

## Tarihi Bayezid Su Yolu Su Kemerinin Deterministik Yaklaşımında Deprem Performansının İncelenmesi

Ahmet Yavuz ŞAHİN\*, Ufuk YALÇINKAYA

İnşaat Teknolojisi / İstanbul Gelişim Meslek Yüksekokulu, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Türkiye  
Orcid No : 0000-0002-6207-1432

İnşaat Teknolojisi / İstanbul Gelişim Meslek Yüksekokulu, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Türkiye  
Orcid No : 0009-0001-2729-1990

([a.yavuzsahin@gmail.com](mailto:a.yavuzsahin@gmail.com))

(Received: 27 August 2024, Accepted: 29 August 2024)

(5th International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences ICEANS 2024, August 25-26, 2024)

**ATIF/REFERENCE:** Şahin, A. Y. & Yalçinkaya, U. (2024). Tarihi Bayezid Su Yolu Su Kemerinin Deterministik Yaklaşımında Deprem Performansının İncelenmesi. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 8(7), 274-281.

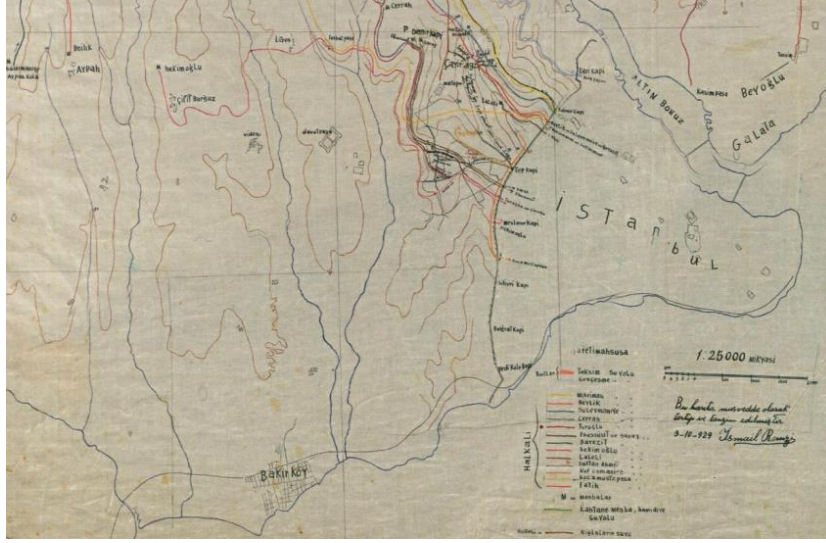
**Özet** – İstanbul dünyanın en hızlı hareket eden ve en aktif sağ-yanal atımlı faylarından biri olan Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde yer almaktadır. Bu durum İstanbul için oldukça önemli depremsellik durumu oluşturmaktadır. Tarih boyunca İstanbul ve çevresinde birçok deprem meydana gelmiştir. KAF Marmara hattı üzerindeki 1999 yılında Gölcük ve Düzce merkezli 7,4Mw ve 7,2Mw iki depremin bölgedeki son depremler olduğu düşünüldüğünde İstanbul'un yakın zamanda deprem ile karşı karşıya kalma olasılığı oldukça yüksektir. İstanbul aynı zamanda oldukça zengin kültür mirası barındıran şehir olduğundan tarihi yapılar ile ilgili depremsellik çalışmalarının kısıtlı olması probleminden yola çıkılarak İstanbul'da Fatih ile Eyüp Sultan ilçeleri arasında sınır hattında 41.0286217 N, 28.933232 E koordinatlarında bulunan tarihi su kemerinin beklenen İstanbul Depremi için deprem performans analizi gerçekleştirilmiştir. Tarihi Su Kemerinin, 15.yy sonu 16.yy başında, Sultan II. Bayezid tarafından dönemin başkenti İstanbul'a su getirmek için yaptırılmıştır. Günümüzde atıl ve kullanılamaz durumda olan su kemerinin kültür mirası olarak geri kazanımı ve beklenen İstanbul depremindeki performansının incelenmesi amacıyla yerinde röleve işlemleri gerçekleştirilmiş ve Sap2000 sonlu elemanlar paket programı ile su kemerinin modellenmiştir. Modellenen su kemerinin dinamik deprem analizi deterministik yaklaşımla gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler** – İstanbul Depremi, Su Kemerinin, Deprem Performans Analizi, Bayezid Su Yolu, Sap2000.

### I. GİRİŞ

Tarihi yapılar içerisinde yığma kemer köprüler önemli bir yere sahiptir. Bu yapıların en önemli özelliği ve köprüye genel adını veren eleman kemerleridir. Kemerler, yığma yapılarda yapısal ve estetik kaygılara yönelik olarak sıkça kullanılmaktadır [1]. Kemerler ağırlıklı olarak köprü, su yolları gibi yapılarda açıklıkları yapısal olarak kapatmaktan ziyade yük taşımak için kullanılır. Yük taşıma kapasiteleri fazla olan kemerler birçok medeniyette ve dönemde tercih edilmiştir. Kemerlerin açıklık ve yükseklikleri belirli bir orantıya sahiptir. Teknik hesaba göre bu orantıda, açıklık arttıkça kemerin yüksekliğinin de artması

gerekmektedir [2]. Araştırma kapsamında Osmanlı Dönemi'nde İstanbul'un Rumeli yakasını besleyen üç büyük sistemden biri olan Halkalı su yollarının bir bölümünü oluşturan Bayezid Suyolu Su Kemerini incelenmiştir. Halkalı sistemini oluşturan su yolları alt sistemi içinde en önemlisi ve debisi en fazla olan Süleymaniye su yolları olmasına karşın debisi en yüksek üçüncü su yolu ise Bayezid su yolu su kemeridir.



Şekil 1. İ.Remzi tarafından hazırlanan Halkalı su sistemini gösteren harita [3].

Tablo 1. Halkalı Su Sistemi'ne ait debi açısından üç büyük su yolu [4].

No	Halkalı Su Sistemi'ne Ait Su Yolları	Muhtemel İnşa Tarihi Aralıkları	Debisi (Masura)
1	Süleymaniye	<1557	152
2	Miri (Beylik)	1730-1754	80
4	Bayezid	1481- 1512	64

Tarihi özelliklerinden dolayı kültürel miras olarak kabul edilen bu eserden günümüze yalnızca bir bölümü ulaşmıştır. Ulaşan kısmında bir bölümünün toprak altında atıl durumda bulunduğu düşünülmektedir.



Şekil 2. Tarihi Bayezid Su Yolu Su Kemerini [5].



Şekil 3. Tarihi Bayezid Su Yolu Su Kemerı [5].

Tablo 2. Geçmiş araştırmalar

Yazar	Araştırma Konusu
Clemente vd. [6]	Kemerlerin güvenlik düzeyi
Colla vd.. [7]	Kemerlerin güvenlik düzeyi
Frunzio ve Monaco [8]	Kemerlerin güvenlik düzeyi ve çözümleme
Toker ve Ünay [1]	Matematiksel modelleme ve çözümleme
Block vd. [9]	Kemerlerin dengesel stabilitesi ve çözümleme
Brencich ve Morbiducci [10]	Malzeme özellikleri merkezli çözümleme
Ural vd. [11]	Tarihi Türk kemerlerinde ki hasarların analizi
Alkan vd. [12]	Tarihsel süreçte köprülerin değerlendirilmesi
Behnamfar ve Afshari [13]	Kemer deprem analizi
Kurt [14]	Kemer deprem analizi
Şahin [15]	Kemer deprem analizi

Kemerler ile ilgili literatür değerlendirildiğinde genel olarak kemerlerde güvenlik düzeyinin değerlendirildiği ve bu kapsamda analizlerin gerçekleştirildiği görülmektedir. Araştırmamız kapsamında literatür incelendiğinde ise deprem analizinin az sayıda gerçekleştirildiği araştırmamızın bu alana katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

## II. MATERYAL VE YÖNTEM

Araştırmada deterministik yaklaşım kullanılmıştır. Deterministik yaklaşımla zaman boyutundan bağımsız olarak bölgede meydana gelebilecek en büyük depremin yaratacağı yer hareketi düzeyi belirlenmektedir.

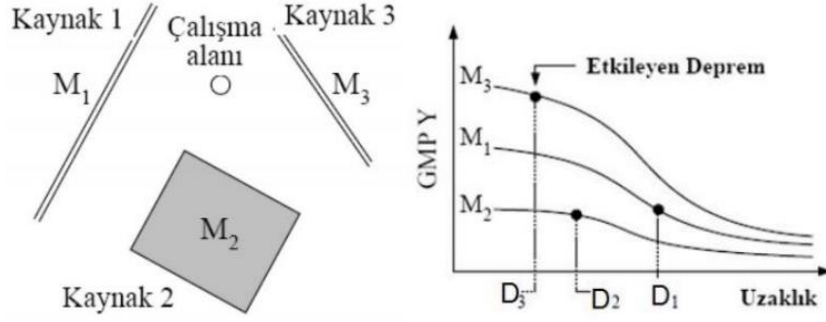
Araştırmada Tarihi Bayezid Suyolu Su Kemerinin koordinatlarına en yakın olan fay kırıkları belirlenmiştir. “Diri fay haritalarından ve deprem verilerinden yararlanarak, deprem üretme potansiyeli olan kaynak bölgeleri saptanmış, tarihsel ve aletsel dönemde meydana gelen en yüksek büyüklüğe sahip deprem ile kemerin depremsellik analizi gerçekleştirilmiştir.

Deterministik yaklaşım ile gerçekleştirilen sismik tehlike analizlerinde (DSTA) belirli bir sismik senaryo geliştirilir ve yer hareketi tehlikesinin belirlenmesi buna göre yapılır.

- Tek bir “senaryo” varsayımı
- Tek bir büyüklük seçimi, M
- Tek bir uzaklık seçimi, D

Bölgeyi veya sahayı etkileyebilecek olası bütün sismik kaynaklar belirlenmelidir” [16].





Şekil 4. Deterministik Yaklaşım [16].

### III. BULGULAR

Araştırma kapsamında İstanbul'da Fatih ile Eyüp Sultan ilçeleri arasında sınır hattında 41.0286217 N, 28.933232 E koordinatlarında bulunan tarihi su kemerine en yakın fay zonunun Kuzey Anadolu Fay Zonu olduğu görülmektedir (Şekil 5). Afad'a göre birkaç yüz metre ile birkaç kilometre genişlikte, yaklaşık 1200 kilometre uzunlukta, sismik olarak çok aktif sağ yönlü ve yılda ortalama iki santimetre kayma hızına sahip bir fay zonu olan KAFZ araştırmanın gerçekleştirileceği kemer ile olan kuş uçuşu uzaklıkları Şekil 5'te verilmiştir [17,18].



Şekil 5. KAFZ -araştırma alanı arasındaki uzaklıklar [18].

Kuzey Anadolu Fay Zonu incelendiğinde araştırma alanı ile arasındaki uzaklıkların doğu da 55.6 km, batıda 86.7 km ve orta kısımda ise 17.4 km olduğu görülmektedir. Beklenen büyük İstanbul depreminin de KAFZ orta kısmı ile başlayarak batı kısmına kadar kırılması ile oluşacağı bilimsel bir gerçektir. Deterministik yaklaşım da kaynak ile araştırma alanı arasındaki en yakın fay zonu ile oluşmuş en yüksek büyüklüğe sahip deprem referans alınacağından araştırmaya konu olan su yoluna en yakın KAFZ orta kısmı 17.4 km uzaklıkta ve bu hattın doğu kısmı üzerinde oluşmuş en büyük depremin ise 7.4Mw ile Düzce Depremi olduğu görülmektedir (Tablo 3; Tablo 4).

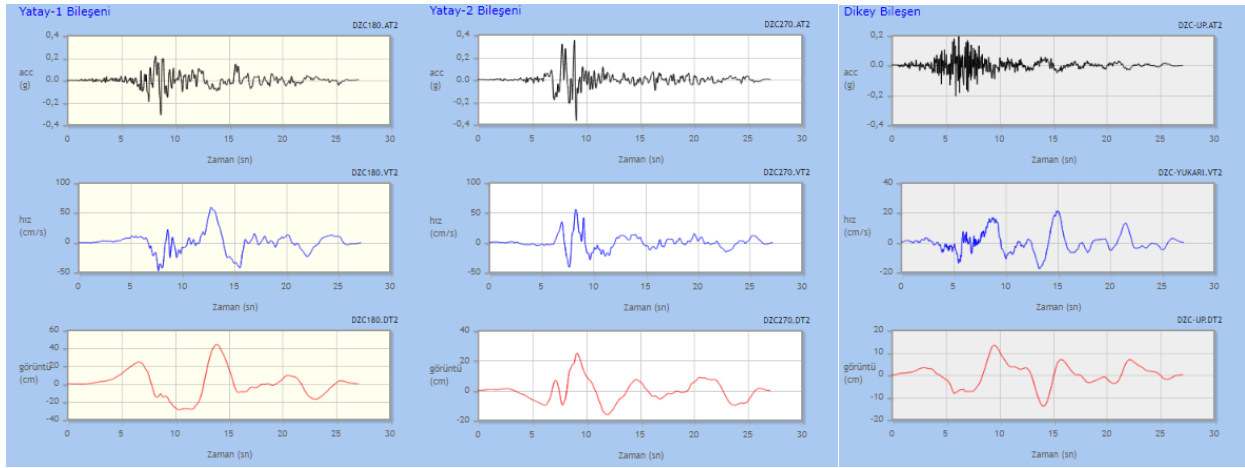
Tablo 3. KAFZ oluşan büyük depremler [18].

Fay Zonu	Kaynak Uzaklığı (km)	Yer	Magnitüd	Tarih
KAF Doğu	84.2	Düzce Depremi	7.4	1999
KAF Orta	-	-	-	-
KAF Batı	156	Mürefte Depremi	7.3	1912

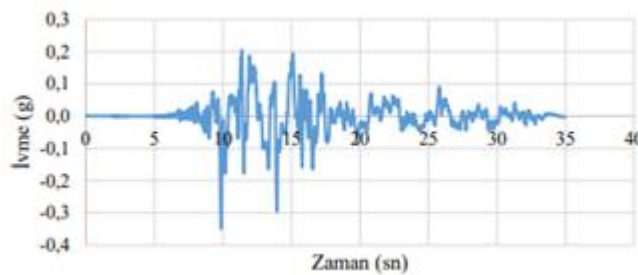
Tablo 4. KAFZ- araştırma alanı uzaklık [18].

Fay Zonu	Kaynak Uzaklığı (km)
KAF Doğu	55.6
KAF Orta	17.4
KAF Batı	84.7

Afad veri tabanı spektrum değerleride göz önünde bulundurularak 7.4 Mw Düzce doğal deprem kaydı “Pacific Earthquake Engineering Research Center” olarak bilinen veri tabanından elde edilmiştir [17,19].



Şekil 6. Düzce Depremi, Düzce istasyonuna ait veriler [19].

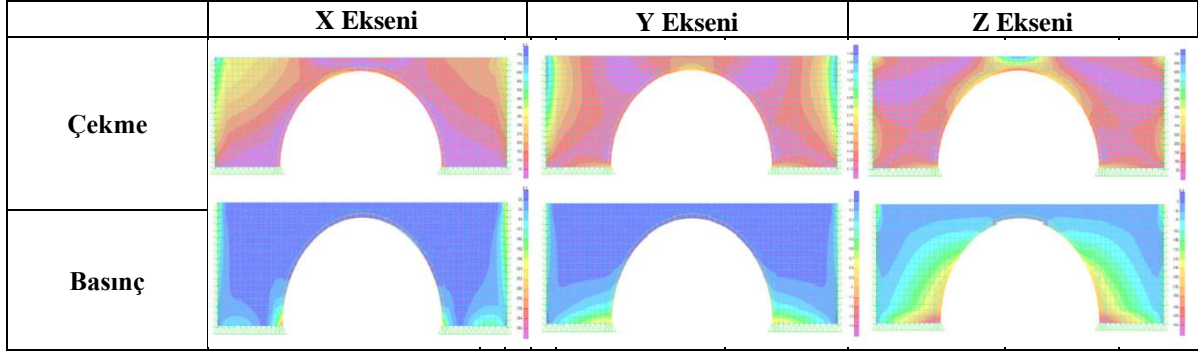


Şekil 7. Düzce Depremi ivme zaman grafiği [19].

Deprem verilerinin hazırlanması akabinde Tarihi Bayezid Suyolu Su Kemerini sonlu elemanlar paket programı Sap2000’de modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Su kemerinin tarihi dokusundan dolayı kullanılan yığma taşlar ile ilgili deneysel çalışma gerçekleştirilememiş ve malzemeye dair elastilite modülü, kayma, çekme poisson oranı gibi veriler literatürden desteklenerek modelleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Su kemerinin büyük oranda yapısal çatlaklara sahip olması nedeniyle ölçülendirme işleminde model sırasında revizyonlar gerçekleştirilmiştir. Yapının modelleme aşamalarının gerçekleştirilebilmesi için rölövesi alınarak ölçüleri belirlendi. AutoCAD ile dış konturlar çizilerek sonlu elemanlar paket programı Sap2000’e aktarıldı. Belirtildiği üzere literatürden destek alınarak malzeme

özellikleri tanımlandı, kabuk olarak modellendikten sonra solid elemanlara dönüştürüldü. Mesnet ataması sonrası yükleme kombinasyonları hazırlandı ve analiz gerçekleştirilerek sonuç elde edildi.

Tablo 5. Düzce Depremi etkisinde oluşan çekme ve basınç gerilmeleri



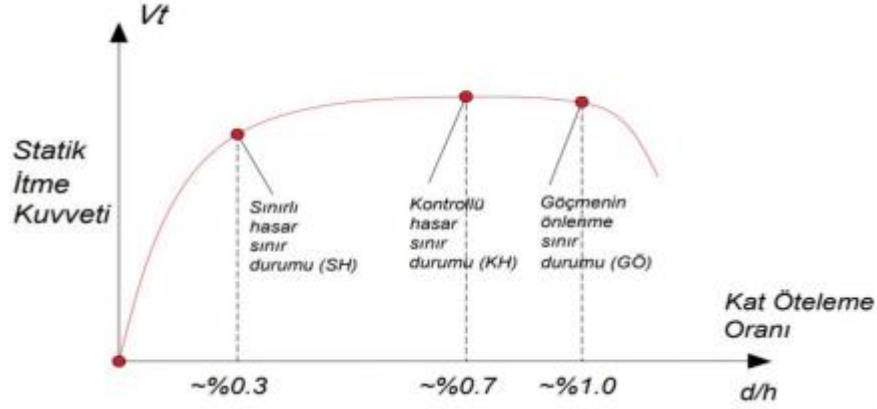
Yapılan analiz sonuçlarında x,y,z eksenli çekme ve basınç gerilmelerinin 0,4 ile 1,5 kN/m<sup>2</sup> aralığında olduğu ve oluşan deplasmanın ise üç yönde de maksimum 0,0001 m ile neredeyse yer değiştirmenin olmadığı görülmektedir.

Tablo 6. Düzce Depremi etkisinde oluşan yer değiştirmeler (x,y,z)

Düzce Depremi	Deplasman (m)
x eksenli	0.0001
y eksenli	0.0001
z eksenli	0

Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu Md.6.8.1/a “Tarihi bir yapıdaki belirsizliklerden dolayı yapısal analizde kullanılan malzeme ve taşıyıcı sistem parametrelerinin ancak sınırlı bir hassasiyetle belirlenebildiği unutulmamalıdır. Bu sebepten tarihi yapının değerlendirilmesinde, kullanılan kabullerin ve matematiksel yöntemin olabildiğince basit tutulması gerektiği açıktır. Belirli bir deprem etkisindeki tarihi yapılar için aşağıdaki Yapısal Performans Düzeyleri tanımlanabilir:

a) *Sınırlı Hasar (SH) Performans Düzeyi:* Bu düzey, yapının taşıyıcı sistem elemanlarında sınırlı düzeyde hasarın meydana geldiği (doğrusal olmayan davranışın sınırlı kaldığı) hasar düzeyine karşı gelir.” ifadesi ile malzeme seçimi konusunda yapılan kabullerin ve deterministik yaklaşım ile kaynak-çalışma alanı-deprem büyüklüğü ilişkisinin olabildiğince basitlendirilerek yapıldığı araştırmamızda sabittir. Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu Md.6.8.1/a ve Tablo 6.4; Şekil 6.18’de “Sınırlı Hasar Sınır Durum (SH) b) Azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranı % 0,3 sınırını aşmıyor.” ifadesi belirtilmiştir [20].



Şekil 8. Statik itme sınır durumları eğrisi [20].

Yapılan analiz sonucunda x,y,z ekseninde oluşan maksimum deplasmanın 0,1mm olması sınırlı hasar durumuna ulaşılanın çok altında kaldığını dolayısıyla hasar olmadığını ve kullanılan malzemelerin birim şekil değiştirme sınırlarının aşılmadığını da göstermektedir.

#### IV. SONUÇLAR

Bu araştırma Tarihi Bayezid Su yolu Su Kemerinin deprem performansının incelenmesi amacıyla deterministik yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan bulgular değerlendirildiğinde su kemerine en yakın fay zonunun KAFZ marmara orta kısmı ve araştırma alanına 17.4 km uzaklıkta olduğu bulgularda ortaya konmuştur. Deterministik yaklaşımda kaynak ile araştırma alanı fay zonu üzerinde gerçekleşen en büyük deprem senaryosu su kemeri için değerlendirilmiş ve bu depremin 1999 yılında KAFZ marmara doğu bloğunda gerçekleşen 7.4Mw büyüklüğündeki deprem olduğu bulgularda belirtilmiştir. (USGS kayıtlarına göre 7.51Mw). Bu veriler ışığında araştırma 7.4Mw büyüklüğünde ki deprem etkisi altında Tarihi Bayezid Su yolu Su kemerinin deprem performansının incelenmesine evrilmiştir. Yapılan analizlerin bulguları değerlendirildiğinde su kemerinde oluşan x, y ve z yönlü deprem etkisinin çekme ve basınç değerleri tanımlanan malzemenin çekme ve basınç değerlerinden oldukça düşük sonuçlar vermiş ve deplasmanın neredeyse sıfır olduğu ortaya konmuştur. Deplasmanın sıfıra oldukça yakın olması Tarihi Yapılar için Deprem Riskleri Klavuzu'nda belirtilen sınırlı hasar sınır durumunun aşılmadığını da göstermektedir. Yüzlerce yıldır ayakta olan su kemerinin mevcut formunu koruduğu verilerle ortaya konmaktadır. Fakat yerinde yapılan gözlemler doğrultusunda kemerin gerek kesme taşları gerekse harç bölgelerinde oluşan boşluklar ve aşınmalar nedeni ile model ile gerçek davranış arasında farklılıklar oluşabileceği de göz ardı edilmemelidir. Ayrıca kemerin belirli bölgesinin toprak altında bulunması da bu parametreleri doğrudan etkileyecektir. İstanbul gibi bir çok medeniyete başkentlik yapmış kültürel bir kentin bu tip tarihi zenginliklerine daha fazla önem verilerek gelecek nesillere aktarılması amacıyla tarihi dokusuna uygun şekilde restore edilmesi gerekmektedir.

#### TEŞEKKÜR

Bu araştırma TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projelerini Destekleme Programı tarafından 1919B012301777 numaralı proje kapsamında desteklenmektedir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Toker, S. ve Unay, A.I., (2004). Mathematical Modeling and Finite Element Analysis of Masonry Arch Bridges, Journal of Science of Gazi University, 17, 2, 129-139.
- [2] Çulpan, C. (2002). Türk Taş Köprüleri – Orta Çağdan Osmanlı Devri sonuna kadar. Türk Tarih Kurumu Basımevi, Ankara.
- [3] Çeçen, K. (1991). Halkalı Suları (Birinci Baskı). İstanbul: İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi Yayınları, 28-57.

- [4] Akova, E. (2012). İstanbul'daki Tarihi Su Sistemleri ve Kumrulukemer (Akyar Kemeri) Örneğinde Bozulma Nedenleri, Çözüm Önerileri, Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [5] Cangül, C. (2023) <https://kulturenvanteri.com/yer/?p=208849>.
- [6] Clemente, P., Occhiuzzi, A., Andraithel, A., 1995. Limit Behavior Of Stone Archbridges. Journal Of Structural Engineering, Asce, 121(7):1045-1050.
- [7] Colla, C., Das, P. C., Mccann, D., And Forde, M. C., 1997. Sonic, Electromagnetic and Impulse Radar Investigation Of Stone Masonry Bridges, Ndt&E International, 30(4):249-254.
- [8] Frunzio, G., And Monaco, M., 2001. 3d F.E.M. Analysis Of A Roman Arch Bridge. Historical constructions, P.B. Lourenço, P. Roca (Editors), Guimarães, P.591-598.
- [9] Block, P., Dejong, M., And Ochsendorf, J., 2006. As Hangstheflexible Line: Equilibrium Of Masonryarches. Nexus Network Journal, 8(2): 13-24.
- [10] Brencich, A., And morbiducci, R., 2007. Masonryarches: Historical Rules And Modern Mechanics. International Journal Of Architectural Heritage, 1(2):165-189.
- [11] Ural, A., Oruç, Ş., Doğangün, A., Vetuluk, Ö. İ., 2008. Turkish Historical archbridges and their deteriorations and failures. Engineering failure Analysis, 15(2):43-53.
- [12] Alkan, A., Baykan, O., Atalay, A., Baykan, N., Ve Öziş, Ü., 2011. Su Yapısı Olarak Anadolu'daki Taş Köprüler. I. Su Yapıları Sempozyumu, 16- 18 Eylül, Diyarbakır, S.13-23.
- [13] Behnamfar, F., And Afshari, M., 2013. Collapse Analysis And Strengthening of Stone Archbridges against earthquake. International Journal Of Architectural heritage, 7(1):1-25.
- [14] Kurt, M., (2016). Tarihi Taş Kemer Köprülerin Dinamik Davranışlarının Deneysel Ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Belirlenmesi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Samsun, 93s.
- [15] Şahin, A. Y. (2023). Tarihi Çobançeşme Köprüsü'nün Yapısal Analizi. *International Conference On Trends In Advanced Research, 1*, 310–312.
- [16] Kramer, S.L., Geoteknik Deprem Mühendisliği, Çeviren: Kamil Kayabalı, Gazi Kitabevi, Ankara, 2003.
- [17] AFAD (Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı), <http://www.deprem.gov.tr/sarbis/Shared/Default.aspx>, 2024.
- [18] MTA, (2024). <https://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/yenilenmis-diri-fay-haritalari>
- [19] Pacific Earthquake Research Center, University of California, Berkeley, CA.
- [20] TYİDRYK, (2017). Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu. Vakıflar Genel Müdürlüğü, İstanbul,
- [21] SAP2000 (v.20.1.0), 2018. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual. Berkeley, California, Computer and Structures Inc