



Yer Radarı (GPR) Uygulaması ile Kısmi Yıkılmış Bir Köprünün Sağlık Durumunun Belirlenmesi

Gökhan Kılıç^{1,*}

¹İzmir Ekonomi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

Makale Tarihi

Gönderim: 18.03.2022

Kabul: 05.07.2022

Yayın: 15.12.2022

Araştırma Makalesi

Öz – Köprü yapılarının sağlık durumlarının ve yapıların yaşam döngüsü bağlamında durumun değerlendirilmesi mühendisler için hayati öneme sahiptir. Kuşkusuz, yıkılmış köprülerdeki yapısal kusurların önceden tespit edilmesi, özellikle yapı elamanlarındaki çatlaklar, donatıların açığa çıkması ve korozyonun tespiti, mühendislerin gerekli önlemleri alması ve yapının daha uzun süre kullanılabilirliğini sağlamaktadır. GPR uygulamalarının doğru kullanıldığı takdirde, bu gibi kusurların tespitinde etkili olduğu kanıtlanmıştır. GPR yöntemi başka yapılar içerisinde de kullanılmaktadır. GPR verileri işlendikten sonra iki boyutlu görüntüler ayrı ayrı incelenerek ve görüntülere ait radargramlar üzerinde yansımış/saçılmış elektromanyetik (EM) dalga alanları da irdelenmiştir. Sonuç olarak, işlenmiş veriler üzerindeki köprüye ait yansımış/saçılmış dalga alanı konumları, yapısal elamanların konumlarını ve derinliklerini tanımlamaktadır. Elde edilen GPR hiperbollerin tepe genişliği yapısal elamanları belirlemektedir. Bu çalışma, Nisan 2012'de bir nehir üzerindeki köprüde meydana gelen kısmi çöküşü incelemektedir. Bu çöküşün yeterli bir yapısal sağlık izleme programı ile önenebileceği tespit edilmiştir. İncelenen köprünün kısmi yıkılmasını doğrudan etkileyen faktörler arasında yapısal elamanların demir korozyonu, temellerin aşınması ve zayıflamış bir köprü döşemesi bulunmaktadır. Bu çalışmada uygulanan yöntem, korozyondan etkilenen köprülerin GPR uygulaması ile ilgili yapı mühendislerinin ve / veya sorumluların karar vermelerini geliştirmek için kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler – Köprü, kazısız teknolojiler, sinir ağları, yapı sağlığı, yer radarı

Health Assessment of a Partially Collapsed Bridge Using Ground Radar (GPR) Application

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, İzmir University of Economics, İzmir, Türkiye

Article History

Received: 18.03.2022

Accepted: 05.07.2022

Published: 15.12.2022

Research Article

Abstract – Condition assessment of bridge structures within the context of health monitoring of structures, as well as the life cycle of structures, is of vital significance for engineers. Undoubtedly, the detection of bridge structural defects in the collapsed bridge in particular internal structural elements such as bridge deck delamination, the formation of cracks and corrosion of rebar will enable engineers to take necessary action, and prolong the serviceability of the structure. Applications of GPR have proved to be effective in detecting such imperfections if utilised correctly. GPR is also used in other structures. Since the GPR data was obtained in the form of two dimensional images after processing, the sections were examined in two dimensions and the reflected/scattered electromagnetic (EM) wave fields on the radargrams of the three dimensional images were examined. According to the results, the reflected/scattered wave field locations of the bridge on the processed data define the locations and depths of the structural elements. The apex width of the resulting GPR hyperbolas determines the structural elements. This paper reviews the collapse in April 2012 of a case study bridge over a creek, examining the possibility that this collapse could have been anticipated, and therefore, prevented with an adequate structural health monitoring programme. This paper also presents the results of the application of GPR. Factors which have been identified as having directly contributed to the failure of the case study bridge include the corrosion of rebar, scour of the foundations and a weakened bridge deck. The methodology implemented in this paper can be used to enhance the decision making of structural engineers and/or asset managers relating to the Ground Penetrating Radar application of corrosion affected bridges.

Keywords – Bridge, ground penetrating radar, non-destructive technologies, structure health, neural networks

¹ gokhan.kilic@ieu.edu.tr

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1. Giriş

Tetkik edilen köprü 1951 yılında trafiğe açılmış, dokuz köprü ayağı tarafından desteklenen on açıklıklı betonarme bir yapıdır. 252 metre uzunluğundaki köprünün yaklaşık 48 metresi 6 Nisan 2012 tarihinde saat 04.00'te aniden çökmüştür ve 15 ölümlü sonuçlanmıştır.

Bu çalışmada; köprü çöküşüne neden olan sebepler, bu sebepleri inceleyen raporlar aracılığıyla belirlenmiştir. İncelememiz sonucu, köprü demirlerinin hava koşulları ve dalgalar sonucu sürüklenen taşlar dolayısıyla aşındığı ancak kapsamlı bakım ve onarım çalışması yapılmadığı tespit edilmiştir. (KGM, 2012) tarafından derlenen bir rapora göre, köprünün genel yapı sağlığı incelemesi yapılmamıştır. Bazı onarım çalışmaları Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından yapılmıştır ancak çok ihtiyaç duyulan köprü yapısına yönelik onarımlar yapılmamıştır (DeNoto, 2022; Cao ve diğ., 2021, Li ve diğ., 2021). Ek olarak; köprü statikğine uygun, taşıyıcı sistemine destek proje çalışmaları yapılmadan, köprüye ekstra yük olan asfalt tabakaları eklenmiştir. Köprüde alt, üst ve etriye donatılarının yerleri bilinmediğinden bu bilgileri elde etmek için GPR kullanılmıştır. Bu çalışma, inşaat mühendisliği kusurlarının yapı aracılığıyla incelenmesi yoluyla tahribata dayanıklı farklı yöntemleri tespit ederek köprü çökmesini önleyebilecek tedbirler konusunda öneriler sunmaktadır. Bu kapsamda, GPR yöntemi, köprü yapısının alt ve üst donatısının konumunu, donatının korozyona uğraması veya nem mevcudiyetini belirlemede, donatı dışındaki betonda çatlak, çökme ve boşlukları belirlemede kullanılır (Parrillo ve Roberts, 2006; Kilic ve Caner, 2021; Benmokrane ve diğ., 2004; Kilic, 2016; Rhazi ve diğ., 2003).

Söz konusu yöntemle tetkik edilen köprü betonunun ciddi şekilde hasar aldığı ve birçok noktada donatıların korozyona uğradığı tespit edilmiştir. Ayrıca, dere yatağının taşıdığı malzeme zaman içinde su debisini değiştirmiş ve bu nedenle köprü ayaklarının altında bulunan ahşap kazıklar ortaya çıkmış, betonarme yapı ve taşıyıcı sistem bozulmuştur. Bu sebeplerin köprünün çökmesinde önemli bir faktör olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmanın ilk bölümünde köprünün yapısal bilgileri, yıkılan alanının detaylı bir incelemesi, bulgular, tarihsel veriler ve tavsiyeler bulunmaktadır. İkinci bölümünde ise köprünün döşemesinde kullanılan donatıların alt ve üst konumlarını belirlemek ve GPR uygulamasına odaklanılmaktadır.

Bu araştırma, mevcut köprülerin yıkılma riski altına girmeden, sadece mühendislik gözlem yolu ile değil, diğer tahribatsız ve kazısız teknolojiler yardımı ile köprünün sağlık durumunu belirlemeyi, yıkılma risklerini ortadan kaldırmayı, düzenli kontrol sağlandığı zaman mevcut üst yapıların kullanım ömürlerini uzatmayı hedeflemektedir.

1.1.İncelenen Köprü

Köprü, Türkiye'de 1951 yılında Çaycuma deresi üzerinde uzanan 225 m'lik bir açıklıktan oluşan, betonarme / ön gerdirmeli beton bir yapıdan oluşmaktadır (Şekil 1-a). 6 Nisan 2012 tarihinde, yapımından 61 yıl sonra, köprünün belli bir bölümü çökmüş, bu yıkım 15 kişinin hayatını kaybetmesi ile sonuçlanmıştır (Şekil 1-b).



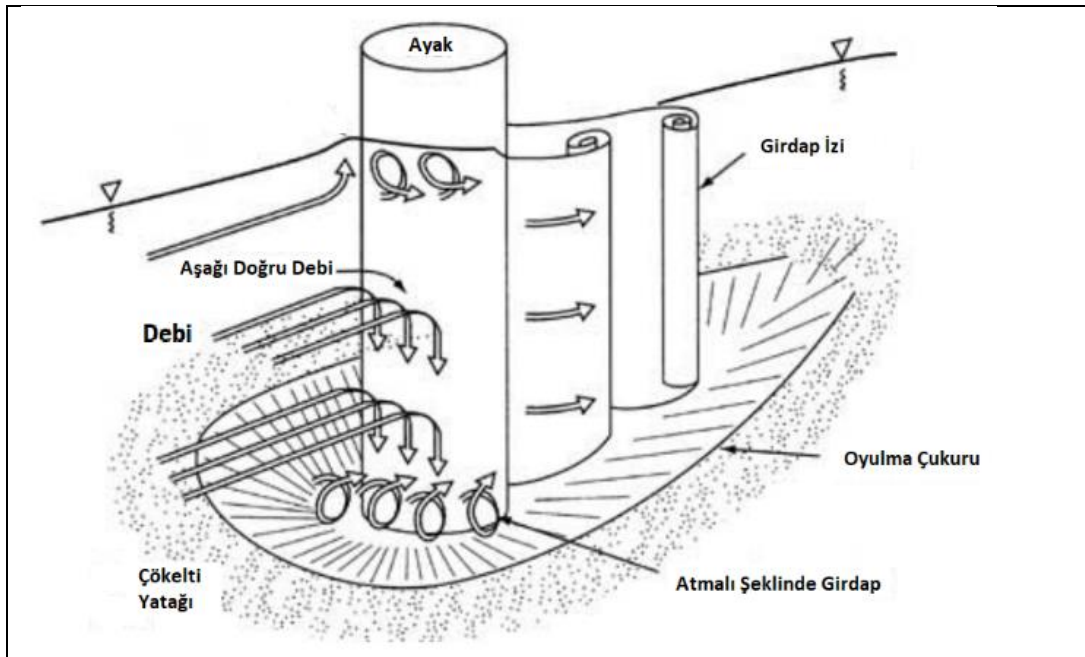
Şekil 1.a Çaycuma Köprüsü'nün Türkiye'deki konumu (KGM, 2012)



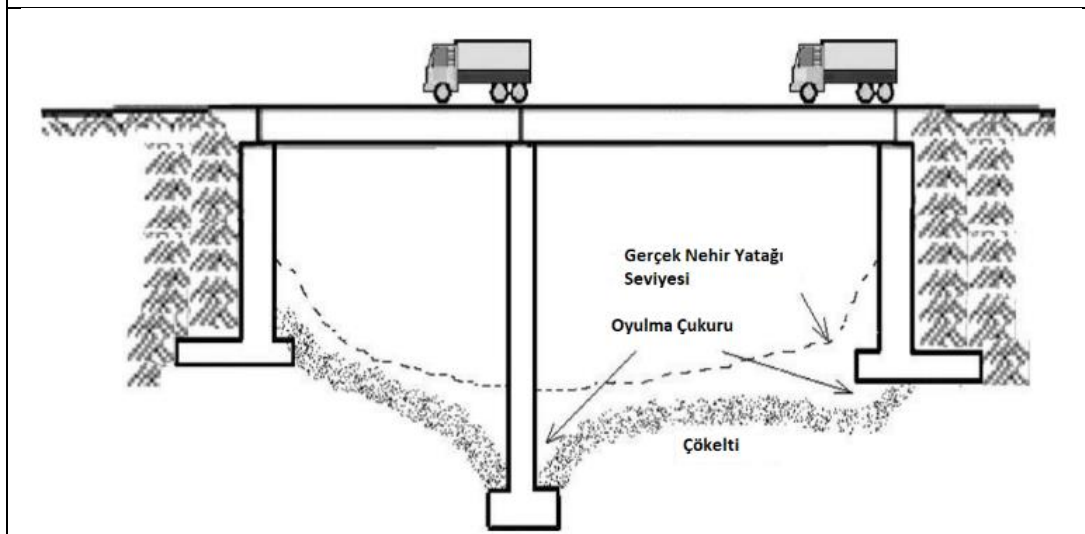
Şekil 1.b İncelenen köprünün kısmi çöken görüntüsü (KGM, 2012)

Köprü yapıları, suyun akım şartlarına göre hem doğrusal akarsularda hem de kıvrımlı akarsularda dayanıklı olmalıdır. Bunun yanında köprü yapılarının mukavemeti, hem statik kuvvetlere karşı hem de suyun dinamik etkisine karşı dayanıklı olmalıdır. Yapıların temeli, su kuvveti tarafından oyulma riskine ve taban oyulmalarına dirençli olacak şekilde tasarlanmalıdır.

İncelenen köprünün temeli, akarsuyun debisine ve zemin parametrelerine bakılmaksızın, oyulma riskine karşı herhangi bir önlem alınmadan tasarlanmıştır. Köprünün yıkılımdan sonraki incelemelerde ön değerlendirme olarak, dere boyunca dere yatağından toprak dolgunun alınmasından dolayı, köprü ayakları ve ahşap temel kazıkları olması gereken seviyenin altına düşmektedir. Bu yüzden dere yatağı erozyonuna karşı temel taşıma kapasitesi düşmüş, bu da statik gerginlikten ötürü köprü döşemesinin çökmesine neden olmuştur (Şekil 2-a ve 2-b).



Şekil 2.a Oyma deliğinde girdap oluşumu (Brandimarte ve diğ., 2012)



Şekil 2.b Köprünün ayaklarındaki oyulma çukuru (Deng ve Cai, 2010).

Bu gibi çökmelerin önlenmesi için kendi ağırlıkları, trafik yükleri ve ayrıca nehirler ve diğer su kütlelerinin empoze ettiği hidrolik kuvvetlerin birleşimine dayanacak su yollarını kapsayan köprüler tasarlamak

gerekmektedir. Bu araştırmadaki köprünün yıkılması, sadece yetersiz bakım ve onarımdan ötürü değil, aynı zamanda erozyonu önleyen setlerin kontrol ve bakımının önemini de ortaya koymaktadır.

1.2. İncelenen Köprünün Yıkılması Sebebi Üzerine Araştırmalar

Tetkik edilen köprünün yıkılmasının öncesi bir kanıt bulunmadığından, bu araştırma makalesi, inşaat ve tasarım hatalarının ana nedenlerini vurgulamayı amaçlamaktadır. Gelişmekte olan ülkelerdeki köprülerin hasar görmelerinin ana nedenlerinden biri hidrolik faktörlerin yanlış kalibrasyonudur. Amerika Birleşik Devletleri'nde 1989-2000 yılları arasında, 503 köprünün yıkılış nedenlerini belirlemek için yapılan araştırmalar, vakaların % 53' ünden fazlasından sellerin sorumlu olduğunu ortaya koymaktadır. Köprülerin yıkılmasının diğer ortak nedenleri arasında araç kazaları, depremler ve aşırı yüklemeler vardır (Yanmaz ve Caner., 2012; Melville ve Coleman., 2000). (Wolforst ve Annandale., 1998; Yanmaz 2002)'e göre nehir akarsuları, köprü ayaklarının etrafındaki fazla çöktelleri temizleyerek yapının sağlamlığını ve güvenilirliğini önemli ölçüde artırır. Şekil 3'te görüldüğü gibi 10 km uzaklıktaki başka bir köprünün taşıyıcı ayaklarının dere yatağından kum alınması sonucu, temellerinin seviyesinin 4-5 metre altında olduğunu tespit edilmiştir.



Şekil 3. Köprünün 10 km yukarısında bulunan başka bir köprü (resim Gokhan Kilic tarafından çekildi, 2012)

Köprü ayaklarının etrafındaki kırılmış beton parçaları yüzünden su akış hızı artmakta ve taşıyıcı ayaklarda oyulmalar daha fazla oranda görülmektedir (Şekil 4 ve 5). Ayrıca taşıyıcı ayaklarda onarım gerektiren bölgeler açıkça Şekil 4'de görülmektedir.



Şekil 4. Köprünün taşıyıcı ayakları ve temelleri (KGM, 2012)

Köprü taşıyıcı ayakları ve ahşap temellerinin üzerinde görünen derin çatlaklar ve açığa çıkmış donatılar Şekil 5'te görünmektedir.



Şekil 5. Köprünün taşıyıcı ayakları ve ahşap temelleri (resim Gokhan Kilic tarafından çekildi, 2012)

Dere yatağı üzerinden izinsiz ve kontrolsüz kum alınması dere akışının seviyesinin değişmesine ve bunun neticesinde köprünün hemen sonrasında bulunan kaya dolgu bariyerinin hasar görmesine sebep olmuştur (Şekil 6).



Şekil 6. Köprünün kaya dolgulu bariyerinin yıkılması (KGM, 2012)

Araştırılan köprünün yıkılmasının ardından, İstanbul Teknik Üniversitesi tarafından yapılan görsel bir inceleme sonucunda; kalan köprü tabliyesi üzerinde derin çatlaklar, beton kalitesinin bozulması, donatı korozyonu, taşıyıcı ayaklar üzerindeki önemli çatlaklar gibi birtakım kusurlar tespit edilmiştir (Şekil 7). Bu ayrıntılı raporda ayrıca, inşaat demiri korozyonunun, taşıma kapasitesi zayıflamış köprü ayaklarının ve döşemesinin de köprünün yıkılmasında etkili olduğu belirtilmiştir.



Şekil 7. Köprünün yıkılmasının ardından köprü tabliyesi (KGM, 2012)

Bu köprünün yıkılmasının birçok nedeni raporda belirtilmektedir. İlk olarak, köprü temelindeki oyulmadan dolayı temel kazıkların ortaya çıkması, Karabük Hidroelektrik Santrali Barajı taşkınlarından (yaklaşık 50 kilometre uzakta) meydana gelen hidrodinamik yüklemdeki artıştan olabileceği de belirtilmektedir. Artan su akışı, temellerin önlerindeki kaya dolgu bariyerinin ortadan kaldırılması (Şekil 6), köprünün yapısal bütünlüğünün, özellikle de taşıyıcı ayaklarının taşıma kapasitesinin zayıflamasına neden olmuştur. Bu su akış gücü aynı zamanda köprünün temellerinin aşınmasına neden olmuştur. Ayrıca diğer faktörlerden birisi de eriyen karın neden olduğu su akışındaki yıllık artışlar suyun debisini artırarak taşıdığı ilave molozlar aynı zamanda beton ayaklarına verilen hasarı artırarak köprüdeki donatının açığa çıkmasına ve bu sebeple korozyonun artışına sebep olmuştur.

Köprünün yapısı ile ilgili olarak, uzun yıllar süren yoğun trafik yükleri ve malzemelerdeki doğal şartlar altındaki yıpranmalara ek olarak, köprünün proje dışındaki döşemesi üzerine yapılan ekstra asfalt çalışmasıdır.

Eklenen asfalt kalınlığı yaklaşık 70 cm kalınlığındadır, bu da köprüye 70 cm' ye (Şekil 8), yaklaşık olarak $0.25 \times 0.70 \times 2,5 = 0.44$ t/m bir ölü yük ile ekstra eklenmektedir.



Şekil 8. Vaka çalışması köprüsünün ve genişletilmiş kaldırımının çöküşü (KGM, 2012)

Köprü yapısı üzerinde bir bütün olarak düzenli standart değerlendirmeler yapılmamıştır. Köprü'nün bazı bölümlerinde çeşitli iyileştirme ve yenileme çalışmaları yapılmış olmasına rağmen, gerekli ciddi onarım ve bakımların hiçbiri yapılmamıştır. Köprüde meydana gelen ciddi hasar belirtilerine rağmen hasarlı köprüye bitişik yeni bir köprü açılmış, tetkik edilen köprü'nün hizmette kalmasına izin verilmiştir. Ek trafik yükünün stresi ve ilave eklenen asfalt ağırlığı, köprü'nün taşıma kapasitesinin zayıflamasına sebep olmuştur.

Kilic, 2013 tarafından ayrıntılı olarak açıklanan böyle bir yaklaşım, tahribatsız tekniklerin bir kombinasyonunu açıklamaktadır: görsel inceleme, GPR, IBIS-S (interferometrik özelliklere sahip gelişmiş temassız bir radar tabanlı sensör sistemidir) ve Sonlu Elemanlar Modellemesi. Tam ve kapsamlı bir görsel inceleme de görünür donatı, köprü ayakları ve döşemesindeki önemli çatlaklar ve anormallikler gibi önemli dış yapısal bozulmayı tanımlamış ve yapısal kusurların yeri hakkında ön bilgi sağlamıştır. IBIS-S incelemesinde köprü sağlığını belirlemede, yük altında oluşan titreşimleri en doğru şekilde aktarmaktadır. Bu incelemede aşırı titreşimler ve yer değiştirmeler, köprü'nün sağlık durumunun çok önemli bir göstergesidir ve ayrıca bir yapının sağlığının bir risk oluşturup oluşturmadığını tahmin edebilecek bir ölçüdür. Başka bir araştırmada, incelenen köprü'nün kapsamlı bir sağlık değerlendirmesinde herhangi bir tam incelemede olduğu gibi, özellikle yoğun olarak kullanılan bir köprü'nün, her zaman gözle inceleme sonucunda bilgilerine ulaşılmamıştır (Hao, 2010). Bu nedenle, yapının sağlık durumunu belirlemek için, köprü gövdesinin iç yapısını, yani nem/su girişinin ve iç çatlakların ve özelliklerin doğru ayrıntılarını belirlemek için bir GPR araştırması yapılmıştır. Hao, 2010 aynı zamanda donatı korozyonunun doğru bir açıklamasını sağlayan bir veri analizi sunar.

Sonuç olarak, tetkik edilen köprü'nün tüm temel bileşenlerinin bozulması sonucunda yıkılmasına yol açmıştır. Sistematik olarak bir köprü sağlığı izleme yaklaşımı uygulandığında, yıkılmasının önlenilebileceği de açıktır. Böyle bir yaklaşım, yapının bir bölümü ile sınırlı olmadığı için, birçok tahribatsız teknik kombinasyonu yardımıyla olmalıdır.

2. Yöntem

Betonda donatı korozyonunun, araştırma köprüsünde olduğu gibi, nihayetinde yapısal bozulma ile sonuçlanabilecek betonarme yapıların erken bozulmasındaki ana faktör olduğu yaygın olarak bilinmektedir (Peng Han ve diğ., 2022; Li ve diğ.,2011). Bu korozyon, klorür iyonlarının girmesiyle çöktürülür. Böylece hızlı akan nehirler gibi zorlu çevre koşullarında bulunan yapılar için risk artar. Çatlak veya hasar görmüş yapılarda, klorür iyonları yapısal korumadan geçerek iyon konsantrasyonunun eşik değere ulaşmasına neden olarak, takviye donatıları çevreleyen alanda klorür kaynaklı korozyona neden olabilir. Korozyonun betonarme yapıları üzerindeki etkilerinin analizi esastır çünkü beton genellikle iç korozyona rağmen çatlama gibi herhangi bir dış hasar belirtisi göstermez. Betonarme donatı demirlerinin korozyon oranı da artan streslerle daha da artmaktadır (Enright ve Frangopol,1998).

Pek çok araştırmada, sırasıyla, betonarme köprü kirişlerinin dayanımının bozulmasını ve bir betonarme döşemesinin güvenilirliğini inceleyen (Stewart ve Rosowsky, 1998; Darmawan ve Stewart, 2007;Doğan 2008) tarafından geliştirilenler gibi korozyon modelleri üzerinde detaylı çalışmalar yapmıştır. Öngermeli donatıların hacimsel ve zamansal maksimum derinlik verilerini belirlemek için hızlandırılmış boşluk korozyonu (Haasl ve diğ.,1981) tarafından da incelenmiştir. (LeBeau ve diğ.,2007) bükölme ve kayma donatılarının boşluk korozyonunun mekanik davranışının ve yapısal güvenilirlik üzerindeki etkisinin daha ileri analizlerini yapmıştır. Korozyon işlemleriyle ilgili daha fazla bilgi için bu ayrıntılı incelemelere başvurulmalıdır. İncelenen köprünün korozyonunu etkileyen ana faktörlerin daha iyi anlaşılmasını kolaylaştırmak için burada sunulan model bilinçli olarak basitleştirilmiştir.

2.1. Yer Radarı İncelemesi ve Donanımı

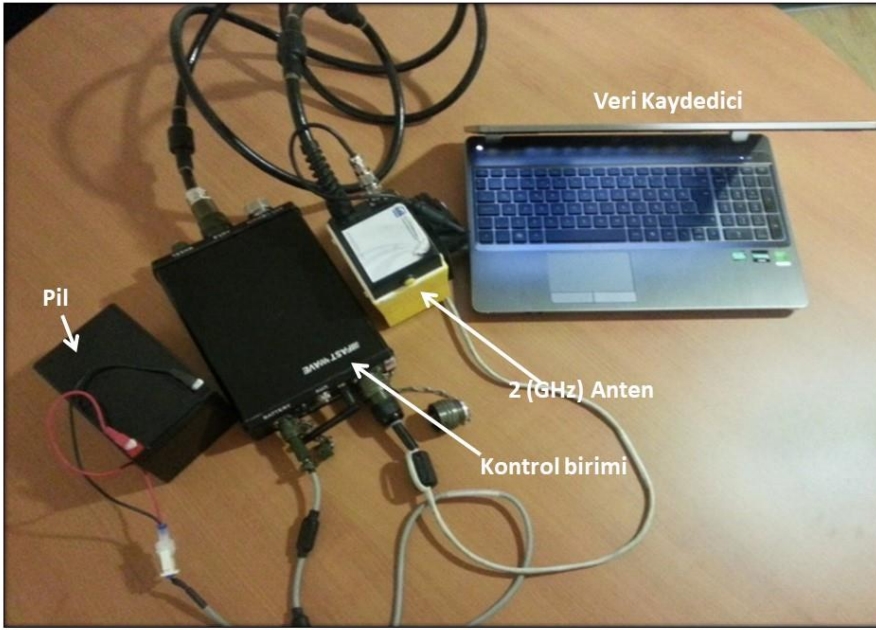
GPR yöntemi öncelikle yapıların sağlık durumlarını belirlemede, zemin yapısının çıkarılmasında, yüzeye yakın zemin birimlerin belirlenmesinde, deprem fay haritasını belirlemede, karstik boşluklarının bulunmasında, yeraltı su seviyesinin belirlenmesinde kullanılır (Li ve diğ., 2022; Asadi ve diğ., 2022).

Köprünün araştırması, GPR'ın köprünün belirli bölgelerinde bir kılavuz kâğıdı üzerine uygulanmasına dayanmaktadır. GPR ekipmanının kılavuz kâğıdında yatay ve dikey çizgileri boyunca aşamalı olarak hareket ettirerek, incelenen alan hem uzunlamasına hem de enlemesine olarak incelenmiştir. . Ekipman büyük GPR sistemlerinden oluşmadığı için, araştırmanın tüm yönlerini tek bir bölgeyi inceleyerek ele almak mümkün değildir. Bu nedenle, köprünün daha sağlıklı bir analizini gerçekteştirmek için birkaç küçük alanda araştırma yapılmıştır (şekil 9).



şekil 9. TR HF (2 GHz) Anteni kullanılarak köprü üzerinde GPR araştırması

Elde edilen verileri almak, izlemek ve kontrol etmek için K2 Fast-Wave yazılımı kullanılmıştır. Yazılım normal bir dizüstü bilgisayarla da uyumludur veyüksek kaliteli görüntüler ve tomografi haritaları elde etmek için 2 GHz frekanslı bir Tomography Resistivity High Frequency (TR HF) anteni kullanılmıştır. (şekil 10). Bu GPR ekipmanı, köprü hasarlarından sorumlu tüm faktörleri belirleme fırsatlar sunmaktadır.

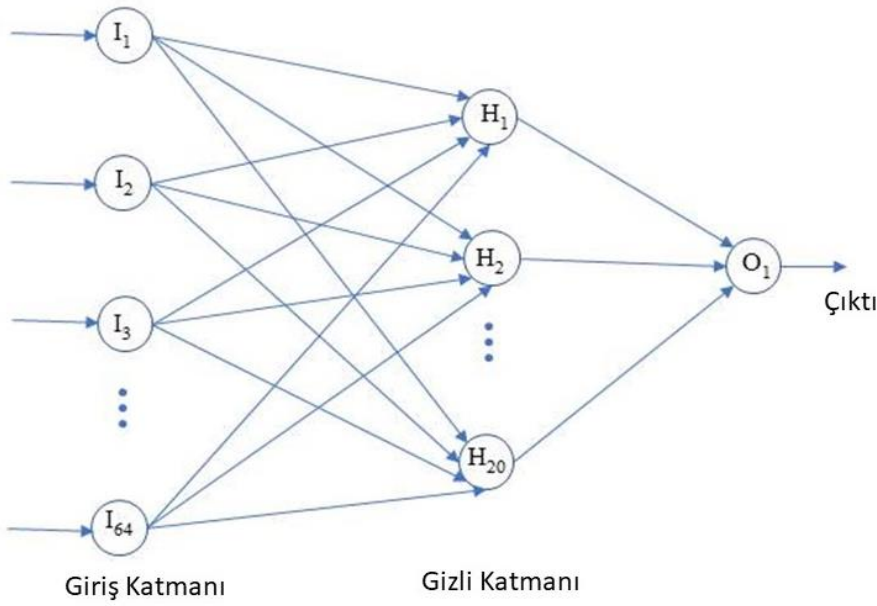


Şekil 10. TR HF (2 GHz) Anteni

Köprünün analizi, veri analizi yazılımı olan IDS GRED kullanılarak yapılmıştır. Analiz incelemesinin tamamı, veri toplama, sıralama ve seçilen verilerin analizini içeren birkaç adımdan oluşur. IDS GRED, donatının derin ve sığ konumlarını otomatik olarak toplayan ve kaydedilen verileri işlemeyen ve bir b-taraması gerçekleştirmeden önce geriye saçılan dalgaları analiz eden akıllı bir sistemdir. Fakat yeterli değildir, bu sebeple incelenen alanın dikey bir bölümünü örneklemek için sinir ağı tasarımı yardımıyla b-taraması azaltılmıştır. Sistem ayrıca kaydedilen verileri yatay ve dikey eksenlerden bir yüksek kaliteli tomografi haritasına toplayabilmektedir.

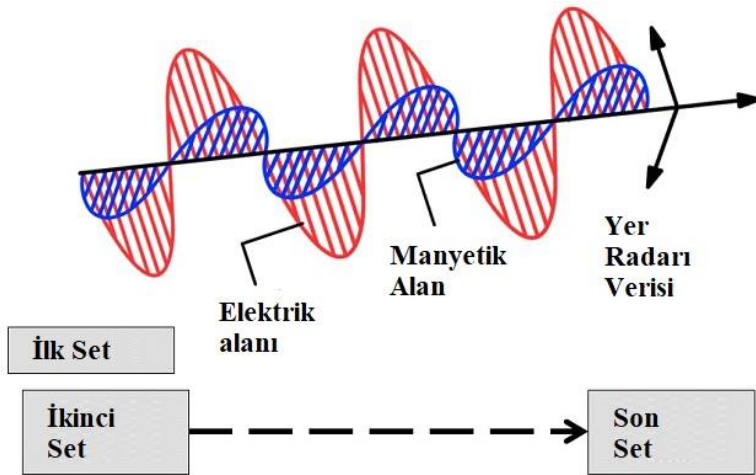
2.2.Sinir Ağı Tasarımı

Bu araştırmada ayrıca, Sinir Ağların saçılma elektro manyetik dalga gürültüsü içindeki tespitini yapmak için geri yayılma öğrenme algoritmasını uygulayarak nemi tespit edebilen Sinir Ağlar için tasarım teknikleri yer almaktadır. Giriş, gizli ve çıkış katmanlarından oluşan üç katmanlı Sinir Ağlar, Şekil 11'de görülebilir. Tartışılan teknikler, elektro manyetik dalgalarındaki gürültü içerisindeki belirli alanı belirlemeden önce nemi tespit etme potansiyeline sahiptir. Ek avantajlar gerçek zamanlı işleme, uyarlanabilirlik ve Sinir Ağı eğitimi içerir.



Şekil 11. Giriş, gizli ve çıkış katmanlarından oluşan basit bir Sinir Ağı

Bu ağ tamamen bağlantılı, ileri beslemeli bir Sinir Ağıdır. Uygulamadan önce, en uygun boyuttaki Sinir Ağının, gizli katman sayısı ve her gizli katmandaki gizli nöronların sayısı konusunda kararlar alınmalıdır. Bu tartışmada (Chen ve diğ.,2010; Frein ve Richard, 2011), tek bir gizli katmanın ve 20 gizli nöronun gerekli olan maksimum değer olduğunu düşünmektedir. Doğrulama amacıyla, Sinir Ağı eğitilmiştir ve ortaya çıkan ağ test edilmektedir. Tatminkâr olmayan sonuçların yetersiz bir eğitim seti veya oyundaki aşırı sayıda nöron olması nedeniyle olduğu düşünülmektedir. Daha sonra gerekli ayarlamalar yapılır ve test tekrarlanır. Bu düzen tatmin edici bir doğrulama seti elde edilinceye kadar devam eder.



Şekil 12. Sinir Ağı'nın blok şeması

Köprü'nün incelenen çeşitli bölgelerinde bölümlere ayrılan GPR taramasından elde edilen veriler Sinir Ağına dahil edilmiştir (Şekil 12). Sinir Ağına giriş sinyali oluşturmak için ham bir veri kullanılmıştır; veriler 64 örnek ve iki ardışık set arasında bir örnektir. İlk set, GPR verilerinin başlangıcından elde edilmiştir ve bir sonraki adım, ilk setin sağındaki bir örnektir. Bu kalıp, setteki 1.700 GPR verisinin tüm örneklerini kaplayana kadar kopyalanmıştır.

GPR verileri Sinir Ağına girdi ve çıktı olarak tespit edilmiştir (hatalı) veya tespit edilememiştir (sağlıklı) olarak ikili bir karardır. Her 10 metrede bir veri toplayarak köprüye GPR anketi uygulanmıştır. Görsel inceleme tarafından hatalı olarak etiketlenmiş dört konum vardır ve bunların üçü Sinir Ağı'nı eğitmek için kullanılmıştır. Kalan on altıdan yedisi eğitim için sağlıklı veriler olarak seçilmiştir. Dördüncü hatalı durum ve kalan dokuz

örnek test için kullanılmıştır. Sinir Ağı, dördüncü hatalı durumda ve bir başka numunede (görsel olarak kontrol edilemeyen başka bir yerde) boşluk / nem tespit edilmiştir.

GPRGPR verileri Sinir Ağına dahil edildiğinde, gizli nöronların her çıktısı giriş düğümlerinin ağırlıklı bir toplamıdır ve yanlılık düğümü bir hiperbolik teğet fonksiyonundan geçer (Şekil 11). Gizli nöron'un $y_j, j=1 \dots L$, Sinir Ağı'nın sonucu,

$$y_j = \phi\left(\sum_{i=1}^M x(i)w_{ji}^h + \theta^j\right) \quad (2.1)$$

ϕ (yanlılık), L 20, M 64'tür ve gizli ve çıkış katmanı için aktivasyon fonksiyonu, ϕ (yanlılık), olarak tanımlanmış, $\phi()$, bir teğet hiperbolik fonksiyondur.

$$\phi(y) = \frac{e^y - e^{-y}}{e^y + e^{-y}} \quad (2.2)$$

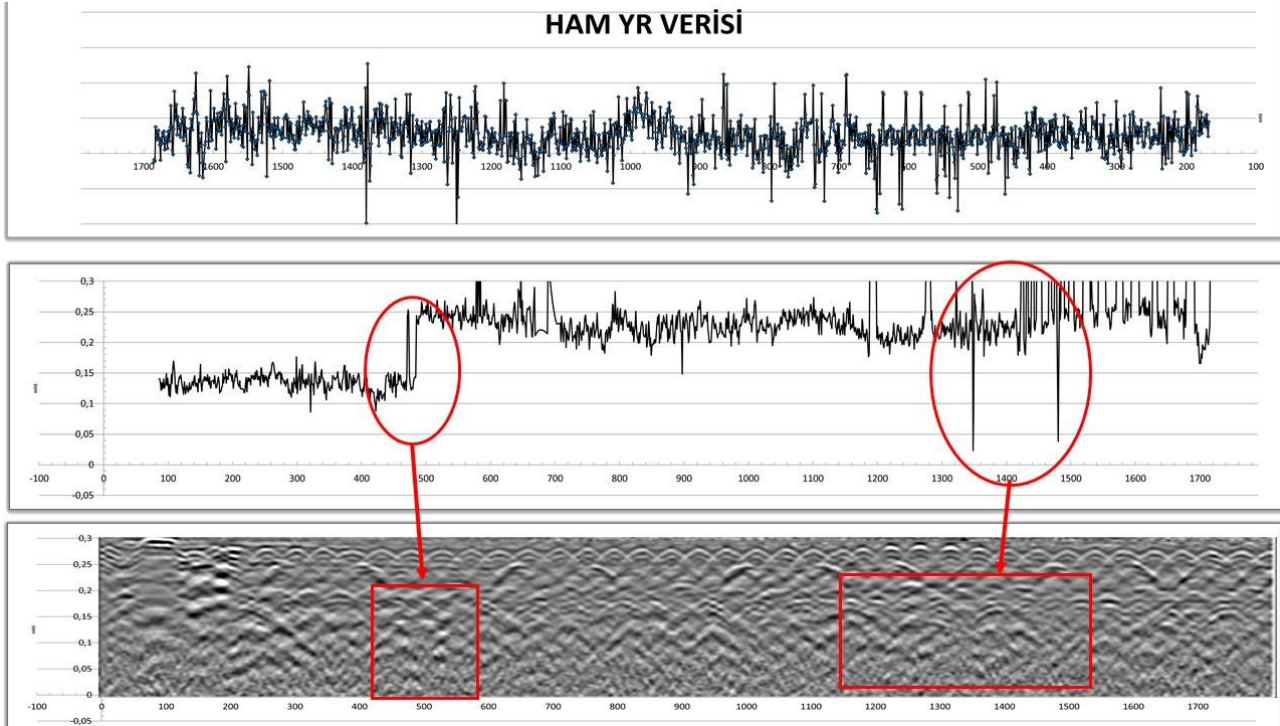
$x(i)$ terim, GPR verisini içeren girişi w_{ji}^h temsil ederken, j^{th} gizli nöronun i^{th} giriş nöronuna olan ağırlığıdır. Sinir Ağı'nın gerçek çıktısı, tüm gizli nöronların ve önyükleme düğümünün ağırlıklı toplamıdır; bu, daha sonra her bir girdi değeri seti için istenen çıktı ile zıtlık oluşturur. Bu çıkışlar arasındaki herhangi bir tutarsızlık bir Sinir Ağı hatası olarak tanımlanır, bu durumda Sinir Ağı'nın ağırlıkları bu çıkış hatasının gradyanı kullanılarak güncellenir (Shi ve diğ.,2011; Li ve diğ.,2010).

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Yer Radarı Sonuçları

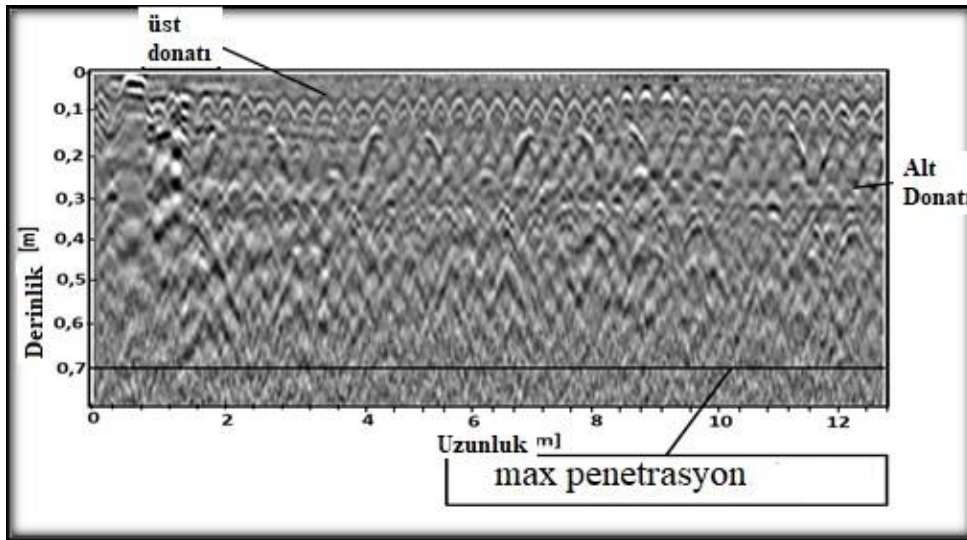
Köprünün incelemesi yalnızca GPR incelemesine dayanmakla kalmıyor, aynı zamanda görsel analizleri de yapılmıştır. GPR sonuçları, somut bozulma, su sızıntısı, taşıyıcı sistemlerde büyük çatlaklar ve donatı korozyonu dahil olmak üzere birtakım nedenlerini ortaya koymuştur. Görsel inceleme ayrıca köprü gövdesi yüzeyinde bozulma olduğunu da gösterilmektedir.

Ham GPR profil verisinden işlenmiş radar profiline geçiş yapılırken Sinir Ağı, düşük frekanslı veya yüksek frekanslı GPR verilerini alacak şekilde tasarlanmıştır. Burada, düşük frekanslı veriler yüzeyde düşük çözünürlük sağlar, ancak daha fazla derinlik bilgisi sağlarken yüksek frekanslı veriler yüzeyde daha yüksek çözünürlük sağlar ancak daha düşük derinlik bilgisi verir. Farklı frekanslar için, boşlukların / nemin saçılma özellikleri oldukça farklı olsa da, test durumlarında ayırım belirgin olarak gözlenmiştir (Şekil 13).



Şekil 13. Ham radar profil verisinden işlenmiş radar profiline geçiş yapılırken uygulanan işlem

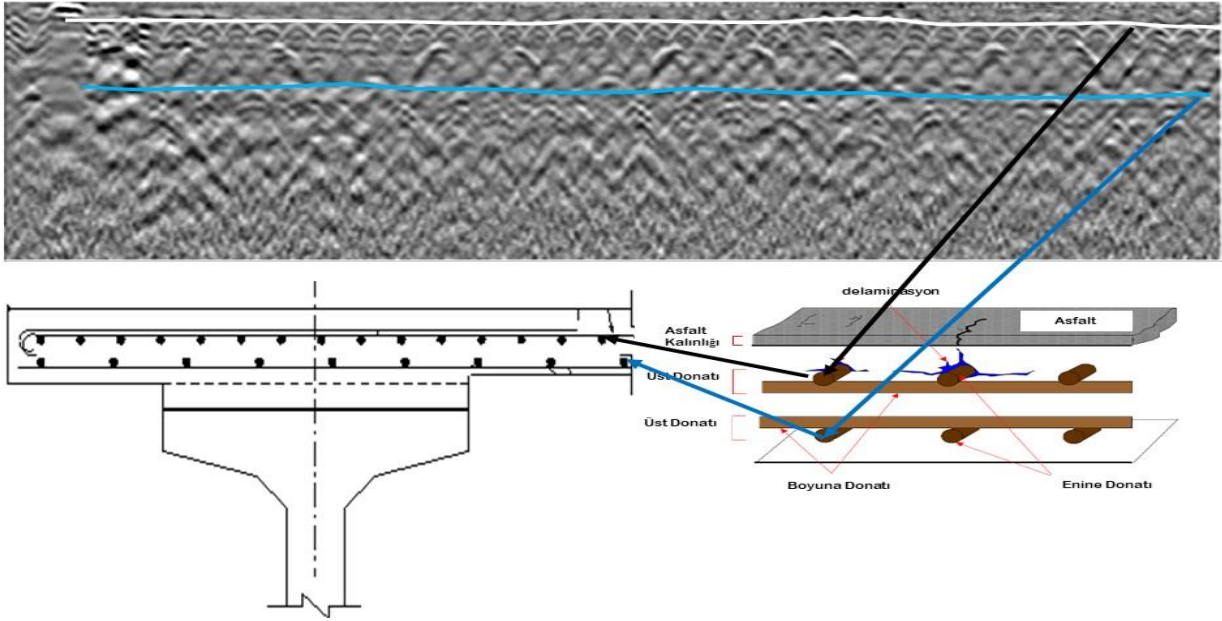
İncelemede ayrıca köprünün 70 cm ölçümünün altındaki 5-10 cm arasındaki üst donatı, 30 cm altında alt donatı konumlarının da aşırı nem penetrasyonundan etkilendiğini ortaya çıkarılmıştır. Bu sonuçlar veri toplama ve köprü ve kompozisyonun tüm yönlerinin analizinden elde edildiklerinden (son derece) güvenilir olarak kabul edilir (Şekil 14).



Şekil 14. İşlenmiş 2GHz veri ve daha derin penetrasyonlu köprünün araştırılmasından elde edilen muhtemel açıklamalar (yorumlama)

Yukarıda bahsedildiği gibi, köprünün çeşitli yapısal özelliklerini incelemek için bir TR HF anteni kullanılmıştır. Migrasyon yöntemine dayalı olarak, beton içindeki tahmini yayılma hızı (V), yaklaşık olarak 0.12 m/ns olmuştur ve buna karşılık gelen nispi dielektrik sabiti 6,3'tür. Anten ayrıca 70 cm altındaki alt yüzey katmanlarının kompozisyonunun araştırılmasına da izin vermiştir (Şek. 13). GPR görüntüleri analiz ederek, donatı çubuğunun tam boyut ve konumunu belirlemek mümkün olmuştur. GPR taramasından elde edilen

veriler, alt ve üst donatı konumlandırmalarını analiz etmek için de kullanılmıştır (Şekil 15) (Koşaroğlu vd. 2016 ve Taştan vd. 2017).



Şekil 15. GPR radargramından inşaat demiri konumu (Kilic 2013)

Her ne kadar beton kaplama kalınlığının inşaat demiri korozyonu üzerinde minimum etkiye sahip olduğu düşünülse de, artan kalınlık nehir sedimentinin aşınmasına karşı etkili olduğu ve bu nedenle dalgalanmaya maruz kalan korozyon akımı yoğunluğunu azaltmıştır. Beton kaplama kalınlığı zamanla aşınırken, korozyon akımı yoğunluk değeri artmıştır ve bu da etkili izleme ve bakımın aşırı önemini gösterir. Bu çalışma, köprü döşemesi üzerine eklenen asfalt kalınlığını belirlemede (ölü yükün artması), alt ve üst donatıların konumlarını belirlemede, ve donatılarda korozyon olup olmadığını saptama da araştırma yapılmadığının altını çizen betonarme köprü çöküşü hakkında çok az sayıda rapordan biridir.

4. Sonuçlar

İnceleme neticesinde, köprünün yıkılmasının iki ana nedeninin kontrolsüz asfalt kalınlığının artması ve dere yatağı seviyesindeki doğal değişiklikler olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun yanında, köprü yatağı silt ve kumdan oluşan yüksek yoğunluktaki su akımının yatak katmanının içinden yayılmasına maruz kalmıştır.

GPR'ye dayalı incelemede, donatının konumları tam olarak belirlenmiştir. GPR araştırmasının bulguları ve görsel analiz, kapsayıcı sonuçları çıkarmak için birleştirilmiştir. İnceleme sadece köprünün yıkılmasının sebeplerini değil, aynı zamanda yapı kusurlarını göstermek için mühendislerin hibrid analiz tekniklerini benimseme ihtiyacını da vurgulamaktadır. Sadece GPR verileri köprünün mevcut sağlık durumunu ortaya koymaya yeterli değildir. Yıkılan köprünün incelenmesi neticesinde, mega yapı tasarımı için mühendislerin GPR gibi ileri teknikler kullanmalarının yıkılma faktörlerini büyük ölçüde azaltacağı sonucuna varılabilir.

Çalışmamız, köprünün yıkılmasında rol oynayan iki önemli noktayı ortaya çıkarmaktadır: Bunlardan biri uygun muayene tekniklerinin önemidir. Ötekisi ise yapıların yaşlanmadan önce derin incelemelerinin yapılması gereğidir. Bu çalışmada her iki yön de incelenmiştir. Saha incelemesi sırasında, önemli yapısal bozuklukların çökmeye neden olduğu tespit edilmiştir. Yapıdaki temelleri aşındıran su kaymaları, yapıya eklenen fazla yüklenmeden dolayı köprü taşıyıcılığının zayıflaması ve donatıların köprü ayaklarının temelindeki aşınmasıdır. Yazar, bu yapısal başarısızlıkları belirlemede potansiyeli olan basit bir metodoloji önererek, gözle inceleme (yüzeysel ve gözlemlenebilir hataları tanımlamak için) ve GPR taraması (gözle inceleme ile erişilemeyen köprünün iç yapısında bulunan yapısal elamanları veya kusurları ortaya çıkarmak için) kapsamlı bir sağlık değerlendirmesi sistemi önermektedir. Bu nedenle, bu çalışma, tetkik edilen köprünün değerlendirmesini ve hizmet ömrü tahmini için basit, karmaşık olmayan bir güvenilirlik analiz sistemi sunmaktadır. Bu yöntem, büyük olasılıkla saha araştırması tarafından belirlenen yapısal bozulma nedeniyle, çöken köprü için düşük

güvenilirlik indeksini tanımlamıştır. Ayrıca, köprülerin yıkılma olasılığını etkileyen iki önemli faktörün önemli betonarmede kaplama kalınlığı ve hareketli yükün yoğunluğu olduğu tespit edilmiştir. Bu özel durumlarda, mevcut trafik yoğunluk oranı, ek takviye, iyileştirici etki ile azaltılabilir. Bu makalede, incelenen köprünün yıkılmasının sadece bir ön değerlendirmesi yapılmıştır fakat yine de bazı temel nedenleri tanımlayamamaktadır. Dünyada binlerce betonarme köprü vardır, Türkiye'de 6765 köprü (KGM, 2012; Hao, 2010'a göre) ve birçoğunun bu yazıda tartışılan yıkılmaya maruz kalma ihtimalleri vardır. Bu nedenle bu çalışma, köprü yapılarının daha fazla araştırılmasını ve analiz edilmesini teşvik etmeyi amaçlamaktadır.

Teşekkür:

Yazar, önemli öneri, kapsamlı inceleme, destek, rehberlik, büyük ilham ve bu yazı için önemli katkılar için Karayolları Genel Müdürlüğünden emekli, rahmetli babası Cemil Kılıç'a minnettedir.

Çıkar Çatışması:

Yazar çıkar çatışması bildirmemiştir.

Kaynaklar

- Asadi P., Gindy M., Alvarez M., Asadi A., (2020), *A computer vision based rebar detection chain for automatic processing of concrete bridge deck GPR data*, Automation in Construction, Volume 112, 103106, ISSN 0926-5805, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103106>.
- Benmokrane, B., El Salakawy, E. F., El Ragaby, A., Desgagné, G. ve Lackey, T. (2004). *Design, construction and monitoring of four innovative concrete bridge decks using non corrosive FRP composite bars*. Annual Conference & Exhibition of the Transportation Association of Canada. Québec, Canada.
- Brandimarte, L., Paron, P., Di Baldassarre, G. (2012). *Bridge pier scour: A review of processes, measurements and estimates*. Environmental engineering and management journal. 11. 10.30638/eemj.2012.121.Cao R., Agrawal A.K., El-Tawil S., 2021, Overheight impact on bridges: A computational case study of the Skagit River bridge collapse, Engineering Structures, Volume 237, 2021, 112215, ISSN 0141-0296, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112215>.
- Peng Han, Guofu Qiao, Bingbing Guo, Dongsheng Li, Jinping Ou, 2022, *Investigation of the low-frequency stray current induced corrosion on reinforced concrete infrastructure in high-speed rail transit power supply system*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 134, 2022, 107436, ISSN 0142-0615, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107436>.
- Chen, X.-j., Gao, Z.-f., Ma, Y.-e., and Guo, Q., *Application of Wavelet Analysis in Vibration Signal Processing of Bridge Structure*, 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), Vol. 1, March 13–14, 2010, pp. 671–674, doi: 10.1109/ICMTMA.2010.95.
- Darmawan M. S., Stewart M. G., 2007, *Spatial time-dependent reliability analysis of corroding pretensioned prestressed concrete bridge girders*, Structural Safety, Volume 29, Issue 1, 2007, Pages 16-31, ISSN 0167-4730, doi: <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2005.11.002>.
- Deng L., Cai C.S., (2010), *Bridge Scour: Prediction, Modeling, Monitoring, and Countermeasures*, Review, Practice Periodical on Structural Design and Construction, 15, 125–134., doi/abs/10.1061/%28ASCE%29SC.1943-5576.0000041
- DeNoto G. *Bridged repair of large ventral hernia defects using an ovine reinforced biologic: A case series*, Annals of Medicine and Surgery, Volume 75, 2022, 103446, ISSN 2049-0801, doi: <https://doi.org/10.1016/j.amsu.2022.103446>.
- Doğan A. E., (2008). *Effects Of Collars on Scour Reduction at Bridge Abutments*”. (Mas. Sc. Thesis), Metu, Ankara, <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/3/12610203/index.pdf>
- Enright, M. P., and Frangopol, D. M. (1998). *Probabilistic analysis of resistance degradation of reinforced concrete bridge beams under corrosion*. Eng. Struct., 2011, 960–971., ISSN 0141-0296, doi: [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00190-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00190-9).
- Frein de, R. and Rickard, S. T., 2011, *The Synchronized Short-Time-Fourier-Transform: Properties and Definitions for Multichannel Source Separation*, in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 59, no. 1, pp. 91-103, Jan. 2011, doi: 10.1109/TSP.2010.2088392.
- Haasl, D., Roberts, N., Vesely, W., and Goldberg, F., (1981). *Fault Tree Handbook*, U.S. Nuclear Regulatory

- Commission, Washington D.C.
- Hao S., (2010), I-35W *Bridge Collapse*, Journal of Bridge Engineering, 608-614-15-5, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000090](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000090)
- KGM, General Directorate of Highways, 2012, *Republic of Turkiye, General Directorate of Highways, Site Collection Documents, KGM documents*, Istatistikler, Kopru ve Tunel Bilgileri, 2012.
- Kilic G., 2016, *Applications of Ground Penetrating Radar (GPR) to Detect Hidden Beam Positions*, Journal of Testing and Evaluation, 0090-3973 (IF = 1.162) (Category: Q3)
- Kilic G. , Caner A. (2021) *Augmented reality for bridge condition assessment using advanced non-destructive techniques*, Structure and Infrastructure Engineering, 17:7, 977-989, doi: 10.1080/15732479.2020.1782947
- Kilic Gokhan, 2013, (Doktora Tezi) *Application of Advance Non-destructive techniques for Bridge Health Assessment*, PhD Dissertation, 2013, University of Greenwich
- Kosaroglu, Sinan; Bilim, Funda; Tastan, Erkan. (2016). *Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Binasının Yer Radarı (GPR) Yöntemi ile Hasarsız İncelenmesi*. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. 5. 10.17798/beufen.90389.
- LeBeau, K.H. and Wadia-Fascetti, S.J., (2007). *Fault Tree Analysis of Schoharie Creek Bridge Collapse*, Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 21, No. 4, pg. 320-326. (2007)., doi: [doi/abs/10.1061/%28ASCE%290887-3828%282007%2921%3A4%28320%29](https://doi.org/10.1061/%28ASCE%290887-3828%282007%2921%3A4%28320%29)
- Li R.W., Cao D.S., Wu H., Wang D.F., (2021). *Collapse analysis and damage evaluation of typical simply supported double-pier RC bridge under truck collision*, Structures, Volume 33, 2021, Pages 3222-3238, ISSN 2352-0124, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.041>.
- Li, F., Yuan, Y., Li, C. Q., (2011). *Corrosion propagation of prestressing steel strands in concrete subject to chloride attack*, Construction and Building Materials, Volume 25, Issue 10, 2011, Pages 3878-3885, ISSN 0950-0618, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.011>.
- Li, J., Jiang, T., Grzybowski, S., and Cheng, C., (2010). *Scale dependent wavelet selection for de-noising of partial discharge detection*, in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 17, no. 6, pp. 1705-1714, Dec. 2010, doi: 10.1109/TDEI.2010.5658220.
- Liu Z., Gu X., Wu W., Zou X., Dong Q., Wang L., (2022) *GPR-based detection of internal cracks in asphalt pavement: A combination method of DeepAugment data and object detection*, Measurement, Volume 197, 111281, ISSN 0263-2241, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111281>.
- Melville, B.W., and Coleman, S.E. (2000). *Bridge Scour*, Water Resources Publications, LLC, Colorado, ABD. ISBN 13: 978-1-887201-18-6
- Parrillo, R. ve Roberts, R. (2006). *Bridge Deck Condition Assessment using Ground Penetrating Radar*. ECNDT Geophysical Survey Systems. North Salem, NH, USA. ECNDT - Tu.4.2.5
- Rhazi, J., Dous, O., Ballivy, G., Laurens, S. & Balayssac, J. P. (2003). *Non-destructive health evaluation of concrete bridge decks by GPR and half cell potential techniques*. 6th International Conference on Nondestructive Testing in Civil Engineering. Berlin
- Shi, G., Chen, X., Song, X., Qi, F., and Ding, A., (2011) *Signal Matching Wavelet for Ultrasonic Flaw Detection in High Background Noise*, IEEE Trans. Ultrason. Ferr., Vol. 58, No. 4, pp. 776–787. DOI:10.1109/TUFFC.2011.1870
- Stewart, M. G., and Rosowsky, D. V. (1998). *Time-dependent reliability of deteriorating reinforced concrete bridge decks*, Structural Safety, Volume 20, Issue 1, 1998, Pages 91-109, ISSN 0167-4730, doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-4730\(97\)00021-0](https://doi.org/10.1016/S0167-4730(97)00021-0).
- Taştan, E. , Koşaroglu, S. & Bilim, F. (2017). *Identifying of structural elements of building using Ground penetrating radar (GPR): A case study of the Cumhuriyet University, Turkey* . Bitlis Eren University Journal of Science and Technology , 7 (1) , 22-26 . doi: 10.17678/beuscitech.295134
- Wolforst J. and Annandale G. (1998) *Channel Degradation due to Gravel Mining: Application of Geomorphic Analysis and Sediment Transport Modeling Approaches*, Proceedings: Unique Functional Consideration for Wetland Restoration, ASCE., doi: [abs/10.1061/40382%281998%29167](https://doi.org/10.1061/40382%281998%29167)
- Web. *Çaycuma Köprüsünün Çökmesi Üzerine Görüşler* [http://www.tkc.org.tr/ documents/caycuma.pdf](http://www.tkc.org.tr/documents/caycuma.pdf). Erişim Tarihi: 29.10.2016.
- Yanmaz, A. M., Caner A. (2012). *Çaycuma Köprüsünün Çökmesi Üzerine Görüşler*. Türkiye Köprü ve İnşaat Cemiyeti", (2012)