HASAR GÖREBİLİRLİK MODELLERİNİN DOĞRULANMASI İÇİN YENİ BİR YAKLAŞIM

U. Yazgan[1] ve S. Günay[2]

[1] *Yrd.Doç.Dr., Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul*
[2] *Yük. Müh., İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul*
Email: ufukyazgan@itu.edu.tr, serdargunay@itu.edu.tr

ÖZET:

Hasar görebilirlik modelleri, belirli bir şiddete sahip yer hareketine maruz kalan bir yapı grubunda meydana gelmesi beklenen hasar seviyesinin tahmin edilmesinde kullanılır. Bu çalışmada, bina tipi yapılar için geliştirilmiş hasar görebilirlik modellerinin depremlerden sonra toplanan hasar verileri kullanılarak sistemli olarak doğrulanmaları için yeni bir yöntem sunulmaktadır. Önerilen yöntemin mevcut diğer yöntemlerden en büyük farkı hasar gözlemleriyle ilgili belirsizliklerin doğrudan göz önüne alınmasına olanak vermesidir. Hasar görmüş yapıların maruz kalmış oldukları yer hareketi seviyesindeki belirsizlik önemli boyuttadır. Geliştirilmiş olan yöntem Bayesci analiz yaklaşımıyla bu belirsizliğin model doğrulama sırasında dikkate alınmasını mümkün kılmaktadır. Bu sayede, yapıların maruz kaldıkları yer ivmeleriyle ilgili deterministik varsayımlar yapılması gerekliliği ortadan kalkmaktadır. Çalışmada önerilen yöntemin örnek uygulaması olarak betonarme binalar için geliştirilmiş mevcut kırılganlık modelleri Düzce 1999 ve Bingöl 2003 depremi hasar bilgileri kullanılarak değerlendirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER : Hasar görebilirlik, kırılganlık modeli, kuvvetli yer hareketi değişkenliği, Bayesci analiz

1. GİRİŞ

Kırılganlık modelleri deprem hasar tahminlerinin en önemli alt bileşenlerindendir. Bu modeller, yapıların belirli bir şiddete sahip kuvvetli yer hareketine maruz kalması durumunda oluşacak hasarın tanımlı bir hasar düzeyini aşma olasılığını tahmin etmekte kullanılan fonksiyonlardır (Şekil 1a). Kırılganlık modellerinde kuvvetli yer hareketi şiddeti genel olarak en büyük yer ivmesi, spektral ivme veya değiştirilmiş Mercalli şiddeti cinsinden tanımlanır. Yapının hasar durumu ise, meydana gelen hasarın onarılabilir düzeyde olup olmadığı veya can güvenliği riski teşkil edip etmediği değerlendirilerek belirlenir. Literatürde kırılganlık modelleri oluşturmak için kullanılan farklı yaklaşımlar Porter (2003) tarafından özetlenmiştir.

Bu çalışmada bir yapı grubu için geliştirilmiş kırılganlık modellerinin doğruluk seviyesinin değerlendirilmesi için yeni bir yöntem sunulmaktadır. Bu yöntemin temelini oluşturan yaklaşım, deprem sonrası hasar görmüş binalarda tespit edilen hasar seviyeleri ile kırılganlık modelleri kullanarak tahmin edilen hasar seviyelerinin karşılaştırılmasıdır. Mevcut kırılganlık analizi yöntemlerinden farklı olarak, önerilen yöntem hasar seviyeleri tespit edilen binaların maruz kaldıkları kuvvetli yer hareketi şiddeti ile ilgili belirsizliklerin doğrudan dikkate alınmasına olanak vermektedir. Bu sayede hasar gözlemleri ile ilgili deterministik varsayımlar yapılması zorunluluğu ortadan kalkmaktadır. Bu çalışmada önerilen yöntemin örnek uygulamasında mevcut literatürde yer alan, betonarme binalar için üretilmiş bir grup kırılganlık modeli kullanılmıştır.

2. ÖNERİLEN HASAR GÖREBİLİRLİK DOĞRULAMA YÖNTEMİ

Bu çalışmada önerilen kırılganlık modeli doğrulama yönteminin temel amacı deprem etkisine maruz kalan yapı gruplarında oluşacak hasarların doğru tahmin edilmesine olanak veren matematiksel modellerin belirlenmesidir. İlgili yapı grupları ortak karakteristik özelliklere (ör. taşıyıcı sistem tipi, kat sayısı, süneklik düzeyi) sahip yapılardan oluşacak şekilde tanımlanır. Daha detaylı tanımıyla, kırılganlık modeli bu ortak özelliklere sahip yapı grubunda oluşması beklenen hasarların belirli bir hasar eşik seviyesini aşmalar olasılığını tahmin etmek için kullanılır. Bu çalışmada öne sürülen yöntemde bir dizi alternatif kırılganlık modelinin gerçek hasar seviyelerini ne derece doğru tahmin edebildiği değerlendirilir. Bu değerlendirmede gerçek depremlerden derlenmiş hasar örneklem kümeleri temel alınmaktadır. Değerlendirme sırasında ilgili belirsizliklerin tutarlı şekilde ele alınması için Bayesçi analiz yöntemi (bkz. Ang ve Tang, 1984) kullanılmaktadır.

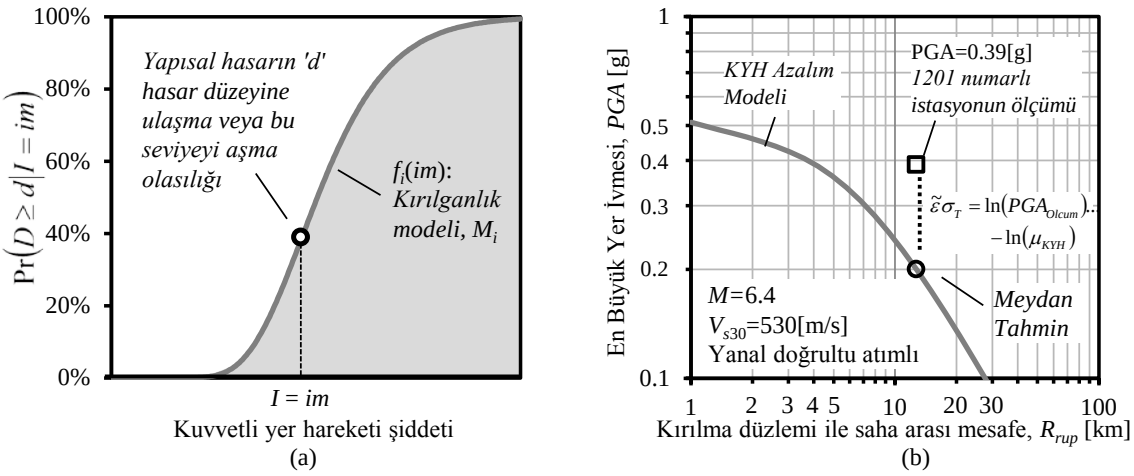
2.1. Önsel Kırılganlık Modelleri

Önerilen yöntemin ilk aşaması bir başlangıç kırılganlık modelleri kümesi oluşturulmasıdır. Bu kümedeki modeller Bayes kuramında *önsel* modeller olarak adlandırılır. Bu önsel modeller farklı yaklaşımlar kullanılarak geliştirilmiş kırılganlık fonksiyonlarını temsil eder. Kırılganlık fonksiyonları $f_i(im)$, şu şekilde ifade edilir:

$$\Pr\left(D \geq d \middle| I = im, M_i\right) = f_i(im) \tag{1}$$

Yukarıdaki eşitlikte $\Pr(D \geq d \mid I=im, M_i)$, *im* seviyesinde yer hareketiyle sarsılan bir binanın aldığı hasar miktarı *D*'nin belirli bir *d* hasar seviyesini aşması olasılığının kırılganlık modeli-*i* M_i'ye koşullu olasılığını temsil eder. Eşitliğin sağ tarafında yer alan $f_i(.)$ ifadesi '*i*' modelini tanımlayan matematiksel fonksiyonu temsil eder. Şekil 1a'da kırılganlık model kullanılarak hasarın '*d*' hasar seviyesine ulaşma veya bu seviyeyi aşma olasılığının belirlenmesi grafiksel olarak gösterilmektedir.

-



Şekil 1. Kırılganlık modeli kullanarak belirli bir hasar seviyesinin aşılma olasılığının belirlenmesi (a) ve kuvvetli yer hareketi azalım modeli (b) kullanılarak medyan değer ve toplam standart sapma kullanılarak $\tilde{\varepsilon}$ 'un belirlenmesi

Önsel kırılganlık modelleri kümesinin oluşturulmasında analitik çalışmalar sonucunda elde edilmiş fonksiyonların yanı sıra parametrik şekilde türetilmiş eğriler de kullanılabilir. Bir sonraki bölümde sunulan örnek uygulamada, farklı analitik yaklaşımlar kullanılarak geliştirilmiş alternatif kırılganlık modelleri önsel model

kümesi olarak kullanılmıştır. Yöntemin parametrik olarak geliştirilmiş kırılganlık modelleri kullanılarak yapılmış bir diğer örnek uygulaması Yazgan (2013) tarafından sunulmaktadır.

2.2. Hasar Gözlemleri ile Kırılganlık Modellerin Doğrulanması

Yöntemin temel stratejisi önsel hasar görebilirlik modellerinin, göz önüne alınan bir grup gerçek hasar gözlemlerini tahmin etmedeki göreli başarısının değerlendirilmesidir. Bayesci analiz yakalışımında bu işlem olabilirlik güncellemesi olarak tanımlanır (Ang ve Tang, 1984). Olabilirlik güncellemesinde bir gözlem kümesi kullanılarak incelenen bir grup önsel modelden hangi modellerin yapılan gözlemleri daha iyi temsil ettiği belirlenir. Bu çalışma kapsamında, kırılganlık modellerinin doğrulanmasında da benzer bir yol izlenmesi önerilmektedir. İlk aşamada, başlangıç kırılganlık modelleri kümesindeki yer alan her kırılganlık modeli için önsel olasılık değerleri varsayılır. Daha sonra, bu önsel olasılıklar deprem sonrası yapılmış hasar gözlemleri dikkate alınarak güncellenir. Bu işlem sonucunda yapılmış olan gözlemlere koşullu olasılık değerleri elde edilir. Herhangi bir O_j sahasındaki hasarlı bina gözlemi dikkate alındığında belirli bir M_i hasar görebilirlik modelinin bu gözleme koşullu doğru olma olasılığı $\Pr(M_i|O_j)$, Bayes Teoremi kullanılarak şu şekilde belirlenir:

$$\Pr\left(M_i\middle|O_j\right)\cong\frac{\Pr\left(O_j|M_i\right)\Pr\left(M_i\right)}{\sum_k\Pr\left(O_j|M_k\right)\Pr\left(M_k\right)} \tag{2}$$

Yukarıdaki denklemde $\Pr(O_j|M_i)$ terimi M_i kırılganlık modeline göre O_j sahasında gözlenmiş olan hasar durumunu için tahmin edilen olasılığı ifade eder. Bu olasılık değeri ilgili kırılganlık modelinin gözlenen hasarı doğru tahmin etmedeki başarısının bir ölçüsüdür. Denklem 1'deki $\Pr(M_i)$, kırılganlık modelleri grubunda yer M_i modeli için varsayılan önsel olasılık değeridir. Bu önsel olasılık değeri uzman görüşüne göre belirlenebileceği gibi, basitçe bütün başlangıç modelleri için eşit olabilirlik varsayılarak da oluşturulabilinir. Olasılık değerlerinin güncellenmesinde çok sayıda hasar gözlemi dikkate alındığında hesaplamalar sonucu elde edilen koşullu olasılıklar başlangıç için varsayılan önsel olasılıklardan bağımsız hale gelir.

Denklem 1'deki $\Pr(O_j|M_i)$ ifadesinin sayısal karşılığının Şekil 1a'da gösterilen şekilde belirlenebilmesi için hasarlı binanın deprem sırasında maruz kaldığı kuvvetli yer sarsıntısı seviyesinin bilinmesi gereklidir. Buna karşılık deprem sırasında hasar görmüş birçok yapı için etkiyen yer sarsıntısı seviyesi ancak önemli miktarda belirsizlikle tahmin edilebilir. Sadece kuvvetli yer hareketi kayıt istasyonlarının yakınında yer alan yapılar için sahada gerçekleşmiş olanın sarsıntı şiddeti hatasız olarak belirlenebilir. Yapılara etkiyen ivmelerle ilgili belirsizliğin kaynağı kuvvetli yer hareketlerinin mekansal değişkenliğinin yüksek olması ve kuvvetli yer hareketi kayıt istasyonlarının depremden etkilenen bölgede yeterli sıklıkta bulunmamasıdır (Şekil 2a).

Önerilen yöntemde, hasarlı yapıların maruz kaldıkları ivme seviyeleriyle ilgili belirsizliği dikkate alabilmek için gözlem yapılan sahalardaki en büyük ivme seviyeleri stokastik simulasyon yöntemi ile rassal olarak üretilmektedir. Her bir stokastik simülasyon olası bir ivme dağılımı kümesini temsil eder. Analizlerde çok sayıda en büyük ivme değeri kümesi simüle edilir ve bu elde edilen sonuçlarının eşit ağırlıklı ortalaması alınır. Aynı depremin etki alanında yer alan iki farklı sahadaki en büyük ivme değerleri arasındaki koreslayon iki saha arasındaki mesafe ile ters orantılıdır (Boore v.d., 2003). Bu korelasyon önerilen yöntemde oluşturulan stokastik ivme dağılımlarında doğrudan göz önüne alınmaktadır. Göz önüne alınan herhangi bir O_j hasar gözlem sahasını etkilemiş olan en büyük ivme değerleri A_j'nin belirli bir S_l simülasyonundaki tahmini $a_{j,l}$ değeri şu eşitlikle tanımlanır:

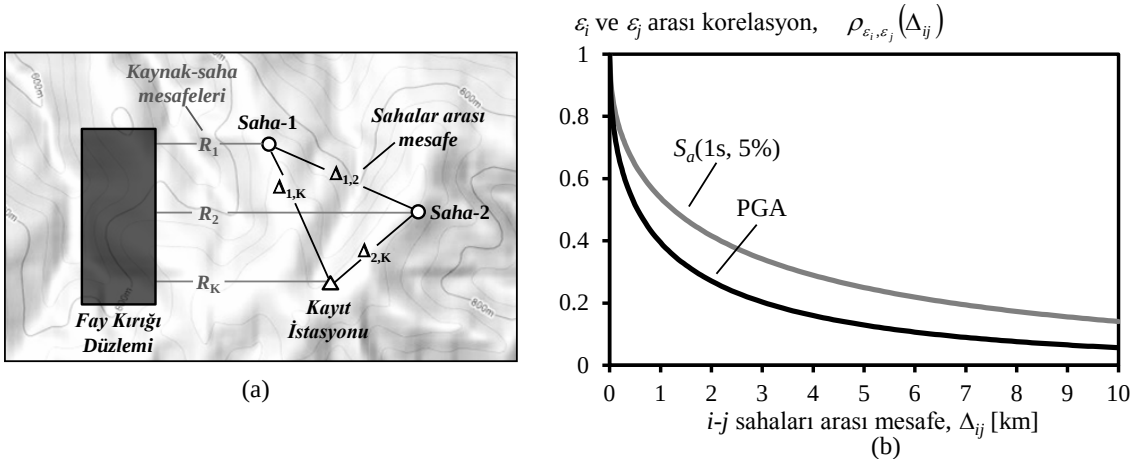
$$\ln\left(a_{j,l}\right)=\ln\left(\overline{a_j}\right)+\sigma_T\tilde{\varepsilon}_{j,l}\ \text{burada}\ \sigma_T=\sqrt{\sigma^2+\tau^2} \tag{3}$$

Yukarıdaki eşitlikte $\overline{a_j}$ kuvvetli yer hareketi azalım ilişkisi kullanılarak O_j sahası için tahmin edilen ivmenin medyan değerini, σ_T toplam standart sapma değerini, τ bir depremden etkilenmiş farklı sahalardaki gerçek ivmelerin medyan değerlerden standart sapma miktarını (intra-event residual), σ ise farklı depremler nedeniyle aynı sahada oluşan ivmelerin medyan değer etrafındaki standart sapma miktarını (inter-event residual) temsil etmektedir. Son yıllarda geliştirilmiş kuvvetli yer hareketi tahmin modellerinin büyük bir bölümünde medyan değerine ek olarak toplam standart sapmanın τ ve σ bileşenleri de ayrı ayrı sunulmaktadır (ör. Campbell ve Bozorgnia, 2007). Denklem 3'de yer alan $\tilde{\varepsilon}$ parametresinin tanımı Şekil 1b'de grafiksel olarak açıklanmaktadır.

Aynı depremden etkilenmiş olan herhangi iki saha arasındaki ε değerleri arasındaki korelasyonun sahalar arasındaki mesafeye göre değişiminin modellenmesi için çeşitli modeller geliştirilmiştir (ör. Boore v.d. 2003; Goda ve Hong, 2008). Goda ve Hong (2008) tarafından Kaliforniya ve Tayvan'da medyana gelmiş depremlerin ivme kayıtları için ε değerlerinin koreslasyonu detaylı şekilde incelenmiştir. Bu incelemeler sonucu Goda ve Hong tarafından geliştirilen ε korelasyonu modeli Şekil 2b'de sunulmaktadır. Bu grafikten de görülebileceği gibi iki saha arasındaki mesafenin artmasıyla sahalardaki ε değerleri arası korelasyon hızla azalmaktadır. Yukarıda verilen tanımlardan yola çıkılarak, aynı depremden etkilenmiş iki sahadaki ε değerleri arasındaki korelasyon $\rho_{\varepsilon_i,\varepsilon_j}$ ve $\overline{\varepsilon}$ değerleri arasındaki korelasyon $\rho_{\overline{\varepsilon}_i,\overline{\varepsilon}_j}$ arasında şu ilişki kurulabilir:

$$\rho_{\tilde{\varepsilon}_i\tilde{\varepsilon}_j}\left(\Delta_{ij}\right)=\frac{\tau^2+\sigma^2\rho_{\varepsilon_i\varepsilon_j}\left(\Delta_{ij}\right)}{\sigma_T^2} \tag{4}$$

Coğrafi korelasyonu dikkate alarak ε değerlerinin stokastik olarak simüle edilmesi için kullanışlı bir yöntem Park v.d. (2007) tarafından geliştirilmiştir. Bu çalışmada ivme seviyelerinin stokastik üretiminde bu yaklaşım kullanılmaktadır. Bu yaklaşımla üretilen bütün ivme dağılımlarında kayıt istasyonları civarında yer alan binalar için elde edilen ivmeler kaydedilen değerle uyumlu seviyelerde elde edilir. Buna ek olarak, birbirlerine yakın sahalarda yer alan hasarlı binalar için stokastik yöntemle elde edilen ivme seviyeleri de birbirleriyle uyumlu olmaktadır.



Şekil 2. Hasar gözlemi sahaları ve kuvvetli yer hareketi kayıt istasyonları arası mesafelerin Δ_{ij} tanımı (a) ve ε değerleri arası korelasyonu $\rho_{\varepsilon,\varepsilon}$ için Goda ve Hong (2008) tarafından geliştirilmiş model (b).

Önerilen yöntemde, değerlendirilen kırılganlık analiz modelleri her bir ivme simülasyonuna koşullu olarak değerlendirilir. Bunun ardından, elde edilen değerlerin ağırlıklı ortalaması alınır. Bu değerlendirmede herhangi

bir M_i kırılganlık modelinin en başarılı model olma olasılığı $\Pr(M_i|O_j, S_l)$ belirli bir S_l ivme dağılımı simülasyonuna koşullu olarak Bayes teormi ile şu şekilde hesaplanır:

$$\Pr\left(M_i\middle|O_j,S_l\right)\cong\frac{\Pr\left(O_j\middle|M_i,S_l\right)\Pr\left(M_i\right)}{\sum_k\Pr\left(O_j\middle|M_k,S_l\right)\Pr\left(M_k\right)} \tag{5}$$

Yukarıdaki denklemde, $\Pr(O_j|M_i,S_l)$ göz önüne alınan O_j hasar gözlemi için M_i kırılganlık modeli ve S_l simülasyonu kullanılarak elde edilen olasılığı temsil etmektedir. Bu olasılık değeri Şekilde 1a'da gösterildiği şekilde belirlenir. Denklem 5'de yer alan diğer parametreler Denklem 2'de tanımlandıkları gibidir. Toplam olasılık yasası kullanılarak, tekil simülasyonlara koşullu olasılık değerlerinin bütün küme üzerinde marjinalizasyonu şu şekilde yapılır:

$$\Pr\left(M_i\middle|O_j\right)=\sum_{l=1}^{n_s}\Pr\left(M_i\middle|O_j,S_l\right)\Pr\left(S_l\right)\quad\text{burada }\Pr\left(S_l\right)\approx 1/n_s \tag{6}$$

Yukarıdaki denklemde, $\Pr(S_l)$ terimi S_l stokastik yer ivmesi dağılımı simülasyonuna verilen göreli olabilirliği ve n_s terimi göz önüne alınan toplam simülasyon sayısını temsil eder. Denklem 6'daki ifadede de belirtildiği gibi bu olabilirlik değerinin her bir simülasyon için eşit düzeyde olduğu varsayılabilir. Bu aşamaya kadar elde edilen model olabilirlik değerleri tek bir hasar gözlemine koşullu değerlerdir. Birden fazla hasar gözlemine koşullu değerlerin belirlenmesi için koşullu olasılıklar yinelemeli şekilde hesaplanır. Her bir hesap adımında bir önceki hasar gözlemi için elde edilmiş olan koşullu olasılıklar yeni önsel olasılıklar olarak dikkate alınır. Örnek olarak, belirli bir j+1 sahasındaki gözlem O_{j+1} olarak tanımlanır. Kırılganlık modellerinin j ve j+1 sahalarındaki hasar gözlemlerine koşullu olasılıkları şu şekilde elde edilir:

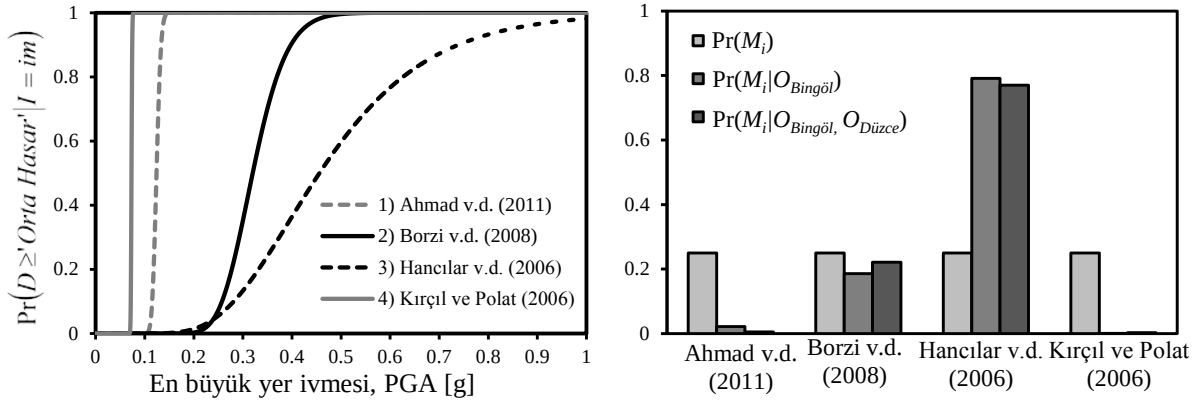
$$\Pr\left(M_i\middle|O_{j+1},O_j,S_l\right)\cong\frac{\Pr\left(O_{j+1}\middle|M_i,S_l\right)\Pr\left(M_i\middle|O_j\right)}{\sum_k\Pr\left(O_{j+1}\middle|M_k,S_l\right)\Pr\left(M_k\middle|O_j\right)} \tag{7}$$

Yukarıdaki denklemde $\Pr(O_{j+1}|M_i, S_l)$ terimi O_{j+1} sahasındaki hasar gözlemi için M_i kırılganlık modeli ve S_l ivme dağılımı simülasyonu kullanılarak bulunan olasılık düzeyini temsil eder. Yukarıdaki denklem esas itibariyle Denklem 5'e benzemektedir. Bu iki denklem arasındaki en önemli fark, önsel kırılganlık model olasılıkları $\Pr(M_i)$ yerine O_j gözlemine koşullu olasılıkların $\Pr(M_i|O_j)$ kullanılmasıdır. Denklem 7'deki ifade kullanılarak her bir adımda yeni bir hasar gözlemine koşullu olasılıklar elde edilir. Bu işlem bütün hasar gözlemlerine ve stokastik ivme dağılımlarına koşullu olasılıklar elde edilinceye kadar devam eder. Bu hesaplamalar sonucunda değerlendirilen kırılganlık modellerinin hasar gözlemlerine koşullu doğruluk oranları belirlenir.

3. DOĞRULAMA YÖNTEMİNİN ÖRNEK UYGULAMASI

Önerilen yöntemin bu çalışmada sunulan örnek uygulamasında literatürdeki mevcut kırılganlık modelleri kullanılmıştır. Kırılganlık modelleri seçilirken, ülkemizdeki bina stokuna benzer özelliklere sahip betonarme binaların ve ülkemizde meydana gelen yıkıcı depremlere eş değer şiddetteki yer hareketlerinin kullanılmış olmasına dikkat edilmiştir. Böylece ülkemizdeki betonarme yapı stokunda belirli bir şiddetteki yer hareketi sonucunda beklenen hasar seviyelerinin temsil edildiği varsayılmıştır. Bu örnek uygulamada: (1) Ahmad v.d. (2011), (2) Borzi v.d. (2008), (3) Hancılar v.d. (2006), ve (4) Kırçıl ve Polat (2006) tarafından önerilmiş

kırılganlık modelleri kullanılmıştır. Bu kaynaklardaki modellerden, 3 veya 4 katlı betonarme binalar için önerilen orta hasar kırılganlık eğrileri Şekil 3a'da sunulmaktadır. Bu çalışmada incelenen bütün kırılganlık modellerinde yer hareketi şiddeti en büyük yer ivmesi (PGA) cinsinden tanımlanmaktadır. Ayrıca, incelenen kırılganlık modellerinin hepsi temsili yapıların analitik modellerinin analiz edilmesi yaklaşımıyla geliştirilmiştir. Ele alınan modellerden Kırçıl ve Polat (2006) modeli hariç hepsi orta hasar sınır durumu için geliştirilmiştir. Kırçıl ve Polat (2006) modeli akma sınır durumunun aşılması için öne sürülmüştür.



Şekil 3. Örnek uyglumada göz önüne alınan kırılganlık modelleri (a) ve modeller için analizler sonucu elde edilen koşullu göreli olasılık değerleri.

Bu çalışmada göz önüne alınan kırılganlık modelleri, Düzce 1999 ve Bingöl 2003 depremleri sonrasında yapılmış hasar tespit çalışmaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Hasarlı bina verileri olarak SERU (2003, 2004) tarafından sunulan Düzce ve Bingöl depremlerinden etkilendikleri belirlenmiş binaların hasar ve koordinat bilgileri kullanılmıştır. Bu veri tabanlarında toplamda 520 için hasar bilgisi bulunmaktadır. Bu binalardan 333 tanesi 3 ve 4 katlı betonarme taşıyıcı sisteme sahip binalardır. Bu binalarda tespit edilmiş hasar durumları Tablo 1'de listelenmektedir.

Tablo 1. Değerlendirmede kullanılan binaların hasar durumları (SERU-METU, 2003; 2004)

	Hasar durumu				
Deprem	*Hasarsız*	*Hafif*	*Orta*	*Ağır*	*Toplam*
Bingöl M6.4, 1 Mayıs 2003	11	17	19	20	*67*
Düzce M7.2, 12 Kasım 1999	35	105	88	38	*266*
Toplam	*46*	*122*	*107*	*58*	*333*

Yöntemin uygulanması için hasar gözlemi yapılan sahalardaki en yüksek ivmelerin dağılımları önceki bölümde açıklandığı gibi stokastik olarak üretilmiştir. Binaların deprem sırasında maruz kaldıkları en büyük ivme seviyesinin tahmini medyan $\overline{a_j}$ değerleri Campbell ve Bozorgnia (2007) tarafından geliştirilmiş olan azalım modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Bu azalım modeli ile elde edilen τ ve σ değerleri genel olarak 0.22 ve 0.45 civarındadır. Campbell ve Bozorgni azalım modelinde her hangi bir sahadaki en büyük ivmenin medyan değerini tahmin etmek için sahanın fay kırık düzlemine olan mesafesinin ve sahadaki zeminin en üst 30 m'lik bölümündeki kayma dalgası hızının bilinmesi gereklidir. Hasar gözlemi sahalarının fay kırık düzlemine olan mesafelerinin belirlenmesi için ilgili deprem için önerilen fay kırılma düzlemi modelleri incelenmiştir. Burada sunulan hesaplarda, Düzce 1999 depremi için Delouis v.d. (2004) tarafından önerilen kırık düzlemi modeli kullanılmıştır. Bingöl 2003 depremi ile ilgili hesaplamalarda ise Li v.d. (2004) önerilen ve Akkar v.d. (2005)

tarafından da kullanılmış olan kırık modeli kullanılmıştır. Hasar gözlemi yapılan sahalardaki üst 30 m'lik zemin profilinin ortalama kayma hızı dalgası (V_{s30}) değeri Allen ve Wald (2009) tarafından geliştirilen yaklaşık yöntem kullanılarak tahmin edilmiştir. Bu deprem sırasında bölgedeki kayıt istasyonlarında ölçülmüş olan ivme değerleri stokastik simülasyonlarda doğrudan dikkate alınmıştır.

Deprem sırasında farklı sahaları etkilemiş olan kuvvetli yer hareketleri ile ilgili belirsizliklerin modellenmesi amacıyla her bir deprem için 500 adet ivme dağılımı stokastik olarak türetilmiştir. Başlangıç olarak her bir model için eşit önsel olasılık değeri varsayılmıştır (Şekil 3b). Daha sonra, Denklem 1-7 kullanılarak hasar gözlemlerine koşullu önsel olasılıklar belirlenmiştir. Şekil 3b'de sunulan koşullu lasılıkların gösteriminde kullanılan $O_{Bingöl}$ terimi Bingöl 2003 depremi ile ilgili göz önüne alınan tüm hasar gözlemlerini temsil etmektedir. Benzer şekilde $O_{Düzce}$ terimi de Düzce depremi ile ilgili hasar gözlemlerini temsil eder. Şekil 3b'de de görüldüğü gibi en yüksek koşullu olasılık değerleri %79 Hancılar, v.d. (2006) modeli için elde edilmiştir. İkinci yüksek koşullu olasılık değeri %18 ise Borzi v.d. (2008) tarafından geliştirilen model için hesaplanmıştır. Bu sonuçlar bu iki modelin 3 ve 4 katlı betonarme binaların hasar durumunu temsil etmede başarılı olduğunu işaret etmektedir.

4. SONUÇLAR

Çalışmada sismik kırılganlık modellerinin doğrulanması için saha gözlemlerine dayanan ampirik yeni bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntem, belirli ortak özelliklere sahip yapı gruplarının kırılganlığının modellenmesinde ve olası kayıpların tahmin edilmesinde kullanılabilir. Yöntem temel olarak, bir grup önsel kırılganlık modellerinin hasarı doğru tahmin etme olasılığının belirli bir hasar gözlemi kümesi göz önüne alınarak değerlendirilmesine dayanmaktadır. Mevcut kırılganlık analizi yaklaşımlarından farklı olarak hasar gözlemi yapılan binaları etkilemiş olan ivmelerin aletsel büyüklükleri ile ilgili belirsizlikler önerilen yöntemde doğrudan dikkate alınmaktadır. Yöntemin örnek uygulaması, Düzce 1999 ve Bingöl 2003 depremleri ardından yapılmış hasar tespit çalışmalarında derlenmiş veriler ile yürütülmüştür. Bu örnek uygulamada mevcut literatürden seçilmiş 4 adet kırılganlık modeli kullanılmıştır. Bu uygulamadan elde edilen sonuçlar da yöntemin etkili şekilde uygulanabilirliğini doğrulamaktadır.

Önerilen yöntem ve sunulan örnek uygulamayla ilgili olarak şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Önerilen kırılganlık analiz yöntemi esnek bir formülasyona sahiptir ve herhangi bir yaklaşımla üretilmiş önsel kırılganlık modellerinin herhangi bir hasar gözlemi kümesi kullanılarak doğrulanmasında kullanılabilir.
- Hasar gözlemi yapılan sahalarda meydana gelmiş kuvvetli yer hareketi seviyeleriyle ilgili belirsizlikler önerilen yöntemde doğrudan dikkate alınmaktadır. Bu sayede hasar gözlemi sahalarındaki ivme seviyeleriyle ilgili herhangi bir deterministik varsayım yapılması gerekmemektedir. Deprem sırasında gerçekleşmiş ivme seviyesi ile ilgili belirsizlik özellikle kuvvetli yer hareketi istasyonuna uzak noktalarda önem kazanmaktadır.
- Deprem sırasında farklı sahalarda oluşan en büyük ivme değerlerinin coğrafi korelasyonu analizlerde doğrudan dikkate alınmaktadır. Bu sayede birbirine çok yakın sahalarda yapılan hasar gözlemleri arasındaki korelasyon nedeniyle oluşabilecek olası yanlılık (bias) önlenmektedir.
- Yöntem, Düzce 1999 ve Bingöl 2003 depremleri sonrası yapılmış hasar incelemeleri kullanılarak uygulanmıştır. Bu çalışmada 3 ve 4 katlı betonarme binalar için orta hasar durumunu modellemek amacıyla geliştirilmiş modeller değerlendirilmiştir. Göz önüne alınan hasar durumu ve incelenen kırılganlık modelleri grubu arasından Hancılar v.d. (2006) ve Borzi v.d. (2008) tarafından geliştirilmiş modellerin gözlenen orta hasar dağılımını göreceli olarak incelenen diğer modellere göre daha doğru tahmin ettiği gözlenmiştir.

TEŞEKKÜRLER
Yazarlar İstanbul Teknik Üniversitesi tarafından verilmiş olan desteğe ve paylaşıma sunulan Bingöl 2003 ve Düzce 1999 deprem hasar veri tabanları için Orta Doğu Teknik Üniversitesi Yapı Mühendisliği Araştırma Birimi'ne teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Ahmad, N., Crowley, H. ve Pinho, R. (2011). Analytical fragility functions for reinforced concrete and masonry buildings and buildings aggregates of Euro-Mediterranean Regions-UPAV methodology, SYNER-G: Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain, Thessaloniki, Greece.

Akkar, S., Boore, D.M.,ve Gülkan, P. (2005). "An evaluation of the strong motion recorded during the May 1, 2003 Bingöl, Turkey, Earthquake", *Journal of Earthquake Engineering*, **9:2**, 173-197.

Allen, T. I. ve Wald, D. J. (2009). "On the Use of high-resolution topographic data as a proxy for seismic site conditions (V_{S30})", *Bulletin of the Seismological Society of America* **99:2A**, 935-943.

Ang, A. H. S. ve Tang, W. H. (1984). Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Vol. II Decision, Risk, and Reliability, John Wiley & Sons, New York.

Boore, D. M., J. F. Gibbs, W. B. Joyner, J. C. Tinsley,ve Ponti, D. J. (2003). "Estimated ground motion from the 1994 Northridge, California, earthquake at the site of the interstate 10 and La Cienega Boulevard bridge collapse, west Los Angeles, California", *Bulletin of the Seismological Society of America* **93:6**, 2737-2751.

Borzi, B., Pinho, R. ve Crowley H. (2008). Simplified pushover-based analysis for large-scale assessment of RC buildings. *Engineering Structures*, **30:3**, 804-820.

Campbell, K. W. ve Bozorgnia, Y. (2007). Campbell-Bozorgnia NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters. PEER 2007/02, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.

Goda, K. ve Hong, H. (2008). Spatial correlation of peak ground motions and response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America* **98:1**, 354–365.

Hancılar, U., Durukal, E., Franco, G., Deodatis, G., Erdik, M. ve Smyth, A. (2006). Probabilistic vulnerability analysis: an application to a typical school building in Istanbul. *1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology* (*1st ECEES*), Geneva, Switzerland.

Kircil, M. S. ve Polat, Z. (2006). Fragility analysis of mid-rise R/C frame buildings. *Engineering Structures*, **28:9**, 1335-1345

Li, X., Kuleli, S. ve Toksöz, M. N. (2004). "The rupture process of the 1 May 2003 Bingöl, Turkey Mw 6.4 Earthquake," (özet), Seismological Research Letters **74:2**, 286-287.

Park, J., Bazzurro, P., ve Baker, J.W. (2007). Modeling spatial correlation of ground motion intensity measures for regional seismic hazard and portfolio loss estimations. In *Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*, Kanda J, Takada T, Furuta H (eds). Taylor & Francis Group, London, U.K.

Porter, K.A., (2003). Seismic Vulnerability. Earthquake Engineering Handbook (Chen W.-F. and Scawthorn C. ed.), Boca Raton, CRC Press, Florida.

SERU (2003). Duzce Veri Tabanı. Structural Engineering Research Unit (SERU), Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara. [Çevrim içi]: http://www.seru.metu.edu.tr/archives.html

SERU (2004). Bingöl Veri Tabanı. Structural Engineering Research Unit (SERU), Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara. [Çevrim içi]: http://www.seru.metu.edu.tr/archives.html

Yazgan, U. (2013). Empirical vulnerability modeling considering geospatial ground motion bariability, *11th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR)*, New York.