



## Evaluation of the epistemic uncertainty in fragility analysis depending on the ground motion dataset and intensity measure

Özkan Kale

Department of Civil Engineering, TED University, Ankara, 06420, Turkey

### Highlights:

- Fragility analysis of buildings
- Effect of ground motion dataset
- Effect of intensity measure

### Keywords:

- Fragility analysis
- Ground motion dataset
- Intensity measure
- Epistemic uncertainty

### Article Info:

Research Article  
Received: 16.05.2018  
Accepted: 25.02.2019

### DOI:

10.17341/gazimmfd.424054

### Acknowledgement:

I thank two anonymous reviewers for their constructive critiques that significantly improved the technical quality of the paper.

### Correspondence:

Author: Özkan Kale  
e-mail:  
ozkan.kale@tedu.edu.tr  
phone: +90 312 585 0282

### Graphical/Tabular Abstract

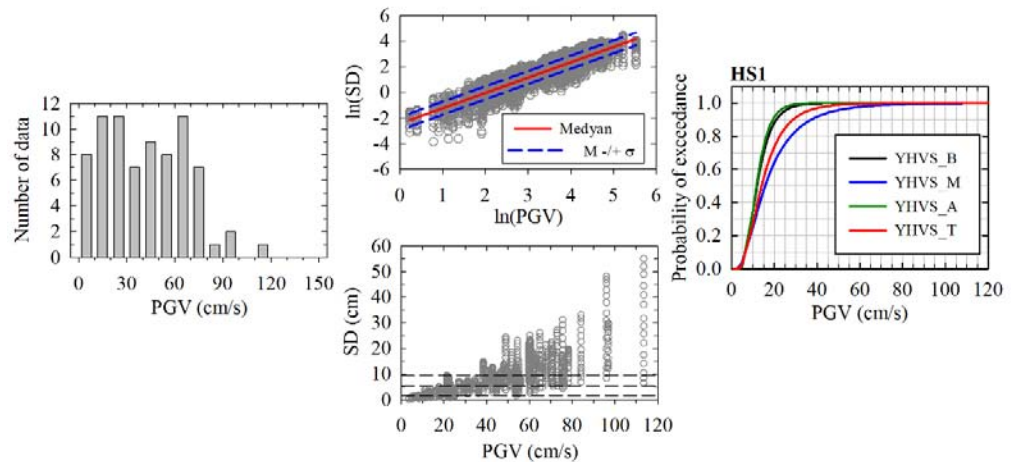


Figure A. Illustrative evaluation of the epistemic uncertainty from ground motion dataset level to resultant fragility curve comparisons.

### Purpose:

The main components of fragility analysis of structures can be listed as compilation of ground motion dataset, structural analysis and selection of ground motion intensity measures. These cases can be considered as the potential sources of the epistemic uncertainty. This study aims at evaluating the level of epistemic uncertainty which mainly depends on the selection of intensity measure and the ground motion dataset, while developing the fragility curves for generic structural simulations.

### Theory and Methods:

In this study, epistemic uncertainty with respect to the selection of the ground motion dataset and intensity measure is evaluated. In this respect, the fragility curves of building type structural simulations for four different ground motion dataset and three selected intensity measures are developed by considering two different approaches and the possible variations are investigated.

### Results:

The detailed evaluations which depend on the fragility curves and the deterministic earthquake scenarios in the case study indicate that the compiled ground motion datasets, selected intensity measures and fragility curve development approaches can significantly affect the analysis results.

### Conclusion:

The most critical component in the fragility analysis results is the selection of intensity measures. Thus, its effective selection can substantially decrease the epistemic uncertainty in fragility analysis.



## Hasargörebilirlik analizlerinde yer hareketi veri setine ve şiddet ölçüsüne bağlı epistemik belirsizliğin değerlendirilmesi

Özkan Kale\*

TED Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06420, Kolej, Ankara, 06420, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Binaların hasargörebilirlik analizi
- Yer hareketi veri seti etkisi
- Şiddet ölçüsü etkisi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 16.05.2018  
Kabul: 25.02.2019

### DOI:

10.17341/gazimmfd.424054

### Anahtar Kelimeler:

Hasargörebilirlik analizi,  
yer hareketi veri seti,  
şiddet ölçüsü,  
epistemik belirsizlik

### ÖZET

Yapıların hasargörebilirlik analizlerinin ana unsurlarını yer hareketi veri setinin derlenmesi, yapısal analiz ve yer hareketi şiddet ölçüsü seçimi olarak sıralamak mümkündür. Bu çalışmada, hasargörebilirlik analizlerinde deprem veri seti ve şiddet ölçüsü seçimine bağlı olarak ortaya çıkan epistemik belirsizlikler değerlendirilmiştir. Bu amaçla, dört farklı deprem veri seti ve seçilen üç farklı şiddet ölçüsü için bina türü yapı simülasyonlarına ait hasar potansiyeli eğrileri iki farklı yaklaşıma göre geliştirilmiş ve olası farklılıklar incelenmiştir. Hasar potansiyeli eğrileri ve deterministik deprem senaryoları kullanılarak yapılan detaylı değerlendirmeler derlenen deprem veri setleri, şiddet ölçüsü seçimi ve hasar potansiyeli eğrilerinin türetilmesinde uygulanan yöntemlerin sonuçları belirli düzeylerde etkileyebileceğini göstermiştir. Bununla birlikte sonuçları etkileyen en etkin parametrenin şiddet ölçüsü olduğu ve efektif şiddet ölçüsü seçiminin hasargörebilirlik analizlerindeki epistemik belirsizliği alt seviyelere indirgeyebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

## Evaluation of the epistemic uncertainty in fragility analysis depending on the ground motion dataset and intensity measure

### H I G H L I G H T S

- Fragility analysis of buildings
- Effect of ground motion dataset
- Effect of intensity measure

### Article Info

Research Article  
Received: 16.05.2018  
Accepted: 25.02.2019

### DOI:

10.17341/gazimmfd.424054

### Keywords:

Fragility analysis,  
ground motion dataset,  
intensity measure,  
epistemic uncertainty

### ABSTRACT

The main components of fragility analysis of structures can be listed as compilation of ground motion dataset, structural analysis and selection of ground motion intensity measures. In this study, epistemic uncertainty with respect to the selection of the ground motion dataset and intensity measure is evaluated. In this respect, the fragility curves of building type structural simulations for four different ground motion dataset and three selected intensity measures are developed by considering two different approaches and possible variations are investigated. The detailed evaluations which depend on the fragility curves and the deterministic earthquake scenarios indicate that the compiled ground motion datasets, selected intensity measures and fragility curve development approaches can considerably affect the analysis results. However, it can be concluded that the most influential parameter on the analysis results is intensity measure and its effective selection can considerably decrease the epistemic uncertainty in fragility analysis.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ozkan.kale@tedu.edu.tr / Tel: +90 312 585 0282

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yapılar açısından ciddi sismik aktivitelere maruz kalma sıklığı ve olasılığı yüksek olan bölgelerde, yapı stoklarının olası bir deprem aktivitesindeki ve sonrasındaki performanslarının olabildiğince gerçeğe yakın olarak tahmin edilebilmesi, olası can kayıplarının ve ekonomik kayıpların en aza indirgenbilmesine olanak sağlamaktadır. Bu durum sismik risk analizleri yardımıyla yapılacak tahminlerin en üst düzeyde güvenilirliğe sahip olması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Sismik risk analizleri, yapıların hasargörebilirlik potansiyeli ve sismik tehlike analizleri olmak üzere iki ana bileşene dayanmaktadır. Sismik tehlike analizleri deterministik ve olasılıksal olmak üzere iki farklı yöntemle yapılabilir. Birlikte deprem mühendisliği ve mühendislik sismolojisi alanlarında günümüzde tercih edilen olasılıksal yöntemlerle elde edilmesidir. Türkiye geneli için olasılıksal sismik tehlike haritası farklı şiddet ölçüleri (maksimum yer ivmesi – PGA, maksimum yer hızı – PGV,  $T = 0,2$  s ve  $1,0$  s için spektral ivmeler) ve farklı dönüş periyotları (43 yıl, 72 yıl, 475 yıl ve 2475 yıl) için Akkar vd. [1] çalışmasında özetlenen proje kapsamında geliştirilerek bütün mühendis ve araştırmacıların kullanımına sunulmuştur. Risk analizlerinin diğer bir bileşeni olan yapıların hasargörebilirlik potansiyeli ise farklı yapı gruplarına ait hasar potansiyeli eğrilerinin çıkarılmasına bağlı olarak dikkate alınabilmektedir. Bugüne kadar Türkiye için yığma yapılar, farklı türde betonarme yapılar veya okul tipi yapı türleri gibi hasar potansiyeli eğrilerinin çıkarıldığı çalışmalar mevcuttur ([2 - 9]). Hasar potansiyeli eğrilerinin çıkarılmasında genel olarak uzman görüşüne bağlı, ampirik ve analitik olmak üzere üç farklı yöntemden söz etmek mümkündür. Uzman görüşüne bağlı yöntemler genel anlamda subjektif özelliktedirler (FEMA 154, Federal Emergency Management Agency [10]; Farsangi vd. [11]). Deneysel hasar potansiyeli eğrileri genel olarak yıkıcı depremler sonrasında gerçekleştirilen yapı değerlendirmelerine bağlı olarak hasar olasılık matrisleri yardımıyla çıkarılabilmektedir (Lin vd. [12]). Analitik yöntemler ise basit veya sofistike analizlere dayanan, belirli bir deprem veri seti altında bina veya farklı yapı modellerinin performans tahkiklerinin yapıldığı çalışmalarla elde edilmektedir (Ay ve Erberik [3], Zakeri vd. [13], Karimzadeh vd. [9]). Analitik yöntemlerle hasar potansiyeli eğrilerinin çıkarılması aşamasında ilk olarak gerçek yapı modelleri veya yapı modellerini temsil eden tek serbestlik dereceli sistemlerin seçilen bir kuvvetli yer hareketi veri seti altında yapıya ait talep ölçüleri (maksimum yer değiştirme, maksimum görel kat ötelenmesi vb.) hesaplanmaktadır. Sonraki aşamada ise seçilen şiddet ölçülerinin (PGA, PGV, kesirsel mertebeli yer tepkisi – PGR, ortalama periyot, efektif maksimum ivme, vb.) aynı veri seti altındaki değerleri elde edilmektedir. Şiddet ölçüleri (IM) ile talep ölçüleri (DM) arasındaki ilişki incelenerek hasar potansiyeli eğrilerinin elde edilmesi aşamasına doğru ilerlenmektedir. Bu aşamada kuvvetli yer hareketi veri seti, seçilen IM dikkate alındığında yapıda veya temsil edilen yapı stoğunda hafif düzeyden orta ve yüksek düzeye kadar hasar

oluşturabilme potansiyeline sahip olacak şekilde oluşturulmalıdır. Bu durumun sağlanabilmesi amacıyla dikkate alınan bir IM için belirli ölçüde üniform dağılıma sahip olması (Ay ve Erberik [3], Kadaş ve Yakut [14]) veya seçilen deprem veri setinin IM değerlerinin geniş bir spektrum bandında dağılması (Baker vd. [15]) gibi özellikler dikkate alınabilmektedir. Kwon ve Elashai [16] çalışmasında seçilen yer hareketi veri setinin hasar potansiyeli eğrilerinin davranışını ciddi ölçüde etkileyebileceği gösterilmiştir. Fakat bu çalışmada oluşturulan deprem veri setleri, şiddet ölçülerinin genlikleri açısından yeterli düzgün dağılıma veya belirli düzeyde spektrum genlik aralığına sahip değildir. Ayrıca dikkate alınan farklı veri setlerindeki deprem ivme kaydı sayısı da oldukça düşüktür.

Bu aşamada dikkate alınması gereken bir diğer konu da IM seçimidir. Kuvvetli yer hareketi zaman serilerinden doğrudan elde edilebilmesi nedeniyle PGA ve PGV birçok çalışmada tercih edilmektedir. Padgett vd. [17] çalışmasında köprü tipi yapılar için PGA'nın daha uygun bir IM olduğu gösterilmiştir. Avşar vd. [18] çalışmasında ise Türkiye'deki köprüler için hasargörebilirlik eğrileri PGA, PGV ve ivme spektrum şiddeti (ASI) dikkate alınarak çıkarılmıştır ve ASI şiddet ölçüsünün PGA ve PGV'ye göre daha efektif bir IM olduğu elde edilmiştir. Akkar ve Özen [19] çalışmasında, bina tipi yapıların hasargörebilirlik analizleri için PGV'nin yapıların doğrusal olmayan performans düzeylerinde deformasyon taleplerini daha iyi temsil ettiği gösterilmiştir. Yapıların doğal titreşim periyoduna veya ikinci mod etkilerinin de birleştirilmesine bağlı olarak elde edilen periyot değerleri için elde edilen spektral ivmelerin ([20 - 23]) veya maksimum yer deplasmanı (PGD) değerinin de ([24]) farklı yapı türleri için önerildiği çalışmalar vardır. Shafieezadeh vd. [25] çalışmasında maksimum kesirsel yer tepkisi (PGR) şiddet ölçüsünün bazı köprü türlerinin hasargörebilirlik analizlerinde belirsizliği ciddi ölçüde azaltarak çok iyi sonuçlar elde edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Kale [26] çalışmasında da tek serbestlik dereceli sistemlerin doğrusal olmayan davranışları üzerinden yapılan değerlendirmelerde özellikle düşük ve orta periyotlu yapılar için PGR şiddet ölçüsünün maksimum deplasman talep ölçüleri ile çok iyi korelasyon gösterdiği ve şiddet ölçüsü kaynaklı belirsizlikleri düşürdüğü gösterilmiştir.

Yapıların hasargörebilirliği çalışmalarında, seçilen şiddet ölçüsü ve yer hareketi deprem veri setine bağlı epistemik belirsizlikler başta olmak üzere farklı parametrelere bağlı epistemik belirsizliklerin varlığından söz edilebilir. Bu çalışma kapsamında, hasargörebilirlik eğrilerinin çıkarılması aşamasında dikkate alınan deprem yer hareketi veri setleri ve şiddet ölçüleri seçiminin sonuçlara ne derecelerde etki edebileceği tartışılmıştır. Bu bağlamda, literatürdeki değişik çalışmalardan derlenmiş 4 farklı yer hareketi veri seti ve PGA, PGV ve PGR olmak üzere 3 farklı şiddet ölçüsü kullanılmıştır. Temsili yapı stoğu, Erberik [4] çalışmasında listelenen düşük kat sayılı Türkiye tipik betonarme yapı özellikleri dikkate alınarak tek serbestlik dereceli sistem yapı simülasyonları ile oluşturulmuştur. Bu bilgiler ışığında, yapı

simülasyonları için Clough davranım modeli ([27 - 28]) kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonuçlarından maksimum yer değiştirmeler elde edilmiştir. Son etapta ise seçilen şiddet ölçüleri ve deprem veri setleri için hasar potansiyeli eğrileri ayrı ayrı çıkarılarak epistemik belirsizlik değerlendirmeleri yapılmıştır.

## 2. YER HAREKETİ VERİ SETLERİ (GROUND MOTION DATASETS)

Yer hareketi deprem veri seti kaynaklı epistemik belirsizliğin irdelenebilmesi amacıyla literatürde yer alan çalışmalardan veri seti seçimi yeterli derecede detaylı olarak yapılmış olan çalışmalar dikkate alınmıştır. Bu çalışmaların seçiminde belirli sayıda deprem kaydı içermeleri ve bu veri tabanlarının belirli düzeyde PGA ve PGV dağılımlarına sahip olmaları gibi kriterler gözetilmiştir. Seçilen veri setlerindeki ivme kayıtlarının tamamı Türkiye'nin de büyük bir bölümü için geçerli olan aktif sığ kabuk içi deprem tektoniği yapıyla uyumludur. Bunlara ek olarak deprem veri setlerinin benzer kayıtları içermemesi gibi bir durum dikkate alınmamıştır. Bununla birlikte seçilen deprem veri setlerinde aynı kayıtların yüzdesi genel olarak düşük seviyelerdedir.

İlk veri seti, sismik risk analizleri için doğrudan deprem veri seti oluşturmaya yönelik olarak yapılan Baker vd. [15] çalışmasında derlenen veri setidir. Baker vd. [15] yer hareketi veri seti (YHVS\_B) magnitüd değerleri 4,3 – 7,9 arasında değişen ve kaynak-saha mesafeleri de 120 km'nin altında olan toplam 160 yatay ivme kaydı çiftinden (toplam 320 ivme kaydı) oluşmaktadır. Farklı zemin türlerinde (yumuşak, sıkı ve kaya) kaydedilmiş olan veri setinin bir bölümünü hız vurumlu (velocity pulse) deprem kayıtları oluşturmaktadır ve deprem kayıtlarının PGA ve PGV değerleri sırasıyla 0,02 g – 1,08 g ve 1 cm/s – 250 cm/s arasında değişmektedir.

İkinci veri seti Kadaş vd. [29] çalışmasında derlenen yer hareketi veri setidir (YHVS\_K). Bu çalışma içeriğinde, Kadaş vd. [29]'de listelenen bütün deprem ivme kayıtlarının her iki yatay bileşeni de kullanılmıştır. Bu bağlamda, YHVS\_B setinin magnitüd aralıkları 5,7 – 7,6 arasında değişen farklı tür zeminlerde kaydedilmiş genel olarak yakın saha kayıtları ( $R < 20$  km) olarak sınıflandırılabilir 100 yatay ivme kaydı çiftinden (toplam 200 ivme kaydı) oluşmaktadır. Veri setini oluşturan kayıtların PGA ve PGV değerleri sırasıyla 0,01 g – 1,77 g ve 0,39 cm/s – 199 cm/s arasında değişim göstermektedir.

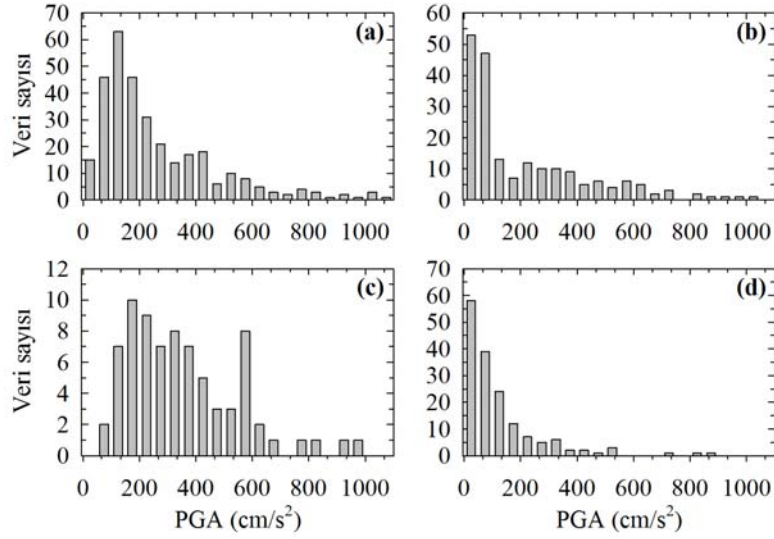
Bir diğer yer hareketi veri seti Akkar vd. [2] çalışmasında derlenen ve Türkiye'deki düşük ve orta kat sayılı betonarme binalar için hasargörebilirlik eğrilerinin üretilmesinde kullanılan veri setidir (YHVS\_A). Bu veri setinden 6 adet ivme kaydına erişim sağlanamamıştır (Imperial Valley, Cape Mendocino ve Chi-Chi depremlerinden). Bu durumda nihai veri setini oluşturan toplam 76 ivme kaydının magnitüd değerleri 5,2 – 7,6 ve zemin kayma dalgası ( $V_{S30}$ ) hızları da 180 m/s – 750 m/s arasında değişim göstermektedir. Bu zemin koşulları, Türkiye geneli için zemin koşulları

düşünüldüğünde oldukça tutarlıdır. YHVS\_A'da sismik kaynak – saha arası mesafe sismik kaynaklara yakın mesafelerdeki yapıların hasar görme potansiyelleri daha yüksek olduğu durumu dikkate alınarak 20 km ile sınırlandırılmıştır. Bu veri seti oluşturulurken Akkar vd. [2] tarafından çok baskın vurum sinyali içeren kayıtlar ileri yönlülük etkilerinden kaynaklanacak belirsizlikleri indirgemek amacıyla veri tabanına dahil edilmemiştir. YHVS\_A ivme kayıtlarının PGA ve PGV değerleri sırasıyla 0,06 g – 1,0 g ve 2,5 cm/s – 114 cm/s arasında değişmektedir.

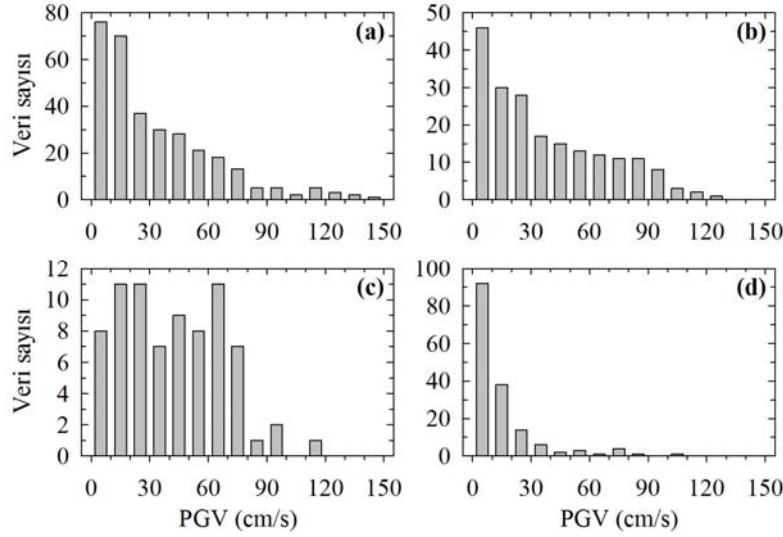
Çalışma kapsamında dikkate alınan son veri seti ise Kale vd. [30] yer hareketi tahmin denkleminin türetilmesinde kullanılan yer hareketi veri setinin mühendislik problemlerini daha ciddi etkileme ihtimali olan bölümü ayrıştırılarak derlenmiştir (YHVS\_T). Kale vd. [30] çalışması Türkiye ve İran deprem verisini içermektedir fakat bu çalışma kapsamında verilerin sadece Türkiye kısmı dikkate alınmıştır. Bu veri setini diğerlerinden ayıran en önemli özellik YHVS\_B, YHVS\_K ve YHVS\_A global ivme kayıtlarını içerirken YHVS\_T'nin sadece Türkiye sınırlarında kaydedilmiş deprem verilerini barındırmasıdır. YHVS\_T magnitüd değerleri 5,6 – 7,6 arasında değişen, sismik kaynak saha mesafesi 70 km'nin altında,  $V_{S30}$  değerleri 180 m/s – 800 m/s arasında toplam 81 yatay ivme kaydı çiftinden (toplam 162 ivme kaydı) teşkil edilmektedir. Burada ayrıştırma aşamasında seçilen mesafe limiti Kale vd. [30] çalışmasındaki tartışmalar ve genel olarak PGA ve PGV dağılımları dikkate alınarak yapılmıştır. Bu veri setindeki ivme kayıtlarının PGA ve PGV değerleri sırasıyla 0,01 g – 0,89 g ve 0,7 cm/s – 109 cm/s arasında değişmektedir. Şekil 1 ve 2'de dikkate alınan 4 farklı yer hareketi veri setinin PGA ve PGV değerlerinin sırasıyla 50  $\text{cm/s}^2$  ve 10  $\text{cm/s}$ 'lik kümeleri dikkate alınarak elde edilen dağılımları gösterilmiştir. Bu dağılımlarda maksimum değerler 1100  $\text{cm/s}^2$  ve 150  $\text{cm/s}$  değerinden sonra çok az sayıda kayıt olmasından dolayı bu değerler kesilmiştir. İlerleyen bölümlerde yapılacak analizlerde ise bu kayıtlar hesaplamalara dahil edilmiştir. YHVS\_T'ye ait dağılım diğer veri setlerine nazaran daha düşük PGV değerlerine doğru eğilim göstermektedir. Bu durum bir kusur olarak dikkate alınabilmekle birlikte bu çalışmanın içeriği düşünüldüğünde epistemik belirsizlik irdemeleri için dikkate değer bir farklılık olarak da düşünülebilir. PGA dağılımları incelendiğinde, YHVS\_K ve YHVS\_T birbirine benzer dağılımlar gösterirken YHVS\_B ve YHVS\_A'nın birbirine yakın fakat YHVS\_K ve YHVS\_T'den farklı dağılımlara sahip oldukları görülmektedir. Genel olarak veri setleri incelendiğinde, derlenen veri setlerinin bu çalışmanın amacı doğrultusunda gerekli analizlerin yapılabileceği yeterlikte oldukları söylenebilir.

## 3. YAPI SİMÜLASYONLARI VE TEMSİLİ DAVRANIM MODELİ (STRUCTURAL SIMULATIONS AND REPRESENTING HYSTERETIC MODEL)

Bu çalışma kapsamında kullanılacak yapı simülasyonları için Erberik [4] çalışmasında yapılan değerlendirmeler dikkate alınmıştır. Erberik [4] çalışmasında Düzce hasar



**Şekil 1.** Yer hareketi veri setlerinin PGA dağılımları: a) YHVS\_B, b) YHVS\_K, c) YHVS\_A, d) YHVS\_T (PGA distributions of the ground motion datasets: a) YHVS\_B, b) YHVS\_K, c) YHVS\_A, d) YHVS\_T)



**Şekil 2.** Yer hareketi veri setlerinin PGV dağılımları: a) YHVS\_B, b) YHVS\_K, c) YHVS\_A, d) YHVS\_T (PGV distributions of the ground motion datasets: a) YHVS\_B, b) YHVS\_K, c) YHVS\_A, d) YHVS\_T)

veritabımından farklı özelliklerdeki (kat sayısı, çerçeve türü, vb.) betonarme binalar incelenmiş ve bunlara ait karakteristik özellikler detaylı olarak çıkarılmıştır. Bu özelliklerin yeterli güvenilirlikte olması ve ilgili çalışmada bütün özelliklerin listelenmesi Erberik [4] çalışmasının seçilmesinde ana unsur olmuştur. Bu çalışmada, Erberik [4] çalışmasında özellikleri listelenen yapılardan alçak bina sınıfından dolgusuz çerçeve türü seçilmiştir. Çalışmanın ana amacına ulaşma aşamasında belirsizlik sayısını indirgeyebilmek için dikkate alınan yapı türü sayısı sınırlı tutulmuştur. Yapı simülasyonlarında, bina türü yapıların deprem esnasındaki performanslarını en fazla etkileyen parametrelerden yapının doğal titreşim periyodu ( $T$ ) ve taban kesme kuvveti katsayısı ( $\eta = f_y/W$ ;  $f_y$ : akma kapasitesi,  $W$ : etkin yapı ağırlığı) rassal değişken olarak dikkate alınmıştır. Bu parametrelerin ortalama ( $\mu$ ) ve standart sapma ( $\sigma$ ) değerleri olarak Erberik [4] çalışmasında önerilen  $\mu_T = 0,372$

–  $\sigma_T = 0,113$  ve  $\mu_\eta = 0,225$  –  $\sigma_\eta = 0,093$  dikkate alınmış ve Latin Hiperküp Örnekleme (Latin Hypercube Sampling, LHS) yöntemiyle 15 farklı yapı simülasyonu oluşturulmuştur. Tablo 1’de yapı simülasyonlarına ait  $T - \eta$  değerlerinin listesi verilmektedir. Erberik [4] çalışmasındaki bulgular, dikkate alınan yapı türü için  $T$  ile  $\eta$  arasında yaklaşık olarak bir ters orantı olduğunu göstermektedir (yani  $T$ ’deki artışa karşılık  $\eta$  değerlerinde azalma). Simülasyonlarda akma sonrası rijitlik oranı ( $\alpha_u$ ) olarak da %2,2 sabit değeri hesaba katılmıştır ([4]).

Yapı simülasyonlarının doğrusal olmayan davranışlarını tek serbestlik dereceli sistemler ile temsil edebilmek amacıyla Clough ve Johnston [27] tarafından geliştirilen Clough davranım modelinin orijinal durumuna Mahin ve Bertero [28] çalışmasında rijitlik azalımı eklenerek modifiye edilen rijitlik azalımlı versiyonu kullanılmıştır. Rijitlik azalımlı

modelin betonarme yapıların davranışını daha iyi modellediği belirtilmektedir [28]. Betonarme yapılarda başlangıç rijitlik değeri, yükleme döngülerine bağlı olarak betonun çatlamasıyla birlikte azalım göstermektedir. Bu yeni rijitlik değeri akma sonrası boşalma rijitliği olarak adlandırılmaktadır [28]. Bu azalım histeretik davranışta hem akma sonrası boşalma hem de geri yükleme evrelerinde gözlemlenmektedir.

**Tablo 1.** Yapı simülasyonlarının karakteristik özellikleri  
(Characteristic features of the structural simulations)

Yapı No	T (s)	$\eta$
1	0,15	0,41
2	0,18	0,38
3	0,21	0,36
4	0,25	0,33
5	0,28	0,30
6	0,32	0,27
7	0,35	0,24
8	0,37	0,23
9	0,39	0,21
10	0,42	0,19
11	0,44	0,17
12	0,46	0,15
13	0,49	0,13
14	0,51	0,11
15	0,53	0,09

Dikkate alınan modelin genel histeretik davranışı ve model parametreleri Şekil 3'te temsili olarak gösterilmiştir. Bu şekilde,  $k_0$ ,  $k_1$  ve  $\beta_0$  sırasıyla başlangıç elastik rijitliği, akma sonrası boşalma rijitliği ve rijitlik azalım katsayısı olarak adlandırılmaktadır. Yine aynı şekil üzerinde yerdeğiştirme ( $u$ ) terimlerinden  $u_y$  akma yerdeğiştirme değerini ve  $u_m$  de maksimum yerdeğiştirme değerini temsil etmektedir.

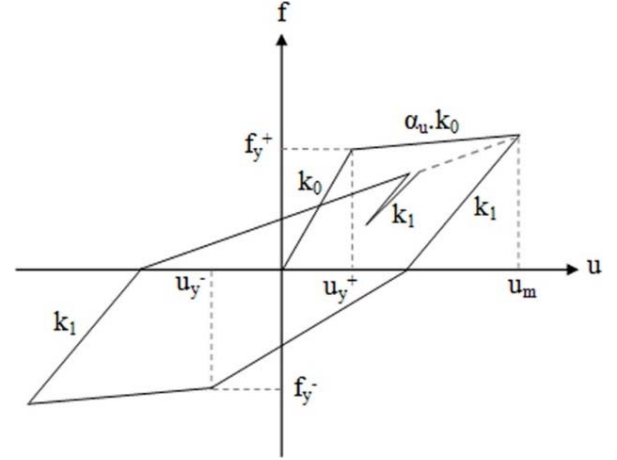
Bu modeldeki davranım, süneklığe dayalı bir yaklaşımı esas almaktadır ve rijitlik azalımı ( $k_1$ ) Eş. 1'e göre  $k_0$  ve bir süneklilik teriminin fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır.

$$k_1 = k_0 \left( \frac{u_y}{u_m} \right)^{\beta_0} \quad (1)$$

Bu eşitlikte  $\beta_0$ , 0 ve 1 arasında herhangi bir değeri alabilmektedir ve bu değer 0 olması durumunda akma sonrası boşalma rijitliği ve elastik rijitlik değerleri birbirine eşit olmaktadır. Bu çalışma kapsamında analizlerde  $\beta_0$  için Kale [31] çalışmasında önerilen 0,5 değeri dikkate alınmıştır.

Yapı simülasyonlarının önceki bölümde açıklamaları verilen yer hareketi veri setleri altında analizleri yapılarak dikkate alınan her bir yapı simülasyonu ve deprem senaryosu için ayrı ayrı maksimum yerdeğiştirme değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu yerdeğiştirme değerleri çalışma kapsamında talep ölçüsü olarak dikkate alınmaktadır. Talep ölçüsü olarak sadece maksimum yerdeğiştirme seçiminin sebebi yine önceki paragraflarda yapı türü için bahsedilen sebeple aynıdır. Hesaplanan bu talep ölçüleri, çalışmanın ilerleyen bölümlerinde detayları verilen yer hareketi şiddet ölçüleri ile birlikte hasar potansiyeli eğrilerinin elde edilmesi ve

bunların da yapı simülasyonlarının hasargörebilirlik analizi değerlendirilmelerinde kullanılacaklardır.



**Şekil 3.** Rijitlik azalımlı Clough davranım modelinin temsili kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi  
(Representative force-deformation relationship of stiffness degrading Clough hysteretic model.)

#### 4. SEÇİLEN ŞİDDET ÖLÇÜLERİ VE OLASILIKSAL SİSMİK TALEP MODELLERİ (SELECTED INTENSITY MEASURES AND PROBABILISTIC SEISMIC DEMAND MODELS)

Yapıların hasargörebilirlik analizi çalışmalarında giriş kısmında da belirtildiği üzere alternatif şiddet ölçüleri (PGA, PGV, PGD, spektral ivme, spektral deplasman, PGR, vb.) yaygın olarak kullanılmaktadır. Genel anlamda talep parametresi ve şiddet ölçüsü arasındaki korelasyonun, yapı periyodu ile şiddet ölçüsünün frekans içeriği arasındaki ilişkiye bağlı olduğu söylenebilir (mesela düşük periyotlu yapıların yüksek frekans içeriğine sahip PGA ile yüksek korelasyon göstermesi gibi). Bina türü yapılarla ilgili çalışmalar dikkate alındığında, PGA ve PGV şiddet ölçülerinin sıklıkla tercih edilen şiddet ölçüleri oldukları görülmektedir ([16], [4]). Özellikle bina türü yapılarda PGV şiddet ölçüsünün daha güvenilir bir parametre olduğu Akkar ve Özen [19] çalışmasında net bir şekilde ortaya konulmuştur. Bu öneriler ışığında bu çalışma kapsamında, PGA ve PGV şiddet ölçüleri ve bunlara ek olarak Kale [26] çalışmasında yine bina türü yapılar için efektif bir şiddet ölçüsü olarak önerilen PGR dikkate alınmıştır.

Seçilen şiddet ölçülerinden PGA ve PGV değerlerinin elde edilmesi doğrudan yer hareketi ivme zaman serilerinden kolaylıkla yapılırken PGR değerleri için detaylı hesaplamalar gerekmektedir. Deprem mühendisliğinde yer hareketi ivme zaman serisinin tamsayı mertebeli (0 ve 1) integrallerinin (nümerik integral) mutlak değerlerinin maksimumları sırasıyla PGA ve PGV değerlerini vermektedir. Tamsayı mertebeler yerine kesirsel mertebeler ( $\alpha$ ) dikkate alınıp kesirsel integrale geçildiğinde yer hareketi ivme serisinin  $\alpha$ -integrali hesaplanabilmektedir. Bu durumlarda farklı  $\alpha$  değerleri için elde edilen zaman serilerinin mutlak değer maksimumları, maksimum kesirsel yer tepkisi (PGR $_{\alpha}$ ) şiddet ölçülerini vermektedir. Eş. 2'de



$PGR_\alpha$  hesabı için gerekli genel formülasyon gösterilmektedir.

$$PGR_\alpha = \max_0^T \left| {}_0^C D_t^\alpha \ddot{x}_g(t) \right| \quad (2)$$

Bu denklemde  $\ddot{x}_g(t)$  yer hareketi ivme serisini temsil etmektedir. Eşitlikte  $\alpha$  kesirsel mertbe değişkenin -2, -1 ve 0 değerleri için hesaplanacak maksimum kesirsel yer tepkisi değerleri sırasıyla PGD, PGV ve PGA konvansiyonel şiddet ölçülerine karşılık gelmektedir.  $PGR_\alpha$  hesabı ile ilgili daha detaylı açıklamalar için Kale [26] ve Shafieezadeh vd. [25] çalışmalarını dikkate alınabilir.

Tek serbestlik dereceli sistem olarak modellenen yapı simülasyonlarının, derlenen deprem veri setleri altında doğrusal olmayan analizleri sonucu elde edilen talep ölçüleri (maksimum yerdeğiştirme) ile seçilen şiddet ölçüleri (PGA, PGV ve  $PGR_\alpha$ ) arasındaki ilişkiden olasılıksal sismik talep modelleri (PSDM) çıkarılmaktadır. PSDM'ler bu çalışma kapsamında seçilen şiddet ölçülerinin uygunluklarının değerlendirilmesi ve sonrasında hasar potansiyeli eğrilerinin geliştirilmesi olmak üzere iki farklı amaçla kullanılmışlardır. Bunlardan ilki bu bölümde ele alınmış, ikinci amaç ise sonraki bölümde değerlendirilmiştir.

Cornell vd. [32] çalışmasında PSDM koşullu sismik talep ölçüsü ile seçilen şiddet ölçüsü arasındaki ilişkiye göre iki parametrelili lognormal dağılım olarak Eş. 3'te verildiği şekilde tanımlanmaktadır.

$$P(D \geq d | IM) = 1 - \Phi \left( \frac{\ln(d) - \ln(S_D)}{\beta_{D|IM}} \right) \quad (3)$$

Bu denklemde  $D$  (ve  $d$ ) talebi,  $IM$  şiddet ölçüsünü,  $\Phi(\bullet)$  standart kümülatif normal dağılım fonksiyonunu,  $S_D$  seçilen bir şiddet ölçüsü cinsinden medyan talep değerini ve  $\beta_{D|IM}$  de modelleme belirsizliği (veya lognormal standart sapma) değerini temsil etmektedir. Dikkate alınan yer hareketi veri setinde bulunan  $N$  adet deprem kaydı için  $S_D$  değeri Eş. 4'te verilen üstel fonksiyon ( $a$  ve  $b$  parametreleri ile tanımlı) ve  $\beta_{D|IM}$  değeri ise Eş. 5'te verilen bağıntı yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$S_D = a(IM)^b \quad (4)$$

$$\beta_{D|IM} = \sqrt{\frac{\sum [\ln(d_i) - \ln(aIM^b)]^2}{N-2}} \quad (5)$$

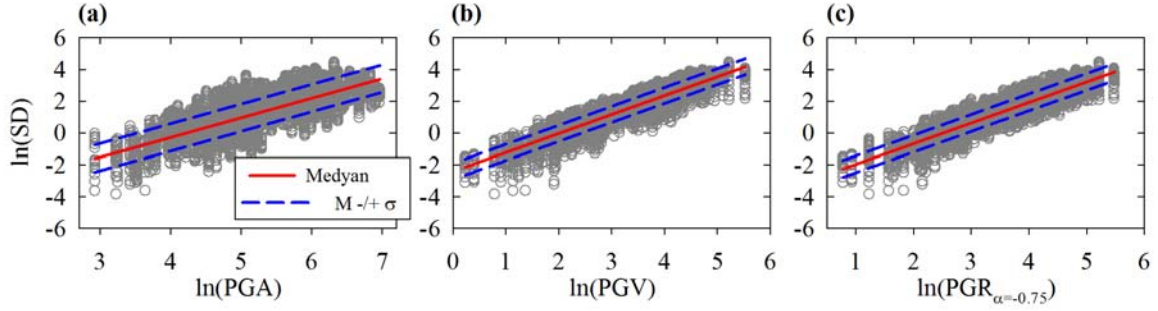
Eş. 4'te verilen fonksiyon Eş. 6'da gösterildiği şekle dönüştürülebilir. Yukarıdaki iki denklemde tanımlanan  $a$  ve  $b$  parametreleri, Eş. 6'da verilen denklem üzerinden yapılacak lineer regresyon analizi ile elde edilebilmektedir. Bu durumda  $\ln(a)$  lineer regresyon sabitini ve  $b$  de eğimi temsil etmektedir.

$$\ln(S_D) = \ln(a) + b \ln(IM) \quad (6)$$

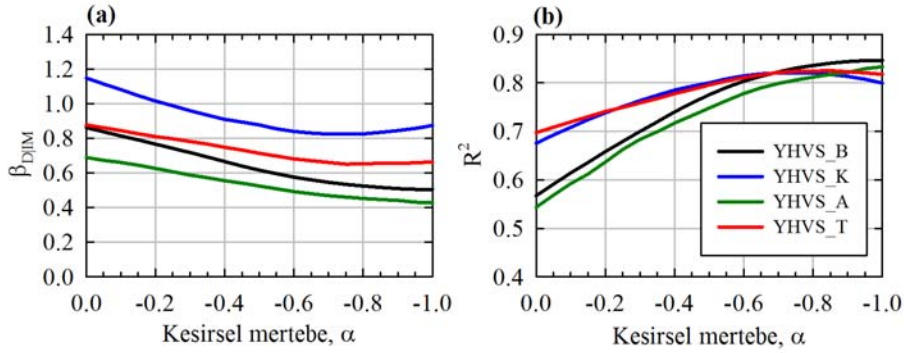
Olasılıksal sismik talep modellerinin oluşturulmasından elde edilen  $\beta_{D|IM}$  ve belirleme katsayısı ( $R^2$ ) şiddet ve talep ölçüleri arasındaki tutarlılığı irdelemede dikkate alınabilecek etkin ölçütlerdir. Seçilen bir şiddet ölçüsü, talepteki belirsizliği en aza indirmeli ve  $R^2$  değeri de birim değere (1,0) o kadar yakın olmalıdır ki istatistiki olarak seçilen bu ölçünün etkinliğinden bahsedilebilsin. Bu bağlamda, düşük  $\beta_{D|IM}$  ve yüksek  $R^2$  değerlerine sahip PSDM'lerde, seçilen şiddet ve talep ölçüleri arasındaki uyum derecesinin yüksek olduğundan söz etmek mümkündür.

Olasılıksal sismik talep modelleri PGA, PGV ve  $PGR_\alpha$  ( $-0,05 \leq \alpha \leq -0,95$ ) için derlenen 4 farklı deprem veri seti altında ve 15 farklı yapı simülasyonu kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 4'te Eş. 6 dikkate alınarak PGA, PGV ve  $PGR_{\alpha=-0,75}$  şiddet ölçüleri ile YHVS\_B için oluşturulan PSDM'ler gösterilmektedir. Şekiller üzerinde, lineer regresyon sonucu elde edilen medyan trend kırmızı düz çizgi ve medyan  $\pm$  standart sapma bandı da mavi kesikli çizgilerle temsil edilmiştir. Bu şekil üzerinden şiddet ve talep ölçüleri arasındaki ilişki incelendiğinde PGA için elde edilen PSDM, PGV ve  $PGR_{\alpha=-0,75}$  şiddet ölçülerinden elde edilenlere göre saçılımı daha yüksek bir davranış göstermektedir. PGV ve  $PGR_{\alpha=-0,75}$  için elde edilen PSDM'lerdeki saçılım ise birbirine yakındır. Bu gözlem ışığında, YHVS\_B için PGV ve  $PGR_{\alpha=-0,75}$  için oluşturulan PSDM'lerde  $\overline{PGA}$ 'ya göre daha düşük  $\beta_{D|IM}$  değerleri ve daha yüksek  $R^2$  değerlerinden söz etmek mümkündür. Bu işlemler çalışma kapsamında incelenen bütün yer hareketi veri setleri ve şiddet ölçüleri dikkate alınarak yapıldığında elde edilen kesirsel mertebeye karşılık  $\beta_{D|IM}$  ve  $R^2$  dağılımları Şekil 5'te gösterilmektedir. Bu şekilde, çalışmanın önceki kısımlarında da belirtildiği üzere  $\alpha = 0$  ve -1 değerleri için hesaplanan PGR değerleri sırasıyla PGA ve PGV'ye karşılık gelmektedir. Dikkate alınan veri setlerinin genel  $\beta_{D|IM}$  ve  $R^2$  dağılımları incelendiğinde, YHVS\_K ve YHVS\_T için  $PGR_{\alpha=-0,75}$  şiddet ölçüsünün, YHVS\_B ve YHVS\_A için de PGV'nin en uygun şiddet ölçüleri olduğu çıkarımını yapmak mümkündür. Bu değerlendirmelere göre PGR için  $\alpha = -0,75$  değerinin en efektif kesirsel mertbe değeri olduğu görülmektedir. Bu nedenle ilerleyen bölümlerde  $PGR_{\alpha=-0,75}$ 'in kullanılmasına karar verilmiştir. Buna ek olarak, YHVS\_B ve YHVS\_A için de şiddet ve talep ölçüleri arasındaki ilişkiden çıkarılan PSDM'lerden hesaplanan model belirsizliklerinin diğer veri setlerine göre daha düşük olduğu görülmektedir.

Bu bölümde yapılan değerlendirmelere göre, PGV ve  $PGR_{\alpha=-0,75}$  şiddet ölçülerinin hasar potansiyeli eğrilerinin çıkarılmasında kullanılacak efektif parametreler olduğu buna karşın PGA şiddet ölçüsünün sismik talebi göreceli olarak çok iyi tarifleyemediği ortaya çıkmaktadır. Sonraki bölümde geliştirilecek olan hasar potansiyeli eğrileri, bu 3 şiddet ölçüsü cinsinden elde edilerek şiddet ölçülerinin seçiminden kaynaklanabilecek epistemik belirsizlik değerlendirmeleri de yapılmıştır. Tablo 2'de sonraki bölüm



Şekil 4. Seçilen şiddet ölçüleri için YHVS\_B altında oluşturulmuş PSDM' ler: a) PGA, b) PGV, c)  $PGR_{\alpha=0.75}$  (PSDMs for the selected intensity measures under YHVS\_B: a) PGA, b) PGV, c)  $PGR_{\alpha=0.75}$ )



Şekil 5. Derlenen veri setleri için kesirsel merteye karşılık a)  $\beta_{DIM}$  ve b)  $R^2$  değerleri (Fractional order vs.  $\beta_{DIM}$  (a) ve  $R^2$  (b) values for compiled ground motion datasets)

kapsamında dikkate alınacak olan lineer regresyon parametreleri  $\ln(a)$ ,  $b$  ve  $\beta_{DIM}$  (Eş. 6) listelenmiştir.

**Tablo 2.** Seçilen şiddet ölçüleri için lineer regresyon parametreleri (Linear regression parameters of the selected intensity measures)

a) $\ln(a)$	YHVS_B	YHVS_K	YHVS_A	YHVS_T
PGA	-5,237	-4,721	-5,588	-5,830
PGV	-2,424	-3,101	-2,321	-2,693
$PGR_{\alpha=0.75}$	-3,271	-3,689	-3,295	-3,476
b) $b$	YHVS_B	YHVS_K	YHVS_A	YHVS_T
PGA	1,237	1,197	1,277	1,291
PGV	1,193	1,318	1,161	1,219
$PGR_{\alpha=0.75}$	1,297	1,375	1,283	1,315
c) $\beta_{DIM}$	YHVS_B	YHVS_K	YHVS_A	YHVS_T
PGA	0,862	1,149	0,689	0,878
PGV	0,505	0,874	0,427	0,664
$PGR_{\alpha=0.75}$	0,534	0,825	0,460	0,656

## 5. HASAR POTANSİYELİ EĞRİLERİNİN ELDE EDİLMESİ (GENERATION OF THE FRAGILITY CURVES)

Yapıların hasargörebilirlik analizleri, dikkate alınan bir şiddet ölçüsü için yapıdan elde edilecek talep değerinin belirli bir hasar sınırı değerindeki aşılma olasılığının tahmin

edilmesi olarak tanımlanabilmektedir. Burada bahsedilen olasılık değeri, hasargörebilirlik analizi çalışmalarında genel olarak lognormal dağılım olarak modellenmektedir. Bu dağılımın elde edilebilmesi için farklı yöntemler dikkate alınabilmektedir ([33 - 35]). Bu yöntemlerin ana amacı istatistiksel olarak en efektif hasargörebilirlik fonksiyonlarının türetilmesidir. Bununla birlikte bu yöntemlerin de hasargörebilirlik fonksiyonlarına belirli düzeyde epistemik belirsizlik kattığı görülmektedir ([35]). Bu çalışma kapsamında, Baker [35] çalışmasında dikkate alınan ve efektif bir yöntem olarak önerilen çoklu şerit analizi (MSA) ve Melchers [36] çalışmasında tanımlanan olasılıksal sismik talep modellerinden elde edilen dağılımla hasar sınırı (veya kapasite) seçimindeki belirsizliğin birleştirilmesi üzerine kurgulanmış yöntem (MDM) dikkate alınmıştır. Yapı simülasyonlarının, derlenen deprem veri setleri altında doğrusal olmayan analizleri sonucu elde edilen tepki değerleri (maksimum yerdeğiştirme) ile seçilen şiddet ölçüleri (PGA, PGV ve  $PGR_{\alpha=0.75}$ ) dikkate alındığında ikisi arasında belirli bir saçılımın olması beklenmektedir. Genel anlamda, şiddet ölçüsünün genliğinin artmasına paralel olarak yapıdan elde edilen tepki değerlerinde de bir artış olmaktadır. Şekil 6'da çalışma kapsamında değerlendirilen bütün yer hareketi veri setleri için PGV ile maksimum deplasman (SD) arasındaki ilişkiye bağlı olarak tepki-şiddet ölçüsü ilişkisi gösterilmiştir. Bu şekil üzerinde, Tablo 3'te listelenen temsili yapı grubu için hasar sınırlarına ([4]) ait medyan ( $SD_{medyan}$ ) değerleri de kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Tablo 3'te ayrıca hasar sınırlarına ait standart

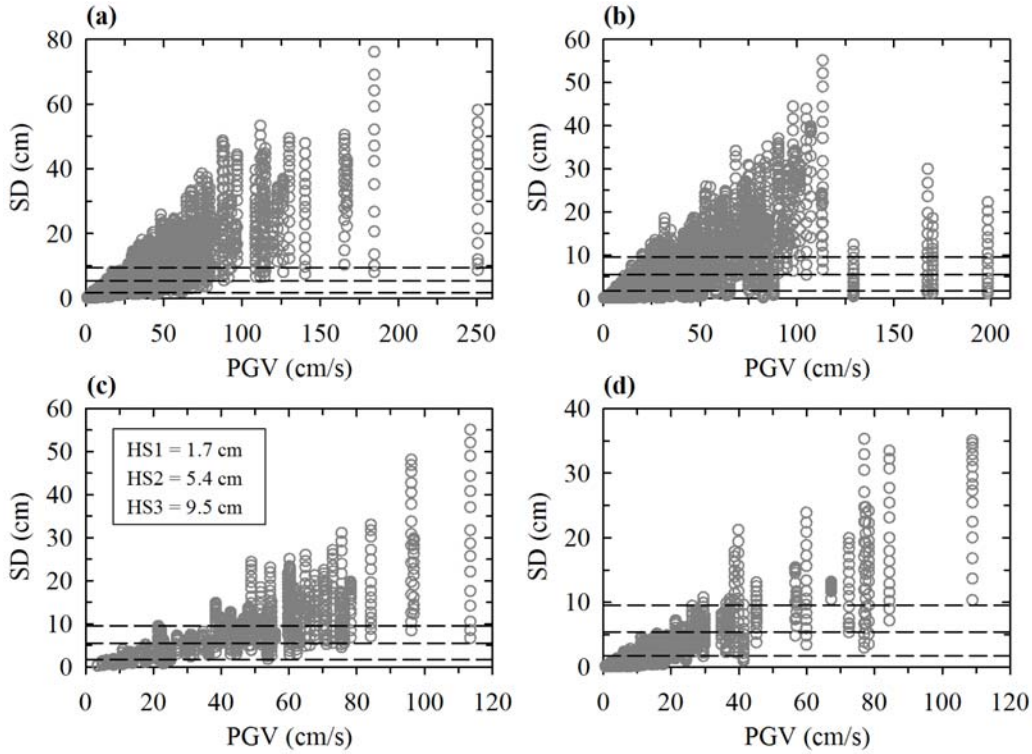


sapma (belirsizlik,  $\beta_{Ci}$ ) değerleri de verilmektedir. HS1, HS2 ve HS3 sırasıyla sınırlı hasar, kontrollü hasar ve göçme öncesi hasar bölgelerinin başlangıcı olarak dikkate alınabilir. HS1 genel olarak yapı rijitliği tarafından kontrol edilirken HS2 rijitlik ve deformasyon ile HS3 de doğrudan deformasyon tarafından kontrol edilmektedir ([4]).

**Tablo 3.** Temsili yapı grubu için hasar sınırı değerleri  
(Limit state definitions for representative building class)

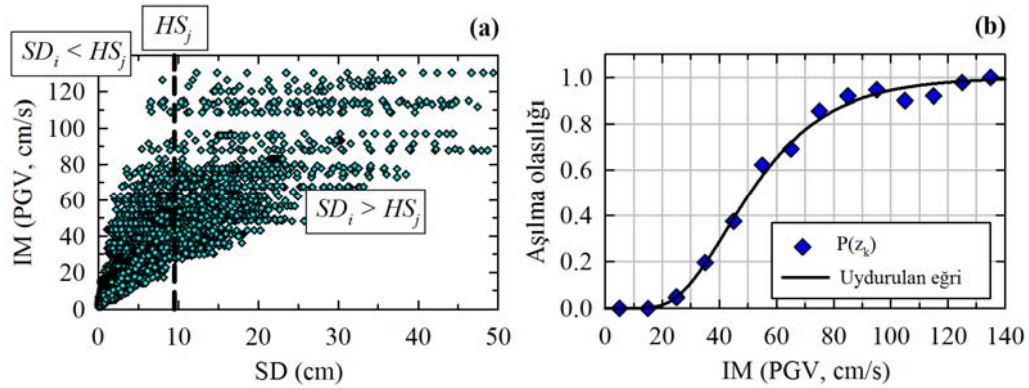
Hasar Sınırı	$SD_{medyan}$ (cm)	$\beta_{Ci}$
HS1	1,70	0,154
HS2	5,40	0,523
HS3	9,50	0,765

Baker [35] çalışmasında önerilen yöntemle göre ilk olarak seçilen şiddet ölçüsü için belirli bir aralık belirlenmektedir. Sonrasında bütün veri seti seçilen bu aralık dahilinde şeritlere bölünmekte (şerit sayısı,  $k$ ) ve bu şeritlere düşen deprem kayıtlarından (toplam kayıt sayısı,  $N_k$ ) elde edilen yapı talep ( $SD_i$ ) değerlerinin seçilen hasar sınırı ( $HS_j$ ) değeri için aşılma olasılıkları hesaplanmaktadır (Şekil 7a). Herbir şeride karşılık gelen bu olasılık değerleri,  $P(z_k)$ , basit bir yol izlenerek  $HS_j$  değerinden büyük  $SD_i$  değerlerine sahip deprem kaydı sayısının,  $N(SD_i > HS_j)_k$ ,  $N_k$ 'ya oranından elde edilebilmektedir. Herbir şerit için belirlenen temsili şiddet ölçülerine karşılık  $P(z_k)$  dağılımları yardımıyla ve maksimum olasılık yaklaşımı dikkate alınarak bir eğri



**Şekil 6.** Yapı simülasyonları için PGV'ye karşılık maksimum yerdeğiştirmelerin dağılımı: a) YHVS\_B, b) YHVS\_K, c) YHVS\_A, d) YHVS\_T

(Distribution of PGV vs. maximum displacements for structural simulations: a) YHVS\_B, b) YHVS\_K, c) YHVS\_A, d) YHVS\_T)



**Şekil 7.** MSA analizi işlem aşamaları: a) Aşılma olasılıklarının hesaplanması, b) Kümülatif dağılım fonksiyonunun uydurulması aşaması

(Computation steps of MSA analysis: a) Calculation of the probability of exceedances, b) Fitting stage of the cumulative distribution function)

uydurulmaktadır. Bu eğri, hasar potansiyeli eğrilerine karşılık gelen lognormal kümülatif dağılım fonksiyonunu temsil etmektedir (Şekil 7b). Melchers [36]'da tanımlanan yöntemde ise yapı kapasitesinin de bir dağılımı olduğu ve bu dağılımın da lognormal dağılıma uyduğu kabulü yapılmaktadır. Genel olarak hasargörebilirlik eğrisi, Eş. 7'de verilen lognormal kümülatif dağılım fonksiyonu ile temsil edilebilmektedir.

$$P(DC_i|IM) = \Phi \left\{ \frac{\ln(S_D/S_{Ci})}{\sqrt{\beta_{D|IM}^2 + \beta_{Ci}^2}} \right\} \quad (7)$$

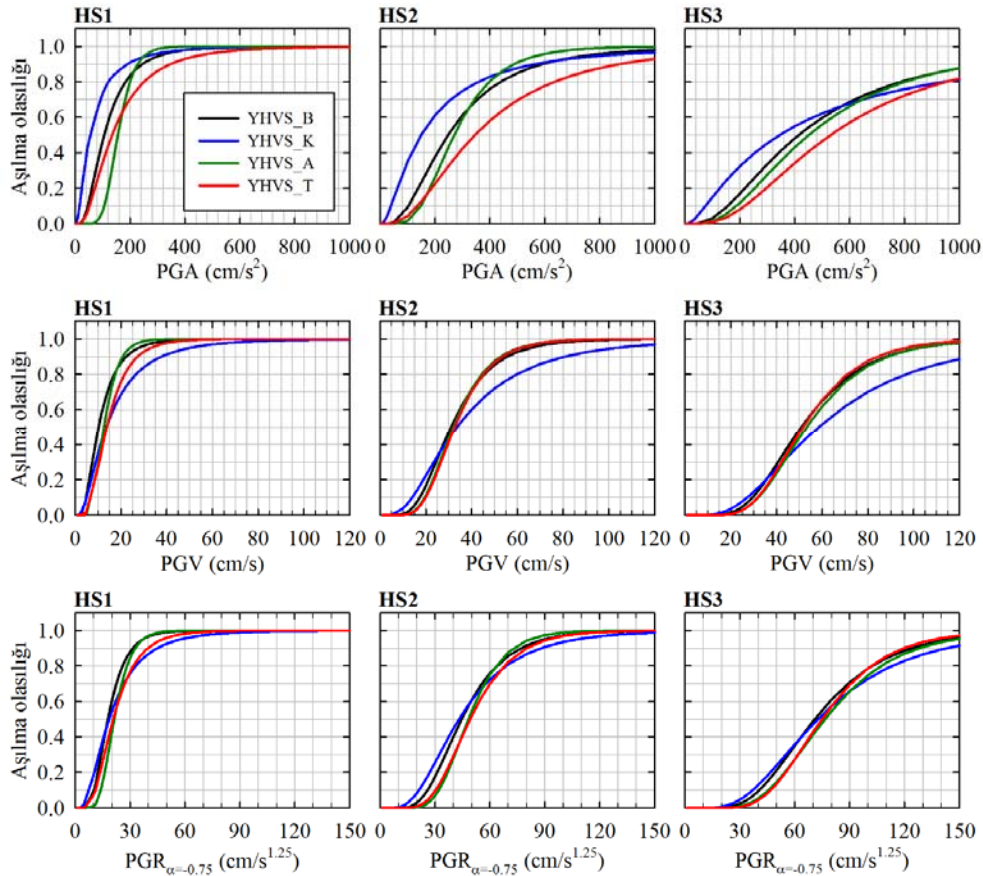
Bu denklemde  $P(DC_i|IM)$  seçilen şiddet ölçüsünün dikkate alınan hasar sınırı  $i$  için yapıda oluşturabileceği hasar olasılığını,  $S_D$  seçilen bir şiddet ölçüsü cinsinden medyan talep değerini,  $S_{Ci}$  seçilen hasar seviyesi için kapasitenin medyan değerini,  $\beta_{D|IM}$  seçilen IM için talep değerindeki belirsizliği ve  $\beta_{Ci}$  de seçilen hasar seviyesi için kapasitedeki belirsizlik değerini (veya lognormal standart sapmaları) temsil etmektedir. Bu denklemde  $S_D$  yerine Eş. 4'te verilen ilişki dikkate alındığında Eş. 7, Eş. 8'de verildiği şekliyle yazılabilmektedir. Bu bağlamda, olasılıksal sismik talep modellerinden elde edilen parametreler ile literatürden (veya detaylı analizlerden) derlenen kapasite modellerine ait

parametreler birleştirilerek nihai hasar potansiyeli eğrileri geliştirilebilmektedir.

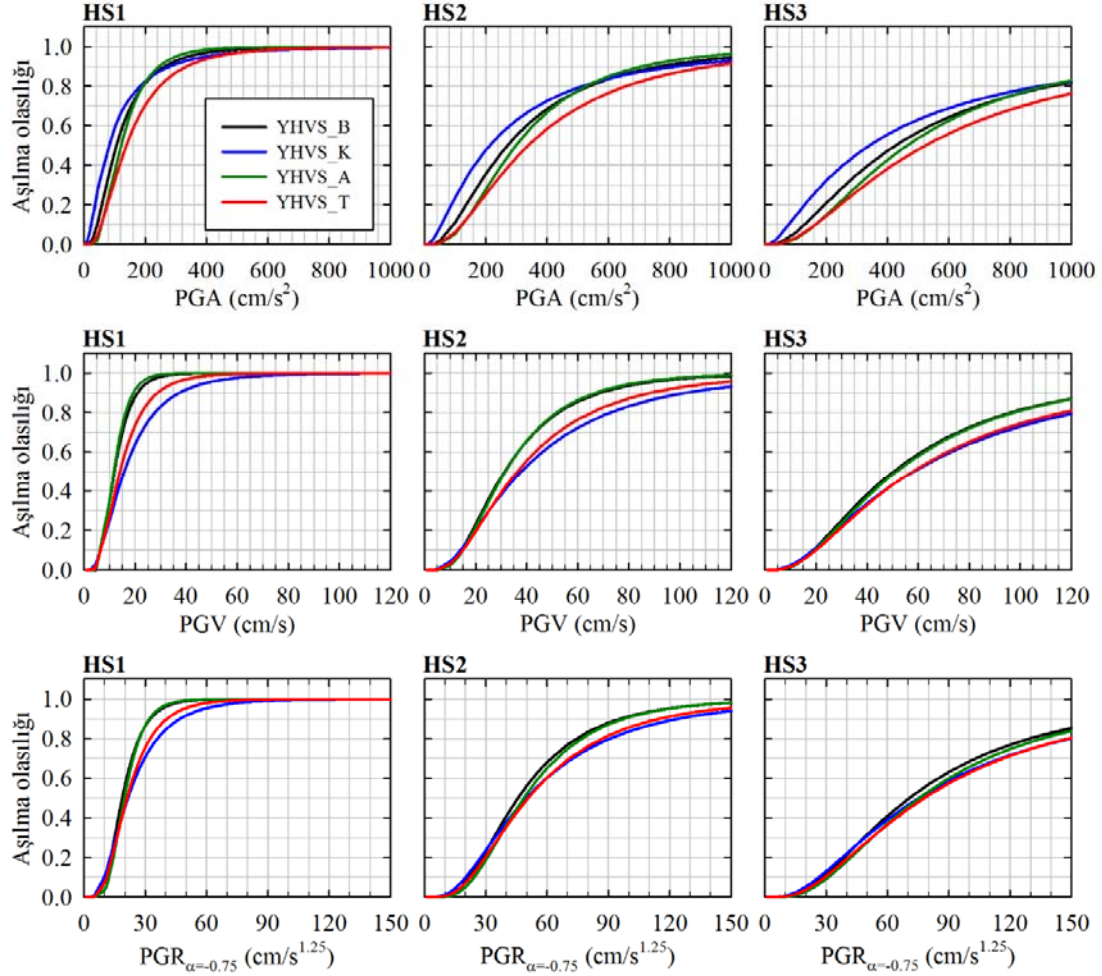
$$P(DC_i|IM) = \Phi \left\{ \frac{\ln(IM) - [\ln(S_{Ci}) - \ln(a)]/b}{\sqrt{\beta_{D|IM}^2 + \beta_{Ci}^2}/b}} \right\} \quad (8)$$

Bu çalışmanın amacı doğrultusunda yapılacak değerlendirmelerde kullanılacak olan hasar potansiyeli eğrileri Baker [35] ve Melchers [36] yöntemlerine göre geliştirilmiştir. Baker [35] yönteminde dikkate alınan deprem veri setleri 50 cm/s<sup>2</sup> lik PGA, 10 cm/s' lik PGV ve yine 10 cm/s<sup>1.25</sup> lik PGR <sub>$\alpha=0.75$</sub>  şeritlerine ayrılarak çoklu şerit analizleri yöntemi uygulanmıştır.  $P(z_k)$  dağılımlarına eğri uydurma aşamaları, Baker [35] çalışmasında sağlanan araçlar yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Melchers [36] yönteminde ise önceki bölümlerde PSDM'lerden hesaplanan talep parametreleri ve Erberik [4] çalışmasından derlenen kapasite parametreleri (Tablo 2 ve 3) dikkate alınarak Eş. 8 uygulamaya konulmuştur.

Yapı simülasyonlarına ait hasar potansiyeli eğrileri 4 farklı yer hareketi veri seti için 3 farklı hasar sınırı ve 3 farklı şiddet ölçüsü cinsinden Baker [35] ve Melchers [36] yöntemlerine göre geliştirilmiştir. Şekil 8 ve 9'da sırasıyla Baker [35] ve



Şekil 8. Baker [35] yöntemine göre elde edilen hasar potansiyeli eğrilerinin karşılaştırmaları (Comparisons of the fragility curves obtained from the method of Baker [35])



Şekil 9. Melchers [36] yöntemine göre elde edilen hasar potansiyeli eğrilerinin karşılaştırması  
(Comparison of the fragility curves obtained from the method of Melchers [36])

Melchers [36] yöntemlerine göre geliştirilen hasar potansiyeli eğrilerinin ayrı ayrı karşılaştırmaları gösterilmektedir. Burada verilen karşılaştırmalardan yapılabilecek ilk ve en hızlı gözlem, dikkate alınan deprem veri setine bağlı olarak ortaya çıkan epistemik belirsizliğin PGA şiddet ölçüsü için her iki yöntemde de diğer şiddet ölçülerine göre dikkat çekici biçimde fazla olmasıdır. Şekil 8 ve 9'da verilen iki yöntem aynı şiddet ölçüsü için karşılaştırıldığında ise Baker [35] yöntemiyle geliştirilen hasar potansiyeli eğrilerinin deprem veri setindeki değişikliklere karşı daha duyarlı oldukları görülmektedir. PGA için geliştirilen hasar potansiyeli eğrilerinden YHVS\_T veri seti için geliştirilenler bütün hasar seviyeleri için de en düşük aşılma olasılığı değerlerini vermektedir. Genel olarak en yüksek aşılma olasılıklarının da YHVS\_K tarafından sağlandığı söylenebilir. PGV ve PGR için geliştirilen hasar potansiyeli eğrilerinde ise her iki yöntem için de deprem veri setine bağlı duyarlılık düşük seviyelerde kalmıştır. Baker [35] yöntemi için yapılan PGV karşılaştırmalarında YHVS\_K veri seti diğer setlere göre daha farklı bir davranış izlemektedir fakat bu gözlem diğer yöntemle çıkarılan hasar potansiyeli eğrileri için geçerli değildir. Bu gözlemin

nedenini veri setindeki PGV dağılımıyla ilişkilendirmek bir alternatif olabilir ancak diğer veri tabanları ile karşılaştırıldığında belirgin olarak bu veri tabanını diğerlerinden ayıran bir özellik bulunmamaktadır. Bu sebeple, bu gözlem kullanılan yöntemde duyarlılık olarak yorumlanmıştır. Her iki yöntem de dikkate alınarak geliştirilen hasar potansiyeli eğrilerinin genel değerlendirmeleri ile olasılıksal sismik talep modellerinin değerlendirilmesi aşamasında şiddet ölçüleri cinsinden yapılan karşılaştırmalar göz önüne alındığında sismik talebi daha efektif şekilde tanımlayan şiddet ölçüleriyle geliştirilen hasar potansiyeli eğrilerinin, derlenen deprem veri setine bağımlılığı daha düşük seviyelerde kalmaktadır. Bu gözlemden hareketle, şiddet ölçülerinin seçiminin hasargörebilirlik çalışmaları üzerinde çok etkili oldukları ve nihai eğrilere ihmal edilemeyecek düzeyde belirsizlik kattıkları söylenebilir. Yer hareketi veri seti, seçilen şiddet ölçüleri ve hasar potansiyeli eğrilerinin geliştirilmesinde kullanılan yöntemler arasında yapılan detaylı değerlendirmeler ve seçilen deprem senaryoları altında elde edilen aşılma olasılıklarındaki değişimlerle ilgili karşılaştırmalara sonraki bölümde yer verilmiştir.



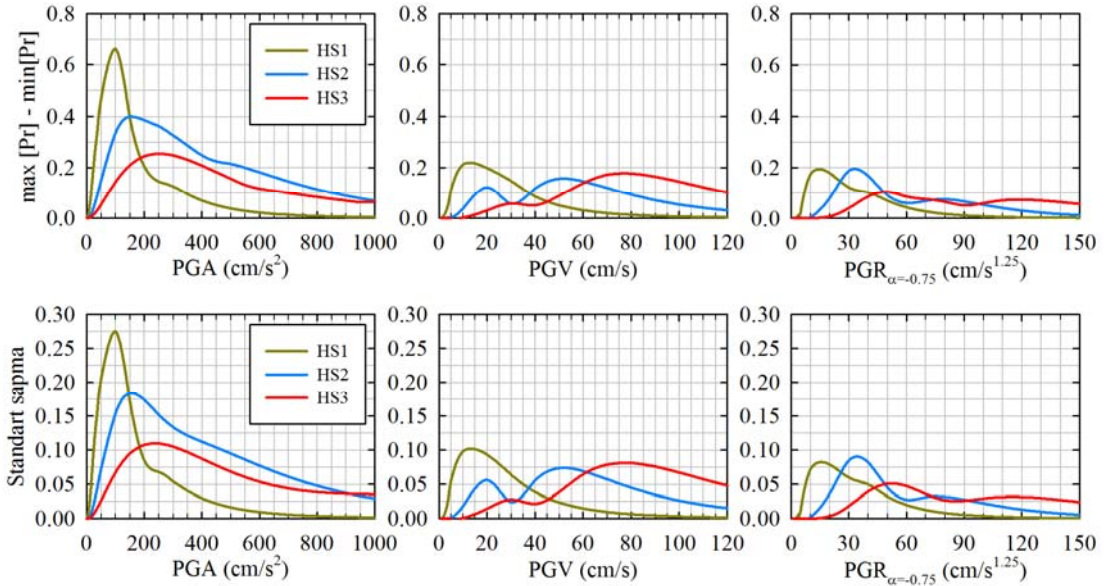
## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Çalışma kapsamında geliştirilen hasar potansiyeli eğrilerinin seçilen yer hareketi veri setine bağlı değişimlerinin detaylı olarak irdelenebilmesi amacıyla ilk olarak seçilen bir şiddet ölçüsünün değerleri boyunca karşılık gelen aşılma olasılıkları (4 farklı aşılma olasılığı değeri) maksimum değerleri ile minimum değerleri arasındaki farklar ( $\max[\text{Pr}] - \min[\text{Pr}]$ ) hesaplanmıştır. Buna ek olarak aynı şekilde, dikkate alınan şiddet ölçüsünün değerleri boyunca standart sapma değerleri de elde edilmiştir. Bu işlemler için bir örnek durum incelendiğinde, örneğin Şekil 8'de HS1 seviyesi için  $\text{PGA} = 100 \text{ cm/s}^2$  değeri dikkate alındığında deprem veri setleri için aşılma olasılıkları  $P(z/\text{YHVS}_B) = 0,47$ ,  $P(z/\text{YHVS}_K) = 0,73$ ,  $P(z/\text{YHVS}_A) = 0,07$ ,  $P(z/\text{YHVS}_T) = 0,34$  olarak elde edilmektedir. Burada  $\max[\text{Pr}] - \min[\text{Pr}]$  değeri  $0,73 - 0,07 = 0,66$  olarak hesaplanırken standart sapma değeri de  $0,275$  olmaktadır.

Bu işlem dikkate alınan 3 şiddet ölçüsü ve 3 hasar sınırı için elde edilerek Şekil 10'un üst satırında farkların ve alt satırında da standart sapma değerlerinin değişimi gösterilmiştir. Şekil 10 MSA analizlerinden hesaplanan sonuçları göstermektedir. MDM analizine göre de benzer davranışlar ortaya çıkmaktadır. Buradaki sonuçlar incelendiğinde, PGA şiddet ölçüsü için farkların ve standart sapma değerlerinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. PGV ve  $\text{PGR}_{\alpha=0,75}$  için yapılan değerlendirmelerde ise farkların en yüksek  $0,2$  değerine ve standart sapma değerlerinin ise  $0,1$  seviyesine ulaştığı gözlemlenmiştir. PGV için elde edilen sonuçlarda, PGV değerlerinin artmasına bağlı olarak çok fazla farklılaşma olmadığı buna karşın PGA ve  $\text{PGR}_{\alpha=0,75}$  şiddet ölçülerinde ise genliklerdeki artışa bağlı olarak farkların ve standart sapma değerlerinin

azaldığı görülmektedir. Çalışmada dikkate alınan 3 farklı şiddet ölçüsü karşılaştırıldığında ise  $\text{PGR}_{\alpha=0,75}$  şiddet ölçüsünün deprem veri setindeki değişimden en az etkilenmiş olan şiddet ölçüsü olduğu sonucu çıkarılmaktadır. Şiddet ölçüsüne bağlı epistemik belirsizliğin ve hasar potansiyeli eğrilerinin geliştirilmesinde uygulanan yöntemlere bağlı etkilerin değerlendirilebilmesi amacıyla 17/08/1999 Kocaeli deprem senaryosu dikkate alınmıştır ([37]). Bu deprem senaryosu için moment magnitüd  $M_w = 7,6$ , doğrultu atımlı fay dikkate alınmış ve sismik kaynak – saha arası mesafesi (Joyner-Boore mesafe türü,  $R_{JB}$ )  $0 - 200$  km arasında değişen ve sert zemine (ortalama kayma dalgası hızı,  $V_{S30} = 520 \text{ m/s}$ ) konumlanmış sanal lokasyonlar kullanılmıştır. Oluşturulan deprem senaryolarından Kale vd. [38] çalışmasında türetilen yer hareketi tahmin denklemi kullanılarak deterministik yaklaşımla yer hareketi tahmin değerleri hesaplanmıştır. Kale vd. [38] denklemi aktif sığ kabuk içi deprem tektoniği yapısına uygun deprem verileri kullanılarak geliştirilmiş global bir modeldir. Bu denklemin seçilmesindeki en önemli neden bu denklemin  $\text{PGR}_{\alpha}$  şiddet ölçülerinin tahminini de yapabiliyor olmasıdır. Şekil 11'de dikkate alınan deprem senaryosu için Kale vd. [38]'den hesaplanan PGA, PGV ve  $\text{PGR}_{\alpha=0,75}$  şiddet ölçülerinin  $R_{JB}$  mesafe türündeki değişime göre değerleri gösterilmiştir. Çalışmanın daha önceki bölümlerinde de bahsedildiği üzere kesirsel mertebeye  $\alpha$ 'nın alacağı  $0$  ve  $-1$  değerleri için sırasıyla PGA ve PGV şiddet ölçülerinin tahmini yapılabilmektedir. Bu çalışmada dikkate alınan  $\alpha$  değeri  $-0,75$  olduğu için ( $-1$  değerine daha yakın)  $\text{PGR}_{\alpha}$ 'nın Kale vd. [38] yer hareketi tahmin denkleminde hesaplanan değerlerinin genlikleri PGV şiddet ölçüsüne daha yakın bir davranış göstermektedir.

Şekil 11 dikkate alındığında, seçilen mesafe aralığındaki her bir  $R_{JB}$  değerine karşılık PGA, PGV ve  $\text{PGR}_{\alpha=0,75}$  değeri elde

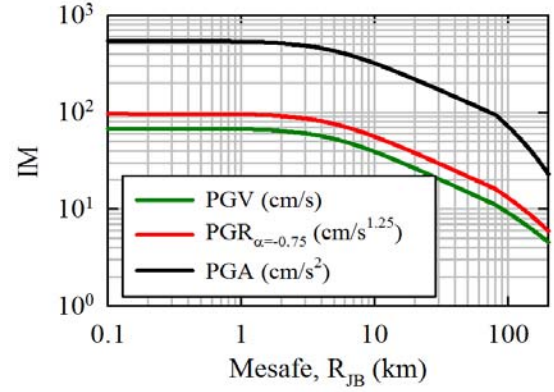


Şekil 10. Baker [35] MSA analizine göre elde edilen hasar potansiyeli eğrilerinin maksimum fark (üst satır) ve standart sapma değerleri (alt satır)

(Maximum differences (top row) and standard deviations (bottom row) of the fragility curves obtained from the Baker [35] MSA analysis)

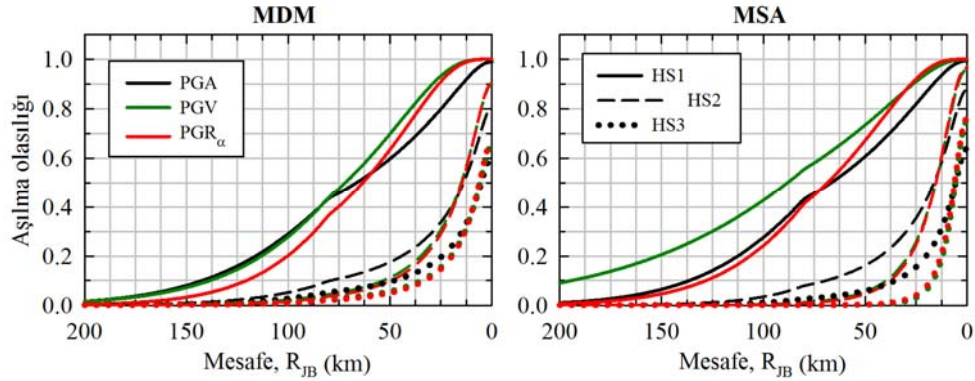
edilebilmektedir. Şekil 8 ve 9'da verilen yapı simülasyonlarına ait hasar potansiyeli eğrilerinden Şekil 11'de gösterilen IM'lere karşılık gelen aşılma olasılıkları hesaplandığında dikkate alınan 3 farklı hasar sınırı değeri için Melchers [36] (MDM) ve Baker [35] (MSA) yöntemlerine göre dağılımlar Şekil 12'de YHVS\_B ve Şekil 13'te YHVS\_K için gösterildiği şekilde elde edilmektedir. Bu şekillerde sürekli çizgiler HS1'i temsil ederken kesikli ve noktasal çizgiler de sırasıyla HS2 ve HS3'ü temsil etmektedir. PGA, PGV ve  $PGR_{\alpha=0,75}$  ise yine sırasıyla siyah, yeşil ve kırmızı renklerle gösterilmiştir. Bu şekillerde verilen karşılaştırmalar incelenerek şiddet ölçüsü seçimine bağlı olarak ortaya çıkabilecek epistemik belirsizlik daha iyi değerlendirilebilecektir. Şekil 12 ve 13 incelendiğinde HS2 ve HS3 seviyelerinde PGV ve  $PGR_{\alpha=0,75}$  şiddet ölçülerinin birbirine yakın aşılma olasılıkları verdiği görülürken PGA'dan elde edilen aşılma olasılıkları (YHVS\_B yakın mesafe haricinde) daha yüksek olmaktadır. HS1 seviyesinde ise YHVS\_B ve YHVS\_K arasında belirgin bir farklılık ortaya çıkmıştır. YHVS\_B seti MDM analizleri için birbirine yakın aşılma olasılıkları elde edilirken MSA analizlerinde ise PGV'ye ait aşılma olasılıkları daha yüksektir. YHVS\_K seti ise PGA kullanılarak elde edilen aşılma olasılığı değerleri PGV ve  $PGR_{\alpha=0,75}$  değerleri kullanılarak elde edilenlere göre ciddi derecede yüksek bir davranış göstermektedir. Yine YHVS\_K için yapılan karşılaştırmalarda HS2 ve HS3 seviyelerindeki PGA'ya bağlı hasar potansiyeli eğrilerinin aşılma olasılığı değerlerinde YHVS\_B'ye göre daha ciddi farklar ortaya çıkmaktadır. YHVS\_K seti HS1 için de PGV

ve  $PGR_{\alpha=0,75}$  değerlerine bağlı aşılma olasılıkları diğer HS'lerde olduğu gibi birbirine yakındır.

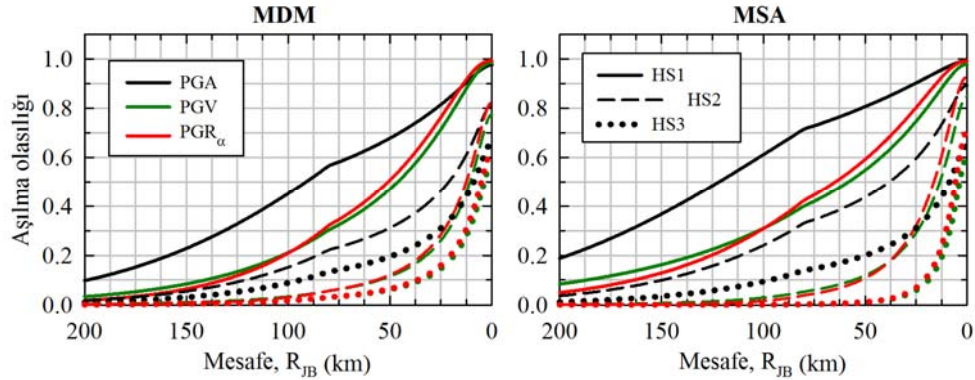


Şekil 11. Deprem senaryosu için mesafeye karşılık IM değerleri  
(Distance vs. IMs for the earthquake scenario)

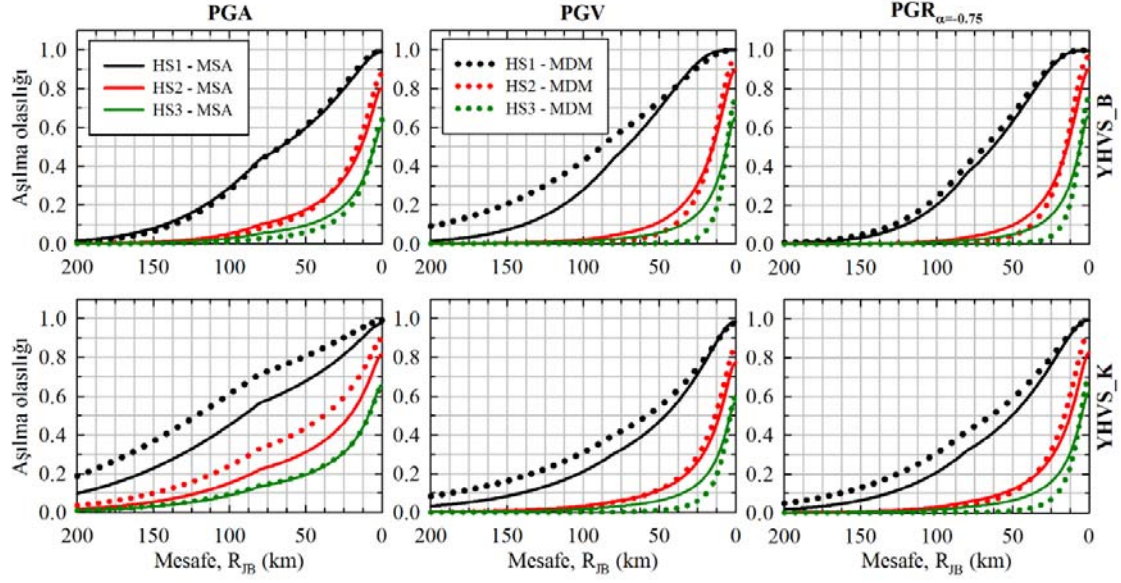
MSA ve MDM yaklaşımlarının yapıların hasargörebilirlik analizi nihai sonuçlarına olan etkilerinin değerlendirilebilmesi amacıyla yine YHVS\_B ve YHVS\_K setleri üzerinden ve önceki paragraflarda detayları verilen deprem senaryosu altında elde edilen IM değerleri yardımıyla karşılaştırmalar yapılmıştır (Şekil 14). Bu şekilde, HS1, HS2 ve HS3 sırasıyla siyah, kırmızı ve yeşil renklerle; MSA ve MDM analizleri ise sırasıyla sürekli ve



Şekil 12. YHVS\_B altında IM'lerin aşılma olasılıklarının karşılaştırması  
(Comparisons for the probability of exceedances of IMs under YHVS\_B)



Şekil 13. YHVS\_K altında IM'lerin aşılma olasılıklarının karşılaştırması  
(Comparisons for the probability of exceedances of IMs under YHVS\_K)



**Şekil 14.** YHVS\_B ve YHVS\_K setleri altında PGA PGV ve  $PGR_{\alpha=0.75}$  için MSA ve MDM analizlerinden elde edilen aşılma olasılıklarının karşılaştırması

(Comparisons of the probability of exceedances obtained from MSA and MDM approaches under YHVS\_B and YHVS\_K for PGA, PGV ve  $PGR_{\alpha=0.75}$ )

noktasal çizgilerle gösterilmiştir. PGA, PGV ve  $PGR_{\alpha=0.75}$  için hesaplanan aşılma olasılıkları incelendiğinde iki yöntemin bazı durumlarda birbirine yaklaştığı bazılarında ise ayrıldığı gözlemlenmektedir. Buradaki birleşme veya ayrışmaları şiddet ölçüsü türü veya dikkate alınan deprem veri seti ile ilişkilendirmek mümkün gözükmemektedir. Bu karşılaştırmalar ışığında yapılabilecek bir başka yorum da MSA ve MDM analizleri sonuçlarının bazı durumlarda birbirlerine göre yüksek veya bazı durumlarda düşük değerler vermesidir ve yine bunun da sistematik olarak gelişmesidir.

## 7. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Deprem mühendisliği ve mühendislik sismolojisi alanlarında yapılan araştırmaların çoğunda, kullanılan parametrelerle (faylar, deprem kayıtları, yapı modelleri, histeretik davranış, şiddet ölçüleri vb. ile ilintili olanlar) ilgili olarak belirli düzeylerde epistemik belirsizlikten söz etmek mümkündür. Epistemik belirsizlik teorik olarak tamamen ortadan kaldırılabilmekle birlikte pratik uygulamalarda epistemik belirsizliği detaylı araştırmalarla olabildiğince düşürme yolu seçilmektedir.

Bu çalışmada deprem yer hareketi veri setine ve yine yer hareketi şiddet ölçülerine bağlı olarak bina türü yapıların hasargörebilirlik analizlerine sunulan epistemik belirsizliğin değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda, Baker vd. [15], Kadaş vd. [29], Akkar vd. [2] ve Kale vd. [30] çalışmalarında kullanılan yer hareketi veri setleri ve PGA, PGV ve  $PGR_{\alpha=0.75}$  şiddet ölçüleri dikkate alınarak Baker [35] ve Melchers [36] yaklaşımlarına göre Erberik [4] çalışmasında değerlendirilen düşük kat sayılı yapı simülasyonları için hasargörebilirlik analizi sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda esas olarak

deprem veri seti ve şiddet ölçüsünün nihai hasar potansiyeli eğrilerine olan etkileri incelenmişse de bu eğrilerin elde edilmesinde uygulanan iki farklı istatistiksel yaklaşımın değerlendirmeleri de yapılmıştır. Deprem veri seti derlemesi ile ilgili etkiler doğrudan geliştirilen hasar potansiyeli eğrileri kullanılarak yapılırken farklı şiddet ölçüleri ve farklı yaklaşımlarla ilgili etkilerin değerlendirilmesi aşamasında deterministik deprem senaryoları üzerinden gidilmiştir. Elde edilen bulgular ışığında deprem veri seti, şiddet ölçüsü ve hasar potansiyeli eğrilerinin çıkarılmasında dikkate alınan yöntemlerle ilgili bazı durumlarda ciddi seviyelere ulaşan epistemik belirsizliklerden söz etmek mümkündür. Bununla birlikte genel olarak yapılan karşılaştırmalar ve değerlendirmeler incelendiğinde ise seçilen şiddet ölçüsünün çalışmadaki parametrelerden belirsizliği en fazla etkileyen unsur olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma özelinde dikkate alınan yapı türü için PGA en yüksek belirsizliğe sahip şiddet ölçüsü olmuştur. PGV ve  $PGR_{\alpha=0.75}$  şiddet ölçülerinden ise çalışmaya birbirleriyle benzer ve kabul edilebilir seviyelerde belirsizlik sunulmuştur. Bu hususlar göz önünde bulundurularak hasargörebilirlik çalışmalarında epistemik belirsizliği düşürebilmek amacıyla çalışmaların özelinde şiddet ölçüsü seçiminin detaylı olarak yapılması önemli bir unsur olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun uygulanması aşamasında ise olasılıksal sismik talep modelleri veya farklı istatistiksel araçların kullanılabilmesi de dikkate alınmalıdır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Akkar S., Azak T., Çan T., vd., Evolution of seismic hazard maps in Turkey, Bulletin of Earthquake Engineering, doi 10.1007/s10518-018-0349-1, 2018.
2. Akkar S., Sucuoğlu H., Yakut A., Displacement-Based Fragility Functions for Low- and Mid-rise Ordinary



- Concrete Buildings, *Earthquake Spectra*, 21 (4), 901–927, 2005.
3. Ay B. Ö., Erberik M. A., Vulnerability of Turkish Low-Rise and Mid-Rise Reinforced Concrete Frame Structures, *Journal of Earthquake Engineering*, 12 (S2), 2–11, 2008.
  4. Erberik M. A., Fragility-based assessment of typical mid-rise and low-rise RC buildings in Turkey, *Engineering Structures* 30, 1360–1374, 2008.
  5. Hsieh M. H., Lee B. J., Lei T. C., Lin J. Y., Development of medium-and low-rise reinforced concrete building fragility curves based on Chi–Chi Earthquake data, *Natural Hazards*, 69 (1), 695–728, 2013.
  6. Uçar T., Düzgün M., Derivation of analytical fragility curves for RC buildings based on nonlinear pushover analysis, *İMO Teknik Dergi*, 24 (3), 6421–6446, 2013.
  7. Mazılıgüney L., Yakut A., Kadaş K., Kalem İ., Fragility analysis of reinforced concrete school buildings using alternative intensity measure-based ground motion sets, 2nd Turkish Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Eskişehir-Türkiye, 25-27 Eylül, 2013.
  8. Hancılar U., Çaktı E., Erdik M., Franco G.E., Deodatis G., Earthquake vulnerability of school buildings: Probabilistic structural fragility analyses, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 67: 169–178, 2014.
  9. Karimzadeh S., Askan A., Erberik M. A., Yakut A., Seismic damage assessment based on regional synthetic ground motion dataset: a case study for Erzincan, Turkey, *Natural Hazards*, doi.org/10.1007/s11069-018-3255-6, 2018.
  10. FEMA 154: Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C, 1988.
  11. Farsangi E.N., Rezvani F.H., Talebi M., Hashemi S.A., Seismic Risk Analysis of Steel-MRFs by Means of Fragility Curves in High Seismic Zones, *Advances in Structural Engineering* 17 (9), 1227–1240, 2014.
  12. Lin S.-L., Uma S. R., King A., Empirical Fragility Curves for Non-Residential Buildings from the 2010–2011 Canterbury Earthquake Sequence, *Journal of Earthquake Engineering*, 22 (5), 749–777, 2018.
  13. Zakeri B., Padgett J. E., Amiri G. G., Fragility Analysis of Skewed Single-Frame Concrete Box-Girder Bridges, *ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities*, 28(3): 571-582, 2014.
  14. Kadaş K., Yakut A., Re-examination of a Spectral Ground Motion Intensity Measure Based on Predicted Period Elongation, 10th International Congress on Advances in Civil Engineering, Ankara, Türkiye, 17-19 Ekim, 2012.
  15. Baker J. W., Lin T., Shahi S. K., Jayaram N., New Ground Motion Selection Procedures and Selected Motions for the PEER Transportation Research Program. PEER Technical Report 2011/03, 106 s, 2011.
  16. Kwon O.S., Elnashai A., The effect of material and ground motion uncertainty on the seismic vulnerability curves of RC structure, *Engineering Structures*, 28, 289–303, 2006.
  17. Padgett J.E., Nielson B.G., DesRoches R., Selection of optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of highway bridge portfolios, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37, 711-725, 2008.
  18. Avşar Ö., Yakut A., Caner A., Analytical Fragility Curves for Ordinary Highway Bridges in Turkey, *Earthquake Spectra*, 27, 971–996, 2011.
  19. Akkar S., Özen Ö., Effect of peak ground velocity on deformation demands for SDOF systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34, 1551-1571, 2005.
  20. Luco N., Cornell A.C., Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earthquake ground motions, *Earthquake Spectra*, 23, 357-392, 2007.
  21. Shome N., Cornell A.C., Probabilistic Seismic Demand Analysis of Nonlinear Structures, Stanford University, Reliability of Marine Structures Program, Report No. RMS-35, California, 1999.
  22. Bazzurro P., Cornell A.C., Vector-values probabilistic seismic hazard analysis (VP-SHA), 7. ABD Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 21-25 Temmuz, Boston, MA, 2002.
  23. Baker J.W., Cornell C.A., A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34, 1193-1217, 2005.
  24. DHS, HAZUS-MH MR4 2009, Earthquake Model User Manual. Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency, Mitigation Division, Washington DC, 2009.
  25. Shafieezadeh A., Ramanathan K., Padgett J.E., DesRoches R., Fractional order intensity measures for probabilistic seismic demand modeling applied to highway bridges, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41, 391-409, 2012.
  26. Kale Ö., Evaluation of the Use of Fractional Order Intensity Measures in Probabilistic Seismic Demand Models by Single Degree of Freedom Systems, *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences*, 22, 427-436, 2018.
  27. Clough R. W., Johnston S. B., Effect of stiffness degradation on earthquake ductility requirements, 2. Ulusal Japon Deprem Mühendisliği Konferansı, Japonya, 227-232, 1966.
  28. Mahin S. A., Bertero V. V., Nonlinear seismic response of a coupled wall system, *Journal of Structural Engineering ASCE*, 102 (ST9), 1759-1780, 1976.
  29. Kadaş K., Yakut A., Kazaz İ., Spectral Ground Motion Intensity Based on Capacity and Period Elongation, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 137(3), 401-409, 2011.
  30. Kale Ö., Akkar S., Ansari A., Hamzehloo H., A ground-motion predictive model for Iran and Turkey for horizontal PGA, PGV and 5%-damped response spectrum: Investigation of possible regional effects, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(2A), 963-980, 2015.

31. Kale Ö., An Empirical Relationship Based on High-pass Filtering to Estimate Usable Period Range for Nonlinear SDOF Response, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009.
32. Cornell A.C., Jalayer F., Hamburger R.O., Foutch A.D., Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines, Journal of the Structural Engineering, 128, 526-533, 2002.
33. Vamvatsikos D., Cornell C.A., Incremental dynamic analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31, 491-514, 2002.
34. Jalayer F., De Risi R., Manfredi G., Bayesian Cloud Analysis: efficient structural fragility assessment using linear regression, Bulletin of Earthquake Engineering, 13, 1183-1203, 2015.
35. Baker J. W., Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis, Earthquake Spectra, 31 (1), 579-599, 2015.
36. Melchers R. E., Structural Reliability Analysis and Prediction, JohnWiley & Sons Ltd., West Sussex, England, second edition, 2002.
37. Akkar S., Sandıkkaya M. A., Şenyurt M., Sisi A.A., Ay B.Ö., Reference database for seismic ground motion in Europe (RESORCE), Bulletin of Earthquake Engineering, 12, 311-339, 2014.
38. Kale Ö., Padgett J. E., Shafieezadeh, A., A Ground Motion Prediction Equation for Novel Peak Ground Fractional Order Response Intensity Measures, Bulletin of Earthquake Engineering, 15, 9, 3437-3461, 2017.