BETONARME KÖPRÜ KOLONLARI İÇİN FARKLI GÜÇLENDİRME YÖNTEMLERİNİN KIRILGANLIK ANALİZLERİ KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

İ. Evcen[1] A. Shafieezadeh[2] R. DesRoches[3]

[1] *Yüksek Lisans, İnşaat Müh. Bölümü, University of Pavia, İtalya*
[2] *Araştırma Görevlisi, İnşaat Müh. Bölümü, Georgia Institute of Technology, ABD*
[3] *Profesör, İnşaat Müh. Bölümü, Georgia Institute of Technology, ABD*
Email: iremevcen@yahoo.com

ÖZET:

Tasarımı 1970lerin öncesinde yapılmış birçok köprü şartnamelerdeki depreme dayanıklı tasarım olgusunun eksikliği nedeniyle yıkıcı depremlerde çok büyük hasarlara uğramıştır. Betonarme kolonlardaki kesme donatısı, eğilme donatısı ve bindirme boyu eksikliği gibi tasarım ve uygulama hatalarının yapıya ciddi zararlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın amacı çeşitli kolon güçlendirme metotlarıyla güçlendirilmiş köprülerin performanslarının değerlendirilmesidir. Bunlar betonarme mantolama, çelik mantolama ve fiber takviyeli polimer (FRP) mantolamayı kapsamaktadır. Çeşitli kolon güçlendirme planları Central ve Southeastern United States (CSUS)'de eski tasarım kodlarına göre tasarlanmış gerçekçi modellenmiş olan çok açıklıklı çelik kirişli köprülere uygulanmıştır. Bu amaçla, güçlendirme yapılmamış ve güçlendirme yapılmış köprülerin üç boyutlu modelleri OpenSees programında geliştirilmiştir. Olasılıklı Sismik Talep Modelleri (PSDM), seçilmiş bir takım yer hareketleri ile doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analizler kullanılarak geliştirilmiştir. Elde edilen kırılganlık eğrileri çeşitli yöntemlerin etkinliklerini karşılaştırmada kullanılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Sismik güçlendirme, Köprü kolonları, Kırılganlık analizi, Hasar sınır durumu, Olasılıklı sismik talep modelleri

1. GİRİŞ

Tasarımı 1970 öncesine dayanan köprüler depremlerde çok büyük hasarlar görmüştür. Bu deneyimler yeni sismik tasarım metotları geliştirme gerekliliğini açığa çıkarmıştır. Köprü bileşenlerinin davranışlarını geliştirmek için çeşitli güçlendirme metotları geliştirilmiştir. Birçok deney kesme dayanımı yetersiz kolonlarda kolon mantolamasının kesme dayanımı ve sünekliliğin artırılmasında etkili olduğunu göstermiştir (Priestley ve diğ., 1994; Yang ve diğ., 2000; Saadatmanesh ve diğ., 1997; Sheikh ve diğ., 2002; Kawashima ve diğ., 2000; Yoneda ve diğ., 2001; Priestley ve diğ., 1996). Bu çalışma köprü kolonlarında uygulanan farklı mantolama yöntemlerinin etkinliği üzerine odaklanmaktadır. Köprü yapılarının çeşitli bileşenlerinin hasar görebilirliğini belirlemek için kırılganlık eğrileri geliştirilmiştir.

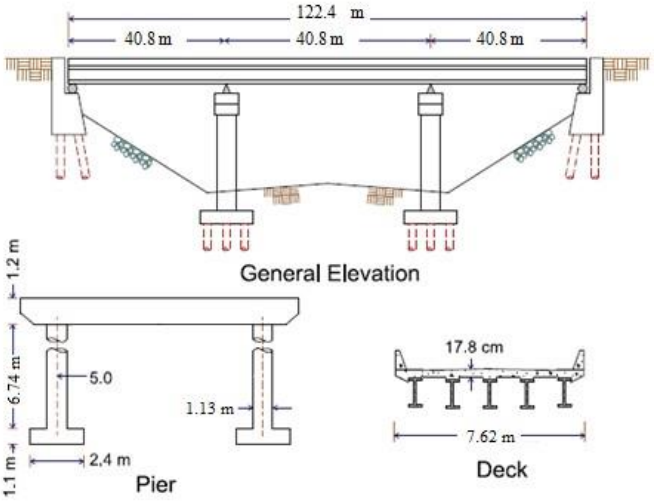
Nielson (2005), CSUS bölgesindeki farklı tip köprüler için kırılganlık eğrileri geliştirmiştir. Padgett (2007) farklı güçlendirme yöntemlerinin bazı temel köprü elemanlarının performansları üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla bu yöntemlerle güçlendirilmiş köprüler için kırılganlık eğrileri geliştirmiştir. Bu çalışma ise köprü kolonlarının güçlendirmesi üzerine bir çalışmadır. Kırılganlık eğrileri geliştirilerek kolon güçlendirme yöntemlerinin etkinliklerinin karşılaştırılması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada incelenmek üzere, CSUS bölgesindeki köprüler içinde kolonlarının hasar görebilirliği en çok olan çok açıklıklı sürekli çelik kirişli köprü tipi seçilmiştir (Nielson, 2005). Bu bölgede bu tipteki köprülerden üç açıklıklı olanının en çok sayıda olması nedeniyle üç açıklı köprü tipi incelenmiştir. Nielson tarafından OpenSees programında geliştirilmiş köprü modelleri bu çalışma için değiştirilmiş ve kullanılmıştır.

2. KÖPRÜ MODELLERİ VE GÜÇLENDİRMESİ

2.1. Köprünün Analitik Modeli

Bu çalışmada kullanılan köprü modeli üç açıklıklı sürekli çelik kirişli köprüdür. Şekil 2.1'de çok açıklıklı sürekli çelik köprünün tipik genel görünüşü gösterilmektedir. Kullanılan köprü 40.79 m uzunluğunda eşit uzunluktaki üç açıklığa sahiptir. Toplam köprü uzunluğu 122.40 m' dir. Köprünün eni 7.62 m olup, tabliye 5 adet çelik kiriş üzerine inşa edilmiştir. Köprü tabliyesi, köprü altyapısına (köprü kolonlarına) yüksek tip çelik mesnetlerle bağlanmıştır. Köprü açıklığında iki adet başlık kirişi vardır ve her bir başlık kirişi 9414 mm çapında iki betonarme kolona oturmaktadır. Tüm kolonlar 6.74 m uzunluğundadır. Kolonlar da 8 adet kazığın bulunduğu betonarme temeller üzerine oturmaktadır. Köprünün uçları kazıklarla desteklenmiş başlık kirişleri ile yaklaşım plağına bağlanmıştır.



Şekil 2.1. Çok açıklıklı çelik kirişli köprü görünümü (Nielson, 2005)

MSC Çelik Köprünün periyodları ve mod şekilleri modal analizinden elde edilmiştir. Transversal mod olan birinci modun periyodu 0.57 s, eksenel mod olan ikinci modun periyodu 0.53 s olarak hesaplanmıştır.

2.2. Kolon Güçlendirmesi ve OpeenSees Modeline Uygulanması

Kırılganlık analizi öncesinde orijinal köprüye seçilen 5 yer hareketiyle dinamik analiz yapılmıştır. Seçilen bu yer hareketlerinin çeşitli şiddet seviyelerindeki yer sarsıntılarını temsil etmesi amaçlanmıştır. Kolon sünekliği, köprü ayaklarında ve mesnetlerdeki kuvvet-deplasman ilişkileri gibi bazı anahtar etkiler kaydedilmiştir.

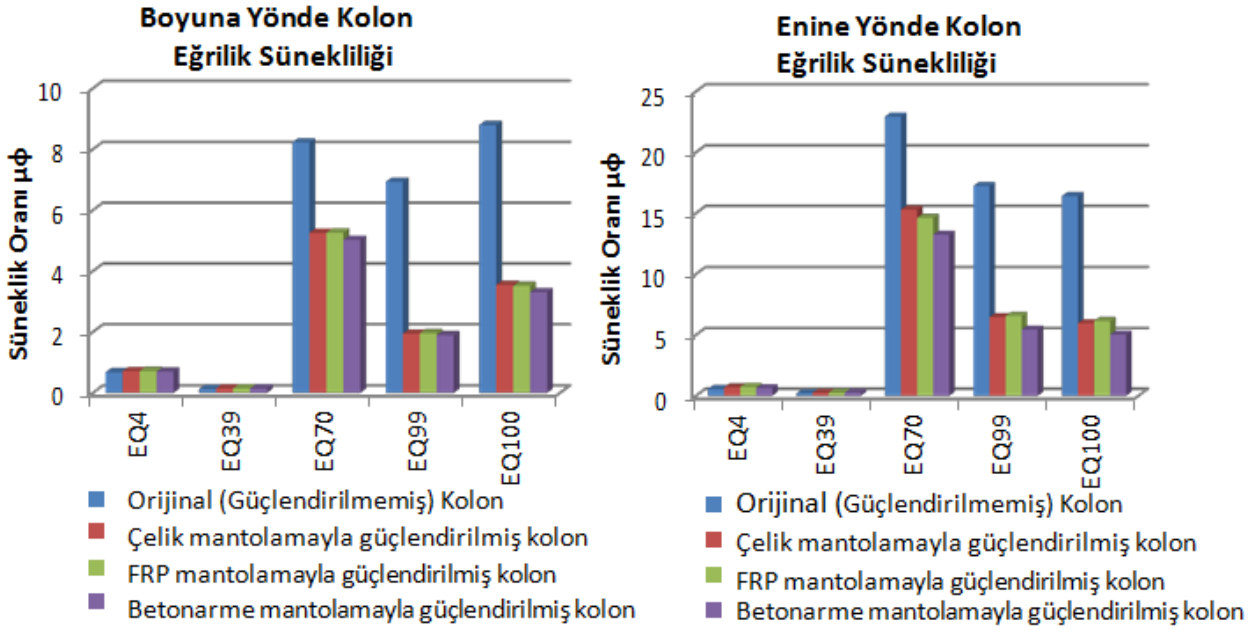
Seçilen 5 yer hareketinden elde edilen maksimum etkilere göre köprü kolonları çelik, fiber takviyeli polimer (FRP) ve betonarme (RC) mantolama yöntemleriyle güçlendirilmiştir. Güçlendirme tasarımı için öncelikle, Priestley (1996) tarafından önerilen ve FHWA Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures (2006)' da belirtilen prosedür doğrultusunda süneklik ve kesme kuvvetinin artırılması için gerekli manto kalınlığı belirlenmiştir. Önerilen prosedür sünekliliğin artırılmasında gerekli plastik dönme (Φp) ile hacimsel sarılma

oranını ilişkilendirir. Kesme dayanımın artırılmasında, kolon güçlendirmesi ile sağlanması gereken ilave kesme kapasitesi hesaplanmıştır.

Sonrasında güçlendirme tasarımı OpenSees 'de simule edilmiş modellere uygulanmıştır. Betonarme kolonlar OpenSees'de sarılmış beton, sarılmamış beton ve donatı çeliğini içeren fiber kesit olarak modellenmiştir. Güçlendirilmiş betonarme kolonlarının özelliklerini simule etmek için bu üç malzemenin geliştirilmiş gerilme-şekil değiştirme ilişkileri kullanılmıştır. Kolon dış yüzeyden mantolandığı için, tüm beton sarılmış beton özelliğindedir. Mantolamadan gelen sarılma etkisi Mander'in (1988) kendi modelinin tasarım için kullanıldığı aynı denklemlerle hesaplanmıştır.

Farklı kolon mantolaması yöntemleriyle güçlendirmesi yapılmış köprülerin seçilen yer hareketleri altındaki davranışları dinamik analizlerle gözlemlenmiştir. Güçlendirilmiş köprülerin davranışları orijinal köprülerin davranışlarıyla karşılaştırılmıştır. Kolon mantolamasıyla makul ölçüde bir iyileşmenin elde edildiği gözlemlenmiştir. Kısaca, farklı şiddet seviyelerindeki 5 adet yer hareketi seçilerek yapılan bu deterministik çalışma, olasılıklı kırılganlık analizi öncesinde köprülerin güçlendirilmesi ve modellerinin değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.

Şekil 2.2 (a) ve (b) süneklik oranlarındaki değişimleri grafiksel olarak göstermektedir. Mantolamanın eğrilik sünekliliği oranını olumlu yönde etkilediği görülmektedir. EQ4, EQ39, EQ70, EQ99 ve EQ100 olasılıklı analiz için kullanılan bir grup yer hareketi arasından seçilmiş 5 yer hareketidir. Bu 5 yer hareketi, olasılıklı analiz için kullanılan 100 adet yer hareketi arasından seçilirken tüm yer hareketlerinin çeşitliliği göz önüne alınmıştır. EQ70, EQ99 ve EQ100 depremleri sırasında yapı elastik sınırın ötesine geçerek elastik olmayan davranış sergilerken, süneklik talebi güçlendirme yöntemleriyle önemli ölçüde azalmıştır.



Şekil 2.2. Boyuna (a) ve Enine (b) yönlerde kolon süneklik oranının kolon güçlendirmesi ile değişimi

3. KIRILGANLIK ANALİZİ

Güçlendirme yapılmış köprülerin kırılganlık eğrileri hem sismik tehlikeye maruz kalmış köprülerin risk ve güvenirlilik değerlendirmesi için hem de köprülerin alternatif güçlendirme yöntemlerinin değerlendirilmesi için

çok önemli bir yöntemdir (Padgett ve diğ. 2008). Kırılganlık eğrileri, bir yapının verilen yer hareketi şiddet ölçüsü (IM) için belirli bir hasar sınır durumuna (LS) ulaşması veya bu sınır durumunu aşması olasılığını veren koşullu olasılık ilişkisidir.

Yapısal kırılganlık eğrilerinin geliştirilmesinde uzmana dayalı kırılganlık fonksiyonları, deneye dayalı kırılganlık fonksiyonları veya analitik hesaplara dayalı kırılganlık fonksiyonları gibi çeşitli yöntemler vardır (Nielson, 2005). Yeterli deprem verisinin olmadığı durumlarda analitik kırılganlık eğrilerinin geliştirilmesi, köprü performanslarının değerlendirilmesi için uygun bir yoldur. Analitik kırılganlık eğrileri Hasar Durumu ile Yapı Kapasitesi (C) arasındaki ilişkiyi ve yer hareketi şiddet parametresi ile yapısal hasar (D) arasındaki ilişkiyi kullanır. Denklem 3.1'de formüle edilen aşılma olasılığı (pf), yapı kapasitesinin sismik talebi aşma olasılığını vermektedir.

$$\text{Kırılganlık}=P[LS \mid IM=y] \tag{3.1}$$

Bu olasılık dağılımının, geçmiş çalışmalarda iyi uyum sağladığı ve geleneksel olasılık teorisi kullanılarak işlenmesine uygun olması nedeniyle lognormal dağılımı takip ettiği kabul edilir (Wen ve diğ., 2003). Buna ek olarak, yapı kapasiteleri ve talepleri birçok pratik uygulamada normal ya da lognormal dağılımı takip etmektedir (Kottegoda ve diğ., 1997). Bu nedenle, kırılganlık fonksiyonu şu şekilde yazılabilir:

$$p_f = \phi\left(\frac{\ln S_d/S_c}{\sqrt{\beta_d^2+\beta_c^2}}\right) \tag{3.2}$$

S_c ve β_c, belirlenmiş hasar durumu için tanımlanan yapı kapasitesinin medyan ve dağılım değerini (lognormal standard saçılım) ifade etmektedir. S_d ve β_d, sismik talebin seçilen yer hareketi şiddeti açısından medyan ve logaritmik saçılım değerini ifade etmektedir. $\phi(.)$ ise standart normal fonksiyonu ifade etmektedir.

3.1. Talep Tahmini

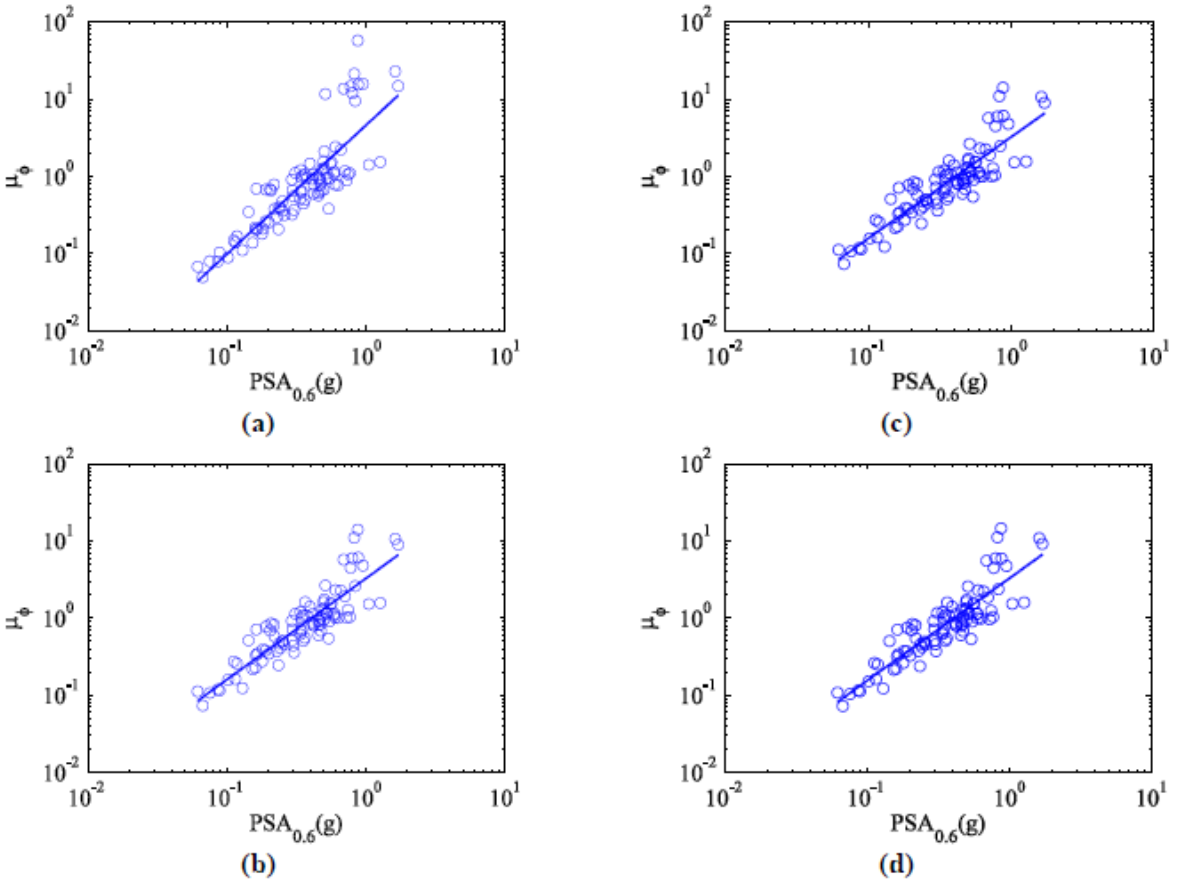
Kırılganlık analizi için talep ve kapasite parametreleri gerekmektedir. Talep parametreleri, olasılıklı sismik talep modellerinin (PSDM) geliştirilmesiyle, kapasite parametreleri ise sınır durum kapasitelerinin kullanılmasıyla tahmin edilebilir. Olasılıklı modellerin geliştirilmesi için birçok kaynaklı belirsizlik ve bir dizi yer hareketini içeren simülasyonlar kullanılarak bir seri analitik modeller oluşturulmaktadır. Bu analitik modeller yapı talebini tahmin etmek için elastik spektral, lineer olmayan spektral ve doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analiz gibi yöntemlerle analiz edilmektedir. Bu çalışmada doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analiz yöntemi izlenmiştir. Sonrasında, belirlenmiş şiddet ölçüsü için regresyon analizi gibi yöntemlerle olasılıklı sismik talep parametreleri elde edilmektedir.

Kırılganlık eğrilerinin geliştirilmesinde kullanılacak zaman tanım alanında dinamik analizlerin uygulanması için, bölgenin depremselliğini temsil edecek N sayıda yer hareketi seçilmektedir. Bu çalışmada olasılıklı değerlendirme için, Rix ve Fernandez (2006) tarafından oluşturulan bir takım yer hareketi kullanılmıştır. Bu yer hareketleri seçilmiş sekiz şehirde kaydedilmiş kayıtların ölçeklendirilmesiyle elde edilmiştir. Her bir şehrin takımı 3 farklı hasar seviyesinde değerlendirilen 10 adet farklı deprem kaydını içeren 30 adet farklı yer hareketinden oluşmaktadır. Bu 3 hasar seviyesi sırasıyla 475, 975 ve 2475 yıllık dönüş sürelerine karşılık gelen 50 yılda 10% (Grup1), 5% (Grup2) ve 2% (Grup3) aşılma olasılığına sahiptir. 240 adet yer hareketi arasından (30 adet her şehir için) 100 adeti kırılganlık analizi için seçilmiştir. Grup 1 ve Grup 2'den 30ar, Grup3'ten 34 adet her hareketi seçilmiştir. Sonra, seçilen yer hareketleri spektral eşleme yoluyla boylamsal (X) ve enlemsel (Z) bileşenlerine ayrılmıştır.

Bunun yanısıra, malzeme ve geometrik parametrelerdeki belirsizlikler köprü modellerinin davranışını etkileyebilmektedir. N sayıdaki köprü modelini oluştururken bu belirsizlikleri yakalamak için, yapısal özellikler olasılıklı olarak örneklenmiştir. Nielson (2005) bu olasılıklı modelleri tanımlamış ve CSUS bölgesindeki çeşitli köprü tipleri için model parametrelerini örneklemiştir. Bu çalışmada, köprü modelleri yalnızca malzeme belirsizlikleri göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Tüm modellerin geometrik özellikleri aynıdır. Farklı güçlendirme yöntemlerine ilişkin birçok paramete mevcuttur (Padgett, 2007). Bu çalışmaya güçlendirme yöntemlerine ve köprü geometresine ait belirsizlikler dahil edilmemiştir.

Malzeme özellikleri dağılımı tanımlandıktan sonra, 100 adet köprü modelinin oluşturulması için bu özellikler olasılıklı olarak örneklenmiştir. Sonrasında 100 yer hareketi ile farklı malzeme özelliklerine sahip 100 köprü modeli rastgele eşleştirilmiştir. Anahtar tepki parametrelerini elde etmek için, herbir köprü modeli ve yer hareketi çiftine doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analiz yapılmıştır.

PSDM'lerin oluşturulmasında, en iyi regresyon sonucunu veren şiddet ölçüsü seçilmektedir. Bu çalışmada kullanılan şiddet ölçüleri PGA, PGV ve yapının doğal periyodu 0.6 s ve 1.0 deki PGA (PSA0.6 ve PSA1.0') dır. Verilerle en uyumlu şiddet ölçüsünü belirlemek için, regresyon analizinden elde edilen saçılım değeri (σ) ve regresyon doğrusunun eğimi (b-hat) göz önüne alınmıştır. Uygun şiddet ölçüsü olarak eğimin en küçük dağılım oranını veren şiddet ölçüsü seçilir. Bu çalışmada, en iyi regresyonu veren şiddet ölçüsü 0.6 s deki psödo-spectral ivme (PSA) olarak belirlenmiştir. Şiddet ölçüsü seçildikten sonra, orijinal modeller için PSDM'ler geliştirilmiştir.



Şekil 3.1. (a) Orijinal, (b) Model1 (c) Model(2) ve (d) Model3'ün kolon sünekliği olasılıklı sismik talep modelleri

Aynı prosedür kolon mantolama yöntemiyle güçlendirilmiş kolonlara da uygunlanmıştır. 100 dinamik analizin her biri için maksimum eğrilik talebi elde edilmiştir. Elde edilen değerlerin ortalama, medyan ve saçılım değerleri hesaplanmıştır. Kolon mantolaması ortalama ve saçılım değerlerinin toplamından (ort+saçılım) elde edilen değere göre tasarlanmıştır. Kolon mantolaması OpenSees modellerine uygulanmıştır. Çelik, FRP ve kolon mantolamasıyla güçlendirilmiş köprüler sırasıyla Model 1, Model 2 ve Model 3 olarak adlandırılmıştır. Orijinal modelin olasılıklı sismik talep modellerin (PSDM) lerin elde edilmesi için izlenen yol Model1A, Model2 ve Model3 'ün PSDM lerinin elde edilmesinde de izlenmiştir.

Orjinal köprü, çelik mantolamalı (Model1), FRP mantolamalı (Model2) ve betonarme mantolamalı (Model 3) köprülerin kolon sünekliliklerinin olasılıklı sismik talep modelleri Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.

3.2. Kapasite Tahmini

PSDM ve regresyon analizleri yoluyla talep tahminlerinin elde edilmesinden sonra, kırılganlık eğrilerinin geliştirilmesi için sınır durumlar tanımlanmalıdır. Sınır durum kapasiteleri cinsinden ifade edilen kapasite tahminleri köprülerin kırılganlıklarının tahmin edilmesinde temel bir unsurdur. Kapasite modeleri, uzman görüşü, deneysel veriler, analitik metodlar veya bunların kombinasyonları yoluyla tanımlanır. HAZUS hasar durumu kriterleriyle uyumu olarak hafif, orta, ileri, tam hasar durumları niteleyici hasar durumları olarak düşünülmüştür. Önceki çalışmalar göstermştir ki sınır durum kapasiteleri lognormal dağılım izlemekte ve dört hasar durumu iki parametreyle tanımlanmaktadır. Bu parametreler yapı kapasitesinin median değeri Sc ve yapı kapasitesinin medyan değerinin lognormal dağılımı yada saçılımı βc dır.

Tablo 2.1. kırılganlık eğrilerinin oluşturulmasında kullanılan nicesliksel sınır durumları göstermektedir. Kapasite sınır durumlarının medyan Sc ve saçılım βc değerleri deneysel sonuçlara ve anketlere dayanan geçmiş çalışmalardan alınmıştır. Aşağıda tabloda gösterilen çelik ve FRP mantolama hariç bu çalışmada kullanılan tüm değerler Ramanathan ve diğ.(2012) tarafından yürütülmüş çalışmadan alınmıştır.

Çelik mantolu kolonlar için, kolon eğrilik sünekliliğinin medyan ve saçılım değerleri Padgett (2007) 'ın çalışmasında alınmıştır. Her hasar durumu için sınır durumları Chai ve diğ. (1991) ve Priestley (1994) yarafından yapılan deneyler temel alınarak değerlendirilmiştir. Her bir hasar durumu için raporlanan deplasman süneklilik talepleri μΔ , aşağıdaki formülle (FHWA, 1995) ilgili eğrilik süneklilik değerine çevrilmiştir.

$$\mu_\phi = 1 + \frac{\mu_\Delta - 1}{3.\frac{l_p}{l}\left(1 - 0.5\frac{l_p}{l}\right)} \tag{3.3}$$

l kolon yüksekliği, *lp* ise plastik mafsal bölgesi uzunluğunu ifade etmektedir.

FRP mantolamalı kolonlar için, Fahmy ve diğ.(2009) tarafından raporlanan FRP ile güçlendirilmiş kolonların tanım sınırları kullanılmıştır. FRP ile güçlendirilmiş kolonların sınır durumlarını elde etmek için, Denklem 3.4 teki formülle deformasyon limit durumları eğrilik sınır durumlarına çevrilmiştir. Plastik mafsal uzunluğu Priestley ve diğ. (1994) ten alınmıştır.

$$l_p = g + 0.044\, f_y d_{bl} \tag{3.4}$$

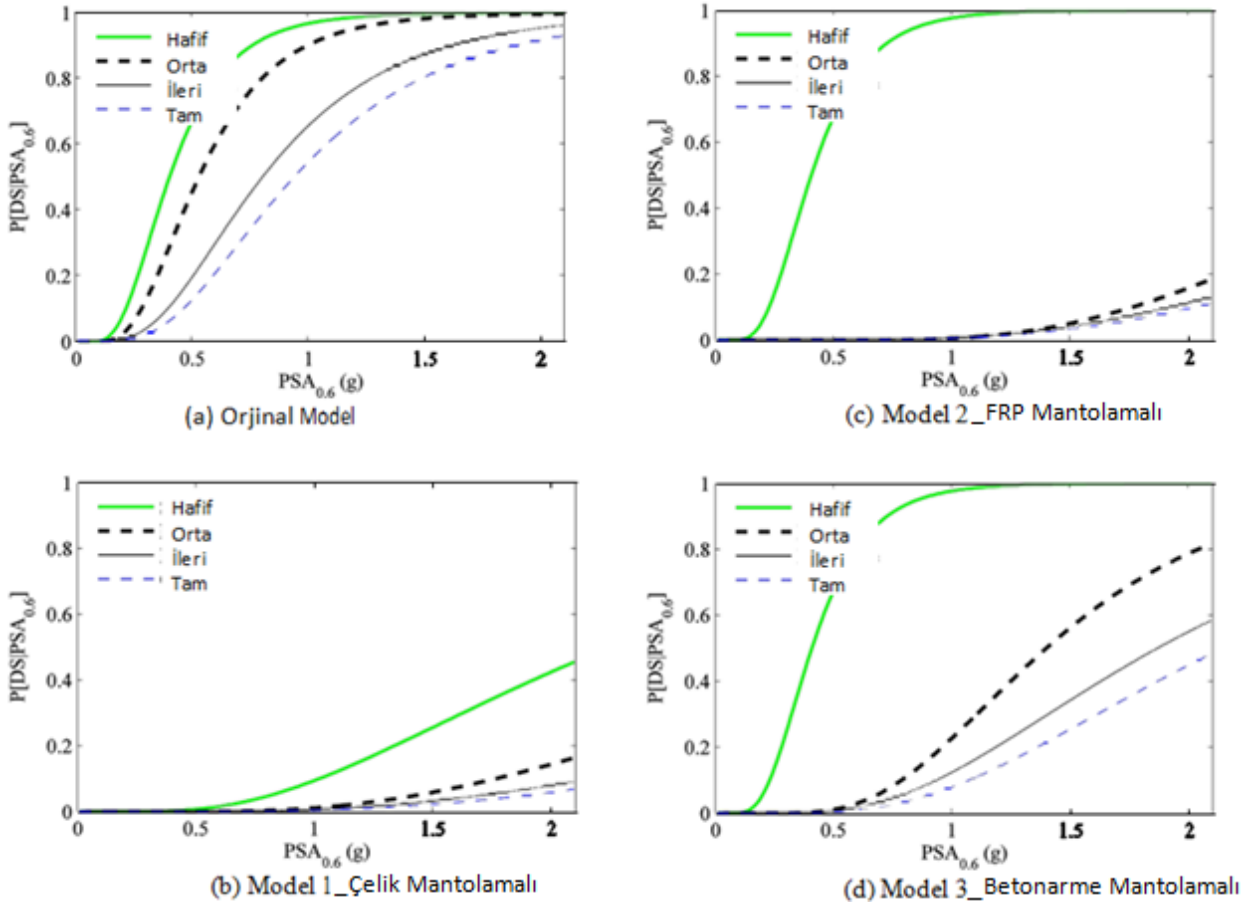
g mantolamanın bitimi ile temel ayağının arasında bırakılan mesafeyi, *fy* ve *dbl* ise düşey donatıların mukavemet ve çap değerlerini ifade etmektedir.

Betonarme mantolamalı kolonlar için sınır durumları, sismik olarak tasarlanmış kolonlar için belirlenen değerlerle ifade edilmiştir. Bu değerler Ramanathan ve diğ.(2012) tarafından yapılan çalışmada yer almaktadır.

Tablo 3.1: Sınır durum kapasiteleri

	Hafif		Orta		İleri		Tam	
Bileşen	S_c	β_c	S_c	β_c	S_c	β_c	S_c	β_c
Sismik olarak tasarlanmamış kolon(μ_ϕ)	1.0	0.25	1.58	0.25	3.22	0.47	4.18	0.47
Çelik Mantolamalı Kolon (μ_ϕ)	9.35	0.59	17.7	0.51	26.1	0.64	30.20	0.65
FRP Mantolamalı Kolon(μ_ϕ)	1.0	0.25	14.72	0.25	19.25	0.47	20.64	0.47
Betonarme Mantolamalı Kolon(μ_ϕ)	1.0	0.25	5.11	0.25	7.50	0.47	9.00	0.47

Talep modelleri ve kapasite sınır durumları belirlendikten sonra, kırılganlık eğrileri oluşturulmuştur. Kırılganlık eğrileri, belirli bir şiddet ölçüsü için belirli bir hasar durumuna ulaşılma ve aşılma olasılığını ifade eder. Şekil 3.2, şiddet ölçüsü olan 0.6 s'deki PSA ya göre dört hasar durumu için kolon süneklik eğrilerini göstermektedir. Görüldüğü gibi kolon güçlendirme yöntemlerinin kolon eğrilik sonuçlarına önemli bir etkisi vardır. Her seviyede güçlendirilmiş kolonun hasarlı olma durumu orijinal köprünün hasarlı olma durumundan daha az bir olasılığa sahiptir.



Şekil 3.2. Tüm modellerin kolon sünekliği kırılganlık eğrileri (μ_φ)

Çelik mantolamanın eğrilik sünekliliği üzerinde önemli bir etkisi olduğu Şekil 3.2(b)'de görülmektedir. Tüm hasar durumları için, verilen hasar durumunun aşma olasılığı önemli ölçüde azalmıştır. Sonuçlara göre orta, ileri ve tam hasar durumu oluşma olasılığı güçlendirilmemiş bir kolondan çok daha azdır.

Şekil 3.2 (c) de görüldüğü üzere, orta, ileri ve tam hasar oluşma olasılığı FRP ile güçlendirilmiş kolonlarda önemli ölçüde düşmesine rağmen, hafif hasar oluşma olasılığı neredeyse güçlendirilmemiş kolonlar için aynıdır. Orta, ileri ve tam hasar durumunu oluşma olasılığındaki azalma ise çelik mantolu kolonlarla neredeyse aynıdır.

Şekil 3.2(d) de, betonarme mantolamalı kolonda hafif hasar olasılığının, orjinal kolondaki ile hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. Diğer yandan, orta çok ve ileri hasar oluşumu orjinal kolonlara göre oldukça azalmıştır.

Genel olarak çelik montolamanın her seviyedeki hasar durumları üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Tüm güçlendirme yöntemleri ileri ve tam hasar durumları için etkili olmuştur.

4. SONUÇ

Bu çalışma kırılganlık analizi kullanılarak çeşitli kolon güçlendirme yöntemlerinin etkinliğinin değerlendirilmesini amaçlamaktadır.
Bu çalışmada CSUS bölgesinin tipik köprü tipi olan çok açıklıklı sürekli çelik kirişli köprüler seçilmiştir. Olasılıklı çalışma için, malzeme belirsizliği göz önüne alınarak bir dizi köprü modeli oluşturulmuştur. Bölgeyi temsil edecek bir dizi yer hareketi seçilmiştir. Herbir yer hareketi oluşturulan modellerle rastgele eşleştirilmiştir. Köprü modellerinden kritik etki değerlerleri elde etmek için doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analizler yapılmıştır.

Bu analizlerin sonuçlarına göre çelik, FRP ve RC mantolama ile köprü kolonları güçlendirilmiştir. Daha geniş bir aralıkta envanteri dikkate almak için, güçlendirme elde edilen talebin ortalamasına ek olarak bir standard sapma değerine göre tasarlanmıştır. Regresyon analizi ile olasılıklı sismik talep modellerinin parametreleri hesaplanmıştır. Aynı prosedür üç farklı yöntemle güçlendirilmiş kolonlara da uygulanmıştır.

Sınır durumlarının sayısal değerlei daha once yapılmış çalışmalardan ve deneylerden alınmış ve hesaplanmıştır. Son olarak, orjinal ve güçlendirilmiş köprü modelleri için kırılganlık eğrileri oluşturulmuştur.

Çelik mantolama tüm seviyelerdeki hasarlar için aşılma olasılığını önemli ölçüde azaltmıştır. FRP ve RC mantolama ise hafif hasar oluşumlarında önemli bir azaltma sağlayamamıştır. Bununla beraber FRP mantolama orta, ileri ve tam hasar durumlarında çelik mantolama kadar etkili olmuştur. Kısaca, bu çalışmayla çeşitli güçlendirme yöntemlerinin farklı seviye hasarların oluşma olasılıklarına farklı ölçüde etkisi olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

Chai, Y. H., Priestley, M. N. ve Seible, F. (1991). Seismic retrofit of circular bridge columns for enhanced flexural performance. *ACI Structural Journal (American Concrete Institute)* **88:5**,572–584.
Fahmy, M. F. M., Wu. Z. and Wu, G. (2009). Seismic performance assessment of damage controlled FRP-retrofitted RC bridge columns using residual deformations. *Journal of Compoites For Construction* **13**, 498-513.
Fernandez, J.A. and Rix, G.J. (2006). Soil attenuation relationships and seismic hazard analysis in the upper Mississippi embayment. Eight U.S. National Conference on Earthquake Engineering. San Francisco, California.
FHWA. (2006). Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures: Part 1 – Bridges, Vol. FHWA-HRT-06-032. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, McLean, VA.
Kawashima, K., Hosotani, M. and Yoneda, K. (2000). Carbon fiber retrofit of reinforced concrete bridge piers.

Proceeding of the International Workshop on Annual Commemoration of Chi-Chi Earthquake. Vol. II-Technical Aspect, National Center for Research on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan, ROC, 124-135.

Kottegoda, N. T. and Rosso, R. (1997). Statistics, Probability, and Reliability for Civil and Environmental Engineer, The McGraw-Hill Companies, Inc.

Nielson, B. (2005). Analytical fragility curves for highway bridges in moderate seismic zones. PhD thesis. Georgia Institute of Technology, USA.

Mander, J. B. and Priestley, M.J. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of the Structural Division ASCE* **114: 8**,1804-1826.

Padgett, J.E. (2007). Seismic vulnerability assessment of retrofitted bridges using probabilistic methods. Dissertation. Georgia Institute of Technology. Atlanta, Georgia.

Priestley, M.J., Seible, F., Xiao, Y. and Verma, R. (1994). Steel jacket retrofitting of reinforced concrete bridge columns for enhanced shear strength-part 2: test results and comparison with theory. *ACI Structural Journal*. **91-S52**,537-551.

Priestley, M. J. N., Seible, F. and Calvi, G. M. (1996). Seismic Design and Retrofit of Bridges. John Wiley and Sons, New York.

Ramanathan, K., DesRoches, R. and Padgett, J.E. (2012). A comparison of pre- and post- seismic design considerations in moderate seismic zones through fragility assessment of multi-span bridge classes. Engineering Structures. *Engineering Structures*. Vol. 45, 559-573.

Saadatmanesh, H,. Ehsani, M.R. and Jin, L. (1997). Repair of earthquake-damaged RC columns with FRP wraps. *ACI Structural Journal*. **94-S20**,206-214.