KUZEY ANADOLU FAY HATTINDA HİBRİD YER HAREKETİ SİMÜLASYONLARI

B. Uğurhan[1] ve A.Askan[2]
[1] *Araştırma Görevlisi, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
[2] *Doç. Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
Email: aaskan@metu.edu.tr

ÖZET:

Yer hareketi simülasyonları, yer hareketlerinin sayıca az olduğu sismik olarak aktif olan bölgelerde kullanılan etkili araçlardır. Sentetik yer hareketleri, kaynak mekanizmaları ve yerin kabuk yapısı hakkında bilgi sağlamak dışında, kayıtların az olduğu bölgelerde deprem mühendislerine maksimum yer hareketi parametrelerini ve potansiyel deprem yer hareketlerinin frekans içeriği hakkında bilgi verirler. Yer hareketlerinin düşük frekanslı kısımları deterministik yöntemlerle simüle edilirler. Bu yöntemler, güvenilir sonuçlar için çok yüksek çözünürlüklü dalga-hızı modelleri gerektirirler. Diğer taraftan, yüksek frekanslı yer hareketlerinin oluşturulmasında stokastik yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada farklı frekans aralıkları için deterministik ve stokastik yöntemlerin kullanıldığı hibrid yer hareketi simülasyonları sunulmaktadır. Yöntemler Kuzey Anadolu fay hattında uygulanmış, ve sonuçların sismik parametrelere bağlılığını araştırmak için bir hassasiyet çalışması yapılmıştır. Son olarak, sentetik yer hareketi çalışmalarının sonuçlarının deprem kayıp tahminleri ve yapıların dinamik analizlerinde nasıl kullanılacağı üzerine öneriler sunulmuştur.

ANAHTAR KELİMELER : Yer hareketi simülasyonları, Kuzey Anadolu fay hattı, geniş-bantlı yer hareketi

1. GİRİŞ

Kuvvetli yer hareketleri, hem sismoloji hem deprem mühendisliği açısından kaydedilmesi ve incelenmesi gerekli sismik hareketlerdir. Sismolojide deprem kaynaklarını ve yerin yapısını araştırmak; deprem mühendisliğinde ise yapıların sismik analiz ve tasarımında kritik yer hareketi parametrelerini belirlemek amacıyla kullanılırlar. En gerçekçi yer hareketi parametreleri, kaydedilmiş yer hareketleri ile elde edilmektedir. Ancak dünyadaki en sık istasyon ağlarında dahi eksik ya da seyrek kayıt sorunları ile karşılaşılabilir. Diğer yandan, günümüzde sismik açıdan aktif olan birçok bölgede hala sık bir istasyon ağı kurulamamıştır. Dolayısıyla, kayıtların eksik olduğu ya da düzenli bir ağ içermeyen şehirleşmiş bölgelerde sentetik yer hareketleri kullanmak gerekli olmaktadır.

Literatürde sentetik yer hareketi üretmek için birçok yöntem bulunmaktadır. Bunlar arasında, dalga hareketini fiziksel olarak modelleyen yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Yer hareketleri, düşük ve yüksek frekanslarda farklı özellikler taşımaktadırlar: düşük frekanslı dalgalar (<1 Hz) deterministik yapıda davranırken, yüksek frekanslı dalgalar (> 1Hz) ise faz açılarındaki uyumluluk kaybı nedeniyle stokastik davranış gösterirler. Dalgaların frekans içeriğiyle değişen karakterlerine uygun olarak simülasyon yöntemleri de temelde deterministik ve stokastik yöntemler olmak üzere ikiye ayrılır. Deterministik yöntemler, düşük frekanslı yer hareketlerini, stokastik yöntemler ise yüksek frekanslı hareketleri modellemekte kullanılmaktadırlar. Gerçek yer hareketleri ise tüm frekansları içeren geniş-bantlı hareketlerdir. Mühendislik yapılarını en çok ilgilendiren frekans bantlarında (1 Hz civarında) düşük ve yüksek frekanslı sentetik yer hereketleri, uygun filtreler kullanılarak birleştirilir.

Ülkemizde de Kuzey Anadolu Fay (KAF) zonu üzerinde bulunan kuvvetli yer hareketi istasyon ağları giderek yoğunlaşsa da, hem halen bazı bölgelerdeki istasyon ve kayıt seyrekliği nedeniyle hem de deprem kaynak ve dalga yayılma mekanizmalarını çalışmak amacıyla, yer hareketi simülasyonları gerekli olmaktadır. Bu çalışmada, öncelikle Kuzey Anadolu Fay (KAF) zonu üzerinde 12 Kasım 1999 Düzce depremini kaydeden istasyonlardan seçilen birkaç tanesinde simülasyonlar sonucu elde edilen geniş-bantlı yer hareketleri sunulmuştur. Ardından, yine KAF zonunun doğu bölgesinde gerçekleşmiş olan 13 Mart 1992 Erzincan depremi anaşoku simüle edilerek, sonuçlar bir hassasiyet çalışması ile birlikte ifade edilmiştir.

2. YER HAREKETİ SİMÜLASYON YÖNTEMLERİ

Bu bölümde düşük ve yüksek frekanslı yer hareketlerinin sırasıyla, deterministik ve stokastik yöntemlerle simülasyonu kısaca sunulmuştur.

2.1. Düşük Frekanslı Yer Hareketleri: Deterministik Yöntemler

1 Hz'den düşük frekans içeriği olan yer hareketlerini simüle etmek için kullanılan deterministik yöntemler çoğunlukla dalga yayılımını ifade eden kısmi diferansiyel denklemlerin sayısal çözümlerine dayanır. Dalga denklemini çözebilmek için deprem kaynak mekanizması ve dalgaların yayıldığı ortamın malzeme özellikleri bilinmelidir. Heterojen ortamlarda dalga yayılımını modellemek için bir çok sayısal yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında en yaygın olanlar sonlu farklar (Ör.: Olsen ve Archuleta, 1996; Olsen *vd.*, 2006; Moczo *vd.*, 2002), sınır-elemanlar (Ör.: Luco *vd.*, 1990; Pedersen *vd.*, 1994) ve sonlu-eleman yöntemleridir (Ör.: Toshinawa ve Ohmachi, 1992; Bao *vd.*, 1998). Bu sayısal yöntemlerle dalga yayılımı üç-boyutlu heterojen ortamlarda modellenmektedir. Alternatif bir yöntem ise Green fonksiyonları yöntemidir (Ör.: Bouchon, 1981; Hisada, 1994; Chen ve Zhang, 2001).

Sözü edilen bu yöntemler, çalışılan bölgedeki mevcut kaynak bilgilerine ve dalga yayılım model parametrelerinin çözünürlüklerine bağlı olarak tercih edilirler. Düşük frekanslar için en gerçekçi çözümleri, dinamik fay yırtılması ve üç-boyutlu dalga yayılım modelleri verse de, her deprem için ayrıntılı kaynak mekanizması çözümleri ve her bölge için ayrıntılı hız modelleri mevcut değildir. O nedenle çoğu zaman hesaplama ve modelleme açısından pratik yöntemler tercih edilir. Bu çalışmada da 1999 Düzce depremi anaşoku düşük frekanslarını modellemek için tek-boyutlu elastik ortam varsayımıyla Green fonksiyonlarının ayrık dalga sayısı/ sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü (Olson *vd.*, 1984) yapılmıştır. Kaynak modeli olarak Umutlu *vd.* (2004)'te tanımlanan fay modeli ve ilgili kinematik parametreler kullanılmıştır. Bu amaçla COMPSYN (Spudich ve Xu, 2003) programı kullanılmış ve düşük frekanslı yer hareketi bileşenleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Bölüm 3'te sunulacaktır.

2.2. Yüksek Frekanslı Yer Hareketleri: Stokastik Yöntemler

1 Hz'den yüksek frekans içeriği olan yer hareketleri, faz spektrumlarında gözlemlenen uyumluluk kaybı sebebiyle, doğaları gereği rassal modelleme gerektirirler. Hem bu nedenle hem de deterministik yöntemler yüksek frekanslara ulaşmak için yüksek çözünürlüklü hız modelleri gerektirdiklerinden, yüksek frekanslı yer hareketleri deterministik yöntemler ile modellenemezler. Stokastik yöntemde, yüksek frekanslı yer hareketleri deterministik bir Fourier büyüklük spektrumu ve rassal faz açılarının frekans uzayında birleştirilmesi ile elde edilirler (Ör.: Boore, 1983; Irikura, 1986; Kamae *vd.*, 1998; Graves ve Pitarka, 2004). En yaygın olarak kullanılan büyüklük spektrumu omega-kare ivme spektrumudur (Brune, 1970). Kaynak mekanizması olarak hem nokta-kaynak hem de sonlu-fay modelleri kullanılabilmektedir. Literatürde büyük depremlerin yakın-saha kayıtlarını simüle etmek için en sık kullanılan yöntem, Motazedian ve Atkinson (2005) tarafından önerilen dinamik köşe frekansı yöntemidir. Bu yöntemde her bir alt-fay bir omega-kare nokta kaynak olarak kabul edilir ve yırtılma odaktan başlayarak her bir alt-fayın merkezine ulaştığında o alt-fay da yırtılmış kabul edilir. Tüm alt-faylara ait hareketler, zaman uzayında her bir alt-faya ait gecikme gözönünde bulundurularak toplanır ve ana

faya ait toplam yer hareketi elde edilir. Bu çalışmada da kullanılan stokastik sonlu-fay modelinde, odaktan R_{ij} kadar uzakta bulunan ij alt-fayına ait S-dalgası ivme spektrumu $A_{ij}(f)$ aşağıda verilmiştir:

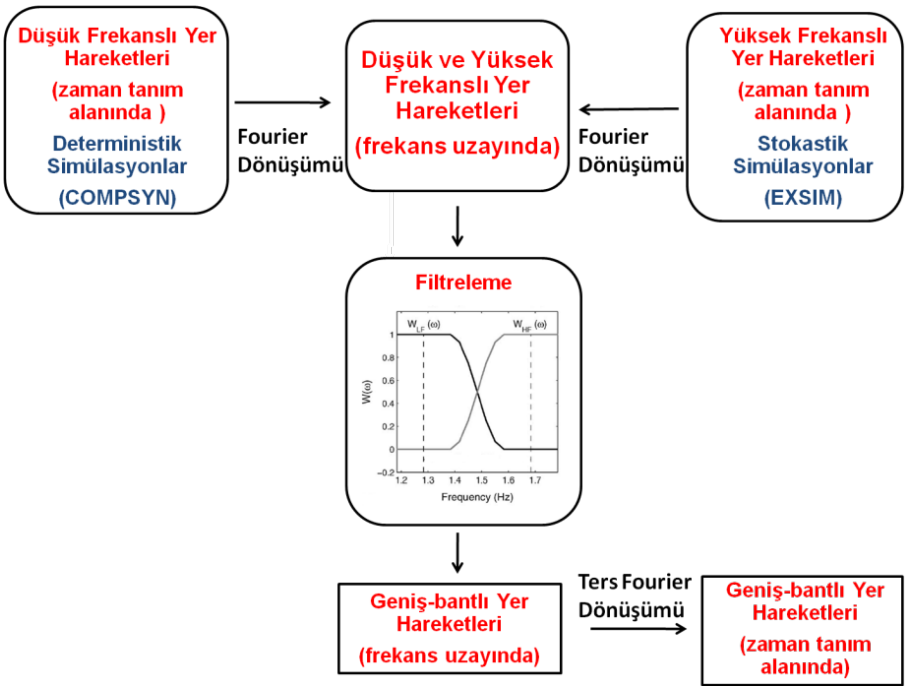
$$A_{ij}(f) = CM_{0ij}H_{ij}\frac{(2\pi f)^2}{\left[1+\left(\frac{f}{f_{cij}}\right)^2\right]}G(R_{ij})e^{-\frac{\pi f R_{ij}}{Q\beta}}S(f)e^{-\pi\kappa f} \quad (1)$$

Bu denklemde $G(R_{ij})$ geometrik yayılım faktörü, Q elastik olmayan azalım katsayısı (kalite faktörü), β kabuk S-dalga hızı, $S(f)$ yerel zemin koşullarını ifade eden bir filtre, κ zeminlere ait yüksek frekans üssel azalım faktörü, $f_{c_{ij}}$, ij alt-fayına ait dinamik köşe frekansı, H_{ij} yüksek frekanslardaki spektral seviyeyi korumak için uygulanan bir ölçekleme faktörüdür.

Bu çalışmada 1999 Düzce ve 1992 Erzincan ana şok kayıtlarını simüle etmek için Motazedian ve Atkinson (2005)'ın stokastik sonlu-fay yöntemi ve EXSIM programı kullanılmıştır. Yüksek frekanslı yer hareketleri ve ilgili model parametreleri Bölüm 3'te sunulacaktır.

2.3. Geniş-bantlı Yer Hareketleri

Farklı yöntemlerle oluşturulan sentetik düşük ve yüksek frekanslı yer hareketleri, frekans uzayında toplanarak geniş-bantlı yer hareketleri elde edilmektedir. Bu amaçla, sırasıyla deterministik ve stokastik yöntemle elde edilen düşük ve yüksek frekanslı yer hareketleri önce Fourier daönüşümü ile frekans uzayına taşınır. Ardından, düşük frekanslara alçak-geçiş ve yüksek frekanslara yüksek-geçiş filtresi uygulanarak, frekans uzayında geniş-bantlı yer hareketleri elde edilir. Bu hareketlere uygulanan ters-Fourier dönüşümü ile zaman tanım alanında yer hareketi kayıtları oluşturulur. Şekil 1'de sunulan akış şeması, bu çalışmadaki geniş-bantlı yer hareketlerinin elde edilme aşamalarını göstermektedir.



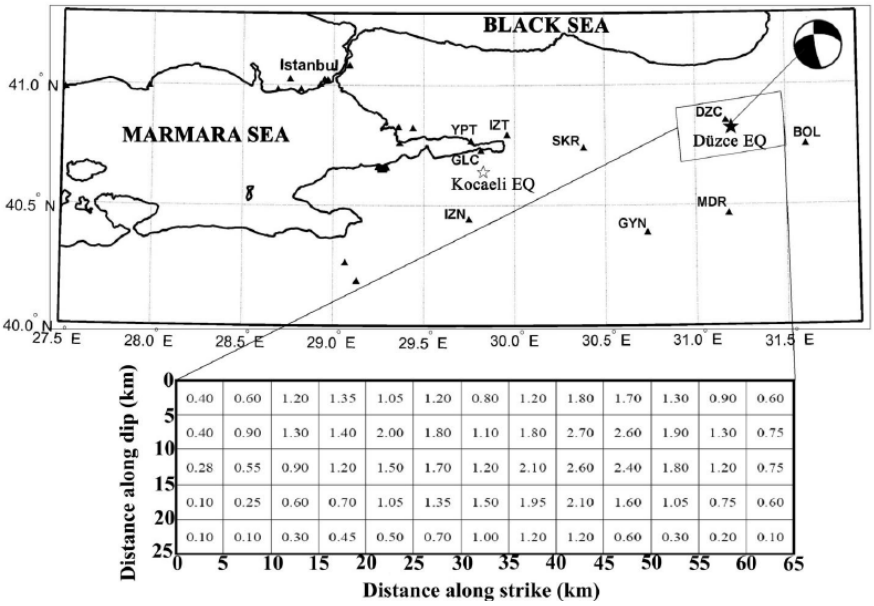
Şekil 1. Geniş-bantlı sentetik yer hareketlerinin elde edilmesi

3. KUZEY ANADOLU FAY ZONUNDA UYGULAMALAR

Bu çalışmada önerilen modeller, önce 1999 Düzce depremi geniş-bantlı yer hareketleri elde etmek için, ardından 1992 Erzincan depremini kaydetmiş olan üç istasyonda yapılan simülasyon ve hassasiyet çalışmalarında kullanılmıştır. Sonuçlar, ilgili bölgelerdeki kaynak ve dalga yayılım model parametreleri ile birlikte sunulacaktır.

3.1. 12 Kasım 1999 Düzce Depremi Geniş-Bantlı Yer Hareketleri

KAF zonu üzerinde Düzce fayı civarında kurulmuş olan Düzce ili, 1999 yılı içerisinde üç aydan az bir zaman aralığında iki tane büyük deprem ile sarsılmış; 12 Kasım 1999 depremi (Mw 7.1), Düzce ve civarında yol açtığı büyük yapısal hasar ile 3000'den fazla yaralı ve 900 can kaybına sebep olmuştur. Sağ-yanal atımlı bu deprem, 32 adet kuvvetli yer hareketi istasyonunda kaydedilmiştir. Şekil 1, Düzce fay düzlemini, deprem dışmerkezini ve Umutlu *vd.* (2004)'nin çalışmasına göre fay düzlemi üzerinde elde edilmiş olan kayma büyüklüklerini göstermektedir.



Şekil 2. 1999 Düzce depremi fay düzlemi, deprem dışmerkezi ve fay üzerinde alt-faylarda kayma büyüklükleri (Şekil, Ugurhan ve Askan (2010)'dan alınmıştır)

Literatürde kaynak mekanizması ve superkesme *(supershear)* etkisi sebebiyle çok tartışılan bu depremin anaşok mekanizması, Ugurhan ve Askan (2010)'da yüksek frekans yöntemi ile modellenmiş; gerek kaynak gerekse bölgesel sismik parametre yetersizliklerine rağmen, ölçülen yer hareketlerine yakın simülasyonlar elde edilmiştir. Bu çalışmada ise, yer hareketlerinin düşük frekans içerikleri de COMPSYN (Spudich and Xu, 2003) ile modellenmiş ve Şekil 1'de gösterilen algoritma ile 1999 Düzce depremine ait geniş-bantlı yer hareketleri elde edilmiştir. Tablo 1 ve 2, sırasıyla, Düzce için kullanılan model parametrelerini ve sonuçları karşılaştırmak için seçilen yakın-saha istasyonlarına ait özellikleri göstermektedir.

Tablo 1. 12 Kasım 1999 Düzce depremi simülasyonu için kullanılan kaynak ve yayılım model parametreleri

Parametre Adı	***Değeri***
Fay oryantasyonu	Doğrultu açısı: 264° Eğim açısı=64°
Fay boyutları	65 x 25 km
M_w	7.1
Odak derinliği	12.5 km
Alt-fay boyutları	5 x 5 km
Stres Düşümü	50 bar
S-dalga hızı	3500 m/san.
Kabuk yoğunluğu	2800 kg/m^3
Elastik olmayan sönüm katsayısı	180f$^{0.45}$
Kappa faktörü	0.045
Geometrik Yayılım Faktörü	1/R
Pencere fonksiyonu	Saragoni-Hart
Zemin büyütme fonksiyonları	Ortalama H/V fonksiyonları (Ugurhan ve Askan, 2010)

Tablo 2. 12 Kasım 1999 Düzce depremi simülasyonu için kullanılan istasyonların özellikleri

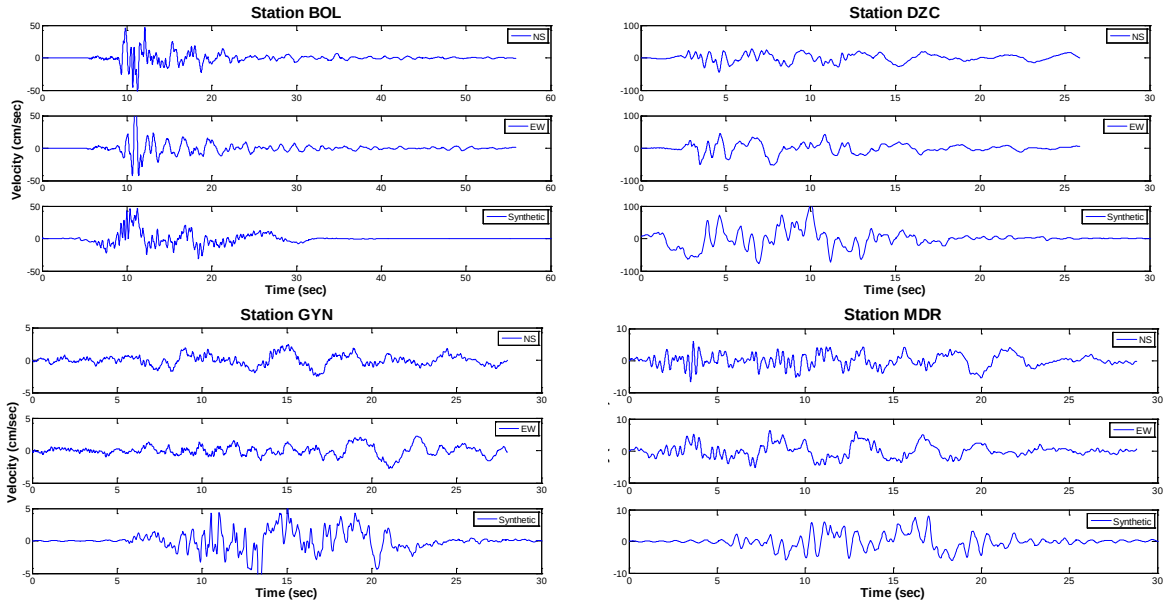
İstasyon Adı	***Kodu***	***Enlem-Boylam***	***Zemin sınıfı***	***Dışmerkeze uzaklık (km)***
Bolu	BOL	40.747- 31.610	D	39.026
Düzce	DZC	40.740- 31.210	D	9.314
Göynük	GYN	40.385- 30.734	D	55.163
Mudurnu	MDR	40.463- 31.182	D	34.073

Şekil 3'te bu çalışmada elde edilen sentetik yer hareketleri, seçilen yakın-saha istasyonlarında gözlemler ile hız-zaman kaydı cinsinden karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Bütün alt-figürlerde, en üstteki kayıt Kuzey-Güney kaydını, ortadaki kayıt Doğu-Batı kaydını ve en alttaki kayıt ise sentetik hareketi göstermektedir. Tüm istasyonlarda, gözlemlenen ve sentetik maksimum yer hızları birbirleriyle aynı mertebededir. BOL ve DZC istasyonlarında sentetik hız-zaman kayıtları gözlemlere çok yakındır. GYN ve MDR istasyonlarında ise veriler ile sentetikler arasındaki farklar daha büyüktür. Kaynağa daha yakın olan BOL ve DZC istasyonlarında gözlemlenmeyen bu farkların nedeni çoğunlukla, kullanılan modelde yeterince ifade edilemeyen yerel zemin koşullarıdır.

3.2. 13 Mart 1999 Erzincan Depremi Yüksek Frekanslı Yer Hareketleri ve Hassasiyet Çalışması

Kuzey Anadolu Fay zonunun doğu kısımları, batısına göre çok daha seyrek istasyon ağı içermektedir. Yer yapısını ve kaynak mekanizmalarını çalışmak için kayıtlara ihtiyaç duyulduğundan, bu bölgede kaynak, yayılım ve yerel zemin etkilerine dair sismik model parametreleri batı bölgelerinde olduğu kadar yoğun çalışılmamıştır. 1992 Erzincan depremi simülasyonu çalışmasının temel amacı, bölgesel sismik parametrelerin çok iyi bilinmediği bölgelerde stokastik sonlu-fay yönteminin yeterliğini araştırmaktır. Bu amaçla, önce mevcut tüm sismik parametreler ile 13 Mart 1992 depreminin anaşok kayıtları simüle edilmiş; sonra bu parametreler

etrafında bir hassasiyet çalışması yapılmıştır. 13 Mart 1992 Erzincan depremine ait model parametreleri, Tablo 3'teki gibidir (Ugurhan, 2010).

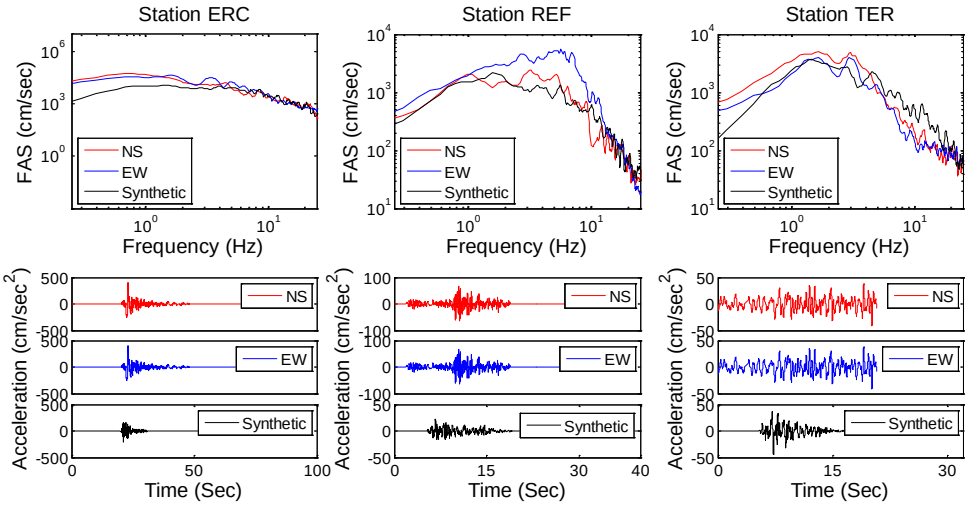


Şekil 3. BOL, DZC, GYN ve MDR istasyonlarında sentetik yer hareketleri ve 1999 Düzce depremi anaşok kayıtlarının karşılaştırılması

Tablo 3. 13 Mart Erzincan depremi simülasyonu için kullanılan kaynak ve yayılım model parametreleri

Parametre Adı	***Değeri***
Fay oryantasyonu	Doğrultu açısı: 123° Eğim açısı=86°
Fay boyutları	28 x 12 km
M_w	6.6
Alt-fay boyutları	2 x 2 km
Stres Düşümü	80 bar
S-dalga hızı	3500 m/san.
Kabuk yoğunluğu	2800 kg/m^3
Elastik olmayan sönüm katsayısı	$122f^{0.68}$
Kappa faktörü	0.045
Geometrik Yayılım Faktörü	R^{-1} : R<30 km $R^{-0.5}$: R≥30 km
Pencere fonksiyonu	Saragoni-Hart
Zemin büyütme fonksiyonları	NEHRP D Sınıfı büyütme faktörleri (Boore ve Joyner, 1997)

Şekil 4, depremin ERC, REF ve TER istasyonlarında ölçülen anaşok kayıtlarını simülasyon sonuçları ile karşılaştırmaktadır. Görüldüğü üzere kullanılan yöntem, bölgesel parametreler çok iyi bilinmemesine rağmen gözlemlere yakın sonuçlar vermektedir.



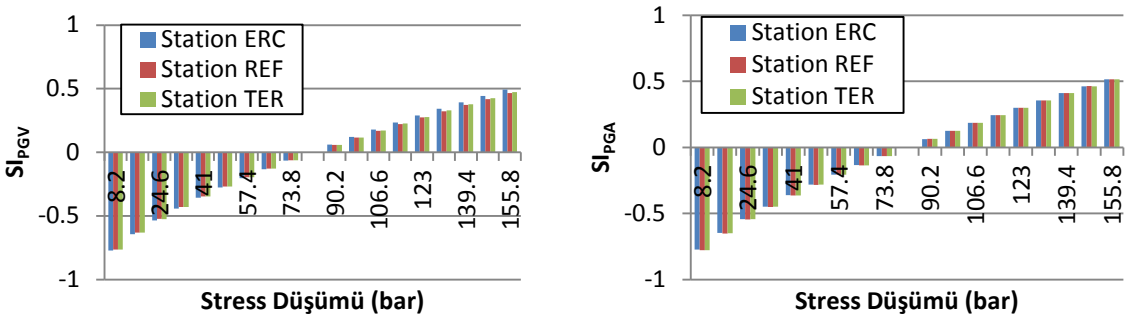
Şekil 4. 1992 Erzincan depremine ait veri ve sentetiklerin Fourier büyüklük spektrumu ve ivme-zaman kayıtları türünden karşılaştırılması (siyah renk sentetik kaydı, kırmızı ve mavi renk ise sırasıyla, KG ve DB kaydını göstermektedir)

Yöntemin, seçilen herhangi bir model parametresi etrafındaki hassasiyetini ölçmek için, önce seçilen model parametresinin optimum değeri ile sentetik maksimum yer hızı (PGV) ve ivmesi (PGA) hesaplanmıştır. Daha sonra seçilen parametre, pozitif ve negatif yönlerde değiştirilerek, bu değiştirilen parametre ile simülasyon yapılmış ve tekrar sentetik PGV ve PGA hesaplanmıştır. Hassasiyeti ölçebilmek için, Denklem 2 ve 3'te sırasıyla, PGV ve PGA cinsinden hassasiyet indisleri (SI) tanımlanmıştır. Burada yer kısıtlaması nedeniyle yalnızca gerilme düşümüne karşı hassasiyet sonuçları sunulmaktadır; diğer model parametrelerine karşı hassasiyet analizi sonuçları ve detaylı incelemeler Ugurhan (2010)'da bulunabilir.

$$SI_{PGV} = \frac{PGV_{değiştirilen} - PGV_{optimum}}{PGV_{optimum}} \quad (2)$$

$$SI_{PGA} = \frac{PGA_{değiştirilen} - PGA_{optimum}}{PGA_{optimum}} \quad (3)$$

Şekil 5, farklı gerilme düşümü değerlerine göre PGA ve PGV cinsinden hassasiyet indislerini sunmaktadır.



Şekil 5. Maksimum yer hareketi parametrelerinin (PGV ve PGA), farklı gerilme düşümü değerlerine hassasiyeti

Şekil 5'te gözlemlendiği üzere, gerilme düşümü arttığında, beklendiği üzere PGA ve PGV değerleri artmaktadır. Gerilme düşümünü %10 azaltmak, PGA ve PGV değerlerinin her ikisinde de %7'lik bir düşmeye karşılık gelmekte; gerilme düşümünü %10 artırmak ise bu değerlerde %6'lık bir artışa neden olmaktadır. Özetle, maksimum yer hareketi değerleri (PGA ve PGV) gerilme düşümüne karşı hassastır; bu nedenle de gerilme düşümü parametresinin değerinin güvenilir simülasyonlar için son derece hassas bir biçimde belirlenmesi gereklidir.

4. DEĞERLENDİRME

Sismik olarak aktif bölgelerde yer hareketlerinin belirlenmesi; sismik tehlike analizi, sismik tasarım ve deprem zararlarının azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle kayıtların az ya da eksik olduğu bölgelerde, zaman tanım alanında yapılan deprem mühendisliği hesapları için yer hareketi simülasyonları gereklidir. Mevcut simülasyon yöntemleri, bölgesel kaynak, dalga yayılım parametreleri ve yerel zemin etkilerinin iyi belirlendiği durumlarda, yer hareketlerini fiziksel olarak modelleyerek gözlemlere yakın sonuçlar vermektedir.

Bu çalışmada, Kuzey Anadolu fay zonu üzerinde farklı bölgelerde, alternatif frekans içerikleri için deterministik ve stokastik yöntemlerin kullanıldığı hibrid yer hareketi simülasyonları sunulmuştur. Yöntemler, önce 1999 Düzce depremine ait geniş-bantlı yer hareketlerinin elde edilmesinde uygulanmış; ardından 1992 Erzincan depremi anaşok simülasyonu gerçekleştirilmiş; son olarak da simülasyon sonuçlarının sismik parametrelere bağlılığını araştırmak için bir hassasiyet çalışması yapılmıştır. Sonuçlardan da gözlemlendiği üzere, geniş-bantlı yer hareketi simülasyonları gözlemlere çok yakın sonuçlar vermekte, simülasyonların güvenirliği model parametrelerinin doğruluğuna göre değişmektedir. Elde edilen sonuçların güvenirliği, kaynak mekanizmalarının, dalga yayılım parametreleri ile yerel zemin koşullarının iyi tanımlanmasına bağlıdır. Bu nedenle sismik olarak aktif olan bölgelerde (gerek mevcut kayıtlar kullanılarak gerekse yeni istasyonlar kurularak) kaynak mekanizmaları ve bölgesel sismik parametrelerin -özellikle kabuk hız modellerinin- belirlenmesi icin ters-çözüm çalışmaları yapılmalıdır. Bu ters çözüm çalışmaları ile elde edilen parametreler ile yapılacak simülasyon sonuçları, her zaman alternatif teknikler ile sınanmalıdır.

Uzun vadede, bu ve benzeri çalışmalar ile elde edilen sonuçların, deprem mühendisliğinde bir boşluğu doldurması ve deprem zararlarının azaltılması yönünde doğrudan kullanılması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

Bao, H., J. Bielak, O. Ghattas, L. Kallivokas, D. O'Hallaron, J. Schewchuk ve J. Xu (1998). Large-scale simulation of elastic wave propagation in heterogeneous media on paralel computers, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, **152**, 85-102.

Boore, D. M. (1983). Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radıated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**, 1865–1894.

Boore, D. M., and W. B. Joyner (1997). Site amplifications for generic rock sites, *Bull. Seismol. Soc. Am*. **87** 327–341.

Bouchon, M. (1981). A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **71,** 959 - 971.

Brune, J. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res*. **75**, 4997–5009.

Chen, X. ve Zhang H. (2001). An Efficient Method for Computing Green's Functions for a Layered Half-Space at Large Epicentral Distances, *Bull. Seism. Soc. Am.* **91,** 858 - 869.

Graves, R. ve A. Pitarka (2004). Broadband time history simulation using a hybrid approach, ***Proc. 13WEEC***, paper no. 1098.

Hisada, Y. (1994). An efficient method for computing Green's functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths, *Bull. Seis. Soc. Am.* **84,** 1456 - 1472.

Irikura, K. 1986. Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proc. 7th Japan Earthquake Symp.*, 151-156.

Kamae, K., K. Irikura, ve A. Pitarka (1998). A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 357-367.

Luco, E. J., H. I. Wong ve F. C. P. de Barros (1990). Three-dimensional response of a cylindrical crayon in a layered half-space, *Earthquake Eng. Struc. Dynamics*, **19**, 799-817.

Moczo, P., J. Kristek, V. Vavrycuk, R. J. Archuleta, ve L. Halada (2002). 3D Heterogeneous Staggered-Grid Finite-Difference Modeling of Seismic Motion with Volume Harmonic and Arithmetic Averaging of Elastic Moduli and Densities, *Bull. Seism. Soc. Am.* **92**, 3042 - 3066.

Motazedian, D., ve G. M. Atkinson (2005). Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **95**, 995–1010.

Olsen, K. B. ve R. J. Archuleta (1996). Three-dimensional simulation of earthquakes on the Los Angeles fault system, *Bull. Seism. Soc. Am.* **86**, 575-596.

Olsen, K.B., Akinci, A., Rovelli, A., Marra, F. ve Malagnini, L., 2006. 3D ground-motion estimation in Rome, Italy, *Bull. seism. Soc. Am.*, **96,** 133–146, doi:10.1785/0120030243.

Pedersen, H. A., F. J. Sánchez-Sesma ve M. Campillo (1994). Three-dimensional scattering by two-dimensional topographies, *Bull. Seism. Soc. Am.* **84**, 1169-1183.

Spudich, P ., ve Xu, L. (2003). Documentation of software package COMPSYN: Programs for earthquake ground motion calculations using complete 1-D Green's functions, IASPEI Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Academic Press, 56 pp.

Toshinawa, T. ve T. Ohmachi (1992). Love-wave propagation in a three-dimensional basin, *Bull. Seism. Soc. Am.* **82,** 1661-1677.

Ugurhan, B (2010). Stochastic strong ground motion simulations on north Anatolian fault zone and central Italy: validation, limitation and sensitivity analyses, MSc thesis, Middle East Technical University, Ankara, 2010.

Ugurhan, B., ve A. Askan (2010). Stochastic strong ground motion simulation of the 12 November 1999 Düzce (Turkey) earthquake using a dynamic corner frequency approach, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **100** (4), 1–27.

Umutlu, N., K. Koketsu, ve C. Milkereit (2004). The rupture process during the 1999 Duzce, Turkey, earthquake from joint inversion of teleseismic and strong-motion data, *Tectonophysics* **391**, 315–324.