

Kesirsel Mertebeli Şiddet Ölçülerinin Olasılıksal Sismik Talep Modellerinde Kullanımının Tek Serbestlik Dereceli Sistemlerle Değerlendirilmesi

Özkan KALE*¹

¹TED Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06420, Ankara

(Alınış / Received: 15.03.2018, Kabul / Accepted: 07.08.2018, Online Yayınlanma / Published Online: 20.09.2018)

Anahtar Kelimeler

Kesirsel mertebe,
Şiddet ölçüsü,
Sismik talep modeli,
Sismik risk

Özet: Bu çalışma kapsamında, yapıların sismik risk değerlendirmelerinin önemli bileşenlerinden biri olan olasılıksal sismik talep modellerinde (PSDM) kesirsel mertebeli şiddet ölçülerinin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, tek serbestlik dereceli (SDF) sistemlerin farklı seviyelerdeki doğrusal olmayan deplasman talepleri kullanılmıştır. Analizlerde, rijitlik azalımsız elastoplastik (bilineer) ve rijitlik azalımlı Clough davranım modelleri dikkate alınmıştır. SDF sistemlerin doğrusal olmayan davranış düzeyleri, normalize edilmiş akma kapasitesi (R) ve süneklik (μ) değerlerinin farklı seviyeleri ile hesaba katılmıştır. Genel değerlendirmeler, kesirsel mertebeli şiddet ölçüleri olarak maksimum kesirsel yer tepkileri ve T = 0.2 s ve 1.0 s için kesirsel sönümlü spektral ivme değerlerine karşılık seçilen konvansiyonel şiddet ölçülerinden maksimum yer ivmesi (PGA), yer hızı (PGV) ve yer deplasmanı (PGD) ve T = 0.2 s ve 1.0 s için spektral ivmeler kullanılarak yapılmıştır. Bu parametrelerle oluşturulan PSDM'lerden elde edilen belirleme katsayısı (R^2) ve model belirsizliğinin yanısıra hesaplanan korelasyon katsayılarının da yardımıyla kesirsel mertebeli şiddet ölçülerinin risk çalışmaları için uygunluğu değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, maksimum kesirsel yer tepkisi kullanılarak oluşturulan PSDM'lerin konvansiyonel şiddet ölçülerine göre daha düşük belirsizlik ve daha yüksek R^2 ve korelasyon katsayısına sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca en efektif kesirsel mertebeli değerlerinin de periyoda bağlı olarak değiştiği elde edilmiştir.

Evaluation of the Use of Fractional Order Intensity Measures in Probabilistic Seismic Demand Models by Single Degree of Freedom Systems

Keywords

Fractional order,
Intensity measure,
Seismic demand model,
Seismic risk

Abstract: Within the context of this study, potential use of fractional order intensity measures in probabilistic seismic demand models (PSDMs) which are one of the most important components in seismic risk evaluation of structures is assessed. In this respect, inelastic displacement demands of single degree of freedom (SDF) systems in various inelasticity levels are employed. Non-degrading elastic perfectly plastic (bilinear) and stiffness degrading Clough hysteretic models are considered in the analysis. Inelasticity levels of SDF systems are taken into account by different levels of normalized yield strength (R) and ductility (μ). The general evaluations are performed by the fractional order intensity measures of peak ground fractional responses and spectral acceleration with fractional damping at T = 0.2 s and 1.0 s in comparison with the conventional intensity measures of peak ground acceleration (PGA), velocity (PGV) and displacement (PGD), and spectral accelerations at T = 0.2 s and 1.0 s. Suitability of the fractional order intensity measures to the risk assessment studies are evaluated by the help of coefficient of determination (R^2), model uncertainty and correlation coefficient. The findings of the study indicate that the PSDMs generated from the peak ground fractional response have lower uncertainties and higher R^2 and correlation coefficient values with respect to the PSDMs obtained from the conventional intensity measures. In addition, the results show that the most efficient fractional order values vary depending on the spectral period.

1. Giriş

Yapıların performans dayalı sismik tasarımında ana etken parametre, dikkate alınan bir deprem tehlike seviyesi için yapısal hasar sınırlarının belirlenebilmesidir. Deprem tehlikesi, maksimum yer ivmesi, maksimum yer hızı, spektral ivme gibi bazı şiddet ölçüleriyle hesaba katılmaktadır. Buna karşın, hasar seviyelerinin belirlenmesinde ise maksimum tepe yer değiştirmesi, katlar arası görelî ötelenme miktarları gibi ölçütler dikkate alınmaktadır. Burada bahsedilen parametrelerin doğru tayini hem yapıların tasarımı hem de servis hayatı boyunca karşılaşılabilecekleri sismik etkiler karşısında kayıp tahminlerinin yapılması aşamalarında güvenilirliği artıran bir unsur olacaktır. Bu bağlamda, farklı disiplinlerin bir araya gelerek ortaya çıkaracağı deprem tehlike ve yapıların hasar görülebilirliği analizlerinin birleşiminden oluşan sismik risk değerlendirmeleri de oldukça önem kazanmaktadır.

Risk değerlendirmelerinin ilk bileşeni olan sismik tehlike analizleri esas olarak sismik kaynak tanımlamalarına ve yer hareketi tahmin denklemlerine dayanmaktadır. Güncel sismik tehlike analizlerinde sismik kaynaklar olarak fay ve alan kaynakların yanısıra mekansal düzleştirilmiş kaynaklar da kullanılmaktadır [1, 2]. Bu kaynaklardan dolayı oluşacak sismik aktivitelerin tahmininde ise bölgesel, ülke bazında veya global ölçekte üretilmiş yer hareketi tahmin denklemleri kullanılmaktadır [1, 3, 4]. Son yıllarda Avrupa (Seismic Harmonization in Europe, SHARE; [5]), Orta Doğu (Earthquake Model of the Middle East, EMME; [6]), Amerika Birleşik Devletleri [2] ve Türkiye (Türkiye Sismik Tehlike Haritasının Güncellenmesi, [1]) için yapılan sismik tehlike çalışmalarını dikkate aldığımızda maksimum yer ivmesi (PGA) ve farklı periyotlar için (genelde kısa ve orta-uzun periyotları temsil eden $T = 0.2$ s ve 1 s) spektral ivme (SA) değerlerinin sonuç olarak verildiği görülmektedir. Bu yaklaşım, araştırmacıları tahmin denklemlerinin genellikle PGA ve SA şiddet ölçülerini tahmin etmeye uygun olarak üretilmesi yönünde teşvik etmektedir. Bunun yanında son yıllarda yapılan çalışmalarda farklı şiddet ölçülerinin de deprem mühendisliği alanında kullanılabilir oldukları ve hatta daha güvenilir sonuçlar elde edilebildiği gerçeği de ortaya çıkmaktadır [7, 8].

Bir diğer risk bileşeni olan yapıların hasar görülebilirliği ise yapıların deprem zorlaması altındaki performanslarının tayinine dayanmaktadır. Yapıların performanslarının yer hareketi şiddet ölçülerinin (IM) bir fonksiyonu olarak belirlenmesinde kırılma eğrilerinin (fonksiyonlarının) kullanılması en genel yaklaşımdır. Kırılma eğrileri, dikkate alınan bir şiddet ölçüsü için yapıların veya yapısal bileşenlerin belirli bir hasar seviyesine ulaşacağı veya bu seviyeyi aşacağına olabirliğinin ifade edildiği koşullu olasılık fonksiyonlarıdır. Kırılma eğrileri

uzman görüşü, deprem sonrası hasar değerleri gibi daha basit yaklaşık yöntemlere göre elde edilebilmekle birlikte günümüzde daha gerçekçi sonuçlar veren yapı simülasyonları ve yapıların analitik modellenmesi yöntemleri de sıkça kullanılmaktadır [9, 10]. Bu bağlamda yapıların analitik modelleri kullanılarak yapılan olasılıksal sismik talep analizleri (PSDA) sonuçlarına göre oluşturulan olasılıksal sismik talep modelleri (PSDM), kırılma eğrilerinin üretilmesi aşamasının temelini oluşturmaktadır. Olasılıksal sismik talep modelleri çeşitli yapısal bileşenlerin maksimum talepleri ile şiddet ölçüleri arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir. Bu olasılıksal modelde koşullu bir değişken olan şiddet ölçüsü talebi kontrol eden oldukça önemli bir parametredir.

Literatürde şiddet ölçülerinin seçimiyle ilgili çok sayıda çalışma vardır. ATC-13' ün [11] yanısıra birçok araştırmacı tarafından da kullanılan Mercalli Şiddet Ölçüsü içerdiği belirsizlikler nedeniyle artık öznel bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Kuvvetli yer hareketi zaman serilerinden doğrudan elde edilebilen maksimum yer ivmesi (PGA) ve maksimum yer hızı (PGV) etkin şiddet ölçüleri arasında yer almaktadır. Bununla birlikte PGV şiddet ölçüsünün özellikle de yapıların elastik olmayan davranışlarındaki deformasyon taleplerini daha iyi yakaladığı için PGA'ya göre daha güvenilir olduğu gözlemlenmiştir [12, 13]. Bu bulgulara karşın Padgett vd. [14] köprüler için yaptıkları olasılıksal sismik talep analizleri sonucunda yeterlilik, pratiklik, yetkinlik ve verimlilik gibi ölçütleri göz önüne alarak PGA'yı ideal şiddet ölçüsü olarak önermişlerdir. ATC-63 [15] ve Luco ve Cornell [16]'da yapıların doğal titreşim periyodu için hesaplanmış spektral ivme değerlerinin şiddet ölçüsü olarak kullanılması önerilmektedir. HAZUS [17] risk değerlendirme yazılımında ise PGA, maksimum yer deplasmanı (PGD) ve $T = 1$ s için hesaplanan spektral ivme değerleri kullanılmaktadır. Scheme ve Cornell [18] ve Bazzurro ve Cornell [19] çalışmalarında, yapının birinci doğal titreşim periyodu (T_1) için elde edilen spektral ivmenin $\{SA(T_1)\}$ doğrudan kullanılması yerine ikinci mod periyodundan (T_2) elde edilen spektral ivme değerinin $\{SA(T_2)\}$ birinci mod değerine oranı $\{SA(T_2)/SA(T_1)\}$ ile birleştirilmesinden oluşan vektör tabanlı bir şiddet ölçüsü önerilmiştir. Baker ve Cornell yaptıkları çalışmada ise birinci mod spektral ivme değerleri ile yer hareketinin epsilon değerine bağlı bir şiddet ölçüsünün kullanılmasını önermişlerdir [20]. Burada epsilon belirli bir periyot için ivme kaydından hesaplanan spektral ivme değeri ile yer hareketi tahmin denkleminde hesaplanan spektral değer arasındaki farktan hesaplanmaktadır.

Shafieezadeh vd. [21] çalışmasında ise kullanılan şiddet ölçülerine farklı bir bakış açısı getirilmiştir. Kuvvetli yer hareketi ivme kayıtlarının kesirsel mertebeli türevlerine (veya integrallerine) bağlı olarak hesaplanan ve literatürde kesirsel mertebeli

matematik başlığı altında farklı bilim dallarında kullanılan bir yöntem izlenmiştir. Bu yöntemde kesirsel maksimum yer tepkisi ve $T = 0.2$ s ve 1.0 s için hesaplanan kesirsel tepki şiddet ölçüleri önerilmiştir. Bu çalışmada, belirli bir köprü türü için yapılan değerlendirmeler sonucunda kesirsel tepki değerlerinin konvansiyonel spektral değerlere göre hasar indeksleriyle çok daha iyi korelasyon gösterdiği ve belirsizliğin de konvansiyonel şiddet ölçülerine göre oldukça düşük seviyelerde kaldığı ortaya çıkmıştır [21].

Kesirsel mertebeli türev, matematik alanında yeni bir kavram olmamakla birlikte güçlü bilgisayar altyapılarının yoksunluğu ve mühendislik alanında çok aşıkır olunmayan bir yaklaşım olmasından dolayı uzun yıllar pratik mühendislik uygulamalarında yer almamıştır. Son yıllarda ise mühendislik uygulamalarındaki popülaritesi gittikçe artmaktadır. Visko-elastik malzeme modelleri [22], sinyal işleme [23], jeofizik mühendisliğinde potansiyel alan verileri [24], yapı mühendisliği [25] gibi genel mühendislik uygulamalarının yanında deprem mühendisliği alanında da sismik izolasyonlu sistemlerin ve zeminlerin modellenmesinde kesirsel mertebeli matematik önem kazanmaktadır [26, 27]. Shafieezadeh vd. [21] çalışmasında da bahsedildiği üzere kesirsel mertebeli şiddet ölçülerinin mühendislik sismolojisi ve deprem mühendisliği uygulamalarında daha yaygın olarak kullanılabilmesi için bu konu üzerine yeni çalışmalar yapılması gerekmektedir. Bu çalışmalar sayesinde Giovenale vd. [28] tarafından vurgulanan iyi bir şiddet ölçüsü parametresinin sahip olması gereken özelliklerinden yeterlilik, verimlilik ve tehlike hesaplarına uygunluk şartları sağlanabilmiş olacaktır.

Bu çalışma kapsamında, ilk olarak olasılıksal sismik talep modellerinin oluşturulması ve kesirsel mertebeli şiddet ölçülerinin genel hesap yöntemleriyle ilgili bilgiler verilmiştir. Sonraki aşamada, dikkate alınan kuvvetli yer hareketi veri setinin karakteristik özellikleri açıklanmıştır. Buna ek olarak tek serbestlik dereceli (SDF) sistemlerin doğrusal olmayan deplasman taleplerinin hesaplanmasında kullanılan rijitlik azalmsız elastoplastik ve rijitlik azalımlı Clough davranım modelleri ile ilgili temel bilgiler özetlenmiştir. Çalışmada SDF sistemlerin doğrusal olmayan davranış düzeyi, normalize edilmiş akma kapasitesi (R) ve süneklik düzeyindeki (μ) değişimlerle ifade edilmiştir. İlerleyen bölümlerde ise kesirsel mertebeli şiddet ölçülerinin genel değerlendirmeleri yapılmıştır. Çalışma kapsamında kesirsel mertebeli şiddet ölçüleri olarak maksimum kesirsel yer tepkisi ve kesirsel sönümlü spektral ivme değerleri ($T = 0.2$ s ve 1.0 s için) dikkate alınmıştır. Kesirsel mertebeli şiddet ölçülerinin kıyaslamalı olarak değerlendirilebilmesi amacıyla da literatürde olasılıksal sismik talep modellerinde sıklıkta tercih edilen konvansiyonel şiddet ölçülerinden maksimum

yer ivmesi (PGA), maksimum yer hızı (PGV), maksimum yer deplasmanı (PGD) ve $T = 0.2$ s ve 1.0 s için spektral ivme değerleri çalışma kapsamına dahil edilmiştir. Bu şiddet ölçüleriyle oluşturulan olasılıksal sismik talep modelleri için hesaplanan istatistiksel parametreler (belirleme katsayısı, model belirsizliği ve korelasyon katsayısı) yardımıyla kesirsel mertebeli şiddet ölçülerinin sismik risk çalışmalarında kullanımlarının efektif olup olmayacakları değerlendirilmiştir.

2. Olasılıksal Sismik Talep Modelleri

Risk çalışmalarının önemli bir unsuru olan olasılıksal sismik talep modellerinin formülasyonu da olasılıksal sismik talep analizlerinin yardımıyla elde edilmektedir. Bu çalışma kapsamında seçilen doğrusal olmayan davranım modelleri, analizlerde kullanılmak üzere derlenen deprem kaydı veri seti, şiddet ölçüleri (maksimum kesirsel yer tepkisi ve kesirsel sönümlü spektral ivme değerleri) ve talep parametreleri (maksimum osilatör deplasmanı) yöntemin ana unsurlarını teşkil etmektedir.

Olasılıksal sismik talep modeli (PSDM) Cornell vd. [29] çalışmasında koşullu sismik talep parametresi ile şiddet ölçüsü arasındaki ilişkiye göre iki parametrelili lognormal dağılım olarak ifade edilmiştir (Denklem 1).

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

Bu denklemde IM şiddet ölçüsünü, $\Phi(\bullet)$ standart kümülatif normal dağılım fonksiyonunu, S_D seçilen bir şiddet ölçüsü cinsinden medyan talep değerini (Denklem 2’de verilen a ve b parametreleriyle tanımlanan üstel fonksiyon olarak) ve $\beta_{D|IM}$ de lognormal standart sapma (veya model belirsizliği) değerini göstermektedir. S_D ve $\beta_{D|IM}$ değerlerinin hesaplanmasında kullanılan formülasyonlar sırasıyla Denklem 2 ve 3’te gösterilmiştir. Denklem 3’te verilen N parametresi toplam veri sayısını temsil etmektedir.

$$S_D = a(IM)^b \quad (2)$$

$$\beta_{D|IM} = \sqrt{\frac{\sum [\ln(d_i) - \ln(aIM^b)]^2}{N - 2}} \quad (3)$$

Olasılıksal sismik talep modellerinin genel formunda seçilen şiddet ölçüsünün önemli bir rol oynadığı unutulmamalıdır. Seçilen etkin bir şiddet ölçüsü, bu şiddet ölçüsü kullanılarak tahmin edilen talepteki belirsizliği en aza indirmelidir. Bu bağlamda, düşük $\beta_{D|IM}$ değerleri efektif şiddet ölçüsünün bir göstergesi olmaktadır. PSDM’lerden elde edilen belirleme katsayısı (R^2) değeri de bir diğer önemli unsurdur. R^2 değerinin yüksek değerler alması (0.9 ’dan büyük ve birim değere yakın) seçilen şiddet ölçüsü ile talep

parametresi arasında oluşturulan modelin uyum derecesinin yüksek olduğunun bir göstergesidir. Bunlara ek olarak korelasyon katsayısının yüksek değerleri de seçilen şiddet ve talep ölçüleri arasındaki ilişkinin gücünü belirtmektedir. Bu çalışma kapsamında, kesirsel mertebeli şiddet ölçülerinin sismik risk çalışmalarına uygunluğunun araştırılmasında bu istatistiksel parametreler üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. Bu değerlendirmeler, kesirsel mertebeli şiddet ölçülerine karşılık konvansiyonel şiddet ölçüleriyle oluşturulan PSDM'lerden hesaplanan istatistiksel parametrelerin karşılaştırılmasına dayanmaktadır.

3. Kesirsel Mertebeli Şiddet Ölçüleri

Mühendislik sismolojisi ve deprem mühendisliği alanında yer hareketi deplasman zaman serisinin tamsayı mertebeli (2, 1 ve 0) türevlerinin (nümerik türev) mutlak değerlerinin maksimumu sırasıyla PGA, PGV ve PGD değerlerini vermektedir. Yine yer hareketi ivme zaman serileri kullanılarak farklı salınım periyotlarına karşılık spektral ivme değerleri de hesaplanabilmektedir. Tamsayı mertebeler yerine kesirsel mertebeli türeve (veya integrale) geçiş yapılarak da yer hareketi ivmesinin α -integrali ve elastik (doğrusal) tek serbestlik dereceli sistemin spektral ivmesinin kesirsel tepki değerleri hesaplanabilmektedir. Bu durumlarda hesaplanan maksimum kesirsel yer tepkisi (PGR_α) ve kesirsel sönümlü spektral ivme ($SAd_{Tn,\alpha}$) değerlerinin pratik mühendislik hesaplarında kullanılabilmesi için bu değerleri tahmin edebilecek kesirsel yer hareketi tahmin denklemleri ve bu denklemler kullanılarak yapılan olasılıksal sismik tehlike analizlerinin literatüre kazandırılması da bir dip not olarak düşünülmelidir. Bu tür çalışmalar yapıldığında kesirsel şiddet ölçülerinin yapıların ve yapısal unsurların risk değerlendirmelerinde daha yaygın ve efektif olarak kullanılması için önemli bir gelişme kaydedilmiş olacaktır.

Kesirli mertebeli türev ve integral işlemleri için genel olarak Grunwald-Letnikov ve Riemann-Liouville yaklaşımları yaygın olarak kullanılmakla birlikte mühendislik uygulamalarında Caputo yöntemi daha fazla tercih edilmektedir [30]. Bunun sebebi, Caputo yönteminde dinamik sistemlerde deplasman ve hız gibi fiziksel olarak yorumu olan başlangıç koşullarının tanımlanabilmesidir. Caputo yöntemine göre $[0, T]$ aralığında tanımlanan $f(t)$ fonksiyonunun ($t \in [0, T]$ olmak üzere) α -türevi Denklem 4'te verilen evrişim (convolution) integrali ile ifade edilmektedir.

$${}_0^C D_t^\alpha f(t) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(\alpha - p)} \int_0^t \frac{f(\tau)^p}{(t - \tau)^{\alpha+1-p}} d\tau; \alpha \geq 0 \\ \frac{1}{\Gamma(-\alpha)} \int_0^t \frac{f(\tau)}{(t - \tau)^{\alpha+1}} d\tau; \alpha < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Bu denklemde p , $p-1 < \alpha \leq p$ koşulunu sağlayan bir tamsayı ve $\Gamma(\bullet)$ Euler Gama fonksiyonudur. Caputo kesirsel türev-integral Laplace dönüşümü uygulandığında ise $F(s)$, $f(t)$ fonksiyonunun Laplace dönüşümü ve s de Laplace dönüşüm değişkeni olmak kaydıyla Denklem 5 ile ifade edilebilmektedir.

$$L\{{}_0^C D_t^\alpha f(t); s\} = \begin{cases} s^\alpha F(s) - \sum_{k=0}^{p-1} s^{\alpha-k-1} f^{(k)}(0); \alpha \geq 0 \\ s^\alpha F(s); \alpha < 0 \end{cases} \quad (5)$$

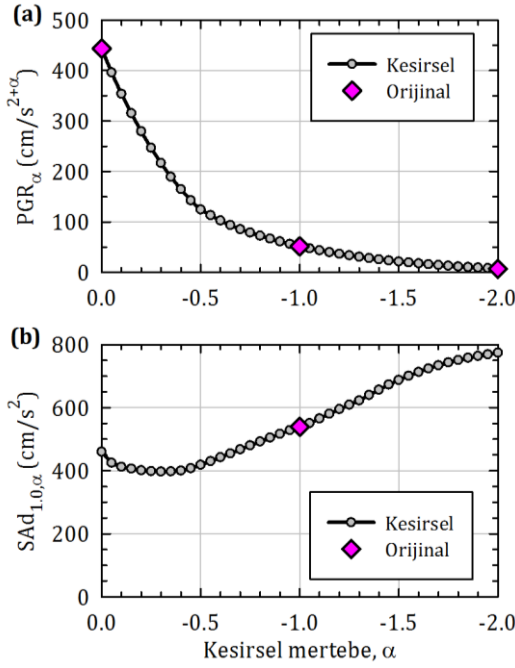
Bu denklem ise Oustalup vd. [31] ve Xue vd. [32] çalışmalarında önerilen Laplace alanında uygulanabilen yaklaşım algoritmaları yardımıyla çözülebilmektedir. Sonuç olarak Denklem 6 ve 7'de formülleri verilen maksimum yer kesirsel tepkisi (PGR_α) ve kesirsel spektral ivme ($SAd_{Tn,\alpha}$) değerleri belirlenebilmektedir. PGR_α analizlerde maksimum yer şiddetini karakterize eden PGA, PGV ve PGD yerine önerilirken $SAd_{Tn,\alpha}$ ise farklı salınım periyotları için hesaplanan yalancı (pseudo) spektral ivme değerleri yerine önerilmektedir.

$$PGR_\alpha = \max_0^T |{}_0^C D_t^\alpha \ddot{x}_g(t)| \quad (6)$$

$$SAd_{Tn,\alpha} = \omega^\alpha \max_0^T |{}_0^C D_t^{-\alpha} \dot{x}(t)| \quad (7)$$

Bu denklemlerde $\ddot{x}_g(t)$ ve $\dot{x}(t)$ sırasıyla yer hareketi ivmesi ve ivme tepkisini gösterirken ω ise açısal frekansı temsil etmektedir. Denklem 6'da α kesirsel mertebeli değişkenin alacağı -2, -1 ve 0 değerleri için hesaplanacak maksimum kesirsel yer tepkisi değerleri sırasıyla konvansiyonel şiddet ölçülerinden PGD, PGV ve PGA'ya karşılık gelmektedir. Denklem 7'de $\alpha = -1$ değerinde ise ilgili periyot değerine karşılık gelen yalancı (pseudo) spektral ivme değeri (PSA) hesaplanmaktadır.

Rasgele seçilmiş bir deprem kaydı kullanılarak Oustaloup yaklaşım tekniğinin uygulaması sonucunda hesaplanan kesirsel mertebeli şiddet ölçülerinin konvansiyonel şiddet ölçüleri ile karşılaştırması Şekil 1'de gösterilmiştir. Hesaplarda bilgisayar algoritması olarak Shafieezadeh vd. [21] çalışmasında geliştirilen Matlab tabanlı yazılım kullanılmıştır. Bu şekilde, belirli yaklaşımlar dikkate alınarak hesaplanan kesirsel mertebeli şiddet ölçüleri gri dairelerle gösterilirken klasik yöntemlerle elde edilen konvansiyonel şiddet ölçülerinin değerleri de renkli dörtgenlerle temsil edilmiştir. Burada, kesirsel mertebeli şiddet ölçülerinin hesabında belirli yaklaşımların kullanıldığı unutulmamalıdır. Bununla birlikte Şekil 1'de verilen karşılaştırmalar, konvansiyonel şiddet ölçülerine karşılık hesaplanan kesirsel mertebeli değerlerin son derece tutarlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 1. Bir deprem kaydı için elde edilen konvansiyonel (orijinal) ve kesirsel mertebeli şiddet ölçülerinin karşılaştırması: a) Maksimum kesirsel yer tepkisi (PGR_{α}), b) $T=1.0$ s için kesirsel sönümlü spektral ivme ($SAd_{Tn,\alpha}$).

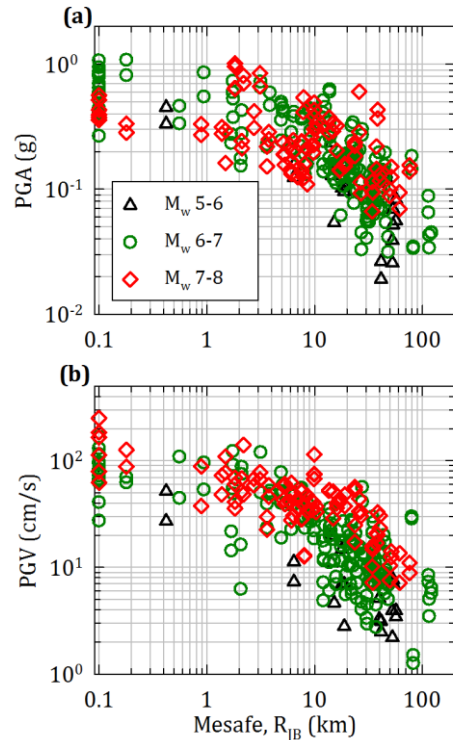
4. Deprem Kaydı Veri Seti ve Davranım Modelleri

Bu çalışma kapsamında Baker vd. [33] çalışmasında derlenen 160 yatay bileşen deprem kaydı çifti içeren veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti magnitüd aralığı 4.3 ile 7.9 arasında değişen ve aktif sığ kabuk içi deprem mekanizmasına sahip depremlerden kaydedilmiş kuvvetli yer hareketi kayıtlarını içermektedir. Veri seti genel özellikleri açısından 4 ana gruba ayrılmaktadır. İlk 3 grup toplamda 120 kayıt çifti içermektedir ve davranış spektrumu dağılımları orta ve büyük moment magnitüdü (M_w) yakın mesafe kayıtlarıyla uyum göstermektedir. Son grup ise 40 deprem kaydı çifti içermektedir ve hız vurumlu (velocity pulse) deprem kayıtları olarak sınıflandırılmaktadır. Bu grup ile faya yakın mesafedeki sahaların etkileri dikkate alınabilmektedir. Deprem kayıtlarının zemin özellikleri de yumuşak, sıkı ve kaya zemin grupları olarak dağılım göstermektedir.

Şekil 2’de veri tabanındaki kayıtlara ait PGA ve PGV değerlerinin farklı moment magnitüd (M_w 5-6, 6-7 ve 7-8) aralıkları için Joyner-Boore mesafesine (R_{JB}) göre dağılımları gösterilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, seçilen veri tabanının PGA ve PGV şiddet ölçüleri ve magnitüd ve mesafe deprem parametreleri cinsinden düzgün bir dağılım gösterdiği ve çalışmanın kapsamına uygun olduğu sonucu çıkarılabilir.

Bu veri tabanı kullanılarak SDF’ler için doğrusal olmayan deplasman talep değerleri, rijitlik azalmsız elastoplastik (bilineer) ve rijitlik azalmsız Clough davranım modelleri kullanılarak normalize edilmiş

akma kapasitesi (R) ve sünellik düzeyi (μ) değerlerinin farklı seviyeleri için elde edilmiştir. Elastoplastik modelde akma sonrası rijitlik değeri %0 olarak dikkate alınmaktadır [34] ve yine akma sonrasında gerçekleşen geri yükleme aşamasında doğrusal bölgeye göre herhangi bir rijitlik azalımı olmamaktadır. Rijitlik azalmsız Clough modeli ise 1966’ da Clough ve Johnston [35] tarafından önerilen orijinal modelin Mahin and Bertero [36] çalışmasında modifiye edilmiş halidir. Bu davranım modelinde, akma sonrası rijitlik değeri doğrusal bölgedeki rijitliğin %3’ü olarak dikkate alınırken akma sonrası geri yükleme aşamasında rijitlik azalım parametresi de 0.5 olacak şekilde rijitlik azalımı hesaba katılmaktadır.



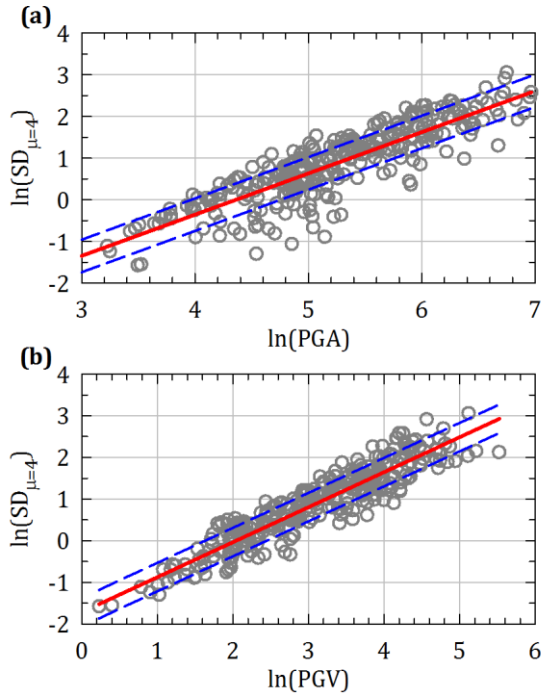
Şekil 2. Kuvvetli yer hareketi veri setinin farklı magnitüd aralıkları için mesafeye göre a) PGA, b) PGV dağılımları.

5. Kesirsel Mertebeli Şiddet Ölçülerinin Değerlendirilmesi

Çalışmada dikkate alınan veri tabanı için rijitlik azalmsız elastoplastik ve rijitlik azalmsız Clough davranım modellerinin $R = 4, 6, 8$ ve $\mu = 4, 6, 8$ düzeylerindeki doğrusal olmayan deplasman talepleri $T = 0.1$ s – 10 s periyot aralığında hesaplanmıştır. Bu spektral değerlere ek olarak olasılıksal sismik talep modellerinin elde edilebilmesi amacıyla da konvansiyonel (PGA; PGV; PGD; $T = 0.2$ s ve 1.0 s’ deki spektral ivmeler, $SA_{T=0.2s}$ ve $SA_{T=1.0s}$) ve kesirsel mertebeli şiddet ölçülerinin (PGR_{α} , $SAd_{0.2,\alpha}$, $SAd_{1.0,\alpha}$) değerleri de elde edilmiştir.

Şekil 3’te, PGA ve PGV şiddet ölçüleriyle elastoplastik modelin $T = 0.5$ s (doğal titreşim periyodu) ve $\mu = 4$ değeri için elde edilmiş spektral deplasman taleplerine ($SD_{\mu=4}$) ait olasılıksal sismik talep

modellemeleri gösterilmektedir. Burada $\ln(\text{PGA})$ ve $\ln(\text{PGV})$ değerlerine karşılık çizilen $\ln(\text{SD}_{\mu=4})$ değerlerine uydurulan doğrusal denklemin medyanı sürekli kırmızı çizgi ve medyan ± 1 standart sapma değerleri de kesikli mavi çizgilerle gösterilmiştir. Oluşturulan alternatif PSDM'lerden Şekil 3.a'da verilen durumun istatistiksel parametreleri $R^2 = 0.81$, $\beta_{\text{D|IM}} = 0.389$, $\rho = 0.90$ iken Şekil 3.b'deki PGV durumunda bu parametreler $R^2 = 0.86$, $\beta_{\text{D|IM}} = 0.341$, $\rho = 0.93$ olarak elde edilmiştir. Bu parametreler değerlendirildiğinde, yüksek R^2 , ρ ve düşük $\beta_{\text{D|IM}}$ değerlerine sahip PGV PSDM'inin bu örneğe benzer özelliklere sahip yapıların sismik risk değerlendirmelerinde kullanımının daha uygun olacağı yorumu yapılabilmektedir. Bu gözlem, Akkar ve Özen [13] çalışmasındaki bulgularla da örtüşmektedir.

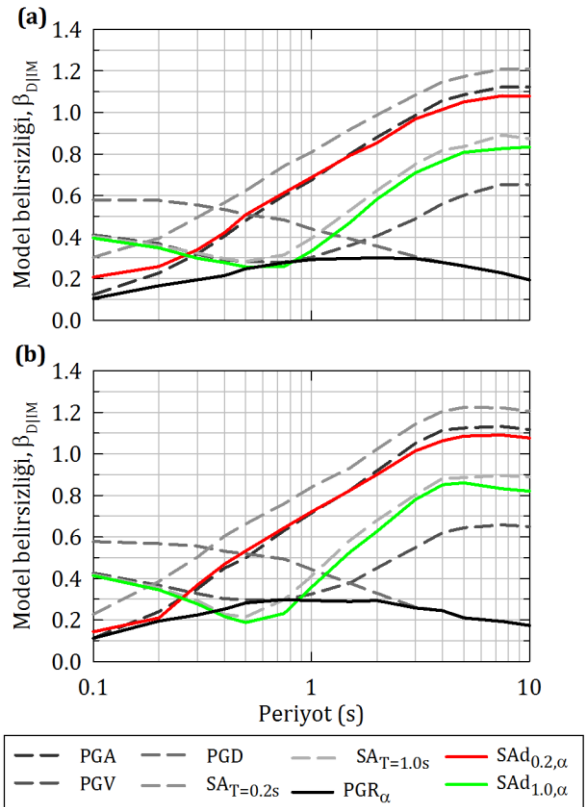


Şekil 3. $T = 0.5$ s periyotlu elastoplastik model ($\mu = 4$) için oluşturulan örnek olasılıksal sismik talep modelleri: a) PGA, b) PGV.

Bu çalışma kapsamında, kesirsel mertebeli şiddet ölçülerinin değerlendirilebilmesi amacıyla Şekil 3'te örneklendirildiği şekilde, dikkate alınması planlanan bütün konvansiyonel ve kesirsel şiddet ölçüleri için PSDM'ler elde edilmiştir. Bunlara ait istatistiksel parametreler (R^2 , ρ ve $\beta_{\text{D|IM}}$) ise elastoplastik ve Clough davranım modelleri için hesaplanmıştır. Şekil 4 ve 5'te dikkate alınan şiddet ölçülerinin sırasıyla R^2 ve $\beta_{\text{D|IM}}$ cinsinden periyoda göre değişimleri gösterilmektedir. Burada kesirsel şiddet ölçülerinin kesirsel mertebesi (α) değerleri, ilgili periyot değerinde en iyi sonucu veren α için hesaplanan R^2 veya $\beta_{\text{D|IM}}$ değerleridir. Periyoda karşılık en efektif α değerleri ise ilerleyen paragraflarda ve şekillerde açıklanmıştır.

Bu karşılaştırmalarda konvansiyonel şiddet ölçülerinin genel performansları incelendiğinde, kısa periyotlarda PGA, orta-ara periyot değerlerinde PGV

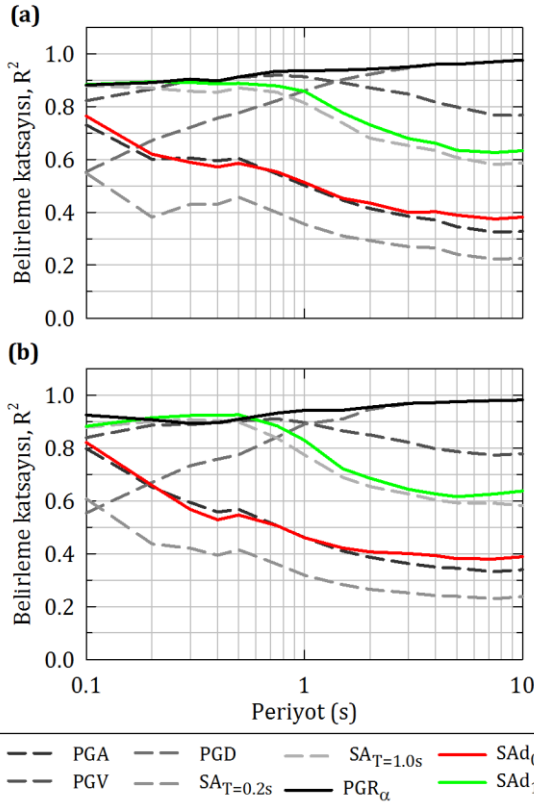
ve uzun periyotlarda da PGD şiddet ölçülerinin sismik risk değerlendirmeleri için daha uygun olacağı gözlemlenmektedir. Bu gözlem, konvansiyonel şiddet ölçülerinin frekans içerik tanımlarıyla da uyusmaktadır. Kesirsel şiddet ölçülerinden $\text{SA}_{T=0.2s}$ şiddet ölçüsünün performansı diğer ölçülere göre daha düşük seviyede kalmaktadır. Konvansiyonel şiddet ölçüleri, çalışmada seçilen periyot aralığı için genel davranışları bakımından incelendiğinde ise PGV'nin en uygun şiddet ölçüsü olduğu çıkarımı yapılabilmektedir. Kesirsel şiddet ölçülerinin performansları değerlendirildiğinde ise ilk olarak bahsedilebilecek gözlem PGA ile $\text{SA}_{0.2,\alpha}$ ve $\text{SA}_{T=1.0s}$ ile de $\text{SA}_{1.0,\alpha}$ arasında çok benzer davranışların olduğudur. PGR_α şiddet ölçüsünün periyoda bağlı davranışı ise diğer şiddet ölçülerine (konvansiyonel veya kesirsel) göre daha farklı eğilimler göstermektedir. Genel olarak periyot aralığına bakıldığında PGR_α şiddet ölçüsünün konvansiyonel ve kesirsel şiddet ölçüleri arasında en iyi sonuçları veren şiddet ölçüsü olduğu gözlemlenmektedir. Bazı periyot değerlerinde ise $\text{SA}_{1.0,\alpha}$ şiddet ölçüsünün performansı PGR_α 'nın performansına yaklaşmakta ve hatta geçmektedir. PGA, $\text{SA}_{T=0.2s}$ ve $\text{SA}_{0.2,\alpha}$ şiddet ölçülerinin genel performansları diğer şiddet ölçülerine göre daha düşüktür.



Şekil 4. Farklı şiddet ölçüleri için model belirsizliği ($\beta_{\text{D|IM}}$) değerlerinin periyoda göre değişimi: a) Elastoplastik model, $\mu=8$; b) Clough model, $\mu=8$.

Bu gözlemler ışığında, Şekil 3'te PGA ve PGV konvansiyonel şiddet ölçüleri dikkate alınarak incelenen senaryo için kesirsel mertebeli şiddet ölçülerinden PGR_α ve $\text{SA}_{1.0,\alpha}$ kullanılarak PSDM'ler oluşturulmuştur ve elde edilen dağılımlar Şekil 6'da

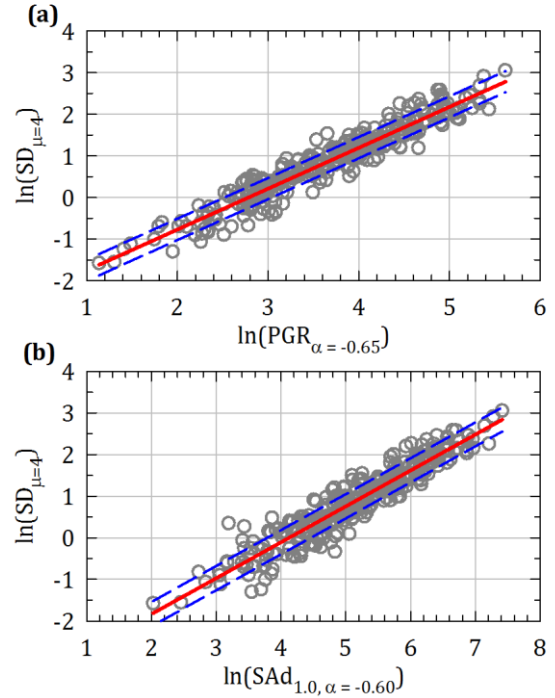
gösterilmiştir. Alternatif PSDM'lerden Şekil 6.a'da PGR_{α} için gösterilen durumun istatistiksel parametreleri $R^2 = 0.92$, $\beta_{D|IM} = 0.255$, $\rho = 0.96$ iken Şekil 6.b'deki $SAd_{1.0,\alpha}$ durumunda bu parametreler $R^2 = 0.90$, $\beta_{D|IM} = 0.290$, $\rho = 0.95$ olarak elde edilmiştir. Bu örneklerdeki istatistiksel parametreler hesaplanırken PGR_{α} ve $SAd_{1.0,\alpha}$ için kesirsel mertebeye değerleri sırasıyla $\alpha = -0.60$ ve $\alpha = -0.65$ olarak dikkate alınmıştır. Bu değerler, incelenen senaryo için en efektif α değerleri olarak elde edilen değerlerdir. Şekil 3 ve Şekil 6'da elde edilen PSDM'ler karşılaştırıldığında, kesirsel mertebeli şiddet ölçüleri kullanıldığı zaman özellikle $\beta_{D|IM}$ değerlerinde ciddi bir iyileşme olduğu görülmektedir. $\beta_{D|IM}$ değeri PGV için 0.341 iken $PGR_{\alpha} = -0.65$ için yaklaşık olarak %25 daha düşük olan 0.255 değerine indirilebilmektedir. R^2 ve ρ değerleri için de $\beta_{D|IM}$ değerindeki kadar yüksek olmamakla birlikte belirli bir düzeyde performans artışı olduğu çıkarımı yapılabilmektedir.



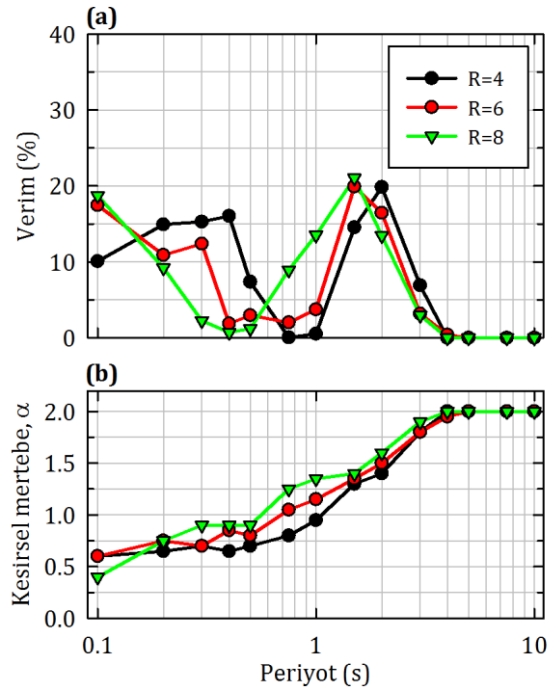
Şekil 5. Farklı şiddet ölçüleri için belirleme katsayısı (R^2) değerlerinin periyoda göre değişimi: a) Elastoplastik model, $R=8$; b) Clough model, $R=8$.

Şekil 7 ve 8'de elastoplastik modelin farklı sabit R ve sabit μ değerleri için periyoda bağlı olarak çizilen performans artışı (yani verim; Şekil 7.a ve 8.a) ve bunlara karşılık gelen en efektif kesirsel mertebeye değerlerinin (Şekil 7.b ve 8.b) değişimleri gösterilmektedir. Bu şekillerde kesirsel mertebeli şiddet ölçüsü olarak önceki paragraflarda yapılan değerlendirmeler ışığında PGR_{α} seçilmiştir. Yüzdelerden verim değerleri, ilgili periyot değerinde konvansiyonel şiddet ölçüleri (PGA, PGV, PGD, $SA_{T=0.2s}$ ve $SA_{T=1.0s}$) için elde edilen en düşük $\beta_{D|IM}$ değeri ile PGR_{α} için elde edilen $\beta_{D|IM}$ değerinin oranı dikkate

alınarak hesaplanmıştır. Örneğin verim değerinin %30 olması, PGR_{α} kullanıldığı zaman $\beta_{D|IM}$ değerinin konvansiyonel en iyi durumuyla karşılaştırıldığında %30 daha düşük olduğu anlamına gelmektedir.



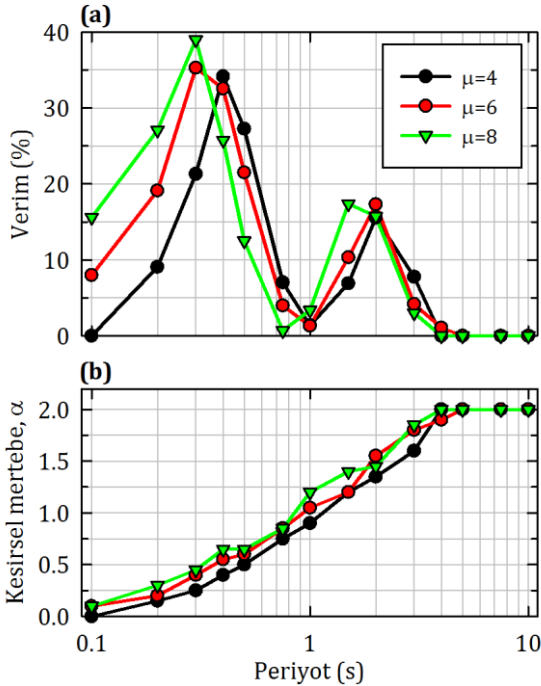
Şekil 6. $T = 0.5$ s periyotlu elastoplastik model ($\mu = 4$) için oluşturulan örnek olasılıksal sismik talep modelleri: a) $PGR_{\alpha} = -0.65$, b) $SAd_{1.0, \alpha} = -0.60$.



Şekil 7. Elastoplastik model farklı sabit R seviyeleri ve PGR_{α} için a) verim, b) kesirsel mertebeye değeri (mutlak değer olarak) değişimleri.

Clough model için elde edilen değişimler de Şekil 7 ve 8'de gösterilenler ile son derece tutarlıdır. Bu bağlamda, burada yapılacak değerlendirmeler her iki davranım modeli için de geçerli olacaktır. Şekil 7 ve 8'de verilen genel davranışlar incelendiğinde, sabit R

modeli için $T < 0.4$ s ve $T \sim 1.5 - 2$ s civarı için %15 - 20 mertebelerinde verimden söz etmek mümkündür. Sabit μ modelinde ise $T \sim 0.2 - 0.5$ s aralığında verim %35 - 40 seviyelerine ulaşırken $T \sim 1.5 - 2$ s civarı için yine sabit R modeline benzer şekilde %15 - 20 mertebelerinde değerler almaktadır. R^2 ve ρ için yapılan değerlendirmelerde ise hesaplanan verim değerlerinin bu derece yüksek olmamakla birlikte %10 - 15 seviyelerine ulaşabildiği durumlar gözlemlenmiştir. Kesirsel mertebeye (α) değerleri incelendiğinde ise küçük periyot aralıklarında sabit R ve μ modelleri arasında bir farklılık göze çarpmaktadır. Sabit R modeli $\alpha = -0.5$ değeri ile başlarken sabit μ modeli $\alpha = -0.1$ civarında başlamaktadır. Sonraki periyot aralıklarında ise benzer değişimler gözlemlenmektedir. Çalışmanın önceki bölümlerinde de bahsedildiği üzere PGR_α şiddet ölçüsü $\alpha = 0, -1$ ve -2 değerleri için konvansiyonel şiddet ölçülerinden sırasıyla PGA, PGV ve PGD'ye eşit olmaktadır. Bu bağlamda, PGR_α $T \sim 0.7 - 0.9$ s civarında PGV'ye ve $T = 4$ s'den başlayarak da PGD'ye eşit olmaktadır. Bu durum, belirtilen periyot aralıklarındaki verim değerlerinin düşmesini efektif bir şekilde açıklamaktadır. Genel olarak PGV ve PGD konvansiyonel şiddet ölçülerinin bu periyot değerlerinde olasılıksal sismik talebi modellemede daha etkin olacaklarından da bu aşamada tekrar bahsedilebilir.



Şekil 8. Elastoplastik model farklı sabit μ seviyeleri ve PGR_α için a) verim, b) kesirsel mertebeye değeri (mutlak değer olarak) değişimleri.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada, kesirsel mertebeli şiddet ölçülerinin olasılıksal sismik talep modelleri yardımıyla sismik risk değerlendirmelerine yapabilecekleri potansiyel katkılar değerlendirilmiştir. Olasılıksal sismik talep modellerinde elastoplastik ve Clough davranım

modelleri için R ve μ değerlerinin farklı seviyelerinde tek serbestlik dereceli (SDF) sistemlerin doğrusal olmayan deplasman talepleri, dikkate alınan kuvvetli yer hareketi veri tabanı altında elde edilmiştir. Analizlerde kesirsel mertebeli şiddet ölçülerinden PGR_α , $SAd_{0.2,\alpha}$, $SAd_{1.0,\alpha}$ dikkate alınmıştır. Buna ek olarak gerekli karşılaştırmaların ve değerlendirmelerin yapılabilmesi amacıyla da konvansiyonel şiddet ölçüleri olarak PGA, PGV, PGD, $SA_{T=0.2s}$ ve $SA_{T=1.0s}$ kullanılmıştır. Bu parametrelerle oluşturulan olasılıksal sismik talep modellerinden elde edilen R^2 , $\beta_{D|IM}$ ve ρ istatistiksel katsayılarının yardımıyla kesirsel mertebeli şiddet ölçülerinin sismik risk analizlerine yapabilecekleri potansiyel katkılar araştırılmıştır.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda elastoplastik ve Clough davranım modelleri için benzer sonuçlar elde edilmiştir. Kesirsel mertebeli şiddet ölçülerinden genel davranış olarak PGR_α , konvansiyonel şiddet ölçülerine göre $\beta_{D|IM}$ ile dikkate alınan model belirsizliğinin belirli periyot aralıklarında ciddi anlamda düşürülmesini sağlamıştır. Orta-uzun periyot ve uzun periyot bölgelerinde sırasıyla konvansiyonel şiddet ölçülerinden PGV ve PGD olasılıksal sismik talep modellerinde düşük $\beta_{D|IM}$ ve yüksek R^2 ve ρ değerlerine sahip olmuşlardır. Davranım modelleri için sabit R ve sabit μ değerlendirmeleri göz önüne alındığında kısa periyotlarda bazı farklılıklar gözlenmekle birlikte genel olarak benzer çıkarımlar yapılmıştır. Bununla birlikte süneklik düzeyi (μ değeri) yüksek durumlar ve orta periyot değerleri ($T = 0.2 - 0.5$ s aralığı) dikkate alındığında, kesirsel mertebeli şiddet ölçülerinin belirsizliği çok daha yüksek ölçülerde azalttığı gözlenmiştir. En efektif kesirsel mertebeye (α) değerlerinin periyoda bağlı olarak değiştiği ve elastoplastik ve Clough model için kısa periyotlarda belirli bir farklılık olduğu, orta ve uzun periyot değerlerinde ise benzer davranışların bulunduğu elde edilmiştir. R ve μ değerlerinin seviye değişiminin ise α değerlerini çok etkilemediği gözlemlenmiştir.

Bu çalışma sonucunda, tek serbestlik dereceli sistemler için yapılan ön analizler sonucunda kesirsel mertebeli şiddet ölçülerinin farklı türden yapıların sismik risk değerlendirmelerinde kullanılması durumunda analizlerde belirsizliğin azaltılması yönünde belirli ölçülerde katkı sağlanabileceği çıkarımı yapılabilir. Bu noktadan hareketle, yapıların sismik değerlendirmelerinde önerilen bu şiddet ölçülerinin dikkate alınması durumunda, bu çalışmada elde edilen bulguların daha detaylı bir biçimde değerlendirilme imkanı da sağlanmış olacaktır.

Teşekkür

Yazar bu çalışma kapsamında kesirsel mertebeli şiddet ölçülerinin hesaplarında kullanılan yazılımı paylaştığı için Dr. A. Shafieezadeh'e teşekkür eder.

Kaynakça

- [1] Akkar, S., Azak, T., Can, T., Çeken, U., Demircioğlu, M.B., Duman, T., Erdik, M., Ergintav, S., Kadirioğlu, F.T., Kalafat, D., Kale, Ö., Kartal, R.F., Kekovali, K., Kilic, T., Özalp, S., Altuncu Poyraz, S., Sesetyan, K., Tekin, S., Yakut, A., Yilmaz, M.T., Yucemen M.S. ve Zulfikar, Ö. 2018. Evolution of seismic hazard maps in Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16, 3197–3228.
- [2] Petersen, M., Frankel, A., Harmsen, S., Mueller, C., Haller, K., Wheeler, R., Wesson, R., Zeng, Y., Boyd, O., Perkins, D., Luco, N., Field, E., Wills, C., Rukstales, K. 2008. Documentation for the 2008 Update of the United States National Seismic Hazard Maps. U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1128, 61 s.
- [3] Delavaud, E., Cotton, F., Akkar, S., Scherbaum, F., Danciu, L., Beauval, C., Drouet, S., Douglas, J., Basili, R., Sandikkaya, M. A., Segou, M., Faccioli, E., Theodoulidis, N. 2012. Toward a Ground-Motion Logic Tree for Probabilistic Seismic Hazard Assessment in Europe. *Journal of Seismology*, 16, 451-473.
- [4] Stewart, J.P., Douglas, J., Javanbarg, M., Abrahamson, N.A., Bozorgnia, Y., Boore, D.M., Campbell, K.W., Delavaud, E., Erdik, M., Stafford, P.J. 2015. Selection of ground motion prediction equations for the global earthquake model. *Earthquake Spectra*, 31, 19-45.
- [5] Giardini, D., Woessner, J., Danciu, L. 2014. Mapping Europe's Seismic Hazard. *EOS*, 95, 261-262.
- [6] Şeşetyan, K., Danciu, L., Demircioğlu Tümsa, M.B., Giardini, D., Erdik, M., Akkar, S. vd. 2018. The 2014 seismic hazard model of the Middle East: overview and results. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16, 3535–3566.
- [7] Kadaş, K., Yakut, A. 2013. Utilization of Alternative Intensity Measures in the Formation of Ground Motion Record Sets for Seismic Demand Analyses. 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 25-27 Eylül, Hatay.
- [8] Wang, X., Shafieezadeh, A., Ye, A. 2018. Optimal intensity measures for probabilistic seismic demand modeling of extended pile-shaft-supported bridges in liquefied and laterally spreading ground, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16, 229–257.
- [9] Nielson, B.G. 2005. Analytical Fragility Curves for Bridges in Moderate Seismic Zones. Georgia Tech Üniversitesi, İnşaat ve Çevre Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi, 373 s, Atlanta, Amerika Birleşik Devletleri.
- [10] Padgett, J.E. 2007. Seismic Vulnerability Assessment of Retrofitted Bridges Using Probabilistic Methods. Georgia Tech Üniversitesi, İnşaat ve Çevre Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi, 251 s, Atlanta, Amerika Birleşik Devletleri.
- [11] ATC 1985. Earthquake Damage Evaluation Data for California. ATC-13. Applied Technology Council: California.
- [12] Sucuoğlu, H., Erberik, M.A. 1998. Influence of ground motion intensity parameters on elastic response spectra. 11. Avrupa Deprem Mühendisliği Konferansı, 6-11 Eylül, Paris.
- [13] Akkar, S., Özen, Ö. 2005. Effect of peak ground velocity on deformation demands for SDOF systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34, 1551-1571.
- [14] Padgett, J.E., Nielson, B.G. ve DesRoches, R. 2008. Selection of optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of highway bridge portfolios. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37, 711-725.
- [15] ATC 2008. Quantification of Building Seismic Performance Factors ATC-633/FEMA P695. Applied Technology Council: California.
- [16] Luco, N. Cornell, A.C. 2007. Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earthquake ground motions. *Earthquake Spectra*, 23, 357-392.
- [17] DHS, HAZUS-MH MR4 2009. Earthquake Model User Manual. Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency, Mitigation Division, Washington, DC.
- [18] Shome, N., Cornell, A.C. 1999. Probabilistic Seismic Demand Analysis of Nonlinear Structures. Stanford Üniversitesi, İnşaat ve Çevre Mühendisliği Bölümü, Reliability of Marine Structures Programı Rapor No. RMS-35, Kaliforniya.
- [19] Bazzurro, P., Cornell, A.C. 2002. Vector-values probabilistic seismic hazard analysis (VP-SHA). 7. ABD Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 21-25 Temmuz, Boston, MA.
- [20] Baker, J.W., Cornell, C.A. 2005. A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34, 1193-1217.
- [21] Shafieezadeh, A., Ramanathan, K., Padgett, J.E., DesRoches, R. 2012. Fractional order intensity measures for probabilistic seismic demand modeling applied to highway bridges. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41, 391-409.

- [22] Meral, F., Royston, T., Magin, R. 2010. Fractional calculus in viscoelasticity: an experimental study. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 15, 939–945.
- [23] Das, S., I. Pan 2012. Fractional Order Integral Transforms. *Fractional Order Signal Processing*, 2012, 51-65.
- [24] Arısoy, M.Ö. 2012. Potansiyel alan verilerinin kesirsel mertebeye türevler ile değerlendirilmesi. Ankara Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi, 78 s, Ankara.
- [25] Ruge, P., Trinks, C. 2004. Consistent modelling of infinite beams by fractional dynamics. *Nonlinear Dynamics*, 38, 267–284.
- [26] Koh, C.G., Kelly, J.M. 1990 Application of fractional derivatives to seismic analysis of base-isolated models. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 19, 229–241.
- [27] Dikmen, Ü. 2005. Modeling of seismic wave attenuation in soil structures using fractional derivative scheme. *Journal of Balkan Geophysics Society*, 8, 175–188.
- [28] Giovenale, P., Cornell, A.C., Esteva, L. 2004. Comparing the adequacy of alternate ground motion intensity measures for the estimation of structural responses. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33, 951-979.
- [29] Cornell, A.C., Jalayer, F., Hamburger, R.O., Foutch, A.D. 2002. Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines. *Journal of the Structural Engineering*, 128, 526-533.
- [30] Podlubny, I. 1999. *Fractional Differential Equations*. Academic Press: New York, 350 s.
- [31] Oustaloup, A., Levron, F., Nanot, F., Mathieu, B. 2000. Frequency-band complex non-integer differentiator: characterization and synthesis. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 47, 25-39.
- [32] Xue, D., Zhao, C.N., Chen, Y.Q. 2006. A modified approximation method of fractional order system. 2006 IEEE Mekatronik ve Otomasyon Konferansı, 25-28 Haziran, Luoyang, Çin, 1043-1048.
- [33] Baker, J. W., Lin, T., Shahi, S. K., Jayaram, N. 2011. New Ground Motion Selection Procedures and Selected Motions for the PEER Transportation Research Program. PEER Technical Report 2011/03, 106 s.
- [34] Otani, S. 1981. Hysteresis models of reinforced concrete for earthquake response analysis. *Journal of Faculty of Engineering, University of Tokyo*, 36, 407-441.
- [35] Clough, R. W., Johnston, S. B. 1966. Effect of stiffness degradation on earthquake ductility requirements. 2. Ulusal Japon Deprem Mühendisliği Konferansı, Japonya, 227-232.
- [36] Mahin, S. A., Bertero, V. V. 1976. Nonlinear seismic response of a coupled wall system. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 102 (ST9), 1759-1780.