SİSMİK KAYNAK ve YER HAREKETİ TAHMİN DENKLEMLERİNE BAĞLI MODELLEME BELİRSİZLİĞİNİN OLASILIKSAL SİSMİK TEHLİKE HESAPLARINA ETKİLERİ

Mehtap Şenyurt[1], Sinan Akkar[2], M. Tolga Yılmaz[3]
[1] *Araştırmacı, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
[2] *Profesör, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
[3] *Yardımcı Doçent, Mühendislik Bilimleri, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
Email: sakkar@metu.edu.tr

ÖZET

Sismik kaynakta büyük depremlerin tekerrürü ve bu depremlerde beklenen yer hareketine ait belirsizlikler olasılıksal sismik tehlike hesabının sonuçlarına önemli etki yapmaktadır. Çalışmada olasılıksal hesabın bu belirsizliklere duyarlılığı irdelenmektedir. Yer hareketi için belirsizlik aktif sığ tektonik bölgeler için geçerli olan 11 adet yer hareketi tahmin denklemi ile ifade edilmiştir. Sismik kaynak modellemesine ait belirsizlik basitleştirilmiş çizgisel fay üzerinde karakteristik ve üstel deprem tekerrür modeli göz önüne alınarak ifade edilmiştir. Duyarlılık analizleri, tehlike hesabının yapılacağı sahanın faya göre konumu ve hedef yer hareketi seviyesine bağlı olarak deprem tekerrür modeli ve yer hareketi tahmin denklemlerindeki belirsizliklerin olasılıksal sismik tehlike hesap sonuçlarını karşılaştırılabilir seviyede etkileyebileceğini göstermiştir.

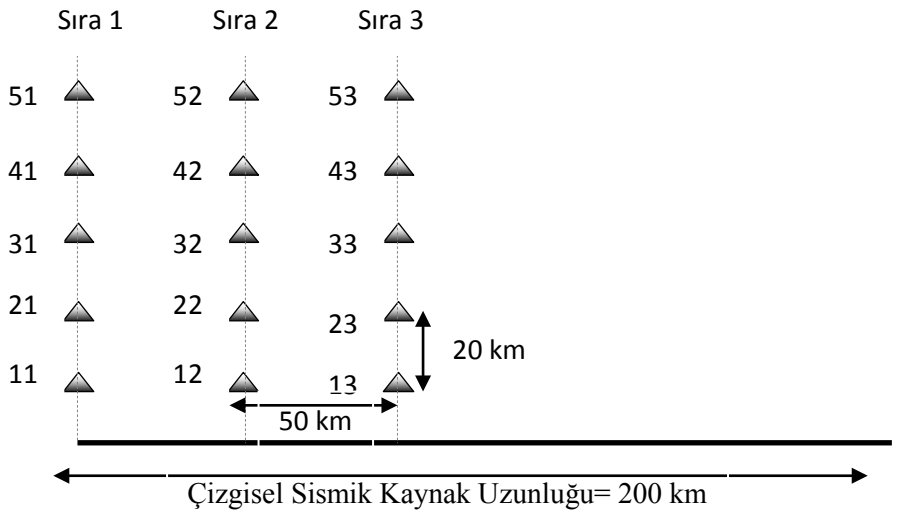
ANAHTAR KELİMELER: Olasılıksal sismik tehlike yöntemi; Yer hareketi tahmin denklemleri; Deprem tekerrür modelleri; Duyarlılık analizi

1.GİRİŞ

Olasılıksal sismik tehlike yöntemi, sismik kaynağa ve yer hareketi parametrelerine bağlı belirsizlikleri dikkate alarak belli bir konumda sismik yapı tasarımına (veya performans değerlendirmesine) yönelik seçilen yer hareketi parametresinin belli bir eşik değer için yıllık aşılma oranını (veya, bu oranın tersi olan tekrar periyodunu -T_R) hesaplar. Bu tanımdan da anlaşılacağı gibi olasılıksal sismik tehlike yöntemleri sonucu bulunan yer hareketi seviyelerinin güvenirliliği öncelikle sismik kaynağa ait bilgilerin yeterliliğine ve yer hareketi parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan ampirik tahmin denklemlerine bağlıdır. Sismik kaynağa bağlı bilgiler magnitüde bağlı deprem tekerrür modellerinin seçiminde, ilgili konum için maksimum magnitüd değerinin belirlenmesinde, sismik kaynağın güvenilir olarak modelenmesinde doğrudan rol oynarlar. Seçilen yer hareketi tahmin denklemlerine ait fonksiyonlar yer hareketi genliklerini öncelikli olarak etkileyen temel sismolojik değişkenleri (magnitüd, kaynak-istasyon mesafesi, fay mekanizması, zemin koşulları vs.) içermelidir. Bunun yanı sıra bu denklemlerin türetilmesinde kullanılan kuvvetli yer hareketi veri tabanlarının güvenilir olması denklemler sonucu tahmin edilen (hesaplanan) yer hareketi genliklerinin güvenirliliğini arttırır, deprem hareketinin doğasında olduğu kabul edilen rassal belirsizliğin, ki bu belirsizlik yer hareketi tahmin denklemlerinde standart sapma ile belirtilir, gerçekçi bir şekilde tanımlanmasını sağlar.

Özellikle kritik mühendislik yapılarının güvenli ve gerçekleştirilebilir tasarımı için, yukarıda özetlenen 2 temel unsura bağlı belirsizliklerin olasılıksal sismik tehlike hesaplarına etkilerini anlayabilmek gereklidir. Bu bağlamda bilgimiz dahilindeki daha önce gerçekleştirilen çalışmalar sismik kaynak özelliklerinin bilindiğini (değişmediğini) kabul ederek, öncelikle yer hareketi tahmin denklemlerinin olasılıksal sismik tehlike hesaplarına olan etkilerini irdelemiştir (ör. Scherbaum vd., 2005; Bommer vd., 2005; Sabetta vd., 2005). Bu çalışmada ise basitleştirilmiş 200 km uzunluğunda çizgisel bir fay kaynağı düşünülerek fay geometrisi ve deprem tekerrür

modeli ile ilişkili belirsizliklerin hesap sonuçlarına olan etkisi yer hareketi modellerinden kaynaklanan belirsizliklerin etkisiyle beraber kıyaslanmıştır. Bulguların fayın konumuna olan duyarlılığı faydan farklı uzaklıklarda konumlandırılmış sahalar için hesapların tekrar edilmesi ile irdelenmiştir. Fay ve hesap sahalarının göreli konumları Şekil 1'de gösterilmektedir. Hesap sonuçlarının basitçe kıyaslanabilmesi için, sonuçlardaki değişkenlik oransal (yüzdelik saçılım) olarak ifade edilmiştir.



Şekil 1. Analizi yapılan bölgenin fay ve saha paterni

2. SENARYO FAY ve YER HAREKETİ TAHMİN DENKLEMLERİ

Şekil 1'de gösterilen ve olasılıksal deprem tehlikesinin hesaplandığı sahalar faya dik yönde 20 km, faya paralel yönde 50 km aralıklar ile konumlandırılmıştır. Sismik tehlike analizlerinde kullanılan fayın özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Hesaplamalar jenerik kaya zeminler (yüzeyden itibaren ilk 30 m'deki ortalama kayma hızı V_{S30} = 760 m/s ile tanımlanırlar) için yapılmıştır.

Tablo1. Deprem kaynağını tanımlayan parametreler

Kaynak	Faylanma	β	$\dot{s}$ (mm/yıl)	M_{min}	M_{max}
Çizgisel Fay	Doğrultu- atımlı	2.1	25	5.0	7.5

Tablo 1'de β büyük depremlerin küçük deprelere olan oranı ifade eden bir katsayıdır ve Gutenberg-Richter modelinde b parametresi ile (β=b*ln10) ilişkilidir. ṡ birim zamanda faydaki atım miktarıdır ve fay geometrisi ile birlikte birim zamanda fayda biriken sismik momenti belirler. M_{min} en küçük belirgin deprem büyüklüğüdür. M_{max} ise bölgede oluşabilecek en büyük deprem büyüklüğüdür ve fay geometrisi ile tarihsel depremler göz önüne alınarak belirlenir (McGuire, 2004).

2.1. Deprem-Tekerrür İlişkileri

Bu çalışmada, sismik tehlike analizleri için iki farklı deprem tekerrür modeli incelenmiştir: kesilmiş üstel deprem modeli (Gutenberg-Richter, 1954) ve karakteristik deprem modeli (Schwartz ve Coppersmith, 1984). Her iki modelde de kaynak için minimum (M_{min}) ve maksimum (M_{max}) magnitüd aralıkları ve β dikkate alınarak birim zaman içinde belli bir deprem büyüklüğünün aşılma olasılığı hesaplanmaktadır. Ancak, kesilmiş üstel deprem modelinin büyük magnitüdlü depremlerin oluş sıklığını tam doğru olarak tahmin edemediği düşünülerek, fay için deprem tekerrür ilişkisi karakteristik model ile de incelenmiştir. Karakteristik modelde diğer modele ek olarak fayın yaratabileceği karakteristik depremlere daha çok ağırlık verilmektedir. Bu modelde fayın yaratabileceği karakteristik depremlerin göz önüne alındığı magnitüd aralığında $\beta=0$ seçilerek $\beta\neq0$ ile elde edilen tipik kesilmiş üstel deprem modeli birleştirilmektedir. Böylece karakteristik deprem magnitüdü aralığında depremlerinin olasılıksal dağılımı tekdüze (uniform) model ile ifade edilmektedir. Bu şekliyle karakteristik magnitüd aralığı dışında kalan deprem tekerrür olasılıkları üstel olasılık fonksiyonu ile tariflenmektedir. Kesilmiş üstel ve karakteristik deprem modellerinde aynı fay atım hızı dikkate alınmıştır. Böylece iki model için de fayda birim zamanda biriken sismik momentin aynı olması sağlanmıştır (McGuire, 2004).

2.2. Seçilen Yer Hareketi Tahmin Denklemleri

Bu çalışmada, yer hareketi parametrelerinin tahminleri için 11 ayrı model kullanılmıştır. Bu modeller Boore ve Atkinson, 2008; Campbell ve Bozorgnia, 2008; Chio ve Youngs, 2008; Abrahamson ve Silva, 2008 ; Akkar ve Çağnan, 2010; Akkar ve Bommer, 2010; Idriss , 2008; Kalkan ve Gülkan, 2004; Özbey vd., 2004; Abrahamson ve Silva, 1997 ve Boore vd. 1997 tarafından önerilmiştir. Çeşitli azalım ilişkilerinin kullanılma sebebi farklı araştırmacıların kullandıkları veri tabanları, veri işleyiş şekilleri ve kullandıkları modeller gibi etkenlerden dolayı oluşan belirsizlikleri dikkate almaktır. Bu yolla yer hareketi tahminlerindeki modelleme farklılığından doğan epistemik belirsizlik dikkate alınmıştır. Kullanılan yer hareketi tahmin denklemlerinin önemli özellikleri Tablo 2'de özetlenmektedir.

3. DUYARLILIK HESAPLARINDA KULLANILAN YÖNTEM

Duyarlılık hesaplarında sismik kaynak modellemesindeki ve yer hareketi parametrelerinin tahminindeki belirsizlikler dikkate alınarak belli tekrarlama periyotları için (T_R) PGA (en yüksek yatay yer ivmesi), 0.2 s ve 1.0 s periyotlarında spektral ivme değerleri hesaplanmıştır. Bu çalışmada kaya zemin koşullarını (V_{S30} = 760 m/s) temsil eden ve % 5 sönümleme oranına sahip spektral ivmeler T_R = 2475 yıl, T_R = 475 yıl ve T_R = 72 yıl seviyeleri için hesaplanmıştır. Sismik kaynak özelliklerinden fayın dalma (dip) eğimi, deprem tekerrür ilişkisi ve yer hareketi tahmin denklemlerinden kaynaklanan belirsizliklerin irdelenmesi için 3 küme analiz gerçekleştirilmiştir. Birinci kümede karakteristik deprem modeli ve 90^o dalma eğimi, ikinci kümede karakteristik deprem modeli ve 60^o dalma eğimi, ve üçüncü kümede ise kesilmiş üstel deprem modeli ve 90^o dalma eğimi göz önüne alınmıştır. Tüm analizlerde gözlemlenen değişkenliğin tek bir yer hareketi tahmin denkleminden kaynaklanmasını engellemek için, her bir saha için en farklı sonuçları gösteren tahmin denklemi göreli değişkenlik hesabının dışında bırakılmıştır. Dolayısıyla, burada bildirilen her göreli değişkenlik oranı 10 yer hareketi tahmin denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Kullanılan tahmin denklemleri arasındaki en yüksek, en düşük ve ortalama ivme değerleri hesaplanmış, en büyük ve en küçük ivme değeri arasındaki fark, ortalama ivme değeri ile normalize edilmiştir. Böylece yer hareketi tahmin modeli seçiminden kaynaklabilecek en yüksek göreli değişkenlik hesaplanabilmiştir. Deprem tekrarlama modeli ve dalma eğiminden kaynaklanan göreli değişkenlik ise farklı model ve eğimi ile hesaplanan değerler arasındaki en yüksek oransal fark hesaplanarak ifade edilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan yer hareketi tahmin modelleri

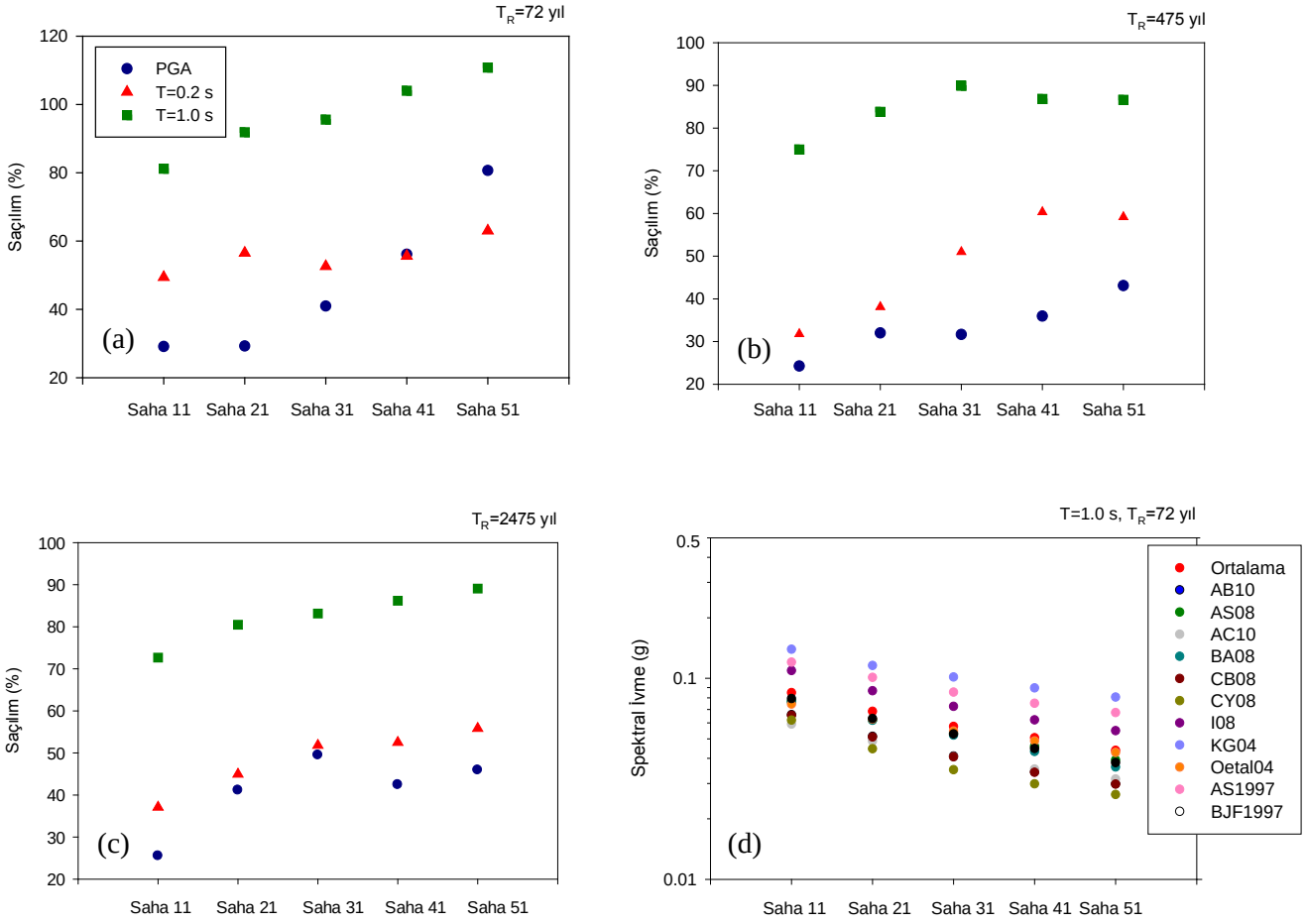
Çalışma	Kısaltma	Bölge	N_R, N_E	Hesaplanan	M_{min}, M_{max}	R_{min}, R_{max}	Fay	Saha
Abrahamson ve Silva (2008)	AS08	Dünya çapında	2754, 135	PGA, PGV, PSA	5.0, 8.5	R_{rup}, 0, 200	SS, N, R	V_{S30}: 180 m/s ila 2000 m/s
Campbell ve Bozorgnia (2008)	CB08	Dünya çapında	1561, 64	PGA, PGV, PSA	4.0, 8.5	R_{rup}, 0, 200	SS, N, R	V_{S30}: 180 m/s ila 1500 m/s
Chiou ve Youngs (2008)	CY08	Dünya çapında	1950, 125	PGA, PGV, PSA	4.0, 8.5	R_{rup}, 0, 200	SS, N, R	V_{S30}: 150 m/s ila 1500 m/s
Boore ve Atkinson (2008)	BA08	Dünya çapında	1574, 58	PGA, PGV, PSA	5.0, 8.0	R_{jb}, 0, 200	SS, N, R	V_{S30}: 150 m/s ila 1300 m/s
Abrahamson ve Silva (1997)	AS1997	Dünya çapında	655, 58	PGA, PGV, PSA	5.0, 8.5	R_{rup}, 0, 200	SS, N, R	Kaya, Sığ ve Derin zeminler
Idriss (2008)	I08	Dünya çapında (MS ve AS)	3551, 173	PGA, PGV, PSA	5.0, 8.5	R_{jb}, 0, 200	SS, N, R	V_{S30} :450 m/s ila 900 m/s
Akkar ve Çağnan (2010)	AC10	Türkiye	433, 137	PGA, PGV, PSA	5.0, 7.6	R_{jb}, 0, 200	SS, N, R	V_{S30}: 150 m/s ila 1300 m/s
Akkar ve Bommer (2010)	AB10	Avrupa ve Orta Doğu ülkeleri	532, 131	PGA, PGV, PSA	5.0, 7.6	R_{jb}, 0, 100	SS, N, R	Kaya, Sert ve Yumuşak Zemin
Kalkan ve Gülkan (2004)	KG04	Türkiye	112, 57	PGA, PGV, PSA	4.0, 7.4	R_{jb}, 0, 250	SS, N, R	Kaya, Sert ve Yumuşak Zemin
Özbey vd. (2004)	Oetal04	Türkiye	195, 17	PGA, PGV, PSA	5.0, 7.4	R_{jb}, 0, 300	SS, N, R	A(V_{S30}>750), B(360< V_{S30} <750), C(180< V_{S30} <360), D (V_{S30}<180)
Boore, Joyner ve Fumal (1997)	BJF1997	Amerika (Kuzey Batı)	271, 19	PGA, PGV,PSA	5.2, 7.4	R_{jb}, 0, 118	SS, R	A(V_{S30}>750), B(360< V_{S30} <750), C(180< V_{S30} <360), D (V_{S30}<180)

N_R: deprem yer hareketi kayıtlarının sayısı, N_E: depremlerin sayısı; PGA, PGV, PSA: sırasıyla en yüksek yatay yer ivmesi, hızı ve psödo-spektral ivme; M_{min}, M_{max}: sırasıyla minimum ve maximum moment magnitüdü; SS, N, R: sırasıyla doğrultu atımlı, normal ve ters fay tipleri; R_{min}, R_{max}: sırasıyla minimum ve maksimum kaynak-istasyon mesafesi; R_{rup}: kırılan fay düzlemine en kısa mesafe; R_{jb}: fay kırılmasının yatay projeksiyonuna en kısa mesafe.

4. GÖZLEMLER

Yer hareketi tahmin denklemleri seçiminin olasılıksal sismik tehlike hesaplarına olan etkisi T_R = 2475 yıl, T_R = 475 yıl ve T_R = 72 yıl seviyeleri ile PGA, T=0.2s ve T=1.0s spektral ivme değerleri için hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda gözlemlenen saçılım aralığı Şekil 2.a-c'de gösterilmektedir. Burada gösterilen panellerin kıyaslamasından tahmin denklemlerinden kaynaklanan belirsizliğin olasılıksak sismik tehlike analiz sonuçları için büyük önem taşıdığı anlaşılmaktadır. Maksimum belirsizliğin gözlemlendiği T_R = 72 yıl ve T=1.0s durumu için faklı tahmin denklemlerinin gösterdiği farklı sismik tehlike seviyeleri Şekil 2.d'de gösterilmektedir. Hesaplanan spektral ivme değerlerinin logaritmik ölçekte dahi belirgin şekilde farklılaşması sismik tehlike hesabında tahmin denklemlerinden dolayı oluşabilecek belirsizliğin önemini daha iyi vurgulamaktadır. Şekil 2.d ayrıca fayın sahaya olan uzaklığının hesaplanmasında yapılabilecek sınırlı seviyedeki hataların, yer hareketi

tahmin denklemi seçiminden kaynaklanan belirsizlikle karşılaştırıldığında, belirgin bir öneminin olmadığına işaret etmektedir.



Şekil 2. (a) T_R =72 yıl , (b) T_R =475 yıl (c) T_R =2475 yıl seviyeleri için hesaplanan ivmelerin saçılım aralıkları, ve (d) T_R =72 yıl için farklı yer hareketi tahmin denklemleri ile hesaplanan spektral ivme değerleri.

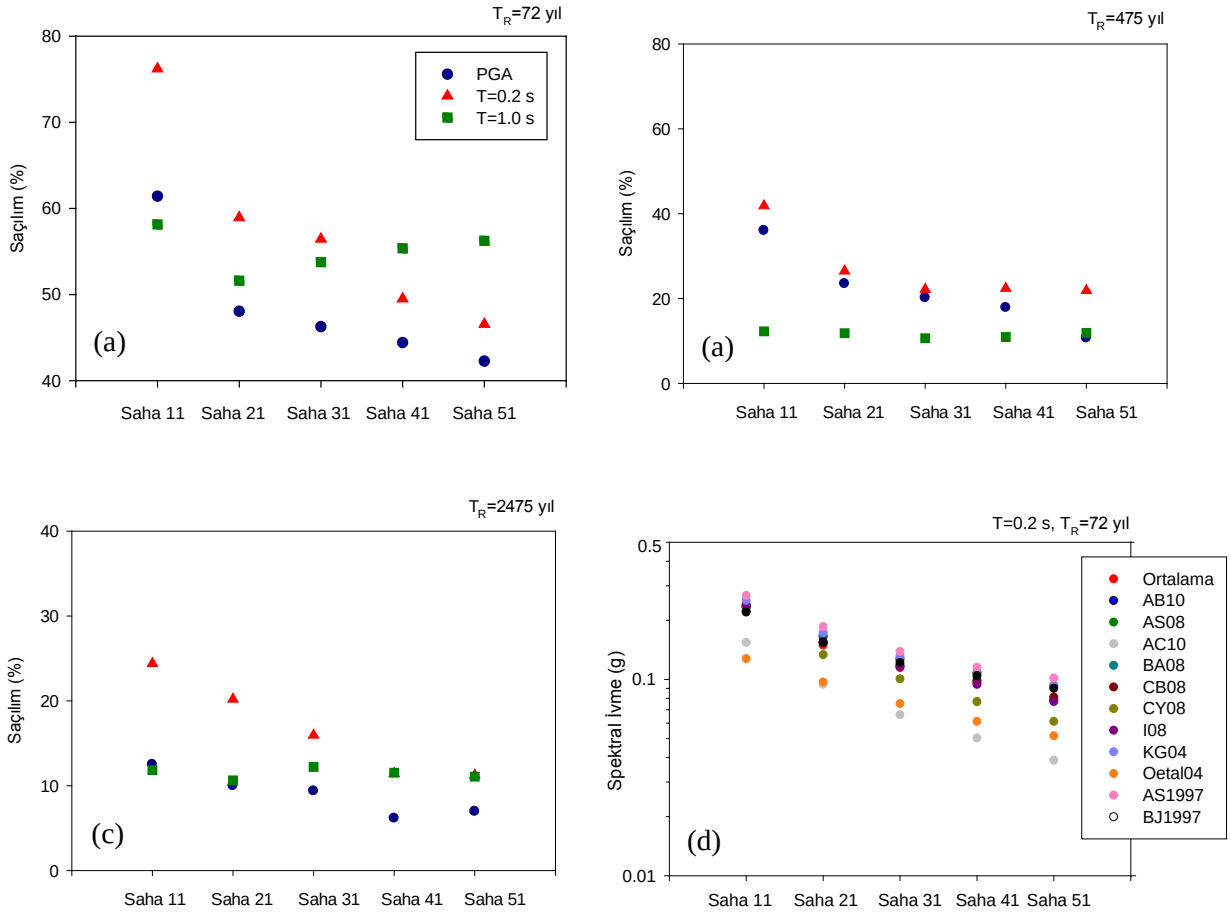
Birinci ve ikinci kümeye ait hesaplamalar doğrultusunda, fayın dalma açısındaki belirsizliğin sismik tehlikeye etkisi incelenmiştir. Karşılaştırmada karakteristik deprem modeli esas alınmıştır. Dalma açısının 60 ve 90 derece olduğu durumlar arasında kıyaslama yapılmış ve belirsizliğin sismik tehlike üzerindeki etkileri Tablo 3'de gösterilmiştir. Tablo 3'den anlaşıldığı gibi, en yüksek saçılım oranı PGA ve T_R =72 yıl için %4.5 iken en düşük saçılım T=1.0 s ve T_R =2475 yıl için %0.2 civarındadır. Geriye kalan aşılma seviyeleri ve periyotlar için hesaplanan saçılımlar ise bahsi geçen minimum ve maksimum seviyeler arasında değişmektedir. Bu bağlamda, fayın dalma açısından kaynaklanan belirsizliğin deprem tehlikesi hesabına önemli derece etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.

Deprem tekerrür modeli seçimine bağlı belirsizlik Şekil 3'de gösterildiği üzere incelenmiştir. Fayın dalma açısının 90 derece olduğu durum esas alınmıştır. Karaktestik ve kesilmiş üstel deprem tekerrür modeli arasındaki fark yüzdelik olarak ifade edilmiştir. Böylece sonuçlar yer hareketi modeli seçiminden kaynaklanan saçılım ile karşılaştırılabilmektedir. Bu bağlamda, sismik kaynağa bağlı belirsizlikler irdelendiğinde deprem tekerrür modeli seçiminden kaynaklanan belirsizliğin önemli bir rol oynadığı gözlemlenmiştir. Şekil 2 ve 3

karşılaştırıldığında, PGA ve T=0.2s için hesaplanan spektral ivme için bu belirsizlik yer hareketi tahmin denklemi seçiminden kaynaklanan belirsizlik kadar önemlidir. Ancak, T=1.0 s ve T_R=475 yıl ile T_R=2475 yıl için hesaplanan spektral ivmeler açısından esas olarak azalım ilişkisi seçimi önem kazanmaktadır.

Tablo3. Normalize edilmiş parametreler arasındaki dağılım (%)

Periyot	Dalma Açısının Seçiminden Kaynaklanan Saçılım(%)		
	T_R =72	T_R =475	T_R =2475
PGA	0.6-4.5	0.5-3.4	0.3-2.3
T= 0.2 s	0.9-3.8	0.4-2.8	0.3-2.9
T= 1.0 s	0.6-2.3	0.3-1.3	0.2-0.9



Şekil 3. (a) T_R =72 yıl , (b) T_R =475 yıl (c) T_R =2475 yıl seviyeleri için saçılım miktarları , (d) maksimum saçılıma sahip spektral ivme değerleri

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 200 km uzunluğunda farazi bir çizgisel fay kaynağı modellenerek sismik kaynağa ve yer hareketi parametrelerine bağlı belirsizliklerin olasılıksal tehlike hesabı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hesaplar T_R = 2475 yıl, T_R = 475 yıl ve T_R = 72 yıl yer hareketi tekrar periyotlarına ve bu periyotlara karşılık gelen PGA, T=0.2s ve T=1.0s spektral ivme değerleri için yapılmıştır. Sismik kaynağa bağlı parametrelerden dalma eğimi ile deprem tekerrür modellerinin etkileri irdelenmiştir. Yer hareketi parametrelerinin belirsiziliği ise farklı araştırmacıların önerdiği 11 adet yer hareketi tahmin denklemi ile dikkate alınmıştır. Seçilen senaryolar ve bunlara göre yapılan hesaplamalar doğrultusunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

i. Yer hareketi tahmin denklemlerinden kaynaklanan belirsizliğin tehlike hesabı üzerindeki etkileri genelde daha önemlidir.
ii. Fayın sahalara olan göreli uzaklıkları, yer hareketi tahmin denklemleri seçimi kadar büyük önem taşımamamaktadır.
iii. Fayın dalma açısındaki belirsizliği tehlike hesabı üzerinde önemli bir rol oynamamaktadır.
iv. Daha çok düşük tekrar periyotları (T_R = 72 yıl) ve kısa periyotlar (PGA ve T=0.2s) söz konusu olduğunda deprem tekerrür modellerinden kaynaklanan belirsizlik yer hareketi tahmin denklemlerinden kaynaklanan belirsizlik kadar önemli olmaktadır. Uzun periyot (T=1.0s) ve büyük tekrarlama periyotları (T_R = 475 ve 2475 yıl) için ise yer hareketi tahmin denklemlerindeki belirsizlik daha fazla önem kazanmaktadır.

KAYNAKLAR

Abrahamson NA ve Silva WJ (1997). “Empirical response spektral attenuation relations for shallow crustal earthquakes,” Seismological Research Letters, 68: 94-127.

Abrahamson N ve Silva W (2008). “Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations”, Earthquake Spectra, 24(1): 67-97.

Akkar, S. and Bommer, J.J., 2010. "Empirical Equations for the Prediction of PGA, PGV and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region and the Middle East," Seismological Research Letters, 81: 195-206.

Akkar S ve Çağnan Z (2010). “A local ground-motion predictive model for Turkey and its comparison with other regional and global ground-motion models, Bulletin of the Seismological Society of America, 100, 2978-2995.

Bommer, J.J.,. Scherbaum, F., Bungum, H., Cotton, F., Sabetta, F., ve Abrahamson N.A. (2005). On the use of logic trees groudn-motion prediction equations in seismic hazard analysis. Bulletin of the Seismological Society of America, 95, 377–389.

Boore DM, ve Atkinson GM (2008). “Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s,” Earthquake Spectra 24(1): 99-138.

Boore, D. M., W. B. Joyner, and T. E. Fumal (1997). Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: A summary of recent work (with 2005 erratum), Seism. Res. Letters 68, 128--153

Campbell KW, ve Bozorgnia Y (2008). "NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s," Earthquake Spectra, 24(1): 139-171.

Chiou B, ve Youngs RR (2008). "An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra," Earthquake Spectra, 24(1): 173-215.

Idriss IM (2008). "An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes," Earthquake Spectra, 24: 217-242.

Kalkan, E. ve Gülkan, P. (2004). Site-dependent spectra derived from ground motion records in Turkey. *Earthquake Spectra*, **20**, 1111–1138.

McGuire RK (2004). Seismic Hazard and Risk Analysis, Earthquake Engineering Research Institute Monograph, MNO-10, CA, 221p

Özbey, C., Sari, A., Manuel, L., Erdik, M. ve Fahjan, Y. (2004). An empirical attenuation relationship for northwestern Turkey ground motion using a random effects approach. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24(2), 115–125.

Sabetta, F., Lucantoni, A., Bungum, H., ve Bommer, J.J., (2005). Sensitivity of PSHA results to ground motion prediction relations and logic-tree weights. Soil, Dyn. Earthq. Eng, 25, 317–329.

Scherbaum, F., Bommer, J.J., Bungum, H., Cotton, F., ve Abrahamson N.A. (2005). Composite groudn-motion models and logic tress: methodology, sensitivities and uncertainties. Bulletin of the Seismological Society of America, 95, 1575–1593.

Schwartz, DP ve Coppersmith KJ (1984). "Fault behavior and charactersitic eartquakes: examples from the Wasatch and San Andreas faults. Journal of Geophysical Research, 89: 5681-5698.

Wells D, ve Coppersmith KJ (1994). "New emprical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement," Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4): 974-1002.