# TÜRKİYE'DEKİ TİPİK KARAYOLU KÖPRÜLERİNİN KIRILGANLIK EĞRİLERİNİN ANALİTİK YÖNTEMLE BELİRLENMESİ

**Ö. Avşar[1], A. Yakut[2] ve A. Caner[3]**

[1] *Yrd. Doç. Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir*
[2] *Profesör, İnşaat Müh. Bölümü, ODTÜ, Ankara*
[3] *Yrd. Doç. Dr., İnşaat Müh. Bölümü, ODTÜ, Ankara*
*Email: oavsar@anadolu.edu.tr*

**ÖZET:**

Geçmişte büyük kayıp ve zarara neden olmuş depremler karayolu ağının hasar görebilirliği en fazla olan parçasının köprüler olduğunu göstermiştir ve dolayısıyla köprü hasarından dolayı meydana gelebilecek riskin azaltılmasının gerekliliğini gün yüzüne çıkarmıştır. Köprünün bulunduğu yerin sismik tehlikesine bağlı olarak, köprü hasar görebilirliği kırılganlık eğrileri ile belirlenebilir. Bu ihtimal eğrileri, belirli bir deprem şiddet seviyesinde köprünün önceden belirlenmiş hasar seviyesine ulaşma ya da aşılma olasılığını verir. Bu çalışmada, 90'lı yıllardan sonra Türkiye'de yapılmış tipik karayolu köprülerinin hasar görebilirliğinin belirlenmesinde kullanılacak kırılganlık eğrileri analitik yöntemle elde edilmiştir. Öncelikle yapısal özelliklerine göre sınıflandırma yapılarak köprü tipleri belirlenmiş ve daha sonra yapısal değişkenliği hesaba katabilmek için köprü örnekleri oluşturulmuştur. Her bir köprünün kapsamlı üç boyutlu analitik modeli oluşturulmuş ve farklı seviyelerde hasar yaratacak deprem yer hareketleri altında zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri yapılmıştır. Köprü bileşenlerinin sismik davranışlarının belirlenmesinde ve eleman kapasiteleri kullanılarak tayin edilen hasar sınır değerlerinin hesaplanmasında bir takım yapısal istem parametreleri kullanılmıştır. Her bir köprü tipi ve seçilen her bir yer hareketi için, belirlenen hasar sınır durumunun aşılma olasılığı hesaplanmıştır. Hesaplanan olasılık değerleri, yer hareketlerinin seçilen sismik şiddet ölçütüne göre dağılımı kullanılarak her bir köprü tipi için kırılganlık eğrileri elde edilmiştir. Diğer köprü tipleriyle kıyaslandığında, verev ve tek kolonlu köprülerin hasar görebilirliğinin daha fazla olduğu görülmüştür. Elde edilen kırılganlık eğrileri zarar azaltma amaçlı sismik risk değerlendirme paket uygulamalarında kullanılabilirler.

**ANAHTAR KELİMELER:** Karayolu Köprüsü, Hasar Görebilirlik, Kırılganlık Eğrisi, Hasar Sınır Durumu, Sismik Şiddet Ölçütü

## 1. GİRİŞ

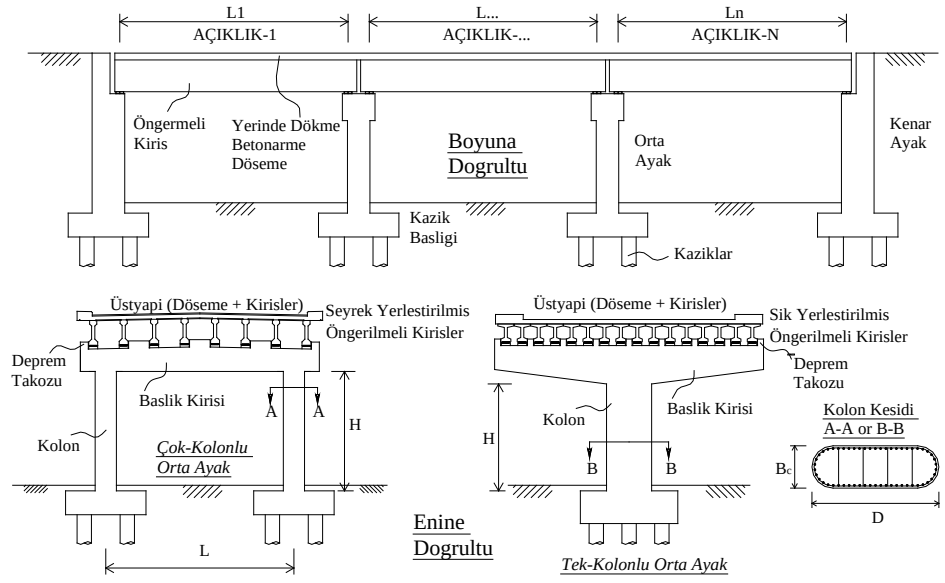
Deprem Tehlike Bölgeleri Haritası'na bakıldığında Türkiye'nin büyük bir kısmının yüksek sismik tehlikeye sahip olduğu görülmektedir. Meydana gelebilecek büyük depremler neticesinde oluşacak zararın azaltılması için yapıların hasar görebilirliği ve bulundukları yerin sismik tehlikesi belirlenerek sismik risk analizleri gerçekleştirilmektedir. Yapıların hasar görebilirliği kırılganlık eğrileri ile belirlenebilmektedir. Türkiye için yapılan çalışmalar genellikle bina türü yapıların kırılganlık eğrilerinin elde edilmesine yöneliktir. Can damarları olan ulaşım sistemlerinin en önemli bileşenlerinden olan köprülerin yapısal özelliklerini dikkate alarak elde edilmiş kırılganlık eğrileri ülkemiz için mevcut değildir. Sismik risk analizinin önemli bir bileşeni olan kırılganlık eğrileri, köprülerin belirli bir sismik şiddet etkisi altında maruz kalabilecekleri hasar seviyesinin olasılığını verir. Buna göre Denklem (1)'de tanımlanan fonksiyon, köprünün maruz kalacağı sismik etkinin (E) incelenen hasar sınırı (HS) için hesaplanan köprü kapasitesine ($K_{HS}$) ulaşılması ya da aşılması olasılığını verir. Denklem (1)'deki olasılık ifadesi köprünün maruz kalabileceği deprem yer hareketinin şiddetini belirlemede kullanılan belirli bir sismik şiddet ölçütüne (ŞÖ) göre tanımlanmıştır.

$$P(HS \mid ŞÖ) = P\left[(E \geq K_{HS}) \mid ŞÖ\right] \quad (1)$$

Deneysel ya da gözleme dayalı gerçek köprü hasar verisi bulunmadığı durumlarda köprülerin sismik performanslarını belirlemek için analitik yöntemlerle elde edilmiş kırılgan eğrileri kullanılabilir (Nielson ve DesRoches, 2007). Analitik kırılganlık eğrilerinin hesaplanabilmesi için köprülerin analitik modelleri oluşturularak farklı sismik şiddet seviyelerindeki yer hareketleri altında birçok analiz yapılmaktadır. Analizler sonucu elde edilecek eleman bazlı sismik istemler, belirlenen her bir hasar sınır durumu için hesaplanacak kapasite değerlerini aşıp aşmaması durumuna göre analitik kırılganlık eğrileri hesaplanmaktadır. Analitik kırılganlık eğrilerinin güvenilirlikleri birçok parametreye bağlıdır; analiz yöntemi, yapısal modelleme, yer hareketi veri setinin seçimi, eleman hasar sınır durumunun tanımlanması bu parametrelerin en önemlilerindendir (Kwon ve Elnashai, 2006). Türkiye'deki karayolu köprülerinin yapısal sistemiyle birebir örtüşmeyen diğer bazı ülkelerde bulunan karayolu köprüleri için gerek ampirik gerekse analitik kırılganlık eğrileri araştırmacılar tarafından elde edilmiştir (Karim ve Yamazaki, 2003; Elnashai ve diğ., 2004; Nielson ve DesRoches, 2007). Diğer taraftan diğer ülkelerdeki köprülerin kırılganlık eğrilerinin hesaplamalarında kullanılan yer hareketi özellikleri Türkiye'de geçmişte meydana gelmiş deprem yer hareketi özelliklerinden farklılık göstermektedir. Çünkü Türkiye ve diğer ülkeler için sismik kaynak karakterleri birbiriyle birebir örtüşmemektedir. Bu sebeplerden dolayı literatürdeki mevcut kırılganlık eğrilerinin Türkiye'deki karayolu köprülerin sismik risk analizlerinde doğrudan kullanılması yanlış neticelerin elde edilmesine yol açabilir. Bu çalışmanın amacı, Türkiye'deki tipik karayolu köprülerinin yapısal özelliklerini dikkate alarak ve aynı zamanda ülkemizdeki sismik kaynak özellikleriyle uyumlu deprem yer hareketleri kullanılarak analitik kırılganlık eğrilerinin elde edilmesidir.

## 2. KÖPRÜ ÖZELLİKLERİ VE SINIFLANDIRMA

Bu çalışmada incelenen köprü seti 1990'lı yılardan sonra Türkiye'de yaygın bir şekilde yapılmış, iki ve daha çok açıklıklı, öngerilmeli tabliye kirişli betonarme karayolu köprülerinden oluşmaktadır. Bu karayolu köprüleri Caltrans (2010)'a göre Tipik Standart Köprüler olarak sınıflandırılabilir. Genel özellikleri Şekil 1'de verilen örnek bir köprünün yapısal sistemini oluşturan köprü bileşenlerinin dağılımı ve istatistiksel özelikleri Avşar ve diğ. (2011)'de verilmiştir. Öngerilmeli kiriş ve yerinde dökme döşemeden oluşan üstyapı ile orta ve kenar ayaklardan oluşan altyapı arasında doğrudan yerleştirilmiş çelik plakalı elastomer yastıklar bulunmaktadır.




Şekil 1. Tipik karayolu köprülerinin genel özellikleri

### *2.1. Köprü Tipleri ve Örnekleme*

Türkiye'deki tipik karayolu köprülerinin yapısal özelliklerinin ve sismik davranışlarının anlaşılması, analitik kırılganlık eğrilerinin elde edilmesi için önemli bir başlangıç noktasıdır. İncelenen köprü envanterinde tüm köprülerin tek tek ele alınıp detaylı bir şekilde incelenmesi pratik bir yaklaşım değildir. Her köprünün kendine has yapısal özelliği olmasına karşın genel anlamda diğer köprülerle bir takım benzerlikleri bulunmaktadır. Belirli yapısal özellikleri benzerlik gösteren köprüler kendi içinde sınıflandırılmış ve o köprü sınıfını temsil edecek yeterli sayıda köprü örnekleri oluşturularak kırılganlık eğrilerinin hesaplamalarında kullanılmıştır. Geçmiş depremlerde karayolu köprülerinin performansları ve yapılan çalışmalar ışığında köprülerin sismik performansını etkileyen köprü özellikleri birincil ve ikincil özellikler olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Birincil özelliklerden olan açıklık adedi, orta ayak kolon adedi ve verev açısı köprünün hasar görebilirliğini en çok etkileyen özelliklerdir (Avşar ve diğ., 2011). Tek açıklıklı köprülerin sismik hasar görebilirlikleri çok açıklıklı olan köprülere kıyasla çok düşük olduğundan (Nielson and DesRoches, 2007) bu çalışmada iki ve üzeri açıklıklı köprüler incelenmiştir. HAZUS (FEMA, 2003)'a göre köprü sınıflandırmasında orta ayağın tek ya da çok kolonlu olması dikkate alınmıştır. Bu çalışmada da benzer şekilde köprüler tek ya da çok kolonlu olmalarına göre sınıflandırılmışlardır. Köprülerin sismik performansını etkileyen en önemli özelliklerin başında gelen verevlik açısı aynı zamanda yönetmeliklerde köprünün düzenli ya da düzensiz olmasını belirleyen bir parametredir. AASHTO (1996)'a göre kabul edilen 30° sınır değeri bu çalışmada kullanılan envanterdeki köprülerin sınıflandırılmasında kullanılmıştır. Buna göre Tablo 1'de gösterilen dört ana köprü tipi belirlenmiştir.

Tablo 1. Köprü tipleri

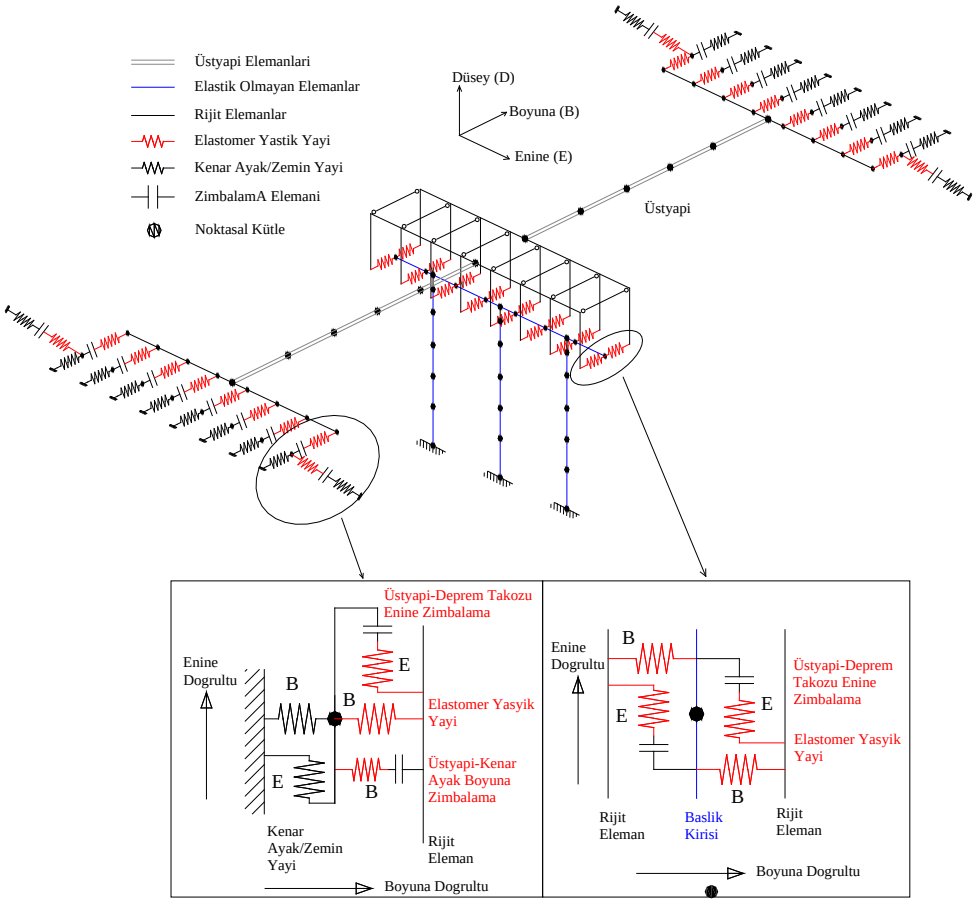
| No. | Köprü Tipleri | Kısaltma |
|---|---|---|
| 1 | **Ç**ok **A**çıklıklı_**Ç**ok **K**olonlu_**V**erev açısı **K**üçüktür **30°** | ÇA_ÇK_VK30 |
| 2 | **Ç**ok **A**çıklıklı_**Ç**ok **K**olonlu_**V**erev açısı **B**üyüktür **30°** | ÇA_ÇK_VB30 |
| 3 | **Ç**ok **A**çıklıklı_**T**ek **K**olonlu_**V**erev açısı **K**üçüktür **30°** | ÇA_TK_VK30 |
| 4 | **Ç**ok **A**çıklıklı_**T**ek **K**olonlu_**V**erev açısı **B**üyüktür **30°** | ÇA_TK_VB30 |

Analitik kırılganlık eğrilerin hesaplanmasında yapısal çeşitliliği hesaba katabilmek için her bir köprü tipini temsil edebilecek 10 adet köprü örneği Latin Hiperküp Örnekleme Yöntemi (Ayyub ve Lai, 1989) kullanılarak oluşturulmuştur. Bu örnekleme yönteminde, birincil ve ikincil köprü özelliklerinin istatistiksel dağılımlarından rastgele örnekleme yapmak yerine sınırlandırılmış örnekleme yapılarak Tablo 1'de belirlenen köprü tiplerinin daha düzgün dağılmış köprü örnekleriyle temsil edilmeleri sağlanmıştır. Birincil özelliklere ek olarak ikincil özelliklerden açıklık mesafesi, kolon yüksekliği ve birçok parametreyi kapsayan altyapı ve üst yapı özelliklerinin istatistiksel dağılımı Avşar ve diğ. (2011)'den alınarak örnekleme hesaplaması yapılmıştır.

## 3. ANALİTİK MODEL

Oluşturulan her bir köprü örneğinin 3-boyutlu detaylı analitik modeli OpenSees (2005) programıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil-2'de gösterilen köprü bileşenlerinin detaylı modeli kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Bu modelde elastomer yastıklar ile altyapıdan ayrılan üstyapının elastik kalacağı kabulüyle (Caltrans, 2010) elastik çubuk elemanlarla modellenmiştir. Elastik ötesi davranması beklenen kolon ve başlık kirişleri fiber tabanlı doğrusal olmayan elemanlar kullanılarak yayılı plastisitenin eleman boyunca tanımlanması sağlanmıştır. Kenar ayak, kazıklar ve zemin etkisi Caltrans (2010) kullanılarak tanımlanmış yaylar ile modellenmiştir. Herhangi bir bağlantı elemanı kullanılmadan üstyapı ve altyapı arasına yerleştirilen elastomer yastıkların beton yüzey ile kauçuk yastık arasındaki sürtünme kuvvetinin aşılmasına kadar yük aktardığı ve sonrasında yer değiştirerek üzerine gelen yükün sabit kalacağı kabulüne dayanarak Caltrans (2010)'a göre özellikleri belirlenen yaylar ile modellenmiştir. Köprü üstyapısı ve altyapısı bir bütün olmadığından, köprüde bazı noktalarda bırakılan boşluğa bağlı olarak zımbalama meydana gelebilmektedir.

Köprüde zımbalamanın meydana gelebileceği enine doğrultudaki üstyapı ve deprem takozları ile boyuna doğrultudaki üstyapı ve kenar ayak arasına çarpma etkisini modelleyebilmek için kontak elemanları kullanılmıştır. Kullanılan yay katsayıları Avşar ve diğ. (2011)'den alınmıştır.

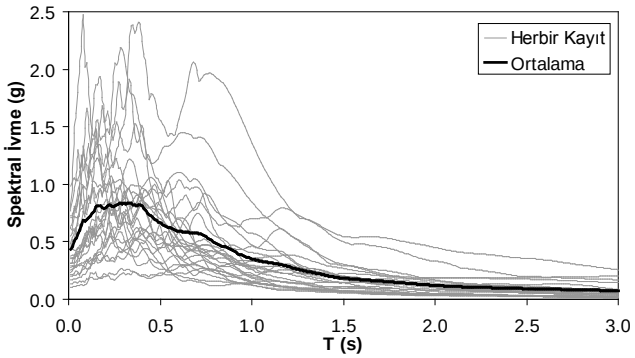



Şekil 2. 3-boyutlu köprü analitik modeli ve bileşenleri

## 4. KUVVETLİ YER HAREKETİ VERİSİNİN SEÇİMİ

Kırılganlık eğrileri köprü tiplerinin farklı sismik şiddet seviyelerinde, belirlenen hasar sınırının ulaşılması ya da aşılması olasılığını verdiğinden analizler için seçilecek deprem yer hareketi setinin farklı seviyede sismik şiddet dağılımına sahip olması gerekmektedir. Böylelikle seçilecek yer hareketi veri setiyle farklı seviyelerde köprü hasarının oluşması sağlanmıştır. Türkiye'de meydana gelmiş depremlere ilave olarak faylanma mekanizması yanal atımlı olan diğer ülkelerde kaydedilmiş yer hareketleri incelenerek maksimum yer ivmesi (PGA) 0.05g'den büyük olan ve iki bileşene sahip 25 adet yer hareketi ivme kaydı seçilmiştir. Seçilen kayıtların özellikleri Avşar ve diğ. (2011)'de verilmiştir. Her bir ivme kaydının iki bileşeni için hesaplanmış davranış spektrumunun geometrik ortalaması ve bütün hepsinin ortalaması Şekil 3'te gösterilmiştir. Kırılganlık eğrileri, ivme spektrum ölçüdü (ASI), maksimum yer hızı (PGV) ve PGA olmak üzere toplam üç adet şiddet ölçüdü için hesaplanmıştır. Avsar ve Yakut (2010) tarafından karayolu köprüler için tanımlanan ASI, ivme davranış spektrumunda $T_i$=0.4s ve $T_f$=1.1s arasında kalan alanı temsil eden şiddet ölçütüdür. Zaman tanım alanında yapılacak analizlerde birbirine dik deprem kaydının iki bileşeni köprüye herhangi bir açı ile etki edebilir. Her bir köprü bileşeni için en büyük sismik istemin belirlenebilmesi için deprem kaydının uygulanacağı en kritik açının belirlenmesi gerek modelleme gerekse analiz süresi bakamından zahmetlidir. Basit bir kabul yapılarak

maksimum istemler iki aşamada hesaplanmıştır. İlk durumda kaydın bir bileşeni köprünün enine diğer bileşen ise boyuna doğrultuda uygulanmış ve ikinci durumda kaydın bileşenleri yer değiştirilmiş ve sonuçta iki durumda elde edilen en büyük istem değerleri o kaydın meydana getireceği maksimum istem değeri olarak hesaplamalarda kullanılmıştır.




Şekil 3. Seçilen yer hareketi veri seti için davranış spektrumları

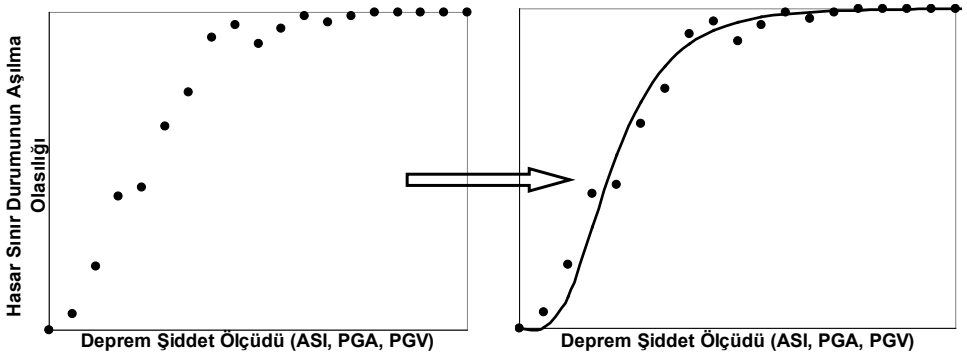
## 5. KÖPRÜLERİN HASAR SEVİYELERİNİN TAYİNİ

Belirli bir hasarın sınır durumu köprünün belirlenen performans seviyesini sağlayabildiği limit hasar durumudur. Bu çalışmada DBYBHY (2007)'de tanımlanmış 3 hasar sınır durumu köprüler için de kullanılmıştır. Bunlar sırayla Minimum Hasar Sınırı (HS-1), Güvenlik Sınırı (HS-2) ve Göçme Sınırı (HS-3)'dır. Her üç hasar sınırının niceliksel olarak tanımlanabilmesi için köprü bileşenlerinin her bir hasar sınır durumuna karşılık gelen kapasite değerlerinin hesaplamalarında mühendislik istem parametreleri kullanılmıştır. Kolon ve başlık kirişinin eğrilik istemleri ve kesme istemleri ile üstyapı yer değiştirme istemleri mühendislik istem parametreleri olarak kullanılmıştır. Eleman kesme hasarı birden gerçekleşen gevrek bir kırılma türü olduğundan kesme istem parametresi için sadece Göçme Hasar Sınır (HS-3) durumu tanımlanmış. HS-3 için tanımlanacak elemanların kesme kapasiteleri Caltrans (2010)'a göre tanımlanmıştır. Diğer istem parametreleri için her üç hasar sınır durumları belirlenmiştir. Elastik ötesi davranması beklenen kolon ve başlık kirişi elemanlarının kesit moment-eğrilik analizleri yapılarak Avşar ve diğ. (2011) tanımlanan kriterler doğrultusunda her üç hasar durumu için sınır eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Son olarak üstyapının yer değiştirmesi için sınır değerler belirlenmiştir. Elastomer yastıklar ile beton yüzey arasındaki sürtünme kuvvetinin aşılıp kalıcı yer değiştirmenin başladığı nokta HS-1; üstyapı kirişlerinin üzerinde oturdukları pedestal bloktan kurtulmasına neden olacak üstyapı yer değiştirmesi HS-2 ve son olarak da üstyapının altyapıya oturma mesafesinden fazla yer değiştirme yaparak toplu göçmenin yaşanması ise HS-3 olarak tanımlanmıştır.

## 6. ANALİTİK KIRILGANLIK EĞRİLERİNİN HESAPLANMASI

Seçilen deprem yer hareketi seti oluşturulan her bir köprü örneğine uygulanarak toplamda 2000 adet iki eksenli zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Her bir analiz neticesinde köprü bileşenlerinin belirlenen mühendislik istem parametreleri için maksimum istemleri hesaplanmıştır. Daha sonra her üç hasar sınırı için tanımlanmış kapasite değerleri ile kıyaslanarak köprü bileşeninin hangi hasar seviyesinde olduğu belirlenmiştir. Diğer taraftan köprünün bir bütün olarak hangi hasar seviyesinde olduğunun belirlenmesi için basit bir kabul yapılarak köprü bileşenlerinin hasar seviyeleri kullanılmıştır. Buna göre bir köprü bileşeninin maruz kaldığı hasar ile diğer bileşenlerin hasar durumuyla olan etkileşimi ihmal edilerek, herhangi bir köprü bileşeninin maruz kaldığı en yüksek hasar seviyesi köprünün o yer hareketi için maruz kalacağı hasar seviyesi olarak kabul edilmiştir. Bu işlem her bir köprü tipi ve yer hareketi kaydı için tekrarlanmıştır. Böylelikle Tablo 1'de belirlenen dört köprü tipi için oluşturulan köprü örneklerinin her bir yer hareketi altında maruz kalacağı

hasar seviyesi belirlenmiştir. Bir köprü tipi için seçilen herhangi bir yer hareketi altında belirli bir hasar sınır durumunu aşan köprü örneğinin toplam köprü örneğine oranı o köprü tipinin belirlenen hasar durumunu aşma olasılığını verir. Bu hesaplama her bir yer hareketi için yapıldığında Şekil 4a'daki grafiğe benzer bir olasılık dağılımı elde edilir. Sismik şiddetin artmasıyla belirlenen hasar durumunu aşılma olasılığı da artmaktadır. Bu dağılımın matematiksel olarak ifade edilebilmeleri için artan-azalan dağılım gösteren noktalar uygun bir eğri ile temsil edilmelidir. Diğer çalışmalarda (Karim ve Yamazaki, 2003; Nielson ve DesRoches, 2007; Avşar ve diğ., 2011) olduğu gibi bu çalışmada da kümülatif lognormal dağılımı kullanılarak hasar olasılık noktalarını temsil edecek Şekil 4b'deki kırılganlık eğrileri oluşturulmuştur. Tablo 2'de her bir köprü tipi, hasar sınır durumu ve şiddet ölçüdü için hesaplanan kırılganlık eğrilerinin kümülatif lognormal dağılımını ifade edebilmek için medyan ve saçılım değerleri verilmiştir. Ayrıca kümülatif lognormal eğrilerinin aşılma olasılık noktalarını ne oranda temsil ettiği ve aralarındaki uyum determinasyon katsayısı ($R^2$) ile belirlenmiştir. Tablo 2'ye göre şiddet ölçüdü olarak ASI kullanılarak elde edilen kırılganlık eğrilerinin daha yüksek güvenilirliğe sahip olduğu ve geçmiş çalışmalarda kullanılan PGA için ise ASI ve PGV'e kıyasla daha düşük $R^2$ değeri hesaplanmıştır.




(a) (b)

Şekil 4. Hasar olasılık noktalarının kümülatif lognormal dağılımı ile temsil edilmesi

Tablo 2. Köprü tipleri için analitik kırılganlık eğrisi parametreleri

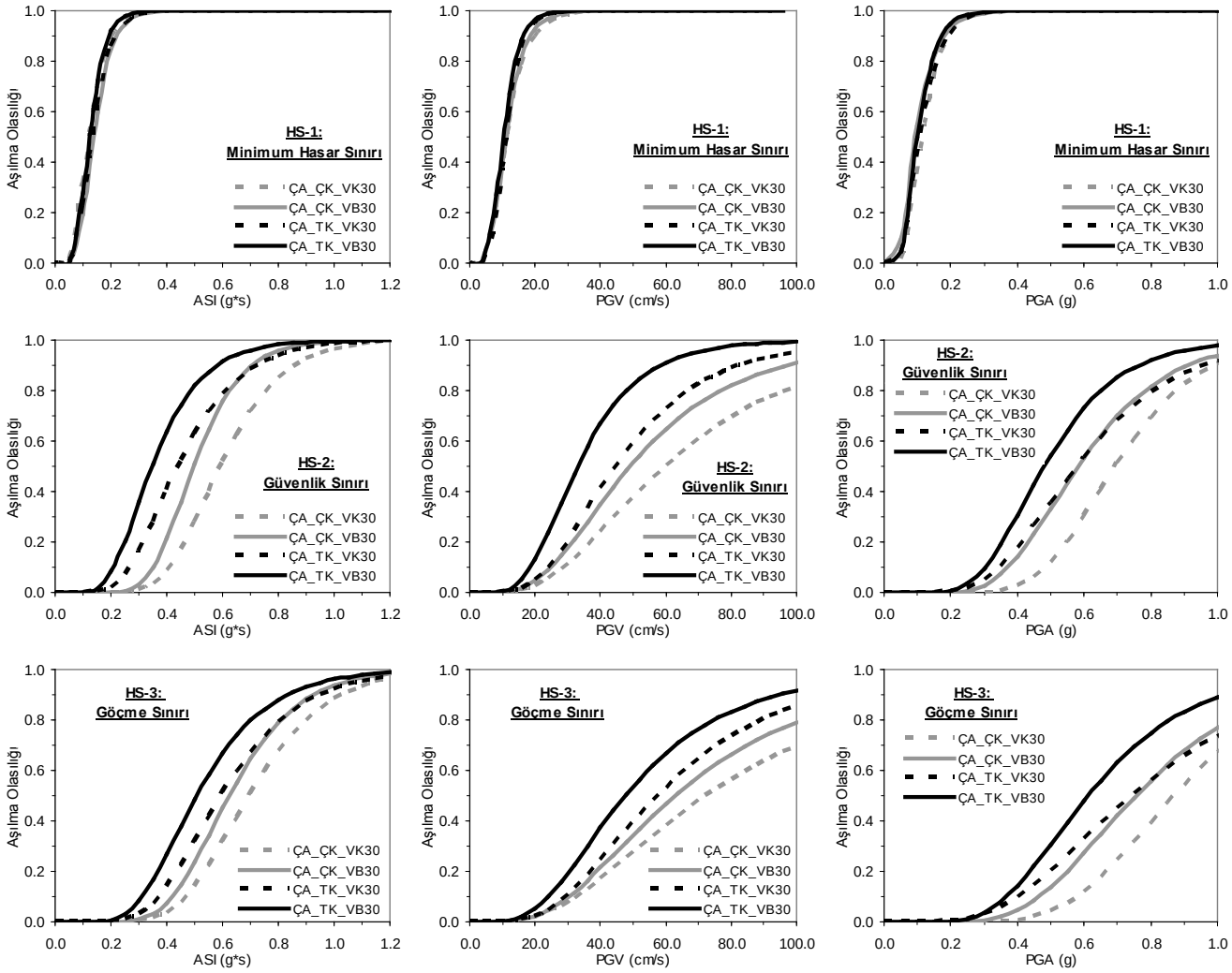
| ÇA_ÇK_VK30 | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Şiddet Ölçüdü | HS-1: Minimum Hasar Sınırı | | | HS-2: Güvenlik Sınırı | | | HS-3: Göçme Sınırı | | |
| | Medyan | Saçılım | $R^2$ | Medyan | Saçılım | $R^2$ | Medyan | Saçılım | $R^2$ |
| ASI (g*s) | 0.121 | 0.401 | 0.758 | 0.592 | 0.290 | 0.748 | 0.693 | 0.308 | 0.902 |
| PGV (cm/s) | 11.238 | 0.454 | 0.299 | 59.678 | 0.573 | 0.569 | 72.287 | 0.628 | 0.619 |
| PGA (g) | 0.117 | 0.400 | 0.121 | 0.693 | 0.280 | 0.296 | 0.869 | 0.316 | 0.361 |

| ÇA_ÇK_VB30 | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Şiddet Ölçüdü | HS-1: Minimum Hasar Sınırı | | | HS-2: Güvenlik Sınırı | | | HS-3: Göçme Sınırı | | |
| | Medyan | Saçılım | $R^2$ | Medyan | Saçılım | $R^2$ | Medyan | Saçılım | $R^2$ |
| ASI (g*s) | 0.137 | 0.366 | 0.843 | 0.497 | 0.272 | 0.777 | 0.623 | 0.309 | 0.721 |
| PGV (cm/s) | 10.914 | 0.423 | 0.235 | 49.109 | 0.532 | 0.501 | 62.887 | 0.570 | 0.469 |
| PGA (g) | 0.094 | 0.500 | 0.128 | 0.583 | 0.350 | 0.176 | 0.756 | 0.380 | 0.205 |

| ÇA_TK_VK30 | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Şiddet Ölçüdü | HS-1: Minimum Hasar Sınırı | | | HS-2: Güvenlik Sınırı | | | HS-3: Göçme Sınırı | | |
| | Medyan | Saçılım | $R^2$ | Medyan | Saçılım | $R^2$ | Medyan | Saçılım | $R^2$ |
| ASI (g*s) | 0.133 | 0.381 | 0.779 | 0.438 | 0.389 | 0.846 | 0.593 | 0.368 | 0.937 |
| PGV (cm/s) | 11.083 | 0.354 | 0.307 | 44.434 | 0.486 | 0.602 | 57.340 | 0.529 | 0.643 |
| PGA (g) | 0.110 | 0.450 | 0.131 | 0.577 | 0.400 | 0.144 | 0.741 | 0.480 | 0.207 |

| ÇA_TK_VB30 | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Şiddet Ölçüdü | HS-1: Minimum Hasar Sınırı | | | HS-2: Güvenlik Sınırı | | | HS-3: Göçme Sınırı | | |
| | Medyan | Saçılım | $R^2$ | Medyan | Saçılım | $R^2$ | Medyan | Saçılım | $R^2$ |
| ASI (g*s) | 0.123 | 0.346 | 0.804 | 0.347 | 0.400 | 0.826 | 0.508 | 0.385 | 0.900 |
| PGV (cm/s) | 10.090 | 0.386 | 0.323 | 33.049 | 0.444 | 0.655 | 47.656 | 0.535 | 0.740 |
| PGA (g) | 0.100 | 0.420 | 0.124 | 0.482 | 0.360 | 0.223 | 0.613 | 0.400 | 0.218 |

Tablo 2'de verilen parametreler kullanılarak kümülatif lognormal dağılım eğrileri çizdirilerek; her bir köprü tipi, üç hasar sınır durumu ve üç sismik şiddet ölçüdü için hesaplanmış analitik kırılganlık eğrileri elde edilmiştir (Şekil 5). Bu grafikler incelendiğinde; Minimum Hasar Sınırı için köprü tipinin fark etmediği ve her bir köprü tipinde benzer kırılganlık eğrileri elde edildiği görülmektedir. Elde edilen bu sonuç HAZUS (FEMA, 2003) ile uyumludur. Ayrıca Güvenlik ve Göçme Sınır Durumları için tek kolonlu ve yüksek verev açısına sahip köprülerin hasar görebilirlik seviyelerinin daha yüksek olduğu görülmüştür.




Şekil 5. Farklı hasar sınır durumları ve şiddet ölçütleri (ASI, PGV, PGA) için kırılganlık eğrileri

## 7. SONUÇLAR

Bu çalışmanın en önemli katkısı 90'li yıllardan sonra ülkemizde yaygın bir şekilde yapılmış ve yapılmaya devam edilmekte olan öngerilmeli tabliye kirişli betonarme karayolu köprülerinin analitik kırılganlık eğrilerinin elde edilmesidir. Kırılganlık eğrileri yardımıyla tipik karayolu köprülerinin hasar görebilirliği belirlenerek sismik risk hesaplamaları yapılabilir.

Analitik kırılganlık eğrileri dört farklı köprü tipi ve üç hasar sınır durumu için hesaplanmıştır. Minimum hasar sınırı için dört farklı köprü tipinin kırılganlık eğrileri arasındaki fark yok denecek kadar azdır. Bu sebeple minimum hasar sınırı için köprü tipinden bağımsız tek bir eğri tanımlanabilir. Fakat Güvenlik ve Göçme Hasar Sınırları için elde edilmiş kırılganlık eğrileri incelendiğinde, tek ayaklı ve verev açısı yüksek köprülerin diğerlerine kıyasla daha yüksek hasar görebilirliği bulunmaktadır. Yer hareketi kayıtlarının sismik şiddet ölçüdü seçimi analitik kırılganlık eğrilerinin güvenilirliğini doğrudan etkileyen parametrelerin başında gelmektedir. Tipik karayolu köprüleri için tanımlanmış şiddet ölçüdü ASI kullanılarak elde edilmiş kırılganlık eğrilerinin PGV ve PGA ile hesaplananlarla kıyasla daha uygun olduğu görülmüştür. Diğer çalışmalarda yaygın bir şekilde kullanılan PGA'in ise ASI ve PGV ile karşılaştırıldığında güvenilirliği en düşük olan şiddet ölçüdü olduğu görülmüştür.

**KAYNAKLAR**

AASHTO, 1996. AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design, American Association of State Highway and Transportation Officials 16th Ed. with 2001 Interims, Washington D.C.

Avşar, Ö., Yakut, A. ve Caner, A. (2011). Analytical fragility curves for ordinary highway bridges in Turkey. *Earthquake Spectra*, (Kabul edilmiş makale basım aşamasında).

Avsar, O. ve Yakut, A. (2010). Evaluation of ground motion intensity measures for the fragility curves of ordinary highway bridges in Turkey. *9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering: Reaching Beyond Borders*, Bildiri No. 380, Toronto.

Ayyub, B.M. ve Lai, K.L. (1989). Structural reliability assessment using Latin Hypercube Sampling, *Proceedings of ICOSSAR'89, the 5th International Conference on Structural Safety and Reliability*, Part II. pp. 1177–1184, ASCE: San Francisco, CA.

Caltrans, 2010 Seismic Design Criteria Version 1.6., California Department of Transportation, Sacramento, CA.

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, 2007 (DBYBHY-2007), Bayındırlık ve İskan Bakanlığı.

Elnashai, A.S., Borzi, B. ve Vlachos, S. (2004). Deformation–based vulnerability functions for RC bridges. *Structural Engineering and Mechanics* **17:2**, 215-244.

FEMA, 2003, HAZUS-MH MR1: Technical Manual, Vol. Earthquake Model. Federal Emergency Management Agency, Washington DC.

Karim, K.R. ve Yamazaki, F. (2003). A simplified method of constructing fragility curves for highway bridges. Earthquake Engineering and Structural Dynamics **32:10**, 1603-1626.

Kwon, O.S. ve Elnashai, A.S. (2006). The effect of material and ground motion uncertainty on the seismic vulnerability curves of RC structure. *Engineering Structures* **28:2**, 289-303.

Nielson, B.G. ve DesRoches, R. (2007). Analytical seismic fragility curves for typical bridges in the Central and Southeastern US. *Earthquake Spectra* **23:3**, 615–633.

OpenSees, (2005). Open System for Earthquake Engineering Simulation, Version 1.7.3, Pacific Earthquake Engineering Research Center, http://opensees.berkeley.edu.