

Yedikardeş Burcu'nun Dinamik Analizi

Rojbin İZGİ YÖNTEN¹, Mehmet Emin ÖNCÜ^{1*}, Mehmet CEBE²

¹Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır

²Dicle Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Diyarbakır

(ORCID: [0000-0001-8362-0392](https://orcid.org/0000-0001-8362-0392)) (ORCID: [0000-0001-6434-293X](https://orcid.org/0000-0001-6434-293X)) (ORCID: [0000-0003-3830-4619](https://orcid.org/0000-0003-3830-4619))



Anahtar Kelimeler:

Tarihi yapılar, Diyarbakır surları, Yedikardeş Burcu, Yapısal performans.

Öz

Bu çalışmada Diyarbakır'ın en önemli kültür mirası olan Diyarbakır Surlarının en büyük burçlarından biri olan Yedikardeş Burcunun (41 nolu burç) yapısal performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Yapısal özellikleri incelenen burç, makro modelleme tekniği kullanılarak üç farklı şekilde modellenmiştir. Burcun dinamik analizi ANSYS programı kullanılarak yapılmış ve sonuçlar üç model için karşılaştırılmıştır. Düşey yük ve azaltılmamış deprem etkisi altında oluşan asal gerilmelerin Yedikardeş Burcunun hesap dayanımlarını aşmadığı görülmüştür. Ayrıca burcun farklı kotlarındaki deplasmanlar alınarak hesaplanan öteleme oranının, tarihi yapıların indirgenmemiş deprem etkisi altında sınırlı hasar performans düzeyi için kabul edilen %0.3 öteleme oranı değerini aşmadığı görülmüştür. Bu nedenle Yedikardeş Burcunun sınırlı hasar performans düzeyini sağladığı değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda büyük hacimli tarihi yapılarda gerçek davranışı yansıtan modelin yapının özel durumuna göre değişebileceği görülmüştür.

Dynamic Analysis of Yedikardeş Bastion

Keywords:

Historical structures, Diyarbakır city walls, Yedikardeş Bastion, Structural performance.

Abstract

In this study, it is aimed to evaluate the structural performance of the Yedikardeş Bastion (41st bastion), one of the biggest bastions of Diyarbakır City Walls, which is the most important cultural heritage of Diyarbakır. The bastion, whose structural characteristics were examined, was modeled in three different ways by using macro modeling technique. Dynamic analysis of the bastion was performed using the ANSYS program and the results were compared for three different models. It has been observed that the principal stresses under the effect of vertical and unreduced earthquake loads do not exceed the strengths of Yedikardeş Bastion. In addition, it has been obtained that the drift ratio calculated by taking the displacements at different elevations of the bastion does not exceed the 0.3% drift ratio value, which is accepted for the limited damage performance level of historical structures under the effect of unreduced earthquakes. For this reason, it was evaluated that Yedikardeş Bastion provides limited damage performance level. As a result of the study, it has been seen that the model reflecting the real behavior in large-volume historical buildings can change according to the characteristics of the structures.

1. Giriş

Tarihi yapılar geçmişten günümüze varlıklarını sürdürebilmiş, birçok farklı yapı tekniği ile inşa

*Sorumlu yazar: oncume@dicle.edu.tr

Geliş Tarihi: 23.09.2021, Kabul Tarihi: 29.10.2021

edilmiş yapılardır. Her biri kendine özgü dokusu ve yapısıyla insanlığın önemli ve ortak değerleridir. Bu yapıların korunması, gerektiğinde doğru onarım yöntemleri ile orijinaline uygun olarak onarılması ve geleceğe güvenle aktarılması önem arz etmektedir. Bu doğrultuda tarihi yapıların mevcut durumlarının incelenerek dinamik analizlerinin yapıldığı çalışmalar önem kazanmaktadır.

Toker ve Günay [1] tarafından genel bir kemerli taş köprü örneği modellenmiştir. Çalışma ile yığma yapıların korunması ve restorasyon yöntemlerinin belirlenmesi amacıyla matematiksel modelleme yapılabileceği, modelleme sonucu yapılan analizler sonucunda yapının zayıf bölgelerinin belirlenebileceği, yapılarda yüklem altında meydana gelebilecek çatlakların yerlerinin belirlenebileceği sonuçlarına ulaşılmıştır. Bayraktar [2] tarafından farklı tipteki tarihi yapıların yapısal özelliklerine uygun güçlendirme teknikleri değerlendirilmiştir. Sevim ve ark. [3] tarafından Karadeniz bölgesinde bulunan Osmanlı ve Şenyuva kemer köprüleri üç boyutlu olarak ANSYS programında modellenerek bulunan frekans değerleri ile deneysel titreşim analizinden bulunan değerlerin uyumluluğu gösterilmiştir. Aksoy ve Aydoğmuş [4] tarafından yapılan çalışmada, Kargı Han'ın yapısal analizinden bulunan basınç ve kayma gerilmesi değerlerinin yönetmelikte verilen sınır değerleri aştığı görülmüştür. Aydın ve Taylan [5] tarafından Darıderesi-II Göleti ANSYS programı ile modellenmiştir. Onat ve Sayın [6] tarafından, Tunceli ilinin Çemişgezek ilçesindeki Tağar köprüsünün üç boyutlu sonlu eleman modelinin ANSYS programı kullanılarak doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri yapılmış, yer değiştirme-zaman grafikleri elde edilmiş, ilk hasarın meydana geldiği ana kadar frekans ve genlik değerlerinin aynı olduğu görülmüş ve hasarların köprü'nün mevcut performansını tehlikeye sokacak büyüklükte olmadığı sonucuna varılmıştır. Mangia ve ark.[7] tarafından çalışmada Tunceli ilinde bulunan Elti Hatun Camii'nin Diana sonlu elemanlar yazılımı ile modellenmiş, sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler ile yapının güvenlik seviyesinin kabul edilebilir seviyede olduğu sonucuna varılmıştır. Behnamfar ve Afshari [8], doğrusal olmayan dinamik analiz ile üç yığma kemer köprü'nün sismik analizini yapmışlardır. Köprü'nün sismik direnci, kemerin orta açıklıklı düğümünün enine

yer değiştirmesi ve kemerin farklı deprem kayıtları altında normal stres dağılımı göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçları, kırılğan davranışların gözlemlendiğini ve bölümlerin gerginlik dengesizliği nedeniyle kemer boyunca hasarın meydana geldiğini göstermiştir. Zampieri ve ark [9], çok açıklıklı yığma kemer köprülerin üç açıklıklı ve beş açıklıklı bir duvar kemer köprüsü olmak üzere iki farklı yapısal konfigürasyonunun sismik performansını incelemiştir. İtme analizi sonuçlarına göre, iskele tabanının maksimum kapasitesine ulaştığını ve bir çökme mekanizmasına işaret eden çatlaklar meydana geldiği değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları artan kemer uzunluğu ve iskele incelik oranının bükülmeye bağlı bir çökme mekanizması oluşturma olasılığını artırdığını göstermiştir. Sevim ve ark. [10], bir yığma kemer köprüsü üzerindeki yakın ve uzak fay zemin hareketi etkilerini yer değiştirme ve stres değerleri açısından araştırmışlardır. Analiz sonuçlarına göre, yakın fay zemin hareketleri için kontrol düğümünün daha yüksek yer değiştirmesi ve yapısal elemanlar üzerindeki gerilmeler gözlenmiştir. Lourenço ve ark. [11], Lizbon, Portekiz'deki Jeronimos Manastırı olarak adlandırılan tarihi bir yapının yapısal güvenlik değerlendirmesini yapmışlardır. Makalede, tarihsel yapılarda sayısal analizlerden elde edilen sonuçların, yapısal davranışı anlamak için genellikle önemli olduğunu vurgulanmıştır. Pela ve ark. [12] kemerleri betondan ve tuğladan inşa edilmiş iki farklı köprü'nün doğrusal olmayan statik analizlerini yapmışlardır. Öncü ve ark. [13] Tarihi Tuzluca köprüsünün yapısal durumunu değerlendirmek amacıyla tek açıklığa sahip köprü'nün ANSYS programında üç boyutlu olarak modellemesini yapmış ve köprü'nün statik ve dinamik yükler altında doğrusal analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda tarihi köprü'nün sınırlı hasar performans düzeyini sağladığı kanaatine varmışlardır. Milani ve ark. [14], seçili yığma kemer köprülerin dikey yüklem altındaki 3D doğrusal olmayan davranışı incelenmiş, 2B hipotezlerin sınırlamaları ve transversal (enine) etkilerin önemi vurgulanmıştır. Oliveira ve ark. [15], Portekiz ve İspanya'dan seçili yığma kemer köprülerin yük taşıma kapasitesinin parametrik bir değerlendirmesini yapmışlardır. Daha sonra, köprü kalınlığının ve dolgunun fiziksel özelliklerinin nihai yük taşıma kapasitesi açısından önemini araştırmışlardır. Kemer kalınlığının ve dolgunun fiziksel özelliklerinin nihai yük taşıma kapasitesi açısından son derece önemli olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Aydın ve Özkaya [16],

çalışmada Ordu ili içerisinde bulunan tarihi Sarpdere Köprüsü'nün üç boyutlu modellemesini Ansys programıyla modellemişlerdir. Modelin statik analiz yöntemi ile belirli yüklerin altında gösterdiği tek yayılmış yığma kemer köprülerin davranışlarının hesaplanmasını amaçlayan bir çalışmadan elde edilen sonuçlar ile literatürdeki mevcut çalışmalara uygun olduğu değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada tarihi Diyarbakır surlarının burçlarından biri olan Yedikardeş Burcunun yapısal analizinin yapılması amaçlanmıştır. Çalışmada önce tarihi yapıların analiz yöntemleri belirtilmiş ardından yapısal özellikleri verilen burç üç farklı teknikte modellenmiştir. ANSYS programı kullanılarak burcun dinamik analizleri yapılmış ve sonuçlar üç model için karşılaştırılmıştır

2. Materyal ve Metot

2.1. Yığma Yapılarda Kullanılan Modelleme Teknikleri ve Yapı Modelinin İdealleştirilmesi

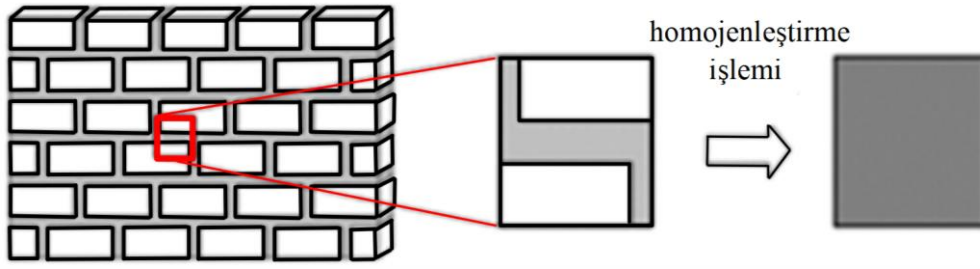
Yığma yapıların modellenmesinde, yığma birimlerin ve harcın statik ve dinamik yükler altındaki davranışı bazı teknikler kullanılarak incelenmektedir. Bunlar; detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelledir. Bu çalışmada makro modelleme tekniği kullanılmıştır. Bu teknikte; yapıda kullanılan taş, tuğla ve harç gibi malzemeler homojenleştirme işlemine tabi tutularak kompozit bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Yığma yapı türünde yapılmış olan tarihi yapıların statik ve dinamik davranışlarının incelenmesi amacıyla yapılan analizlerde birtakım kabuller yapılmaktadır. Bu kabuller betonarme yapılar için kullanılan kabullerden farklılık göstermektedir. Bunun nedeni betonarmenin heterojen bir malzeme olmasına rağmen, yapılan kabullerle bir yapısal elemanı aynı çeşit sonlu elemanla tanımlanmasının mümkün olmasıdır. Yığma yapı duvarlarında ise taş ve tuğla gibi yığma birimlerin ve farklı karakteristiklere sahip harcın bir arada bulunması tek tip sonlu eleman ile modellemeyi zorlaştırmaktadır. Bu durumda yapıya gerçeğe uygun bir modelleme tekniği uygulanmalıdır.

Farklı mekanik özellikteki bu birimleri ayrı ayrı modelleme yolu da tercih edilebilir. Bu modelleme ile yığma birimlerin ve ara yüzey elemanları ayrı ayrı modellenmektedir. Bu durumda bilinmeyen sayısı oldukça artmakta, çözüm süreci uzamaktadır [17].

Yığma yapıların yapım aşamasında genellikle yerel malzemelerden yararlanılmıştır ve taşıyıcı birimlerin birbirinden farklı mekanik özelliklere sahip olmalarından dolayı yapı davranışının modellenmesinde dikkatli olunmalıdır. Yapının davranışının gerçeğe en yakın şekilde modellenmesi gerektiğinden, oluşan zorlukların giderilmesi amacıyla kimi kabullere ve basitleştirme işlemlerine başvurulmaktadır. Tarihi yapıların taşıyıcı elemanlarının mimari detayları olabilmektedir. Taşıyıcı sistem bilgisayar ortamında modellenirken kemer, kubbe ve tonoz gibi yapı elemanlarının mimari detayları sadeleştirilerek yeni bir geometrik forma dönüştürülmektedir. İdealleştirme yapılırken, tüm taşıyıcı elemanların davranışını en iyi temsil edecek, yapının orijinal geometrisine uygun modellerin seçilmesine dikkat edilmelidir [18].

2.2. Gerilme-Şekil Değiştirme Diyagramlarının İdealleştirilmesi

Gerilme-şekil değiştirme diyagramları lineer bağıntılar ile modellenebilir. Bilgisayar analizine esas olan bu model ile gerçek malzeme davranışı basitleştirilerek temsil edilmiş olur. Sayısal metotlarla, yapının göçme öncesi hasar durumu, göçme mekanizmaları ve yapısal performansı belirlenebilmektedir [19]. Ayrıca, tarihi yığma yapıların mekanik özellikleriyle ilgili göz önüne alınması gereken hususlar vardır. Bunlardan biri malzeme davranışının homojen ve izotropik olmadığıdır. Ayrıca çekme dayanımı çok düşük olduğu için sıfır olarak kabul edilebilmektedir. Bu yapılar basınç yükleri altında gevrek davranış sergilemektedir. Kesme kuvvetleri altında kısmi sünek davranış görülür. Çatlak ve hasarlar eleman rijitliklerini etkilemektedir [20]. Makro modelde, malzemenin homojen olduğu kabul edilip, tüm noktalarda aynı davranışı gösterdiği varsayımı yapılır (Şekil 1). Bu doğrultuda yapılan makro modellemede, taşıyıcı elemanlar ile aralarındaki harç malzemeleri birlikte tek bir malzeme olarak modellenir.



Şekil 1. Yığma yapılarda homojen malzeme seçimi için kullanılan birim hücre yöntemi [19]

2.3. Farklı yapı malzemelerinin homojenize edilmesi

Yığma yapıların modellenmesinde kullanılan makro modelleme yönteminde, harç ve taş/tuğladan oluşan yapının tek bir malzeme gibi modellenmesi yani yapının homojenleştirilmesi yapılmaktadır. Bu iki malzemenin tek bir malzeme gibi düşünülmesinde elastisite modülü için Lourenço tarafından Denklem 1’de verilen bağıntı önerilmiştir [21].

$$E = \frac{t_m + t_u}{\frac{t_m}{E_m} + \frac{t_u}{E_u}} \cdot \rho \quad (1)$$

Burada, E , homojenleştirilmiş malzemenin elastisite modülünü, t_m harç kalınlığını, t_u taş veya tuğla yüksekliğini, E_m harcin elastisite modülünü, E_u taş veya tuğlanın elastisite modülünü, ρ sabiti ise tuğla ile harç arasındaki etkileşimi ifade etmektedir. ρ değeri 0-1 arasında değişen bir katsayı olup genellikle 0.5 kabul edilebilir. Yığma yapıların basınç dayanımının belirlenmesinde kullanılan homojenleştirme işlemi için Eurocode 6’da önerilen bağıntı Denklem 2’de verilmiştir.

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (2)$$

Burada, f_k homojenleştirilmiş malzemenin basınç dayanımını, f_b taş veya tuğlanın basınç mukavemetini, f_m harcin basınç mukavemetini ifade etmektedir. K , α , β değerleri birer sabittir. α değeri 0.625, β değeri 0.25 olup burada K , 0.4 ile 0.6 arasında alınabilen bir sabittir ve genellikle 0.5 olarak değerlendirilmektedir [21].

2.4. Yedikardeş Burcunun Özellikleri ve Malzemenin Homojenleştirilmesi

Diyarbakır tarihi kent merkezini çevreleyen ve genel hatlarıyla bugünkü sınırlarına IV. Yüzyılda

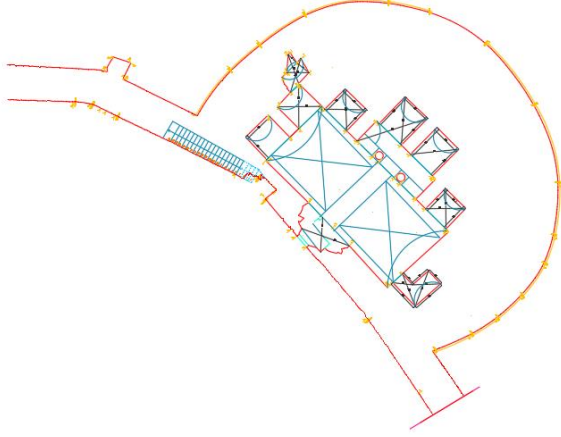
ulaşan surlar, yapıldığı dönemden itibaren kentin en önemli mimari ögesi olmuştur. Diyarbakır surlarının çevre uzunluğu yaklaşık 5200 metredir. İç Kale’nin, Suriçinde kalan bölümünün uzunluğu 599m, İç Kale ile sur duvarlarının toplam uzunluğu yaklaşık 5800 metredir. Sur duvarlarının yaklaşık 645 metrelik bölümü çeşitli sebeplerle yıkılmış veya yıktırılmıştır. İç Kale dâhil, sur duvarlarının çevrelediği toplam alan yaklaşık olarak 1,57km²’dir. Gabriel dış surlar üzerinde 82, İç Kalede ise 18 adet burç tespit etmiştir [22]. Bu burçlardan biri de Yedikardeş Burcudur. Yedikardeş Burcu, surların çevirdiği alanın güney batısında bulunan tarihi Ali Paşa Camii ve Medresesinin güneyinde bulunan 41 nolu burç olarak literatürde kayıtlı olan ve taşıyıcı sistem türü yığma yapı olan tarihi bir yapıdır (Şekil 2). Burcun planı Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Yedikardeş Burcu güney cephesi

Yıllar içerisinde Diyarbakır Surlarında değişimler olmuştur. Tarihi surların dokuları zarar görmüş, sur ve burçların taşları sökülerek geçkondu inşasında kullanılmıştır. Yapıda meydana gelen bu tahribatlar nedeniyle surlar ve burçlarda yıllar içinde birçok onarım yapılmıştır. Bilinçsiz yapılan restorasyon çalışmaları, plansız yerleşim gibi sebeplerle birlikte sur ve burçlarda oluşan deformasyonlar Diyarbakır Surlarının yapısal durumunun değerlendirilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Bu amaçla, çalışmada Diyarbakır

Surlarında yer alan Yedikardeş Burcunun üç boyutlu sonlu eleman modeli hazırlanmış, statik ve dinamik analizleri yapılarak yapısal durumu incelenmiştir.



Şekil 3. Yedikardeş Burcu'nun zemin kat planı [23]

Yedikardeş Burcu duvarlarında tarihi Diyarbakır bazaltı kullanılmış olup, bağlayıcı harç malzemesi kaymak kirecidir. Modellemede kullanılan ve yapıda tonoz kullanılan kısımları temsil eden üst yüzeyde harman tuğlası kullanılmış olup bağlayıcı harç malzemesi kireç harcıdır. Tarihi yapılarda yerinde inceleme imkanının olmadığı ya da yapıya zarar vermektan kaçınmak istendiği durumlarda malzemelerin mekanik özellikleri literatürden alınarak kullanılabilir. Bu tez çalışmasında Yedikardeş Burcunda kullanılan harman tuğlası, bazalt taşı ve horasan harcının mekanik özellikleri literatürdeki çalışmalardan alınmıştır [24-27]. Yapıdaki malzeme özellikleri homojenleşme yöntemiyle modellenen elemanlara tanımlanmıştır. Malzeme özellikleri Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Malzeme özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)	Poisson Oranı	Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
Bazalt Taşı	20140	2280	0.236	57.66	0.625
Horasan Harcı	1100	1340	0.2	6.25	0.625
Harman Tuğlası	6085	1930	0.2	6.6	0.42

2.5. Yedikardeş Burcu'nun Bulunduğu Konumun Depremselliği

Yedikardeş Burcu'nun konumuna ait deprem verilerine Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığının (AFAD) [28], Türkiye deprem tehlike haritaları interaktif web uygulaması ile ulaşılmıştır. Bu uygulama ile istenen deprem yer hareketi düzeyine göre, konum ve yerel zemin sınıfı girilerek, yatay elastik ivme spektrumu, düşey elastik ivme spektrumu ve sismik tehlike haritası özet veya detay raporu alınabilmektedir. Bu raporda kısa ve 1 saniye periyot için spektral ivme katsayıları, yerel zemin etki katsayıları, en büyük yer ivmesi ve yer hızı değerleri yer almaktadır. İvme değerleri yerçekimi ivmesinin katsayısı olarak boyutsuz verilmektedir [29]. Yedikardeş Burcu yatay ve düşey elastik tasarım spektrumları Şekil 4 ve 5 'te verilmiştir. Bulunan değerler aşağıda verilmiştir: Yedikardeş Burcunun konumuna ait deprem verilerine Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığının (AFAD) [28], Türkiye deprem tehlike haritaları interaktif web uygulaması ile ulaşılmıştır. Bu uygulama ile istenen deprem yer hareketi düzeyine göre, konum

ve yerel zemin sınıfı girilerek, yatay elastik ivme spektrumu, düşey elastik ivme spektrumu ve sismik tehlike haritası özet veya detay raporu alınabilmektedir. Bu raporda kısa ve 1 saniye periyot için spektral ivme katsayıları, yerel zemin etki katsayıları, en büyük yer ivmesi ve yer hızı değerleri yer almaktadır. İvme değerleri yerçekimi ivmesinin katsayısı olarak boyutsuz verilmektedir [29]. Yedikardeş Burcu yatay ve düşey elastik tasarım spektrumları Şekil 4 ve 5 'te verilmiştir. Bulunan değerler aşağıda verilmiştir:

$$S_s = 0.304, S_1 = 0.128, S_{DS} = 0.243, S_{D1} = 0.102, PGA = 0.135, PGV = 10.181$$

Burada;

S_s : Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı (boyutsuz)

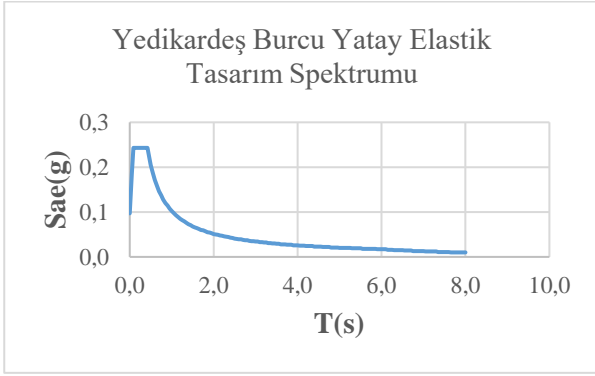
S_1 : 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı (boyutsuz)

S_{DS} : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (boyutsuz)

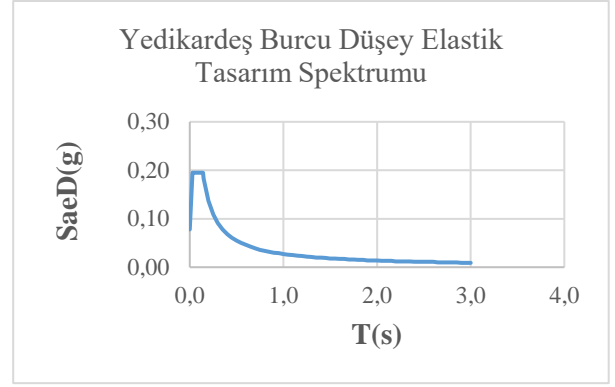
S_{D1} : 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı (boyutsuz)

PGA: En büyük yer ivmesi (g)

PGV: En büyük yer hızı (cm/s)



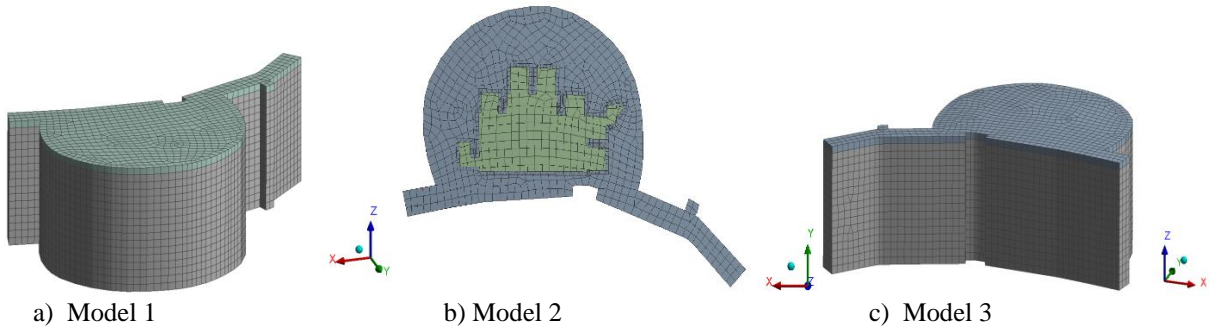
Şekil 4. Yatay elastik tasarım spektrumu



Şekil 5. Düşey elastik tasarım spektrumu

2.6. Yedikardeş Burcu'nun Sonlu Eleman Modeli

Kalkan balığı planına sahip olan Diyarbakır Surlarının büyük burçlarından olan Yedikardeş Burcunun modellenmesinde, burcun rölövesi esas alınmıştır. Bu yüzden burcun iki yanında devam eden duvarlar rölövedeki gibi alınmıştır. Burç sonlu elemanlar yöntemiyle üç boyutlu olarak modellenmiş, üç farklı modelleme (Şekil 6) yapılarak yapı davranışı incelenmiştir. Modellerin statik ve dinamik analizleri ANSYS [30] programı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 6. Yedikardeş Burcu'nun sonlu eleman modelleri

Birinci modelde (Model 1) yapı, dört farklı katı modelden oluşmaktadır. Bunlar, kalınlığı da göz önüne alınarak modellenmiş olan iç duvar, dış duvar, dolgu duvar ve üst döşemedir. Bu modelde iç duvar ve dış duvar ince yonu taş duvarlar olup ara duvar ise moloz bazalt taşlarının harçla birleştirildiği dolgu duvardır. Yapıda tonozlar tarafından taşınan 2 metrelik toprak dolgu bulunmaktadır. Modelde bu toprak dolgu döşeme tarafından taşınmaktadır. Dış duvar ve iç duvarın modellenmesinde kullanılan malzemelerin özellikleri aynı olup, modele tanımlanan malzemelerin mekanik özellikleri, bazalt malzemesiyle kireç harcının mekanik özelliklerinin homojenleştirilme işlemi sonucunda elde edilen değerleridir. Dolgu duvarın

modellemesinde kullanılan malzemeler moloz taşlar ve kireç harcının mekanik özelliklerinin homojenleştirme işlemi sonucu elde edilen malzeme değerleridir. Tonozlar tarafından taşınan döşeme modellemesinde kullanılan malzeme değerleri ise harman tuğlası ve kireç harcının mekanik özelliklerinin homojenleştirilme işlemi sonucu elde edilen malzeme değerleridir.

İkinci modelde (Model 2) yapı üç farklı katı elemandan oluşmaktadır. Bunlar iç duvar, dış duvar ve döşemedir. İç ve dış duvarlar ince yonu taş duvarlar olup, toprak dolgu döşeme tarafından taşınmaktadır. Dış duvar ve iç duvarın modellenmesinde kullanılan malzemelerin özellikleri aynı olup, modele tanımlanan malzemelerin mekanik özellikleri, bazalt

malzemesiyle kireç harcının mekanik özelliklerinin homojenleştirilme işlemi sonucunda elde edilen değerleridir. Tonozlar tarafından taşınan döşeme modellemesinde kullanılan malzeme değerleri ise harman tuğlası ve kireç harcının mekanik özelliklerinin homojenleştirilme işlemi sonucu elde edilen malzeme değerleridir.

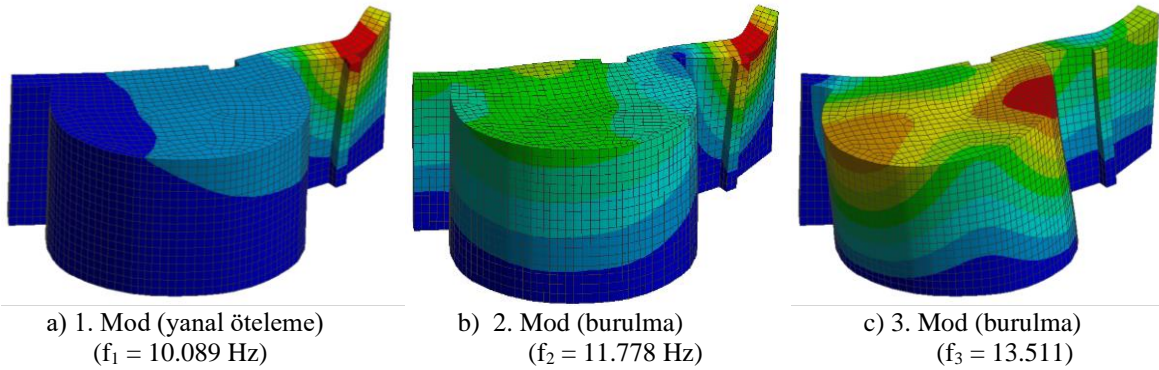
Üçüncü modelde (Model 3) yapı iki farklı katı elemandan oluşmaktadır. Bunlar duvar ve toprak dolgu taşıyan döşemedir. Dış duvarın modellemesinde kullanılan malzeme özellikleri bazalt malzemesiyle kireç harcının mekanik özelliklerinin homojenleştirilme işlemi sonucunda elde edilen değerleridir. Tonozlar tarafından taşınan döşeme modellemesinde kullanılan malzeme değerleri ise harman tuğlası ve kireç harcının mekanik özelliklerinin homojenleştirilme işlemi sonucu elde edilen malzeme değerleridir.

Burç modellerinde sınır şartları belirlenirken burcun tabanı ankastre olarak mesnetlenmiştir. Burcun sağında ve solunda uzanan duvarların yüzeyleri X yönünde sabit, Y ve Z yönünde serbest olacak şekilde modellenmiştir. Burcun statik analizinde, burcun kendi ağırlığının yanı sıra TS 498'den (Yapı Elemanlarının

Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri) alınan kar yükü ve hareketli yük etki ettirilmiştir. Oluşturulan modellerden Model 1, 133488 düğüm noktası ve 29459 katı elemandan, Model 2, 88488 düğüm noktası ve 20086 katı elemandan, Model 3 ise 63877 düğüm noktası ve 16555 katı elemandan oluşmaktadır. Katı elemanın boyutları 0.5m ile 1m arasında değişmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

Yedikardeş Burcu'na ait üç modelin modal ve spektral analizlerinde sönüm oranı 0.05 alınmıştır. Model 3'ün modal analiz sonucu elde edilen mod şekilleri diğer modellere göre daha anlamlı çıkmıştır. Bu modele ait ilk 12 mod incelenmiş, ilk 3 mod şekli Şekil 7'de verilmiştir. Frekans değerleri 10.089-29.75 Hz aralığında değişmektedir. Analiz sonuçlarına göre 1. mod şekli yanal öteleme 2. ve 3. mod şekilleri burulma olarak gözlenmiştir. Spektral analiz sonucunda elde edilen gerilmeler Tablo 2'de verilmiştir.



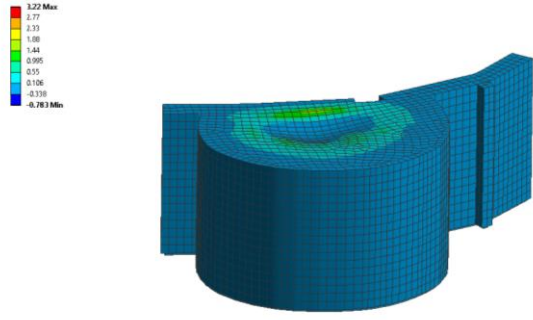
Şekil 7. Model 3'ün frekans değerleri ve mod şekilleri

Tablo 2. Spektral analizden elde edilen maksimum gerilme ve şekil değiştirmeler

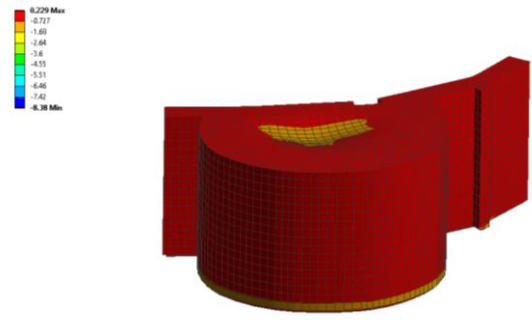
	Maksimum gerilme (MPa)	Minimum gerilme (MPa)
Model 1	2.37	10.5
Model 2	0.921	1.79
Model 3	0.349	0.5

Yedikardeş Burcu için oluşturulan modellerin statik yükler altındaki analizinden elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeleri

incelenmiştir. Model 1 için maksimum asal gerilme 3.22 MPa, minimum asal gerilme ise 0.229 MPa bulunmuştur. Model 2 için maksimum asal gerilme 1.3 MPa, minimum asal gerilme ise 0.0809 MPa bulunmuştur. Model 3 için maksimum asal gerilme 1.84 MPa, minimum asal gerilme ise 0.0625 MPa bulunmuştur (Şekil 8-10). Yedikardeş Burcu'nun düşey yükler altındaki analiz sonuçlarından, Yedikardeş Burcu'nun mevcut durumunun düşey yük taşıma güvenliğinin yeterli olduğu görülmüştür. Bulunan değerler Tablo 3'de verilmiştir.

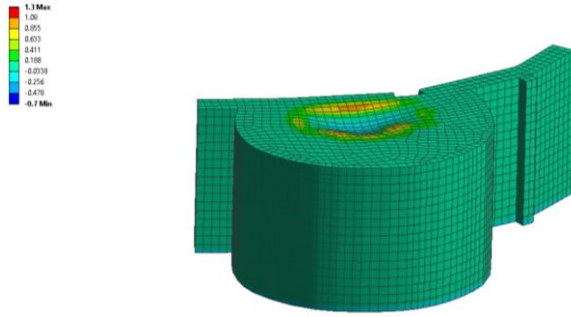


a) Model 1'de oluşan maksimum asal gerilme

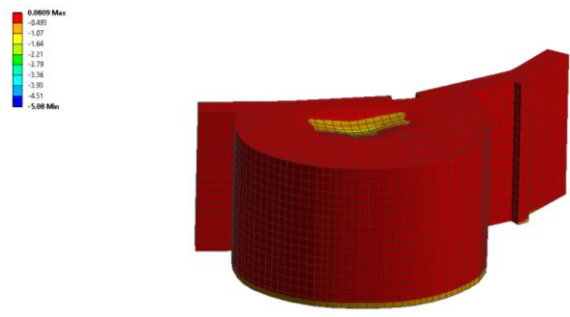


b) Model 1'de oluşan minimum asal gerilme

Şekil 8. Model 1 de oluşan maksimum ve minimum asal gerilmeler (MPa)

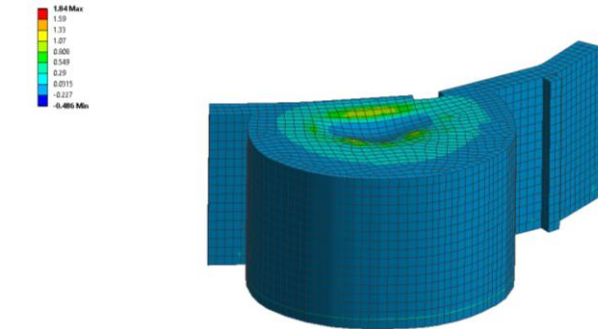


a) Model 2'de oluşan maksimum asal gerilme

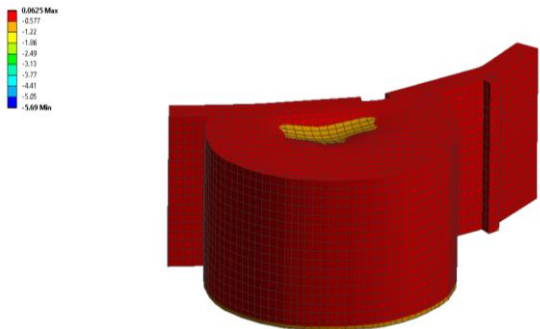


b) Model 2'de oluşan minimum asal gerilme

Şekil 9. Model 2'de oluşan maksimum ve minimum asal gerilmeler (MPa)



a) Model 3'de oluşan maksimum asal gerilme



b) Model 3'de oluşan minimum asal gerilme

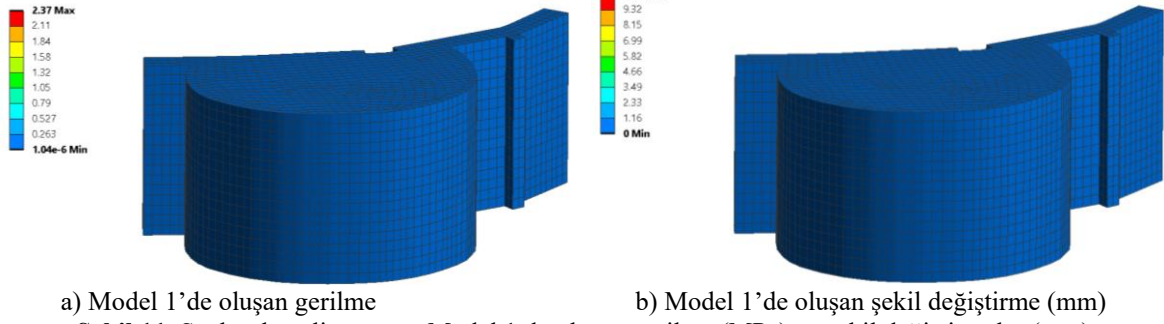
Şekil 10. Model 3'de oluşan maksimum ve minimum asal gerilmeler (MPa)

Tablo 3. Model 1, Model 2 ve Model 3'de oluşan maksimum ve minimum asal gerilmeler

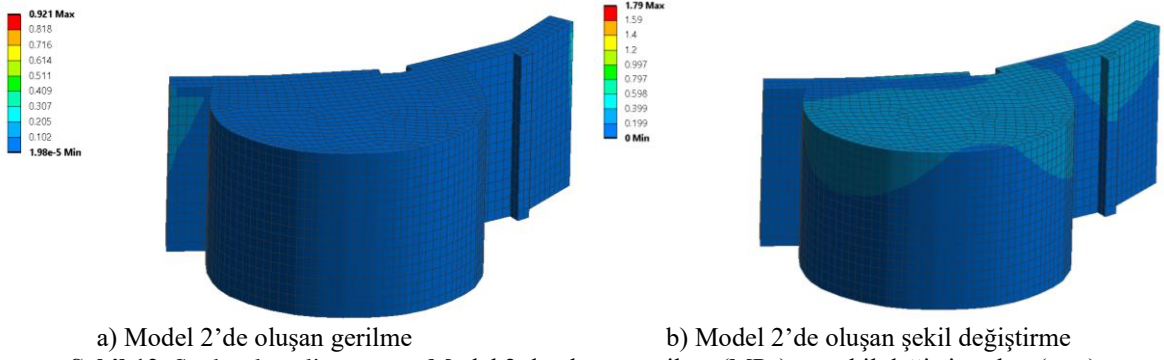
	Maksimum asal gerilme (MPa)	Minimum asal gerilme (MPa)
Model 1	3.22	0.229
Model 2	1.3	0.0809
Model 3	1.84	0.0625

X ve Y yönü doğrultusundaki spektral analizler sonucunda Model 1, 2 ve 3'de oluşan gerilmeler ve

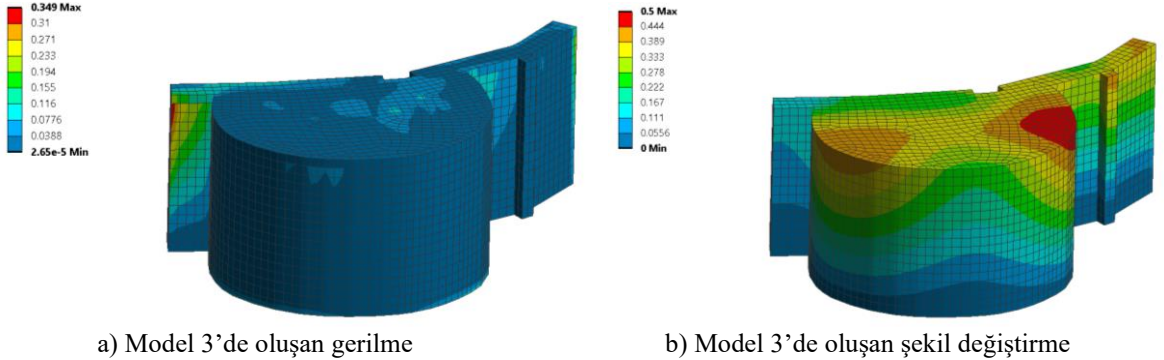
şekil değiştirmeler şekilde verilmiştir. Yedikardeş Burcu için hazırlanan üç modelin X ve Y yönleri için yapılan spektral analizlerden elde edilen sonuçlarına göre, rijit bir yapı olan burcun gerilme ve şekil değiştirme değerleri oldukça küçük çıkmıştır. Model 1 için maksimum gerilme 2.37 MPa, maksimum şekil değiştirme 10.5 mm bulunmuştur. Model 2 için maksimum gerilme 0.921 MPa, maksimum şekil değiştirme 1.79 mm, Model 3 için ise maksimum gerilme 0.349 MPa maksimum şekil değiştirme 0.5 mm bulunmuştur.



Şekil 11. Spektral analiz sonucu Model 1 de oluşan gerilme (MPa) ve şekil değıştirmeler (mm)



Şekil 12. Spektral analiz sonucu Model 2 de oluşan gerilme (MPa) ve şekil değıştirmeler (mm)



Şekil 13. Spektral analiz sonucu Model 3 de oluşan gerilme (MPa) ve şekil değıştirmeler (mm)

Büyük hacimli bu yapı için gerilme ve şekil değıştirmelerin her üç model için de oldukça küçük değerler olduğu söylenebilir. Ancak, modelde yapılan değışikliklerin analiz sonuçlarını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Bu tür büyük hacimli, çok katmanlı ve sürekli bir sistemin parçası olan tarihi yapılarda modellemenin sonuçlara etki ettiği açıktır (Şekil 11, 12, 13).

Tarihi yapılar için deprem risklerinin yönetimi kılavuzunda [31] tanımlanan hasar durumları doğrultusunda, Yedikardeş Burcunun spektral analiz sonucu oluşan gerilme ve şekil değıştirmeleri değerlendirilmiştir. Tarihi yapılar için deprem risklerinin yönetimi kılavuzuna göre, tarihi yapıların performans düzeyleriyle ilgili üç sınır durumu tanımlanmaktadır. Bunlar, sınırlı hasar, kontrollü hasar ve göçme öncesi hasar sınır

durumlarıdır. Doğrusal hesap yöntemi kullanılarak düşey yük ve azaltılmamış öngörülen deprem etkisinde bulunan hesap dayanımların aşılmadığı ve azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranı %0.3 sınırının aşılmadığı durumlarda, yapının sınırlı hasar performans seviyesinde olduğu kabul edilmektedir. Bu yaklaşıma göre Yedikardeş Burcunun da sınırlı hasar performans seviyesinde olduğu değerlendirilmiştir. Bu düzey, yapının taşıyıcı sistem elemanlarında sınırlı düzeyde hasarın meydana geldiği (doğrusal olmayan davranışın sınırlı kaldığı) hasar düzeyine karşı gelmektedir. Kılavuza göre tarihi yapıların önemine göre seçilebilecek performans düzeyleri, evrensel öneme sahip olan, ulusal öneme sahip olan ve yerel öneme sahip olan yapılar olarak gruplandırılmıştır. Yedikardeş Burcu'nun evrensel

öneme sahip tarihi yapı grubunda olduğu göz önüne alınarak spektral analiz aşamasında kullanılmak üzere seçilen deprem yer hareketi düzeyinin kılavuz ile uyumlu olduğu değerlendirilmiştir.

4. Sonuç ve Öneriler

Çalışmada, evrensel ölçekte öneme sahip olan tarihi Diyarbakır surlarına ait en önemli burçlardan biri olan Yedikardeş Burcunun mevcut durumu değerlendirilmiş, üç boyutlu sonlu eleman modeli üç farklı şekilde oluşturulmuştur. Burç ve sur duvarları makro modelleme tekniğiyle modellenmiş, düşey ve yatay yükler altında statik ve dinamik analizleri yapılmıştır. Yedikardeş Burcunun düşey yükler altındaki analiz sonuçlarından, Yedikardeş Burcunun mevcut durumunun düşey yük taşıma güvenliğinin yeterli olduğu görülmüştür. Ancak, tonoz, harç ve bazalt taştan aşınma ve bozulmalar oluşması durumunda, yapının yeni durumunun tekrar analiz edilmesi gerekmektedir.

Yedikardeş Burcu için oluşturulan modellerde burç duvarları arasındaki temas yüzeyleri ve sınır şartları manuel olarak tanımlanmış olup, sonraki çalışmalarda sınır şartlarının farklı olarak tanımlandığı modellemelerin de yapılması hedeflenmektedir.

X ve Y yönü doğrultusundaki spektral analizler sonucunda her üç modelde bulunan gerilme ve şekil değiştirmeler küçük değerler çıkmıştır. Çalışmada, bu tür büyük hacimli, çok katmanlı ve sürekli bir sistemin parçası olan tarihi yapılarda modellemenin sonuçlara ne denli etki ettiği görülmüş olmaktadır.

Yedikardeş Burcunun X ve Y yönleri için yapılan statik ve dinamik analizlerden elde edilen sonuçlara göre, rijit bir yapı olan burç için oluşturulan üç ayrı modele ait gerilme ve şekil değiştirme değerlerinin oldukça küçük olduğu gözlenmiştir. Düşey yük ve azaltılmamış deprem etkisinde, Yedikardeş Burcunda hesap dayanımlarının aşılmadığı ve azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranının %0.3 sınırını aşmadığı görüldüğünden, Yedikardeş Burcunun sınırlı hasar performans seviyesinde olduğu değerlendirilmiştir.

Yedikardeş Burcunun temeli bazalt kayaya mesnetlendiği için oturma gözlenmemiştir, ancak zeminde herhangi bir deformasyon ve buna bağlı olarak burçta farklı oturma gözlenmesi durumunda yeni durumun oluşturulacak modellerde göz önüne

alınması gerekecektir. Böyle bir durum için yapı zemin etkileşiminin hesaba katılması önerilmektedir.

Makro modellemenin yanısıra mikro veya detaylı mikro modelleme yapılarak yapının taş ve harç etkileşiminin de incelenmesi önerilmektedir. Ancak, bu tür büyük hacimli tarihi yapılarda mikro modellemeye elde edilen sonuçlarda hata payının olabileceği de göz ardı edilmemelidir.

Çalışma sonunda, büyük hacimli tarihi yapılarda gerçek davranışı yansıtan modelin, yapının kendi özel durumuna göre değişebildiği görülmüştür. Böylece, bir tarihi yapıda davranışı iyi yansıtan modelin, başka bir tarihi yapıda aynı oranda yansıtamayabileceği anlaşılmıştır. Çalışmada, tarihi yapıların mevcut durumlarının iyi gözlenmesi, hasarların ve hasar oluşum mekanizmalarının detaylı değerlendirilmesi gerektiği, yapı modellenirken yapı davranışını en iyi temsil edecek modelin seçilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Yazarların Katkısı

Bu çalışma, Doç. Dr. Mehmet Emin ÖNCÜ danışmanlığında Rojbin İZGİ YÖNTEN tarafından hazırlanan yüksek lisans tez çalışmasının bir bölümünden üretilmiştir. Dr. Öğretim Üyesi Mehmet CEBE tarafından çizilerek Diyarbakır Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kuruluna sunulan ve onaylanan rölöve, restitüsyon, restorasyon projeleri ile raporlarından faydalanılmıştır. Ayrıca, Dr. Öğretim Üyesi Mehmet CEBE, Yedikardeş Burcunun üç boyutlu modellenmesinin hazırlanmasında katkı sunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- [1] S. Toker and A. İ. Ünay, “Mathematical modeling and finite element analysis of masonry arch bridges,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 17, pp. 129–139, 2004.
- [2] A. Bayraktar, “Tarihi Yığma Yapıların Depreme Karşı Güçlendirilmesi,” 2005.
- [3] B. Sevim, A. Bayraktar, A. C. Altunışık, H. S. Atamtürktür, and F. Birinci, “Finite element model calibration effects on the earthquake response of masonry arch bridges,” *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 47, pp. 621–634, 2011.
- [4] E. Aksoy and F. Aydoğmuş, “Tarihi yapıların deprem analizi ve kargı han örneği,” in *Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu*, 2017, pp. 411–419.
- [5] T. Aydın and E. D. Taylan, “Darıderesi-II göletinin dinamik davranışlarının ANSYS ile incelenmesi,” *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, vol. 7, no. 2, pp. 10–17, 2017.
- [6] O. Onat and E. Sayın, “Tarihi Tağar köprüsünün doğrusal olmayan sismik analizi,” in *5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu*, 2015, pp. 301–311.
- [7] L. Mangia, B. Ghisaasi, E. Sayın, O. Onat, and P. B. Lourenço, “Pushover analysis of historical Elti Hatun Mosque,” in *12th International Congress on Advances In Civil Engineering*, 2016.
- [8] F. Behnamfar and M. Afshari, “Collapse analysis and strengthening of stone arch bridges against earthquake,” *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 7, pp. 1–25, 2013.
- [9] P. Zampieri, M. A. Zanini, and C. Modena, “Simplified seismic assessment of multi-span masonry arch bridges,” *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 13, pp. 2629–2646, 2015.
- [10] B. Sevim, H. S. Atamturktur, A. C. Altunışık, and A. Bayraktar, “Ambient testing and seismic behavior of historical arch bridges under near and far fault ground motions,” *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 14, pp. 241–259, 2016.
- [11] P. B. Lourenço, K. J. Krakowiak, F. Fernandes, and L. F. Ramos, “Failure analysis of Monastery of Jerónimos, Lisbon: How to learn from sophisticated numerical models,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 14, no. 2, pp. 280–300.
- [12] L. Pela, A. Aprile, and A. Benedetti, “Seismic assessment of masonry arch bridges,” *Engineering Structures*, vol. 31, pp. 1777–1788, 2009.
- [13] Öncü, M.E., Karaşin, A., İzgi, R., Karaşin, İ.B, “Tarihi Tuzluca köprüsünün yapısal durumunun değerlendirilmesi,” in *4. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu*, 2019, pp. 479–490.
- [14] G. Milani and P. B. Lourenço, “3D nonlinear behavior of masonry arch bridges,” *Computures & Structures*, vol. 110–111, pp. 133–150, 2012.
- [15] D. V. Oliveira, P. B. Lourenço, and C. Lemos, “Geometric issues and ultimate load capacity of masonry arch bridges from the northwest iberian Peninsula,” *Engineering Structures*, vol. 32, pp. 3955–3965, 2010.
- [16] A. C. Aydın and S. G. Ozkaya, “The finite element analysis of collapse loads of single-spanned historic masonry arch bridges (Ordu, Sarpdere Bridge),” *Engineering Failure Analysis*, vol. 84, pp. 131–138, 2018.
- [17] A. Ural, “Yığma yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesi,” Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2009.
- [18] Ö. Dabanlı, “Tarihi yığma yapıların deprem performansının belirlenmesi,” İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
- [19] P. B. Lourenço, “Structural behavior of civil engineering structures: highlight in historical and masonry structures,” in *Workshop on Civil Engineering Research*, 2006.
- [20] M. Oğuzmert, “Yığma minarelerin dinamik davranışları,” İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002.
- [21] P. B. Lourenço, G. Vasconcelos, and L. Ramos, “Assessment of the stability conditions of a Cistercian Cloister,” in *The 2nd International Congress on Studies in Ancient Structures*, 2001, pp. 669–678.
- [22] A. Nabikoğlu and N. Dalkılıç, “Diyarbakır surlarının günümüzdeki durumuna yeni bir bakış,” *Restorasyon Konservasyon Çalışmaları Dergisi*, vol. 15, pp. 23–35, 2013.
- [23] M. Cebe, “Diyarbakır kültür varlıklarını koruma bölge kurulu diyarbakır surları ve rölöve raporları,” 2013.

- [24] M. Akatay, “Diyarbakır bazaltlarının bazı önemli malzeme özelliklerinin tahribatsız yöntemlerle belirlenebilirliğinin araştırılması,” Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 2014.
- [25] A. Bayraktar, E. Hökelekli, M. F. Halifeoğlu, A. Mosallam, and H. Karadeniz, “Vertical strong ground motion effects on seismic damage propagations of historical masonry rectangular minarets,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 91, pp. 15–128, 2018.
- [26] S. Ulukaya and Y. N., “Tarihi yapılarda taşıyıcı tuğla duvarın elastisite modülünün deneysel ve matematiksel model ile belirlenmesi,” in *Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu*, 2017, pp. 533–542.
- [27] H. Çağlar, A. Çağlar, S. Z. Korkmaz, B. Demirel, and O. Y. Bayraktar, “Geleneksel Kastamonu evlerinin inşasında kullanılan el ile üretilmiş harman tuğla ile fabrikasyon olarak üretilen tuğlanın fiziksel, mekanik ve yapısal karakterizasyon özelliklerinin karşılaştırılması,” *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 30, no. 2, pp. 39–48, 2018.
- [28] “Türkiye deprem tehlike haritaları interaktif web uygulaması,” 2019. [Online]. Available: <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>. [Accessed: 02-Sep-2019].
- [29] R. İzgi, “Tarihi yapıların yapısal analizi: Diyarbakır surları örneği,” Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 2020.
- [30] ANSYS Inc. 2018.
- [31] “Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu,” İstanbul Valiliği İstanbul Proje Koordinasyon Birimi, İstanbul, 2018.