NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2021; 10(1): 284- 300

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Araştırma / Research

Tarihi Şenkaya Yünören Köprüsünün deprem performansının incelenmesi

Earthquake performance of historical Şenkaya Yünören Bridge

Oğuzhan Çelebi[1], Abdulkadir Cüneyt Aydın[1,*]

[1]*Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye*

Özet

Türkiye Erzurum İli Şenkaya İlçesinde yer alan Yünören Köprüsünün, Türkiye'de yaşanmış büyük depremler etkisinde performansının belirlenmesi ve köprünün güçlendirilmesi için mevcut yöntemler kullanılarak çalışma yapılmıştır. Çalışmada, SAP2000 paket programı ile köprü üç boyutlu olarak modellenmiş ve yine analiz sonuçları bu programdan alınmıştır. Analiz sonuçlarına göre, köprü ayaklarının ileri hasar seviyesinde ve ana taşıyıcı kirişlerinin ise göçmenin önlenmesi hasar seviyesinde olduğu gözlemlenmiştir. Yapıdaki hasarları en aza indirgemek için, yapıda doğrusal olmayan yer değiştirmelerin yoğun olduğu kirişlerin dönme merkezine sismik sönüm cihazı yerleştirilmiştir. Ayrıca, ek güçlendirme yöntemi olarak kirişlerin deprem esnasında düzlem dışı burkulmasını önlemek için, kirişler yanal stabilite bağlantılarıyla desteklenmiştir. Elde edilen yapının üç farklı durumu, analiz edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yanal stabilite bağlantılarıyla oluşan yapının sünek davranış gösterdiği ve sismik sönüm cihazı yerleştirilen tasarımda da yapının benzer şekilde belirgin hasar düzeyinde kaldığı gözlemlenmiştir. Yapının oluşabilecek deprem esnasında göçmeden ayakta durabilmesi için tasarımı yapılan şekliyle güçlendirilmesi gerektiği kanısına varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Çelik köprü, Onarım ve güçlendirme, Performans analizi

Abstract

This sentence needs rephrasing: Turkey Erzurum Province, located in the district of Şenkaya Yunoren Bridge, experienced major earthquakes in Turkey have been studied using the present method for determining the effect of performance and strengthening the bridge. In the study, the bridge was modeled in three dimensions with the SAP2000 package program, and the analysis results were obtained from this program. According to the analysis results, it was observed that the building columns were at the advanced damage level and the main carrier beams were at the damage level to prevent collapse. In order to minimize the damages in the structure, a seismic damping device was placed in the center of rotation of the beams where non-linear displacements are intense. Another strengthening method is to support the beams with lateral stability connections to prevent out-of-plane buckling of beams during earthquakes. Three different situations of the obtained structure were analyzed, and the results were compared. It was observed that the structure formed by the support of the beam with lateral stability joints displayed a ductile behavior and remained at an obvious damage level and the structure in which the seismic damping device was installed remained at the level of obvious damage. It has been concluded that the building should be strengthened in order to stand without collapse during an earthquake.

Keywords: Steel bridge, Repair and strengthening, Performance analysis

1 Giriş

Günümüzde kültürel öneme sahip tarihi yapılar, geçmiş medeniyetimizi anlamada bizlere öncülük etmektedir. Tarihi yapıların, doğal afetlerden veya herhangi bir durumdan göçmeden ayakta durabilmesi için, mimari ve tarihi yapısı bozulmadan restorasyonunun ya da onarım güçlendirilmesinin yapılması gerekmektedir. Çalışmada konu edinilen Yünoren çelik köprüsünün, 1900'lü yılların başında Ruslar tarafından, yaya ve yük arabaları geçişi için Erzurum Şenkaya Bölgesinde inşa edildiği tahmin edilmektedir. Günümüzde köylüler tarafından rulmanın üstüne su kanalı yapılarak kullanılmaktadır. Tarihte birçok göçlere, savaşlara ve doğal afetlere maruz kalan bölgelerden biri olan Şenkaya'da yer alan köprü birçok medeniyete ışık tutmaktadır. Tüm bu sebeplerle kültürel mirasın korunması ve yaşanabilecek büyük depremde köprüde ağır hasarların oluşmaması için köprünün deprem performans analizi yapılmıştır.

Çelik köprü geniş mesafelere yayılan kemer şeklinde olması ve geometrik formu nedeniyle basınç kuvvetlerine maruz kalmaktadır [1]. Tarihi köprülerin birçoğu büyük depremlere maruz kalsa da ayakta durabilmeyi başarmıştır [2]. Çalışmada konu edilen köprü bugüne kadar büyük depremlere maruz kalmasına rağmen ayakta durabilmiştir. Ancak, köprüde yapılan gözlemler sonucunda kirişlerin ve kolonların yanal öteleme yaptığı görülmektedir. Yapı analizinden önce köprünün geometrik yapısı, malzeme ve maruz kaldığı kritik yüklerin bilinmesi gerekmektedir [3]. Bunların yanı sıra köprüde oluşan çatlaklar, ezilmeler, deformasyonlar ve sünmeler hesaba dahil edilmelidir [4]. Tüm bu etkilerin temsil edilmesi için Türkiye Çelik Yapılar Yönetmeliği 2016'da tanımlanan dayanım ve rijitlik azaltılması dikkate alınmıştır [5]. Yapıların analizinde üç ana kriter olan mukavemet, rijitlik ve stabilite durumları bu çalışmada göz önünde bulundurulmuştur [4].

Yukarıda ifade edilen tüm durumları analitik modelde temsil edilebilmesi için SAP2000 programında köprünün üç boyutlu modeli oluşturulmuş ve yapı elemanlarına yükler aktarılmıştır [6]. Yapıda oluşan tüm olumsuz durumları temsil eden model bu çalışmada hasarlı köprü olarak tanımlanmıştır. Tarihi yapıların performansının belirlenmesi için literatürde önerilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi kullanılmıştır [7]. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre yapıda bir takım güçlendirme prensipleri önerilmiştir. Yapı analizinde Türkiye'de yaşanmış büyük şiddetli depremlerden olan Erzincan Depremi, Erzurum Horasan Depremi ve Van Depremi verileri kullanılmıştır. Yapılan

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail acaydin@atauni.edu.tr (A.C. Aydın)
Geliş / Recieved: 12.10.2020 Kabul / Accepted: 25.11.2020 Yayımlanma / Published: 15.01.2021
doi: 10.28948/ngmuh.809490

incelemeler sonucunda bu depremlerin karakteristiklerinin, köprünün üzerinde bulunduğu zemin yapısına uygun olduğu tespit edildiğinden ve bölgeye yakın alan kaynaklı olmasından dolayı bu deprem verileri çalışmada tercih edilmiştir [8].

Deprem etkisi altında olan çelik köprünün karşılaşabileceği büyük depremler altında göçmeden belirgin hasar düzeyinde kalabilmesi için bu çalışmada çelik köprüye bir takım yapısal kontrol ve güçlendirme işlemleri uygulanmıştır. Çelik köprü ilk olarak ASCE41-13 standartlarına uygun 3 boyutlu modellenerek sabit, hareketli ve deprem yükleri altında değerlendirilmesi yapılmıştır [9]. Daha sonra çelik köprüye tipik bir viskoz sönümleyici yerleştirilerek tekrar performansı değerlendirilmiştir. Viskoz sönümleyici olarak FEMA273 standartlarına göre yapının kritik sönümünün %20'si olarak hesaplara dahil edilmiştir [10]. Diğer güçlendirme olarak ise, yanal burulmalı burkulma sorunu yaşayan ana taşıyıcı kirişler yanal stabilite bağlantı elemanlarıyla ve kiriş gövdesi düşey ara rjitlik levhalarıyla desteklenmiştir. Bu güçlendirme yönteminde gövdede yerel burkulma sorununun giderilmesi için gövdeye berkitme levhası sürekli olarak kaynatılarak gövdenin kalınlığı arttırılmıştır. Hasarlı köprü, sismik sönüm cihazı ile güçlendirilmiş köprü ve levha ile stabilite elemanlarıyla desteklenmiş köprü olarak üç farklı model için doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler yapılmıştır. Çelik çerçevelerde deprem enerjisinin önemli bir kısmı kolon, kirişler ve çapraz bağlantı elemanlarında oluşan plastik mafsallarla sönümlendiği kabul edilerek çelik köprüdeki tüm elemanlar plastik mafsallı olarak modellenmiştir. Çelik çaprazlara eksenel olarak çalışan mafsal, kirişlere eğilme momenti olarak çalışan mafsal ve kolonlara ise eksenel, eğilme momenti olarak çalışan plastik mafsallar tanımlanmıştır [11]. Çalışmada köprünün performansının değerlendirilmesinde Denklem 1'de ifade edilen yük kombinasyonu kullanılmıştır [13].

$$G + Q + E \tag{1}$$

Denklem 1'de ifade edilen G çelik köprüde, çelik elemanların ve beton döşeme kaplamasının oluşturduğu yükü, Q hareketli yükü ve E ise zaman tanım alanında hesap için kullanılan deprem kayıtlarının en büyüğünün zamanla değişen yük tanımını temsil etmektedir. Hasar oluşabilecek taşıyıcı elemanların mevcut dayanımları hesaplanarak, yukarıda ifade edilen yük birleşiminin bu yapı elemanlarında oluşturacağı iç kuvvetler mukayese edilmiştir. Güçlendirme işlemlerinin de elemanlarda oluşan iç kuvvetlerinde ne kadar değişiklik yaptığı açıklanmıştır. Üç farklı modelli köprüde, depremlerin oluşturduğu iç kuvvetler, taban kesme kuvvetleri, tepe deplasmanları mukayese edilerek tartışılmıştır. Depremlere karşı köprünün üç farklı durumunun ivme-zaman ve yer değiştirme-zaman hikayeleri elde edilmiştir. Doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre köprünün göçmeden yapabileceği plastik deformasyon kabiliyetlerinin yanı sıra köprü elemanlarının yapabileceği plastik dönmeler hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Elemanların yapacağı kalıcı yer değiştirme ve kalıcı dönmelere göre köprünün hasar seviyeleri belirlenmiştir [6].

2 Materyal ve metot

Bu bölümde, çelik köprü yapısının geometrik özellikleri, çelik köprüyü oluşturan yap elemanlarının statik ve geometrik bilgileri, yapı elemanlarının mevcut dayanımları ve kesit karakteristikleri, Türkiye Çelik Yapılar Yönetmeliğine göre sunulmuştur [5]. Çelik köprü yerinde incelenerek rölevesi elde edilmiştir. Çelik yapının üç boyutlu modeli ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizi bilgisayar tabanlı SAP2000 programı ve depremlerin spektrumlarının, frekans tanım alanında sonuçları için MATLAB programı yöntem olarak kullanılmıştır. Hasar alan yapıyı güçlendirmek için hazırlanan güçlendirme detayları TEKLA structures programında çizilmiştir [12].

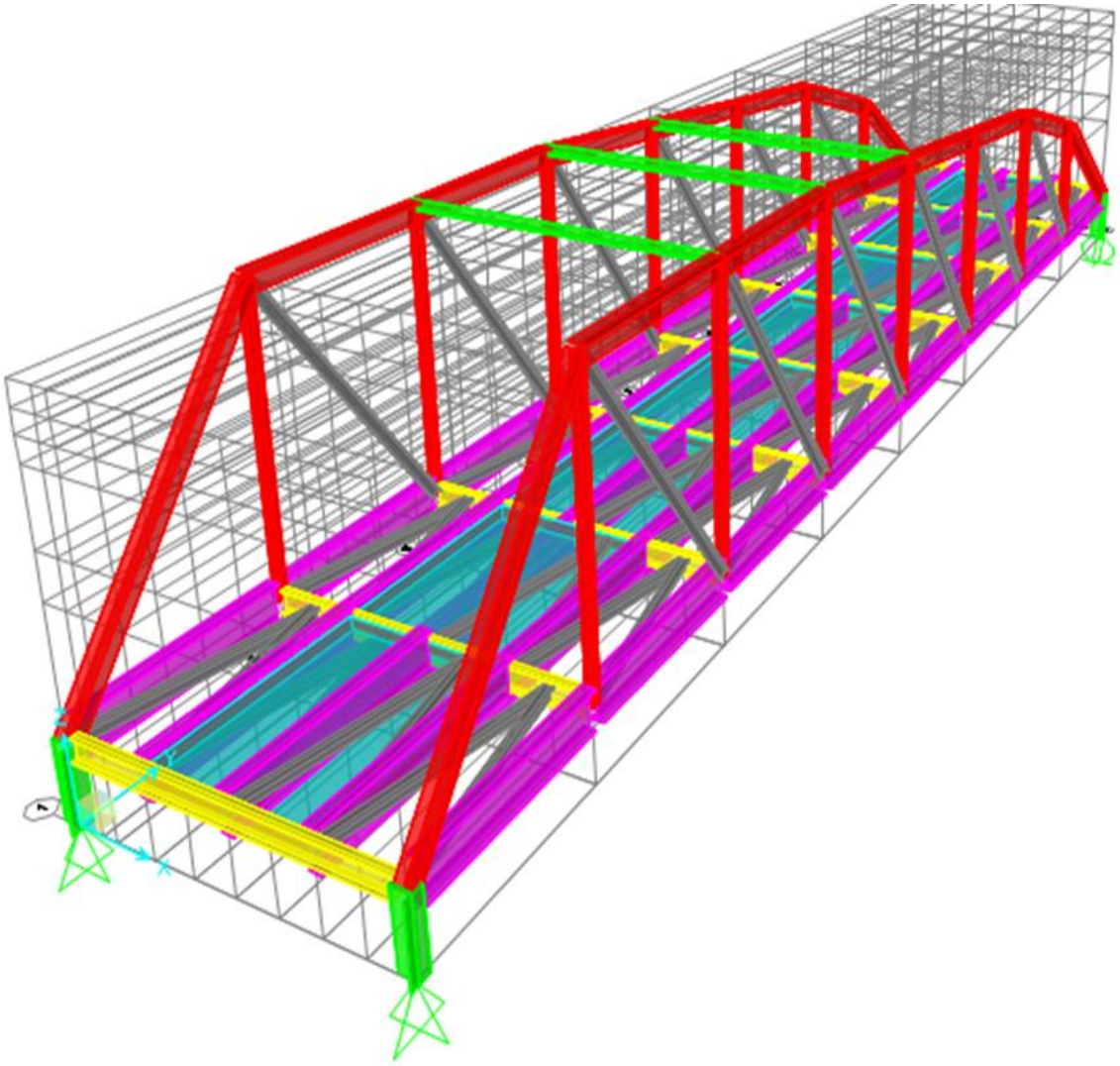
2.1 Çelik köprü bilgileri

Erzurum Şenkaya İlçesi Yünören Mahallesinde inşa edilen tarihi köprü göze alınan Y yönünde 34 m ve X yönünde 6 m açıklığa sahiptir. Betona gömülü olan kolonların yüksekliği 1.35 m'dir. Kemer köprünün makas kirişlerini oluşturan ana dikme profilinin maksimum yüksekliği 5.42 m'dir. Şekil 1'de çelik köprünün 3 boyutlu modeli ve çelik köprünün tasarımında kullanılan profillerin bilgisi Tablo 1'de sunulmuştur. Çelik köprünün görüntüleri Şekil 2a ve Şekil 2b'de sunulmuştur. Köprüde profillerin öz ağırlıklarının yanı sıra, su kanalı olarak yapılan betonun ağırlığı ve köprünün günümüze kadar maruz kaldığı hareketli yükler dikkate alınmıştır. Hareketli yük kolon ve ana taşıyıcı kirişlere 5 kN/m^2 olarak dağıtılmıştır [6]. Çelik köprüde tüm profiller birbirine lama demirleri yardımıyla perçinli olarak birleştirilmiştir.

2.2 Yapı elemanlarının mevut dayanımlarının ve kesit karakteristiklerinin belirlenmesi

Geçmişte yaşanan depremlerden yola çıkılarak, köprülerde deprem sonrası oluşabilecek hasarlar göz önünde tutulmuştur. Depremin oluşturduğu yanal etkilere karşı kirişlerin güçlü eğilme momenti dayanımı sağlayabilmesi için kirişlerin kompakt geniş başlıklı kesitlerden oluşturulması gerekmektedir. Yine deprem etkisinde kolonlarda gevrek kırılmayı önlemek için kolonlarda oluşacak burkulmanın akma bölgesinden sonra oluşması için uygun kompakt ve narin olmayan kesitlerin seçilmesi gerekmektedir. Çaprazların deprem etkilerine karşı sönüm özelliği gösterebilmesi için çaprazlarda sünek tasarımın yapılması gerekmektedir. Eleman sünek davranış yapmadan burkulmaması için çapraz elemanı oluşturan başlıkların narin olmaması gerekmektedir. Dolayısıyla çelik köprüyü oluşturan yapı elemanlarının kompakt ve narin olmayan kesitlerden seçilmesi daha uygun olacaktır [11].

Çelik köprüde elemanların mevcut dayanımlarının belirlenmesinde referans alınacak yapı elemanları Şekil 3'te sunulmuştur. Yapı elemanlarının mevcut eksenel basınç dayanımları, eğilme momenti ve kesme dayanımları Türkiye Çelik Yapılar Yönetmeliğine göre hesaplanmıştır [5].



Şekil 1. Çelik köprü üç boyutlu modeli [15].



(a) (b)

Şekil. 2. Çelik köprü görüntüleri (a) çelik köprünün rulman üstü görüntüsü ve (b) çelik köprünün rulman altı görüntüsü

Referans alınan yapı elemanlarının başlık ve gövde yerel burkulmaları, kirişlerde oluşması muhtemel yanal burulmalı burkulma sorunları yine bu yönetmeliğin önermiş olduğu narinlik, kompaktlık ve yanal burulmalı burkulma sınır değerlerine göre belirlenmiştir [5].

Referans alınan yapı elemanlarında depremli yük birleşimlerinin çelik köprünün üç farklı durumunda oluşturduğu iç kuvvetler bu mevcut dayanımlarıyla mukayese edilmiştir. Deprem performans analizi yapılmadan önce, yapı elemanlarında oluşacak doğrusal olmayan şekil değiştirmeleri temsil edilebilmesi açısından yine bu yönetmelik kapsamında elemanların etkin eğilme, eksenel ve kayma rijitlikleri 0.80 katsayısıyla çarpılarak azaltılmıştır. Bu azaltmalar sonucu elemanlarda oluşan iç kuvvetleri, yapı elemanlarının mevcut dayanımlarının karşılaması gerekmektedir. Aksi takdirde yapının performans analizine gerek kalmadan, yapıda stabilite göçmesi muhtemel olacaktır [5].

2.2.1 Kolonlar

Başlık genişliği 400 mm, gövde yüksekliği 380 mm, gövde ve başlık kalınlığı 20 mm olan T en kesitli kolonun eksenel basınç dayanımı çelik yapılar yönetmeliğine göre aşağıda belirtilen denklemlerle hesaplanmıştır [5].

$$P_n=F_{cr}A_g \quad (2)$$

Burada Pn eksenel basınç dayanımı ve YDKT 'ye (yük ve dayanım katsayılarına göre tasarım) göre karakteristik eksenel basınç dayanımı Denklem 3'e göre belirlenecektir

$$P_c = \phi_c P_n \quad (3)$$

Burada ϕc güvenlik katsayısı olmak üzere, basınç elemanlarında 0.90 olarak alınır. Fcr kritik burkulma gerilmesi ve Ag ise kayıpsız net en kesit alanı olarak tanımlanmıştır. Kritik burkulma gerilmesinin hesabı için Çelik Yapılar Yönetmeliği basınç elemanları için iki kriter sunmuştur;

$$\frac{L_c}{i} \leq 4.71\sqrt{\frac{E}{Fy}} \text{ olduğunda } F_{cr} = (0.658^{\frac{Fy}{Fe}})Fy \quad (4)$$

$$\frac{L_c}{i} > 4.71\sqrt{\frac{E}{Fy}} \text{ olduğunda } F_{cr} = 0.877Fe \quad (5)$$

Bu denklemlerde E yapısal çeliğin elastisite modülü ve Fy ise yapı elemanlarında kullanılan çelik malzemesinin akma dayanımıdır. Burada E=200000MPa ve Fy ise 235 MPa olarak alınmıştır. Fe ise yapısal çelik elemanın elastik burkulma gerilmesidir. T en kesitli elemanlar için eğilmeli burkulma sınır durumu dikkate alınarak şöyle hesaplanacaktır;

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(\frac{L_c}{i})^2} \quad (6)$$

Bu denklemde Lc kolonun burkulma boyu olmak üzere Lc=KL olarak hesaplanacaktır. K burada burkulma katsayısı (kolonun yanal ötelenip ötelenmeme durumuna göre) ve L ise kolonun boyudur. Lc/i oranı narinlik oranını vermekle birlikte 200 değerini asla aşmamalıdır.

Kolonun güçlü ve zayıf eksenlerindeki atalet momentleri sırasıyla 28333.33 cm^4 ve 10693.33 cm^4olarak hesaplanmıştır. Kesitin en kesit alanı 160 cm^2'dir. Bu durumda güçlü ve zayıf eksendeki atalet yarıçapları sırasıyla 13.30 cm ve 8.17 cm olarak elde edilmiştir.

Kolonun statik bilgileri ve yukarıdaki denklemler kullanılarak kolonun eksenel basınç dayanımı 1485.6 kN olarak hesaplanmıştır.

Kolon kesitinin narinlik sınır değerleri aşağıda belirtilen denklemlere göre elde edilmiştir.

T en kesit profilin başlığının narin olmaması için başlık/kalınlık oranı aşağıda belirtilen sınır değerini aşmayacaktır.

$$0{,}56\sqrt{\frac{E}{Fy}} \quad (7)$$

T en kesit profil gövdesinin narin olmaması için gövde/kalınlık oranı aşağıda belirtilen sınır değerini aşmayacaktır.

$$0{,}75\sqrt{\frac{E}{Fy}} \quad (8)$$

T en-kesit profil başlığının ve gövdesinin kompakt olabilmesi için, sırasıyla başlık/kalınlık ve gövde/kalınlık değerinin aşağıda belirtilen sınır değerlerini aşmayacaktır.

$$0{,}38\sqrt{\frac{E}{Fy}} \quad (9)$$

$$0{,}84\sqrt{\frac{E}{Fy}} \quad (10)$$

Kolonun başlık/kalınlık ve gövde/kalınlık oranları;

$$\frac{b}{2tf} = \frac{400}{2x20} = 10$$

$$\frac{h}{tw} = \frac{380}{20} = 19$$

Başlık için narinlik sınır değeri, $0.56\sqrt{\frac{E}{Fy}} = 0{,}56\sqrt{\frac{200000}{235}} = 16.33$

Gövde için narinlik sınır değeri, $0.75\sqrt{\frac{E}{Fy}} = 21.88$

Başlık için kompaktlık koşulu, $0.38\sqrt{\frac{E}{Fy}} = 11.08$

Gövde için kompaktlık koşulu, $0.84\sqrt{\frac{E}{Fy}} = 24.50$

Bu durumda kolonun başlığı ve gövdesi narin olmayan kompakt kesittir.

Kolon için kesme dayanımı aşağıda belirtilen denklemle hesaplanmıştır.

$$Vn= 0{,}6FyAwCv1 \quad (11)$$

Aw kolonun gövde kesit alanı, Cv1 ise Türkiye Çelik Yapılar Yönetmeliğinde tanımlanan kayma dayanımı katsayısı olmak üzere güvenli bölgede kalınması için 1.0 olarak alınmıştır. Kolonun kayma dayanımı 1128 kN olarak hesaplanmıştır.

T en kesitler için eğilme momenti dayanımı şöyle hesaplanacaktır.

Akma anındaki eğilme momenti dayanımı,

$$My = FyWex \quad (12)$$

Plastik bölgedeki maksimum eğilme momenti dayanımı,

$$Mp = FyWpx \quad (13)$$

Denklemlerdeki Wex, güçlü eksendeki elastik kesit mukavemet momenti olmak üzere T en kesit profil için 1287.83 cm3 ve Wpx ise güçlü eksendeki plastik kesit mukavemet momenti olmak üzere 1923.00 cm^3 olarak hesaplanmıştır.

$$My = FyWex = 235x1287830 = 302.64\ KNm$$

$$Mp = FyWpx = 235x1923000 = 451.90\ KNm$$

2.2.2 *Makas kirişler*

Başlık genişliği 35 cm, başlık kalınlığı 1cm, gövde yüksekliği 39 cm ve gövde kalınlığı 1 cm olan T en kesitli makas kirişleri için narinlik ve kompaktlık sınır değerleri incelenmiştir.

b/2tf=350/2x10=17.5>16.33

h/tw=390/10=39>21.88

T en kesit profilin hem gövdesi hem de başlığı narin olduğundan dolayı makas kirişleri yerel burkulmaya uğrayacaktır. Profilin başlığı ve gövdesi levha elemanlar ile desteklenmesi gerekmektedir.

Makas kirişinin çekme dayanımı Denklem 2-6 kullanılarak 1708.4 kN olarak hesaplanmıştır.

2.2.3 *Ana taşıyıcı kirişler*

Eğilme etkisinde bulunan I en kesitli ana taşıyıcı kirişin narinlik ve kompaktlık sınır değerleri incelenerek kiriş başlığının kompakt ve narin olmayan kesit olduğu, kiriş gövdesinin ise narin ve kompakt olmayan gövde olduğu belirlenmiştir.

b/2tf=250/2x20=6.25<16.33

h/tw=500/20=25>21.88

Kiriş yanal burulmalı burkulma davranışı sergilememesi için yanal stabilite elemanlarıyla yanal olarak desteklenecektir. Yanal olarak desteklenmeyen uzunluk, gövdede düşey ara rijitlik levhaları belirli aralıklarla yerleştirilerek azaltılacaktır. Kiriş için eğilme momenti dayanımı yanal burulmalı burkulma sınır durumu, basınç başlığı yerel burkulma sınır durumu ve çekme başlığı akma sınır durumu için hesaplanacak eğilme momenti dayanımlarının en küçüğü olarak hesaplanacaktır.

Yanal burulmalı burkulma sınır durumu için eğilme momenti dayanımı,

$$Mn = RpgFcrWexc \quad (14)$$

Burada Rpg eğilme momenti dayanımı azaltma katsayısı olmak üzere şöyle hesaplanacaktır,

$$Rpg = 1 - \frac{a_w}{1200 + 300a_w}\left(\frac{h_c}{t_w} - 5.7\sqrt{\frac{E}{Fy}}\right) \leq 1.0 \quad (15)$$

$$a_w = \frac{h_c t_w}{b_{fc} t_{fc}} \leq 1.0 \quad (16)$$

Denklem 14'te Fcr kritik burkulma gerilmesini ifade etmektedir. Yanal olarak desteklenen uzunluk Lb'ye göre aşağıdaki gibi belirlenecektir.

$L_b < L_p$ olduğunda bu sınır durumun göze alınmasına gerek kalmayacaktır.

$L_p < L_b < L_r$ olduğunda Fcr şöyle hesap edilecektir;

$$Fcr = Cb\left[Fy - (0.3Fy)\left(\frac{Lb - Lp}{Lr - Lb}\right)\right] \leq Fy \quad (17)$$

$Lb > Lr$ olduğunda Fcr;

$$Fcr = \frac{Cb\pi^2 E}{\left(\frac{Lb}{i_t}\right)^2} \leq Fy \quad (18)$$

Lr ve Lp kirişin sınır uzunluklarını temsil etmekte olup aşağıda belirtilen denklemlerden elde edilecektir.

$$Lp = 1.1i_t\sqrt{\frac{E}{Fy}} \quad (19)$$

$$Lr = \pi i_t\sqrt{\frac{E}{0.7Fy}} \quad (20)$$

Denklem 17'de ki Cb moment düzeltme katsayısını ifade etmektedir. Güvenli bölgede kalabilme açısından 1.0 olarak alınacaktır.

Kirişin yanal olarak desteklenmeyen uzunluğu 6.5 m'dir. Etkin atalet yarıçapı 6.84 cm'dir.

$$Lp = 1.1i_t\sqrt{\frac{E}{Fy}} = 1.1x6.84x\sqrt{\frac{200000}{235}} = 2.19m$$

$$Lr = \pi i_t \sqrt{\frac{E}{0.7Fy}} = \pi x 6.84 x \sqrt{\frac{200000}{0.7x235}} = 7.49m$$

$L_p < L_p < L_r$ olduğundan dolayı kirişte yanal burulmalı burkulma sınır durumu dikkate alınacaktır. Bu durumda Fcr 177.67 N/mm^2 olarak hesaplanmıştır.

Eğilme momenti dayanımı azaltma katsayısı 0.75 olarak hesap edilmiştir. Kiriş kesitinin basınç başlığı için elastik kesit mukavemet momenti Wexc 5188420 mm3 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda yanal burulmalı burkulma sınır durumu için eğilme momenti dayanımı,

$$Mn = RpgFcrWexc = 0.75x177.67x5188420 = 479.35\ kNm$$

Kiriş kesitinin başlığı kompakt olduğundan dolayı, basınç başlığında herhangi bir burkulma olmayacaktır. Basınç başlığında ve çekme başlığında akma sınır durumunda eğilme momenti dayanımı yanal burulmalı burkulma sınır durumunda hesaplanan eğilme momenti dayanımından daha büyük olacağından kiriş kesitinin eğilme momenti dayanımı 479.35 kNm olarak alınacaktır.

Kiriş kesitinin kesme kuvveti dayanımı Denklem 11 kullanılarak şöyle hesaplanmıştır;

$$Vn = 0.6FyAwCv1 = 0.6x235x(500x20)x1.0 = 1410\ KN$$

2.2.4 *Makas kirişleri arası çaprazlar*

Çelik köprüde çaprazlar çekme etkilerine karşı dayanım gösterdiği için çapraz elemanın çekme dayanımı hesaplanmıştır. Çaprazların birleşimi kaynak ile yapıldığından dolayı alan kaybı olmayacaktır. Bu durumda akma sınır durumunda çaprazların eksenel çekme dayanımı hesaplanacaktır. Çaprazlarda birleşim kaynak ile yapıldığından dolayı çekme etkisinde kırılma sınır durumu incelenmeyecektir [5]. Çekme etkisinde çapraz elemanın narinlik değeri 300 değerini aşmayacaktır [5].

$$\frac{KL}{i} < 300 \qquad (21)$$

Çok parçalı çekme elemanının x yönlü atalet yarıçapı 7.76 cm ve y yönlü atalet yarıçapı 3.94 cm olarak hesaplanmıştır. Çapraz elemanın boyu 6.25 m olmak üzere güvenli bölgede kalınması açısından burkulma boyu KL=6.25 m olarak alınacaktır.

$$\frac{KL}{i_{min}} = \frac{625}{3.94} = 158.62 < 300$$

Çapraz elemanın en kesit alanı Ag, 6180 mm^2'dir. Bu durumda çekme dayanımı,

$$Tn = FyAg = 235x6180 = 1452.3\ KN \qquad (22)$$

$$\phi Tn = 0.75x1452.3 = 1089.22$$

Çapraz elemanın başlık narinliğinin belirlenmesi Denklem 23'e göre yapılmaktadır.

$$\frac{b}{t} < 0.45\sqrt{\frac{E}{Fy}} \qquad (23)$$

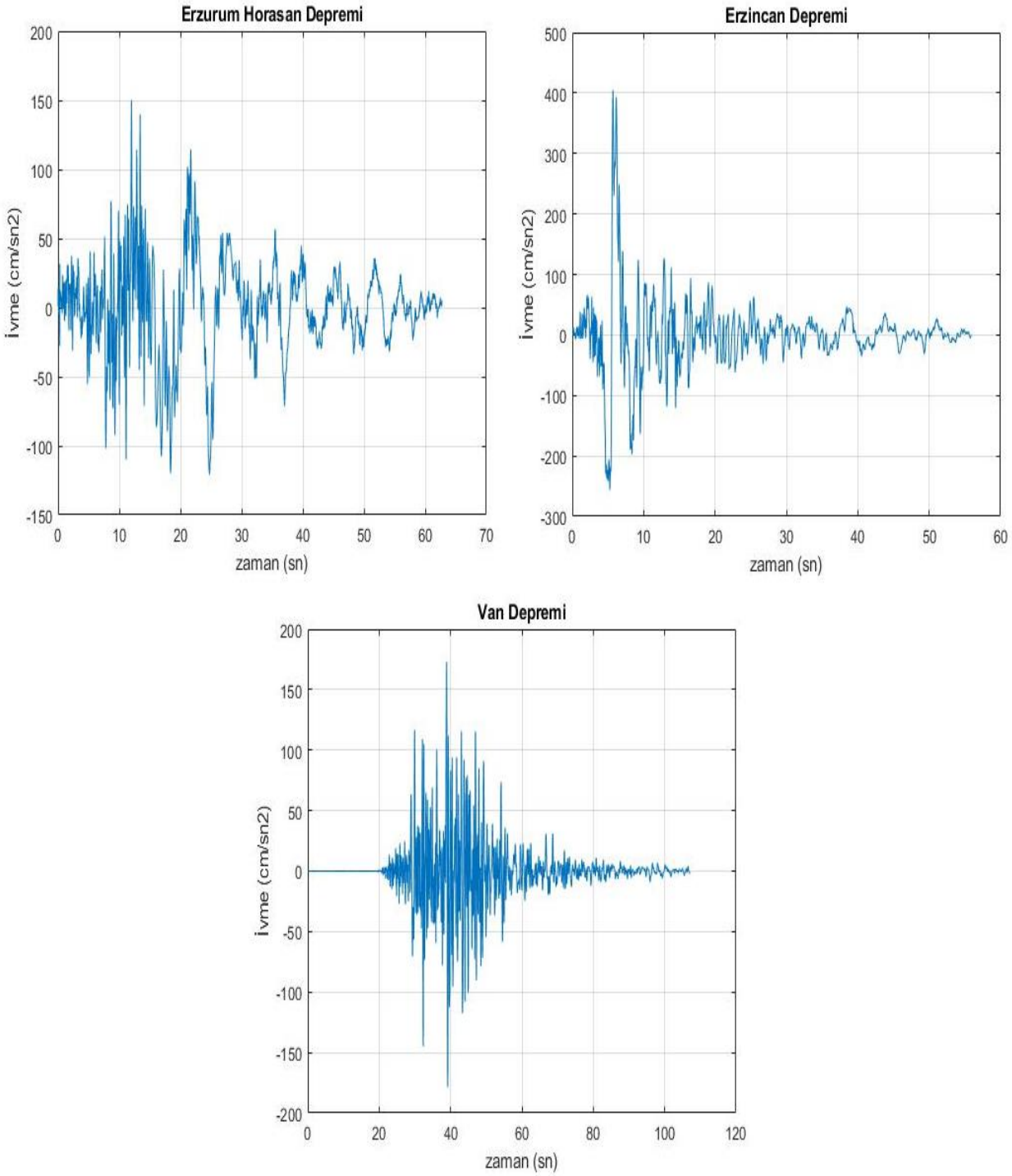
$\frac{200}{16} = 12.5 < 0.45\sqrt{\frac{200000}{235}} = 13.2$ olduğundan dolayı çapraz elemanın başlığı narin değildir.

Çelik yapılar yönetmeliğinde doğrusal olmayan yer değiştirmelerin temsil edilebilmesi için yapı elemanlarının eğilme, kesme ve eksenel rijitliklerinin 0.80 ile çarpılarak azaltılması gerektiği vurgulanmıştır. Bunun dışında zamana bağlı olarak yapı elemanlarında oluşan sünme etkilerini hesaba katılabilmesi için bu rijitlikler ayrıca 0.90 ile çarpılarak azaltılacaktır [6]. Toplamda 0.72 katsayısı ile yapı elemanlarının mevcut dayanımları çarpılarak, depremin yapı elemanlarında oluşturduğu iç kuvvetler mukayese edilecektir.

2.3 *Çalışmada kullanılan deprem bilgisi*

Aktif fay hattı bölgesinde bulunan çelik köprünün deprem yükleri altında analizleri için, Türkiyede bugüne kadar yaşanmış en büyük depremlerden üçü olan Erzincan Depremi (1992), Erzurum Horasan Depremi (1983) ve Van Depremi (2011) kayıtları kullanılmıştır. Üç farklı deprem verisinin verisinin bu çalışmada kullanılmasının nedeni, bu depremlerin çıkış kaynağının Şenkaya'da bulunan fay hatlarına benzer özellikler içermesidir. Bunun yanı sıra bu depremler çelik köprünün konumlanmış olduğu bölgeye en yakın alan kaynaklı depremler olması çalışmada bu üç deprem verisinin kullanılmasını sağlamıştır. Çalışmada kullanılmış depremlerin bilgileri Tablo 2'de ve depremlerin ivme-zaman eğrileri Şekil 4'te sunulmuştur [8].

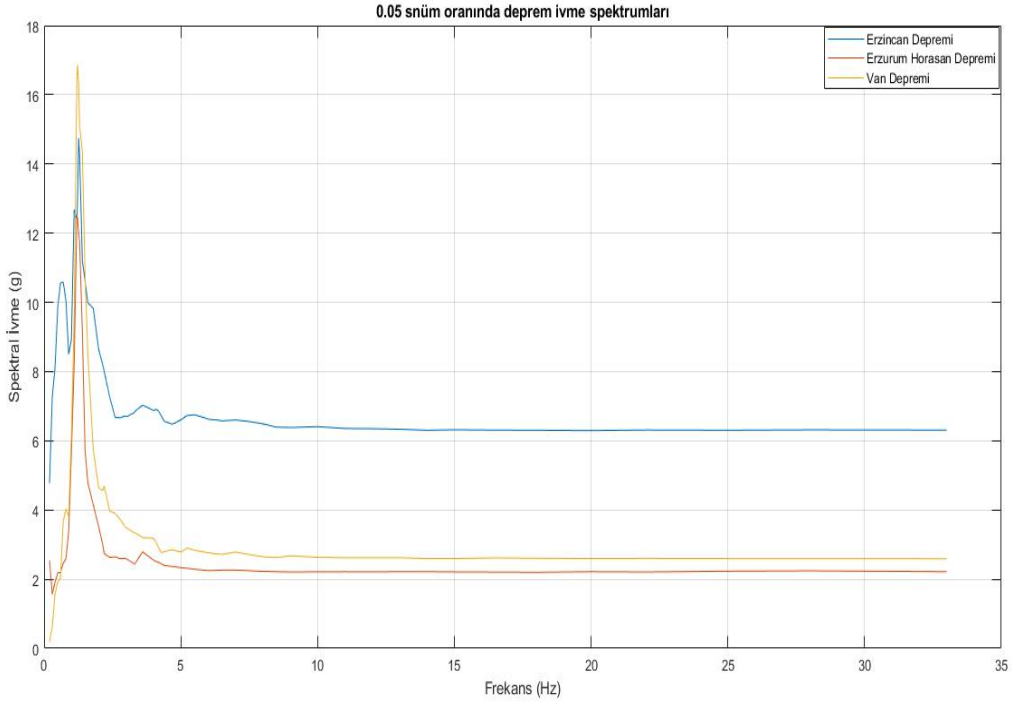
Zaman tanım aralığı dt=0.01 sn olarak depremlerin ivme zaman grafikleri çizdirilmiştir. Erzurum Horasan Depreminin 0-25 sn aralığında, Erzincan Depreminin 0-10 sn aralığında ve Van Depreminin 30-45 sn aralığında en büyük yer hareketini gerçekleştirdiği görülmektedir. Deprem kayıtlarının çelik köprünün zaman tanım alanı analizinde kullanılması için ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Çelik köprünün zemin bilgisine ve depremi sönümleyebilme karakteristiklerine göre depremlerin ölçeklendirilmesi Şekiller 5-7'de sunulmuştur. Çelik yapı sistemlerinin deprem enerjisini sönümleme oranı 0.05 olarak kabul edilmektedir. Ancak, yapının gerçek sönümünün belirlenebilmesi için yapıya, ivmeölçer cihazlarla zorlanmış titreşim hareketi uygulanmaktadır. ASCE-41 şartnamesinde, viskoz sönümleme cihazı yerleştirilen çelik yapının sönüm oranının kritik sönümün %20'si kadar alınabileceği ifade edilmiştir.



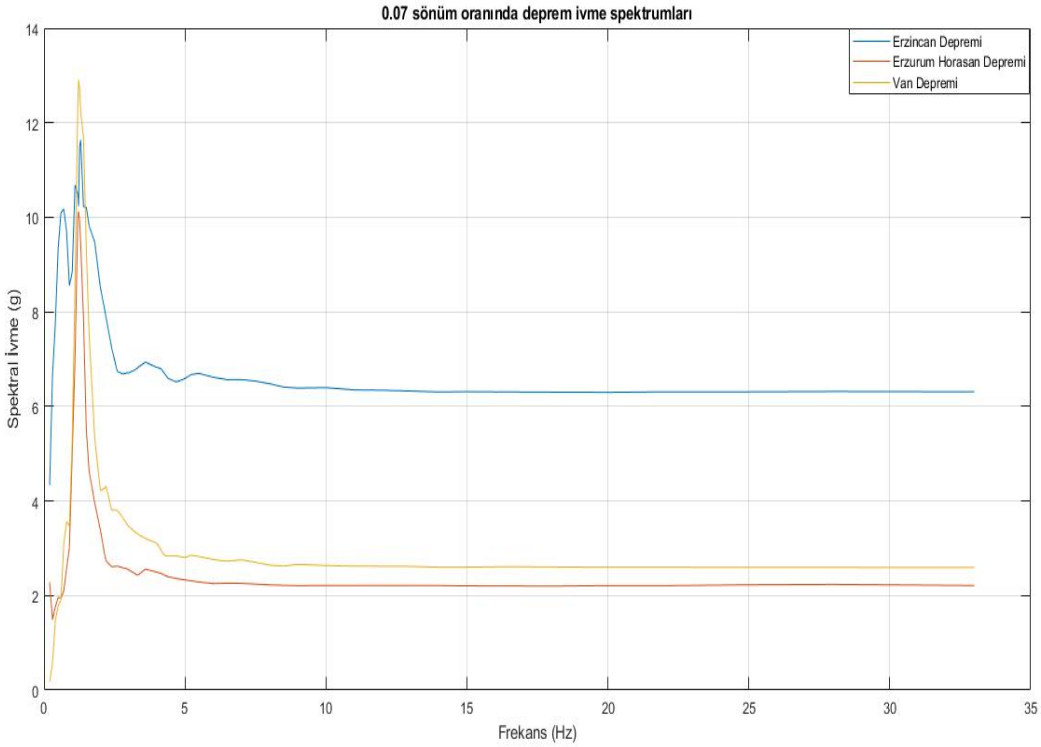
Şekil 4. Deprem yer hareketleri

Tablo 1. Çalışmada kullanılan deprem yer hareketi bilgileri [8]

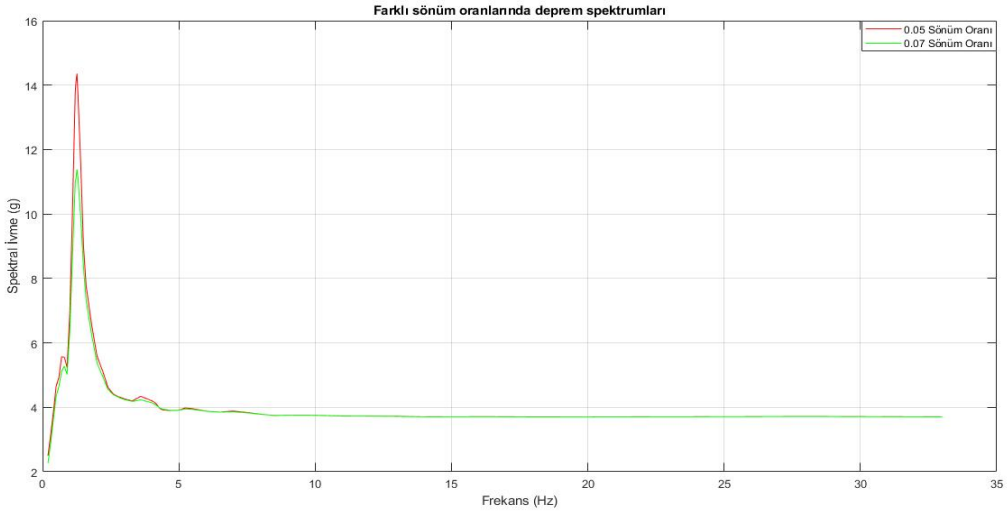
Depremler	Tarih	İstasyon	PGA (cm/sn^2)	Depremin Şiddeti
Erzincan Depremi	13.3.1992	Erzincan Merkez Meteoroloji Müdürlüğü	470.92	6.1 ML
Erzurum Horasan Depremi	30.10.1983	Erzurum Horasan Meteoroloji Müdürlüğü	173.29	6.0 ML
Van Depremi	23.10.2011	Van Muradiye Meteoroloji Müdürlüğü	178.5	6.7 ML



Şekil 5. 0.05 sönüm oranında deprem ivme spektrumu



Şekil 6. 0.07 sönüm oranında deprem ivme spektrumu



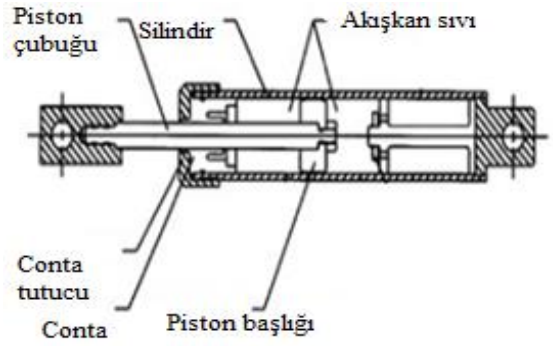
Şekil 7. Farklı sönüm oranlarında deprem ivme spektrumları

Bu durumda sönüm oranları 0.05 ve 0.07 olan yapının deprem spektrum eğrileri elde edilerek sunulmuştur [14]. Şekil 4,5,6 ve 7'de görüldüğü gibi yapı sönüm oranının 0.05'ten 0.07'ye çıkması depremin ivme etkisini yaklaşık %42 olarak azaltmıştır. Viskoz sönümleme cihazının yapının depreme karşı davranışını iyileştirmede önemli bir etken olduğu görülmüştür. Görüldüğü üzere çelik köprüye en fazla hasarı Van Depreminin vereceği anlaşılmaktadır. Van depremi etkisini azaltabilmek için yapıya viskoz sönümleme cihazının yerleştirilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Ayrıca depremin büyüklüğü ne olursa olsun yeryüzünde vereceği hasar depremin şiddeti olduğu bu grafiklerle doğrulanmıştır [15].

2.4 Çelik köprünün güçlendirilmesi ve yapısal kontrol uygulaması

2.4.1 Çelik köprüye sismik sönüm cihazının yerleştirilmesi

Çelik köprünün depreme karşı iyi bir performans sergileyebilmesi için çelik köprü güçlendirilmiştir. İlk olarak ana taşıyıcı kirişlerin merkezine doğrusal olmayan sismik sönümleyici cihaz yerleştirilmiştir [11]. Çelik köprüye yerleştirilen cihazın çelik köprünün sönüm oranına katkısının, çelik köprünün kritik sönüm oranının %20'si kadar olduğu varsayılmıştır [7]. Şekil 8'de çelik köprüye yerleştirilen sismik sönümleyici cihazın kesiti sunulmuştur.



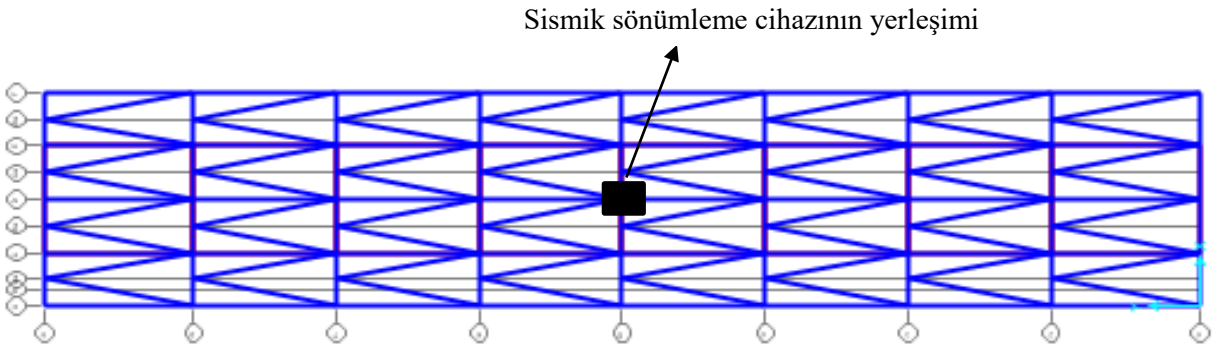
Şekil 8. Sismik sönümleyici cihazı

Sismik sönümleme cihazı depreme karşı duyarlı salınım hareketi göstererek köprünün rijitliğini ve periyodunu değiştirmeden köprüye yeni bir sönümleme kuvveti kazandırmıştır. Sönümleme kuvveti Denklem 2'de ifade edilmiştir. Çalışmada çelik köprünün sabit sönüm oranı ilk olarak 0.05 ve sismik sönümlü cihaz yerleştirildikten sonra köprünün sabit sönüm oranının tüm modlarda 0.07 olarak kabul edilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Çelik köprüye yerleştirilen sismik cihaz Şekil 9'da sunulmuştur.

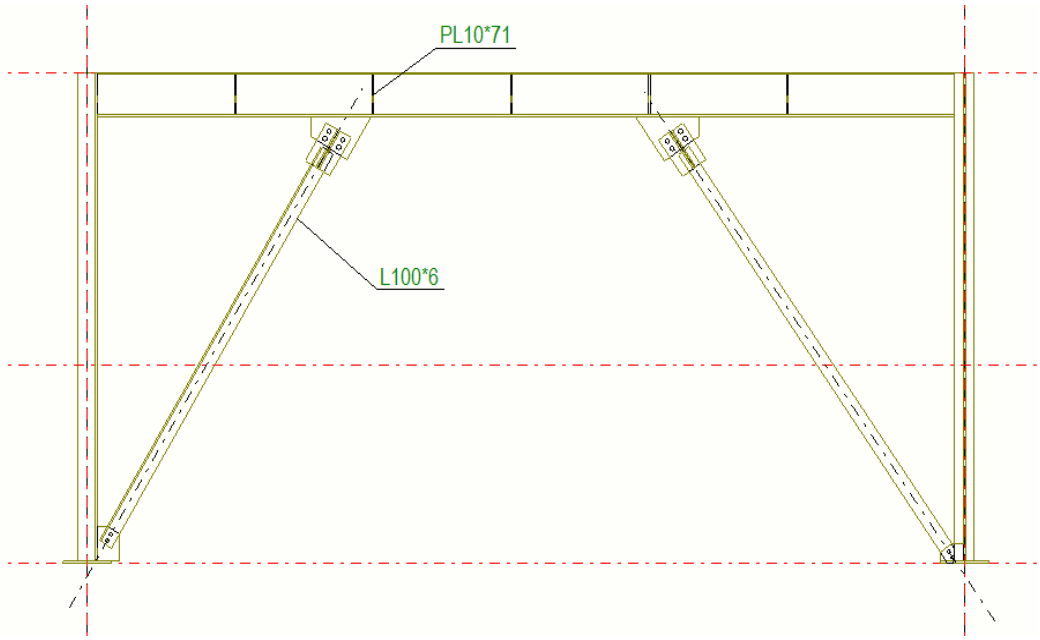
Kirişlerin kolonlardan daha fazla doğrusal olmayan yer değiştirme yapabileceği kabulünden yola çıkılarak en fazla titreşim hareketi oluşabileceği ön görülen rulman bölgesine sismik sönümleme cihazının yerleştirilmesi uygun görülmüştür [13]. Sismik sönümleme cihazı oluşabilecek titreşimleri yani mekanik enerjiyi elektriksel enerjiye dönüştürerek bu mekanik etkiyi absorbe edebilmektedir [4, 15, 17, 18].

2.4.2 Çelik yapı elemanlarının güçlendirilmesi

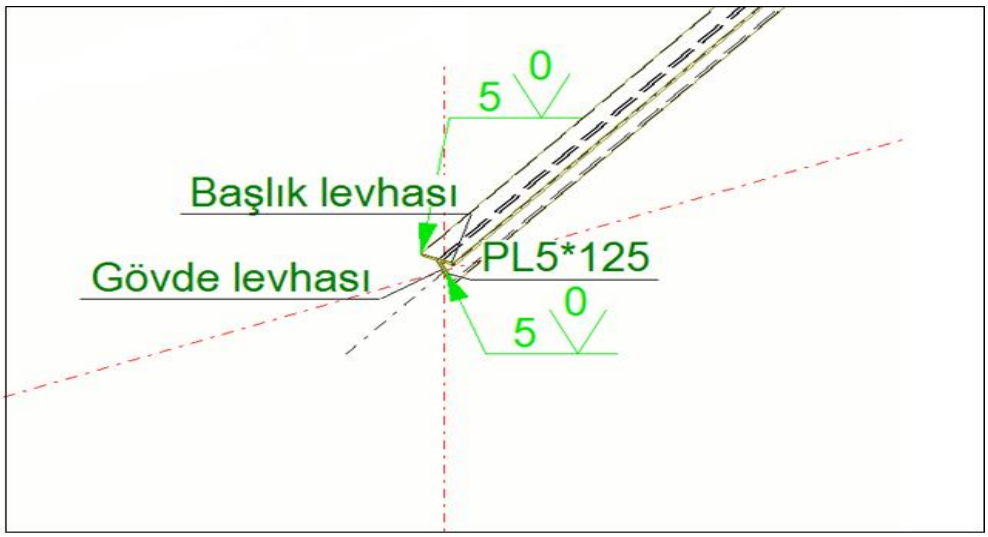
Çelik köprünün yapı elemanlarının deprem esnasında düzlem dışı burulma gerçekleştirmemesi için güçlendirme işlemi gerçekleştirilecektir. Ana taşıyıcı kiriş şekilde görüldüğü gibi yanal stabilite elemanlarıyla ve gövdede düşey ara rijitlik levhalarıyla desteklenmiştir. Bu durumda kirişin yanal olarak desteklenmeyen uzunluğu L_b 6.35 m'den 1m'ye düşmüştür. Bu nedenle kirişte yanal burulmalı burkulma engellenmiş olmaktadır. Şekil 10'da kirişin güçlendirilmiş hali sunulmaktadır. Gövde sürekli olarak kaynatılmış 10 mm levha ile yanal stabilite bağlantısı olarak L100x6 mm eşkenar köşebent ile kiriş yanal olarak desteklenmiştir. Köşebentler kirişe dışmerkezi olarak her iki ucu mafsallı bağlanmıştır. Deprem etkileri çaprazların mafsalları ve dış merkezi bağ kirişi ile karşılanacaktır. Sünek bir tasarım için bu güçlendirme yöntemi tercih edilmiştir. Deprem esnasında mafsallarda oluşan çatlaklar ve bağ kirişte oluşacak doğrusal olmayan yer değiştirmeler sayesinde deprem enerjisinin sönümlenmesi öngörülmektedir.



Şekil 9. Sismik sönümleme cihazının yerleşimi [12]



Şekil 10. Yanal stabilite elemanlarıyla desteklenmiş kiriş [19]



Şekil 11. Makas kirişlerinin başlık ve gövdesinin desteklenmesi [19]

Kirişin yanal stabilite bağlantısı ve düşey ara rijitlik levhası ile desteklenmesinin yanı sıra, makas kirişlerinin gövde kalınlığı ve başlık kalınlığı, kirişin başlığına ve gövdesine tam penetrasyonlu küt kaynak ile 10 mm kalınlıklı levha birleştirilmiştir. Bu işlemle kiriş kesitlerinin yerel burkulmaya uğramaması amaçlanmaktadır. Eksenel basınç yükü taşıyan makas kirişlerinin taşıma direncinin arttırılması bu işlemle mümkün olabilecektir. Şekil 11'de bu güçlendirme yöntemi sunulmuştur. Bunların dışında iki tür güçlendirme prosedürü önerilmiştir. Birincisi diyagonal çelik elemanlarla ya da kesme duvarlarla güçlendirme diğeri ise kirişlerin mukavemetinin arttırılmasıdır [19-22].

3 Bulgular ve tartışma

Çalışmanın bu bölümünde, köprünün mevcut durumu, sismik sönüm cihazıyla güçlendirilmiş durumu ve köprünün ana taşıyıcı kirişlerinin yanal doğrultuda desteklenmiş durumu için bir dizi analizler yapılmıştır. Türkiye'de yaşanmış büyük depremlerden olan Erzincan Depremi, Erzurum Horasan Depremi ve Van Depremi verileri kullanılarak, köprü için ifade edilen üç farklı yapıda ilk olarak zaman tanım alanında doğrusal analiz ve daha sonra zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yapılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları ve bu sonuçlar üç farklı yapı durumu için mukayese edilerek tartışılmıştır.

Çelik köprünün hasarlı, sismik sönümleyici cihazla ve çelik köprünün destek elemanlarıyla güçlendirilmiş yapıları zaman tanım alanında, Türkiye'de gerçekleşen 3 büyük depremin istasyon kayıtlarıyla doğrusal olmayan analizi yapılmıştır. Doğrusal olmayan analizden önce, bu üç farklı durumun zaman tanım alanında doğrusal analizi yapılarak yapı elemanlarında oluşan iç kuvvetler, yapının deprem etkisine karşı göstermiş olduğu ivmesel tepkiler, frekans tanım alanında yapının yapmış olduğu salınımlar elde edilerek mukayese edilmiştir. Daha sonra doğrusal olmayan analizler yapılarak üç farklı durum için çelik köprü elemanlarının yapmış olduğu maksimum plastik dönmeler, zaman tanım alanında doğrusal olmayan yer değiştirmeler elde edilerek yapı elamanlarının bu üç farklı durumda hasar seviyeleri karşılaştırılmıştır.

3.1 Zaman tanım alanında doğrusal analizler

Çelik köprü yapı elemanlarının eksenel, kayma ve eğilme rijitlikleri 0.72 katsayısı ile çarpılarak azaltılmıştır. Ölçeklendirilen üç deprem verisi çelik köprüye girdi olarak verilerek zaman tanım alanında doğrusal analizler yapılmıştır. İlk olarak, doğrusal olmayan hareketleri ve sünme gibi çeşitli olumsuz durumları temsil etmek için hasar verilen yapı elemanlarında depremlerin oluşturduğu iç kuvvetler elde edilmiştir.

Kolonun mevcut eksenel basınç dayanımı Bölüm 3'ten 1485.6 kN, kesme kuvveti dayanımı 1128 kN, akma anındaki eğilme momenti dayanımı 302.64 kN.m ve plastik sınır durumundaki eğilme momenti dayanımı 451.90 kN.m olarak elde edilmiştir. Tablo 2'de depremlerin kolonlarda oluşturduğu iç kuvvetlere bakıldığında kolonun eksenel basınç yükünü ve kesme kuvvetini karşılayabildiği görülmektedir. Depremlerin kolonda oluşturduğu eğilme momenti, kolonun akma anındaki eğilme momenti dayanımını aştığı ve plastik sınırdaki eğilme momenti dayanımını aşmadığı görülmüştür. Bu durumda kolon ağır hasar almış ancak göçmemiştir.

Ana taşıyıcı kirişin kesme kuvveti dayanımı 1410 kN ve eğilme momenti dayanımı 479.35 kN.m olarak Bölüm 3'ten elde edilmiştir. Tablo 2'ye göre kiriş kesme etkilerini karşılayabilmekte lakin Erzincan depreminin kirişte oluşturduğu eğilme momentini karşılayamayıp göçmekte olduğu gözlemlenmiştir.

Makas kirişinin eksenel basınç dayanımı 1708.4 kN olarak Bölüm 3'ten elde edilmiştir. Tablo 2'ye göre makas kirişi eksenel basınç yükünü karşılayabildiği görülmüştür.

Çapraz elemanın eksenel çekme dayanımı 1089.22 kN olduğundan, çekme etkilerini karşılayabildiği görülmüştür.

Bu durumda, ana taşıyıcı kirişin göçtüğü, kolonun ise ağır hasar aldığı tespit edilmiştir. Yapılan güçlendirmeler sonucu kolonda ve kirişte oluşan iç kuvvetler Şekil 12'de sunulmuştur.

Şekil 13-18'de yanal olarak destekleme işleminin yapıda oluşan ivmeleri %60, yer değiştirmeleri %50 olarak azalttığı, sismik sönüm cihazı yerleştirme işleminin ise ivmeleri %45, yer değiştirmeleri %35 olarak azalttığı görülmüştür. Ayrıca şekillerden Erzincan Depreminin yapıda daha fazla öteleme, dinamik yer değiştirmelere yol açtığı anlaşılmaktadır.

Frekans tanım alanında yapının bu depremlere karşı yapmış olduğu salınımlar Şekil 19'da sunulmuştur.

Yapının hâkim olduğu frekans aralığında yanal olarak desteklenmiş köprünün daha az genliklerle salınım yapmış olduğu görülmektedir. Sismik sönüm cihazı yerleştirilmiş köprünün hasarlı köprüyle yaklaşık olarak aynı genliklerde yaklaşık olarak benzer salınımlar yaptığı görülmektedir. Ancak yanal olarak desteklenmiş olan köprü çok düşük frekanslarda daha fazla dinamik hareket yapmış, sismik sönüm cihazı yerleştirilmiş yapıda ise çok düşük frekanslarda dinamik hareket giderek azalmıştır. Bu durum insanların konforu açısından sismik sönüm cihazı yerleştirilmiş yapının daha elverişli olacağını göstermiştir.

Şekil 19'da görüldüğü üzere, sismik sönüm cihazlı yapı yapının hakim periyodunu değiştirmeden yapıda depremlerin oluşturduğu ivmesel tepkileri azaltmaktadır. Desteklenme işlemi yapının hakim periyodunu azaltarak yapının rijitliğini önemli ölçüde artırarak ve buna bağlı olarak ivmesel tepkiyi azaltmaktadır.

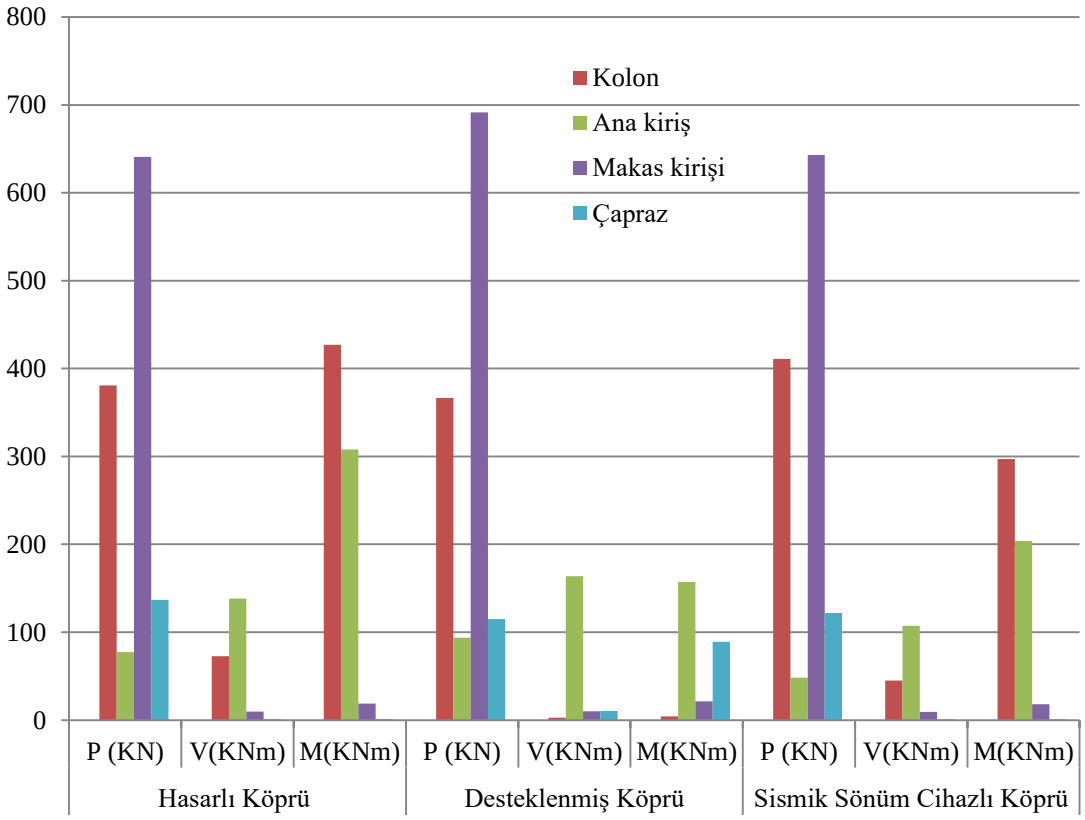
3.2 Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler

Yapı elemanlarında en fazla yer değiştirme, dinamik tepki oluşturan Erzincan Depremi etkisi altında zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yapılarak, yapı elemanlarında oluşan hasarlı yapı durumunda, yanal olarak desteklenmiş yapı durumunda ve sismik sönüm cihazı yerleştirilmiş yapı durumunda plastik dönmeler ve zamanla değişen doğrusal olmayan yer değiştirmeler elde edilmiştir. Yapı elemanlarında oluşan bu istemlere göre, yapı elemanlarının hasar seviyeleri belirlenmiştir.

Tablo 4'te üç farklı yapı durumu için, ağır hasar alan kolon ve göçme aşamasında olan kiriş için plastik dönmeler gösterilmiştir.

Tablo 2. Hasarlı yapının taşıyıcı elemanlarında oluşan iç kuvvetler

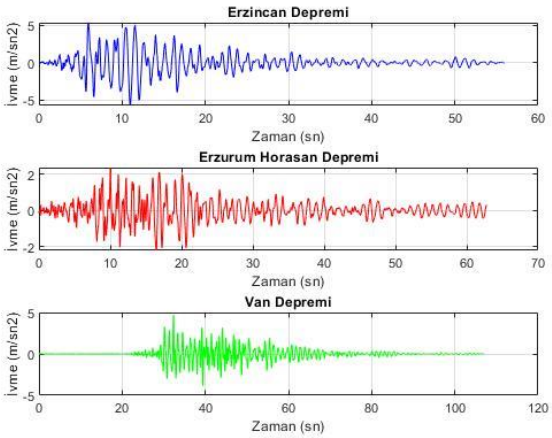
Yapı Elemanları	Van Depremi			Erzurum Horasan Depremi			Erzincan Depremi			Etkiyen Deprem		
	P (kN)	V (kN)	M (kN.m)	P (kN)	V (kN)	M (kNm)	P (kN)	V (kN)	M (kNm)	P (kN)	V (kN)	M (kNm)
Kolon	408.6	45.98	259.48	401.3	53.91	234.44	333.6	118.7	787.12	380.2	72.75	427.01
Ana kiriş	36.86	108.4	165.26	41.31	117.2	193.02	154.9	189.5	565.83	77.45	138.7	308.04
Makas kirişi	641.6	9.4	17.88	643.2	9.22	17.66	638.6	10.8	20.52	641.4	9.81	18.69
Çapraz	173.9	0.88	1.69	123.8	0.78	1.08	113.6	0.76	1.13	136.8	0.81	1.30



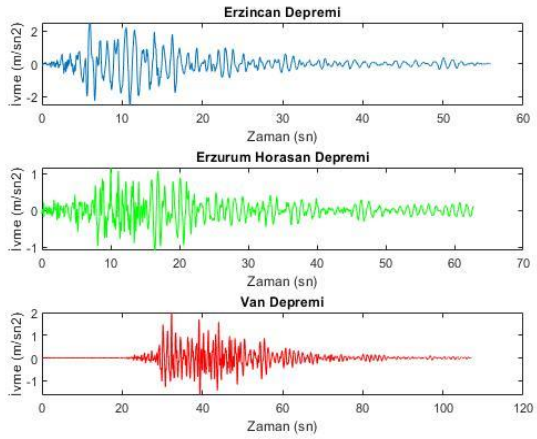
Şekil 12. Üç farklı yapı için yapı elemanlarında oluşan iç kuvvetler

Tablo 3. Depremlerin üç farklı yapıda oluşturdukları taban kesme kuvvetleri ve tepe deplasmanları

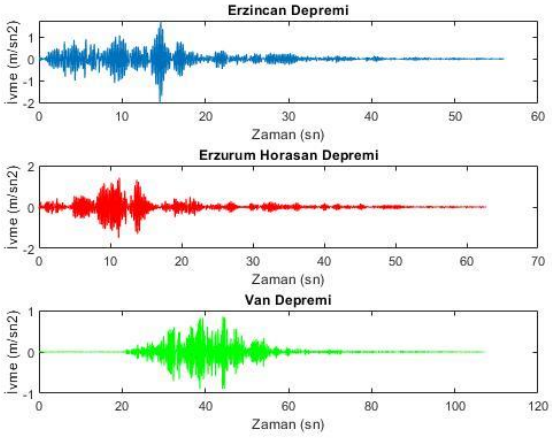
Depremler	Taban Kesme Kuvveti (KN)			Tepe Deplasmanı (m)		
	Hasarlı yapıda	Yanal Olarak Desteklenmiş yapıda	Sismik sönüm cihazlı yapıda	Hasarlı yapıda	Yanal Olarak Desteklenmiş yapıda	Sismik sönüm cihazlı yapıda
Van Depremi	232.4	369.30	152.24	0.0505	0.0021	0.031
Erzurum Horasan Depremi	208.8	372.24	124.45	0.0575	0.0025	0.039
Erzincan Depremi	786.20	741.62	543.39	0.115	0.0042	0.073
Etkiyen Deprem	409.07	494.35	273.38	0.074	0.0034	0.0481



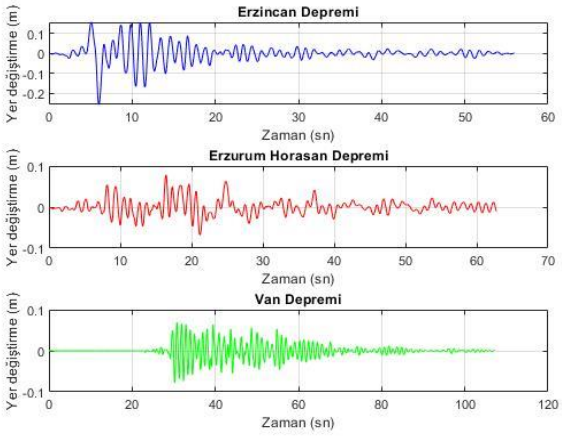
Şekil 13. Hasarlı yapının depremlere karşı yaptığı ivme zaman hikayesi



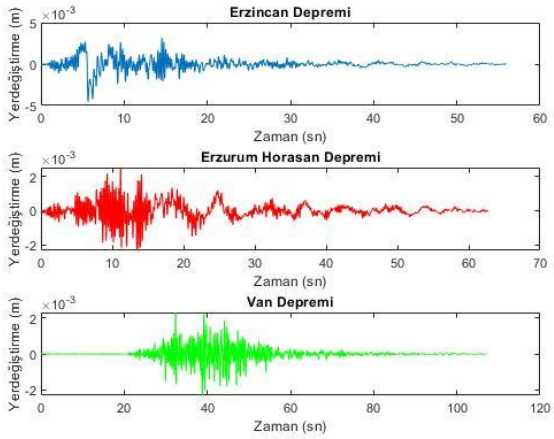
Şekil 14. Yanal olarak desteklenmiş yapının ivme zaman hikayesi



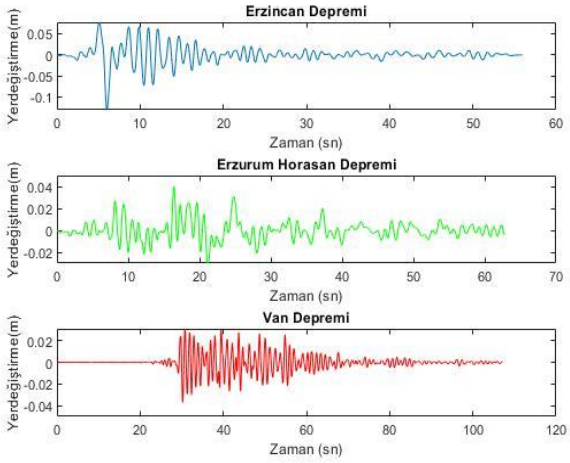
Şekil 15. Sismik sönüm cihazı yerleştirilmiş yapının ivme zaman hikayesi



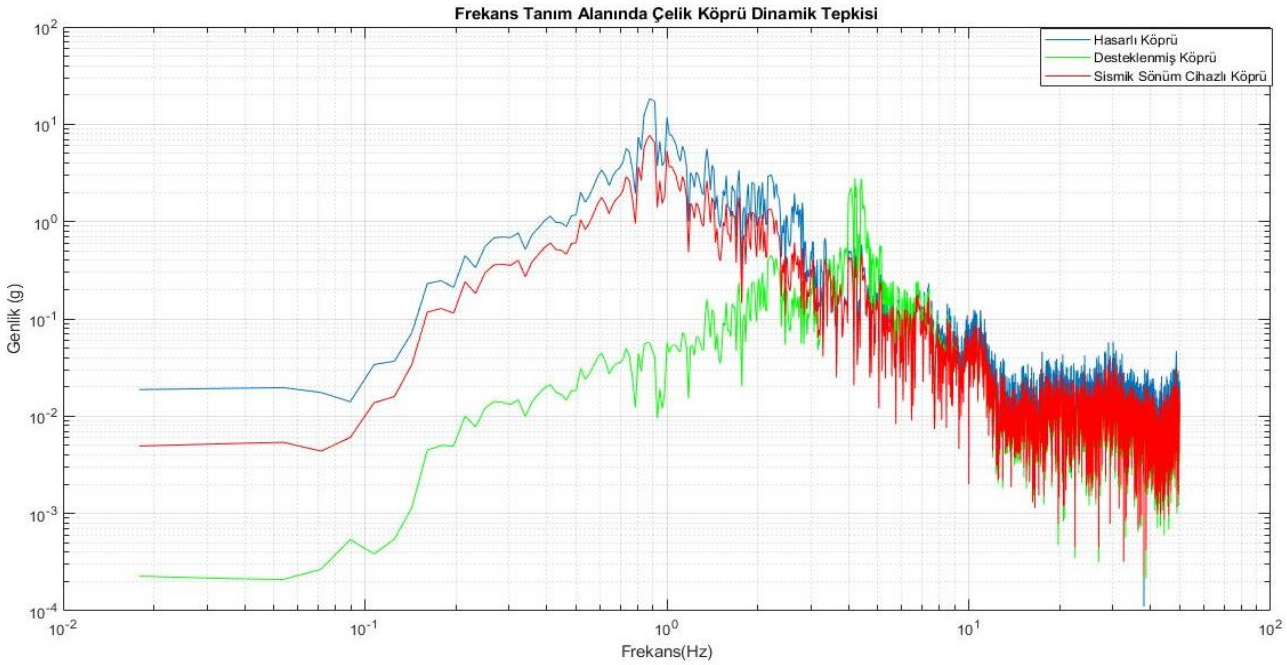
Şekil 26. Hasarlı yapının yer değiştirme zaman hikayesi



Şekil 37. Yanal olarak desteklenmiş yapının yer değiştirme zaman hikayesi



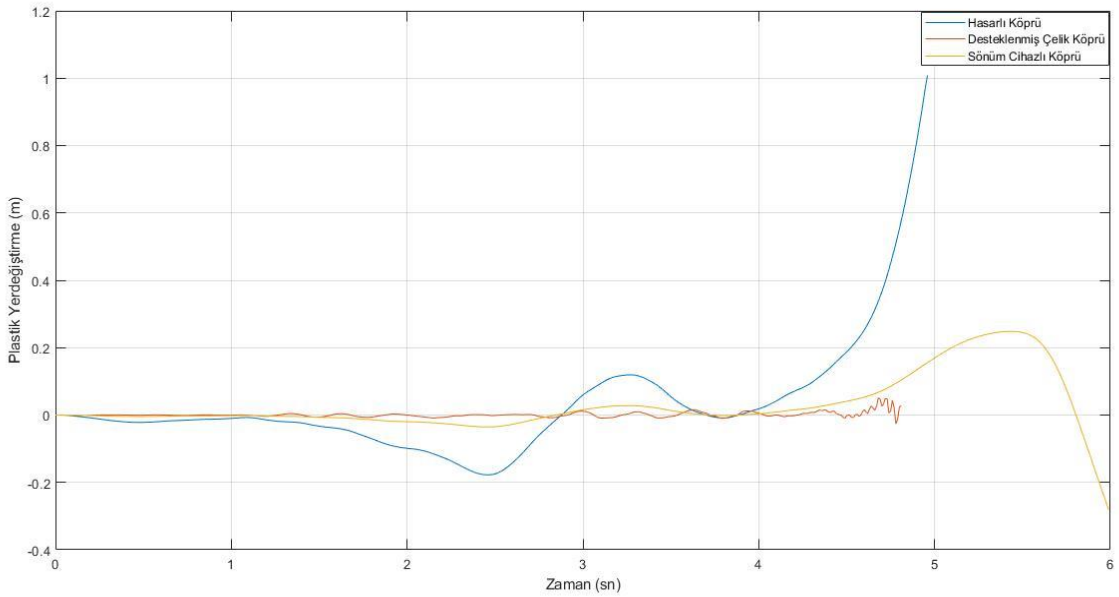
Şekil 48. Sismik sönüm cihazı yerleştirilmiş yapının yer değiştirme zaman hikayesi



Şekil 59. Frekans tanım alanında yapının depremlere karşı salınımları

Tablo 4. Yapı elemanlarında oluşan plastik dönmeler ve buna karşılık gelen momentler

Etkiyen Deprem Verisine göre elemanlarda oluşan plastik dönme				
Taşıyıcı Eleman	İstemler	Hasarlı Köprü	Sönüm oranı 0.07	Desteklenmiş köprü
Kolon	M (KNm)	380.25	428.78	51.77
	Θp (rad)	0.144	0.089	0.00748
Kiriş	M (KNm)	255.4	285.17	440.25
	Θp (rad)	0.23	0.147	0



Şekil 20. Çelik köprünün üç farklı durumda plastik deformasyon yapabilme yeteneği

Tablo 5. Yapı elemanlarının hasar seviyeleri

	Hasar Seviyeleri		
Taşıyıcı Eleman	Hasarlı Köprü	Sismik Sönüm Cihazlı Köprü	Güçlendirilmiş köprü
Kolon	İleri Hasar Bölgesi	Belirgin Hasar Bölgesi	Belirgin Hasar Bölgesi
Kiriş	Göçme Bölgesi	Belirgin Hasar Bölgesi	Sınırlı Hasar Bölgesi

Tablo 4'te gösterildiği üzere Yanal olarak desteklenmiş köprü durumunda kolonda daha az plastik dönme ve daha az eğilme momenti oluşmaktadır. Yanal olarak desteklenmiş köprü için kolonda oluşan plastik dönme miktarının hasarlı duruma göre 20 kat ve sismik sönüm cihazı yerleştirilmiş köprü için kolonda oluşan plastik dönme miktarının hasarlı duruma göre 1.7 kat daha az olduğu görülmektedir. Güçlendirme işlemleri sonucunda kirişte eğilme momenti taşıma kapasitesi artarak buna karşılık plastik dönmelerde azalmalar görülmektedir. Yanal destekleme işlemi sonunda kirişin elastik bölgede kalarak daha fazla eğilme momenti kapasitesine ulaştığı görülmektedir. Kirişin eğilme moment dayanımının 479.35 kN.m olması ve doğrusal olmayan analiz sonucu 440.25 kN.m momentin kirişte oluşması nedeniyle bu eğilme etkilerinin kiriş tarafından karşılanabileceği görülmektedir. Sismik sönüm cihazı yerleştirilmiş sistemde kirişin daha fazla sünek davranarak, hasarlı durumdaki kirişe göre daha az plastik dönme yapabildiği gözlemlenmiştir.

Şekil 20'de ise çelik köprüde zamanla değişen plastik deformasyonlar sunulmuştur. Bu şekilde, desteklenmiş köprünün plastik deformasyon yapabilme yeteneğinin çok düşük olduğu, sismik sönüm cihazı yerleştirilmiş yapının plastik deformasyon yapabilme yeteneğinin daha fazla olduğu ve zamanla yapmış olduğu plastik deformasyonla deprem etkilerini karşılayabildiği görülmüştür. Hasarlı durum için, yapı yüksek miktarda doğrusal olmayan yer değiştirme yaparak göçme seviyesine gelmiştir. Ayrıca Şekil 20'ye göre yanal stabilite bağlantılarıyla desteklenmiş köprünün çok rijit olduğu ve bu sayede elastik bölgede kalarak kalıcı plastik deformasyon yapmadığı izlenmiştir. Sismik sönüm cihazı yerleştirilen köprünün ise, deprem etkilerini karşılayacak düzeyde kalıcı plastik deformasyon yaptığı görülmüştür. Sismik sönüm cihazı sayesinde yapının sünek bir davranış gösterebileceği öngörülmüştür.

Ayrıca, Tablo 5'te üç farklı durumda yapının hasar seviyeleri belirtilmiştir. Yapı elemanlarında oluşan hasar seviyeleri, yapıda oluşan plastik dönmelere göre belirlenmiştir [9].

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, çelik köprünün maruz kalabileceği büyük depremde göçmemesi veya ağır hasar almaması için çelik köprünün performans analizi yapılarak yapının yaşanabilecek depremlere karşı davranışının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çelik köprü elemanlarında oluşabilecek çatlak deformasyon veya hasarları gözlemleyebilmek için Türkiye'de yaşanmış olan Erzincan, Erzurum Horasan ve Van Depremleri etkisinde zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, taşıyıcı kolonlar ileri hasar seviyesinde ve ana taşıyıcı kirişlerin göçmenin önlenmesi hasar seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada, yapının göçmesinin önlenmesi açısından bir dizi güçlendirme prensipleri önerilmiştir. Çalışmada önerilen güçlendirme prensiplerinden birisi, göçme bölgesinde olan kirişlere dış merkezi olarak, her iki ucu mafsallı bağlanan yanal stabilite elemanlarıdır. Diğer güçlendirme yöntemi ise, yapıda doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin yoğun olduğu ön görülen kirişlerin dönme merkezine sismik sönümleme cihazının yerleştirilmesidir.

Yanal olarak desteklenmiş yapı ve sismik sönüm cihazı yerleştirilmiş yapı için depremlerin taşıyıcı elemanlarda oluşturduğu iç kuvvetler sırasıyla hasarlı olarak değerlendirilen yapı için depremlerin taşıyıcı elemanlarda oluşturduğu iç kuvvetlerden %44 ve %18 daha az olduğu tespit edilmiştir. Ancak yapıya vermiş olduğu ağırlıktan dolayı, yanal olarak desteklenmiş sistem için hesaplanan eksenel basınç kuvvetleri hasarlı yapı için hesaplanan eksenel basınç kuvvetlerinden %1.5 oranında daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Depremlerin yapıda oluşturduğu taban kesme kuvvetleri, hasarlı yapı için hesaplanan taban kesme kuvvetlerine nazaran; desteklenmiş köprü için 90 KN civarında daha fazla, sismik sönüm cihazlı yapı için yaklaşık 136 KN daha az olduğu izlenmiştir. Bu durum yanal olarak desteklenmiş sistemin, köprünün ağırlığını artırdığını, sismik sönüm cihazının ise yapı ağırlığını değiştirmeden yapının periyodunu azaltarak taban kesme kuvvetini artırdığını göstermiştir. Maksimum tepe deplasmanları hasarlı yapı için 0.074 m, desteklenmiş yapı için 0.0031 m ve sismik sönüm cihazlı yapı için 0.0481 m olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, her iki güçlendirme yöntemiyle yapının yer değiştirmesi azaltılmıştır.

Zaman tanım alanında, zamana bağlı olarak üç farklı durum için yer değiştirme-zaman, ivme-zaman eğrileri elde edilmiştir. Yapının zamanla değişen ivmelerin yaklaşık olarak, desteklenmiş köprü de %60 ve sismik sönüm cihazlı köprüde %45 olarak azaldığı görülmüştür.

Ayrıca desteklenmiş köprüde zamanla değişen yer değiştirmelerin %50 ve sismik sönüm cihazlı köprüde %35 olarak azaldığı tespit edilmiştir. Aynı frekans aralıklarında desteklenmiş köprü ve sismik sönüm cihazlı köprü sırasıyla 19 ve 1.8 kat daha az ivmesel yer hareketi yaptığı görülmüştür. Her üç sistemde maksimum yer hareketi düzeyine ulaştığı anda Desteklenmiş köprü, sismik sönüm cihazlı köprüye göre 1.5 kat daha fazla salınım yaptığı görülmüştür.

Doğrusal analiz sonuçları dışında, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılarak yapı elemanlarının hasar seviyeleri belirlenmiştir. Desteklenmiş köprü için kirişlerde oluşan eğilme momentlerinin sismik sönüm cihazlı

köprüye göre 1.5 kat daha fazla olmasına rağmen sismik sönüm cihazlı köprü kirişi 0.147 rad dönme yapmış buna karşılık desteklenmiş köprü kirişi elastik bölgede kalarak plastik dönme yapmamıştır. Hasarlı köprü için kiriş 0.23 rad dönme yaparak göçme seviyesine gelmiştir. Göçme hasarını engellemek için sismik sönüm yerleştirerek kirişin daha az dönme yapması sağlanmıştır. Kolonlarda oluşan plastik dönmelerin, desteklenmiş köprü için 0.00748 rad, sismik sönüm cihazlı köprü için 0.089 rad, hasarlı köprü için 0.144 rad olduğu gözlemlenmiştir. Güçlendirme işlemleri sonucunda yapı elamanlarının plastik dönmeleri azaltılmıştır. Bunların dışında, sismik sönüm cihazı yapının plastik yer değiştirme kapasitesine %60 oranında katkı sunmuştur. Desteklenme işlemi ise, yapıda kirişlerin plastik deformasyon yapmayarak elastik bölgede kalmasını sağlamış ve kolonların plastik deformasyon kapasitesine %4 civarında katkı sunmuştur. Son olarak, kolonlar hasarlı köprü için ileri hasar bölgesinde, sismik sönüm cihazlı yapı ve desteklenmiş yapı için ise belirgin hasar düzeyinde kalmıştır. Kirişler ise, hasarlı köprüde göçme bölgesinde, desteklenmiş yapı için sınırlı hasar seviyesinde ve sismik sönümlü yapıda belirgin hasar düzeyinde kalmıştır.

Bu sonuçlara göre, yapının daha az salınım yaparak insan konforunun iyileşmesi açısından uygulanan sismik sönüm cihazlı güçlendirme işleminin, desteklenmiş tasarıma göre daha uygun olduğu görülmüştür. Yapının ağırlığı değişmeden, yapı elemanlarının sünekliğini artırmak için sismik sönüm cihazı tercih edilmelidir. Daha az maliyete sahip desteklemeli güçlendirme yöntemiyle ise yapı elamanlarının göçmeden ayakta durabilmesi sağlanmaktadır. Desteklenme işlemiyle elemanların mevcut dayanımları arttırılarak, depremden gelen kuvvetler, sismik sönüm cihazlı yapıya göre daha iyi karşılanmaktadır. Desteklenme işlemiyle, dış merkezi oluşturulan bağ kiriş tüm plastik dönmeleri kendinde toplayarak, ana taşıyıcı kirişin elastik bölgede kalmasını sağlamıştır.

Sonuç olarak, Şenkaya Yünören Köprüsünün göçmeden ayakta durabilmesi için, yukarıda ifade edilen güçlendirme işlemlerinden birinin uygulanması gerekmektedir. Ancak, yapının mimarisinin değişmemesi gerekiyorsa yapıya sismik sönüm cihazının yerleştirilmesi daha makul olacaktır. Aksi takdirde Erzincan Depremi gibi büyük depremlerde yapının göçmesi öngörülmektedir.

Çıkar çatışması

Bu çalışmada çıkar çatışmasının olmadığını beyan ediyoruz.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

[1] A. Dogangun, and A. Ural, Characteristics of Anatolian stone arch bridges and a case study for Malabadi Bridge. ARCH 07 – 5th International Conference on Arch Bridges, 179–186, 12–14, 2007.

[2] P. Foraboschi, Specific structural mechanics that underpinned the construction of Venice and dictated Venetian architecture. Eng. Fail. Anal., 78, 169–195, 2017. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.03.004

[3] A. C. Aydin, Restoration of historical structures: material and structural point of view. The 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, 325–336, 12–14 Oct. 2009.

[4] I. N. Sener, An innovative methodology and structural analysis for relocation of historical masonry monuments: a case study in Hasankeyf. M.Sc. Thesis, 167, Middle East Technical University, Turkey, 2004.

[5] TÇYY Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, Türkiye 2016.

[6] AASHTO., American Association of State Highway And Transportation Officials, Washington, DC, U.S.A 2018.

[7] H. Gönen, M. Doğan, ve H. Gökdemir, Viskoz sönümleyici ilave edilmiş kısmi dolgu duvarlı çelik çerçevelerin sismik performans analizi. 6. Çelik Yapılar Sempozyumu, 317-328. 12, 2015.

[8] AFAD. T.C İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durumu Yönetim Başkanlığı, Ankara, Türkiye, 2009.

[9] ASCE/SEI 41-13. Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2013.

[10] D. Lee, and D. P Taylor, Viscous damper development and future trends. Struct. Des. Tall Build., 10, 311–320., 2001. https://doi.org/10.1002/tal.188

[11] M. Bruneau, Performance of steel bridges during the 1995 Hyogoken – Nanbu (Kobe, Japan) earthquake. Elsevier Science Ltd., 20(12), 1063-1078, 1998. https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00203-4

[12] TEKLA Structures, Structural BIM Software, Trımble Access, 1978.

[13] SAP2000, Structural Analysis Program, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, 2005

[14] Z. Celep, Deprem mühendisliğine giriş ve depreme dayanıklı yapı tasarımı. İstanbul, Beta Basın Yayın Dağıtım, 2018.

[15] H. Jimin, and F. Zhi-Fang., Modal analysis, oxford, a division of reed educational and proffesional publishing ltd. linacre house, Jordan Hill, OX2 8DP, 2001

[16] T. E. Kelly, In-structure damping and energy dissipation design guidelines, wellington, Holmes Consulting Group, 2001.

[17] FEMA 273. Federal Emergency Management Agency Publication, NHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington, D.C., U.S.A, 1997.

[18] A. Chopra, Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995.

[19] E Aydin, B Ozturk, and E Duzel, Rehabilitation of planar building structures using steel diagonal braces and dampers. 5th European Conference on Structural Control (EACS 2012), Genoa, Italy, 2012.

[20] E. Aydin, B. Ozturk, and D. Guney, Sensitivity analyses of variations on seismic response via viscous damper placement in planar building structures. 10th

International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, 2013.

[21] E Aydin, B Ozturk, H Cetin, M Gasir, Strengthening plane frames with steel plates. 7th World Conference on Structural Control and Monitoring, Qingdao, China, 2018.

[22] E. Aydin, E. N. Farsangi, B. Ozturk, A. Bogdanovic and M. Dutkiewicz, Improvement of building resilience by viscous dampers. Resilient Structures and Infrastructure, 105-127, Springer, 2019. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7446-3_4