

Anlık Güç Spektrumu ile Eşleştirilmiş Kayıtların Tek Serbestlik Dereceli Sistemlerin İnelastik Yer Değiştirmelerine Etkisi

Esra ZENGİN¹

¹ Beykent Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

e-posta: esrazengin@gmail.com ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6543-4526>

Geliş Tarihi: 18.11.2021

Kabul Tarihi: 22.02.2022

Öz

Yapının birinci periyodundaki elastik spektral ivme ($Sa(T_1)$) ile anlık güç ($IP(T_1)$) parametresinin birlikte kullanılması, yapının sismik tasarım ve değerlendirilmesinde yakın saha deprem kayıtlarının darbe özelliklerinin açıkça dikkate alınması ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Yakın zamanda önerilen kayıt eşleştirme algoritmasında, yakın saha yer hareketleri hedef Sa spektrumu ve IP spektrumu ile aynı anda eşleşmektedir. Bu çalışma, IP 'nin kayıt eşleştirmedeki önemini yalnızca Sa ile eşleştirilen kayıtlardan ve Sa ve IP ile eşleştirilen kayıtlardan elde edilen tek serbestlik dereceli sistemlerin doğrusal olmayan yer değiştirmelerini karşılaştırarak değerlendirmektedir. Orijinal ve eşleştirilen kayıtların sonuçları arasında herhangi bir fark olup olmadığını ve maksimum yer değiştirmeler arasındaki farklılıkların ne ölçüde kayıt setlerinin IP 'lerindeki farklılıklara atfedilebileceğini test etmek için orijinal kayıtlarla da doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Yer değiştirme değerlerinin kayıt setlerinin median IP seviyelerine duyarlı olabileceği ve kayıt eşleştirmede IP parametresinin dikkate alınmasının yakın saha yer hareketlerine maruz kalan yapıların performanslarının doğru bir şekilde tahmin edilmesinde önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler

Yakın saha yer hareketleri; Darbeli kayıtlar; Kayıt eşleştirme; Doğrusal olmayan dinamik analiz

Influence of Instantaneous Power Spectrum Matched Records on Inelastic Displacements of Single-Degree-of-Freedom Systems

Abstract

The use of Instantaneous Power ($IP(T_1)$) together with elastic spectral acceleration at the first mode period of the structure ($Sa(T_1)$) alleviates the need for explicit consideration of pulse characteristics of the near-fault records in seismic design and assessment of structures. A recently proposed record matching algorithm can simultaneously match the near-fault records to the target Sa - and IP - spectrum. This study evaluates the influence of consideration of IP in the record matching process by comparing the maximum inelastic displacements of single-degree-of-freedom systems obtained from Sa -only matched records and Sa - and IP -matched records. We also consider original records to test whether there are any differences between the results of original and matched records and to what extent the differences in structural responses can be attributed to differences in IP s of the record sets. We find that inelastic displacements can be sensitive to the median IP levels of the record sets, and that the consideration of the IP in record matching can be important for the accurate prediction of the seismic performance of structures subjected to near-fault ground motions.

Keywords

Near-fault ground motions; pulse-like records; Record matching; Nonlinear dynamic analysis

1. Giriş

Yapıların doğrusal olmayan dinamik analizinde tasarım yer hareketi seviyesi ile uyumlu kayıtlar elde etmek için senaryo depreminin sismolojik parametreleri (büyüklük, mesafe, yerel zemin sınıfı) ile uyumlu seçilmiş yer hareketlerinin spektrumu

hedef spektrumla uyumlu olacak şekilde ölçeklendirilir ya da eşleştirilir. Güvenilir ve doğru bir yapısal tepki tahmini için tasarım deprem yer hareketinin kritik yönlerini temsil edebilen kayıt seçim ve ölçeklendirme yöntemini kullanmak oldukça önemlidir. Abrahamson (1992) tarafından geliştirilen ve yer hareketinin durağan olmayan

özelliklerini koruyabilen spektrum eşleştirme yöntemi (RspMatch) ivme kaydına zaman tanım alanında dalgacık fonksiyonları ekleyerek kayıt spektrumu ile hedef spektrum arasındaki spektrum uyumluluğu yakalar. Spektrumu eşleştirilmiş yer hareketlerinin kullanılması yapısal tepkideki değişkenliği düşürdüğü için dinamik analizler için gerekli kayıt sayısında da azalmaya neden olur. Ancak bu yöntem, seçilen belli bir periyot aralığındaki spektral genliklerin eşleştirilmesine dayandığı için yapısal tepkiyi önemli ölçüde etkileyen yer hareketinin diğer özelliklerinin etkisini göz önüne almaz. Örneğin, hız darbesi içeren yakın saha yer hareketlerinin hız zaman serilerinde kısa zaman aralığında büyük miktarda enerjinin toplandığı gözlemlenmiştir (Somerville *et al.* 1997). Darbesiz kayıtlara göre farklı özelliklere sahip olan bu tarz kayıtların yıkıcı etkileri darbenin genliği ve periyodu (T_p) ile karakterize edilmiştir (Alavi and Krawinkler 2000). Literatürdeki birçok çalışma darbeleri yakın saha yer hareketlerinin tek serbestlik dereceli (TSD) sistemlerin maksimum inelastik yer değiştirme (u_m) taleplerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir (Baez and Miranda 2000, Chopra and Chintapakdee 2004, Akkar *et al.* 2004). Betonarme ve çelik çerçeve sistemlerde darbeleri kayıtların darbesiz kayıtlara göre süneklik ve kat ötelenme taleplerini arttırdığı literatürde gösterilmiştir (Bertero *et al.* 1978, Nakashima *et al.* 2000, Liao *et al.* 2001, Baker and Cornell 2008).

Sismik tasarım ve değerlendirme yöntemlerinde yapısal tepkiyi tahmin etmede yaygın olarak kullanılan ve yapının temel periyodundaki elastik spektral ivmeyle tanımlanan şiddet ölçüsü ($Sa(T_1)$) darbeleri yakın saha yer hareketlerinin yapılar üzerindeki etkilerini yakalayamamaktadır. Zengin ve Abrahamson (2020a) tarafından önerilen $Sa(T_1)$ ve anlık güçten ($IP(T_1)$) oluşan vektör şiddet ölçüsünün yakın saha depremlerin yıkıcı etkilerini verimli bir şekilde yakaladığı gösterilmiştir. Önerilen bu ikincil şiddet ölçüsünün etkilerini göz önüne almak için kayıt seçim ve eşleştirme yöntemleri önerilmiştir (Zengin and Abrahamson 2020b, 2021a). Zengin ve Abrahamson (2021a) çalışmasında, yakın saha kayıt eşleştirme yöntemlerinde kayıtların IP değerlerinin

hedef IP değerlerle uyumlu olması gerektiği belirtilmiştir.

Mevcut uygulamalarda sıklıkla kullanılan spektrum eşleştirme yöntemi ile ilgili bir endişe de, spektrumu eşleştirilmiş yer hareketleriyle elde edilen yapısal tepki parametrelerinin ne ölçüde doğru ve gerçekçi olduğudur. Bu bağlamda özellikle medyan yapısal tepkinin konservatif olarak tahmin edilip edilmediği araştırılmış, ancak kullanılan farklı hedef spektrumları, kayıt setleri ve yapısal modeller yapılan çalışmalar arasında tutarsız sonuçlara neden olmuştur (Grant 2012). Bu yüzden genellikle spektrumu eşleştirilmiş kayıtların gerçekçiliğini görmek için eşleştirme öncesi ve sonrası ivme, hız ve yer değiştirme zaman serileri karşılaştırılmaktadır. Darbeli yakın saha yer hareketleri için darbe parametrelerinin korunup korunmadığı kontrol edilmektedir. Bunun yanısıra, spektrumu eşleştirilmiş yer hareketinin dinamik analizlerde kullanımının uygunluğu sahada beklenen sismik taleple tutarlı yapısal tepkinin doğru bir şekilde tahmin edilmesiyle de kontrol edilmektedir.

Bu çalışma, yakın saha yer hareketlerini hem elastik spektral ivme (Sa) spektrumu hem de IP spektrumu ile eşleştirmektedir. Farklı kayıt eşleştirme yöntemlerinin maksimum yer değiştirme dağılımı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla farklı periyotlara sahip TSD sistemlerin doğrusal olmayan dinamik analizleri Sa spektrumu ile eşleşen kayıtlar, Sa ve IP spektrumları ile eşzamanlı eşleşen kayıtlar ve orijinal kayıtlar altında yapılmıştır. Kayıt setlerinin IP değerleri hedef IP değerleri ile karşılaştırılmış ve sonuçlara olan etkileri irdelenmiştir.

2. Kayıt Eşleştirme Yöntemi ve Kayıt Özellikleri

Yer hareketinin tek bir bileşenin geometrik ortalama veya RotD50 ortalama bileşeni kullanılarak oluşturulmuş hedef spektruma eşleştirilmesi kaydın spektral değişkenliğinin yapay olarak bastırılmasına yol açmaktadır. Bu yüzden, ortalama hedefe göre kaydın bileşeninin değişkenliğinin korunması amacıyla Bileşen Değişkenlik Oranı (BDO) Denklem 1 ile tanımlanmıştır:

$$BDO_{ij} = \frac{Sa_i^{H_{j,kayıt}}}{Sa_i^{RotD50,kayıt}} \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde, $Sa_i^{H_{j,kayıt}}$ j kayıt bileşeni için i periyodundaki spektral ivmeyi göstermektedir. Daha sonra bileşene özgü hedef spektrumu ($Sa_i^{H_{j,hedef}}$) Denklem 2 kullanılarak hesaplanmıştır:

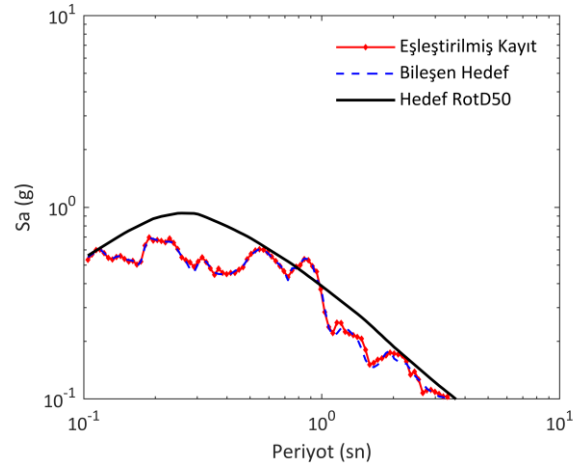
$$Sa_i^{H_{j,hedef}} = BDO_{ij} \times Sa_i^{hedef} \quad (2)$$

Sa_i^{hedef} , i periyodundaki hedef spektral ivmeye karşılık gelmektedir. Bileşene özel IP hedefi için BDO'yu hesaplariken, RotD50 yerine kaydın geometrik ortalama IP değerleri kullanılmaktadır. Çünkü IP için önerilen koşullu yer hareketi modeli, kayıtların yatay bileşenlerinin geometrik ortalamasına göre önerilmiştir (Zengin and Abrahamson 2020b). Bu şekilde kaydın bileşenleri arasındaki spektral ve IP değışkenlikleri korunmuştur.

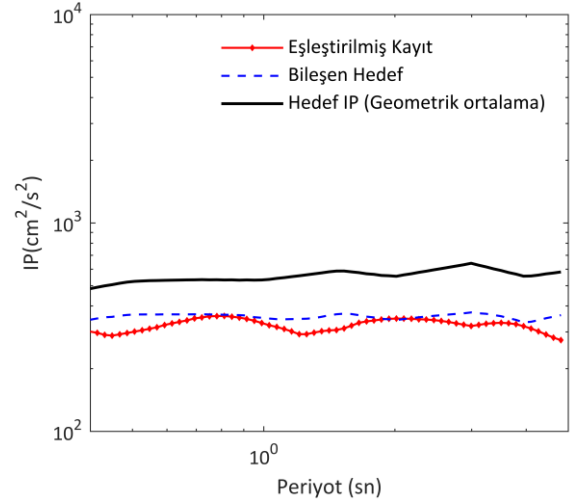
Bu çalışmada, Sa eşleştirmeli kayıt setleri RspMatch programındaki yaklaşımla elde edilmiştir. Kayıtların ivme serilerine zaman tanım alanında kosinüs dalgacık fonksiyonları eklenerek Sa spektrum eşleştirmesi gerçekleştirilmiştir. IP eşleştirmesi yaklaşımında ise kayıtların hız zaman serilerine Ricker dalgacıkları (Ricker 1953) eklenmiştir. Seçilen kayıt bileşenleri Denklem 2 kullanılarak elde edilen Sa ve IP hedef spektrumlarına yakın bir eşleşmeye sahip olana kadar ardışık şekilde modifiye edilmiştir. Sa ve IP kayıt eşleştirmelerinde Zengin ve Abrahamson (2021a ,b) tarafından geliştirilen algoritma kullanılmıştır (https://github.com/zenginesra/Sa_IPmatch).

Abrahamson vd. (2014) yer hareketi modeli kullanılarak büyüklük (M_w) 7.5, kırılma mesafesi (R_{rup}) 10 km ve ortalama kayma dalgası hızı (V_{s30}) 400 m/sn olan bir deprem senaryosu için 84. yüzdilik dilimine tekabül eden hedef senaryo spektrumu oluşturulmuştur. Şekil 1, RotD50 hedef spektrumu ve Northridge-01 ($M_w=6.69$) depremi Sylmar Olive istasyonunda kaydedilen yer hareketinin (yatay bileşen-1) bileşene özgü spektrumu Denklem 2 kullanılarak elde edilmiş ve kaydın spektrumu seçilen periyot aralığında bu spektruma eşleştirilmiştir.

Şekil 2, koşullu IP yer hareketi modeli kullanılarak elde edilen median spektrumu, bileşene özgü hedef spektrumu ve Sa ve IP eşleştirme yöntemi kullanılarak elde edilen eşleştirilmiş kayıt IP spektrumunu göstermektedir. Sa ve IP eşleştirme yöntemleri seçilen yer hareketinin iki yatay bileşeni için uygulanması gerekir. Böylece eşleştirilmiş kayıtların geometrik ortalaması hedef senaryo spektrumlarla uyum gösterecektir.



Şekil 1. RotD50 hedef spektrumu ve Northridge-01 ($M_w=6.69$) depremi Sylmar Olive istasyonundaki yer hareketinin (yatay bileşen-1) bileşene özgü spektrumla eşleştirilmiş kayıt spektrumu.



Şekil 2. Hedef median spektrumu, bileşene özgü hedef spektrumu ve Sa ve IP eşleştirme yöntemi kullanılarak elde edilen eşleştirilmiş kayıt IP spektrumu.

Doğrusal olmayan analizlerde kullanılmak üzere eşleştirilecek kayıt seti hız darbeli ve darbesiz olarak sınıflandırılmış kayıt grubundan oluşturulmuştur. Bunun için NGA-West2 kayıt veritabanı M_w 6.5-7.5,

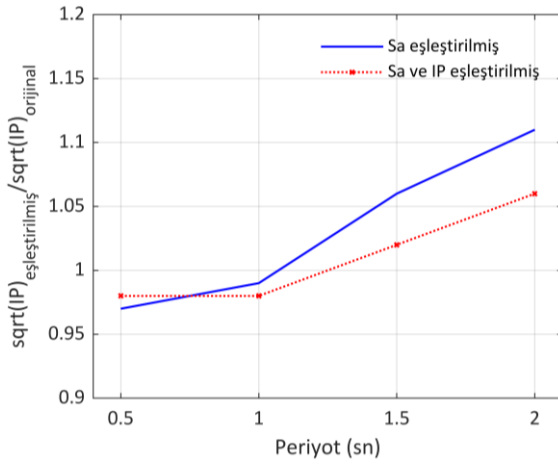
R_{rup} 0-20 km ve V_{s30} 180-760 m/sn aralıklarında sınırlandırılmış ve hedef spektruma spektral şekilleri en yakın 11 adet yer hareketi seçilmiştir. Tek bir depremin sonuçlarda yanlılık yaratmaması için aynı depremden en fazla 3 istasyon kaydı kullanılmıştır. Seçilen kayıt setinde 7 adet darbeli kayıt ve 4 adet darbesiz kayıt vardır. Analizler, yer hareketinin iki yatay bileşeni için gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan deprem kayıtların listesi Çizelge 1’ de gösterilmiştir. Bu kayıtlar aynı zamanda eşleştirme için de kullanılmıştır.

Şekil 3, S_a eşleştirmeli, S_a ve IP eşleştirmeli kayıt setlerinin IP değerlerinin karekökünün (\sqrt{IP}), \sqrt{VIP} , orijinal kayıt setinin \sqrt{VIP} değerine oranını dört farklı periyotta göstermektedir. Orijinal kayıtlar, kayıt eşleştirme yöntemlerinin maksimum yer

değiştirmeleri tahmin etmedeki etkinliğini değerlendirmek için kullanılmıştır. Aynı zamanda, bu kayıt setinin median IP değeri koşullu yer hareketi modelinden elde edilen hedef IP değerine yakın bulunduğu için analizlerde referans kabul edilmiştir. IP şiddet ölçüsü, yakın saha yer hareketlerini etkileyen bir parametre olduğu için kayıt setlerinin ürettiği yapısal tepki dağılımı arasındaki farklar kayıt setlerinin IP değerleri arasındaki farklılardan etkilenebilir. Şekil 3’te görüldüğü üzere, S_a eşleştirmeli kayıt setinin S_a ve IP eşleştirmeli kayıt setinden genelde daha yüksek IP değerine sahip olduğu görülmüştür.

Çizelge 1. Analizlerde kullanılan yakın saha deprem kayıtları.

No	Deprem	Yıl	İstasyon	M_w	R_{rup} (km)	V_{s30} (m/sn)	T_p (sn)
1	Gazli, USSR	1976	Karakyr	6.8	5.46	260	-
2	Loma Prieta	1989	LGPC	6.93	3.88	595	-
3	Loma Prieta	1989	Saratoga-Aloha Ave	6.93	8.50	381	4.57
4	Northridge-01	1994	Jensen Filter Plant	6.69	5.43	526	3.53
5	Northridge-01	1994	Rinaldi Receiving Sta.	6.69	6.5	282	1.25
6	Northridge-01	1994	Sylmar-Olive	6.69	5.3	440	2.44
7	Cape Mendocino	1992	Petrolia	7.01	8.2	422	2.99
8	Chi-Chi Taiwan	1999	CHY028	7.62	3.12	543	-
9	Duzce, Turkey	2010	Duzce	7.14	6.58	282	-
10	Darfield, New Zealand	2010	GDLC	7.0	1.22	344	6.23
11	Darfield, New Zealand	2010	HORC	7.0	7.29	326	9.92



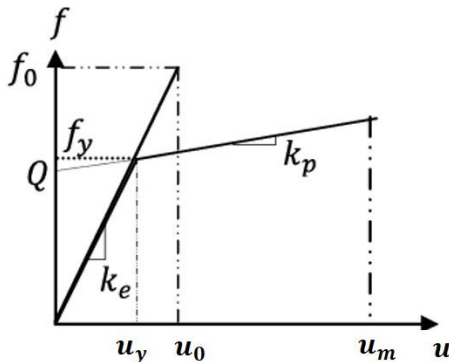
Şekil 3. Sa eşleştirmeli, Sa ve IP eşleştirmeli kayıt setlerinin IP'lerinin karekökünün (\sqrt{IP}) orijinal kayıt setinin \sqrt{IP} değerine oranının periyoda göre değişimi.

3. Doğrusal Olmayan Dinamik Analizler

Yer hareketine maruz TSD dereceli sistemler için hareket denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\omega_0\dot{u}(t) + \omega_0^2u(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (3)$$

Denklem 3' deki ifadelerden ω_0 doğal frekansı, ξ viskoz sönüm oranını ifade etmektedir. $u(t)$, $\dot{u}(t)$ ve $\ddot{u}(t)$ terimleri sırasıyla sistemin görelî yer değiştirmesi, hızı ve ivmesini göstermektedir. $\ddot{u}_g(t)$ terimi ise yer hareketinin ivmesini temsil etmektedir. TSD sistemlerinin doğrusal olmayan davranışlarını simüle etmek için birçok histeretik model geliştirilmiştir (Takeda 1970, Ibarra *et al.* 2005). Ancak, tasarım prosedürünü basitleştirmek için, modern yapısal sistemlerin davranışı genellikle iki doğrusal (bilineer) kuvvet-yer değiştirme eğrisiyle temsil edilmektedir. Doğrusal olmayan bir TSD sisteminin bilineer kuvvet-yer değiştirme ilişkisi Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Doğrusal olmayan bir TSD sisteminin bilineer kuvvet-yer değiştirme ilişkisi

Şekildeki k_e parametresi elastik rijitliği, k_p ise akma sonrası rijitliği göstermektedir. Burada sistemin elastik dayanımı f_0 , akma dayanımı ise f_y ile gösterilmiştir. 0.5 ile 2.0 saniye arasında dört farklı periyoda sahip TSD sistemlerin doğrusal olmayan davranışları, elastik dayanımın akma dayanımına oranı (f_0/f_y) olan dayanım azaltma faktörü $R=2,4,6$ ve 8 kullanılarak incelenmiştir. TSD sistemlerinin akma sonrası pekleşme oranı başlangıç rijitliğinin %10'u, ξ ise %5 olarak göz önüne alınmıştır. Bu durumda, $R=2$ katsayısı elastikliğe yakın durumu temsil ederken, $R=8$ katsayısı yüksek derece doğrusal olmayan davranışı temsil etmektedir. Doğrusal olmayan dinamik analizler OpenSees programında (Mazzoni *et al.* 2005) gerçekleştirilmiştir.

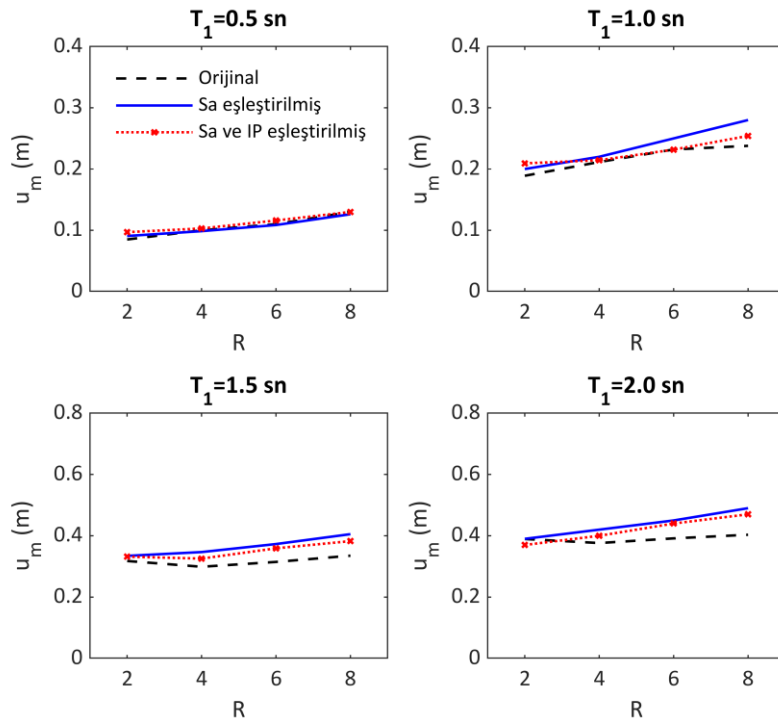
Şekil 5, TSD sistemlerin farklı periyotlarda ve farklı R değerlerinde eşleştirilmiş ve orijinal kayıt setlerinden elde edilen u_m değerlerini göstermektedir. Şekil 5'te görüldüğü üzere $T_1=0.5$ saniyedeki medyan değerler bütün kayıt setleri için hemen hemen aynıdır. $T_1=0.5$ sn iken, eşleştirilmiş kayıt setlerinin VIP değerlerinin orijinal kayıt setinin VIP değerine göre yaklaşık %5 oranında düşük olmasının (bkz. Şekil 3) sonuçları etkilemediği görülmüştür. Aynı şekilde $T_1=1.0$ saniye olduğu durumda eşleştirilmiş kayıt setleri orijinal kayıt setiyle benzer u_m değerlerini üretmiştir. Ancak, yalnızca Sa eşleştirilmiş kayıtlar, $R=8$ olduğu durumda diğer kayıt setlerine göre ortalama medyana daha yüksek tahmin etmiştir. Analiz sonuçlarına göre, kayıt setleri arasındaki IP farklılığının uzun periyotlu sistemlerin ($T_1=1.5$ sn ve $T_1=2.0$ sn) orta ve yüksek derecede doğrusal olmayan davranışında daha etkili olduğu görülmüştür. Örneğin, $R=2$ elastikliğe yakın davranışta eşleştirilmiş kayıt setlerinin VIP değerleri orijinal kayıt setine göre %7-11 oranında yüksek olmasına rağmen bütün kayıt setleri için benzer u_m elde edilmiştir. Ancak, $R=6$ ve $R=8$ olduğu durumda eşleştirilmiş kayıtların medyan u_m değerleri orijinal kayıtlara göre %10-25 oranında daha yüksek bulunmuştur.

$T_1=1.5$ sn ve $T_1=2.0$ sn iken eşleştirilmiş kayıtlar kendi içinde kıyaslandığında Sa eşleştirilmiş kayıt setinin ortalama IP değerlerinin Sa ve IP eşleştirilmiş kayıt setinin ortalama IP değerlerinden daha yüksek

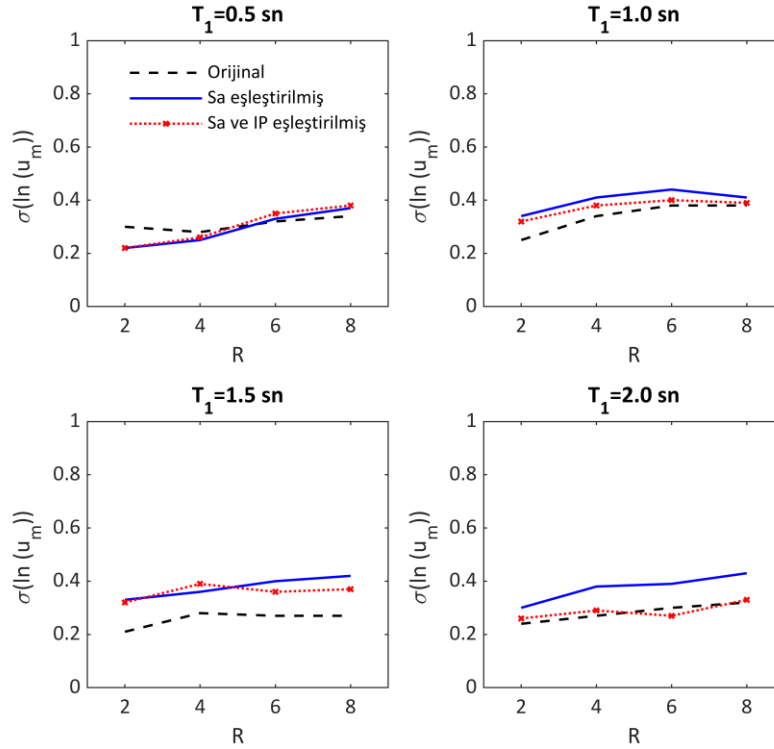
olduğu görölmektedir. Dolayısıyla, Sa eşleştirilmiş kayıt setinin ürettiği u_m değerleri Sa ve IP eşleştirilmiş kayıt setinin ürettiği u_m değerlerine göre nispeten daha yüksek çıkmıştır. Şekil 6, bu çalışmada kullanılan kayıt setlerinden elde edilen u_m değerlerinin doğal logaritmasının standart sapmasını ($\sigma(\ln(u_m))$) göstermektedir. Eşleştirilmiş kayıt setleri arasındaki IP farklarının $\sigma(\ln(u_m))$ değerlerini (saçılımı) etkilediği gözlemlenmiştir. Özellikle, yüksek periyotlu sistemler $R=6$ ve 8 durumunda iken IP kullanılarak eşleştirilen kayıt setinin Sa eşleştirilmiş kayıt setine göre daha düşük standart sapma değeri verdiği görölmüştür. Bu sonuçlar gösteriyor ki, hedef IP değeriyle uyumlu kayıt seti daha doğru u_m dağılımını üretmektedir. Bu sonuçlar aynı zamanda, yakın saha yer hareketlerinin eşleştirilmesinde IP parametresinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

4. Sonuç

Bu çalışma, yakın saha deprem kayıtlarının karakteristik özelliklerinin (darbe periyodu ve darbe genliği) etkisini yakalayan $IP(T_1)$ parametresinin kayıt eşleştirme yönteminde göz önüne alınmasının önemini göstermektedir. Farklı periyotlardaki TSD sistemlerin Sa eşleştirilmiş kayıtlar, Sa ve IP eşleştirilmiş kayıtlar ve orijinal kayıtlar altındaki u_m değerleri karşılaştırıldığında medyan u_m değerlerindeki farklılıkların kayıt setlerinin IP değerlerindeki farklılıklardan kaynaklanabileceği sonucuna varılmıştır. Özellikle, $T_1 > 0.5$ saniyeden büyük TSD sistemlerin yüksek doğrusal olmayan davranışlarında IP'nin etkili olduğu görölmüştür. Sa ve IP eşleştirilmiş kayıtlardan elde edilen u_m değerlerinin düşük standart sapma vermesi ve medyan değerlerin orijinal kayıtlarla elde edilen sonuçlarla benzer olması bu eşleştirme yönteminin güvenilirliğini göstermektedir. Gelecekteki çalışmalarda, IP'nin ve eşleştirilmiş kayıtların etkileri çok serbestlik dereceli sistemler için incelenebilir.



Şekil 5. TSD sistemlerin farklı periyotlarda ve farklı R değerlerinde eşleştirilmiş ve orijinal kayıt setlerinden elde edilen maksimum inelastik yer değiştirme değerleri.



Şekil 6. TSD sistemlerin farklı periyotlarda ve farklı R değerlerinde eşleştirilmiş ve orijinal kayıt setlerinden elde edilen maksimum inelastik yer değıştirme değerlerinin doğal logaritmasının standart sapması.

5. Kaynaklar

- Abrahamson, N.A., 1992. Nonstationary spectral matching. *Seismological Research Letters*, **63(1)**, 30.
- Abrahamson, N.A., Silva, W.J., and Kamai, R., 2014. Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. *Earthquake Spectra*, **30(3)**, 1025–1055.
- Akcar, S., Yazgan, U., and Gulkan, P., 2004. Deformation limits for simple non-degrading systems subjected to near-fault ground motions. In *Proc of the 15th World Conferences on Earthquake Engineering (WCEE)*.
- Alavi, B., and Krawinkler, H., 2004. Behavior of moment-resisting frame structures subjected to nearfault ground motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **33(6)**, 687–706.
- Baéz, J. I., and Miranda, E., 2000. Amplification factors to estimate inelastic displacement demands for the design of structures in the near field. In *Proc. of the 12th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE)*.
- Baker, J.W., and Cornell, C.A., 2008. Vector-valued intensity measures for pulse-like near-fault ground motions. *Engineering Structures*, **30(4)**, 1048-1057.
- Bertero, V. V., Mahin, S. A., and Herrera, R. A., 1978. Aseismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **6(1)**, 31-42.
- Chintapakdee, Ch., and Chopra, A.K., 2004. Seismic response of vertically irregular frames: response history and modal pushover analyses. *Journal of Structural Engineering*, **130(8)**, 1177-1185.
- Grant, D.N., 2012. Preservation of velocity pulses in response spectral matching. In *Proc. of the 15th World Conferences on Earthquake Engineering (WCEE)*.
- Ibarra, L. F., Medina, R. A., and Krawinkler, H., 2005. Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **34(12)**, 1489-1511.
- Liao, W. I., Loh, C. H., and Wan, S., 2001. Earthquake responses of RC moment frames subjected to near-fault ground motions. *The Structural Design of Tall Buildings*, **10(3)**, 219-229.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., and Fenves, G. L., 2005. OpenSees command language manual. *Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center*, Berkeley, CA.

- Nakashima, M., Matsumiya, T., Asano, K., 2000. Comparison in earthquake responses of steel moment frames subjected to near-fault strong motions recorded in Japan, Taiwan and the US. *In Proc. of the International Workshop on Annual Commemoration of Chi-Chi Earthquake, Technology Aspect, Taiwan*, vol. II., p. 112–23.
- Ricker, N., 1953. The form and laws of propagation of seismic wavelets. *Geophysics*, **18(1)**, 10–40.
- Somerville, P.G., Smith, N.F., Graves, R.W., Abrahamson, N.A., 1997. Modification of empirical strong ground-motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological Research Letter*, **68(1)**, 199-222.
- Takeda, T., Sozen, M. A., and Nielsen, N. N., 1970. Reinforced concrete response to simulated earthquakes. *Journal of the Structural Division*, **96(12)**, 2557-2573.
- Zengin, E., and Abrahamson, N.A., 2020a. A vector-valued intensity measure for near-fault ground motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **49(7)**, 716–734.
- Zengin, E., and Abrahamson, N.A., 2020b. Conditional ground-motion model for damaging characteristics of near-fault ground motions based on instantaneous power. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **110(6)**: 2828–2842.
- Zengin, E., and Abrahamson, N. A., 2021a. A procedure for matching the near-fault ground motions based on spectral accelerations and instantaneous power. *Earthquake Spectra*, **37(4)**, 2545-2561.
- Zengin, E., and Abrahamson, N. A., 2021b. On the Use of Instantaneous Power for Near-Fault Record modification. *8th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, doi:[10.7712/120121.8818.19489](https://doi.org/10.7712/120121.8818.19489).