

## Eğri Eksenli Kompozit Tabliyeli Bir Köprünün Deprem Performansının Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesi

Güliz BAYRAMOĞLU\*  
Alpay ÖZGEN\*\*  
Enver ALTINOK\*\*\*

### ÖZ

Bu çalışmada, eğri eksenli, betonarme dikdörtgen ayaklı, kompozit tabliyeli bir karayolu köprüsünün şekil değiştirme esaslı doğrusal olmayan elasto-plastik analiz yöntemine göre deprem performansı değerlendirilmiştir. Analizde İzmit (1999), San Fernando (1971) ve Loma Prieta (1989) depremlerinin zaman-ivme kayıtları 50 yılda %2 aşılma olasılıklı olarak değiştirilerek kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre köprünün güçlendirilmesine gerek duyulmuştur. Güçlendirme stratejisinde köprünün varolan mimari görünüşü olabildiğince korunarak ayak üst uçlarındaki mesnetlere köprü eksenine dik doğrultuda viskoz sismik sönümleyiciler yerleştirilerek kompozit üst yapının ayaklara göre yapacağı göreceli yer değiştirmeler sınırlandırılmış, ayaklara ve temellere gelen tesirler azaltılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Doğrusal olmayan analiz, deprem performansı, plastik şekil değiştirme, plastik eğrilik, akma eğriliği, plastik dönme, viskoz sismik sönümleyici

### ABSTRACT

#### Seismic Performance Evaluation and Strengthening of a Curved Bridge Having Concrete Piers and Composite Deck

In this study, the seismic performance of a curved highway bridge having rectangular concrete piers and composite deck is evaluated by nonlinear elasto-plastic analysis method. The time-acceleration records of the Izmit (1999), San Fernando (1971) and Loma Prieta (1989) earthquakes which are modified corresponding to a probability of exceedance of 2% in 50 years are used in the analysis. According to the analysis results, strengthening of the bridge is required. In the strengthening strategy, the viscous dampers are mounted on each bearing at the top of the piers in the transverse direction by preserving the existing architectural appearance of the bridge as much as possible. Thus the relative displacements

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 22.10.2010 günü ulaşmıştır.
- 31 Aralık 2012 gününe kadar tartışmaya açıktır.

\* İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - bayramogl8@itu.edu.tr

\*\* İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - ozgena@itu.edu.tr

\*\*\* Altinok Müş. Müh. Taah. San. Tic. Ltd. Şti., İstanbul - enver@altinok.tk

between the composite superstructure and the piers are limited, and the internal forces which occur in the piers and foundations are reduced.

**Keywords:** Nonlinear analysis, seismic performance, plastic deformation, plastic curvature, yielding curvature, plastic rotation, viscous damper

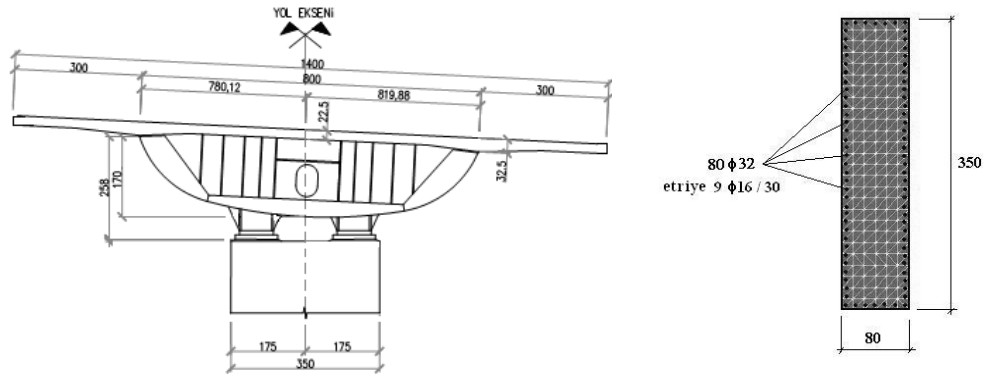
## 1. GİRİŞ

Köprülerin sismik performansını viskoz sismik sönümleyicilerle arttırmak oldukça yaygın bir uygulamadır ve çok sayıda araştırmaya konu olmuştur [1-4]. Köprünün varolan mimarisi de korunarak köprü mesnetleri ile ayakları arasına yerleştirilen viskoz sismik sönümleyicilerle taşıyıcı sisteme enerji girişi sınırlanır. Üst yapı ile ayaklar arasındaki göreceli yer değiştirmelerin büyük bir kısmı viskoz sismik sönümleyiciler tarafından karşılanır [5-7]. Bu çalışmada İstanbul-Anadolu yakasında TEM otoyolunu E-5 karayoluna bağlayan ana arter üzerinde bulunan Kozyatağı Köprüsünün deprem performansı şekil değiştirme esaslı doğrusal olmayan elasto-plastik analiz yöntemiyle değerlendirilmiş ve viskoz sismik sönümleyicili olarak öngörülen güçlendirme stratejisi sunulmuştur.

## 2. KOZYATAĞI KÖPRÜSÜNÜN ÖZELLİKLERİ

Kozyatağı Köprüsü, toplam uzunluğu 409.6 m, ayaklar arasındaki maksimum açıklığı 41.8 m olan 11 açıklıklı, betonarme dikdörtgen ayaklı, kompozit tabliyeli, kurp yarıçapı 280 m olan eğri eksenli bir bağlantı köprüsüdür. Betonarme ayakların yüksekliği  $H = 9.756 \sim 16.617$  m arasında değişmektedir.

Köprü, 1986 yılında, H30-S24 hareketli yük sınıfına göre tek yönde iki şeritli olarak yapılmıştır [8]. Kompozit üst yapı, genişliği 14 m, ortalama kalınlığı 22.5 cm olan C30 kalitesinde tabliye betonundan ve yüksekliği kesit ortasında 170 cm olan yarı elips şeklinde S235 kalitesinde kutu enkesitli çelik gövdeden oluşmaktadır (Şekil 1). Betonarme ayaklar ise 80cmx350cm enkesitinde, C25 kalitesinde betondan imal edilmiştir [9]. Betonarme tabliye her iki kenarından 3 m konsol çıkmaktadır.



Şekil 1. Kompozit üst yapının ve betonarme ayakların enkesiti (boyutlar cm)

Kompozit üst yapı her bir ayağa ikişer adet çelik mesnetle mesnetlendirilmiştir (Şekil 2). Mesnetler, köprü eksenine dik doğrultuda kayıcı, köprü eksenine doğrultusunda ise ara mesnetlerde sabit, kenar mesnetlerde kayıcı olarak teşkil edilmiştir.

Betonarme ayaklar, 700cmx500cmx150cm boyutlarında C25 beton kalitesinde yüzeysel temellere mesnetlendirilmiştir. Köprü bölgesinde yapılan geoteknik incelemelere [10] göre köprü temelleri kayaç özelliği gösteren sağlam bir zemine oturmaktadır; temel yatak katsayısı  $286000 \text{ kN/m}^3$ , zemin taşıma gücü  $q_u = 1800 \text{ kN/m}^2$  olarak tespit edilmiştir.

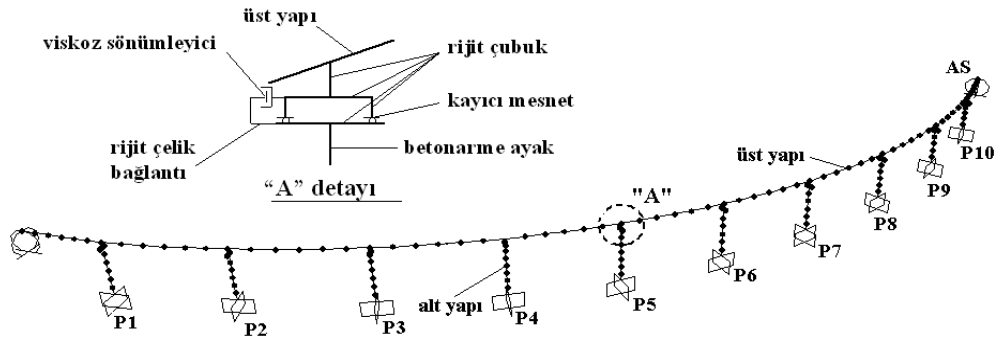


Şekil 2. Kompozit üst yapının çelik mesnetleri

### 3. KÖPRÜNÜN DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ

#### 3.1. Yükler ve Statik Sistem

Betonarme tabliye+asfalt kaplama+çelik gövde+korkuluklar ve diğer kısımlardan oluşan üst yapının öz ağırlığı  $114.3 \text{ kN/m}$  olarak hesaplanmıştır. Kompozit üst yapının enkesit alanı  $A = 0.6348 \text{ m}^2$ , atalet momentleri  $I_x = 9.0893 \text{ m}^4$ ,  $I_y = 0.2713 \text{ m}^4$ , burulma mukavemet momenti  $J = 1.6887 \text{ m}^4$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. Statik sistem ve viskoz sismik sönümleyicili mesnet modeli

Statik sistemde kompozit üst yapı ve betonarme ayaklar, kendi ağırlık merkezlerinde sonlu çubuk elemanlarla modellenmiş, kütleleri ise yayılı kütle olarak tanımlanmıştır. Üst yapının ayak üst uçlarına bağlantısında rijit çubuk elemanlar kullanılmıştır (Şekil 3). Köprü mesnetleri köprü eksenine dik doğrultuda kayıcı, sabit ve viskoz sismik sönümleyicili olarak üç farklı şekilde modellenmiştir. Ayaklar temellerde tam ankastre kabul edilmiştir.

Betonarme ayakların modellenmesinde C25 “Mander Sargısız Beton Modeli” [11] ve S420 pekleşmeli donatı çeliği özellikleri kullanılmıştır. Doğrusal olmayan analizde betonarme ayakların çatlamış enkesit değerleri kullanılmıştır.

Analizde İzmit (1999), San Fernando (1971) ve Loma Prieta (1989) depremlerinin zaman-ivme kayıtları köprünün bulunduğu yerin, deprem ve zemin özelliklerini temsil edecek şekilde türetilmiş, elde edilen sonuçlar 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan S2 depremine dönüştürülmüştür [12].

### 3.2. Doğrusal Olmayan Elasto-Plastik Davranışın Modellenmesi

Doğrusal olmayan davranışın modellenmesinde ve değerlendirilmesinde [13] geleneksel plastik mafsallı hipotezinden yararlanılmıştır. Bu hipoteze göre  $H$  ayak yüksekliği,  $f_y$  ayak kesitindeki donatı çeliğinin karakteristik akma dayanımı,  $d_b$  boyuna donatı çapı olmak üzere plastik mafsalların uzunluğu  $L_p = 0.08 H + 0.022 f_y d_b \geq 0.044 f_y d_b$  bağıntısıyla  $L_p = 1076.2 \sim 1625$  mm olarak hesaplanmıştır [14]. Statik modelde her bir ayak alt kesitinde, enine ve boyuna doğrultuda birer adet plastik mafsallı tanımlanmıştır.

### 3.3. Moment-Eğrilik ve Moment-Plastik Dönme İlişkileri

Köprü ayaklarında aksel kuvvetler pratik olarak, deprem etkisinden bağımsız olarak sadece düşey yüklerden oluşacağından, her ayak için tek bir  $(M - \phi)$  moment-eğrilik ve  $(M - \theta_p)$  moment-plastik dönme diyagramı elde edilmiştir. Her bir plastik mafsallı kesitinde, normal kuvvet etkisi altında  $(M - \phi)$  diyagramları çizilmiş ve bu diyagramlar iki doğrulu  $(M - \phi)$  diyagramlarına dönüştürülmüştür. İki doğrulu  $(M - \phi)$  diyagramlarından hareketle de her bir plastik mafsallı için hesaplanan plastik mafsallı boyları göz önünde tutularak plastik mafsallı temsil eden  $(M - \theta_p)$  diyagramları elde edilmiştir.

### 3.4. Viskoz Sismik Sönümleyiciler

Viskoz sismik sönümleyiciler maksimum  $\pm 100$  mm piston hareketli ve 1000 kN kuvvet kapasitelidir. Viskoz sismik sönümleyici kuvveti  $F = C V^\alpha$  bağıntısı ile verilmiştir. Burada  $V$  deprem hareketi esnasında üst yapının mesnetlerde ayak üst uçlarına göre hareketinin hızıdır [15]. Sönüm katsayısı  $C = 2000$  kNsn/m, sönüm üssü  $\alpha = 0.6$  olarak alınmıştır.

#### 4. DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Her bir ayağın ( $M - \phi$ ) bağıntıları kullanılarak, köprünün SAP2000 V.10.0.5 programıyla üç deprem kaydı altında boyuna ve enine deprem doğrultularında zaman tanım alanında şekil değiştirme esaslı doğrusal olmayan elasto-plastik dinamik analizi yapılmıştır. Kayıcı mesnetlerde meydana gelen sürtünme kuvvetleri ihmal edilmiştir. Analiz sonucu ayaklarda meydana gelen şekil değiştirmelerin değerlendirilmesinde sargısız betonarme kesitlerde izin verilen birim şekil değiştirme sınırları Karayolları 17. Bölge Müdürlüğünün ek bir güvenlik istemesi nedeniyle betonda  $\epsilon_c = 0.0027$ , donatı çeliğinde  $\epsilon_s = 0.04$  olarak alınmıştır.

Mesnetlerin köprü eksenine dik doğrultuda kayıcı olması durumunda (varolan durum) kompozit üst yapı ile betonarme ayaklar arasında mesnetlerde çok büyük mertebelerde göreceli enine yer değiştirmeler meydana gelmiştir. Bu nedenle kayıcı mesnetlerde stoperler kullanılarak köprünün eksenine dik doğrultuda hareketinin engellenmesi öngörülmüştür. Mesnetlerin köprü eksenine dik doğrultuda sabit olduğu bu halde ayaklarda büyük mertebelerde iç kuvvetler meydana gelmiştir. Boyuna doğrultudaki depremlerde tüm ayakların alt kesitlerinde plastik şekil değiştirmeler oluşmuş, ancak bu plastik şekil değiştirmeler hiçbir ayakta, donatı çeliğinde  $\epsilon_s$  sınır değerini aşmamış; P3, P4 ve P6 ayakları hariç diğer ayaklarda ise sargısız betonda  $\epsilon_c$  sınır değerine çok yaklaşmıştır. Enine doğrultudaki depremlerde P3, P4 ve P6 ayaklarında beton birim şekil değiştirme değerleri  $\epsilon_c$  sınır değerini aşmıştır. Ayak temellerinde meydana gelen zemin gerilmeleri sınır değerleri aşmamış, ancak temel plakları zeminden aşırı derecede ayrılmıştır. Temeller boyut ve donatı bakımından yetersiz kalmıştır; sonuç olarak temellerin ve kolonların güçlendirilmesine gerek duyulmuştur.

Köprü ayak üst uçlarında çelik mesnetlerde köprü eksenine dik doğrultuda teşkil edilen viskoz sismik sönümleyicilerle güçlendirilen köprüde, tüm mesnetlerde göreceli enine yer değiştirmeler ve tüm ayaklarda iç kuvvetler indirgenerek, enine doğrultudaki depremlerde bütün ayak alt kesitlerinde olası plastik şekil değiştirmelerin kalkması, boyuna doğrultudaki depremlerde ise azaltılması sağlanmıştır. Analiz sonucu ayak alt kesitlerinde en büyük plastik şekil değiştirmeler, boyuna doğrultuda Loma Prieta depreminden elde edilmiş ve sonuçlar Tablo 1'de özetlenmiştir. Buna göre P1, P2, P8, P9 ve P10 ayaklarının alt kesitlerinde meydana gelen plastik şekil değiştirmeler küçük mertebelerde kalmış, hiçbir ayakta donatı çeliğinde ve sargısız betonda sınır birim şekil değiştirme değerleri aşılmamıştır. Bu halde tüm ayakların kesme kapasiteleri yeterli bulunmuş, ayak temellerinin zemin gerilmeleri emniyet sınırları içinde kalmıştır. Temel plakları boyut, eğilme donatısı, kesme ve zımbalama dayanımları bakımından yeterli bulunmuştur. Maksimum viskoz sismik sönümleyici kuvveti ve maksimum piston hareketi kullanılması öngörülen viskoz sismik sönümleyicilerin kapasite sınırları içinde kalmıştır.

Viskoz sismik sönümleyiciler betonarme ayakların kısa kenarlarını ortalayacak şekilde, üst yapıda çelik gövdeye kaynaklı varolan çelik mesnet levhalarına ve ayak üst uçlarının ~2.4 m'lik kısımlarında HEB 340 profilleriyle oluşturulan çelik karkaslara mesnetlendirilen düşey konumdaki rijit HEB 500 profillerine bağlanmıştır.

Tablo 1. Boyuna doğrultuda Loma Prieta depreminde analiz sonuçları

Ayak no.		P1	P2	P8	P9	P10
H	[m]	14.209	13.518	13.332	11.744	9.756
$L_p$	[mm]	1432.4	1377.1	1362.2	1235.2	1076.2
$EI_{eff,x}$	$\times 10^7$ [kNm <sup>2</sup> ]	3.22	3.25	3.24	3.24	3.20
$EI_{eff,y}$	$\times 10^6$ [kNm <sup>2</sup> ]	2.22	2.23	2.23	2.23	2.21
$\phi_y$	$\times 10^{-3}$ [rad/m]	4.811	4.860	4.855	4.848	4.780
$\theta_p$	$\times 10^{-3}$ [rad]	0.170	2.133	2.682	5.966	10.523
$\phi_p$	$\times 10^{-3}$ [rad/m]	0.119	1.549	1.969	4.830	9.778
$\phi_t$	$\times 10^{-3}$ [rad/m]	4.930	6.409	6.824	9.678	14.558
$\varepsilon_c$	$\times 10^{-3}$	1.146	1.350	1.347	1.569	1.764
$\varepsilon_s$	$\times 10^{-3}$	2.640	3.735	3.734	5.568	8.690

*H*: ayak yüksekliği,  $L_p$ : plastik mafsalsal boyu,  $EI_{eff,x}$ ,  $EI_{eff,y}$ : çatlama kesit rijitliği,  $\phi_y$ : akma eğriliği,  $\phi_p$ : plastik eğrilik,  $\phi_t$ : toplam eğrilik,  $\varepsilon_c$ ,  $\varepsilon_s$ : betonda ve çelikte birim şekil değiştirme

## 6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

İstanbul-Anadolu yakası Kozyatağı bölgesinde, TEM Otoyolunu E-5 karayoluna bağlayan ana arter üzerinde bulunan betonarme dikdörtgen ayaklı, kompozit tabliyeli, eğri eksenli bir bağlantı köprüsünün deprem performansı, şekil değiştirme esaslı doğrusal olmayan elasto-plastik analiz yöntemine göre değerlendirilmiştir. Analizde İzmit (1999), San Fernando (1971) ve Loma Prieta (1989) depremlerinin 50 yılda %2 aşılma olasılıklı olarak değiştirilmiş zaman-ivme kayıtları kullanılmıştır. Statik modelde kompozit üst yapının betonarme ayaklara oturduğu çelik mesnetler köprü eksenine dik doğrultuda kayıcı, sabit ve viskoz sismik sönümleyiciler olarak modellenmiştir.

Güçlendirme stratejisinde ayak üst uçlarında çelik mesnetlere köprü eksenine dik doğrultuda viskoz sismik sönümleyiciler yerleştirilerek kompozit üst yapının ayaklara göre yapacağı göreceli yer değiştirmeler sınırlandırılmış, temellere gelen tesirler azaltılarak temel ve ayak güçlendirmesinden kaçınılmıştır. Böylece köprünün varolan mimarisi olabildiğince korunmuş, köprü üzerindeki ve ayakların mesnetlendiği otoyoldaki ulaşımın sürekliliği de kesintiye uğramamıştır.

### Kaynaklar

- [1] Moroni, M.O., Boroschek, R., Sarrazin, M., "Dynamic characteristics of Chilean bridges with seismic protection", *J Bridge Engineering*, 10(2), 124-132, 2005.
- [2] Caetano, E., Cunha, A., Moutinho, C., Magalhaes, F., "Studies for controlling human-induced vibration of the Pedro e Ines footbridge, Portugal. Part 2: Implementation of tuned mass dampers", *Engineering Structures*, 32, 1082-1091, 2010.

- [3] Kandemir, E.C., Mazda, T., Nurui, H., Miyamoto, H., “Seismic retrofit of an existing steel arch bridge using viscous damper”, *Procedia Engineering*, 14, 2301-2306, 2011.
- [4] Martinez-Rodrigo, M.D., Lavado, J., Museros, P., “Dynamic performance of existing high-speed railway bridges under resonant conditions retrofitted with fluid viscous dampers”, *Engineering Structures*, 32, 808-828, 2010.
- [5] Museros, P., Martinez-Rodrigo, M.D., “Vibration control of simply supported beams under moving loads using fluid viscous dampers”, *J Sound and Vibration*, 300, 292-315, 2007.
- [6] Dion, C., Bouaanani, N., Tremblay, R., Lamarche, C.P., Leclerc, M., “Real-time dynamic substructuring testing of viscous seismic protective devices for bridge structures”, *Engineering Structures*, 33, 3351-3363, 2011.
- [7] Xu, Y.L., Zhou, H.J., “Damping cable vibration for a cable-stayed bridge using adjustable fluid dampers”, *J Sound and Vibration*, 306, 349-360, 2007.
- [8] AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials, Standard Specifications for Highway Bridges, 17th Edition, Washington, DC, 2002.
- [9] Taşdemir, M.A., TCK 17. Bölge Otoyollar ve Bağlantı Yolları Üzerindeki Köprülerin Onarım ve Sismik Takviye Projelerinin Hazırlanması İşine Yönelik Malzeme Değerlendirme Raporu, İTÜ, İstanbul, 2006.
- [10] Altınok Müş. Müh. Taahhüt San. ve Tic. Ltd. Şti., Kozyatağı Kavşak Köprüsü Geoteknik Raporu, İstanbul, 2007.
- [11] Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R., “Theoretical stress-strain model for confined concrete”, *J Structural Division, ASCE*, 114(8), 1804-1826, 1988.
- [12] İpek, M., TCK 17. Bölge Otoyollar ve Bağlantı Yolları Üzerindeki Köprü ve Viyadüklerin Onarım ve Güçlendirilmesi İşine Yönelik Sismik Rapor, İstanbul, 2005.
- [13] Aydınoğlu, M.N., Mevcut veya Güçlendirilen Köprü ve Viyadüklerin Deprem Performanslarının Nonlineer Analiz Yöntemleri ile Değerlendirilmesi, İstanbul, 2005.
- [14] Priestly, M.J.N., Seible, F., Calvi, G.M., Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley&Sons, New York, 1996.
- [15] Farzad, N., Kelly, J.M., Design of Seismic Isolated Structures, John Wiley&Sons Inc., New York, 1999.