İSTANBUL İÇİN TASARIM ESASLI KUVVETLİ YER HAREKETİ DALGA FORMLARININ ZAMAN ORTAMINDA TÜRETİLMESİ

Aydın Mert[1], Yasin Fahjan[2], Ali Pınar[3], Larry Hutchings[4]

[1] *Doktor, Deprem mühendisliği ABD, Boğaziçi .Üniversitesi, Çengelköy, İstanbul*
[2] *Doçent, Deprem ve Yapı Bilimleri ABD, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze, Kocaeli*
[3] *Profesör, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul Üniversitesi, Avcılar, İstanbul*
[4] *Profesör,LBNL Earth and Environmental Sciences Berkeley, California, USA*
Email: mertay@boun.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerine girdi verisi oluşturmak amacıyla Prens Adaları ve Orta Marmara fay segmentlerinin kırılmasıyla Marmara Bölgesi ve İstanbul da oluşacak yer hareketi dalga formları ve farklı kaynak parametrelerinin bu dalga formlarının genlik ve frekans içeriklerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Hutchings ve Wu (1990) tarafından geliştirilen Fiziksel tabanlı yırtılma süreçlerini göz önüne alan melez (hybrid) bir yöntem kullanılarak geniş bir frekans bandı aralığında yer hareketi dalga formları Ampirik (AGF) ve Sentetik Green Fonksiyonlar (SGF) beraber kullanılarak üretilmiştir. Bu amaçla, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsünün (KRDAE) Marmara Bölgesinde çalıştırdığı geniş bant (broadband) deprem istasyonlarında kaydedilen dalga şekli verileri kullanılmıştır. Küçük depremlerin oluşturduğu dalga şekilleri spektrumun yüksek frekanslı bileşenlerini elde etmek amacıyla AGF olarak kullanılmıştır. Spektrumun alçak frekans kısmını elde etmek için ise Sonlu Farklar (Finite Difference) hesaplama yöntemini kullanan üç boyutlu E3D yazılımı yardımıyla sentetik sismogramlar (SGF) üretilmiştir. Prens Adaları ve Orta Marmara fay segmentlerinde meydana gelmesi muhtemel 100 farklı deprem senaryosu için kuvvetli yer hareketi dalga formları alçak ve yüksek frekans bandında ayrı ayrı elde edilmiş ve özel filtreler yardımıyla birleştirilerek melez deprem benzeşimleri (simulation) elde edilmiştir. Farklı deprem senaryoları için elde edilen melez deprem benzeşimleri sonucunda Prens Adaları depremi için ARM istasyonunda ve Orta Marmara depremi için CTK istasyonunda ortalama ivme değerleri elde edilmiş ve sunulmuştur. Çalışmada kullandığımız yöntem bir deprem sonucunda oluşacak yer hareketinin sadece genliğini değil aynı zamanda frekans içeriğini de belirleyebilmektedir. Deprem benzeşimlerinde kullanılan istasyonlar yakın fay bölgesi olarak tanımlanan alanda yer almakta ve bu istasyonlarda elde edilen deprem benzeşimlerinde alçak frekans bandındaki enerjinin baskın olduğu dikkat çekmektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Ampirik Green Fonksiyon, Sentetik Green Fonksiyon, Melez deprem benzeşimleri

1.GİRİŞ

Depremler sonucu oluşan kuvvetli yer hareketinin belirlenmesi çalışmalarının temelinde, eski depremlerin faylanma mekanizmalarının ve bunu etkileyen parametrelerin özellikleriyle birlikte tanımlanması ve bu bilgilerin, gelecekte oluşması muhtemel depremlerin oluşturacağı kuvvetli yer hareketi parametrelerinin tahmin edilmesi amacıyla kullanılması yatmaktadır. Oluşan yıkıcı depremler sırasında, özellikle yaklaşık iki fay boyu mesafesi olarak tanımlanan kaynak yakın bölgesi (near source region) boyunca, ciddi hasarlar meydana gelmektedir. Bu sebeple büyük depremlerin yırtılma modellerinin, özellikle kaynak yakın bölgesindeki dalga yayınımının karmaşıklığının da hesaba katılarak belirlenmesi, günümüzde mühendislik sismolojisi çalışmalarının başlıca hedefleri arasındadır. Kuvvetli yer hareketi kaydın geniş bir frekans aralığında doğru tahmini, deprem

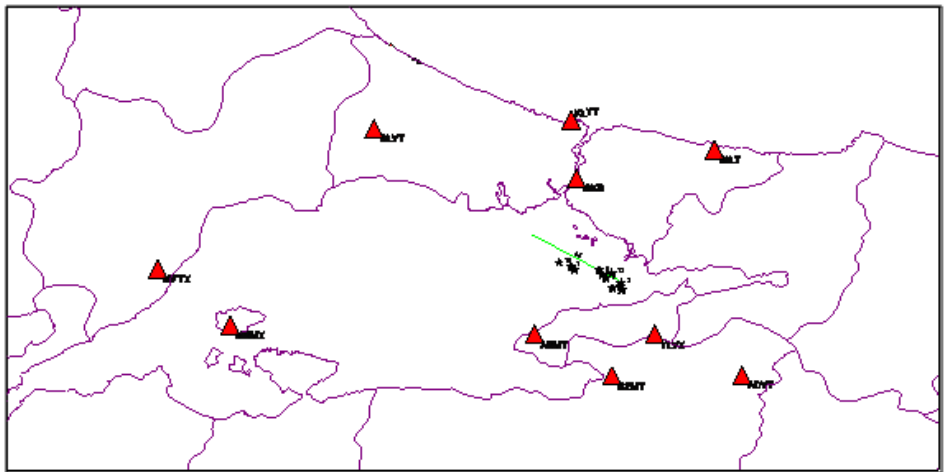
zararlarını azaltmak için, yapıların depreme dayanıklı ve performansa bağlı tasarımında kullanılan yeni teknolojiler göz önüne alındığında, son derece önemli bir kavramdır.

Deprem yırtılması ve bunun sonucu oluşan yer hareketinin, 'Temsil Teorisi'ne (Representation Theorem) bağlı kalarak, kaydedilmiş küçük depremleri AGF olarak kabul ederek hesaplanabileceği fikri ilk olarak Hartzell (1978) ve Wu (1978) tarafından ortaya atılmıştır. AGF yöntemini daha sonra Hutchings ve Wu (1990), Hutchings (1991, 1994) gibi araştırmacılar çeşitli değişikliklerle kullanmış ve geliştirmişlerdir. Bu yöntemdeki orijinal fikir küçük deprem kayıtlarının büyük depremlerde ortaya çıkacak yer hareketinin modellenmesi için kullanılmasıdır. Küçük depremlerin büyük depremlere nazaran yüzlerce kez sık oluştukları ve küçük depremler sonucu oluşan sismik dalgaların yayılım yolu boyunca üç boyutlu olarak bütün jeolojik etkileri içerdikleri düşünüldüğünde pratikte yöntemin ne kadar kullanışlı olduğu ortaya çıkmaktadır. AGF ve SGF ları beraberce kullanan melez yaklaşımların temel dayanak noktası ise, bu iki farklı Green Fonksiyonunun (GF) spektrumun farklı frekans bantlarında en doğru sonuçların elde edilmesini sağlamasıdır. AGF lar jeolojik heterojenliğin iyi modellenemediği yüksek frekanslı bileşenlerin hesaplanmasında, SGF lar ise AGF ların yeterli enerjiye sahip olmadığı düşük frekanslı bileşenlerin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Böylelikle bu yöntem geniş bir frekans bandı (0.1 – 20 Hz) aralığında oldukça doğru sonuçlar vermektedir.

Son zamanlarda özellikle melez benzeşim teknikleri kullanılarak yapılmış olan Marmara Bölgesi ile ilgili çalışmalar, (Pulido vd., 2004; Sorensen vd., 2007, Mert, 2011) oluşabilecek büyük bir depremde, yer hareketinin ne kadar karmaşık olabileceğini göstermesi açısından son derece önemli sonuçlar ortaya koymuştur. Bu çalışmada, Marmara Denizindeki küçük depremler, deprem kaynak parametrelerinin belirlenmesi amacıyla derlenmiş ve spektrumun yüksek frekans bandındaki benzeşimlerin yapılmasında kullanılmıştır. Spektrumun alçak frekans bandındaki benzeşimlerin gerçekleştirilmesi için Sonlu Farklar hesaplama yöntemini kullanan üç boyutlu E3D yazılımı (Larsen, 1995) yardımıyla sentetik sismogramlar (SGF) üretilmiştir. Büyük depremler için kaynak yırtılma modelleri geliştirilerek yer hareketi değişkenliğinin yerel jeolojiye bağlılığı incelenmiştir. Dr. Hutchings'in katkısı ile Marmara Bölgesini etkileyecek potansiyel büyük depremler için kuvvetli yer hareketinin ulaşabileceği değerler fiziksel tabanlı benzeşim algoritmaları kullanılarak elde edilmiştir.

2.PRENS ADALARI SEGMENTİNDE YAPILAN DEPREM BENZEŞİMLERİ

Yüksek frekanslı bileşenlerin benzeşiminde kullanılan Ampirik Green Fonksiyoların elde edilmesi ve kullanılması

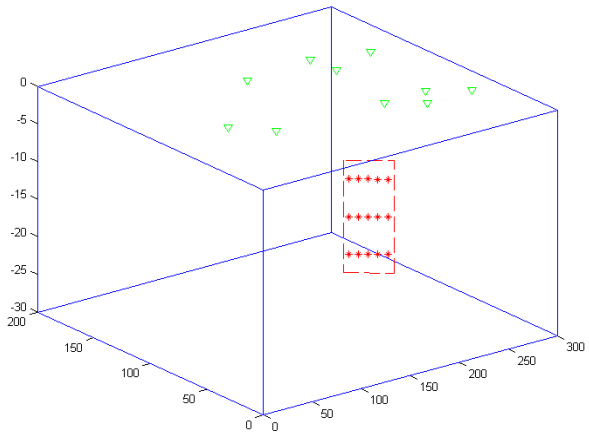


Şekil 1. Prens Adaları fay segmentinde Ampirik Green Fonksiyon olarak kullanılan depremler ve kaydedildikleri deprem istasyonları.

Melez deprem benzeşimlerinin yüksek frekanslı bileşenlerinin elde edilmesinde Marmara Denizi içinde Prens Adaları fay segmenti üzerinde meydana gelmiş küçük manyetüdlü depremlerin Marmara Denizi etrafında yerleştirilmiş bulunan geniş bant sismometre istasyonlarındaki kayıtları kullanılmıştır. Prens adaları segmenti ile ilgili yüksek frekanslı bileşenlerin benzeşimlerinde kullanılan deprem kayıt istasyonları ve bu istasyonların kaydettiği AGF olarak kullanılan küçük manyetüdlü depremler Şekil 1 de verilmiştir.

Düşük frekanslı bileşenlerin benzeşiminde kullanılan Sentetik Green Fonksiyoların elde edilmesi ve kullanılması

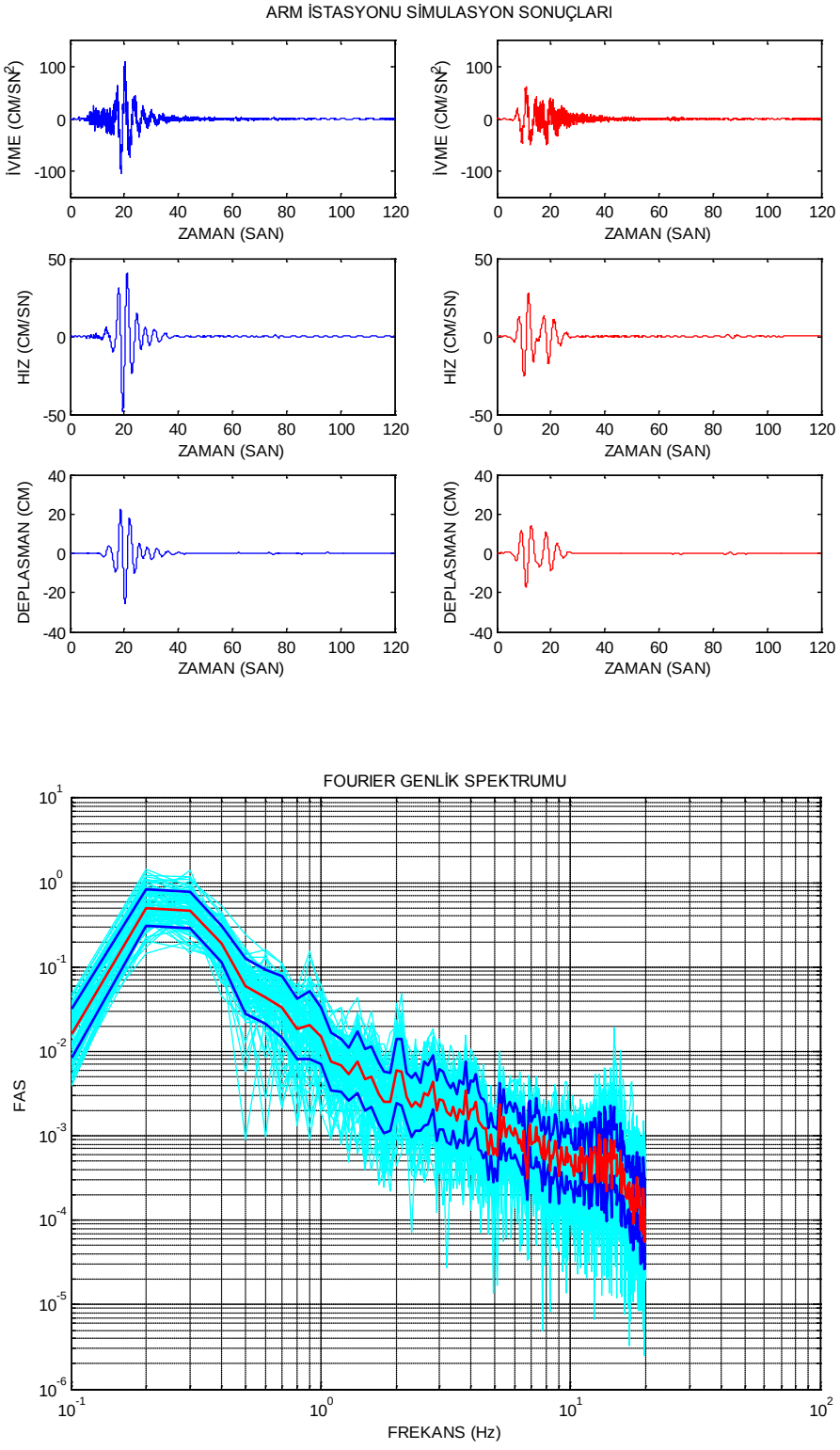
Düşük frekanslı bileşenlerin benzeşimlerinde kullanılacak sentetik sismogramların (SGF) üretilmesinde Larsen (1995) tarafından geliştirilen Sonlu Farklar hesaplama yöntemini kullanan üç boyutlu E3D yazılımı kullanılmıştır. Bu amaçla Prens Adaları fay segmentini ve deprem benzeşimleri yapılacak istasyonları içine alacak şekilde bir hacim tanımlanmıştır. Bu hacim başlangıç noktası 40 N 26.50 E koordinatlarında, doğu-batı yönünde 300 km ve kuzey-güney yönünde 200 km genişliği ve yüzeyden itibaren 30 km derinliği olan bir hacimdir (Şekil 2). Bu hacim içinde koordinatları 40.887 N 28.866 E ve 40.732 N, 29.244 E genişliği 15 km ve yüzeyden itibaren derinliği 10 km olan Prens Adaları fayı yerleştirilmiştir. Geniş bant deprem benzeşimleri yapılması planlanan deprem istasyonları da koordinatlarına göre tanımlanan hacmin yüzeyine yerleştirilmiştir. Fay bloğu üzerinde doğrultu boyunca her 7 km de bir üç farklı derinlikte (12.5 km - 17.5 km - 22.5 km) bir odak seçilmiş ve toplam 15 odak için sentetik depremler üretilmiştir. Sentetik olarak üretilen depremlerin momentleri nokta kaynak kabulüne uygun olarak M_0=1e+21 dyn cm köşe frekansları ise 10 Hz olarak alınmıştır. Üretilen sentetik depremlerin odak mekanizmaları Prens Adaları fayının tektonik yapısına uygun olarak Strike 118° Dip 90° ve Rake -180° olarak seçilmiştir. Sonlu Farklar yönteminde kullanılmak üzere bu hacim 0.5 km grit aralığı ile gritlenmiş ve sentetik sismogramların üretilmesinde kullanılan zaman aralığı 0.01 sn olarak alınmıştır.



Şekil 2. Prens adaları fayı için sentetik sismogramların üretildiği hacim ve fay ile istasyonların geometrisi.

Deprem benzeşimleri

Prens Adaları fay segmenti ile ilgili elde edilmiş SGF ve AGF ile farklı deprem senaryoları kullanılarak bu fay segmentinde oluşması muhtemel depremler sonucu meydana gelebilecek dalga formlarının benzeşimleri elde edilmiştir. Deprem senaryoları HAZARD programı kullanılarak üretilmiştir. HAZARD programı yırtılma geometrisi, hiposentır lokasyonu, asperitilerin büyüklüğü ve sayısı, yırtılma hızı ve fayın doğrultusu, kayma vektörü gibi parametreleri rastgele değiştirerek farklı deprem senaryoları oluşturur. Daha sonra HAZARD programı kullanılarak oluşturulan 100 farklı deprem senaryosu için, EMPSYN yazılımı yardımıyla spektrumun hem düşük frekans bandında hemde yüksek frekans bandında elde edilen SGF ve AGF kullanılarak Prens Adaları fayı için deprem benzeşimleri elde edilmiştir.



Şekil 3. ARM istasyonunda 100 farklı senaryo depremi sonucu elde edilen deprem benzeşimlerinin Fourier Genlik Spektrumları ve standart sapmaları ile hesaplanan ortalama depremin dalga formu.

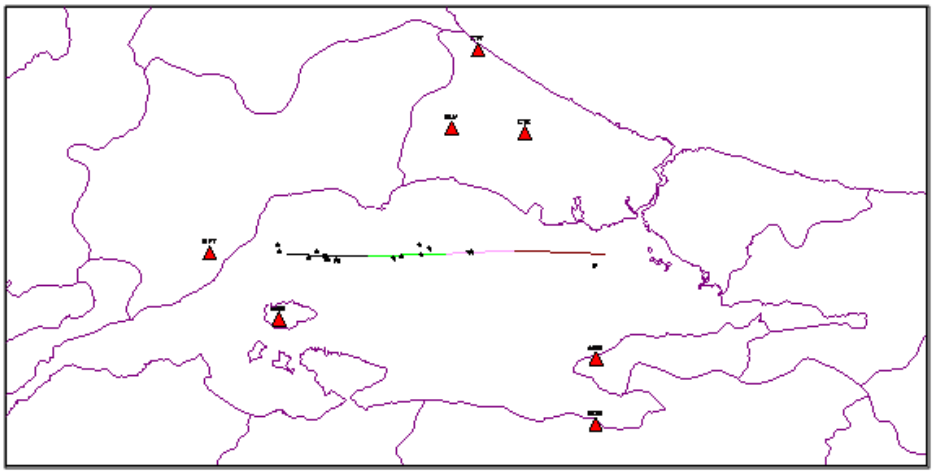
Deprem senaryolarında kullanılan parametreler ve değişim aralıkları aşağıda açıklanmıştır;
Moment; Prens adaları fay segmenti ile ilgili yapılan deprem benzeşimlerinde moment değeri M_0=0.5e+27 ile M_0=1e+27 arasınada değiştirilmiştir.
Fay yırtılma geometris; Prens Adaları fayı dikdörtgen yapılı bir fay olarak alınmış, fayın boyu 35 km, genişliği 15 km ve yüzeyden itibaren derinliği 10 km olarak alınmıştır.
Hiposentır; Fay üzerinde rastgele olarak her bir senaryoda farklı derinlik ve koordinatlarda seçilmiştir.
Fay Yırtılma hızı; Farklı senaryolarda kullanılan fay yırtılma hızları S dalga hızının 0.8 – 1.0 katı aralığında değiştirilmiş, healing hızı ise yırtılma hızının 0.8 – 1.0 katı aralığında değiştirilmiştir.
Strike, Dip, Rake; Prens Adaları fayının tektonik yapısına uygun olacak şekilde Strike:110°/116° aralığında Dip:70°/90° aralığında Rake:-160°/-180° aralığında seçilmiştir.

Herbir senaryo deprem için üretilmiş düşük ve yüksek frekanslı bileşenler özel olarak geliştirilen filtre fonksiyonları kullanılarak birleştirilmiş ve melez deprem benzeşimleri elde edilmiştir. Kullanılan filtre fonksiyonlarında birleştirme frekansı olarak 0.5 Hz seçilmiştir. Geniş bant deprem benzeşimleri spektrumunda 0.5 Hz in altındaki frekanslar düşük frekanslı yani SGF lar kullanılarak yapılan benzeşimlerden 0.5 Hz in üzerindeki frekanslar ise yüksek frekanslı yani AGF lar kullanılarak yapılan benzeşimlerden elde edilmiştir.

ARM istasyonunda 100 farklı senaryo depremi sonucu elde edilen deprem benzeşimlerinin Fourier Genlik Spektrumları ve standart sapmaları ile hesaplanan ortalama depremin dalga formu Şekil 3 te verilmektedir. Benzeşim sonuçlarında gözlemlenen en belirgin özellik alçak frekans bandındaki enerjinin yüksekliğidir. Bu durum ARM istasyonu için hesaplanan Fourier Genlik Spektrumunda da açıkça görülmektedir.

3.ORTA MARMARA SEGMENTİNDE YAPILAN DEPREM BENZEŞİMLERİ

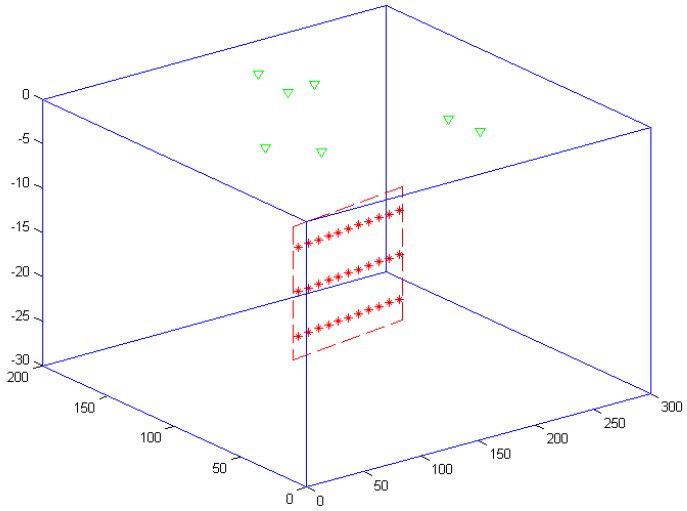
Yüksek frekanslı bileşenlerin benzeşiminde kullanılan Ampirik Green fonksiyoların elde edilmesi ve kullanılması
Melez deprem benzeşimlerinin yüksek frekanslı bileşenlerinin elde edilmesinde Marmara Denizi içinde Orta Marmara fay segmenti üzerinde meydana gelmiş küçük manyetüdlü depremlerin Marmara Denizi etrafında yerleştirilmiş bulunan geniş bant sismometre istasyonlarındaki kayıtları kullanılmıştır. Orta Marmara segmenti ile ilgili benzeşimlerde kullanılan istasyonlar ve bu istasyonların kaydettiği AGF olarak kullanılan küçük manyetüdlü depremler Şekil 4 te verilmiştir.



Şekil.4. Orta Marmara fay segmentinde Ampirik Green Fonksiyon olarak kullanılan depremler ve kaydedildikleri deprem istasyonları.

Düşük frekanslı bileşenlerin benzeşiminde kullanılan Sentetik Green fonksiyoların elde edilmesi ve kullanılması

Orta Marmara fay segmentinde farklı senaryolar için melez deprem benzeşimleri üretebilmek amacıyla düşük frekanslı bileşenlerin benzeşimlerinde kullanılacak sentetik sismogramlar (SGF) üretilmiştir. Burada izlenen yöntem Prens Adaları fay segmenti için izlenen yöntemin aynısıdır. Farklılık fayın boyutları ve geometrisi ile ilgilidir. Burada kullanılan hacmin başlangıç noktası 26.50 E 40.00 N koordinatlarıdır. Bu hacim doğu-batı yönünde 300 km, kuzey-güney yönünde 200 km uzunluğa sahip ve genişliği yüzeyden itabaren 30 km dir (Şekil 5). Bu hacim içinde koordinatları 27.588E 40.802N ve 28.866E 40.887N genişliği 15 km ve yüzeyden itibaren derinliği 10 km olan Orta Marmara fay segmenti yerleştirilmiştir. Fay bloğu üzerinde doğu-batı yönünde her 10 km de bir üç farklı derinlikte (12.5 km-17.5km-22.5 km) bir odak seçilmiş ve toplam 33 odak için sentetik sismogramlar (SGF) üretilmiştir. Üretilen SGF ların odak mekanizmaları Orta Marmara fayının tektonik yapısına uygun olarak Strike 85° Dip 90° ve Rake -180° olarak seçilmiştir. Sonlu Farklar yönteminde kullanılmak üzere bu hacim 0.5 km girit aralığı ile giritlenmiş ve sentetik sismogramların üretilmesinde kullanılan zaman aralığı 0.01 sn olarak alınmıştır.



Şekil 5. Orta Marmara fayı için sentetik sismogramların üretildiği hacim ve fay ile istasyonların geometrisi

Deprem Benzeşimleri

Prens Adaları Segmenti için yapılanlara benzer olarak EMPSYN yazılımı ile benzeşim hesaplamalarına başlamadan önce HAZARD yazılımı yardımıyla benzeşimleri gerçekleştirilmek üzere 100 farklı deprem senaryosu oluşturulmuştur. Senaryolarda kullanılan parametreler ve değişim aralıkları aşağıda açıklanmıştır;

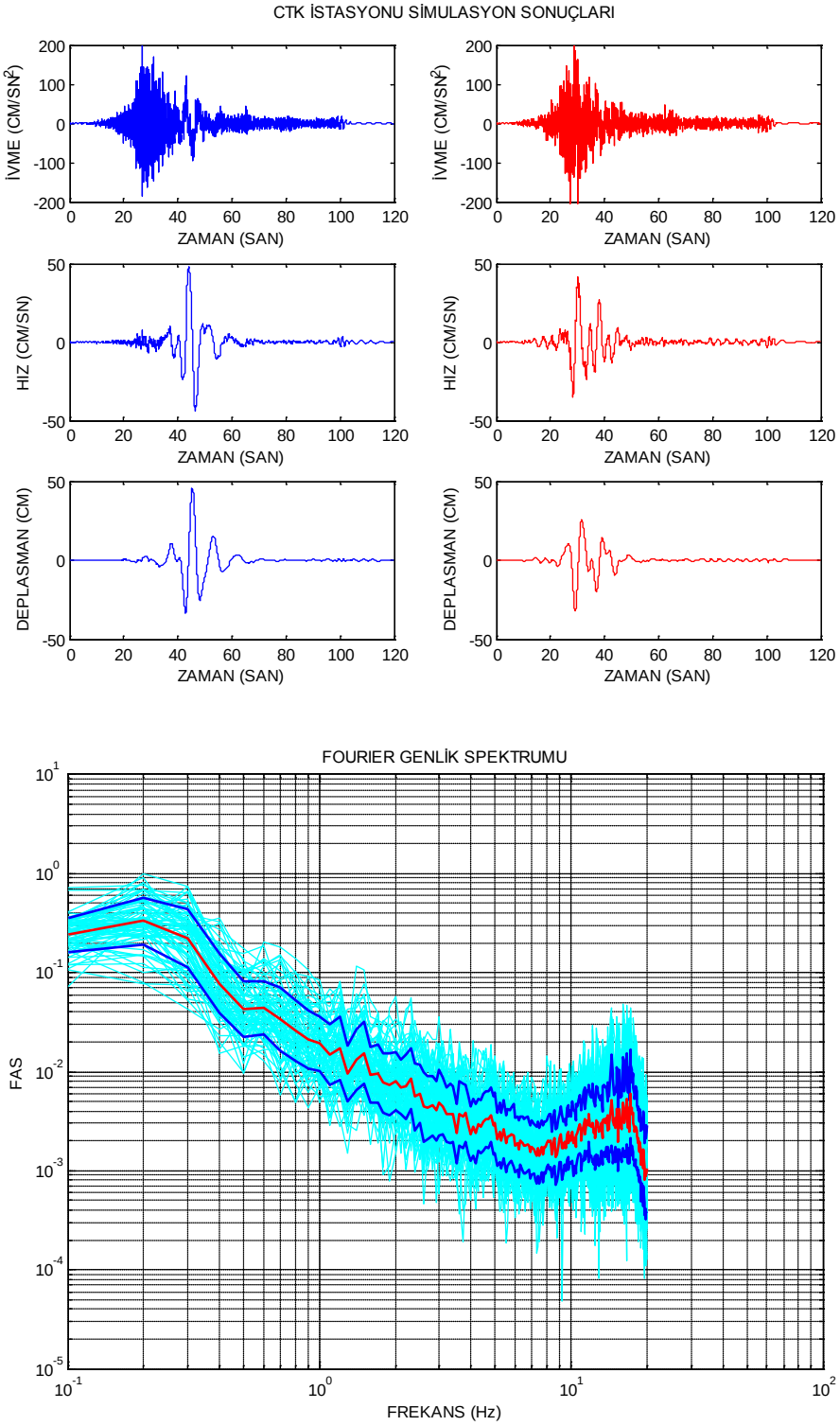
Moment; Orta Marmara fay segmenti ile ilgili yapılan benzeşimlerde moment değeri 1.5e+27 ile 2.5e+27 arasınada değiştirilmiştir.

Fay yırtılma geometrisi; Batı Marmara fayı dikdörtgen yapılı bir fay olarak alınmış, fayın boyu 110 km genişliği 15 km ve yüzeyden itibaren derinliği 10 km olarak alınmıştır.

Hiposentır; Fay üzerinde rastgele olarak her bir senaryoda farklı derinlik ve koordinatlarda seçilmiştir.

Strike, Dip, Rake; Batı Marmara fayının tektonik yapısına uygun olacak şekilde Strike:80°/85° Dip:70°/90° Rake:-160°/-180° olarak seçilmiştir.

Fay Yırtılma hızı; Farklı senaryolarda kullanılan fay yırtılma hızları S dalga hızının 0.8 – 1.0 katı aralığında değiştirilmiş healing hızı ise yırtılma hızının 0.8 -1.0 katı aralığında değiştirilmiştir



Şekil 6. CTK istasyonunda 100 farklı senaryo depremi sonucu elde edilen deprem benzeşimlerinin Fourier Genlik Spektrumları ve standart sapmaları ile hesaplanan ortalama depremin dalga formu.

Prens Adaları Segmentinde olduğu gibi her bir senaryo deprem için üretilmiş düşük ve yüksek frekanslı bileşenler özel olarak geliştirilen filtre fonksiyonları kullanılarak birleştirilmiş ve melez deprem benzeşimleri elde edilmiştir. Orta Marmara fay segmenti için CTK istasyonunda 100 farklı senaryo depremi sonucu elde edilen deprem benzeşimlerinin Fourier Genlik Spektrumları ve standart sapmaları ile hesaplanan ortalama depremin dalga formu Şekil 6 da verilmektedir.

4.TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Çalışmada Kuzey Anadolu fayının Prens Adaları segmenti ve Orta Marmara segmenti için belirli büyüklükteki bir deprem sonucu oluşabilecek yer hareketinin ulaşabileceği genliklerin ve enerji içeriklerinin belirlendiği bir yöntem önerilmiştir. Deprem kaynak özellikleri belirlenmiş, gerektiğinde kaynak etkileri giderilmiş GF lar, yalnızca benzeşimi elde edilen büyük depremin momentiyle ilişkili olarak 'temsil ilişkileri teoremine' (Aki and Richards, 1980) dayanılarak ölçeklendirilmiştir. Elde mevcut bilgiler dikkate alınarak HAZARD programı yardımıyla yırtılma parametreleri, yırtılma süreci ve kaynak ile ilgili parametreler belirli aralıklarda değiştirilerek toplam 100 farklı deprem senaryosu üretilmiş ve 100 senaryonun her biri için hem yüksek frekans bandında (0.5 Hz - 20 Hz) hem de alçak frekans bandında (0.1 Hz - 0.5Hz) EMPSYN programı yardımıyla ayrı ayrı deprem benzeşimleri elde edilmiştir. Spektrumun alçak ve yüksek frekans bandındaki benzeşimler özel filtreler geliştirilerek birleştirilmiş ve farklı senaryolar için melez deprem benzeşimleri elde edilmiştir. Deprem benzeşimlerinin fizik tabanlı yırtılma süreçleri ile gerçekleştirilmiş olduğu ve yayılma yolu ile ilgili jeolojik etkilerin ampirik ilişkilerden değil küçük depremlerin yayılma etkileri kullanılarak elde edildiği vurgulanmalıdır.

Benzeşimlerde kullanılan deprem istasyonlarının hemen hepsi yakın fay bölgesi olarak tanımlanan alanda yer almaktadır. Benzeşimler sonucu elde edilen deprem kayıtlarında alçak frekans bandındaki enerjinin baskınlığı göze çarpan önemli bir husustur. Bu hususun, Marmara bölgesinde meydana gelebilecek büyük manyetüdlü (M>7) depremlerde oluşacak deprem yer hareketinin karakteristiği konusunda önemli ipuçları verdiği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi BAP tarafından Proje no: 1827 ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK - MAG) tarafından Proje No: 108M584 desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

Aki, K.,. Richards, P. G. (1980). Quantitative Seismology,Theory and Methods, Volumes I and II, W. H. Freeman and Company, San Francisco, CA.

Hartzell, S. H. (1978). Earthquake aftershocks as Green's functions, *Geophys.Res.Lett*, 5, 1-4.

Hutchings, L. And Wu, F. (1990). Empirical Green's functions from small earthquakes: A waveform study of locally recorded aftershocks of the San Fernando earthquake, *J. Geophys. Res*., 95, 1187-1214.

Hutchings, L. (1991). "Prediction" of strong ground motion for the 1989 Loma Prieta earthquake using empirical Green's functions. *Bull, Seismol. Soc. Am*, 81, 88–121.

Hutchıngs, L. (1994). Kinematic earthquake models and synthesized ground motion using empirical green's functions. *Bull, Seismol. Soc. Am*, 84, 1028–1050.

Larsen S. (1995). E3D: 2D/3D elastic finite-difference wave propagation code.

Mert A. (2011). İstanbul İçin Tasarım Esaslı Kuvvetli Yer Hareketi Dalga Formlarının Zaman Ortamında Türetilmesi, Jeofizik Müh. Bölümü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.

Pulido N, Ojeda A, Atakan K, Kubo T. (2004). Strong ground motion estimation in the Sea of Marmara region (Turkey) based on a scenario earthquake, *Tectonophysics*, 391:357–74.

Sørensen BM, Pulido N, Atakan K. (2007). Sensitivity of ground-motion simulations to earthquake source parameters: a case study for Istanbul, Turkey, *Bull Seism Soc Am*, 2007;97(3):881–900.

Wu, F. (1978). Prediction of strong ground motion using small earthquakes, *Proceedings of the 2nd International Conference on Microzonation.* Vol II San Francisco, 701-704.