



Araştırma Makalesi / Research Article

Yığma Kemerli Bir Köprü'nün Yapay Deprem Kayıtları Altında Sismik Analizi

Seismic Analysis of a Masonry Arch Bridge under Artificial Earthquake Records

Esra ADSIZ¹, Erkut SAYIN^{2*}, Alper ÖZMEN³¹Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, esraadsiz94@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6781-7056>²Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, esayin@firat.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0266-759X>³İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, alper.ozmen@inonu.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1335-3780>

MAKALE BİLGİLERİ

ÖZ

Makale Geçmişi:

Geliş 26 Mart 2024
Revizyon 13 Eylül 2024
Kabul 23 Eylül 2024
Online 30 Eylül 2024

Anahtar Kelimeler:

Sonlu elemanlar metodu, Tarihi yığma köprüler, Yapay deprem kayıtları, Zaman tanım alanında analiz

Türkiye' de yer alan tarihi yığma köprüler, ülkemizin zengin kültürel mirasının önemli bir parçasını oluşturur. Bu köprüler, derin vadileri, bataklıkları ve büyük sulak alanları aşmak için inşa edilmiştir. Türkiye, tarih boyunca birçok medeniyete ev sahipliği yaptığı için eski medeniyetlerden kalma ve günümüze ulaşan birçok tarihi köprüye sahiptir. Bu tarihi köprülerin gelecek nesillere güvenle aktarılabilmesi için deprem durumunda nasıl tepki vereceklerinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, çeşitli doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, yapay deprem ivme kayıtları kullanılarak, 1779 yılında inşa edilmiş olan Malatya ili Darende ilçesinde bulunan Osmanlı dönemine ait üç açıklıklı tarihi Uzunok Köprüsü incelenmiştir. Köprü, SAP2000 sonlu eleman programı kullanılarak üç boyutlu olarak makro modelleme yöntemiyle modellenmiştir. Köprü'nün deprem kuvvetleri altında tepkilerini belirlemek amacıyla, 11 adet yapay deprem ivme kaydı kullanılmıştır. Analizler sonucunda, köprüde ortaya çıkan maksimum yer değiştirmeler ve gerilme değerleri elde edilmiş ve köprü'nün deprem davranışı değerlendirilmiştir.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received 26 March 2024
Received in revised form 13 September 2024
Accepted 23 September 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

Finite element method, Historical masonry bridges, Artificial earthquake records, Time history analysis

Historical masonry bridges in Turkey are an important part of our country's rich cultural heritage. These bridges were built to cross deep valleys, swamps, and large wetlands. Turkey has many historical bridges dating back to ancient civilizations, as it has been home to many civilizations throughout history. In order to safely transfer these historical bridges to future generations, it is necessary to accurately assess how they will respond in the event of an earthquake. For this purpose, various linear and nonlinear analysis methods are used. In this study, the three-span historical Uzunok Bridge from the Ottoman period located in the Darende district of Malatya, which was built in 1779, was investigated using artificial earthquake acceleration records. The bridge was modelled in three dimensions using the macro modelling method with the SAP2000 finite element program. Eleven artificial earthquake acceleration records were used to determine the bridge's response under seismic forces. As a result of the analyses, the maximum displacements and stress values that occurred in the bridge were obtained, and the bridge's seismic behavior was evaluated.

Doi: 10.24012/dumf.1458709

* Sorumlu Yazar

Giriş

Tarihi yapılar, bir topluluğun kimliğini şekillendiren önemli unsurlardır. Bu yapılar, farklı dönemlerin izlerini taşıdıkları için geçmişe ışık tutar ve önemli bilgiler sunar. Geçmişte, şu anda yaşadığımız topraklarda birçok medeniyet varlığını sürdürdüğü için tarihi yapılar, ülkemiz için de büyük bir öneme sahiptir. Bu yapılar, kültürel mirasımızın temel taşlarını oluştururlar ve geçmiş dönemlerin tarihini yansıtır. Ayrıca bu yapılar, geçmişteki toplumların yaşam koşulları, kullanılan malzemeler ve bilimsel ilerlemeler hakkında önemli bilgiler sunarlar. Tarihi yapılar üzerinde yapılan araştırmalar, bu yapıların hasar alma nedenlerini belirlememize ve gelecekteki koruma önlemlerini geliştirmemize yardımcı olur. Bu nedenle, tarihi yapıların korunması ve onların sunduğu tarihsel ve kültürel değerlerin sürdürülmesi büyük bir önem taşır. Tarihi yapıların önemli bir kısmını oluşturan yapı türlerinden biri de köprülerdir. Köprü, dere, ırmak ve yüksek vadilerin üzerinden geçmek için inşa edilen, ahşap, taş, kâgir veya demir gibi malzemelerden oluşan ayaklar ve kemerlerle desteklenen bir yol olarak tanımlanabilir. Köprüler, teknik ilerlemeler ve estetik kaygıların artmasıyla zaman içinde bugünkü görünümünü almışlardır. Ülkemiz birçok farklı medeniyetin hüküm sürdüğü topraklar olduğu için tarihi köprülerin sayısı oldukça fazladır. Bu tarihi köprülerin taşıyıcı temel ögesi genellikle kemerlerdir ve adını bu kemer yapısından almışlardır. Köprülerin tasarımında kullanılan kemer yapısı, büyük açıklıkları geçmek için basınç gücünü etkili bir şekilde dağıtma yeteneği nedeniyle tercih edilir. Günümüze kadar gelmeyi başarmış olan yığma köprüler, deprem, sel vb. doğal afetler neticesinde hasar görebilmekte ve göçmektedir. Tarihi yığma kemer köprülerin statik ve dinamik kuvvetlere karşı sayısal analizleri, çeşitli yazılım ve programlar aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Bu analizler, köprülerin dayanıklılığını ve güvenliğini değerlendirmek, potansiyel hasarları tespit etmek ve değerlendirmek için önemlidir. Statik analizler, köprünün sabit yükler altında nasıl davrandığını değerlendirir. Bu tür analizler, köprünün taşıma kapasitesini, dayanıklılığını ve şekil değişimini inceler. Dinamik analizler ise köprüye etki eden titreşimler, rüzgâr veya deprem gibi dinamik yükler altındaki davranışını incelemek için kullanılır. Bu analizler, köprünün dinamik yükler altında nasıl tepki vereceğini değerlendirmek için önemlidir. Tarihi yığma köprülerin sismik yükler altında analiz edildiği birçok çalışma yapılmıştır. Özmen ve Sayın [1] tarafından yapılan çalışmada, Kütahya ili Gediz ilçesinde yer alan tek açıklıklı Debboy Köprüsü, sonlu elemanlar metodu kullanılarak ANSYS programında modellenmiştir. Bu modelleme işlemi sonrasında, 2011 Simav ve 2002 Sultandağı deprem ivme kayıtları köprüye uygulanmış ve bu yığma kemer köprünün doğrusal dinamik analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, köprünün ilk hasar göreceği bölgeler incelenen deprem ivme kayıtları altında değerlendirilmiştir. Sakcalı ve diğ. [2] yaptıkları çalışmada, tarihi kâgir köprülerin depreme karşı davranışını incelemeyi amaçlamışlardır. Çalışma kapsamında, Irgandı Köprüsü'nün deprem davranışı analiz edilmiş ve hasar potansiyeli değerlendirilmiştir. Karalar ve Yeşil [3] yaptıkları çalışmada, tek açıklıklı yığma kemer köprünün farklı yakın fay depremleri altındaki statik ve dinamik davranışını karşılaştırmışlardır. Çalışma için Karabük ilinde bulunan tarihi Tokatlı Köprüsü örnek olarak seçilmiştir. Tarihi yığma köprünün yakın fay depremleri altındaki davranışını incelemek için öncelikle bir sonlu eleman modeli

oluşturulmuş ve ANSYS programı ile çeşitli yakın fay depremleri altında analiz edilmiştir. Milani ve Lourenço [4] taş köprülerin eksantrik yükler altındaki davranışını, üç boyutlu bir sayısal modelleme yöntemi kullanarak incelenmişlerdir. Bu yöntem, köprülerin gerçek üç boyutlu geometrisini ve dolgunun etkisini dikkate almaktadır. Makalede, iki gerçek ölçekli taş köprü incelenmiştir. Birisi, İngiltere'de Bolton Enstitüsü'nde deneysel olarak test edilmiş eğik bir köprüdür. Diğeri ise, beş dairesel kemerden oluşan düz bir köprüdür. Çalışma, üç boyutlu yaklaşımın, 2D yaklaşıma göre daha doğru sonuçlar ürettiğini göstermiştir. Şeker ve Özkaynak [5] Amasya ilinde bulunan Hundi Hatun Köprüsü'nün statik ve dinamik analizlerini yapmışlardır. Çalışma kapsamında, köprünün üç boyutlu modeli oluşturulmuş ve ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Doğrusal malzeme modeli köprünün güvenli olduğunu gösterirken, doğrusal olmayan malzeme modeli özellikle köprünün ayaklarında ve tepe noktalarında hasar meydana gelebileceğini ortaya koymuştur. Bahreini ve diğ. [6] yaptıkları çalışmada Musa Palas Kemer Köprüsü'nün sismik duyarlılık analizini gerçekleştirerek malzeme belirsizliklerinin yapının sismik davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda hem köprü malzemelerinin elastik modülü hem de yoğunluğunun yapısal tepkiler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmaların dışında tarihi yapıların yapısal analizleri konusunda yapılmış çeşitli çalışmalar mevcuttur [7-10].

Yığma kemerli köprülerin sismik davranışlarının incelendiği çalışmalar incelendiğinde, zaman tanım alanında yapılan analizlerde mevcut deprem kayıtlarının seçilerek kullanıldığı görülmektedir. Yapay deprem ivme kayıtlarının Türk Deprem Yönetmeliği (2018) (TBDY, 2018)'ne göre tasarım spektrumuna uyumlu olarak ölçeklendirilerek kullanıldığı çalışmaları sınırlı olduğu görülmüştür.

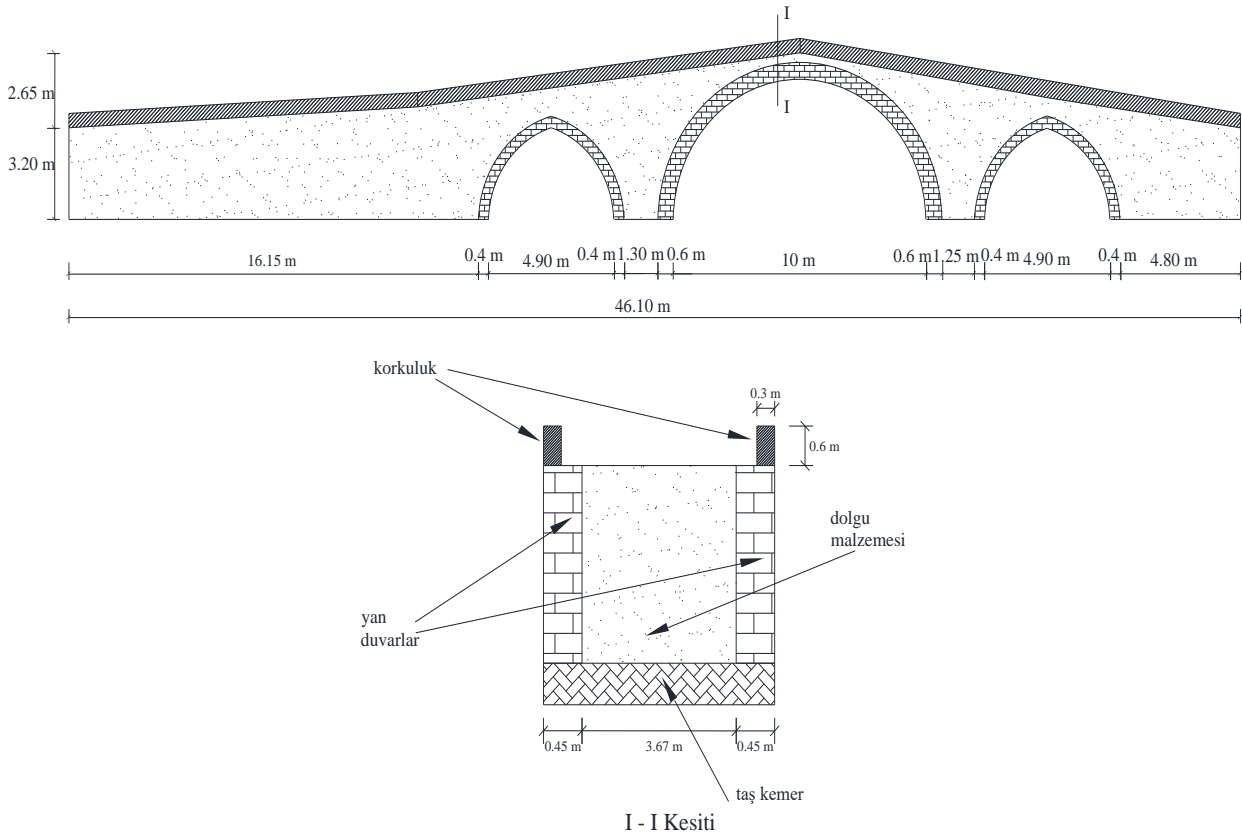
Bu çalışma, tarihi öneme sahip yığma kemerli bir köprünün sismik davranışını zaman tanım alanında analiz etmeyi amaçlamaktadır. Analiz için, Türk Deprem Yönetmeliği (2018) tasarım spektrumuna uygun yapay deprem ivme kayıtları kullanılmış ve köprünün dinamik analizleri yapılmıştır. Zaman tanım alanında analizler için SAP2000 sonlu elemanlar programı kullanılmış olup, köprüde meydana gelen gerilme yığılmaları ve yer değiştirmeleri incelenmiştir. Sonuç olarak köprünün olası bir depremde hasar alma riski olan bölgeleri yapılan analizler ile değerlendirilmiştir.

Tarihi Uzunok Köprüsü

Bu çalışma kapsamında incelenecek olan tarihi yığma kemerli Uzunok köprüsü, Tohma çayı üzerinde inşa edilmiş olup Malatya ili Darende ilçesinde yer almaktadır. Köprü, Osmanlı İmparatorluğu dönemine ait olup 1779 yılında inşa edilmiştir. Köprünün uzunluğu 46 m, genişliği ise 3.67 m olup toplamda üç kemerden oluşmaktadır. Orta kemerin yarıçapı 5 m iken, iki yan kemerin yarıçapları ise 3.4 m'dir. Yan taşıyıcı duvarların kalınlığı 0.45 m, köprü korkuluğunun yüksekliği ise 0.60 m'dir. Ayrıca, köprünün orta kemeri 0.60 m, yan kemerler ise 0.45 m kalınlığa sahiptir. Köprünün korunması ve gelecek nesillere aktarılması amacıyla, 2007-2008 yılları arasında Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından restore edilmiştir. Uzunok köprüsünün görünümü Şekil 1' de, köprüye ait geometrik özellikler ise Şekil 2' de verilmiştir.



Şekil 1. Uzunok köprüsünün görünümü



Şekil 2. Uzunok köprüsüne ait geometrik özellikler

Köprü'nün Sonlu Elemanlar Modeli ve Malzeme Özellikleri

Yığma yapılar, malzeme özellikleri ve mekanik özellikleri açısından diğer yapı gruplarından farklılık göstermektedirler. Bilgisayar teknolojisinin ilerlemesi, yığma yapıların analizinde farklı yöntemlerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Yığma yapılarda kullanılan malzemelerin çeşitli karakteristiklere sahip olmaları, bu malzemelerin farklı şekillerde davranmasına neden olur, bu da sonlu eleman türlerinin çeşitlenmesine yol açar. Malzeme ve harcın tek bir

eleman olarak modellenmesi veya ayrı elemanlar olarak ele alınması, farklı modelleme yaklaşımlarını gerektirir. Yapı içindeki tüm koşullar modelleme aşamasında ifade edilemez. Bu nedenle, modelleme sürecinde bazı varsayımların yapılması zorunlu hale gelir. Yığma yapıların sayısal analizlerinde, ele alınan yapının büyüklüğüne bağlı olarak üç farklı modelleme tekniği sıklıkla kullanılmaktadır. Bu teknikler; detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme olarak adlandırılır [11-12].

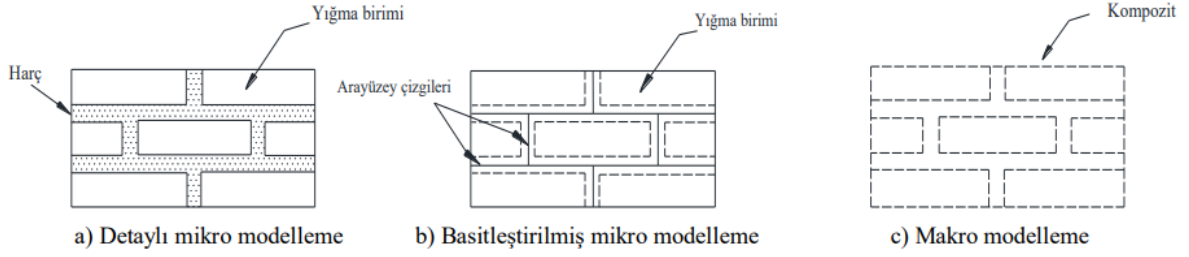
Detaylı Mikro Modelleme: Bu modelleme tekniğinde, çözüm süresi genellikle uzun olur ve bu nedenle özellikle küçük

yapılar veya belirli bir bölümün analizi için daha uygundur. Bu yaklaşımda, yığma elemanlarının detaylı olarak modellenmesi gerekmektedir.

Basitleştirilmiş Mikro Modelleme: Burada, yığma elemanlarının boyutları harç tabakasının kalınlığının yarısı kadar genişletilir ve harç tabakası ihmal edilir. Yığma elemanları arasındaki sınırlar ara yüzey çizgileriyle belirlenir.

Makro Modelleme: Bu modelleme, taş, tuğla gibi yapı malzemeleri ile harç arasında ayırım yapmadan, yapı elemanını kompozit bir malzeme olarak kabul eden ve bu

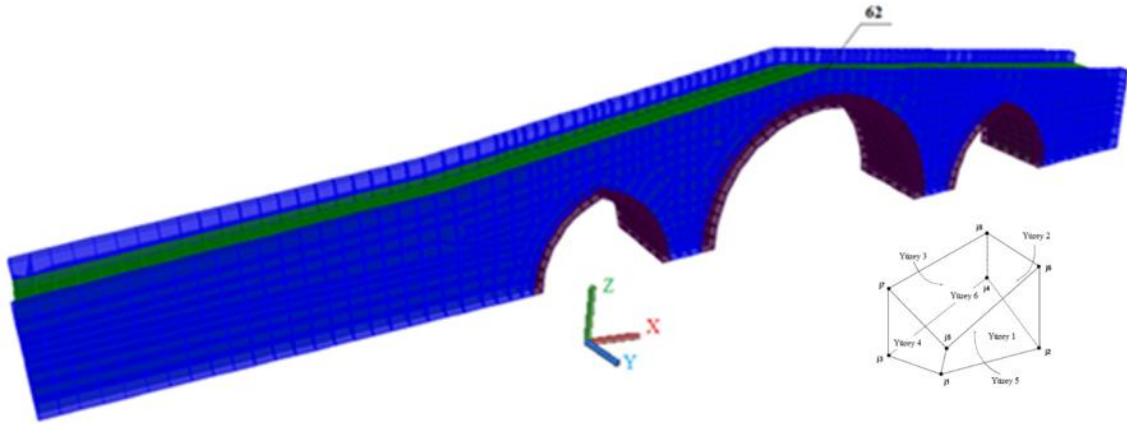
malzemelerin ortak özelliklerini yansıtan bir modelleme yöntemidir. Bu yaklaşım, büyük yapı sistemlerinin analizinde bilgisayar çözüm süresini önemli ölçüde azalttığı için tercih edilir. Bu modelleme tekniklerine ait görseller Şekil 3’de verilmiştir. Bu teknikler için birinin, bir diğerinden üstün olduğunu söylemek uygun değildir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde tarihi yığma yapıların modellenmesinde genellikle makro modelleme yaklaşımının tercih edildiği görülmektedir [13-18].



Şekil 3. Tarihi yapıların modellenmesinde kullanılan teknikler [11-12]

Tarihi Uzunok köprüsü'nün sonlu elemanlar modeli, SAP2000 sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak üç boyutlu olarak oluşturulmuştur. Bu modellemede, tarihi yapıların modellenmesinde yaygın olarak kullanılan makro modelleme yöntemi oluşturmuştur. Köprü modelinin üç boyutlu sonlu elemanlar ağında toplam 5403 düğüm noktası ve 3882 katı eleman vardır. Analizlerde kullanılan katı elemanlar (solid) sekiz düğüm noktalıdır ve her bir düğüm noktasında üç serbestlik derecesine sahiptir. Üç boyutlu modelde, Uzunok köprüsü'nün kemer, dolgu ve yan duvarları farklı malzeme özelliklerine sahiptir. Ayrıca, köprü'nün zeminle temas eden bölgeleri ankastre mesnetlerle bağlanmıştır.

Uzunok Köprüsü'nün tepki büyüklüklerinin incelendiği düğüm noktası, solid eleman ve sonlu elemanlar modeli Şekil 4 'te gösterilmektedir. Tarihi yapıların malzeme özelliklerini belirlemek oldukça zorlu bir süreçtir ve ayrıca bu özellikleri tespit etmek amacıyla yapılan deneyler, tarihi yapıların zarar görmesine neden olabilir. Bu nedenle, yığma köprülerin analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri, literatürde daha önce tarihi köprülerle ilgili yapılmış çalışmaların bulguları temel alınarak seçilmektedir. Uzunok Köprüsü'nün malzeme özellikleri ise Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 4. Köprü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli, solid eleman ve 62 nolu düğüm noktası

Tablo 1. Sonlu eleman modeli malzeme özellikleri [19-21]

Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)
Kemer	2500	0.2	2300
Yan Duvarlar	2000	0.2	2100
Dolgu	1200	0.2	1500

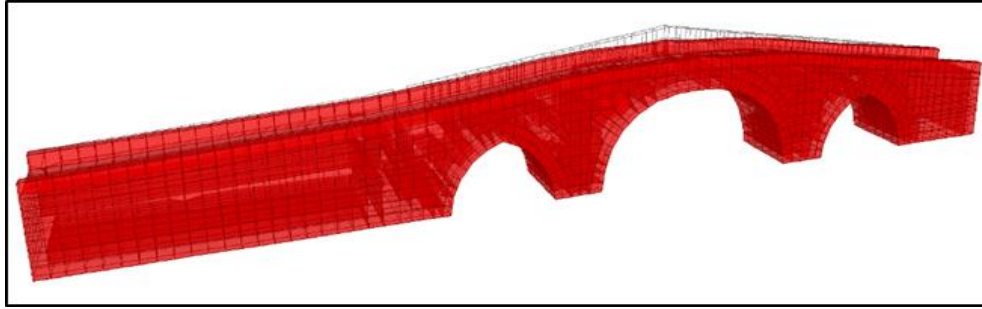
Sayısal Analizler

Köprünün davranışını detaylı olarak ortaya koymak amacıyla sonlu elemanlar modeli üzerinde, köprünün statik analizi, modal analizi ve zaman tanım alanında dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizler için, TBDY- 2018'e göre oluşturulmuş on bir farklı yapay deprem ivme kaydı kullanılmıştır

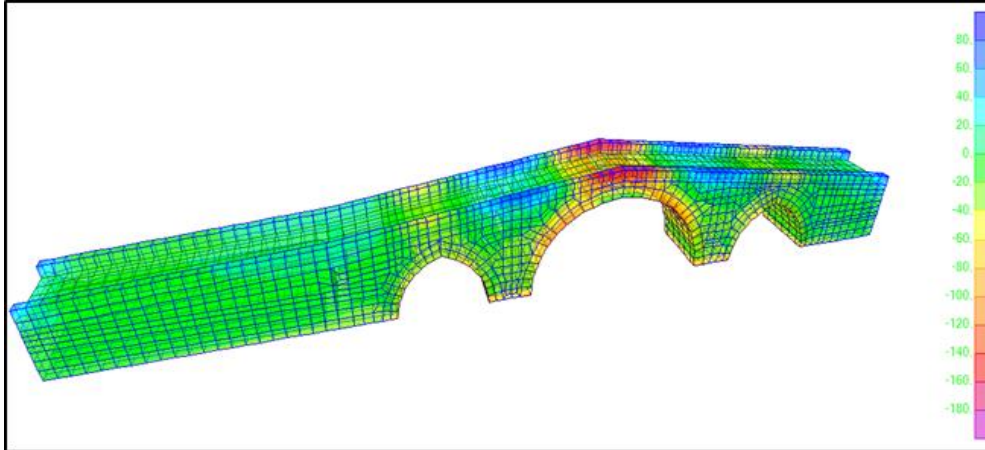
Uzunok köprüsünün statik analizi

Uzunok Köprüsü için hazırlanan üç boyutlu sonlu eleman modeli kullanılarak, Uzunok köprüsü, kendi ağırlığı altında statik analize tabi tutulmuş ve köprünün şekil değiştirmiş hali Şekil 5a 'da gösterilmiştir.

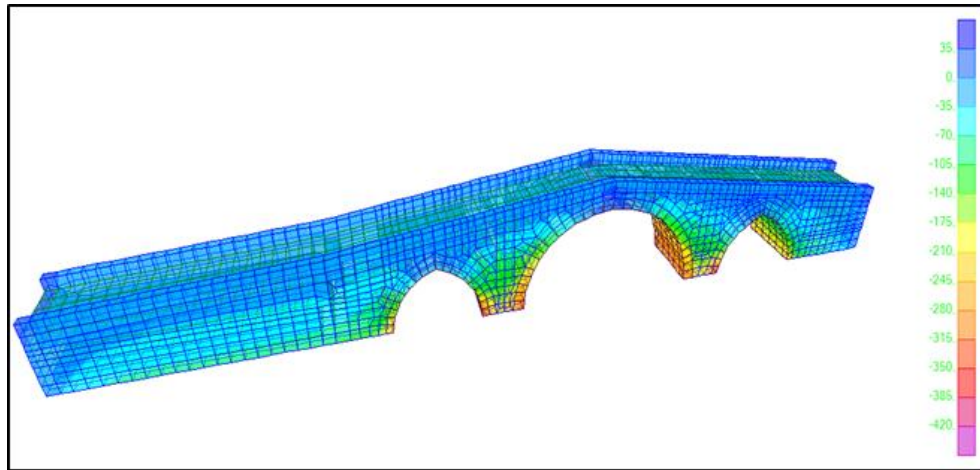
Köprü üzerinde meydana gelen en büyük yer değiştirme, ana kemerin ortasında düşey yönde gerçekleşmiştir. Bu yer değiştirme, tepki büyüklüklerinin incelendiği düğüm noktası (Düğüm 62) üzerinde z ekseninde 0.87 mm olarak belirlenmiştir. Statik analiz sonuçlarına göre, maksimum çekme gerilmeleri dağılımı incelendiğinde, bu gerilmelerin özellikle köprünün kenar yamaçlarına yakın bölgelerinde yoğunlaştığı görülmüştür (Şekil 5b). Bu bölgelerde en büyük gerilme değeri 83.88 kPa olarak tespit edilmiştir. Statik analizde maksimum basınç gerilmelerinin ise köprü kemerinin zemin ile birleştiği bölgelerde meydana geldiği gözlemlenmiştir (Şekil 5c). En büyük basınç gerilme değeri ise 433.24 kPa olarak hesaplanmıştır.



a)



b)



c)

Şekil 5. Uzunok Köprüsü'nün statik analizinden elde edilen sonuçlar (kPa)

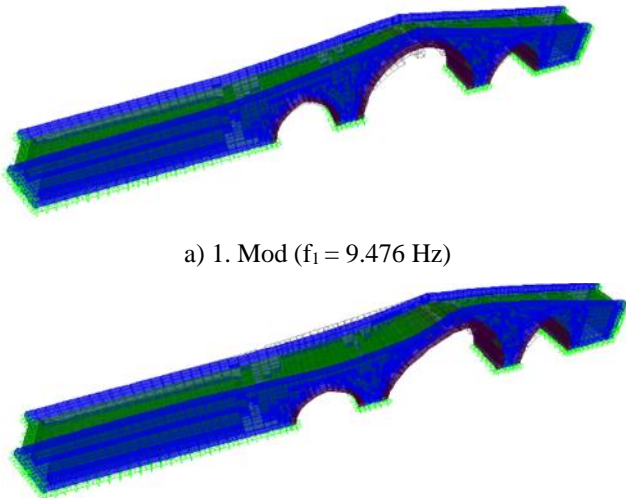
Uzunok köprüsünün modal analizi

Köprü'nün dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla, köprü'nün analitik modal analizi yapılmıştır. Modal analiz ile köprü'nün serbest titreşim periyotları, kütleli katılım oranları ve mod biçimleri elde edilmiştir. Bu analiz sonucunda 100 mod için elde edilen kütleli katılım oranlarının toplamı, köprü'nün toplam kütle'sinin %90' ından fazlasını kapsamaktadır. Tablo 2'de modal analiz sonucu elde edilen ilk 10 mod gösterilmektedir.

Tablo 2. Köprü'nün serbest titreşim periyotları ve kütleli katılım oranları

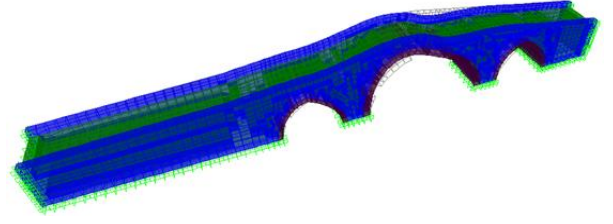
Modlar	Periyot (s)	Toplam Kütle Katılım Oranı (x eksen)	Toplam Kütle Katılım Oranı (y eksen)
1	0.105519	2.619E-09	0.2664
2	0.06951	2.215E-08	0.26983
3	0.058562	0.41461	0.26983
4	0.056466	0.41461	0.48019
5	0.050665	0.41463	0.48019
6	0.043817	0.41463	0.48635
7	0.03826	0.41915	0.49782
8	0.038227	0.4224	0.51418
9	0.036329	0.4224	0.64927
10	0.033948	0.56952	0.64928

Uzunok köprü'sünün, modal analizi sonucunda, köprü'nün kütleli olarak en etkili serbest titreşim hareketlerine katılan modların, birinci ve üçüncü modlar olduğu belirlenmiştir. Mod 1, kütle'nin y doğrultusunda yer değiştirme yaptığını gösterirken, mod 3 ise x eksen yönünde yer değiştirme hareketini göstermektedir. 1. mod da kütleli katılım oranı %27 iken, 3. mod da, kütleli katılım oranı yaklaşık olarak %41 olarak elde edilmiştir. 1. ve 3. modlar için hesaplanan serbest titreşim periyotları sırasıyla 0.105519 saniye ve 0.058562 saniye olarak elde edilmiştir. Uzunok Köprü'sü'nün ilk 3 doğal titreşim modu ve frekansları, Şekil 6' da görsel olarak sunulmuştur.



a) 1. Mod ($f_1 = 9.476$ Hz)

b) 2. Mod ($f_2 = 14.386$ Hz)

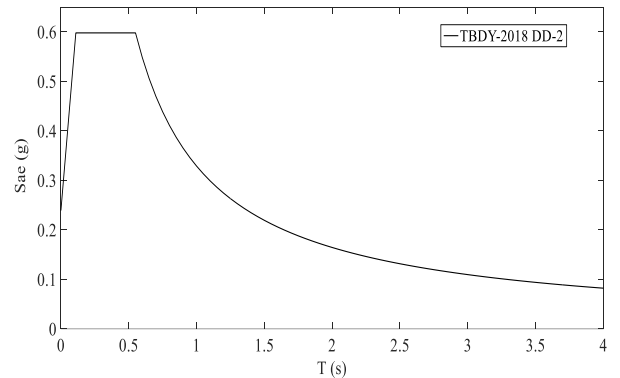


c) 3. Mod ($f_3 = 17.076$ Hz)

Şekil 6. Köprü'nün modal analiz sonuçları

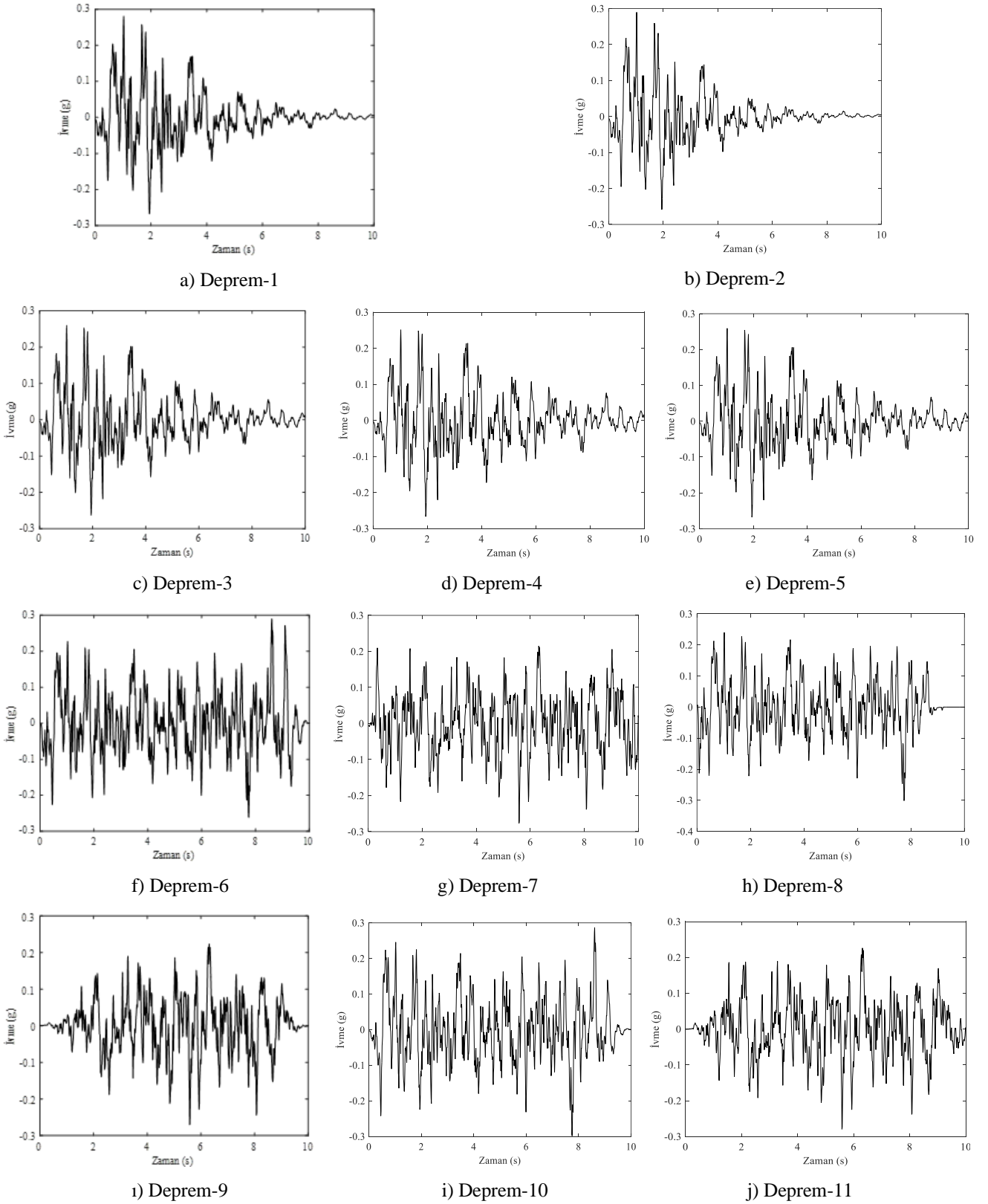
Uzunok köprü'sünün dinamik analizi

Köprü'nün zaman tanım alanında gerçekleştirilen analizleri için 11 farklı yapay deprem ivme kaydı kullanılmış ve bu kayıtların süreleri 10 saniye olarak belirlenmiştir. Deprem ivme kayıtları SeismoArtif (2021) [22] programı kullanılarak üretilmiştir. Analizler sırasında bu yapay depremler, köprü'nün suyun akış doğrultusu (y doğrultusu) yönünde etki ettirilmiştir. Köprü'nün bulunduğu konum (yerel zemin sınıfı: ZD) dikkate alınarak, tüm dinamik analizlerde kullanılan deprem ivmeleri, deprem yer hareketi düzeyi DD-2'ye göre (50 yılda aşılma olasılığı %10, tekrarlanma periyodu 475 yıl) SeismoArtif programı ile ölçeklendirilmiştir. Ölçeklendirme işlemi TBDY-2018 tasarım spektrumuna uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 7). Analizlerde kullanılan ivme kayıtları Şekil 8' de sunulmuştur. Lineer dinamik analizler sırasında, köprü temel ortamı rijit olarak dikkate alınmıştır. Literatür incelendiğinde köprü temel ortamının rijit olarak sunulduğu çok sayıda çalışma mevcuttur [9-10, 13, 17-20, 24-25]. Dinamik analizler için HHT- α (Hilber-Hughes-Taylor) algoritması kullanılmıştır. Ayrıca, sönüm tipinin Rayleigh tipi bir sönüm olduğu varsayılmıştır. Analizlerde sönüm oranının (ξ) %5 olduğu kabul edilerek, rijitlik (α) ve kütle (β) orantılı sönüm katsayıları hesaplanmıştır [23-24]. Bu katsayılar, Denklem 1 yardımıyla elde edilmiştir. Denklem 1'de ω_i , ω_j ifadeleri sırasıyla sistemin i inci ve j inci moduna ait doğal titreşim frekanslarını göstermektedir. Yapılan dinamik analizlerinde, yapının kendi ağırlığı, yapay deprem ivmeleri ile birlikte dikkate alınmıştır. Bu çalışma kapsamında, zamana bağlı olarak değişen gerilmelerin en büyük değerleri (Envelop max, min) sunulmuştur.



Şekil 7. Tasarım spektrumu

$$\alpha = \frac{2\xi\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad \beta = \frac{2\xi}{\omega_i + \omega_j} \quad (1)$$



Şekil 8. Yapay deprem ivme grafikleri

Köprü üzerine uygulanan 11 adet yapay deprem ivme kaydı sonucunda 62 nolu düğüm noktasında ortaya çıkan maksimum

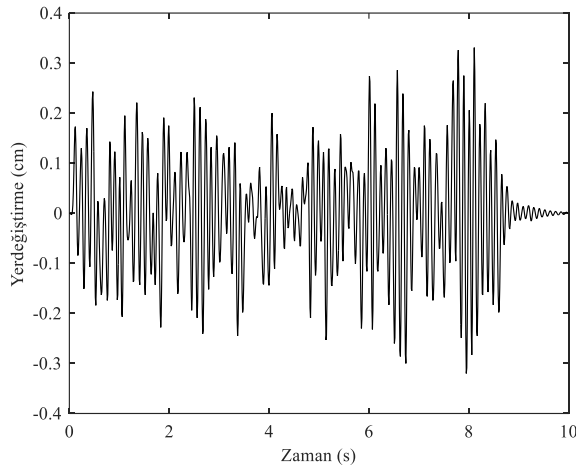
yer değiştirmeler ile köprüde oluşan maksimum ve minimum gerilmeler, Tablo 3' de sunulmuştur.

Tablo 3. Zaman tanım alanında analizlerden elde edilen maksimum yer değiştirme ve gerilmeler

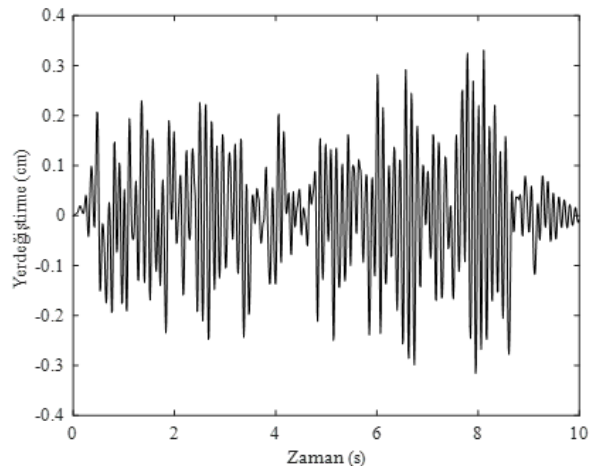
Deprem İvme Kayıtları	62 nolu düğüm noktası için yer değiştirme (cm)	Maksimum Çekme Gerilmesi (kPa)	Maksimum Basınç Gerilmesi (kPa)	Maksimum Kayma Gerilmesi (kPa)	Minimum Kayma Gerilmesi (kPa)
Deprem-1	0.280	541.327	1402.839	309.414	280.213
Deprem-2	0.286	566.394	1421.129	314.012	276.821
Deprem-3	0.269	484.097	1350.033	314.012	276.821
Deprem-4	0.268	466.145	1333.326	287.816	276.821
Deprem-5	0.270	473.869	1341.058	293.166	276.821
Deprem-6	0.330	623.723	1490.746	312.886	320.702
Deprem-7	0.270	464.502	1330.261	289.038	268.928
Deprem-8	0.331	598.572	1445.908	329.314	324.108
Deprem-9	0.264	453.775	1319.560	285.897	257.519
Deprem-10	0.331	596.240	1463.279	329.322	319.828
Deprem-11	0.270	465.962	1331.718	289.443	270.663

Tarihi Uzunok köprüsünün zaman tanım alanında yapılan dinamik analizleri sonucunda y doğrultusunda (suyun akış doğrultusunda) 62 nolu düğüm noktası için bulunan mutlak maksimum yer değiştirme değeri 0.331 cm olup bu değer Deprem-8 ve 10 için bulunmuştur. Deprem-8 ivme kaydı ile gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki dinamik analizler sonucunda, köprü modeli üzerinde işaretlenmiş 62 nolu düğüm noktası için nehir akışı (y doğrultusunda)

doğrultusunda elde edilen yer değiştirme grafiği Şekil 9a' da sunulmuştur. Deprem-10 ivme kaydı ile gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki dinamik analizler sonucunda, köprü modeli üzerinde işaretlenmiş 62 nolu düğüm noktası için suyun akış doğrultusunda elde edilen yer değiştirme grafiği ise Şekil 9b' de verilmiştir.



a) Deprem-8



b) Deprem-10

Şekil 9. 62 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafikleri

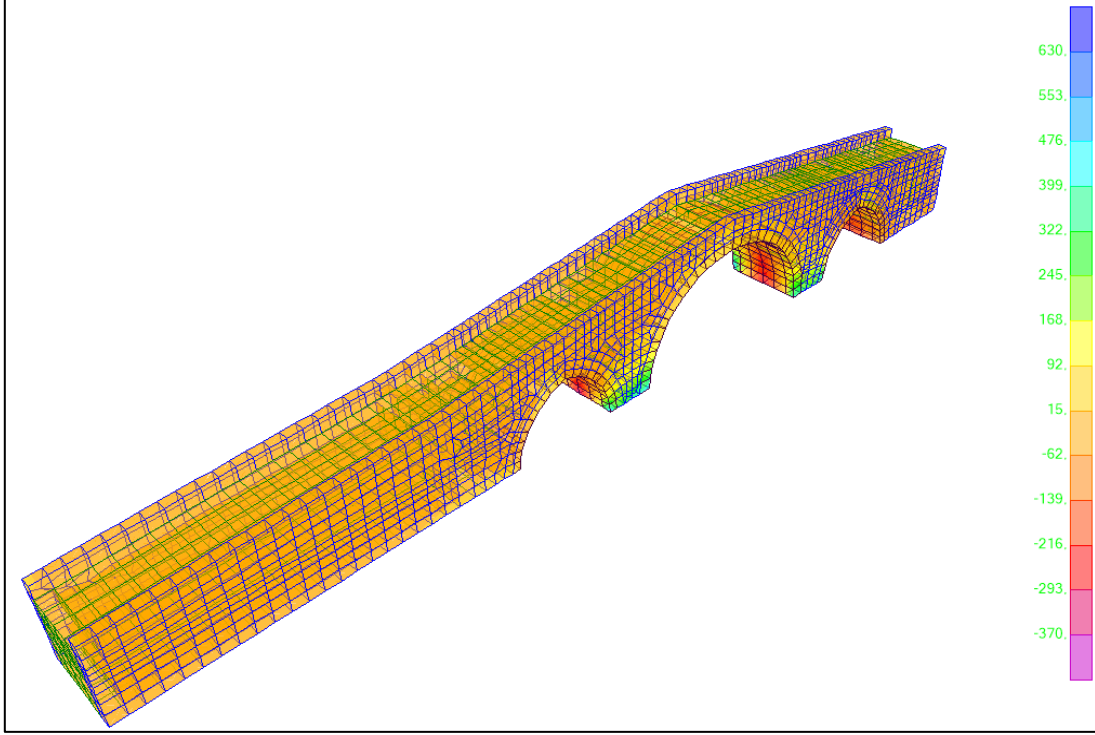
Köprüde meydana basınç ve çekme gerilmelerinin maksimum değerleri Deprem-6 ivme kaydı için elde edilmiştir. Deprem-6 ivme kaydı uygulanarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu Envelope max. için bulunan maksimum çekme gerilme diyagramı ise Şekil 10a' da sunulmuştur. Analizlerin sonuçlarına göre, Deprem-6 ivme kaydı kullanıldığında, maksimum çekme gerilmesi köprü üzerinde 623.723 kPa olarak belirlenmiştir. Bu gerilmelerin yoğunlaştığı bölgeler, köprü'nün yan duvarlarının zeminle birleştiği kısımlardır. Bu sonuçlar, köprü'nün bu bölgelerindeki gerilmenin yoğun olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre, Envelope min. için maksimum basınç gerilme diyagramı ise Şekil 10b' de sunulmuştur. Deprem-6 ivme kaydı kullanıldığında maksimum basınç gerilmesi -1490.746 kPa olarak hesaplanmıştır. Bu en büyük gerilme değerleri, köprü'nün

yan duvarlarının zeminle birleştiği bölgelerde gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, köprü'nün bu bölgelerinde basınç gerilmelerinin yoğun olduğunu göstermektedir.

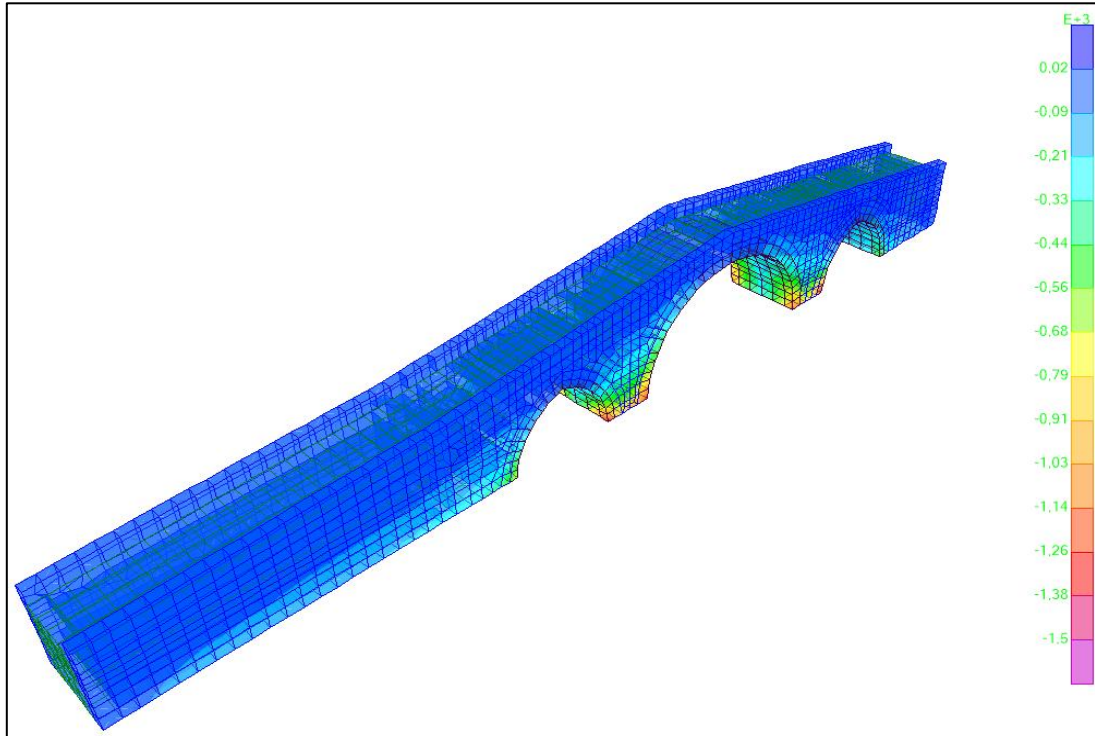
Maksimum ve minimum kayma gerilme değerleri ise Deprem-8 ivme kaydından elde edilmiştir. Deprem-8 ivme kaydı dikkate alınarak yapılan zaman tanım alanındaki analizlerde, Envelope max. için elde edilen maksimum kayma gerilme diyagramı Şekil 11a' da sunulmuştur. Bu analizler sonucunda maksimum kayma gerilmesi değeri 329.314 kPa olarak bulunmuştur. Maksimum kayma gerilmeleri özellikle büyük kemerin karın bölgesinde yoğunlaşmıştır. Ayrıca, Envelope min. için elde edilen minimum kayma gerilme diyagramı da Şekil 11b' de gösterilmiştir.

Analizler sonucunda elde edilen minimum kayma gerilmesi değeri ise -324.108 kPa olarak tespit edilmiştir. Benzer şekilde Minimum kayma gerilmeleri de büyük kemerin karın bölgesinde yoğunlaşmıştır.

Bu sonuçlar, köprünün bu bölgelerindeki kayma gerilmelerinin yüksek olduğunu göstermektedir.

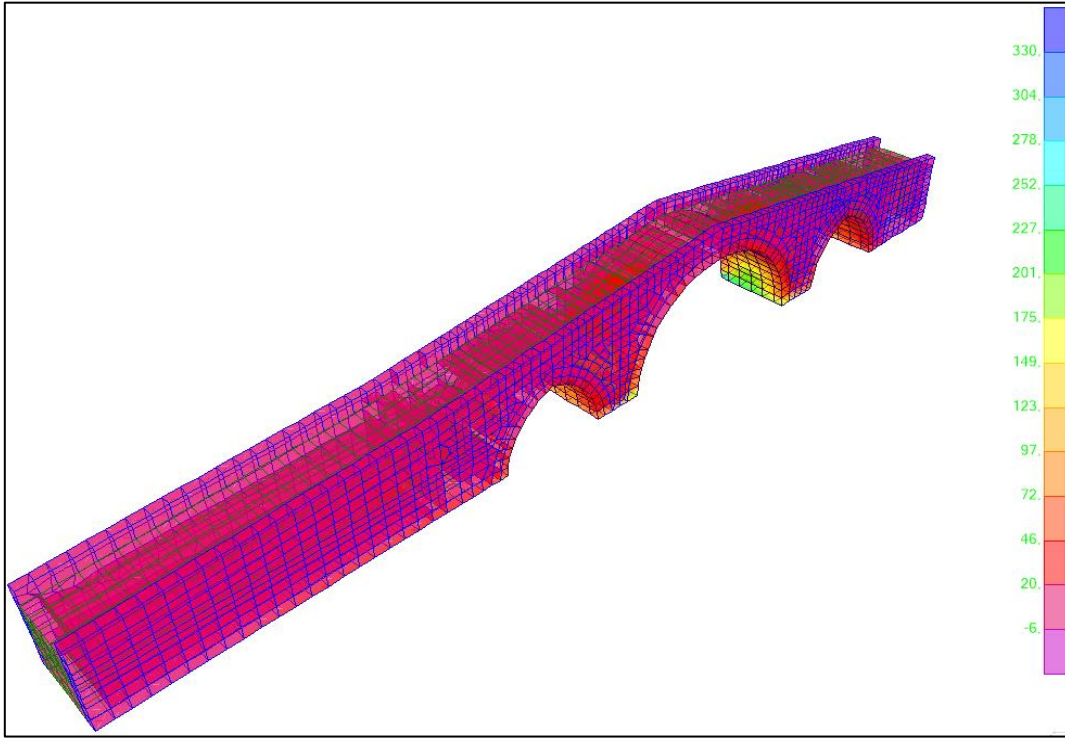


a) Maksimum çekme gerilmeleri, Envelope max. (kPa)

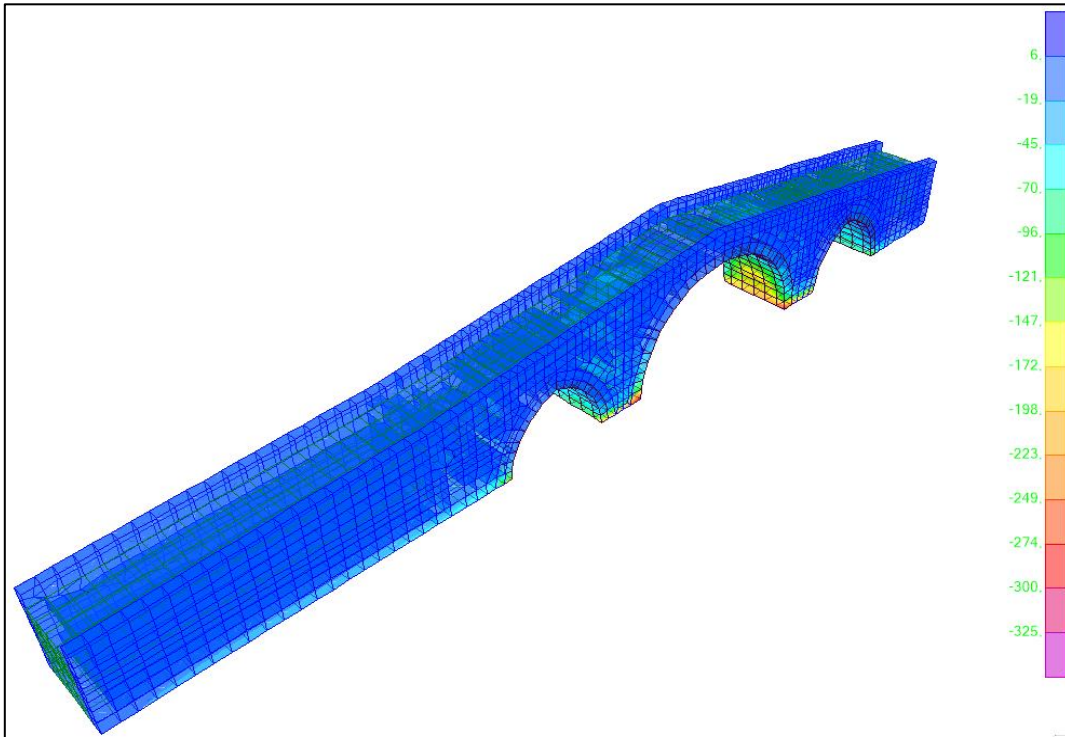


b) Maksimum basınç gerilmeleri, Envelope min. (kPa)

Şekil 10. Dinamik analizlerden elde edilen maksimum gerilmeler (Deprem-6)



a) Maksimum kayma gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



b) Minimum kayma gerilmeleri, Envelope min. (kPa)

Şekil 11. Dinamik analizlerden elde edilen maksimum gerilmeler (Deprem-8)

Sonuçlar

Bu çalışmada, tarihi Uzunok Köprüsü'nün dinamik analizleri, yapay olarak üretilen deprem ivme kayıtları altında yapılmıştır. Bu amaçla, köprünün sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Köprünün doğal titreşim frekansları, periyotları ve mod şekilleri analitik modal analiz yöntemi ile tespit edilmiştir. Köprüdeki sönümün Rayleigh tipi bir sönüm olduğu kabul edilmiştir. Dinamik etkiler için TBDY-2018'e uyumlu yapay olarak üretilen 11 adet ivme kaydı kullanılmıştır. Analizler sırasında köprünün kendi ağırlığı başlangıç yükü olarak alınmıştır. Zaman tanımlanmasında gerçekleştirilen dinamik analizler sonucunda köprüde meydana gelen yer değiştirme ve gerilme değerleri incelenmiştir. Köprünün kendi ağırlığı altında gerçekleştirilen statik analiz sonuçlarına göre, maksimum çekme gerilmesi 210.92 kPa ve maksimum basınç gerilmesi ise 638.79 kPa olarak hesaplanmıştır. Dinamik analizler sırasında, köprü üzerinde işaretlenmiş düğüm noktası için elde edilen mutlak maksimum yer değiştirme, Deprem-8 ve

10 ivme kayıtları altında belirlenmiştir. Ayrıca, köprüde çekme ve basınç gerilmelerinin maksimum ve minimum değerleri Deprem-6, kayma gerilmelerinin maksimum ve minimum değerleri ise Deprem-8 ivme kaydı için hesaplanmıştır. Analiz sonuçları, çekme ve basınç gerilmelerinin maksimum değerlerinin köprü yan duvarlarının zeminle birleştiği bölgelerde yoğunlaştığını, kayma gerilmelerinin ise maksimum ve minimum değerlerinin büyük kemerin karın bölgesinde yoğunlaştığını göstermektedir.

Tarihi köprüler üzerine yapılan deneysel ve nümerik çalışmaların artması, farklı analiz yöntemlerinin kullanılması, bu köprülerin sismik davranışlarının daha iyi anlaşılmasına ve güçlendirme tekniklerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu çalışmalar aynı zamanda tarihi köprülerin deprem etkilerine karşı daha dayanıklı hale getirilmesi ve gelecek nesillere aktarılması için önemli bir rol oynamaktadır.

Kaynaklar

- [1] A. Özmen, and E. Sayın, "Tarihi Yığma Bir Köprünün Deprem Davranışının Değerlendirilmesi," *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 9(2), pp. 956–965, 2020.
- [2] G.B. Sakcalı, A. Gönül, and İ. Yüksel, "Seismic behaviour of historical masonry bridges: The case study of Irgandi Bridge," *International Journal of Architectural Engineering Technology*, vol. 6, pp. 24–32, 2019.
- [3] M. Karalar, and M. Yesil, "Effect of near-fault earthquakes on a historical masonry arch bridge (Konjic Bridge)," *Earthquakes and Structures*, vol. 21(2), pp. 125–136, 2019.
- [4] G. Milani, and P.B. Lourenço, "3D non-linear behaviour of masonry arch bridges," *Computers & Structures*, vol. 110–111, pp. 133–150, 2012.
- [5] B.Ş. Şeker, and M. Özkaynak, "Investigation of Structural Performance of Historical Amasya Hundi Hatun Bridge," *Architecture, Civil Engineering, Environment*, vol. 15(2), pp. 109–120, 2022.
- [6] V. Bahreini, M. Pouraminian, and A. Tabaroei, "Seismic sensitivity analysis of Musa Palas historic masonry arch bridge by Tornado diagram," *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, vol. 7(1), pp. 1–7, 2022.
- [7] H. Güllü, "Tarihi yığma yapılı Cendere köprüsünün deprem etkisinin incelenmesi," *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 7(1), pp. 245–259, 2017.
- [8] A. Özmen and E. Sayın, "Linear dynamic analysis of a masonry arch bridge," *In Proceedings of the Conference on Innovative Engineering Applications*, 2018, Sivas, Turkey, pp. 1–7.
- [9] G.B. Sakcalı *et al.*, "Linear/Nonlinear dynamic analysis and prediction of failure mechanism of Irgandi Bridge," *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 66(4), pp. 1248–1261, 2022.
- [10] M. Karalar, and G. Çufalı, "Structural assessment of historical stone bridges with the finite element method under dynamic effects of arch shape: The Antik Iscehisar Bridge," *Applied Sciences*, vol.13(19), 10740, 2023.
- [11] P. Lourenço, "Computational Strategy for Masonry Structures," Doktora tezi, Delft Technical University of Technology, 1996.
- [12] E. Sayın, "Yığma yapıların lineer olmayan statik ve dinamik analizi," Doktora tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. Anabilim Dalı, 2009.
- [13] P. Zampieri, M.A. Zanini, and C. Modena, "Simplified seismic assessment of multi-span masonry arch bridges," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 13(9), pp. 2629–2646, 2015.
- [14] İ. Kocaman, "Effect of restoration interventions on the seismic behaviour of historical masonry buildings: The case of Molla Siyah mosque," *Engineering Failure Analysis*, vol. 148, 107206, 2023.
- [15] İ. Kocaman, and İ. Kazaz, "Collapse mechanism of historical masonry mosques under strong ground motions," *Engineering Failure Analysis*, vol. 144, 106983, 2023.
- [16] A. Özmen, and E. Sayın, "3D Soil structure interaction effects on the seismic behaviour of single span historical masonry bridge". *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 41(3), pp. 2023–2041, 2023.
- [17] Ö. F. Nematlu *et al.*, "Nonlinear seismic assessment of historical masonry Karaz bridge under different ground motion records", *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 12, no. 1, pp. 247–260, 2023.
- [18] Ç. O. Öztürk, S. Yılmaz Çetin, and E. Sayın, "Dynamic analysis of historical Sultan Hamit masonry arch bridges", *DUJE*, vol. 14, no. 3, pp. 499–506, 2023.
- [19] G. Frunzio, M. Monaco, and A. Gesualdo, "3D FEM analysis of a Roman arch bridge," *Historical Constructions*, pp. 591–598. 2001.

- [20] A. Bayraktar *et al.*, “Tarihi köprülerin deprem davranışına sonlu eleman model iyileştirilmesinin etkisi,” *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, pp.16–20, 2007.
- [21] L. Pelà, A. Aprile, and A. Benedetti, “Seismic assessment of masonry arch bridges,” *Engineering Structures*, vol. 31(8), pp. 1777–1788, 2009.
- [22] Seismosoft Ltd., SeismoArtif, Available at: <https://seismosoft.com/product/seismomatch/>, 2021.
- [23] B. Öztürk, “Seismic behavior of two monumental buildings in historical Cappadocia region of Turkey”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 15, pp. 3103-3123, 2017.
- [24] E. Sayın “Nonlinear seismic response of a masonry arch bridge”, *Earthquakes and Structures*, vol. 10(2), pp. 483-494, 2016.
- [25] E. G. Yılmaz, E. Sayın, ve A. Özmen, “Dynamic analysis of historical masonry arch bridges under different earthquakes: The Case of Murat Bey Bridge”, *TJST*, c. 17, sy. 2, ss. 461–473, 2022, doi: 10.55525/tjst.1105998.