

BURSA İVME-ÖLÇER AĞINDA (BUSNET) KAYDEDİLEN DEPREMLERİN KAYNAK PARAMETRELERİNİN KESTİRİLMESİ

Estimation of the Source Parameters from the Earthquake Records of Bursa Acceleration Network (Busnet)

Orhan D. POLAT*

ÖZET

Bursa SM2 Ağında (BUSNET) algılanmış küçük depremlerin kaynak parametrelerinin bulunması için ivme ve yerdeğiştirme spektrumları incelenmiştir. BUSNET ağında Bursa ve çevresinde kurulmuş 5 adet ivme-ölçer sismografi bulunmaktadır. İvme sismogramları genellikle Permian yaşlı kireçtaşları ve Neojen yaşlı birimler üzerinde kurulmuştur. Episantr uzaklığı 100 km den küçük olan 40 depremin üç bileşenli sayısal ivme sismogramları elde edilmiştir. Kaynak boyutu, sismik moment ve gerilme düşümü gibi kaynak parametrelerinin belirlenmesi amacıyla ve spektrum eğiminin hızla azaldığı F_{max} frekansının varlığını saptamak için SH ivme ve yerdeğiştirme spektrumları incelenmiştir. f_0 ile F_{max} parametrelerinin geçerliliği ivme ve yerdeğiştirme spektrumları üzerinde araştırılmıştır. Ayrıca çeşitli Q_s soğrulma modelleri için spektral parametrelerdeki değişim incelenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan depremlerin yerleri saptanırken Ezen (1973)'in tabakalı yer kabuğu modeli kullanılmıştır. İvme kayıtları iki kez integre edilerek yerdeğiştirme kayıtları elde edilmiştir. İncelenen sismogramlar %10 luk bir kosinüs penceresinden geçirildikten sonra spektrum hesabı için FFT uygulanmıştır. Saptanan spektrumların birçoğu, yalın bir kaynak spektrumunun kestirilmesi için önerilen Brune spektrumundan farklılık göstermektedir. Kökeni ve fiziksel mekanizması tartışmalı olan F_{max} parametresi spektrumlarda gözlenmiştir. İvme kaydından yerdeğiştirme kaydına geçmeksizin köşe frekansı f_0 değerinin bulunabileceği gösterilmiştir. F_{max} parametresine yer ve kaynak etkisi açık olarak gösterilememiştir. Kinematik ve dinamik kaynak parametreleri arasındaki bağıntılar saptanmıştır.

ABSTRACT

The acceleration and displacement spectra of small earthquakes detected by BURSA SM2 NETWORK (BUSNET) are studied to infer source parameters. The network consists of 5 acceleration seismographs deployed in around Bursa city. The acceleration recorders were installed mainly on the sites where thick Permian limestone and thick Neogene formations exposed. Threecomponent digital accelerograms obtained for 40 earthquakes at epicentral distances less than 100 km were analyzed. SH acceleration and displacement spectra were examined to infer source parameters such as source size, seismic moment and stress drop, and to determine the existence of the cutoff frequency F_{max} beyond which the spectral amplitudes decay sharply. The validity of f_0 and F_{max} were tested on the acceleration and displacement spectra. The effect of various Q_s models on the source spectra is also discussed.

The earthquakes used in this study are located for a layered crustal structure. SH acceleration seismograms were integrated twice to get the displacement records. The resulting time series were multiplied by 10 percent cosine window and FFT was applied to calculate the spectra. I found that the appearance of the most of the source spectra depart from Brune's source model which predicts simple source spectrum. Signature of F_{max} phenomena of which the origin and the physical mechanism is controversy, is observed from the acceleration spectra. It is shown that the corner frequency f_0 can be determined from the acceleration record without converting the signal to displacement record. I could not observe clear evidences of site and source effects on the F_{max} parameter. The equations between kinematic and dynamic source parameters are determined.

GİRİŞ

Depremlerin ölçeklendirilmesi ve deprem kaynak özelliklerinin daha iyi tanınması amacıyla yapılan çalışmalar sonunda, depremlerin çok sayıda kaynak parametresi ile tanımlanabileceği öngörülmüştür. Deprem kaynağı ile ilgili bilgileri elde etmek için deprem kayıtlarının spektrumları incelenmektedir. İlk defa Haskell (1964), spektrumlara ait spektral parametrelerin değiştiğini gözlemlemiş ve deprem kaynağını spektral ortamda ölçeklendirmeye çalışmıştır. Aki (1967), Haskell (1964)'in önerdiği kaynak modeline dayanarak deprem kaynak spektrumunu, fay düzlemi üzerindeki dislokasyonun özilişkisi cinsinden açıklamış ve büyüklük (magnitüd, M) - sismik moment (M_0 , dyne.cm) arasındaki ölçeklendirmeyi tartışmıştır. Brune (1970,1971) bütün bu varsayımların dışında deprem kaynağını Dairesel Kaynak Modeli ile açıklamaya çalışmıştır. Savage (1972), bu kaynak modelini kullanarak köşe frekansı (f_0 , Hz) ile fay boyutu (r , km) değişimini incelemiş ve genliğin frekans ile ters orantılı azalmasının gerilme düşümü ($\Delta\sigma$, bar) üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Archuleta ve diğ. (1982), bir depremin birden fazla istasyonda kaydedilmesi durumunda, elde edilen spektral parametreleri kullanarak ortalama deprem kaynak parametrelerini hesaplamıştır. Bütün bu spektral parametreler yer değiştirme spektrumundan elde edilmiştir. Bu çalışmaların dışında, ivme ve yer değiştirme spektrumlarında köşe frekansını takiben belli bir frekans değerinden sonra genliklerin çok daha hızlı olarak azaldığı ortaya çıkarılmıştır. Bu frekans değeri Hanks (1982) tarafından F_{max} olarak adlandırılmıştır. Bu parametrenin kökeninin kaynak mı yoksa ortam mı olduğuna ilişkin kesin kanıtlar bulunamamıştır.

Marmara bölgesi ve çevresinden elde edilen depremler için kaynak parametre çalışması Biçmen ve diğ. (1993) tarafından yapılmıştır. Brune (1970,71) kaynak modelinin esas alındığı bu çalışmada, büyüklüğü 2.5 - 4.1 arasındaki 84 depremin kaynak parametreleri hesaplanmıştır. Bu çalışmada P ve S fazlarına ait köşe frekansı değerlerinin 1.8 - 5.5 Hz, sismik momentin 1017 - 1019 dyne.cm, sismik enerjinin 107 - 1011 erg, gerilme düşümünün ise 10-5 - 10-1 bar arasında değiştiği belirtilmiştir. Polat (1995), "Kuzeybatı Anadolu Projesi" kapsamında elde edilen deprem verilerini kullanarak, Bursa ve çevresindeki mikrodeprem aktivitesinin şehrin güneydoğusunda kümelendiğini tespit etmiştir. Ayrıca mikrodepremlerin kaynak özelliklerini incelemiş ve F_{max} parametresini irdelemiştir. Aktar ve diğ. (1996), Bursa bölgesi ve çevresine ait mikrodepremlerin dağılımını incelemiş ve aktivitenin 3 ayrı bölgede kümelendiğini tespit etmiştir. Eyidoğan ve diğ. (1997), bölgeden elde edilen verilere soğrulma (attenuation) nın etkisini incelemiş ve frekans ile koda Q arasındaki değişimi Qc

(f)= $41 \cdot f^{0.84}$ bağıntısı ile vermişlerdir. Sellami ve diğ. (1997), magnitüdü 4'den küçük Bursa bölgesi ve çevresi depremlerinin odak mekanizması çözümlerini inceleyerek bölgenin sismotektonik yapısı hakkında çalışmalar yapmışlardır. Bölgenin soğrulma özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla bilimsel çalışmalar halen sürdürülmektedir.

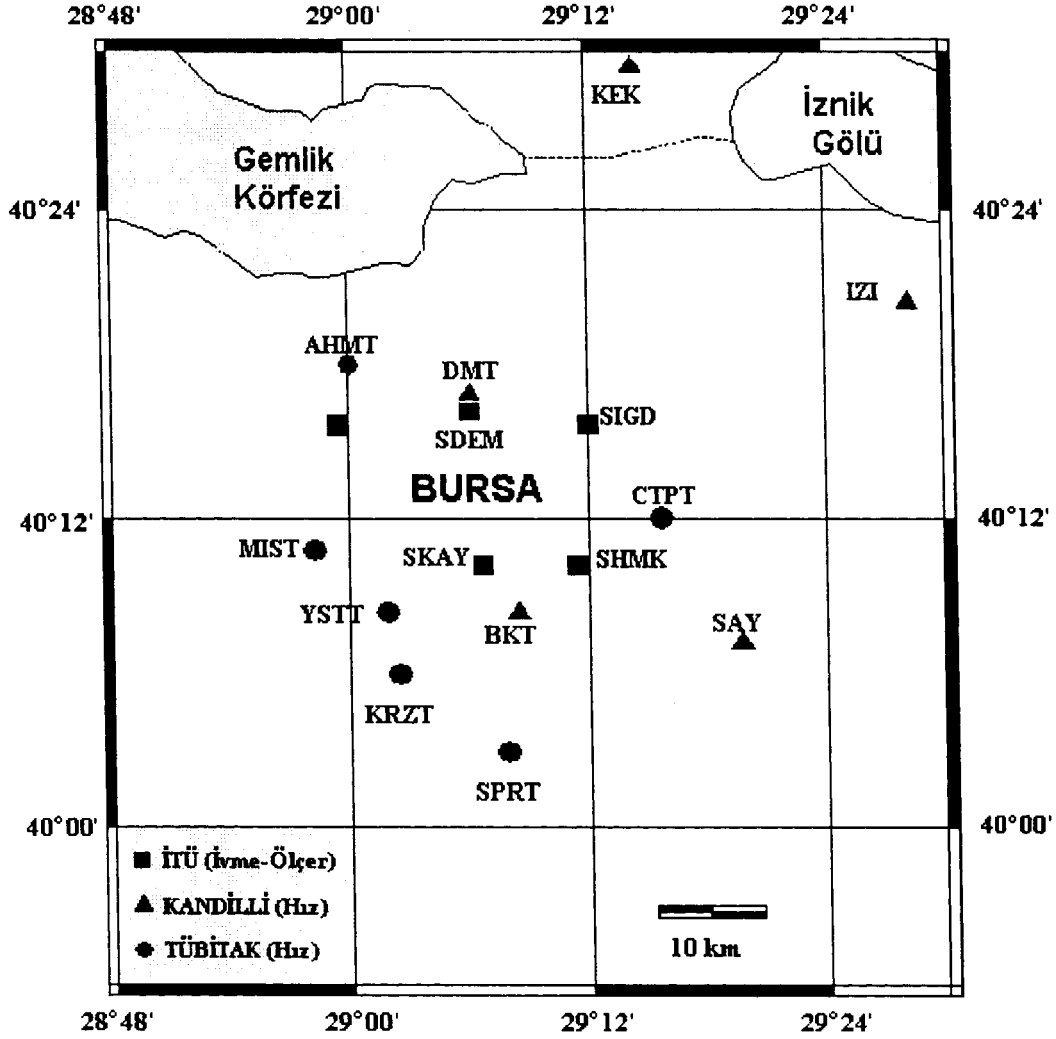
JEOLOJİ

Bursa yöresi, Türkiye'nin tektonik birliklerinden olan Sakarya kıtasının, Batı Anadolu'ya ait bölümünün kuzeyinde yer alır. Uludağ masifinin kuzeybatı eteğinde kalan bölge Permiyen, Mesozoyik ve Senozoyik yaşlı kırıntılı sedimanlarla ve fosilli kireçtaşlarıyla kaplıdır (Ketin, 1983). Bursa ovası genel olarak bir graben yapısına sahiptir. Ovanın etrafında çeşitli jeolojik birimler bulunmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan kayıt istasyonları çeşitli jeolojik birimler üzerindedir. Demirtaş (SDEM) deprem istasyonu ovanın kuzeyinde; genç alüvyonlar, Permiyen yaşlı alüviyal çökeller ve Neojen örtü birimleri arasında yer alan kumtaşları üzerinde bulunur. Ovanın batısında kalınlığı tam olarak tesbit edilemeyen Neojen yaşlı birimler yer alır. Hamitler (SHMT) deprem istasyonu, bölgede kil-kumçakıtaşı ardalanması şeklinde derinlere doğru devam eden bu birimler üzerinde bulunmaktadır. Ovanın güneyinde, Uludağ eteklerinde mermer, gnays ve kireçtaşlarından oluşan birimler yerleşmiştir. Kaplıkaya (SKAY) deprem istasyonu Uludağ'ın eteklerinde yer alan kristalize kireçtaşı blokları üzerindedir. Ovanın güneydoğusunda genç alüvyonlar bulunur. Hamamlıkızık (SHMK) deprem istasyonu Uludağın kuzey yamacındaki sığ olan iri taneli yamaç molozları (yığılım malzemesi) üzerine yerleştirilmiştir. Iğdır (SIGD) deprem istasyonu ise, ovanın hemen kuzeydoğusunda yer alan Permiyen yaşlı kalın kireçtaşı blokları üzerine kurulmuştur. Ova etrafına yerleştirilmiş olan ivmeölçerler ile birlikte, Bursa ve çevresinin sismotektonik araştırmalarına katılan TÜBİTAK-MAM Yer Bilimleri Bölümü ve Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü hız kayıtçı istasyonları Şekil 1' de gösterilmiştir.

VERİLER

Bu çalışmada kullanılan ivme sismogramları Bursa bölgesinde kurulmuş 5 adet ivme-ölçer sismografı ile elde edilmiştir. Sismograflar İsviçre SIG-SA firmasının SM2 modeli sayısal ve üç bileşenli kayıtçılarıdır. Örneklem frekansı 128 Hz olan 12 bitlik kayıtçıların frekans tepki fonksiyonu 0.2-30 Hz arasında düzdür. Kayıtçıların bu çalışmada tetikleme eşik değerleri 0.4 - 0.8 mg arasında kalmıştır.



Şekil 1. Bursa ve çevresinde kurulmuş deprem istasyonlarının dağılımı.

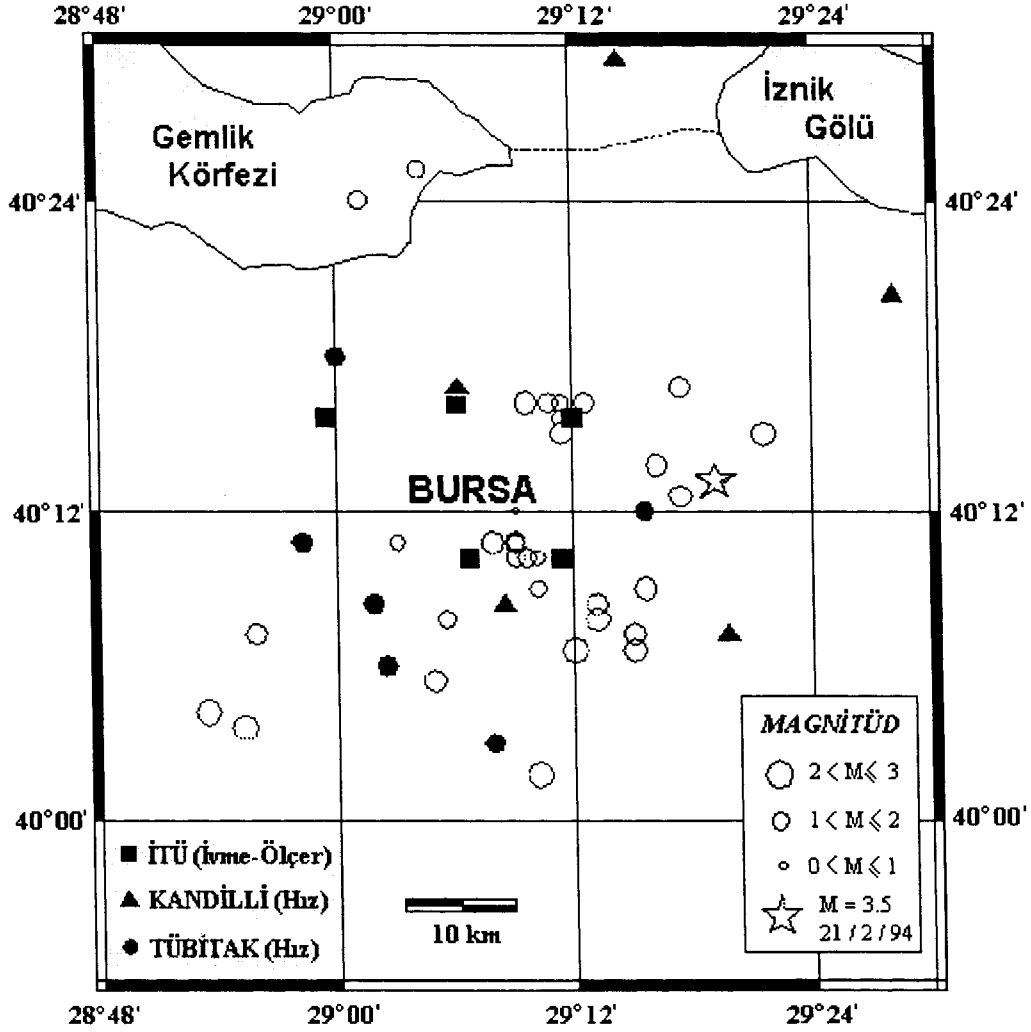
Fig. 1. Map of the seismic stations deployed in and around Bursa region.

Kasım 1992 ile Şubat 1994 arasında olmuş 40 deprem için elde edilen ivme verilerinin P ve S fazlarının varışları okunmuştur. Bu veri ile birlikte TÜBİTAK ve Kandilli Rasathanesine ait bölgede bulunan diğer deprem istasyonlarından elde edilen varış zamanları bir araya getirilerek, depremlerin yerleri HYPO71PC (IASPEI, 1989) programı kullanılarak belirlenmiştir. Depremlerin büyüklükleri deprem kayıt süreleri kullanılarak elde edilmiştir. Çalışmada kullanılmak üzere RMS (ortalama karekök hata) değerleri küçük olan 40 deprem seçilmiştir (RMS < 1). Seçilen depremlerin lokasyon (yer bulma) işleminin yapılmasıyla elde edilen harita Şekil 2'de verilmiştir; ancak bu harita depremsellik haritası olarak algılanmamaktadır.

İVME KAYITLARININ ANALİZİ

Spektral Parametrelerin Bulunması

Spektrumların hesaplanması PITSA (IASPEI, 1991) isimli paket program kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Spektrum hesabı öncesi veriler üzerinde bazı işlemler yapılmıştır. 3 bileşen olarak kaydedilen ivme kayıtlarının (Şekil 3) offset düzeltmeleri yapıldıktan sonra, bu sismogramların trapezoidal (yamuk) kuralına göre integralinin hesaplanmasıyla hız sismogramı ve yerdeğiştirme sismogramı bulunmuştur (Şekil 4). Bu sismogramlar üzerinde S dalgasına ait 3 yada 4 sn'lik veri kullanılarak, SH ivme ve yerdeğiştirme bileşenleri elde edilmiştir. SH verileri daha sonra %10 işleçli kosinüs penceresi ile çarpılmış ve Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) kullanılarak spektrumları hesap-



Şekil 2. Bu çalışmada ivme kayıtları kullanılan depremlerin dağılımı.

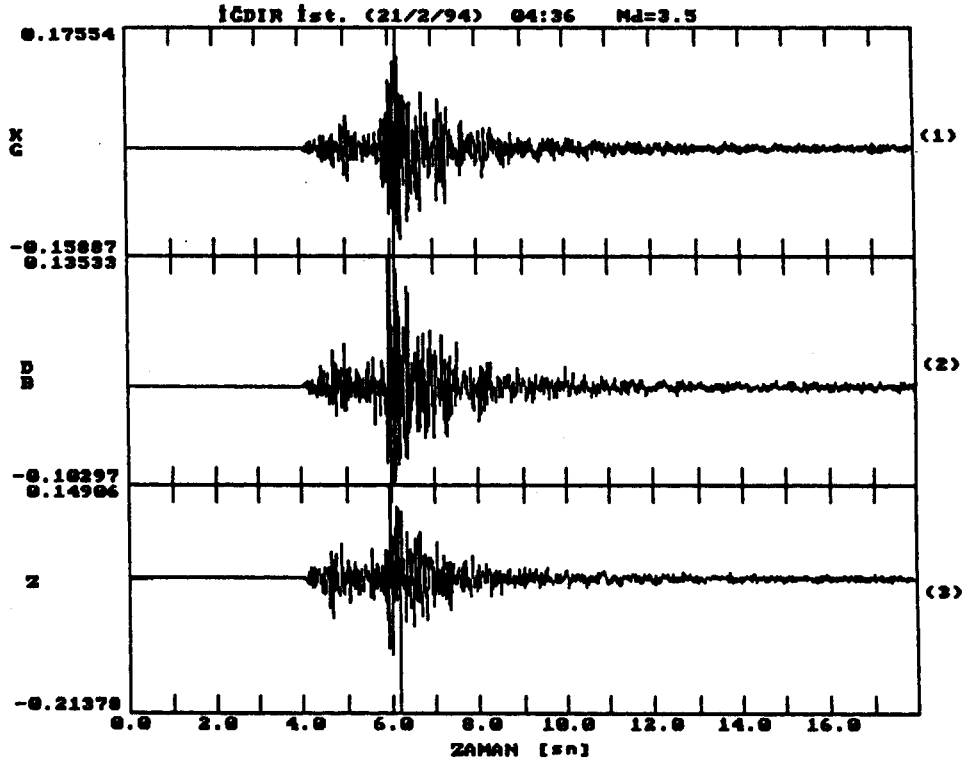
Fig. 2. Epicenters of the earthquakes of which the seismograms are studied.

lanmıştır. Köşe frekansı f_0 ve F_{max} parametreleri ivme ve yerdeğiştirme, spektral düzey (Ω_0) ise sadece yerdeğiştirme spektrumlarından gözle okunmuştur. Her iki spektrumdan elde edilen köşe frekansı f_0 ve F_{max} parametreleri karşılaştırılarak benzer ve farklı yanları ortaya konulmuştur. Brune (1970, 1971)'ün Dairesel Kaynak Modeli esas alınarak ivme ve yerdeğiştirme verilerinin spektrumlarından, kaynak parametreleri belirlenmeye çalışılmış ve her iki spektrumdan elde edilen kaynak parametrelerinin uyumu incelenmiştir.

Sismik moment M_0 , yerdeğiştirme spektrumundan okunan spektral düzey (Ω_0) değeri kullanılarak hesaplanmıştır. Aralarındaki ilişki,

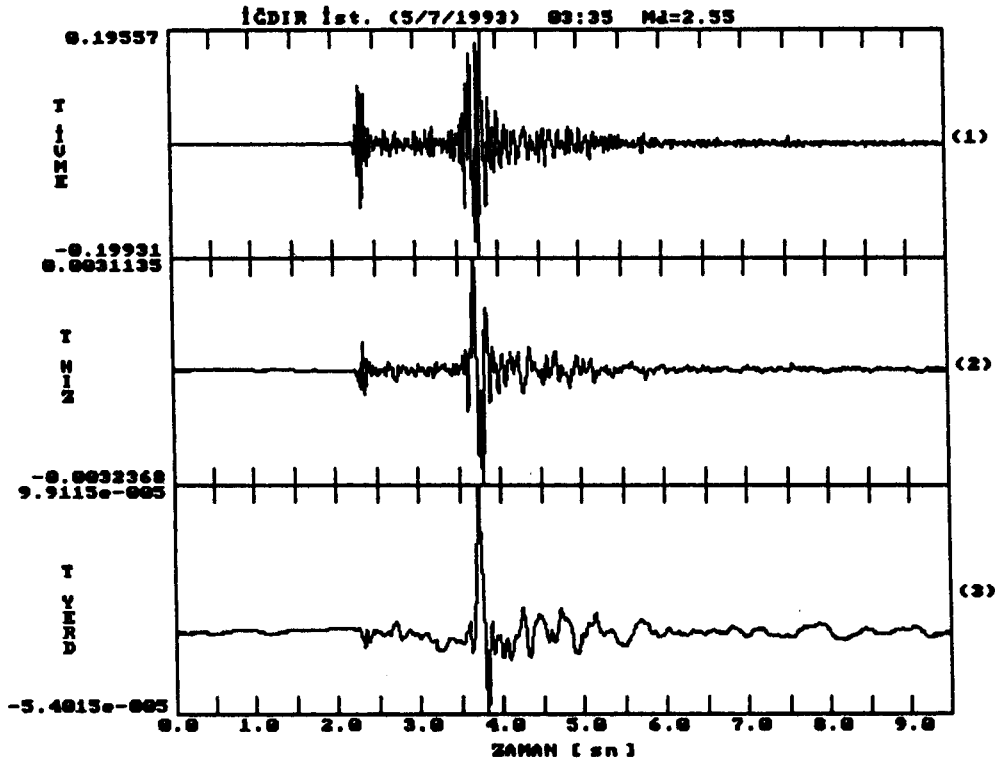
$$M_0(S) = \frac{\Omega_0 \cdot 4\pi \cdot \rho \cdot R \cdot \beta^3}{k_s \cdot R\beta(\theta, \phi)} \quad (1)$$

bağıntısı ile verilir (Keilis-Borok, 1960). Yukarıdaki bağıntıda verilen $M_0(S)$: SH dalgasından elde edilen sismik moment (dyne.cm), $\Omega_0(S)$: SH dalga spektrumundan okunan spektral düzey (cm.sn), ρ : Yoğunluk (gr/cm^3), R : Hiposantır (kaynak-alıcı) uzaklığı (km), β : S dalga hızı (km/sn), k_s : S dalgası için serbest yüzey düzeltmesi ve $R\beta(\theta, \phi)$: Yayınlam örüntüsü (radiation pattern) katsayısı'dır. Burada $\rho=2.7 gr/cm^3$, $\beta=3.3 km/sn$, $k_s=2$ ve $R\beta(\theta, \phi)=0.6$ alınmıştır. Dairesel kaynak alanının yarıçapı (r), köşe frekansı f_0 'dan hesaplanır ve aşağıdaki bağıntı ile verilir (Brune, 1971) :



Şekil 3. İncelenen depremlerin üç bileşenli ivme kayıtlarından bir örnek.

Fig. 3. An example of three component acceleration seismogram for one of the studied earthquakes.



Şekil 4. Bir depremin döndürülerek elde edilmiş SH sismogramının ivme, hız ve yerdeğiştirme kaydı.

Fig. 4. Acceleration, velocity and displacement seismogram of an rotated earthquake record (SH).

$$r(S) = \frac{2.34 \cdot \beta}{2\pi \cdot f_0(S)} \quad (2)$$

Bu eşitlikte $r(S)$: Dairesel kaynak alanının yarıçapı (km), $f_0(S)$: SH dalga spektrumundan okunan köşe frekansıdır. Gerilme düşümünü ($\Delta\sigma$), sismik moment ve kaynak yarıçapı ile ifade etmek mümkündür. Aralarındaki ilişki,

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \cdot \frac{M_0}{r^3} \quad (3)$$

bağıntısı ile verilir (Brune, 1971). Burada $\Delta\sigma$ =Gerilme düşümü (dyne=bar) dür. Yayılan S dalgasının toplam enerjisi E_s , köşe frekans ve spektral düzeyin fonksiyonu olarak hesaplanabildiği gibi, gerilme düşümü ve kaynak boyutunun fonksiyonu olarak da bulunabilir. Bu çalışmada S dalga enerjisi,

$$E_s = \frac{0.454 \cdot (\Delta\sigma)^2 \cdot r^3}{\mu} \quad (4)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır (Hanks and Wyss, 1972). Yukarıdaki eşitlikte E_s : Sismik S dalga enerjisi (dyne.cm), μ : Rijidite (katılık) katsayısı (dyne.cm²) dir. Burada $\mu=3 \cdot 10^{11}$ alınmıştır.

Köşe frekans f_0 ve F_{max} parametreleri, yerdeğiştirme verilerine geçilmeksizin ivme spektrumundan okunmaya çalışılmıştır. Fakat bu iki parametre arasında karşılaştırma yapmak, benzer veya farklı yanlarını ortaya koymak amacıyla yerdeğiştirme spektrumlarından da f_0 ve F_{max} okuması yapılmıştır (Çizelge 1). Özellikle ivme-ölçer sismograflar tarafından kaydedilen deprem verileri, yerdeğiştirme zaman verisi haline dönüştürülürken veri-işlem aşamaları sırasında orjinal halini yitirmektedir. Böylece kaynağa ait bilgilerin hassasiyeti de düşmektedir. Sadece ivme verilerini kullanarak kaynak parametrelerini kestirmeye çalışmanın amacı budur. İvme spektrumundan okunan köşe frekans f_0 ve buna bağlı olarak elde edilen kaynak parametrelerinin, yerdeğiştirme spektrumlarından bulunanlarla büyük bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür (Çizelge 2).

Soğrulmanın Etkisi

Deprem dalgaları kaynaktan çıktıktan sonra istasyona ulaşana kadar çeşitli jeolojik birimlerden geçer ve bazı frekansları soğurulur. Algılanan deprem kaydı üzerindeki yol ve frekans bağımlı soğurma etkisi aşağıdaki eşitlikle verilir (Aki, 1980).

$$Q_s = Q_0 \cdot f^n \quad (5)$$

Burada Q_s : Frekans bağımlı soğrulma, Q_0 : 1 Hz için sismik kalite faktörü, n ise frekans üstel katsayısıdır ($0 < n < 1.2$). Daha önce yapılmış çalışmalar (Chin and Aki, 1991; Iio, 1992) izlenerek SH dalgaları için $Q=100, 200, 300$ gibi çeşitli kalite faktörü değerleri kullanılarak soğrulma modelleri üretilmiş ve veriye uygulanarak spektrumlardaki değişimler incelenmiştir. Bu çalışmada veriler üzerindeki soğrulma etkisini gidermek amacıyla, frekans ortamında çeşitli Q_s fonksiyonları üretilmiştir. Q_s spektrumlarının üretilmesi için,

$$Q_s(R,f) = e^{\frac{\pi \cdot f \cdot R}{Q \cdot \beta}} \quad (6)$$

bağıntısı kullanılmıştır (Archuleta ve diğ., 1982). Burada $Q_s(R,f)$: SH dalgası için yol ve frekans bağımlı soğrulma spektrumu, f : Frekans (Hz), R : Hiposantır uzaklığı (km), Q : Kalite faktörü (1/km) dür.

Soğrulmanın etkisi araştırılırken episantrır uzaklığı da dikkate alınmıştır. Neojen yaşlı birimlerden geçen SH dalgalarının kalite faktörü Q için, 100 ve 200 gibi küçük değerler alınmıştır. Çünkü gevşek ve tutturulmamış birimler sert kayalara göre deprem dalgasını daha çok soğururlar. Bu nedenle Q kalite faktörü değerinin düşük alınması gerekir. SKAY ve SIGD gibi istasyonlarda ise, kayaç kalitesinin yüksek olmasından dolayı (paleozoyik kireçtaşı) kalite faktörü değeri $Q=300$ alınmıştır. Kayıtcı cihazın tepki spektrumu 0.2 - 30 Hz frekanslarında düz olduğundan, bu frekansların dışında kalan frekanslar için Q ' nun neden olduğu değişimler yorumlanmamıştır. Yol ve frekans bağımlı Q_s modellerinin üretilmesinde lokasyon programı yardımıyla hesaplanan gerçek episantrır (D) ve hiposantır (R) değerleri kullanılmıştır. Üretilen verilerin frekans aralığı 1 - 64 Hz arasındadır. Demirtaş (SDEM) deprem istasyonunda kaydedilen ve hiposantır uzaklığı $R=6$ km olan bir deprem verisinin ivme spektrumu, Şekil 5' de verilmiştir. Spektrumdan okunan köşe frekans f_0 ve F_{max} parametreleri şekil

Çizelge 1. Bursa ve çevresinde olmuş küçük depremlerin ortalama spektral parametre değerleri (Hata faktörleri Archuleta ve diğ. (1982) ne göre hesaplanmış ve $E\Omega_0$, Ef_0 , EF_{max} olarak gösterilmiştir. IST, depremi kaydeden istasyon sayısıdır).

Table 1. The list of the average spectral parameters for the small earthquakes occurred in around Bursa region (Error factors have been calculated by Archuleta et al. (1982) and shown as $E\Omega_0$, Ef_0 , EF_{max} . IST is the station number which recording the earthquake).

No	YERDEĞİŞTİRME SPEKTRUMU						İVME SPEKTRUMU				IST
	Spektral Düzey (cm.s ⁿ)		Köşe frekansı (Hz)		F_{max} (Hz)	E_{Fmax}	Köşe frekansı (Hz)		F_{max} (Hz)	E_{Fmax}	
	Ω_0	$E\Omega_0$	f_0	Ef_0			f_0	Ef_0			
1	5.41 E-04	2.29	4.27	1.18	26.0	1.1	3.29	1.09	22.8	1.2	2
2	2.71 E-04	3.17	6.04	1.28	15.0	1.0	5.01	1.93	14.4	1.4	3
3	6.17 E-04	5.10	4.82	1.19	15.1	1.1	4.86	1.30	16.9	1.2	4
4	2.73 E-05		7.60		30.0		5.00		20.0		1
5	6.69 E-05		7.00		30.0		4.00		13.0		1
6	4.55 E-05	2.30	6.71	1.52	27.4	1.1	5.66	1.63	22.4	1.2	2
7	1.43 E-04		3.40		24.0		5.00		20.0		1
8	1.37 E-04	3.04	6.53	1.38	26.2	1.3	4.45	1.20	22.2	1.1	3
9	9.92 E-05		1.70		22.0		4.40		26.0		1
10	1.00 E-04	3.28	6.14	1.13	28.3	1.1	3.74	1.30	20.2	1.7	3
11	6.46 E-04	1.83	4.48	1.43	23.2	1.1	4.63	1.46	22.5	1.1	3
12	1.27 E-04	3.25	4.93	1.23	24.7	1.2	4.07	1.31	23.5	1.2	3
13	9.97 E-05	4.50	4.93	1.23	24.7	1.0	4.66	1.06	19.5	1.2	3
14	1.93 E-04		5.00		25.0		5.00		25.0		1
15	4.53 E-05	2.67	4.90	1.33	21.9	1.6	4.00	1.00	20.4	1.4	2
16	4.47 E-05	1.88	3.74	1.10	27.0	1.1	5.48	1.14	26.9	1.1	2
17	9.20 E-05		8.00		26.0		10.0		32.0		1
18	6.67 E-04	2.13	5.28	1.38	21.6	1.4	4.02	1.40	20.4	1.3	5
19	5.74 E-04		6.00		19.0		3.00		15.0		1
20	2.47 E-05		5.00		27.0		7.00		17.0		1
21	1.61 E-04	2.97	4.93	1.23	21.8	1.2	4.16	1.42	20.0	1.0	3
22	3.99 E-05		4.00		28.0		10.0		28.0		1
23	1.36 E-04	3.58	5.85	1.61	25.4	1.2	3.91	1.29	15.9	1.4	3
24	3.21 E-04	4.94	5.48	1.14	24.8	1.2	4.24	1.09	21.5	1.0	2
25	6.95 E-05		3.00		28.0		7.00		30.0		1
26	4.25 E-05		4.00		23.0		8.00		23.0		1
27	1.65 E-04	2.25	2.74	1.14	24.5	1.3	4.90	1.33	23.2	1.4	2
28	6.86 E-05	1.52	3.46	1.23	24.1	1.3	5.29	1.49	25.7	1.2	2
29	2.14 E-04	3.93	5.29	1.49	21.9	1.1	5.74	1.06	20.0	1.1	2
30	6.84 E-05		2.00		30.0		13.0		30.0		1
31	1.87 E-07		10.0		21.0		9.00		20.0		1
32	1.98 E-04		4.00		21.5		4.00		20.0		1
33	1.99 E-04	2.10	3.46	1.23	22.8	1.2	3.87	1.44	18.3	1.5	2
34	7.50 E-05	3.76	7.35	1.33	23.7	1.3	7.42	1.75	21.9	1.1	2
35	1.22 E-04	2.66	6.37	1.36	23.2	1.2	6.28	1.67	19.7	1.5	4
36	1.31 E-05		7.00		30.0		8.50		28.0		1
37	9.41 E-05	3.44	4.90	1.33	24.2	1.2	4.24	1.09	23.7	1.3	2
38	4.39 E-05	2.63	4.00	1.00	15.5	1.5	5.92	1.27	14.7	2.0	2
39	6.34 E-05	2.76	5.48	1.56	18.2	2.0	6.78	2.11	17.3	2.2	2
40	5.90 E-03	2.50	2.39	1.23	16.2	1.7	2.24	1.22	16.0	1.7	4

Çizelge 2. Bursa ve çevresinde olmuş küçük depremlerin ortalama kaynak parametrelerinin dökümü (EMo: Sismik moment için hata faktörü)

Table. 2. The list of the average source parameters for the small earthquakes occurred in around Bursa region (EMo: Error factor for the seismic moment).

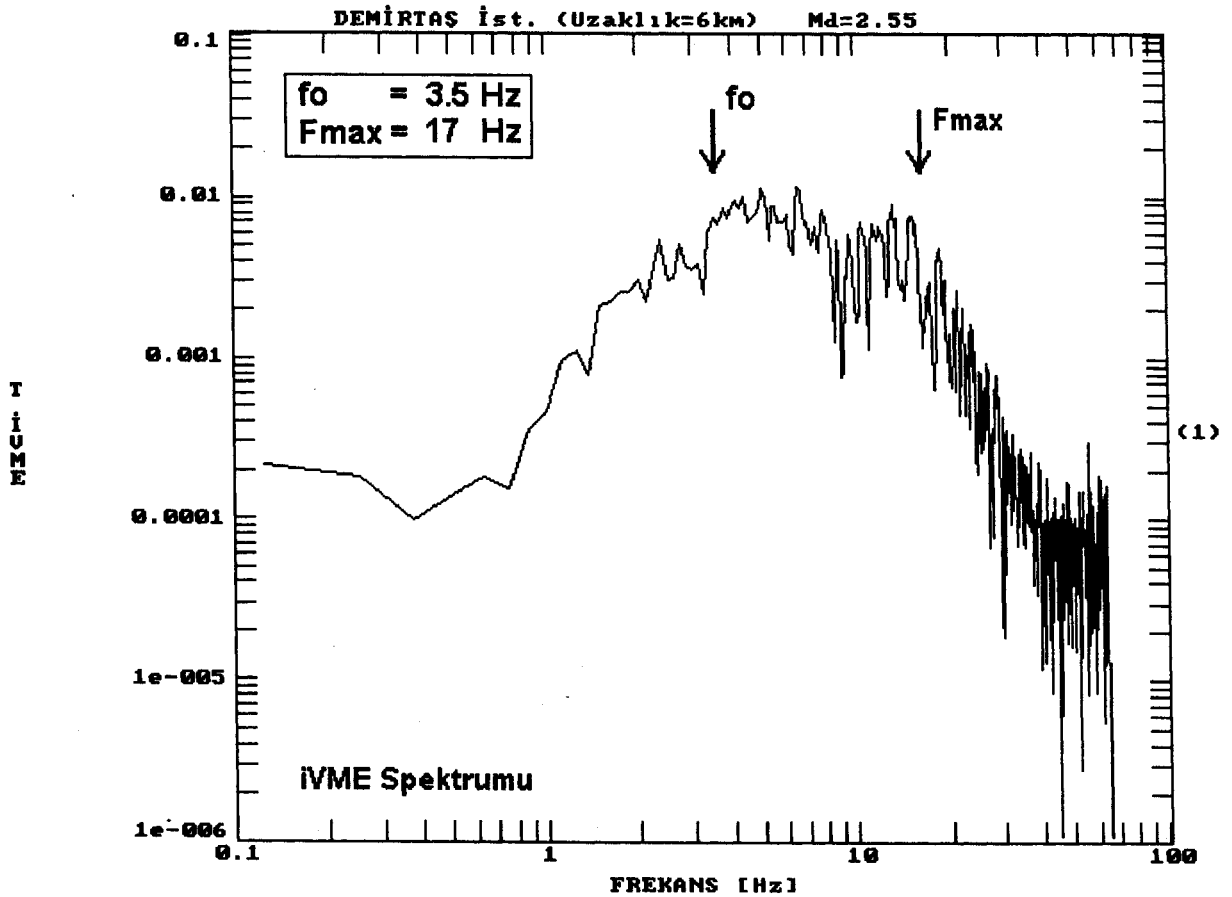
No	YERDEĞİŞTİRME SPEKTRUMU					İVME SPEKTRUMU			İST
	M_0 (<i>dyncm</i>)	EM_0	r (<i>km</i>)	$\Delta\sigma$ (<i>bar</i>)	Enerji (E_s) (<i>erg</i>)	r (<i>km</i>)	$\Delta\sigma$ (<i>bar</i>)	Enerji (E_s) (<i>erg</i>)	
1	5.50 E+20	1.21	0.29	9.89	3.36 E+15	0.37	4.61	1.68 E+15	2
2	2.75 E+20	1.37	0.21	13.44	2.45 E+15	0.28	5.60	1.02 E+15	3
3	6.27 E+20	1.57	0.26	16.02	6.65 E+15	0.26	15.79	6.56 E+15	4
4	2.77 E+19		0.16	2.87	5.26 E+13	0.25	0.82	1.50 E+13	1
5	6.80 E+19		0.18	5.50	2.47 E+14	0.31	1.03	4.61 E+13	1
6	4.63 E+19	1.39	0.19	2.90	8.88 E+13	0.23	1.65	5.07 E+13	2
7	1.45 E+20		0.36	1.35	1.30 E+14	0.25	4.28	4.12 E+14	1
8	1.40 E+20	2.01	0.19	8.33	7.71 E+14	0.28	2.80	2.59 E+14	3
9	1.01 E+20		0.72	0.12	7.79 E+12	0.28	2.02	1.35 E+14	1
10	1.01 E+20	2.36	0.20	5.47	3.69 E+14	0.34	1.18	7.97 E+13	3
11	6.57 E+19	1.40	0.29	1.22	5.30 E+13	0.28	1.32	5.73 E+13	3
12	1.29 E+20	2.42	0.25	3.49	2.98 E+14	0.31	1.90	1.62 E+14	3
13	1.01 E+20	3.07	0.25	2.75	1.84 E+14	0.26	2.41	1.61 E+14	3
14	1.96 E+20		0.25	5.76	7.46 E+14	0.25	5.76	7.46 E+14	1
15	4.60 E+19	1.79	0.26	1.20	3.66 E+13	0.31	0.69	2.12 E+13	2
16	4.54 E+19	1.78	0.33	0.56	1.68 E+13	0.23	1.74	5.23 E+13	2
17	9.35 E+19		0.15	11.28	6.98 E+14	0.12	22.03	1.36 E+15	1
18	6.78 E+20	1.85	0.24	20.69	9.28 E+15	0.32	9.04	4.05 E+15	5
19	5.83 E+20		0.20	29.69	1.15 E+16	0.41	3.71	1.43 E+15	1
20	2.51 E+19		0.25	0.74	1.23 E+13	0.18	2.03	3.38 E+13	1
21	1.64 E+20	1.85	0.25	4.45	4.83 E+14	0.31	2.47	2.68 E+14	3
22	4.05 E+19		0.31	0.61	1.64 E+13	0.12	9.56	2.56 E+14	1
23	1.38 E+20	2.28	0.23	5.29	4.84 E+14	0.32	1.83	1.68 E+14	3
24	3.27 E+20	2.35	0.23	12.49	2.70 E+15	0.29	5.85	1.26 E+15	2
25	7.06 E+19		0.41	0.45	2.10 E+13	0.18	5.71	2.67 E+14	1
26	4.32 E+19		0.31	0.65	1.86 E+13	0.15	5.21	1.49 E+14	1
27	1.68 E+20	1.98	0.45	0.80	8.93 E+13	0.26	4.38	4.87 E+14	2
28	6.97 E+19	1.51	0.36	0.66	3.05 E+13	0.24	2.17	1.00 E+14	2
29	2.17 E+20	2.28	0.24	6.76	9.73 E+14	0.21	9.68	1.39 E+15	2
30	6.95 E+19		0.61	0.13	6.03 E+12	0.09	35.99	1.66 E+15	1
31	1.90 E+17		0.12	0.04	5.63 E+09	0.14	0.03	4.11 E+09	1
32	2.02 E+20		0.31	3.04	4.06 E+14	0.31	3.04	4.06 E+14	1
33	2.02 E+20	1.91	0.36	1.92	2.56 E+14	0.33	2.51	3.36 E+14	2
34	7.63 E+19	3.34	0.17	6.71	3.39 E+14	0.18	5.84	2.95 E+14	2
35	1.24 E+20	2.49	0.20	6.84	5.61 E+14	0.21	5.59	4.58 E+14	4
36	1.33 E+19		0.18	1.08	9.48 E+12	0.14	1.93	1.70 E+13	1
37	9.56 E+19	2.89	0.26	2.49	1.58 E+14	0.29	1.71	1.08 E+14	2
38	4.46 E+19	1.51	0.31	0.67	1.99 E+13	0.21	2.09	6.16 E+13	2
39	6.44 E+19	3.28	0.24	2.16	9.20 E+13	0.21	3.18	1.35 E+14	2
40	6.00 E+21	2.63	0.52	18.34	7.28 E+16	0.56	15.26	6.06 E+16	4

üzerinde gösterilmiştir. Aynı verinin yerdeğiştirme spektrumu ve bu spektrumdan okunan spektral parametreleri ise Şekil 6' da verilmiştir. İki veri karşılaştırıldığında, her iki spektrumdan okunan köşe frekansı f_0 ve F_{max} in birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca, aynı depremi kaydeden tüm istasyonlardan okunan ortalama spektral parametrelerin de uyumlu oldukları gözlenmiştir (Çizelge 1, No:18). Bu veri üzerinden soğurulmanın etkisini gidermek için, kalite faktörü $Q=200$, episantır uzaklığı 5 km alınmış ve ivme ile yerdeğiştirme spektrumları hesaplanmıştır (Şekil 7 ve Şekil 8). Şekillerde görüldüğü gibi, her iki spektrumda gözlenen f_0 ve F_{max} uyum içerisindedir.

Kaplıkaya (SKAY) deprem istasyonunda kaydedilen ve hiposantır uzaklığı $R=29$ km olan bir başka deprem verisinin ivme spektrumu Şekil 9' da, yerdeğiştirme spektrumu ise Şekil 10' da verilmiştir. Her iki spektrumdan elde edilen ortalama spektral parametreler uyumludur (Çizelge 1, No:3). Bu veri üzerinden yerin soğurma etkisini gidermek için, kalite faktörü $Q=300$, episantır uzaklığı ise 30 km olarak alınmıştır. Q düzeltmesi yapılmış ivme ve yerdeğiştir-

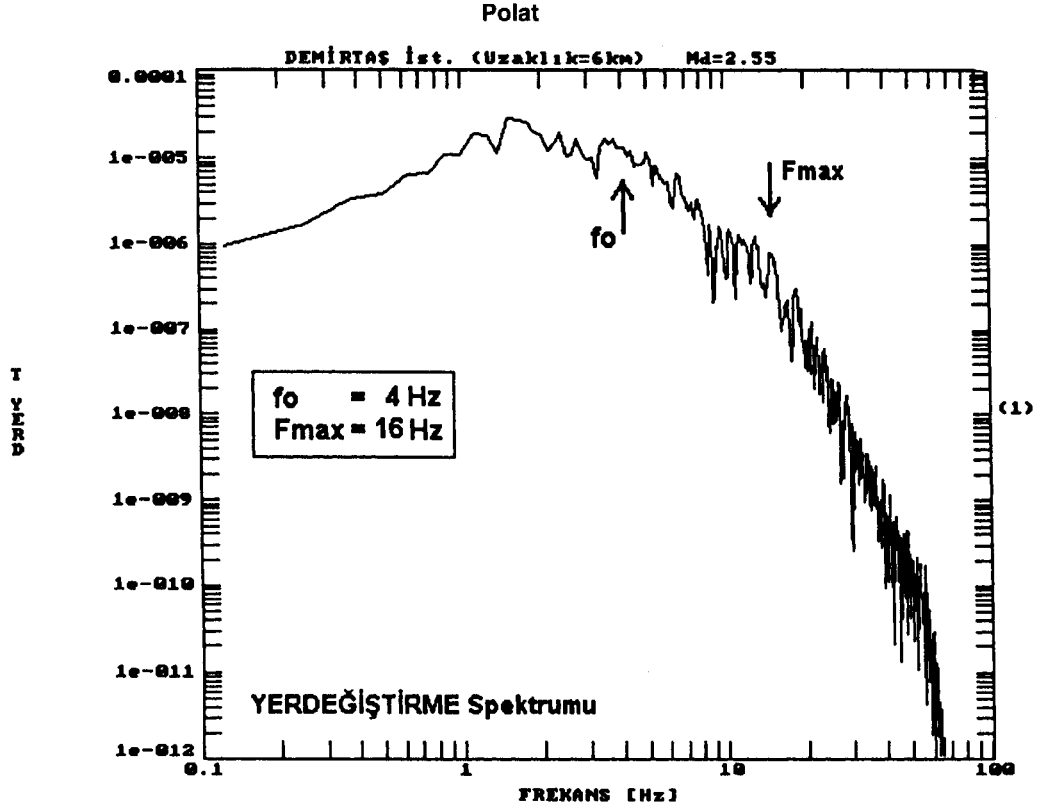
me spektrumları hesaplanarak, sırasıyla Şekil 11 ve Şekil 12 'de verilmiştir. İvme spektrumları kendi aralarında karşılaştırıldığında 30 Hz' den önceki küçük frekanslarda verinin karakterinde bir değişim gözlenmektedir. Yüksek frekanslara doğru verinin enerjisi azaldığından soğurulma artmakta, Q operatörü ise bunun önüne geçebilmek için genlikleri anormal büyütülmektedir. Ortamın soğurma etkisi giderildikten sonra Şekil 9' da gözlenen F_{max} ' in seçilebilirliği Şekil 11 de azalmıştır. Şekil 10 ve Şekil 12' de verilen yerdeğiştirme spektrumlarında, gerek F_{max} gerekse köşe frekansı f_0 rahatlıkla seçilmekte ve parametreler arasındaki uyum gözlenmektedir.

Yukarıdaki karşılaştırmalardan anlaşılmaktadır ki, yakın depremler için Q düzeltmesi uygulandığında spektrumdan elde edilen parametreler belirgin bir oranda değişmemektedir. Episantır uzaklığı arttıkça yüksek frekanslı enerji daha hızlı azaldığından, Q düzeltmesi uygulanmış spektrumların karakteri değişmekte, spektral parametre değerleri ise büyük oranlarda değişmemektedir.



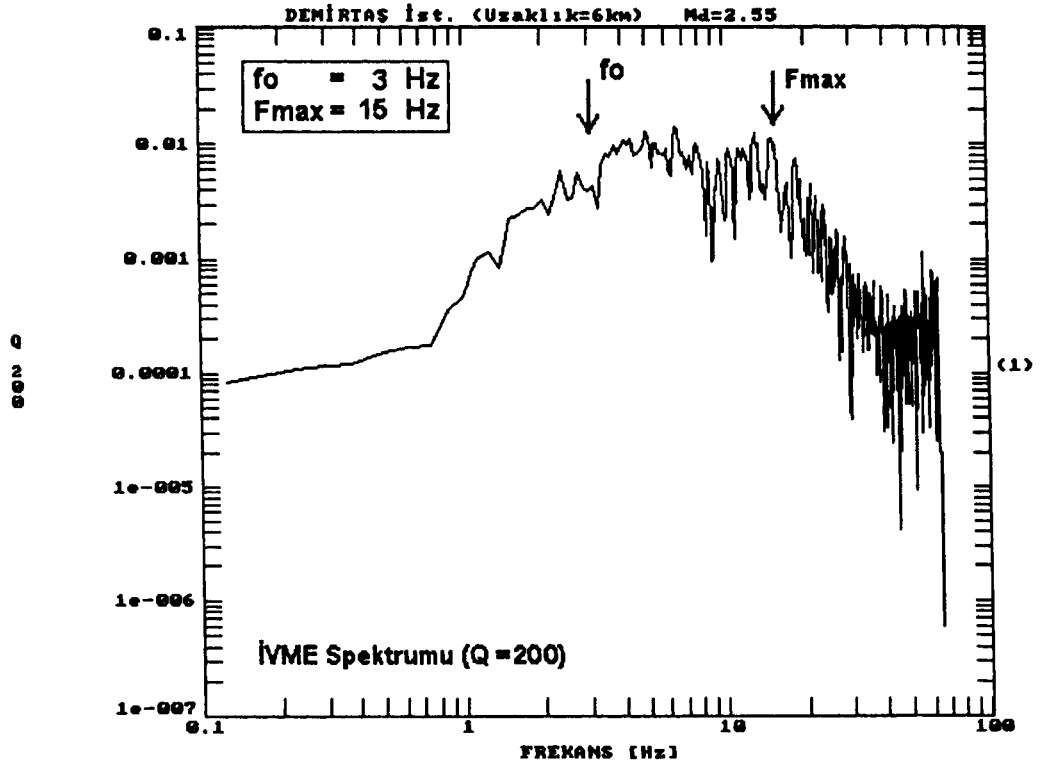
Şekil 5. SDEM istasyonunda kaydedilmiş bir depremin SH ivme spektrumu.

Fig. 5. SH acceleration spectrum of an earthquake recorded at the SDEM station.



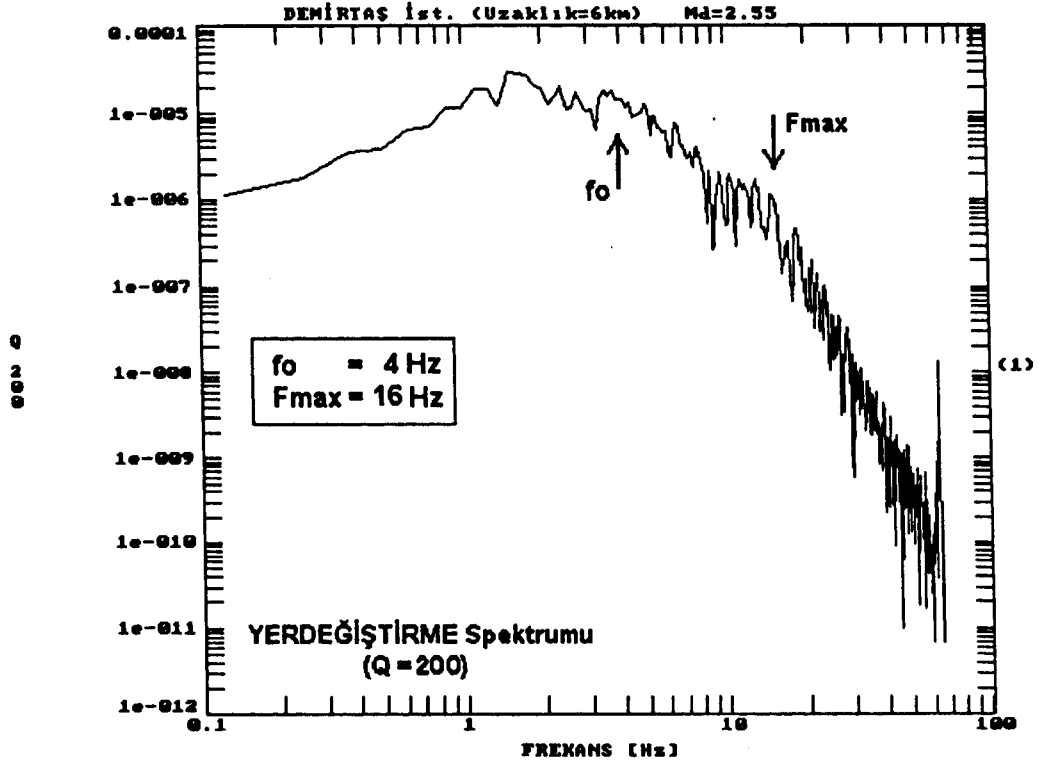
Şekil 6. Şekil 5' de verilen depreme ait yerdeğiştirme spektrumu.

Fig. 6. Displacement spectrum for the earthquake given in Figure 5.



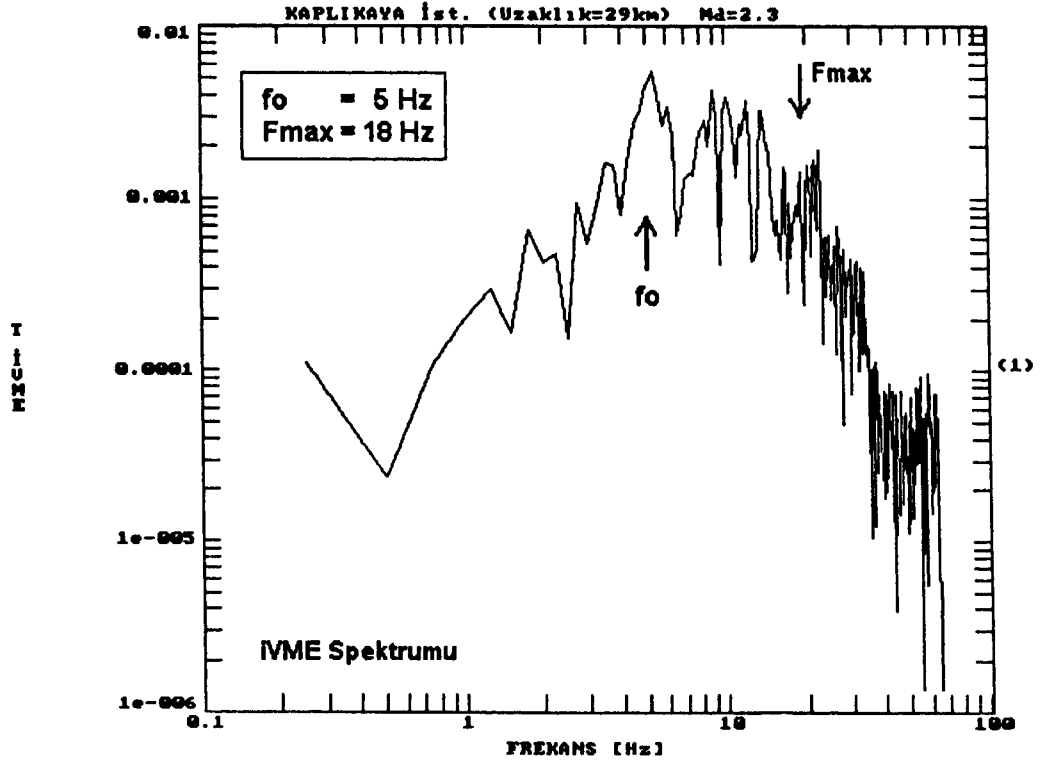
Şekil 7. Şekil 5' de verilen ivme spektrumunun Q=200 için düzeltilmiş spektrumu.

Fig. 7. Corrected acceleration spectrum for Q=200 for the spectrum given in Figure 5.



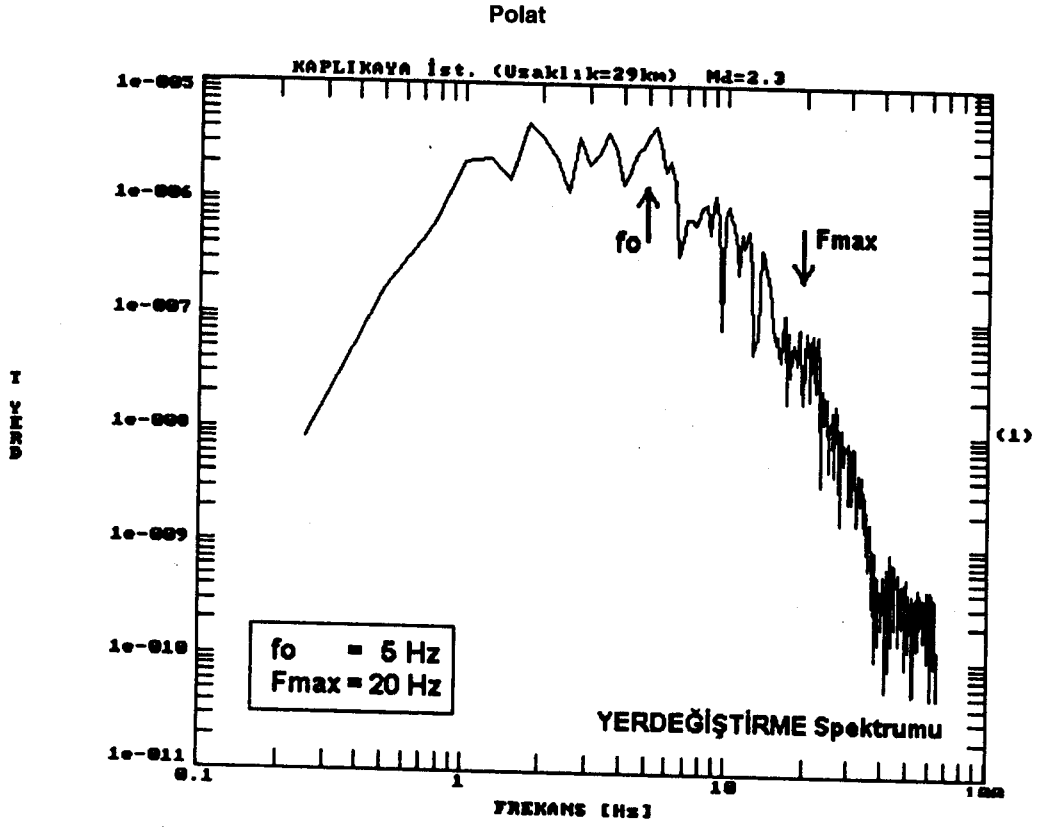
Şekil 8. Şekil 6' da verilen yerdeğiştirme spektrumunun Q=200 için düzeltilmiş spektrumu.

Fig. 8. Corrected displacement spectrum for Q=200 for the spectrum given in Figure 6.



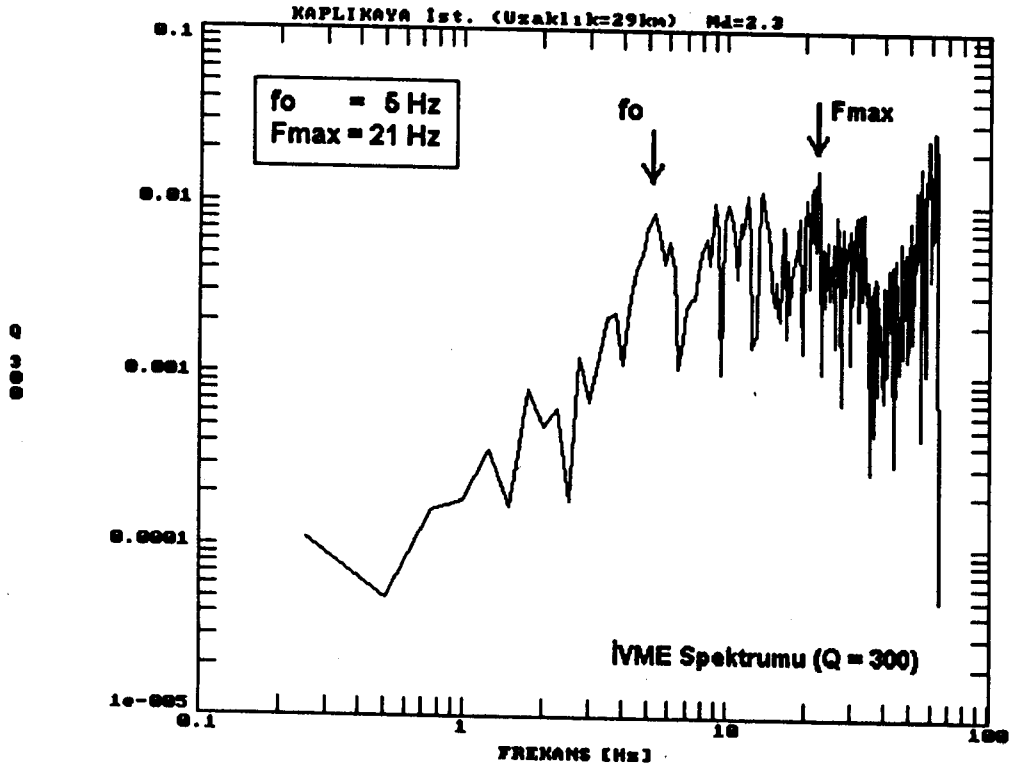
Şekil 9. SKAY istasyonunda kaydedilmiş bir depremin SH ivme spektrumu.

Fig. 9. SH acceleration spectrum of an earthquake recorded at the SKAY station.



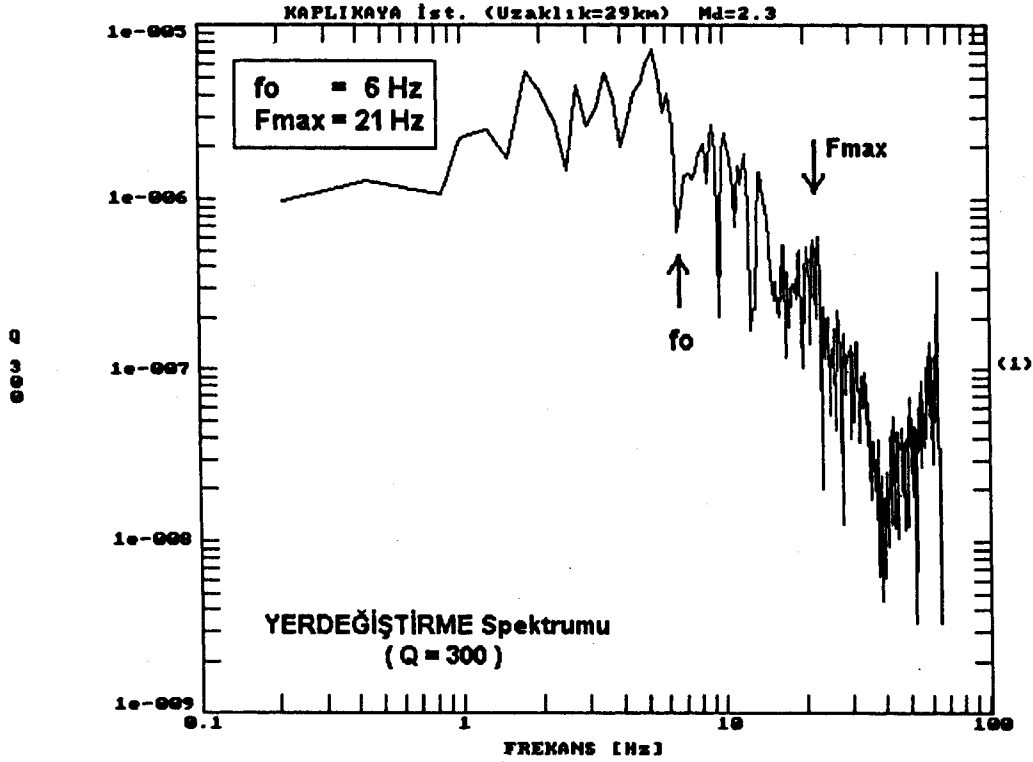
Şekil 10. Şekil 9' da verilen depreme ait yerdeğiştirme spektrumu.

Fig. 10. Displacement spectrum for the earthquake given in Figure 9



Şekil 11. Şekil 9' da verilen ivme spektrumunun Q=300 için düzeltilmiş spektrumu.

Fig. 11. Corrected acceleration spectrum for Q=300 for the spectrum given in Figure 9.



Şekil 12. Şekil 10' da verilen yerdeğiştirme spektrumunun $Q=300$ için düzeltilmiş spektrumu.

Fig. 12. Corrected displacement spectrum for $Q=300$ for the spectrum given in Figure 10.

F_{max}

Kaynak spektrumlarının incelenmesi sırasında ortaya çıkan ve kökeni tam olarak anlaşılmayan bir parametre, ilk defa Hanks (1982) tarafından incelenmiş ve F_{max} olarak adlandırılmıştır. Bu çalışmadan sonra günümüze kadar çeşitli bilimsel çalışmalar yapılmış (Papageorgiou and Aki, 1983; Phillips and Aki, 1986; Chin and Aki, 1991), fakat F_{max} 'ın kaynak veya ortam kökenli olup olmadığı kesin olarak kanıtlanamamıştır.

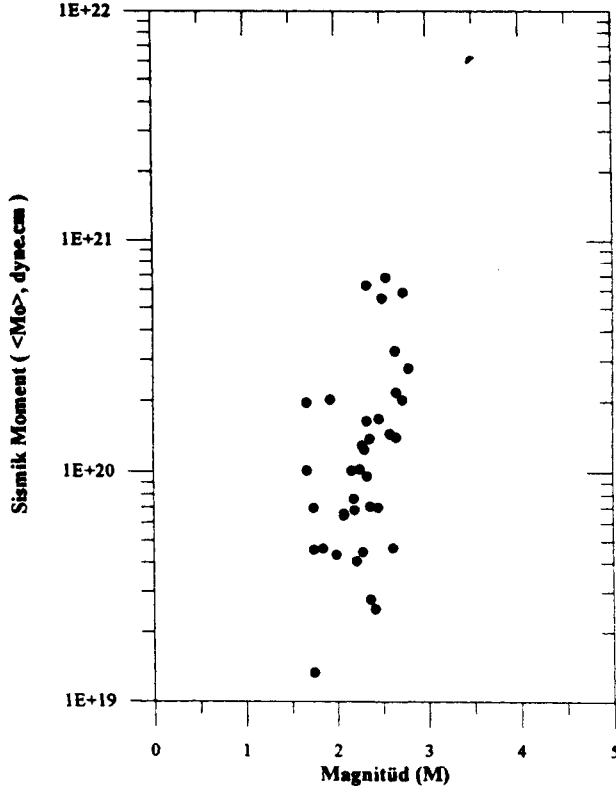
Bu çalışmada, ivme ve yerdeğiştirme spektrumlarında F_{max} incelenmiştir. Özellikle köşe frekansı (f_0) ndan sonra, ikinci bir köşeden sonra genlik değerlerinin ani olarak azaldığı gözlenmiştir. Bu durum, Şekil 5 ve Şekil 6 ile Şekil 9 ve Şekil 10' da kaydedilen verilerin ivme ve yerdeğiştirme spektrumlarında rahatlıkla gözlenmektedir. Bu veriler üzerinden yol ve frekans bağımlı ortam etkisi giderilmiş ve sonuçta F_{max} gözlenmiştir (Şekil 7, 8 ve Şekil 11, 12). Çoğu deprem spektrumlarında buna benzer sonuçlar elde edilmiştir. Eğer F_{max} ortam etkisinden kaynaklanan bir parametre ise, bu etkinin ortadan kaldırılması durumunda gözlenmemesi gerekir. 30 Hz'e kadar kayıtçının tepki yanıtı düz olduğundan, bu frekanslardan önceki azaltım kayıttan kaynaklanıyor olamaz. Dolayısıyla bu çalışmadaki

gözlemler, F_{max} 'ın kaynak ile ilgili bir parametre olduğu tezini kuvvetlendirmektedir. İncelenen depremlerin büyüklük aralığı çok küçük olduğundan, bu parametrenin depremin büyüklüğü ile değişimi için bir sonuç elde edilememiştir.

Deprem Kaynak Parametreleri

Bu çalışmada, ivme ve yerdeğiştirme spektrumlarından elde edilen spektral parametreler kullanılarak ayrı ayrı kaynak parametreleri hesaplanmış, sonuçlar arasındaki uyuma bakılmış ve kaynak parametrelerinin birbirleriyle olan ilişkileri araştırılmıştır ve sonuçlar bir çizelge halinde verilmiştir (Çizelge 2). 40 depremin verilerinden bulunan magnitüd (M_d) ve sismik moment (M_0) arasındaki ilişki, Şekil 13' de verilmiştir. Magnitüd değerleri genelde, 1.5 ile 3.0 arasında kümelenmiştir. Sismik moment değerleri, 10^{19} ile 10^{21} dyne.cm arasında değişirken, 21 Şubat 1994 tarihli Bursa depreminin ($M_d = 3.5$) sismik momenti 10^{22} dyne.cm' ye yakın elde edilmiştir (Çizelge 2, No:40).

İvme ve yerdeğiştirme spektrumlarından ayrı ayrı elde edilen kaynak boyutu (r) değerleri uyumludur. İvme verilerinden elde edilen magnitüd-kaynak boyutu ilişkisi, yerdeğiştirme verilerine göre daha uyumludur. Gerilme



Şekil 13. Bu çalışmada incelenen Bursa ve yöresi depremleri için saptanan Büyüklük (Magnitüd) Sismik moment ilişkisi.

Fig. 13. Magnitude-Seismic moment relation determined for the earthquakes occurred in around Bursa region.

düşümü ($\Delta\sigma$) değerleri, 1 ile 10 bar arasında kümelenmiştir. Genelde yerdeğiştirme verilerinden elde edilen gerilme düşümü değerlerinin, ivme verilerine göre daha uyumlu oldukları gözlenmiştir.

SONUÇ

Bu çalışmada Bursa ve çevresine yerleştirilmiş olan ivme-ölçerlerin kaydettiği ivme verilerinden yararlanarak deprem kaynak parametreleri hesaplanmış ve bunlar arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Episantr tayinlerindeki kayıtlardan, RMS (ortalama karekök) hata oranı, düşük 40 depremin spektrumları incelenmiştir. Bu veriler üzerinde spektral parametreler f_0 ve F_{max} ile çeşitli Q değerleri için bu parametrelerdeki değişimler araştırılmıştır. İvme ve yerdeğiştirme verilerinden elde edilen diğer kaynak parametreleri arasındaki değişimlerin bağımlıları bulunmuştur. Varılan sonuçlar şunlardır :

1. İvme ve yerdeğiştirme spektrumları kullanılarak ayrı ayrı yapılan kaynak çalışması sonucu görülmüştür ki; yerdeğiştirme spektrumlarına geçilmeye gerek kalmaksızın, köşe frekansı f_0 ve buna bağlı kaynak parametreleri ivme spektrumlarından bulunabilir.

2. Yol ve frekans bağımlı çeşitli Q_s modelleri kullanılarak spektrumlar üzerindeki ortamın soğurma etkisi giderilmeye çalışılmıştır. Bu işlemler sonunda F_{max} değerinin önemli derecede değişmediği gözlenmiştir. Bu gözlem F_{max} 'ın kaynak ile ilgili bir parametre olduğu tezini güçlendirmektedir. Bu çalışmada incelenen depremlerin büyüklük (magnitüd) aralığı dar olduğundan büyüklüklerin (magnitüdü) F_{max} ile değişimi ilişkilendirilememiştir.

3. İvme ve yerdeğiştirme spektrumlarından elde edilen kaynak parametreleri birbirleriyle uyumludur. Parametreler arasındaki ilişkiler şu şekildedir :

• Magnitüd (Md) - Sismik moment (Mo)

Yerdeğiştirme verileri için : $\log Mo = (0.71 \pm 0.04) Md + (18.42 \pm 0.24)$ ($r = 0.69$)

• Sismik moment (Mo) - Gerilme düşümü (Ds)

İvme verileri için : $\log Ds = 0.38 \log Mo - (7.14 \pm 0.01)$ ($r = 0.55$)

Yerdeğiştirme verileri için : $\log Ds = 0.80 \log Mo - (15.57 \pm 0.21)$ ($r = 0.65$)

• Magnitüd (Md) - Kaynak boyutu (r)

İvme verileri için : $\log r = (0.17 \pm 0.01) Md - (1.02 \pm 0.03)$ ($r = 0.55$)

Yerdeğiştirme verileri için : $\log r = 0.04 Md - (0.66 \pm 0.01)$ ($r = 0.11$)

• Magnitüd (Md) - Sismik enerji (Es)

İvme verileri için : $\log Es = (0.93 \pm 0.02) Md + (12.25 \pm 0.37)$ ($r = 0.59$)

Yerdeğiştirme verileri için : $\log Es = (1.36 \pm 0.04) Md + (11.12 \pm 0.14)$ ($r = 0.66$).

Burada r ilişki katsayısıdır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma 1992 yılı Ağustos'undan bu yana sürmekte olan İTÜ-ETH-TÜBİTAK-BÜ Kandilli Rasathanesi işbirliği ile yürütülen ve Kuzeybatı Anadolu Projesi'nin alt projelerinden Sismoloji çalışmaları kapsamında yapılmıştır. Projenin bir bölümü İTÜ Araştırma Fonu tarafından desteklenmiştir. Projenin çeşitli aşamalarında destek olan İTÜ Araştırma Fonu Müdürlüğüne, Bursa Bayındırlık Müdürlüğüne, DSİ Bölge Müdürlüğü'ne ve Karayolları Bölge

Müdürlüğü'ne, TEK Bursa Bölge Müdürlüğü'ne, Bursa Valiliği ve İlçe Kaymakamlıklarına, İstanbul Yeşilköy Atatürk Havalimanı Giriş Gümrük Müdürlüğü'ne, Bursa Gümrük Müdürlüğü'ne ve Demirtaş Belediyesi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- Aki, K. 1967, Scaling law of seismic spectrum, J. Geophys. Res., Vol:72, 4 : 1217-1231.
- Aki, K. 1980, Attenuation of shear waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz, Phys. Earth Planet. Inter., 21 : 50-60.
- Aktar, M., Üçer, B., Eyidoğan, H., Gürbüz, C., Sellami, S., Pavoni, N., Mayer-Rosa, D., St. Mueller, Barış, Ş., Ergin, M., Biçmen, F., Polat, O.D., Yörük, A. ve Kaypak, B. 1996, Investigation of the micro-earthquakes of Bursa and its vicinity, Earthquake Research in Türkiye State of the Art, Sep.30 - Oct.5, p:48, Ankara.
- Archuleta, R.J., Cranswick, E., Mueller, C. and Spudich, P. 1982, Source parameters of the 1980 Mammoth Lakes, California-Earthquake Sequence, J. Geophys. Res., 87 : 4595-4607.
- Biçmen, F., Alptekin, Ö. ve Aktar, M. 1993, Marmara bölgesi depremlerinin kaynak parametrelerinin belirlenmesi, Türkiye 13. Jeofizik Kurultayı Bildiri Özetleri, TMMOB Jeofizik Müh. Odası, s:95, Ankara.
- Brune, J.N. 1970, Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, J. Geophys. Res., 75 : 4997-5009.
- Brune, J.N. 1971, Corrections, J. Geophys. Res., 76 : 5002.
- Chin, B-H. and Aki, K. 1991, Simultaneous study of the source, path and site effects on strong ground motion during the 1989 Loma-Prieta earthquake: A preliminary result on pervasive nonlinear site effects, BSSA, Vol:81, 1859-1884.
- Eyidoğan, Akıncı, A. ve Polat, O.D. 1997, The characteristics of site, source and regional attenuation in the vicinity of Bursa city- Northwestern Turkey, VIII. International Conference on SDEE, 20-24 July 1997, p:32, İstanbul.
- Ezen, İ. 1973, Yüzey dalgalarının dispersiyonuna göre Batı Anadolu da kabuk yapısı, Deprem Araştırma Bülteni, Vol:62,77-95.
- Hanks, T. and Wyss, M. 1972, The use of body waves spectra in the determination of seismic source parameters, BSSA, 62 : 561-589.
- Hanks, T. 1982, Fmax, BSSA, Vol:71, 6 : 1867-1879.
- Haskell, N.A. 1964, Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults, BSSA, 54 : 1811-1841.
- HYPO71PC. 1989, IASPEI Software Library Toolbox for Seismic Data Acquisition, Processing and Analysis, Vol:1, California, USA.
- Iio, Y. 1992, Seismic source spectrum of microearthquakes, BSSA, Vol:82, 6 : 2391-2409.
- Keilis-Borok, V.I. 1960, Investigation of the mechanism of earthquakes, Sov. Res. Geophys., 4-Am. Geophys. Union, Consultants Bureau, NY, 201 p.
- Ketin, İ. 1983, Türkiye Jeolojisine Genel Bir Bakış, İTÜ Gümüşsuyu Matbaası, İstanbul, 591 s.
- Papageorgiou, A. ve Aki, K. 1983, A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion. Part I. Description of the model, BSSA, 73 : 693-722.
- Phillips, W.S. and Aki, K. 1986, Site amplification of coda waves from local earthquakes in central California, BSSA, 76 : 627-648.
- PITSA. 1991, IASPEI Software Library Bibliographic References and BSSA Database, Vol:4, California, USA.
- Polat, O.D. 1995, Bursa ve çevresindeki küçük depremlerin ivme kayıtlarının incelenmesi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 125 s. (yayınlanmamış).
- Savage, J.C. 1972, Relation of corner frequency to fault dimensions, J. Geophys. Res., Vol:77, 23 : 4393-4405.
- Sellami, S., Pavoni, N., Mayer-Rosa, D., Mueller, S., Eyidoğan, H., Aktar, M., Gürbüz, C., Barış, Ş., Polat, O.D. and Yalçın, N. 1997, Seismicity and seismotectonics of the Bursa region, Kluwer Publ. Com. (yayında).termined for the earthquakes occurred in around Bursa region.