

Güney Marmara Bölgesi'nde Meydana Gelen Manyas (Mw=4.7) ve Gemlik (Mw=4.8) Depremlerinin Kinematik Analizi

Feyza Nur Bekler^{1,2,*}, Nurcan Meral Özel², Gülüm Tanırcan³

¹ Çanakkale İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü, 17100, Çanakkale.

² Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Jeofizik ABD, 34100, İstanbul.

³ Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Deprem Mühendisliği ABD, 34100, İstanbul.

Özet

Kuzey Anadolu Fay zonu (KAFz) güney kolunda meydana gelen orta büyüklükte 2 deprem için sismik kaynak karakteri ve faylanmalara ait kaymanın gelişimi incelenmiştir. Bu iki depremden biri 20 Ekim 2006 tarihinde meydana gelen Manyas depremi (Mw=4.7) ve diğeri de 24 Ekim 2006 tarihinde olan Gemlik Körfezi depremi (Mw=4.8) olarak analiz edilmiştir. Her iki depremde, KAFz güney kolundaki son 20 yılda meydana gelen orta büyüklükteki yarıtlımlardır. Sayısal analizde kuvvetli yer hareketi (KYH) verisine çoklu zaman-pencereli dalga şekli ters çözümü tekniği uygulanmıştır. Alt fay grupları (tali faylar) ve istasyonlar arasındaki kuramsal Green fonksiyonları bir-boyutlu (1-B) hız yapısı kullanılarak ayırık dalga sayısı yöntemi ile hesaplanmıştır. Bu çalışmada kullanılan ters çözüm tekniği, tekil olmayan çözümü getirmektedir. Bu nedenle hem gözlemsel hem de sentetik veri eşleşene kadar çeşitli yarıtlıma modelleri denenmiştir. Sonuçlar, kayma dağılımlarında basit modellerine işaret etmektedir. Gemlik ve Manyas depremleri için kayma miktarları sırası ile 0.18m ve 0.12m, sismik moment değerleri ise 3.43E+15 Nm ve 1.73E+15Nm olarak elde edilmiştir. Sonuçlar, küresel ölçekte benzer büyüklükte depremlerle karşılaştırılmış ve sismik moment ile yarıtlıma arasında yeni bir deneysel ilişki önerilmiştir. Bulguların Güney Marmara bölgesindeki yarıtlıma mekanizmalarının çözümlemesinde ve depremlerin tetiklenmesi için yararlı bilgiler sağlamasını amaçlanmıştır.

Anahtar Sözcükler

Marmara, Deprem, Kinematik Analiz, Ters Çözüm

Kinematic Rupture Process of Manyas (Mw=4.7) and Gemlik (Mw=4.8) Earthquakes Occurred in The Southern Marmara Region

Abstract

Source characterization and slip history were estimated for two moderate-sized earthquakes which occurred on the southern branch of the North Anatolian Fault zone (NAFz): October 20, 2006 (Mw 4.7) Manyas Earthquake and October 24, 2006 (Mw 4.8) Gulf of Gemlik Earthquake. These events are the largest to have occurred in the last 20 years on the southern branch of the NAFz. Multi time-window linear waveform inversion technique (MTWIT) was applied to strong ground motion (SGM) data. Theoretical Green's functions between subfaults and stations were calculated by a Discrete Wave Number Method (DWNM) using one-dimensional (1-D) velocity structure. The inversion technique used in this study yields a non-unique solution. Therefore, various rupture models were tested until a satisfactory match was obtained between observed and synthetic data. Results showed simple patterns in slip distributions. Max. slips are 0.18 m and 0.12 m and seismic moments are 3.43E+15 Nm and 1.73E+15 Nm for the Gemlik and Manyas Earthquakes, respectively. Results were compared with those of similar sized earthquakes around the world and a new empirical relationship was proposed between seismic moment and rupture area. It was aimed at providing useful information for resolving rupture mechanisms and triggering of the events in Southern Marmara region through the findings of the present study.

Keywords

Marmara, Earthquake, Kinematic Analysis, Inversion

1. Giriş

1500 km uzunluğundaki Kuzey Anadolu Fay zonu (KAFz) ve ilişkili alt kolları, neo-tektonik dönemde Marmara Bölgesi'ndeki en aktif tektonik özelliklere sahip unsurlarını oluşturur. Marmara bölgesinden de geçen KAFz içindeki aktif fayların geometrisi ve dağılımı karmaşık olmasına rağmen, genellikle Doğu Anadolu'da Geç Miyosen boyunca başlayan ve Pliyosen boyunca batıya doğru yayılan KAF bölgesinin de aktif fay sistemini oluşturmaktadır (Bozkurt 2001; Okay vd. 2000; Barka 1992; Şengör 1979). Tektonik özellikleri ve bölgesel jeoloji ele alındığında KAF esas itibari ile Kuzey (KAFk) ve güney (KAFg) olmak üzere iki kol ile karakterize edilmektedir. KAFk, KAF'ın yayılma bölgesinin bulunduğu İzmit Körfezi'nde denize girmektedir (Gürbüz vd.2000).

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (286) 2171764 Faks: +90 (286) 2726391

E-posta: fbekler@gmail.com (Bekler F), ozeln@boun.edu.tr (Özel N.M),

birgore@boun.edu.tr (Tanırcan B.G)

Gönderim Tarihi / Received : 06/12/2018

Kabul Tarihi / Accepted : 06/02/2019

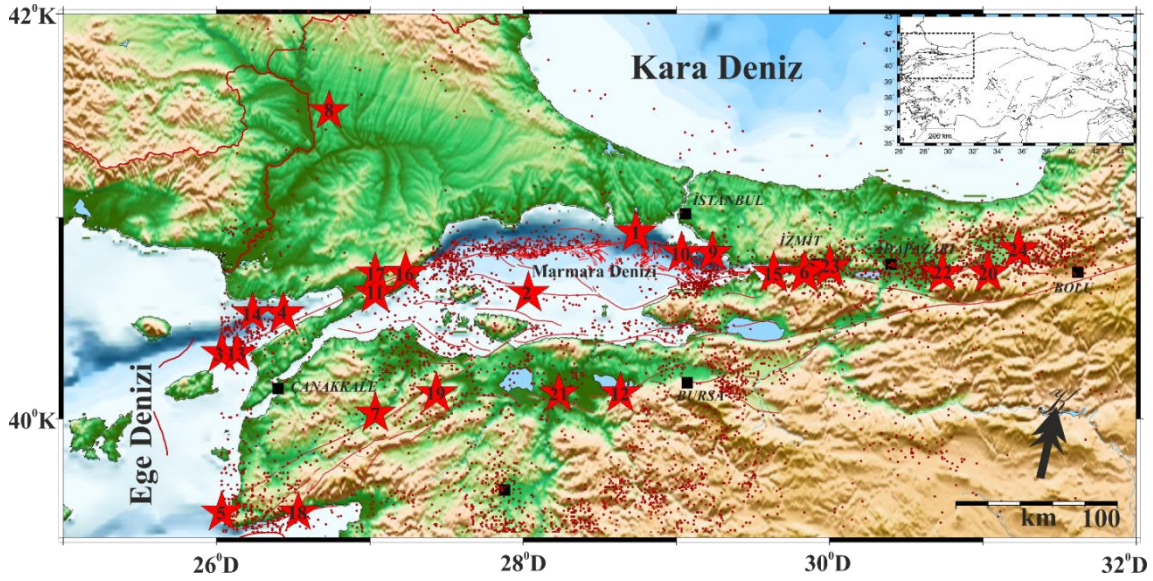
Diğer yandan kuzey kol İzmit Körfezi, Marmara Denizi kuzeyi olmak üzere Saroz Körfezi'ne doğru Ganos-Gaziköy fayı olarak devamlılığını sürdürerek Ege Denizi altında Yunan ana karasına doğru sonlanmaktadır. Yüksek ayrıntılı sismik ve aktif kaynak sismolojisi çalışmaları da bu devamlılığı desteklemektedir (Karabulut vd. 2003; Bekler ve Gürbüz 2008). KAFg ise KAF'nin Marmara Bölgesi'nde baskın olan ve güney kesiminde yer alan Edincik, Kapıdağı ve Bandırma-Mudanya yükselmelerini kapsamaktadır ve bunlara ek olarak da Uludağ yükselimi ve Söğütalan düzlüğü kolun güney kısmında yer almaktadır. Bu iki yükselimi arasında kalan alan ise doğu-batı uzanımlı depresyon olup yükselimi ve depresyon alanı KAF'nin güney kolu tarafından kontrol edilmekte ve depresyon alanı genel itibari ile çek-ayır havza kombinasyonunun bir sonucu olarak şekillenmiştir (Selim vd. 2006).

Kuzey Anadolu Fayı'nın deprem üreten önemli yerel tektonik unsurları arasında Yenice-Gönen, Manyas-Mustafakemalpaşa, Ulubat, Bursa, Sarıköy ve Doğruca fayları sayılabilir. KAFg kolu KD-GB doğrultulu çok sayıda sağ-yanal atım karakterli fayların kompozisyonunu yansıtmaktadır. Tarihsel dönemde, KAFg kolundaki en önemli yıkıcı ve zarar verici tarihi depremlerin 1556, 1719, 1855 ve 1894 depremleri olduğu bilinmektedir. Diğer yandan aletsel dönemde 1953, 1957, 1964 ve 1969 depremleri bu niteliklere sahip depremlerdir. Tablo 1'de büyüklüğü M>6.0 olan depremler (Şekil 1) listelenmiştir.

Tablo 1: Son 400 yılda Marmara Bölgesi'nde meydana gelen depremler (Ms≥ 6.8) (Barka 1996; Ambraseys 2002)

No	Yıl	Ay	Gün	Saat	Enlem(K°)	Boylam (D°)	Ms	Lokasyon
1	1509	9	10	22:00	40.90	28.70	7.2	Marmara Denizi
2	1556	5	10	0	40.60	28.00	7.1	Gönen
3	1625	5	18	0	40.30	26.00	7.1	Saros
4	1659	2	17	19:00	40.50	26.40	7.2	Saros
5	1672	2	14	0	39.50	26.00	7.0	Biga
6	1719	5	25	12:00	40.70	29.80	7.4	İzmit
7	1737	3	6	7:30	40.00	27.00	7.0	Biga
8	1752	7	29	18:00	41.50	26.70	6.8	Edirne
9	1754	9	22	1:30	40.80	29.20	6.8	İzmit
10	1766	5	22	5:00	40.80	29.00	7.1	Marmara Denizi
11	1766	8	5	5:30	40.60	27.00	7.4	Ganos
12	1855	2	28	2:30	40.10	28.60	7.1	Bursa
13	1859	8	21	11:30	40.30	26.10	6.8	Saros
14	1893	2	9	17:16	40.50	26.20	6.9	Saros
15	1894	7	10	12:24	40.70	29.60	7.3	İzmit
16	1912	8	9	1:28	40.70	27.20	7.3	Ganos
17	1912	9	13	23:31	40.70	27.00	6.8	Ganos
18	1944	10	6	2:34	39.50	26.50	6.8	Edremit
19	1953	3	18	19:06	40.10	27.40	7.1	Gönen
20	1957	5	26	6:33	40.70	31.00	7.1	Abant
21	1964	10	6	14:31	40.10	28.20	6.8	Manyas
22	1967	7	22	16:57	40.70	30.70	7.2	Mudurnu
23	1999	8	17	1	40.72	29.96	7.4	İzmit
24	1999	11	12	16:57	40.81	31.19	7.2	Düzce

Ms: yüzey dalgası büyüklüğü



Şekil 1: Marmara Bölgesi geliştirilmiş aktif fay haritası üzerinde güncel depremsellik ve tarihsel depremlerin konumları. Kırmızı noktalar aletsel dönem depremlerini (1970–günümüze) simgelemektedir. 30 km ile 100 km arasında yırtılmaya sebep olan büyüklüğü $M_s \geq 6.8$ ve 1509 tarihinden 17 Ağustos 1999 Adapazarı depremine ($M_w=7.4$) kadar olan depremler kırmızı yıldız ile gösterilmiştir. Mavi çizgiler Marmara bölgesinde aktif fayları temsil etmektedir (Şaroğlu vd. 1992; Barka 1996; Ambraseys 2002; Armijo vd. 2005).

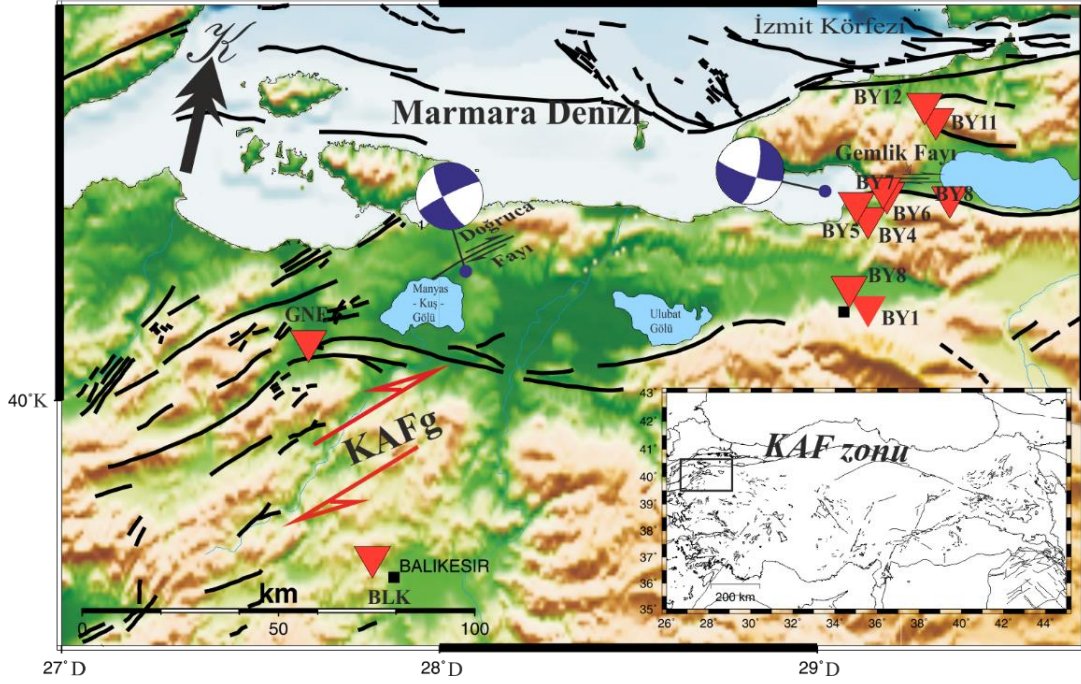
Bu çalışmada Tablo 2’de kaynak parametreleri verilen Gemlik depremi (20 Ekim 2006, $M_w=4.7$) ve Manyas Depreminin (24 Ekim 2006, $M_w=4.8$) kinematik yırtılma analizi yapılmıştır (Bekler vd. 2009, 2011). Her iki olay da 1999 Adapazarı depreminden bu yana KAFs kolunda oluşan en büyük iki depremdir (Şekil 2). Bu iki depremin neden olduğu herhangi önemli yapısal hasar olmamasına rağmen, bu bölgenin sismotektonik karakterini daha iyi anlamak için yırtılma karakteristiklerini araştırmak önemlidir. Manyas depremi doğu-batı uzanımlı çöküntü havzaları ile sınırlandırılmış Manyas Grabeni açılması ile uyumlu bir tektonizmanın sonucu meydana gelmiştir. Yine bu deprem 18 Mart 1953 Yenice-Gönen depremi ($M_s=7.3$) ile ilişkilendirilen Doğruca fayı üzerinde oluşmuştur. Bu fay Manyas Gölü’ne KD-GB doğrultusunda olan bir faydır ve ağırlıklı olarak da Yenice-Gönen fayı ile yayılım gösteren açılma ile uyumluluk gösterir. Bu deprem sonucunda Bandırma’nın 10 km güney doğusuna doğru Doğruca Köyü’nde hafif yapısal hasarlar gözlenmiştir. Gemlik depremi tektonik sistemin oldukça karmaşık olduğu Gemlik Fayı’nın (Tsukuda 1988) hemen kuzeyindedir. Dekstral tipte bir hareketin farklı yapıları bu bölgede bir araya geldiği görüşü baskındır (Flerit 2003).

Tablo 2: Gemlik ve Manyas depremlerine ait kaynak parametreleri

Deprem	M_w	Derinlik (km)	Enlem-Boylam	Odak Mekanizması Doğrultu°, Eğim°, Atım°
Manyas Gölü Depremi 20 Ekim 2006	4.7	15	40.26°K 27.98°D	244 84 -164 (KRDAE* çözümü)
Gemlik Depremi 24 Ekim 2006	4.8	14	40.42°K 29.00°D	14 71 -12 (Irmak 2007)

*KRDAE: Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü

Armutlu Yarımadası ve Güney Marmara bölgesinde son yıllarda çalışılan sismik hatlar ve tektonik veriler, bu bölgelerin tektonik özelliklerinin çok karmaşık olduğunu göstermektedir. Doğruca ve Gemlik faylarının uzun bir süre orta büyüklükte deprem dahi üretmeyen ve oldukça sakin ve düşük bir sismisite (KRDAE) gösterdikleri gözlenmektedir (KRDAE 2018). Bu yüzden bölgesel sismotektonik karakterinin ortaya çıkarılmasında bu depremlerin yırtılma süreci gelişiminin anlaşılması önemlidir. Bu amaçla Gemlik ve Manyas depremlerinin kinematik yırtılma özellikleri kuvvetli yer hareketi (KYH, Strong Ground Motion –SGM-) sismik ağ (AFAD) kayıtları kullanılarak ortaya konulmuştur. Bu depremlere ait kayma miktarı, atım, ortalama yırtılma hızı ve yükselme zamanı ilgili algoritmaların gereği dalga formu çakıştırmasına göre belirlenmiştir. Bu algoritma ile ilgili işlemler en temel hali ile Birgören vd. (2004) tarafından açıklanmaktadır. Fay düzlemleri üzerinde kayma miktarı dağılımı yırtılmanın karmaşık yapısı göz önünde bulundurularak yorumlanmıştır.



Şekil 2: Çalışmada kullanılan Manyas ve Gemlik depremlerinin yerleri ve fay mekanizması sonuçları. Kırmızı ters üçgenler AFAD Deprem Dairesi tarafından işletilen istasyonları göstermektedir. Siyah çizgiler Marmara Bölgesi aktif faylarını temsil etmektedir (Şaroğlu vd. 1992; Barka 1996; Ambraseys 2002; Armijo vd. 2005).

2. Veri

Gemlik ve Manyas depremleri yırtılma süreci kinematik analizinde dalga şekli ters çözümü için AFAD Deprem Dairesi tarafından işletilen 8 KYH istasyonu verisi kullanılmıştır (Tablo 3). İstasyonların sayısal ivme kayıtları 0.2 s ile tekrar örneklenerek hız sismogramlarına dönüştürülmüştür. S-dalgası başlangıcından 1 saniye öncesi S-dalgası kısmı, toplam 6 saniyelik sürelik zaman serisi analiz edilmek üzere kesilmiştir. Her kesilen zaman serisi sismogramlara 0.1-0.5 Hz bant -geçişli süzgeç uygulanmıştır. Her iki deprem içinde fay düzlemi boyutları 1.5km x 1.0 km olarak seçilmiştir. Dalga şekli ters çözümünde kullanılmak üzere Green fonksiyonlarının elde edilmesinde kabuk yapısı Bekler ve Gürbüz (2008) çalışmasından derlenmiştir.

Tablo 3: Dalga şekli ters çözüm için kullanılan KYH kayıt istasyonları

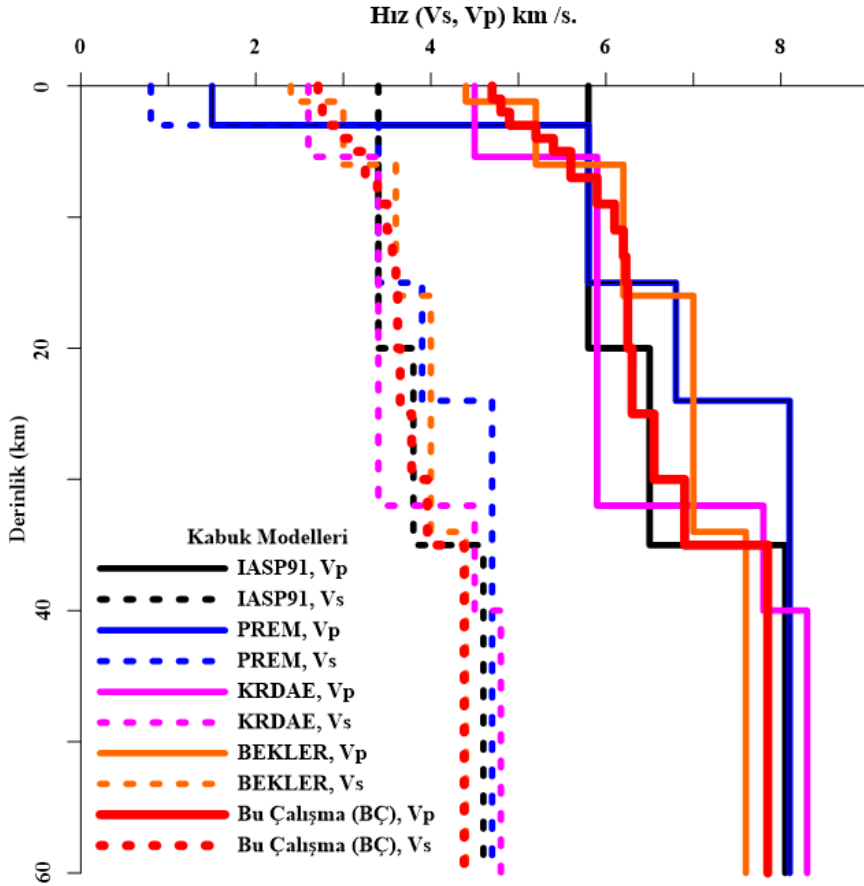
İstasyon Kodu	Lokasyon Enlem-Boylam	Episantral uzaklık (km)	Sismik Ağ
BYT01	40.18°K-29.12°D	27	AFAD
BYT02	40.22°K-29.07°D	21	AFAD
BYT04	40.36°K-29.12°D	11	AFAD
BYT05	40.39°K-29.09°D	7	AFAD
BYT06	40.41°K-29.17°D	14	AFAD
BYT07	40.42°K-29.16°D	13	AFAD
BYT08	40.42°K-29.29°D	24	AFAD
BYT11	40.56°K-29.30°D	30	AFAD
GNE	40.11°K-27.64°D	31	AFAD
BLK	39.65°K-27.85°D	68	AFAD

3. Sismik Hız Modeli

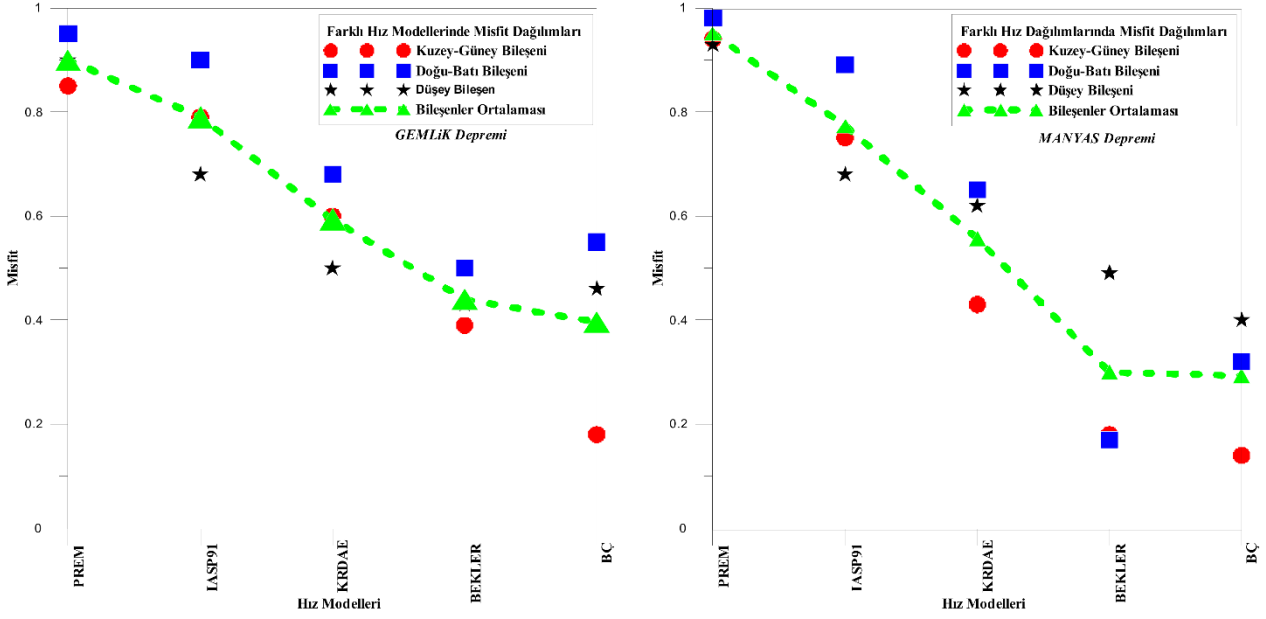
Gözlemsel ve sentetik dalga şekilleri arasındaki eşleşmenin değerlendirilmesi, ters çözüm işlemi için kullanılan kabuk hız modeli dikkate alınarak RMS (Root Mean Square) uyumsuzluğu tarafından kontrol edilir. En çok kullanılan uyumsuzluk ölçütü (Geller ve Takeuchi 1995) olarak RMS uyumsuzluk ifadesi eşitlik 1’de verilmektedir.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum |S_{göz} - S_{snt}|^2}{\sum |S_{snt}|^2}} \quad (1)$$

Burada, $S_{göz}$ gözlemsel dalga şekillerini (istasyona ait hız sismogramı), S_{snt} ise kuramsal hesaplama ile üretilen sentetik sismogramları göstermektedir. Bu çalışmada 5 farklı hız modeli üzerinde durularak bunlar arasında en düşük RMS değeri veren 1-B kabuk modeli belirlenmiştir. Bu modeller küresel ve yerel modeller olup bunlar; İlk Referans Yer Modeli (PREM, Dziewonski ve Anderson 1981), IASP91-The International Association of Seismology and Physics of the Earth’s Interior-(Kennett ve Engdahl 1991), Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE) ve BEKLER (Bekler ve Gürbüz 2008). Küresel ölçekli ve daha derin uzun periyotlu kabuk modelleri olan PREM ve IASP91 modelleri üst kabuk modeli oluşturulmasında tercih edilmektedir. Diğer yandan, daha yüksek frekanslı KRDAE ve BEKLER modelleri karşılaştırmaları sonucunda da en düşük RMS değerini veren aktif kaynak sismolojisi verisine dayalı BEKLER kabuk modeli hesaplamalarda kullanılmıştır. 1-B hız modelinin hesaplanmasında Kennet ve Kerry (1979) yansıma matrisi yöntemi üzerine Bouchon (1981) tarafından geliştirilen ayrık dalga sayısı yaklaşımı kullanılmıştır.



Şekil 3: Bu çalışmada test edilen ve kuramsal Green fonksiyonların hesaplanmasında kullanılan farklı Vp ve Vs hızlarının tanımladığı kabuk modelleri

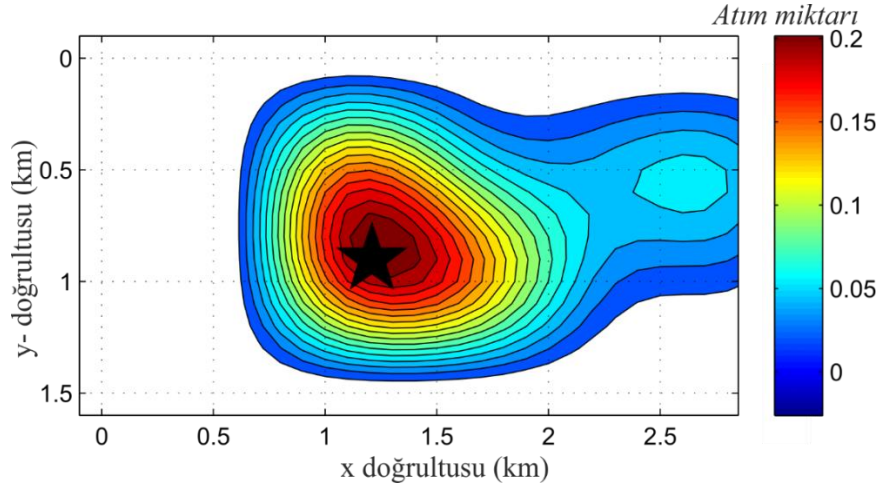


Şekil 4: Gemlik ve Manyas depremlerinin çözümünde kullanılan 5 farklı modele ait RMS değişimleri. PREM (Preliminary Reference Earth Model); IASP91 (International Association of Seismology and the Physics of the Earth's Interior), KRDAE (Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü), BEKLER (Bekler ve Gürbüz 2008) ve BÇ (Bu çalışma).

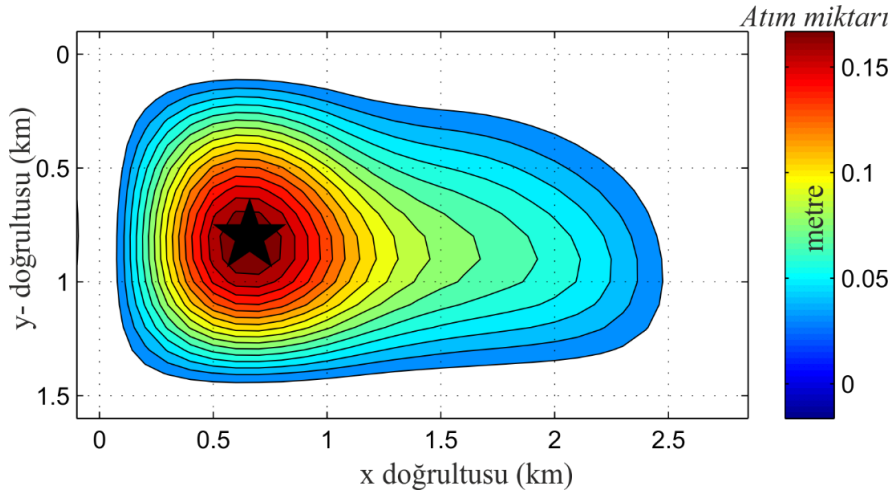
4. Dalga Şekli Ters Çözümü

Kinematik analizin gerçekleştirilmesinde uygulanan yöntemin iki temel prensibi vardır; ilki çoklu zaman pencereli ters çözüm (Sekiguchi vd. 2000) yaklaşımı ile incelenen 0.1-0.5 Hz frekans aralığında sismik kaynak sürecinin gerçekleştirilmesi, ikincisi ise verilen bir kabuk modeli için Green fonksiyonlarının hesaplanmasıdır. Sismik kaynağın dinamik sürecinin incelenmesi ve tali faylar ile de ilişkilendirebilecek farklı yırtılma yayılım etkilerinin ortaya konulduğu fay düzlemi üzerindeki kayma vektörlerinin zaman ve uzaysal dağılımlarını elde etmek üzere çoklu zaman pencereli ters çözüm (Sekiguchi vd. 2000) işlemi güvenilir bir toplam kayma zamanı (Tinti vd. 2005) hesaplaması sunabilmektedir. Kaymanın süreci hem uzaysal (tali faylarda) hem de zamanda (farklı zaman pencerelerinde) ve her tali faydaki, moment serbestleşmesi olarak gösterilmekle birlikte her zaman pencere gözlemsel ve sentetik dalga şekilleri uyumunu boyunca hesaplanmıştır. Her iki deprem için de toplam fay düzlemi içinde kalan tali fayların alanları 0.5 x 0.5 km olarak düzenlenmiştir. Her tali fay için kayma hızı zaman fonksiyonlarının gösteriminde kullanılmak üzere 3 zaman penceresi kullanılmıştır. Bu çalışmada yükselme zamanı 0.32 s ve yırtılmaz hızı 2.7 km/s olarak değerlendirilmiştir. 180 ± 45 derece arasında süreksizlik atım açısı değişiminin sınırlandırılması için pozitif sınırlamalar uygulanmıştır (Akaike 1980).

Akaike (1980) tarafından önerilen bir Bayes Bilgilendirme Kriteri (Bayesian Information Criterion-ABIC-), gözlemlenen veriden ve objektif bir şekilde önceki kısıtlamalardan elde edilen bilgilerin göreceli ağırlıklarını belirlememizi sağlamıştır. En küçük ABIC değeri olan çözüm, gözlemlenen ve sentetik dalga şekillerinin birbirine en iyi çakıştığı sonuçtur. Fukahata vd. (2003), zamanda ve uzaysal düzgünlük kısıtlamalarının tam bağımsızlığı varsayımına dayanan yeterli olmayan formülasyonun, sismik kaynak süreçlerini tahmin etmek için dalga şekli ters çözümünde yaygın olarak kullanıldığını göstermiştir. Düzgünlük kısıtlamaları aynı zamanda istenmeyen kayma düzenlerinden kaçınmak için kullanılır. 1-B hız model tepkisi de düşünülerek her istasyon ile sismik kaynak olan tali fay arasındaki Green fonksiyonlarını hesaplanmasında Bouchon (1981) tarafından önerilen yansıma-aktarım matrisi yöntemi (Kennett ve Kerry 1979) ile birlikte ayrı dalga sayısı yöntemi kullanılmıştır. Gözlemsel ve sentetik sismogramların arasındaki en iyi uyum elde edilene her tali fay için kadar yırtılma başlama noktası ve düzgünlük kısıtlamaları değiştirilerek birden fazla ters çözüm sınaması yapılır. Bu duruma ek olarak da daha önceki çalışmalardan faylanma mekanizması çözümleri ve odak derinlikleri de test edilmiş olur. Gözlemsel ve sentetik sismogramlar arasındaki en iyi dalga şekli uyumunu elde edebilmek için, KYH verisine bant geçişli süzgeç (0.5-1.0 Hz; 0.02-0.5 Hz) uygulanmıştır.



Şekil 5: 24.10.2006 Gemlik depremi faylanma alanı kayma miktarı dağılımları. Yıldız deprem kaynağı lokasyonunu simgelemektedir.

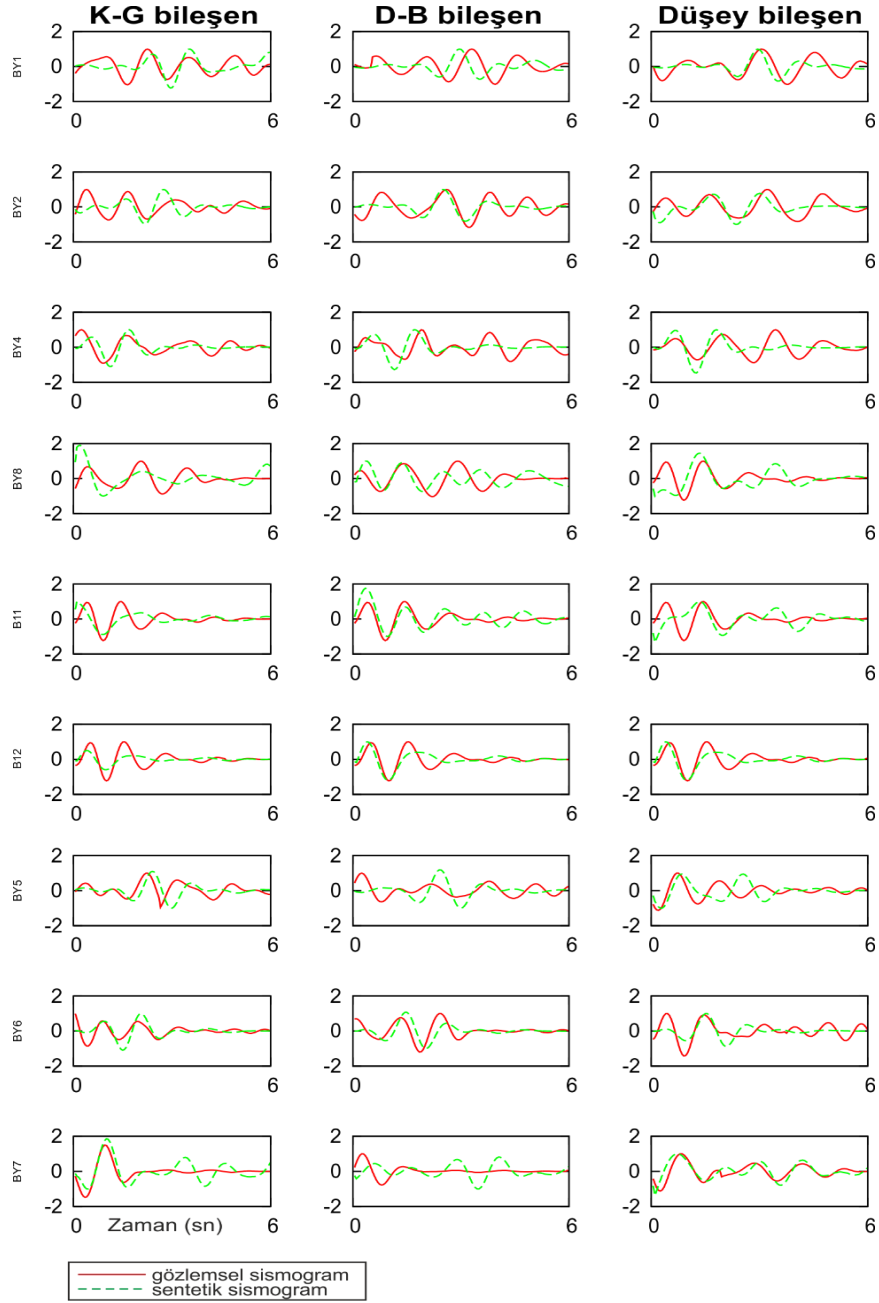


Şekil 6: 20.10.2006 Manyas depremi faylanma alanı kayma miktarı dağılımları. Yıldız deprem kaynağı lokasyonunu simgelemektedir.

5. Tartışma ve Sonuçlar

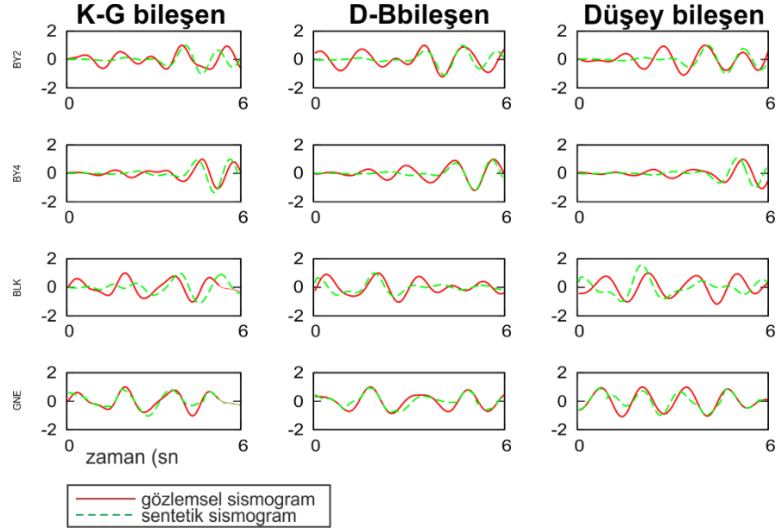
Kinematik analizi sonuçları fay düzlemi üzerindeki kayma dağılımı hemen hemen homojen bir azalışa sahip dairesel bir yırtılma paterni göstermektedir. Gemlik depremi (Şekil 5) için en büyük kayma miktarı ve moment değeri 0.18 m ve $M_0=3.43E+15$ Nm, Manyas depremi (Şekil 6) için de bu değerler 0.12 m ve $M_0=1.73E+15$ Nm olarak hesaplanmıştır. Her iki depremde de en büyük kayma miktarı odağın yanındadır. Statik gerilme düşümleri Gemlik ve Manyas depremleri için sırası ile 12 Mpa ve 7 Mpa olarak değerlendirilmiştir. Gözlemsel ve sentetik sismogramların her KYH istasyonu için karşılaştırmaları Şekil 7 ve Şekil 8 de verilmiştir. Genel olarak sonuçlar, gözlemsel ve sentetik sismogramların dalga şekli uyumunun oldukça iyi olduğunu göstermektedir. Manyas depremi KYH sismogramlarının karşılaştırmasında episantr uzaklığı fazla olan istasyonların (BLK) dışında uyumun kalitesi Şekil 8 de sunulmuştur.

Marsan (2005) ve Helmstetter vd. (2005), büyük depremlerin, enerji salınımı için küçüklerden çok daha önemli olmasına rağmen, küçük depremlerin, depremler arasındaki gerilim değişiklikleri için uzaysal kümelenmelerinden dolayı büyük ölçüde aynı etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Bu nedenle, yırtılma sürecinden hesaplanan gerilme düşümü değerleri, küçük depremlerin deprem tetiklemesini nasıl etkilediği hakkında bilgi verir.



Şekil 7: Gemlik depremi KYH sismogramları (yeşil çizgi) ve sentetik (kırmızı çizgi) sismogramların karşılaştırılması

Tablo 4'de dünya genelinde orta büyüklükteki depremlere ait kaynak parametreleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Wells ve Coppersmith 1994; Ichinose vd. 1997; Somerville vd. 1999; Rebolgar vd. 2001; Abdel-Fattah 2002). Bu depremlerin sismik moment ve yırtılma alanı dağılımı ve bu çalışmanın sonuçları Şekil 9'da sunulmuştur. Parametrelerin dağılımı $\ln(y)=0.71*\ln(x)+4.91$ gibi eşitlik ile ifade edilebilir.



Şekil 8: Manyas depremi KYH sismogramları (yeşil çizgi) ve sentetik (kırmızı çizgi) sismogramların karşılaştırılması

Tablo 4: Deneysel bağıntıların ortaya çıkarılması için gerekli deprem kaynağı parametreleri

Tarih	Lokasyon	Büyükük	Sismik Moment (10 ²⁶ dyne-cm)	Yırtılma Boyu(m)	Yırtılma Genişliği(m)	Yerdeğiştirme Dmax(m)
23.01.1975	Brawley,Kaliforniya	4.6(Ms)		10.4(R1)	4(R1)	0.20(R1)
31.05.1975	Galway Gölü,Kaliforniya	5.2(Ms)		6.8(R1)	3(R1)	0.02(R1)
15.03.1979	Homestead Vadisi, Kaliforniya	5.6(Ms)		3.9(R1)	4(R1)	0.10(R1)
06.08.1979	CoyotoGölü, Kaliforniya	5.7(Ms)		14.4(R1)	10(R1)	0.15(R1)
30.03.1986	MarryatCreek, Avustralya	5.8(Ms)		13(R1)	3(R1)	1.3(R1)
11.06.1983	Coalinga, Kaliforniya	5.4(Ms)		3.3(R1)	6.5(R1)	0.64(R1)
29.10.1989	Chenoua, Cezayir	5.7(Ms)		4.0(R1)	10(R1)	0.13(R1)
13.09.1986	Kalamata, Yunanistan	5.8(Ms)		15(R1)	14(R1)	0.18(R1)
17.05.1993	Eureka Vadisi, Kaliforniya	5.8(Ms)		4.4(R1)	7(R1)	0.02(R1)
14.10.1998	Umbria,İtalya	5.7(Ms)		12(R1)	2-3(R1)	0.8(R1)
21.03.1934	Güney Izu, Japonya	5.5(Ms)(R2)	0.095	7(R3)	4(R3)	
9.10.1965	Antioch,ABD	4.9(Ml)(R2)		3	6	
27.02.1972	BearValley, ABD	4.7(Ml)(R2)	0.008	3.8	2.5	
10.03.1972	San JuanBautisla	4.8(Ml)(R2)	0.016	4.3	2.5	
23.01.1975	Brawley, ABD	4.6(Ms)(R2)		9	4	0.20
08.02.1975	HorseKanyonu, ABD	4.7(Ml)(R2)	0.035	2	2	
11.03.1978	South Puget Sound, ABD	4.8 (Ml)(R2)		2.5	4	
01.01.1979	Malibu, ABD	4.7(Ms)(R2)		5	5	
19.08.1979	Charlevoix,Kanada	4.5(Ms)(R2)	0.015	2	2	
26.12.1979	Carlisle,İngiltere	4.8(Ml)(R2)		4	3	
25.02.1980	Anza, ABD	4.7(Ms)(R2)	0.041	2.5	2.5	
29.02.1980	Arudy,Fransa	4.9(Mb)(R2)	0.064	3.8	3.5	
27.7.1980	Sharpsburg, ABD	4.7(Ms)(R2)	0.043	4	5	
14.02.1981	ElkGölü, ABD	4.8(Ms)(R2)	0.1	6	7	
15.06.1982	Anza, ABD	4.8 (Ml)(R2)	0.017	2.5	3	
31.03.1983	Popayan, Kolombiya	4.9(Ms)(R2)	0.35			0.01
11.08.1983	Liege,Belçika	4.3(Ms)(R2)	0.016	5	3	
10.07.1984	North Wales, Büyük Britanya	4.7(Ms)(R2)	0.01	3	3.2	
05.04.1986	Cuzco, Peru	4.6(Ms)(R2)	0.077			0.1
28.05.1987	Kameoka,Japonya	4.9(Ml)(R2)		1.4	1.8	
10.06.1987	WabashVadisi, ABD	4.4(Ms)(R2)	0.031	1.7	3	
02.08.1987	Xunwu,Çin	4.8(Ml)(R2)	0.036	4	4	
10.10.1986	San Salvador	5.4(Ms)(R2)	0.45	6	7.5	
13.09.1986	Kalamata, Yunanistan	5.8(Ms)(R2)	0.89	15	14	0.18
25.09.1987	Lakeside, ABD	4.6	0.038	5.5	6	
03.12.1988	Pasadena, ABD	4.2	0.031	4.5	2.5	
28.06.1992	Landers, Kaliforniya	7.2(Mw)(R4)	7.5	69.0	15.0	7.94
16.09.1978	Tabas,İran	7.1(Mw)(R4)	5.8	95.0	45.0	2.13
17.10.1989	LomaPrieta,Kaliforniya	6.95(Mw)(R4)	3.0	40.0	18.0	4.96
17.01.1995	Kobe,Japonya	6.9(Mw)(R4)	2.4	60.0	20.0	3.48
28.10.1983	Borah Tepesi,Idaho	6.87(Mw)(R4)	2.3	48.75	26.4	1.47
23.12.1985	Nahanni, Kanada	6.75(Mw)(R4)	1.5	34.67	16.49	5.16

Tablo 4'ün devamı

Tarih	Lokasyon	Büyüklik	Sismik Moment (10 ²⁶ dyne-cm)	Yırtılma Boyu (m)	Yırtılma Genişliği (m)	Yerdeğiştirme Dmax (m)
17.01.1994	Northridge,Kaliforniya	6.66(Mw)(R4)	1.1	18.0	21.0	2.86
05.10.1985	Nahanni,Kanada	6.63(Mw)(R4)	1.0	29.33	13.92	3.83
09.02.1971	San Fernando,Kaliforniya	6.53(Mw)(R4)	0.7	13.36	12.03	3.00
15.10.1979	Imperial Vadisi, Kaliforniya	6.43(Mw)(R4)	0.5	36.0	10.0	1.80
24.11.1987	Superstition,Kaliforniya	6.33(Mw)(R4)	0.35	20.0	8.05	1.86
24.04.1984	Morgan, Kaliforniya	6.18(Mw)(R4)	0.21	26.0	11.5	1.00
07.08.1986	NorthPalm,Kaliforniya	6.14(Mw)(R4)	0.18	20.0	13.3	0.45
1.10.1987	WhittierNarrows, Kaliforniya	5.97(Mw)(R4)	0.1	10.0	10.0	0.90
08.06.1979	Coyote Gölü,Kaliforniya	5.66(Mw)(R4)	0.035	5.5	4.57	1.20
20.10.2006	Manyas Depremi,Türkiye	4.7(Mw)(R5)	0.00174	1.50	1.0	0.12
24.10.2006	Gemlik Depremi, Türkiye	4.8(Mw)(R5)	0.00343	1.50	1.0	0.18

R1: Mohammadioun ve Serva, (2001) çalışması kaynak parametreleri

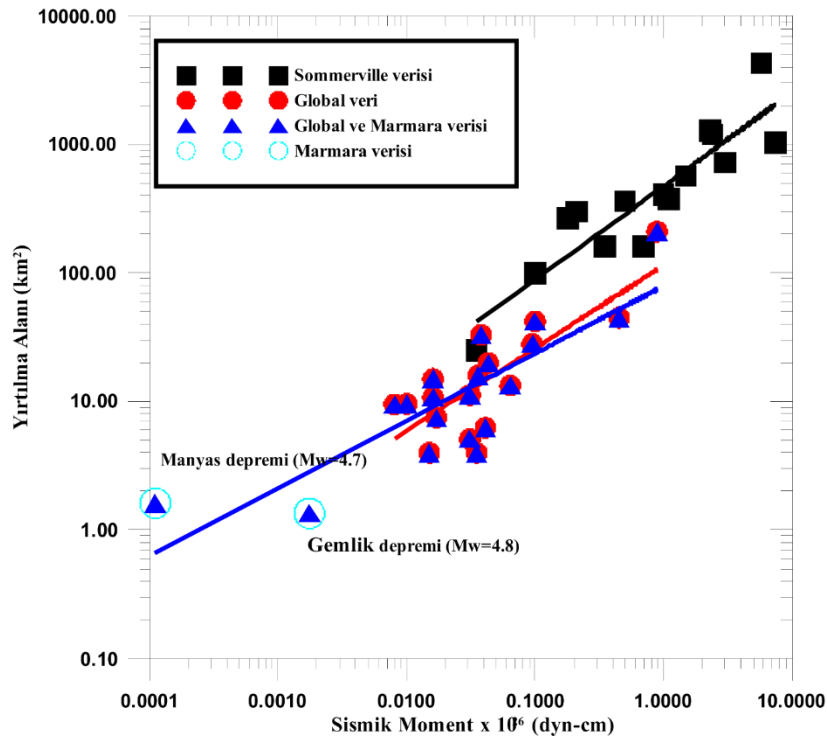
R2: Wells ve Coppersmith (1994) çalışması

R3: Cisim ve yüzey dalgası çalışmaları

R4: Somerville vd. (1999) çalışması kaynak parametreleri

R5: Bu çalışmadaki kaynak parametreleri

Ms: Yüzey dalgası büyüklüğü, Ml: Yerel büyüklük, Mw: Moment büyüklük



Şekil 9: Yırtılma alanı – Sismik Moment ilişkisi

Şekil 9'da, Somerville vd. (1999) tarafından önerilen sismik moment ve yırtılma alanı arasındaki üstel regresyon ilişkisi de gösterilmiştir. Kırmızı içi dolu daireler küresel ölçekli veri (Mohammadioun ve Serva 2001; Wells ve Coppersmith 1994) kullanılarak elde edilen kaynak parametrelerini, siyah içi dolu kareler (Somerville vd. 1999) çalışmasının orta büyüklükteki deprem kaynağı parametrelerini ve içi boş daireler ise bu çalışmada kullanılan Gemlik ve Manyas depremleri sismik moment-yırtılma alanı dağılımlarını ifade etmektedir. Genel olarak, orta büyüklükteki depremlerin yırtılma alanı, Somerville vd. (1999) tarafından çok üst limitlerde değerlendirilmiştir. Dolayısı ile bu çalışmaya ait sonuçlar bu değerlerin altında olmakla beraber benzer trende sahiptir.

Regresyon modelleri ağırlıklı olarak çok miktarda dağınık veriyi gösterir, bu durum belirli bir güvenilir model için deneysel ilişkinin doğruluğunu etkileyecektir. Uyuşmazlıkların güvenilirliği ve algoritmanın sonuçlarına ait doğruluğun derecesi faylanmanın türüne ve özellikle orta dereceli depremlerin meydana getiren tektonik yapıya bağlı olmakla beraber, veri kalitesi ve büyüklük değerlendirme ölçütleri ile ilgilidir. Bu çalışmada KYH sayısal verisi yanında model çözünürlüğünü iyileştirmek için geniş periyod hız verisi de kullanılmak istenmiştir. Ancak yeterli istasyon azimutal kapsama olmadığından geniş periyod ve kuvvetli yer hareketi verisi birlikte kullanımı mümkün olmamıştır.

Diğer yandan, bant geçişli süzgeçleme bant aralığı geniş periyod veri kullanımında uygun olmamıştır. Bu çalışmadan ortaya çıkan bulgulardan biri de orta büyüklükte depremlerin araştırılmasının iyi kalitede yakın alan KYH kayıtları gerektirmesidir. Bu nedenle, uzak episantral mesafelerde KYH kayıtlarından bazıları kullanılmamıştır.

Teşekkür

Bu çalışmanın bir kısmı TÜBİTAK ÇAYDAG 107Y322 No'lu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın gerçekleştirilmesinde emekleri olan Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Jeofizik Anabilim Dalı ve Bölgesel Deprem- Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi çalışanlarına ve çalışmanın gözden geçirilmesinde ve yaptıkları öneriler için de Ali Pınar'a teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Abdel-Fattah A., (2002), *Source characteristics of a moderate earthquake (M 4.9) using empirical Green's function technique*, Annals of Geophysics, 45(5), 575-585.
- Akaike H., Bernardo J.M., (Ed.), (1980), *Likelihood and the Bayes procedure*, in *Bayesian Statistics*, Univ. Press, Valencia, Spain. 142-166.
- Ambraseys N.N., (2002), *The seismic activity of the Marmara Sea region over the last 2000 years*, Bulletin of Seismological Society of America, 92 (1), 1–18.
- Armijo R., 22 co-authors, (2005), *Submarine fault scarps in the Sea of Marmara pullapart (North Anatolian Fault): implications for seismic hazard in Istanbul*, Geochemistry Geophysics Geosystem, 6(6), 1-29, doi:10.1029/2004GC000896.
- Barka A., (1992), *The North Anatolian Fault Zone*, Annales Tectonicae, 6, 164-195.
- Barka A.A., (1996), *Slip distribution along the North Anatolian Fault associated with the large earthquakes of the period 1939 to 1967*, Bulletin of Seismological Society of America, 86, 1238-1254.
- Bekler T., Gürbüz C., (2008), *Insight into the Crustal Structure of the Eastern Marmara Region, NW Turkey*, Pure and Applied Geophysics, 165, 295-309.
- Bekler F.N., Ozel N.M., Birgöre G., (2009), *Rupture Characteristics of The Two Moderate Size Earthquakes on Southern Marmara, Turkey*, AGU 2009 Fall Meeting, San-Francisco, *Eos Trans. AGU*, 90(52), Fall Meet. Suppl., Abstract S31A-1694.
- Bekler F.N., Ozel N.M., Birgöre G., (2011), *Rupture Process of Two Moderate Size Earthquakes in The Southern Marmara Region*, AGU 2011 Fall Meeting, San-Francisco, Abstract S43C-2286.
- Birgören G., Sekiguchi H., Irikura K., (2004), *Rupture model of the 1999 Duzce, Turkey, earthquake deduced from high and low frequency strong ground motion data*, Geophysical Research Letters, 31, L05610.
- Bouchon M., (1981), *A simple method to calculate Green's function forelastic layered media*, Bulletin of Seismological Society of America, 71, 959– 971.
- Bozkurt E., (2001), *Neotectonics of Turkey—a synthesis*, Geodinamica Acta, 14, 3-30.
- Dziewonski A.M., Anderson D.L., (1981), *Preliminary Reference Earth model*, Phys. Earth Planet. Inter., 25, 297–356.
- Flerit F., Armijo R., King G.C.P., Meyer B., Barka A., (2003), *Slip partitioning in the Sea of Marmara pull-apart determined from GPS velocity vectors*, Geophysical Journal International 154, 1–7.
- Fukahata Y., Yagi Y., Matsu'ura M., (2003), *Waveform inversion for seismic source processes using ABIC with two sorts of prior constraints: Comparison between proper and improper formulations*, Geophysical Research Letter, 30(6), doi:10.1029/2002GL016 293.
- Geller R. J., Takeuchi N., (1995), *A new method for computing highly accurate DSM synthetic seismograms*, Geophysical Journal International, 123, 449–470.
- Gürbüz C., Aktar M., Eyidoğan H., Cisternas A., Haessler H., BarkaA., Ergin M., Türkelli N., Polat O., Üçer B., Kuleli H.S., Baris Ş., Kaypak B., Bekler T., Zor E., Biçmen F., Yörük A., (2000), *The seismotectonics of the Marmara Region (Turkey): Results from a microseismic experiment*, Tectonophysics, 316, 1–17.
- Helmstetter A., Kagan Y., Jackson D., (2005), *Importance of small earthquakes for stress transfers and earthquake triggering*, Journal of Geophysical Research, 110, B05S08, doi: 10.1029/2004JB003286.
- Ichinose G. A., Smith K.D., Anderson J.G., (1997), *Source parameters of the 15 November 1995 Border Town, Nevada, Earthquake Sequence*, Bulletin of Seismological Society of America, 87, 652-667.
- Irmak T.S., Gresser H., Ozer M.F., Woith H., Baris S., (2007), *The October 2006 Gemlik Earthquake (M:5.2)*, Geophysical Research Abstract, 9, s10212
- Karabulut H., Ozalaybey S., Taymaz T., Aktar M., Selvi O., Kocaoglu A., (2003), *A tomographic image of the shallow crustal structure in the Eastern Marmara*, Geophysical Research Letters, L018074.
- Kennett B.L.N., Engdahl E.R., (1991), *Traveltimes for global earthquake location and phase identification*, Geophysical Journal International, 105, 429–465
- Kennett B.L., Kerry N.J., (1979), *Seismic waves in a stratified half space*, Geophysical Journal Royal Astronomical Society, 57, 557–583.
- Marsan D., (2005), *The role of small earthquakes in redistributing crustal elastic stress*, Geophysical Journal International, 163, 141-151.
- Mohammadioun B., Serva, L., (2001), *Stress drop, slip type, earthquake magnitude—and seismic hazard*, Bulletin of the Seismological Society of America, 91, 694 – 707.
- Okay A.I., Kaşlılar-Özcan A., İmren C., Boztepe-Güney A., Demirbağ E., Kuşçu, İ., (2000), *Active faults and evolving strike-slip basins in the Marmara Sea, northwest Turkey: a multi-channel reflection study*, Tectonophysics, 321, 189–218.
- Selim H., Tüysüz O., Barka A., (2006), *Güney Marmara Bölümünün Neotektoniği*, ITU dergisi/d mühendislik, C5, 1, 151-160.

- Somerville P., Irikura K., Graves R., Sawada S., Wald D., (1999), *Characterizing Crustal Earthquake Slip Models for the Prediction of Strong Ground Motion*, Bulletin of the Seismological Society of America, 70 (1), 59-80.
- Sekiguchi H., Irikura K., Iwata T., (2000), *Fault geometry in the rupture termination of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake*, Bulletin of the Seismological Society of America, 90, 117– 133.
- Şaroğlu F., Emre O., Kuşçu I., (1992), *Türkiye'nin Aktif Tektonik Haritası*, Maden Teknik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA), Ankara, Turkey.
- Şengör, A.M.C., (1979), *The North Anatolian transform fault: its age, offset and tectonic significance* Journal of the Geological Society, 136 (3), 269–282.
- Rebollar C. J., Quintanar L., Castro R., Day R., Madrid S.M., Brune J., Astiz J.N., Vernon L.F., (2001), *Source Characteristics of a 5.5 Magnitude Earthquake that Occurred in the Transform Fault System of the Delfin Basin in the Gulf of California*, Bulletin of the Seismological Society of America, 91, 781-791.
- Tinti E., Fukuyama E.A., Cocco M., (2005), *A kinematic source time function compatible with earthquake Dynamics*, Bulletin of the Seismological Society of America, 95, 1211– 1123.
- Tsukuda E., Herece E., Kuşçu I., (1988), *Some geological evidence on activity of the western North Anatolian fault, Geyve, İznik, Gemlik area*, ITIT Project 8513, 68-91.
- Wells D. L., Coppersmith K.J., (1994), *New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacement*, Bulletin of the Seismological Society of America, 84, 974-1002.