

Prens Adaları Fayında Kuvvetli Yer Hareketi Benzeşimleri

Aydın MERT*
Yasin FAHJAN**
Ali PINAR***
Lawrence HUTCHINGS****

ÖZ

Bu çalışmanın temel amacı, mühendislik yapılarının doğrusal ve doğrusal olmayan zaman ortamı analizlerine girdi verisi oluşturmak için, Prens Adaları Fayı'nın kırılmasıyla meydana gelmesi muhtemel büyük bir deprem sonrasında oluşacak yer hareketi dalga formlarını geniş bir frekans bant aralığında tahmin etmektir. Benzeşimlerin hesaplanmasında Hutchings ve Wu (1990) [1], tarafından geliştirilen fiziksel tabanlı yirtılma süreçlerini göz önüne alan Green Fonksiyonlar yöntemi kullanılmış ve farklı kaynak parametrelerinin bu dalga formlarının genlik ve frekans içeriklerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Elde edilen dalga formlarında alçak frekans bandındaki enerji dikkat çekicidir ve bu husus, bölgede meydana gelebilecek büyük manyetüdü depremlerde oluşabilecek yer hareketinin karakteristiği konusunda önemli ipuçları vermektedir.

Anahtar Kelimeler: Genişbant deprem benzeşimi, Green fonksiyonu, Prens Adaları Fayı.

ABSTRACT

Strong Ground Motion Simulations Around Princes Islands Fault

The main objective of this study is to simulate broad-frequency-band strong ground motion waveforms resulted from the rupture of Prince Islands Fault, to provide input accelerograms for linear and non-linear time history analyses of the engineering structures. Simulations are performed using Green's Function methodology developed by Hutchings and Wu (1990) [1]. The methodology considers physical based rupture process and takes into account different source parameters to investigate their effects on amplitude and frequency content of simulated waveforms. As a result, the low frequency energy content of

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 06.08.2012 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2014 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, İstanbul - mertay@boun.edu.tr

** Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli - fahjan@gyte.edu.tr

*** İstanbul Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul - alipinar@istanbul.edu.tr

**** Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, ABD - ljhutchings@lbl.gov

the simulated waveforms has significant role in the characteristic of strong ground motion for large earthquakes in Marmara region.

Keywords: Broadband earthquake simulation, Green's functions, Prince Islands Fault.

1. GİRİŞ

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 depremler sırasında oluşacak kuvvetli yer hareketinin, özellikle kaynak yakın bölgesindeki dalga yayılımının karmaşıklığının da hesaba katılarak belirlenmesi, günümüzde mühendislik sismolojisi çalışmalarının başlıca hedefleri arasındadır. 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.

Kaynak yakın bölgesinde meydana gelebilecek kuvvetli yer hareketinin gerçekçi bir şekilde temsil edilmesi özellikle inşaat mühendisliği çalışmaları açısından son derece önemli bir konudur. Mühendislik yapılarının depreme dayanıklı tasarımında kullanılan hesaplama tekniklerinde son yıllarda kaydedilen hızlı gelişmeler, performansa dayalı tasarım yaklaşımlarının benimsenmesi ve zaman tanım alanında hesaplama yöntemlerinin yapıların sismik tasarımında yaygın olarak kullanılması sonucunu doğurmuştur. Depremler sırasında yapılara etkileyen sismik yüklerin hesaplanması işlemlerinde kullanılan 'Eşdeğer Statik Deprem Yüğü Yöntemi' ve 'Mod Birleştirme Yöntemi' gibi klasik yöntemlerin yerini zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizlerin alması, bu tip analizlerde girdi olarak kullanılacak uygun sismik kayıtların elde edilmesini gerekli kılmış ve bu husus deprem mühendisliği araştırmalarının önemli konularından biri haline gelmiştir.

Literatürde dinamik analizlerde kullanılacak kuvvetli yer hareketi ivme kayıtlarının elde edilmesi ile ilgili üç farklı kaynaktan bahsedilmektedir: **1)** Depremler sırasında kaydedilen gerçek ivme kayıtları **2)** Tasarım ivme spektrumuna uyumlu olarak elde edilmiş sentetik ivme kayıtları. **3)** Sismolojik kaynak modelleri kullanan ve yayılım ortamı özellikleri dikkate alınarak yapılan deprem benzeşimleri sonucu elde edilen benzeştirilmiş ivme kayıtları.

Gerçek depremlerden elde edilen ivme kayıtları, ilgilenilen sahanın özelliklerine göre belirli jeolojik, tektonik ve sismolojik parametreler göz önünde bulundurularak seçilip ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarıdır. Bu tür kayıtlar yer sarsıntısının doğası ve belli başlı özellikleri (genliği, süresi, faz özellikleri, frekans muhteviyatı gibi) hakkında sağlıklı bilgiler içerdiği gibi ayrıca, ortamın sismik dalga yayılımını etkileyen kaynak, yayılım ortamı ve zemin koşulları gibi önemli faktörleri yansıtır [2]. Mühendislik yapılarının depreme dayanıklı tasarımına uygun gerçek kuvvetli yer hareketi kayıtlarının seçilmesi ve ölçeklenmesi ile ilgili temel yöntemler ve kriterler Fahjan (2008) [2], de ayrıntıları ile açıklanmıştır.

Sentetik ivme kayıtları, belirli bir bölge için yapılan sismik tehlike analizi sonucunda ortaya çıkan tepki spektrumuna veya sismik tasarım yönetmeliklerinde verilen tasarım spektrumuna uyumlu, yapay yollar kullanılarak üretilmiş ivme kayıtlarıdır [3].

Benzeştirilmiş (simülasyon) ivme kayıtları, deprem kaynağını ve kaynak bölge arası dalga yayılımını fiziksel tabanlı süreçler kullanarak modelleyen deprem benzeşimleri sonucu elde edilen ivme kayıtlarıdır. Genel olarak benzeşim işlemi matematiksel olarak bir elastodinamik representasyon (temsil ilişkileri) teoremi kullanılarak ifade edilir ve toplam yer hareketi, fay yüzeyi üzerindeki herbir noktanın yer hareketine olan katkısının (Green fonksiyonu) integrali alınarak hesaplanır [4].

Mevcut kuvvetli yer hareketi veri bankalarının her geçen gün artması ve bunlara erişimin sürekli gelişen haberleşme teknolojileri sayesinde kolaylaşması depremler sırasında kaydedilmiş gerçek ivme kayıtlarının yapıların dinamik analizlerinde kullanılmasının yolunu açmıştır. Ancak, zemin sınıfı, kaynakla saha arasındaki mesafe, büyüklük, yırtılma mekanizması gibi kriterler gözönüne alındığında tasarıma uygun kayıt bulmakta zorluklarla karşılaşmaktadır [5, 2]. Benzer olarak tasarım için sentetik ivme kayıtlarının kullanılması düşünüldüğünde de pekçok zorlukla karşılaşmaktadır. Yapay kayıtların kullanımındaki en büyük zorluk, çok sayıda kaydedilmiş hareketin ortalamasını simgeleyen tasarım spektrumuna uygun tek bir kayıt elde etmeye çalışmaktır [6, 2]. Bu tür kayıtların kullanımını sınırlayan bir diğer konu, kuvvetli yer hareketindeki çevrim sayısının artması sebebiyle gerçeğe aykırı olacak kadar büyük miktarda enerjinin açığa çıkmasıdır [2]. Yapıların doğrusal olmayan davranışlarının hesaplanmasında yer hareketinin genliği kadar faz bilgilerinin de önemli olduğu düşünüldüğünde, özellikle yakın ve büyük depremler için çok az sayıda kayıt bulunduğu da gözönüne alındığında, yukarıdaki iki seçeneğin de beklentileri karşılamaktan uzak olduğu anlaşılmaktadır. Bu bakımdan yapıların dinamik analizlerinde spektral ortalamaları tasarım spektrumu ile az çok çakışan ve deprem fiziği göz önüne alınarak benzeşimi elde edilmiş deprem yer hareketinin kullanılması daha doğru bir yaklaşımdır [4].

Literatürde, 17 Ağustos 1999 Gölcük ($M_w=7.4$) ve 12 Kasım 1999 Düzce ($M_w=7.2$) depremlerinin ardından, Kuzey Anadolu Fay Zonunda (KAFZ) son yüzyılda gözlenen yıkıcı depremlerin batıya göçü [7, 8] ve 9 Ağustos 1912 Mürefte-Şarköy ($M_s=7.2$) depremi gözönüne alınarak, tüm Marmara denizinin sismik bir boşluk olarak tanımlandığı pekçok çalışma mevcuttur [9]. Bu sebeple, Marmara bölgesi ile ilgili sismik tehlikenin ve gelecekte ilgili sismik risk değerlendirmelerinin daha sağlıklı yapılabilmesi amacıyla anakaya yer hareketinin geniş bir frekans bandı aralığında doğru olarak tanımlanması kaçınılmaz bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu çalışmanın amacı; melez bir benzeşim yöntemi kullanarak Prens Adaları Fayı'nın kırılmasıyla meydana gelmesi muhtemel $M_w=7.2$ büyüklüğünde bir deprem sonrasında Marmara Bölgesinde oluşacak yer hareketi dalga formlarını geniş bir frekans bant aralığında tahmin etmektir. Ayrıca, farklı kaynak parametrelerinin değişimlerinin bu dalga formlarının genlik ve frekans içeriklerini nasıl etkilediği incelenmiştir.

2. DEPREM YER HAREKETİ BENZEŞİM MODELLERİ

Deprem benzeşim modelleri deprem kaynağının, deprem kaynağından depremin kaydedildiği yere kadar olan jeolojik ortamın ve yerel zemin koşullarının fiziksel özellikleri ile ilgili birtakım bilgilere dayandığı gibi aynı zamanda belirli fay parametrelerindeki ve kırılma özelliklerindeki değişikliklerin kuvvetli yer hareketi kaydını nasıl etkilediğinin de bilinmesini gerektirir [10]. Genel olarak deprem benzeşim modellerinin temel öğelerini kaynak, yayılma hattı ve yerel zemin etkileri teşkil eder [4]. Son yıllarda sismologlar özellikle kuvvetli depremler sonucu oluşan yer hareketinin doğru olarak tahmin edilebilmesi amacıyla deprem yırtılma süreçlerinin modellenmesi ile ilgili olarak pek çok çalışma gerçekleştirmişlerdir [1, 11, 12, 13]. Literatürde deprem yer hareketinin benzeşimi ile ilgili olarak kullanılan pek çok yöntem vardır. Bu yöntemleri başlıca; **Green Fonksiyon**, **Deterministik**, **Stokastik**, **Melez (Hibrid)** yöntemler olarak sınıflandırmak mümkündür.

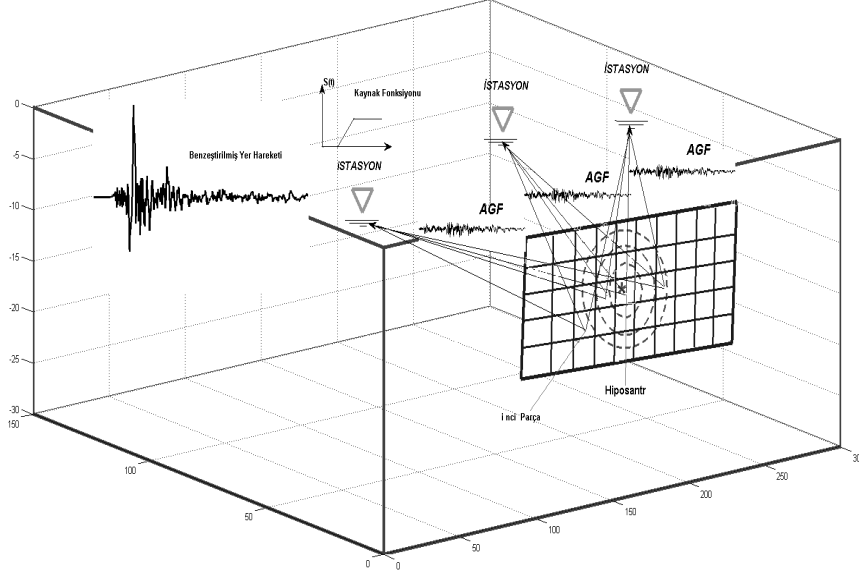
2.1. Green Fonksiyon Tabanlı Deprem Benzeşim Yöntemleri

Genel olarak **Green Fonksiyonu (GF)** ani etkili nokta kaynak (impulsive point source) şeklindeki bir etkiye yerin gösterdiği tepki olarak tanımlanabilir. Bu tanım, aynı zamanda teorik yada bu çalışmada kullanıldığı biçimiyle '**Sentetik Green Fonksiyonu**' (**SGF**) teriminin bir ifadesidir. GF'nun sentetik olarak hesaplanabilmesi için, deprem kaynağı ile depremin kaydedildiği yer arasındaki kabuğun hız yapısının belirlenmesi gereklidir. Ancak özellikle yer hareketinin yüksek frekanslı yada küçük dalga boylu bileşenleri için yerin heterojen yapısının yeterli çözünürlükte belirlenebilmesi pek mümkün değildir. Bu sebeple kabuksal hız yapısının etkilerini içeren **Ampirik Green Fonksiyonları (AGF)** kullanmak heterojiniteden kaynaklanan sorunların giderilmesi açısından en pratik çözümdür. [14]. AGF yöntemi, deprem yırtılması ve bunun sonucu oluşan yer hareketini 'elostodinamik temsil ilişkileri teoremi'ne' (Elostodynamic Representation Theorem) dayanarak, kaydedilmiş küçük depremleri AGF olarak kullanarak depremler sırasında oluşan yer hareketinin modellenebileceği esasına dayanır ve ilk olarak Hartzell (1978), [15] ve Wu (1978), [16] tarafından ortaya atılmıştır. Daha sonra yöntem Hadley ve Helmberger (1980) [8], Irikura (1983) [13], Hutchings ve Wu (1990) [1], Hutchings (1991) [10], gibi araştırmacılar tarafından çeşitli değişikliklerle kullanılmış ve geliştirilmiştir. Bu yöntemdeki temel mantık, gerçek yayılma ortamı ve lokal etkileri hesaba katabilmek amacıyla benzeşimi yapılacak büyük depremin yırtılma alanından kaynaklanan gözlenmiş küçük depremleri kullanmak ve böylelikle kaynaktaki asperiti alanlarını ve heterojenliği doğru olarak temsil edebilmektir [15]. GF kullanılarak yapılan deprem benzeşimlerinin şematik gösterimi Şekil 1 de sunulmuştur.

2.2. Deterministik Deprem Benzeşim Yöntemleri

Deterministik deprem benzeşimleri kinematik kaynak modelini kullanır ve fay üzerindeki kayma (slip) dağılımının bilinmesini gerektirir. Esas olarak deterministik yöntemler depremler sırasında zemin yüzeyinde oluşan hareketi üretmek için SGF ile kaynak fonksiyonunu birleştirirler [4]. Bu yöntemde herhangi bir noktadaki yer hareketinin elde edilmesi için, deprem kaynağının geometrisinin tanımlanması, kaynağın sonlu sayıda parçaya bölünmesi, kaynağın tamamı için kayma fonksiyonlarının ve GF'nin tanımlanması

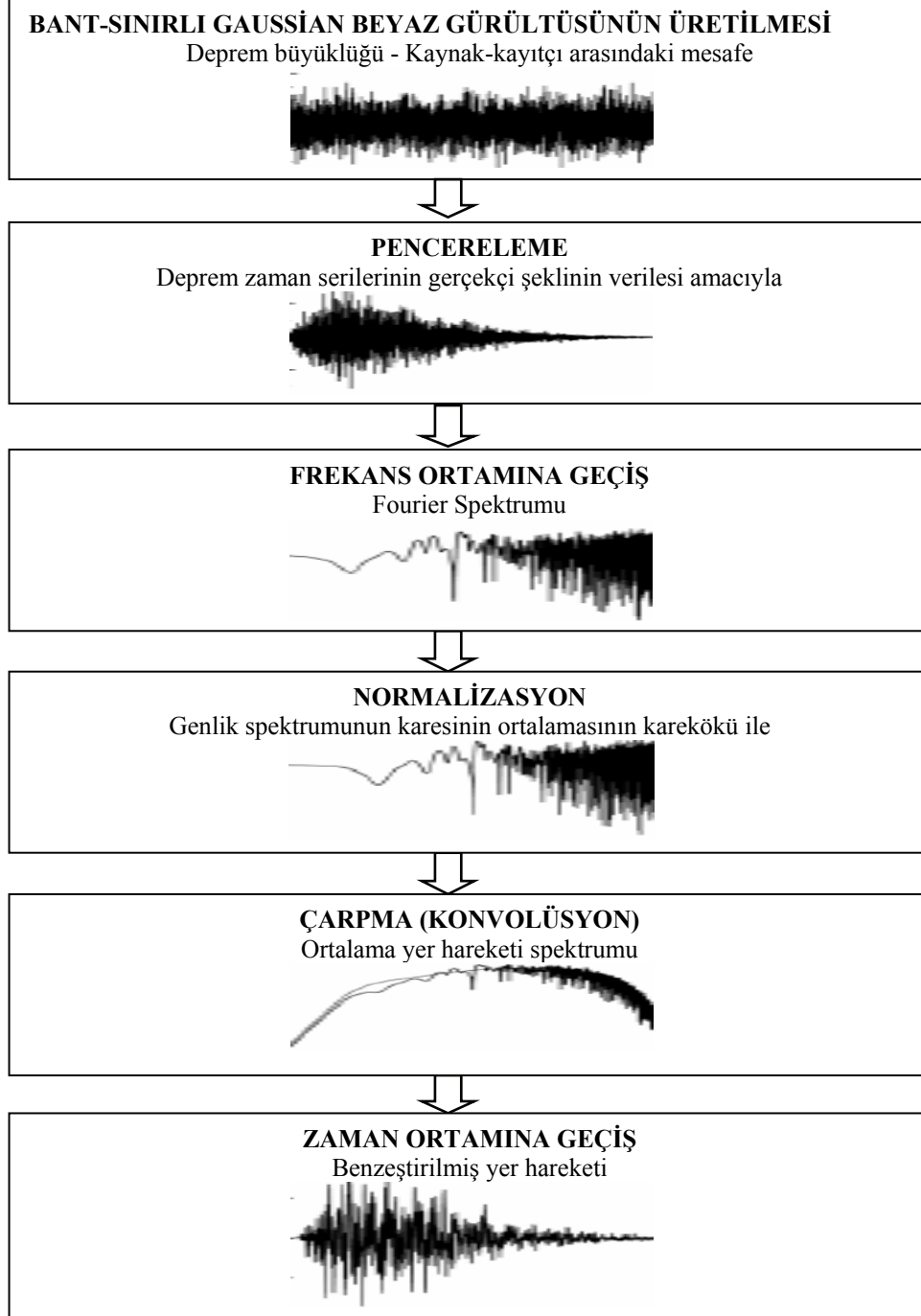
gerekir [14]. Deterministik kuvvetli yer hareketi benzeşimlerinin elde edilmesinde literatürde en sık karşılaşılan yöntemler; sonlu farklar, sonlu elemanlar, ayırık dalga-sayı gibi yaklaşımlardır. Aki, (1968) [17] ve Bouchon, [18] bu modeli kullanan ve geliştiren önemli araştırmacılar olarak göze çarpmaktadır.



Şekil 1. Green Fonksiyon (GF) benzeşimlerinin şematik gösterimi.

2.3. Stokastik Deprem Benzeşim Yöntemleri

Stokastik yöntem kuvvetli yer hareketi benzeşim modellerinin en sık kullanılanlarından biridir. Bu yöntem, deprem hareketinin yüksek frekanslı bileşenlerinin omega kare (ω^2) ortalama spektrumuna uyan bant sınırlı bir Gaussian gürültüsü ile temsil edilebileceği varsayımına dayanır [12]. Erdik vd., (2003) [4] te belirtildiği üzere stokastik deprem benzeşimlerinde kullanılan Fourier genlik spektrum modelinin temelinde Brune (1970) [19] uzak saha modeline dayanan S-dalgası yer hareketi spektrumu vardır ve geniş bir manyetüd aralığındaki depremler için yüksek frekanslı yer hareketinin ana parametreleri, Brune (1970) [19] tipi Fourier genlik spektrumlarını sağlamaktadır [20]. Stokastik yöntem kullanılarak yapılan deprem benzeşimlerinin temel adımları Şekil 2 de gösterilmiştir. Genel olarak stokastik benzeşim tekniklerinde nokta kaynak ve sonlu kaynak modeli olmak üzere iki farklı kaynak modeli kullanılır [2]. Nokta kaynak modeli kaynağın bir noktada yoğunlaştığı ve elde edilen dalga formu benzeşiminin yer hareketinin hem deterministik hemde rastgele süreçlerini içerdiği varsayımına dayanır. Kaynak ile kayıt noktası arasındaki mesafe kaynağın boyutlarından çok büyük olduğu durumlarda nokta kaynak modeli oldukça doğru sonuçlar vermektedir [21, 22]. Beresnev ve Atkinson (1997) [23] fay kırılma düzlemini daha küçük (ikincil) fayların bir matrisi olarak modelleyerek herbir ikincil



Şekil 2. Stokastik deprem benzeşiminde temel adımlar.

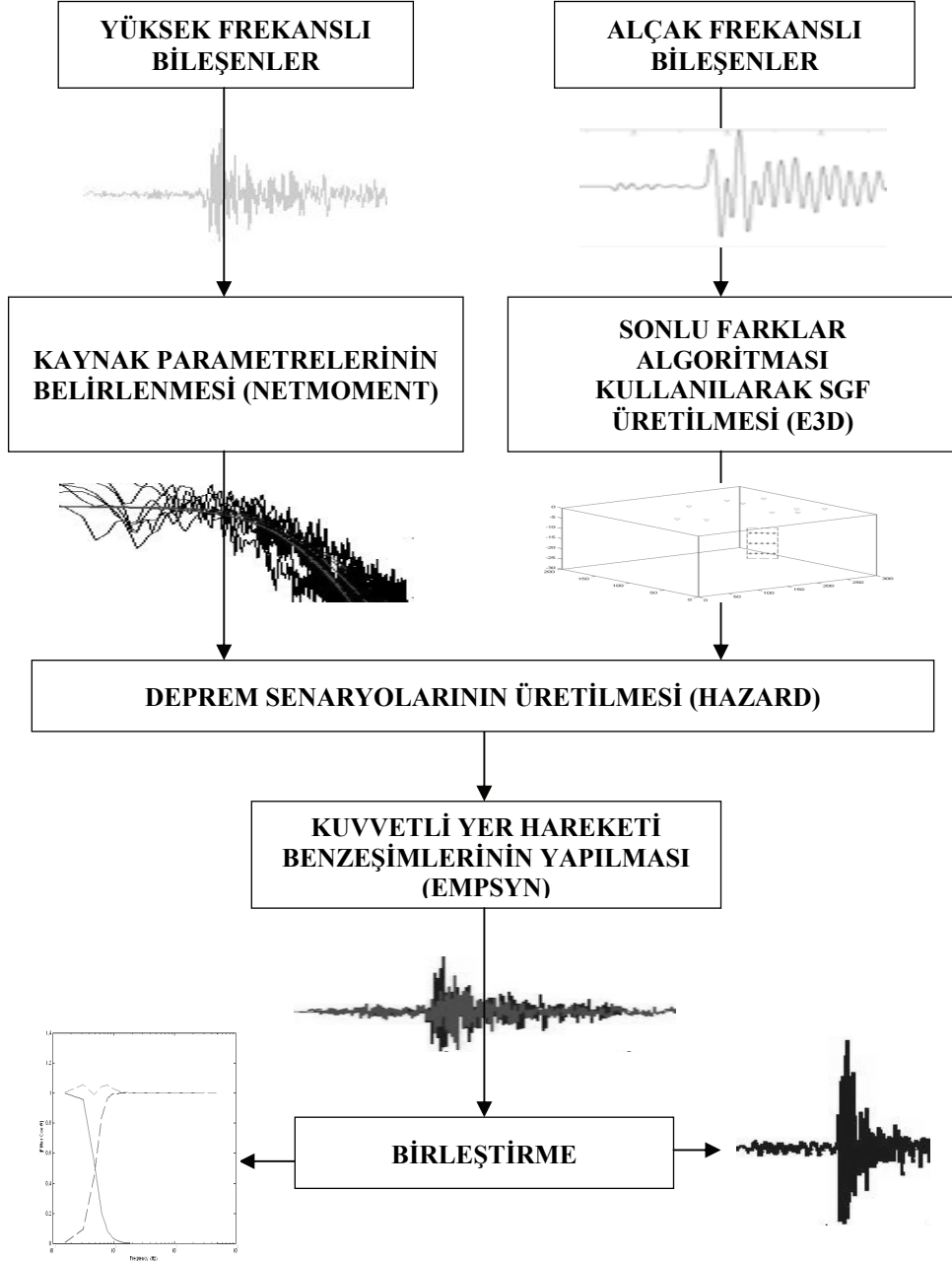
faydan kaynaklanan yayını ω^2 -modeli spektrumla ve nokta kaynak olarak ([12] prensiplerine uygun) göz önüne alarak sonlu fay kırığında kuvvetli yer hareketinin benzeşimi için bir yöntem geliştirmişlerdir [4]. Sonlu kaynak modeli, özellikle büyük depremlerde meydana gelen yer hareketinde stokastik nokta kaynak modeli kullanılarak medellenemeyen sonlu fay yırtılması etkilerini de (kaynağın geometrisi, yırtılma parametrelerindeki belirsizlik ve inhomojenite vb.) içermesi sebebiyle stokastik deprem benzeşim tekniklerinde önemli bir sorunu gidermiştir.

2.4. Melez Genişbant Deprem Benzeşim Yöntemleri

Geniş bant deprem kuvvetli yer hareketi benzeşimlerinin üretildiği melez yaklaşımların temel dayanak noktası ise, spektrumun farklı frekans bantlarındaki yer hareketi bileşenlerinin uygun yöntemlerle ayrı ayrı elde edilerek birleştirilmesidir. Sismoloji biliminde son yıllardaki gelişmeler, jeolojik heterojenliğin modellenilebildiği büyük dalga boyulu ya da bir başka deyişle alçak frekanslı bileşenler için, SGF'ların matematik çözümünü mümkün kılmaktadır. Yer hareketinin yüksek frekanslı bileşenleri için ise hem deprem kaynağındaki hem de jeolojik heterojenlikten kaynaklanan belirsizliklerden dolayı matematik çözüm üretmek mümkün olamamaktadır. Bu sebeple, kuvvetli yer hareketinin yüksek frekanslı bileşenlerinin stokastik benzeşim teknikleri ya da küçük deprem kayıtlarının GF olarak kullanıldığı AGF tabanlı bir yöntem kullanılarak hesaplanması gerekmektedir. Deprem yer hareketinin düşük ve yüksek frekans bandındaki bileşenleri farklı yöntemler kullanılarak elde edildikten sonra belirli filtre fonksiyonları kullanılarak birleştirilir ve geniş bir frekans aralığında yer hareketi benzeşimleri elde edilir. Birleştirme işleminde kullanılacak filtre fonksiyonlarının tasarlanması oldukça önemli bir konudur çünkü, spektrumun farklı bölgeleri için elde edilen enerjilerin doğru şekilde biraraya getirilmesi gerekmektedir.

3. PRENS ADALARI FAYI'NDA YAPILAN GENİŞBANT DEPREM BENZEŞİMLERİ

Literatürde özellikle 1999 depremlerinin ardından Marmara bölgesi ile ilgili sismik tehlikenin ve gelecekle ilgili sismik risk değerlendirilmelerinin daha sağlıklı yapılabilmesi amacıyla ana kaya yer hareketinin melez geniş bant benzeşim teknikleri kullanılarak hesaplandığı pek çok çalışma mevcuttur [24, 25, 26, 27, 28, 29]. Bu çalışmalar, oluşabilecek büyük bir depremde, yer hareketinin ne kadar karmaşık olabileceğini göstermesi açısından son derece önemli sonuçlar ortaya koymuştur. Tanırcan (2012) [24], Prens adaları fayında meydana gelecek $M_w=7.2$ büyüklüğündeki bir deprem sonucunda, İstanbul da yerleşik 82 ivme istasyonunda kaydedilebilecek kuvvetli yer hareketi dalga formlarının benzeşimini elde etmiştir. Alçak frekans bandındaki yer hareketi benzeşimlerini sonlu farklar tekniğini kullanarak, yüksek frekanslı yer hareketi benzeşimlerini ise stokastik teknikler kullanarak elde ettiği melez benzeşimlerde, Anadolu yakasında 8 m/s^2 e ulaşan ivme ve Avrupa yakasında 1.6 m/s^2 ye ulaşan hız değerleri gözlemlenmiştir. Erdik vd., (2001) [25], fay yakın bölgelerindeki önemli mühendislik yapıları için tasarım esaslı kuvvetli yer hareketi dalga formlarını melez bir yöntem kullanarak hesapladıkları çalışmada deterministik yöntemle elde ettikleri alçak frekans yer hareketi bileşenlerini stokastik yöntemle elde ettikleri yüksek frekans yer hareketi bileşenleri ile birleştirmişler ve geniş



Şekil 3. Kuvvetli yer hareketi dalga formlarının üretilmesinde kullanılan benzeşim algoritmasının temel öğeleri. Yüksek frekanslı bileşenler AGF ler kullanılarak düşük frekanslı bileşenler SGF ler kullanılarak elde edilir. Her bir senaryo deprem için üretilmiş farklı frekans bandındaki benzeşimler birleştirilerek geniş bant yer hareketi elde edilir.

bant yer hareketi dalga formları üretmişlerdir. Pulido vd., (2004) [26], benzer olarak yer hareketinin alçak frekans bileşenlerini deterministik bir algoritma kullanarak yüksek frekans bileşenlerini ise yarı-stokastik bir yöntem ile hesaplayarak Marmara bölgesinde meydana gelecek büyük bir depremde oluşabilecek kuvvetli yer hareketinin mutlak genliliği, frekans içeriği ve süresi gibi mühendislik yapıları için son derece önemli parametrelerin değişimlerini incelemişlerdir. Mathilde vd., (2007) [27], [26] ile aynı melez modeli kullanarak Marmara Bölgesinde oluşacak büyük bir depremde kaynak ve sönüm parametrelerinin kuvvetli yer hareketi dalga formları üzerindeki etkisini ortaya koymuşlardır. Ansal vd., (2008) [28] İstanbul için stokastik-deterministik melez bir yaklaşım ile kuvvetli yer hareketi benzeşimlerini elde ettikleri çalışmalarında büyük bir deprem sonrasında İstanbulda meydana gelebilecek hasar ve kayıpları belirlemeye çalışmışlardır. Mert, (2011) [29]. Marmara denizinde meydana gelecek büyük bir depremde oluşacak kuvvetli yer hareketi dalga formlarını melez bir yöntem kullanarak geniş bir frekans aralığında belirlemiş ve farklı deprem senaryoları kullanarak yer hareketinin kaynak ve yırtılma parametrelerine bağlı değişkenliğini ortaya koymuştur. Literatürde, bu çalışmadan önce, Marmara denizi içinden geçen fay segmentleri boyunca AGF tabanlı bir benzeşim tekniği kullanılarak yapılmış herhangi bir çalışma mevcut değildir. Bunun en önemli sebebinin bölgede yeterli sayıda ve kalitede deprem istasyonu olmamasına bağlı olarak veri eksikliği olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, özellikle 1999 depremlerinin ardından farklı organizasyonlar tarafından bölgeye yerleştirilen geniş bant deprem istasyonları ve Marmara denizi içinde ve etrafında yapılan jeofizik ve jeolojik [30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41] çalışmalar eksiklikleri gidererek bu tür çalışmaların yapılabilmesine olanak sağlamıştır.

Bu çalışmada, Prens Adaları Fay'ında meydana gelmesi muhtemel $M_w=7.2$ büyüklüğünde bir deprem sonrasında oluşabilecek kuvvetli yer hareketi dalga formları melez bir benzeşim algoritması kullanılarak farklı deprem senaryoları için geniş bir frekans bant aralığında elde edilmiştir. 35-40 km uzunluğundaki Prens Adaları fayının yırtılması ile bölgede oluşabilecek maksimum depremin büyüklüğü konu ile ilgili literatürde mevcut diğer çalışmalar [42, 24], ortalama sismik moment - deprem büyüklüğü arasındaki ampirik ilişkiler [43] ve fay boyutları - deprem büyüklüğü arasındaki ampirik ilişkiler [44] gibi kriterler gözönüne alınarak hesaplanmıştır. Analizler sırasında dalga yayılımının yüksek ve alçak frekans bandında ayrı ayrı modellenmesi için sırasıyla ampirik ve sentetik GF kullanılmıştır. Kuvvetli yer hareketi dalga formlarının benzeşiminde kullanılan yöntem ilk olarak Hutchings ve Wu (1990) [1] tarafından ortaya konan fiziksel tabanlı yırtılma süreçlerini göz önüne alan bir metodolojiye dayanmaktadır.

Fayın geometrik yapısı, yırtılma modelleri ve deprem kaynağı ile ilgili çeşitli parametreler (odağın yeri, derinliği, yırtılma hızı vb.) belirli aralıklarda değiştirilerek 100 farklı deprem senaryosu elde edilmiştir. Senaryo deprem parametrelerinin değişim aralıkları bölgenin tektonik yapısı [30, 31, 32, 33, 34, 35], bölgede oluşan depremlerin kaynak parametreleri [36, 37], sismik moment - deprem büyüklüğü [43] ve fay boyutları - deprem büyüklüğü arasındaki ampirik ilişkiler [44] ile konu ile ilgili literatürde mevcut diğer çalışmalar [42, 24] ve bu çalışmalarda kullanılan senaryo deprem kriterleri gözönüne alınarak hesaplanmıştır.

Her bir senaryo deprem için Prens Adaları Fayı'nda kaydedilmiş küçük depremler AGF olarak kullanılarak kuvvetli yer hareketinin yüksek frekanslı bileşenlerinin benzeşimleri

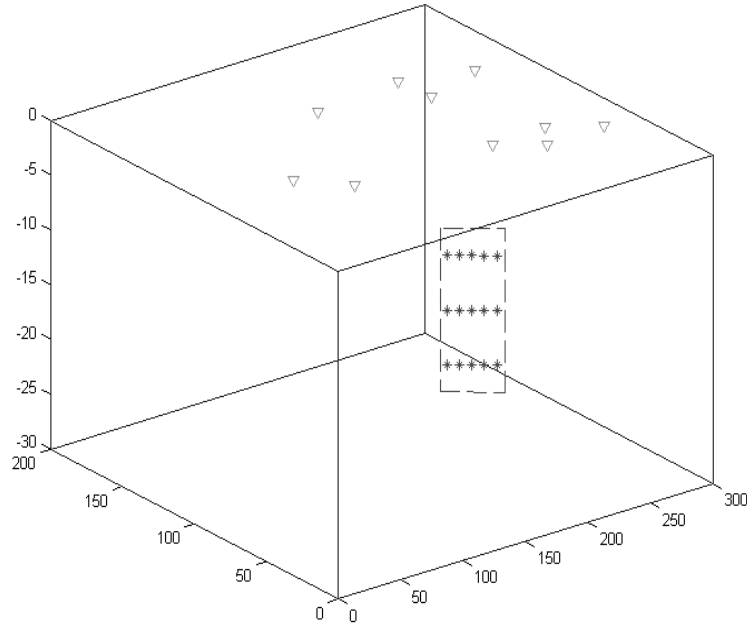
Prens Adaları Fayında Kuvvetli Yer Hareketi Benzeşimleri

elde edilmiştir. Yer hareketinin büyük dalga boylu bileşenlerinin benzeşimlerinin elde edilmesinde kullanılacak sentetik GF'lar sonlu farklar yöntemi ile hesaplanmıştır. Shawn Larsen (Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL) (1995) [45] tarafından geliştirilen bu yöntem, üç boyutlu bir jeolojik ortamda herhangi bir sismik kaynaktan sismik dalgalar şeklinde yayılan elastik enerjinin benzeşimini deterministik olarak hesaplayan bir algoritmadır. Kuvvetli yer hareketinin alçak frekanslı bileşenlerinin benzeşimleri hesaplanan SGFler kullanılarak elde edilmiştir. Son olarak geniş bir frekans bandı aralığında (0.1 Hz–20 Hz) kuvvetli yer hareketi benzeşimlerini elde edebilmek amacıyla özel geliştirilmiş filtreler kullanılarak ampirik ve sentetik GF yardımıyla üretilmiş düşük ve yüksek frekanslardaki yer hareketi dalga formları birleştirilmiştir. Genişbant kuvvetli yer hareketi benzeşimlerinin elde edilmesinde NETMOMENT, EMPSYN, E3D ve HAZARD isimli dört ayrı yazılım kullanılmıştır. (Şekil 3).

3.1. Genişbant Deprem Benzeşimlerinin Elde Edilmesi

3.1.1. Alçak frekanslı bileşenlerin benzeşiminde kullanılan Sentetik Green Fonksiyonların elde edilmesi ve kullanılması

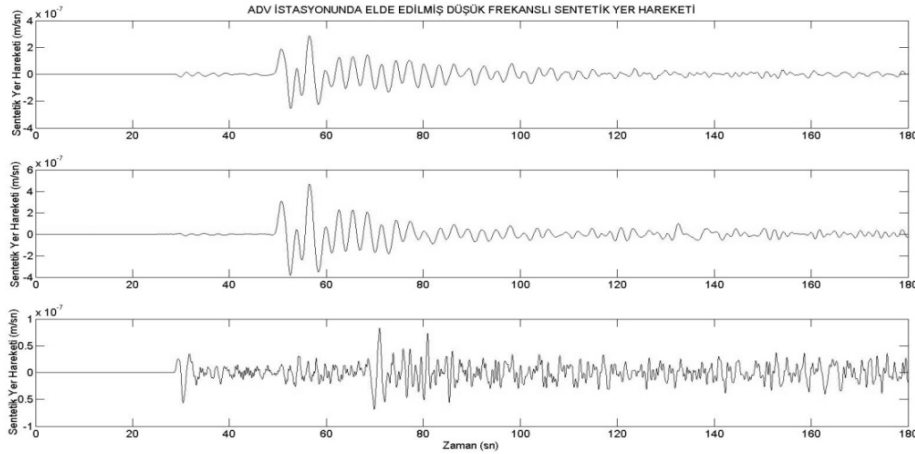
Prens Adaları Fayı'nda farklı deprem senaryoları için genişbant deprem benzeşimleri üretebilmek için öncelikle alçak frekanslı bileşenlerin benzeşimlerinde kullanılacak sentetik



Şekil 4. Prens Adaları Fayı için sentetik sismogramların üretildiği hacim ve fay ile istasyonların geometrisi (Kırmızı yıldızlar SGF ların odakları, yeşil üçgenler ise SGF ların kaydedildiği deprem istasyonlarını göstermektedir).

sismogramların (SGF) üretilmesi gereklidir. Bu amaçla Prens Adaları Fayı'nı ve benzeşim yapılacak istasyonları içine alacak şekilde, başlangıç noktası koordinatları 40.0 N 26.50 E olan, doğu-batı yönünde 300 km ve kuzey-güney yönünde 200 km genişliği ve yüzeyden itibaren 30 km derinliği olan bir hacim tanımlanmıştır (Şekil 4). 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. Deprem benzeşimi yapılması planlanan deprem istasyonları da koordinatlarına göre tanımlanan hacmin yüzeyine yerleştirilmiştir. SGF'nin hesaplanmasında Karabulut vd., (2003) [46], tarafından Marmara bölgesi için geliştirilen hız yapısı kullanılmıştır.

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 (SGF) üretilmiştir. Sentetik olarak üretilen depremlerin momentleri nokta kaynağına uygun olarak $M_0=1e+21$ dyncm köşe frekansları ise 10 Hz olarak alınmıştır. Üretilen sentetik depremlerin odak mekanizmaları Prens Adaları Fayı'nın yapısına uygun olarak strike 118° dip 90° ve rake -180° olarak seçilmiştir. Hacim 0.5 km'lik hücre aralıklarına bölünmüş ve sentetik sismogramların üretilmesinde kullanılan zaman aralığı 0.01 sn olarak alınmıştır. Şekil 5 te ADV istasyonunda elde edilmiş sentetik kayıt görülmektedir.

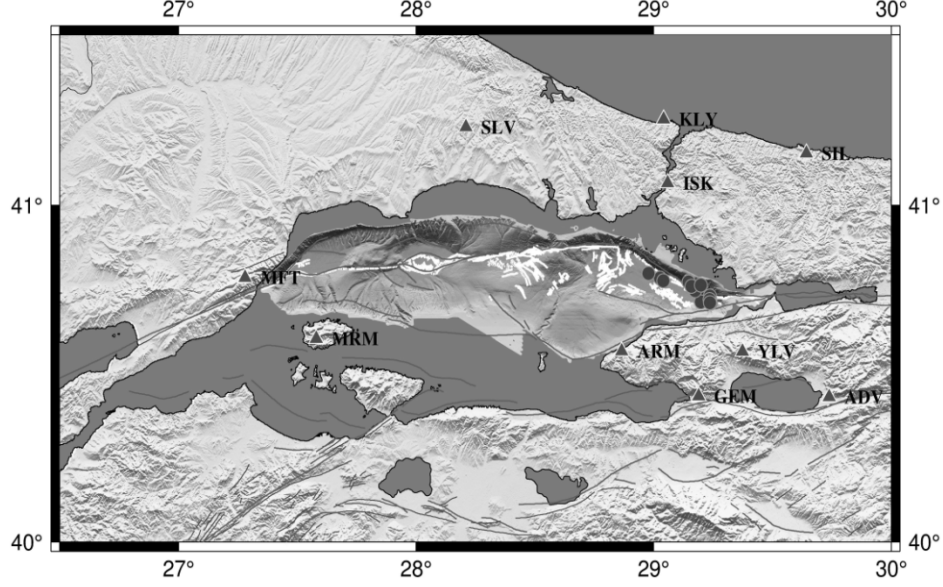


Şekil 5. ADV istasyonunda elde edilmiş bir sentetik sismogram örneği.

3.1.2. Yüksek frekanslı bileşenlerin benzeşiminde kullanılan AGF elde edilmesi ve kullanılması

Genişbant deprem benzeşimlerinin yüksek frekanslı bileşenlerinin elde edilmesinde Marmara Denizi içinde Prens Adaları Fayı üzerinde meydana gelmiş küçük manyetüdü (Mw \approx 3.5) depremlerin (AGF) Marmara Denizi etrafında yerleştirilmiş bulunan genişbant sismometre istasyonlarındaki kayıtları kullanılmıştır.

Prens Adaları Fayında Kuvvetli Yer Hareketi Benzeşimleri



Şekil 6. Prens Adaları Fayı'nda AGF olarak kullanılan depremler ve kaydedildikleri istasyonlar.

Tablo 1. Prens Adaları Fayı'nda AGF'lerin kaydedildiği deprem kayıt istasyonları.

NO	İSTASYON KODU	ENLEM (N) DERECE	BOYLAM (E) DERECE	SİSMOMETRE TİPİ
1	ADV	40.4332	29.7383	CMG-3TD
2	ARM	40.5683	28.8660	CMG-3ESPD
3	GEM	40.4350	29.1890	CMG-3TD
4	ISK	41.0657	29.0592	CMG-3TD
5	KLY	41.2530	29.0420	CMG-3TD
6	MFT	40.7867	27.2812	CMG-40T
7	MRM	40.6058	27.5837	CMG-3TD
8	SIL	41.1530	29.6430	CMG-3ESPD
9	SLV	41.2300	28.2100	CMG-3ESPD
10	YLV	40.5667	29.3728	CMG-40T

Benzeşimlerde kullanılan deprem kayıt istasyonları Tablo 1 ve Şekil 6 da, bu istasyonların kaydettiği AGF olarak kullanılan küçük manyetüdü depremler (Şekil 6) hesaplanan kaynak parametreleri ile birlikte Tablo 2 de verilmiştir. Benzeşimi yapılan depremin olduğu fay düzlemi boyunca kaydedilmiş küçük depremlerin AGF olarak kullanılmasının en önemli avantajı, bu depremlerin kaynak ile kayıtçı istasyonu arasındaki yol boyunca yayılım ile

ilgili gerekli olan her türlü bilgiyi içermeleridir. Öyleki AGF lar kaydedildikleri noktadaki lineer zemin etkilerini dahi içerirler.

Tablo 2. Prens Adaları Fayı'nda AGF olarak kullanılan depremler ve kaynak parametreleri.

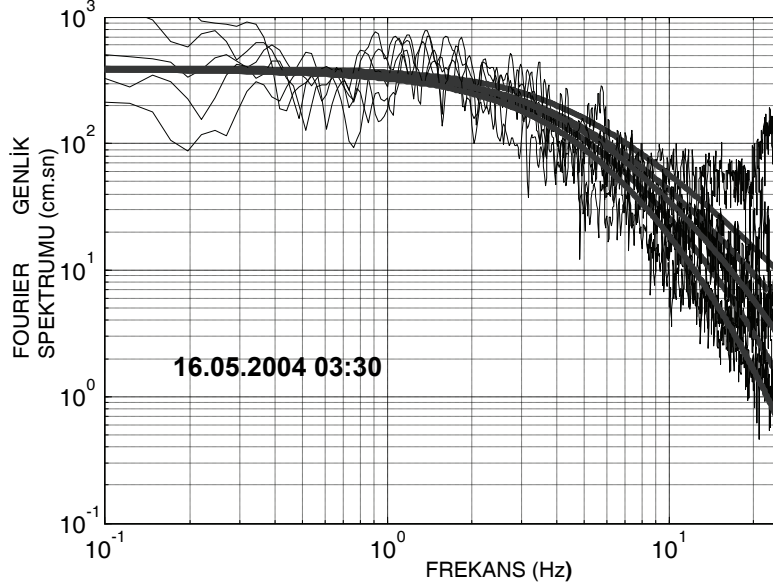
NO	TARİH (gg/aa/yy)	SAAT (Lokal)	ENLEM (N) DER	BOYLAM (E) DER	DERİN (Km)	M _w	MOMENT (Dyne-cm)	f _c (Hz)
1	290904	15:42	40.785	29.027	13.4	3.9	76.4 e+20	12.3
2	290904	15:51	40.777	29.041	10.77	2.9	2.84 e+20	8.3
3	070905	13:22	40.732	29.237	7.6	3.4	13.1 e+20	10.2
4	080905	00:22	40.715	29.199	12.1	3.1	4.22 e+20	4.5
5	080905	03:39	40.711	29.241	5.4	3.2	6.01 e+20	8.6
6	080905	07:12	40.722	29.235	9.8	3.2	8.44 e+20	6.1
7	031105	05:06	40.712	29.237	14.7	3.2	8.4 e+20	11.0
8	221008	01:00	40.748	29.174	9.4	3.8	63.6 e+20	4.2
9	160406	20:54	40.773	29.147	24.6	3.0	3.84 e+20	10.2
10	120906	18:18	40.799	28.978	10.4	3.0	3.72 e+20	11.7
11	280507	22:47	40.761	29.159	7.9	2.7	1.31 e+20	12.1
12	030208	12:57	40.764	29.198	5.3	2.7	1.45 e+20	14.3

AGF ler fay düzlemi boyunca fayın farklı bölgelerinden yayılacak olan enerjiyi temsil etmek amacıyla dağılmış olsalarda fay düzlemi üzerindeki her bölgeyi temsil edecek biçimde dağılmış olmaları pratikte pek mümkün değildir. Bu sebeple, benzeşimler sırasında fayın her noktasını temsil etmek amacıyla interpolate edilmişlerdir. Temsil ilişkilerini çözerken dikkat edilmesi gereken bir diğer husus, seçilecek AGF lerin ani etkili nokta kaynak kabulüne uymaları ya da bir başka deyişle momentlerinin $1.5 \cdot 10^{14}$ Nm civarında olmasına dikkat edilmesidir [1], [47]. Kullanılan AGF lerin momentleri bu değerden fazla ise kaynak etkileri dekonvolüsyon işlemine tabi tutularak ani etkili nokta kaynak kabulüne uymaları sağlanabilir [48]. Bu çalışmada kullanılan bazı GF'nın da kaynak etkileri bu yolla giderilmişlerdir.

3.1.3. Ampirik Green Fonksiyon (AGF) olarak kullanılan depremlerin kaynak parametrelerinin hesaplanması

Deprem kaynak parametrelerinin, sismik moment (Mo), kaynak köşe frekansı (fc), sönüm parametresi (t*), hesaplanmasında doğrudan gelen S dalgalarının yatay bileşenleri kullanılmıştır.

Analizler sırasında her bir istasyona ait deprem kayıtlarının yatay bileşenleri öncelikle radyal ve transversal bileşenlere dönüştürülmüş ve daha sonra her bir kayıttaki S dalgası fazlarının ilk on saniyelik bölümleri kullanılarak kaynak yer değiştirme spektrumları elde edilmiştir. Her bir deprem için Mo, fc ve t* (Tablo 2) eşzamanlı ters çözüm tekniği kullanılarak Hutchings (2001) [47] de detayları açıklandığı şekilde elde edilmiştir.



Şekil 7. Kaydedilen depremin düzeltilmiş S dalgası yerdeğiştirme spektrumuna uydurulmuş teorik Brune Spektrumu. (Kırmızı çizgiler teorik Brune spektrumunu, siyah çizgiler gözlemsel S dalgası yer değiştirme spektrumunu göstermektedir. Hesaplamalarda S dalgasının radial ve transversal bileşenleri kullanılmıştır. Hesaplamalarda Kullanılan istasyonlar: ISK, KLY, MRM, SLV, YLV)

Deprem dalgalarının odak merkezi ile kaydedildikleri istasyon arasındaki yol boyunca belirli frekanslardaki soğurulma etkilerinin giderilmesi amacıyla, literatürde Marmara bölgesi ile ilgili yapılmış mevcut çalışmalar gözden geçirilmiştir. Akıncı vd. (2006) [49] tarafından geliştirilen frekans bağımlı kesme dalgası kalite faktörü $Q(f) = 180 f^{0.45}$ bağıntısının kullanılmasına karar verilmiştir. Yayılm süresince Geometrik saçılma (R^a) etkisine bağlı bozulmaların spektrumdan arındırılması için 100 km den büyük uzaklıklar için $\alpha=0.5$, 100 km den daha küçük uzaklıklar için $\alpha=1$ kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan bir boyutlu hız modeli Karabulut vd. (2003) [46], den alınmıştır. Serbest yüzey düzeltme katsayısı (S) bu hız modelinden elde edilmiş ve yoğunluklar P dalgası hızları (V_p) kullanılarak hesaplanmıştır [50]. Odak mekanizması ile ilgili düzeltme (F), düşey yönde polarize olmuş S dalgaları (SV) için 0.47 yatay yönde polarize olmuş S dalgaları (SH) için 0.52 katsayısı [51] kullanılarak yapılmıştır. Yerel zemin koşullarına ait tepki fonksiyonu bilinemediğinden bu etkiler spektrumdan giderilememiştir. Bu sebeple, yerel zemin etkilerinin sonuçlarda saçılmaya sebep olduğu düşünülmektedir. Analizler sırasında istasyonların kaydettiği deprem kaydı için sinyal gürültü oranı hesaplanmış, spektrumda sinyal gürültü oranının 10 katın üstünde olduğu frekans bandı tespit edilerek deprem kaynak parametreleri yalnızca bu frekans bandı kullanılarak hesaplanmıştır. Örneğin Şekil 7 de verilen 16.05.2004 03:30 depreminin Marmara (MRM) istasyonu kaydı kullanıldığında Brune teorik spektrumu ile kaydedilen depremin kaynak yer değiştirme spektrumu 0.15 Hz ile 25 Hz arasında birbirleriyle eşleştirilmiştir. Kaydedilen depremin

düzeltilmiş S dalgası yer değiştirme spektrumu Brune (1970) [19], yer değiştirme spektral şekline sönüm parametresine bağlı olarak, en küçük kareler algoritmasını kullanan ters çözüm tekniği ile eşleştirilerek çözüm parametreleri elde edilmiştir (Şekil 7).

3.1.4. Prens Adaları Fayı'nda farklı deprem senaryolarının elde edilmesi

Prens Adaları Fayı'nda farklı deprem senaryoları oluşturmak için yırtılma geometrisi, odağın yeri, asperitilerin büyüklüğü ve sayısı, yırtılma hızı, fayın doğrultusu ve kayma vektörü, gerilme düşümü gibi ölçülebilir ya da teorik olarak belirlenebilir parametreler fiziksel olarak gerçekleşmesi muhtemel aralıklarda rastgele değiştirilmiştir. Daha sonra bütün senaryolar için, sentetik ve amprik Green Fonksiyonlar kullanılarak düşük ve yüksek frekans bandında deprem benzeşimleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Buradaki temel hipotez, belirli bir moment büyüklüğünde deprem meydana getirme potansiyeli bulunan bir fay segmenti için, fay yırtılma parametreleri fiziksel olarak anlamlı ve yeterli ölçüde örneklendirilebilirse, elde edilecek sentetik deprem sismogramlarıyla mühendislik yapılarının maruz kalabilecekleri farklı deprem yüklerinin ve davranış özelliklerinin elde edebileceğidir [52].

Senaryolarda kullanılan parametreler ve değişim aralıkları aşağıda açıklanmıştır;

Moment; Prens Adaları Fayı ile ilgili yapılan benzeşimlerde moment değeri $M_0=0.5e+27$ Dyne-cm ile $M_0=1e+27$ Dyne-cm arasında değiştirilmiştir.

Doğrultu, Eğim, Sapma; Prens adaları fayının yapısı ile ilgili literatürdeki mevcut tektonik ve sismolojik çalışmalar ve bu fay üzerinde oluşmuş depremlerin odak mekanizması sonuçları dikkate alınarak, fay doğrultu atımlı olarak modellenmiş ve Doğrultu: $110^\circ/116^\circ$, Eğim: $70^\circ/90^\circ$, Sapma: $-160^\circ/-180^\circ$ aralığında seçilmiştir.

Fay yırtılma geometrisi; Prens Adaları Fayı dikdörtgen yapılı bir fay olarak seçilmiş, boyu 35 km, genişliği 15 km ve yüzeyden itibaren derinliği yani fay üst sınırına olan uzaklığı 10 km olarak alınmıştır.

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

Fay yırtılma hızı; Farklı senaryolarda kullanılan fay yırtılma hızları S dalga hızının 0.8-1.2 katı aralığında değiştirilmiştir.

İyileşme hızı (Healing velocity); İyileşme hızı yırtılma cephesinin fayın herhangi bir kenarına ulaşmasıyla başlar. İyileşme hızı atımı sonlandıran gerilme palsının (stress pulse) hızıdır ve yükseliş zamanını kontrol eden bir parametredir. Analizlerde fay yırtılma hızının 0.8-1 katı aralığında değiştirilmiştir.

Yükseliş zamanı (Rise time); Fay yırtılmasının başlangıcından itibaren ilk iyileşme fazının ulaşmasına kadar geçen zaman yada bir başka deyişle yırtılma cephesinin fayın bir kenarına ulaşması için geçen en kısa süredir.

Pürüzlülük (Roughness); Fay üzerindeki herhangi bir elamanın fay yırtılmasına olan direncini belirleyen bir parametredir. Fay üzerindeki elemanların belirli bir yüzdesi (bu çalışmada %33) pürüzlü elaman olarak alınmıştır. Bu türden elemanlar yüksek gerilme düşümü değerlerine sahiptir.

Gerilme düşümü; Kullanılan atım fonksiyonuyla (Kostrov kayma fonksiyonu [53]) ilişkili bağımlı bir değişkendir ve modellenen yırtılma sırasında iki farklı etki ile değişim gösterir. Bunlardan birincisi fay yüzeyi boyunca asperiti alanları olarak tanımlanan daha yüksek gerilme düşümüne sahip bölgelerdir. İkincisi ise yeryüzüne yaklaştıkça gerilme düşümünün azalmasına izin verilmesidir.

3.1.5. Farklı frekans bandındaki deprem benzeşimlerinin birleştirilmesi

Mühendislik çalışmaları için anlamlı frekans bandında (0-20 Hz) genişbant melez yer hareketi dalga formlarının hesaplanabilmesi için alçak ve yüksek frekanslı sismogramların birleştirilmesi ile ilgili pekçok yöntem geliştirilmiştir ([54] Irikura ve Kamae, 1994; [55] Beresnev ve Atkinson, 1997; [56] Kamae vd., 1998; [57] Hartzell vd., 1999; [58] Pitarka vd., 2000; [59] Pulido ve Kubo, 2004; [60] Graves ve Pitarka, 2004; [61] Mena vd., 2006; [62] Pulida ve Matsuoka, 2006; [63] Liu vd., 2006; [64] Rodgers vd., 2008, daha fazla referans için [65] Mai vd., 2010, pp.2128 bakılabilir).

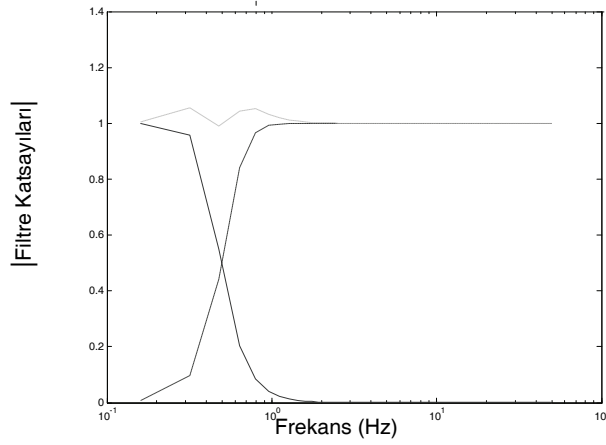
Bu çalışmada, kullanılan kayıtçı istasyonlarının her birinde, her bir senaryo deprem için ayrı ayrı üretilmiş alçak ve yüksek frekans bandındaki benzeşim sonuçları ‘in-house’ birleştirme algoritması kullanılarak MATLAB ortamında birleştirilerek geniş bir frekans bandında (0.1Hz-20 Hz) deprem benzeşimleri elde edilmiştir. Alçak frekans bandında sonlu farklar algoritması kullanılarak elde edilen sentetik GF lar ortamın seçilen hücre aralığı (0.5km) ve hız yapısı özellikleri dikkate alındığında 0.1Hz-2Hz bandında güvenilir sonuçlar üretmektedir.

Yüksek frekans bandında AGF olarak kullanılan deprem kayıtlarında örnekleme aralığı 0.02 sn dir. Dolayısıyla spektrumun üst kısmında 25 Hz e kadar sonuç almak mümkündür. Ancak, 20 Hz ten sonra ve 0.5 Hz altındaki frekanslarda, gürültü seviyesi bu tarz küçük depremlerin enerjisinin üstüne çıktığından, 0.5Hz-20Hz bandı güvenilir frekans bandı olarak alınmış ve kullanılan algoritmada birleştirme frekansı olarak 0.5 Hz seçilmiştir.

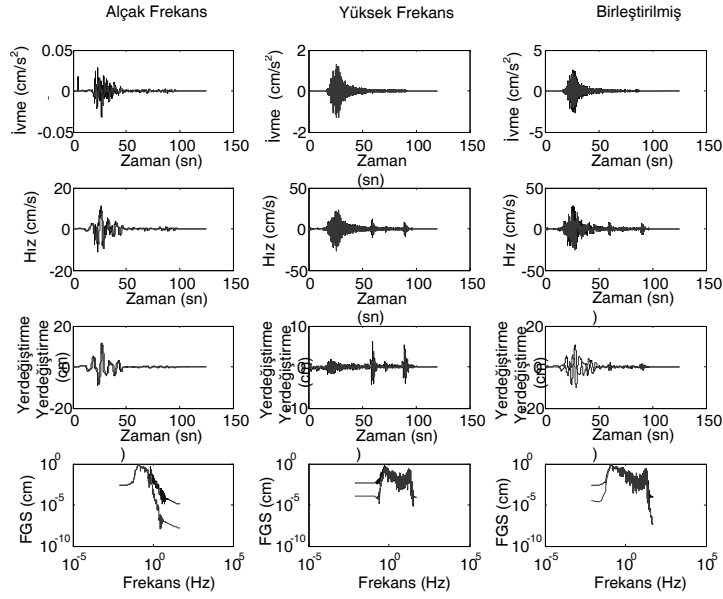
Geniş bant deprem benzeşim spektrumunda 0.5 Hz in altındaki frekanslar SGF kullanılarak yapılan benzeşimlerden bir alçak-kesen filtre kullanılarak, 0.5 Hz in üzerindeki frekanslar ise AGF kullanılarak yapılan benzeşimlerden bir yüksek-kesen filtre kullanılarak elde edilmiştir. Uygun filtre katsayılarını seçmek için bir optimizasyon işlemi yapılmış ve birleştirme filtre fonksiyonunun toplamının frekans ortamında yaklaşık olarak bir olması sağlanmıştır. Bu sayede birleştirilmiş geniş bant yer hareketi benzeşiminde birleştirme köşe frekansı etrafında yüksek genliklerin oluşması engellenmiştir. Çalışmada kullanılan filtre fonksiyonları Şekil 8 de verilmiştir.

Şekil 9 da ARM istasyonundaki yüz senaryodan bir tanesi için yukarıdaki filtre fonksiyonları kullanılarak alçak frekans bandındaki ve yüksek frekans bandındaki benzeşim sonuçlarının birleştirilmesi gösterilmektedir. Şekildeki birinci kolonda mavi ile gösterilen kayıtlar SGF kullanılarak elde edilmiş orijinal alçak frekans benzeşimlerini kırmızı ile gösterilen kayıtlar ise bu benzeşimlerin şekil 8 de gösterilen filtre fonksiyonu ile filtrelenmiş halini göstermektedir. Şekildeki ikinci kolonda yüksek frekanslı benzeşimlerin orijinal ve filtre edilmiş halleri üçüncü kolonda ise düşük ve yüksek frekanslı bileşenlerin birleştirilmesi ile elde edilmiş geniş bant deprem benzeşimlerinin orijinal ve filtre edilmiş halleri gösterilmektedir.

Her bir deprem istasyonu için elde edilen 100 genişbant deprem benzeşiminin ortalaması ve standart sapması belirlenerek sonuçlarda, hesaplanan ortalama depremin dalga formu iki yatay bileşen için ivme, hız ve deplasman cinsinden ayrı ayrı verilmiştir (Şekil 10-19).



Şekil 8. Genişbant deprem benzeşimlerinin elde edilmesinde kullanılan filtre fonksiyonları.



Şekil 9. ARM İstasyonunda alçak ve yüksek frekans bandındaki benzeşim sonuçlarının birleştirilmesi (Mavi orjinal sismogramları kırmızı ise filtrelenmiş sismogramları göstermektedir).

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Gerek Marmara bölgesinde, gerekse dünyanın farklı aktif tektoniğe sahip bölgelerinde, farklı benzeşim teknikleri kullanılarak yapılan, mevcut pek çok çalışma göstermiştir ki, güvenilirliği yüksek benzeşim algoritmaları kullanarak dahi gelecekte meydana gelmesi muhtemel depremlerde oluşacak yer hareketini modellemede belirgin sınırlamalar ve belirsizlikler ile karşı karşıyayız [27]. Bu sınırlamaların başında, ortamın sönümlenme parametrelerindeki belirsizlikler ve oluşacak depremlerin kaynak parametrelerinin değişkenliği ve belirsizliği gelmektedir [27]. Bu çalışmada kullanılan benzeşim yönteminin en önemli avantajı, ortamın sönümlenme özelliklerini, modellemesi yapılan fayda oluşmuş küçük depremleri AGF kullanarak yayılma ortamınının gerçek fiziksel özelliklerini temsil edebilmesidir. Kaynak parametrelerinin belirsizliği sorununun en optimal çözümü olarak ise, en kötü ve en iyi durum senaryoları oluşturmak ve daha sonra bu senaryolara uygun farklı kaynak parametreleri için farklı sınır değerleri belirlemek önerilmektedir [27]. Bu sayede oluşması beklenen yer hareketinin maksimum ve minimum değerlerini belirli yaklaşımlarla ile tespit etmek mümkün olabilecektir. Bu amaçla, çalışmada her bir kaynak parametresi fiziksel olarak gerçekleşmesi muhtemel sınırlar içinde değiştirilerek 100 farklı deprem senaryosu oluşturulmuştur.

Fiziksel tabanlı yırtılma süreçleri uygulayarak Kuzey Anadolu Fayı'nın Marmara Denizi içinden geçen Prens Adaları segmenti için $M_w=7.2$ büyüklüğündeki bir deprem sonucu oluşabilecek gerçekçi yer hareketi dalga formları üretebilmek ve deprem kaynak parametrelerindeki değişimlerin bu dalga formlarının genlik ve frekans içeriklerini nasıl etkilediğini incelemek amacıyla, Marmara denizi etrafındaki 10 istasyonda geniş bir frekans bandı aralığında (0.1Hz-20Hz) yapay sismogramlar üretilmiş ve spektrumların enerji içerikleri karşılaştırılmıştır (Şekil 10-19). Bu amaçla, bölgedeki küçük depremlerin kayıtları yardımıyla elde edilen AGF ve sonlu farklar yöntemi kullanılarak hesaplanmış SGF lar kullanılmıştır.

Deprem kaynak özellikleri belirlenmiş, gerektiğinde kaynak etkileri giderilmiş AGFler ile nokta kaynak kabulüne uygun olarak hesaplanmış SGF ler benzeşimi yapılan büyük depremin momentiyle ilişkili olarak temsil ilişkileri teoremine [66] dayanılarak ölçeklendirilmiştir. AGF olarak kullanılacak küçük depremlerin kaynak parametrelerinin elde edilmesinde karşılaşılan en büyük problem, yerel zemin etkilerinin orijinal kaynak spektrumunu köşe frekansının olması muhtemel yerlerinde etkileyerek kaynak parametrelerinin yanlış hesaplanmasına sebep olmasıdır. Bu problemi giderebilmek amacıyla bu tür etkilerin görüldüğü istasyonların verileri kullanılmamış ve spektrumda sinyal gürültü oranının en az 10 olduğu frekans bandı kullanılarak analizler yapılmıştır. AGF olarak kullanılacak depremler ile ilgili bir diğer sınırlama depremlerin birbirlerine ve ilişkili oldukları faya olan mesafeleridir. Çalışmada, fay ile arasındaki mesafe 8-10 km ye varan GF lar başarıyla kullanılmıştır.

Yer yüzeyinde meydana gelen deprem yer hareketinin özellikleri faylanma geometrisine, atım miktarı ve atımın fay düzlemi üzerindeki dağılımına, yırtılma özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Kullanılan quasi-dinamik yırtılma modelinin özellikleri sebebiyle bir kaynak parametresini değiştirmek farklı parametrelerinde değişmesi anlamına gelmektedir. Örneğin yırtılma hızını değiştirmek kaynağın yükselme zamanını ve atım dağılımını da değiştirmektedir. Benzer olarak hiposentir lokasyonunu değiştirmek yükselme zamanı ve atım dağılımını da değiştirmektedir. Senaryolarda pek çok parametre

değiştirilerek yer hareketinin genlik ve frekans içeriklerinin nasıl değiştiği incelenmiştir. Senaryolar incelendiğinde, modellenen yer hareketini etkileyen en önemli kaynak parametrelerinin hiposentir lokasyonu, yırtılma hızı ve bunlara bağlı olarak değişen yükselme zamanı olduğu gözlemlenmiştir. Yer hareketinin özellikle yüksek frekanslı bileşenlerini etkileyen önemli bir parametre ise gerilme düşümeüdür. Bu sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalar ile uyumludur [24, 27].

Farklı parametrelerin değişimlerinin modellenen yer hareketini ne ölçüde değiştirdiği Şekil 10-19 da her bir istasyon için verilen spektrumlardan açıkça görülmektedir. Aynı istasyonda farklı senaryolar kullanılarak elde edilen deprem benzeşimlerinin enerji içerikleri arasında belirgin farklılıklar göze çarpmaktadır. Örneğin şekil 10 da ADV istasyonunda, 100 senaryo derem ile hesaplanan ortalama depremin enerji içeriği ile \pm standart sapması arasında belirli frekanslarda 2-3 kat fark olduğu gözlemlenmektedir. Benzeşimlerin hesaplandığı diğer dokuz istasyondaki spektrumlarında benzer özellikler gösterdiği görülmektedir. Bu durum, deprem kaynak parametrelerindeki değişimlerin, dalga formlarının genlik ve frekans içeriklerini ne ölçüde değiştirdiğinin açık bir göstergesidir.

Benzeşimler sonucu elde edilen dalga formlarında alçak frekans bandındaki enerjinin baskınlığı göze çarpan bir diğer önemli husustur. Bu hususun, Marmara bölgesinde meydana gelebilecek büyük manyetüdü ($M > 7$) depremlerde oluşacak deprem yer hareketinin karakteristiği konusunda önemli ipuçları verdiği düşünülmektedir. Bu büyüklükte depremlerin, kırdıkları fay segmentlerinin boyutları ve dolayısıyla kırılma süreleri gözönüne alındığında, kaynak köşe frekanslarının oldukça alçak frekanslarda olacağı açıktır. Dolayısıyla spektrumun alçak frekans bandında oldukça büyük enerjiler ortaya çıkarmaları şaşırtıcı olmayacaktır. Benzeşimler sonucu elde edilen genlik spektrumlarında bu gerçeği doğrular niteliktedir. Bu durum, özellikle yüksek doğal salınımlı yapıların, köprü, viyadük, yüksek katlı mühendislik yapılarının tasarımlarında üzerinde durulması gereken bir husustur. Deprem benzeşimlerinin hesaplanmasında kullanılan istasyonların hemen hepsi yakın fay bölgesi olarak tanımlanan alanda yer almaktadır. Yakın fay bölgesi istasyonlarında kaydedilen dalga formlarının spektrumlarında, yönelme etkilerine bağlı olarak alçak frekanslarda belirgin enerjiler gözlemlenmesi beklenmelidir. Benzeşim sonuçlarının bu gerçekle uyuşması, kullanılan yöntemin deprem dalgalarının modellenmesi konusundaki başarısını ve güvenilirliğini göstermesi açısından önemlidir.

Hesaplamaların yapıldığı istasyonlarda, 100 farklı senaryo depremi sonucu elde edilen genişbant deprem benzeşimlerinden ortalama depremin PGA değerlerinin, mesafe ile dağılımları azalım ilişkileri ile [67, 68, 69] karşılaştırıldığında (Tablo 3) tüm değerlerin genel olarak ± 1 standart sapma içinde kaldığı gözlemlenmektedir. Bu genellemeye uymayan ve PGA değerleri ± 1 standart sapmanın dışına taşan üç istasyondan bahsetmek mümkündür (MFT, SLV, YLV). Bunlardan MFT istasyonundaki farklılık dikkate alınmayacak ölçüde küçüktür. Diğer iki istasyondaki genlik değerlerinin azalım ilişkileriyle elde edilen değerlerden büyük olması ve bu istasyonların konumları dikkate alındığında bu farklılığın nedeninin, yönelme etkileriyle ilgili olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, ampirik azalım ilişkilerinin özellikle fay yakın bölgelerinde dalga yayılımı ile ilgili belirli etkileri yansıtmadıkları iyi bilinen bir gerçektir [70]. Literatürde mevcut pek çok çalışmada da çoğu zaman açıklanamayan farklı nedenlerle benzer saçılmalara sıkça rastlanıldığı bilinmektedir. Bu arada, ampirik azalım ilişkileri ile yalnızca ortalama depremde elde

Prens Adaları Fayında Kuvvetli Yer Hareketi Benzeşimleri

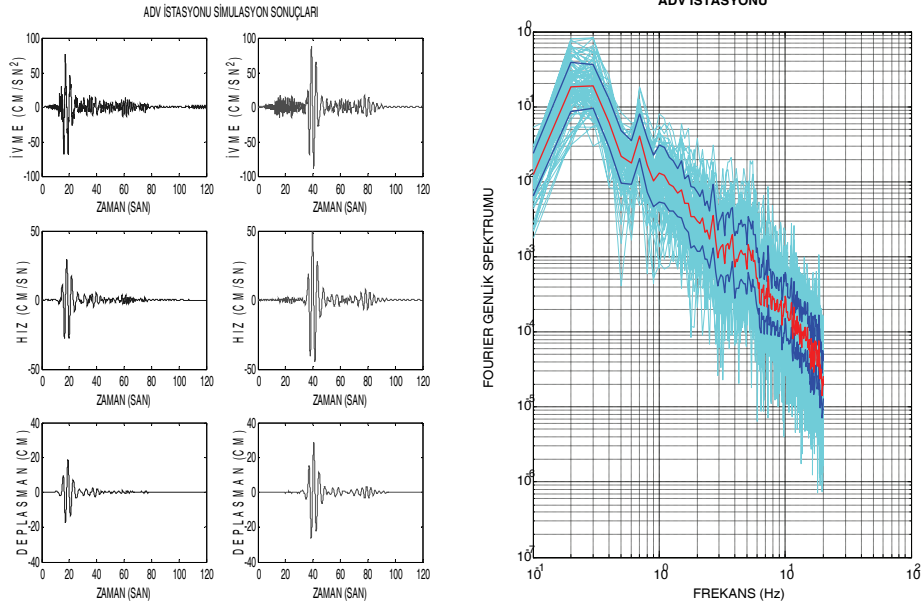
edilen ivme değerlerinin kıyaslandığını, spektrumlarda azalım ilişkilerindeki saçılmalara benzer olarak ortalama depremin çok altında ve çok üstünde genlik değerlerine sahip senaryo depremlerin mevcut olduğu gözden kaçırılmamalıdır.

Prens adaları fayında oluşabilecek pek çok deprem senaryosunu kapsayacak şekilde sistematik bir benzeşim tekniği kullanılarak, Marmara denizi etrafındaki yerleşim birimlerinde, yer hareketi dalga formlarının genlik ve enerji dağılımı değişimlerinin ilk olarak incelendiği bu çalışmadan elde edilen sonuçların, dünyanın farklı tektonik bölgelerinde farklı benzeşim teknikleri kullanılarak elde edilmiş sonuçlarla karşılaştırılmasının, kuvvetli yer hareketi benzeşim teknikleri ile ilgili literatürün gelişmesine önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

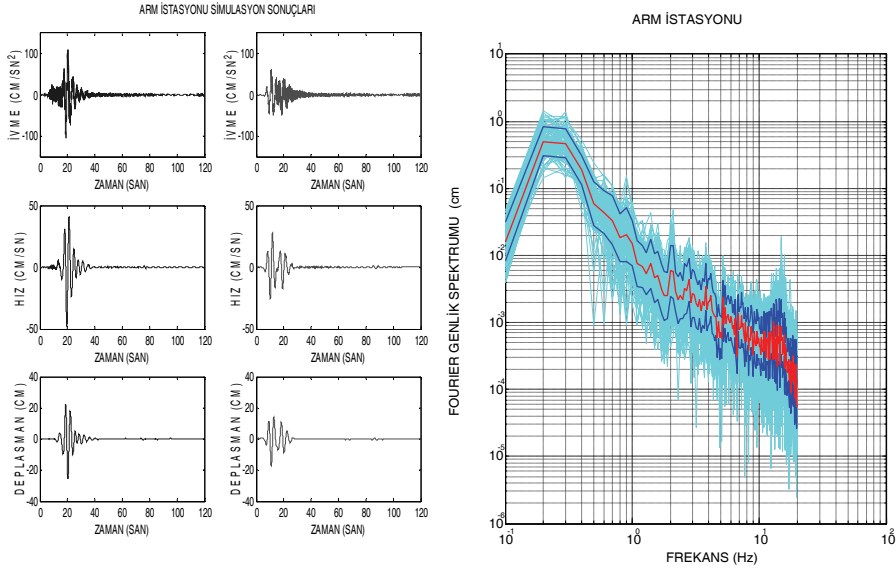
Bundan sonra konuyla ilgili yapılacak çalışmalarda, benzer senaryolarla farklı benzeşim teknikleri kullanarak yer hareketi değişkenliğinin incelenmesi ve bu çalışmada elde edilen sonuçlarla kıyaslanması düşünülmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara dayanarak yer hareketine en çok etki eden kaynak parametrelerinin de daha detaylı incelenmesinin önemli olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, Marmara bölgesindeki çok faylı tektonik modelin deprem tehlike analizlerine dayalı benzeşim algoritmaları ile değerlendirilmesinin literatürdeki önemli bir boşluğu dolduracağı düşünülmektedir.

Tablo 3. Benzeşimler sonucu elde edilen PGA değerlerinin mesafe (R_{JB}) ile dağılımının yer hareketi azalım ilişkileri ile karşılaştırılması. AS08: Abrahamsan & Silva 2008 [67]; BA08:Boore & Atkinson 2008 [68]; CB08: Campbell & Bozorgnia 2008 [69].

İST	R_{JB}	AS08 (PGA-mg)			BA08 (PGA-mg)			CB08 (PGA-mg)			BNZŞM (PGA-mg)
		Med	+1.σ	-1.σ	Med	+1.σ	-1.σ	Med	+1.σ	-1.σ	
ADV	62.85	51,56	89,95	29,55	72,02	126,6	40,97	53,40	90,27	31,90	80
ARM	15.59	174,6	303,9	100,3	198,2	348,3	112,8	152,9	258,1	90,53	120
GEM	39.41	73,8	128,7	42,32	110,4	194,0	62,8	78,49	132,7	46,45	80
ISK	22.26	125,9	219,4	72,28	162,9	286,4	92,70	121,0	204,4	71,64	125
KLY	41.47	71,04	123,9	40,73	106,0	186,2	60,28	75,30	127,3	44,57	110
MFT	131.0	25,53	44,56	14,62	25,66	45,09	14,60	28,43	48,08	16,81	12
MRM	106.4	32,79	57,22	18,79	36,51	64,17	20,77	34,04	57,56	20,13	28
SIL	42.06	70,29	122,6	40,31	104,7	184,1	59,59	74,48	125,9	44,07	40
SLV	75.49	44,58	77,79	25,55	58,54	102,9	33,30	45,72	77,30	27,04	135
YLV	33.88	82,42	143,7	47,27	123,8	217,5	70,41	88,48	149,5	52,36	270

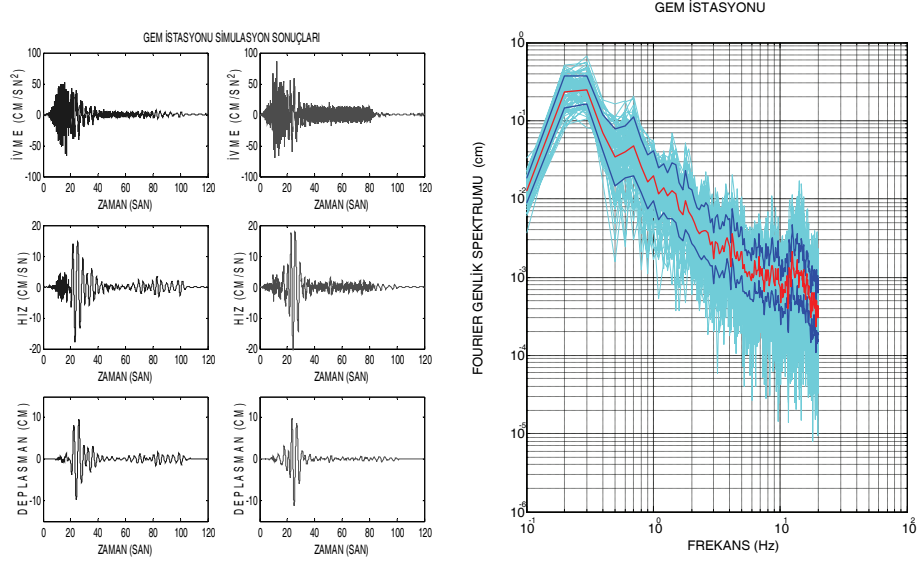


Şekil 10. ADV istasyonunda 100 farklı senaryo depremi sonucu elde edilen geniş bant deprem benzeşimleri. Açık mavi, hesaplanan 100 farklı FGS; Kırmızı, ortalama depremin FGS; Koyu mavi ile gösterilen standart sapmayı ifade etmektedir (sağdaki şekil). Hesaplanan ortalama depremin iki yatay bileşen için dalga formu (soldaki şekil).

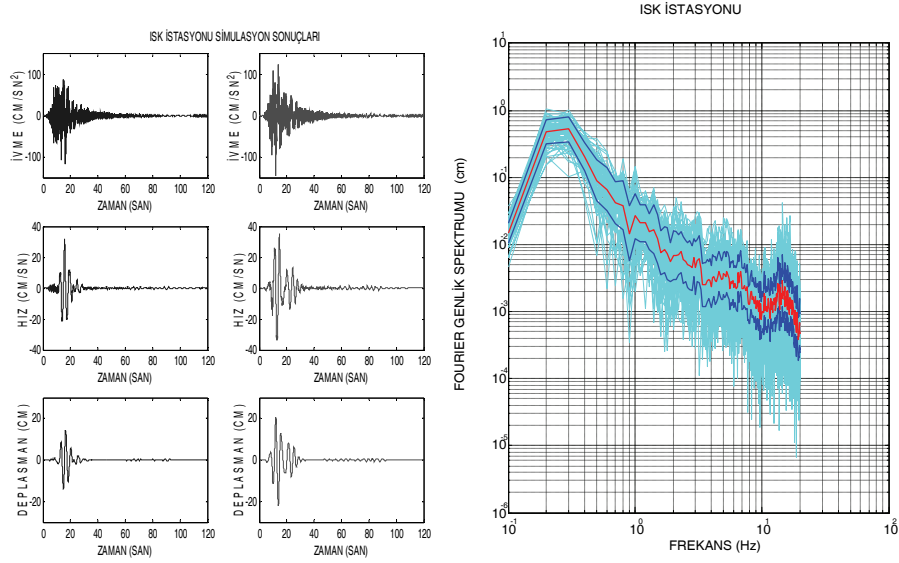


Şekil 11. ARM istasyonunda 100 farklı senaryo depremi sonucu elde edilen geniş bant deprem benzeşimleri. (Açıklamalar Şekil 10 ile aynıdır)

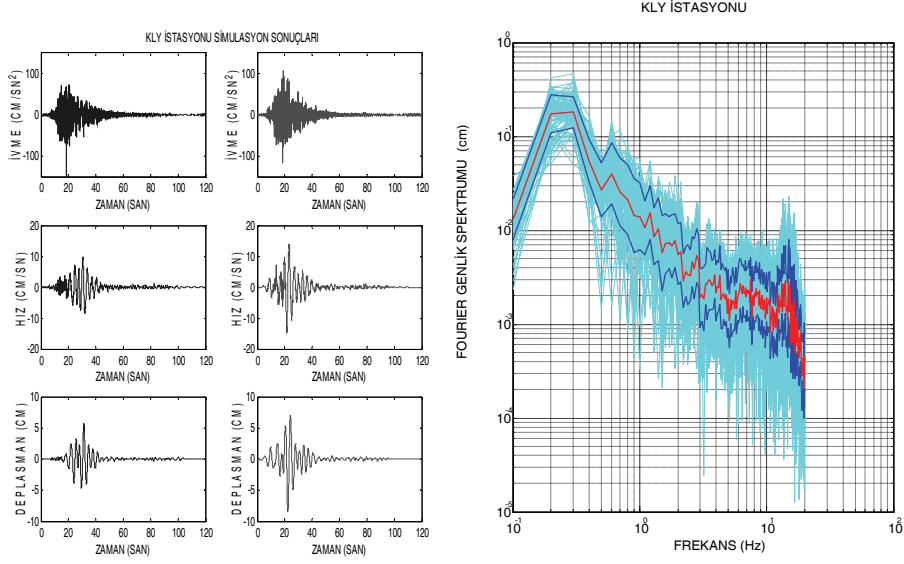
Prens Adaları Fayında Kuvvetli Yer Hareketi Benzeşimleri



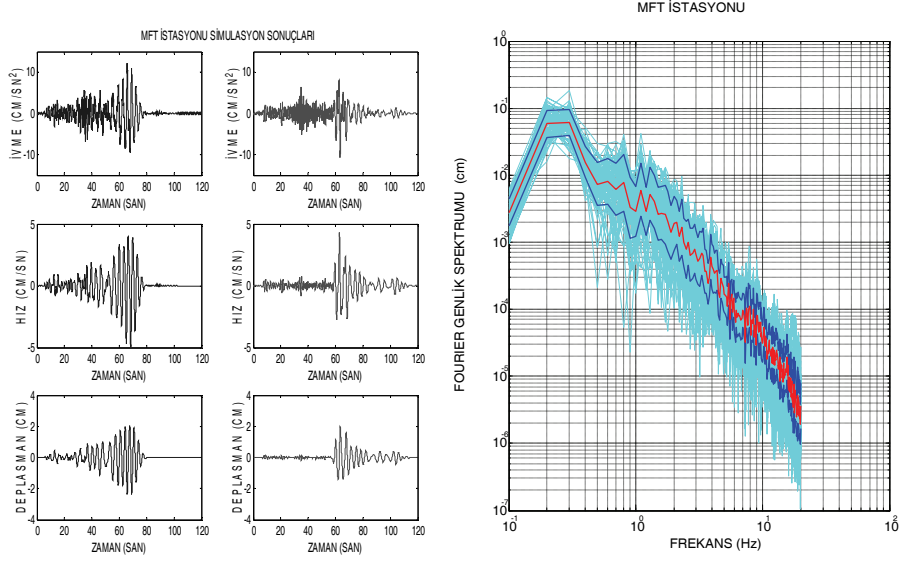
Şekil 12. GEM istasyonunda 100 farklı senaryo depremi sonucu elde edilen geniş bant deprem benzeşimleri. (Açıklamalar Şekil 10 ile aynıdır)



Şekil 13. ISK istasyonunda 100 farklı senaryo depremi sonucu elde edilen geniş bant deprem benzeşimleri. (Açıklamalar Şekil 10 ile aynıdır)

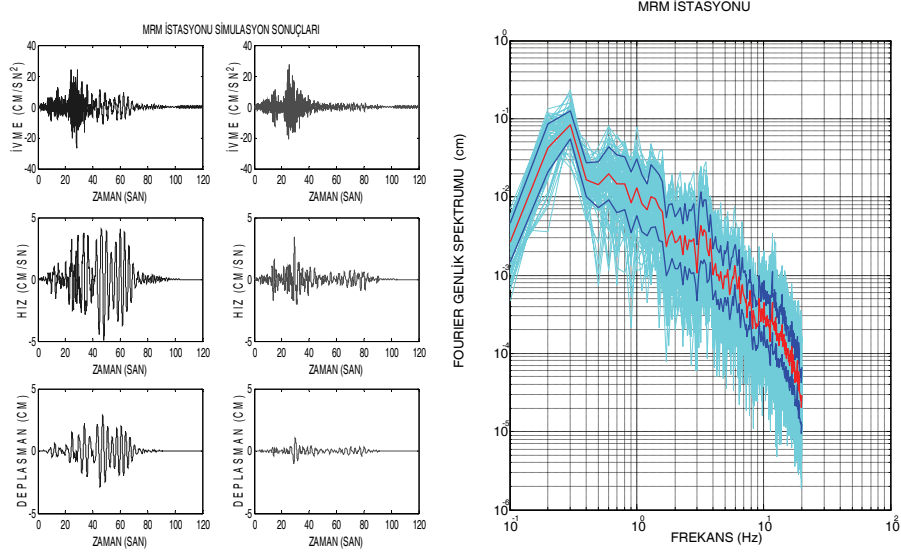


Şekil 14. KLY istasyonunda 100 farklı senaryo depremi sonucu elde edilen geniş bant deprem benzeşimleri. (Açıklamalar Şekil 10 ile aynıdır)

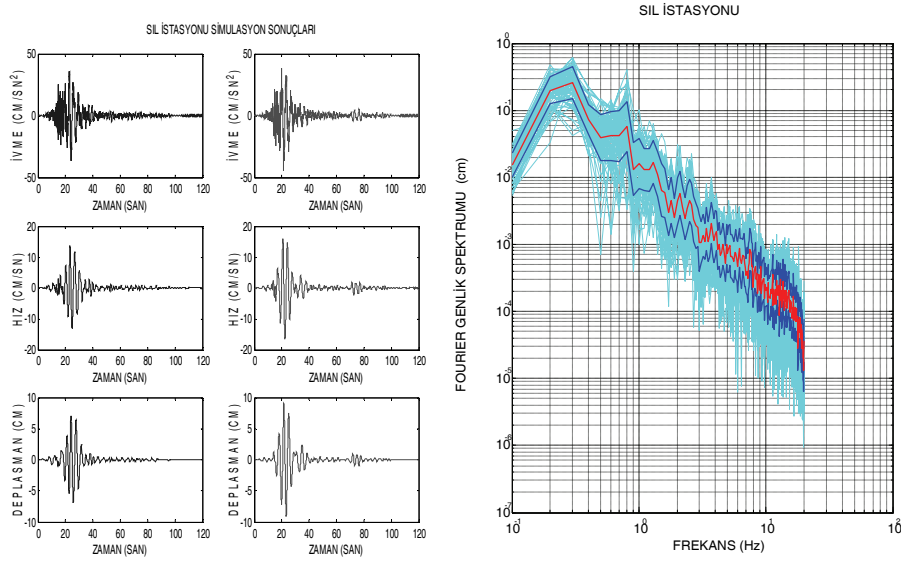


Şekil 15. MFT istasyonunda 100 farklı senaryo depremi sonucu elde edilen geniş bant deprem benzeşimleri. (Açıklamalar Şekil 10 ile aynıdır)

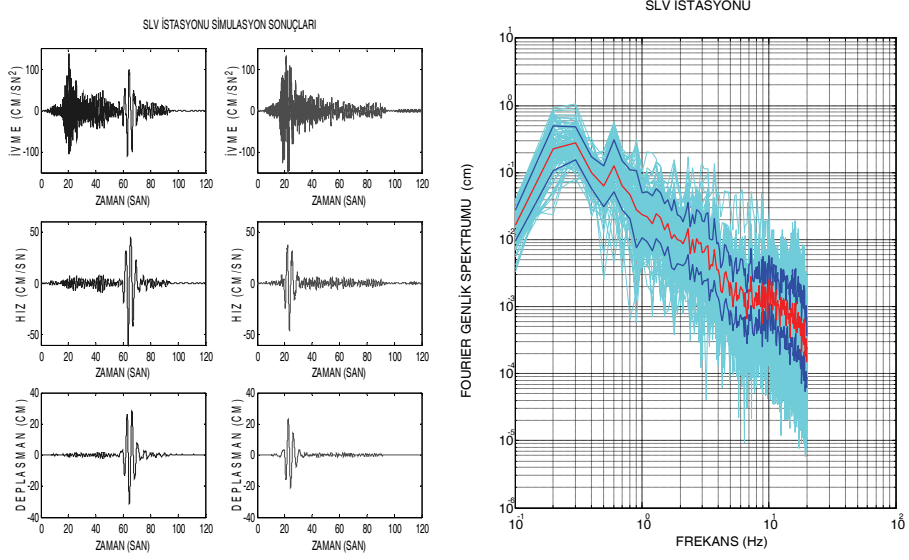
Prens Adaları Fayında Kuvvetli Yer Hareketi Benzeşimleri



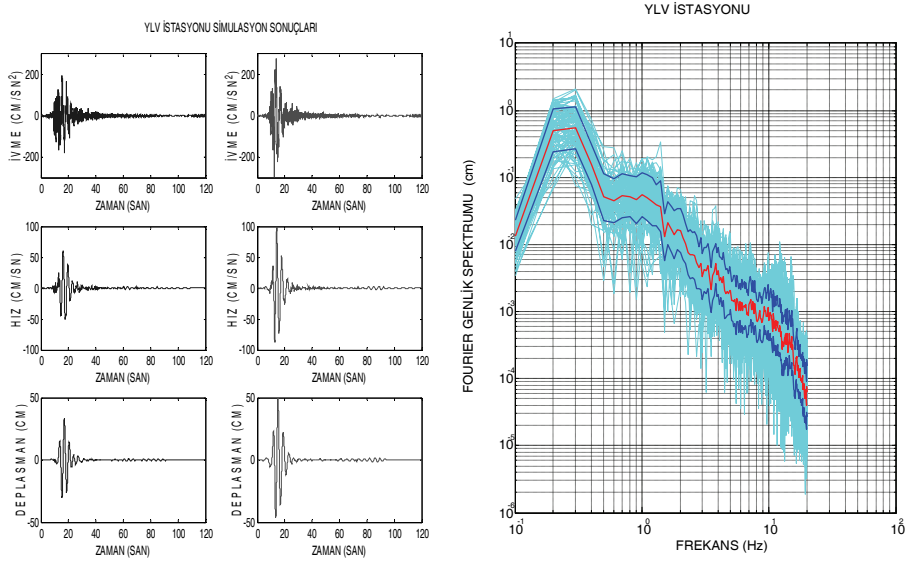
Şekil 16. MRM stasyonunda 100 farklı senaryo depremi sonucu elde edilen geniş bant deprem benzeşimleri. (Açıklamalar Şekil 10 ile aynıdır)



Şekil 17. SIL istasyonunda 100 farklı senaryo depremi sonucu elde edilen geniş bant deprem benzeşimleri. (Açıklamalar Şekil 10 ile aynıdır)



Şekil 18. SLV istasyonunda 100 farklı senaryo depremi sonucu elde edilen geniş bant deprem benzeşimleri. (Açıklamalar Şekil 10 ile aynıdır)



Şekil 19. YLV istasyonunda 100 farklı senaryo depremi sonucu elde edilen geniş bant deprem benzeşimleri. (Açıklamalar Şekil 10 ile aynıdır)

Teşekkür

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

Kaynaklar

- [1] Hutchings, L. And Wu, F., 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, 1990.
- [2] Fahjan, M. Y., Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY,2007) Tasarım İvme Spektrumuna Uygun Gerçek Deprem Kayıtlarının Seçilmesi ve Ölçeklenmesi, *İMO Teknik Dergi*, 292, 4423-4444, 2008.
- [3] Abrahamson, N. A., Non-stationary Spectral Matching Program RSPMATCH, PG&E Internal Report, 1998.
- [4] Erdik, M., Durukal, E., Siyahi, B., Fahjan, Y., Şeşetyan, K., Demircioğlu, M., Akman, H., Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Deprem Yer Hareketinin Belirlenmesi, Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, 26-30 Mayıs 2003.
- [5] Bommer, J. J., Acevedo, A. B., Douglas, J., The Selection and Scaling of Real Earthquake Accelograms for Use in Seismic Design and Assesment, *Proceedings of ACI International Conference on Seismic Bridge Design and Retrofit*, American Concrete Institute, 2003.
- [6] Naeim, F., Kelly, J. M., *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*, John Wiley & Sons, 1999.
- [7] Barka, A.A., Slip distribution along the North Anatolian Fault associated with large earthquakes of the period 1939 to 1967, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 86, 1238-1254.
- [8] Toksoz, M.N., A.F. Shakal, and A.J. Micheal, Space-time migration of earthquakes along the North Anatolian Fault and seismic gaps, *Pure Appl. Geophys*, 117, 1258-1270.
- [9] Pinar, A., Kuge, K., Honkuro, Y., Moment tensor inversion of recent small to moderate sized earthquakes: implications for seismic hazard and active tectonics beneath the Sea of Marmara. *Geophys. J. Int.*, 153, 133-145, 2003.
- [10] Hutchings, L., "Prediction" of Strong Ground Motion for the 1989 Loma Prieta Earthquake Using Empirical Green's Functions. *Bull, Seismol. Soc. Am*, 81, 88-121, 1991.
- [11] Hadley, D. M., Helmberger D. V., Simulation of Strong Ground Motions. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 70, 617-630, 1980.
- [12] Boore, D. M., Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiated Spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America* 73, 1865-1894, 1983.

- [13] Irikura, K., Semi-Empirical Estimation of Strong Ground Motions During Large Earthquakes. Bull. Disaster Prevention. Res. Inst Kyoto Univ. 33, 63–104, 1983.
- [14] Kramer S. T., Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Inc, 1996.
- [15] Hartzell, S. H., Earthquake Aftershocks as Green's Functions, Geophys.Res.Lett, 5, 1-4, 1978.
- [16] Wu, F., Prediction of Strong Ground Motion Using Small Earthquakes, Proceedings of the 2nd International Conference on Microzonation. Vol II San Francisco, 701-704, 1978.
- [17] Aki, K., Seismic Displacements Near a Fault, J. Geophys. Res., 73,5359-5376, 1968.
- [18] Bouchon, M. Aki, K., Discrete Wave-Number Representation of Seismic Wavefields, Bull. Seism.Soc. Am. 67, 259-277, 1977.
- [19] Brune, J.N., Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes, J. Geophys. Res.,75, 4997–5010, 1970, (Correction, J. Geophys. Res. 76 (20), 5002, 1971)
- [20] McGuire R. K., Hanks, T.C., RMS Acceleration and Spectral Amplitudes of Strong Ground Motion During the San Fernando, California Earthquake, Bull. Seism.Soc. Am. 70, 1907-1919, 1980.
- [21] Atkinson, G. M., Silva, W., Stochastic Modeling of California Ground Motions, , Bull. Seism.Soc. Am. 90, 255-274, 2000.
- [22] Boore, D. M., Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method, Pure appl. Geophys. 160, 635-676, 2003.
- [23] Beresnev, I., Atkinson, G., Modelling Finite Fault Radiation from the n Spectrum, Bull. Seism.Soc. Am. 87, 67-84,1997.
- [24] Tanırçan, G., İstanbul için 3 boyutlu hız modeli ile yer hareketi simülasyonu, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 27, No 1, 27-35, 2012.
- [25] Erdik M., Durukal, E., A Hybrid Procedure for the Assesment of Design Basis Earthquake Ground Motions for Near-Fault Conditions, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 21, 431-443, 2001.
- [26] Pulido N, Ojeda A, Atakan K, Kubo T., Strong Ground Motion Estimation in the Sea of Marmara Region (Turkey) Based on a Scenario Earthquake, Tectonophysics, 391:357–374, 2004.
- [27] Mathilde, B. S., Pulido, N., Atakan, K., Sensitivity of Ground Motion Simulations to Earthquake Source Parameters: A Case Study for İstanbul, Turkey, Bull. Seism.Soc. Am. 97, 881-900, 2007.
- [28] Ansal, A., Akıncı, A., Cultera, G., Erdik, M., Pessina, V., Tönük, G., Ameri, G., Loss Estimataion in İstanbul Based on Deterministic Earthquake Scenarios of The Marmara Sea Region (Turkey), Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29, 699-709, 2009.
- [29] Mert A., İstanbul İçin Tasarım Esaslı Kuvvetli Yer Hareketi Dalga Formlarının Zaman Ortamında Türetilmesi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.

- [30] Okay, I.A., Demirbağ, E., Kurt, H., Okay, N., Kuşçu, İ., An active, Deep Marine Strike-Slip Basin Along the North Anatolian Fault in Turkey, *Tectonics*, V: 18, No: 1, 129-147, 1999.
- [31] Okay, I.A., Kaşlılar Ö. A., İmren, C., Boztepe G. A., Demirbağ, E., Geometry of Active Faults and Strike Slip Basins in the Marmara Sea, Northwest Turkey: A Multichannel Seismic Reflection Study. NATO Advanced Research Seminar , May 14-17, 2000, Istanbul, Abstracts 20-21.
- [32] İmren C., Le Pichon, X., Rangin C., Demirbağ E., Ecevitoglu B., Görür N., The Anatolian fault within the Sea of Marmara: A new interpretation based on Multi channel seismic and multibeam bathymetry data, *Earth Planet Sci Letter*, 186, 143-158, 2001.
- [33] Le Pichon, X., Sengör, A.M.C., Demirbag, E., Rangin, C., Imren, C., Armijo, R., Görür, N., Cagatay, N., Mercier De Lepinay, B., Meyer, B., Saatçılar, R., Tok, B., The active main Marmara fault. *Earth Planet. Sci. Lett.* 192, 595–616, 2001.
- [34] Gökaşan, E., Alpar, B., Gazioğlu, C., Yücel, Z.Y., Tok, B., Doğan, E., Guneyesu, C., Active Tectonics of the Izmit Gulf (NE Marmara Sea): from High Resolution Seismic and Multi-Beam Bathymetry Data, *Mar Geol*, 175(1–4):271–294, 2001.
- [35] Armijo, R., Pondard, N., Meyer, B., Submarine Fault Scarps in the Sea of Marmara Pull-Apart North Anatolian Fault: Implications for Seismic Hazard in Istanbul, *Geochem Geophys Geosyst*, 6:Q06009:29., 2005.
- [36] Pınar, A., Kuge, K., Honkura, Y., Moment Inversion of Recent Small to Moderate Sized Earthquakes: Implications for Seismic Hazard and Active Tectonics Beneath the Sea of Marmara, *Geophys J Int*, 153:133–145, 2003.
- [37] Orgulu, G., Seismicity and Source Parameters for Small-Scale Earthquakes Along the Splays of the North Anatolian Fault (NAF) In the Marmara Sea, *Geophysical Journal International* 184, 385-404, 2011.
- [38] Carton, H., Singh, S.C., Hirn, A., Bazin, S., Voogd, B., Vigner, A., Ricolleau, A., Cetin, S., Oçakoğlu, N., Karakoç., Sevilgen, V., Seismic imaging of the three-dimensional architecture of the Çınarcık Basin along North Anatolian Fault, *Journal of Geophysical research*, Vol. 112, 2007.
- [39] Laigle, M., Becel, A., Voogd B., Hirn, A., Taymaz, T., Özalaybey, S., A first Deep Seismic Survey in the Sea of Marmara: Deep Basins and Whole Crust Architecture and Evolution, *Earth Planet. Sci. Lett.* 270, 168-179, 2008.
- [40] Becel, A., Laigle, M., Voogd, B., Hirn, A., Taymaz, T., Galve, A., Shimamura, H., Murai, Y., Lepine, J.C., Sapın, M., Özalaybey, S., Moho, Crustal Architecture and Deep Deformation Under the North Marmara Trough from the SEISMARMARA Leg 1 Offshore-Onshore Reflection-Refraction Survey, *Tectonophysics*, 467, 1-21, 2009.
- [41] Yılmaz Y, Gökaşan E, Erbay AA., Morphotectonic Development of the Marmara Region. *Tectonophysics* doi:10.1016/j.tecto.2009.05.012, 2009.
- [42] Oncel, A.O. & Wilson, T., Evaluation of earthquake potential along the Northern Anatolian Fault Zone in the Marmara Sea using comparisons of GPS strain and seismotectonics parameters. *Tectonophysics*., 418:205-218, 2006.

- [43] Hanks T.C. & Kanamori H. A moment magnitude scale. *J. Geophys. Res.*, 84, 2348-2350, 1979.
- [44] Wells D.L. & Coppersmith K.J., New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84: 974-1002, 1994.
- [45] Larsen S., E3D: 2D/3D Elastic Finite-Difference Wave Propagation Code, 1995.
- [46] Karabulut H., Özalaybey S., Taymaz T., Aktar M., Selvi O., Kocaoğlu A., A Tomographic Image of the Shallow Crustal Structure in The Eastern Marmara, *Geophys. Res. Lett.*, 30(24, 2777), 2003.
- [47] Hutchings, L., Program NetMoment, a Simultaneous calculation of Moment, Source Corner Frequency, and Site Specific t^* from Network Recordings, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, UCRL-ID 135693, 2001.
- [48] Hutchings, L., Ioannidou, E., Kalogeras, I., Voulgaris, N., Savy, J., Foxall, W., Scognamiglio, L., Stavrakakis, G., A Physically-Based Strong Ground-Motion Prediction Methodology; Application to PSHA and the 1999 M=6.0 Athens Earthquake. *Geophys. J. Int.*, 168, 569–680, 2007.
- [49] Akıncı, A., Malagnini, L., Herrmann, R. B., Gok, R., Sorensen, M. B., Ground Motion Scaling in the Marmara Region, Turkey, *Geophys. J. Int.* 166, 635-651, 2006.
- [50] Lama, R.D. and Vutukuri, V.S., Handbook on Mechanical Properties of Rocks, Volume II: Testing Techniques and Results, Trans Tech. Publications, 1978, 245 pp., *J. Phys. Earth.* 42, 377–397, 1978.
- [51] Prejean, S.G., Ellsworth, W.L., Observations of Earthquake Source Parameters and Attenuation at 2 km Depth in the Long Valley Caldera, Eastern California, *Bull. Seismol. Soc. Am.* ,91, 165–177, 2001.
- [52] Scognamiglio L., Hutchings, L, A test of a Physically-based strong ground motion prediction methodology with the 26 September 1997, Mw=6.0 Colfiorito (Umbria-Marche Sequence), Italy earthquake, *Tectonophysics*, 476:145-158, 2009.
- [53] Kostrov, B.V. and S. Das., Principles of earthquake source mechanics. In: Cambridge Monographs on Mechanics and Applied Mathematics, Cambridge University Press, Cambridge, 1988.
- [54] Irikura, K. and K. Kamae: Estimation of strong ground motion in broad-frequency band based on a seismic source scaling model and an empirical Green's function technique, *Annali Di Geofisica*, Vol. XXXVII, N.6, 1721-1743, 1994.
- [55] Beresnev, I. A. and G. M. Atkinson., Modeling finite-fault radiation from the wn spectrum, *Bulletin of the Seismological Society of America* 87: 67-84, 1997.
- [56] Kamae, K., Irikura, K. ve Pitarka, A., “A Technique for Simulating Strong Ground motion using Hybrid Green's Function”, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Cilt 88, No 2, 357-367, 1998.
- [57] Hartzell, S., S. Harmsen, A. Frankel, and S. Larsen., Calculation of broadband time histories of ground motion: comparison of methods and validation using strong-ground motion from the 1994 Northridge earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.* 89: 1484–1504, 1999.

- [58] Pitarka A., Somerville P., Fukushima Y., Uetake T., ve Irikura,K., “Simulation of Near-Fault Strong-Ground Motion Using Hybrid Green's Functions” Bull. Seism. Soc. Am. Cilt 90, 566-586, 2000.
- [59] Pulido N., Ojeda, A., Kuvvet A. ve Kubo, T.,“Strong Ground Motion Estimation in the Sea Region (Turkey) Based on a Scenario Earthquake”, Tectonophysics, Cilt 391, 357-374, 2004.
- [60] Graves, R. W., and A. Pitarka., Broadband time history simulation using a hybrid approach, Proc. 13th World Conf. Earthq. Eng., Vancouver, Canada, paper no. 1098, 2004.
- [61] Mena, B., E. Durukal, and M. Erdik. Effectiveness of hybrid Green’sfunction method in the simulation of near-field strong motion: An application to the 2004 Parkfield earthquake, Bull. Seismol. Soc.Am. 96, 183–205, 2006.
- [62] Pulido, N., and M. Matsuoka. Broadband Strong Motion Simulation of the 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake: Source and Site Effects. Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble, France, 1, 657-666, 2006.
- [63] Liu, P., R. Archuleta, and S. H. Hartzell., Prediction of broadband ground motion time histories: Frequency method with correlation random source parameters, Bull. Seismol. Soc. Am. 96, 2118–2130, 2006.
- [64] Rodgers, A. J., E. Matzel, M. Pasyanos, A. Petersson, B. Sjogreen, C. Bono, O. Vorobiev, T. Antoun, and W. Walter (2008). Seismic simulations using parallel computing and three dimensional Earth models to improve nuclear explosion phenomenology and monitoring, 30th Monitoring Research Review, Portsmouth, Virginia, 23–25 September 2008.
- [65] Mai, P. M., J. Ripperger, J.-P. Ampuero, and J.-P. Hillers (2006). Frontiers in source modeling for near-source ground-motion prediction, in Proc. of the 3rd Int. Symp. on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble, France, 30 August–1 September 97–114, 2006.
- [66] Aki, K., Richards, P.G., Quantitative Seismology, Theory and Methods, Volumes I and II, W. H. Freeman, New York, 1980.
- [67] Abrahamson, N. A., and W. J. Silva., Summary of the Abrahamson and Silva NGA ground motion relations, Earthq. Spectra 24, no. S1,67–97, 2008.
- [68] Boore, D. M., and G. M. Atkinson., 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, 99–113, 2008.
- [69] Campbell, K. W., and 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, 139-171, 2008.
- [70] Erdik, M., Durukal, E., Şeşetyan, K., İstanbul için kuvvetli yer hareketi Benzeşimi ve yakın saha bölgelerindeki deprem hareketleri özelliklerinin belirlenmesi, Proje Raporu, Proje No:103I050, İstanbul, 2008.