MERKEZ-HEDEF YÖNTEMİNİN KULLANILMASI İLE DOĞU AKDENİZ BÖLGESİ KABUK VE DERİN DEPREMLERİ İÇİN YER HAREKETİ AZALIM İLİŞKİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Z. Çağnan[1]

[1] *Yardımcı Doçent Doktor, İnşaat Müh. Programı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi*
Kuzey Kıbrıs Kampusu, Kalkanlı Güzelyurt, KKTC
Email: cagnan@metu.edu.tr

ÖZET:

Kıbrıs adası üzerinde alınmış yer hareketi kayıtlarının sayıları oldukça az olduğundan güncel ampirik yer hareketi azalım ilişkilerinin geliştirilmesi mümkün değildir. Bu çalışmada, Campbell (2003) tarafından revize edilerek yeniden gündeme getirilen Merkez-Hedef yönteminin kullanılması ile Doğu Akdeniz kabuk ve Wandati Benioff Zonu depremleri için yer hareketi azalım ilişkileri geliştirilmiştir. Doğu Akdeniz bölgesi kabuk ve Wandati Benioff Zonu depremleri için kaynak, yayılım ve zemin büyütme parametreleri eldeki sınırlı yer hareketi kayıtları kullanılarak belirlenmiş; bu parametrelerin ve stokastik simülasyon yönteminin kullanılmasıyle Doğu Akdeniz ('hedef') bölgesi için sentetik yer hareketi verisi elde edilmiştir. Campbell (2003) yöntemiyle elde edilen sentetik yer hareketi verisi 'merkez' bölgesi ampirik yer hareketi azalım ilişkileri üzerinde kullanılacak düzeltme faktörlerine dönüştürülmüştür. Bu çalışmada seçilen 'merkez' bölgeleri: kabuk depremleri için Kuzeybatı Amerika, Wandati Benioff Zonu depremleri içinse Cascadia bölgeleridir. Bu çalışma çerçevesinde elde edilen yer hareketi azalım ilişkileri Akkar ve Bommer (2010), Atkinson ve Boore (2011), Boore ve Atkinson (2003), Zhao vd. (2006), Abrahamson vd. (2012) ampirik yer hareketi azalım ilişkileri ile karşılaştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Yer hareketi azalım ilişkileri, deprem tehlikesi, Akdeniz.

1. GİRİŞ

Kıbrıs adası üzerinde kuvvetli yer hareketi şebekelerinin işletilmesine 1990'lı yılların ikinci yarısında başlanmıştır. Bununla birlikte ada üzerindeki alet sayısının halen daha oldukça sınırlı olması, elde edilen kayıtların şebekeleri işleten kurumlara mensup olmayan araştırmacılara açık olmaması ve kurumlar arası işbirliğinin eksikliği Kuzeydoğu Akdeniz bölgesine özel bir yer hareketi azalım ilişkisinin geliştirilmesini mümkün kılmamaktadır. Bu bölge için geliştirilen tek yerel yer hareketi azalım ilişkisi Kyriakides (2007) çalışması çerçevesinde elde edilen ilişkidir. Bu ilişki, büyüklükleri 4.00-5.8 (M_s, yüzey dalga büyüklüğü) aralığında değişen 15 depremden elde edilmiş olan 30 kuvvetli yer hareketi kaydına dayanmaktadır. Bu ilişkide kullanılan değişkenler M_s, deprem merkezine olan mesafe ve zemin sınıfı olup uzun peryotlu yer hareketini kontrol eden sadece büyüklüğe bağlı kısımda linear bir fonksiyon tercih edilmiş, mesafeye bağlı yer hareketi sönümünü kontrol eden kısımda ise büyüklük etkisi göz ardı edilmiştir. Yukarıda sıralanan eksikliklerden dolayı bu çalışma Campbell (2003) tarafından güncellenerek yeniden gündeme getirilen Merkez-Hedef yöntemini kullanarak Kuzeydoğu Akdeniz bölgesine özel yer hareketi azalım ilişkileri geliştirmeyi hedefler.

Campbell (2003) yönteminde, 'merkez' bölgesi (kuvvetli yer hareketi verisinin ve güncel, güvenilir ampirik azalım ilişkilerinin mevcut olduğu bölge) için geliştirilmiş olan ampirik yer hareketi azalım ilişkileri Merkez-Hedef dönüştürme faktörleri kullanılarak 'hedef' bölgesi (eldeki kuvvetli yer hareketi verisinin nisbeten az

olduğu bölge) azalım ilişkilerine dönüştürülürler. Bu metod, stokastik simülasyon yönteminin (Boore,2003) kullanılması ile hem 'merkez' hem 'hedef' bölgeleri için sentetik yer hareketi verisinin elde edilmesi ve her iki bölge için elde edilen bu verinin birbirlerine oranı olan Merkez-Hedef dönüştürme faktörlerinin hesaplanmasını içerir. Stokastik simülasyon yönteminin uygulanabilmesi için gerekli kuvvetli yer hareketi kayıt sayısının ampirik azalım ilişkilerinin geliştirilmesi için gerekli kuvvetli yer hareketi kayıt sayısına kıyasla oldukça az olması Merkez-Hedef yönetminin uygulanmasına olanak vermektedir. Merkez-Hedef yönteminde (1) 'hedef' bölgesi için geliştirilen yer hareketi azalım ilişkileri 'merkez' bölgesinde kaydedilen çok sayıda kuvvetli yer hareketi verisinin etkisini içerir, (2) 'merkez' bölgesi azalım ilişkileri için elde edilmiş olan epistemik belirsizlik değerleri 'hedef' bölgesi için elde edilen azalım ilişkilerine aktarılır. Bu iki özellik, Merkez-Hedef yöntemini az sayıda kuvvetli yer hareketi verisine sahip 'hedef' bölgeleri için ampirik yer hareketi azalım ilişkileri geliştirmeyi içeren yöntemlere kıyasla güçlü kılan ana özelliklerdir. Merkez-Hedef yöntemi yeniden güncellenerek gündeme getirildiği 2003 yılından beri bir çok bölgeye başarıyla uygulanmıştır: Kuzey Amerika (Campbell, 2003), İspanya, Norveç (Douglas vd., 2006), Gürcistan (Askan, 2011) gibi.

Bu makalede, kuvvetli yer hareketi kayıt sayısı oldukça sınırlı olan Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi için Merkez-Hedef yönteminin (Campbell, 2003) kullanılması suretiyle kabuk ve Wandati Benioff zonu depremleri için azalım ilişkilerinin geliştirilme süreci anlatılmakta ve elde edilen ilişkilerin Akkar ve Bommer (2010), Atkinson ve Boore (2011), Boore ve Atkinson (2003), Zhao vd. (2006), Abrahamson vd. (2012) ampirik yer hareketi azalım ilişkileri ile karşılaştırılması yapılmaktadır.

2. MERKEZ-HEDEF YÖNTEMİNİN UYGULANMASI

Merkez-Hedef yönteminin Kuzeydoğu Akdeniz bölgesine uygulanmasındaki ilk adımı, eldeki bölgesel kuvvetli yer hareketi verisinin kullanılması ile 'hedef' bölgesi (Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi) sentetik yer hareketi verisinin elde edilmesinde kullanılacak stokastik kaynak, yayılım ve zemin büyütme model parametrelerinin belirlenmesi oluşturmuştur. Çalışmanın bu kısmında büyüklükleri 4.0-6.7 (M_w, moment büyüklüğü) aralığında değişen depremlere ait toplam 61 kuvvetli yer hareketi kaydı kullanılmıştır. Bu veri öncelikle standart olmayan hatalara (Douglas, 2003) karşı incelenmiş daha sonra da Akkar ve Bommer (2006) ve Akkar vd. (2011) makalelerinde tarif edilen yöntemler uygulanarak yüksek ve alçak geçirimli filtre işlemine tabii tutulmuştur. Kayıtların işlenmesi ve filtrelenmiş hallerine ait Fourier büyüklük spektrumlarının elde edilmesi için Orta Doğu Teknik Üniversitesi-Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi tarafından geliştirilmiş olan USDP yazılımı kullanılmıştır (web.ce.metu.edu.tr/~sakkar/usdp.html). Bu çalışmada kullanılan stokastik nokta kaynak modelinde, kaynaktan belirli bir mesafe uzakta bulunan herhangi bir gözlem noktasındaki S-dalgasına ait Fourier büyüklük spektrumu frekans uzayında kaynak, yayılım ve saha filtre fonksiyonlarının çarpımı olarak aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$A(f)=S(f)P(f)D(f) \tag{1}$$

Denklem 1'de f frekans, S(f) kaynak spektrumu, P(f) yayılma etkilerini içeren filtre, D(f) Kappa zemin faktörünü ve zemin büyütme faktörlerini içeren saha filtresidir (Boore, 2003). S(f) ve D(f) fonksiyonları Denklem 2'de bu çalışmada kullanıldıkları şekilde açık halleri ile verilmektedir.

$$\ln\left(A(f)\right) = lnC + lnM_o + ln\left(\frac{(2\pi f)^2}{1+\left(\frac{f}{f_o}\right)^2}\right) + P(f) - \pi f K_{ov} + \ln\left(\frac{H}{V}\right) \tag{2}$$

$$C = \frac{F_S R_{\theta\varphi} P}{4\pi\rho\beta^3} \quad (2.1)$$

$$f_o = 4.910^6\, \beta(\frac{\Delta\sigma}{M_o}) \quad (2.2)$$

Denklem 2'de F_s=2, $R_{\theta\Phi}$=0.55, P=0.707, ρ=2.8g/cm^3, β=3.7 km/s olarak alınmıştır. Kayıt alınan sahalarda H/V oranının (yatay yöndeki harekete tepki spektrumun düşey yöndeki hareketin tepki spektrumuna oranı) frekansa bağlı değişiminin elde edilmesinde J-sesame (2004) yazılımı kullanılmıştır. H/V oranlarının hesaplanmasında 10sn'lik pencereler kullanılmıştır. K_{ov} parametresi ise Uğurhan ve Aşkan (2010), Durukal (2002), Akıncı vd. (2006), Ansal vd. (2009), Anderson vd. (2001) çalışmalarına paralel olarak 0.047 olarak alınmıştır. Denklem 2'de tanımlanmış olan S(f) ve D(f) modelleri ile Eyidoğan ve Akıncı (1999), Ansal vd. (2009), Bingoren ve Irikura (2005), Uğurhan ve Aşkan (2010), Boore vd. (2009), Hatzidimitriou (1995), Margaris ve Hatzidimitriou (2002), Roumelioti vd. (2004), Atkinson (1995), Atkinson ve Macias (2009), Macias vd. (2008) ve Ordaz ve Sigh (1992) çalışmalarında yer alan P(f) yayılma modellerinin kullanılması ile eldeki kuvvetli yer hareketi kayıtlarına en uyumlu stokastik kaynak, yayılım ve zemin büyütme model parametreleri belirlenmiştir. Kayıtlara uyumun irdelenmesinde Denklem 3'de verilen frekans uzayında hata denklemi kullanılmıştır:

$$E(f) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} log\left(\frac{A_i(f)_{gözlemlenen}}{A_i(f)_{sentetik}}\right) \quad (3)$$

Denklem 3'de, n simulasyonlarda kullanılan istasyon sayısına, A_i(f) ise i. istasyona karşılık gelen Fourier büyüklük spektrumunu temsil etmektedir. Bu çalışmada, E(f) hata değerlerinin 0.25-25Hz aralığında minimize edilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre sığ kabuk (crustal) depremleri için Ansal vd. (2009) ve Uğurhan ve Aşkan (2010) P(f) modelinin, derin (inslab) depremler için Boore vd. (2009)'da verilen modelin ve arayüz (interface) depremleri için ise Macias vd. (2008) ve Ordaz ve Sigh (1992) modellerinin en uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Merkez-Hedef yönteminin Kuzeydoğu Akdeniz bölgesine uygulanmasındaki ikinci adımda kabuk, derin ve arayüzey depremleri için belirlenen model parametrelerinin kullanılması ile büyüklük M_w=5.0, 5.2, 5.4, 5.6, 5.8, 6.0, 6.2, 6.4, 6.6, 6.8, 7.0, 7.2, 7.4, 7.6, 7.8, 8.0 ve faya en kısa mesafe (closest distance to rupture) R=1, 2, 3, 5, 7, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100km değerleri için 'hedef' bölgesi yer hareketi simüle edilmiştir. Merkez-Hedef yönteminin sonraki adımları aşağıda kabuk, derin ve arayüzey depremleri için ayrı ayrı verilmektedir.

2.1. Kabuk Depremleri

Kuzeydoğu Akdeniz 'hedef' bölgesi için kullanılan kabuk depremleri model parametereleri ve bu parameterelere atanan ağırlıklar Tablo 1'de verilmektedir. Ağırlıklar eldeki bölgesel yer hareketi verisine uyum gözönünde bulundurularak belirlenmiştir. Campbell (2003) yöntemi çerçevesinde 'merkez' olarak Kuzeybatı Amerika bölgesi seçilmiş ve bu bölge için yine Campbell (2003) makalesinde verilen kaynak, yayılım ve zemin büyütme parametreleri kullanılmıştır (Tablo 1). Bu çalışmada, kuzeydoğu Akdeniz bölgesine kıyasla kuzeybatı Amerika bölgesi için belirlenen simülasyon parametrelerinde belirsizlik olmadığı varsayılmaktadır. Kuzeybatı Amerika bölgesi için verilen yerel zemin profili ve büyütme faktörleri Boore ve Joyner (1997) çalışmasından alınmıştır. Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi için verilen yerel zemin profili ise Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kuzey Kıbrıs Kampusu tarafından geliştirilen KKTC-NET Kuvvetli Yer Hareketi Şebekesi Esentepe istasyonuna (KT006) ait zemin profilidir (Tablo 2). Bu zemin profiline karşılık gelen büyütme faktörleri çeyrek dalga boyu yöntemi

(Boore, 2003) kullanılarak elde edilmiştir. 'Merkez' ve 'hedef' bölgeleri için geliştirilen sentetik yer hareketi verisinin karşılaştırılması ile elde edilen düzeltme faktörlerinin merkez bölgesi için geçerli ampirik yer hareketi azalım ilişkilerine uygulanması suretiyle hedef bölgesi yer hareketi azalım ilişkleri elde edilmiştir. Bu çalışmada merkez bölgesi için Atkinson ve Boore (2011), Campbell ve Bozorgnia (2008) ve Abrahamson ve Silva (2008) ampirik yer hareketi azalım ilişkileri eşit ağırlık (0.33) verilerek kullanılmıştır. Hedef bölgesi için birden fazla stokastik model parametresinin kullanılması ve 'merkez' bölgesi için birden fazla ampirik yer hareketi azalım ilişkisinin kullanılması epistemik belirsizlik değerlerinin güvenilir biçimde hesaplanmasına olanak sağlamaktadır.

Şekil 1'de Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi için geliştirilen yer hareketi azalım ilişkileri maksimum yer ivmesi, 0.2sn'lik ve 1sn'lik periyotlara karşılık gelen spektral ivme parametreleri için örnek olarak verilmektedir. Bu parametrelerin mesafeye bağlı değişimi Atkinson ve Boore (2011), Akkar ve Bommer (2010) ampirik ilişkileri ile karşılaştırılmıştır. Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi için geliştirilen ilişkilerin Atkinson ve Boore (2011), Akkar ve Bommer (2010) global yer hareketi azalım ilişkleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmektedir.

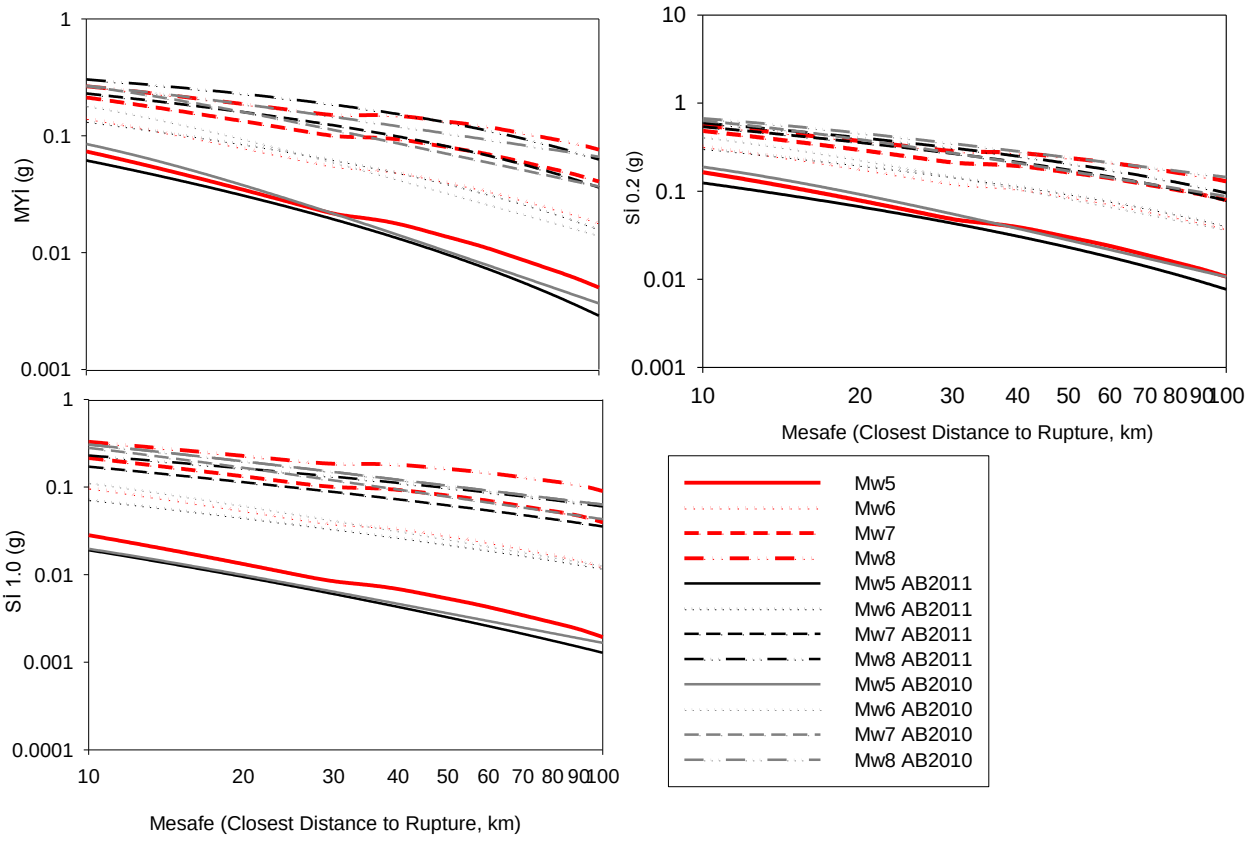
Atkinson ve Boore (2011), Akkar ve Bommer (2010) çalışmalarında R_{JB} Joyner ve Boore mesafesi, Campbell ve Bozorgnia (2008), Abrahamson ve Silva (2008) çalışmalarında ise R_{RUP} fay düzlemine en kısa mesafe değişkenleri kullanılmaktadır. Stokastik simülasyonlarda ise mesafe değişkeni fay düzlemine en kısa mesafe olduğundan, Joyner ve Boore mesafe değerlerinin fay düzlemine en kısa mesafe değerlerine dönüştürülmesinde Scherbaum vd. (2004) çalışmasında verilen ilişkiler kullanılmıştır. Kuzeybatı Amerika bölgesinde değişik faylanma tiplerinin yer hareketi üzerindeki etkisinin Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi içinde geçerli olması gerektiği düşünülmediğinden Kuzeybatı Amerika bölgesi için Atkinson ve Boore (2011), Campbell ve Bozorgnia (2008) ve Abrahamson ve Silva (2008) ampirik denklemleri kullanılırken faylanma tipi bilinmeyen olarak modellenmiştir. Bu Campbell ve Bozorgnia (2008), Abrahamson ve Silva (2008) ilişkilerinde ek hata payına sebep olacağından, Campbell (2003) çalışmasında verilen ek değerler ölçüsünde bu çalışmalarda kullanılan standart sapma değerleri artırılmıştır. Campbell ve Bozorgnia (2008) ve Abrahamson ve Silva (2008) modellerindeki 'asılı duvar (hanging wall)' etkisi gözardı edilmiş ancak bu çalışmalarda asılı duvar etkisinin gözlemlendiği kayıt sayısı sınırlı olduğundan bu değişiklik sebebi ile modellerin standart sapma değerleri artırılmamıştır.

Tablo 1. Kabuk depremleri için kullanılmış sismolojik parametreler (birden fazla değerin/fonksiyonun verildiği durumlarda uygulanan ağırlıklar parantez içinde verilmektedir)

Parametre	**Kuzeybatı Amerika**	**Kuzeydoğu Akdeniz**
Stres düşümü	100	100*(0.75)*,70*(0.25)*
Geometrik yayılım faktörü	1/R R<40km $1/R^{0.5}$ R>40km	1/R R<30km $1/R^{0.4}$ 30<R<60km $1/R^{0.6}$ 60<R<90km $1/R^{0.8}$ 90<R<100km $1/R^{0.5}$ R>100km
Kaynak süresi T_s (sec)	$1/f_o$	$1/f_o$
Yayılma süresi T_p (sec)	0.05R	0.05R
Elastik olmayan sönüm katsayısı Q	$180f^{0.45}$	$180f^{0.45}$
S dalga hızı β (km/s)	3.5	3.7
Kabuk yoğunluğu (g/cc)	2.8	2.8
Kappa faktörü, K_o (sec)	0.04	0.047*(0.75)*, 0.055*(0.25)*
Yerel zemin profili	Kuzeybatı Amerika kayası (620 m/s)	Kıbrıs kayası (760 m/s)

Tablo 2. Stokastik simülasyonlarda kullanılan yerel zemin profilleri

Kuzeybatı Amerika			Kuzeydoğu Akdeniz		
Derinlik z (km)	**S dalga hızı β (km/sec)**	**Kabuk yoğunluğu p (g/cc)**	**Derinlik z (km)**	**S dalga hızı β (km/sec)**	**Kabuk yoğunluğu p (g/cc)**
≤0.001	0.245	2.495	0.005	0.444	2.514
0.001-0.03	$2.206z^{0.272}$	-	0.01	0.611	2.529
0.03-0.19	$3.542z^{0.407}$	-	0.18	0.649	2.533
0.19-4.00	$2.505z^{0.199}$	-	0.027	0.970	2.563
4.00-8.00	$2.927z^{0.086}$	-	0.032	0.908	2.557
≥8.00	3.500	2.800	0.032-2	1.400	2.603
			2-6	2.000	2.659
			6-14	3.500	2.800
			>14	3.700	2.819



Şekil 1. Campbell (2003) Merkez-Hedef yönteminin kullanılması ile Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi kabuk depremleri için geliştirilen maksimum yer ivmesi, 0.2sn'lik ve 1sn'lik periyotlara karşılık gelen spektral ivme azalım ilişkilerinin (kırmızı) Atkinson ve Boore (2011) AB2011 (siyah), Akkar ve Bommer (2010) AB2010 ilişkileri (gri) ile karşılaştırılması. Verilen azalım ilişkileri V_{s30}=760 m/s zemin koşulu için geçerlidir.

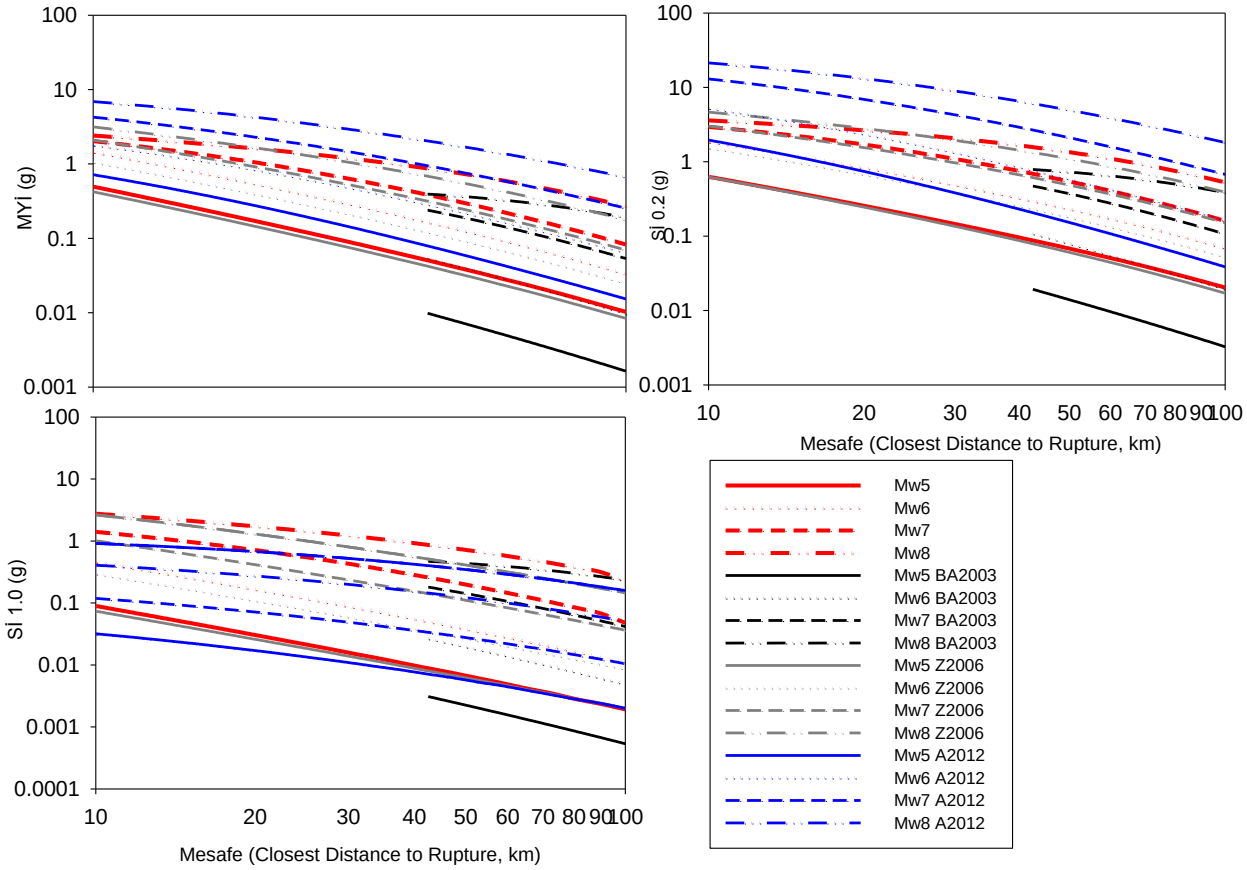
2.2. Derin Depremler

Campbell (2003) yönteminin derin depremler (inslab) için uygulanmasında (1) literatürde derin deprem kaynak ve yayılım parametrelerinin çok sınırlı sayıda yer almasından 'merkez' bölgesi stokastik model tanımlamasının yapılmasında ve (2) stokastik simülasyon sonuçları ile uyumlu ampirik azalım ilişkilerinin bulunmasında problemlerle karşılaşılmıştır. Bu çalışmada, derin depremler için Cascadia bölgesi merkez bölgesi olarak seçilmiştir. Cascadia bölgesi derin depremlerinin simüle edilmesi için Atkinson (1995) çalışmasında verilen kaynak, yayılım ve zemin büyütme parametreleri kullanılmıştır. Stokastik simülasyonlardan elde edilen yer hareketi verisinin Atkinson ve Boore (2003), Zhao vd. (2006) ve Abrahamson vd. (2012) ampirik ilişkileri ile karşılaştırılması ile simülasyon sonuçları ve ampirik değerler arasında oldukça büyük farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Atkinson ve Boore (2003) ve Zhao vd. (2006) ampirik ilişkilerinin M_w=7.0 ve 8.0 değerleri için uyumlu olduğu ancak düşük büyüklük değerleri için oldukça farklı davranışlar gösterdikleri gözlemlenmiştir. Zhao vd. (2006) ve Abrahamson vd. (2012) ampirik ilişkilerinin yüksek periyotlardaki spektral ivme değerleri için uyum gösterdikleri ancak düşük periyotlarda oldukça farklı davranışlar sergiledikleri gözlemlenmiştir. Atkinson (1995) çalışmasında kullanılan depremlerin ağırlıklı olarak büyüklüklerinin 5.0'den az olması sebebi ile bu çalışmada kullanılan 30 bar'lık stres düşümü değerinin ampirik ve simülasyon değerleri arasındaki farka sebebiyet verdiği düşünülmüştür. Stres düşümü değerinin azaltılıp artırılması ile ampirik ilişkilerle en uyumlu stres düşümü değeri olan 200 bar'a ulaşılmıştır. Bu çalışmada, Atkinson (1995) çalışmasındaki tüm parameterelerin korunması ancak stres düşümü değeri olarak 200 bar'ın kullanılması ve 'merkez' bölgesi için geçerli ampirik yer hareketi azalım ilişkileri olarak Atkinson ve Boore (2003) M_w>6.5 ve Zhao vd. (2006) ilişkilerinin Mw 5.0-8.0 depremleri için kullanılmasına karar verilmiştir. Zhao vd. (2006) ilişkisi için kullanılan ağırlık 0.6, Atkinson ve Boore (2003) ilişkisi için kullanılan ağırlık ise 0.4 tür.

Hedef bölgesi için kullanılan model parametereleri ve bu parameterelere atanan ağırlıklar Tablo 3'de verilmektedir. Cascadia bölgesi için kullanılan yerel zemin profili Atkinson (1995) çalışmasından alınmıştır. Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi içinse yukarıda verilen Esentepe istasyonuna (KT006) ait zemin profili kullanılmıştır. Şekil 2'de Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi derin depremleri için geliştirilen yer hareketi azalım ilişkileri maksimum yer ivmesi, 0.2sn'lik ve 1sn'lik periyotlara karşılık gelen spektral ivme parametreleri için örnek olarak verilmektedir. Bu parametrelerin mesafeye bağlı değişimi Atkinson ve Boore (2003), Zhao vd. (2006) ve Abrahamson vd. (2012) ampirik ilişkileri ile karşılaştırılmıştır. Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi derin depremleri için geliştirilen ilişkilerin Zhao vd. (2006) yer hareketi azalım ilişkisi ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Atkinson ve Boore (2003) ve Zhao vd. (2006) ilişkilerinde mesafe değişkeni R_{RUP} fay düzlemine en kısa mesafe ve Abrahmson vd. (2012) ilişkisinde R_{hyp} kaynak merkezine olan mesafedir. Şekil 2'de kaynak merkezine olan mesafe değerlerinin fay düzlemine en kısa mesafe değerlerine eşit olduğu kabulu yapılmıştır.

Tablo 3. Derin depremler (inslab) için kullanılmış sismolojik parametreler (birden fazla değerin/fonksiyonun verildiği durumlarda uygulanan ağırlıklar parantez içinde verilmektedir)

Parametre	**Cascadia**	**Kuzeydoğu Akdeniz**
Stres düşümü	200	200*(0.2)*,400*(0.3)*,600*(0.3)*,800*(0.2)*
Geometrik Yayılım faktörü	1/R	1/R
Kaynak süresi T_s (sec)	$1/f_o$	$1/f_o$
Yayılma süresi T_p (sec)	0.05R	0.05R
Elastik olmayan sönüm katsayısı Q	$263f^{0.49}$	$150f^{0.8}$ (0.33), $251f^{0.58}$ (0.33), $194f^{0.9}$ (0.33)
S dalga hızı β (km/s)	3.7	3.7
Kabuk yoğunluğu (g/cc)	2.7	2.8
Kappa faktörü, K_o (sec)	0.02	0.047*(0.75)*, 0.055*(0.25)*
Yerel zemin profili	Cascadia kayası (760 m/s)	Kıbrıs kayası (760 m/s)



Şekil 2. Campbell (2003) Merkez-Hedef yönteminin kullanılması ile Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi derin depremleri için geliştirilen maksimum yer ivmesi, 0.2sn'lik ve 1sn'lik periyotlara karşılık gelen spektral ivme azalım ilişkilerinin (kırmızı) Boore ve Atkinson (2003) BA2003 (siyah), Zhao vd. (2006) Z2006 (gri), Abrahamson vd.(2012) A2012 ilişkileri (mavi) ile karşılaştırılması. Verilen azalım ilişkileri V_{s30}=760 m/s ve 50km'lik derinlik değerleri için geçerlidir.

2.3. Arayüzey Depremleri

Campbell (2003) yönteminin arayüzey depremleri (interface) için uygulanmasında çalışmanın derin depremlerle ilgili kısmında yapılan gözlemlere benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Arayüzey depremleri içinde Cascadia bölgesi merkez bölgesi olarak seçilmiştir. Cascadia bölgesi arayüzey depremlerinin simüle edilmesi için Atkinson ve Macias (2009) çalışmasında verilen kaynak, yayılım ve zemin büyütme parametreleri kullanılmıştır. Stokastik simülasyonlardan elde edilen yer hareketi verisi Atkinson ve Boore (2003), Zhao vd. (2006) ve Abrahamson vd. (2012) ampirik ilişkileri ile karşılaştırılmıştır. Atkinson ve Boore (2003) ve Zhao vd. (2006) ampirik ilişkilerinin derin depremlerde olduğu gibi Mw=7.0 ve 8.0 değerleri için uyumlu olduğu ancak düşük büyüklük değerleri için farklı davranışlar gösterdikleri gözlemlenmiştir. Zhao vd. (2006) ve Abrahamson vd. (2012) ampirik ilişkilerinin yine derin depremlerde olduğu gibi yüksek periyotlardaki spektral ivme değerleri için uyum gösterdikleri ancak düşük periyotlarda farklı davranışlar sergiledikleri gözlemlenmiştir. Cascadia bölgesi için elde edilen stokastik simülasyon sonuçlarının Zhao vd. (2006) ve Atkinson ve Boore (2003) ampirik ilişkileri ile en uygumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, Atkinson ve Macias (2009) makalesinde verilen tüm parameterelerin korunması

ve 'merkez' bölgesi için geçerli ampirik yer hareketi azalım ilişkileri olarak Atkinson ve Boore (2003) ve Zhao vd. (2006) ilişkilerinin sırasıyla Mw>6.5 ve Mw 5.0-8.0 depremleri için kullanılmasına karar verilmiştir. Bu çalışmada, Zhao vd. (2006) ilişkisi için kullanılan ağırlık 0.6, Atkinson ve Boore (2003) ilişkisi için kullanılan ağırlık ise 0.4 tür.

Hedef bölgesi için kullanılan model parametereleri ve bu parameterelere atanan ağırlıklar Tablo 4'de verilmektedir. 'Merkez' ve 'hedef' bölgeleri için geliştirilen sentetik yer hareketi verisinin karşılaştırılması ile elde edilen düzeltme faktörlerinin merkez bölgesi için geçerli ampirik yer hareketi azalım ilişkilerine uygulanması suretiyle hedef bölgesi yer hareketi azalım ilişklerine ulaşılmıştır. Stokastik simülasyonlarda Cascadia bölgesi için kullanılan zemin büyütme faktörleri derin depremlerde olduğu gibi Atkinson (1995) çalışmasından alınmıştır. Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi içinse yine Esentepe istasyonu zemin profili kullanılmıştır.

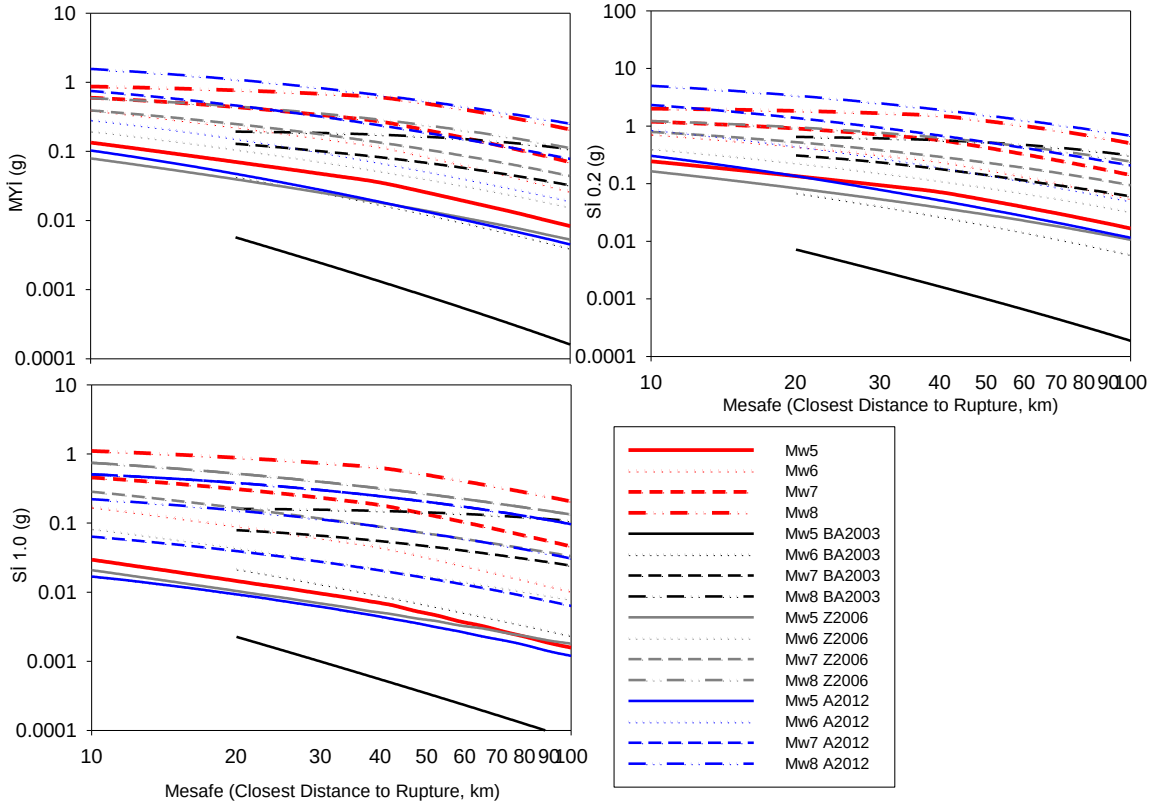
Şekil 3'de Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi arayüzey depremleri için geliştirilen yer hareketi azalım ilişkileri maksimum yer ivmesi, 0.2sn'lik ve 1sn'lik spektral ivme parametreleri için örnek olarak verilmektedir. Bu parametrelerin mesafeye bağlı değişimi Boore ve Atkinson (2003), Zhao vd. (2006), Abrahamson vd.(2012) ampirik ilişkileri ile karşılaştırılmıştır. Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi için geliştirilen ilişkilerin düşük periyotlarda Zhao vd. (2006), Abrahamson vd. (2012) yer hareketi azalım ilişkileri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek periyot ve M_w=7.0-8.0 depremleri içinse bu uyum nisbeten azalmaktadır.

Tablo 4. Arayüzey depremleri (interface) için kullanılmış sismolojik parametreler (birden fazla değerin/fonksiyonun verildiği durumlarda uygulanan ağırlıklar parantez içinde verilmektedir)

Parametre	**Cascadia**	**Kuzeydoğu Akdeniz**
Stres düşümü	90	50*(0.15)*,200*(0.15)*,400*(0.4)*,600*(0.15)*, 800*(0.15)*
Geometrik Yayılım faktörü	1/R R<40km $1/R^{0.5}$ R>40km	1/R
Kaynak süresi T_s (sec)	$1/f_o$	$1/f_o$
Yayılma süresi T_p (sec)	0.05R	0.05R
Elastik olmayan sönüm katsayısı Q	$180f^{0.45}$	$135f^{0.76}$ (0.5), $273f^{0.66}$ (0.5)
S dalga hızı β (km/s)	3.7	3.7
Kabuk yoğunluğu (g/cc)	2.7	2.8
Kappa faktörü, K_o (sec)	0.02	0.047*(0.75)*, 0.055*(0.25)*
Yerel zemin profili	Cascadia kayası (760 m/s)	Kıbrıs kayası (760 m/s)

3. SONUÇ

Bu çalışma çerçevesinde Merkez-Hedef yönteminin kullanılması ile Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi kabuk ve Wandati Benioff Zonu depremleri için yer hareketi (Maksimum yer ivmesi, 0.01-4sn aralığındaki periyotlara karşılık gelen spektral ivme parametreleri) azalım ilişkileri geliştirilmiş ve bu ilişkilere karşılık gelen belirsizlik değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen derin ve arayüzey depremleri azalım ilişkileri, Kıbrıs Arkı Wandati Benioff Zonu depremleri için bugüne kadar geliştirilmiş ilk azalım ilişkileridir. Bölgesel kuvvetli yer hareketi verisinin ileride artması ile stokastik model parametrelerinin bu çalışmada yapıldığı gibi hata denkleminin minimize edilmesi yerine direk olarak eldeki veriden elde edilmesini mümkün kılacaktır. Geliştirilen azalım ilişkileriyle bölgesel deprem tehlikesi hesaplarının güvenilirliğinin artırılması hedeflenmektedir.



Şekil 3. Campbell (2003) Merkez-Hedef yönteminin kullanılması ile Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi arayüzey depremleri için geliştirilen maksimum yer ivmesi, 0.2sn'lik, ve 1sn'lik periyotlara karşılık gelen spektral ivme azalım ilişkilerinin (kırmızı) Boore ve Atkinson (2003) BA2003 (siyah), Zhao vd. (2006) Z2006 (gri), Abrahamson vd.(2012) A2012 ilişkileri (mavi) ile karşılaştırılması. Verilen azalım ilişkileri V_{s30}=760 m/s ve 30km'lik derinlik değerleri için geçerlidir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 109Y346 no'lu TÜBİTAK 1001 Projesi çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna bu çalışmaya sağladığı maddi destekten ötürü teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

Abrahamson, N. ve Silva, W. (2008). Summary of the Abrahamson and Siva NGA ground motion relations. *Earthquake Spectra*, **24**, pp.67-97.

Abrahamson, N., Gregor, N., ve Addo, K. (2012). BCHydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes. *Earthquake Spectra* (yayınlanma aşamasında)

Akıncı, A., Malagnini, L., Hermann, R.B., Gok, R., ve Sorensen, M.B. (2006). Ground motion scaling in the Marmara region, Turkey. *Geophys. J. Int.*, **166**, pp.635-651.

Akkar, S., Kale, Ö., Yenier, E., ve Bommer, J.J., (2011). The high frequency limit of usable response spectral ordinates from filtered analogue and digital strong motion accelerograms. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **40**, pp.1387-1401.

Akkar, S. ve Bommer, J.J., (2006). Influence of long-period cut off on elastic spectral displacements. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **35**, pp.1145-1165.

Akkar, S. ve 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**, pp.195-206.

Anderson, J., Zeng, Y., ve Sucuoglu, H. (2001). Analysis of accelerations from the October 11995 Dinar, Turkey, earthquake. *Bulletin of Seismological Society of America*, **91**,pp.1433-1445.

Ansal, A., Akinci, A., Cultrera, G., Erdik, M., Pessina, V., Tonuk, G., ve Ameri, G. (2009). Loss estimation in İstanbul based on deterministic earthquake scenarios of the Marmara sea region (Turkey). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**, pp.699-709.

Askan, A. (2011). Establishment of Host-to-Target Relationships. *Section in EMME Project WP3 Progress Report, March 01, 2011*, Middle East Technical University (METU), Ankara, Turkey.

Atkinson, G. ve Boore, D.M., (2003). Empirical ground motion relations for subduction zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**, pp.1703-1729.

Atkinson, G.M. ve Boore, D.M. (2011). Modifications to existing ground motion prediction equations in light of new data. Bulletin of the Seismological Society of America, **101**, pp.1121-1135.

Atkinson, G.M. (1995).Attenuation and source parameters of earthquakes in the Cascadia region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **85**, pp.1327-1342.

Atkinson, G.M. ve Macias, M. (2009). Predicted ground motions for great interface earthquakes in the cascadia subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society America*, **99**,pp.1552-1578.

Bingoren, G. ve Irikura,K. (2005). Estimation of site response in time domain using the Meyer-Yamada wavelet analysis. *Bulletin of the seismological Society of America*, **95**, pp.1447-1456.

Boore, D.M., (2003). Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and Applied Geophysics*, **160**, pp.635–675.

Boore, D.M., Skarlatoudis, A., Margaris, B.N., Papazachos, C.B., ve Ventouzi, C. (2009). Along-arc and back-arc attenuation, site response, and source spectrum for the intermediate depth 8 january 2006 M6.7 Kythera, Greece, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99**, pp.2410-2434.

Boore, D.M., ve Joyner, W.B., (1997). Site amplification for generic rock sites. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **87**, pp.327-341.

Campbell; K.W., (2003). Prediction of strong ground motion using the hybrid empirical method and its use in the development of ground motion relations in eastern north america. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**, pp.1012-1033.

Campbell, K.W. 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 10s. *Earthquake Spectra*, **24**, pp.139-171.

Durukal, E. (2002).Critical evaluation of strong motion in Kocaeli and Duzce (Turkey) earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**, pp.589-609.

Douglas, J. (2003). What is a poor quality strong motion record. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **1**, pp.141-156.

Eyidoğan, H. ve Akıncı, A. (1999). Site attenuation and source parameters on the North Anatolian Fault zone, eastern Turkey estimated from the aftershocks of 13 March 1992 Erzincan earthquake. *Journal of Seismology*, **3**, pp.363-373.

J-sesame (2004) J-Sesame User Manual Version 1.08

Hatzidimitriou, P.M. (1995). S-wave attenuation in the crust waves of Northern Greece. *Pure Appl. Geophys.*, **140**, pp.1381-1387.

Macias, M., Atkinson, G., ve Motazedian, D., (2008). Ground-motion attenuation, source and site effects for the 26 September 2003 M8.1 Tokachi-Oki earthquake sequence. *Bulletin of Seismological Society of America*, **98**,pp.1947-1963.

Margaris, B.N. ve Hatzidimitriou, P.M. (2002). Source spectral scaling and stress release estimates using strong-motion records in Greece. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **92**,pp.1040-1059.

Ordaz, M., ve Sigh, S.K. (1992). Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes and evidence of amplification in the hill zone of Mexico city. *Bulletin of Seismological Society of America*, **82**, pp.24-43.

Roumelioti, Z., Kiratzi, A., Theodoulidis, N. (2004). Stochastic strong ground motion simulation of the 7 September 1999 Athens (Greece) earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **94**, pp.1036-1052.

Ugurhan, B. ve Askan, A. (2010). Stochastic strong ground motion simulation of the 12 November 1999 Duzce (Turkey) earthquake using a dynamic corner frequency approach. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**, pp.1498-1512.

Scherbaum, F., Schmedes, J., ve Cotton, F. (2004). On the conversion of source to site distance measures for extended earthquake source models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **94**, pp.1053-1069.

Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T.,Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H. K., Somerville, P. G., ve Fukushima, Y. (2006). Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**, pp.898–913.