







Kubbe yapı formlarının kenet ile güçlendirilmesi Strengthening of dome type structures with clamps

Fatih Kürşat Fırat¹ , Şükran Tanrıverdi^{2,*} , Ali Ural³ , Mehmet Emin KARA⁴ 

^{1,2,3,4} Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray Türkiye

Öz

Tarihi yapılar buldukları dönemin kültürünü, tarihini, ekonomik ve sosyal özelliklerini, inançlarını, yansıtan yapı türleridir. Bu yapı türleri arasında yer alan kubbeli yapılar, geniş açıklıkları geçmek amacıyla yapılmış eğrisel örtü sistemleridir. Tarihi yapıları gelecek nesillere de aktarabilmek için yapıların korunması ve yapısal davranışlarının iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, hasar görmüş kubbe yapı formlarının, kenet ile güçlendirme tekniğini incelemek için deneysel çalışma yapılmıştır. İlk olarak 2 m çapında 1 m yüksekliğinde sekizgen kasnaklı kubbenin düşey yük altındaki davranışı incelenmiştir. Kubbe yük taşıma kapasitesine ulaştığı zaman kubbe üzerinde bazı çatlaklar meydana gelmiştir. Bu hasarlar kenet bağlantı elemanı kullanılarak giderilmiştir. Kenet ile güçlendirilen kubbede, düşey yük altında deneysel olarak incelenmiştir. Referans kubbe ve kenet ile güçlendirilmiş kubbenin deney sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Çalışma sonucunda günümüzde kubbe yapı formlarının onarım ve güçlendirilmesinde çok sık kullanılan kenet uygulamalı güçlendirme yönteminin kubbenin taşıma kapasitesini artırmadığı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Tarihi yapılar, Yığma kubbe, Güçlendirme, Kenet uygulama

1 Giriş

Kubbeler, kemerli yapıların merkezinden geçen dik eksen etrafında döndürülmesiyle elde edilen yapı türleridir. Kubbe formunun ilk örnekleri Mezopotamya'da görülmekle birlikte kubbe, ilk Hristiyan, Ermeni, Sasani, Bizans, Roma ve İslam mimarilerinde de yapısal eleman olarak kullanılmıştır. Gerek ülkemizde gerekse diğer ülkelerde birçok kubbeli yapılar bulunmaktadır. Kültürel miraslarımız arasında bulunan kubbeli yapıların, onarılması, güçlendirilmesi ve korunması hiç kuşkusuz tarihi yapılar açısından sorumluluklarımız arasında en başta gelmektedir. Kubbeler taşıyıcı sistem ve yük aktarım şekillerine göre yedi farklı gruba ayrılmaktadır. Bunlar; 1. Yığma kubbeler, 2. Kabuk kubbeler, 3. Kaburgalı kubbeler, 4. Kablo destekli kubbeler, 5. Çubuk ağı kubbeler, 6. Kemer taşıyıcılı kubbeler ve 7. Pnömatik kubbelerdir. Bu çalışma Osmanlı yığma kubbeleri baz alınarak yapılmıştır. Yığma kubbenin etek kısmında açılma yapmaması için, yanal hareketi engellenmiş mesnetlere ihtiyaç vardır. Kubbede yükler, meridyenler doğrultusunda basınç gerilmesiyle mesnetlere iletilir. Kubbe ayakları mesnet yüklerinin düşey bileşenlerini kemerlere,

Abstract

Historical buildings are types of buildings that reflect the culture, history, economic and social characteristics, beliefs of the period they are in. Dome type structures, which are among these building types, are curvilinear cover systems made to pass large openings. In order to transfer historical structures to future generations, structures should be protected and their structural behavior should be well known. In this study, an experimental study was carried out to examine the strengthening of dome structures by using clamps. Firstly, the behavior of the 2 m diameter and 1 m high octagonal pulley dome under vertical load was investigated. When the dome reached its load-bearing capacity, some cracks occurred on the dome. These damages were repaired by using clamp connectors. The dome strengthened with clamps was tested again under vertical load. The testing results of the reference and the clamp-reinforced domes are compared. As a result of the study, it has been determined that the clamp-applied strengthening method, which is frequently used in the repair and strengthening of dome structures, does not increase the bearing capacity.

Keywords: Historical structures, Masonry dome, Strengthening, Clamp application

yanal bileşenlerini ise kemer düzlemlerine dik doğrultuda yerleştirilmiş yarım kubbeler ve payandalara iletir. Yığma kubbelerde genelde kubbe yüksekliğinin alttan % 60'lık kısmında yatayda çekme, üstte kalan % 40'lık kısmında ise yatayda basınç gerilmeleri oluşmaktadır.

Ülkemizdeki tarihi yapıların birçoğu, çok iyi durumda değildir. Depremler, yangınlar, zemin kaynaklı problemler, çevre faktörlerinin oluşturduğu fiziksel ve kimyasal bozulmalar bu yapıların taşıyıcı sistem özelliklerini ve görüntülerini olumsuz yönde etkilemiştir. Bunun yanında taşıyıcı sistemdeki düzensizlik ve süreksizlikler nedeniyle pek çok tarihi yapıda çatlaklar ve onun sonucu kısmen veya tamamen yıkılmalar meydana gelmiştir. Tarihi yapıların gelecekte de ayakta kalabilmesi için bu yapıların korunması ve kubbe formlarının yapısal davranışının bilinmesi gerekmektedir. Tarihi yapıların çekme dayanımı düşük basınç dayanımları ise yüksektir. Bu yapıların çekme dayanımlarını arttırmak için, özellikle kubbeli yapılarda, minarelerde, yığma duvarlarda, köprülerde, sütunlarda meydana gelen geniş çatlakların onarım ve güçlendirilmelerinde kenet, zıvana gibi çekme dayanımı

yüksek metal bağlantı elemanları kullanılmaktadır. Yapılan bu çalışmada, günümüzde özellikle tarihi kubbe yapılar üzerinde kenetlerle uygulanan dikiş yönteminin yapı üzerindeki etkisi incelenmiştir. İlk önce 2 m çapında 1 m yüksekliğinde bir kubbe yapılmış; bu kubbenin düşey yük altında taşıma kapasitesi tespit edilmiştir. Taşıma kapasitesine ulaşırken, hasar alan kubbe üzerine kenet ile dikiş yöntemi uygulanmış ve arkasından düşey yük altında deneye tabi tutulmuştur. Yapılan deney sonucunda elde edilen veriler, referans kubbe için yapılan deneyden elde edilen veriler ile kıyaslanarak dikiş yönteminin restorasyon, onarım ve güçlendirme çalışmalarında kullanımı tartışılmıştır.

Yapıların geleceğe devredilmesi için sabit, hareketli, deprem ve rüzgâr yüklerine karşı yapı taşıyıcı sistemlerinin güçlendirilmesi ve bu yüklerin incelenmesi konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Yaldız vd. [1] Nevşehir İli'nde bulunan İbrahim Paşa Köyü'nde yer alan yağma konut üzerinde meydana gelen hasarları inceleyerek, onarım ve güçlendirme için hangi yöntemlerin nasıl uygulanması gerektiği konusunda önerilerde bulunmuşlardır. Fırat ve Eren [2], farklı şekillerde FRP malzemesiyle güçlendirilmiş altı adet hasarlı yağma kemer ile güçlendirilmemiş referans yağma kemerin düşey yük altındaki davranışlarını deneysel olarak inceleyip, sayısal modellemeleri ile karşılaştırmışlardır. Yağma kemerlerin onarım ve güçlendirilmesinde FRP'lerin nasıl uygulanması gerektiği belirtilmiştir. Ottoni vd. [3], çalışmasında İtalya'da 16. yüzyılda yapılmış sekizgen kasnaklı kubbenin yapısal analizini gerçekleştirmiştir. Daha çok kubbe eteklerinde meydana gelen açılmaları engellemek amacıyla kubbe eteklerinde çekme çemberi uygulayarak sonlu elemanlar ile modellemiştir. Çalışma sonucunda çekme çemberinin kubbenin eteklerinde meydana gelen açılmaları önlediği ve kubbenin taşıma kapasitesini artırdığı tespit edilmiştir. Ural vd. [4] çalışmalarında biri referans beş tanesi de farklı tasarımda gergi çubukları ile güçlendirilmiş toplamda altı adet kemer numunesi üzerinde deneysel çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışma sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılarak tarihi yapılarda kemerlerin onarım ve güçlendirmelerinde kullanılacak gergi tipinin nasıl olması gerektiği hususunda önerilerde bulunmuşlardır. Aghabeigi ve Tabar [5] Tebriz Çarşısı'ndaki Malek Timche tarihi binasını, yapının davranışını incelemek için Sonlu Elemanlar Metodu ile analiz etmiştir. Yapılan analizler sonucunda bina duvarlarında ve kubbelerinde uygulanması gereken onarım ve güçlendirme yöntemlerine karar verilmiştir. Özmen ve Sayın [6] Kütahya İli'nde bulunan tarihi Debboy yağma köprüsünün lineer dinamik analizlerini yaparak köprü'nün depreme karşı davranışlarını incelemişlerdir.

Literatür çalışmaları incelendiği zaman tarihi yağma yapıların davranışlarını inceleyen çalışmalarda bulunmaktadır. Tanrıverdi [7], doktora tezi çalışmasında kubbelerde kasnak yüksekliğinin ve kubbe pencere boşluk oranlarının kubbe davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla deneysel ve analiz çalışmaları yapmıştır. Çalışma sonucunda kasnak yüksekliğinin artmasıyla kubbenin taşıma kapasitesinin arttığı, yapmış olduğu yatay deplasmanın azaldığı tespit edilmiştir. Pencere boşluk oranının artmasıyla

kubbenin yük taşıma kapasitesinin azaldığı ve yatay deplasmanın arttığı belirlenmiştir. Sözen ve Çavuş [8] Yılanlı (Leylekli) tarihi köprüde deprem sonrası meydana gelen hasarlar sebebiyle geometrik formunda değişiklikler meydana gelmiştir. Bu sebeple yapının özgün formu ile değişikliğe uğramış formunun depreme karşı davranışlarını ANSYS sonlu elemanlar analizi ile modellemiştir. Çalışma sonucunda geometrik formunun değiştirilmesi ile yapının mimari ve estetik açıdan bozulduğu fakat deprem yüklerine karşı performansının olumlu etkilendiği tespit edilmiştir. Türker ve Yanık [9], sonlu elemanlar modeli ile İlyasbey Camii'nin deprem, sabit ve hareketli yükler etkisi altında analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çevresel titreşim testi sonuçlarına göre kalibre edilerek gerçekleştirilen analiz sonucunda yapıda oluşan basınç, çekme ve kayma dayanımları bulunmuştur.

Tarihi yapıların onarım ve güçlendirme çalışmalarında kenet ve zıvana gibi bağlantı elemanlarının kullanılmasıyla ilgili bilimsel çalışmalar yer almaktadır. Smoljanovic vd. [10] taş duvarların onarım ve güçlendirilmelerinde kullanılan kenet ve zıvana gibi bağlantı elemanlarının etkisini incelemek amacıyla sonlu-ayrık elemanlı sayısal model sunmuşlardır. Bu modelleme ile çelik kenet ve zıvanaların tarihi duvarların onarım ve güçlendirilmelerinde kullanılmasının depreme karşı yapıları oldukça koruduğu görülmüştür. Nikolic vd. [11] farklı tipteki (kenet, zıvana) bağlantı elemanları ile güçlendirilmiş taş bloktan oluşan deney numunelerinden elde edilen sonuçlara dayanarak, yük-yer değiştirme eğrileri temelinde geliştirilen bir sayısal model sunmuşlardır. Sayısal modelleme sonucunda kenet ve zıvanaların yapının taşıma kapasitesini artırdığı belirlenmiştir. Baranaydın [12], Ephesos St. Jean Kilisesi'nde günümüzde ve geçmişte yapılan restorasyon tekniklerini inceleyerek benzerlik ve farklılıklarını gözlemlemiştir. Kilisedeki geniş çaptaki boşlukların kenet ile dikiş yöntemi uygulamasının yapıldığını, kenet malzemesi olarak hatalı malzeme kullanılmasıyla yapı üzerinde sıkıntılar meydana getirdiğine değinmiştir. Nikolic vd. [13] çalışmalarında Protiron anıtının ölçülerini küçülterek laboratuvar ortamında deneysel çalışma yapmışlardır. Kenet ve zıvanalar ile güçlendirilen anıtın sismik performansını incelemek için, sarsma tablası ile modelin sismik davranışının deneysel bir araştırması yapılmıştır. Kenet ve zıvanaların sismik direnci arttırmada ve yapının çökmeye karşı korunmasında özel bir rolü olduğu belirlenmiştir. Çelik vd. [14] tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmelerinde sıklıkla kullanılan kenetlerin batma noktasının taşın kenarına olan mesafesi değişken olarak alınarak kenetlerin taş bloklar üzerindeki kayma dayanımlarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılarak kenet batma derinliğinin taşın kenarına olan mesafesinin, taşın uzunluğuna oranının 0.2 değerinden küçük olmaması sonucuna varılmıştır. Ural ve Fırat [15] 12 Mart 2013 yılında Aksaray'da meydana gelen fırtına sonrasında yıkılan minareleri incelemişlerdir. Yine aynı şekilde Yetkin vd. [16] 24 Ocak 2020 yılında 6.8 büyüklüğünde meydana gelen Sivrice depremi sonrasında tarihi minarelerde meydana gelen hasarları inceleyerek sayısal modellemeler ile

analizlerini yapmışlardır. Her iki çalışmada da minarelerin yatay doğrultuda kenet, düşey doğrultuda ise zıvana gibi bağlantı elemanları ile güçlendirilerek minare üzerine gelecek çekme gerilmelerinin karşılanabileceğini vurgulanmıştır. Karabork ve Kocak [17] yığma taş duvarların kesme mukavemetini artırmak için farklı kenet tasarımı yaparak deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda kenetin yığma duvarın süneklik ve kesme mukavemetini etkili bir şekilde artırdığı belirlenmiştir.

Bu çalışmanın esas amacı; tarihi yığma kubbelerde görülebilen bazı çatlakların, kenet bağlantı elemanı kullanarak yapılan dikiş yöntemi ile ne oranda iyileştirilebildiğinin araştırılmasıdır. Bu bağlamda, laboratuvarında imal edilen ve referans olarak adlandırılan bir kubbe deneye tabi tutulmuştur. Deney sonucunda kubbe taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra bir takım çatlaklar meydana gelmiştir. Bu hasarlar, kenet ile dikiş yöntemi yardımıyla giderilmiş ve bu şekilde tamir edilmiş kubbe numunesi yeniden düşey yükler altında deneysel olarak incelenmiştir. Bu konu ile ilgili literatür de hiçbir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma, çelik kenet ile kubbelerin güçlendirilmesi konusunda ilk çalışma olmuştur. Deney sonuçları çelik kenet uygulamaları ile güçlendirme yönteminin kubbe yapı formlarında davranışını iyileştirmede ne kadar etkili olduğunu göstermesi açısından önemli bir başlangıç çalışması olacaktır.

2 Kubbe numunesinin hazırlanması

Kubbe deney numunesi çelik levha tablası üzerinde örülmüştür. Çelik levha tablası, uzunluğu 1100 mm olan 150x150 mm² kutu profil 7 adet ayak ile desteklenmiştir. Bu ayaklar kaynak yardımıyla çelik levha tablasına birleştirilmiştir. Örülen kubbe numunesinin çapı (2000 mm) boyutunda, çelik levha üzerinde plazma kesim ile boşluk oluşturulmuştur. Kubbe numunesini, çelik levha üzerinde örebilmek için yay şeklinde bükülerek birleştirilen çelik profilden kalıp yapılmıştır. 1990 mm çapındaki kalıbın, kubbe numuneler örüldükten sonra çelik levha üzerindeki boşluktan çıkartılabilmesi için, kubbenin çapından daha küçük yapılmıştır. Şekil 1’de kubbe deney numunesinin örümünde kullanılan çelik levha tablası ve kalıp olarak hazırlanmış çelik profil kalıp verilmiştir.



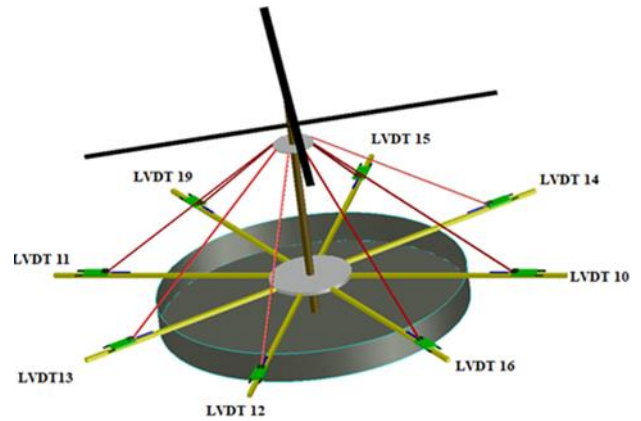
Şekil 1. Kubbe numunesinin örümünde kullanılan çelik levha tablası ve çelik profil kalıp

Şekil 2’de gösterildiği gibi kubbe deney numunesi örülmeden önce çelik levha üzerine 8 adet ahşap kalıp yapılarak dayanımı 25 MPa olan betonlar dökülmüştür. Beton kütleler ikişer adet doğrusal rulmanlara sonsuz dişli yardımıyla sabitlenmiştir. 750x100x100 mm³ boyutlarındaki beton bloklar üzerine kubbe deney numunesini örme işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Kubbe numune örümü için beton blokların üretimi ve yerleştirilmesi

Deneylerde meydana gelen yatay uzama ve kısalmaları ölçmek için 8 adet LVDT (Linear Variable Differential Transformer) ve kubbe üzerine gelen yükü ölçmek için kubbe tepesine yerleştirilen 50 ton kapasiteye sahip yük hücresi kullanılmıştır. Şekil 3’te kubbe numunesi üzerine LVDT’lerin nasıl yerleştirildiği gösterilmiştir.



Şekil 3. Deney numunesine LVDT’lerin yerleştirilmesi

2.1 Referans kubbe

Çelik kenet uygulamalı dikiş yönteminin işlevselliğini incelemek için üzerinde çatlaklar bulunan bir kubbeye ihtiyaç vardır. Bu nedenle bir adet kubbe elemanı örülmüş ve düşey yük altında üzerinde çatlaklar oluşturularak hasar verilmiştir.

Kubbe örme işleminde taşları birleştirmek için horasan harcı kullanılmıştır. Kullanılan harcin taş tozu/kireç/kum karışım oranı hacimsel olarak 4/4/2’ dir. Kubbe kısmında

taşın boyutları farklılık göstermiştir. Şekil 4’de kubbe modelinin genel geometrisi verilmiştir. Çapı 2000 mm olan kubbe numunesinin kasnak yüksekliği 200 mm olup kasnak genişliği 250 mm’dir. Deneysel çalışmada yükleme, şemsiye şeklinde mekanizma üzerinden düşey olarak yapılmıştır. 1300 mm uzunluğunda 20 mm çapında dairesel şeklindeki çelik profil kubbenin tam ortasından geçirilmiştir. Bu profilin 150 mm aşağısına, 400 mm uzunluğunda sonsuz dişli çelik profile geçirilmiştir. Şekil 4’de gösterildiği gibi kubbenin tepe noktasına 50 ton kapasiteli yük hücresi, sonsuz dişli içerisinden geçecek şekilde yerleştirilmiştir. Sonsuz dişliye sekiz boşluklu çelik halka bağlanmıştır. Bu çelik halkanın boşluklarına çelik çubuklar yerleştirilmiştir. Şemsiye şeklindeki mekanizmaya yerleştirilen çelik çubuklar ile çelik profiller doğrusal rulmanlar ile sabitlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada yükleme şemsiye mekanizmanın üst tarafına yerleştirilen çevirme kolunun saat yönünün tersine çevrilmesiyle yapılmıştır. Uygulanan yük ile kubbelerde açılmalar gözlemlenmiştir. Kubbe üzerinde meydana gelen düşey yük şemsiye mekânizması üzerine yerleştirilen 50 ton kapasiteli yük hücresinden ölçülürken, yatay yer değiştirmeler de kubbe kenarına yerleştirilen LVDT’ler ile ölçülmüştür.

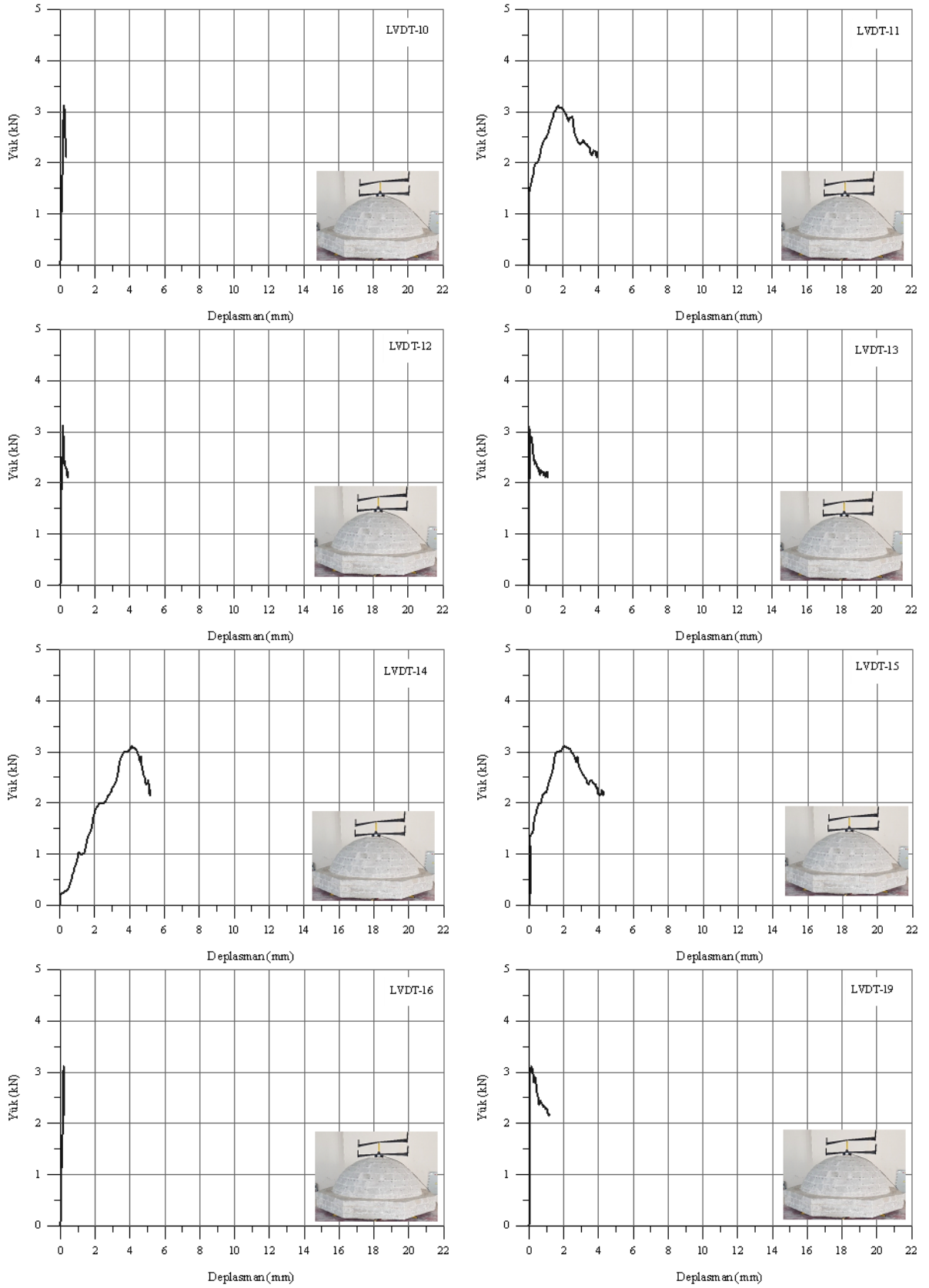


Şekil 4. Referans numunenin genel geometrisi

Deney düzeneğine, 8 adet yatay yer değiştirmeyi ölçmek için LVDT’ler yerleştirilmiştir. Şekil 5’de referans numunenin göçme sonucundaki hali gösterilmiştir. Çatlamlar kasnaklarda başlayıp, kubbe eteklerinde devam etmiştir. Derzlerde meydana gelen çatlakların genişliği 2-3 cm arasında değişmektedir. Deney sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri Şekil 6’da gösterilmiştir. Referans numunede maksimum yük 3,11 kN olarak ölçülmüştür. Maksimum yüke ulaşıldığında maksimum yer değiştirme 4,121 mm olarak LVDT-14’den elde edilmiştir. Bu değeri 2,040 mm yer değiştirme yapan LVDT-15 takip etmektedir. Bu LVDT’ler çatlak genişliklerinin fazla olduğu yerlerde bulunan yer değiştirmeleri ölçmektedir. Şekil 6’da görüldüğü gibi deney sonucunda referans numune üzerine yerleştirilen LVDT’den en fazla yer değiştirme 5,176 mm ile LVDT-14’den ölçülürken en az yer değiştirme ise 0,331 mm ile LVDT-10’dan elde edilmiştir. En az yer değiştirme olan yerde çatlama kılcal şeklinde oluşmuştur.



Şekil 5. Referans deney numunenin göçme sonucundaki hali



Şekil 6. Referans kubbe yük-deplasman grafikleri

2.2 Kenet ile güçlendirilmiş kubbe

Hasar görmüş referans kubbenin derzlerinde meydana gelen küçük çatlaklar kubbenin örümünde kullanılan horasan harcı ile onarılmıştır. 8 mm'den daha geniş çatlakların bulunduğu bölgelere çelik kenet uygulaması yapılarak dikiş yöntemiyle güçlendirme uygulanmıştır. Dikiş yöntemi uygulamasında kubbe de oluşan 8 mm'den daha geniş çatlakların sağındaki ve solundaki taş 5 cm mesafe bırakılarak matkap yardımıyla delinmiştir. Delme işlemi tamamlandıktan sonra taş, hava püskürtme tabancasıyla temizlenmiştir. Şekil 7 (a)'da gösterildiği gibi taşın delinen kısımlarına çelik bağlantı elemanı olan kenetler yerleştirilmiştir. Kenetlerin yerleştirildiği boşluklar çimento şerbeti ile doldurmuştur. Şekil 7 (b)'de kenet uygulaması ve hasar görmüş kubbe üzerine uygulanan dikiş yöntemi gösterilmiştir. Kenet ile güçlendirilmiş kubbe üzerine referans kubbedeki gibi düşey yük uygulanmıştır.

Şekil 8'de kenet ile güçlendirilmiş kubbenin deney sonucundaki göçme halleri verilmiştir. Şekil 8'de görüldüğü üzere dikiş yöntemi ile yapılan güçlendirme çalışmasında en fazla hasar, kenetlerin yerleştirildiği bölgenin sağında ve solunda bulunan derzlerde meydana gelmiştir. Kenetin yerleştirildiği bölgenin sağında ve solunda bulunan derzlerde meydana gelen bu çatlaklar radyal şeklindedir. Deney sonrası göçme şekilleri incelendiği zaman kenet ile güçlendirilmiş kubbe üzerinde, referans kubbe olduğu gibi çekme bölgesinde ve basınç bölgesinde çatlakların oluştuğu görülmektedir. Her iki deneyde de kubbe taşı zarar görmemiştir. Kasnak kenarlarından başlayarak kubbenin basınç bölgesine kadar uzanan çatlamlar kubbe derzlerinde meydana gelmiştir.



(a)

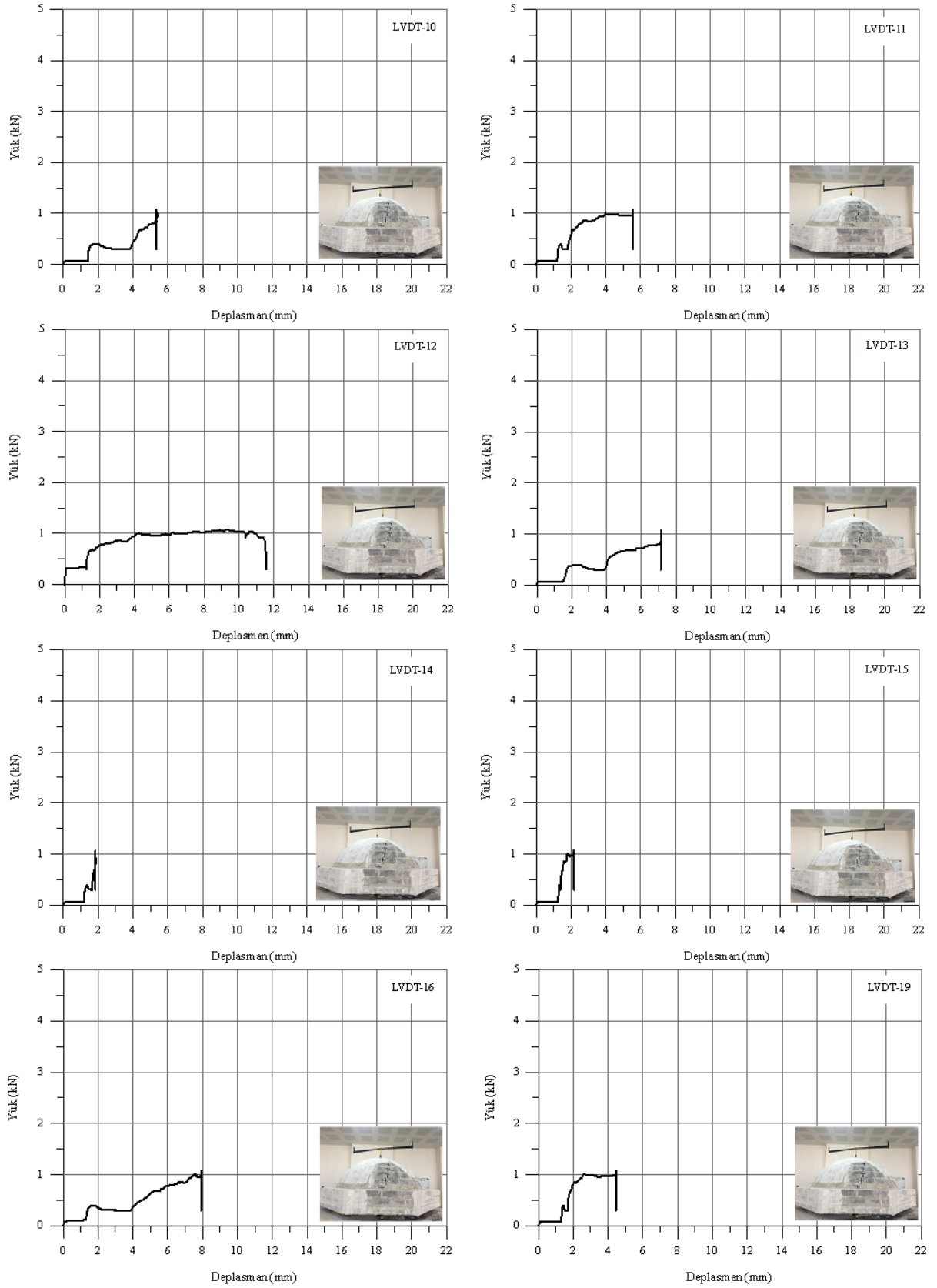


(b)

Şekil 7. (a) kubbe taşının delinmesi ve kenetin uygulanması, (b) dikiş yönteminin uygulanması



Şekil 8. Kenet ile güçlendirilmiş kubbe numunesinin deney sonucundaki hali



Şekil 9. Kenet ile güçlendirilmiş kubbe numunesinin yük-deplasman grafikleri

Şekil 9’da yük–deplasman grafikleri verilmiştir. Kubbe yaklaşık 1.18 kN yük taşımıştır. Maksimum yük altında maksimum deplasman 9.12 mm ile LVDT 12’de meydana gelmiştir. LVDT 12’den sonra maksimum deplasman sırası ile LVDT 16’da 7.91 mm ve LVDT 13’de 7.11 mm ölçülmüştür. Minimum deplasman LVDT 14’den 1.84 mm ve LVDT 15’den 2.17 mm elde edilmiştir. Tablo 1’de deney sonuçları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Tablo 1’de görüldüğü gibi kenet ile güçlendirilen kubbe referans kubbeden daha az yük taşımıştır. Daha az yük taşınması ile birlikte referans kubbeye göre daha fazla yer değiştirme de yapmıştır.

Tablo 1. Deney sonuçları

Numune No	P _r (kN) (Mak. Yük)	Artış ^a (%)	Mak.yüke karşılık gelen yatay yer değiştirme (mm)
Referans kubbe	3.11	0	4.12
Kenet ile güçlendirilmiş kubbe	1.18	-62.06	9.12

3 Sonuçlar

Bu çalışmada, günümüzde tarihi yığma kubbelerde görülen geniş çatlaklar üzerine kenet bağlantı elemanları kullanılarak uygulanan dikiş yönteminin, kubbenin davranışına etkisi araştırılmıştır. İlk olarak 2 m çapında 1 m yüksekliğinde sekizgen kasnaklı referans kubbe imal edilmiştir. Kubbenin en tepe noktasından etkiyen düşey yük altındaki referans kubbenin taşıma kapasitesi deneysel olarak incelenmiştir. Kubbe yük taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra, kubbe üzerinde çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlaklar kenetler kullanılarak dikiş yöntemi ile giderilip, kenetli kubbe numunesinin düşey yük altındaki davranışı deneysel olarak incelenmiştir.

Deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

- ✓ Referans kubbe ve güçlendirme amaçlı kenetli dikiş yöntemi uygulanan kubbe karşılaştırıldığı zaman referans kubbe kenetli kubbeye göre daha fazla yük taşımıştır. Referans kubbe deney sonucunda maksimum 3.11 kN yük taşırken, dikiş yöntemi uygulanan kubbe 1.18 kN yük taşımıştır. Dikiş yöntemi uygulanmış kubbenin referans kubbeye göre yük taşıma kapasitesi %62.06 azalmıştır.
- ✓ Referans kubbeye çatlaklar kubbe kasnağının köşelerinde, kubbenin çekme ve basınç bölgelerinde meydana gelmiştir. Dikiş yöntemi uygulanan kubbeye ise çatlaklar genellikle kenet uygulamasının yapıldığı bölgenin sağında ve solunda meydana gelmiştir. Dikiş yöntemi uygulanan kubbeye çatlaklar referans kubbeye olduğu gibi kubbenin çekme ve basınç bölgesinde de gözlemlenmiştir.
- ✓ Kubbe kenet kullanılarak dikiş yöntemi ile güçlendirilmesine rağmen yapmış olduğu yatay yer değiştirme, referans deney numunesine oranla daha fazladır. Referans kubbenin maksimum yük altında yapmış olduğu yatay yer değiştirme 4.12 mm iken, dikiş yöntemi uygulanan kubbeye bu değer 9.12

mm olmuştur. Buradan kenet uygulamalı dikiş yönteminin taşıma kapasitesini arttırmamasına rağmen sünekliğe olumlu yönde etki ettiği sonucu çıkarılabilir.

Çalışma genel olarak değerlendirildiğinde;

Tarihi yapılarda kubbelerde onarım ve güçlendirmede çok sık kullanılan bir uygulama olan dikiş yönteminin kubbe üzerinde meydana gelen geniş çaptaki açılmaların daha fazla genişlemesini önlediği, fakat kubbenin yük taşıma kapasitesine olumlu bir katkı sağlamadığı tespit edilmiştir. Dikiş yöntemi uygulanan kubbe ile referans kubbeye meydana gelen çatlaklar ve açılmalar arasında bölgesel olarak bir fark görülmemiştir. İki durumda da kubbenin çekme hatta basınç bölgelerinde çatlaklar ve açılmalar gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile hasar görmüş kubbe yapılar bu şekilde uygulanan bir dikiş yönteminin iyi sonuçlar vermediği görülmüştür. Kubbenin yük taşıma kapasitesini arttırmak ve yatay yer değiştirmeyi azaltmak için kenet ile yapılan dikiş yöntemi ile birlikte kubbenin çelik çekme çemberi veya FRP gibi malzemelerle de güçlendirilmesi gerektiği düşünülmektedir. Bununla birlikte kenet uygulamalı dikiş yöntemi, tarihi yığma kubbelerin restorasyon ve güçlendirme çalışmalarında çok sık kullanılmaktadır. Bu çalışma piyasada yapısal uygulamalarda kullanılan şekliyle dikiş yönteminin bir güçlendirme yöntemi olarak düşünülmemesi gerektiği sonucunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte kenet boyutları, kenet bağlantı tipleri, kenet miktarları, çatlakların farklı malzemelerle doldurulması gibi taşıma kapasitesine etki edebilecek parametrelerin hasar görmüş kubbeler üzerinde taşıma gücü açısından nasıl etki edeceği ve dolayısıyla piyasa da uygulanan bir dikiş yönteminden farklı optimum faydayı sağlayacak yeni bir dikiş yönteminin önerilmesi üzerinde araştırma yapılması gereken bir konudur.

Teşekkür

Bu çalışma Aksaray Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje no: 2018/035).

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] E. Yıldız, G. Yavuz ve Ü.S. Yılmaz, Tarihi taş yığma konutların güçlendirilmesinde kullanılan yöntemler: Ürgüp İbrahim Paşa Köyünden bir konut örneği. Engineering Sciences Dergisi, 6 (4), 1033-1052, 2011.
- [2] F.K. Fırat ve A. Eren, Tarihi yığma yapılardaki hasarlı kemerler üzerinde FRP etkisinin incelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(4), 659-670, 2015. <https://doi.org/10.17341/gummfd.46980>.
- [3] F. Ottoni ve C. Blasi, Hoping as an ancient remedy for conservation of large masonry domes. International Journal of Architectural Heritage, 10 (2-3), 164-181,

2016. <https://doi.org/10.1080/15583058.2015.1113335>.
- [4] A. Ural, F.K. Fırat, Ş. Tuğrüleçli ve M.E. Kara, Experimental and numerical study on effectiveness of various tie-rod systems in brick arches. *Engineering Structures*, 110, 209-221, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.11.038>.
- [5] P. Aghabeigi, ve S. Farahmand-Tabar, Seismic vulnerability assessment and retrofitting of historic masonry building of Malek Timche in Tabriz Grand Bazaar. *Engineering Structures*, 240, 112418, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112418>.
- [6] A. Özmen, ve E. Sayın, Tarihi yığma bir köprünün deprem davranışının değerlendirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 956-965, 2020. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.715121>.
- [7] Ş. Tanrıverdi, Taş kubbelerde pencere boşluğunun ve kasnak yüksekliğinin davranış ve dayanım üzerine etkisinin incelenmesi, Doktora Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray, 2020.
- [8] Ş. Sözen ve M. Çavuş, Tek açıklıklı tarihi taş köprülerde form değişikliğinin köprünün sismik davranışına etkisinin değerlendirilmesi: Niksar Yılanlı (Leylekli) Köprü örneği. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8 (1), 48-59, 2020. <https://doi.org/10.29130/dubited.589223>.
- [9] T. Türker ve Y. Yanık, İlyasbey Camisi'nin yapısal davranışının çevresel titreşim testi ve sonlu eleman yöntemleriyle incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8 (2), 1431-1453, 2020. <https://doi.org/10.29130/dubited.627927>.
- [10] H. Smoljanović, Ž. Nikolić ve N. Živaljić, A finite-discrete element model for dry stone masonry structures strengthened with steel clamps and bolts. *Engineering Structures*, 90, 117-129, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.02.004>.
- [11] Z. Nikolic, L. Krstevska, H. Smoljanovic ve N. Živaljić, Modelling of the influence of metal connectors on the resistance of historical dry-stone masonry structures. *International Journal of Architectural Heritage*. 2019. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1613455>.
- [12] F. Baranaydın, Ephesos St. Jean Kilisesi Kiborion sütunu 1963 yılı restorasyonuna güncel bir yaklaşım, *AMİSOS*, 5 (8), 31-50, 2020.
- [13] Z. Nikolic, L. Krstevska, P. Marovic ve H. Smoljanovic, Experimental investigation of seismic behaviour of the ancient Protiron monument model. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 48 (6), 573-593, 2019. <https://doi.org/10.1002/eqe.3149>.
- [14] T. Çelik, Ş. Tanrıverdi, A. Ural ve F.K. Fırat, Yığma yapılarda kullanılan kenetlerin yapı davranışına etkilerinin incelenmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21 (3), 650-659, 2021. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.874494>.
- [15] A. Ural ve F.K. Fırat, Evaluation of masonry minarets collapsed by a strong wind under uncertainty. *Natural Hazards*, 76 (2), 999-1018, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1531-7>.
- [16] M. Yetkin, İ.Ö. Dedeoğlu ve Y. Calayır, 24 Ocak 2020 sivrice depremi sonrasında Elazığ ilinde bulunan minarelerde meydana gelen hasarların araştırılması ve değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33 (2), 379-389, 2021. <https://doi.org/10.35234/fumbd.838261>.
- [17] T. Karabork ve Y. Kocak, New metal connectors developed to improve the shear strength of stone masonry walls. *Structural Engineering and Mechanics*, 50 (1), 121-135, 2014. <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2014.50.1.121>.

