366) minare iki katlı son cemaat yerinin kuzeybatı köşesine ilştirilmiştir. Alçak bir kaide üstünde yükselen minarenin gövdesi kısa tutulmuştur. Bursa'da erken dönemde inşa edilen ve zemin seviyesinde kaideleri bulunan minarelerin merdivenlerinin çekirdeksiz inşa edildiği gözlenmektedir. Bu minarelerde basamaklar tuğla ile yığma tekniğinde inşa edilmiştir. Klasik dönemde ise minareler daha çok taş bloklarla yapılmıştır. Zeminden başlayan bir orta sütun (çekirdek) çevresinde dönerek yükselen merdiven basamakları, bir yanda merkeze, diğer yanda dış duvara oturtularak sıkı bir bağlantı sağlanmıştır. Çekirdekte zıvana, dış cidarda kenet ve zıvana bağlantılarıyla, kolay dağılmayan bir minare kütlesi oluşturulmaya çalışılmıştır.

Minare merdivenleri genellikle tek yolludur ve zeminden başlayarak şerefe seviyesine kadar yükselirler. Minarenin içinin ılık alabilmesi için kaideden itibaren, kürsü ve gövdeye mazgal tipi pencereler açılmıştır. Bazı sultan minareleri, müezzinlerin rahatça yukarı çıkmalarını, inmelerini sağlamak üzere iki yollu yapılmıştır. Bu tipe en erken örnek Bursa Ulu Cami'nin güneybatı minaresidir. Edirne'de Üç Şerefeli ve Selimiye camilerinde merdiven sayısının daha da artırıldığı, üç yollu düzenler uygulandığı gözlenmektedir. Minarelerin merdivenleri üstte şerefe seviyesinde sona ermektedir. Burada oluşturulan küçük bir sahanlıktan, bir kapıyla şerefeye geçilir. Merdiven bittikten sonra, minare çekirdeği bir miktar yükseltilerek, minarenin külahını destekleyen seren direğinin oturtulması için kaide oluşturulmaktadır. Yaklaşık 50-60 cm yükseklikteki kaide üzerine oturtulan seren direkleri uzun ağaçlardan yapılır. Bunların kaideye tespiti için zıvana kullanılır.

Peteğin dairesel veya çokgen planlı oluşuna göre, minare külahı konik veya piramidal olmaktadır. Külahın ahşap çatısı petek kornişi üzerinde oluşturulan bir ahşap hatıl üzerine oturtulmakta ve eğik kirişlerle serene bağlanıp üstü ahşap kaplanmaktadır. Serenin rüzgâr ve depremden etkilenmemesi için, külahın etek seviyesinde çevresi birbirine dik kirişler kullanılarak sarılır ve külahın saçağındaki hatıla bağlanır. Gerek görüldüğünde, minarenin petek bölümünde de seren ahşap yatay bağlantılarla yan duvarlara bağlanmaktadır.

Yüksek, narın strüktürler olan minareler büyük depremlerden etkilenmiş; özellikle şerefe ve üst kısımları yıkılmıştır. İstanbul'da 1509, 1766, 1894 depremleri, Edirne'de 1752 depremi ve

Bursa’da 1855 depremi birçok camide hasarlara neden olmuştur. Bu hasarlarla ilgili tarihi belgelerden onarımların yapılış şekilleri hakkında bilgi edinilmektedir. 18. ve 19. yüzyılda depremlerden sonra yapılan onarımlarda, mimarlar o sırada geçerli olan Barok veya canlandırmacı akımlara uygun bütünlemeler yapmışlardır. Böylece Erken ve Klasik dönem Osmanlı minarelerinin şerefe ve petek bölümlerinde ilk tasarımlarından farklı üslupta yenilemeler bulunmaktadır. Bursa’da Orhan Gazi, Ulu Cami, Yeşil Cami ve Muradiye minarelerinin onarımlarında üslupsal değişimler gözlenmektedir.

Referanslar

Ayverdi, E.H. (1966) Osmanlı Mimarlığının İlk Devri, I (1230-1402). İstanbul Fetih Cemiyeti, İstanbul

Ayverdi, E.H. (1972) Osmanlı Mimarisinde Çelebi ve II. Murad Devri (1403-1451). İstanbul Fetih Cemiyeti, İstanbul

Kuran A. (1964) İlk Devir Osmanlı Mimarisinde Cami, ODTÜ Mimarlık Fakültesi, Ankara

Öziş Ü., Alkan A., Özdemir, Y. (2018) Mühendis ve Mimar Sinan, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 340, İzmir, s. 77-78

Tanyeli, G. (2017) “Hiçbir Üstad Böyle Kar Etmemiştir” Osmanlı İnşaat Teknolojisi Tarihi, Mas Matbaacılık, s. 96-97, 144

KAGİR TONOZ VE KUBBELER

Görün Arun

Prof. Dr. Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Güzel Sanatlar ve Mimarlık Fakültesi

Abstract

In historic buildings, constructed of stone and brick masonry, the forms used to span between vertical supports and enclosing walls were arches, vaults and domes of various profiles and surfaces. The geometry of these forms and their force distribution has different characteristics.

Stone, brick and mortar as building materials are weak in tension and can only withstand compression. Cracks are the most frequent visible signs of damage at the weaker zones. For safety evaluation of masonry vaults and domes, it is important to understand the surface characteristics in order to predict possible weaknesses.

Keywords: arch, vault, dome, curved surface behavior

Giriş

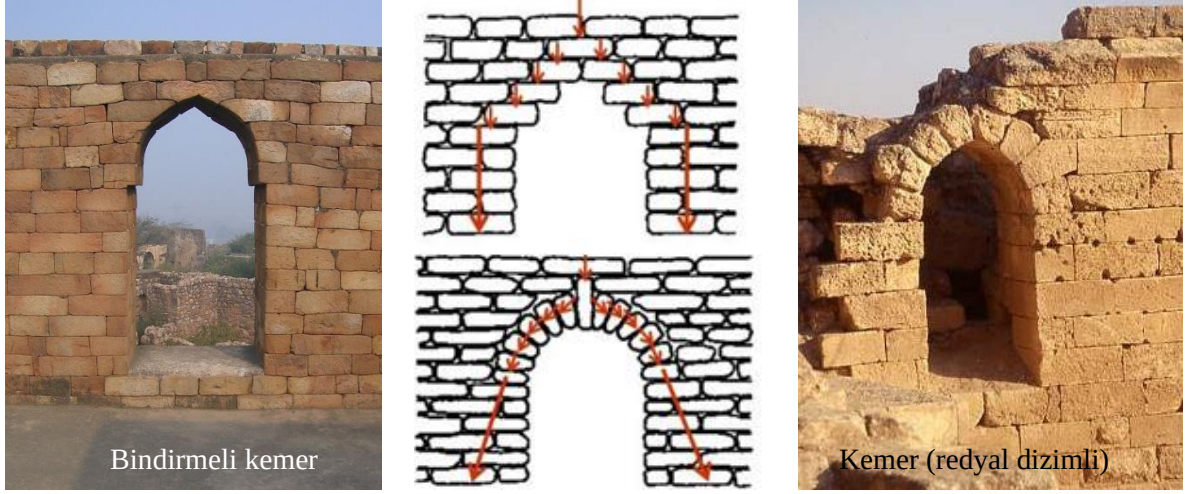
Mimari kültür varlıkları çeşitli yapı malzemesi ve geometri tipolojisi ile yapılmış karmaşık yapılardır. Uzun süre pek çok insan ya da doğa kaynaklı tehlikelere karşı direnerek bugünlere ulaşmış mimari kültür varlıklarının çoğu yığma kagir yapılardır. Kagir yapıları oluşturan taş, tuğla ve kerpiç üniteler basınca dayanıklı, çekme gerilmelerine karşı zayıf malzemelerdir.

Ahşabın az olduğu bölgelerdeki tarihi kagir binalarda, sütun ve ayaklar arasını geçmek, duvarlar arasında boşluk oluşturmak ya da bu elemanlar arasını örtmek için kemerler, tonozlar ve kubbeler yapılmıştır. Bu eğrilikli elemanların örgü şekli ve formları yapısal davranışın anlaşılması açısından önemlidir.

Duvarlarda boşluk açmak için uygulanan eğri formların taş, tuğla ya da kerpiç örgüsü bindirmeli ya da eğri profiline dik (radyal) olarak dizilir. Bindirmeli olarak yapılan açıklıkta yatay sıralanmış kagir birimler birbirleri üzerinden yaklaşık üçte bir taşırılarak oluşturulur. Bu konsol çıkıntılar yontularak açıklığa eğri bir form verilebilir. Bindirmeli olarak yapılan eğri formlar duvar davranışı gösterir (Arun 2006), yani kagir birime etkiyen kuvvetler birimden birime geçerek zemine iletilir. Radyal dizim ile oluşturulmuş eğri formlarda formun geometrisi önemlidir. Burada eğrilığe dik yerleştirilmiş kagir birimler mesnetlerine itki verir.

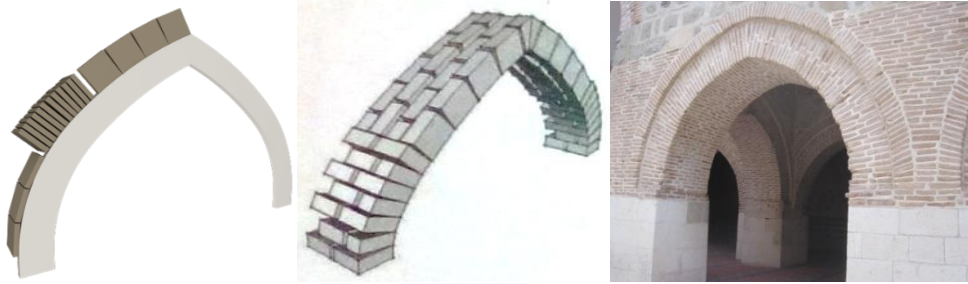
Kemerler

Tüm eğrilikli yüzeyler kemerlerden türetildiği için öncelikle kemeri tanımak önemlidir. Kemerler bindirmeli ya da kemer profiline dik yerleştirilmiş kagir birimlerle oluşturulan tek doğrultulu boşluk oluşturma elemanlarıdır. Bindirmeli olarak yapılan bindirmeli kemer ya da yalancı kemer, radyal dizimle oluşturulana kemer denir (Şekil 1).



Şekil 1. Bindirmeli ve radyal dizimli kemer

Kagir birimleri yatay sıralanmış bindirmeli kemerin birimleri, bir duvar davranışı ile üzerine etkiyen düşey yükleri basınca çalışarak zemine iletir (Feilden, 1983). Radyal dizimle oluşturulmuş kemerin kagir birimleri, etkiyen kuvvetlerin bileşenlerini birbirlerine eğik ilettikleri için, profil eğrilğine bağlı olarak, mesnetlerine eğik itki verir. Bu kemer, etkiyen yükler kemer biriminin çekirdeğinde kaldığı sürece basınca çalışır. Radyal dizimli kemer profili düz, basık, yarım daire, parabol, elips ya da çeşitli geometrilerdeki eğrilerin kesiştirilmesiyle oluşturulmuş karma geometrik formlarda olabilir. Bu kemerlerde kagir birimin örgü şekli (Şekil 2), kemerin mekanik özelliklerini değiştirmez.



Şekil 2. Kemer örgü biçimleri

Profil eğrisi basıklaştıkça kemerdeki basınç kuvvetleri ve kemerin mesnetlerine vereceği itki artar. Kemer formu ne olursa olsun, bu itkinin uygun bir şekilde zemine iletilmesi gerekir. Tarih boyunca yapılan uygulamalarda itkinin zemine iletilmesi için ya mesnetlerde yeterli bir duvar, ya itkinin yatay bileşenini almak için kemer üzengisinde ahşap ya da metal gergiler, ya da kemer üzengisine yakın itkiyi ikiye ayıracak ikinci bir kemer ve hatta bu ikinci kemerin itkisinin yönünü değiştirecek bir ağırlık kulesi yapılmıştır. Kemerler, kagir birimin derinliğine ve birimler arasındaki sürtünmeye bağlı olarak mesnetlerindeki küçük hareketlere uyum sağlayabilir ya da çatlak oluşturarak sönümleyebilir (Feilden, 1983). Bu çatlaklar, içine

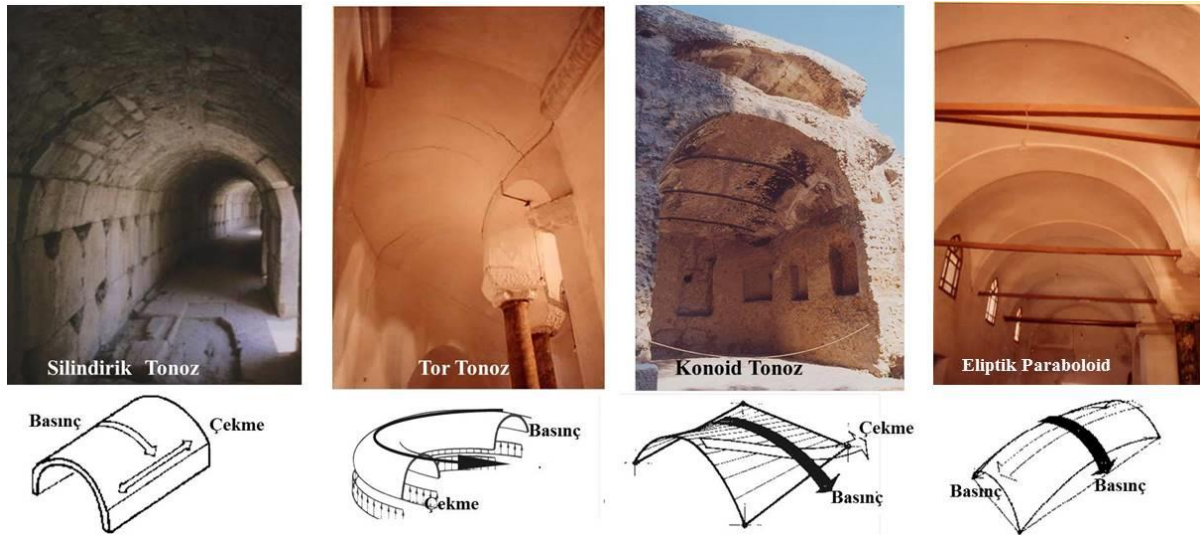
döküntüler dolduracağı için geri dönüştürülemez ve zamanla çatlaklar büyüyebilir. Kemer mesnetlerinde itkiyi karşılayan kuvvetlerin yok olması, kemerin yıkılmasına neden olur.

Tonoz ve Kubbeler

Tonoz ve kubbeler, tek ya da çift eğrilikli yüzeylerdir. Yüzeyi oluşturan, birbirine dik iki asal profil eğrisi ve iki asal gerilme yörüngesi bulunur (Arun, 1983). Kagir tonoz ve kubbelerde de kagir birimler bindirmeli ya da yüzey profiline dik, radyal, dizilerek oluşturulur. Bindirmeli oluşturulmuş eğri yüzeyler, profil geometrisi ne olursa olsun, duvar davranışı gösterir. Yani kagir birimler, etkiyen kuvvetleri birimden birime düşey olarak, mesnetlendiği yapı elemanına ya da zemine iletir. Kagir birimleri radyal düzenlenmiş tonoz ve kubbelerin davranışı geometrilerine bağlıdır.

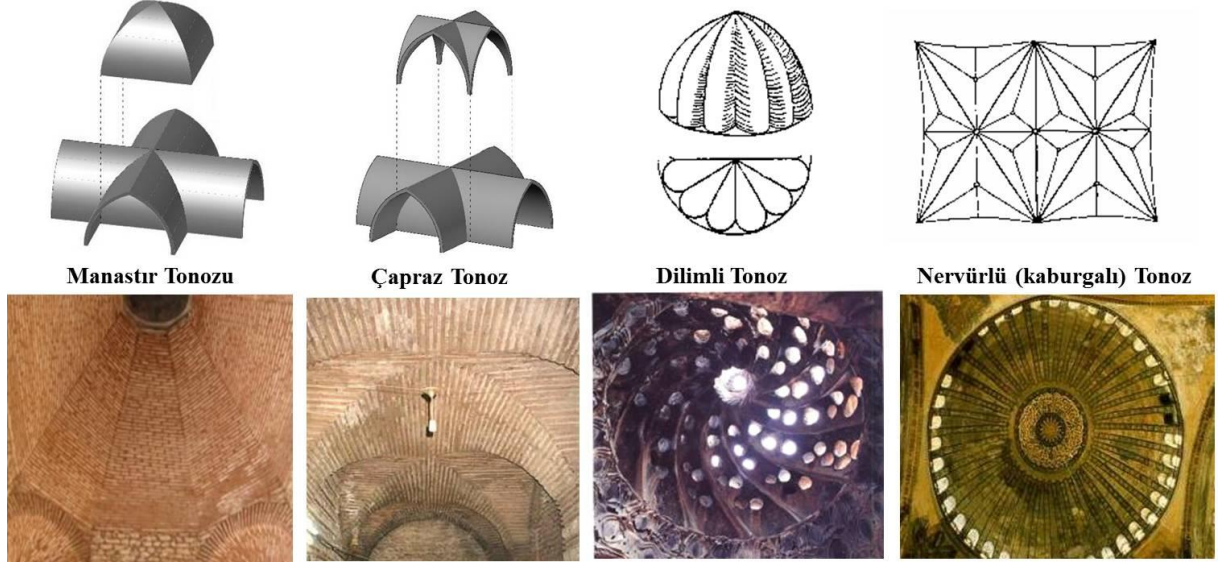
Radyal dizimli tonoz ve kubbelerin geometrilerine bağlı olarak bazılarının asal gerilmeleri çekmeye çalışır. Tarihi kagir yapılarda bünyesinde çekme bulunan yüzeylerin çekme gerilmelerini yok etmek için bu bölgenin duvar malzemesiyle ağırlaştırılması, bindirmeli örgü sistemine dönülmesi ya da yüzeye dik tonoz/kemerler düzenlenmesi ile karşılanmıştır (Arun, 2016).

Radyal dizimde tonoz formları benzer görünse de tonozu oluşturan birbirine dik iki asal profil eğrisi ve iki asal gerilme yörüngesi farklı özellikler gösterebilir. Bir tonoz formu silindirik, konik, tor, konoid veya eliptik paraboloid olabilir (Şekil 3). Eliptik paraboloid yüzeyin iki asal gerilmesi basınç olsa da diğer yüzeylerin her birinin bazı bölgelerinde çekme gerilmesi vardır. Tarihi yapılarda tonoz yüzeyindeki çekme bölgelerinde çekme gerilmesini aktifleştirmeyecek tedbirler alınmıştır. Tonoz uçlarındaki kayma gerilmesi, kemerlerle, tempın duvarlarıyla ya da çeyrek kubbelerle alınmıştır (Arun, 2006).



Şekil 3. Silindirik, Tor, Konoid ve Eliptik paraboloid tonoz

Kareye yakın planlar, tonozların çeşitli şekillerde düzenlenmesiyle örtülebilir. Bu tonozların kesiştirilmesiyle manastır tonozu ya da çapraz tonoz, dönel sıralanmasıyla dilimli tonoz ya da kemerler arasının tonoz ile kapatılmasıyla nervürlü tonoz elde edilir (Şekil 4). Burada kullanılan kısmi tonozlar, alındığı tonoz geometrisi ile aynı çalışır. Aynalı Tonoz, manastır tonozun üst orta kısmının düz kemer döşeme ile kapatılmış şeklidir. Burada manastır tonozunun eğrisel kısmı genellikle bindirmeli yapılıdır.



Şekil 4. Manastır tonozu, Çapraz tonoz, Dilimli tonoz ve Nervürlü tonoz

Kubbe, bir daire, parabol ya da elips yayının bir eksen etrafında döndürülmesiyle oluşturulur. Kubbe tabanı dairedir. Radyal dizimde kubbe çalışması, meridyen ve paraleller doğrultusunda farklıdır (Arun, 1983). Küre kubbenin kendi ağırlığı altında meridyen gerilmeleri basınç, paralel (halka) gerilmeleri tepe kısmı basınç, yataydan $\sim 52^\circ$ altı çekmeye çalışır. Paraboloid kubbenin her iki doğrultudaki gerilmeleri de basınçtır.

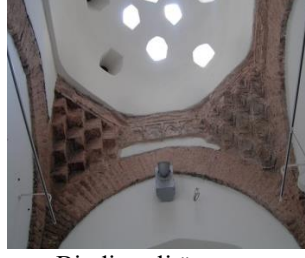
Küre kubbenin düşey düzlemlerle kesilmesiyle pendentif kubbe, yelken tonoz, oluşturulur. Bu tonoz radyal dizimli yarım küre kubbeden üretildiği için tonoz eteklerindeki halka gerilmeleri çekmeye çalışır.

Kubbeler tek ya da çift cidarlı yapılmıştır. Her iki cidar radyal dizimde yapılabildiği gibi bindirmeli ya da biri radyal, diğeri bindirmeli olarak yapılabilir. Radyal dizimli kubbe, geometrisine bağlı olarak çalışır.

Kubbe tabanı daire olduğu için kare planların örtülmesinde, kare planı köşelerine daire kubbe tabanını taşıyacak geçiş elemanları kullanılmıştır. Geçiş elemanları pendentif, bindirmeli üçgen, tromp (tonoz bingi) ve üçgenli kuşak (Türk üçgeni)tır (Arun, 2013). *Pendentif*, radyal dizimli pendentif kubbe (yelken tonoz) tepesinin yatay düzlemle kesilmesiyle oluşturulan üçgen parçadır (Şekil 5). Kagir birimler radyal dizildiği için bu üçgen küre parçasının halka gerilmeleri çekmeye çalışır. Burada çekme gerilmelerini aktifleştirmemek için pendentif arkası kagir birimlerle ağırlştırılır. *Bindirmeli üçgen*, kare plan köşelerinin üçgen şeklinde bindirmeli örülerek kapatılmasıyla oluşturulur. Bu yüzeyin bünyesinde çekme gerilmeleri yoktur. *Tromp (tonoz bingi)*, kare plandan, kubbe tabanına geçişte köşelerde kemerler ve kemerler arasındaki kısmın çeşitli tonozlarla örtülmesiyle oluşturulur. Bu köşe geçişleri “tonoz bingi” olarak adlandırılır. *Üçgenli kuşak (Türk üçgeni)*, kare plandan kubbeye geçişte çeşitli şekillerde bindirmeli prizmatik şekillerle oluşturulan yatay kuşaktır.



Pendantif



Bindirmeli üçgen



Tromp



Üçgenli kuşak

Şekil 5. Kubbe geçiş elemanları

Sonuç

Tarihi kagir yapılarda herhangi bir müdahale öncesinde yapılan hasar teşhisinde ve önerilecek müdahale kararlarında kubbe ve tonozların davranışını anlamak önemlidir.

Tarihi kagir yapıyı oluşturan elemanların geometrisi, yapı davranışını etkiler. Sütun, ayak ve duvarlar arasını örten farklı formdaki kagir yüzeylerin kendine özgü yük aktarış yörüngesi olduğu için bu yüzeyler belirlenmelidir. Hasarlı bir kagir binanın ön araştırması sırasında olası zayıflıkları tahmin etmek için bu formların kuvvet dağılımını anlamak gerekir.

Yapının ve elemanlarının geometrisine ilişkin bilgi, tarihi kagir yapıların analizinde üç boyutlu geometri modellemesinin uygulanmasına da yardımcı olabilir.

Referanslar

Arun G., (1983) Kabuk Geometrisinin İç Kuvvet Dağılımına Etkisi, Doktora tezi, Yıldız Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Feilden B. M., 1983, Conservation of Historic Buildings; Butterworth Scientific, London

Arun. G. (2006) Behavior of Vaults and Domes: Geometrical Considerations, Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi 2006, P.B. Lourenço, P. Roca, C. Modena, S. Agrawal (Eds.), ISBN 972-8692-27-7

Arun, G. (2013) Ancient building masters' design skills in diagnosis phase, Structures and Architecture: Concepts, Applications and Challenges – Cruz (ed) 2013 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-66195-9 (24- 27.07.2013, Guimaraes, İspanya)

Arun, G. (2016) Interpretation of Construction Details in Diagnosing the Failures, International Scientific Conference BASA- Bulgarian Academy of Science and Art Bildiri Kitabı, s.159-166 ISBN: 978-954-8931-50-12

BURSA’NIN GÜNCEL DEPREM ETKİNLİĞİ VE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Şerif Barış¹

¹Prof. Dr., Kocaeli Üniversitesi

Abstract

Turkey is located on one of the most active zones in the world called the Alpine-Himalian tectonic zone. The North Anatolian Fault Zone is located on this active zone and it creating catastrophic earthquakes for thousands of years and it will continue its activity by creating similar large earthquakes in the future. Bursa and Yalova cities are high earthquake risk due to locating on the active tectonic zone and they are faced with many destructive earthquakes for more than thousands of years. Most of the earth scientists expecting the next large earthquake on the western extension of the 1999 Kocaeli rupture after this large event. Bursa and Yalova is located on the western and southwestern extension of the 1999 rupture and there are many active faults have potential to create large earthquake in these regions. The study region has more than 4 million inhabitants, many heavy industrial companies and historical structures. The most important way is to reduce casualties and damages during a large earthquake is to install a robust early warning and rapid response system in the region. In this paper we will explain ongoing seismicity studies and earthquake early warning and rapid response systems in Bursa region.

Keywords: Bursa, seismicity, seismic risk, earthquake early warning system, rapid response

Özet

Ülkemiz, dünyanın deprem açısından oldukça etkin olan Alp-Himalaya aktif tektonik zonunda yer almaktadır. Bu zon üzerinde bulunan Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) binlerce yıldır yıkıcı ve hasar verici depremler üretmekte ve ileride de benzer depremlerle bu etkinliğini sürdürecektir. Bursa ve Yalova illeri bu aktif kuşak üzerinde yer aldıkları için deprem riski yüksek olan illerimizden olup binlerce yıldan fazladır birçok yıkıcı depremle karşı karşıya kalmışlardır. 1999 Kocaeli depreminden sonra yerbilimcilerin büyük çoğunluğu bir sonraki büyük depremi bu kırığın batı yöresinde yer alan bölgelerde beklemektedir. Bursa ve Yalova, 1999 deprem kırığının batısında güneybatı ucunda yer almaktadır ve bu bölgelerde büyük deprem oluşturma potansiyeline sahip birçok aktif fay bulunmaktadır. Bölge halen 4 milyondan fazla insanı ve birçok ağır sanayi/fabrika ve tarihi yapıları barındırmaktadır. Deprem zararlarını azaltmanın en önemli yolu bölgenin mikro deprem etkinliğinin sürekli izlenmesi ve olası bir yıkıcı deprem sırasında olası zarar ve can kayıplarını azaltacak bir deprem acil uyarı ve müdahale ve müdahale sisteminin kurulmasıdır. Bu çalışma Bursa’da sürdürülen depremsellik deprem acil uyarı ve müdahale sistemleri çalışmalarına değinilecektir.

Anahtar Kelimeler: Bursa, depremsellik, deprem riski, deprem erken uyarı sistemi, acil müdahale

Bursa’nın Tektonik Yapısı

Ülkemizin Alp-Himalaya aktif tektonik kuşağında bulunması nedeniyle gerek tarihi dönemlerde gerekse son 121 yılda ülkemizin birçok bölgesinde hasar yapıcı ve yıkıcı depremler

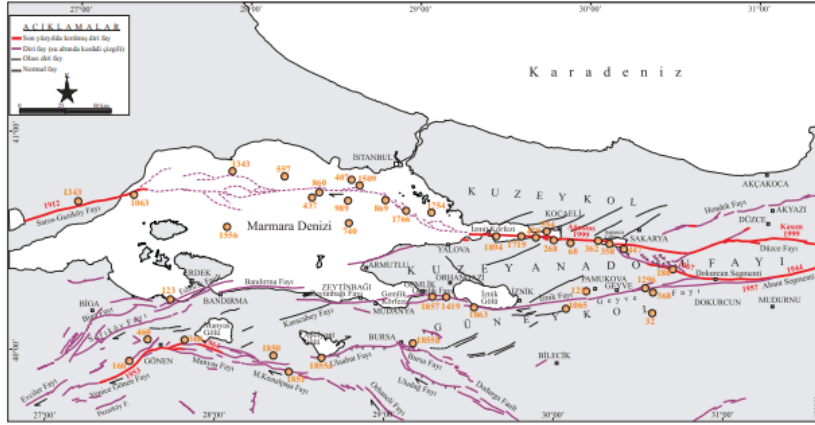
meydana gelmiş ve yaklaşık son yüzyılda her yıl ortalama 900 vatandaşımızın ölümüne ve milyonlarca dolarlık ekonomik kayıplara yol açmıştır. Marmara Bölgesi, Türkiye'nin kuzey batısında, ülkemiz ekonomisine önemli ölçüde katkı sağlayan, tarihi ve kültürel yapılar bakımından çok zengin ve demografik açıdan önemli yere sahip illerimizi sınırları içerisinde bulundurmaktadır. Bursa ili, Marmara Bölgesi'nin güneybatısında yer alır ve toprakları üzerinde bulundurduğu çok sayıda sanayi kuruluşu ile gerek üretim ve gerekse istihdam bakımından önemli bir yere sahiptir. Bunun yanında Anadolu'nun çeşitli uygarlıklarına tanıklık etmiş, Osmanlı Devleti'nin ilk başkenti olma özelliğine sahip olan Bursa, geçmişten günümüze ulaşan çok sayıda tarihi yapı ile de kültür turizmi açısından büyük öneme sahip illerimiz arasındadır.

Kuzey Anadolu Fayı yaklaşık 1500 km uzunluğunda, tek bir hat değil, bir fay sistemi halinde çok sayıda kırıktan oluşmaktadır. Bu sistem, Marmara bölgesi içinde, Mudurnu/Bolu civarında kuzey ve güney olmak üzere iki ana kola ayrılmaktadır. Bursa İli kuzeyinden geçen güney kol, Geyve, İzmit ve Gemlik olmak üzere üç ana fay segmentinden oluşur (Özalp ve diğ., 2013). Genişliği bazı bölgelerde 50 km'ye kadar ulaşan Kuzey Anadolu Fayı üzerinde tarih boyunca irili ufaklı çok sayıda deprem yaşanmıştır (Ambraseys, 1988, 2002; Ambraseys ve Finkel, 1991). Marmara Bölgesi'nin depremselliği bu iki fay ile önemli ölçüde ilişkilidir. Kuzey kol tarihsel ve aletsel dönemde çok sayıda yıkıcı deprem üretmiştir. Bunlardan önemli ikisi Marmara Bölgesi'nde 1999 yılında yaşanan 17 Ağustos Kocaeli ($M_w=7.4$) ve 12 Kasım Düzce ($M_w=7.2$) depremleridir. Her iki deprem de çok sayıda can kaybına neden olmuş, ülke ekonomisi önemli ölçüde etkilenmiştir. Deprem zararlarının azaltılması, afet yönetimi, erken uyarı sistemlerinin gelişmesi gibi pek çok konuda milat olarak kabul edilen bu depremlerin ardından olumsuz etkilerinin giderilmesine yönelik çalışmalar sosyal, ekonomik, yeniden yapılanma gibi pek çok alanda halen devam etmektedir. Kuzey Anadolu Fayı'nın batı ucunda yaşanan bu iki deprem sonrasında Marmara Denizi ve çevresinde deprem tehlikesinin arttığına yönelik görüşler de bulunmaktadır (Stein vd., 1996; Persons vd., 2000; Erdik vd., 2004).

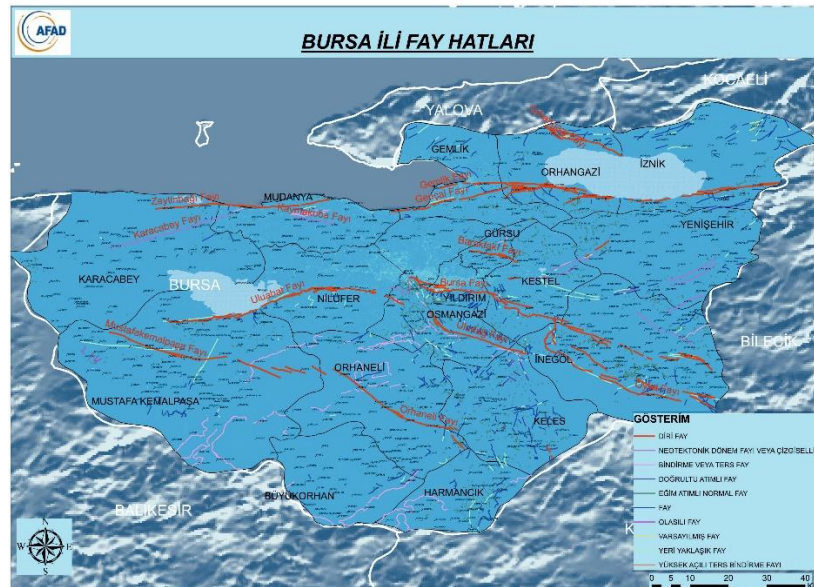
Kuzey kol kadar olmasa da Bursa'nın kuzeyinden geçen güney kol üzerinde de büyük depremlerin yaşandığı bilinmektedir (Ambraseys ve Finkel, 1991; Ambraseys ve Jackson, 2000; Ambraseys, 2002). Bazı çalışmalarda güney kol üzerinde $M>7$ büyüklüğündeki depremin tekrarlama periyodunun 600-1000 yıl olduğu ileri sürülmektedir (Utkucu vd., 2011). Bunun yanında 1999 depremleri sonrasında güney kol üzerindeki deprem tehlikesinin arttığını ortaya koyan çalışmalar da bulunmaktadır (Langridge vd., 2002). Özalp vd., 2013 tarafından yapılan çalışmada Gemlik segmenti üzerinde yapılan hendek çalışmaları ile tarihsel depremler ile paleosismolojik veriler karşılaştırılmış, güney kolun tehlikesi ortaya konulmuştur. Bursa ilini de içine alan Marmara bölgesindeki diri fayların ve bu faylar üzerinde son iki bin yılda meydana gelmiş büyük depremlerin ($M_s>6.8$) dışmerkez dağılımları Şekil 1'de gösterilmiştir.

Şekil 1'de görüldüğü gibi, Bursa'nın yer aldığı Marmara Bölgesi'nde irili ufaklı aktif faylar bulunmaktadır. 1800'lü yılların ortalarında güneyde Ulubat fayı, Bursa Fayı, M. Kemalpaşa Fayı ve kuzeydoğuda Gemlik Fayı üzerinde meydana gelen depremler Bursa'nın tarihsel dönem deprem etkinliğini önemli ölçüde tanımlamaktadır.

Bursa ili her an orta ve büyük deprem üretecek birçok aktif fay barındırmaktadır. Yapılan birçok araştırma 1999 depremlerinden sonra bu bölgenin deprem riskinin arttığını göstermiş olup yapılan deprem riski çalışmalarında da düşük b değeri ve önümüzdeki 50 yıllık dönemde aletsel büyüklüğü 7,0 ve daha büyük bir depremin olma olasılığının %80 olduğu gösterilmiştir (Sayıl ve Osmanşahin, 2005; Barış, Ş., 2015). Şekil 2'de Bursa ili ve çevresinde hasar yapıcı büyüklükte deprem üretebilecek aktif fay haritası verilmektedir.



Şekil 1. Marmara Bölgesi’ndeki aktif faylar ve bu faylar üzerinde son 2000 yılda meydana gelen ($M > 6.8$) depremlerin dışmerkez dağılımları (Özalp ve diğ., 2013’den alınmıştır).



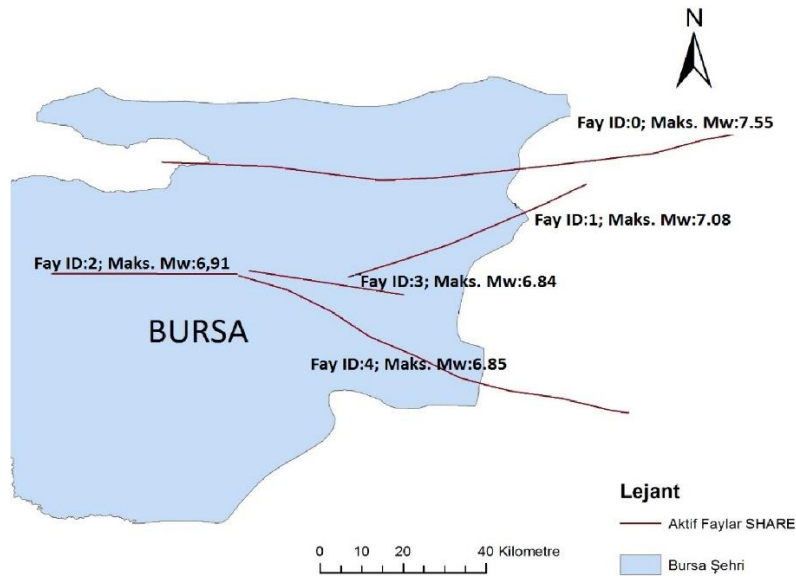
Şekil 2. Bursa ilinde bulunan aktif fay dağılım haritası (AFAD Bursa İl Müdürlüğü, 2013)

Bursa'nın içinde ve etrafında büyük deprem potansiyeli yüksek olan Kuzey Anadolu Fay Zonu'na ait birçok segment yer almaktadır. Bu fay segmentleri tarihsel dönemlerde büyük depremler üretmiş ve ileride de hasara yapıcı depremler üretecek potansiyelleri vardır. Örneğin İznik defalarca bu depremlere maruz kalmış olup tarihi birçok kayıta bu depremlere ait hasar ve ölüm bilgileri bulunmaktadır. Benzer şekilde Bursa 1855 tarihinde 2 yıkıcı depreme maruz kalmış ve kent çok ağır hasar görmüştür. Günümüz deprem potansiyeline bakıldığında bu bölgede yer alan fayların yıkıcı depremler üretebilecek büyüklüklere ve yıllık gerilme birikim değerlerine sahip olduğu birçok bilimsel araştırma tarafından saptanmıştır.

Bursa ilinde bulunan aktif fayların deprem üretme potansiyelleri incelendiğinde bir AB projesi (SHARE, 2013) kapsamında yapılan bir çalışmada il merkezini etkileyecek 5 farklı fayın kırılma olasılığının bulunduğu ve bu fayların 6,8 ile 7,6 büyüklüğünde depremler üretebileceği tespit edilmiştir. Bu faylar ve olası en yüksek deprem büyüklükleri Şekil 3'te gösterilmektedir. Şekil 3'te hesaplanan büyüklükteki depremler oldukça yıkıcı depremler olarak sınıflandırılmaktadır ve bu depremlerin herhangi birinin gerçekleşmesi durumunda il genelinde oldukça fazla ekonomik kayıp oluşturan ağır hasar ve oldukça fazla can kaybının olması

beklenmektedir. Örneğin şekilde yer alan Eskişehir-İnegöl Fayı Bursa şehrinden geçmekte olan bir fay olup bu fay üzerinde 6.85 büyüklüğünde yıkıcı bir deprem olması muhtemeldir. Bu ve benzer çalışmalara göre Bursa şehrini ve Bursalıları etkileyecek en büyük deprem İznik-Gemlik hattında bulunan fayların aynı anda kırılması ile sonuçlanacak bir deprem olup hesaplanan en büyük aletsel büyüklük ise 7.55 olarak belirlenmiştir. Bu faylardan herhangi birinin önümüzdeki yüzyıl içerisinde deprem üretme riski ise oldukça yüksektir.

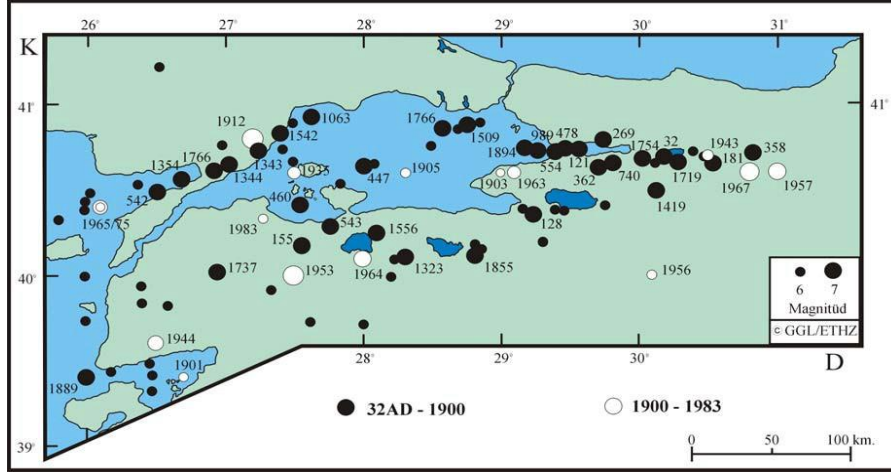
Bunun yanında Bursa'nın kuzeyinde, Kuzey Anadolu Fayı'nın kuzey ve güney kolları arasındaki Armutlu Yarımadası üzerinde çok sayıda kırık sistemi bulundurmasına rağmen bu bölge bir süredir sismik olarak suskun bir dönem içerisinde. Bunun yanında 1999 depremleri sonrasında Armutlu Yarımadası'nda mikro deprem aktivitesinde artış olduğu gözlenmiştir. Yarımada, üzerinde bulundurduğu, sıcaklıkları 38.0-83,0 arasında değişen jeotermal alanları ile de önemli bir yere sahiptir. (Tunç ve diğ., 2011).



Şekil 3: Bursa aktif fay haritası ve oluşabilecek bir depremde beklenen en büyük aletsel büyüklükler (SHARE Projesi, 2013).

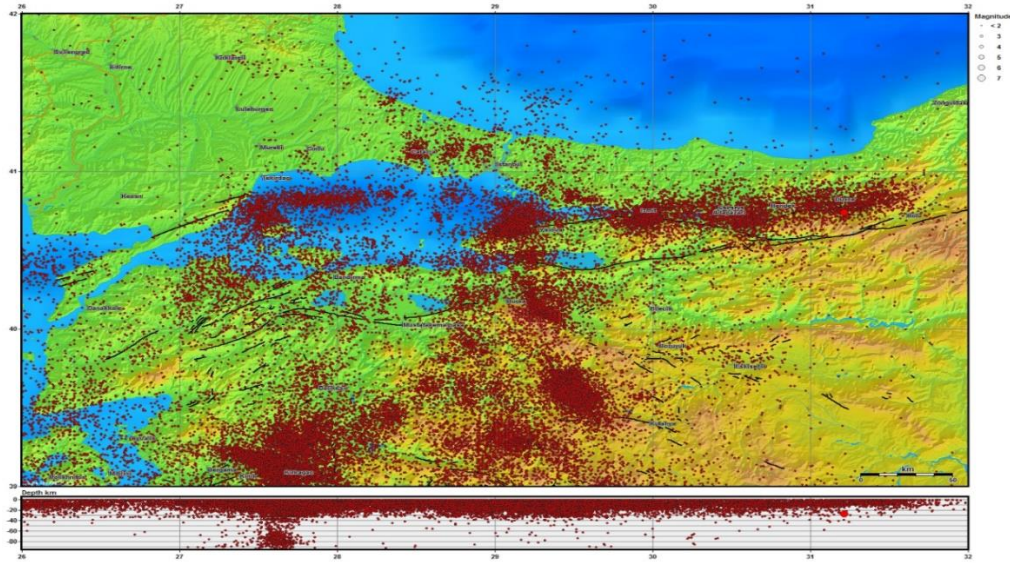
Bursa'nın Deprem Etkinliği

Tarihsel dönemlerde Bursa ve Armutlu Yarımadası kuzeyi ve güneyinde çok sayıda deprem yaşanmıştır (Şekil 4). Geçmişte olduğu gibi Armutlu Yarımadası ve çevresinde yaşanacak depremler de Bursa'yı etkileyerek şehirde çeşitli ölçeklerde hasara neden olabilecektir. Nitekim 30 Kasım 2018 tarihinde Armutlu yarımadasında aletsel büyüklüğü 4.3 olan bir deprem olmuş ve bölgenin halen süregiden deprem üretme potansiyelinin bir işareti olarak basında geniş yer almıştır. Bursa tarihsel dönemlerde birçok yıkıcı büyük depreme sahip olmuş ve halen depremler olmaya devam etmektedir. Doğa kanunu gereği bir yerde deprem olduysa mutlaka bu depremler tekrar edecektir. Aşağıdaki Şekil 4 ile gösterilen haritada Bursa ve civarında olan milattan öncesi ile 1983 yılları arasındaki dönemde oluşan hasar yapıcı tüm deprem dağılımları gösterilmektedir (Erdik ve diğ., 2004). Siyah daireler tarihsel dönem deprem etkinliğini, beyaz daireler ise aletsel dönem depremlerini göstermektedir. Bu harita Bursa'nın ve yakın çevresinin çok önemli depremler ile karşı karşıya kaldığının önemli bir göstergesidir.

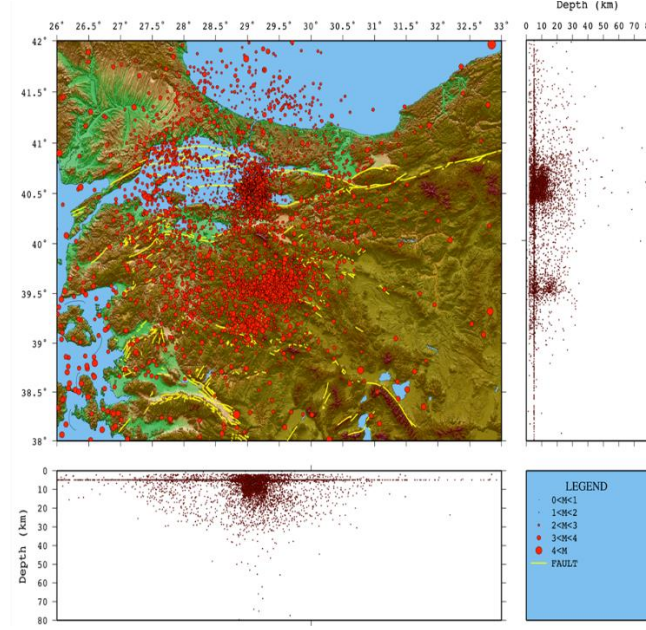


Şekil 4. Marmara Bölgesinin Deprem Tehlikesi ve meydana gelen büyük depremler (Erdik ve diğ., 2004)

Bursa'nın aletsel dönem deprem etkinliği ise aşağıdaki Şekil 5 ve 6 ile verilen iki farklı haritada gösterilmektedir. Bu haritalardan ilki 1900-2017 yılları arasında Bursa ve yakın çevresinde olmuş BU KOERI'nce kaydedilmiş tüm depremleri gösterirken, ikinci harita ise 2006-2017 yılları arasında KOU YUBAM tarafından Bursa-Yalova ve civarında işletilen deprem ağından elde edilmiş deprem dağılımlarını göstermektedir. Haritalarda yer alan her kırmızı nokta olmuş bir depremi göstermektedir. Haritalarda yer alan siyah ve sarı çizgiler ise büyük depremlerde oluşan deprem üreten aktif fay izlerini temsil etmektedir. Her iki haritada da görüleceği üzere Bursa ve yakın çevresi depremsellik açısından oldukça etkin bir bölgede yer almakta olup, 1999 depremlerinden sonra deprem etkinliğinin Kocaeli'nin batısında arttığını göstermektedir.



Şekil 5. Marmara Bölgesinin güncel deprem etkinliği (1900-2017, BU KOERI kayıtları kullanılmıştır).



Şekil 6. Marmara Bölgesinin son dönem deprem etkinliği (2006-2021, KOU YUBAM kayıtları)

Bursa'nın Deprem Riski

AFAD tarafından 2018 yılında yayımlanan “Türkiye Deprem Tehlike Haritası” verilerine göre, aktif fayları geçtiği bölgeler ve yakın civarları yüksek ivme değerlerine sahip tehlikeli alanlar olarak tanımlanmıştır. Bu haritanın verilerine göre de Bursa ili ve yakın çevresi bahsi geçen yüksek tehlike altında tanımlanmıştır. Üzerinde bulundurduğu sanayi kuruluşları, üretim tesisleri ve nüfus yoğunluğu da dikkate alındığında Bursa’da veya çevresinde yaşanacak bir depremin kent üzerinde etkisi çok yüksek olacaktır.

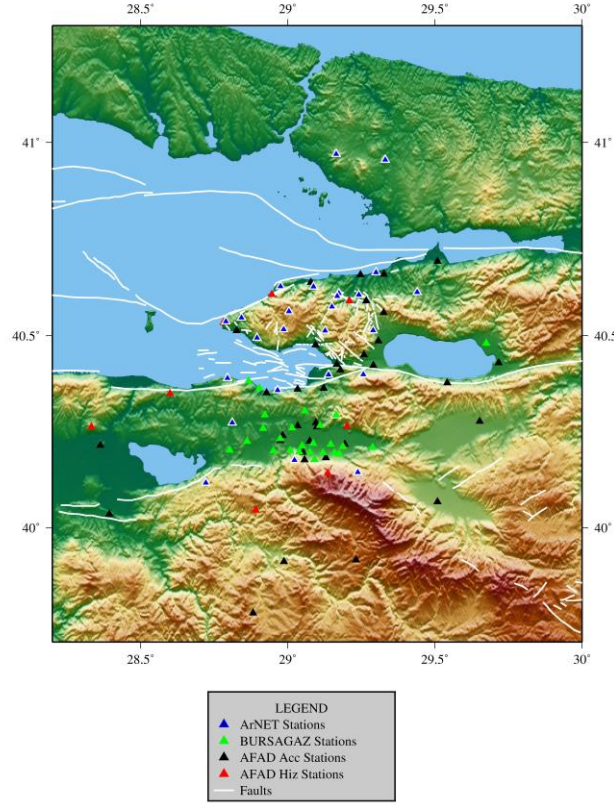
Yapılan çalışmalarda İznik ve Gemlik fayları üzerinde en son meydana gelen depremlerin yaklaşık 400 yıl önce olması, 17 Ağustos 1999 depreminin batısında bulunan bölgelerde ise açığa çıkan gerilmenin bir bölümün transfer edilmesi bölgedeki gerilme birikimini arttırmış olup, bu da olabilecek bir depremin riskini artırmıştır. 1900-2012 yılları arasında oluşan tüm depremler dikkate alınarak yapılan, aletsel büyüklüğe bağlı deprem riski hesabına göre Bursa’daki olasılıklar (Barış, Ş, 2008; Yalçın ve diğ., 2014) aşağıdadır:

- ✦ 6,0 olan bir depremin 10 yıl içinde olma olasılığı %85
- ✦ 6,5 büyüklüğünde bir depremin 30 yıl içerisinde olma olasılığı %90
- ✦ 7,0 büyüklüğünde bir depremin 50 yıl içerisinde olma olasılığı ise %80
- ✦ 7,5 olan bir depremin önümüzdeki yüzyıl içerisinde olma olasılığı ise %65

Bursa'nın Deprem Acil Uyarı ve Müdahale Sistem Kurulumu

Bursa, Yalova ve yakın çevresinin deprem oluş düzenlerini, güncel deprem etkinliğini ve deprem riskini belirleyebilmek, oluşabilecek büyük bir deprem öncesi mikrodprem oluş düzenlerini tanımlamak ve büyük depremlerin bölgenin hidrotermal potansiyeli ile olan ilişkisini izlemek üzere tarafımızdan sık istasyonlardan oluşan bir ağ orta Marmara’yı izleyecek şekilde kurgulanmış ve 27 adet hız ve 6 adet ivmeölçer istasyonundan oluşan bir ağa dönüştürülmüştür. Bursa ve civarının deprem etkinliğinin izlenmesi 2006 yılından beri

sürdürülmektedir. Bu çalışmaların diğer bir amacı bölgede olası büyük bir deprem öncesi deprem oluş düzenlerini anlamak, olası bir deprem öncesi olası öncül belirtileri yakalamak ve depremlerle jeotermal sistem arasında olası bir tetikleme mekanizmasını ortaya çıkarmak hedeflenmiştir. Bu çalışmalar sürdürülürken olası bir yıkıcı deprem sırasında devreye girecek ve depremin olumsuz etkilerini azaltacak bir deprem erken uyarı ve acil müdahale sistemine dönüştürülerek halen her türlü bilimsel veri toplamaya devam etmektedir. Deprem izlemek ve acil uyarı sinyali oluşturmak amacıyla birleştirilen deprem ağıımız Şekil 7’de gösterilmektedir (Barış ve diğ., 2017, Tunç ve diğ., 2017).



Şekil 7. AFAD, Bursagaz ve YUBAM ağına ait birleştirilmiş istasyonların dağılım haritası

Depremlerin zararlarını azaltmanın yegâne yolu her türlü depremsellik etütlerini yaparken bölge için bir erken uyarı sistem ve acil müdahale sistemi kurularak olası can ve mal kayıplarını en aza indirmek için altyapı oluşturulmaya çalışılmıştır. Benzer şekilde Bursagaz için kurulan ivmeölçer ağı hem firmanın ana doğalgaz regülatörlerindeki vanaları hasar yapıcı bir deprem anında şehre verilecek doğalgazı kesmek, hem de bölgede kurulacak bir erken uyarı sistemine çekirdek oluşturmak amacıyla planlanmış ve 2017 yılında bu iki ağ entegre edilerek tek bir donanım ve yazılım altında birleştirilmiştir. Bu proje kapsamında Bursa ve Yalova illerini kapsayacak olan erken uyarı ve acil müdahale sistemi bu iki ağı kapsamakla birlikte projenin diğer bir ortağı olan AFAD’ın Marmara Bölgesi ve Kuzey Ege’de işlettiği tüm istasyonlar sisteme entegre edilerek bölgede işlettiği tüm ivmeölçer ve hız ölçer istasyonlarının da aynı ağ ve yazılım altında toplanmıştır. Bu sayede deprem erken uyarı sistemimizin alet sayısı toplam 150’ye ulaşmıştır. Halen Kaliforniya’da da kullanılan EPIC (eski adı Elarms) (Allen ve Kanamori, 2003; Allen ve diğ., 2009) Deprem erken uyarı algoritması Bursa için işletilmekte ve bu yazılımın bölgeye özgü parametrelerle test edilmesi çalışması sürdürülmektedir.

Halen deprem erken uyarı sistemi batı Anadolu'da olan tüm depremleri kaydetmekte, depremlerin yeri ve büyüklüğünü otomatik olarak şekilde belirleyerek her bir deprem için alarm sinyali oluşturarak belirli karar algoritmalarına göre çıkış sinyali oluşturmaktadır. Sistem ayrıca her gün büyük bir test depremi ile test edilerek çalıştırılmaktadır. Nisan 2022'de bu sistem Ankara AFAD Deprem Daire Başkanlığına taşınarak sistemin test çalışması buradan yürütülecek ve Eylül 2022'de sistem devreye alınmış olacaktır.

Referanslar

AFAD, (2013) Bursa İli Fay Haritası.

Allen, RM, Kanamori, H. (2003) The potential for earthquake early warning in southern California. Science, 300, 786-789.

Allen, RM, Gasparini, P., Kamigaichi, O., Böse, M., (2009) The Status of Earthquake Early Warning around the Worlds: An Introductory Overview. Seism. Res. Lett., 80 (5), 682-693, doi:10.1785/gssrl.80.5.682.

Ambraseys, NN, Finkel, CF (1991) Long-term seismicity of Istanbul and the Marmara region. Eng. Seism. Earthq., Report 91/8, Imperial College.

Ambraseys, NN, Jackson JA. (2000) Seismicity of the Sea of Marmara (Turkey) since 1500. Geophys. J. Int., 141, F1-F6, (2000).

Ambraseys, NN. (2002) The seismic activity of the Marmara Sea region during the last 2000 years. BSSA, 92, 1-18.

Ambraseys, NN. (1988) Engineering seismology. Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics 17, 1-105.

Barış, Ş., Tunç, S., Kaman, G., Bozkurt, O., Çaka, O., Tunç, B., Woith, H., Lühr, B., (2017) Automatic Shutdown System in Gas Regulators for Real-Time Seismic Risk Reduction of a Populated City: Bursa, Turkey. JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Japonya.

Barış, Ş. (2015) Earthquakes and Fault structure of Turkey. Third World Conference on Disaster Risk Reduction, Sendai, Japonya.

Barış, Ş. (2008) Yalova ve Marmara'nın güncel deprem riski, I. Ulusal Yalova Afet Yönetimi Eğitimi.

Erdik, M., Demircioglu, M., Sesetyan, K., Durukal, E., Siyahi, B. (2004) Earthquake Hazard in Marmara Region, Turkey. Soil Dyn. and Earthq. Eng., 24, 605-631.

Erdik, M., Fahjan, Y., Ozel, O., Alcik, H., Mert, A., Gul, M. (2003) Istanbul Earthquake Rapid Response and the Early Warning System", Bull. of Earthq. Eng., 1, 157-163.

Langridge, RM, Stenner, HD., Fumal, TE., Christofferson, SA, Rockwell, TK, Hartleb, RD, Bachhuber, J., Barka, AA. (2002) Geometry, slip distribution, and kinematics of surface

rupture on the Sakarya fault segment during the 17 August 1999 İzmit earthquake, Turkey. Bull. Seism. Soc. Am., 92, 1, 107–125.

Özalp S., Emre E., Doğan A. (2013) Paleosismolojik bulgular ışığında Orhaneli Fayının Holosen aktivitesi, Bursa, KB Anadolu. Maden Tetkik Arama Dergisi, 147:1-17.

Parsons, T., Toda, S., Stein, RS, Barka, A., Dieterich, JH. (2000) “Heightened Odds of Large Earthquakes Near Istanbul: An Interaction-Based Probability Calculation”, Science, 288, 661-665, (2000).

Sayıl, N., Osmaşahin, İ. (2005) Marmara Bölgesinin Depremselliğinin İncelenmesi. Bildiri Kitabı, 2005 Kocaeli Deprem Sempozyumu.

SHARE Projesi (2013) Aktif Faylar ve Maksimum Deprem Büyüklükleri (SHARE) - <http://www.share-eu.org/>

Stein, R.S., Dieterich, J.H., Barka, A.A (1996) Role of stress triggering in earthquake migration on the North Anatolian Fault. Phys. Chem. Earth, 21 (4), 225- 230.

Utkucu, M., Budakoğlu, E., Durmuş, H. (2011) Marmara Bölgesinde (KB Türkiye) Depremsellik ve Deprem Tehlikesi Üzerine Bir Tartışma. Yerbilimleri, 32 (3), 187-211.

Yalçın, H., Barış, Ş., Gülen, L. (2014) Çeşitli sismik ağ verileri kullanılarak Marmara bölgesi ve civarının güncel depremsellik durumu. Aktif Tektonik Araştırma Grubu Çalıştayı. ATAG 18.

BURSA İLİNDE TARİHİ CAMİLERİN YER ALDIĞI HANLAR BÖLGESİ YEREL ZEMİN KOŞULLARI

Recep İyisan^{1*}, M. Emre Haşal², Merve Akbaş³

¹*Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geoteknik Birimi*

²*Dr., Bursa Büyükşehir Belediyesi, Etüd Proje Şube Müdürlüğü*

³*Araş. Gör., İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geoteknik Birimi*

**Sorumlu yazar, iyisan@itu.edu.tr*

Abstract

Many of the historical monuments belonging to the early Ottoman period in the city of Bursa are located in the Khans district. These structures consist of inns, caravanserais, baths and mosques. The prevailing foundation soil in the Khans district is composed of quaternary aged alluvial fan deposit with thickness varying between 50-75 m. This layer, which consists of block containing silty gravel, is also termed as alluvial cone. Many historical mosques in the near vicinity of Khans district, especially the Ulu Mosque, are located on this formation. SPT N values within this deposit generally reach the refusal value and average shear wave velocity, V_{s-30} , varies between 360~450 m/s. Considering the limited number of geotechnical borehole data and seismic studies, the local soil class can be determined as ZC. This soil layer has the characteristics of being a suitable foundation ground in terms of both bearing capacity and settlement terms.

Keywords: Bursa, Historical Mosques, Seismicity, Local Soil Conditions.

Anahtar Kelimeler: Bursa, Tarihi Camiler, Depremsellik, Yerel Zemin Koşulları.

Giriş

Çok eski bir tarihe sahip olan Bursa şehri, 1326 yılında Osmanlı hâkimiyeti altına girmiş, devletin ilk başkenti olmuştur. Osmanlı döneminde Bursa şehrinde cami, medrese, türbe, han ve hamam gibi birçok eser inşa edilmiştir. Bu eserler meydana gelen yangın ve depremlerde büyük ölçüde zarar görmüş, yapılan onarımlarla varlıklarını günümüze kadar devam ettirmişlerdir. Sahip olduğu tarihi ve kültürel dokusuyla birlikte ele alındığında Bursa gerek bölge gerekse ülke için önemli bir merkez olma özelliğini asırlardan beri korumaktadır. Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın Güney Marmara kolunun kapsadığı alan içerisinde kalan Bursa ve yakın çevresinde meydana gelmiş önceki tarihsel depremlerin il merkezindeki yapıları etkilemiş olduğu bilinmektedir. Günümüze en yakın yıkıcı depremler 1855 yılında yaklaşık iki ay arayla olmuştur. Geliştirilmiş Mercalli Ölçeğine göre IX ve X şiddetindeki bu iki deprem, yerleşim yerlerine ve tarihi eserlere önceki tarihi kayıtlardaki hasar oranlarına göre çok daha fazla zarar vermiştir. Bu depremlerde en fazla hasara uğrayan eserler arasında Ulu Cami de yer almış; caminin doğu minaresi şerefe, batı minaresi ise küp (pabuç) seviyesinden yıkılmış, yirmi kubbeli caminin mihrap önü kubbesi ile diğer kubbelerinde çatlaklar ve hasar oluşmuştur. Şehrin 1855 depremi sonrasında yaklaşık 165 yıldır yıkıcı bir depreme maruz kalmaması bölgenin sismik boşluklar içerdiği anlamına gelmekte, bu durum da gelecekteki büyük depremlerin merkez üssünün şehre yakın olabileceğine işaret etmektedir.

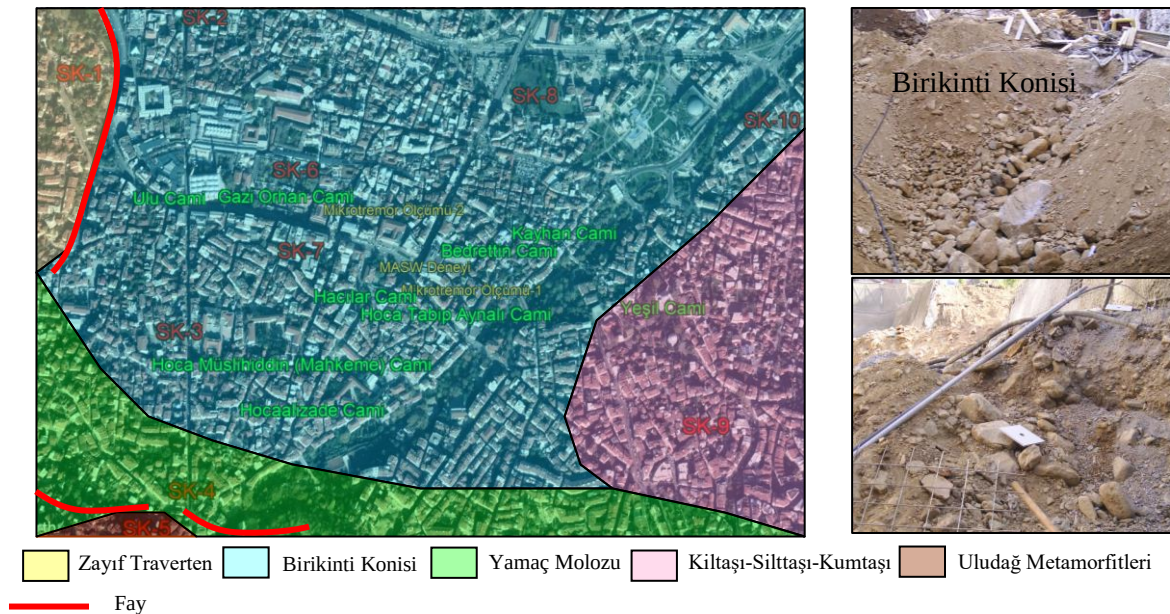
Tablo 1. Tarihsel ve aletsel dönemlerde R=75 km yarıçaplı daire içinde oluşmuş depremler
(<https://depem.afad.gov.tr/depemkatalogu> 2021)

Tarihsel Dönem					
Deprem Şiddeti (I ₀)		IX		X	
Hesaplanmış Büyüklük, M		7.0		7.6	
Tekrar Sayısı		7		3	
Aletsel Dönem					
Büyüklük	4.1≤M≤4.6	4.7≤M≤5.2	5.3≤M≤5.8	5.9≤M≤6.4	6.5≤M≤7
Tekrar Sayısı	72	22	10	3	1

Yerel Zemin Koşulları

Tarihi yapıların yer aldığı Hanlar Bölgesi'nde zemin kesitinde yer alan tabakaların cinslerini, kalınlıklarını ve mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla özellikle yapılmış bir geoteknik inceleme bulunmamaktadır. Yeni yapılaşmanın kısıtlı olması, zemin koşullarının zemin araştırma sondajı yapılmasını güçleştirmesi ve sahada daha önce yapılmış zemin etüt çalışmalarında gözlem çukuru açılmasının tercih edilmiş olması dolayısıyla Hanlar Bölgesi ve çevresinde yapılmış zemin etüdü sondajlarının sayısı son derece sınırlıdır. Bununla birlikte, kamu veya özel kuruluşlarca değişik amaçlarla düzenlenen önceki çalışmalar kapsamında yapılmış arazi deneyleri, yayınlar ve raporların derlenmesiyle yerel zemin koşulları belirlenmeye çalışılmıştır.

Yapılmış çalışmalardan, tarihi camilerin yer aldığı bölgenin genelde Kuvaterner yaşlı alüvyon yelpaze çökeli olduğu yani sellerde yüksek enerjili akışlarla Uludağ'dan taşınmış blok içerikli kaba daneli alüvyondan oluştuğu anlaşılmaktadır. Bu formasyona birikinti konisi ismi de verilmektedir. İçinde yer yer kaya parçaları da gözlenebilen bu birim genellikle blok içerikli siltli çakıl olarak nitelendirilmektedir. Sahadaki birikinti konisinin kalınlığının 50~75 m arasında değiştiği belirtilmektedir. SPT-N darbe sayıları yüzeye yakın derinliklerden itibaren refü (>50) değerine ulaşmaktadır. Tarihi Camiler bölgesindeki yerel jeoloji ve zemin koşulları Şekil 3'te gösterilmiştir. Ulucami ve Atatürk Caddesi çevresinde yapılan sismik deneylerden ortalama kayma dalgası hızının $V_{s-30}=360\sim450$ m/s arasında değiştiği belirlenmiştir. Yapılan tekil mikrotremor ölçümlerinden zemin hakim periyodu yaklaşık $T=0.2$ s ve zemin büyütmesi $A_g=1.7$ olarak elde edilmiştir. Sahada sondaj derinlikleri içinde yer altı suyu gözlenmemiştir.



Şekil 3. Tarihi Camiler bölgesinde yerel jeoloji ve zemin koşulları

Ulucami, Orhan Cami, Mahkeme Cami, Kayhan Cami vb. tarihi camilerin büyük kısmı Kuvaterner yaşlı alüvyon yelpaze çökeli üstünde yer almaktadır. Uludağ yamaçlarının dibine yaklaşıldığında topoğrafik eğimin de artmasıyla birikinti konisi yerini yamaç molozuna bırakmaktadır. Hanlar Bölgesi'nin batısında kalan Hisar bölgesinde Kuvaterner yaşlı traverten birim Tophane yamaçlarından yaklaşık $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ eğimle dalım yapmakta ve taban kısmında gözlemlendiği mostradan hemen sonra çok kalın birikinti konisi başlamaktadır. Formasyondaki bu ani değişim fay hattının varlığına işaret olarak değerlendirilmektedir. Gökdere'nin doğusunda kalan Yeşil Cami tarafında ise Neojen döneme ait kilitaşı-silttaşı-kumtaşı birimler ve bunlara ait rezidüel zeminler gözlenmektedir. Gerek kısıtlı sayıdaki sondaj verileri gerekse sismik çalışmalar dikkate alındığında söz konusu formasyonların hepsinin ZC yerel zemin sınıfına sahip olduğu öngörülebilecektir. Ancak, traverten oluşumun yamaç molozuyla dokanak oluşturduğu fay kısımlarında, bölgedeki fayların üstünde yer alan yamaç molozu birimlerin bazı kısımlarında ve formasyon geçişlerinin olduğu bazı bölümlerde ince daneli çökeller yer alabilmekte, bu durum da yerel zemin sınıfının değişmesine sebep olabilmektedir.

Sonuç

Bursa ilinde tarihi yapıların yer aldığı Hanlar Bölgesi'nde hakim zemin yapısını, kalınlığı 50~75 m arasında değişen alüvyon yelpaze çökeli oluşturmaktadır. Blok içerikli siltli çakıldan meydana gelen bu tabaka, birikinti konisi ismini de alabilmektedir. Başta Ulucami olmak üzere bölgede yer alan birçok cami bu formasyon üstünde yer almaktadır. Birim içinde SPT-N darbe sayıları genelde refü (>50) değerine ulaşmakta, kayma dalgası hızı ise $V_s=360\sim 450$ m/s arasında değişmektedir. Tarihi camilerin üst yapı yükleri temelleri vasıtası ile yer yer kaya parçaları içeren bloklu, siltli çakıl tabakasına aktarılmaktadır. Bu tabaka gerek taşıma gücü gerekse oturmalar yönünden uygun bir temel zemini olma niteliğini taşımaktadır. Sahip olduğu geçirgenlik özelliği, yerleşim sıklığı ve ihtiva ettiği çok az ince dane oranı nedeniyle zamana bağlı oturma beklenmemektedir. Kuvvetli yer hareketi altında yapıları olumsuz yönde etkileyecek sıvılaşma, yumuşama, mukavemet kaybı, büyütme gibi davranış özellikleri bulunmamaktadır. Kalınlığı fazla olmasına karşılık sıklığı derinlikle görece arttığından ve katmanları arasında ani bir empedans değişikliği bulunmadığından depremler sırasında önemli bir zemin büyütmesi beklenmemektedir. Nitekim geçmişteki büyük depremlerde oluşmuş hasarların nedeni genelde yapısal özelliklere bağlı olup bu hasarların temel zemininden kaynaklandığını gösteren bulguya rastlanılmamıştır. Sınırlı sayıdaki zemin incelemelerinden elde edilen bilgiler ışığında yapılmış olan bu değerlendirmelerin, sondaj, arazi ve laboratuvar çalışmalarını içeren kapsamlı bir zemin incelemesi ile desteklenmesi ve geliştirilmesi faydalı olacaktır. Ayrıca söz konusu bölgedeki zemin tabakalarının depremler sırasındaki davranışının anlaşılabilmesi ve tarihi yapılara etkiyecek yer hareketi karakteristiklerinin belirlenebilmesi için kuvvetli yer hareketi istasyonlarının kurulması uygun olacaktır.

Referanslar

Tübitak Mam - Bursa İli İçin Zemin Sınıflaması ve Sismik Değerlendirme Projesi (2013), Bursa Büyükşehir Belediyesi.

Neslihan Özaydın (2017), Arşiv Belgeleri Işığında 1855 Depremi ve Bursa Yapılarına Etkisi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İslam Tarihi ve Sanatları Anabilim Dalı, 246 s.

Haşal ME, İyisan R (2005) Bursa şehri için olasılıksal sismik tehlike analizi uygulaması, TMMOB İMO Bursa Şubesi Aylık Yayın Organı, Bursa Bülteni, sayı:38, sf. 16-22.

YIĞMA KARGİR TARİHİ YAPILARIN DEPREM GÜVENLİĞİ VE YAPISAL MODELLENMESİ

Oğuz Cem Çelik^{1*}, Vildan Gizem Menteşe², Melika Salman³

¹*Prof.Dr., İTÜ Mimarlık Fakültesi, Yapı ve Deprem Mühendisliği Birimi, Taşkışla*

²*İnşaat Yüksek Mühendisi, İstanbul Büyükşehir Belediyesi*

³*İnşaat Mühendisi, İTÜ Afet Yönetimi Enstitüsü, Deprem Mühendisliği Y.Lisans Programı*

**celikoguz@itu.edu.tr*

Abstract

Seismic evaluation and modeling of historic brick and/or stone masonry structures are overviewed with some experiences gained from real life examples in Turkey. Structural components, their basic role in the overall behavior, damage types, and repair/retrofit possibilities are discussed. Common seismic damage types both in masonry structures and minarets are summarized. Special emphasis is given on historic masonry minarets by carrying out on a limited typological survey. Significant issues related to macro and micro modeling in evaluation of masonry structures are presented.

Keywords: Masonry, Minaret, Modeling, FEM, Seismic

Anahtar Kelimeler: Yığma, Kargir, Minare, Modelleme, Sonlu Eleman Yöntemi (SEY), Deprem

Giriş

Yığma kargir tarihi yapılar üzerine yapılan kuramsal ve deneysel çalışmalar ile deprem güvenliklerinin artırılması amacıyla yürütülen onarım ve güçlendirme uygulamaları özellikle 2000’li yılların başından itibaren Türkiye’de önemli bir artış göstermiştir. Bu artışın en önemli nedenlerinden birinin son 29 yıl içinde Türkiye’de meydana gelen yıkıcı depremler olduğu ve bu depremler sonrasında bu türden yapı stokunda oluşan sorunlar olduğu düşünülmektedir. Kamuya ait yapıların restorasyonu kapsamında gerçekleştirilen iyileştirme çalışmalarında çoğunlukla pek çok disiplinin temsilcisi olan bilim kurullarından yararlanılmakta, kapsamlı olarak hazırlanan bir 3R (rölöve, restitüsyon, restorasyon) projesi ile uygulama aşamasına geçilmektedir. Yapısal hasarların tespit edildiği analitik rölöve önemli bir aşama olup onarım ya da gerekirse güçlendirme aşaması için çok önemli ön bilgileri içermektedir. Çoğu zaman hasarın (çatlak, ezilme, yerel/tümsel göçme, dönme, malzeme kaybı vb) bir süre (örneğin 6 ay, 1 yıl) izlenmesi olası yapısal müdahale öncesinde sistemi tanımak adına tercih edilmektedir. Konvansiyonel izleme yöntemlerinden (örneğin, çatlak ölçerlerden) daha gelişmiş yapı sağlığı izleme yöntemlerine (monitoring) kadar değişik yöntemler yapının içinde bulunduğu koşullara bağlı olarak tercih edilebilmektedir.

Tarihi yapıların taşıyıcı sistemlerini oluşturan bileşenler modern taşıyıcı yapı bileşenleri ve malzemeleri gibi özellikleri çok iyi bilinen, homojen türden elemanlar değildir. Üstelik, yığma kargir elemanlarda bloklar arasında kullanılan harç, örgü düzeni, kenetler vb bağlayıcı/bütünleştirici elemanlar zaten homojen olmayan yapıyı daha da karmaşık duruma getirmekte, oldukça heterojen ve kompozit bir yapı ortaya çıkmaktadır. Durum böyle olunca,

zaten yüzyıllarca önce inşa edilmiş, yapım tekniği bilinen/bilinmeyen özellikleri olan, zaman içinde meydana gelen deprem, rüzgâr, yangın vb aşırı yüklemelerle sorun yaşamış, daha sonra bu tür sorunların o dönemin teknikleriyle giderilmiş olduğu tarihi yapıların yapısal olarak karakterizasyonu güçleşmekte, oldukça ileri düzeylere gelmiş modelleme teknikleriyle bile istenen doğruluklara ulaşmakta zorluklar yaşanmaktadır. Basitleştirilmiş mekanik modellere ek olarak tüm yapıyı sonlu elemanlarla daha hassas bir şekilde modellemek, kullanılan teknikler içinde en yaygın olanıdır. Elastik ötesi davranış (inelastik davranış) dikkate alınmadan yapılan modellemeler ve analizler yapı hakkında bir ön fikir verse de karar verme aşamasında yetersiz kalmaktadır. ABAQUS, DIANA, ANSYS, RING, LS-DYNA gibi yazılımlar sağladığı üstünlükler nedeniyle sıkça kullanılanlar arasında yer almaktadırlar.

Burada öncelikle yapısal elemanlar, hasarlar, olası çözümler hakkında özlü bilgi verilecek, sonra yığma kargir yapılarda kullanılan modelleme teknikleri tanıtılacak ve son olarak da tarihi minareler üzerinde yapılan bir inceleme kısaca sunulacaktır.

Yapısal Elemanlar, Hasarlar, Çözümler

Tarihi yapılarda sıkça görülen yapısal elemanlar sütunlar, duvarlar, payandalar, kemerler, tonozlar, kubbeler, gergiler, ağırlık kuleleri olarak özetlenebilir. Tarihsel süreç içinde bu tür elemanlarda değişik nedenlerle yapısal sorunlar izlenebilir. Sütunlar çoğunlukla tek parça ya da davul şeklindeki parçalarla (segment) pimlerle eklenerek oluşturulmakta ve taşıyıcılıktaki önemi gereği olabildiğince dayanımı yüksek malzemeden (örneğin granit, mermer vb) yapılmaktadır. Özelliği olan yapılarda kaliteli devşirme malzemenin de kullanıldığı çok örnek vardır. Parça kopmaları, değişik düzeylerdeki çatlaklar, dönmeler izlenen hasarlar arasında yer almaktadır. Duvarlar taş, tuğla ya da taş+tuğla almalı örgü tekniği ile inşa edilmektedir. Ana taşıyıcı duvarlarda ve duvar kesişme/köşe bölgelerinde kesme taşlar, kalın duvarlarda cidarlar kesme taş, orta bölüm moloz taş dolgu olan örnekler vardır. Duvarlarda düzlem içi ve dışı (özellikle depremlerde) hasarlar görülebilmektedir. Yalnızca zemindeki oturmanın yol açtığı düzlem içi kesme/kayma çatlakları da bilinen hasarlardandır. Özel bir hasar türü olarak kenetlerin zamanla korozyona uğrayarak hacminin artması ve taşlara zarar verdiği durumlarla da karşılaşmıştır. Payandalar tarihi duvarlarda (yapı duvarları ya da istinat duvarları) düzlem dışı stabilite için tercih edilmiş olup pek çok yapıyı sorunlardan arındırmış, günümüze kadar ulaşmasını sağlamıştır. Köprüler ve dinsel yapılarda yüzyıllarca büyük açıklıkların geçilmesinde en etkin olarak kullanılan yapısal öğelerden biri kemerler olmuştur. Mesnet kaybı, malzeme bozulmaları, üzengi düzeyi hasarları, kilit taşı boşalması, mafsallaşarak mekanizma durumuna geçerek göçme türü sorunlar izlenmektedir. Özellikle gerçek göçme davranışının araştırılması günümüzde ilgi çekmektedir. Gergilerin (ahşap, demir) varlığının ve yokluğunun kemerlerin taşıma gücüne etkisi çoktur. Zamanla kaybolmuş gergilerin restorasyon aşamasında özgün malzeme ile yerine konulması çoğu sorunu ek bir önlem almadan çözmektedir (Celik, O.C. and Sesigur, H., 2014). Tonozlar ve kubbeler eğriselliklerinin verdiği dayanım ve rijitlikle günümüze dek ulaşmıştır. Tonozlardaki hasarlar ve çözümü kemerlere benzerdir. Bu tür çatı elemanlarının en büyük sorunlarından biri zamanla üzerine eklenen yalıtım katmanları nedeniyle gelen ek yüküdür. Bu türden gereksiz yüklerin yapıdan uzaklaştırılması, daha etkin bir yalıtım uygulanması yalnızca tonoz ve kubbelerdeki sorunları değil, diğer taşıyıcı duvarlar ve sütunlardaki sorunları da hafifletmektedir. Yüzeysel taşıyıcılarda çekme bölgelerinde meydana gelen çatlakların hidrolik esaslı, yeterli dayanımdaki enjeksiyon malzemesi ile düşük basınç altında doldurularak onarılması çoğunlukla izlenen bir yoldur. Buna ek olarak, çatlak kalınlıklarının fazla olduğu durumda enjeksiyona ek olarak paslanmaz çelik, titanyum ya da FRP elemanlarla çatlağa dik doğrultuda, belirli aralıklarla çatlağın dikilmesi, yetersizliğin hesaplarla da kanıtlanması durumunda bunlara ek olarak kubbe dışından çelik çember,

dıştan/içten C/GFRP kumaş ile çekme gerilmelerinin karşılanması uygulamaları vardır. Bu önlemlerin etkinliği yapılan kapsamlı hesaplarla gösterilmiştir. Kemerli/tonozlu sistemlerde sistemin bütünlüğünü sağlayacak gergiler çokça uygulanan çözümlerden biridir (Celik, O.C. and Sesigur, H., 2010; Gedik, Y.H. and Celik, O.C., 2015a; Gedik, Y.H. and Celik, O.C. 2015b).

Önceki depremlerde minarelerde gözlenen hasar biçimleri şerefe üstü bölümde yapım tekniğinin ve yüksek modların neden olduğu göçmeler, gövdede meydana gelen değişik düzeylerdeki çatlaklar, merdiven çekirdeğinde ve iç yüzeyde oluşan hasarlar, kaide üstünde toptan ya da kısmen göçmeler olarak sayılabilir. Geometri belli olduğundan iyileştirme yöntemleri üzerinde yapılan çalışmalar sınırlı kalmıştır. Aksine, iyileştirme yerine sökülerek tüm minarenin yenilenmesi doğrultusunda hızla artan uygulamalar vardır. Buradaki en büyük sorun, minarenin özgünlüğünü detaylarıyla birlikte kaybetmesi, aynı taş ocağı bile olsa aynı türden malzemenin günümüzde sağlanamaması, aynı işçiliğin olamaması gibi olumsuzluklardır (S. Avukatoğlu Kalle ile kişisel görüşme).

Zeminden kaynaklanan sorunlar bulunması durumunda zeminin özelliklerinin geoteknik yöntemlerle iyileştirilmesi önem kazanmaktadır. Buna karşın, yüzyıllar önce yapılmış ve günümüze dek zemin kaynaklı sorunları olmayan yapılarda, zeminin iyileştirilmesine yönelik olarak geliştirilen bazı aşırı müdahale örnekleri üstyapıya zarar verilmesine neden olmaktadır.

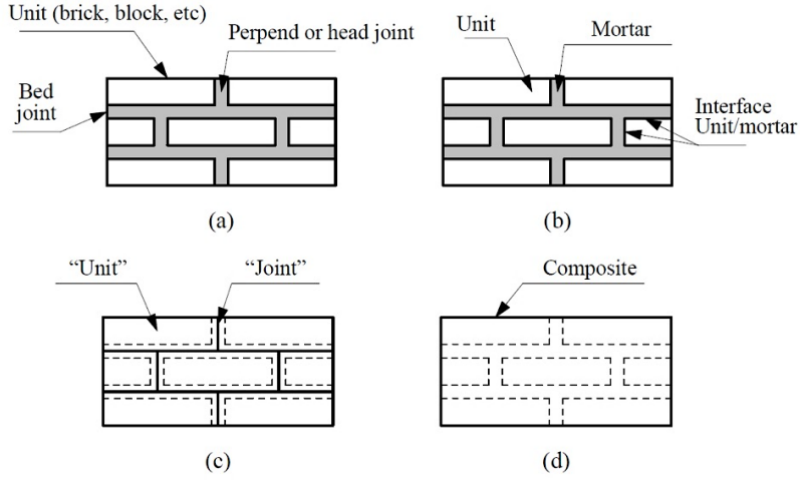
Tarihsel değeri olan kültür mirası yapılarda herhangi bir yapısal müdahalenin minimum düzeyde tutulması esastır. Bu türden yapıları güncel yönetmeliklere (deprem yönetmelikleri de dahil olmak üzere) tamamıyla uygun duruma getirmek mümkün ve gerekli değildir; mevcut yönetmelikte bu durum açık olarak belirtilmiştir. Buna karşın, yapısal güvenlikle ilgili mutlaka alınması gereken bir önlem varsa restorasyon ilkeleri doğrultusunda uygulanmasında bir sakınca yoktur. Bu ilkelerin en başta geleni 1964 tarihli Venedik Tüzüğü'dür (Venice Charter). Yapılan müdahalenin geri dönüşümünün olabilmesi esastır. Yapıda özgünlüğü ve yük akış şemasını bozarak tamamen değiştirecek müdahale biçimleri yapıya faydadan çok zarar getirmektedir.

Yapısal modelleme çalışmalarının yapıyı ve olası yükler altındaki davranışı daha iyi tanımanın/anlamanın ötesine geçmeyeceği açıktır. Modelleme sonuçlarının özellikle tarihi yapı mekaniği ve modellemesi konusunda uzmanlarca değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Bu tür yapılarda oluşan hasarlar, göçmeler çoğunlukla deprenselliği yüksek bölgelerde yaşandığından hangi düzeydeki bir yer hareketinin deprem hesaplarında dikkate alınacağı ve taşıyıcı malzeme karakteristiklerinin doğru olarak belirlenmesi önemlidir. Karmaşık ve narin yapıları nedeniyle minarelerin bu incelemeler içindeki önemi büyüktür. Aşağıda önce yığma kargir yapılarda çokça kullanılan modelleme teknikleri tanıtılacak, sonrasında ise minarelerin taşıyıcılık ve geometrik özellikleri ile ilgili yapılan sınırlı bir incelemenin sonuçları kısaca sunulacaktır.

Yığma Kargir Yapılarda Modelleme

Yığma kargir, taş ve/ya da tuğla birimler ile birimler arasındaki harç derzlerinden oluşan heterojen bir yapıdır. Modelleme yaklaşımları, taş birimlerin ve harç derzlerinin ayrı ayrı mikro ya da bu bileşenlerin birlikte modellendiği makro (kompozit) modelleme tekniklerine odaklanmaktadır (Şekil 1). Mikro modelleme tekniği ise ayrıntılı ve basitleştirilmiş mikro modelleme olarak iki grupta ele alınmaktadır. Ayrıntılı mikro modellemede, taş/tuğla kargir birimler, bu birimler arasındaki harç derzler ve derz ile kargir birimler arasındaki arayüzler ayrı ayrı düşünülür. Basitleştirilmiş mikro modellemede, kargir birimler ile birlikte her bir derz ve

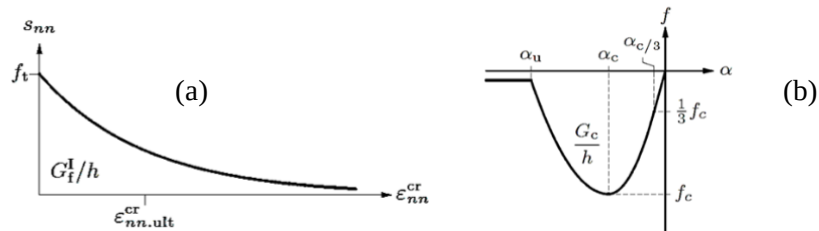
komşu olduğu arayüzler tek bir sürekli eleman olacak şekilde genişletilerek modellenmektedir. Makro modelleme yaklaşımında ise kargir birimler, harç ve birim-harç arayüzü birlikte kompozit bir yapı olarak ele alınmaktadır (Lourenço, 1996).



Şekil 1: Yığma yapılar için önerilen modelleme yaklaşımları: (a) yığma birim, (b) detaylı mikro modelleme, (c) basitleştirilmiş mikro modelleme, (d) makro (kompozit) modelleme (Lourenço et al., 1995).

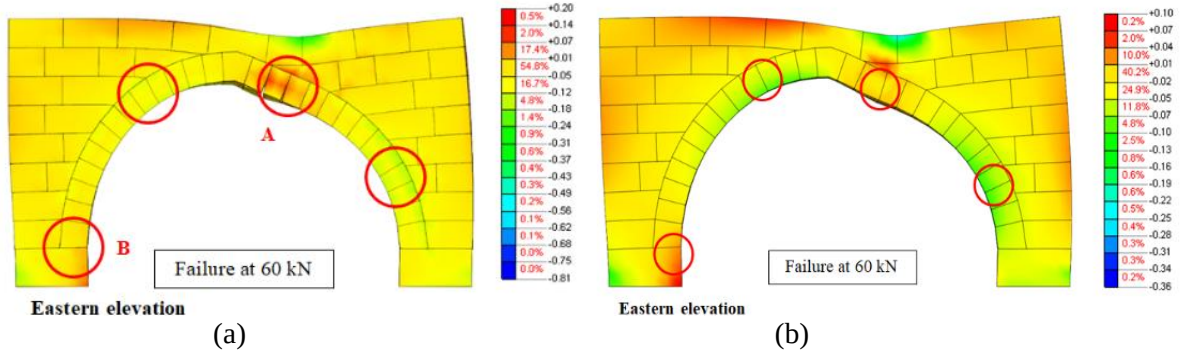
Elastisite modülü ve Poisson oranı gibi malzeme elastik özellikleri ile kargir birimler ve derz malzemenin elastik olmayan özelliklerinin yığma davranışını incelemeye ilk yaklaşım için dikkate alınması gerektiği belirtilmektedir, (Lourenço, 1996). Buna göre, düşey yük ve deprem yükleri etkisindeki kargir yapılarda, harç derzleri yığma birimlerde potansiyel çatlaklara ve kaymalara neden olacağından, özellikle mikro modelleme yaklaşımlarında arayüz elemanlarının detaylı ve doğru bir şekilde modellenmesi oldukça önem taşımaktadır.

Yığma kargir yapıların performans değerlendirmesinin doğru bir şekilde yapılabilmesi ve elde edilen sonuçların anlamlı olabilmesi, uygun modelleme yöntemi ile birlikte yapıya ait malzeme özelliklerinin doğru belirlenebilmesi, malzeme modeli seçimi, mesnetlenme koşulları gibi parametrelere bağlıdır. Modelleme aşamasında malzemenin çekme, basınç ve kayma davranışının birlikte modellendiği malzeme modelleri tercih edilmelidir. Literatürde yaygın olarak tercih edilen *Total Strain Based Fixed Crack Model*'de, malzemenin çekme ve basınç davranışı birlikte ele alınmaktadır. Örneğin, tek açıklıklı bir yığma kemer köprünün doğrusal olmayan makro ve mikro modelleme yaklaşımlarında, çekmede üstel bir yumuşama davranışı (exponential tension softening) ve basınçta parabolik/üssel yumuşamayı takip eden parabolik sertleşme davranışı (parabolic hardening/softening behavior) benimsenerek yapılan göçme analizlerinde deneysel sonuçlara oldukça benzer göçme mekanizmaları elde edilmiştir, (Şekil 2, Menteşe, 2018).



Şekil 2: Yığma kargir malzeme modelleri: (a) çekmede üstel yumuşama davranışı, (b) basınçta parabolik/üssel yumuşamayı takip eden parabolik sertleşme davranışı

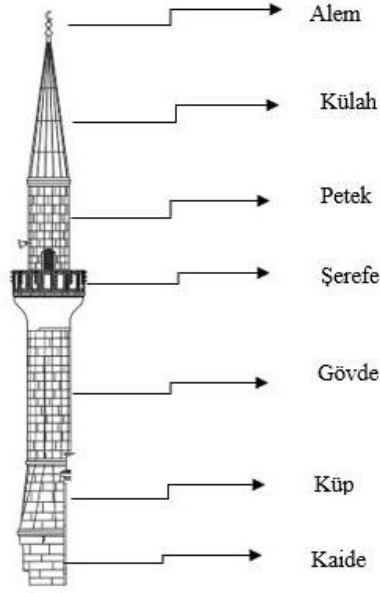
Kemer, tonoz ve köprüler gibi karmaşık geometriye sahip yığma kargir yapıların göçme performans analizlerinde, doğrusal olmayan yapı davranışı ve göçme anındaki mafsalları oluşturmalarını ayrıntılı gözlemlemek için mikro modelleme teknikleri tercih edilmelidir. Ancak, gerek modelleme gerekse analiz süresi bakımından daha pratik olan ve sıkça tercih edilen makro modelleme tekniği de oldukça doğru tahminler verebilmektedir. Tek açıklıklı bir taş yığma kemer köprünün DIANA yazılımında sonlu elemanlar ile üç boyutlu modelleri makro (kompozit) ve basitleştirilmiş mikro modelleme teknikleri yardımıyla incelenmiş, elde edilen doğrusal olmayan statik analiz sonuçları aynı köprünün laboratuvar modelinin göçme testinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır, (Şekil 3, Menteşe, 2018). Bu çalışmaya göre basitleştirilmiş detaylı modelleme tekniği ile köprünün göçme mekanizmasında köprü kemer taşlarında meydana gelen açılmalar ve mafsalları oluşumları gözle görülebiliyorken, kompozit modelleme yaklaşımı da köprünün mafsallaşma mekanizması hakkında doğru tahminler verebilmektedir. Her iki modelleme yaklaşımında da deneysel sonuçlar ile benzer göçme yükleri elde edilmiştir. Sakarya’da bulunan çok açıklıklı bir taş yığma kemer köprü olan Justinianus Köprüsü’nün üç boyutlu sonlu elemanlar modeli DIANA yazılımında makro modelleme yaklaşımı ile ele alınmıştır (Menteşe and Celik, 2021). Üç farklı yükleme açıklığı için elde edilen doğrusal olmayan statik analiz sonuçları, aynı köprünün en kritik üç açıklığı için RING yazılımında hazırlanan modelinin limit analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapılan malzeme varsayımları altında, köprünün makro modeli ile oldukça gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3: Taş yığma kemer köprü modellerine ait sayısal analiz sonuçları: (a) basitleştirilmiş mikro model, (b) makro (kompozit) model (Menteşe, 2018).

Yığma Kargir Minareler

Minareler yapısal olarak idealleştirildiklerinde hem izostatik (statikçe belirli) hem de konsol sistemli olmaları nedeniyle depremler ve önemli rüzgâr etkilerinde hasar görebilirlikleri yüksektir. Genelde ampatmanlı bir yığma kargir temelden başlayarak, kaide, küp (geçiş ögesi), gövde, şerefe, petek, külah ve alem bölümlerinden oluşur (Şekil 4). İçte ise cidarlar ve çekirdeklerle bütünleşik bir merdiven sistemi ile gerçekte taşıyıcılık özellikleri daha da karmaşılaşan bir yapıya dönüşmektedir. Modelleme bölümünde açıklanan genel modelleme ilkeleri ile minarelerin benzer bir yolla kapsamlı bir biçimde modellenmesi mümkündür. Daha basitleştirici yaklaşımlarla yeterli düzeyde doğruluk da elde edilebilir. Genelde titreşim özelliklerinin yerinde belirlenmesi ile modelleme sonuçlarının doğruluğu kontrol edilmektedir.



Üsküdar Abdülbaki Cami (Üsküdar - İstanbul)
17.yüzyılda tek şerefeli tek minareli olarak inşa edilmiştir.

Özellikler	Kaide	Kûp	Gövde	Petek	Kûlah
Yükseklik (m)	2.58	3.03	7.49	5.18	6.04
Dış çap (m)	3.02	3.02~2.59	2.59	2.00	2.00~0.44
İç çap (m)	1.84	1.84~1.40	1.40	1.36	1.36~0.12
Cidar kalınlığı (m)	0.59	0.59	0.59	0.32	0.32
Kullanılan malzeme	Kesme Taş	Kesme Taş	Kesme Taş	Kesme Taş	Kurşun

Bıçakçı Alaaddin Cami (Fatih - İstanbul)
16.yüzyılda tek şerefeli ve taş çekirdekli olarak inşa edilmiştir.

Özellikler	Kaide	Kûp	Gövde	Petek	Kûlah
Yükseklik (m)	2.48	0.92	4.91	2.40	2.32
Dış çap (m)	1.75	1.75~1.57	1.57	1.22	1.22~0.22
İç çap (m)	1.17	1.17~1.22	1.22	0.90	0.90~0.14
Cidar kalınlığı (m)	0.29	0.29~0.18	0.18	0.16	0.16
Kullanılan malzeme	Tuğla	Tuğla	Tuğla	Tuğla	Kurşun

Makedonya Üsküp Alaca Cami
15.yüzyılda tek şerefeli tek minareli olarak inşa edilmiştir.

Özellikler	Kaide	Kûp	Gövde	Petek	Kûlah
Yükseklik (m)	4.19	2.13	13.12	5.72	4.10
Dış çap (m)	2.90	2.90~2.22	2.22	1.98	1.98~0.24
İç çap (m)	1.60	1.60~1.50	1.50	1.48	1.48~0.15
Cidar kalınlığı (m)	0.60	0.60	0.36	0.25	0.25
Kullanılan malzeme	Kesme Taş	Kesme Taş	Kesme Taş	Kesme Taş	Sac kaplama

Şekil 4: Minare bölümleri (tipik) ve 17.,16.,15.yy minarelerinden seçilen üçünde özellikler

Minare taşıyıcılık özelliklerini kullanılan malzemelere ve inşa edildikleri dönemlere göre incelemek, böylece bir tipolojik çalışma yapmak uygun olmaktadır. Örneğin, minare yüksekliği/gövde kalınlığı, cidar kalınlığı/gövde kalınlığı, kaide-küp yüksekliği/minare yüksekliği, çekirdek çapı/gövde çapı gibi oranlar bu tür bir sınıflandırmada yapısal anlamda çok yararlı olmaktadır. Sınırlı sayıdaki bir incelemede 17., 16. ve 15.yüzyıl minareleri için Şekil 4’de verilen sayısal değerler elde edilmiştir.

Sonuç ve Öneriler

Yığma kargir yapıların düşey ve yatay (deprem) etkileri altındaki davranışlarının ve performanslarının gerçekçi olarak belirlenebilmesi yapının çok iyi tanınması, malzeme özelliklerinin doğru olarak belirlenebilmesi, sistemin doğru olarak modellenmesi ve hesap sonuçlarının uygun olarak değerlendirilmesine bağlıdır. Zaten oldukça heterojen olan bir yapıda, deprem etkilerinin karmaşıklığı, hesap modellerinin ve varsayımlarının etkisi çoğu zaman beklenmeyen/yorumu güç sonuçlara da götürebilmektedir. Yine de kullanılan ileri düzeylerdeki yazılımlar yardımıyla yeterli denebilecek bilgi elde edilmektedir. Minarelerin titreşim özelliklerinin yerinde belirlenmesi ve üretilecek model numuneler üzerinde mevcut deprem kayıtları kullanılarak yapılacak sarsma tablası deneyleri çok yararlı olacaktır.

Referanslar

Celik, O. C., and Sesigur, H. (2014) Seismic Retrofit of Historic Masonry Buildings in Turkey: State of the Practice, Workshop on Seismic Risk of Historical Structures, ITU Süleyman Demirel Cultural Center, November, Istanbul, Turkey.

Celik, O. C., and Sesigur, H. (2010) Performance of Historic Masonry Buildings during the April 6, 2009 L’Aquila Earthquake, 14th European Conference on Earthquake Engineering, August, Ohrid, Macedonia.

Gedik, Y. H., and Celik, O. C. (2015a) 3D Modeling and Structural Evaluation of Ancient Bozdogan (Valens) Aqueduct in Istanbul, 21th International Conference on Computer Methods in Mechanics, September 8-11, Gdansk, Poland.

Gedik, Y. H., and Celik, O. C. (2015b) Aslanlı Taş Kemer Köprüsü'nün Deprem Yükleri Etkisinde Mevcut ve İyileştirilmiş Durumunun İncelenmesi, 8.Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 11-14 Mayıs, İstanbul, Türkiye.

Lourenço, P. B. (1996) Computational strategies for masonry structures (Doctoral dissertation). Retrieved from <http://www.hms.civil.uminho.pt>.

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

Mentese, V. G. and Celik O. C. (2021) 3d FE Modeling of Multi-Span Stone Masonry Arch Bridges for the Assessment of Load Carrying Capacity: The Case of Justinian's Bridge, 12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC 2020), September 29-30 and October 1, Barcelona, Spain.

Vildan G. Mentese (2018) 3D Nonlinear Modeling and Testing of Historic Stone Masonry Arch Bridges: The Case of Justinian's Bridge, M.Sc. Thesis, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey.

Serpil Avukatoğlu Kalle ile kişisel görüşme.

BURSA TARİHİ MİNARELERİNİN DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİ VE HIZLI DEĞERLENDİRİLME İÇİN DOĞAL TİTREŞİM PERİYODU TAHMİNİ

Cavit SERHATOĞLU¹, Ramazan LİVAOĞLU^{2*}

¹Araş. Gör. Bursa Uludağ Üniversitesi, Müh. Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü

² Prof. Dr. Bursa Uludağ Üniversitesi, Müh. Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü

*rliva@uludag.edu.tr

Özet

Türkiye’deki tarihi yapıların büyük bir bölümünü Osmanlı cami ve minareleri oluşturmaktadır. Bu yüzden tarihi minarelerin mevcut durumunun değerlendirilmesi ve olası depremlere karşı korunması oldukça önemlidir. Doğru bir değerlendirmenin yapılabilmesi için öncelikle minarenin dinamik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Araştırmanın birinci bölümünde; deneysel ve sayısal metotlar kullanılarak Bursa’da yer alan öncelikle yedi daha sonra on sekiz tarihi minarenin dinamik karakteristiği ve yapısal özellikleri incelenmiştir. Diğer yapılarda olduğu gibi minarelerin dinamik karakteristiklerinin arasında en önemli parametre yapının hâkim periyotudur. Anadolu’da çok sayıda tarihi minare olduğu da düşünülerek bu periyotun hızlıca hesaplanabilmesi için pratik metotlar araştırılması gerekliliği açıktır. Bu nedenle araştırmanın ikinci bölümünde; dinamik davranış ile yapısal özellikleri arasındaki ilişkinin yorumlanarak minarenin hâkim periyotunu belirlemek için ampirik formüller türetilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hızlı değerlendirme, Tarihi Minareler, Modal test, Sonlu elemanlar modeli, Modal analiz, Ampirik doğal titreşim periyodu

Giriş

Tarih boyunca Anadolu, birçok medeniyete ev sahipliği yapmıştır. Bu bağlamda Anadolu’da farklı türde birçok tarihi yapıya rastlamak mümkündür. Ancak altı asırdan fazla hüküm sürmüş Osmanlı Devleti’nin inşa ettiği minare ve camiler kadar fazla sayıda ve faaliyetini halen sürdüren tarihi eser niteliğinde başka tür bir yapıdan bahsetmek pek mümkün değildir. Maalesef bu yapılar Anadolu’nun sismik tehlikeye sahip bir bölgede olmasından dolayı geçmişte çok kez depreme maruz kalarak zarar görmüş ve halen günümüzde bu tehditle karşı karşıyadır. Bu yüzden Osmanlı tarihi minarelerinin yapısal ve dinamik özelliklerin incelenmesi, yatay yüklere karşı yapısal davranışının değerlendirilmesi, gerekli ise güçlendirilmesi ve mümkünse yapısal sağlık takibine alınması gereklidir. Bu parametrelerin her biri oldukça önemli ve birbirini ilgilendiren araştırmalardır. Ancak yapı ve deprem mühendisliğinde bu konularla ilgili mesafe kat edebilmek için yapıda incelenmesi ve öncelik verilmesi gereken en önemli parametre yapının dinamik karakteristiğidir.

Bu araştırmada, geçmişte birçok medeniyetin hüküm sürdüğü ve Osmanlı Devleti’ne yıllarca başkentlik yapmış Bursa’daki 18 adet tarihi minare incelemeye alınmıştır. Çeşitli dönemlerde rüzgâr ve deprem etkisiyle bu minarelerin gördükleri hasarlar, onarılmalarına ya da yeniden yapılmalarına neden olmuştur. Tarihi kayıtlara göre Bursa şehri en büyük hasarı ve buna bağlı olarak can ve mal kaybını 1855 Bursa depreminde yaşamıştır. Güncel araştırmalar da söz konusu bölgenin aktif faylar üzerinde olduğunu göstermekte olup deprem riski açısından tehlikesini gözler önüne sermektedir. Kaçınılmaz olan bu gerçek, tarihi eser niteliğindeki bu

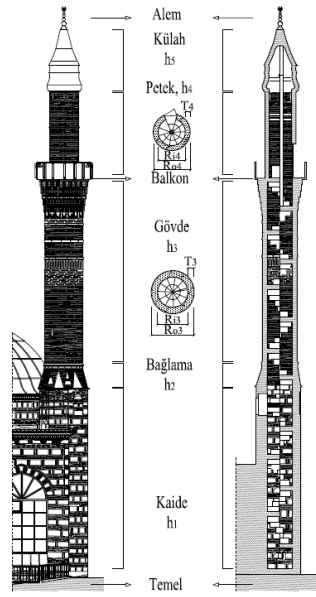
yapıtların korunması için yapılacak araştırmaların her aşamasının değerinin ne denli önemli olacağını göstermektedir. Tüm bu gerekliliklerin yanında tarihi minarelerin alışlagelmiş yapı tarzından farklı olarak uzun, narin, yığma yapı karakterleri ve bundan dolayı yatay yük taşıma kapasitelerinin düşük olması yapısal davranışlarının tespitinde inşaat mühendislerinin işini oldukça zorlaştırmaktadır.

Tarihi minarelerin yapısal sağlık takibi ve performans değerlendirmesi için dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi oldukça zahmetli olmasına karşın önemli bir gerekliliktir. Bir yapıda dinamik karakteristik genel bir ifadeyle yapının periyodu, mod şekli ve sönüm oranı şeklinde açıklanabilir. Tarihi minarelerin rijitliğinin tespitindeki zorluklar, heterojen malzeme özellikleri, gözlemsel olarak belirlenmesi oldukça güç olan ana yapıyla ilişkisi ve buna bağlı mesnet koşulları durumu daha da zorlaştırmaktadır. Bu amaçla, araştırmada minarelerin dinamik karakteristiklerini belirlemek için minarelere çevresel titreşim testi uygulanmış ve yukarıda ifade edilmeye çalışılan tüm zorluklar lineer sınırlar içerisinde tespit edilmeye çalışılmıştır. Söz konusu bu testler sırasında modal parametrelerin belirlenebilmesi için klasik frekans alanlı yöntem kullanılmıştır. Tarihi minarelerin inşa edildiği malzemelerin mekanik özellikleri yerinde ultrases testi, laboratuvarında ise birim hacim ağırlık ve özgül ağırlık testleri yapılarak elde edilmiştir. Tarihi minarelerin yapısal davranışını temsil edecek matematiksel modeller, üç boyutlu sonlu elemanlar yaklaşımıyla Abaqus Cae programında oluşturulmuş ve modal testten elde edilen veriler sayesinde model güncellemesi gerçekleştirilebilmiştir. Kalibrasyon neticesinde sayısal modellerin modal analiz sonuçları ile modal test arasındaki hata yüzdesi çoğunlukla %10'un altında tutularak, incelenen tarihi minarelerin dinamik davranışları mümkün olduğunca mevcut yapı davranışına yakın temsil edilmeye çalışılmıştır. Bu sayede Sultan camii minareleri de dâhil olmak üzere on sekiz minarenin yapı performansı ve sismik analizleri için kullanılacak modeller hazır hale gelmiştir.

Anadolu'daki ve Osmanlı'nın hüküm sürdüğü topraklardaki minare sayısını düşünecek olursak bu tür detaylı incelemelerin her bir minare için yapılması ve testlerin istenilen anda uygulanması pek mümkün değildir. Bu yüzden araştırmacıların bu tarihi yapıların mevcut durumunun hem dinamik özellikleri hem de performansı hakkında ön değerlendirme yapabilmesi için pratik yöntemlerin geliştirilmesi gerekliliği açıktır. Bu bağlamda yapının dinamik özelliklerinden hâkim periyodun hızlı tespit edilmesi mantıklı bir araştırma olacaktır. Çünkü minarelerin hâkim periyodu, minarenin dinamik davranışında kütle katılımının genellikle %60'ın üzerinde olan ve deprem esnasındaki hasarların oluşma şeklinde büyük katkısı olan ilk modun periyotudur. İncelenen tarihi minarelerin birinci mod periyotları ile periyota etkiyen parametreler arasında ilişki kurularak regresyon analizi yapılmıştır. Bahsedilen ilişkilere idealleştirmeler yapılarak tarihi minarelerin birinci mod periyotlarının, tespiti veya tahmini kolay olabilecek bazı parametreler sayesinde, ampirik bir formülle tahmin edilebileceği kanaatine varılmıştır. Bu kapsamda Livaoğlu ve ark. (2016) ve Serhatoğlu ve Livaoğlu (2019) olmak üzere iki çalışma yapılmıştır. Livaoğlu ve ark. (2016) minarenin periyodu kaide en kesit ve yüksekliği de dikkate alınan eşdeğer yüksekliğe göre normalize edilerek ve doğrusal ilişkiler kurularak hâkim periyot denklemi elde edilmiştir. Serhatoğlu ve Livaoğlu (2019) çalışmasında ise on sekiz minarenin malzeme özelliklerini kapsayan ve kapsamayan parametreler kullanılarak doğrusal olmayan çoklu regresyon analiz yapılmış ve T_{5p} ve T_{3p} olmak üzere iki ampirik denklem üretilmiştir.

Minarelerin malzeme ve geometrik özellikleri

İncelenen on sekiz minarenin yapısal özellikleri hakkında literatürden ve ilgili kurumlardan kayıtlı bir bilgi elde edilemediği için minarelerin geometrik özellikleri ve kullanılan malzeme türleri yerinde yapılan ölçümler neticesinde belirlenmiştir. Belirlenen yükseklik ve iç/dış çaplar Şekil 1'de verilen minare bölümlerine ve onların numaralarına göre Tablo 1'de sunulmaktadır.



Şekil 1. Osmanlı minarelerinin bölümleri ve yapısal bileşenleri

Tablo 1. İncelenen minarelerin genel geometrik özellikleri ve kullanılan malzeme türleri

Minare	Kaide duvarının mesnetlenme Durumu	Malzeme		Geometrik Özellikler			
		Kaide	Gövde	h ₁ (m)	h ₂ +h ₃ +h ₄ (m)	R ₀₃ (m)	R ₁₃ (m)
Ali Paşa	A*	TK	T	6.38	11.70	1.81	1.33
Altıparmak	B*	TK	T	7.00	15.00	1.85	1.25
Emir Sultan (Batı)	B*	K	K	11.40	18.75	2.10	1.40
Hacılar	B*	TK	T	8.00	15.75	1.90	1.30
Hoca Muslihiddin	B*	TK	T	8.60	12.30	2.00	1.40
Hoca Tabip	A*	TK	T	4.00	9.80	1.62	1.16
Hocaalizade	B*	TK	B	8.50	15.69	1.80	1.20
Ismail Hakkı	A*	T*	T*	4.00	19.36	1.59	1.17
Kayhan	B*	TK	T	6.40	12.32	1.65	1.05
Muradiye (Doğu)	B*	TK	T	9.00	16.50	1.78	1.30
Muradiye (Batı)	B*	TK	T	9.00	16.80	1.87	1.35
Sultan Alaaddin	B*	S	T	7.10	13.70	1.84	1.24
Şehadet	B*	K	K	7.45	22.48	2.30	1.60
Ulucami (Doğu)	B*	K	T	4.60	37.50	4.76	2.16
Ulucami (Batı)	B*	K	T	11.47	31.28	4.30	2.20
Üftade	Ü*	TK	T	10.65	13.65	1.73	1.17
Yeşil (Batı)	U*	K	T	1.44	16.55	2.42	1.40
Yıldırım Beyazıt (Batı)	U*	TK	T	4.60	15.41	2.21	1.55

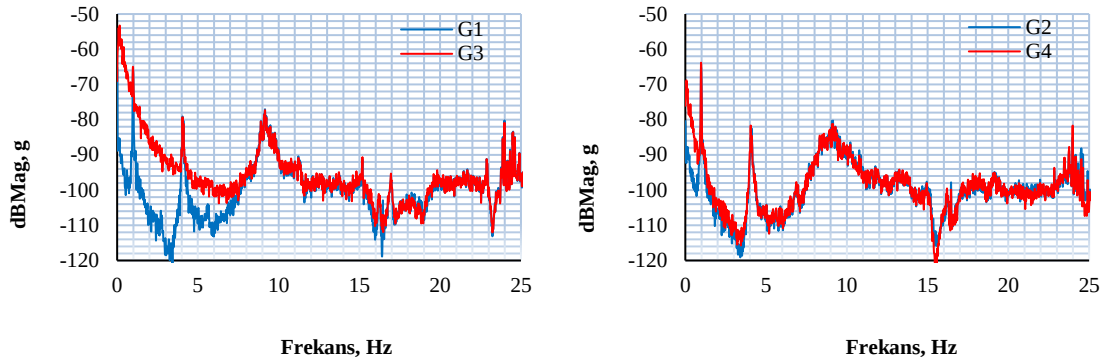
A*: Ayrık, B*: Bitişik, U*: Beden Duvar üzerinde, TK: Brick-Küfeki Taş, K: Küfeki taşı T: Tuğla T: Taş

Minarelerin dinamik karakteristikleri ve sayısal modelleri

İncelenen minarelerin dinamik karakteristiği hem deneysel olarak hem de numerik olarak belirlenmiştir. Öncelikle minarelerin modal periyotları deneysel olarak çevresel titreşim testi (ÇTT) sayesinde belirlenmiştir. Daha sonra ise minarelerin sayısal modelleri numerik olarak sonlu elemanlar tekniğiyle oluşturulmuş ve model ÇTT sonuçlarından faydalanan modal analiz gerçekleştirilerek güncellenmiştir. Güncelleme sonucunda modelin mod şekilleri, mod periyotları hesaplanmış ve minarenin malzeme özellikleri, minarenin mesnetlenme şartları, modelin eleman boyutları belirlenmiştir. Bu sayede hem ampirik formülün türetilmesi için

gerekli parametreler belirlenmiş hem de her bir minare modeli sonraki dinamik analizler için hazır hale gelmiştir.

Test sonuçlarıyla ilgili grafik sadece bir minare için Şekil 2’de verilmiş olup incelenen tüm minarelerin sonuçlarına Serhatoğlu (2015) veya Serhatoğlu ve Livaoğlu (2019) çalışmasından bakılması mümkündür. İvmeölçer kullanarak elde edilen Şekil 2’deki iki güç yoğunluk spektrumları birbirine dik iki yatay yönün sonuçlarını içermektedir.



(a) Kuzey-Güney doğrultusu (KG)

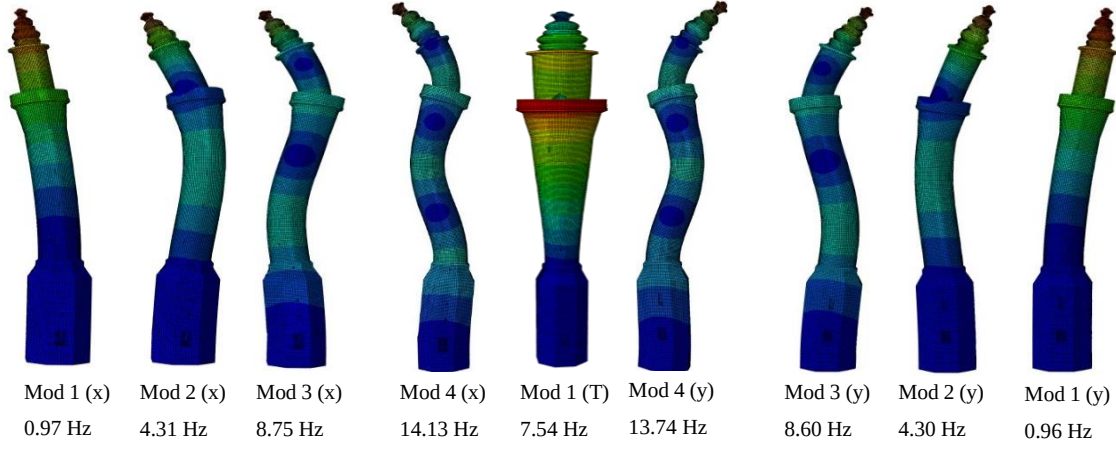
(b) Doğu-Batı doğrultusu (DB)

Şekil 2. Ulucami batı minaresine ait güç yoğunluk spektrumları

Minarelerin deneysel olarak modal frekansları belirlendikten sonra yapıların nümerik modelleri oluşturularak üzerinde modal analiz gerçekleştirilmiştir. Modal analiz, matematiksel bir model kullanarak bir yapının dinamik karakteristiği olan doğal frekans, mod şekli, sönüm oranlarını belirleme işlemidir. Modal analizde yapılan işlemler, zaman içerisinde değişmeyen dinamik özellikler prensibine göre basit harmonik hareket modlarının lineer birleşimi olarak ifade edilebilir. Çalışma kapsamında bu analizler literatürde yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar metoduyla hazırlanan modeller üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modelinin hazırlanması ve çözülmesi için Abaqus Cae programından faydalanılmıştır. Minarenin yapı elemanları modellenmesinde üç boyutlu katı (Solid) eleman tipi seçilmiş olup düzgün geometrilili hexagonal mesh kullanılmıştır. Yapılan modal analiz sayesinde her minarenin sonlu elemanlar modeli güncellenmiş ve minarelerin mod frekansları, mod şekilleri, modların kütle katılım oranları ve malzeme özellikleri belirlenmiştir. Bu hesaplama örneği olarak Ulucami Batı minaresi modelinin ilk dokuz mod sonuçları Şekil 3’te sunulmuş ve Tablo 2’de test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Diğer minarelerle alakalı daha ayrıntılı sonuçlara Serhatoğlu ve Livaoğlu (2019) çalışmasından ulaşılması mümkündür.

Tablo 2. Ulucami batı minaresine ait frekans değerleri ve kütle katılım oranı

İvme Kayıt Yönü	Mod	Kütle Katılım Oranı, %		Modal Analiz Frekansı, Hz	Modal Test Frekansı, Hz	Hata yüzdesi, %
		X	Y			
KG	1	36.00	2.00	0.97	0.98	1
	2	13.00	7.00	4.31	4.10	5
	3	19.00	1.00	8.75	9.15	4
	4	16.00	0.00	14.13	14.95	5
DB	1	2.00	35.00	0.96	0.96	0
	2	7.00	14.00	4.30	4.09	5
	3	1.00	20.00	8.60	9.03	4
	4	0.00	15.00	13.74	13.38	2



Şekil 3. Ulucami batı minaresinin ilk dokuz mod şekli ve frekansı

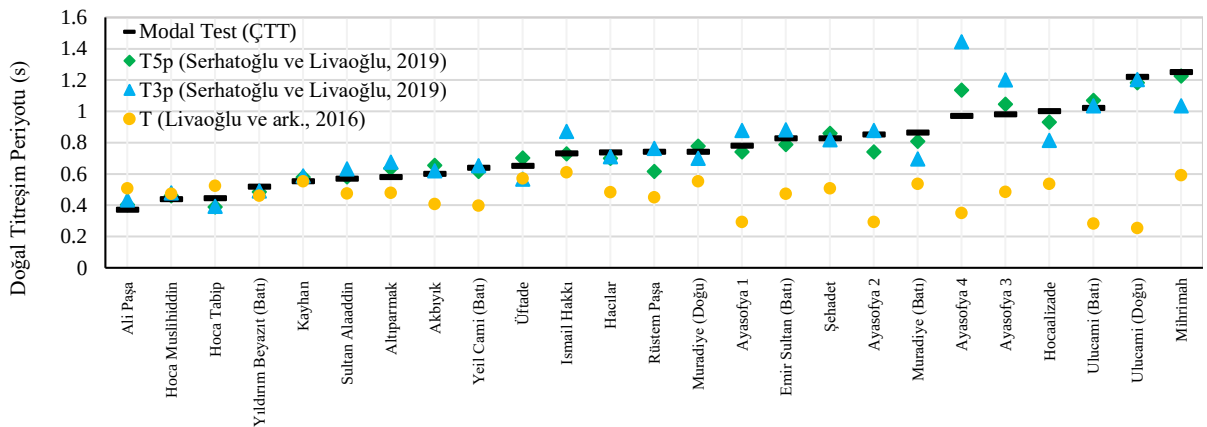
Doğal titreşim periyodu tahmini

Minarelerin kütle katılım oranları incelendiğinde birinci (hâkim) modun dinamik davranışa katkısının %50-60'nın üzerinde olduğu görülmektedir (Serhatoğlu ve Livaoğlu 2019). Bu bağlamda yazarlar minarenin dinamik davranışını önemli oranda etkileyen hâkim mod periyodunun hızlı değerlendirme yöntemlerinde kullanılmak üzere yaklaşık olarak tespit edilebilmesi için doğrusal ve doğrusal olmayan çoklu regresyon analizini kullanarak ampirik denklemler (1-2-3) türetmeye çalışmışlardır (Serhatoğlu ve Livaoğlu 2016-2019). Denklem 1,2,3'teki semboller Yükseklik (h), Kesit alanı (A), Birim hacim ağırlık (ρ), Elastisite modülü (E) ve Atalet moment (I) parametrelerini temsil etmektedir. Şekil 4-5'teki grafikler; Oliviera ve ark. (2012) çalışmasından İstanbul'daki minarelerde dâhil edilerek 27 minare için oluşturulmuştur.

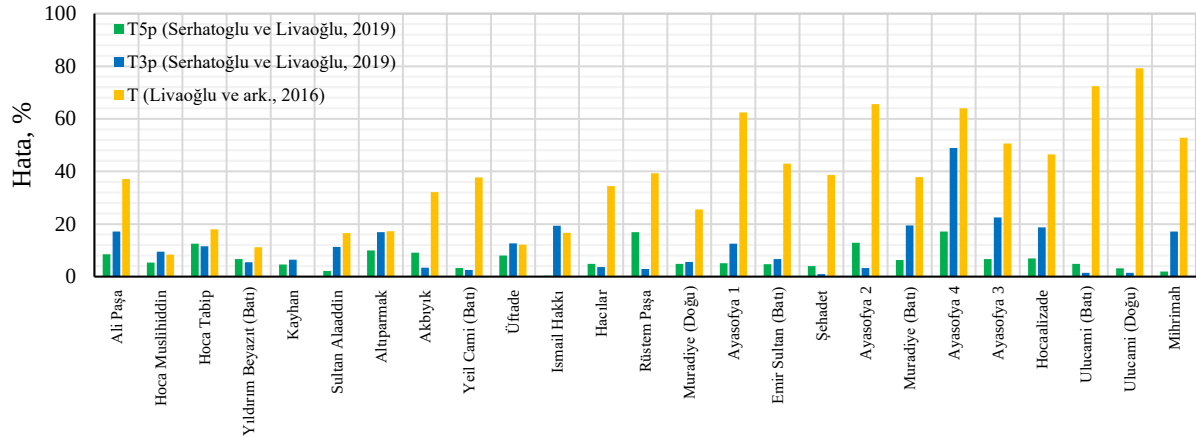
$$T_{(Livaoğlu et al., 2016)} = 0.727 \sqrt{\frac{EI}{A\rho}} h^{-3/2} + 0.0039 \sqrt{\frac{\rho h^4}{EI}} (6.875 - \sqrt{A}) \quad (\text{kPa, m, kg}) \quad (1)$$

$$T_{5p} = \frac{2\pi}{32} \frac{h^{1.776} A^{1.225} \rho^{0.588}}{I^{0.928} E^{0.427}} \quad (\text{Pa, m, kg}) \quad (2)$$

$$T_{3p} = \frac{2\pi}{3783} \frac{h^{1.398} A^{2.329}}{I^{1.478}} \quad (\text{Pa, m, kg}) \quad (3)$$



Şekil 4. Doğal titreşim periyotlarının ampirik denklemlere ve modal test (ÇTT) göre belirlenmesi



Şekil 5. Amprik denklemlerin modal test (ÇTT) sonuçlarına göre hata yüzdeleri

Sonuçlar

- Bursa tarihi minareleri üzerinde yapılan bu çalışmalar; Osmanlı erken dönem minarelerinin tasarım, inşa ve malzeme özellikleri hakkında bir alt yapı oluşturulmasını sağlamıştır.
- İncelenen 18 minarenin yapısal özellikleri, dinamik karakteristikleriyle birlikte literatüre katkı olarak sunulmuş olup Bursa için bir envanter niteliğine dönüşmüştür.
- Amprik formül sonuçları incelendiğinde doğrusal olmayan çoklu regresyon analizi ile Serhatoglu ve Livaoğlu (2019) çalışmasında elde edilen denklemler; Bursa ve Anadolu'nun farklı illerindeki minareler için geliştirilebilecek hızlı değerlendirme yönteminde kullanabilecek nitelikte (mak. hata 19%) değerler üretmektedir. Bunun yanında malzeme özelliklerini içermeyen denklem T_{3p} hem T_{5p} denklem sonucunun tutarlılığını kontrol etmek hem de malzeme hakkında fikrimiz yoksa yaklaşık bir değer belirleme imkânı sunmaktadır.
- Modal testle güncellenen modeller yazarlar tarafından performans analizlerinde kullanılarak ilgili yapıların olası deprem davranışları hakkında çalışmalar devam etmektedir.

Referanslar

- Livaoğlu, R., Baştürk, M. H., Doğangün, A., & Serhatoglu, C. (2016). Effect of geometric properties on dynamic behavior of historic masonry minaret. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(6), 2392-2402. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0622-2>
- Oliveira, C. S., Çaktı, E., Stengel, D., & Branco, M. (2012). Minaret behavior under earthquake loading: The case of historical Istanbul. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(1), 19-39. <https://doi.org/10.1002/eqe.1115>
- Serhatoglu, C. (2015). Bursa tarihi minarelerinin dinamik davranışlarının ve performanslarının incelemesi (Master's thesis, Uludağ Üniversitesi).
- Serhatoglu, C., & Livaoğlu, R. (2019). A fast and practical approximations for fundamental period of historical Ottoman minarets. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 120, 320-331.

BURSA İLİNDEKİ TARİHİ YIĞMA MİNARELERİN ÇEVRESEL TİTREŞİM ALTINDA DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

**Fikret Kuran¹, Berkay Aldırmaz², Serdal Kaya³, Ömer Tuğrul Turan⁴, Medine Ispir⁴,
Cem Demir⁴, Alper İlki⁴**

¹ Vakıflar Genel Müdürlüğü, Sanat Eserleri ve Yapı İşleri Daire Başkanlığı,
² Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kadir Has Üniversitesi,
³ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi,
⁴ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi,
*Sorumlu yazar, f.kuran@vgm.gov.tr

Abstract

Within the scope of "Examination of the Earthquake Performance of Bursa Historical Minarets with Analytical and Experimental Approaches and Obtaining Vulnerability Curves", UDAP (G-18-07), 12 minarets in ten different mosques were monitored under ambient vibration for a short period of time. Utilizing the ambient vibration data with operational modal analysis, natural frequencies, mod shapes and corresponding damping factors were investigated and compared with the available data in the literature. Ampirical frequency formulas for the first three mod shapes of the minaretes are proposed.

Keywords: Operational modal analysis, Dynamic properties, Ampirical formulas,

Anahtar Kelimeler: Operasyonel modal analiz, Dinamik özellikler, Ampirik denklemler

Giriş

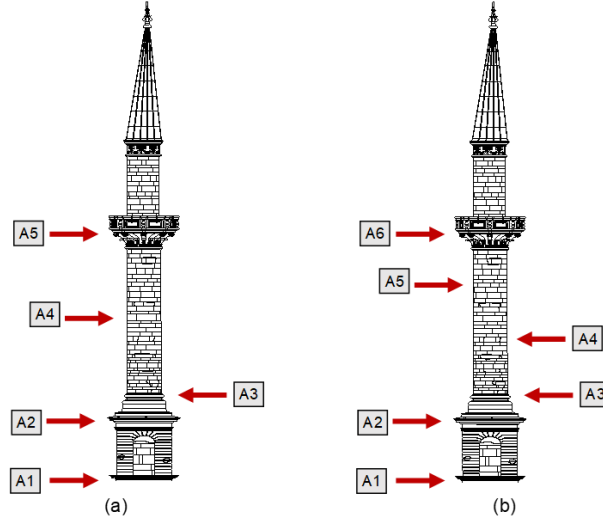
Bursa İl Merkezi'nde mevcut bulunan tarihi yığma minarelerin tipolojilerinin belirlenmesi ve sınıflandırma yapmak amacıyla arşiv ve saha araştırmaları yapılmıştır. Bu kapsamda, VGM arşivi taraması ve literatür araştırmasıyla, Bursa il merkezindeki 109 adet tarihi minarenin yapım yılları, malzemeleri (taş, tuğla veya almalı), yapım teknikleri (kuru derzli kesme taş, harç ile örgü vb.), ana yapı ile etkileşimleri, yükseklikleri, cidar kalınlıkları, narinlik oranları gibi kritik yapısal ve geometrik parametreler belirlenerek bir veri tabanı oluşturulmuştur. Bursa il merkezindeki 109 adet minareden, 95 minarenin gövde malzemesi tuğla, sekiz minarenin taş ve bir minarenin gövde malzemesi ise ahşap olduğu belirlenmiştir. Bursa İl Merkezi'nde bulunan ve proje kapsamında incelenen tarihi minarelerin büyük bir kısmının gövde malzemesi tuğla olduğundan bu çalışmada yalnızca tuğla gövdeli minareler incelenmiştir.

Minarelerin Çevresel Titreşim Altında Operasyonel Modal Analizleri

Bursa ili şehir merkezindeki tarihi tuğla minarelerin narinlik oranları da dikkate alınarak seçilen 10 farklı camide bulunan 12 minarede çevresel titreşim ölçümleri yapılarak doğal titreşim frekansı, mod şekli ve modal sönüm oranı gibi dinamik özellikleri belirlenmiştir. Çevresel titreşimler (yapı çevresindeki trafik vb günlük aktiviteler, yerküre ana plaklarının mikro-tremor yaratan hareketi, vb.) ve minarenin buna olan tepkisi, zemine ve minarenin farklı kotlarına yerleştirilmiş ivmeölçerler ile kaydedilmiştir. Elde edilen ivme-zaman verileri, Operasyonel

Modal Analizi (OMA) ile frekans tabanında incelenerek minarelere ait dinamik karakteristikler belirlenmiştir.

Çevresel titreşim testleri, beş veya altı adet üç eksenli, kuvvet geri beslemeli (forced balance) ve analog voltaj çıkışlı ivmeölçer ve 24 bit çözünürlüğe sahip veri sayısallaştırıcı sistem kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan ivmeölçerler $\pm 3g$ ($1g=9,81 \text{ m/s}^2$) aralığında ölçüm yapabilmekte olup düşük gürültü seviyesine sahiptir ($70 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$). Çevresel titreşim testleri için örnekleme frekansı 100 ya da 200 Hz olarak alınmıştır. İvmeölçerlerden biri zemine, diğerleri kesit değişiminin olduğu farklı kotlara yerleştirilmiştir (Şekil 1). Yüksek dayanımlı epoksi bazlı yapıştırıcı kullanılarak ivmeölçerler, minare içerisine monte edilmiştir. İvmeölçerlerin minare üzerindeki yerleşimi ve konumları; Alaaddin Paşa, Arap Mehmet, Orhan, Selimzade, Tuzpazarı, Üçkuzular Cami minareleri ve Yıldırım Beyazıt Cami batı ve doğu minareleri için Şekil 1-a'da, Hocaalizade, Hüdavendigar Camileri ve Ulu Cami batı ve doğu minareleri için Şekil 1-b'de gösterilmiştir. İvmeölçerler, A1'den A6'ya kadar numaralandırılmıştır. Minarelerin çevresel etkiler altındaki titreşim testleri, camilerin kullanım durumuna ve cemaatin ibadet saatlerine göre 15 dakika ile 45 dakika arasında değişen sürelerde yapılmıştır.



Şekil 2. Minarelerde ivmeölçer yerleşimi

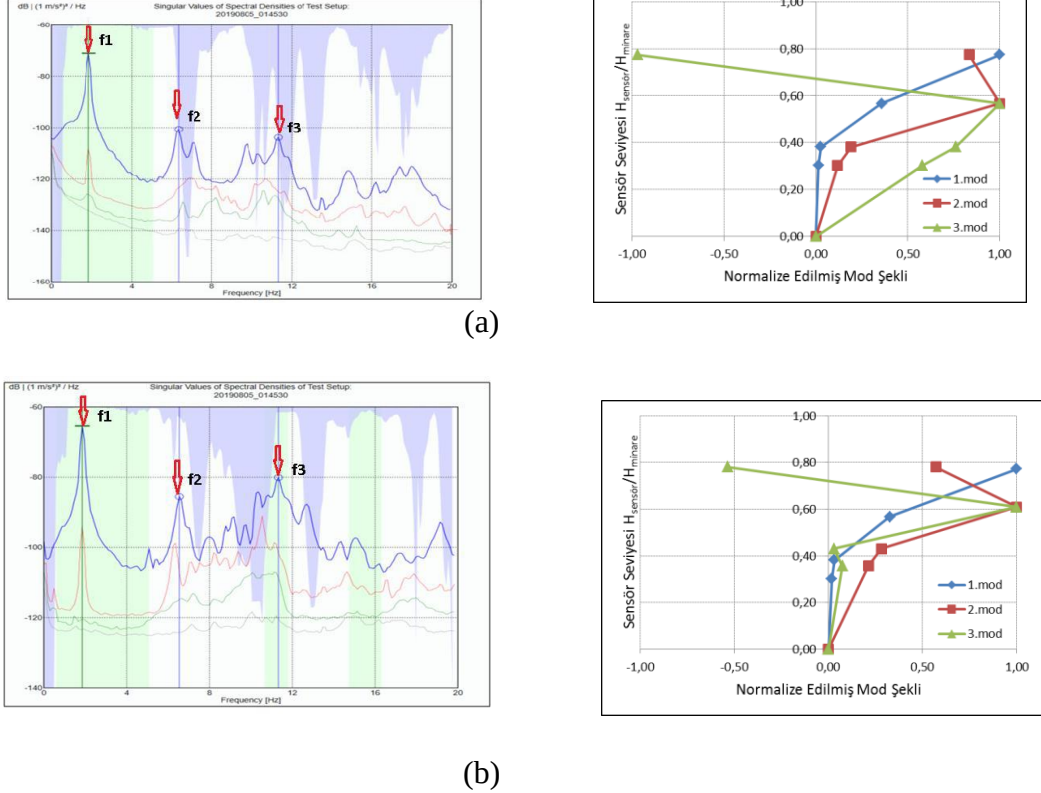
Operasyonel Modal Analiz (OMA) Sonuçları

Minarelerin dinamik karakteristikleri, Frekans Tabanında Ayırıştırma (FDD: Frequency Domain Decomposition) ve Geliştirilmiş Frekans Tabanında Ayırıştırma (EFDD: Enhanced Frequency Domain Decomposition) yöntemleri kullanılarak elde edilmiştir. Yöntemlerin uygulanması için Brincker vd. (2001a,b) adlı çalışmalardan faydalanılmıştır.

OMA yönteminde, genliği ve zamanla değişimi bilinmeyen çevresel etkilerin (rüzgâr, deprem, trafik, insan kaynaklı titreşimler, patlatma vb.) yapıya yerleştirilmiş olan ivmeölçerler sonucunda tepkisi kaydedilmektedir. Bu kayıtların zaman ve frekans tanım alanında analizinden yapının dinamik karakteristikleri (frekans, sönüm oranı, mod şekli) belirlenmektedir (Göksu vd. 2015). OMA yönteminde, yapıda ölçülen titreşim genliklerinin küçük olduğu (doğrusal elastik davranışın geçerli olduğu), malzeme özelliklerinin değişmediği, sınır şartlarının değişmediği, yapının sürekli ve bir bütün olduğu kabul edilmektedir. İvmeölçerlerle kaydedilen yapının tepkisinin matematiksel değerlendirmesinde farklı yöntemler olmasına karşılık, temel farklılık değişkenin frekans veya zaman olmasından kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada Artemis Modal Pro 4.0 yazılımı kullanılarak FDD ve EFDD yöntemleri kullanılmıştır.

FDD yönteminde çıkış verileri kullanılarak hesaplanan güç spektral yoğunluk matrisi Tekil Değer Ayrışımı Yöntemi (TDA, Singular Value Decomposition) ile ayrıştırılmaktadır. Tahrik fonksiyonunun geniş bantlı, modların ortogonal ve dinamik sistemin düşük sönümlü olması durumunda TDA ile bulunan her bir oto-spektral yoğunluk fonksiyonu, dinamik sistemin tek bir titreşim moduna karşılık gelmektedir. Mod şekilleri tekil vektörler kullanılarak bulunabilmektedir. EFDD yöntemi, FDD yönteminin genişletilmiş halidir. EFDD yönteminde, doğal titreşim frekansları ve sönüm oranları Ters Fourier Dönüşümü ile zaman tanım alanına dönüştürülen tek serbestlik dereceli sistemlerin güç spektral yoğunluk fonksiyonları kullanılarak elde edilmektedir. FDD yöntemi Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD, Fast Fourier Transform) analizinde Tekil Frekans Çizgisinin (Single Frequency Line) kullanılması esasına dayanmaktadır. Tahmin edilen doğal frekansların kesinliği HFD çözümlemesine bağlıdır ve modal sönüm hesaplanamamaktadır. EFDD yönteminde ise doğal frekanslar, mod şekilleri ve modal sönüm oranları da belirlenebilmektedir. Bu yöntemde sönüm, zaman ortamına dönüştürülmüş korelasyon fonksiyonunda logaritmik azalım ile hesaplanmaktadır (Brincker vd., 2001a, Brincker vd., 2001b) Modal sönüm oranlarının belirlenmesinde hata oranı fazla olabilmektedir. Bu çalışmada Artemis Modal Pro 4.0 yazılımı kullanılarak FDD ve EFDD yöntemleri kullanılmıştır (ARTEMIS EXtractor Pro software, 2010).

Mod şekillerinin çizilmesinde ivmeölçer sensörlerinin bulunduğu yükseklikler, minare taban kotu referans alınarak hesaplanmıştır. Minare toplam yüksekliğine, külah kısmı yığma olan minarelerde külah kısmı da dahil edilmiştir. Külah kısmı ahşap olan minarelerde ise minare toplam yüksekliğine külah dahil edilmemiştir. Ölçüm yapılan minarelerin kesit alanları küçük olduğu için her seviyeye bir adet ivmeölçer yerleştirilmiş ve bu nedenle burulma modları hesaplanamamıştır.



Şekil 2. Alaaddin Paşa Cami minaresi titreşim frekansları ve mod şekilleri, (a) X doğrultusu, (b) Y doğrultusu

Aynı minareler üzerinde farklı araştırmacılar tarafından da ölçüm yapılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen deneysel frekansın literatürdeki ilgili deneysel frekansa oranı (ζ/L), oldukça birbirine yakın olup ortalama olarak 1,04 olarak tespit edilmiştir. Aradaki farkın, ölçüm sistemindeki hatadan ziyade, mevsimsel sıcaklık farkı (termal etki) ve duvarlardaki nem oranının farklılığından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Sürekli izlenen tarihi yapılarda frekans değerleri sıcaklık ve nem etkisine bağlı olarak değişmektedir. Bu değişim sinüzoidal bir davranış göstermektedir (Dar ve Çaktı, 2019).

Tablo 1. Minarelerin dik doğrultularda EFDD yöntemi ile bulunan ilk üç moda ait frekans ve sönüm oranları

Minare	Mod	x doğrultusu		y doğrultusu	
		Titreşim frekansı (Hz)	Modal sönüm oranı %	Titreşim frekansı (Hz)	Modal sönüm oranı %
Alaaddin Paşa Cami	1	1.85	2.84	1.86	2.98
	2	6.31	1.70	6.55	1.81
	3	11.30	1.48	11.30	3.07
Arap Mehmet Cami	1	1.61	2.27	1.94	1.84
	2	6.67	1.04	7.03	1.13
	3	13.77	1.88	10.32	0.37
Hocaalızade Cami	1	1.04	2.50	1.17	2.07
	2	4.19	0.84	4.69	0.82
	3	9.71	1.22	9.46	2.26
Hüdavendigâr Cami	1	1.14	3.72	1.36	0.77
	2	5.28	2.48	4.72	2.45
	3	11.57	-	8.94	2.20
Orhan Cami	1	1.11	2.68	1.17	2.34
	2	4.57	2.19	4.62	4.24
	3	9.11	1.15	9.99	3.59
Selimzade Cami	1	2.60	1.40	2.87	1.48
	2	9.62	5.11	9.93	1.15
	3	13.60	0.43	14.96	1.26
Tuz Pazarı Cami	1	2.35	1.37	2.55	1.24
	2	7.76	0.85	8.01	1.00
	3	13.06	9.22	15.14	0.95
Üçkuzular Cami	1	2.16	4.06	2.33	2.59
	2	8.26	0.71	8.25	0.55
	3	14.85	1.52	14.90	1.82
Ulu Cami (Batı)	1	0.99	3.02	0.99	3.11
	2	4.05	1.08	4.13	1.43
	3	9.35	4.12	9.15	5.60
Ulu Cami (Doğu)	1	0.85	5.00	0.86	3.29
	2	3.35	0.96	3.42	0.95
	3	7.22	1.77	7.34	1.29
Yıldırım Beyazıt Cami (Batı)	1	1.87	1.73	1.91	1.72
	2	8.75	1.87	8.62	1.31
	3	14.44	1.25	14.01	2.11
Yıldırım Beyazıt Cami (Doğu)	1	2.07	2.62	2.00	1.49
	2	8.38	3.11	8.11	4.00
	3	13.12	1.76	12.61	2.50

Tablo 2. Literatürde ölçümü olan minarenin frekans değerleri

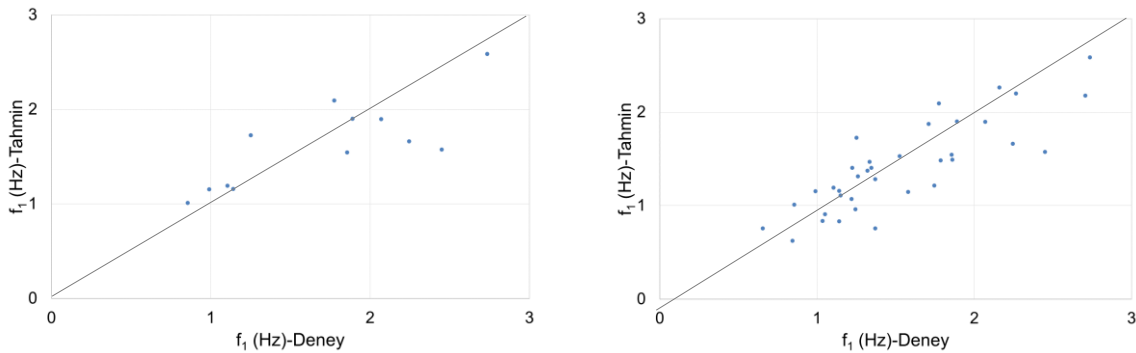
Minare	Çalışma-Ç f_1 (Hz)	Literatür-L f_1 (Hz)	Literatür Referans	Ç / L
Hocaalızade Cami	1.11	1.00	Baştürk (2013)	1.11
Hüdavendigar Cami	1.23	1.13	Serhatoğlu (2015)	1.09
Ulu Cami Batı	0.99	0.98	Serhatoğlu ve	1.01
Ulu cami Doğu	0.84	0.82	Livaoğlu (2019)	1.02
Yıldırım Beyazid Batı	1.90	1.93	Serhatoğlu ve Livaoğlu (2019)	0.98

Önerilen Frekans Bağlıları

Bu çalışma kapsamında çevresel titreşim testleri yapılan minarelerin birinci moduna karşı gelen frekans değerleri ile minarelerin geometrik ve malzeme özellikleri arasında bir ilişki belirlenmiş ve Eş.1’de verilen bağıntı önerilmiştir. Bu denklemin belirleme katsayısı (R^2) 0.72 olarak elde edilmiştir. Bu denklemde; A en kesit alanını, I eylemsizlik momentini (m^4) ve H ise kürsü üst kotundan petek üst kotuna kadar olan minare yüksekliğini (küp, gövde ve petek yüksekliği toplamı) belirtmektedir. Minarenin külah kısmı ahşap değil de yığma olması durumunda minare yüksekliğine yığma külah yüksekliği de dahil edilmektedir.

$$f_1 = 150 \frac{I^{0,92}}{H^{1,25} A^{1,25}} \quad (1)$$

Eş.1 kullanılarak tahmin edilen frekans değeri ile deneysel ilgili frekansın karşılaştırılması Şekil 3-a’da verilmektedir. Tahmin edilen frekansın ilgili deneysel frekansa oranı (C/T) ve Eş.1’in mutlak hata oranları hesaplanmıştır. C/T oranları 0.63-1.41 arasında değişmekte olup ortalama değeri 1.00 olarak elde edilmiştir. Mutlak hata oranları ise 0.01-0.41 arasında değişmektedir. Mutlak hata toplamı (IAE) 0.15 olup doğruluk derecesi Kategori I olmaktadır. Eş. 1 kullanılarak, bu çalışma kapsamında yapılan OMA analizleri sonuçlarına ilave olarak literatürdeki deneysel olarak bulunan birinci moda karşılık gelen frekans değerleri ile de karşılaştırılmış deneysel-tahmin karşılaştırılması Şekil 3-b’de verilmektedir (Baştürk 2013, Oliviear vd. 2012, Serhatoğlu 2015). C/T oranları 0.59-1.41 arasında değişmekte olup ortalama değeri 0.93 olarak elde edilmiştir. Mutlak hata oranları ise 0.00-0.41 arasında değişmektedir. Mutlak hata toplamı (IAE) 0.15 olup doğruluk derecesi Kategori I olmaktadır. Literatürdeki minareler sadece tuğla gövdeli olmayıp, taş gövdeli minareleri de kapsamaktadır. Eş.1, tüm minare türleri için de birinci moda karşılık gelen frekansın tahmini için de kullanılabilir.



Şekil 3. a) Deneysel ve tahmin edilen birinci moda ait frekans karşılaştırılması (çalışma),
b) Deneysel ve tahmin edilen birinci moda ait frekans karşılaştırılması (çalışma ve literatür dahil)

Minarelerin planda birbirine dik doğrultularındaki ikinci ve üçüncü modlara ait frekans değerlerinin, ilgili doğrultudaki ilk moda ait frekansla arasındaki olası bir ilişkinin varlığı da araştırılmıştır. İlk üç moda ait frekanslar arasındaki ilişkinin düzeyini anlamak için birinci moda ait frekans değerleri (f_1) ile ikinci ve üçüncü modlara ait frekans değerleri (f_2 ve f_3) arasındaki korelasyon katsayısı hesaplanmıştır. f_1 ve f_2 arasındaki ilişkinin korelasyon katsayısı (R) 0.90; f_1 ile f_3 arasındaki ilişkinin korelasyon katsayısı ise 0.77 olarak hesaplanmıştır. Bu katsayıların 1'e yakın olması iki değişken arasındaki ilişkinin varlığını ve katsayıların pozitif işaretli olması da bu ilişkinin orantılı olduğunu göstermektedir. Elde edilen frekans verisi kullanılarak regresyon analiziyle Eş.2 elde edilmiştir. Planda birbirine dik doğrultularındaki ilk moda ait frekans değerlerinin bilinmesi durumunda, Eş.2 kullanılarak ikinci ve üçüncü moda ait frekans değerleri yaklaşık olarak tahmin edilebilmektedir.

$$f_n = 2^n f_1^{\left(1 - \frac{n}{10}\right)} \quad n = 2,3 \quad (2)$$

Sonuç

Bu çalışmada Bursa il merkezindeki tuğla gövdeli minarelerin genelini yansıtacak farklı narinlik oranlarına sahip 12 adet tuğla gövdeli minarede OMA yöntemi ile dinamik özellikleri belirlenmiş ve ortogonal doğrultularda ilk üç mod için frekans tahminine yönelik ampirik eşitlikler geliştirilmiştir. Ampirik eşitliklerden elde edilen frekans tahminlerinin, bu çalışma ve literatürde deneysel olarak bulunan frekans değerleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, zaman tanım alanında doğrusal olmayan artımsal dinamik analiz model kalibrasyonlarında kullanılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma, AFAD-UDAP tarafından desteklenen “Bursa Tarihi Minarelerinin Deprem Performanslarının Analitik ve Deneysel Yaklaşımlar ile İncelenmesi ve Hasargörebilirlik Eğrilerinin Elde Edilmesi” isimli ve (G-18-07) numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu desteklerinden dolayı AFAD-UDAP’a teşekkür ederiz. Ayrıca, yerinde yapılan incelemelere müsaade ederek her türlü kolaylığı sağlayan Bursa Vakıflar Genel Müdürlüğü’ne ve Bursa İl Müftülüğü’ne; zemin konusundaki değerlendirmeleri için Dr. Emre HAŞAL’a; yerindeki incelemeler, ölçümler ve çizimler için Dr. Öğr. Üyesi Ömer DABANLI’ya ve Dr. İlknur DALYAN’a teşekkür ederiz.

Referanslar

ARTEMIS EXtractor Pro software (2010). Issued by Structural Vibration Solutions ApS. NOVI Science Park, Niels Jernes Vej 10, DK 9220 Aalborg East, Denmark

Baştürk, M. H. (2013). “Bursa tarihi minarelerinin dinamik davranışlarının modal analiz yöntemi ile incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uludağ Üniversitesi

Brincker, R., Ventura, C E., Andersen, P. (2001a). “Damping estimation by frequency domain decomposition”, Proc. 19th Int. Modal Analysis Conf. (IMAC), Kissimmee, FL, 698-703

- Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P. (2001b). “Modal identification of output-only system using frequency domain decomposition”, *Smart Mater. Struct.*, 10(3): 441-455
- Goksu, C., Inci P., Demir, U., Yazgan, U. and Ilki, A. (2017). “Field testing of substandard RC buildings through forced vibration test”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(8), 3245-3263.
- Oliveira, CS., Çaktı, E., Stengel, D. and Branco, M. (2012). “Minaret Behavior under Earthquake Loading: The Case of Historical Istanbul”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (41) 19-39
- Serhatoğlu, C. (2015). “Bursa Tarihi Minarelerinin Dinamik Davranışlarının ve Performanslarının İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uludağ Üniversitesi.*

YIĞMA YAPILARIN KIRILGANLIK ANALİZİ

Murat Altuğ Erberik^{1*}

¹Prof. Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

* altug@metu.edu.tr

Özet

Deprem kayıplarının çok sık yaşandığı ülkemizde, olası deprem etkilerinin belirlenmesi ve bu etkilerin hafifletilmesi amacıyla çeşitli stratejilerin ortaya konulması gerekmektedir. Bu hedefe ulaşmanın önkoşulu, kentsel deprem risklerinin tespit edilmesidir. Deprem riskinin yapı mühendisliği ile ilgili kısmı, mevcut yapı stokunun kırılğanlığının belirlenmesidir. Literatüre bakıldığında dünyada ve Türkiye’de bu konuda pek çok çalışma olduğu görülmektedir. Ancak yığma yapıların sayısal olarak modellenmesi ile ilgili varolan güçlükler ve kırılğanlık eğrilerinin türetilmesinde ihtiyaç duyulan fazla sayıda analiz gerçeği, araştırmacıları bu konuda basitleştirilmiş ve daha az gerçekçi yaklaşımlar kullanmaya zorlamaktadır. Gelecekte hesaplama hızlarının ve depolama kapasitelerinin daha da iyileşmesi durumunda bu hususun bir sorun olmaktan çıkabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yığma yapılar, kırılğanlık analizi, hasar görebilirlik, sınır durum, sayısal modelleme yaklaşımı.

Genel Bilgi

Ülkemizde son otuz yıldır kentsel alanlarda meydana gelen orta-büyük ölçekli depremler hem maddi hem de manevi açıdan çok büyük kayıplara yol açmıştır. Bu yıkıcı afetler sebebiyle oluşan hasar, Türkiye gibi gelişmekte olan bir ülkenin ekonomisinde büyük sıkıntılara neden olmaktadır. Buna ek olarak ortaya çıkan üretim kaybının sonucu, ekonomik zararlar katlanarak artmıştır. Ülke nüfusunun yoğun olarak yaşadığı bölgelerin aktif fay hatlarının yakınında bulunması, yakın gelecekte bu tür felaketlerle karşılaşmaya devam edeceğimizin bir göstergesidir. Öyleyse olası deprem etkilerinin belirlenmesi ve bu etkilerin hafifletilmesi amacıyla çeşitli stratejilerin ortaya konulması gerekmektedir. Bu hedefe ulaşmanın önkoşulu, kentsel deprem risklerinin belirlenmesidir. Deprem riskinin yapı mühendisliği ile ilgili kısmı, mevcut yapı stokunun kırılğanlığının (hasar görebilirliğinin) belirlenmesidir.

Deprem olayında hasar görebilirlik, yapısal davranış belirsizliği ve deprem tehlikesinin rastlantısallığının bir arada incelenmesi ile ifade edilebilir. Bunu gerçekleştirmek için kullanılacak araç, yapılara ait kırılğanlık eğrileridir. Kırılğanlık eğrileri sayesinde bir yapının ya da yapı sınıfının hasarsızlıktan göçmeye kadar tüm davranış spektrumunu ortaya çıkarılabilir. Bu bağlamda kırılğanlık, herhangi bir yer hareketi seviyesi için bir hasar sınırının aşılma olasılığı olarak Denklem 1’de görüldüğü üzere ifade edilebilir (Erberik 2015).

$$F = P[R \geq LS|HI] \quad (1)$$

Bu denklemde, F deprem hareketi altında yapısal kırılğanlığı, $P[\cdot]$ aşılma olasılığını, R seçilen tepki parametresini (deformasyon, kuvvet, hız vs.), LS kapasiteyi ortaya koyan sınır durum

ifadesini, H_I ise yer hareketi seviyesini temsil eder. Buna göre yapılardaki kırılgenlik üç çeşit parametreye bağlıdır: (1) yer hareketi seviyesi, (2) yapısal kapasite özellikleri, (3) herhangi bir talep karşısında bina performansını temsil eden yapısal tepki parametreleri.

Yığma yapılar, kentsel alanlarda sıklıkla rastlanılan yapı türlerinden biridir. Özellikle ülkemizde, 70'li yıllar ile 90'lı yıllar arasında çok fazla sayıda yığma yapı inşa edilmiştir. Bu yapıların önemli bir bölümü halen mevcut yapı stokumuzda yer almaktadır. Buna ek olarak, kültürel mirasımızı oluşturan tarihi yapıların önemli bir kısmı da yığma yapılardan oluşmaktadır. Bu yapılarla ilgili en büyük sorun, yatay deprem yükleri altında hasar görme potansiyellerinin yüksek olmasıdır. Bu sebepten dolayı, bu tür yığma türü tekil yapıların ve yapı stoklarının hasar görebilirliklerinin belirlenmesi deprem risk ve zarar azaltma planlamaları açısından önem taşımaktadır. Hasar görebilirlik tayini için kullanılan yöntem ise kırılgenlik analizidir. Bu çalışmada, yığma yapılar için kırılgenlik analizlerinin nasıl uygulanacağı literatürden örneklerle kısaca anlatılmaktadır.

Yığma Yapıların Kırılgenlik Analizinin Tarihçesi

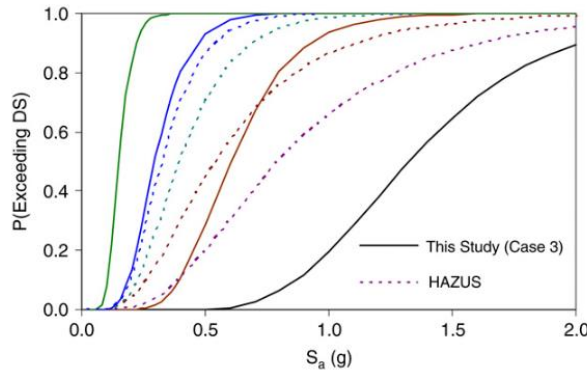
Kırılgenlik eğrilerinin çıkarılması aşamasında farklı yaklaşımlar kullanılabilir. Kırılgenlik analizleri için gerekli olan veriler deneysel çalışmalardan, deprem sonrası saha gözlemlerinden, uzman görüşüne bağlı olarak veya sayısal modellerden elde edilebilir. Uzman görüşü sayesinde türetilmiş kırılgenlik eğrileri için en uygun örnekler olarak ATC-13 dökümanı (Applied Technology Council 1985) ve HAZUS deprem kayıp tahmin metodolojisi (National Institute of Building Sciences 1999) verilebilir. Bu tür yaklaşımdaki en büyük sorun, uzman görüşü sonucu elde edilen verinin son derece öznel olmasıdır. Gözlemsel veri ile elde edilen kırılgenlik eğrileri kapsamında Rosetto ve Elnashai (2003), 19 farklı depremden ve bölgeden 340,000 binanın yapısal hasar bilgilerini toplayarak Avrupa-tipi betonarme çerçeveli binalar için kırılgenlik eğrileri türetmişlerdir. Ancak çoğu durumda deneysel veya gözlemsel veri, kırılgenlik eğrileri için ihtiyaç duyulan veri çeşitliliğini ve aralığını sağlayamayabilir. Halbuki sayısal modelleme tekniği sayesinde yapısal parametreler rassal değişken olarak kabul edilip çok sayıda simülasyon hazırlanabilir. Bu yapısal simülasyonlara uygulanan dinamik analizler sonucunda çok geniş bir davranış yelpazesini kapsayan veri istatistiği elde edilebilir. Bu sebepten dolayı günümüzde pek çok araştırmacı kırılgenlik eğrilerini sayısal modeller kullanarak türetmektedir. Sayısal simülasyon tabanlı kırılgenlik analizlerinde bir sonraki aşamada yanıtlanması gereken sorular, hangi detay seviyesinde modelleme yapılacağı ve hangi analiz türünün seçileceğidir. Modelleme aşamasında basit tek dereceli sistemlerden çok parametrelili ve üç-boyutlu sonlu elemanlar yaklaşımıyla oluşturulmuş modellere kadar geniş bir seçenek yelpazesi mevcuttur. Modelleme yaklaşımı ile ilgili kararları verirken, kırılgenlik eğrisinin belirli bir yapı için mi yoksa bir bina popülasyonunu (yapı sınıfını) temsil eden jenerik bir yapı için mi elde edileceği, hangi yapı ve malzeme türü için türetilceği, kırılgenlik analizi sonuçlarının hangi amaçla kullanılacağı gibi faktörler önem kazanmaktadır.

Yığma yapıların modellenmesi, betonarme ve çelik çerçeveli yapılara göre bazı zorluklar içermektedir. Yığma yapıları oluşturan yığma birim ve harç, biraraya geldiğinde bambaşka özelliklere sahip olur ve doğrusal olmayan davranış sergiler. Bunun yanı sıra, malzeme özelliklerinin sahip olduğu değişkenlik, modelleme aşamasında ilgili parametrelerin belirlenmesini zorlaştırır. Bu aşamada çok sayıda ve farklı deneyler gerçekleştirmek gerekebilir. Yığma duvarlar genellikle iki boyutlu, düzlemsel elemanlar oldukları için, bu tür elemanları en gerçekçi şekilde modellemek amacıyla çok sayıda küçük eleman ağlarında oluşan sonlu elemanlar yaklaşımı kullanılır. Ancak kırılgenlik eğrisini elde etmek için gereken analiz sayısı fazla olduğundan, her biri oldukça uzun zaman alan ve çok büyük çıktı dosyaları yaratan

sonlu elemanlar yaklaşımı uygun ve pratik olmayabilir. Bu tür durumlarda çözüm, doğruluktan biraz feragat ederek daha az detaylı ama daha fazla varsayım içeren basitleştirilmiş modelleme teknikleri kullanmaktır.

Yığma yapıların kırılmalık analizleri ile ilgili olarak sayısal modelleme bazlı ilk çalışmalardan biri, Park v.d. (2009) tarafından gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, Amerika Birleşik Devletleri'nde yer alan az katlı yığma yapılar için basitleştirilmiş ama yeterli doğrulukta sonuç veren bir sayısal model yaklaşımı kullanmışlardır. Bu model yaklaşımına göre binadaki tüm duvar parçaları doğrusal olmayan yatay yaylarla idealize edilmiş ve bu yaylar birbirlerine seri ve paralel olarak bağlanmıştır. Duvar parçalarını temsil eden yayların yatay tersinir yükler altında farklı düzlem-içi davranış şekilleri (kayma, çapraz çekme, salınım) göstermesi sağlanmıştır. Modellemede ayrıca duvarların düzlem-dışı hareketleri de dikkate alınmıştır. Sentetik yer hareketleri altında sayısal modellerin dinamik analizleri gerçekleştirilmiş, ortaya çıkan tepki istatistiği HAZUS metodolojisinde daha önce belirlenmiş olan sınır durumlar ile karşılaştırılarak kırılmalık eğrileri elde edilmiştir. Şekil 1'de Park v.d. ve HAZUS tarafından elde edilmiş olan az katlı yığma yapı kırılmalık eğrileri karşılaştırılmaktadır. Tek bir yapı için ve detaylı sayılabilecek bir sayısal model ile elde edilmiş kırılmalık eğrilerinin (Park v.d.) bir bina alt grubu için jenerik olarak ve uzman görüşü kullanılarak elde edilmiş kırılmalık eğrilerinden farklı sonuçlar vermesinin normal olduğu düşünülmektedir.

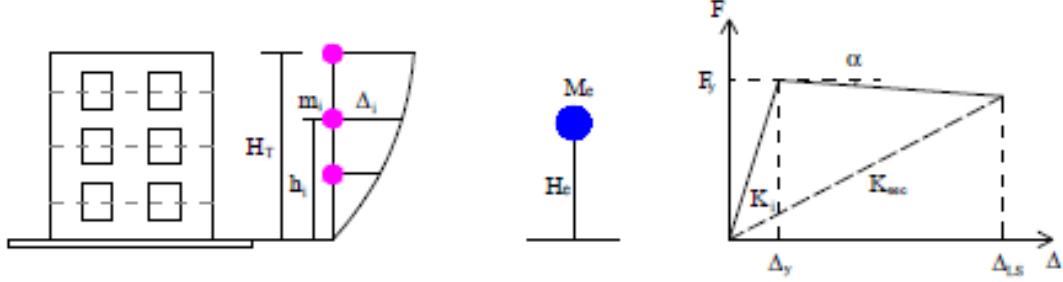
2013 yılında Frankie v.d., A.B.D.'nin orta ve doğu kesimlerinde bulunan konut-tipi yığma binaların kırılmalık eğrilerini Kapasite Spektrum Yöntemi kullanarak elde etmişlerdir. Kapasite için statik itme analizlerini, talep içinse sentetik olarak üretilmiş yer hareketlerinden elde edilen tepki spektrumlarını kullanmışlardır.



Şekil 1. Az katlı yığma yapılar için Park v.d. (2009) tarafından elde edilen kırılmalık eğrilerinin HAZUS metodolojisine ait kırılmalık eğrileri ile karşılaştırılması

Yapı stokunun önemli bir bölümünün eski ve geleneksel yığma yapılardan oluştuğu İtalya'da pek çok araştırmacı yığma yapıların kırılmalık analizleri üzerine çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmaların bazıları mekanik modeller kullanılarak (Dona v.d. 2020) bazıları ise İtalya'da meydana gelmiş olan büyük depremler sonrası saha incelemesine ve gözleme dayalı veri kullanılarak (Zuccaro v.d. 2020, Lagomarsino v.d. 2021) elde edilmiştir. Başka bir İtalyan araştırma grubu, yığma yapıların yer değiştirme esaslı kırılmalık eğrileri üzerine çalışmış ve bu yöntemi Pakistan'da bulunan tipik yığma yapılara uygulamışlardır (Ahmad v.d. 2010). Bu çalışmada doğrusal olmayan yapısal analizler, eşdeğer tek dereceli sistem modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Yer değiştirme esaslı kırılmalık analizinin benzer bir yaklaşımı Kanada'da bulunan az katlı taş yığma yapılar için kullanılmıştır (Abo-El-Ezz v.d. 2013).

Yukarıda bahsi geçen örnek çalışmalar dışında, yığma yapıların kırılabilirlik eğrilerinin türetilmesi üzerine literatürde başka çalışmalar da yer almaktadır. Bu araştırmalar ile ilgili çok kapsamlı bir derleme çalışması Lagomarsino ve Cattari (2014) tarafından yapılmıştır.



Şekil 2. Doğrusal olmayan analizler için tek dereceli sistem modeli (Ahmad v.d. 2010)

Yığma Yapıların Kırılabilirlik Analizleri ile İlgili Ulusal Çalışmalar

Ülkemizde yığma yapılar için gerçekleştirilmiş olan kırılabilirlik çalışmaları için ilk örneklerden biri, D'Ayala (2004) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, İstanbul'un tarihi dokusu içinde Balat'ta yer alan eski ve geleneksel yığma yapıların kırılabilirlik eğrileri saha verileri kullanılarak elde edilmiştir.

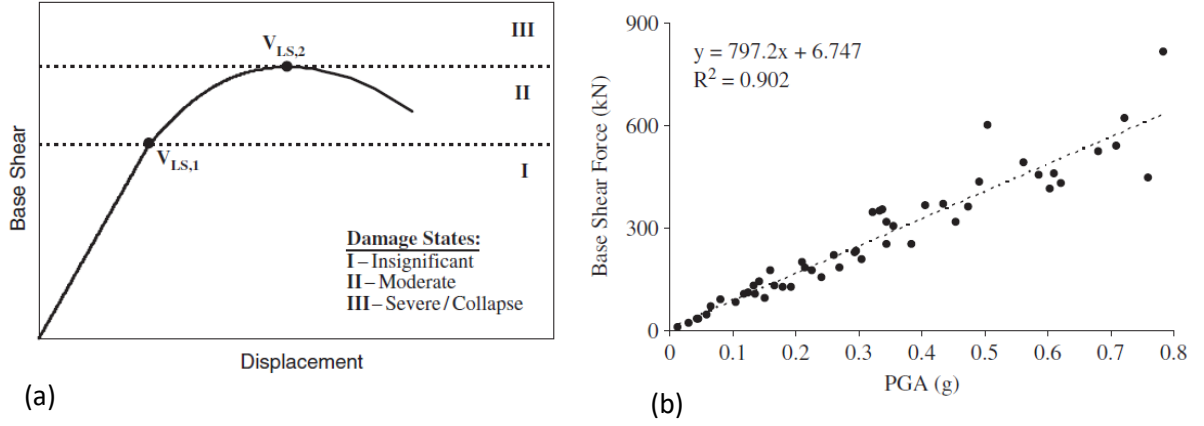
Sayısal analiz içeren ilk kırılabilirlik çalışması, İstanbul Masterplan kapsamında yığma yapıların kademeli değerlendirme yöntemi için gerçekleştirilmiştir (Erberik 2008). Bu çalışmada, deprem riski yüksek olan ilçelerdeki yığma bina stoku genel yapısal parametreler kullanılarak sınıflandırılmış ve her sınıf için jenerik olarak türetilmiş sayısal modeller hazırlanmıştır. Bu modeller, elemanların mekanik özelliklerindeki değişkenlikler de göz önüne alınarak talep için dinamik analiz, kapasite içine statik itme analizi altında incelenmiştir. Deprem talebi ve kapasitesi Denklem 2'de verilen bağıntı sayesinde karşılaştırılmış ve sınır durum aşılma kapasiteleri hesaplanmıştır.

$$P(LS_i/PGA) = 1 - \Phi \left[\frac{\ln(V_{LS,i}) - \ln(V_D)}{\sqrt{\beta_C^2 + \beta_D^2 + \beta_M^2}} \right] \quad (2)$$

Bu denklemde V_{LS} herhangi bir sınır durum (LS) için kesme kuvveti kapasitesini (Şekil 3a), V_D kesme kuvveti talebini (Şekil 3b), paydadaki β parametreleri ise sırasıyla kapasite, talep ve modelleme kaynaklı belirsizlikleri temsil etmektedirler. Bu yöntem kullanılarak 120 farklı yığma alt sınıfı için kırılabilirlik eğrisi setleri elde edilmiştir.

2010 yılında Elazığ'da meydana gelmiş olan deprem sonrasında çok sayıda yığma yapının düzlem-dışı duvar hasarına maruz kalmış olmasından yola çıkılarak 2008 yılında önerilmiş yöntem (Erberik 2008) düzlem-dışı etkiler de ilave edilerek farklı yığma bina alt sınıfları için her iki davranış şeklini de dikkate alan kırılabilirlik eğrileri türetilmiştir (Ceran ve Erberik 2013).

Bölgesel deprem risk tahmini için mevcut yığma yapı alt gruplarına ait kırılabilirlik eğrilerinin gerçekleştirildiği bir başka çalışmada, Erzincan şehir merkezi'ndeki yığma bina tiplerine ait dinamik analizler bölgenin sismolojik yapısına uygun şekilde üretilmiş sentetik yer hareketleri altında tek serbestlik dereceli yapısal sistem yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ortaya çıkan kırılabilirlik eğri setleri, senaryo depremler altında bölgesel risk tahmini amacıyla kullanılmıştır (Karimzadeh v.d. 2018, Karimzadeh v.d. 2020).



Şekil 3. a) Kapasite için statik itme analizi ve sınır durumlar, b) Talep için dinamik analizler ile tepki istatistiği (Erberik 2008)

Sonuç

Yığma yapıların sayısal olarak modellenmesi ile ilgili varolan güçlükler, kırılgenlik analizi yaklaşımlarını da doğrudan etkilemektedir. Tekil ve özel yığma yapıların analizlerinde bile detaylı ve üç boyutlu sonlu elemanlar modellemesinden kaçınılmaktadır. Genellikle duvar makro model veya eşdeğer çerçeve modeli yaklaşımları tercih edilmektedir. Bölgesel deprem riski çalışmalarında çok sayıda bina sınıfının kırılgenlik eğrilerine ihtiyaç duyulduğu zaman ise, çoğunlukla eşdeğer tek serbestlik dereceli yapısal sistem yaklaşımı ile üretilen jenerik modeller kullanılmaktadır. Çok sayıda analizi detaylı modeller ile gerçekleştirmek günümüzün bilgisayar teknolojisinde bile hala tercih edilmeyen bir yaklaşımdır. Hesaplama hızlarının ve depolama kapasitelerinin daha da iyileşmesi durumunda bu husus ileride bir sorun olmaktan çıkabileceği düşünülmektedir.

Referanslar

Abo-El-Ezz A, Nolle MJ, Nastev M (2013) Seismic fragility assessment of low-rise stone masonry buildings Earthq Eng & Eng Vib 12: 87-97

Ahmad N, Crowley H, Pinho R, Ali Q (2010) Derivation of displacement-based fragility functions for masonry buildings. Proceedings of the 14th European Conference on Earthquake Engineering, Ohrid, North Macedonia

Applied Technology Council (1985) Report ATC-13: Earthquake damage evaluation data for California. Applied Technology Council, Palo Alto

Ceran HB, Erberik MA (2013) Effect of out-of-plane behavior on seismic fragility of masonry buildings in Turkey. Bull Earthq Eng. 11: 1775–1795

D'Ayala D (2004). Correlation of fragility curves for vernacular building types: houses in Lalitpur, Nepal and in Istanbul, Turkey. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver B.C., Canada

- Donà M, Carpanese P, Follador V, Sbrogiò L, da Porto F (2020) Mechanics-based fragility curves for Italian residential URM buildings. *Bull Earthq Eng.* 19: 3099–3127
- Erberik MA (2008) Generation of fragility curves for Turkish masonry buildings considering in-plane failure modes. *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 37:387–405
- Erberik MA (2015) Seismic fragility analysis. *Encyclopedia of Earthquake Engineering*: 1-10, Springer.
- Frankie TM, Gencturk B, Elnashai AS (2013) Simulation-based fragility relationships for unreinforced masonry buildings. *J. Struct. Eng.*, 139(3): 400-410
- Karimzadeh S, Askan A, Erberik MA, Yakut A (2018) Seismic damage assessment based on regional synthetic ground motion dataset: a case study for Erzincan, Turkey. *Nat Hazards* 92(3): 1371-1397
- Karimzadeh S, Kadas K, Askan A, Erberik MA, Yakut A (2020) Derivation of analytical fragility curves using SDOF models of masonry structures in Erzincan (Turkey). *Earthq and Struct* 18(2): 249-261
- Lagomarsino S, Cattari S (2014) Fragility functions of masonry buildings. *SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk*. Eds. K. Pitilakis, H. Crowley, A.M. Kaynia, Springer.
- Lagomarsino S, Cattari S, Ottonelli D (2021) The heuristic vulnerability model: fragility curves for masonry buildings. *Bull Earthq Eng.* 19, pages 3129–3163
- National Institute of Building Sciences (1999) HAZUS technical manual. Prepared for Federal Emergency Management Agency, Washington, DC
- Park J, Towashiraporn P, Craig JI, Goodno BJ (2009) Seismic fragility analysis of low-rise unreinforced masonry structures. *Eng Struct* 31: 125–137
- Rossetto T, Elnashai A (2003) Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data. *Eng Struct* 25:1241–1263
- Zuccaro G, Perelli FL, De Gregorio D, Cacace F (2020) Empirical vulnerability curves for Italian masonry buildings: evolution of vulnerability model from the DPM to curves as a function of acceleration. *Bull Earthq Eng.* 19: 3077–3097

BURSA İLİNDEKİ TARİHİ MİNARELERİN KIRILGANLIK EĞRİLERİNİN ELDE EDİLMESİ

**Elif Durgut¹, Fikret Kuran², Medine Ispir³, Cem Demir³, Ömer Tuğrul Turan³ ve
Alper İlki^{3*}**

¹Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi

²Vakıflar Genel Müdürlüğü, Sanat Eserleri ve Yapı İşleri Daire Başkanlığı

³İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi

*Sorumlu yazar, ailki@itu.edu.tr

Abstract

It is important to determine the structural behavior of historical buildings under the effects of earthquakes of different content and magnitude, to improve them by intervening beforehand when necessary, and to ensure that these structures can survive in the future. In this study, modal analysis and material value update of the historical Hocaalızade, Arap Mehmed and Ulu Mosque (East) Minarets in Bursa province, 11 different earthquake records and both directions of each earthquake record were applied to the minaret at the same time, incremental dynamic analyzes were made and fragility curves has been obtained. The values obtained as a result of the analysis for these minarets were evaluated based on the relevant earthquake performance limits given for non-linear analysis approaches in the Earthquake Risk Management Guide for Historic Buildings (2017).

Keywords: Fragility Curves, Historical Masonry Minarets, Incremental Dynamic Analysis, Nonlinear Analysis

Anahtar Kelimeler: Tarihi Yığma Minareler, Doğrusal Olmayan Analiz, Artımsal Dinamik Analiz, Kırılabilirlik Eğrileri

Giriş

Cami beden duvarlarına bitişik veya ayrı olarak inşa edilmiş olan tarihi minarelerin, yüksek ve narin olmaları sebebiyle deprem etkileri altında diğer yığma yapılardan farklı bir davranış sergiledikleri ve depremlerde yaygın olarak hasar gördükleri bilinmektedir. Minarelerin deprem etkileri altındaki davranışının incelenmesi konusunda literatürde az sayıda çalışma bulunmaktadır (Doğangün vd., 2008; Livaoglu vd., 2014; Serhatoğlu, 2015; Alamehmet, 2019; Durgut, 2021; Durgut vd., 2021).

Bu çalışma, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) Ulusal Deprem Araştırma Programı (UDAP) G-18-07 numaralı ve “Bursa Tarihi Minarelerinin Deprem Performanslarının Analitik ve Deneysel Yaklaşımlar ile İncelenmesi ve Hasargörebilirlik Eğrilerinin Elde Edilmesi” isimli proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bursa’da yer alan tarihi minareler için gerçekleştirilmiş olan literatür taraması ve saha ziyaretleri sonrasında, farklı tipolojideki minareleri temsil edecek şekilde üç adet minare (Hocaalızade, Arap Mehmed ve Ulu Cami Minareleri) seçilerek, çok sayıda doğrusal olmayan analiz içeren artımsal dinamik analizler (IDA: Incremental Dynamic Analysis) sonrasında bu minarelere ait kırılabilirlik eğrileri

elde edilmiştir. Elde edilen bu kırılganlık eğrileri, benzer tipolojilere sahip minareler için kullanılabilir. Bu sayede hasar tahminlerinin önceden yapılabilmesi mümkün olmakta ve erken müdahale edilerek önlemler alınabilmektedir.

İncelenen Minarelerin Özellikleri

Bu çalışma kapsamında detaylı yapısal analizler sonucunda kırılganlık eğrileri elde edilen Hocaalızade, Arap Mehmed ve Ulu Cami Minareleri; Erken Dönem Osmanlı mimarisinin önde gelen örnekleri arasında yer almaktadır. Bu minarelerin günümüzdeki genel görünüşleri Şekil 1’de verilmiştir. Ayrıca, tipik bir minarenin farklı bölümleri ve bu bölümleri tanımlamak amacıyla kullanılan terimler yine aynı şekilde gösterilmiştir.

Bu tarihi minareler günümüze kadar çok sayıda depreme maruz kalmıştır. Bursa ve civarını etkileyen ve 1855 yılında meydana gelen depremde, Hocaalızade Cami Minaresi’nin şerefesinin hasar gördüğüne, Ulu Cami’nin doğu ve batı minarelerinin şerife üstünde kalan bölümlerinin yıkıldığına dair bilgiler bulunmaktadır (Özaydın, 2017). Arap Mehmed Cami için ise hasar ile ilgili bir bilgi verilmemiştir. İncelenen her bir minare için kullanılmış olan malzemeler ve boyutları, mevcut rölöve çizimleri incelenerek ve yerinde ölçümler yapılarak belirlenmiştir. Bu bilgiler Hocaalızade, Arap Mehmed ve Ulu Cami Minareleri için Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Sırasıyla Hocaalızade, Arap Mehmed ve Ulu Cami minarelerinin görünüşleri ve tipik bir minarenin bölümleri

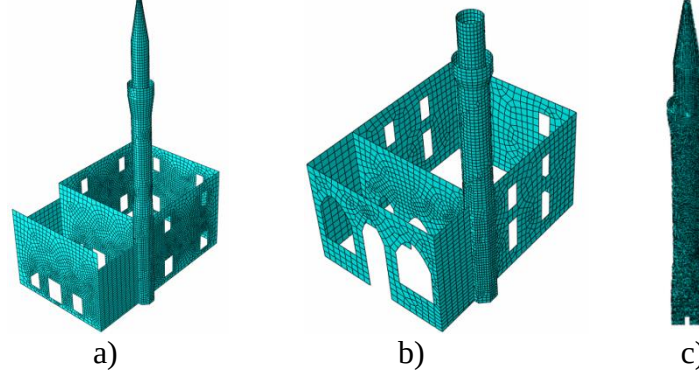
Tablo 1. İncelenen minarelere ait özellikler

Camiler	Toplam Yükseklik (m)	Gövde Yüksekliği (m)	Gövde Dış Çap (m)	Gövde Cidar Kalınlığı (m)	Ana Yapı İle Bağlantı	Çekirdek	Gövde Malzemesi
Hocaalızade	27	9.15	1.84	0.30	Bitişik	Çekirdeksiz	Tuğla
Arap Mehmed	16.98	6.94	2.00	0.40	Bitişik	Çekirdeksiz	Tuğla
Ulu (Doğu)	49.54	24.40	4.60	1.24	Ayrık	Çekirdekli	Tuğla

Yapısal Analizler ve Kırılganlık Eğrilerinin Elde Edilmesi

Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi hususu Durgut, (2021)’de detaylı olarak verilmiştir. Malzeme mekanik özellikleri belirlenirken, minarelerde gerçekleştirilmiş olan titreşim ölçümlerinden ve modal analiz sonuçlarından yararlanılarak model güncelleme çalışması yapılmıştır. Model güncelleme çalışması öncesinde minareler Abaqus v6.13 sonlu

eleman analizi yazılımı ile modellenmiştir. Her üç minarenin yapısal modeli, minare ve cami beden duvarları için kabuk elemanlar (S4R-dört düğüm noktalı eleman), merdiven için ise çubuk elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 2).

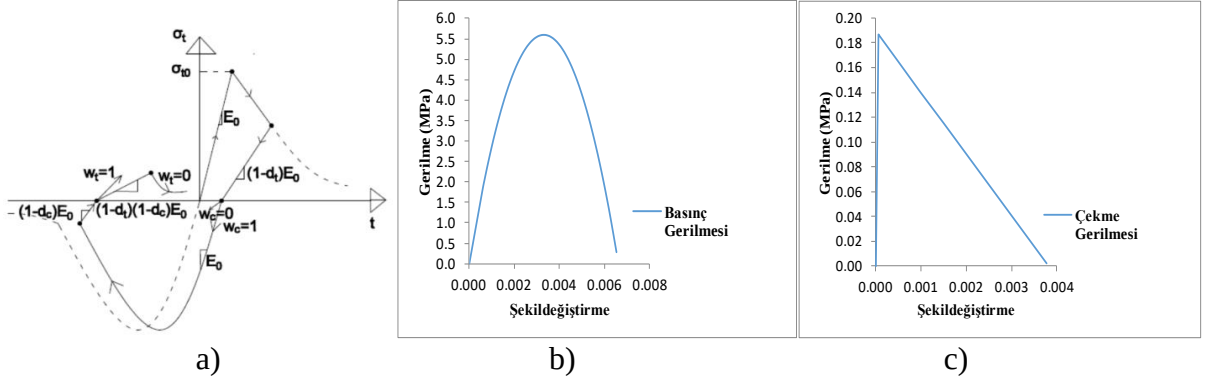


Şekil 2. a) Hocaalızade Cami, b) Arap Mehmed Cami, c) Ulu Cami için oluşturulan modellere ait görünümüler

Her bir minareye ait malzeme özellikleri Tablo 2’de sunulmuştur. Tablo 2’de kullanılan f_d ; f_t ; E_d , ve γ sembolleri sırası ile güncellenmiş modeldeki yığma basınç dayanımını, çekme dayanımını, elastisite modülünü ve birim hacim ağırlığını göstermektedir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler için çevrimsel davranışı da dikkate alan Concrete Damaged Plasticity (CDP) malzeme davranış modeli kullanılmıştır (Şekil 3).

Tablo 2. Minarelerin güncellenmiş malzeme özellikleri

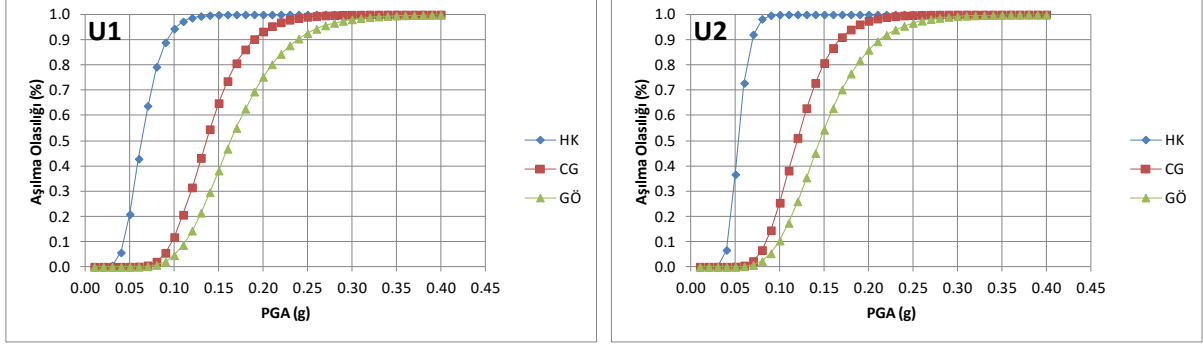
Minare	f_d (MPa)	f_t (MPa)	E_d (MPa)	γ (kg/m ³)
Hocaalızade Cami	5.6	0.19	3086	1800
Arap Mehmed Cami	2.3	0.077	1267	1800
Ulu Cami	10.7	0.36	5775	1800



Şekil 3. CDP için tanımlanan malzeme davranış modeli: a) Çevrimsel davranış (Abaqus Manual, 2017), yığma malzemenin tek eksenli basınç ve çekme davranışını tanımlamak için kullanılan tipik malzeme modeli, b) basınç gerilme-şekildeğiştirme, c) çekme gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan artımsal dinamik analizler için *Pacific Earthquake Engineering Research Center* (PEER) ve AFAD veritabanından alınan 11 adet deprem kaydı kullanılmıştır. Analizler her bir deprem kaydının aynı anda iki yatay bileşeni altında gerçekleştirilmiş olup deprem kaydının düşey bileşeni dikkate alınmamıştır.

Çalışma kapsamında incelenen minarelerin zaman tanım alanında doğrusal olmayan artımsal dinamik analizleri sonucunda, Tarihi Yapılar için Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda (2017) (TYDRYK) belirtilen her üç sınır durumu (Hemen Kullanım (HK), Can Güvenliği (CG) ve Göçmenin Önlenmesi (GÖ)) için kırılma eğrileri elde edilmiştir. Elde edilmiş olan kırılma eğrilerine örnek olarak Hocaalızade Cami minaresinin plandaki iki ortogonal doğrultusuna ait eğriler Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Hocaalızade Cami minaresi için elde edilen kırılma eğrileri

Sonuç

Bu çalışma kapsamında Bursa ilinde yer alan tarihi camilere ait minareleri temsilen üç farklı yapının (Hocaalızade, Arap Mehmed ve Ulu Cami) minareleri için kırılma eğrileri elde edilmiştir. Elde edilmiş olan kırılma eğrilerinin benzer tipolojide minareler için kullanılması ile kültürel mirasımızın önemli bir parçasını oluşturan minarelerin hasar ve kayıp tahminlerinin gerçekçi bir şekilde yapılabilmesi ve zarar azaltmaya yönelik müdahalelerin planlanması ve yürütülmesi ile mümkün olabilecektir.

Teşekkür

Bu çalışma, AFAD-UDAP tarafından desteklenen “Bursa Tarihi Minarelerinin Deprem Performanslarının Analitik ve Deneysel Yaklaşımlar ile İncelenmesi ve Hasargörebilirlik Eğrilerinin Elde Edilmesi” isimli ve (G-18-07) numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu desteklerinden dolayı AFAD-UDAP’a teşekkür ederiz. Ayrıca, yerinde yapılan incelemelere müsaade ederek her türlü kolaylığı sağlayan Bursa Vakıflar Genel Müdürlüğü’ne ve Bursa İl Müftülüğü’ne; zemin konusundaki değerlendirmeleri için Dr. Emre HAŞAL’a; yerindeki incelemeler, ölçümler ve çizimler için Dr. Öğr. Üyesi Ömer DABANLI’ya ve Dr. İlknur DALYAN’a ve nümerik analiz sonuçlarının listelenmesi konusundaki katkılarından dolayı İnş. Müh. Neslihan ASLAN’a teşekkür ederiz.

Referanslar

“Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu” (2017). Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü, Kültür ve Turizm Bakanlığı, İstanbul Valiliği, ICOMOS (Uluslararası Anıtlar ve Sitler Konseyi) Türkiye Milli Komitesi, Sanat Eserleri ve Yapı İşleri Daire Başkanlığı, İstanbul Valiliği İstanbul Koordinasyon Birimi ve Proje Genel Koordinasyonu.

Serhatoğlu, C. (2015). “Bursa Tarihi Minarelerinin Dinamik Davranışlarının ve Performanslarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uludağ Üniversitesi.

Doğangün A., Acar R., Sezen H., Livaoğlu R. (2008). “Investigation of Dynamic Response of Masonry Minaret Structures”. Bull Earthquake Engineering.

Livaoğlu, R., Türkeli, E., Doğangün, A. (2014). “Dynamic Response of Traditional and Buttressed Reinforced Concrete Minarets”. Engineering Failure Analysis (2014), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal; 12.002>.

Alamehmet A. Z. (2019). “Bursa Ulu Camii Minaresinin Davranışının Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analizler İle İncelenmesi”, İstanbul Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Durgut E. (2021). “Bursa Hocaalizde Cami Minaresi Davranışının Farklı Deprem Kayıtları Altında Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analiz Yaklaşımları İle İncelenmesi”. İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Durgut, E., Ispir, M., Demir, C., Turan, T., Kuran, F., İlki, A. (2021). “Bursa Hocaalizde Cami Minaresi’nin Deprem Performansının Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analiz Yaklaşımları ile İncelenmesi”. 9th Turkish Conference on Earthquake Engineering.

Özaydın N. (2017). “Arşiv Belgeleri Işığında 1855 Depremi ve Bursa Yapılarına Etkisi”, Uludağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İslam Tarihi ve Sanatları Anabilim Dalı İslam Tarihi Bilim Dalı Doktora Tezi, Bursa.

Abaqus (2017) Analysis User’s Manual-Abaqus Version 6.13.

TARİHİ YIĞMA BİNALARDA TÜNEL KAZILARINDAN KAYNAKLI HASAR DEĞERLENDİRMESİ KONUSUNDA SAHA DENEYLERİ VE YAPI SAĞLIĞI İZLEME VERİLERİ

**Derya Burcu Gülen^{1*}, Yiyan Liu¹, Sinan Açıkgöz², Harvey Burd², Korhan Deniz
Dalgıç³, Alper İlki⁴**

¹Doktora öğrencisi, Oxford Üniversitesi

²Doç. Dr., Oxford Üniversitesi

³Dr., İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

⁴Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi

*burcu.gulen@eng.ox.ac.uk

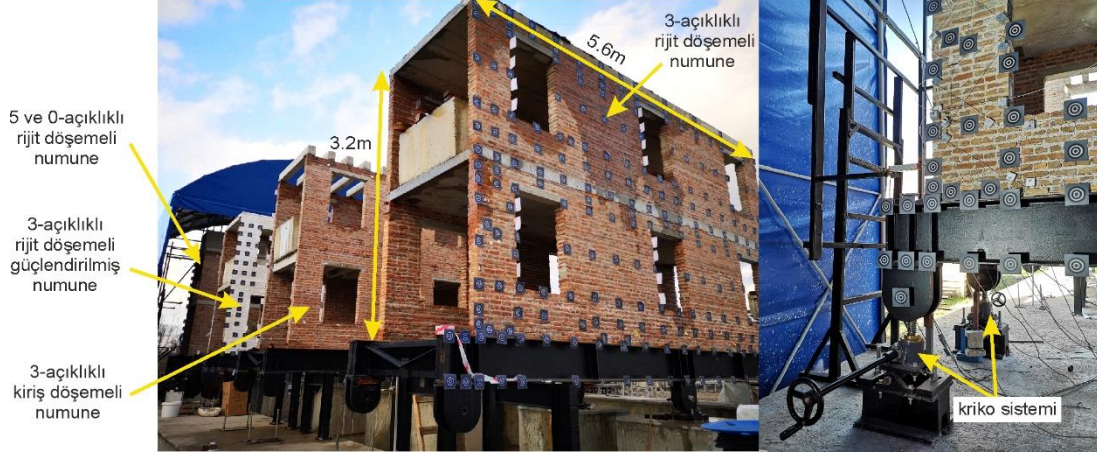
Özet

Yığma binalarda tünel kazılarından kaynaklanan hasar riskini değerlendirmek için kullanılan mevcut sayısal yöntemler, problemin önemli parametrelerini (örneğin; bina ağırlığının, döşeme tipinin ve cephelerdeki açıklıkların etkilerini) göz ardı etmektedir. Kullanılan sayısal modellerin doğruluğunu teyit etmek için yapı özelliklerinin etkilerini dikkate alan kapsamlı deneylere ihtiyaç duyulmaktadır. Belirtilen özelliklerin yapısal hasar üzerindeki etkilerini belirlemek için dört adet, 1/2 ölçekli tuğla yığma bina, tünel kazısını temsil eden düşey yer değiştirme hareketleri altında test edilmiştir. Yapı sağlığı izleme yöntemleri kapsamında video kameralar, fiber optik sensörler, lineer potansiyometrik deplasman sensörleri ve lazer ölçüm cihazı kullanılmıştır. Testler, bina ağırlığının artırılması ile duvarların farklı oturmaları temsil edecek şekilde uygulanan mesnet hareketlerine uyumlu olarak davrandığını, rijit betonarme döşemelerin bina hasarının üst katlara yayılmasını önlediğini ve artan sayıda duvar boşluklarının (pencere) yapısal bileşenlerin maruz kaldığı gerilme değerlerini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Yığma yapı, farklı oturma, tünel, yapı sağlığı izleme.

Deney Düzenegi

Deneyler, Aralık 2020 ile Şubat 2021 ayları arasında Fibrobeton firmasının Düzce'deki fabrika sahasında gerçekleştirilmiştir. Binalara tünel kazısını temsil eden mesnet hareketlerini uygulamak için birbirine paralel iki adet çelik kirişten oluşan bir düzenek kullanılmıştır. Şekil 1'de gösterilen çelik kirişler, binaların şekilde gösterilen sağ ucu ve orta açıklıklarından saha zemin betonu üzerinde konumlandırılmış ağır betonarme kaidelere mesnetlenmiş olup sol uçtan söz konusu oturma etkilerini oluşturmak için hassas vidalı krikolar ile aşağı yönlü çekme işlemi uygulanmıştır. Bu uçta uygulanan aşağı yönlü çekme miktarı (oturma) 85mm'lere kadar ulaşmaktadır. Bu düzenek, binanın altında temsili tünel kazısı tarafından meydana gelecek oturma profilini yapıya mesnet hareketi olarak uygulayabilmek amacıyla tasarlanmıştır. 1/2 ölçekli, iki katlı ve aynı malzeme (kil tuğla, kireç-çimento harcı) özelliklerine sahip, tek tuğla kalınlığında duvarlardan oluşan dört adet bina modeli benzer oturma profilleri altında test edilmiştir (Dalgıç vd. 2021). Taklit edilen prototip yığma yapıya etkiyen ölü ve hareketli düşey yüklerden kaynaklanan duvar tabanı gerilmelerine eşdeğer seviyede bir gerilme düzeyi oluşturabilmek amacıyla, ölçeklenmiş olarak inşa edilen numunelerin öz ağırlıklarına ek olarak birinci ve ikinci kat döşemelerine ilave yükler yerleştirilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği ve numuneler

Numuneler; (i) bina ağırlıkları (normal bina yükü altında, iki kat artırılmış bina yükü altında ve bina zemin kat pencere açıklıklarından uygulanmış ilave yükler altında), (ii) sahip oldukları pencere açıklıklarının miktarı (penceresiz, 3 veya 5 pencere açıklıklı) ve (iii) döşeme tipi (yerinde dökme betonarme döşeme veya metal askı elemanları ile duvarlara bağlanan kirişli döşeme) bakımından birbirinden farklılık göstermektedir.

Şekil 2, farklı yapı özelliklerinin yapısal hasarı nasıl etkilediğini göstermektedir. Rijit betonarme döşemeli ve 3 açıklıklı bina, referans numune (Şekil 2a) olarak kabul edilmiş olup diğer numuneler, farklı yapı özelliklerinin yapı davranışına etkisini araştırmak için referans numune ile karşılaştırılmıştır. Testlerden elde edilen en önemli bulgular şu şekilde özetlenmiştir:

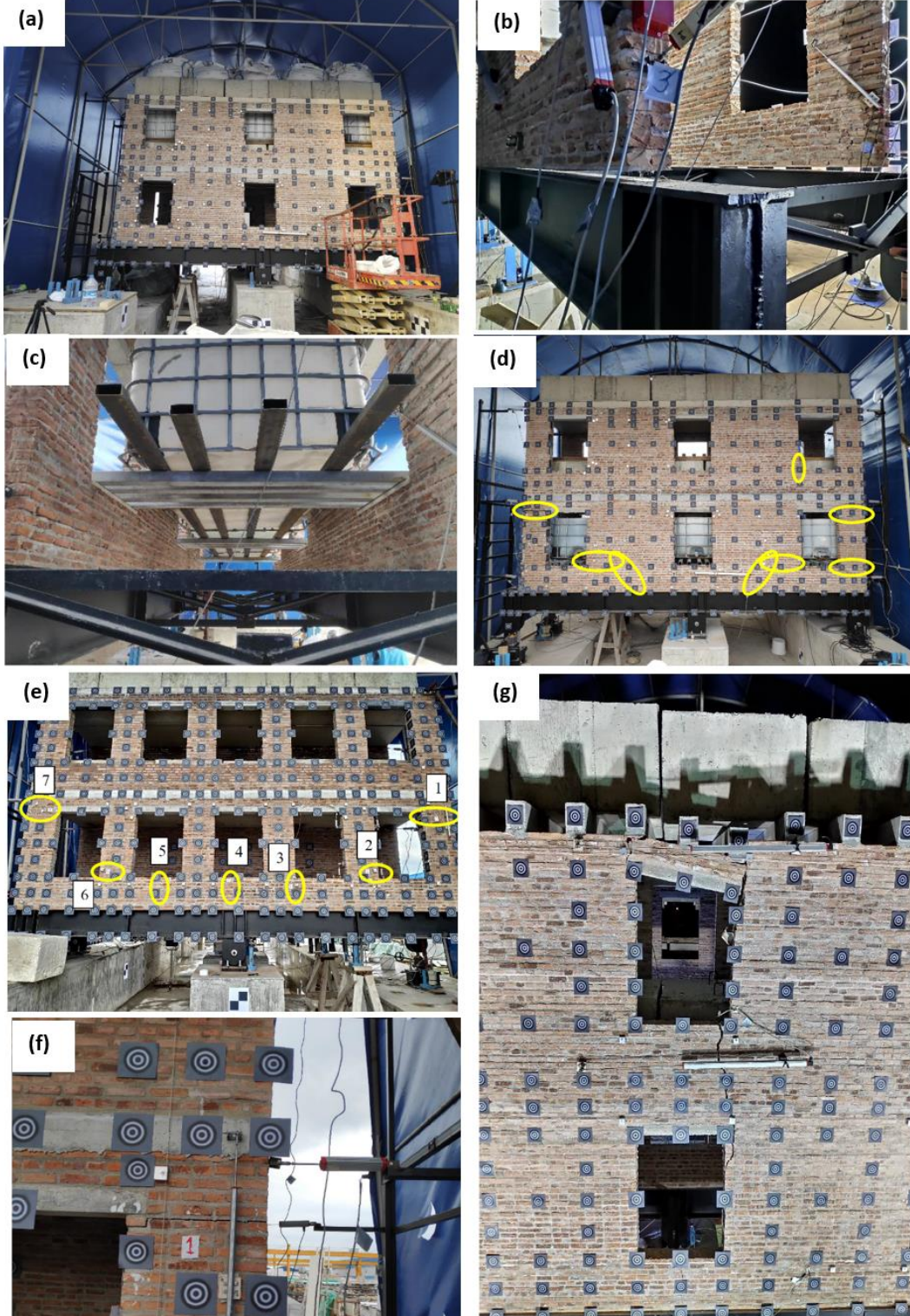
1) Referans numune normal yapı yükü altında oturmalara maruz kaldığında, bina orta mesnet açıklığından askıda kalmakta ve rijit dönme hareketi yaparak binanın sağ ve sol köşelerinde bina ile çelik kiriş arasında boşluklar oluşmaktadır (Şekil 2b). Bina yükü iki katına çıkartıldığında ise yapı hasar davranışında önemli bir değişim gözlemlenmemiştir. Ancak binanın zemin kat pencere açıklıklarına ilave yükler yerleştirildiğinde (Şekil 2c) bina kendi ağırlığını taşıyamaz hale gelmiştir. Bina ile çelik kiriş arasındaki boşluklar kapanarak, pencere köşelerinden yatay ve diyagonal ilerleyen çatlaklar oluşmuştur. Bu yükleme altında oluşan hasar dağılımları Şekil 2d'de gösterilmiştir. Bu durumda 40 mm'lik bir düşey krikos hareketine karşılık alt kat pencere köşelerinde ve kenarlarda bulunan kolonumsu elemanların üst uçlarında 15 mm'ye kadar çatlaklar gözlenmiştir. Bu bulguyla, bina yükü etkisinin yapı hasar değerlendirmelerinde hesaba katılması gerektiği tespit edilmiştir.

2) Cephe açıklıklarının hasar dağılımına etkisi, 5 açıklıklı bina numunesi için normal yükleme altında, kenarlarda bulunan kolonumsu duvar parçalarının üst uçlarında ve alt kat pencere çevrelerinde oluşan çatlak dağılımları ile gözlemlenmiştir (Şekil 2e). Kenarlarda bulunan kolonumsu duvar parçalarının üst uçlarındaki çatlak oluşumu Şekil 2f'de detaylı olarak gösterilmiştir. Aynı yükleme altında 3 açıklıklı referans numunede gözlemlenmeyen ancak 5 açıklıklı numunede etkisini gösteren bu hasar karşılaştırmaları, tünel oturma davranışı altında bina hasar değerlendirmesi yapılırken cephe açıklıklarının etkisinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

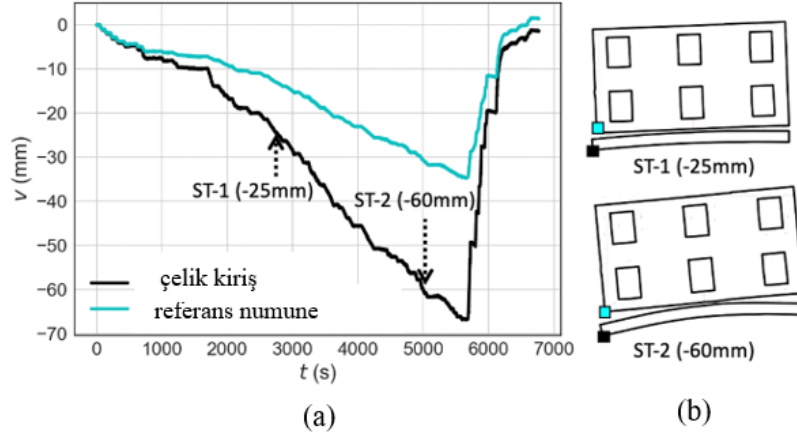
3) Normal yükleme altında kiriş döşemeli 3-açıklıklı numunede ise binanın tüm yüksekliği boyunca uzanan geniş bir çatlak meydana gelmiştir (Şekil 2g). Bu hasar, rijit betonarme döşemelere sahip diğer numunelerde gözlemlenen hasarlardan farklılık göstermektedir. Bu örnek, hasar değerlendirmesi yapılırken döşeme elemanlarının rijitliğinin ayrıntılı olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir. Ayrıca, sürekli döşemelerin rijitlik dışında bir diğer etkisi ise duvar üst uçlarına boydan boya bağlanarak bu bölümlerde çekme dayanımı yığma duvarlardan çok daha fazla bir kord gibi davranarak hasar başlangıcını engellemesidir.

Yapı Sağlığı İzleme, Veri İşleme ve Hasar Değerlendirmesi

Binalarda oluşan yer değiştirme hareketlerini ölçmek için (Şekil 2’de gösterilen cephe yüzeylerine yapıştırılmış kağıt hedefler aracılığıyla) dijital görüntü korelasyon teknikleri kullanılmıştır. Bu yer değiştirmeler farklı ölçüm sistemlerden elde edilen (fiber optik sensörler ve lineer potansiyometrik deplasman sensörleri) bağımsız ölçümler ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 2. Numuneler ve testler sırasında maruz kaldıkları hasarı gösteren fotoğraflar



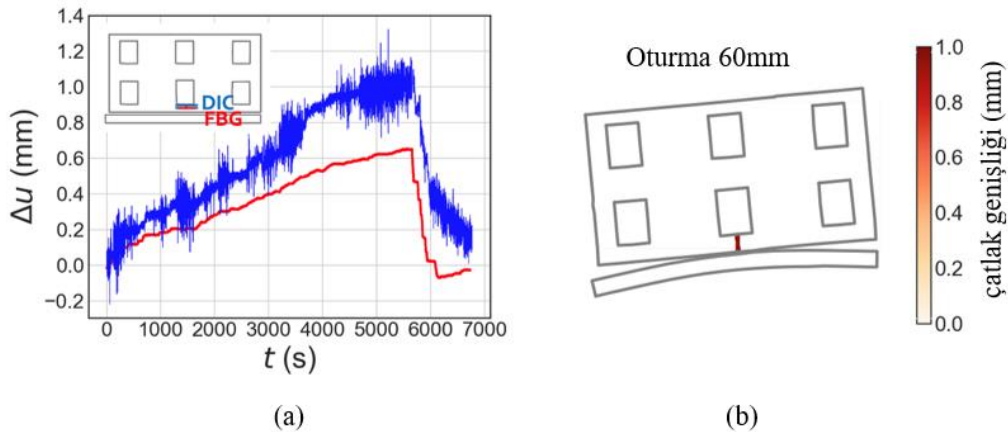
Şekil 3. Normal yükleme altında referans numunenin yapısal davranışı: (a) çelik kiriş uygulanan ve referans numune tarafından deneyimlenen düşey yer değiştirmeler, (b) bina ve çelik kirişin ölçülmüş oturma davranışı

Ölçülen yer değiştirme verileri aşağıda belirtilen hedeflere ulaşmak için kullanılmıştır:

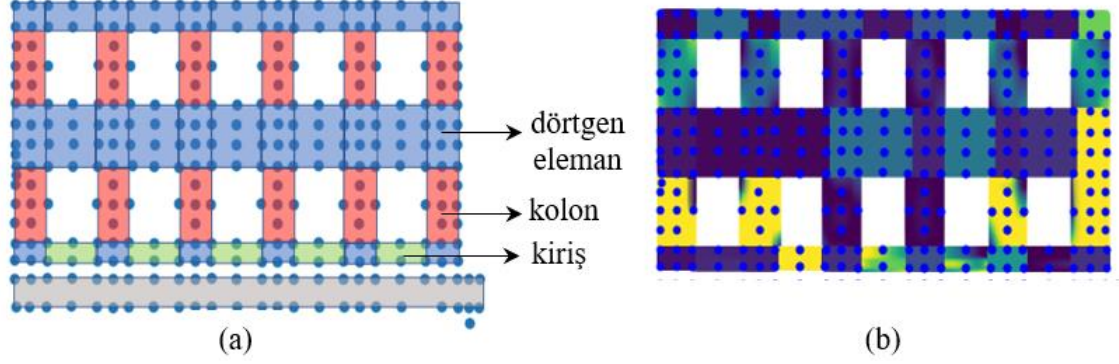
1) Tüm cephe boyunca yapı davranışını gösteren mutlak yer değiştirmeleri görselleştirmek. Yapısal davranışının daha iyi anlaşılmasını sağlamak amacıyla, yapının hasar durumunun görsel açıklamalarının yanı sıra, çelik kirişe uygulanan ve numune tarafından deneyimlenen düşey yer değiştirmeler ölçülmüştür (Şekil 3). Bu veriler daha sonra sayısal modellerden elde edilecek davranış simülasyonlarını değerlendirmek için kullanılacaktır.

2) Çatlak genişliklerini ölçmek.

Bir çatlakın her iki tarafındaki hedefler arasındaki rölatif yer değiştirmeleri ölçerek, çatlak genişliği güvenilir bir şekilde hesaplanmıştır. Şekil 4'te normal yükleme altındaki referans numunede, dijital görüntü korelasyonu (DIC) ve fiber optik sensör (FBG) ölçümlerinden elde edilen çatlak genişliğinin zamanla değişimi (Şekil 4a) ile buna ek olarak belirli bir oturma değerine karşılık oluşan çatlakın konumu ve genişliği (Şekil 4b) gösterilmiştir. Güncel mühendislik uygulamalarında, tünel kazısı kaynaklı bina hasar tespiti yapılırken yapıda oluşan şekil değiştirme büyüklüklerinin ve çatlak genişliklerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır (Burland ve Wroth 1974, Burland vd. 1977, Boscardin ve Cording 1989). Bu ölçümler ile, çatlakların sayısı ve genişliği belirlenebilmekte ve bina hasar sınıfı tespit edilebilmektedir.



Şekil 4. Normal yükleme altında referans numunenin yapısal davranışı: (a) fiber optik sensörden (FBG) ve kameralardan (DIC) alınan çatlak açıklığı ölçümleri, (b) çatlak konumu ve genişliğinin görseli



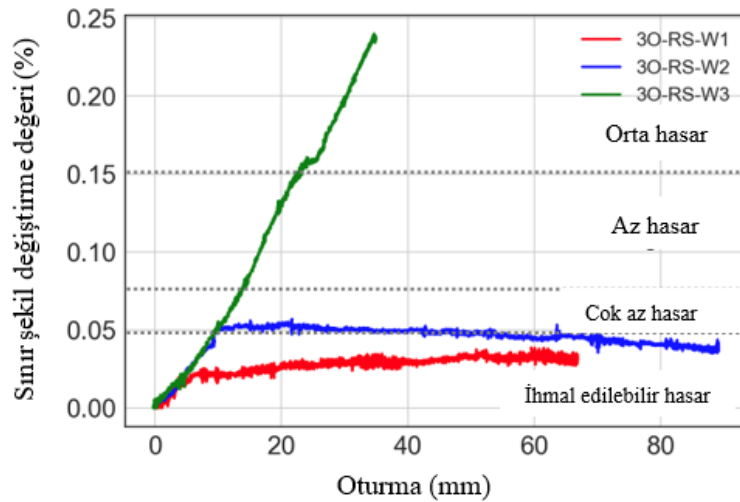
Şekil 5. 5-açıklıklı rijit betonarme döşemeli numunenin: (a) kolon, kiriş ve dörtgen elemanlar ile modellenmesi, (b) yer değiştirmelerden hesaplanan deformasyonların görseli

3) Yapı bileşenlerinde oluşan şekil değiştirmeleri hesaplamak.

Yapının bileşenlerinin maruz kaldığı şekil değiştirmeleri tahmin etmek için yeni yöntemler geliştirilmiştir. Buna göre, i) pencere boşluklarının altında kalan ve kiriş gibi davranan duvar parçaları ile düşey yüklerin aktarılmasından sorumlu kolonumsu duvar parçaları Timoshenko kiriş teoremine göre, ii) kolon ve kiriş elemanlarının bağlantı bölümleri ile döşemeleri kapsayan duvar parçaları kayma deformasyonunu dikkate alan dörtgen elemanlar ile modellenmiştir (Şekil 5a). Geliştirilen bu yöntem ile her bir yapısal elemanın maruz kaldığı şekil değiştirme değeri hesaplanabilmekte ve oluşan çatlak genişlikleri arasında bağlantı kurulabilmektedir (Şekil 5b). Böylece deneysel veriler mevcut bina hasar tespiti yöntemlerin değerlendirilmesinde ve geliştirilen sayısal modellerin doğrulanmasında önemli bir kaynak oluşturacaktır.

4) Bina hasarını ölçmek için kullanılan temel göstergeleri değerlendirmek.

Güncel bina hasar tespiti uygulamalarında, özellikle binayı temsil eden bir kiriş modelinin (Mair vd. 1996) maksimum şekil değiştirme değeri hesaplanıp sınır şekil değiştirme kriterleriyle karşılaştırılmaktadır. Son otuz yılda, binanın eğimi, kayma deformasyonu ve yatay şekil değiştirmeler dahil olmak üzere birçok temel parametre hasar değerlendirmesi için önerilmiştir. Deneyler ile elde edilen ayrıntılı çatlak verileri ve yapı elemanı deformasyon hesaplamaları kullanılarak, bu temel parametrelerin bina hasar değerlendirmesindeki geçerlilikleri değerlendirilecektir (Şekil 6).



Şekil 6. Referans numunenin oturma deformasyonu değişimi: normal bina yükü altında (W1), iki kat artırılmış bina yükü altında (W2), bina zemin kat pencere pervazlarından uygulanmış ilave yükler altında (W3)

Sonuçlar

Bu deneysel çalışma, yığma yapıların tünel kazısından kaynaklanan temsili zemin hareketleri altında davranışlarının ölçülmesi ile detaylı veriler elde edilerek sonuçlanmıştır. Bina ağırlığı, cephe açıklığı ve döşeme rijitliği gibi yapı özelliklerinin bina hasar davranışına etkisi gözlemlenmiştir. Böylece hem literatürde kullanılmakta olan hasar değerlendirme parametrelerinin hem de geliştirilmekte olan sayısal modellerin deneysel veriler ile doğrulanmasına olanak sağlanmıştır.

Bu proje, tarihi yığma yapılarının korunmasına katkıda bulunurken çevrelerinde yapılacak alt yapı çalışmalarının güvenli bir şekilde tamamlanmasına olanak sağlayacaktır. Bu projenin bir parçası olarak geliştirilmekte olan teknikler geniş çapta uygulamalara elverişli olup diğer yapısal formlara (çerçeve binalar, köprüler) ve malzemelere (beton ve çelik) yönelik olarak uyarlanabilir.

Referanslar

Boscardin M D, Cording E J (1989) Building response to excavation induced settlement. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 155, No. 1, 1-21

Burland J B, Broms B B, De Mello V F B (1977) Behaviour of foundations and structures. State of the art report. Session 2. *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo*, 3, 495-546

Burland J B, Wroth C P (1974) Settlement of buildings and associated damage. SOA Review. *Proceedings of a Conference on Settlement of Structures, Cambridge. Pentech Press, London*, 611-654

Dalgic K D, Gulen D B, Acikgoz S, Burd H, Hendriks M A, Giardina G, Ilki A. (2021) Large Scale Experimental Settlement Tests to Evaluate Structural Models for Tunnelling-Induced Damage Analysis. In *International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics* (pp. 164-171). Springer, Cham

Mair R J, Taylor R N, Burland J B (1996) Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunnelling. In R. J. Mair & R. N. Taylor (eds), *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*: 713–718. Rotterdam, the Netherlands: Balkema

ERKEN DÖNEM OSMANLI YIĞMA MİNARE KARAKTERİSTİKLERİNE SAHİP MİNARELERİN SARSMA TABLASI DENEYLERİ

Osman Fatih Bayrak¹, Berkay Aldırmaz², Medine Ispir^{3*}, Fikret Kuran⁴, Cem Demir³,
Alper İlki³

¹Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi

²Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kadir Has Üniversitesi

³İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi

⁴Vakıflar Genel Müdürlüğü, Sanat Eserleri ve Yapı İşleri Daire Başkanlığı

*Sorumlu yazar, ispi@itu.edu.tr

Abstract

Historical masonry minarets are one of the remarkable parts of mosques. Since many of them are located in the earthquake-prone areas, the seismic responses of these minarets should be studied both experimentally and analytically. Thus, an experimental program of shake table tests has been planned on a representative minaret of Hocaalızade Mosque located in Bursa, Turkey. Due to the limitations of the shaking table and practice, minaret specimens are planned to be constructed in 1:4 scale. In this study, a shaking table test results and preliminary nonlinear time history analyses are presented. The main purpose of the analyses is to predict the behaviour of the minaret and to take measures to prevent the shaking table system from being damaged during the test, depending on the predicted behaviour. For the test preparation studies, initially, the minaret dimensions and the acceleration record of the 1999 Kocaeli Earthquake were scaled. Then, modal and nonlinear time history analyses of the scaled minaret were performed. Lastly, the produced samples were transported and made ready for testing. The numerical and test results are evaluated in terms of the displacement values at the specific levels of the minaret and the damage development.

Keywords: Historical, mosque, minaret, nonlinear analysis, shake table, seismic

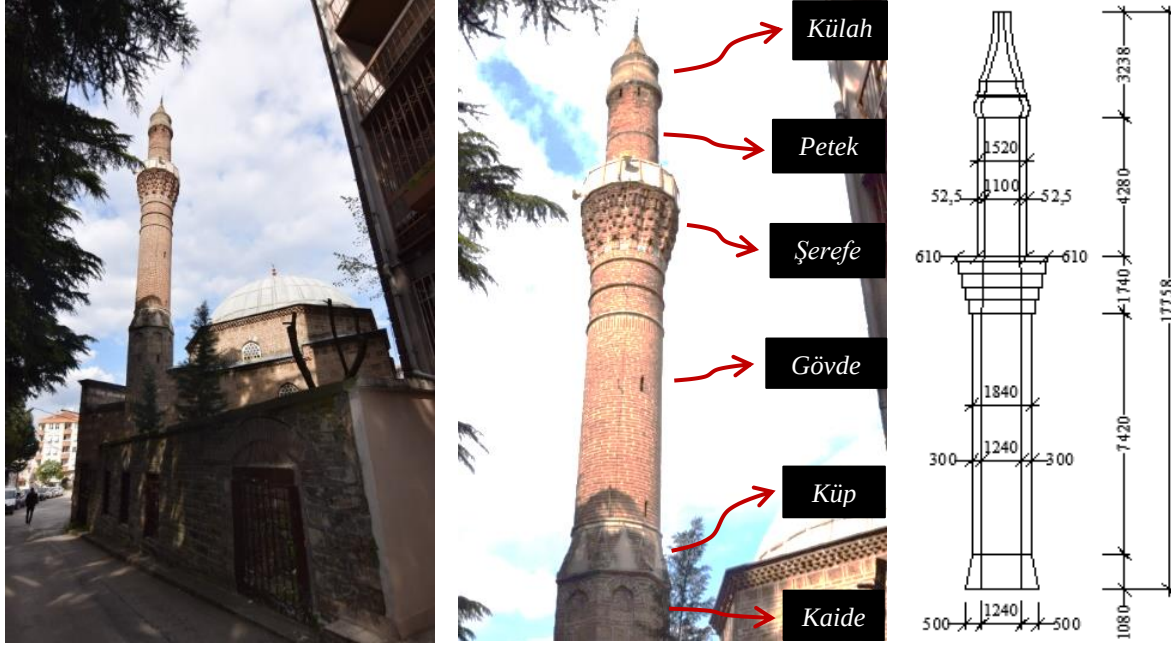
Anahtar Kelimeler: Tarihi cami, minare, doğrusal olmayan analiz, sarsma tablası, deprem

Giriş

Yığma camilerin bir parçası olan minareler, inşa edildiği yıldaki mimari özellikleri koruyan tarihi yapılardandır. Tipik Osmanlı minareleri; kaide, küp, gövde, bir veya daha fazla sayıda şerefe (balkon), petek ve külahtan oluşmaktadır. Minareler genellikle düşey etkilere karşı dayanıklı iken narin olmaları nedeniyle yatay kuvvetlere karşı güvenirliliklerinin araştırılması gerekmektedir. Deprem riski yüksek olan bölgelerde bulunan minarelerin deprem altındaki davranışlarının anlaşılması ve yapısal güvenliğinin sağlanması önem arz etmektedir.

AFAD-UDAP tarafından desteklenen projede, Osmanlı döneminde inşa edilmiş ve Bursa’da bulunan tarihi Hocaalızade Cami’nin minaresinin geometrik özellikleri esas alınarak üretilen minare numunelerinin nümerik ve sarsma tablası testleri gerçekleştirilmektedir (Şekil 1). Laboratuvarın fiziksel sınırlarından dolayı test numuneleri ¼ ölçekli olarak üretilmiştir.

Öncelikle minare ölçüm cihazlarının belirlenmesi ve laboratuvar ortamının korumaya alınması için test öncesi doğrusal olmayan analizler yapılarak minare davranışı ve hasar bölgeleri belirlenmiştir. Bu çalışmada, referans numunesinin deprem kaydının farklı düzeylerinde gerçekleştirilen sarsma tablası testi sonuçları nümerik analiz sonuçlarıyla beraber sunulmaktadır.



Şekil 1. (a) Hocaalızade Cami, (b) bölümleri ve (c) minare boyutları (mm) (Bayrak vd. 2021)

Minare Boyutlarının ve Deprem Ölçeklenmesi

Hocaalızade Cami'nin minaresi, Şekil 1'de gösterildiği üzere altı bölümden oluşmaktadır. Laboratuvar fiziksel koşulları ve uygulama zorluğu göz önüne alınarak testler için minarenin kaide üstü dikkate alınmış ve minare 1/4 oranında ölçeklenmiştir. Sarsma tablası testi, 17 Ağustos 1999 depreminin Bursa/TOFAŞ istasyonundaki kaydı altında gerçekleştirilmiştir. Bursa/TOFAŞ istasyonu, Hocaalızade Cami'ne yaklaşık 9 km ve deprem merkez üssüne 93 km uzaklıkta konumlanmaktadır. İvmenin Kuzey-Güney yönü maksimum pik ivmesi 0.101g, Doğu-Batı yönü pik ivmesi ise 0.100g'dir (Şekil 2a). Minare testi, Türk-Alman Üniversitesi/Allianz Teknik Deprem & Yangın Test ve Eğitim Merkezi'nde bulunan 2 serbestlik dereceli sarsma tablasında gerçekleştirilmiştir.

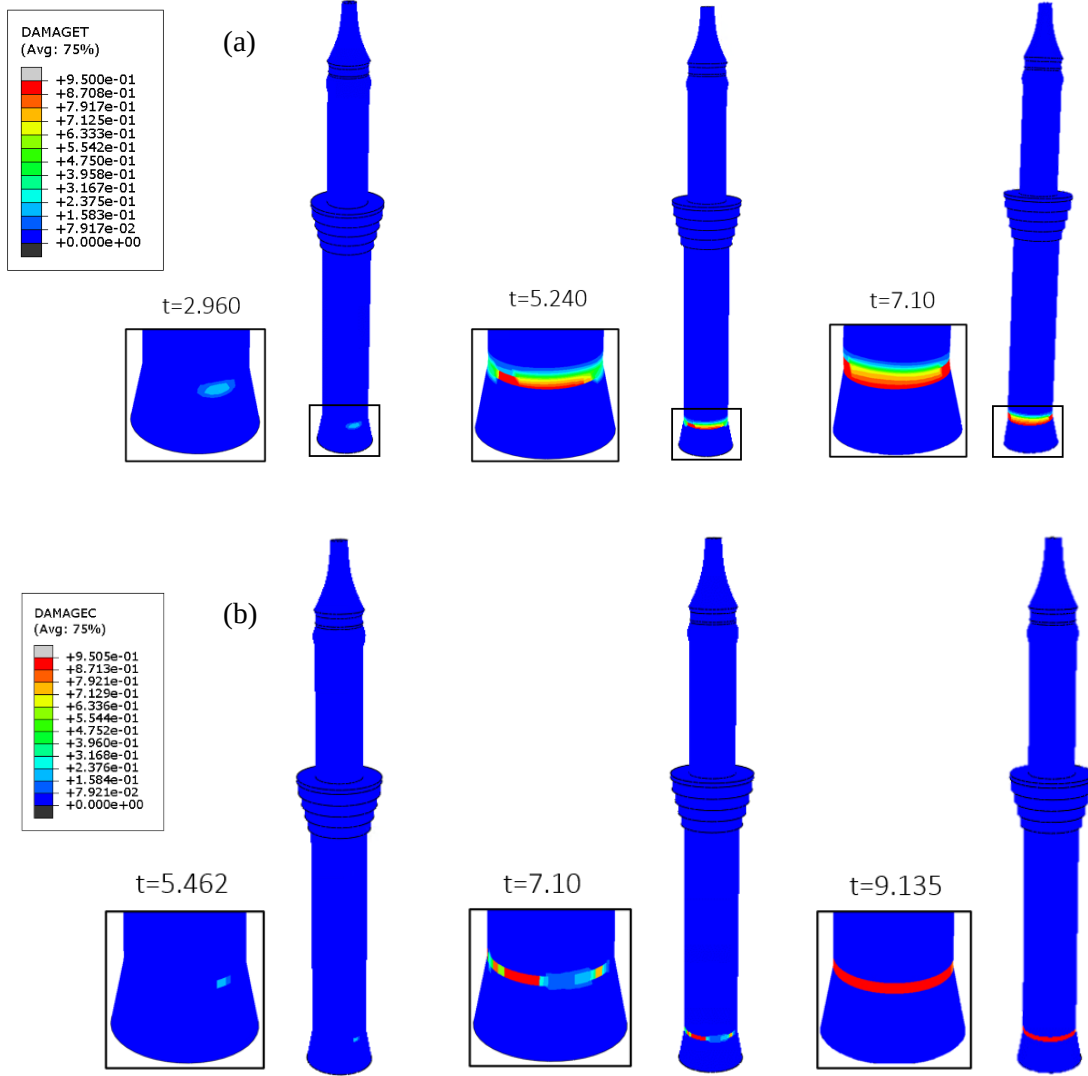
Tablo 1. Ölçekleme Yaklaşımı (Moncarz ve Krawinkler, 1981)

	Model Tipi		
	True Replica Modeli	Artificial Mass Simulation	Gravity Forces Neglected
Uzunluk	$\ddot{O}$	$\ddot{O}$	$\ddot{O}$
Zaman	$(\ddot{O})^{1/2}$	$(\ddot{O})^{1/2}$	$\ddot{O}$
Frekans	$(\ddot{O})^{-1/2}$	$(\ddot{O})^{-1/2}$	$(\ddot{O})^{-1}$
Hız	$(\ddot{O})^{1/2}$	$(\ddot{O})^{1/2}$	1
Yer ivmesi	1	1	Neglected
İvme	1	1	$(\ddot{O})^{-1}$
Kütle	$E_r / \ddot{O}$	*	1

$\ddot{O}$: Ölçek

*Ek kütle gerektirir

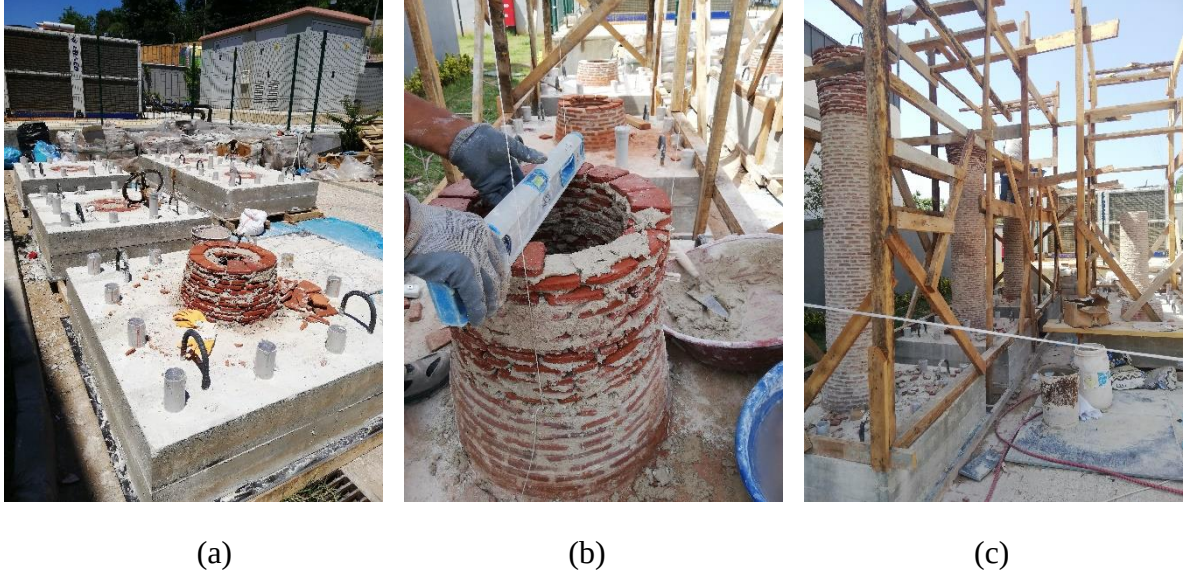
Yapılan doğrusal olmayan analizler ile minarenin kritik ve dolayısıyla hasar alması beklenen bölgeleri belirlenmiştir. Minarede öncelikle küp, gövde birleşim bölgesinde çekme hasarlarının meydana geldiği görülmüştür. Çekme hasarlarına bağlı olarak basınç hasarları da aynı bölgede yoğunlaşmıştır. Meydana gelen basınç ve çekme hasarları Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. Deprem kaydı altında minarede oluşan (a) çekme, (b) basınç hasarları

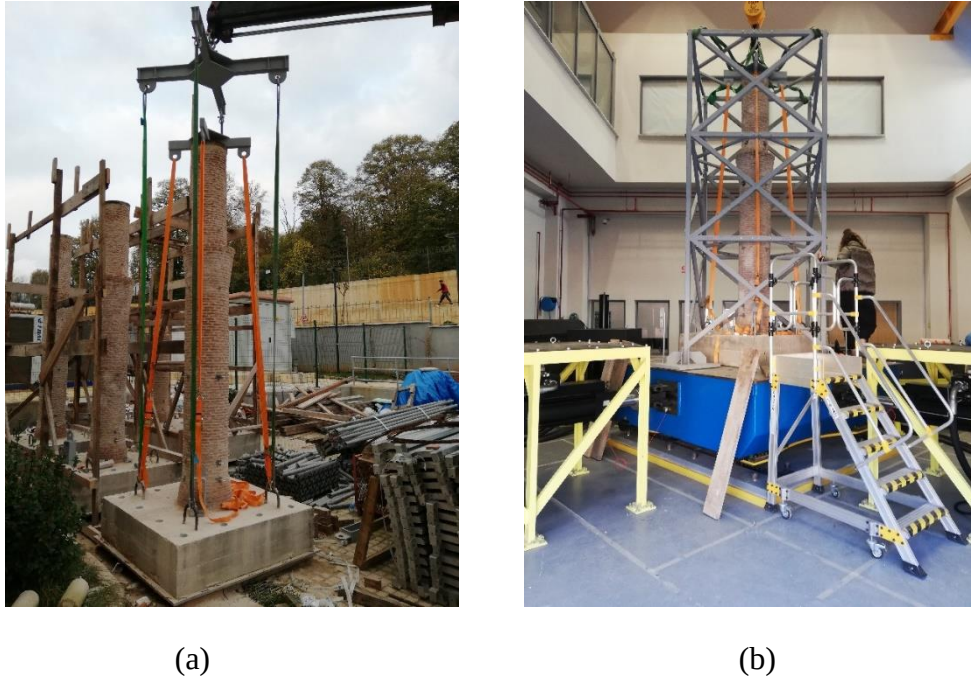
DeneySEL Çalışma

Minare numuneleri laboratuvar ortamı dışında üretilmiştir (Şekil 6a-c). Numuneleri sarsma tablasına sabitlemek ve tabla üzerine taşımak için minareler, 400 mm yüksekliğe sahip bir betonarme temel üzerinde inşa edilmişlerdir.



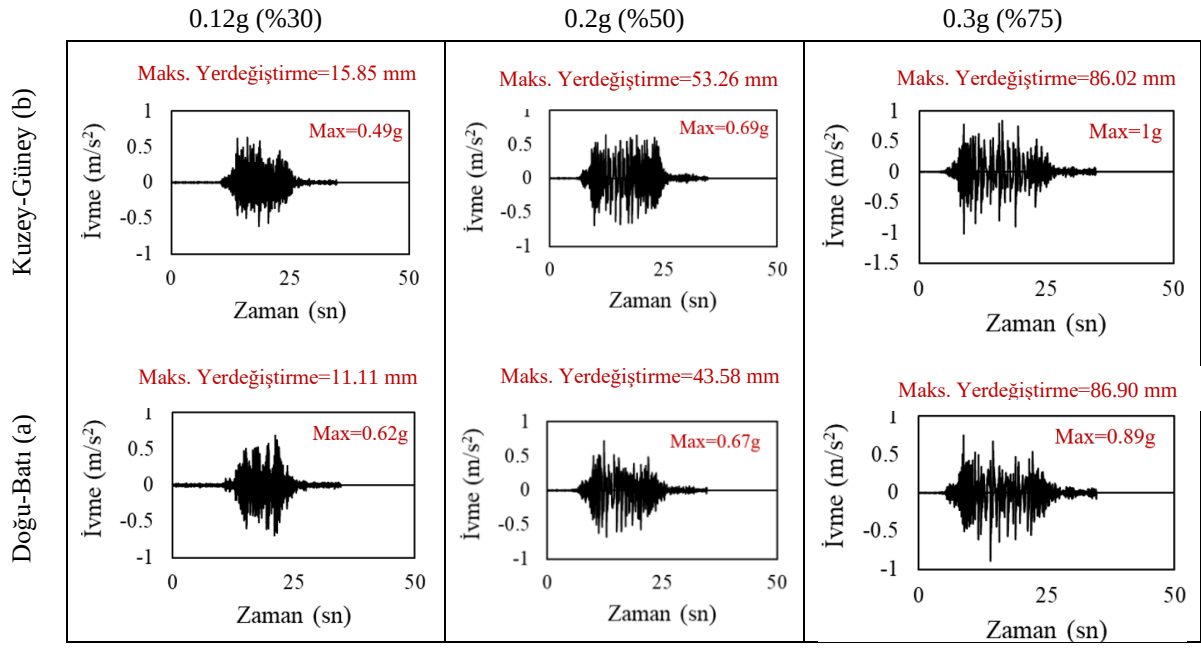
Şekil 6. (a) Temel, (b, c) minare üretimi

Numune, taşıma sırasında zarar görmemesi için temele bırakılan kancalar ile kontrollü şekilde taşınarak sarsma tablasının üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 7a, b). Test sırasında oluşan yerdeğiştirmeleri ölçmek için kullanılan deplasman ölçerlerin sabitlenmesini kolaylaştırmak için minare dışına ve sarsma tablasının üzerine çelik çerçeve yerleştirilmiştir. Laboratuvardaki cihazların korumaya alınması için sarsma tablası çevresine yerleştirilen koruma sistemi ile test öncesi hazırlık aşamaları tamamlanmış olmaktadır.

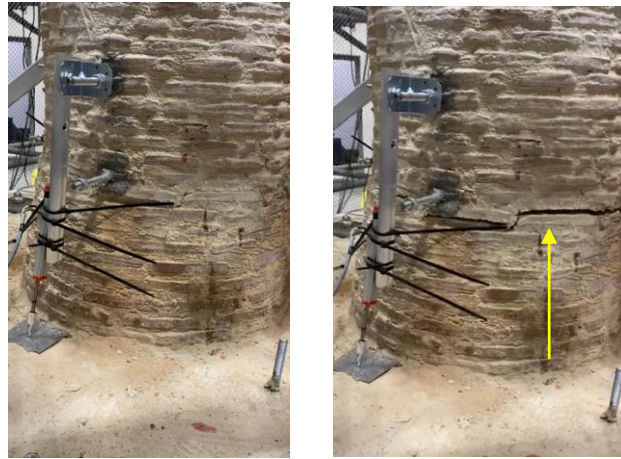


Şekil 7. (a) Minarenin taşınması ve (b) yerleştirilmesi

Test için belirlenen ivme, minarenin davranışını gözlemlemek ve meydana gelen hasarları incelemek amacıyla artımsal olarak uygulanmıştır. Minareye uygulanan yer hareketinin %30, %50 ve %75'ine karşılı gelen etki altında oluşan minare tepe deplasmanları Şekil 8'de verilmiştir. Ayrıca 0.3g altında minarenin küp-gövde geçişinde meydana gelen hasar ve minare tepesinde oluşan deplasman görüntüsü Şekil 9 ve 10'da sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 8. Minare tepesinde oluşan ivmeler (a) Doğu-Batı, (b) Kuzey-Güney



Şekil 9. 0.3g ivme kaydı altında hasar gelişimi (küp-gövde kesişimi)



Şekil 10. “0.3g” ivme altında minare tepesinde kuzey-güney doğrultusunda meydana gelen yerdeğiştirme

Sonuç

Bursa’da bulunan Hocaalızade Cami’nin sarsma tablası üzerinde deneysel çalışması gerçekleştirilmiştir. Uygulama zorluğu ve laboratuvar kısıtlamalarından dolayı test edilecek minare numunesi ¼ oranında ölçeklenmiştir. Minarenin doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizi ile hasar bölgesi belirlenmiş ve test öncesi güvenlik önlemleri alınmıştır. Daha sonra numune test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Numunenin analizi ve testinde hasarlar küp, gövde geçişinde meydana gelmiştir.
- Küp, gövde geçişinde meydana gelen hasarın dışında başka hasar meydana gelmemiş minare bütünlüğünü korumuştur.
- Minare üzerinden ölçülen ivmelerde yer ivmesine bağlı olarak artış görülmüştür. 0.3g yer ivmesinde minare tepesinde 1g ivme meydana gelmiştir.
- Artımsal ivme uygulanan numune de hasar bölgesi değişmemiş ve ivmeye bağlı olarak artış göstermiştir.

Yığma duvarlardan inşa edilmiş minarelerde hasarlar genellikle kesit değişimlerinde meydana gelmektedir. Ani kesit değişimleri, minarenin belirli bir noktadan hasar alarak devrilmesini tetiklemektedir. Yatay kuvvetlere karşı kırılğan ve inşa edildiği dönemin kültürü yansıtan bu tarihi minarelerin deprem altındaki davranışının değerlendirilmesi ve depreme dayanıklı hale getirilmesi, minarelerin gelecek nesillere aktarılması açısından önem arz etmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, AFAD-UDAP tarafından desteklenen ‘‘Bursa Tarihi Minarelerinin Deprem Performanslarının Analitik ve Deneysel Yaklaşımlar ile İncelenmesi ve Hasargörebilirlik Eğrilerinin Elde Edilmesi’’ isimli ve (G-18-07) numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu desteklerinden dolayı AFAD-UDAP’a teşekkür ederiz. Ayrıca, yerinde yapılan incelemeler sırasında her türlü kolaylığı sağlayan Bursa Vakıflar Genel Müdürlüğü’ne ve Bursa İl Müftülüğü’ne; zemin konusundaki değerlendirmeleri için Dr. Emre HAŞAL’a; yerindeki incelemeler, ölçümler ve çizimler için Dr. Öğr. Üyesi Ömer DABANLI’ya ve Dr. İlknur DALYAN’a ve deney hazırlık aşamasındaki katkılarından dolayı Birdal KOÇAK’a, Ayşenur BİREL’e ve Muhammed Şükrü YAVAŞ’a teşekkür ederiz.

Referanslar

Bayrak OF, Ispir M, Demir C, Dalyan I, Dabanli O, Ilki A (2021). Preliminary Analysis of a Representative Historical Minaret for Preparation to Shake Table Tests. 6th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology (6ICEES), Gebze, Kocaeli, Turkey.

Moncarz PD, Krawinkler H (1981). Theory and application of experimental model analysis in earthquake engineering. Vol. 50, Stanford University, California.

ABAQUS (1996). ABAQUS User’s Manual, version 5.5, Hibbitt Karlsson and Sorensen, Inc, Pawtucket, USA.

YAZAR İNDEKSİ

Alper İlki	35, 48, 53, 59
Berkay Aldırmaz	35, 59
Cavit Serhatoğlu	29
Cem Demir	35, 48, 59
Derya Burcu Gülen	53
Elif Durgut	48
Fikret Kuran	35, 48, 59
Görün Arun	4
Harvey Burd	53
Korhan Deniz Dalgıç	53
M. Emre Haşal	18
Medine Ispir	35, 48, 59
Melika Salman	22
Merve Akbaş	18
Murat Altuğ Erberik	42
Oğuz Cem Çelik	22
Osman Fatih Bayrak	59
Ömer Tuğrul Turan	35, 48
Ramazan Livaoğlu	29
Recep İyisan	18
Serdal Kaya	35
Sinan Açıkgöz	53
Şerif Barış	9

Vildan Gizem Menteş	22
Yiyan Liu	53
Zeynep Ahunbay	1



© 2022, İstanbul Teknik Üniversitesi

© 2022, Istanbul Technical University