

Taş Köprülerin FRP ile Güçlendirilmesi: Leylekli Köprüsü Örneği

Strengthening of Stone Bridges with FRP: The Case of Leylekli Bridge

Şükran Tanrıverdi^{1*}, Tülin Çelik¹

¹ Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Aksaray, Türkiye

Öz

Tarihi köprüler, geçmişin mimari ve mühendislik birikimini yansıtan, kültürel miras açısından korunması gereken özgün yapılardır. Geleneksel inşaat tekniklerinin ve yerel malzeme kullanımının önemli örneklerini sunan bu yapılar, günümüzde hala işlevlerini sürdürebilmektedir. Ancak zamanla meydana gelen malzeme bozulmaları, çevresel etkiler ve özellikle sismik yüklemeler, bu köprülerde yapısal zayıflıklara yol açmaktadır. Deprem riski taşıyan bölgelerde yer alan tarihi yığma taş köprülerin korunması, yalnızca mühendislik açısından değil, kültürel süreklilik bakımından da kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, Lifli Polimer Takviyeler (FRP) gibi ileri mühendislik malzemeleri, yapıya minimum müdahale ile yüksek yapısal iyileştirme sağlayan, estetik ve tarihi bütünlüğe zarar vermeyen yenilikçi bir güçlendirme seçeneği olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, tarihi Leylekli Taş Köprüsü örneği üzerinden, FRP malzemelerinin farklı bölgelere uygulanmasının köprünün yapısal davranışına etkileri incelenmiştir. Analiz sonuçları, uygun yerleşim stratejileriyle FRP uygulamasının taşıyıcı kapasiteyi artırdığı ve potansiyel hasarların azaltılmasında etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışma, tarihi yığma köprülerin çağdaş koruma yaklaşımlarıyla güvenli bir şekilde güçlendirilmesine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Abstract

Historic bridges are unique structures that reflect the architectural and engineering accumulation of past and should be preserved in terms of cultural heritage. These structures, which present significant examples of traditional construction techniques and the use of local materials, are still functional today. However, material deterioration over time, environmental impacts and especially seismic loading cause structural weaknesses in these bridges. The preservation of historic masonry stone bridges located in earthquake-prone areas is of critical importance not only in terms of engineering but also in terms of cultural continuity. In this context, advanced engineering materials such as Fibrous Polymer Reinforcements (FRP) stand out as an innovative strengthening option that provides high structural improvement with minimal intervention to the structure and does not harm aesthetics and historical integrity. In this study, the historical Leylekli Stone Bridge was used as a case study to investigate the effects of applying FRP materials to different sections of the bridge on its structural behavior. The results of the analysis reveal that FRP application with appropriate placement strategies increases the load-bearing capacity and is effective in reducing potential damages. The study aims to contribute to the safe retrofitting of historic masonry bridges with contemporary conservation approaches.

Anahtar Kelimeler: Tarihi köprüler, Yığma yapılar, Güçlendirme, Yapısal analiz

Keywords: Historical bridges, Masonry structures, Strengthening, Structural analysis

* Sorumlu yazar e-posta (Corresponding e-mail): sukrantugruler@aksaray.edu.tr
Geliş Tarihi (Received): 17.05.2025 , Kabul Tarihi (Accepted): 17.07.2025

1. Giriş

Tarihi yapılar, eski medeniyetlerin kültürel, mimari ve mühendislik birikimlerinin somut örneklerini sunarak, önemli bir kültürel miras ögesi oluşturur. Bu yapılar, bulundukları dönemin sosyal, ekonomik ve inşaat teknikleri açısından gelişimini gözler önüne sererken, aynı zamanda o dönemin mimarlık ve mühendislik seviyesini de yansıtmaktadır. Özellikle tarihi taş köprüler, mimarlık ve mühendislik açısından önemli birer örnek olarak, hem teknik hem de kültürel değer açısından büyük bir öneme sahiptir.

Yığma taş köprüler, geleneksel inşaat yöntemleriyle inşa edilerek uzun yıllar boyunca farklı amaçlarla taşıma işlevini yerine getirmiş ve tarihi süreç içinde varlıklarını sürdürmüşlerdir. Ancak zaman içerisinde taş köprülerde malzeme yıpranması, çevresel faktörlerin etkisi, aşınma ve korozyon gibi doğal etkilere maruz kalmışlardır. Bununla birlikte, özellikle sismik aktiviteler gibi dinamik yükler, taş köprüler üzerinde yapısal hasarlara yol açmakta ve zaman içerisinde taşıma kapasitelerini zayıflatmaktadır. Bu faktörler, tarihi taş köprülerin yapısal bütünlüğünü tehdit etmekte ve korunmalarını gerektiren önemli bir sorun oluşturmaktadır.

Tarihi yapıların korunması, yalnızca estetik ve kültürel değerlerin muhafaza edilmesiyle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda toplumların kültürel miraslarının gelecek nesillere sağlıklı bir biçimde aktarılabilmesi için büyük bir önem arz etmektedir. Bu nedenle tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesi, mühendislik ve kültürel varlıklarımızın korunması açısından bir bütün olarak ele alınması gereken bir durumdur. Geleneksel onarım ve güçlendirme teknikleri, genellikle yapının orijinal şeklini ve estetik bütünlüğünü koruyarak yapının güçlendirilmesinin sağlamayı hedeflemektedir fakat bu yöntemler çoğu zaman yapısal güvenliği artırmada yetersiz kalabilmektedir. Bu sebeple, tarihi yapıların korunması için çağdaş mühendislik malzemelerinin ve yenilikçi güçlendirme tekniklerinin kullanımı, kritik bir rol oynamaktadır. Modern mimarlık ve mühendislik çözümleri, onarım ve güçlendirme yöntemlerinde hem yapısal güvenliği sağlamakta hem de tarihi yapının özgünlüğünü ve estetik değerini korumaktadır.

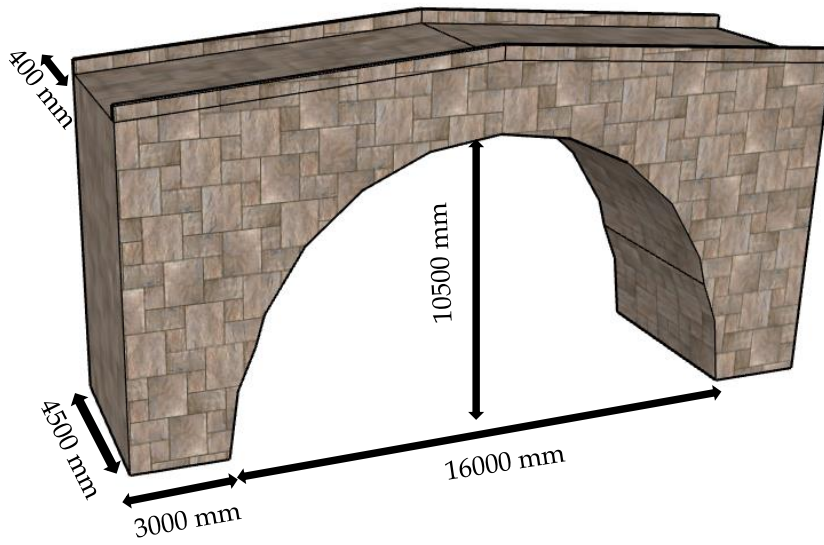
Günümüzde, yenilikçi kompozit malzemelerden biri olan Lifli Polimer Takviyeler (FRP), tarihi yapıların yapısal olarak güçlendirilmesinde minimum müdahale gerektiren, yüksek verimliliğe sahip ve çevresel sürdürülebilirliği destekleyen bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. FRP malzemeler; yüksek çekme dayanımı, düşük yoğunluk, korozyon direnci ve uygulandıkları yüzeyde estetik bütünlüğü bozmadan işlev görebilme özelliklerinden dolayı öne çıkmaktadır [1]. Bu avantajları sayesinde, özellikle tarihi yapılarda özgün yapısal ve mimari niteliklere zarar vermeden önemli ölçüde taşıyıcı sistem iyileştirmesi sağlanabilmektedir. Özellikle yüksek deprem riski taşıyan bölgelerde yer alan tarihi yığma taş köprülerde gerçekleştirilen uygulamalar, FRP ile yapılan güçlendirmelerin yapısal performansı artırmadaki etkinliğini ortaya koymakta; bu yöntem, kültürel mirasın korunmasında hem mimarlık hem de mühendislik disiplinleri açısından önemli ve uygulanabilir bir çözüm yolu sunmaktadır. Tarihi köprülerin davranışlarının incelendiği, onarım ve güçlendirme çalışmalarının yapıldığı çalışmalar bulunmaktadır.

Borri vd.,[2] yaptıkları çalışmada tuğla örgü kemerlerin iç yüzeylerinden güçlendirilmesi için karbon plakalar kullanarak yenilikçi bir teknik incelenmiştir. FRP levhalar genellikle güçlendirme elemanı olarak kullanılsa da, bunlar yerel çökme mekanizmalarına yol açabilir. GFRP ve CFRP levhalar gibi alternatifler, erken soyulma sorunlarını çözebilecek özellikler sunmaktadır. Çalışmada, farklı takviye türlerinin, bağlama sistemlerinin ve ankraj çivilerinin etkisi, monotonik dikey yük altında yapılan testlerle değerlendirilmiştir. D'Ambrisi vd.,[3] bu çalışmada, İkinci Dünya Savaşı sonrası inşa edilmiş bir kemer köprü örneği üzerinden, karbon takviyeli çimento matrisi (C-FRCM) malzemelerle yapılan güçlendirme tasarım kriterleri sunulmuştur. Yapının mevcut hali ile güçlendirilmiş hali karşılaştırılmış ve mevcut yapının güncel yük standartlarına göre yaklaşık %60 kapasite yetersizliği taşıdığı belirlenmiştir. Güçlendirme sonrası, yük taşıma kapasitesi anlamlı şekilde artmıştır. Uçları ankrajlı ve ankrajsız olmak üzere iki farklı C-FRCM uygulaması değerlendirilmiş; ankrajlı sistemde 3 kat, ankrajsız sistemde ise 4 kat uygulama gerekliliği ortaya konmuştur. Güçlendirme, çökme yük çarpanını 0,338'den 1'in üzerine

1 çıkarmış ve ankrajsız sistemde %29 daha fazla lif kesitine ihtiyaç duyulmuştur. Daryadel ve Cunningham
2 [4] çalışmada, yığma kemer köprülerin fiber takviyeli polimer (FRP) sistemlerle güçlendirilmesi sayısal
3 olarak incelenmiştir. ABAQUS yazılımı ile oluşturulan modeller, deneysel verilerle doğrulanmış ve yarım
4 daire kemerler üzerinde farklı FRP uygulama konfigürasyonları (iç yüzey, dış yüzey, yerel) analiz
5 edilmiştir. Güçlendirme miktarının ve yerleşiminin kemerlerin dayanım, süneklik ve genel davranışı
6 üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçta, maliyet, dayanım artışı ve verimlilik açısından en uygun FRP
7 düzenlemesi belirlenmiştir. Yanık ve ark [5] tarihi taş köprülerde deprem, sel gibi doğal afetlerden dolayı
8 meydana gelen hasarlar ve bu hasarların giderilmesi için yapılan onarım ve güçlendirme çalışmalarına
9 değinmişlerdir. Onarım ve güçlendirme çalışmalarında yapılmaması gereken yanlış uygulamalar
10 anlatılarak yapının daha uzun süre nasıl korunabileceği ve hangi yöntemlerin nasıl uygulanacağı
11 anlatılmıştır. Özmen ve Sayın [6] tek açıklıklı yığma köprüyü ANSYS programını kullanarak
12 modellemişlerdir. 2011 Simav ve 2002 Sultandağı depremlerine ait ivme kayıtları kullanılarak köprünün
13 sismik davranışlarını incelemişlerdir. Analiz sonucunda köprünün sismik davranışlarının yanında, yer
14 değiştirmeleri ve maksimum-minimum asal gerilmeleri de değerlendirilmiştir. Simoncello vd.,[7] Bu
15 çalışmada, tarihi duvar örgüsü kemer köprülerinin güçlendirilmesi için fiber takviyeli polimer (FRP)
16 kullanımı incelenmiştir. FRP tabakaları ile güçlendirilen köprülerin sayısal analizi, Prestwood Köprüsü
17 örneği üzerinden yapılmıştır. Sonuçlar, FRP güçlendirmenin yapının yük taşıma kapasitesini artıracığını
18 ancak laboratuvar testlerinden elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında daha düşük katkı sağladığını
19 göstermektedir. Sözen ve Çavuş [8] çalışmalarında Leylekli Köprüsü'nün geometrik formunda değişiklik
20 yaparak köprünün deprem performanslarını ANSYS programını kullanarak incelemişlerdir. İki farklı
21 geometrik formdaki köprünün gerilme ve deformasyonlarını ele alıp, statik ve dinamik analizleri
22 sonucunda asimetric formdaki köprünün daha az zorlandığı belirlenmiştir. Bayraktar ve Hökelekli [9]
23 çalışmada, tarihi duvar örgüsü kemer köprülerinin spandrel duvarlarının sismik performansı
24 incelenmiştir. Farklı güçlendirme teknikleri, yani konik kesit, enine bağlantı çubukları ve FRCM kompozit
25 kaplama ile güçlendirilmiş spandrel duvarların sismik tepkileri sayısal analizlerle değerlendirilmiştir.
26 Sonuçlar, güçlendirme yöntemlerinin spandrel duvarların sismik dayanımını artırdığını göstermektedir.
27 Ayrıca, spandrel duvarların güçlendirilmesi için bazı önerilerde bulunulmuştur. Bahreini vd., [10] çalışma
28 kapsamında, Musa Palas Kemer Köprüsü üzerine yapılan sismik hassasiyet analizi ile köprünün malzeme
29 özelliklerinin yapısal davranış üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tornado diyagramı kullanılarak,
30 malzeme parametrelerindeki belirsizliklerin yapısal tepkiler üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. ANSYS
31 sonlu elemanlar yazılımı ile yapılan dinamik analizlerde, El Centro deprem kaydı kullanılarak köprünün
32 sismik yük altında davranışı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, köprü dolgu malzemelerinin elastik
33 modülünün ve yoğunluğunun yapısal tepkilerde en etkili değişkenler olduğunu göstermiştir. Yang vd.
34 [11], yığma köprü güçlendirmelerinde kullanılan UHPC malzemesinin köprü üzerindeki etkisini
35 incelemişlerdir. Çalışmada ultra yüksek performanslı betonun (UHPC) erken yaşta büzülmesini ve
36 çatlama potansiyelini araştırmışlardır. Adsız vd. [12] Malatya İli Darende İlçesi'nde bulunan Uzunok
37 Köprüsü'nü SAP 2000 programında modelleyerek deprem kuvvetleri altındaki davranışlarını
38 incelemişlerdir. Maksimum gerilme ve yer değiştirmeleri tespit etmişlerdir. Cavuşlu ve Ülger [13]
39 çalışmalarında Batıayaz Köprüsü'nü ele almışlardır. Köprünün kemer kısmını metal bağlantı elemanı olan
40 kenet - zıvanalar ve FRP malzemesi ile güçlendirmişlerdir. Köprünün sismik performanslarını
41 karşılaştırarak, kenet ve zıvananın FRP malzemesine göre yapıyı daha iyi iyileştirdiklerini
42 belirtmişlerdir. Tarhan vd. [14] çalışmalarında harçlı yığma kemerlerin deprem performansını FRP (elyaf
43 takviyeli polimer) ile güçlendirme yoluyla incelemektedir. Güçlendirme düzeni topoloji optimizasyonu
44 ile belirlenmiş, yatırma masası deneyleri ve sayısal analizlerle test edilmiştir. Sonuçlar, FRP'nin
45 kemerlerin taşıma kapasitesini artırdığını ve yapısal davranışı olumlu etkilediğini göstermektedir. Varró
46 vd. [15] sekiz tonozlu taş köprü incelenmiş ve yapısal hasarın yük taşıma kapasitesine etkisi araştırılmıştır.
47 Sayısal analizlerle, hasarın türüne bağlı olarak kapasite kaybı %90'a kadar değişmiştir. Geometrik
48 boyutlar ve sürtünme etkileşimi, yük taşıma kapasitesini en çok etkileyen faktörler olarak belirlenmiştir.
49 Zampieri vd.[16] İtalya'da bulunan tek açıklıklı köprüyü 1/2 oranında küçülterek hem deneysel hem de
50 nümerik bir çalışma yapmıştır. Çalışmada köprüyü önce güçlendirmeden sonra da FRCM (Fiber Takviyeli
51 Çimentolu Matriks) ile güçlendirerek incelemiştir. Güçlendirme sonucunda köprünün mukavemetinde,

1 yük taşıma kapasitesinde artma meydana geldiğini ve daha sünek davranış sergilediğini
2 gözlemlemişlerdir.

3
4 Çalışmada Tokat'ın Niksar İlçesi'nde bulunan tarihi taş köprü olan Yılanlı (Leylekli) Köprü örnek olarak
5 seçilmiştir. Köprü'nün uzunluğu 22 m, kemer açıklığı 16 m, kemer yüksekliği 10.5 m, kemer genişliği 4.5
6 m ve yan duvar kalınlığı 0.4 m'dir (Şekil 1). Köprü'nün önce güçlendirilmeden analizi yapılarak, köprüde
7 nerelerde hasar meydana gelebileceği tespit edilmiştir. Hasar gelebilecek noktalar FRP kompozit
8 malzemesi kullanılarak güçlendirilip köprü tekrar analiz edilmiştir. Makalenin asıl amacı Leylekli Taş
9 Köprüsü örneği üzerinden tarihi taş köprülerin taşıyıcı sistem davranışını incelemeyi ve FRP kullanılarak
10 gerçekleştirilen güçlendirme uygulamalarının yapısal iyileştirme üzerindeki etkilerini değerlendirmektir.
11 Elde edilen sonuçlar FRP uygulamalarının yığma taş köprülerin yapısal yeterliliğini artırmada etkili
12 olduğunu göstermekte ve benzer özelliklere sahip tarihi yapıların korunmasında uygulanabilir bir
13 mühendislik yaklaşımı sunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 1. Köprü'nün geometrik boyutları

2. Materyal ve Metod

Bu çalışmada, Tokat ilinin Niksar ilçesinde yer alan tarihi Yılanlı Taş Köprüsü temel alınarak sayısal modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, herhangi bir güçlendirme müdahalesi yapılmaksızın köprü'nün mevcut durumu, LUSAS sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak nümerik olarak modellenmiştir. LUSAS analiz programı dünya çapında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu program, yapının üç boyutlu dinamik, statik, doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerini yapması bakımından oldukça avantajlı bir analiz programıdır [17]. LUSAS yazılımının tercih edilme sebebi; Drucker-Prager kriteri ile Von-Mises kriterinin aynı modelde birlikte kullanılabilmesi, farklı malzeme davranışlarının (taş, dolgu, FRP) uyumlu ve kararlı şekilde modellenmesini sağlamasıdır. Ayrıca, LUSAS'ın gelişmiş temas yüzeyi tanımlama özellikleri ve yüksek çözünürlüklü gerilme-deformasyon çıktıları, FRP güçlendirme yöntemlerinin detaylı bir şekilde analizine imkan vermektedir. Üç boyutlu makro modelleme yaklaşımı ile büyük ölçekli yığma yapıların hesaplama verimliliği yüksek ve kararlı analizleri, çalışmanın teknik gereksinimleriyle doğrudan örtüşmektedir. Yapılan bu çalışmada güçlendirilme yapılmadan analizi yapılan model "Referans Model" olarak tanımlanmıştır. Referans modelin analizi yapılarak köprü'nün taşıyacağı yük ve ortaya çıkan şekil değiştirmeler referans olarak kabul edilmiştir. Ardından, daha çok şekil değiştirmelerin meydana geldiği bölgelere farklı FRP (Lifli Polimer Takviye) kompozit şeritler kullanılarak üç ayrı güçlendirme senaryosu uygulanmış ve her biri ayrı modeller şeklinde analiz edilmiştir.

İlk güçlendirme durumunu temsil eden Model-1'de, köprünün kemer açıklığının orta noktasına, 1500 mm genişliğinde tek bir FRP kompozit şerit yerleştirilmiştir. İkinci durumu ifade eden Model-2'de ise kemer açıklığının her iki kenarından 350 mm boşluk bırakılarak, ortada kalan bölgeye simetrik olarak yerleştirilen 1150 mm genişliğinde iki adet FRP şerit kullanılmıştır. Son güçlendirme düzenlemesini içeren Model-3'te ise, köprünün dolgu bölgesi yan yüzeylerinden FRP ile takviye edilmiştir. Bu uygulamada da kenarlardan 350 mm mesafe bırakılarak, her iki tarafa 1150 mm genişliğinde FRP kompozit şeritler uygulanmıştır.

Son yıllarda özellikle güçlendirme malzemesi olarak FRP şeritler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. FRP malzemesi hafif, düşük yoğunluklu, dayanımı oldukça yüksek ve paslanmaya, çevre şartlarına karşı oldukça dayanıklıdır. FRP; cam, basalt, aramid ve karbon malzemelerin birleşimiyle üretilen kompozit malzemedir. Tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesinde tercih edilmesinin en büyük sebebi, yapıya ilave yük getirmemesi ve yapının orjinal dokusunu bozmamasıdır.

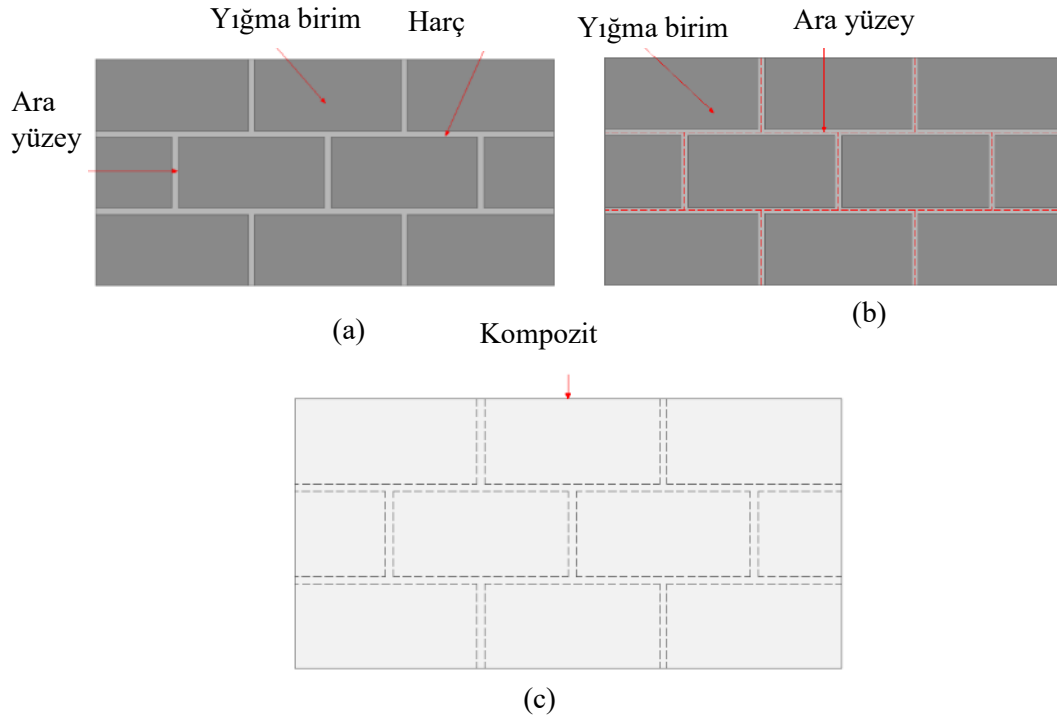
Bu çalışmada, köprü modellerinin sayısal analizleri LUSAS [18] sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yığma yapıların yapısal analizinde genellikle üç farklı modelleme yaklaşımı tercih edilmektedir: basitleştirilmiş mikro modelleme, detaylı mikro modelleme ve makro modelleme.

Basitleştirilmiş mikro modelleme yönteminde, yığma yapıyı oluşturan birimler (örneğin taş veya tuğla) harç tabakasıyla birlikte temsil edilmek yerine, harç kalınlığının yarısı kadar genişletilerek sadece birim malzemeler üzerinden modellenir; bu sayede harç, modelleme sürecinde ihmal edilir. Yığma birimler, aralarındaki temas ara yüzeyleri ile tanımlanır ve bu ara yüzeyler yapı içindeki potansiyel çatlak oluşum bölgeleri olarak kabul edilir. Bu yaklaşım, çatlakların esas olarak birimler arasındaki bağ yüzeylerinde meydana geleceği varsayımına dayanarak yapısal davranışı değerlendirme amacı taşımaktadır [1].

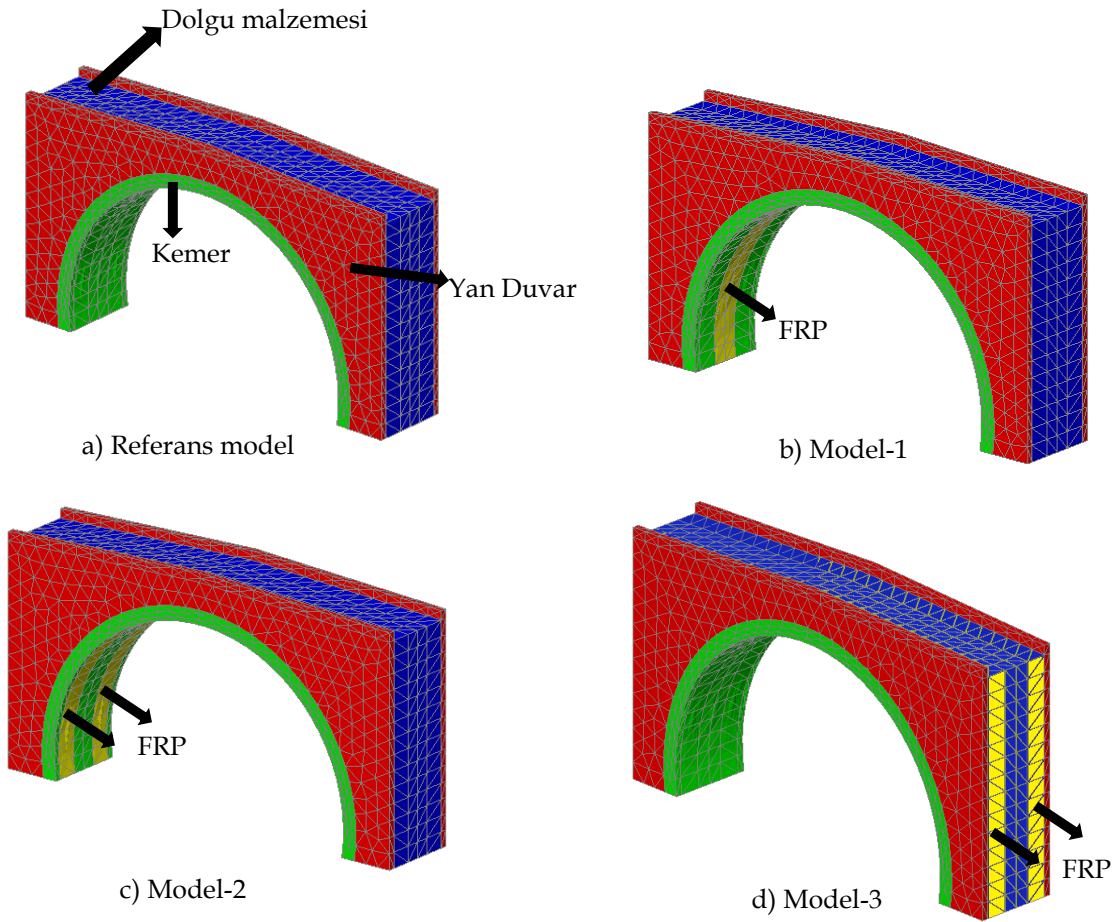
Detaylı mikro modelleme yaklaşımında, hem yığma birimleri (örneğin taş veya tuğla) hem de bu birimleri bir arada tutan harç tabakası ayrı sonlu elemanlar olarak modellenmekte ve her bir malzeme bileşeni için elastik olmayan (nonlineer) mekanik özellikler, elastisite modülü ve Poisson oranı ayrı ayrı tanımlanmaktadır. Bu modelleme tekniğinde, taş ve harç bileşenleri arasındaki ara yüzey davranışı açıkça temsil edilmekte olup, çatlakların öncelikli olarak bu ara yüzeylerde gelişeceği varsayılmaktadır. Böylece, detaylı mikro modelleme ile yığma yapıların yerel mekanik davranışları daha hassas bir şekilde analiz edilebilmektedir [1].

Bu çalışmada, kullanılan makro modellemede, harç ve yığma birimleri homojenleştirilerek bir bütün olarak ele alınmıştır. Bu yaklaşımda, yığma duvarın mekanik özellikleri homojenleştirilmiş bir kompozit malzeme olarak kabul edilmekte ve analizde bu homojenleştirilmiş özellikler dikkate alınmaktadır. Çalışma kapsamında makro modelleme tercih edilmiştir, çünkü mikro modelleme yönteminde her bir yığma birimi ve harç bileşeninin mekanik özellikleri ayrı ayrı tanımlanarak daha ayrıntılı analizler yapılmakta, bu da bilgisayar tabanlı analizlerin uzun süre almasına neden olmaktadır. Makro modelleme, bu tür detayların birleştirilerek daha hızlı ve verimli sonuçlar elde edilmesini sağlayarak, yığma yapıların genel davranışlarını daha pratik bir şekilde değerlendirme imkânı sunmaktadır. Şekil 2'de yığma duvarlardaki modelleme teknikleri gösterilmiştir.

Her bir modelin yapısal davranışı analiz edilerek karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmış, köprü üzerindeki FRP yerleşimlerinin taşıma kapasitesi ve deformasyon karakteristikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Söz konusu modellerin şematik temsilleri Şekil 3'de sunulmaktadır.



Şekil 2. Yığma duvardaki modelleme teknikleri a) detaylı mikro modelleme, b) basitleştirilmiş mikro modelleme, c) makro modelleme.



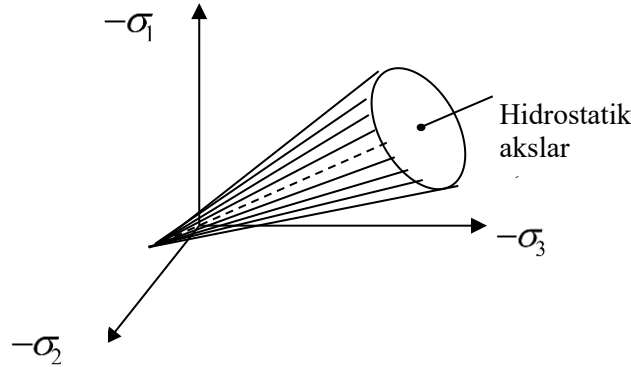
Şekil 3. Köprü modellerinin çizimi

Köprü, kemer kısmı, yan duvarlar ve dolgu olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. Sayısal modellemeler, köprünün mevcut ve güçlendirilmiş durumlarının yük taşıma kapasitesini ve deformasyon davranışlarını değerlendirmek üzere doğrusal olmayan statik analizler şeklinde gerçekleştirilmiştir. Dinamik etkiler ve modal analizler bu çalışma kapsamında ele alınmamıştır, çünkü odak noktası statik yükler altındaki güçlendirme etkinliğinin incelenmesidir. Yığma yapıların sayısal analizinde, yapıların doğrusal olmayan (non-linear) davranışlarını temsil etmek için Drucker-Prager kriteri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, köprünün sayısal modellemesinde, kemer, yan duvar ve dolgu bileşenlerinin her biri için elasto-plastik davranışını temsil eden Drucker-Prager kriteri uygulanarak, yapının malzeme davranışları ve potansiyel çatlak gelişimi incelenmiştir. Köprülerin güçlendirilmesinde kullanılan FRP kompozit malzemesi için ise Von-Mises kriteri kullanılmıştır.

Drucker-Prager kriteri, çelik gibi malzemelerde yaygın olarak kullanılan Von-Mises kriterine, hidrostatik basınca duyarlılığı artıran bir terimin eklenmesiyle geliştirilmiş ve bu sayede gevrek malzemeler, özellikle yığma yapıların analizlerinde kullanılabilir bir kriter haline gelmiştir. Bu kriter, yığma malzemelerin kırılma ve plastik davranışlarını daha doğru bir şekilde modellemek için kullanılır. Drucker-Prager kriteri, aşağıdaki Denklem 1 ile matematiksel olarak ifade edilmektedir.

$$f(I_1, J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (1)$$

Denklemdeki α ve k pozitif malzeme parametreleri, I_1 : gerilme tansörünün birinci invariantını, J_2 ise deviatorik gerilme tansörünün ikinci invariantını göstermektedir. $\alpha = 0$ olduğunda denklem Von-Mises denklemini vermektedir. Üç boyutlu gerilme durumunda Drucker-Prager kırılma yüzeyi Şekil 4'de gösterilmektedir.



Şekil 4. Drucker-Prager kriteri [1]

Drucker-Prager kriterinin dairesi Mohr-Coulomb kriterine oldukça yakındır. Altıgeninin dışından çizilen daire Mohr-Coulomb olarak düşünülürse, iki yüzey $\theta=60^\circ$, α ve k ile belirlenecek basınç meridyenine uygun olarak Denklem 2 ile ifade edilebilir [1]. Denklemdeki c ve ϕ sırası ile kohezyonu ve içsel sürtünme açısını belirtmektedir.

$$\alpha = \frac{2 \sin \theta}{\sqrt{3}(3 - \sin \theta)} \quad (2)$$

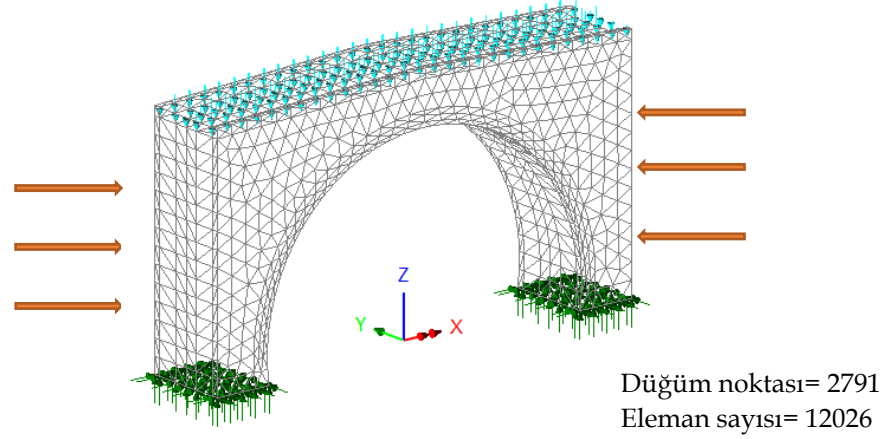
$$k = \frac{6c \cos \theta}{\sqrt{3}(3 - \sin \theta)}$$

Aynı zamanda çekme meridyeninden geçen, $\theta=0^\circ$ ile iç koniyi belirleyen sabitler Denklem 3 ile bulunmaktadır.

$$\alpha = \frac{2 \sin \theta}{\sqrt{3}(3 + \sin \theta)} \quad (3)$$

$$k = \frac{6c \cos \theta}{\sqrt{3}(3 + \sin \theta)}$$

1 Köprü modellerinin sayısal analizinde kemer ve yan duvarlar için Θ ve c parametreleri $c=3$ MPa, $\Theta= 33^\circ$
2 değerleri, dolgu malzemesi için c ve Θ değerleri sırası ile 2.5 MPa ve 25° , kemer ve yan duvarlar için
3 elastisite modülü 3500 MPa, dolgu malzemesi için 500 MPa kullanılmıştır [8]. FRP için elastisite modülü
4 25000 MPa, poisson oranı 0.3 olarak ele alınmıştır [1]. Sonlu elemanlar modellerinde kemer, yan duvar ve
5 dolgu için üç boyutlu katı (solid) elemanlar kullanılmıştır. Şekil 5’de köprü modelin analizinde kullanılan
6 eleman ve düğüm noktası sayıları verilmiştir. Eleman sayısı 12026, düğüm noktası sayısı ise 2791’dir.
7 Analizde modelin x doğrultusunda ötelenmeleri sabitlenmiştir. Yükleme Şekil 5’de gösterildiği gibi köprü
8 üzerinden yayılı yük olarak uygulanmıştır. Mesnetler köprünün ayak kısımlarında mafsallı olarak
9 tanımlanmıştır. Sayısal modelde her düğüm noktasında 3 adet serbestliği bulunan 10 düğüm noktalı 3
10 boyutlu dörtyüzlü (tetrahedral) sonlu elemanlar kullanılmıştır. Analizde kullanılan malzemelere ait lineer
11 ve lineer olmayan özellikler Çizelge 1’de, Analiz sonuçları Şekil 6’da verilmektedir.



Şekil 5. Köprü modellerinin analizde kullanılan eleman ve düğüm noktası sayısı

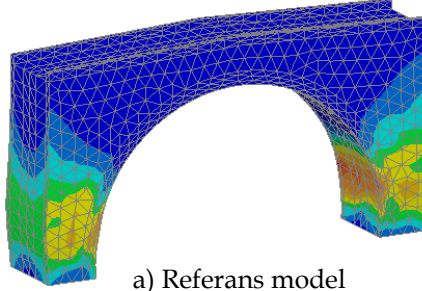
Çizelge 1. Analizde kullanılan malzemelerin özellikleri [1,8]

Malzeme	Özellikler	Değer
Kemer	Elastisite modülü (MPa)	3500
	Poisson oranı	0.18
	Kohezyon (MPa)	3
	İçsel sürtünme açısı	33
	Çekmede kohezyon eğimi	0.0
	Sürtünme geriliminin eğimi	0.0
	Plastik şekil değiştirme	0.001
Yan duvar	Elastisite modülü (MPa)	3000
	Poisson oranı	0.2
	Kohezyon (MPa)	3
	İçsel sürtünme açısı	30
	Çekmede kohezyon eğimi	0.0
	Sürtünme geriliminin eğimi	0.0
	Plastik şekil değiştirme	0.001
Dolgu malzemesi	Elastisite modülü (MPa)	500
	Poisson oranı	0.2
	Kohezyon (MPa)	2.5
	İçsel sürtünme açısı	25
	Çekmede kohezyon eğimi	0.0
	Sürtünme geriliminin eğimi	0.0
	Plastik şekil değiştirme	0.001
FRP	Elastisite modülü (MPa)	25000
	Poisson oranı	0.3
	Tek eksenli akma gerilmesi (MPa)	350

Analysis: Analysis 1
Loadcase: 62:Loadcase 1, Increment 62 Load Factor = 39.98
Results file: koprureferans~Analysis 1.mys
Entity: Plastic strain - Solids
Component: EP1

0.0
2.9852E-3
5.9704E-3
8.95561E-3
0.0119408
0.014926
0.0179112
0.0208964
0.0238816

Maximum 0.0268668 at node 3
Minimum 0.0 at node 21



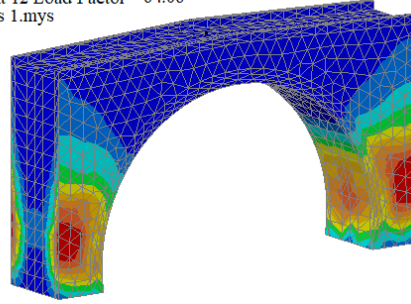
a) Referans model

Deformasyon büyüklüğü: 6 mm
Yük faktörü: 39.98 kN
Plastik şekil değiştirme: 0.0268

Analysis: Analysis 1
Loadcase: 12:Loadcase 1, Increment 12 Load Factor = 64.08
Results file: kopruortaFRP~Analysis 1.mys
Entity: Plastic strain - Solids
Component: EP1

0.0
6.65557E-3
0.0133111
0.0199667
0.0266223
0.0332779
0.0399334
0.046589
0.0532446

Maximum 0.0599002 at node 401
Minimum 0.0 at node 21



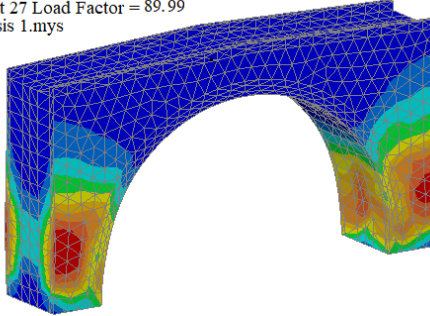
b) Model-1

Deformasyon büyüklüğü: 6 mm
Yük faktörü: 64.08 kN
Plastik şekil değiştirme: 0.0599

Analysis: Analysis 1
Loadcase: 27:Loadcase 1, Increment 27 Load Factor = 89.99
Results file: koprukenarFRP~Analysis 1.mys
Entity: Plastic strain - Solids
Component: EP1

0.0
9.79292E-3
0.0195858
0.0293788
0.0391717
0.0489646
0.0587575
0.0685504
0.0783434

Maximum 0.0881363 at node 323
Minimum 0.0 at node 21



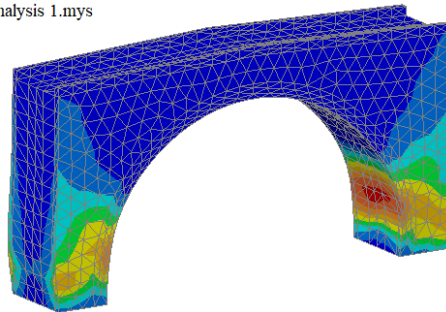
c) Model-2

Deformasyon büyüklüğü: 6 mm
Yük faktörü: 89.99 kN
Plastik şekil değiştirme: 0.0881

Analysis: Analysis 1
Loadcase: 21:Loadcase 1, Increment 21 Load Factor = 75.13
Results file: koprufrpdiskenar~Analysis 1.mys
Entity: Plastic strain - Solids
Component: EP1

0.0
6.95684E-3
0.0139137
0.0208705
0.0278274
0.0347842
0.041741
0.0486979
0.0556547

Maximum 0.0626116 at node 347
Minimum 0.0 at node 971



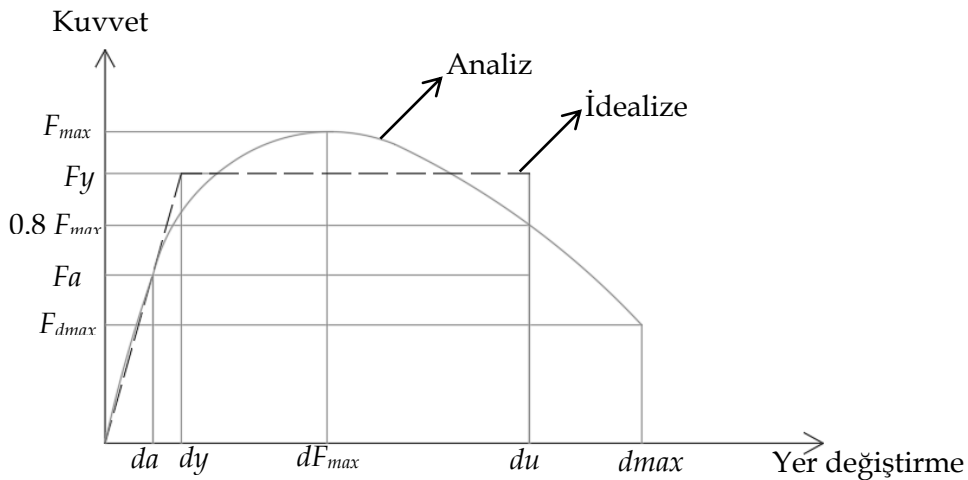
d) Model-3

Deformasyon büyüklüğü: 6 mm
Yük faktörü: 75.13 kN
Plastik şekil değiştirme: 0.0626

Şekil 6. Analiz sonuçları

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, Leylekli Köprüsü örneği üzerinden tarihi taş köprülerin FRP (Fiber Takviyeli Polimer) malzemelerle güçlendirilmesinin yapısal performansa etkisi, sonlu elemanlar yöntemiyle detaylı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, güçlendirme uygulamalarının taşıma kapasitesi ve düşey yer değiştirme üzerindeki etkilerini açık biçimde ortaya koymaktadır (Çizelge 2). Referans model, yalnızca 39.98 kN maksimum yük taşıyabilmiş ve bu yük altında 53.57 mm'lik düşey yer değiştirme göstermiştir (Şekil 1). Bu değerler, referans modelin sistem içinde en zayıf taşıma kapasitesine sahip olduğunu açıkça göstermektedir. FRP ile güçlendirilmiş Model-1, 64.08 kN'a ulaşarak referans modele göre %60.28 daha fazla yük taşımış; aynı zamanda düşey yer değiştirme değeri 30.01 mm'ye düşmüştür. Bu durum, güçlendirme uygulamasının yapısal rijitlik üzerinde de olumlu bir etki yarattığını göstermektedir. Ancak taşıma kapasitesi açısından, Model-1 tüm modeller arasında ikinci en düşük performansı sergilemiştir. En dikkat çekici iyileşme Model-2'de gözlemlenmiştir. Bu model, 89.99 kN'a ulaşarak referans modele göre %125.08 oranında daha fazla yük taşımış, üstelik bu yük altında yalnızca 20.02 mm'lik bir düşey yer değiştirme göstermiştir. Bu değerler, FRP uygulamasının hem taşıma kapasitesi hem de deformasyon kontrolü açısından nedenli etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Model-3 ise 75.13 kN taşıma kapasitesine ulaşmış ve 28.44 mm düşey yer değiştirme sergilemiştir. Referans modele kıyasla yük taşıma kapasitesinde %87.92 oranında artış sağladığı görülmektedir. Düşey yer değiştirme, köprünün tepe noktasından elde edilen değerlerdir. Grafikler, güçlendirme düzeyinin artmasıyla taşıma kapasitesindeki belirgin artışa karşın, düşey deformasyonların anlamlı şekilde azaldığını görsel olarak da desteklemektedir. Deneyde, yük-düşey yer değiştirme grafikleri, [19-20]'de önerilen yöntemle dayalı olarak köprünün yapısal davranışlarını incelemek için idealize edilmiştir. İdealize eğrinin altındaki alan, analiz sonrası köprü için çizilen yük-düşey yer değiştirme grafiğinin altındaki alanla eşitlenerek idealize edilmiş çift doğrusal diyagram oluşturulmuştur. Yük-yer değiştirme eğrisinin idealize edilmiş çift doğrusal diyagramı Şekil 7'de verilmiştir. Köprü modellerinin süneklik faktörleri bu diyagram ile elde edilmiştir. İlk olarak, köprünün süneklik faktörünü hesaplamak için akma yükü ve akma yüküne karşılık gelen yer değiştirme elde edilmiştir. Akma yükü (F_y), maksimum yükün %90'ına düştüğünde belirlenir. F_y 'ye karşılık gelen akma yer değiştirmesi (d_y), grafikten okunur. Köprünün nihai yükü, maksimum yükün %80'ine düştüğündeki değerdir. Bu noktadaki yer değiştirme, nihai yer değiştirmedir (d_u). Süneklik katsayısı μ , nihai yer değiştirmenin akma noktasındaki yer değiştirmeye oranı (d_u/d_y) olarak hesaplanır. Köprü modellerinin süneklik faktörleri Çizelge 2'de verilmiştir. FRP ile güçlendirilmeyen referans modelde süneklik faktörü 0.67 iken, Çizelge 2'de FRP ile güçlendirilen köprü modellerinde süneklik faktörünün arttığı görülmektedir.

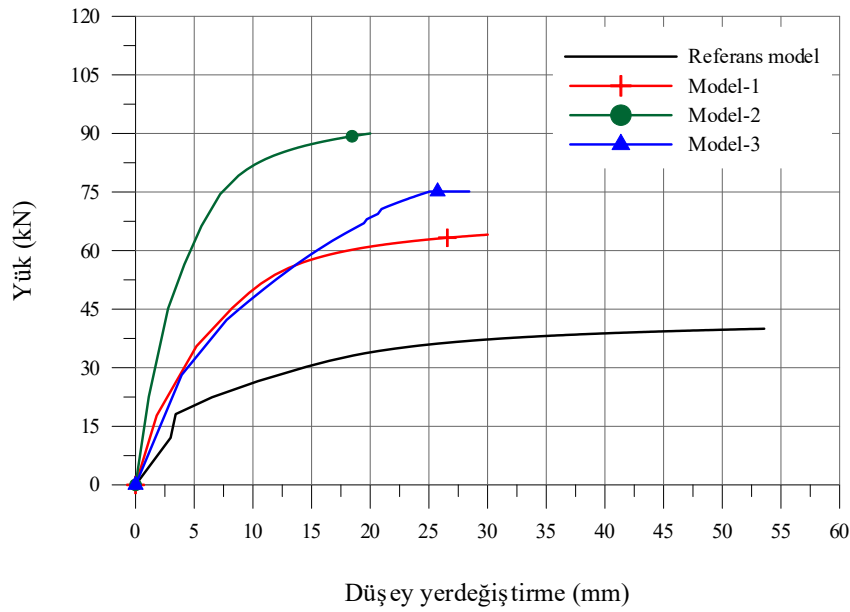


Şekil 7. İdealize edilmiş çift doğrusal diyagram [19-20].

Şekil 8’de de tüm modellerin yük-düşey yer değiştirme grafiği karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Şekil 8 ve Çizelge 2 incelendiği zaman FRP ile güçlendirilen köprü modellerinin, referans modele göre sünekliğini etkili bir şekilde arttırdığı görülmektedir. Maksimum yükü taşıyan Model-2 diğer modellere göre daha sünek bir davranış sergilemiştir. Bunu sırası ile Model-3 ve Model-1 takip etmektedir. Şekil 6’dan da görüleceği gibi FRP kompozit malzemesinin kullanılmasıyla köprünün yapmış olduğu plastik şekil değiştirme miktarı da artmıştır. En fazla plastik şekil değiştirme Model-2’de görülmektedir. Model-2 maksimum yük altındayken plastik şekil değiştirme değeri 0.0881’dir. Bunu Model-3 ve Model-1 takip etmektedir. Model-3’ün ve Model-1’in yapmış oldukları plastik şekil değiştirme değerleri sırası ile 0.0626 ve 0.0599’dur. FRP malzemesi olmadan analizi yapılan referans modelde ise maksimum yük altında iken, plastik şekil değiştirme değeri 0.0268’dir.

Çizelge 2. Analiz sonuçları

Modeller	P_f (kN)	Artış (%)	Düşey yerdeğiştirme (mm)	d_y (mm)	d_u (mm)	μ
Referans model	39.98	0	53.57	24.96	16.65	0.67
Model-1	64.08	60.28	30.01	14.77	10.52	0.71
Model-2	89.99	125.08	20.02	9.67	7.45	0.77
Model-3	75.13	87.92	28.44	20.01	15.02	0.75



Şekil 8. Modellerde ait yük- düşey yerdeğiştirme grafiği

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, Leylekli Köprüsü örnek alınarak, biri referans olmak üzere, üçü farklı FRP (Fiber Takviyeli Polimer) yerleşimlerine sahip toplam dört köprü modelinin yayılı yük altındaki yapısal davranışları sayısal olarak incelenmiştir. Referans modelde herhangi bir güçlendirme yöntemi uygulanmazken, diğer üç modelde kemer yayı ve dolgu bölgelerine çeşitli FRP şeritleri yerleştirilmiştir.

Yapılan analiz sonucunda referans modelde şekil değiştirmelerin, yer değiştirmelerin meydana geldiği bölgeler tespit edilmiştir. Tespit edilen bu bölgelere farklı şekillerde FRP şeritler kullanılarak güçlendirme çalışmaları yapılmıştır. Model-1’de köprü kemerinin tam ortasına 1500 mm genişliğinde tek bir FRP şeridi uygulanmıştır. Model-2’de kemerin her iki kenarına, yanlardan 350 mm boşluk bırakılarak toplam 1150 mm genişliğinde iki FRP şeridi yerleştirilmiştir. Model-3’te ise dolgu bölgesine, kenarlardan 350 mm boşluk bırakılarak iki FRP şeridi uygulanmıştır. Çalışmada elde edilen başlıca bulgular şunlardır:

Güçlendirilmiş tüm modellerin yük taşıma kapasiteleri, güçlendirilmemiş referans modele göre en az yüzde 60.28 oranında artış göstermiştir. Bu artış, FRP uygulamalarının taşıyıcı sistem üzerinde doğrudan olumlu etkisi olduğunu göstermektedir.

Referans modelde özellikle köprü ayaklarında belirgin deformasyonlar gözlenmiştir. Buna karşın güçlendirilmiş modellerde deformasyonlar daha sınırlı kalmış, rijitlik artışı ile birlikte yük daha dengeli dağılmıştır.

Sadece kemer ortasında 1500 mm genişliğinde FRP şeridi ile güçlendirilen Model-1, referans modele göre yüzde 60.28 daha fazla yük taşıyabilmiştir. Ancak deformasyon kontrolü açısından kısmi bir iyileşme sağlamıştır.

Kemerin her iki kenarına şeritlerin yerleştirildiği Model-2, en yüksek performansı göstermiştir. Bu model, Model-1'e göre yüzde 40.43 daha fazla yük taşıyabilmiş, ayrıca maksimum yük altındaki düşey yer değiştirmesi daha düşük seviyelerde kalmıştır. Bu durum, kenar bölgelerden yapılan FRP uygulamasının yalnızca taşıma kapasitesini değil, aynı zamanda yapının sünekliğini de önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır.

Model-3'de referans modele göre %87.92 daha fazla yük taşımıştır. Dolgu bölgesine uygulanan FRP şeritler, deformasyonun bu bölgelerde azalmasını sağlamış; ancak köprü ayaklarında göreceli olarak daha fazla deformasyon olduğu gözlemlenmiştir.

FRP şeritlerle güçlendirilmiş tüm modellerin daha sünek bir davranış sergilediği, düşey yer değiştirmelerin azaldığı, yük kapasitesinin arttığı ve hasarların belirli bölgelerde oluşmasını engelleyerek dağıtıldığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, köprülerin yalnızca kemer ortasından yapılan güçlendirmesi belirli bir katkı sağlamakla birlikte, kemer kenarlarına yapılan çift şeritli FRP uygulamasının çok daha verimli sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışma, tarihi taş köprülerin onarımı ve güçlendirilmesinde FRP malzemelerinin doğru konumlandırılarak uygulanmasının, hem taşıma kapasitesini artırmak hem de deformasyon ve hasar dağılımını kontrol altına almak açısından kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Katkı Beyanı

Şükran Tanrıverdi: Modelleme, Veri Toplaması, Veri analizi, Metodoloji, Makale yazımı, Kontrol.
Tülin Çelik: Literatür taraması, Düzenleme, Makale Yazımı, Kontrol.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makalenin yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

Kaynaklar

- [1] Tanrıverdi S. An experimental and numerical study of the strengthening of masonry brick vaults, Structures. 2023; 47: 800-813.
- [2] Borri A, Castori G, Corradi M. Intrados strengthening of brick masonry arches with composite materials. Composites Part B: Engineering. 2011; 42(5); 1164-1172.
- [3] D'Ambrisi A, Focacci F, Luciano R, Alecci V, De Stefano M. (2015). Carbon-FRCM materials for structural upgrade of masonry arch road bridges. Composites Part B: Engineering. 2015; 75; 355-366.
- [4] Daryadel M, Cunningham L. Optimisation of FRP strengthening systems for masonry arch bridges. Masonry International. 2017; 29(2); 61-72.

- [5] Yanık Y, Türker T, Çoruhlu B. Tarihi taş kemer köprülerde hasar nedenleri ve onarım teknikleri. Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu; 2017; Türkiye.
- [6] Özmen A, Sayın E. Tarihi yığma bir köprünün deprem davranışının değerlendirilmesi, NÖHÜ Müh. Bilim. Derg., 2020;39(2):956-965.
- [7] Simoncello N, Zampieri P, Gonzalez-Libreros J, Perboni S, Pellegrino C. Numerical analysis of an FRP-strengthened masonry arch bridge. *Frontiers in Built Environment*. 2020; 6, 7.
- [8] Sözen Ş, Çavuş M. Tek açıklıklı tarihi taş köprülerde form değişikliğinin köprünün sismik davranışına etkisinin değerlendirilmesi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2020;8:48-59.
- [9] Bayraktar A, Hökelekli E. Seismic performances of different spandrel wall strengthening techniques in masonry arch bridges. *International Journal of Architectural Heritage*. 2021; 15(11); 1722-1740.
- [10] Bahreini V, Pouraminian M, Tabaroei A. Seismic sensitivity analysis of Musa Palas historic masonry arch bridge by Tornado diagram. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. 2022; 7(1); 71.
- [11] Yang J, Wang Y, Zhang Z, Zou Y, Zhou J. Early-age shrinkage characteristic of UHPC in strengthening stone masonry arch: influence of restraint from arch structure. *Structures*. 2023; 58;105465.
- [12] Adsız E, Sayın E, Özmen, A. Yığma kemerli bir köprünün yapay deprem kayıtları altında sismik analizi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi. 2024; 15(3); 677-688.
- [13] Cavuslu M, Ülger T. Enhancing the seismic resilience of the Batıyaz masonry bridge, aftermath of 2023 Kahramanmaraş earthquakes, using iron and FRP clamp-dowel connectors in the arch: Failure tests and numerical modelling. *Engineering Failure Analysis*. 2025; 175, 109544.
- [14] Tarhan İH, Savalle N, Uysal H, da Silva LC, Lourenço PB. Seismic capacity of unstrengthened and FRP strengthened masonry arches: tilting test and nonlinear numerical analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2025; 54(3); 1009-1027.
- [15] Varró R, Török Á, Görög P. Historic stone masonry arch bridges: materials and numerical modelling of failure modes. *Geoheritage*. 2025; 17(2); 40.
- [16] Zampieri P, Piazzon R, Santinon D, Hofer L, Toska K, Faleschini F, Ricci D. Intrados FRCM-strengthening of a masonry bridge: Experimental and analytical investigations, *Engineering Structures*. 2025;323:119215.
- [17] Ural, A. Yığma yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesi.[Doktora tezi]. Trabzon. Karadeniz Teknik Üniversitesi; 2009.
- [18] LUSAS. Finite element analysis software products. United Kingdom: finite element system, FEA Ltd. 2020.
- [19] Tomazevic M. Earthquake-resistant design of masonry buildings. London: Imperial College Press; 1999.
- [20] Allen C, Masia M, Derakhshan H, Griffith M, Dizhur D, Ingham J. What ductility value should be used when assessing unreinforced masonry buildings?. In *Proceedings of the New Zealand Society for Earthquake Engineering 2013 Conference*, New Zealand Society for Earthquake Engineering Inc. (2013) 1-14,