



Malatya ili mimari dokusunu temsil eden tarihi bir yapının deprem davranışının incelenmesi

Investigation the seismic behaviour of a historical building representative the architectural style of Malatya province

Alper Özmen^{1,*} 

¹Inönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

Öz

Tarihi yapılar bir şehrin ve dönemin kültürünü ve yaşantısını gelecek nesillere aktaran en önemli bileşenlerden biridir. Özellikle yerel bölgelerde yörenin malzemesi ve kullanım taleplerini bir araya getirerek yapılan yapılar yapıldığı dönemi ve zamanın yaşantısını göstermektedir. 2023 yılında meydana gelen Kahramanmaraş depremleri sonrası birçok tarihi yapı hasar görmüş veya yıkılmıştır. Bu çalışmada incelenen yapı doğu Anadolu fay zonu üzerinde yer almaktadır ve başta 2023 Kahramanmaraş depremleri olmak üzere birçok büyük depreme maruz kalmıştır. Yapının gelecek nesillere güvenle aktarılması için mevcut durumunun analiz edilmesi ve deprem davranışının ortaya koyulması gerekmektedir. Çalışma kapsamında Malatya ili kültürünü ve mimarisini yansıtan bir yapı seçilmiştir. Sahada gözlemlerle hasar analizi ve sonlu elemanlar yöntemi ile deprem davranışı analiz edilmiştir. Analizlerde Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018) ve Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu- 2017 kriterleri dikkate alınmıştır. Analiz sonuçlarına göre yapı, DD-3, DD-2 ve DD-1 deprem düzeyleri için görece kat ötelenmesi sınırları olan %0.3-%0.7-%1.0 değerlerini sağlamıştır; ancak DD-2 deprem düzeyinde özellikle 15 cm kalınlığındaki narın duvarların açıklık bölgelerinde oluşan çekme gerilmeleri maksimum 1.88 MPa olarak meydana gelmiş ve 0.05 MPa olan sınır değerleri aşmıştır. Buna karşın kayma gerilmeleri sınır değerlerin altında kalmıştır.

Anahtar kelimeler: Tarihi yapılar, Sonlu elemanlar yöntemi, Deprem davranışı, Kerpiç

1 Giriş

İnsanlığın hem barınma yapıları hem de anıtsal yapılar inşa etmek için kullandığı en eski yapı malzemelerinden biri de kerpiçtir. Kerpiç malzemesinin hemen her yerde temin edilebilmesi, sağladığı ısı konfor ve düşük maliyeti, kerpiç geleneksel mimaride çok önemli bir bileşen haline getirmiştir. Kerpiç ile inşa edilmiş ve geçmişten günümüze kadar gelmeyi başarmış olan bu yapılar, sadece birer barınak değil aynı zamanda geçmiş nesillerin yaşam biçimlerini, mühendislik bilgisini ve mimari kimliğini günümüze taşıyan kritik birer kültürel miras olarak kabul edilmektedir. Ancak

Abstract

Historical buildings are among the most important components that transmit the culture and way of life of a city and era to future generations. Especially in local areas, structures made by combining the region's materials and usage demands reflect the era and lifestyle of the time. After the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, many historical buildings were damaged or destroyed. The structure examined in this study is located on the East Anatolian Fault Zone and has been subjected to many large earthquakes, including the 2023 Kahramanmaraş earthquakes. To safely transmit the structure to future generations, its current condition must be analyzed, and its seismic behavior needs to be revealed. A building reflecting the culture and architecture of the Malatya province has been selected for the study. Damage analysis through field observations and seismic behavior analysis using the finite element method have been conducted. In the analyses, the Turkey Building Earthquake Code 2018 (TBDY 2018) and the Earthquake Risk Management Guide for Historic Structures-2017 criteria have been taken into account. According to the results of the analyses, the structure met the relative storey drift limits of 0.3%-0.7%-1.0% for DD-3, DD-2 and DD-1 earthquake levels; however, at DD-2 earthquake level, the tensile stresses, especially in the span regions of the 15 cm thick slender walls, were maximum 1.88 MPa and exceeded the limit values of 0.05 MPa. On the other hand, shear stresses remained below the limit values.

Keywords: Historical structures, Finite element method, Seismic behavior, Adobe

kerpiç malzemesinin doğasından kaynaklanan yapısal zorluklar sebebiyle bu yapılar sismik yükler altındaki etkilere karşı güvenlik açısından büyük bir zorluk teşkil etmektedir. Bu yaygın kullanımına rağmen kerpiç ve karma (ahşap-yığıma) sistemler; düşük çekme dayanımı, rijit diyafram oluşturulamaması, zayıf bağlantı detayları ve gevrek davranış özellikleri sebebiyle deprem etkilerine karşı oldukça hassastır [1-3]. Bu yapı türlerinde deprem kaynaklı hasarlar, yalnızca düzlem içi değil düzlem dışı davranışa da sebep olabilir. Bu durumlar göz önüne alındığında sismik değerlendirmeyi sadece kapasite kontrolü değil; deneysel

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: alper.ozmen@inonu.edu.tr (A. Özmen)

Geliş / Received: 23.12.2025 Kabul / Accepted: 02.02.2026 Yayımlanma / Published: 17.02.2026

doi: 10.28948/ngumuh.1847860

veriler, saha incelemesi ve numerik analizlerin birlikte ele alındığı bütünlük bir prosedür olarak ele almak gereklidir. Bu bağlamda ilgili literatür incelendiğinde kerpiç yapıların deprem davranışlarını deneysel ve teorik olarak incelemek üzere birçok yöntem geliştirilmiş ve bu yöntemler uygulanarak birçok çalışma yapılmıştır.

Karanikoloudis ve Lourenço [2], Peru'daki 17. yüzyıl Kuño Tambo Kilisesi örneğinde kerpiç tarihi yapılar için yerinde inceleme ve tanı (hasar haritalama, sonik/dinamik tanılama gibi testler) ile gelişmiş sayısal modelleri aynı çerçevede birleştirerek, mevcut hasar mekanizmalarını açıklayacak şekilde doğrusal olmayan statik (pushover) ve doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizlerinden yararlanmışlardır. Briceño ve ark. [3], Andahuayllas'taki San Pedro Apostol Kilisesi üzerinde, tarihi kerpiç yapıların değerlendirilmesinde en kritik problemlerden birinin "girdi belirsizliği" (geometri, sınır koşulu, hasar birikimi ve malzeme parametreleri) olduğunu belirtmişlerdir. Bu belirsizliklerden dolayı, tahribatsız testler, sayısal modelleme ve basitleştirilmiş araçları bütünlük olarak dikkate almışlardır. Briceño ve çalışma arkadaşlarının Sacsamarca'daki 17. yüzyıl kilisesi için yürüttüğü diğer çalışmada ise, hızlı tarama (rapid screening) ile ön değerlendirme ve pushover ile ayrıntılı global performans analizinin birlikte kullanılmasıyla hem hızlı karar desteği hem de daha derin teknik gerekçelendirme sağlanabileceği gösterilmiştir; hasar tespitinde termografi, malzeme tayininde flat-jack gibi araçlar öne çıkmıştır [4].

Sismik risk seviyelerinin local ölçekte yönetimi için kırılma eğrileri, belli yer hareketleri altında hasar limit durumlarının aşılma olasılığını nicel olarak verir. Kerpiç yapılarda da karar vericiler için oldukça önemli bir parametredir [1,5]. Sumerente ve arkadaşları [6], Cusco bölgesindeki kerpiç konutlar için düzlem içi ve düzlem dışı mekanizmaların birlikte ele alınmasının gerekliliğini vurgulayarak, Monte Carlo ile temsilî bina örneklemeleri üretmiş; her bina için düzlem içi kapasiteyi basitleştirilmiş eğrilerle, düzlem dışı kapasiteyi rocking mekanizması temsilleriyle ifade etmiş ve deprem kayıtları altında hasar durumlarını olasılık hasar matrisi üzerinden birleştirerek kırılma eğrileri elde etmiştir. Portekiz'de Sarchi ve ark. [7] ise kırılma fonksiyonlarının güvenilirliği için deneysel kalibrasyonu merkeze almış; tam ölçekli çevrimsel duvar deneyinden elde edilen verilerle malzeme parametrelerini kalibre ederek doğrusal olmayan makro-modelleme (TSCM) yaklaşımıyla pushover analizleri yürütmüş ve buradan kırılma fonksiyonlarını üretmiştir. Ataman [8], hımsı yapıların deprem performansını literatür ve deprem raporları üzerinden değerlendirerek, ahşap iskeletin sünek/enerji yayıcı davranışı ile kerpiç dolgunun sürtünmeye dayalı enerji yutma katkısının yapısal dayanımı artırdığını belirtmiştir. Kim ve Rosowsky [9] çalışmasında, hafif ahşap çerçeve perde duvarların deprem performansı kırılma eğrileriyle değerlendirilmiş; ölçeklenmiş yer hareketleri altında doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleriyle deplasman ve hold-down uplift temelli fragility eğrileri geliştirilmiştir. Barontini ve Lourenço [10] ise Lima'daki Hotel El Comercio örneğinde, özellikle adobe-quincha ara yüzündeki sınır koşullarının ve diyafram

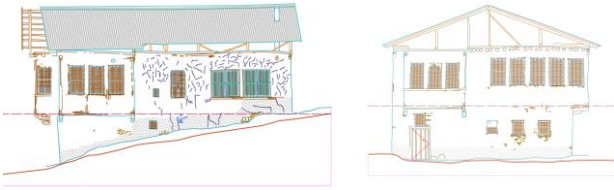
kabullerinin sonuçlara etkisini duyarlılık analizleriyle irdelemiş; bu yapı tipinde güvenliğin doğru değerlendirilebilmesi için modelleme stratejisinin açıkça gerekçelendirilmesini önermiştir Lourenço ve ark. [11], Getty Conservation Institute'nin Seismic Retrofitting Project (SRP) kapsamında tarihi toprak yapılarda düşük teknolojiye dayalı, yerel pratiklerle uyumlu ve tarihi dokuyu koruyan güçlendirme yaklaşımlarını ele almış; prototip yapılarda test-analiz-tasarım-uygulama döngüsünün birlikte işletildiğini ve hedef performans kriterlerinin sağlanabildiğini raporlamıştır. Literatürde belirtilen bu çalışmalara rağmen, Doğu Anadolu Fay Hattı üzerinde yer alan ve kendine özgü yapı tekniği olan yerel mimari miras yapılarının, güncel ulusal yönetmelikler dikkate alınarak incelenmesi büyük önem arz etmektedir.

Bu gereksinimler ışığında, çalışma kapsamında Malatya için özel bir mimari ve kültür arşivi niteliği taşıyan tarihi Malatya evlerinin mimari ve yapı tekniğinin görülebileceği örnek bir yapı incelenmiştir. Söz konusu yapıların karmaşık geometrilerini ve malzeme özelliklerini temsil etmede Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), yığma konutlardan sanat yapılarına (taş köprüler, camiler vb.) kadar geniş bir yelpazede güvenilir sonuçlar veren bir araç olarak kendini kanıtlamıştır [12-21].

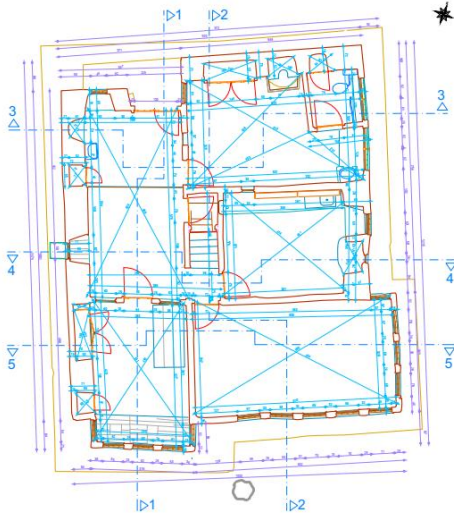
Malatya'nın eski yerleşimlerinden Arapgir'de, kuşaklar boyunca iklim ve topoğrafyaya uyum sağlayarak gelişen kerpiç evler, sadece insanların barınma ihtiyacını karşılamıyor. Aslında, bu yapılar kentin hafızasını ve kültürel kimliğini de taşıyor. Bu kültürel hafızanın korunması, sadece mimari bir kaygı değil, aynı zamanda yapının mühendislik açısından sismik güvenliğinin bilimsel yöntemlerle ortaya konulmasını gerektiren teknik bir sorumluluktur. Bu doğrultuda, çalışmada, Arapgir'in yerleşim düzenini ve Malatya kültürünü yansıtan tipik bir kerpiç evin deprem davranışı Vakıflar Genel Müdürlüğü Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu ve 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) dikkate alınarak incelenmiştir. Böylece, Malatya ilinin kültürel mirasını yansıtan geleneksel yapıların deprem performansını anlamak ve korumak için bilimsel bir zemin oluşturmak hedeflenmiştir. İlgili literatürde Vakıflar Genel Müdürlüğü Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nun dikkate alındığı ve Malatya ilinin kültürel mirasını inceleyen çalışmaların sayısı oldukça azdır. Bu çalışma, sadece tarihi bir yapının sismik analizini sunmakla kalmayıp, aynı zamanda yerel mimaride estetik ve işlevsel nedenlerle tercih edilen narin yapı elemanlarının (15 cm kalınlığındaki kerpiç bölme duvarlar) ve yüksek pencere boşluk oranlarının deprem performansı üzerindeki kritik etkisini teknik verilerle ortaya koymayı amaçlamaktadır. Literatürde masif yığma yapılar ağırlıklı incelenirken, narin ve yüksek boşluklu geleneksel yapılarda deprem etkilerine duyarlılığı artıran yapısal düzensizlikler ve zayıf detayların (açıklık kesişimleri, konsol bölgeleri, ince duvarlar) belirlenmesi, benzer yapılara yönelik özgün bir değerlendirme çerçevesi sunacaktır.

2 İncelenen yapının mimari özellikleri

Malatya il merkezine yaklaşık 120 km ve Arapgir ilçe merkezine yaklaşık 2 km mesafede olan yapı, 692 ada 1 parselde bulunmaktadır. İlçe merkezine yakınlığı sebebiyle Hükümet Konağı gibi idari yapılar ile Çarşı hamamı, Mirliya Ahmet Bey Cami, Millet Hanı gibi anıt eserlerin etkileşim alanına içerisinde bulunmaktadır. Konumu itibarıyla geleneksel sivil mimari dokusunun içinde bulunan yapı, pek çok geleneksel konut ile de komşuluk özelliğine sahiptir. İlk inşaa tarihi kesin olarak bilinmeyen yapının yaklaşık 150 yıllık bir geçmişe sahip olduğu bilinmektedir. İlk inşasından günümüze, kullanıma yönelik bazı iç mekân eklemeleri dışında genel olarak özgün haliyle ulaşmıştır. Bu bağlamda yapının sahip olduğu mimari elemanlar, yapıldığı döneme ait özgün mimari unsurlardır. Yapının plan ve kesit görünüşleri Şekil 1’de verilmiştir. Yapının plandaki boyutları 9.7 m x 12.2 m’dir ve kat yükseklikleri 2.4 m ve 2.6 m’dir. Bodrum katta yer alan taş duvarların kalınlıkları 75 cm ile 85 cm arasında değişmektedir. İç duvar kalınlıkları ise 15 cm olarak tespit edilmiştir.



a) Kesit görünüşleri



b) Plan görünüşü

Şekil 1. Yapının plan ve kesit görünüşleri

Kuzeydoğu-güneybatı aksında eğimli araziye dik bir şekilde oturan yapı, bodrum ve zemin kat olmak üzere iki katlıdır. Dikdörtgen planlı yapıya kuzeydoğu cephesindeki yol kotundan, bodrum katta ise eğimin düşük olduğu güneybatı cephesinden giriş yapılmaktadır. Eğimli araziye oturmasından kaynaklı, yapının bodrum katı kısmi olarak araziye gömülmüştür. Yapının bodrum katı toprak kotunun üstünde olduğunda, çalışmanın devamında bodrum olarak isimlendirilmesine rağmen normal kat gibi çözümler gerçekleştirilmiştir. Üst örtüsü beşik çatılı olup, strüktürü

ahşaptır. Yapım tekniği bodrum katta moloz taş duvar üzeri sıva, birinci katta kerpiç dolgu bağıdadır. Yapıya ait görseller Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. İncelenen yapıya ait görseller

3 Mevcut durum hasar analizi

İlgili yapı Malatya ili Arapgir ilçesi sınırları içerisinde yer almaktadır. Yapı lokasyonu nedeniyle Doğu Anadolu Fay Hattı üzerinde yer almaktadır ve bu nedenle, başta 2023 Kahramanmaraş depremleri olmak üzere birçok büyük depreme maruz kalmıştır. Bu nedenle yapıda dış kaynaklı birçok hasar mevcuttur. Bu bölümde yapının hasar durumu değerlendirilecektir.

Yapı üzerinde meydana gelen mevcut hasarlar ve yapısal kusurların tespit edilmesi amacıyla yapı üzerinde incelemelerde bulunulmuştur. Yapılan incelemeler sonucunda aşağıdaki yapısal kusurlar tespit edilmiştir:

- Yapının Güney ve Doğu cephesinde yer alan dış duvarlarında yaklaşık 5-6 cm şakulden sapmalar görülmüştür. Bu durumu destekler nitelikte bodrum ve zemin katlarda yer alan bazı iç duvarlarda da aynı yönde yatay hareketler görülmüştür (Şekil 3a-c).

- Yapının taban kotu incelendiğinde oturmaya bağlı olarak hasarlar görülmüştür. Yaklaşık olarak 3-4 cm oturma gözlemlenmiştir (Şekil 3d).

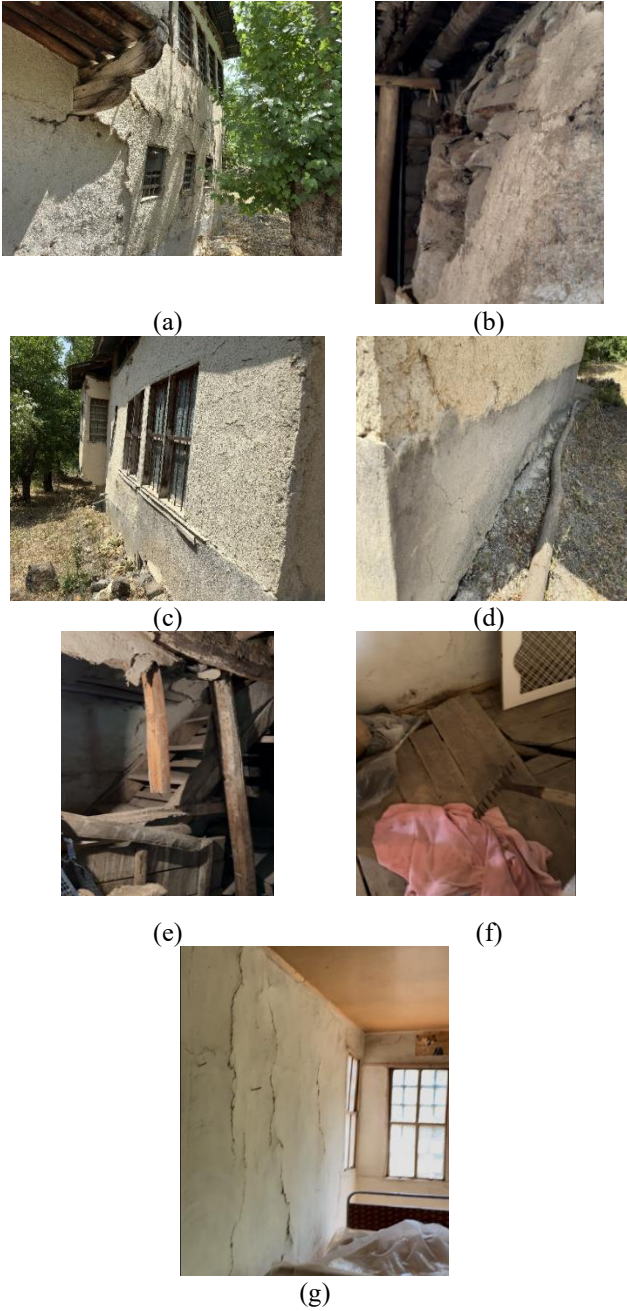
- Yapının duvarlarında yatay olarak kullanılan ahşap hatılların birçoğunda çatlamlar mevcut.

- Yapının merdiven bölümünde yer alan taşıyıcı duvarlardan biri bodrum katta tamamen yıkılmış, üst katta mevcut olan duvarın yükünü bir ahşap çerçeve taşımaktadır (Şekil 3e).

- Yapının iç duvarlarının %80’inde genişliği 0.5-2 cm arasında değişen birçok çatlak mevcuttur. Ayrıca iç duvarların bazılarında da şakulden çıkmalar gözlemlenmiştir (Şekil 3f). Burada sunulan Şekil 3f, iç duvarlarda gözlenen şakulden çıkma durumuna ilişkin temsili bir örneği göstermekte olup, metinde ifade edilen çatlakların yaygınlığı

(%80) ise yapı genelinde gerçekleştirilen saha incelemeleri sonucunda yapılan toplam gözleme dayalı bir tespittir ve tek bir görselle temsil edilmemektedir.

- Yapının mutfak bölümünde taban döşemesinin yanıl hareket sebebiyle kalktığı ahşap kaplamanın hasar gördüğü tespit edilmiştir (Şekil 3g). Şekil 3g, mutfak bölümünde taban döşemesindeki yerel kabarma/kalkma ile ahşap kaplama hasarını gösteren temsili bir örnektir. Söz konusu hasarın yanıl hareketle ilişkilendirilmesi, doğrudan ölçülmüş bir yer değiştirmeden ziyade saha incelemelerinde gözlenen komşu elemanlardaki yer değiştirme izleri ve yapının genel sismik davranışı dikkate alınarak yapılan mühendislik yorumuna dayanmaktadır.



Şekil 3. Yapıda mevcut olan hasarlar

4 Yapının zemin özelliklerinin değerlendirilmesi

Yapının oturduğu zemin özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla yapının bulunduğu lokasyonda özel bir kuruluş tarafından zemin etüdü gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucu ortaya çıkan veriler Şekil 4’de sunulmuştur. İnceleme alanında yeraltı su seviyesine rastlanmıştır. Yeraltı su seviyesi mevsimsel olarak değişiklik gösterebilir. İnceleme alanı 1/100.000 ölçekli MTA L49 paftası üzerinde yapılan jeolojik değerlendirme ve arazi gözlemleri neticesinde kireçtaşı içerisinde bulunmaktadır. Zemin ve deprem tehlike parametreleri, zemin etüdü/veri raporunda sunulan çıktılardan doğrudan alınmış olup Şekil 4’te özetlenmiştir. Buna göre çalışma alanında yerel zemin sınıfı ZD, yeraltı su seviyesi 7.50 m ve analizlerde esas alınan temel derinliği 1.50 m’dir. Zemin hız parametresi $Vs30=351$ m/s olup zemin büyütme katsayısı $A_k=2.02$ ’dir; ayrıca raporda sıvılaşma potansiyeli bulunduğu belirtilmiştir. Elastik tasarım spektrumu, DD-1/DD-2/DD-3 deprem düzeyleri için Şekil 4’te verilen spektral ivme katsayıları kullanılarak tanımlanmıştır.

Zemin hâkim titreşim periyodu T_0 : 0,56 sn olarak hesaplanmıştır. Amplifikasyon aralıkları T_a : 0,37 sn ve çıkış amplifikasyonu T_b : 0,84 sn’dir. $Vs30$ değeri, 351 m/sn ve A_k : 2,02’ dir. Kayma modülü: 1265 kg/cm^2 ve Bulk modülü: 5086 kg/cm^2 olarak hesaplanmıştır. Elastisite modülü: 3506 kg/cm^2 . Dinamik yatak katsayısı: 1782 t/m^3 . Oturma: 1,91 cm’dir. Yapıda incelenen hasarlar ve mevcut zemin etüdü sonuçları dikkate alındığında, yapıda oturma kaynaklı hasarlar gözlemlenmiş ve yapının güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için zemin iyileştirmesi ve drenaj yapılması gerektiği görülmüştür.

Veri Raporu Parametreleri			
Temelin Oturacağı Jeolojik Birim	Blok çakıllı siltli killi yamaç moloz		
Koordinat (Enlem/Boylam)	38.304746°	38.236693°	
Yeraltı Su Seviyesi (m)	7.50		
Yerel Zemin Sınıfı	ZD		
Deprem Yer Hareket Düzeyi	DD-1	DD-2	DD-3
Spektral İvme Katsayısı	$S_s=1.415, S_1=0.379$ $S_{ds}=1.415, S_{d1}=0.728$	$S_s=0.771, S_1=0.204$ $S_{ds}=0.875, S_{d1}=0.447$	$S_s=0.216, S_1=0.076$ $S_{ds}=0.346, S_{d1}=0.182$
En Büyük Yer İvmesi (g) ve hızı (cm/sn)	$PGA=0.575$ $PGV=35.569$	$PGA=0.302$ $PGV=19.018$	$PGA=0.095$ $PGV=6.649$
Bina Önem Katsayısı	1.2		
Bina Kullanım Sınıfı	BKS=2		
Deprem Tasarım Sınıfı	DTS=1	DTS=3	
Bina Yükseklik Sınıfı	BYS=8		BYS=8
Temel Derinliği (Df)	1.50 m		
$Vs30$ (m/sn)	351m/sn		
Zemin Büyütmesi (Ak)	2,02		
Sıvılaşma Potansiyeli	Sıvılaşma Vardır		
Amplifikasyon Bölgesi (Ta, Tb) (sn)(AFAD)	$T_a = 0.103$ $T_b = 0.515$	$T_a = 0.102$ $T_b = 0.511$	$T_a = 0.106$ $T_b = 0.528$

Şekil 4. Zemin etüdü sonuçları

5 Yapının bulunduğu bölgenin depremselliği

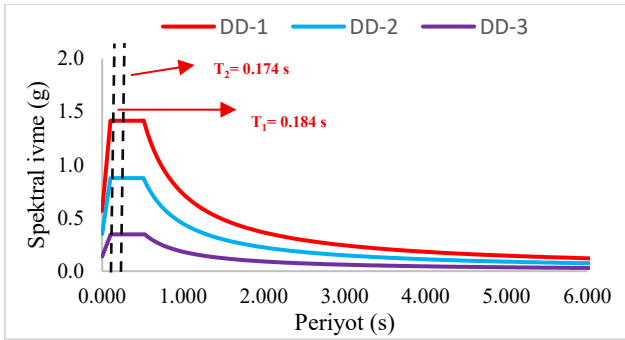
İlgili yapı Arapgir ilçesi, Çobanlı Mahallesi 692 ada ve 1 parsel üzerinde yer almaktadır (Şekil 5). Yapının koordinatları, 39.0434, 38.4985’ dir. Zemin etüt raporuna göre yapının bulunduğu zemin TBDY2018’ e göre ZD sınıfıdır. TBDY 2018’e göre İnteraktif Türkiye Deprem Tehlike Haritasından yapının koordinatları ve yerel zemin sınıfı seçilerek elde edilen elastik tasarım spektrumu Şekil 6’da sunulmuştur. Yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla SAP2000 ortamında modal analiz gerçekleştirilmiştir. Sayısal model, rölöve/ölçüm verileri

esas alınarak üç boyutlu olarak oluşturulmuş; kerpiç/yığıma duvarlar kabuk (shell) elemanlar ile, varsa ahşap döşeme/hatıl gibi elemanlar ise eşdeğer diyafram/çubuk eleman kabulleriyle temsil edilmiştir. Malzeme davranışı, modal analiz kapsamında lineer-elastik kabul edilmiş; kerpiç/yığıma için kullanılan elastisite modülü (E), Poisson oranı (ν) ve birim hacim ağırlık (γ) değerleri saha gözlemleri ve literatürde önerilen aralıklar dikkate alınarak tanımlanmıştır.



Şekil 5. Yapının arazi üzerindeki konumu

Şekil 6’da görüldüğü üzere yapının 1. ve 2. periyodu spektral ivmenin maksimum olduğu noktalara düşmektedir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018) de belirtilen deprem analiz yöntemlerinde Tepki Spektrumu Analizi metodu kullanılmıştır. Analizde kullanılan elastik tasarım spektrumu Şekil 6’da verilmiştir. Elastik tasarım spektrumu, TBDY-2018 esasları doğrultusunda %5 sönüm oranı kabul edilerek oluşturulmuştur. Analizde kullanılan elastik tasarım spektrumu, TBDY-2018 esaslarına göre belirlenen zemin ve deprem tehlike parametreleri kullanılarak oluşturulmuş olup Şekil 6’da sunulmuştur.



Şekil 6. Elastik yatay tasarım spektrumu

Yapının dinamik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan modal analiz sonucunda elde edilen 1. ve 2. doğal titreşim periyotları da aynı şekilde Şekil 6 üzerinde işaretlenerek, bu periyotların spektrum üzerindeki konumu değerlendirilmiştir. Böylece tasarım spektrumunun deprem girdisi, modal analiz periyotlarının ise yapısal modelin çıktısı olduğu dikkate alınarak, olası rezonans duyarlılığı açısından ilk modların spektral ivmenin yüksek olduğu bölgeye karşılık gelip gelmediği yorumlanmıştır. Bu

yöntem, yapının deprem sırasında gösterdiği dinamik tepkileri değerlendirmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu analizde, yapıdaki her bir titreşim modunun, belirli bir deprem hareketine karşı maksimum yer değiştirme, hız veya ivme gibi yanıtları hesaplanır. SAP2000 gibi yazılımlarda, her modun tepki spektrumuna göre yanıtları hesaplanır ve sonra bu modların etkileri birleştirilir. SAP2000’ de tepki spektrumu analizinde, CQC (Complete Quadratic Combination) yöntemi kullanılmıştır.

6 Yapının sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi

Yapının statik ve deprem yükü altında analizlerini gerçekleştirmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılmıştır. Bu amaçlar analizleri gerçekleştirmek için ticari bir yazılım olan SAP2000 programından faydalanılmıştır. Yığıma, kerpiç vb. yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesinde 3 farklı modelleme yaklaşımı mevcuttur. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilecek analizlerde bu yaklaşımlardan makro modelleme yaklaşımı kullanılacaktır. Bu yaklaşımda iki farklı malzemeden meydana gelen duvarda, malzemeler kompozit bir malzeme gibi düşünülerek tek bir malzeme özelliği ile modelleme yapılır. Bu kapsamda çalışmada kullanılacak malzeme özellikleri ilerleyen bölümlerde paylaşılmıştır.

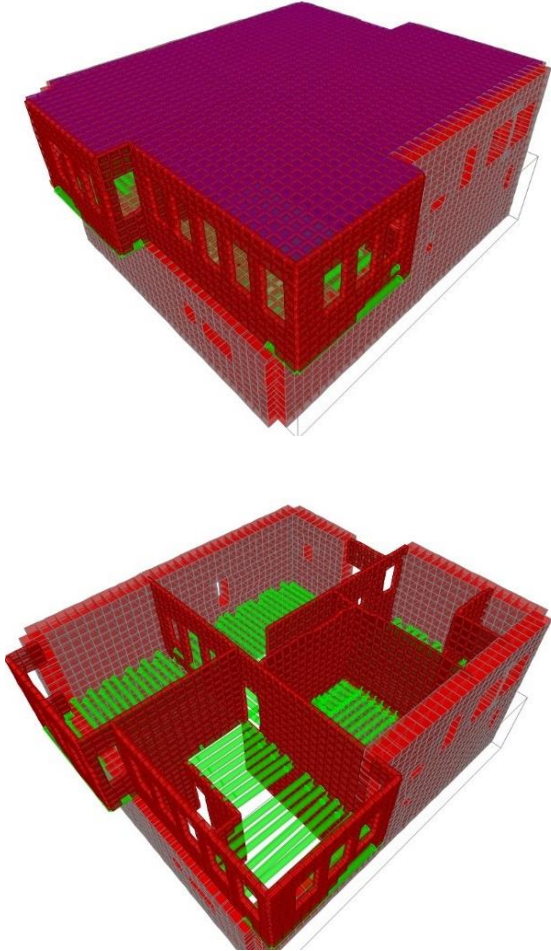
İlgili yapı tarihi eser niteliği taşıdığından orijinal yapısına zarar vermemek adına yapı üzerinde malzeme deneyleri gerçekleştirilememiştir. Gözlemsel olarak yapılan inceleme neticesinde yapının farklı bölgelerinde kullanılan malzeme cinsleri tespit edilmiştir. Buna göre yapının bodrum katı moloz taş duvar olarak, bodrum kat tavanı ise ahşap kirişlerle inşa edilmiştir. Zemin kat duvarları kerpiç dolgu olarak ahşap hatıllarla inşa edilmiştir. Analizlerde kerpiç/yığıma malzeme, eşdeğer sürekli ortam yaklaşımıyla lineer-elastik ve izotropik olarak modellenmiştir. Bu varsayım, yapıya özgü ortotropik parametreleri tanımlayacak yeterli deneysel verinin bulunmaması ve çalışmanın genel davranış/hasar eğilimlerini incelemeyi hedeflemesi nedeniyle tercih edilmiştir. Yapının modellenmesinde tüm bu malzeme grupları ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Bu malzemelere ait mekanik özellikler literatürde bu konuda yapılmış çalışmalar dikkate alınarak seçilmiştir [4, 5, 12]. Malzemelere ait mekanik özellikler Tablo 1’ de sunulmuştur.

Tablo 1. Malzeme özellikleri

	E (MPa)	γ (kN/m ³)	ν	Basınç dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)
Moloz Taş	800	19	0.25	1	0.06	0.1
Kerpiç	300	15	0.20	0.46	0.05	0.1
Ahşap	10000	4.7	0.20	10	10	-

Yapının modellenmesinde SAP2000 v22 sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Yapının duvarlarının modellenmesinde Shell (kabuk) elemanlar kullanılırken, ahşap kiriş ve dikmelerin modellenmesinde frame (çubuk) elemanlar kullanılmıştır. Yapının sonlu elemanlar modelinde 7076 kabuk (shell) eleman, 7370 düğüm noktası (node) ve 270 çubuk eleman kullanılmıştır. Yapının modellenmesinde

döşeme kirişleri modellenmiş bu nedenle rijit diyafram kabulü yapılmamıştır. Mesh boyutları maksimum 30 cm olacak şekilde ayarlanmıştır. Yapının temeli zemine ankastre olarak mesnetlenmiştir. Yapının 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli Şekil 7’ de gösterilmiştir.



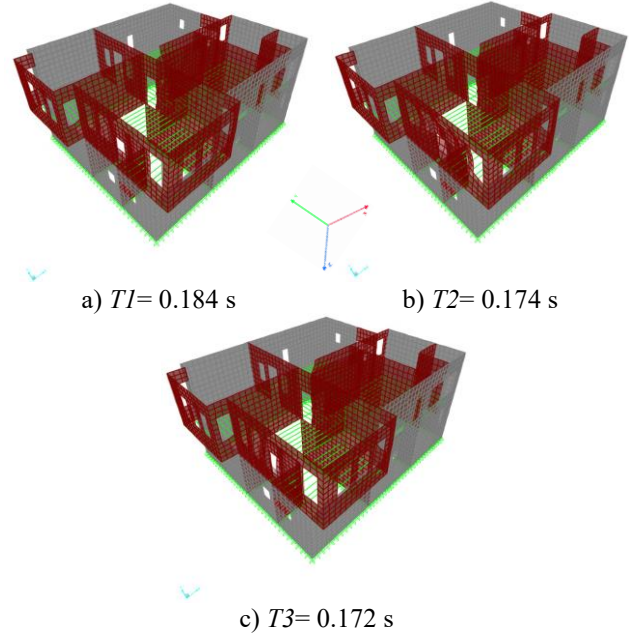
Şekil 7. Yapının sonlu elemanlar modeli

7 Bulgular ve tartışma

Bu Yapının deprem davranışını elde etmek doğrusal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda modal analiz, ölü yük analizi ve tepki spektrumu analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları aşağıda sunulmuştur.

7.1 Modal analiz sonuçları

Deprem etkileri, SAP2000 ortamında önce modal analiz ile yapının doğal titreşim özellikleri (periyotlar ve mod şekilleri) belirlenerek, ardından tepki spektrumu analizi ile hesaplanmıştır. Kütle tanımı, ölü yükler ve hareketli yüklerin yönetmelik esaslı katsayıları dikkate alınarak mass source üzerinden modele aktarılmıştır. Tepki spektrumu analizinde mod katkıları CQC yöntemiyle birleştirilmiş ve her bir deprem doğrultusunda yeterli modal temsilin sağlandığı, toplam etkin kütle katılım oranının en az %90 olacak şekilde kontrol edilmiştir. Bu amaçla analizlerde 100 mod dikkate alınmıştır. Yapının ilk üç moduna ait mod şekilleri ve periyotları Şekil 8’de verilmiştir. İlk 2 mod y ve x yönünde öteleme şeklinde elde edilmiştir.



Şekil 8. Mod şekilleri ve periyotları

7.2 Tepki spektrumu analizi sonuçları

TBDY 2018 [22] ve Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu (2017) [23] kapsamında, performans değerlendirmesinde deprem düzeylerine karşılık gelen hedefler; DD-3 için Sınırlı Hasar (SH), DD-2 için Kontrollü Hasar (KH) ve DD-1 için Göçmenin Önlenmesi (GÖ) olarak tanımlanmaktadır. Bu hedefler için görelî kat ötelenmesi sınırları sırasıyla %0.3 (SH), %0.7 (KH) ve %1.0 (GÖ)’dür ve öncelikle bu yer değiştirme esaslı koşulların sağlanması beklenir.

Yer değiştirme koşulları sağlandıktan sonra kılavuzda belirtilen dayanıma göre tasarım/denetim ilkeleri uygulanır: Yapının SH bölgesinde kalması hedefleniyorsa, taşıyıcı elemanlarda azaltılmamış deprem etkisi (R=1) altında sınır gerilmelerin aşılması öngörülür. Yapının KH performans düzeyinde kalması hedefleniyorsa, azaltılmış deprem etkisi altında sınır gerilmelerin aşılması beklenir. GÖ performans düzeyi hedeflendiğinde ise, düşey yüklerle birlikte azaltılmış deprem etkisinin oluşturduğu gerilmelerin ilgili sınır gerilmeleri belirli bir oranda aşmasına kılavuz kapsamında izin verilebilmektedir. Bu çalışmada da görelî kat ötelenmesi sınırları sağlandıktan sonra gerilme denetimleri, yukarıdaki esaslar doğrultusunda ilgili deprem düzeyi için gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, modellemeden kaynaklanan kabuller ve malzemelerin karmaşık doğasından dolayı güvenli tarafta kalınması amacıyla analizlerde azaltılmamış (R=1) deprem kayıtları esas alınmıştır.

Yapının deprem yükü altında performansını belirlemek amacıyla tepki spektrumu analizi yapılmıştır. Analizlerde deprem yükünün yanı sıra ölü yük ve hareketli yükler de dikkate alınmıştır. Yapıya x ve y yönünde deprem kuvvetleri ayrı ayrı etki ettirilmiştir ve analiz sonuçları bu bölümde paylaşılmıştır. Yapıda ölü yükler malzemelerin kendi ağırlıkları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Hareketli yükler ise TS498 standardına göre 2 kN/m² olarak hesaplarda

dikkate alınmıştır. Çatı hareketli yükü 1 kN/m^2 olarak hesaplarda dikkate alınmıştır.

Analiz sonucu elde edilen görelî kat ötelemeleri **Tablo 2'** de sunulmuştur. Görelî kat ötelemeleri katlar içerisinde hesaplanmıştır. Tablo içerisinde her bir deprem düzeyi için sınır değerler de belirtilmiştir.

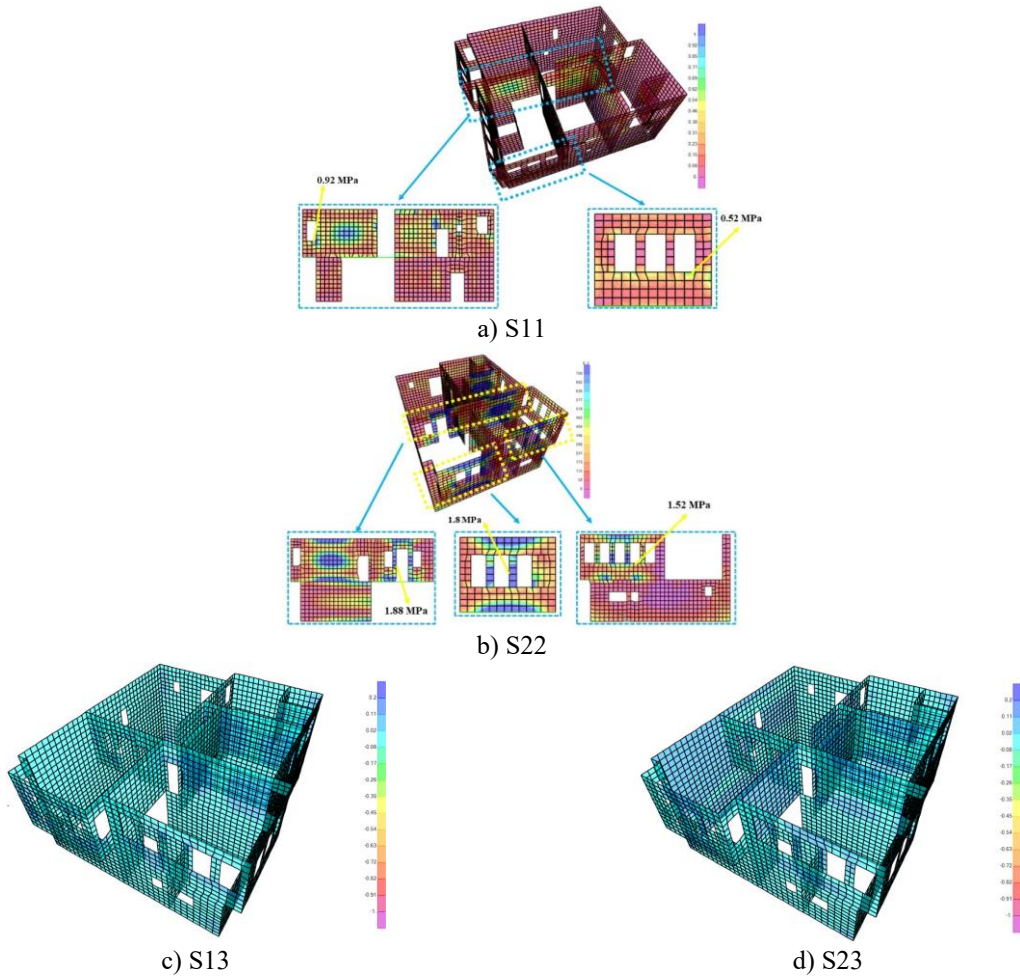
Tablo 2' ye göre görelî kat ötelemeleri sınır değerleri sağlamaktadır. Bu nedenle dayanıma göre analiz sonuçları incelenecektir. Yapının DD2 deprem düzeyinde x ve y yönünde deprem yükü altında meydana gelen normal ve kayma gerilmesi dağılımı **Şekil 9'** da verilmiştir. Gerilme değerleri azaltılmamış deprem etkisinde elde edilmiştir. **Şekil 9a** ve **Şekil 9b'** de x ve y yönünde basınç ve çekme gerilmeleri elde sunulmuştur. Birçok duvarda çekme gerilmeleri sınır değerleri aşmaktadır. Bu lokasyonlarda çatlak oluşumları beklenmektedir. **Şekil 9c** ve **Şekil 9d'** de x ve y yönünde kayma gerilmeleri elde edilmiştir. Kayma gerilmeleri sınır değerlerin altında elde edilmiştir. Gerilme değerleri DD2 deprem düzeyinde elde edilmiştir. Çekme gerilmelerinde kerpiç dolgululu iç duvarlar sınır değer 0.05 MPa iken, x doğrultusunda maksimum 0.92 MPa ve y doğrultusunda maksimum 1.88 MPa çekme gerilmesi meydana geldiği görülmüştür (**Şekil 9a**, **Şekil 9b**). Gerilme sınırlarının aşıldığı lokasyonlar genellikle büyük açıklıkların olduğu kapı ve pencere boşluklarının çevresindedir.

Sayısal analiz sonuçları ile saha gözlemleri karşılaştırıldığında, hasarın yapının genelinde homojen dağılmadığı, özellikle konsol çıkımlar ile teşkil edilen 15 cm kalınlığındaki kerpiç duvarların pencere açıklıklarıyla kesiştiği bölgelerde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Bu durum, narinlik oranının ve yüksek boşluk miktarının, deprem yükleri altında kerpiç malzemenin düşük çekme kapasitesiyle birleşerek yapının en zayıf halkasını oluşturduğunu kanıtlamaktadır.

Bu bulgu, geleneksel kerpiç yapılarda sadece taşıyıcı ana duvarların değil, narin iç bölme duvarlarının da yapının genel stabilitesi ve sismik güvenliği açısından belirleyici olduğunu göstermektedir.

Tablo 2. Görelî kat ötelemeleri

Deprem düzeyi	Kat	Yer değiştirme (mm)		Görelî ötelenme oranı (%)		Sınır değer (%)
		x	y	x	y	
DD-3	Bodrum	0.72	0.92	0.061	0.13	0.3
	Zemin	2.4	4.4			
DD-2	Bodrum	1.8	2.3	0.15	0.32	0.7
	Zemin	5.8	10.98			
DD-1	Bodrum	2.9	3.7	0.23	0.51	1
	Zemin	9.3	17.7			



Şekil 9. Yapıda meydana gelen gerilmeler (tüm birimler MPa)

8 Sonuçlar ve öneriler

Malatya ili Arapgir ilçesi 692 ada 1 parselde yer alan tarihi Malatya evlerinin mimari yapısını ve dokusunu yansıtan inceleme konusu yapının, statik yük altında ve deprem yükü altında performansını elde etmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde SAP2000 sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır.

Yapılan analizler neticesinde yapı yer değiştirmeler yönünden performans kriterlerini sağlamaktadır. Ancak gerilmeler incelendiğinde yapının bazı lokasyonlarında çekme gerilmelerinin yapının taşıyabileceği sınırların üzerinde olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu lokasyonlarda çatlak oluşumu beklenmektedir.

Sayısal analiz sonuçlarının yanı sıra yapıda yapılan yerinde inceleme neticesinde zemin ve işçilik kusurlarına bağlı olarak yapıda farklı oturumların mevcut olduğu, bunun da tesiri ile Güney ve Doğu cephesinde yer alan dış duvarlarında yaklaşık 5-6 cm şakulden sapmalar olduğu ve bu durumun birçok iç duvarda da meydana geldiği görülmüştür. Yapının güvenle yeniden kullanılabilmesi için zeminde enjeksiyon uygulaması ile zemin iyileştirme ve yapıda bütünlüğü bozulan duvarlarda yeniden örme tekniği ve kerpiç duvarlarda ahşap çaprazlar kullanılarak yanall yüklerin karşılanması gerekmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] P. Usta and Ö. Bozdağ, Seismic fragility analysis of traditional himis structures in Turkey. *Structures*, 43, 28–39, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.06.028>.
- [2] G. Karanikoloudis and P. B. Lourenço, Structural assessment and seismic vulnerability of earthen historic structures. *Engineering Structures*, 160, 488–509, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.12.023>.
- [3] C. Briceño, M. F. Noel, C. Chácarra and R. Aguilar, Integration of non-destructive testing, numerical simulations, and simplified analytical tools for assessing the structural performance of historical adobe buildings. *Construction and Building Materials*, 290, 123224, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123224>.
- [4] C. Briceño, S. Moreira, M. F. Noel, M. Gonzales, E. Vila-Chã and R. Aguilar, Seismic vulnerability assessment of a 17th century adobe church in the Peruvian Andes. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(1), 140–152, 2019. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1497224>.
- [5] M. P. Ciocci, S. Sharma and P. B. Lourenço, Engineering simulations of a super-complex cultural heritage building: Ica Cathedral in Peru. *Meccanica*, 53, 1931–1958, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11012-017-0720-3>.
- [6] G. Sumerente, H. Lovon, N. Tarque and C. Chácarra, Assessment of combined in-plane and out-of-plane fragility functions for adobe masonry buildings in the Peruvian Andes. *Frontiers in Built Environment*, 6, Article 52, 2020. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00052>.
- [7] L. Sarchi, H. Varum, R. Monteiro and D. Silveira, Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part II—Numerical modeling and fragility assessment. *International Journal of Architectural Heritage*, 12(6), 936–950, 2018. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1423132>.
- [8] G. Ataman, Hımış Yapının Taşıyıcılık Açısından Karşılaştırmalı Olarak Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [9] J. H. Kim and D. V. Rosowsky, Fragility analysis for performance-based seismic design of engineered wood shearwalls. *Journal of Structural Engineering*, 131(11), 1764–1773, 2005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339445\(2005\)131:1\(1764\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(2005)131:1(1764)).
- [10] A. Barontini and P. B. Lourenço, Seismic safety assessment of mixed timber-masonry historical building: An example in Lima, Peru. *Journal of Earthquake Engineering*, 25(5), 872–891, 2021. <https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1540368>.
- [11] P. B. Lourenço, M. P. Ciocci, F. Greco, G. Karanikoloudis, C. Cancino, D. Torrealva and K. Wong, Traditional techniques for the rehabilitation and protection of historic earthen structures: The seismic retrofitting project. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(1), 15–32, 2019. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1497232>.
- [12] S. S. Ahmadi, G. Karanikoloudis, N. Mendes, R. Illambas and P. B. Lourenço, Appraising the Seismic Response of a Retrofitted Adobe Historic Structure, the Role of Modal Updating and Advanced Computations. *Buildings*, 12(11), 1795, 2022. <https://doi.org/10.3390/buildings12111795>.
- [13] O. Onat, F. Deniz, A. Özmen, E. Özdemir and E. Sayın, Performance evaluation and damage assessment of historical Yusuf Ziya Pasha Mosque after February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquakes. In: *Structures*, Vol. 58, p. 105415, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105415>.
- [14] M. M. Maraş, A. Özmen, E. Sayın and Y. Ayaz, Seismic assessment of the historical Sütlu Minaret Mosque. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 66(2), 445–459, 2022. <https://doi.org/10.3311/PPci.19400>.
- [15] A. Özmen and E. Sayın, Different soil-structure interaction modelling strategies for seismic analysis of a masonry church. *International Journal of Architectural Heritage*, 19(9), 1341–1361, 2025. <https://doi.org/10.1080/15583058.2024.2341330>.
- [16] P. U. Evci, A. E. Sever, E. Şakalak and A. Arici, Effect of Opening Frame Materials with Different Mechanical

- Properties on the Behavior of Unreinforced Masonry Structures. *European Journal of Sustainable Development Research*, 8(1), 31-40, 2024.
- [17] B. Ş. Şeker and M. Özkaynak, Seismic Performance Evaluation of Historical Case Study of Armenian Architecture Tekor Church. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 32(2), 36-52, 2022. <https://doi.org/10.2478/ceer-2022-0018>
- [18] B. Ş. Şeker and M. Özkaynak, Analysis Of the Structural Behaviour of a Historical Mosque Damaged Due to An Earthquake: Sofular Mosque Example. *Journal of Engineering Research*, 9(4b), 2021. <https://doi.org/10.36909/jer.9787>
- [19] G. B. Sakcalı, M. B. Bağbancı, Y. Öztürk and Ç. M. Cevahir, Seismic performance of Nilüfer Hatun Bridge pre-and post-restoration under near-fault and far-fault ground motions. *Engineering Failure Analysis*, 109677, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109677>.
- [20] G. B. Sakcalı, A. Gönül, M. B. Bağbancı and İ. Yüksel, Linear/Nonlinear Dynamic Analysis and Prediction of Failure Mechanism of Irgandı Bridge. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 66(4), 1248-1261, 2022. <https://doi.org/10.3311/PPci.20355>
- [21] P. U. Evcı, A. E. Sever and E. Şakalak, Investigation of Seismic Behavior of the Historical Yeşiltepe Bridge. *Prevention and Treatment of Natural Disasters*, 3(2), 198-209, 2024. <https://doi.org/10.54963/ptnd.v3i2.291>
- [22] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018). *Resmî Gazete*: 18 Mart 2018, Sayı: 30364 (Mükerrer), Ankara, 2018.
- [23] T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü, Tarihi Yapılar için Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu. Vakıflar Genel Müdürlüğü, Sözcü Yayıncılık, Ankara, 2017.

