





Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Tarihi Yapılarda Üst Örtülerin Çelik Malzeme ile Tamamlanmasının Yapısal Açıdan İncelenmesi

 Murat ÇAVUŞ^{a,*},  Metin ARSLAN^b

^a İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat, TÜRKİYE

^b Gayrimenkul Geliştirme ve Yönetimi Anabilim Dalı, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Ankara Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: murat.cavus@gop.edu.tr
DOI:10.29130/dubited.1180533

ÖZ

Bu çalışmada tarihi Tokat Deveci Hanı'nın hasar görmüş tonozu için geleneksel malzeme dışında çelik konstrüksiyon ile sağlamlaştırma önerisi hazırlanmıştır. Yapı sonlu elemanlar yöntemiyle SAP2000 programı kullanılarak modellenerek statik ve dinamik açıdan yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde literatürde verilen malzeme özellikleri ve deprem yönetmeliğinin ilgili formülleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar deformasyon ve gerilme haritaları üzerinden tartışılmıştır. Bu veriler dikkate alındığında, benzer özelliklere sahip yapılar için geçici ya da kalıcı olarak çelik ile sağlamlaştırma-tamamlama uygulamalarının mevcut yapının sismik performansına olumlu yönde etkisinin olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Restorasyon, Tonoz, Çağdaş Malzeme, Yapısal Analiz

Structural Investigation of the Completion of the Upper Covers with Steel Material in Historical Buildings

ABSTRACT

In this study, a reinforcement proposal was prepared for the damaged vault of the historic Tokat Deveci Inn with steel construction instead of traditional materials. The finite element method modeled the structure using the SAP2000 program, and structural analyses were carried out statically and dynamically. The material properties in the literature and the relevant formulas of the earthquake code were used in the analysis. The results obtained are discussed through deformation and stress maps. Considering these data, it has been seen that temporary or permanent steel construction-completion applications for structures with similar properties positively affect the existing structure's seismic performance.

Keywords: Restoration, Vault, Contemporary Material, Structural Analysis

I. GİRİŞ

İnsanlık ilk çağlardan günümüze kadar barınma ihtiyaçlarını karşılamak için farklı türde yapılar üretmişlerdir. Bu yapılar, malzeme ve yapım tekniği alanındaki gelişime paralel olarak çeşitlenmiş ve daha sofistike hale gelmiştir [1],[2]. Çoğunlukla kagir malzemeyle, yığma yapım tekniğine göre inşa edilen bu yapıların bir kısmı kullanılan malzemenin mekanik özelliklerine ve yapım tekniğine bağlı olarak yüzlerce yıl ayakta kalarak günümüze kadar ulaşmıştır. Tarihi yapıların hasar görmelerinin en önemli nedenleri olarak malzemelerin mekanik dayanımlarının azalması ya da doğal afetlerin yol açtığı yıkımlar olarak kayıtlara geçmiştir [3],[4]. Anadolu coğrafyasında bu yıkımların en önemli sebebi diri fay hatlarının ürettiği farklı büyüklükteki depremlerdir. Tarihi yapıların depreme karşı güçlendirilebilmesi bu yapıların deprem altındaki davranışlarının tahmin edilebilmesiyle doğru orantılıdır [5]. Günümüze kadar ulaşan tarihi yapıların korunabilmesi için deprem analizleri yapılmaktadır. Bu analizler daha çok yapının davranışını belirleyerek gerilme yığılmalarının yoğunlaştığı bölgelere odaklanmaktadır [6]. Tarihi yapıların sismik analizi, çelik ya da betonarme yapım tekniğine göre inşa edilmiş yapılarınkinden farklı yöntemler gerektirir. Bu tür yapıların analizinde karşılaşılan en büyük problem yapı elaman kesitlerinin değişkenliği ve tam bir kompozit özellik göstermemeleridir. Bununla birlikte inşa aşamasında kullanılan birleşim detayları ve kalın kesitli duvarlarda iç kısım özelliklerinin tespit edilememesi başka bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden analiz yönteminin ve sonuçlarının değerlendirilmesi benzer binaların yapısal davranışlarında gözlenen deneyimleri ön plana çıkarmaktadır. Tarihi yığma yapıların performans özelliklerinin belirlenmesi için bazı araştırmacıların yaptıkları çalışmalar şu şekilde özetlenebilir.

Cardoso vd. [7] tarihi yapıların sismik performansını tahmin etmek için doğrusal olmayan analiz yöntemlerini kullanmışlardır. Şeker vd. [8] Kara Mustafa Paşa Camisi'nin statik ve dinamik analizlerini gerçekleştirmek için yapının sonlu eleman modelini oluşturmuşlar, yaptıkları analizlerle Cami'nin deprem altındaki davranışını belirlemeye çalışmışlardır. Durukal vd. [9] Ayasofya ve Sultanahmet Cami'lerinin deprem performanslarını belirlemek için 1999 Kocaeli ve Düzce deprem kayıtlarını kullanarak zaman tanım alanında hesap yöntemiyle dinamik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Casolo ve Sanjust [10] Maniace Kalesi hakkında yaptıkları çalışmada hem geleneksel sonlu eleman modellerini hem de mekanik bir hesaplama modelini kullanarak yapının sismik özelliklerini belirlemişlerdir. Doğangün ve Sezen [11] 1999 Kocaeli ve Düzce depremlerinden sonra inceledikleri beş tarihi yığma yapıda sismik hasar ve kırılgenlik incelemesi yapmışlardır. Atamturktur vd. [12] Beverley Manastırının dinamik karakteristiklerini belirlemek için sonlu eleman modelinden yola çıkarak, yapıda oluşması muhtemel hasarları belirlemişlerdir. Köseoğlu ve Canbay [13] Cenabı Ahmet Paşa Camisi'nin sonlu eleman modelini oluşturmuşlar ve çevresel yükler altında yapının davranışı belirlenmeye çalışmışlardır. Günaydın vd. [14] Orta Anadolu'da 19. yüzyıldan kalma önemli bir kervansaray olan Veli Paşa Han Binası'nın restorasyon öncesi yapısal davranışını araştırmışlardır. Bayraktar vd. [15] tarihi yığma minareler üzerinde deneysel ve teorik modal analizler gerçekleştirmiş ve analiz sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmaya çalışılmıştır. Rovero ve Tonietti [16] Halep bölgesinde bulunan geleneksel yığma yapıların kubbelerinin sonlu eleman modellerini kabuk elemanlar kullanarak modellemişler ve analiz sonuçları ile gerçek durumu tartışmışlardır. Ademovic vd. [17] yığma bir binanın sismik performansını farklı analiz türleri kullanarak araştırmışlardır. Çalık vd. [18] yaptıkları çalışmada tarihi Dürbinar Mahallesi Cami'nin restorasyon öncesi ve sonrasındaki durumunu sonlu elemanlar yöntemiyle modellemişler, iki durum arasındaki farkı incelemişlerdir. Çakır vd. [19] 2011 Van depreminde hasar gören tarihi binaların performansını değerlendirmek üzere yaptıkları çalışmalarla bu yapıların mevcut durum analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Akan [20] çalışmasında tarihi Ahi Evren Camisi'nin sonlu eleman modelini oluşturmuş literatürden elde ettiği malzeme özellikleri ile Deprem yönetmeliğinden elde ettiği bağıntıları kullanarak malzeme mekanik özelliklerini belirlemiştir. Daha sonra elde ettiği gerilme değerleri arasında karşılaştırma yapmıştır. Brandonisio vd. [21] 2009 L'Aquila depremi sonrasında bir kilisenin performansını belirlemek için itme analizini kullanmışlardır. Mustafaraj ve Yardım [22] yaptıkları çalışmada mevcut durumda hasar ve çatlaklar barındıran tarihi Naziresha Camisi'nin sonlu eleman modelini oluşturarak deprem analizi gerçekleştirmişlerdir. Kazaz ve Kocaman [23] yaptıkları çalışmada malzeme özelliklerini belirlemek için literatürde yer alan modelleri kullanmışlar ve elde ettikleri değerlerle Erzurum Lala Paşa caminin sismik analizini yapmışlardır.

Bu çalışmada bir bölümü depremlerde hasar görmüş Tokat Deveci hanı incelenmiştir. Bu çalışmanın literatürde yer alan diğer çalışmalardan farkı, aynı yapının bir kısmının çelikte diğer kısmının ise özgün malzeme kullanılarak tamamlanmasıyla oluşturulan yeni sistemin deprem performansına odaklanmasıdır. Bu amaçla tarihi Tokat Deveci Hanının tamamen çökmüş olan develik kısmındaki tonozların üst kısmının çelikte sağlamlaştırılması ve geri kalan kısmın özgün malzemeyle tamamlanması senaryosu hazırlanmıştır. Daha sonra bu yeni durumun yapısal performansını belirlenmiş ve deprem davranışı incelenmiştir. Yapıya uygun sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve yapının statik ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar deformasyon ve gerilme haritaları kullanılarak tartışılmıştır.

II. İNCELENEN YAPI ve SAYISAL MODELLEME **PARAMETRELERİ**

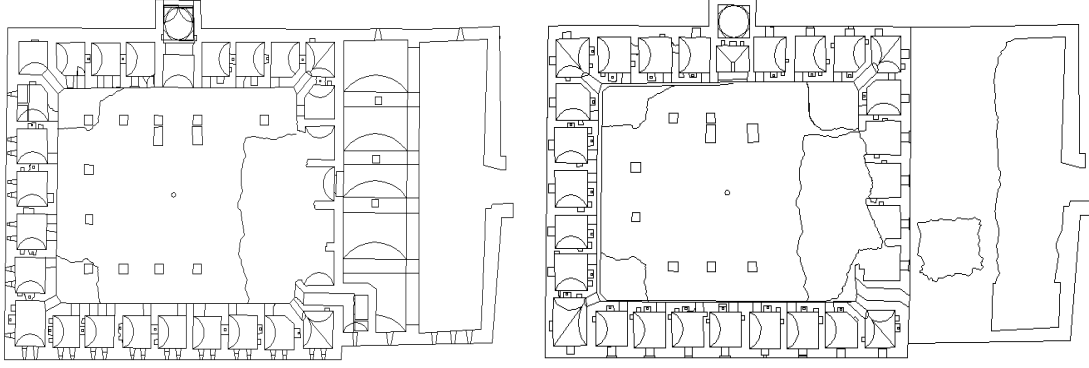
A. TOKAT DEVECİ HANI

Osmanlı dönemi yapılarından olan Tokat Deveci Hanı, Tokat il merkezindedir. Yapının XV-XVI yüzyıla ait olduğu bilinmekle beraber kimin tarafından yaptırıldığı tam olarak bilinmemektedir. Hanın adı Eski Eserler ve Müzeler Genel Müdürlüğü Doğal ve Kültürel Varlıkları Koruma envanterinde Deveci Hanı olarak geçmektedir [24]. 2007 yılında çekilen resimlerde geçirdiği depremler sonucunda iç revakların tamamen yıkıldığı, develik kısmı tonozlarının ise çöktüğü görülmektedir (Şekil 1). Giriş bölümünün üzeri kubbeyle örtülmüş olan yapı açık dikdörtgen bir avluya sahiptir (Şekil 2). İç avlunun etrafı iki katlı revaklarla çevrilmiştir. İç avludan tonozlu develik kısmına basık bir tonozla geçilmektedir [24].



Şekil 1. Deveci Hanının 2007 yılı avlu ve develik bölümü görünüşü (Tokat Vakıflar Bölge Müdürlüğü Arşivi).

Doğu-batı yönünde yaklaşık 60 m ve kuzey-güney yönünde ise yaklaşık 35 m uzunluğa sahiptir (Şekil 2). Yapının kapalı mekanlarında üst örtü geçiş elemanı olarak genellikle tonoz kullanılmıştır. Yapılan incelemelerde yıkılmış olan revaklarda ve giriş kısmında kubbe kullanıldığı düşünülmektedir [24]. Yapıda 4 farklı duvar kalınlığı kullanılmış olup yerinde yapılan ölçümlerde kalınlıklar şu şekilde tespit edilmiştir. Odalar arası bölme duvarlar 80-90 cm, zemin kat beden duvarları 135-140 cm, iç avluya bakan duvarlar 130-135 cm, üst kat avluya ve dışa bakan duvarlar ise 110-120 cm aralığında ölçülmüştür. Üst katlara çıkışta giriş kısmının sağında ve solunda merdiven olduğu düşünülmektedir [24].



Şekil 2. Zemin ve 1. kat plan krokisi 2012 yılı (Tokat Vakıflar Bölge Müdürlüğü Arşivi).

Yapının doğu cephesinde develerin bağlandığı ve ahır olarak kullanılan kısım vardır. Bu mekâna içeriden ve dışarıdan giriş mevcuttur. Ahır iki mekandan meydana getirilmiş olup üzeri kaburgalı tonoz olarak adlandırılan sistemle örtülmüştür. Bu bölümde tonoz açıklıkları yaklaşık 9 metredir. İki bölüm birbirinden kemerli ve sütunlu duvarla ayrılmıştır. Tüm yapıda duvarların örülmesinde kesme taş ve moloz taş kullanılmıştır. Tonozlar ve kubbelerin teşkilinde ise harman tuğlası kullanılmıştır.

B. SAYISAL MODELLEME PARAMETRELERİ

Tarihi binaların modellenmesi ve yapısal analizleri günümüzde inşa edilen betonarme, çelik ya da ahşap yapıların modelleme analiz yöntemlerinden farklılar içerir [25-26]. Özellikle modelleme aşamasındaki bazı belirsizlikler kesin sonuç alınmasındaki en önemli engeldir. Bu belirsizlikler 3 maddede toplanabilir. Bunlardan birincisi, malzemelerin mekanik özelliklerinin tam olarak saptanamaması ve kompozit bir yapı oluşturmamaları nedeniyle hesaplarda kesin bir değer yerine yaklaşık değerlerin kullanılmasıdır. İkincisi, geniş kesitlere sahip yapı elemanlarının içyapılarının tam olarak bilinmemesi nedeniyle modellemelerde genellikle duvar yüzeyi ile iç yüzeyinin benzer kabul edilmesidir. Son olarak yapı elemanlarının geometri ve ölçü özelliklerinin her noktada farklılık göstermesi ve bunların modele tam yansıtılmaması olarak verilebilir. Bu belirsizlikler ortaya çıkan sonuçların yorumlanmasında bazı tecrübelerden faydalanmayı gerektirmektedir.

Tokat Deveci Hanı'nın sonlu elemanlar modeli oluşturulurken, bu hususlar dikkate alınmıştır. Son derece karmaşık geometrik yapıya sahip yapının özellikle revak yapı birleşimleri mümkün olduğunca hassas bir şekilde tanımlanmıştır. Yapının analiz modeli için yapılan matematiksel modelleme sırasında aşağıda belirtilen kabuller yapılmıştır:

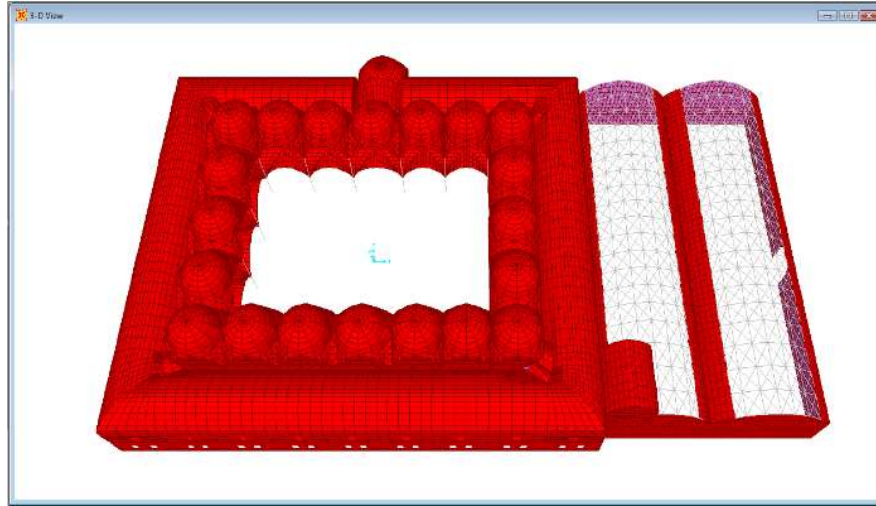
- Yapıda kullanılan taş ve tuğlanın harç ile birlikte tek bir malzeme özelliği gösterdiği varsayılmış doğrusal elastik özelliklere sahip olduğu ve modelleme yaklaşımı olarak da makro modelleme tekniği kullanılmıştır.
- Çoğu zaman tarihi yapı elemanlarından malzeme örneği alınmadığından malzeme özellikleri literatürde benzer yapılar için yapılan çalışmalarda elde edilen değerler ve önerilen bağıntılardan faydalanılarak üretilmiştir.
- Kalın kesitlere sahip yapı elemanlarının içyapıları tam olarak bilinemediğinden duvar dış kısımlarında kullanılan malzemelerin kalınlık boyunca devam ettiği varsayımı yapılmıştır.
- Yapının çelik ile örtülen tonoz bölümünün sabit yükleri hesaplanırken, ana taşıyıcı kendi ağırlıklarına ek olarak bölgenin kar yükü de dikkate alınmıştır.
- Modelde duvarların temelle bağlantısı ankastre olarak alınmıştır.
- Yapıya yer hareketinin yol açtığı zorlamaların tespiti için sabit yükler ve deprem spektrumu ile tanımlanan EQx ve EQy şeklinde iki ayrı yükleme durumu uygulanmıştır.
- Sonuçların kolaylıkla değerlendirilebilmesi için, G + EQx ve G + EQy olmak üzere iki ayrı yük kombinasyonu tanımlanmıştır. Modal analizde ilk 20 mod dikkate alınmıştır.

Yapının modellenmesinde duvarlar, kubbeler ve tonozlarda kabuk elemanlar kullanılmıştır. Revaklarda bulunun kolonlar ise çubuk eleman olarak tanımlanmıştır. Yapının kubbe ve tonozları tuğla ile yapılmış geri kalan kısımlarında ise taş kullanılmıştır. Tonoz kalınlıkları yerinde yapılan kalıntı ölçümlerine göre develik kısmında 35 cm olarak alınmıştır. Mekanik ve fiziksel analizler için numune alınmadığından analizlerde daha önceki çalışmalarda [27-28] benzer yapılar için kullanılan ve Tablo 1’de verilen malzeme değerleri kullanılmıştır.

Tablo 1. Modellemede kullanılan elemanlar için malzeme özellikleri.

Malzeme	Elastisite modülü (MPa)	Özgül ağırlık (kN/m ³)	Poisson Oranı
Tuğla tonoz ve kubbeler (harç ile)	3500	18	0,2
Taş duvarlar (harç ile)	1500	24	0,2

Sayısal modelde develik kısmı tonoz üst kısımlarının çelikle sağlamlaştırıldığı, geri kalan kısımların ise geleneksel malzemeyle tamamlandığı varsayılmıştır. Yapının sonlu eleman modelinde 21235 kabuk ve 1060 adet çubuk eleman kullanılmıştır. Yapının sonlu elemanlar modelini gösteren durum Şekil 3’te verilmiştir.

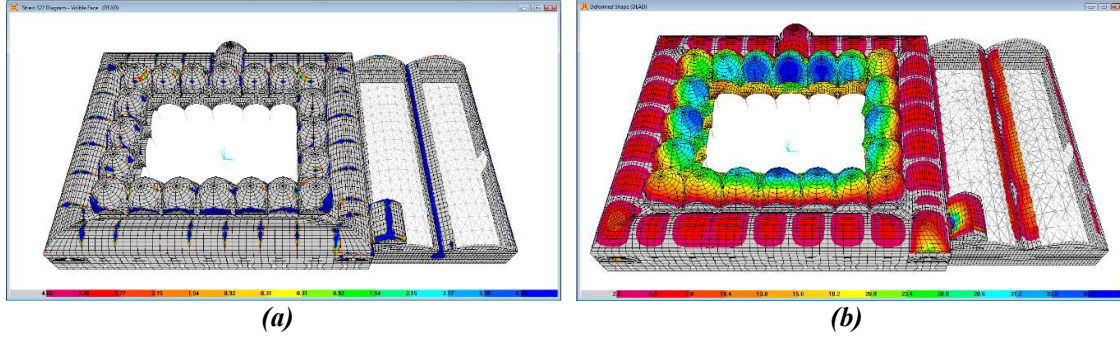


Şekil 3. Yapının sonlu elemanlar modeli.

III. YAPISAL ANALİZ SONUÇLARI

A. STATİK ANALİZ

Statik analizde yapıda kullanılan malzemelerin doğrusal elastik özelliklere sahip olduğu kabul edilmiştir. Elde edilen gerilme ve yer değiştirme haritaları Şekil 4’te verilmiştir. Kendi ağırlığı altında oluşan basınç gerilmeleri incelendiğinde, revaklarda oluşan maksimum basınç gerilmeleri 1,27 MPa ya kadar ulaşmıştır. Yapının tonoz kısmına bakıldığında basınç gerilme değeri 1,46 MPa olarak gerçekleşmiştir (Şekil 4-a). Yapılan analize göre maksimum yer değiştirmenin düşey yönde revakların tepe noktasında meydana geldiği ve maksimum yer değiştirme değerinin 2,23 mm’ye ulaştığı görülmektedir (Şekil 4-b). Yapıda oluşan gerilme ve yer değiştirmelerin beklendiği gibi herhangi bir risk oluşturmadığı görülmüştür.



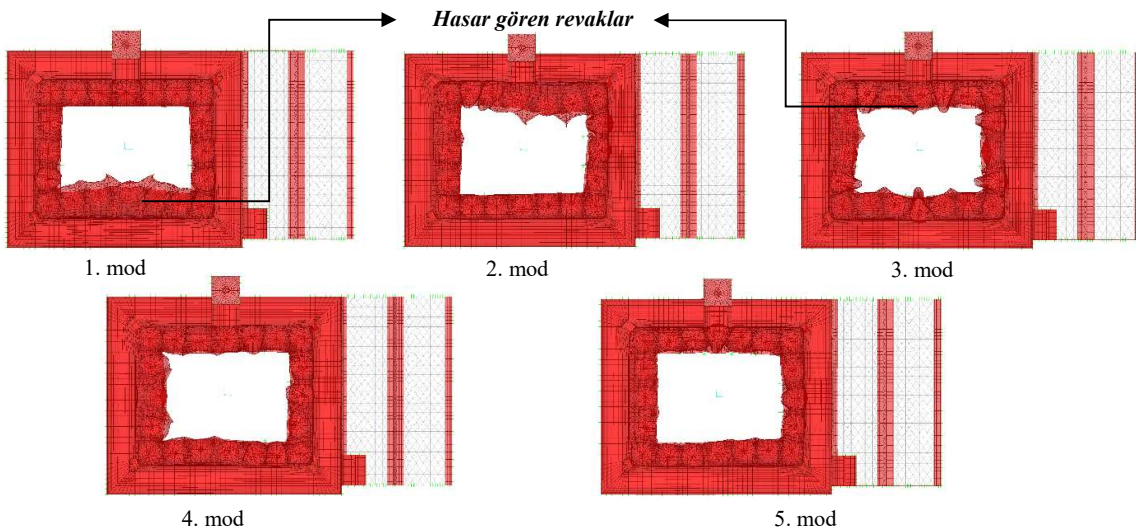
Şekil 4. Statik analiz sonucunda elde edilen (a) eksenelsel gerilmeler (b) yer deęistirmeler.

B. MODAL ANALİZ

Yapıların deprem anındaki muhtemel davranışlarının tespit edilebilmesi için öncelikle serbest titreşim mod şekillerinin ortaya konması gerekir. Bu işlem için yapıya etkiyen dinamik yükler altında olası şekil değistirmeler ve kütle katılım oranları belirlenerek riskli noktalar tespit edilir [29-31]. Tokat Deveci Hanı'nın dinamik hesaplamaları için yapılan modal analiz sonucunda elde edilen mod şekilleri ve titreşim periyotları belirlenmiştir. Analizlerde 20 mod kullanılmıştır. Aşağıdaki Tablo 2'de ilk beş moda ait periyot, frekans ve kütle katılım oranları, Şekil 5'te ise ilk beş moda ait deformasyonlar gösterilmektedir.

Tablo 2. Modlara göre periyotlar ve kütle katılım oranları.

Mod	Periyot (sn)	Frekans (Hz)	Kütle Katılım Oranı		
			X Yönü	Y Yönü	Z Yönü
1	0,177	3,75	0,0961	0,7345	0,0001
2	0,116	5,87	0,1227	0,4773	0,12E-4
3	0,056	6,54	0,2365	0,0443	0,62E-5
4	0,020	11,41	0,0651	0,0039	0,25E-5
5	0,006	17,34	0,0042	0,0059	0,34E-5



Şekil 5. Yapının ilk beş moduna ait deformasyon şekilleri.

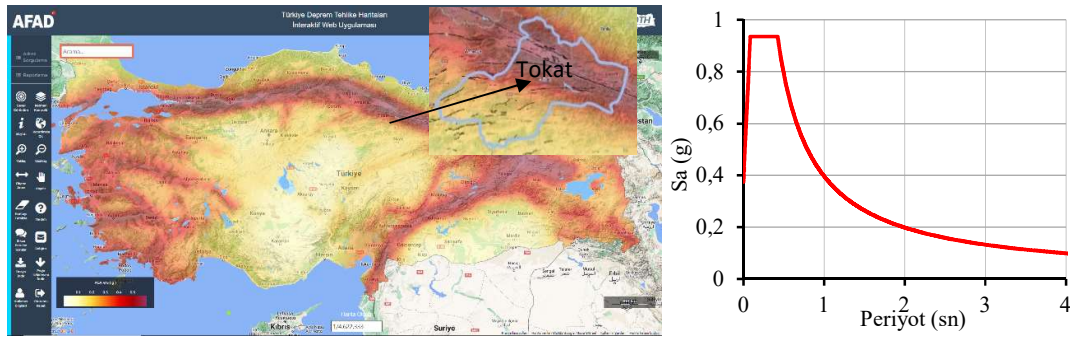
Yapının mod şekilleri incelendiğinde ilk 2 modun doğu-batı yönünde, 3. ve 4. modların kuzey-güney yönünde ve 5. moddan itibaren burulma şeklinde gerçekleştiği görülmüştür. İlk beş moda ait deformasyon şekilleri incelendiğinde deprem sırasında özellikle iç avluda yer alan revakların büyük oranda zorlandığı görülmektedir. Şekil 6'da verilen 2007 yılına ait fotoğraflar incelendiğinde yapının yıkılan ve hasar gören kısımlarının, analiz sonucunda tespit edilen hasar görme potansiyeli olan kısımlarla uyumlu olduğu görülmektedir. Develik kısmında bulunan ve geniş açıklığa sahip tonozların çelikle geçilmesi sayesinde burada oluşacak deformasyonların sınırlandırıldığı görülmektedir.



Şekil 6. Yapının 2007 yılındaki iç avlusunu gösteren fotoğraflar (Vakıflar Bölge Müdürlüğü Arşivi).

C. DİNAMİK ANALİZ

Deveci hanının bulunduğu bölge Türkiye deprem risk haritasında yüksek riskli bölgeler içinde kalmaktadır. Yakın tarihimizde olan Erbaa depreminde çok sayıda bina hasar görmüştür. Tokat merkezde bulunan bazı binalarla birlikte Deveci Hanı da etkilenmiştir. Günümüzde restore edilmiş olan hanın 2007 resimlerinde durum açıkça görülmektedir. Deveci Hanının dinamik analizi SAP2000 [32] programında gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizlerde Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde [33] de önerilen normalize edilmiş ivme spektrumu kullanılmıştır. Buna göre Tokat Deveci Hanı'nın bulunduğu bölge için deprem risk haritasından elde edilen veriler ve bölgenin yerel zemin sınıfı dikkate alınarak hesap spektrum eğrisi oluşturulmuştur (Şekil 7). Binanın mevcut durumu göz önüne alınarak bina önem katsayısı bir olarak belirlenmiştir. Deprem yüklerinde herhangi bir azaltma yapılmamış ve R değeri bir olarak alınmıştır. Deveci Hanı'nın olası bir deprem sırasındaki davranışı ve taşıyıcı elemanları üzerinde oluşması muhtemel deformasyonlar ve asal gerilmeler ile ilgili şu gözlemler yapılmıştır.



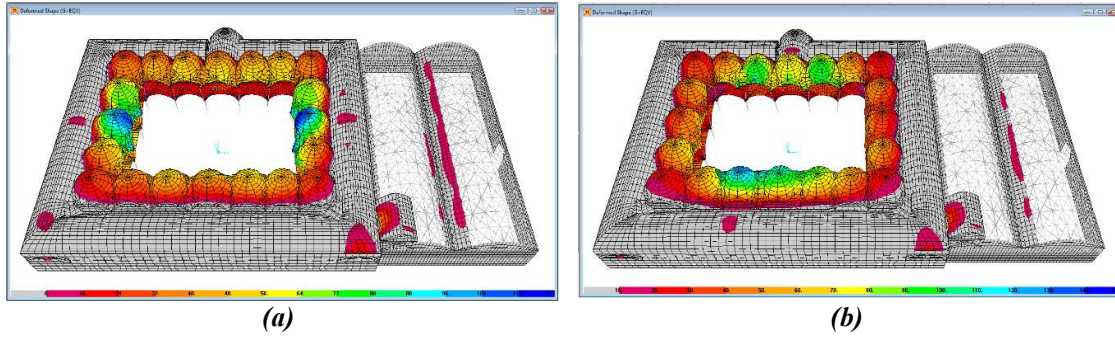
Şekil 7. Deprem risk haritasında Tokat'ın yeri ve Hesap spektrum eğrisi.

Yapının toplam ağırlığı 98147 kN, taban kesme kuvveti doğu-batı doğrultusunda uygulanan deprem etkisi altında toplam 4662 kN, kuzey-güney doğrultusunda uygulanan deprem etkisi altında 6582 kN olarak hesaplanmıştır (Tablo 3). Bu sonuçlara göre, yapının maruz kaldığı en büyük taban kesme kuvveti kuzey-güney yönünde toplam ağırlığının yaklaşık %7'sine karşılık geldiği görülmüştür.

Tablo 3. Taban kesme kuvvetleri ve eksenel kuvvetler.

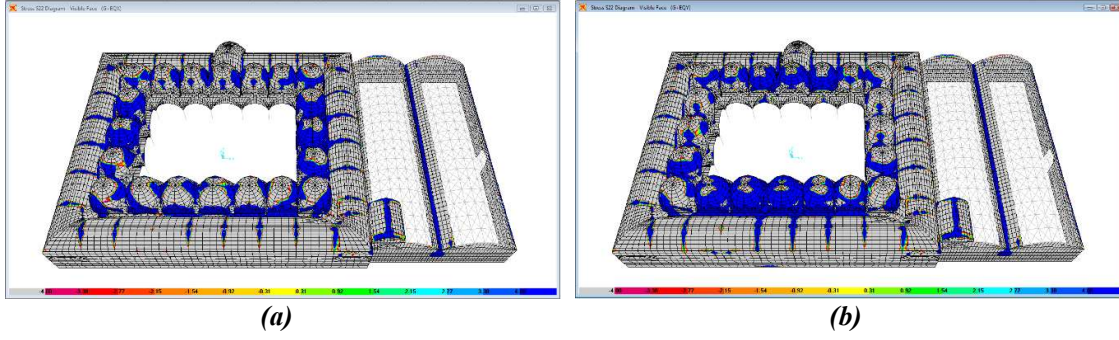
Yükleme tipi	Analiz tipi	Meydana gelen taban kesme kuvveti (kN)		
		X Yönü (Doğu-Batı)	Y Yönü (Kuzey-Güney)	Z Yönü (Düşey)
G	Doğrusal Statik	-	-	98147
EQx	Doğrusal Davranış Spek.	Max	4662	1456
EQy	Doğrusal Davranış Spek.	Max	1456	6582
G+EQx	Kombinasyon	Max	4662	1456
	Kombinasyon	Min	-4662	-1456
G+EQy	Kombinasyon	Max	1456	6582
	Kombinasyon	Min	-1456	-6582

Kareye yakın bir geometriye sahip olan yapının ana bölümünün ve iç mekanların simetrik olmasından dolayı oluşan yer değiştirmeler X ve Y yönündeki deprem yüklemelerinde birbirine yakın çıkmıştır. Develik kısmının yapının doğu-batı yönündeki stabilitesine kayda değer bir katkı sağlamadığı görülmüştür. Her iki yönde de 3,5-3,8 cm aralığında hesaplanan yer değiştirmeler revak kubbelerinde oluşmuştur (Şekil 8). Yapı yer değiştirmeler açısından değerlendirildiğinde (gerilme ve deformasyonlar dikkate alınmadığında) revaklarda oluşan hareket, yapının mevcut hasarlı durumuyla örtüşmektedir. Revakların özgün malzemeye onarımı sonrasında, ileriki tarihlerde oluşacak depremlerde hasar görmesi beklenmelidir. Onarım ve tamamlamasında çelik kullanılan develik kısmında her iki deprem doğrultusu için yer değiştirmeler 0,6 cm'nin altında kalmıştır.



Şekil 8. Deprem yüklemesi altında elde edilen yer değiştirmeler (a) X yönü (doğu-batı) (b) Y yönü (kuzey-güney)

Tonozların çelikle onarımı sonucu yapılan deprem analizinde bu yapının en zayıf noktalarının revaklar olduğu ortaya çıkmaktadır. Büyük açıklığa sahip tonozların geleneksel malzeme yerine çelikle onarımı bu bölgelerde oluşacak gerilmeleri sınırlandırmıştır. Doğu-batı yönünde uygulanan deprem kuvvetiyle revakların bazı kısımlarında oluşan basınç gerilmeleri 4,65 MPa olarak hesaplanmıştır. Kuzey-güney yönünde uygulanan deprem kuvvetiyle revakların duvarla birleştiği pandantif kısımlarında oluşan basınç gerilmeleri 4,95 MPa'a kadar ulaşmıştır. Develik kısmındaki tonozlarda ise gerilmeler her iki deprem doğrultusu için en fazla 1,98 MPa düzeyinde gerçekleşmiştir (Şekil 9). Bunlarla birlikte revakları ayakta tutan kolonlarda çok büyük oranda kesme gerilmeleri meydana gelmiştir.



Şekil 9. Deprem yüklemesi sonucunda elde edilen aksenal gerilmeler (a) X yönü (doğu-batı) (b) Y yönü (kuzey-güney)

Özellikle revaklarda oluşan gerilme değerlerinin Türk Deprem Yönetmeliğinin ortaya koyduğu sınır değerleri zorladığı, ancak çelikle onarımı yapılan develik kısmında oluşan gerilmelerin sınırlı kaldığı görülmüştür.

IV. SONUÇ

Bu çalışmada Tokat Deveci Hanının hasarlı tonozlarında özgün malzeme yerine çelik malzeme kullanılarak bir onarım senaryosu hazırlanmıştır. Analiz parametreleri 3. bölümde verilen deprem bölgesi ve zemin sınıfı dikkate alınarak oluşturulmuştur. Bu analizlerde, doğrusal elastik malzeme varsayımına göre çok sayıda düğüm noktası ve kabuk eleman oluşturulmuştur. Elde edilen bulgular ile ilgili aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Yapılan statik analiz sonucunda elde edilen gerilme deformasyon şekilleri herhangi bir hasar oluşturmayacak şekilde ve beklendiği şekilde oluşmuştur.
- Geleneksel malzemeyle onarılan revaklarda hasar vermeye sonuçlanacak deformasyonların (ötelenmelerin), bu elamanlarda oluşacak gerilmelerden daha belirleyici olacağı görülmüştür. Çelikle onarımı yapılan tonozlarda meydana gelen gerilmeler yapının diğer kısımlarında meydana çıkan gerilmelerden daha düşük olarak hesaplanmıştır.
- Gerilme haritaları ile yapının 2007 yılı resimleri karşılaştırıldığında, gerilme yığılmalarının olduğu bölgeler ile mevcut durumdaki hasarlı bölgelerin uyumlu olduğu görülmüştür.

Ancak bu tür analizlerde malzeme değerlerinin literatürden alınması ve gerçek yapı kesitlerinin modele çok hassas bir şekilde yansıtılmamış olması sebebiyle elde edilen sayısal değerler nihai sonuç olarak görülmemelidir. Yüzlerce yıl önce yapılmış yapıların bazı bölümlerinde oluşabilecek malzeme dayanım kayıplarının analiz sonuçlarını sınırlı da olsa değiştirebileceği unutulmamalıdır.

TEŞEKKÜR: Bu çalışmada kullanılan Rölöve Projeleri ve Fotoğraflar için Tokat Vakıflar Bölge Müdürlüğüne ve Mimar Özkan Öner'e teşekkür ederiz.

V. KAYNAKLAR

- [1] F. Aras, L. Krstevka, G. Altay, and L. Tashkov, "Experimental and numerical modal analyses of a historical masonry palace," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 1, pp. 81-91, 2011.
- [2] M. Betti, and A. Vignoli, "Modeling and analysis of a Romanesque church under earthquake

- loading: assessment of seismic resistance,” *Engineering Structures*, vol. 30, no. 2, pp. 352-367, 2008.
- [3] A.İ. Ünay, *Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı*, Ankara, Türkiye, ODTÜ Mimarlık Fak. Basım İşliği, 2002, ss. 76- 77.
- [4] Ö. Can, "Seismic performance comparison of a building made with old masonry Bayburt stone according to old and new TBDY," *International Journal of Scientific and Technological Research*, Vol. 5, no. 11, pp. 18 – 24, 2019.
- [5] Ş. Sözen, and M. Çavuş, “Assessment of the seismic performance of historical building reinforced with steel buttress,” *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 23, no. 7, pp. 3113-3121, 2019.
- [6] P.B. Lourenço, A. Zucchini G. Milani and A. Tralli, “Homogenization Approaches for Structural Analysis of Masonry Buildings” *Proceedings of the 5th International Conference*, New Delhi India, 2006, pp. 59-76.
- [7] R. Cardoso, M. Lopes, and R. Bento, “Seismic evaluation of old masonry buildings. part I: Method description and application to a case-study,” *Eng. Struct.* vol. 27, no. 20, pp. 24–35, 2005.
- [8] B.Ş. Şeker, A. Doğangün ve F. Çakır, “Merzifonlu Kara Mustafa Paşa Cami Taşıyıcı Sistemi Üzerine İrdeleme,” *SDU İnternational Technologic Science*, c. 5, ss. 112-120, 2013.
- [9] E. Durukal, S. Cimilli, and M. Erdik, “Dynamic Response of Two Historical Monuments In İstanbul Deduced from The Recordings of Kocaeli and Düzce Earthquakes,” *Bulletin of The Seismological Society of America*, vol. 93, no. 2, pp. 694-712, 2003.
- [10] S. Casolo, and C.A. Sanjust, “Seismic analysis and strengthening design of a masonry monument by a rigid body spring model: The “Maniace Castle” of Syracuse,” *Eng Struct*, vol. 31, no. 7, pp. 1447–59, 2009.
- [11] A. Doğangün, and H. Sezen, “Seismic vulnerability and preservation of historical masonry monumental structures,” *Earthquakes and Structures*, vol. 3, no. 1, pp. 83–95, 2012.
- [12] S. Atamturktur, L. Bornn, and F. Hemez, “Vibration characteristics of vaulted masonry monuments undergoing differential support settlement,” *Engineering Structures*, vol. 33, pp. 2472-2484, 2011.
- [13] G.C. Köseoğlu, and E. Canbay, “Assessment and Rehabilitation of The Damaged Historic Cenabı Ahmet Pasha Mosque,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 57, pp. 389-398, 2015.
- [14] M. Günaydın, C. Demirkır, A.C. Altunışık, E.D. Gezer, A.F. Genç, and F.Y. Okur, “Diagnosis and monitoring of historical timber Velipaşa Han building prior to restoration,” *International Journal of Architectural Heritage*, pp. 1–25, 2021.
- [15] A. Bayraktar, A.C. Altunışık, B. Sevim, T. Türker, M. Akköse, and N. Çoşkun, “Modal Analysis, Experimental Validation, and Calibration of A Historical Masonry Minaret,” *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 36, no. 6, pp. 516-24, 2008.
- [16] L. Rovero, and U. Tonietti, “Structural behavior of earthen corbelled domes in the Aleppo’s region,” *Materials and Structures*, vol. 45, pp. 171-184, 2012.
- [17] N. Ademovic, M. Hrasnica, and D.V. Oliveira, “Pushover analysis and failure pattern of a typical masonry residential building in Bosnia and Herzegovina,” *Eng. Struct.*, vol. 50, pp. 13–29, 2013.

- [18] İ. Çalık, A. Bayraktar ve T. Türker, “Betonaarme kubbeli taş yığma duvarlı camilerin dinamik davranışına etkisinin çevresel titreşim yöntemiyle incelenmesi,” *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, c. 31, s. 3, ss. 621-630, 2016.
- [19] F. Cakir, E. Uçkan, J. Shen, B.S. Seker, and B. Akbas, “Seismic damage evaluation of historical structures during Van Earthquake,” *Eng Fail Anal*, vol. 58, pp. 249–66, 2015.
- [20] A.E. Akan, “Tarihi Ahşap Sütunlu Camilerin Sonlu Elemanlar Analizi ile Taşıyıcı Sistem Performansının Belirlenmesi,” *SDU International Technologic Science*, c. 2, s.1, ss. 41-54, 2010.
- [21] G. Brandonisio, G. Lucibello, E. Mele, and A.D. Luca, “Damage and performance evaluation of Masonry Churches in the 2009 L’Aquila earthquake,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 34, pp. 693-714, 2013.
- [22] E. Mustafaraj and Y. Yardım, “Conditional Assessment of Historical Structures: Earthquake Performance of Naziresha Mosque,” Presented at International Students Conference of Civil Engineering, Tirana, Albania, 2012.
- [23] İ. Kazaz ve İ. Kocaman, “Taş Yığma Camilerin sismik yük kapasitelerinin değerlendirilmesi,” *Gazi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 33, s. 2, ss. 557-573, 2018.
- [24] B.I. Aksulu, “Tokat Deveci Hanı,” 9. Milletlerarası Türk Sanatları Kongresi, T.C. Kültür Bakanlığı Yayınlar Dairesi Başkanlığı, İstanbul, ss. 65-77, 1991.
- [25] S. Toker, and A.I. Ünay, “Mathematical Modeling and Finite Element Analysis of Masonry Arch Bridges,” *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, c. 17, s.2, ss. 129-139, 2004.
- [26] M. Yurdakul, F. Yılmaz, M. Artar, Ö. Can, E. Öner, and A. Daloğlu, “Investigation of time-history response of a historical masonry minaret under seismic loads,” *Structures*, Vol. 30, pp. 265-276, 2021.
- [27] F. Jalayer, H. Ebrahimian, A. Miano, G. Manfredi, and H. Sezen, “Analytical fragility assessment using unscaled ground motion records,” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 46, no. 15, pp. 2639–2663, 2017.
- [28] L. Pela, A. Aprile, and A. Benedetti, “Seismic assessment of masonry arch bridges,” *Eng. Struct.*, vol. 31, no. 8, pp. 1777-1788, 2009.
- [29] A. Preciado, G. Bartoli, and H. Budelmann, “Fundamental aspects on the seismic vulnerability of ancient masonry towers and retrofitting techniques,” *Earthq. Struct.*, vol. 9, no. 2, pp. 339-352, 2015.
- [30] Ö. Can, “5 Katlı Yığma Binanın Deprem Performansının Belirlenmesi ve Güçlendirme Önerileri,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 9, s. 2, ss. 689-701, 2021.
- [31] M. Artar, K. Çoban, M. Yurdakul, Ö. Can, F. Yılmaz, and M. B. Yıldız, “Investigation on seismic isolation retrofit of a historical masonry structure,” *Earthquakes and Structures*, vol. 16, no. 4, pp. 501-512, 2019.
- [32] SAP2000, “Integrated Structural Analysis and Design Software,” Computers and Structures, Inc., Ver. 16.0.0, Berkeley, California.
- [33] TBDY-2018, “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği,” *Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı*, Ankara, 2018.