SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

S.Ü. Müh. Bilim ve Tekn. Derg., c.6, s.3, ss. 417-432, 2018
Selcuk Univ. J. Eng. Sci. Tech., v.6, n.3, pp. 432-432, 2018
ISSN: 2147-9364 (Electronic)
DOI: 10.15317/Scitech.2018.142

BASİT MESNETLİ TEK AÇIKLIKLI ÇELİK DEMİRYOLU KÖPRÜSÜNÜN DEPREM DAVRANIŞININ KIRILGANLIK EĞRİLERİ YARDIMI İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

[1,2]Mehmet Fatih YILMAZ, [2]Barlas Ozden CAGLAYAN

[1]Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, SAMSUN
[2]İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İSTANBUL
[1] yilmazmehmet3@itu.edu.tr , [2] caglayan@itu.edu.tr

(Geliş/Received: 09.08.2017; Kabul/Accepted in Revised Form: 28.12.2017)

ÖZ: Kırılganlık analizi köprülerin deprem performanslarının belirlenmesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Aktif deprem kuşağında yer alan ülkemizde demiryolu köprülerinin deprem performanslarının belirlenmesi olası deprem senaryoları için maddi ve can kayıplarının önlenmesi için büyük önem taşımaktadır. Ülkemizdeki demiryolu köprülerinin 19 uncu yüzyılın sonları ile 20 inci yüzyılın başlarında inşa edildiği görülmektedir. Devlet Demiryolları envanterinde bulunan köprüler; çelik, yığma ve betonarme köprülerden oluşmakla birlikte bunların önemli bir kısmı tarihi köprü niteliğindedir. Demiryolu köprülerinin uzun kullanım ömrünün olması ve köprülerin imal edildiği zamanın teknolojisi ile günümüz teknolojisi arasındaki gelişmeler göz önüne alındığı takdirde köprülerin deprem performanslarının belirlenmesi için ayrıntılı çalışmaların yapılması gerekliliği açıkça görülmektedir. Bu çalışmada Türkiye'de ki demiryolu hatlarında sıklıkla kullanılan basit mesnetli tek açıklıklı bir çelik demiryolu köprüsü ele alınmıştır. Köprünün doğrusal olmayan analizlerinin yapılabilmesi için A, B ve C zemin sınıflarında 30 farklı gerçek deprem kaydı seçilmiş ve bu deprem kayıtları en büyük yer ivmesi 0.1g ile 1.0g arasın da 10 sarsıntı şiddeti değerine oranlanmış ve 300 zaman tanım alanına doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. Köprünün matematiksel modeli yaygın olarak kullanılan bir sonlu elemanlar programı yardımı ile imalat paftalarına uygun şekilde oluşturulmuştur. Kırılganlık eğrileri elde edilirken maksimum olasılık yaklaşımından faydalanılmış ve her bir köprü elemanı için dört farklı hasar sınıfına ait kırılganlık eğrileri elde edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda köprü mesnetlerinin köprünün en zayıf elemanları olduğu tespit edilmiştir. Köprü mesnetlerinde %50 olasılıkla hafif hasara neden olan sarsıntı şiddeti parametresi 0.086g olarak belirlenmiştir. Köprü üst yapı elemanları incelendiği takdirde ise %50 olasılıkla hasar oluşmasına neden olan sarsıntı şiddeti parametresi 0.32 g olarak belirlenmiştir. Üst yapı elemanlarında plastik davranış başladıktan sonra yüklerin tekrar dağılımı mümkün olmamaktadır. Bu nedenle üst yapı gevrek davranış göstermekte ve hafif hasara ulaşıldıktan hemen sonra orta, ileri ve göçme durumu hasarları gözlemlenmektedir. Köprünün kullanım sınır durumları incelendiği takdirde ise kullanım hız limitlerinin artması ile köprü hasar olasılıklarının arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan analizler dikkate alınarak demiryolu hat güvenliğinin arttırılması için deprem riski yüksek olan bölgelerde köprü kullanım hız limitlerinin sınırlandırılması gerektiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Artımsal dinamik analiz, Demiryolu Köprüleri, Doğrusal olmayan analiz, Kırılganlık Analizi, Köprü.*

Evaluation of The Earthquake Behavior of Single Span Simply Supported Steel Railway Bridges by Fragility Curve

ABSTRACT: Fragility analysis is widely used in determining the earthquake performance of bridges. Determination of earthquake performances of railway bridges in Turkey which is located in the active earthquake zone is of great importance for preventing earthquake loss and material loss for possible

earthquake scenarios. When the railway bridges in our country are examined it is seen that they are generally constructed in the late 19th century and early 20th century. Turkish Railway administration's bridge inventory contains steel, masonry and reinforced concrete bridges, some of which are historical bridges. It is clear that detailed studies should be carried out to evaluate the seismic performance of bridges considering their long period service life and changes of technology and construction methodologies between their construction days and nowadays. In this study, a single-span steel railway bridge with simple support, which is frequently used in railway lines in Turkey is investigated. In order to make nonlinear analysis of the bridge, 30 different real earthquake records are selected in A, B and C ground classes. These earthquake records are scaled to 10 different shaking intensity values between 0.1 g and 1.0 g, and 300 nonlinear time-history analyzes are performed. The mathematical model of the bridge is constructed in accordance with the shop drawing with the help of commonly used finite element software. When the fragility curves are obtained, the maximum probability approach is used and the fragility curves of four different classes of damage are obtained for each bridge element. The results obtained are elaborated in detail. As a result of the analyzes, it is determined that the bridge supports are the weakest elements of the bridge. Intensity measure which causes 50% probability slight damage on bridge supports is 0.086g. The intensity measure, which causes 50% probability of damages for bridge superstructures, is 0.32 g. Redistribution of loads is not possible after plastic behavior is start in superstructure, for this reason the superstructure shows brittle behavior and moderate, extensive and complete damage are observed immediately after slight damage is reached. Considering the serviceability limit state, the analysis shows that increase in the use speed, increase the probability of failure. For the high risk seismic region use speed of Railway Bridge need to be restrained.

Key Words: *Incremental dynamic analysis, Railway bridges, Nonlinear analysis, Fragility analysis, Bridge.*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kırılganlık eğrileri köprülerin ve köprü elemanlarının deprem performanslarının belirlenmesi için sıklıkla kullanılan etkili bir yöntemdir. Kırılganlık eğrisi köprünün ya da köprü elemanlarının belirli bir yer sarsıntısı değeri için hasar sınırlarını oluşturan sınır değerleri aşıp aşmadığını olasılıksal olarak ifade etmektedir. Kırılganlık eğrileri, deney ve gözlemlere dayalı yöntemlerle, uzman görüşlerine dayalı yöntemlerle ve analitik yöntemlerle elde edilebilir (Shinozuka ve dig., 2000b). Deneysel ve uzman görüşüne dayalı yöntemlerin kullanılması için gerekli verilere ulaşmak birçok durumda mümkün olmamaktadır bu nedenle analitik yöntemler ile kırılganlık eğrilerinin elde edilmesi önem kazanmaktadır. Analitik yöntemler ile kırılganlık eğrilerinin elde edilebilmesi için bazı matematiksel analizlerin yapılması gerekmektedir. Statik itme analizi, doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz ve artımsal dinamik itme analizi bu analizlere örnek olabilirler. Doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizlerle gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilmesine karşın analiz süresi ve işlem yükü artmaktadır. Yapılan analizlerin sonuçlarına göre olasılıksal sismik talep modelleri oluşturulmaktadır. Olasılıksal sismik talep modelinin (PSDM) oluşturulmasında yapılan analizlere göre üç farklı yöntem yer almaktadır, bunlar Bulut (Cloud) yöntemi, Artımsal dinamik itme analizi (IDA) yöntemi ve şerit (Stripe) yöntemidir (Mackie ve Stojadinovic, 2005)(Dolsek, 2009). Bu çalışma kapsamında artımsal dinamik analiz yönteminden faydalanılmıştır. Bunun için seçilen gerçek deprem kayıtları sarsıntı şiddeti değeri 0.1g ile 1.0g arasında 10 farklı değere oranlanmıştır ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Kırılganlık eğrilerinin elde edilmesinde yaygın bir şekilde kullanılan iki parametreli log-normal dağılım fonksiyonundan faydalanılmıştır (Cornell ve dig., 2002b).

Türkiye'de ki demiryolu hatlarının ülke ekonomisine ve yolcu taşımacılığına önemli bir katkısı bulunmaktadır. Bu nedenle olası deprem senaryosunda meydana gelebilecek can kayıpları ve maddi kayıpların önlenmesi veya azaltılması için demiryolu köprülerinin deprem performanslarının belirlenmesi gerekmektedir. Köprülerin deprem performanslarının belirlenmesinde kırılganlık eğrileri etkin ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Shinozuka ve dig., 2000b)(Shinozuka ve dig., 2000a)(Pan ve

dig., 2010). Birçok durumda yeterli veriye ulaşmak zor olduğu için analitik yöntemler ile kırılganlık eğrilerinin elde edilmesi yöntemine gidilmektedir. Artımsal dinamik analiz (IDA) köprünün deprem talebinin belirlenmesinde kullanılan analitik yöntemlerden bir tanesidir. Köprünün ve köprü elemanlarının hasar sınıflarının belirlenmesi ise diğer önemli bir husustur. Mander ve dig., (1996). tarafından yapılan çalışmada çelik karayolu köprü mesnetlerinin doğrusal olmayan davranışları deneysel ve analitik yöntemler yardımı ile elde edilmiştir. Nielson (2005), Mander ve dig. (1996) tarafından yapılan deneysel çalışmalar ve gözlemlere dayanarak Bayesian yaklaşımlarından da faydalanarak kırılganlık eğrilerinin elde edilmesinde köprü elemanlarını dört farklı hasar sınıfı için sınır değerlerini belirlemiştir. Belirlenen hasar sınır durumları dikkate alınarak maksimum olasılık yöntemi ile kırılganlık eğrisine ait parametreler belirlenmektedir (Baker, 2015). Artımsal itme analizindeki analiz yükünün fazla olması ve küçük deprem kayıtlarının büyük sarsıntı şiddeti değerlerine oranlanması ile oluşan belirsizliklerin giderilmesi için sınırlandırılmış artımsal itme analizi de kırılganlık eğrisinin elde edilmesi için kullanılmaktadır (Chandramohan ve dig., 2013).

Bu çalışmada tipik basit mesnetli çelik bir demir yolu köprüsü ele alınmıştır. Seçilen köprü Manisa-Uşak-Dumlupınar-Afyon demiryolu hattı üzerinde yer almaktadır. Köprünün dinamik analizlerinin yapılabilmesi için A, B, ve C zemin sınıflarından 30 farklı gerçek deprem kaydı seçilmiş ve seçilen deprem kayırları 0.1g den 1.0g ye kadar 0.1g aralıklar ile 10 sarsıntı şiddeti değeri için oranlanmıştır. Köprünün deprem performansının belirlenmesi için toplam 300 zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. Zaman tanım alanında analizler yapılırken Sap 2000 sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Analizler sonucunda köprü elemanlarında oluşan yer değiştirmeler ve dönmeler kaydedilmiş olasılık sismik talep modelleri oluşturulmuştur. Köprü elemanları için hasar sınır durumları çelik elemanların dönmelerine bağlı olarak Mohseni, (2012) tarafından yapılan çalışmada belirtilen dönme değerlerine göre ve mesnetlerin yer değiştirmelerine bağlı olarak Neilson (2005) tarafından yapılan çalışmada belirtilen yer değiştirme sınır değerlerine göre belirlenmiştir. Köprü elemanlarının kullanılabilirlik limit durumları ve dayanım limit durumlarına göre ayrı ayrı kırılganlık eğrileri elde edilmiştir. Kırılganlık eğrilerinin elde edilmesinde iki parametreli log-normal dağılım fonksiyonlarından faydalanılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Kırılganlık eğrisi yapısal ve yapısal olmayan elemanlar için deprem etkisi altında oluşan talebin hasar limit durumunu aşıp aşmaması olasılığı olarak ifade edilmektedir. Günümüzde yapısal ve yapısal olmayan elemanların deprem performansının ve tehlike analizlerinin yapılmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Kırılganlık eğrilerinin elde edilebilmesi için üç farklı temel yöntemden faydalanılmaktadır, bunlar uzman görüşüne dayanan kırılganlık analizi, deneysel verilere dayanan kırılganlık analizi ve analitik kırılganlık analizidir (Nielson ve DesRoches, 2006). Uzman görüşüne dayanan kırılganlık analizi ve deneysel verilere dayanan kırılganlık analizlerinin yapılabilmesi için gerekli verilere ulaşılması çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Bu nedenle analitik kırılganlık analizi önem kazanmaktadır. Analitik kırılganlık analizinin yapılabilmesi için yapının sonlu elemanlar modeli gerçekçi bir şekilde oluşturulmalıdır. Yapının deprem etkisi altındaki davranışının belirlenebilmesi için doğrusal ya da doğrusal olmayan analizlerden faydalanılmaktadır. Son olarak yapının performans seviyeleri göz önünde bulundurularak yapıya ait hasar limit durumları belirlenmelidir.

Olasılık Sismik Talep Modelinin Oluşturulması (Probabilistic Seismic Demand Models)

Kırılganlık eğrilerinin elde edilmesinde depremin yapıdan talebinin belirlenmesi için olasılık sismik talep modeli (PSDM) oluşturulmaktadır. Bu model depremin yapıdan talebinin bir sarsıntı şiddeti büyüklüğü (IMs) cinsinden elde edilmesine yaramaktadır. Böylece depremin yapıdan talebi deprem sarsıntısı şiddeti cinsinden ifade edilebilmektedir. PSDM denklem (1) de tanımlandığı şekilde elde edilebilir.

$$P[EDP \geq d \,|\, IM] = 1 - \phi\left(\frac{\ln(d) - \ln(\hat{EDP})}{\beta_{EDP|IM}}\right) \quad (1)$$

Denklem 1 depremin yapıdan talebi (EDP)' nin yapının hasar limit durumu d den büyük olma olasılığını ifade etmektedir. Burada EDP analitik yöntemler yardımı ile doğrusal veya doğrusal olmayan analizler kullanılarak elde edilebilmektedir. EDP' nin elde edilmesinde en gerçekçi sonuç doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler yardımı ile elde edilmektedir. Bu analizler rasgele seçilen deprem kayıtları yardımı ile yapılabileceği gibi belirli sarsıntı şiddeti değerine oranlanmış deprem kayıtları yardımı ile de yapılabilmektedir. EDP ile IMs arasındaki ilişti kuvvet modeli ile denklem (2) deki gibi ifade edilebilmektedir (Cornell ve dig., 2002a).

$$\hat{EDP} = aIM^b \quad (2)$$

Burada EDP depremin yapıdan talebini, IM ise deprem sarsıntı şiddetini ifade etmektedir. a ve b değerleri ise doğrusal regresyon analizi sabitleridir. Denklem (2) deki kuvvet modelinde eşitliğin her iki tarafının da logaritması alınırsa denklem (3) teki gibi doğrusal bir ifade elde edilmiş olur.

$$\ln(EDP) = \ln(a) + b\ln(IM) \quad (3)$$

Denklem (1) de ϕ standart normal dağılımı ifade etmektedir. $\beta_{EDP|IM}$ ise koşullu standart sapmayı ifade etmektedir. Olasılık talep modelinde koşullu standart sapma ne kadar büyük ise deprem talebindeki belirsizlik o kadar artmaktadır. $\beta_{EDP|IM}$ denklem (4) yardımı ile belirlenebilir (Padgett ve dig., 2008)(Padgett ve DesRoches, 2008).

$$\beta_{EDP|IM} \cong \sqrt{\frac{\sum(\ln(d_i) - \ln(aIM^b))^2}{N-2}} \quad (4)$$

Maksimum Olasılık Yöntemi ile Kırılganlık Eğrilerinin Elde Edilmesi **(Deriving Fragility Curve Using Maximum Likelihood Method)**

Kırılganlık eğrisi yaygın bir şekilde iki parametreli logaritmik normal dağılım fonksiyonu yardımı ile tanımlanmaktadır. Kırılganlık eğrisinin elde edilebilmesi için bu iki parametrenin belirlenmesi gerekmektedir. Kırılganlık parametrelerinin belirlenmesi için doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerden faydalanılmaktadır. Kırılganlık eğrisi parametrelerinin belirlenmesi için yaygın olarak kullanılan iki istatistiki yöntem literatür'deki çalışmalarda yer almaktadır. Moment yönteminde analitik verilere ait standart sapma ve ortalama (moment) değerleri elde edilmektedir. Maksimum olasılık yönteminde ise analiz verileri sonucunda elde edilen verilere en büyük olasılıkla yakınsayan eğriyi tanımlayan parametreler bulunmaktadır (Baker, 2015).

$$P(C \,|\, IM = x) = \Phi\left(\frac{\ln(x/\theta)}{\beta}\right) \quad (5)$$

Denklem (5) te yer alan $P(C|IM = x)$ ifadesi deprem sarsıntı şiddetin IM in x değerine eşit olma durumunda yapıda hasar oluşma olasılığını ifade etmektedir. Φ birikimli standart normal dağılım fonksiyonunu ifade etmektedir, θ ve β ise ortalama ve standart sapma değerlerini ifade etmektedir. Yapılan analizler sonucunda bilinmeyen θ ve β değerleri hesaplanmaktadır.

Kırılganlık fonksiyon sabitlerinin belirlenmesi için etkili bir şekilde kullanılan yöntemlerden bir tanesi de artımsal dinamik itme analizi (IDA) yöntemidir. Bu yöntemde bir gurup gerçek ya da sanal deprem kaydı seçilir ve seçilen deprem kayıtları hafif sarsıntı şiddetinden büyük sarsıntı şiddetine

doğru kademeli bir şekilde oranlanarak her bir sarsıntı şiddeti için yapıda oluşan tepkiler belirlenir. Yapı tamamen göçme durumuna ulaşıncaya kadar sarsıntı şiddeti değeri arttırılarak oranlamalara ve analizlere devam edilir. Artımsal itme analizinin yaygın bir şekilde kullanılmasına karşın bazı olumsuz yönleri bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, deprem kayıtlarının yapıda tamamen göçmeye neden olacak sarsıntı şiddeti değerine kadar oranlanması dolayısı ile yapılması gereken analiz miktarının artması ve analiz zamanının artmasıdır. İkincisi sarsıntı şiddetinin çok büyük değerleri gerçek hayatta gözlenme olasılığı çok düşük olan depremleri ifade etmektedir dolayısı ile yapıların bu büyüklükte depremler ile karşılama ihtimali yok denecek kadar azdır. Son olarak ise küçük sarsıntı şiddetine sahip deprem kayıtlarını büyük sarsıntı şiddetlerine oranlamak deprem kayıtlarının karakteristik özelliklerindeki farklılıklar göz önüne alındığı zaman gerçekçi sonuç vermeyeceği görülmektedir. Bu durumda sınırlandırılmış artımsal dinamik itme analizi bir alternatif olarak kaşımıza çıkmaktadır. Deprem mühendisliğinde sarsıntı şiddetinin yapının bulunduğu bölgede gözlemlenebilir değerlerde olduğu durumlara karşı gelen veriler daha değerlidir. Bu nedenle analizlerde kullanılacak deprem verileri belirli bir sarsıntı şiddeti değerine kadar oranlanması ile büyük analiz yükleri ve diğer olumsuz durumlar hafifletilmiş olacaktır.

Denklem (6) maksimum olasılık fonksiyonu ile kırılganlık eğrisinin tanımlanmasını ifade etmektedir. Denklem (7) de verilen ifadede eşitliğin sağ tarafı için en büyük değeri veren θ ve β değerleri belirlenmektedir. Bu değerlere göre elde edilen kırılganlık eğrisi analizler sonucu elde edilen talep durumlarına en uygun eğriyi vermektedir.

$$Likelihood = \phi\left(\frac{\ln(IM_i / \theta}{\beta}\right) \tag{6}$$

$$\left\{\hat{\theta},\hat{\beta}\right\} = \arg\max_{\theta,\beta} \sum_{j=1}^{m}\left[\ln\phi\left(\frac{\ln(IM / \theta}{\beta}\right)\right] + [n-m]\ln\left[1-\Phi\left(\frac{\ln(IM_{\max} / \theta}{\beta}\right)\right]\right. \tag{7}$$

Köprünün Kullanım ve Güvenlik Limit Durumlarının Belirlenmesi (Determining Serviceability and Damage Limit State of the Bridge)

Köprülerde oluşan hasarların limit durumlarının belirlenmesi köprünün deprem performansının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Her bir köprü elemanı diğerlerinden farklı karakteristik özelliklere sahip olabilmektedir, bu nedenle köprü elemanlarında ayrı ayrı meydana gelen hasarlar ile köprünün tamamında meydana gelen hasarlar farklılık gösterebilmektedir. Köprü elemanlarında meydana gelen hasarlar tarif edilirken HAZUS-MH (FEMA,2003) te tanımlanan dört farklı hasar durumundan faydalanılmıştır. Bunlar, hafif hasar, orta hasar, ileri hasar ve göçme durumudur. Her bir hasar sınıfı köprünün kullanım performansında belirli bir kayba ulaşması ve köprünün onarılabilmesi için gerekli süreye göre belirlenmektedir. Böylece farklı elemanlarda meydana gelen hasar durumları değerlendirilirken oluşan hasar durumlarının köprü üzerindeki etkileri dikkate alınmış olmaktadır. Yapılan analitik çalışmalar sonucunda her bir köprü elemanına ait kırılganlık eğrileri ayrı ayrı elde edilmektedir böylece köprü elemanlarının ayrı ayrı deprem performansları ile değerlendirme yapılabilmekte ve etkili bir güçlendirme yapabilmek için hangi elemanlara öncelik tanınması gerektiği ile ilgili değerlendirme yapılabilmektedir.

Bu çalışmada Türkiye demiryolu hattı üzerinde yer alan tipik basit mesnetli dolu gövdeli kiriş yardımı ile teşkil edilmiş tek açıklıklı bir köprü ele alınmıştır. Köprü bir tarafında sabit diğer tarafında hareketli mesnetler yardımı ile teşkil edilmiştir. Bu mesnetler karayolu köprülerinde kullanılan tipik kısa tip çelik mesnetler ile benzer özelliktedirler. Kısa tip çelik mesnetlerin doğrusal olmayan davranışları Mander ve arkadaşları tarafından deneysel olarak belirlenmiştir (Mander ve dig., 1996) ve ileriki bölümlerde ayrıntılı bir şekilde bahsedilmektedir. Köprü mesnetlerine ait hasar limitleri sınır durumları Çizelge (1) de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Mesnet yer değiştirme hasar limitleri (Nielson 2005)
Table 1. *Bearing displacement damage Limit States (Nielson 2005)*

Birleşenler	Hasar limitleri			
	Hafif	**Orta**	**İleri**	**Göçme**
Kısa tip çelik sabit mesnet-Boy(mm)	6	20	40	255
Kısa tip çelik sabit mesnet-En(mm)	6	20	40	255
Kısa-tip çelik hareketli mesnet-Boy(mm)	50	100	150	255
Kısa-tip çelik hareketli mesnet-En(mm)	6	20	40	255

Kısa tip çelik sabit mesnet için boyuna doğrultuda 6mm yer değiştirdiği durumda mesnedin oturduğu beton ayak üzerinde çatlaklar oluşmaktadır ve hafif hasar olarak tanımlanmıştır. 20 mm yer değiştirme oluştuğu durumda ise mesnette akmalar meydana gelmekte ve ankraj bulonlarında büyük yer değiştirmeler gözlemlenmekte ve orta hasar olarak tanımlanmaktadır. 40 mm lik yer değiştirme meydana geldiğinde köprünün mesnetten düştüğü ya da mesnette büyük yer değiştirmeler meydana geldiği gözlemlenmekte ve ileri hasar olarak tanımlanmaktadır. 255 mm lik yer değiştirme meydana geldiğinde köprünün ayak ya da yaklaşım üzerinden düştüğü kabul edilmekte ve göçme sınır durumu olarak tanımlanmaktadır.

Köprü üst yapısı dikkate alındığı takdirde yapma çelik elemanlardan teşkil edildiği görülmektedir. Yüklerin taşıyıcı sistem üzerinde aktarımı sırası ile raylardan traversler aracılığı ile boylamalara oradan enlemeler ve ana kirişlere daha sonrada mesnetler aracılığı ile zemine şekildedir. Yük aktarım esnasında köprü elemanları eğilme etkisine maruz kaldığı görülmektedir. Eğilme etkisi altındaki çelik elemanların hasar sınır durumları elemanlarda meydana gelen dönmelere bağlı olarak Çizelge (2) de belirtilmiştir. (Mohseni, 2012).

Çizelge 2. Çelik elemanların moment-eğrilik hasar sınır değerleri.
Table 2. *Moment-Rotation damage state of steel frame*

Birleşenler	Hasar limitleri			
	Hafif	**Orta**	**İleri**	**Göçme**
Kiriş dönme sünekliği μ_φ	1	3	6	8

Kullanım sınır koşulları ise bu çalışmada göz önüne alınan diğer bir hasar sınır durumudur. 1999 Kocaeli depremi esnasında Haydarpaşa-İstanbul tren hattı üzerinde hareket halinde olan bazı trenler ray hattından çıkmış ve bakım istasyonlarındaki bazı trenler ise devrilmiştir (Byers, 2004). Türkiye'deki demir yolu hattı incelendiği takdirde bazı bölgelerde köprüler arasındaki mesafenin çok az olduğu görülmektedir, bu ise deprem esnasında hareket halindeki bir trenin köprü üzerinde yer alma olasılığını arttırmaktadır. Bu nedenle yapılan çalışmada trenin köprü üzerinde olması durumu incelenmiş ve bu durumda EN 1990 Annex 2 de demiryolu köprülerinin kullanım sınır koşuları için belirlenen sınır durumların aşılıp aşılmadığı değerlendirilmiştir. EN1990 annex 2 de farklı tren hızları için yanal yer değiştirme sınırları Çizelge (3) teki gibi belirlenmiştir.

Çizelge 3. Kullanım durumu yanal yer değiştirme sınır koşulları
Table 3. *Serviceability lateral displacement limit state*

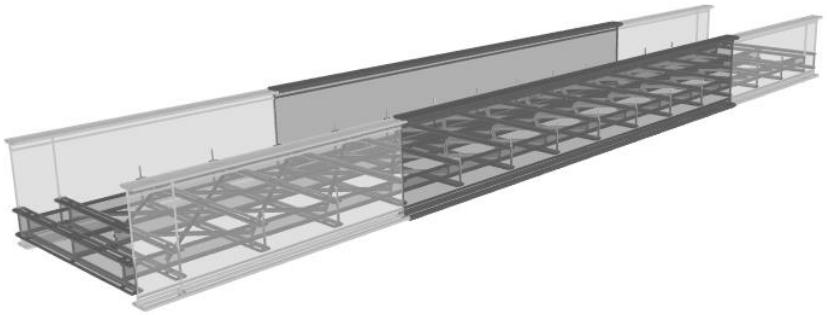
Hız Değeri V (km/h)	**Dönme (rad)**	**Yarıçap (1/m)**
V≤120	0.0035	1700
120<V≤200	0.0020	6000
V>200	0.0016	14000

Deprem etkisi altında köprüde oluşan yer değiştirmeler dikkate alınarak kullanım koşulları için kırılganlık eğrileri elde edilmiştir.

SEÇİLEN KÖPRÜNÜN TANIMI (DESCRIPTION OF CASE BRIDGE)

Türkiye demir yolu hatlarının imalatı İngiltere, Fransa ve Almanya gibi Avrupa ülkelerinin katkıları ile tarım ürünlerinin ve değerli madenlerin limanlara taşınması için yapılmaya başlanmıştır. Türkiye'deki ilk demir yolu hattı 1856 yılında İzmir ve Aydın arasında bir İngiliz firması tarafından inşa edilmiştir ve uzunluğu 130 km dir (Çağlıyan ve Yıldız, 2013). Türkiye'deki demiryolu hatları bakım onarım ve işletme kolaylığı bakımından 7 bölgeye ayrılmıştır. Toplam demiryolu hattı uzunluğu 8722 km'dir. Demiryolu hatlarında toplam 25443 adet menfez ve köprü yer almaktadır ve bu yapıların %81 1960 öncesinde inşa edilmiştir. (Çağlıyan ve Yıldız, 2013) Bu nedenle demiryolu hatları üzerinde tarihi değere sahip birçok yapı yer almaktadır.

Bu çalışmada Manisa-Uşak-Dumlupınar-Afyon hattı üzerinde yer alan tek açıklıklı basit mesnetli bir çelik demiryolu köprüsü ele alınmıştır. Köprü iki ana kiriş tarafından taşınmaktadır, ana kirişlere enleme kirişleri bağlanmakta enleme kirişlerine de boylama kirişleri bağlanmaktadır. Boylama kirişlerinin üzerine çelik tabla yardımı ile balast teşkil edilmiş, traversler balast taşlarının üzerine yerleştirilmiştir. Traverslerin üzerine ise raylar teşkil edilmiştir. Böylece tren yükleri ana kirişlere sıra ile aktarılmakta ve ana kirişlerden mesnetlere aktarılmaktadır. Köprü boyu 22,4 m'dir. Ana kiriş yüksekliği 1.82 m'dir ve ana kiriş yapma bir kiriştir ve çelik plakalar ile korniyerlerin perçinler yardımıyla birleştirilmesi yoluyla teşkil edilmiştir. Boylama ve enleme elemanları IPN450, IPN300, ve UPN240 hadde profilleri yardımı ile teşkil edilmiştir. Köprü üzerinde teşkil edilen çelik tabla ve balast taşları aynı zamanda köprünün yanal rijitligine katkı sağlamakta ve köprü kütlesini arttırdığı için köprünün dinamik davranışını etkilemektedir. Şekil 1 de köprünün üç boyutlu model görüntüsü yer almaktadır.

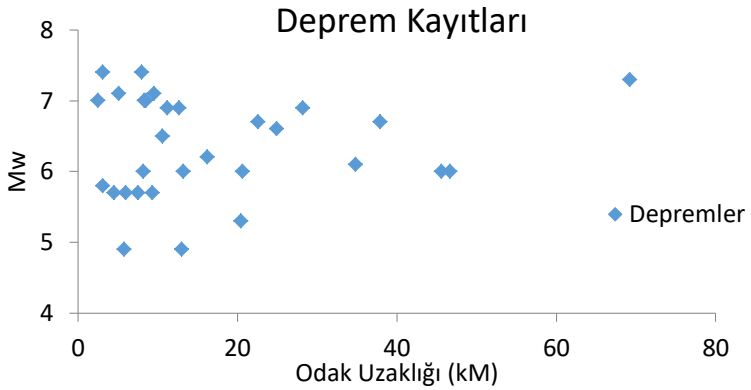


Şekil 1. Köprünün 3D model görünümü
Figure 1. *3D model view of bridge*

KÖPRÜ MODELİ VE ANALİZİ (ANALYSIS OF BRIDGE MODEL)

Deprem Kayıtlarının Seçilmesi (Selection of Earthquake Record)

Analitik yöntemler ile kırılganlık eğrilerinin elde edilebilmesi için köprünün deprem etkisi altındaki davranışı doğrusal veya doğrusal olmayan analizler yardımı ile belirlenmelidir. Doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler doğrusal yöntemlere göre daha gerçekçi sonuç verdiği için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Artımsal dinamik itme analizi de doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz prosedürlerinden biridir. Artımsal dinamik itme analizinde deprem kaydı gurubu belirli deprem sarsıntı şiddeti değerlerine oranlanır ve her bir sarsıntı şiddeti büyüklüğü için analizler yapılarak köprünün deprem taleplerinin belirlenir (Mackie ve Nielson, 2009)(Mackie ve dig., 2008). Yapılan analizlerde seçilen deprem kayıtlarının karakteristik özellikleri köprüde oluşan deprem talebini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle deprem kayıtlarının seçilmesi gerçekçi bir sonuç elde edebilmek için önemlidir.



Şekil 2. Deprem kayıtlarının moment büyüklük ve odak uzaklık dağılımları
Figure 2. *Moment magnitude and central distance distribution of earthquake record*

Bu çalışmada 3 farklı zemin sınıfından 10 ar adet gerçek deprem kaydı seçilmiştir. Deprem kayıtları Türkiye'de de gözlenen yanal atımlı depremlerden seçilmiştir. Deprem kayıtları seçilirken farklı moment büyüklükleri, maksimum ivme değeri PGA ve deprem odak uzaklıkları dikkate alınmıştır. Seçilen deprem kayıtlarına ait PGA değerleri 0.08g-0.78g arasında değişmektedir, moment büyüklük değeri 4,9 ile 7,4 arasında değişmektedir, ve deprem odak uzaklığı ise 2.5kM ile 69,2 km arasında değişmektedir. Şekil (2) de seçilen deprem kayıtlarının moment büyüklükleri ile odak uzaklıkları arasındaki ilişki gösterilmektedir, ayrıca deprem kayıtlarının zemin sınıflarına göre dağılımları, PGA, odak uzaklık ve moment büyüklük değerleri Çizelge 4 te belirtilmiştir. Seçilen deprem kayıtları PGA 0.1g ile 1.0g arasında oranlanarak deprem analizleri yapılmıştır. Toplamda 300 deprem kaydı için analiz yapılmıştır.

Köprünün 3 Boyutlu Analitik Modelinin Oluşturulması (Deriving 3-D Analytical Model of Bridge)

Köprü modeli oluşturulurken çubuk elemanlardan faydalanılarak imalat projesine ve arazi ölçümlerinde elde edilen verilere göre modellemeler yapılmıştır. Köprü elemanları ve mesnetlerinin geometrik koşulları dikkate alınarak daha gerçekçi model elde edebilmek için modelleme esnasında bu farklılıklar modele yansıtılmıştır. Örneğin ana kirişler ile enleme kirişlerinin merkezleri arasında fark modelde link elemanlar yardımı ile tanımlanmıştır.

Modelleme esnasında traverslerin ve rayların ağırlıkları ölü yük olarak boylama elemanlarının üzerine yayılı yük olarak etkitilmiştir. Birleşim levhalarının ve bayrak levhalarının ağırlıkları ihmal edilmiştir. Köprünün çelik malzemesi ST37 olarak tanımlanmıştır. Modal analiz esnasında köprü üzerinde sadece ölü yükler göz önüne alınmıştır ancak doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler yapılırken ölü yükler ile birlikte tren yükleri de dikkate alınmıştır. Köprü modeli Sap 2000 sonlu elemanlar programı yardımı ile 242 kiriş, 40 link ve 152 düğüm noktası kullanılarak teşkil edilmiştir.

Zaman tanım alanında analizler esnasında malzeme ve geometri bakımından doğrusal olmayan davranış dikkate alınmıştır. Plastik mafsallar Sap 2000 programının içerisinde yer alan fiber PMM plastik mafsal modülü kullanılarak her bir kiriş elemanın başlangıç, orta ve bitiş noktalarında tanımlanmıştır. Geometri bakımından doğrusal olmayan davranışın analizinde büyük yer değiştirmeler kuralından faydalanılmıştır zaman tanım alanında analiz için Newmark direk iterasyon yöntemi kullanılmıştır. Deprem kayıtlarının iki yatay ve bir düşey olmak üzere üç doğrultusu için de analizler yapılmıştır.

SELÇUK
ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

S.Ü. Müh. Bilim ve Tekn. Derg., c.6, s.3, ss. 417-432, 2018
Selcuk Univ. J. Eng. Sci. Tech., v.6, n.3, pp. 432-432, 2018
ISSN: 2147-9364 (Electronic)
DOI: 10.15317/Scitech.2018.142

Çizelge 4. Zemin sınıflarına göre seçilen deprem kayıtları
Table 4. *Selected earthquake record by ground classification*

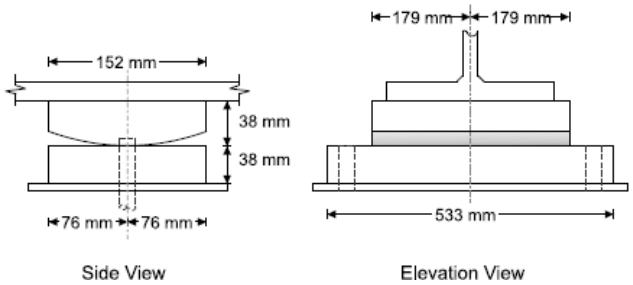
A zemin sınıfına ait deprem verileri						B zemin sınıfına ait deprem verileri						C zemin sınıfına ait deprem verileri					
Deprem	**Tarih**	**Moment Büyüklük (M_w)**	**Kayıt**	**Yer ivmesi (g)**	**Odak Uzaklığı (km)**	**Deprem**	**Tarih**	**Moment Büyüklük (M_w)**	**Kayıt**	**Yer ivmesi (g)**	**Odak Uzaklığı (km)**	**Deprem**	**Tarih**	**Moment Büyüklük (M_w)**	**Kayıt**	**Yer ivmesi (g)**	**Odak Uzaklığı (km)**
Morgan Hill	24.04.1984	6.2	G01320	0.098	16.2	**Coyote Lake**	06.08.1979	5.8	G06230	0.4339	3.1	**Coyote Lake**	06.08.1979	5.7	G02140	0.339	7.5
Coyote Lake	06.08.1979	5.7	G01320	0.132	9.3	**Northridge**	17.01.1994	6.7	ORR090	0.5683	22.6	**Coyote Lake**	06.08.1979	5.7	G03050	0.272	6
Landers	28.06.1992	7.3	ABY090	0.146	69.2	**Loma Prieta**	18.10.1989	7.1	CLS000	0.6437	5.1	**Coyote Lake**	06.08.1979	5.7	G04270	0.248	4.5
Loma Prieta	18.10.1989	6.9	G01090	0.473	11.2	**Livemor**	27.01.1980	7.4	LMO355	0.252	8	**Imperial Valley**	15.10.1979	7	I-ELC180	0.313	8.3
N. Palm Springs	08.07.1986	6	AZF225	0.099	20.6	**N. Palm Springs**	08.07.1986	6	DSP000	0.331	8.2	**Imperial Valley**	15.10.1979	7	H-AEP045	0.327	8.5
N. Palm Springs	08.07.1986	6	ARM360	0.129	46.7	**Northridge**	17.01.1994	6.7	TPF000	0.364	37.9	**Imperial Valley**	15.10.1979	7	H-BCR230	0.775	2.5
N. Palm Springs	08.07.1986	6	H02090	0.093	45.6	**San Fernando**	02.09.1971	6.6	ORR021	0.324	24.9	**Imperial Valley**	15.10.1979	6.5	H-CX0225	0.275	10.6
Whittier Narrows	01.10.1987	5.3	MTW000	0.123	20.4	**Whitter Narrows**	10.01.1987	6	ALH180	0.333	13.2	**Cape Mendocino**	25.04.1992	7.1	PET090	0.662	9.5
Anza (Horse Cany)	25.02.1980	4.9	PTF135	0.131	13	**Kocaeli**	17.08.1999	7.4	SKR090	0.376	3.1	**Loma Prieta**	18.10.1989	6.9	HCH090	0.247	28.2
Anza (Horse Cany)	25.02.1980	4.9	TVY135	0.081	5.8	**Victoria, Mexica**	09.06.1980	6.1	CPE045	0.62	34.8	**Loma Prieta**	18.10.1989	6.9	G02000	0.367	12.7

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

S.Ü. Müh. Bilim ve Tekn. Derg., c.6, s.3, ss. 417-432, 2018
Selcuk Univ. J. Eng. Sci. Tech., v.6, n.3, pp. 432-432, 2018
ISSN: 2147-9364 (Electronic)
DOI: 10.15317/Scitech.2018.142

Köprü davranışının belirlenmesinde mesnetlerin davranışının önemli bir etkisi bulunmaktadır. Mevcut çelik demiryolu köprüsü bir tarafı hareketli (roller) diğer tarafı sabit mesnet ile teşkil edilmiştir. Karayolu köprülerinde kullanılan kısa tip çelik mesnetlerin doğrusal olmayan davranışları ayrıntılı bir inceleme yapılarak Mander, (1996) tarafından belirlenmiştir. Karayolu köprülerinde kullanılan kısa tip çelik mesnetler demiryolu köprülerinde kullanılan mesnetlere benzer davranış sergilemektedir. Bu çalışmada mesnet davranışları tanımlanırken kısa tip çelik mesnetlere ait davranış özelliklerinden faydalanılmıştır.

Kısa tip sabit mesnetler her iki doğrultuda yer değiştirmelere izin vermezken boyuna doğrultuda dönmelere izin vermektedir. Boyuna yönde bulon deliklerinden dolayı 2,0 mm serbest yer değiştirmeye izin verilmektedir daha sonra başlangıç rijitligi 210 kN/mm olacak şekilde mesnet hareketi gerçekleşmektedir. Enine doğrultuda ise bulon deliklerinden dolayı 1,5 mm serbest harekete izin verilmektedir, serbest hareket sınırına ulaşıldığı zaman 350kN/mm rijitlige sahip olacak şekilde yer değiştirmeler gerçekleşmektedir. Şekil 3 te kısa tip çelik sabit mesnetlere ait şematik görüntü yer almaktadır. Kısa tip çelik sabit mesnetlere ait kuvvet yer değiştirme grafikleri ise Şekil 4 te görüldüğü gibi Nielson tarafından elde ediliştir (Nielson, 2005).

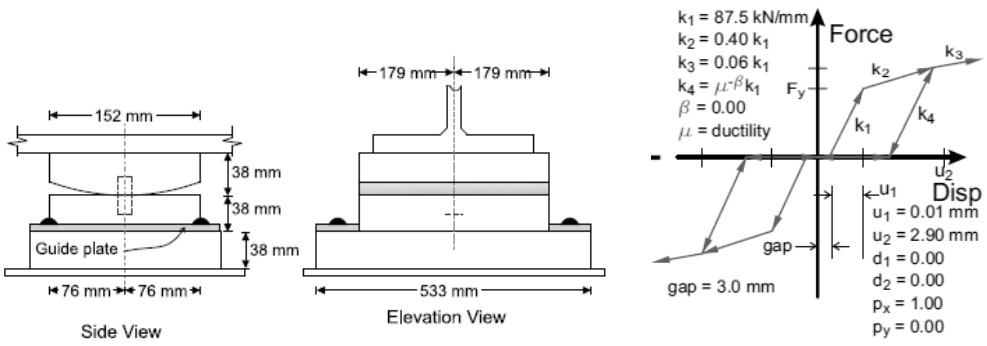


Şekil 2. Kısa -Tip Sabit Mesnet (Nielson, 2005)
Figure 3. *Low-Type fixed bearing (Nielson, 2005)*



Şekil 3. a) Boyuna doğrultu için kuvvet-yer değiştirme ilişkisi b) Yatay doğrultu için kuvvet-yer değiştirme ilişkisi (Nielson, 2005)
Figure 4. *a) Longitudinal direction force displacement graphic b) Transverse direction force displacement graphic. (Nielson, 2005)*

Kısa tip hareketli mesnetler boyuna doğrultuda yer değiştirmeye izin verirken enine doğrultuda yer değiştirmeye izin vermemektedir. Boyuna doğrultuda bulon deliklerinden dolayı 3.0mm serbest yer değiştirmeye izin verilmektedir, serbest yer değiştirmeden sonra 87,5 kN/mm rijitlik ile mesnet yer değiştirmeleri başlamaktadır. Enine doğrultuda mesnet ile zemin arasındaki sürtünme katsayısı $\mu = 0.35$ olarak belirlenmiştir. Kısa tip hareketli mesnetlere ait şematik görüntü ve kuvvet yer değiştirme ilişkisi Şekil 5 te yer almaktadır (Nielson 2005).

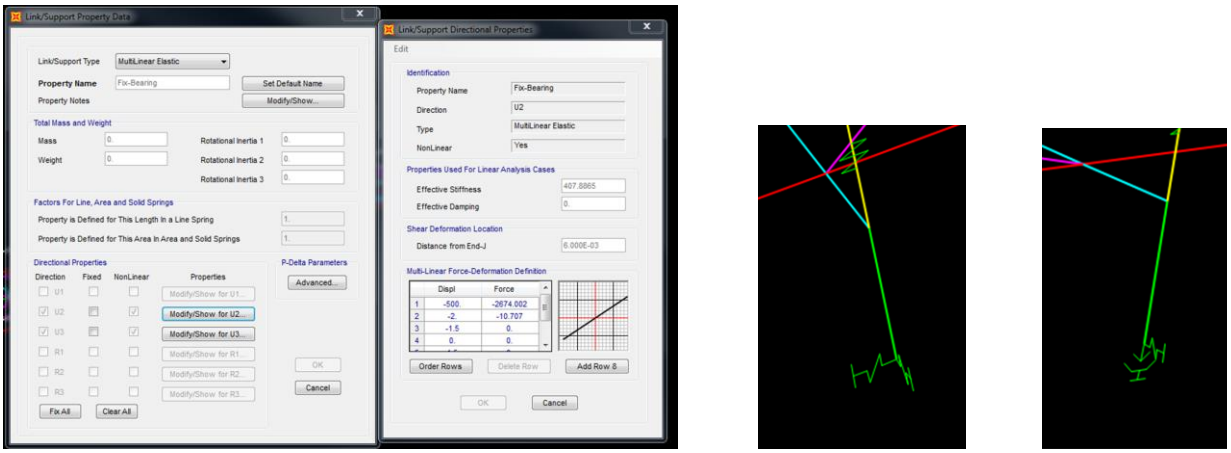


(a) (b)

Şekil 4. a) Kısa tip hareketli mesnet b) Kısa tip hareketli mesnet boyuna doğrultu kuvvet yer değiştirme ilişkisi (Nielson 2005).

Figure 5. *a) Low-Type steel sliding bearing b) Low-Type steel sliding bearing longitudinal direction force displacement graphic. (Nielson 2005)*

Mesnetlerin doğrusal olmayan davranışları multi-linear elastik link elemanlar ve sürtünmeli link elemanlar yardımı ile modellenmiştir. Bulon deliklerinden kaynaklanan serbest yer değiştirmeler modellemelerde dikkate alınmıştır. Şekil 6 da Sap2000 programında mesnetlerin tanımlandığı ekran görüntüleri ve mesnet görüntüleri yer almaktadır.



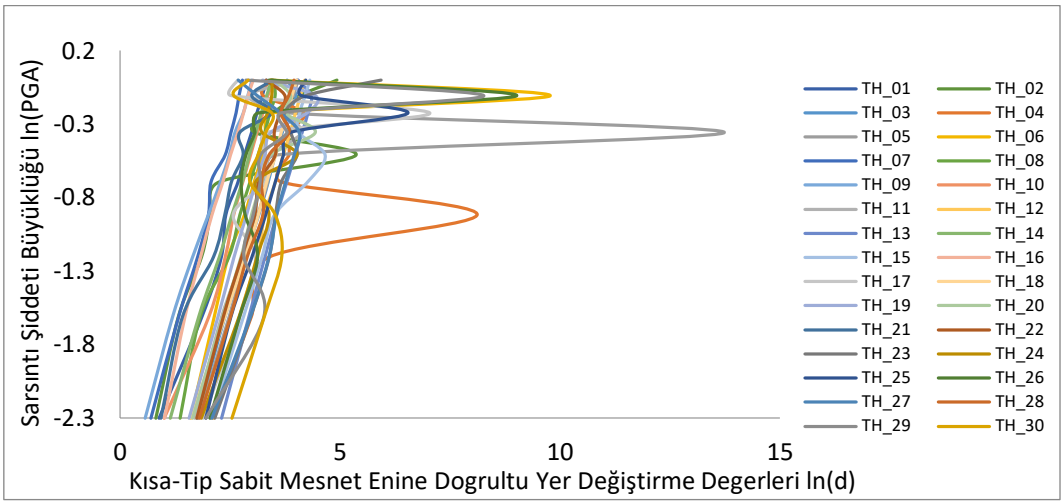
a b c

Şekil 5. a) Sap2000 mesnet tanımlama ekranı, b) Sap2000 kısa tip çelik sabit mesnet görünüşü, c) Sap2000 kısa tip çelik hareketli mesnet görüntüsü

Figure 6. *a) Sap2000 bearing definition screen view b) Sap2000 Low-Type steel fix bearing view c) Sap2000 Low-Type steel sliding bearing view*

Artımsal İtme Analizi İle Köprü Talebinin Belirlenmesi.(Determining response of bridge using Incremental Dynamic Analysis)

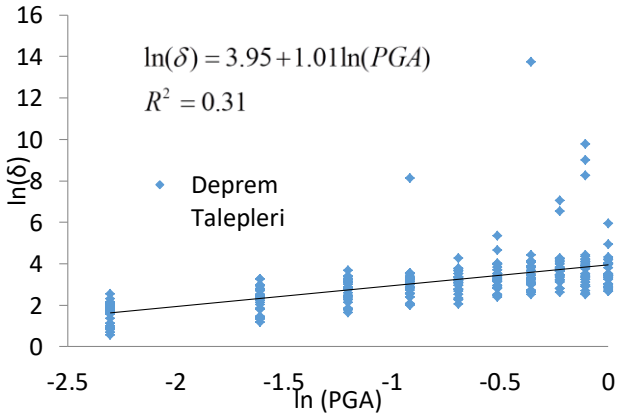
Artımsal itme analizi seçilen belirli bir gurup deprem kaydının farklı sarsıntı şiddeti değerlerine oranlanması ve analizlerin bu sarsıntı şiddeti değerleri için yapılması ile elde edilmektedir. Artımsan itme analizi ile köprünün deprem talebi belirlenmektedir. Bir deprem kaydı küçük sarsıntı şiddeti değerlerinden büyük sarsıntı şiddeti değerlerine oranlandığı zaman köprüde oluşan yer değiştirme, iç kuvvetler ve dönmeler gibi taleplerin değiştiği görülmektedir. Artımsal itme analizi ile bu artış doğrusal olmayan dinamik yöntem ile belirlenmektedir.



Şekil 6. Kısa tip sabit mesnet enine doğrultu için artımsal dinamik itme analiz sonuçları

Figure 7. *Incremental dynamic analysis result for Low-Type steel fix bearing transverse direction*

Şekil (7) da artımsal itme analizi sonucunda Kısa tip çelik mesnet Enine doğrultusu için deprem sarsıntı şiddeti değerlerine karşılık elde edilen yer değiştirme değerleri logaritmik tabanda gösterilmiştir. Elde edilen veriler incelendiği takdirde köprü mesnetlerinin birçok deprem analizinde doğrusal kısımda kaldığı görülmektedir. Yapılan analizlerin büyük bölümü için sarsıntı şiddeti değerinin artması ile mesnetlerde meydana gelen yer değiştirmelerin arttığı görülmektedir ancak bazı durumlarda sarsıntı şiddetinin değerinin artması durumunda mesnette meydana gelen yer değiştirmelerin azaldığı görülmektedir. Elde edilen veriler deprem kayıtlarının karakteristik özelliklerinin analiz sonuçları üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir ve deprem performansının belirlenmesinde seçilen deprem verilerinin büyük öneme sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 7. Kısa tip çelik mesnet olasılık sismik talep modeli

Figure 8. *Low-Type steel fix bearing probabilistic seismic demand model*

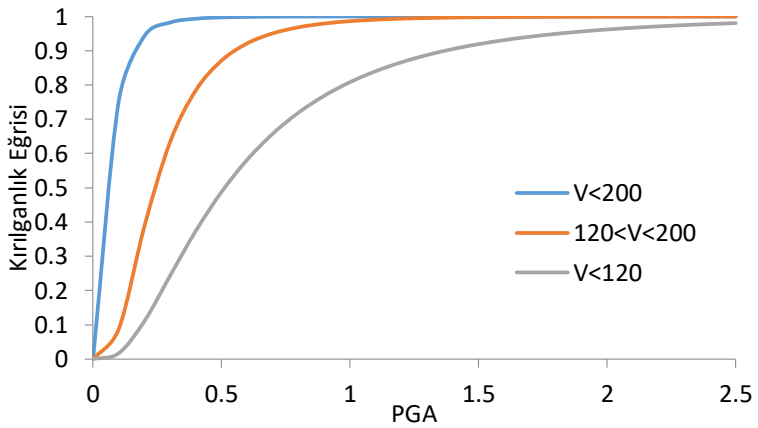
Artımsal dinamik itme analizi sonucunda elde edilen olasılıksal sismik talep modeli Şekil (8) de görülmektedir. Her bir sarsıntı şiddeti için 30 farklı deprem kaydı oranlanarak bu sarsıntı şiddetine karşı gelen deprem talebi belirlenmiştir. Deprem kayıtlarının belirli sarsıntı şiddeti değerlerine oranlanması ile olasılıksal olarak eşit örneklemeye sahip veri gurupları elde edilmiştir elde edilen verilerin ortalama ve standart sapma değerlerinden faydalanılarak olasılık sismik talep modeli oluşturulmuştur.

KIRILGANLIK EĞRİLERİNİN ELDE EDİLMESİ (DERIVATION FRAGILITY CURVE)

Kırılganlık eğrileri bölüm 2 de belirtildiği üzere iki parametreli log-normal dağılım fonksiyonu yardımı ile tanımlanmaktadır. Bu çalışmada kırılganlık eğrisi parametreleri maksimum olasılık yöntemi ile artımsal dinamik itme analizi verilerinden faydalanılarak elde edilmiştir.

Kullanım Limit Durumlarına Göre Kırılganlık Eğrilerinin Elde Edilmesi (Deriving Fragility Curve For Serviceability Limit States)

Türkiye' de ki demiryolu hatlarının deprem performanslarının belirlenebilmesi için demiryolu köprülerinin deprem performanslarının belirlenmesi gerekmektedir. Köprüler demiryolu hattı üzerinde hat uzunluğunun küçük bir kısmını oluştursalar bile maliyet açısından bakıldığında önemli bir paya sahip oldukları görülmektedir. Ayrıca köprüler demiryolu hattı üzerindeki en kırılgan elemanlardır. Dolayısı ile demiryolu köprülerinin performansı hat kullanımı ve güvenliği açısından anahtar role sahiptir. 1999 Kocaeli depreminde hareket halindeki ve bakım istasyonundaki bazı trenlerin devrilmiştir. Demiryolu hattı üzerindeki yer-değiştirmeler, raylarda meydana gelebilecek kopmalar ve köprülerde meydana gelebilecek yer değiştirme ve hasar durumları seyahat güvenliği açısından önem taşıdığı görülmektedir. Bu nedenle deprem etkisi altında tren yükleri köprü üzerinde kabul edilerek yapılan dinamik analizler sonucunda köprü yanal yer değiştirme EN 1990 da belirtilen sınırları geçip geçmediği irdelenmiştir.



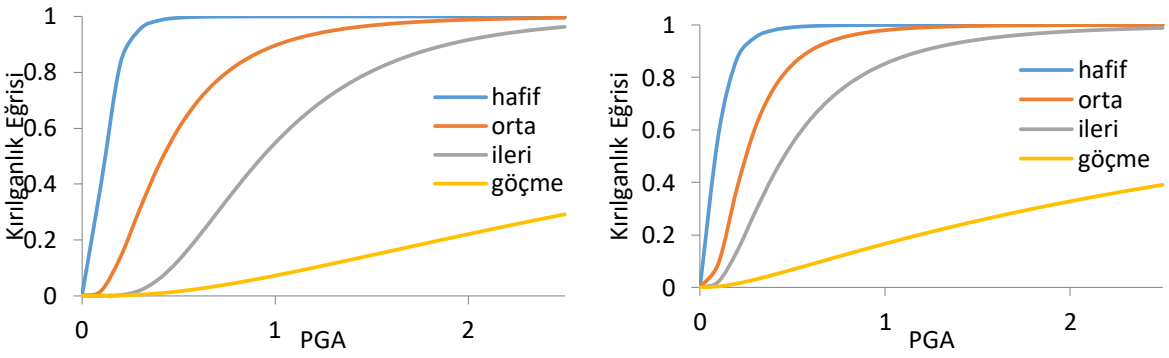
Şekil 8. Kullanım sınır koşullarına göre kırılganlık eğrileri
Figure 9. *Fragility curve for serviceability limit state*

Şekil (9) de basit mesnetli çelik demiryolu köprüsüne ait kullanım limit durumlarına göre elde edilen kırılganlık eğrileri yer almaktadır. Elde edilen eğriler incelendiği takdirde kullanım hızının büyük olduğu durumlarda küçük sarsıntı şiddeti değerleri için %50 olasılıkla kullanım sınır durumunun aşıldığı ancak kullanım hız limitinin düşük olduğu durumlarda ise %50 olasılıkla kullanım limitinin aşılması için daha büyük sarsıntı şiddetine ulaşılması gerektiği gözlemlenmiştir. %50 olasılıkla kullanım limitinin aşılmasına neden olan sarsıntı şiddeti değerleri V<200, 120<V<200, ve V<120 için sırası ile 0.06g, 0.25g ve 0.51g olarak belirlenmiştir.

Köprü Elemanlarının Kırılganlık Eğrilerinin Elde Edilmesi (Deriving Fragility Curve for Bridge Component)

Köprü elemanlarının deprem performanslarının belirlenebilmesi için iki bölümde incelenmiştir. Bunlar mesnetler ve üst yapı elemanlarıdır. Mesnetler sabit ve hareketli mesnet olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Önceki bölümlerde hareketli mesnetler, sabit mesnetler ve eğilme elemanları için hasar sınır durumları HAZUS hasar sınıflarına göre belirlenmiştir. Bu çalışmada belirlenen sınır durumları

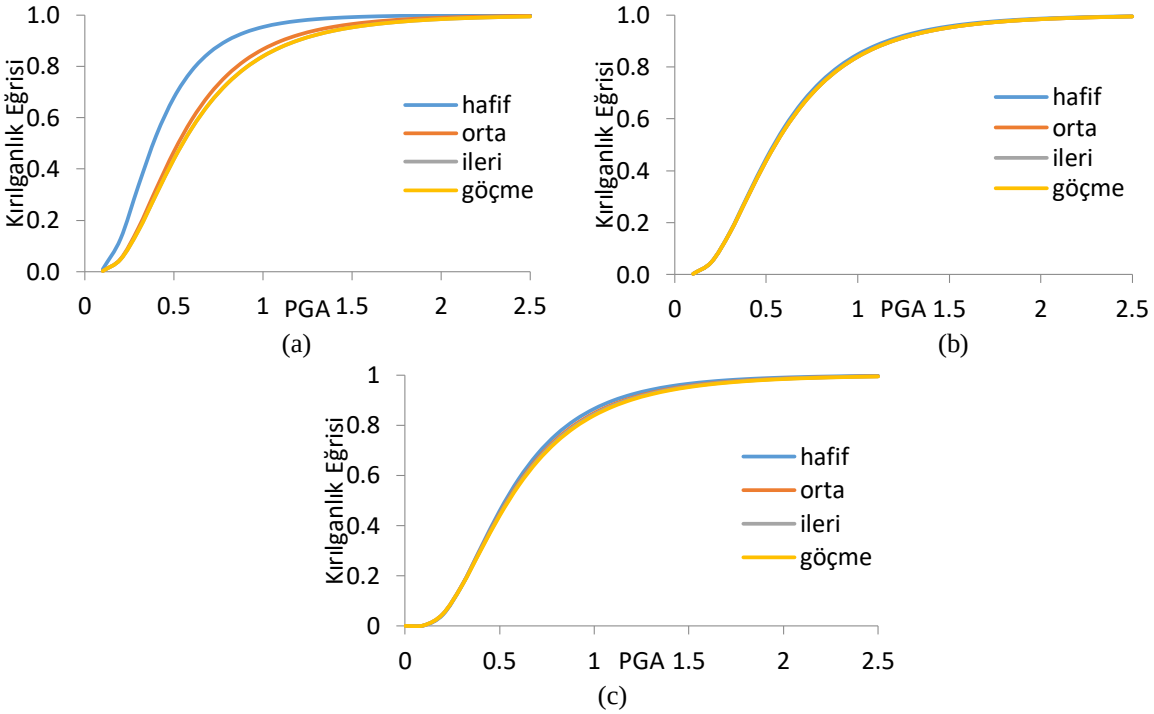
kullanılarak maksimum olasılık yöntemi yardımı ile köprü elemanlarına ait kırılganlık eğrileri elde edilmiştir.



Şekil 9. a) Sabit mesnet enine doğrultu için üretilen kırılganlık eğrisi b) Kayıcı mesnet boyuna doğrultu için üretilen kırılganlık eğrisi

Figure 10. *a) Fragility curve for fix bearing transverse direction b) Fragility curve for sliding bearing transverse directio*

Sabit ve hareketli mesnetler için elde edilen kırılganlık eğrileri Şekil (10) de görülmektedir. Belirlenen dört farklı hasar sınıfı için 4 farklı kırılganlık eğrisi elde edilmiştir. Sabit mesnet enine doğrultu ele alındığı zaman % 50 olasılıkla hasar limit durumun aşılmasına neden olan sarsıntı şiddeti değerleri hafif, orta ve ileri hasar durumunu gösterecek şekilde 0.123g, 0.42g ve 0.93g dir. Hareketli mesnet boyuna doğrultu ele alındığı zaman %50 olasılıkla hasar limit durumun aşılmasına neden olan sarsıntı şiddeti değeri hafif, orta ve ileri hasar durumunu gösterecek şekilde 0.086g, 0.25g ve 0.46g dir. Elde edilen kırılganlık eğrileri incelendiği durumda hareketli mesnet boyuna doğrultunun sabit mesnet enine doğrultudan daha kırılgan olduğu belirlenmiştir. Olası bir deprem senaryosunda hareketli mesnedin hasar görme olasılığı daha yüksektir.



Şekil 10. a) IPE 300 boylama elemanına ait kırılganlık eğrileri, b) IPN450 enleme elemanına ait kırılganlık eğrileri, c) UPN240 boylama elemanına ait kırılganlık eğrileri

Figure 11. *a) Fragility curve of IPE 300 stringer element b) Fragility curve of IPN450 transverse element c) Fragility curve of UPN240 stringer element.*

Köprü elemanlarına ait kırılganlık eğrileri Şekil (11) a, b ve c de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Köprü enleme ve boylama elemanları ana kirişe göre daha narin olduğu için enleme ve boylama elemanları için elde edilen kırılganlık eğrileri bu çalışma kapsamında irdelenmiştir. Kırılganlık eğrileri elde edilirken Sap2000 sonlu elemanlar programı yardımı ile oluşturulan matematiksel model ve yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler sonucu elde edilen dönmelerden faydalanılmıştır. Köprü üzerinde bir eleman plastikleştiği durumda o elemandaki yükler başka elemanlara dağıtılamamaktadır bu nedenle ilk pratikleşmenin oluşumu ile göçme durumunun gözlemlenmesi olasılıkları birbirlerine yakın çıkmaktadır. Yapılan analizler sonucu IPE300 boylama elemanında %50 olasılıkla hafif hasar gözlemlenme olasılığı 0.53g, %50 olasılıkla orta, ileri ve göçme durumu hasarlarının gözlemlenme olasılığı ise yaklaşık 0.32g olarak belirlenmiştir. IPE450 ve UPN240 elemanları için ise %50 olasılıkla hafif, orta, ileri ve göçme hasar durumlarının gözlemlenme olasılığı yaklaşık olarak 0.44g olarak belirlenmiştir.

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışmada Türkiye demiryolu hattı üzerinde yer alan tipik basit mesnetli çelik demiryolu köprüsü ele alınmıştır. Köprünün doğrusal olmayan analizlerinin yapılabilmesi için Sap2000 sonlu elemanlar programından faydalanılmıştır. Köprü modeli imalat resimlerinden faydalanılarak gerçeğine uygun bir şekilde yapılmıştır. Köprü mesnetlerinin doğrusal olmayan davranışları ve hasar sınır durumları belirlenmiştir. Ayrıca üst yapıyı oluşturan eğilme elemanlarının hasar sınır durumları ve köprü kullanım hasar sınır durumları da ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir. Köprünün deprem performansının belirlenebilmesi için A,B ve C zemin sınıflarından 30 gerçek deprem kaydı seçilmiş ve bu deprem kayıtları 0.1g ile 1.0g arasında farklı maksimum zemin ivme değerleri için oranlanarak toplam 300 doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda köprünün sismik talep modeli elde edilmiştir. Maksimum olasılık yaklaşımından faydalanılarak köprü elemanları için ve kullanım koşulları için kırılganlık eğrileri ayrı ayrı elde edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda köprü mesnetlerinin 0.086g gibi küçük sarsıntı şiddeti değerleri için %50 olasılıkla hafif hasara maruz kalabileceği gözlemlenmiştir. Köprü mesnetleri üst yapı elemanlarından daha kırılgan olduğu belirlenmiştir. Olası bir güçlendirme durumunda köprü mesnetlerinin güçlendirilmesinin sistem performansını büyük ölçüde etkileyeceği belirlenmiştir. Üst yapı elemanları için elde edilen kırılganlık eğrileri incelendiği takdirde %50 olasılıkla hasar oluşması için 0.32g lik sarsıntı şiddeti değerine ulaşılması gerektiği görülmüştür. Üst yapı elemanlarında plastik mafsal oluşumundan sonra yüklerin diğer elemanlara aktarılamadığı dolayısı ile hafif hasar ile orta, ileri ve göçme hasar durumlarının oluşma olasılıklarının birbirlerine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu da üst yapı elemanlarının doğrusal olmayan davranış kapasitelerinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Kullanım limit durumlarına göre elde edilen kırılganlık eğrileri incelendiği zaman düşük kullanım hızları için köprünün daha güvenli olduğu belirlenmiştir. Kullanım hız limit durumları V<200, 120<V<200, ve V<120 için %50 olasılıkla limit durumların aşılmasına neden olan sarsıntı şiddeti değerleri sırası ile 0.06g, 0.25g ve 0.51g olarak belirlenmiştir. Bu analizler dikkate alınarak demiryolu hat güvenliğinin arttırılması için köprü üzerinde tren kullanım hızlarının sınırlandırılması gerektiği belirlenmiştir.

BİLGİLENDİRME (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma TCDD ve TÜBİTAK 114M332 projesi tarafından desteklenmektedir. Bu yazıda gecen görüşler tamamıyla yazarlara ait olup destekleyen kurum, kuruluş ve projelerin görüşlerini yansıtmamaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

Baker, J. W., 2015, "Efficient Analytical Fragility Function Fitting Using Dynamic Structural Analysis", *Earthquake Spectra*, Vol.31, No.1, pp. 579–599.

Byers, W. G., "Railroad Lifeline Damege in Earthquaked." *13 th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver*, B.c., Canada, 324-335, 2004

Chandramohan, R., Lin, T., Baker, J. W., Deierlein, G. G. "Influence of Ground Motion Spectral Shape and Duration on Seismic Collapse Risk." *10th International Conference on Urban Earthquake Engineering*, Tokyo, Japan, 1-2 Mar 2013.

Cornell, C. A., Jalayer, F., Hamburger, R. O., Foutch, D., 2002a, "Probabilistic Basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency Steel Frame Guidelines." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, pp. 526–533.

Cornell, C. A., Jalayer, F., Hamburger, R. O., Foutch, D. A., 2002b, "Probabilistic Basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency Steel Moment Frame Guidelines", *Journal of Structural Engineering*, Vol.128, No.4, pp 526–533.

CSI. SAP2000 V-19, 2017, *Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual*, Berkeley (CA, USA): Computers and Structures Inc.

Çağlıyan, A., Yıldız, A. B., 2013, "Türkiye ' de Demiryolu Güzergâhları Jeomorfoloji İlişkisi (Turkey Associatıon of Railway Routes-Geomorphology)." *Marmara Coğrafya Dergisi*, Vol. 28. July pp. 466–486.

Dolsek, M., 2009, "Incremental Dynamic Analysis with Consideration of Modeling Uncertainties", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.38 No.6, pp. 805–825.

Mackie, K. R., Nielson B.G., 2009, "Uncertainty Quantification in Analytical Bridge Fragility Curves." *TCLEE : Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment*, Vol.407, pp 1–12.

Mackie, K. R., Stojadinovic, B., 2005, "Comparison of Incremental Dynamic, Cloud and Stripe Methods for computing Probabilistic Seismic Demand Models", *Structural Congress*, Newyork, 20-24 April 2005.

Mackie, K., Wong, J.-M., Stojadinovic, B., 2008, *Integrated Probabilistic Performance-Based Evaluation of Benchmark Reinforced Concrete Bridges*, PEER 2007/09 January 2008.

Mander, J., Kim, D., Chen, S., Premus, G., 1996, *Response of Steel Bridge Bearings to the Reversed Cyclic Loading*, Technical Report NCEER 96-0014, Buffalo, NY.

Mohseni, M., 2012, *Dynamic Vulnerability Assessment of Highway and Railway Bridges*, Doktora Tezi, The Collage of Engineering at the University of Nebraska-Lincoln.

Nielson, B. G., 2005, *Analytical Fragility Curves for Highway Bridges in Moderate Seismic Zones*, Doktora Tezi, Georgia Institute of Technology, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia USA.

Nielson, B. G., DesRoches, R., "Seismic Fragility Methodology for Highway Bridges", *Structures Congress: ,* St Louis, Missouri, 105–112, 18-21 Mayıs 2006.

Padgett, J. E., DesRoches, R., 2008, "Methodology for the Development of Analytical Fragility Curves for Retrofitted Bridges", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 37, No.8, pp. 1157–1174.

Padgett, J. E., Nielson, B. G., DesRoches, R., 2008, "Selection of Optimal Intensity Measures in Probabilistic Seismic Demand Models of Highway Bridge Portfolios", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 37, No.5, pp. 711–725.

Pan, Y., Agrawal, a. K., Ghosn, M., Alampalli, S., 2010, "Seismic Fragility of Multispan Simply Supported Steel Highway Bridges in New York State. I: Bridge Modeling, Parametric Analysis, and Retrofit Design", *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 15, No.5, pp. 448–461.

Shinozuka, M., Feng, M. Q., Kim, H. K., Kim, S. H., 2000a, "Nonlinear Static Procedure for Fragility Curve Development", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, No.12, pp. 1287-1295

Shinozuka, M., Freg, M. Q., Lee, J., Naganuma, T., 2000b, "Statistical Analysis of Fragility Curves", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126 December, pp. 1224–1231.