

PRENS ADALARI FAYINDAKİ DEPREMLERİN KAYNAK PARAMETRELERİNİN EŞZAMANLI VE TEKİL TERS ÇÖZÜM TEKNİKLERİ İLE BELİRLENMESİ

DETERMINATION OF EARTHQUAKE SOURCE PARAMETERS OF PRINCE ISLANDS FAULT USING SIMULTANEOUS AND INDIVIDUAL INVERSION TECHNIQUES

Aydın MERT ^{1*}, Ali PINAR ², Yasin M. FAHJAN ³,
Lawrance J. HUTCHINGS ⁴

^{1*} B.Ü. Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Çengelköy, İstanbul

² İ.Ü. Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 34320 Avcılar, İstanbul

³ GYTE Deprem ve Yapı Bilimleri ABD, 41400 Gebze, Kocaeli

⁴ LBNL Earth and Environmental Sciences One Cyclotron Road 94720 Berkeley, California, USA

Yayına Geliş (Recieved): 22.04.10, Yayına Kabul (Accepted): 11.11.10

ÖZ : Bu çalışmada, 1999 depremlerinin ardından Prens Adaları fayı olarak bilinen Kuzey Anadolu Fay Zonunun İstanbul'a en yakın olarak geçtiği yaklaşık 40 km uzunluğundaki fay segmenti üzerinde meydana gelmiş, sismik moment büyüklüğü ($3.1 \leq M \leq 5.2$) arasında değişen artçı depremlerden fay düzlemi çözümleri mevcut olanların, geniş bant istasyon kayıtları derlenmiş ve radial ile transversal bileşenlerine ayrılarak geometrik saçılma ve yayınım yolu (radiation pattern) etkileri giderilmiştir. Hutchings (2004) tarafından geliştirilen, yerel ağlarla kaydedilmiş depremlerin S fazlarını kullanan eş zamanlı (simultane) ters çözüm yöntemi (NetMoment, Hutchings, 2004) ile depremlerin kaynak parametreleri (Moment, M_0 , Kesme Frekansı, f_c) belirlenmiştir. Bu yöntem aynı zamanda tek bir istasyonda kaydedilmiş depremlerin kaynak parametrelerinin hesaplanmasına olanak sağlamaktadır. Bu amaçla kaydedilmiş depremlerin düzeltilmiş S dalgası yerdeğiştirme spektrumu, Brune omega kare (w^2) kaynak yer değiştirme spektrumuna (Brune, 1970) doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemi kullanılarak eşleştirilmiş ve en iyi uyumu veren teorik spektrum belirlenerek çözüm parametreleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deprem kaynak parametreleri, tekil ve eşzamanlı ters çözüm, Prens Adaları Fayı

ABSTRACT : In this study we analyzed the aftershocks of the 1999 Izmit earthquake that took place along the 40-km-long Prince's island segment of the North Anatolian Fault which is the nearest trace of the fault to the city of Istanbul. The seismic moment magnitudes of these events range between $3.1 \leq M_w \leq 5.2$ and the focal mechanism solutions are available. We compiled the waveforms of the broadband stations running in the region, rotated them to obtain the radial and transversal components, and corrected for the radiation pattern and geometrical spreading effects. We estimated the source parameters (seismic moment, M_0 ; corner frequency, f_c) using the simultaneous inversion technique (NetMoment) developed by Hutchings (2004) that use the S-phases of the events recorded by local seismic networks. This method can also be used to derive the source parameters of earthquakes recorded at single station. The resulting parameters are estimated from the best fitting theoretical spectrum which is obtained through non-linear least square fitting of the observed S-wave displacement spectrum to the Brune omega squared (w^2) source displacement spectrum (Brune, 1970).

Key Words: Earthquake source parameters, individual and simultaneous inversion, Prince Island Fault.

GİRİŞ

17 Ağustos 1999 İzmit depremi ($M_w=7.4$) ve bu depremlerle oluşan yüzey kırığının doğu ucundan itibaren Düzce'ye kadar olan segmentin kırılmasına neden olan 12 Kasım 1999 Düzce ($M_w=7.2$) depremi araştırmacıların ilgisini Marmara denizi ve Kuzey Anadolu fayının batı ucuna çekmiştir. Bunun en önemli sebeplerinden biri bu iki depremin 1939 yılında Erzincan depremiyle ($M_w=7.9$) başlayan ve kuzey Anadolu fayı boyunca batıya doğru göç eden 7 tane büyük deprem dizisinin sonuncuları olmalarıdır (Parsons ve diğ., 2000). Batı'da 1912 Şarköy-Mürefte depremi ($M_s=7.4$) ve doğu'da 1999 İzmit depremi göz önüne alındığında bütün Marmara denizi büyük bir sismik boşluk olarak karşımıza çıkmaktadır (Pinar ve diğ., 2003). Marmara Bölgesi ve özellikle İstanbul'u etkileyecek olan büyük bir depremin meydana gelme olasılığı, depremlerin birbirleriyle etkileşimi de göz önüne alınarak yapılan hesaplamalarda (Coulomb gerilme modellemeleri) 30 yıl içinde %62 olarak hesaplanmaktadır (Parsons ve diğ., 2000). Bu bakımdan Kuzey Anadolu fayının batı ucunu oluşturan Marmara denizi faylarının gerilme dağılımlarının, deprem kaynak parametrelerinin (Moment, M_0 , Köşe Frekansı, f_c) ve bunlara bağlı ölçeklendirme ilişkilerinin (scaling relations) belirlenmesi önemli bir konu haline gelmiştir. Literatürde, son yıllarda, bu konuyla ilgili dünyanın farklı bölgeleri için yapılmış pek çok çalışma mevcuttur (Parolai S. ve diğ., 2007).

Deprem kaynaklarının köşe frekanslarını ve sismik momentlerini doğru olarak hesaplamak son derece önemlidir, çünkü bu parametrelerin farklı kullanım alanları mevcuttur. Özellikle, büyük depremlerle küçük depremler arasındaki ölçeklendirme ilişkilerinin (scaling relationships) belirlenmesi, gerilme düşümü ve sismik moment arasındaki doğrusal ilişkinin hesaplanması deprem tehlike analizleri açısından son derece önemlidir. Aynı zamanda büyük depremlerde oluşabilecek yer hareketinin tahmin edilmesine yönelik deprem benzeşim (earthquake simulation) çalışmalarında, özellikle Ampirik Green fonksiyonları kullanan deprem benzeşim algoritmalarında deprem kaynak parametrelerinin belirlenmesi son derece önemlidir (Gök ve diğ., 2009). Ancak uygulamada özellikle küçük depremlerin kaynak köşe frekanslarının ve sismik momentlerinin doğru olarak belirlenmesinde ciddi sıkıntılar mevcuttur. Kaynak köşe frekansının hesaplanmasındaki en temel problem yerel zemin koşullarının (site response) ve yüzeye yakın yayılma yolu etkilerinin (near surface propagation path effect) deprem spektrumunu depremin kaynak köşe frekansının olması muhtemel bölgelerinde etkileyerek yanlış sonuçlar elde edilmesine sebep olmasıdır. Bununla birlikte kültürel gürültü dediğimiz insan kaynaklı gürültüler ya da doğada var olan belirli gürültü kaynakları, elde edilen deprem kayıtlarının yaklaşık 0.5

Hz civarında bant sınırlı hale gelmesine ve dolayısıyla uzun periyot spektral seviyelerinin belirlenememesine yada yanlış belirlenmesine ve bunun sonucu olarak depremlerin sismik momentlerinin hesaplanmasında sorunlara yol açabilmektedir (Bonilla ve diğ., 1997; Jarpe ve Kasamayer, 1996). Hanks Güney California bölgesinde kaydedilmiş depremler ile yaptığı bir çalışmada (Hanks ve diğ., 1982) sismik momentleri $1.0E+21$ dyn-cm nin altındaki küçük depremlerde yaklaşık 10 Hz civarında görünür sabit köşe frekansı (apparent constant corner frequency) (f_{max}) olduğunu, bu sismik momentten daha büyük depremlerde de yine 10 Hz civarında görünür ikinci bir yüksek spektral köşe frekansının olduğunu gözlemlemiştir. Bu konu ile ilgili olarak daha sonra yapılan pek çok çalışmada da farklı araştırmacılar farklı bölgelerde benzer sonuçlar elde etmiş ve bu durumu, depremin odak merkezi ile kayıt istasyonu arasındaki yayılma yolu boyunca yada, yerel zemin koşulları sonucu oluşan sönümleme (attenuation) veya büyümeye (amplification) ye bağlı olarak açıklamışlardır (Anderson ve Hough, 1984; Hutchings ve Wu, 1990; Abercombie, 1995).

Bu çalışmada, 1999 depremlerinin ardından Prens Adaları fayı olarak bilinen Kuzey Anadolu Fay Zonunun İstanbul'a en yakın olarak geçtiği yaklaşık 40 km uzunluğundaki fay segmenti (İmren ve Diğ., 2001) üzerinde meydana gelmiş, sismik moment magnitüdleri ($3.1 \leq M_w \leq 5.2$) arasında değişen artçı depremler kullanılmıştır. Bu kayıtlar ile Hutchings tarafından geliştirilen ve yerel ağlar tarafından kaydedilmiş depremlerin S fazlarını kullanan eş zamanlı (simultane) ters çözüm yöntemi (NetMoment, Hutchings, 2004) kullanılarak, depremlerin kaynak parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen kaynak parametreleri bilgileri kullanılarak kaynaktaki gerilme düşümü ortaya çıkan enerji gibi parametreleri hesaplamak mümkündür. Kaynak parametreleri hesaplanmasında yayılım geometrisi (radiation pattern) düzeltilmesi sonuçlara etki eden önemli faktörlerden biridir. Bu düzeltmeler literatürde genellikle ortalama bir değer alınarak yapılmasına karşın bu çalışmada Pinar vd. (2003) te verilen faylanma mekanizması değerleri kullanılarak yapılmıştır. Bundan sonraki çalışmalarımızda Marmara bölgesinde 1999 yılından sonra meydana gelen irili ufaklı depremler ve bu depremleri kaydeden bütün istasyonlar kullanılarak depremlerin kaynak parametreleri belirlenecek ve bunlar arasındaki ilişkiler incelenecektir. 1999 yılından sonra meydana gelen küçük depremlerin faylanma mekanizmalarını belirleme çalışmamız halen devam ettiğinden bu depremler bu çalışmada yer almaktadır. Ayrıca ileride Ampirik Green fonksiyonları yöntemleri kullanılarak bu fay zonunda yapılacak olan deprem benzeşim çalışmaları için bir veri tabanı oluşturulması amaçlanmaktadır.

VERİ ANALİZİ

Verilerin seçilmesi ve hazırlanması

1999 Marmara depremlerinin hemen ardından bu bölgede yerli ve yabancı araştırmacılardan oluşan pek çok farklı grup sismoloji biliminin çok çeşitli konularında araştırmalar yapmış ve bu araştırmalar sırasında pek çok farklı sismometre yada ivme ölçerlerden oluşan kayıtçı ağları kullanmışlardır. Bu ağlar tarafından kaydedilmiş deprem verilerinin bir kısmı elde edilmiş ancak bir kısmına ulaşılamamıştır. Elde edilen verilerde karşılaşılan en önemli güçlük bu verilerin alet etkilerinin giderilebilmesi için sismograf sisteminde kullanılan sismometre ve/veya kayıtçı ünitelerinin tepki fonksiyonlarının bulunamamasıdır.

Karşılaşılan bir diğer problem ise, özellikle geçici süreler için yerleştirilmiş ağlarda, kayıtçıların yerleştirildiği alanlardaki yerel zemin etkilerinin bu çalışmada kabul edilebilecek üst sınırın (literatürde genel olarak üst sınır 2 olarak alınır) çok üzerinde değerlere ulaşmasıdır. Yerel zemin etkileri depremlerin kaynak köşe frekansı ve sismik moment

hesaplamalarında çok önemli bir faktör olduğundan hesaplamalarda önemli hatalara sebep olabilmektedirler.

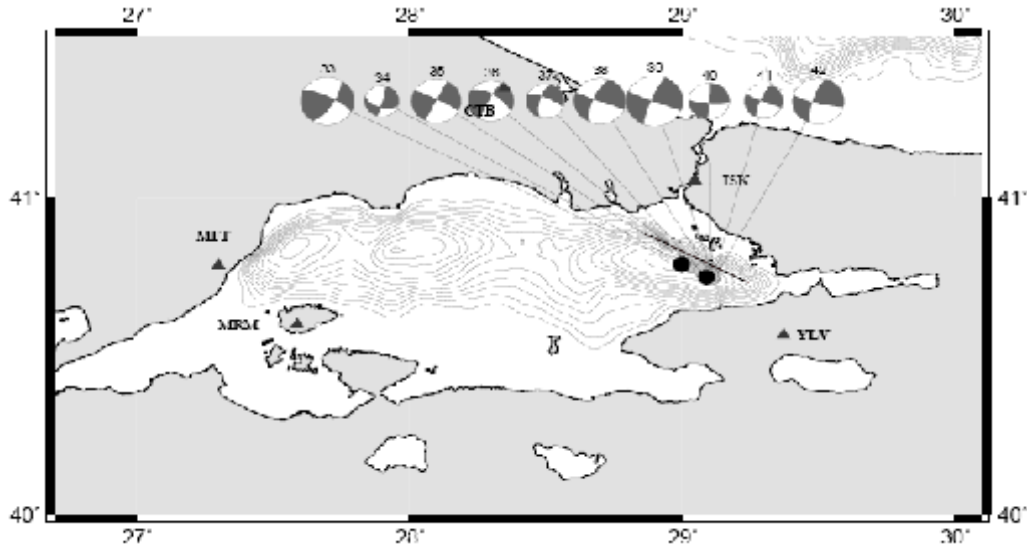
Verilerin derlenmesi sırasında ivme ölçer ağlarında karşılaşılan bir diğer problem ise kayıt başlangıç ve sonlanma sürelerinin kısa seçilmesi nedeni ile P fazı gelişleri ya da S fazı kayıt sürelerinin yeteri kadar uzun olmaması ya da ortamdaki gürültü seviyesinin yüksekliği sebebiyle kayıt kalitesinin düşmesidir.

Bununla birlikte, 1999 Marmara depremleri öncesinde Marmara denizinin etrafında B.Ü. Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü tarafından yerleştirilmiş beş adet üç bileşen geniş bant sismometre den oluşan bir ağ mevcuttur (Tablo 1). Bu ağ tarafından kaydedilen verilerin elde edilmesi, derlenmesi, alet tepki fonksiyonlarının giderilmesi gibi verilerin analize hazırlanma işlemlerinin daha hızlı ve güvenilir olarak elde edilmesi kolay ve pratik olduğundan analizlerde bu sismometre ağı tarafından kaydedilen deprem verilerinin kullanılmasına önem verilmiştir (Şekil 1).

Tablo 1: Analizlerde kullanılan deprem istasyonları.

Table 1: Earthquake recording stations that are used in the analyses

İstasyon No	İstasyon Kodu	Enlem (N)	Boylam (E)	Sismograf Tipi
1	CTT	41.15	28.43	GÜRALP CMG-40T
2	ISK	41.07	29.06	GÜRALP CMG-40T
3	MFT	40.79	27.28	GÜRALP CMG-40T
4	MRM	40.60	27.58	GÜRALP CMG-40T
5	YLV	40.57	29.37	GÜRALP CMG-40T



Şekil 1: Analizlerde kullanılan odak mekanizma çözümleri Moment Tensor Inversion metodu ile belirlenmiş 10 adet depremin dağılımı ve kaydedildikleri geniş bant deprem istasyonların yerleri .

Figure 1: Distribution of recording station and ten earthquakes that are used in the analysis. Earthquake focal mechanism calculated by moment tensor inversion

Analizlerde kullanılacak verilerin seçilmesi ile ilgili olarak bir diğer önemli husus, kullanılacak depremlere ait güvenilir deprem odak mekanizması çözümlerinin elde edilmiş olmasıdır. Bu çalışmada Prens adaları fayı boyunca oluşmuş ve yukarıda bahsi geçen genişbantlı

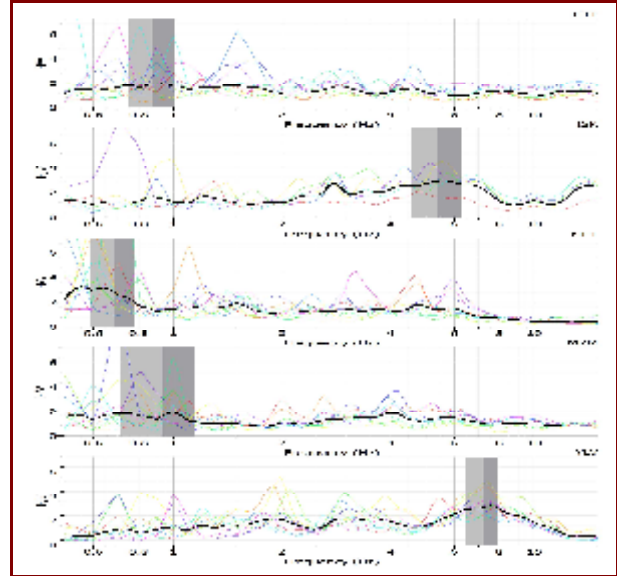
sismometre ağındaki beş istasyon tarafından kaydedilmiş (Tablo 1), odak mekanizması çözümleri moment tensor inversion yöntemi ile elde edilmiş (Pinar ve diğ., 2003) moment büyüklükleri ($3.1 \leq M_w \leq 5.2$) arasında değişen depremler kullanılmıştır (Tablo 2).

Tablo 2: Analizlerde kullanılan depremler ve odak mekanizması çözümleri. Depremlerin yerleri ve faylanma mekanizması çözümleri Şekil 1’de gösterilmektedir.

Table 2: Earthquakes and their focal mechanism that are used in the analysis. Earthquake location and fault mechanism solution demonstrated in figure 1.

No	Oluş Tarihi	Oluş Zamanı	Enlem (N)	Boylam (E)	Derinlik (Km)	Mw	Strike	Dip	Rake	İstasyon sayısı
1(33)	20.10.1999	23:08	40.79	29.00	8	4.9	32	71	16	5
2(34)	17.08.1999	06:20	40.78	29.03	16	3.1	108	54	-175	1
3(35)	17.08.1999	05:54	40.79	29.04	11	4.5	207	89	-7	1
4(36)	17.08.1999	01:48	40.77	29.07	11	4.2	208	82	-27	1
5(37)	18.08.1999	00:45	40.75	29.09	5	3.5	196	66	-18	5
6(38)	17.08.1999	01:31	40.75	29.11	11	4.7	202	68	1	1
7(39)	17.08.1999	01:33	40.76	29.11	11	5.2	112	88	170	1
8(40)	17.08.1999	04:18	40.76	29.11	15	3.7	95	79	-177	1
9(41)	17.08.1999	02:09	40.76	29.12	11	3.5	204	76	2	1
10(42)	17.08.1999	04:14	40.76	29.13	13	4.7	105	82	163	1

Analizlere başlamadan önce son olarak, istasyonların yerleştirildiği noktadaki yerel zemin koşullarının değerlendirilmesi amacıyla mikrotremor verileri ile yatay/düşey spektral oran (HVSR) tekniği kullanılarak istasyonların buldukları çevresel etkiler ve yerel zemin koşulları değerlendirilmiş ve hangi istasyonların analizlerde kullanılabileceği belirlenmeye çalışılmıştır. (Şekil 2). Spektral oran tekniği temel olarak düşey bileşen kayıtlarının yatay bileşenlere nazaran yerel zemin koşullarından etkilenmediği ya da en az etkilendiği varsayımına dayalı olarak geliştirilmiş bir yöntemdir. Literatürde bu yöntemin güvenilirliğini sorgulayan pek çok yayın olmasına rağmen, yerel zemin koşulları hakkında çok kolay ve hızlı bir şekilde fikir vermesi sebebiyle bu tür çalışmalarda son derece sık kullanılan bir yöntemdir. Literatürde genel olarak Spektral oran genlikleri 2 yi geçmeyen (Franceschina ve diğ., 2006) istasyonların verileri güvenilir kabul edildiğinden bu çalışmada da 2 güvenilir oran olarak kabul edilmiştir.



Şekil 2: HVSR tekniği kullanılarak yerel zemin koşullarının değerlendirilmesi. Bu kapsamda Nakamura (1989) tekniği 3-bileşenli geniş-bant verilerine uygulanarak deprem istasyonlarının bulunduğu yerin zemin hakim frekansları belirlenmiştir. Analizler için Geopsy programı kullanılmıştır.

Figure 2: Evaluation of local site conditions using by HVSR technique developed by Nakamura (1989). In order to evaluate soil conditions for all earthquake recording stations resonance frequencies was calculated using by three component earthquake records and geopsy software.

KAYNAK PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ İLE İLGİLİ METODOLOJİ

Deprem kaynak parametrelerinin (M_o , f_c) hesaplanması ile ilgili çalışmalarda genel olarak doğrudan gelen S dalgalarının yatay bileşenleri kullanılır (Franceschina ve diğ., 2006) ve sonuçların güvenilirliği genellikle kaynak istasyon azimutlarının dağılımına, mesafesine (sönümleme parametreleri) ve yerel zemin koşulları etkilerine bağlı olarak değişiklikler göstermektedir. Bu çalışmada deprem kaynak parametrelerinin hesaplanmasında LBNL, Berkeley, ABD’de geliştirilen algoritma (NetMoment) kullanılmıştır (Hutchings., 2004). Kullanılan ters çözüm algoritması genel olarak herhangi bir deprem için düzeltilmiş uzun periyot spektral seviyelerin ve kaynak köşe frekanslarının depremin kaydedildiği her istasyonda aynı olması gerektiği ve spektrumdaki farklılıkların yayılım yolu boyunca oluşan sönümleme (attenuation) ile birlikte yerel zemin koşullarından kaynaklandığı hipotezine dayanmaktadır. Eğer kullanılan deprem sadece bir istasyonda kaydedilmiş ise tek istasyon ile ters çözüm (individual inversion), eğer deprem birden çok istasyon tarafından kaydedilmiş ise bütün istasyonların kullanıldığı çok istasyon ile eş zamanlı ters çözüm (simultaneous inversion) yapılabilmektedir.

Kullanılan algoritma, eğer bütün yayılma boyunca meydana gelen sönümleme (t_r^* whole path kappa) daha önce bölge ile ilgili yapılmış çalışmalardan belirlenebiliyorsa deprem spektrumunu bütün yayılma boyunca meydana gelen sönümlemeye göre normalize edilerek kayıt istasyonunun yerel koşullarına bağlı sönümlemeye (t_g^* site specific kappa) göre ters çözüm yoluyla belirlemektedir. Yada, bu çalışmada da kullanıldığı gibi, analiz edilen depremler küçük bir alanda aynı fay segmenti boyunca birbirine çok yakın yerlerde meydana gelmişse ve yerel bir sismometre ağı tarafından kaydedilmiş ise t_r^* ve t_g^* içeren tek bir t^* değeri kullanarak ters çözüm yapılabilir. Ancak bu iki durumda Marmara bölgesi gibi oldukça heterojen bir yapıya sahip alanlarda t_r^* in istasyondan istasyona farklılıklar göstermesinden ötürü kaynak köşe frekanslarının hesaplanmasında sorunlara sebep olabilir. Yerel zemin koşullarının tepki fonksiyonu (site response) bilindiğinde bu etkiler giderebilir ancak bilinmediği durumlarda bu etkiler sonuçlarda saçılmalara sebep olabilir.

Kaynak parametreleri çözümüne başlamadan önce deprem kaydının spektrumu Aki ve Richards (1980) sismik moment denklemi kullanılarak, yayılma (radiation pattern) etkisi ve geometrik saçılmadan (geometrical spreading) kaynaklanan etkilerden arındırılarak, yüksek periyot asimptotu depremin sismik momentini temsil edecek şekilde ölçeklendirilir (Aki and Richards (1980).

$$\Omega(f)_i = \frac{4\pi\rho_x^{1/2}\rho_z^{1/2}\beta_x^{1/2}\beta_z^{5/2}}{S^S F^S R^a} U(f)$$

Burada, $U(f)$ kaydedilmiş depremin yerdeğiştirme spektrumu, R^a , geometrik saçılma düzeltmesini, ρ_x istasyonun bulunduğu ortamın yoğunluğunu, ρ_z deprem kaynağının bulunduğu ortamın yoğunluğunu, aynı şekilde β_x istasyonun bulunduğu ortamın β_z deprem kaynağının bulunduğu ortamın S dalgası hızını temsil etmektedir. S , serbest yüzey düzeltme katsayısı F , odak mekanizması ile ilgili düzeltme katsayısını temsil eder. Daha sonra lineer olmayan en küçük kareler yöntemi kullanılarak kaydedilmiş depremin düzeltilmiş S dalgası yer değiştirme spektrumu Brune (1970) yer değiştirme spektral şekline, sönüm parametresine bağlı olarak, uydurularak çözüm parametreleri (M_o , f_c , t^*) elde edilir. Brune spektral şekline benzeşim sağlanan düzeltilmiş yer değiştirme spektrumu;

$$\Omega(f) = \frac{M_o \exp(-\pi ft^*)}{\left[1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right]}$$

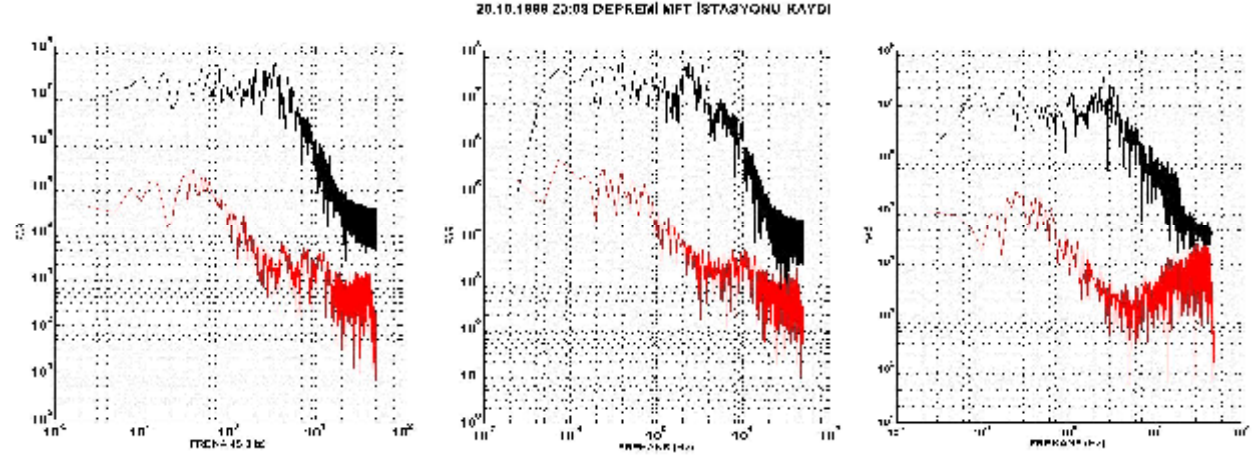
Burada M_o moment, f frekans, f_c kaynak köşe frekansı t^* ise herhangi bir kayıt istasyonu için sönüm parametresidir. Simplex algoritması kullanılarak (Caceci and Cacheris, 1984; Nelder and Mead, 1965; Numerical Recipes, 1998, Chapter 10.4) bir başlangıç modelinden başlayarak iterasyon ile çözüm parametrelerinin (M_o , f_c , t^*) en iyi uyumu verdiği kombinasyon elde edilmeye çalışılır.

ANALİZ

Analiz için seçilen on depremin sekiz tanesi yalnızca bir genişband sismometre istasyonu (ISK) tarafından kaydedilmiş, diğer iki deprem ise beş istasyon tarafından kaydedilmiştir. İstasyon sayısının fazla olması ve azimutal dağılımın iyi olması sonuçları olumlu yönde etkilemektedir. Seçilen veriler öncelikle SAC formatına çevrilmiş ve alet etkileri giderilerek hız kayıtlarının birimlerinin m/s olması sağlanmıştır. Daha sonra SAC dosyasının başlık (header) bilgisi kullanılan yazılımının gerektirdiği biçimde değiştirilmiştir. Yerel zemin koşulları bilindiğinde spektrumu bu etkilerden arındırabilmek mümkündür. Ancak, yukarıda da belirtildiği gibi istasyonların bulunduğu bölgeye ait yerel zemin etkileri bilinemediğinden analizlere başlamadan önce Spektral oran (HVSR) tekniği kullanılarak (Şekil 2) yerel zemin koşullarının spektrumu nasıl değiştirebileceği gözlenmeye çalışılmıştır. Analizlerde kullanılan 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 hesaplanmıştır. 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 20.10.1999 23:08 depreminin Mürefte (MFT) istasyonu kaydı kullanıldığında Brune teorik spektrumu ile kaydedilen depremin kaynak yer değiştirme spektrumu 0.15 Hz ile 25 Hz arasında birbirleriyle eşleştirilmiştir (Şekil 3). Kaydedilen depremin kaynak yer değiştirme spektrumu ile Brune kaynak spektrumu en küçük kareler algoritmasını kullanan ters çözüm tekniği ile eşleştirilerek kaynak parametreleri hesaplanmıştır.



Şekil 3: 201099_2308 depreminin Mürefte (MFT) istasyonundaki sinyal gürültü oranı (Altta spektrum çizgileri gürültü kayıtlarından üstteki spektrum çizgileri ise S dalgasından hesaplanmıştır), FAS: Fourier Amplitude Spectrum

Figure 3: Signal to noise ratio for 201099_2308 earthquake in Murefte (MFT) station. (Below spectrum was calculated from noise record and upper spectrum was calculated from S wave.

Deprem dalgalarının odak ile kaydedildikleri istasyon arasındaki yol boyunca çeşitli jeolojik birimlerden geçerken bu birimlerin fiziksel özelliklerine bağlı olarak belirli frekanslardaki soğurulma etkilerinin giderilmesi amacıyla, literatürde Marmara bölgesi ile ilgili yapılmış mevcut çalışmalar gözden geçirilmiştir. Akıncı ve diğ. (2006) tarafından geliştirilen frekans bağımlı kayma dalgası kalite faktörü $Q(f) = 180 f^{0.45}$ bağıntısının kullanılmasına karar verilmiştir. Yayılım süresince Geometrik Saçılma etkisine bağlı azalım/sönüm için ise aynı çalışmadan elde edilen,

$f < 1.0$ Hz için;

$r-1.2$ for $r \leq 30$ km; $r-0.7$ için $30 < r \leq 60$ km; $r-1.4$

için $60 < r \leq 100$ km; $r-0.1$ için $r > 100$

$f \geq 1.0$ Hz için;

$r-1.0$ for $r \leq 30$ km; $r-0.6$ for $30 < r \leq 60$ km; $r-0.9$

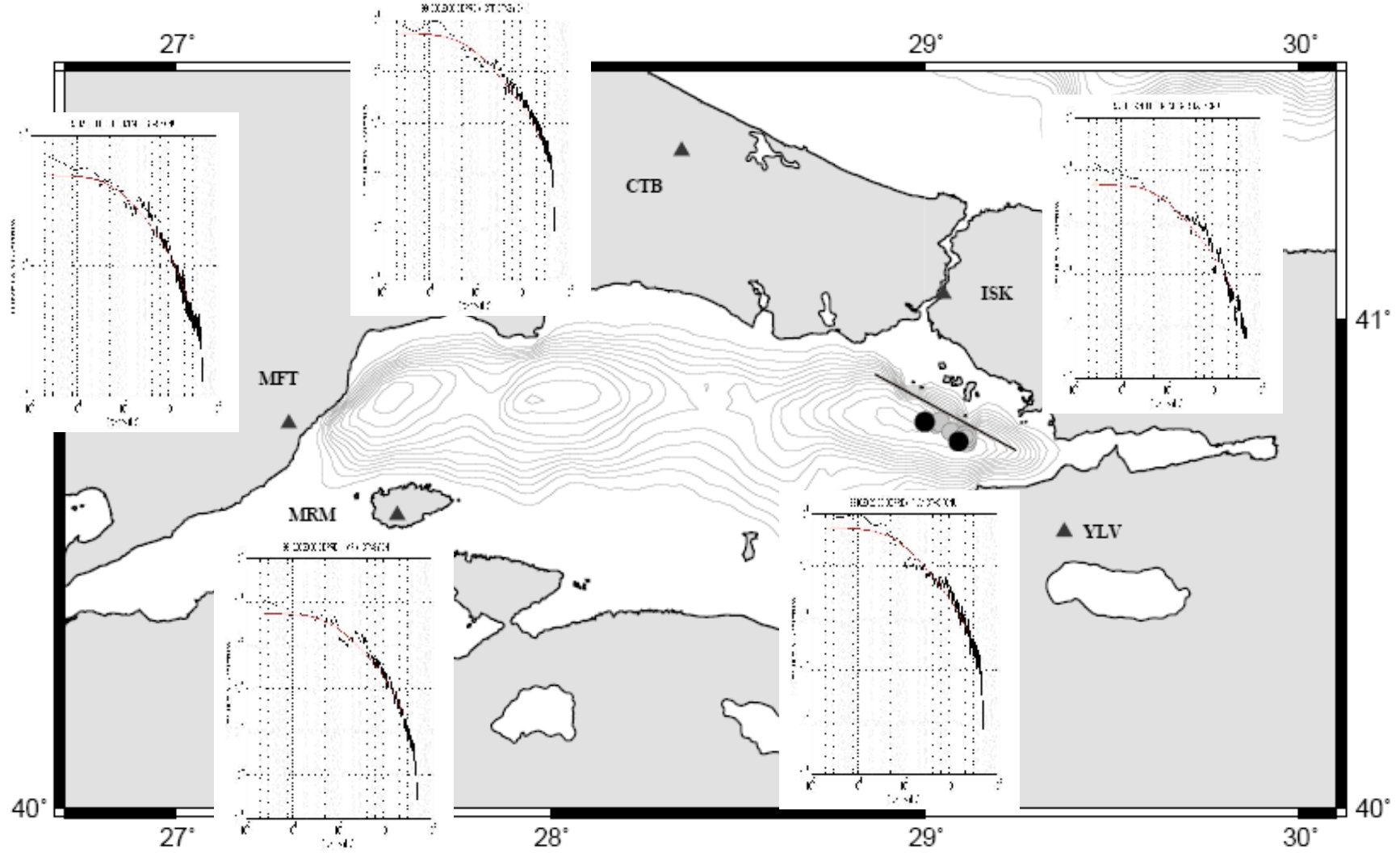
için $60 < r \leq 100$ km; $r-0.1$ için $r > 100$ km.

frekans bağımlı fonksiyon kullanılarak, yüksek ($f > 1$ Hz) ve alçak ($f < 1$ Hz) frekans bandında, mesafe bağımlı olarak ayrı ayrı hesap yapılmıştır.

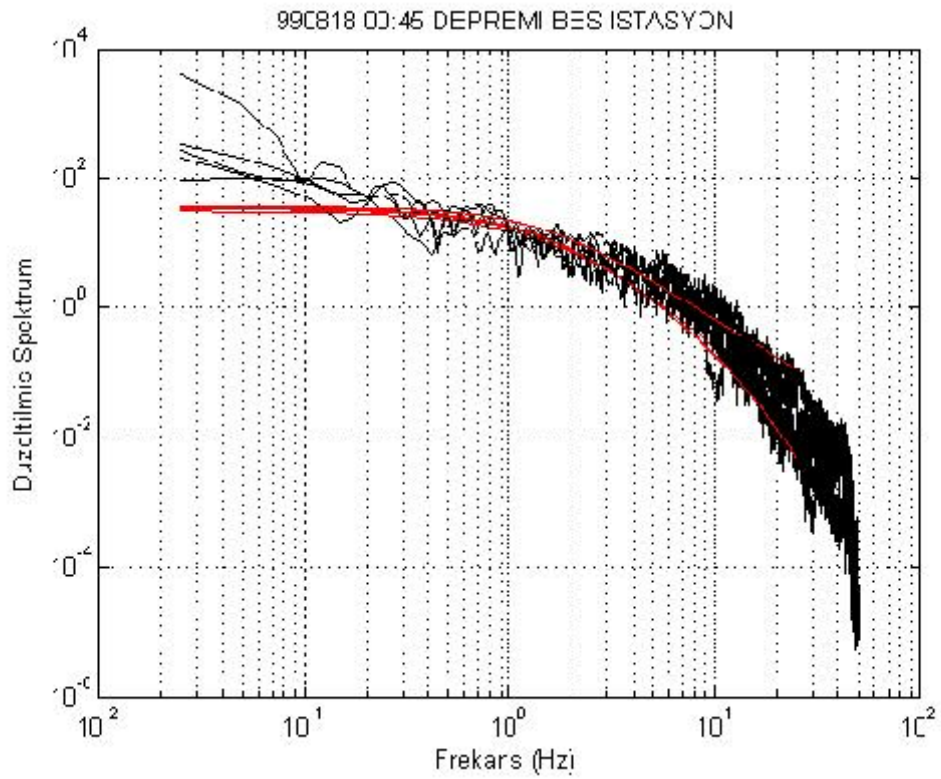
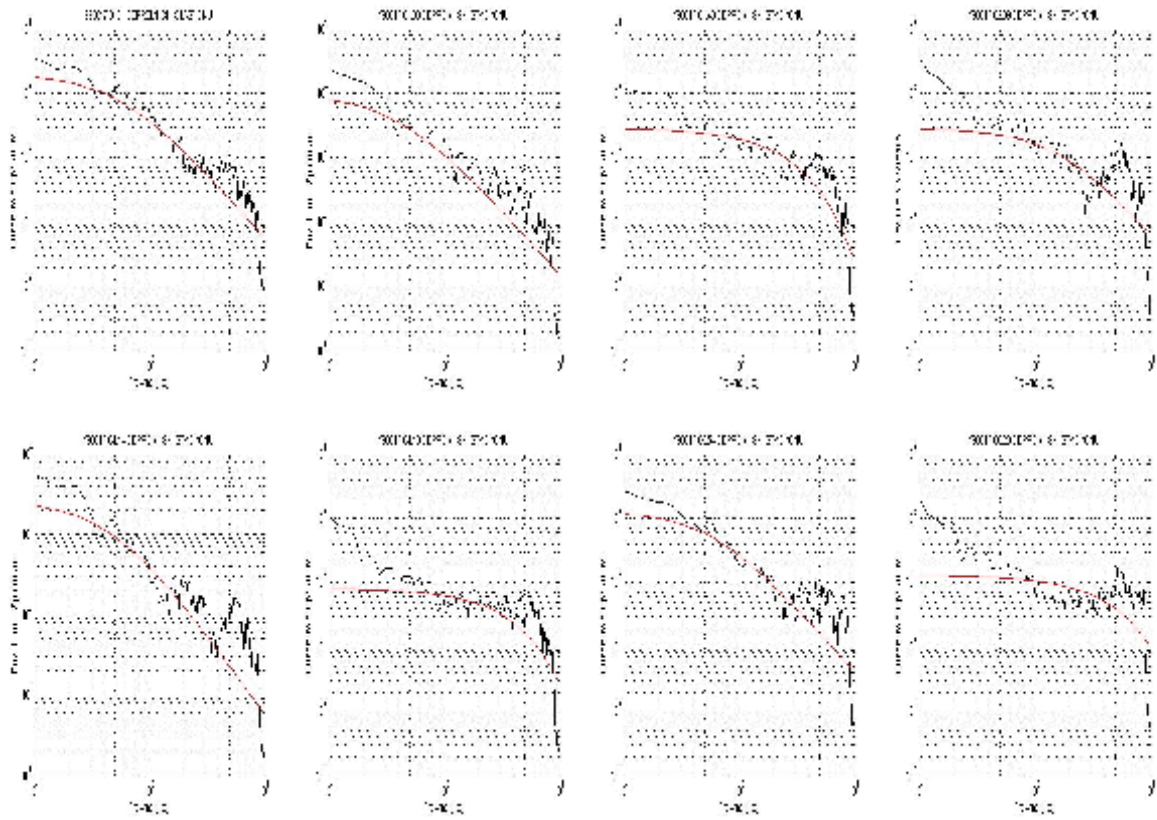
Analizlerde kullanılan bir boyutlu hız modeli Karabulut ve diğerleri (2003) den alınmıştır. Serbest yüzey düzeltme katsayısı bu hız modelinden elde edilmiş ve yoğunluklar P dalgası hızları (V_p) kullanılarak hesaplanmıştır. Yerel zemin koşullarına ait tepki fonksiyonu bilinemediğinden bu etkiler spektrumdan giderilememiştir, bu sebeple yerel zemin etkilerinin sonuçlarda saçılmaya sebep olduğu düşünülmektedir.

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada 1999 Marmara depremi öncesinde, Marmara denizinin etrafında B.Ü. Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü tarafından yerleştirilmiş beş adet üç bileşen geniş bant sismometreden oluşan sismik yerel ağ tarafından, 1999 depremlerinin ardından Prens Adaları fayı olarak bilinen Kuzey Anadolu Fay Zonunun İstanbul'a en yakın olarak geçtiği yaklaşık 40 km uzunluğundaki fay segmenti (İmren ve diğ., 2001) üzerinde meydana gelmiş, moment magnetüdüleri ($3.1 \leq M_w \leq 5.2$) arasında değişen artçı depremlerin kayıtları kullanılarak deprem kaynak parametreleri hesaplanmıştır (Şekil 4 ve Şekil 5).



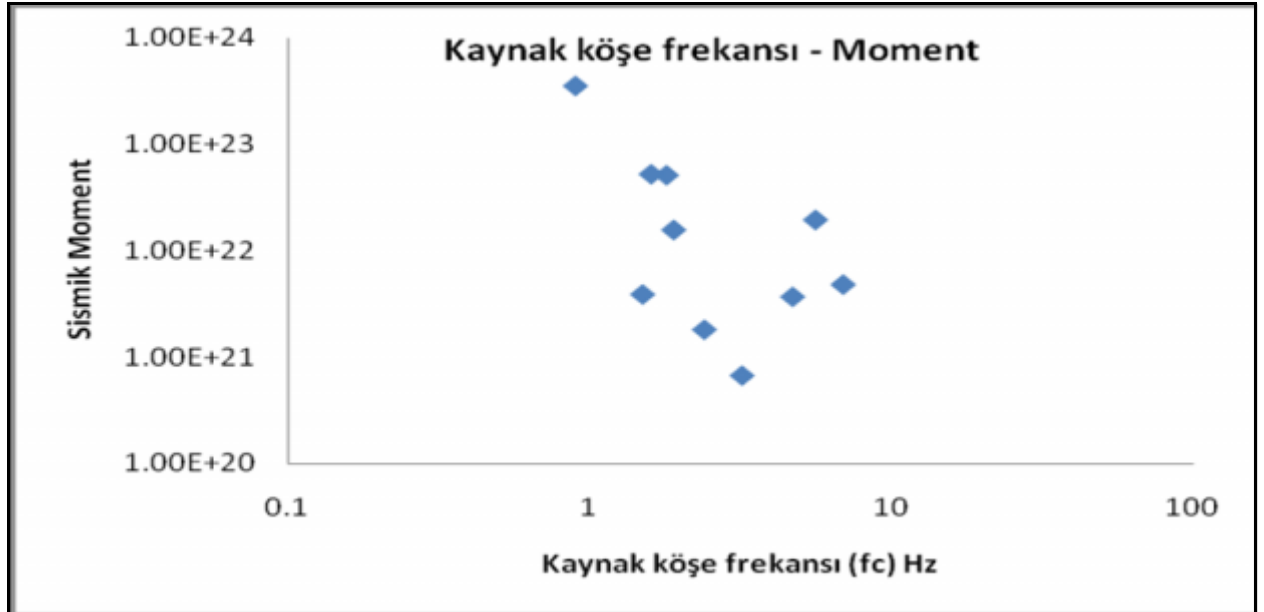
Şekil 4: Analizlerde kullanılan istasyonların dağılımı ve 20.10.1999 23:08 depremine ait Brune teorik spektral şekline uydurulmuş yerdeğiştirme spektrumları.
 Figure 4: Distribution of earthquake stations that are used during the analysis and displacement spectrum fitted Brune theoretical source spectrum for 20.10.1999 23:08 earthquake



Şekil 5: Analiz edilen depremlere ait Brune teorik spektral şekline uydurulmuş yerdeğiştirme spektrumları.
Figure 5: Analysed earthquakes displacement spectrum fitted to the Brune theoretical source spectrum.

Kullanılan veri setindeki on depremden sekiz tanesi sadece bir genişbant kayıtçı tarafından kaydedilmiştir. Bu sekiz depremin kaynak parametreleri tek istasyon verisinin Brune Spektral şekline en küçük kareler yöntemi ile yaklaştırılması ile elde edilmiştir. Diğer iki deprem ise beş istasyon tarafından kaydedilmiş ve bu depremlerin kaynak parametreleri hesabında eşzamanlı ters çözüm tekniği yardımıyla beş istasyon verisi beraber kullanılmıştır. Hesaplanan Sismik Moment değerleri $1.82E+21$ - $3.52E+23$ dyne-cm arasında, Köşe frekansları ise 0.9 -6.9 Hz arasında değişiklik göstermektedir (Şekil 6). Hesaplanan parametrelerin Marmara bölgesinde farklı yöntemler kullanılarak yapılmış diğer çalışmalardan (Gök vd., 2009) elde edilen değerlerle uyumlu olması kullanılan yöntemin güvenilirliğini ortaya koyduğu gibi yüzeye yerleştirilmiş kayıtçıların verilerinin deprem kaynak parametrelerinin hesaplanmasında kullanılabileceği de bir kez daha doğrulanmış olmaktadır. Çalışmada

Marmara bölgesi için geliştirilmiş azalım ilişkileri de başarıyla kullanılmıştır. Moment hesaplamalarında, kullanılan hız yapısı (yoğunluklar hız yapısından hesaplanmıştır) sonuçları önemli ölçüde etkilemektedir. Moment hesaplamaları sismik hızlara 4. Dereceden bağlı olduğundan sismik hızlardaki %20 değişiklik moment hesaplamalarını 2.4 kat değiştirebilmektedir (Gök vd., 2009). Marmara bölgesi gibi oldukça heterojen bir hız dağılımı gösteren ve istasyondan istasyona hızların bazen büyük değişiklikler gösterdiği bir bölgede istasyonların altındaki hız yapısının da bilinmiyor olması hesaplamalardaki en önemli belirsizliktir. Sonuçlardaki saçılmaların büyük oranda hız yapısındaki belirsizliklerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Hesaplanan kaynak köşe frekansları ve sismik moment değerleri Tablo 3 te sismik moment ile kaynak köşe frekanslarının değişimi Şekil 6 da sunulmuştur.



Şekil 6: Hesaplanan Moment ve kaynak köşe frekansı ilişkisi

Figure 6: Calculated moment source corner frequency relationship.

Tablo 3. Hesaplanan moment ve kaynak köşe frekansları
Table 3. Calculated moment source corner frequencies

No	Oluş Tarihi	Oluş Zamanı	Moment (M0) (dyn-cm)	Mw	Köşe Frekansı (Hz) (fc)
1	20.10.1999	23:08	3.52E+23	4.9	0.9
2	17.08.1999	06:20	6.76E+20	3.1	3.2
3	17.08.1999	05:54	3.90E+21	4.5	1.5
4	17.08.1999	01:48	1.95E+22	4.2	5.6
5	18.08.1999	00:45	0.37E+22	3.7	4.7
6	17.08.1999	01:31	5.12E+22	4.7	1.8
7	17.08.1999	01:33	1.57E+22	5.2	1.9
8	17.08.1999	04:18	4.82E+21	3.7	6.9
9	17.08.1999	02:09	1.82E+21	3.5	2.5
10	17.08.1999	04:14	5.23E+22	4.7	1.6

Marmara bölgesi gelecekte büyük bir depremle sarsılması muhtemel, Türkiye ekonomisi için vazgeçilmez önemde bir bölgedir. Bu bakımdan bu bölgede oluşmuş küçük depremleri kullanarak depremlerin kaynak parametrelerinin ve bunlara bağlı ölçeklendirme ilişkilerinin geliştirilmesi gelecekte bu bölgeyi etkilemesi muhtemel büyük depremlerle ilgili sismik tehlike analizleri ve deprem benzeşim çalışmalarında son derece önemli bir veri olacaktır. Bu çalışmanın bir diğer amacı da bölgede yapılacak deprem benzeşim çalışmalarında kullanılacak bir veritabanı oluşturmaktır.

SUMMARY

A ten-earthquake data set is developed to study their source parameters. These earthquakes occurred after $M=7.4$ İzmit and $M=7.2$ Düzce earthquakes along the Prince's island fault segment which is the nearest trace of the North Anatolian Fault to the city of Istanbul. The seismic moment magnitude of analyzed events range between $3.1 \leq M_w \leq 5.2$ and the focal mechanism solutions are available.

Source parameters of these small earthquakes are computed using Hutchings' method. Hutchings (2004) method utilize spectra of direct S waves in a simultaneous inversion of local network data in order to estimate seismic moment, source corner frequency, site attenuation and whole path Q. In this paper, the seismic source parameters are calculated and the relationship between seismic moment and source corner frequency is investigated.

TEŞEKKÜR

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

DEĞİNİLEN BELGELER

- Abercrombie, R.E., 1995**, Earthquake source scaling relationships from -1 to 5 ML using seismograms recorded at 2.5-km depth, *J. Geophys. Res.*, 100, 24015-24036.
- Aki, K. and P. G. Richards, 1980**, Quantitative seismology, Theory and Methods, Volumes I and II, W. H. Freeman and Company, San Francisco, CA.
- Akinci A., Malagnini I., Herrmann, R. B., Gok R, and Sørensen M. B., 2006**, Ground motion scaling in the Marmara region, Turkey. *Geophys. J. Int.*, 166, 635-651.
- Anderson, J.G., and Hough, S, 1984**, A model for the shape of the Fourier amplitude spectra of accelerograms at high frequencies, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 74, 1969-1994.
- Bonilla, L. F., Steidl J. H., Lindley, G. T., Tumarkin, A, G., Archuleta, R. J., 1997**, Site amplification in the San Fernando Valley, CA: Variability of the site effect estimation using the S-wave coda, and H/V methods, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87, 710-730.
- Brune, J.N., 1970**, Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 75, 4997-5010, (Correction, *J. Geophys. Res.* 76 (20), 5002, 1971).
- Cacci, M.S., Cacheris, W.P., 1998**, Numerical Recipes, (Chapter 10.4).
- Cacci, M.S., Cacheris, W.P., 1984**, Fitting curves to data, *Byte Magazine*, May, 340-360.
- Franceschina, G., Kravanja, S., Bressan G., 2006**, Source parameters and scaling relationships in the Friuli-Venezia Giulia (Northeastern Italy) region, *Physics of the Earth and Planetary Interiors.*, 154, 148-167.
- Gok R, Hutchings L., Mayeda K., and Kalafat D., 2009**, Source Parameters for 1999 North Anatolian Fault Zone Aftershocks. *Pure appl. geophys.*, DOI 10.1007/s00024-009-0461-x.

- Hanks, T.C., 1982**, Fmax, Bull. Seismol. Soc. Am., 72, 1867-1879.
- Hutchings, L., Wu, F 1990**, Empirical Green functions from small earthquakes. A waveform study of locally recorded aftershocks of the San Fernando earthquake, J. Geophys. Res., 95, 1187-1214.
- Hutchings, L., 2004**, Program NetMoment, a Simultaneous Inversion for Moment, Source Corner Frequency, and Site Specific t^* , Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, UCRL-ID 135693.
- İmren C., Le Pichon, X., Rangin C., Demirbağ E., Ecevitoglu B., Görür N., 2001**, 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.
- Jarpe, S.J., Kasameyer, P.K., 1996**, Validation of a methodology for predicting broadband strong motion time histories using kinematic rupture models and empirical Green's functions, Bull. Seismol. Soc. Am., 86, 1116-1129.
- Karabulut H., Özalaybey S., Taymaz T., Aktar M., selvi O., Kocaoğlu A., 2003**, A Tomographic image of the shallow crustal structure in The Eastern Marmara, Geophys. Res. Lett., 30 (24, 2777).
- Nakamura, Y (1989)**. A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface, Quarterly Report of RTRI, Vol.30, No. 1, pp. 25-33.
- Nelder, J.A., Mead, R., 1965**, A simplex method for function minimization, Computer J., 7, 308.
- Parsons, T., S. Toda, R. S. Stein, A. Barka, and J. H. Dieterich 2000**, Heightened odds of large earthquakes near Istanbul: An interaction-based probability calculation, Science., 288, 661-665.
- Pinar, A., Kuge, K., Honkuro, Y., 2003**, 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.
- S. Parolai, D. Bindi, E. Durukal, H. Grosser, and C. Milkereit., 2007**, Source Parameters and Seismic Moment-Magnitude Scaling for Northwestern Turkey. BSSA., Vol. 97, No. 2, pp. 655.