

TÜRKİYE' DE MEYDANA GELEN BAZI BÜYÜK DEPREMLERİN SİSMİK MOMENT TENSÖRLERİ

Seismic Moment Tensors of Some Great Earthquakes Occured in Turkey

Ali Pınar*

ÖZET

Bu çalışma çerçevesinde 1964-1992 yılları arasında meydana gelen ve telesismik uzaklıklarda kayıt edilen 24 depremin kırılma oluşumları (rupture process) incelenerek sismik moment tensörlerinin elde edilmesi için gerekli olan parametreler, sismik moment değeri ve fay düzleminin doğrultusu, eğimi ve atım yönü, belirlenmiştir. Sayfa sınırlamasından dolayı burada sadece iki depremin analiz sonucu verilmiştir. Diğer depremler başka bir yerde daha sonra yayımlanacaktır. Genel sonuç olarak, magnitudü 6.8 den büyük olan ($M_s > 6.8$) depremlerin birden fazla şok'la (subevent) meydana geldiği gözlenmiştir. Deprem esnasındaki kırılma birçok şok'la olduğu zaman toplam sismik moment tensörünün double-couple mekanizmasından uzaklaştığı sonucu görülmüştür. İnversiyon yönteminde her bir şok double-couple mekanizmasına sahip nokta kaynak ile ifade edilmektedir. Toplam sismik moment tensörünün depremin meydana geldiği yerde etki eden kuvvetler hakkında daha fazla bilgi verdiği söylenebilir. Sismik moment tensörünün double-couple mekanizmadan uzaklaşma sebepleri olarak şunları gösterebiliriz:

- 1) Fayın eğriselliği, (örneğin 1967 Mudurnu Vadisi depremi),
- 2) Depremin meydana geldiği yerde birden fazla fayın bulunması veya fayların kesişmesi, (örneğin 1992 Erzincan depremi),
- 3) Subevent'lerin farklı geometriye sahip fay düzlemlerinde meydana gelmesidir.

ABSTRACT

The teleseismic records of 24 earthquakes, occurred between the period 1964-1992, were inverted to their sources so as to get a rupture process and the parameters necessary to calculate a seismic moment. Only two of these earthquakes are discussed here and the rest of them will be published later. It was noticed that earthquakes with magnitude larger than 6.8 ($M_9 > 6.8$) have complex rupture pattern associated with two or more subevents. The total moment tensor of the complex events usually have nondouble couple component. It can be said that the total seismic moment gives more information on the forces acting at the source region. The following reasons are likely to cause the nondouble couple component of a total seismic moment tensor.

- 1) Curvature of a fault plane (e.g. 1967 Mudurnu Valley earthquake)
- 2) Existence of other faults near the source region (e.g. 1992 Erzincan earthquake)
- 3) The subevents take place at fault planes with different geometry.

GİRİŞ

Ülkemiz deprem etkinliği oldukça yüksek olan bir deprem kuşağı içersindedir. Büyük hasar yapıcı, can ve

mal kaybına sebep olan depremler Kuzey Anadolu Fayı, Doğu Anadolu Fayı, Kuzey-Doğu Anadolu Fayı ve Batı Türkiye açılma bölgesinde meydana gelmektedir. Bu çalışmada iki farklı deprem kuşağından birer depremin

* Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Çengelköy, İstanbul

kırılma oluşumları analiz edilmiştir. Batı Türkiye açılma bölgesinden 6 Ekim 1964 Manyas depremi ve Kuzey-Doğu Anadolu Fayı kuşağından 30 Ekim 1983, Narman-Horasan (Erzurum) depremidir Manyas depreminin tel; bir şokla meydana geldiği bulunmuştur. Bu depremin mekanizma çözümünün doğrultu atım bileşenine sahip normal faylanma olduğu sonucu bulunmuştur. Aynı depremi çalışan diğer araştırmacılardan biraz farklı olan bu çözümün başlıca sebebi kullanılan kabuk yapısı olduğu görülmüştür. Narman-Horasan depremi oldukça karmaşık bir kırılma oluşumuna sahiptir. Kırılma zamanının 150 saniye olduğu ve 5 şok' tan oluştuğu görülmüştür.

YÖNTEM

Bu çalışmada Kikuchi ve Kanariori (1991) tarafından geliştirilen inversiyon yöntemi kullanılmıştır. Yöntemi kısaca şu şekilde açıklayabiliriz. Deprem kaynağı, mekanizmaları farklı olabilen nokta kaynak serisi şeklinde ifade edilmektedir. Nokta kaynakların mekanizmaları gözlemsel ve yapay sismogramları karşılaştırarak tespit edilir. Nokta kaynak, moment tensörü ile ifade edilmektedir. Sismik momentin $[M_{ij}]$ 6 bağımsız elemanı vardır. Bunları şu şekilde gösterebiliriz.

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; M_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; M_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$M_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; M_5 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; M_6 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

M_{ij} 'nin (x, y, z) koordinatları sırasıyla (kuzey, doğu, aşağı) yönlerine karşılık gelmektedir. Herhangi bir moment tensörü M_n kombinasyonu ile gösterilmektedir.

$w_{jn}(t;p)$, j istasyonundaki M_n tensörünün $n.ci$ elemanı ile hesaplanan kuramsal sismogram (Green fonksiyonu) olsun; burada t , ilgili fazın istasyona gelişinden sonraki zamanı göstermektedir. p parametresi ise kaynak parametreleri ile ilgilidir (Kikuchi and Kanamori, 1986). Gözlemsel sismogramı $x_j(t)$ ile gösterecek olursak her bir M_n için an katsayısı aşağıda verildiği şekilde elde edilir.

$$\Delta = \sum_{j=1}^{N_s} \int \left[x_j(t) - \sum_{n=1}^{N_b} a_n w_{jn}(t;p) \right]^2 dt$$

$$= R_x - 2 \sum_{n=1}^{N_b} a_n G_n + \sum_{m=1}^{N_b} \sum_{n=1}^{N_b} R_{nm} a_n a_m \quad (1)$$

$$= \text{minimum,}$$

burada N_b kullanılan tensör elemanlarının sayısı, N_s ise istasyon sayısı ve

$$R_x = \sum_{j=1}^{N_s} \int [x_j(t)]^2$$

$$R_{nm}(p) = \sum_{j=1}^{N_s} \int [w_{jn}(t;p) w_{jm}(t;p)] dt$$

$$G_n(p) = \sum_{j=1}^{N_s} \int [w_{jn}(t;p) x_j(t)] dt$$

(1) bağıntısının $n = 1, \dots, N_b$ için kısmi türevlerini ahp sıfıra eşitlersek, $\frac{\partial \Delta}{\partial a_n} = 0$, aşağıdaki denklem sistemi elde edilir,

$$\sum_{m=1}^{N_b} R_{nm} a_m = G_n \quad (2)$$

bu denklem sisteminin çözümü an katsayılarını verir. Bu an katsayıların kullanarak moment tensörü aşağıdaki şekilde oluşturulur.

$$[M_{ij}] = \begin{bmatrix} a_2 - a_5 - a_6 & a_1 & a_4 \\ a_1 & -a_2 + a_6 & a_3 \\ a_4 & a_3 & a_5 + a_6 \end{bmatrix}$$

Eğer deprem karmaşık bir kırılma ile meydana gelmiş ise, bir sonraki nokta kaynağını belirlemek için ilk nokta kaynağının etkisi gözlemsel sismogramlardan çıkartılır,

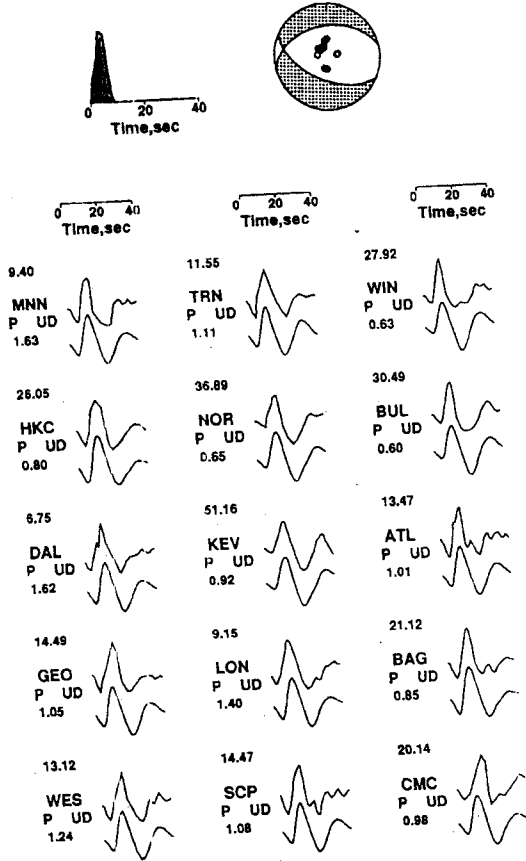
$$x'_j(t) = x_j(t) - m_1 w_{jn}(t;p)$$

burada, $x'_j(t)$ residuel sismogram, m_1 ise ilk subevent'in sismik moment değeridir. Bu aşamada inversiyon işleminde $x_j(t)$ yerine $x'_j(t)$ kullanılmaktadır.

Bu işleme gözlemsel ve yapay sismogramların uyumu iyileştirene kadar devam edilir.

VERİ ANALİZİ VE SONUÇLAR

Manyas depreminin analizi için dış merkez uzaklığı 30-90 derece aramda olan 15 WWSSN istasyonu kullanıldı. Analog olan kayıtlar 1 saniye aralıkla sayısallaştırıldı. Bu, kayıtlar Kikuchi ve Kanamori (1991) tarafından geliştirilen inversiyon yöntemi uygulanarak deprem kaynağına invert edildi. Elde edilen mekanizma çözümü, kaynak fonksiyonu ve gözlemsel ve yapay sismogramlar m karşılaştırılması Şekil 1'de gösterilmektedir.



Sekil 1: 6 Ekim 1964 Manyas depreminin kaynak fonksiyonu, mekanizması ve gözlemsel ve yapay sismogramları gösterilmektedir. Taralı yerler sıkışma bölgeleridir. İstasyon alarının üstündeki rakamlar mikron olarak yer hareketini ve altındaki rakamlar yapay ve gözlemsel sismogramların oranlarıdır.

Figure 1: Source time functions, the mechanism of the subevents, the total mechanism, and the calculated (down) and observed (up) Green's functions of the 6 October, 1964 Manyas earthquake. The shaded regions of the focal spheres indicate compressional regions. The numbers shown for waveforms are peak-to-peak amplitudes in microns (up) and the amplitude ratio of calculated to observed seismograms (bottom).

Farklı derinlikler için yapay sismogramlar hesaplanarak gözlemsellerle karşılaştırıldı ve en iyi uyumun odak derinliği 15 km için elde edildi. Daha sonra kabuk yapısındaki tabaka kalınlıklarının derinlik ve hızları ile oynanarak gözlemsel ve yapay sismogramların uyumu iyileştirildi. Çizelge 1 de bu şekilde elde edilen kabuk yapısı gösterilmektedir. Bu depremin kırılma oluşum zamanının 8 saniye olduğu bulundu. Kırılma oluşum zamanı şu şekilde elde edilmiştir. Önce depremin odak mekanizma çözümü bulundu. Sonra, kaynak fonksiyonu 1 saniye uzunluğuna sahip kaynak fonksiyoncularının toplamı şeklinde ifade edilerek gözlemsel sismogramlarla karşılaştırıldı. Gözlemsel sismogramlarla uyum içinde olan kaynak fonksiyoncuları toplam uzunluğu kırılma oluşum zamanını vermektedir. $M_0 = \mu DS$ ve $\Delta\sigma = 2.5M_0S^{1.5}$

formülleri kullanılarak depremin atım miktarı ve gerilme düşümü hesaplandı; burada $\mu (= 3 \times 10^{11} \text{ dyn cm}^{-2})$ ortamın rigiditesi, S yaklaşık deprem kaynak alanıdır ve $S = L \times w$ bağıntısı ile hesaplanır. D atım miktarı ve M_0 sismik moment'tir. Fay uzunluğu L ise, kırılma oluşum zamanı T_p ve kırılma hızı (rupture velocity) v 'nin çarpımı şeklinde ifade edilir. Kırılmamın iki yönde $v = 2.5 \text{ km/sec}$ ile ilerlediğini düşünerek fayın uzunluğunu $L = 2vT_p$ ile verebiliriz. Fayın genişliği $w = L/2$ ile verilebilir, Kanamori and Anderson (1975). Bu bilgilerin ışığı altında Manyas depreminin fay boyu, atım miktarı ve gerilme düşümü sırasıyla 40 km, 28 cm ve 7 bar olarak hesaplanmıştır.

depth km	V_p km/s	V_s km/s	ρ g/cm ³
0 ~ 25	5.5	3.0	2.7
> 25	7.5	4.9	3.3

Çizelge 1. 6 Ekim 1964 Manyas depreminin Green functionlarını hesaplamak için kullanılan kabuk yapısı.

Table 1. Crustal structure used for calculating the Green's functions of the 6 October, 1964 Manyas earthquake.

Inversiyon sonucunda bu depremin fay düzleminin doğrultusu, eğim ve atım-yönü sırasıyla 112.8, 53.5 ve -67.1 derece olarak bulunmuştur. Sismik momentin değeri ise $6.6 \times 10^{25} \text{ dyn.cm}$ olarak elde edilmiştir. Jackson ve McKenzie (1988)'de verildiği gibi yukarıda verilen sismik moment değeri ve kaynak parametreleri vasıtasıyla sismik moment tensörü bulunabilir.

$$M = M_0 (\hat{u}\hat{n} + \hat{n}\hat{u})$$

veya

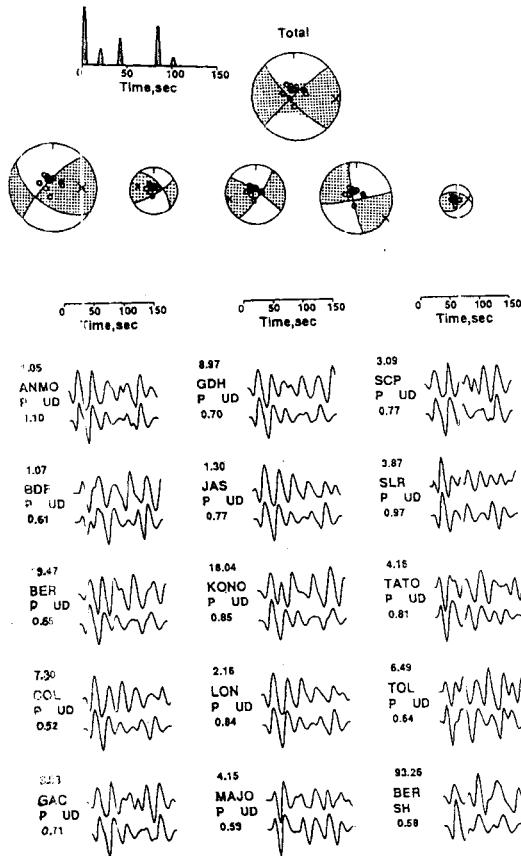
$$M_{ij} = M_0 (u_i n_j + u_j n_i)$$

burada \hat{n} fay düzlemine dik birim vektörünü ve \hat{u} atım yönündeki birim vektörünü göstermektedir (bak sayfa 115, Aki ve Richards, 1980).

Aki ve Richards (1980)'de verilen formülleri (sayfa 117) kullanarak bu depremin sismik moment tensörünün kartezyen bileşenleri rahatlıkla bulunabilir.

Yukarıda yapılan açıklamaları izleyerek Narman-Horasan 1983 depreminde analiz edildi ve moment tensörünü hesaplamak için gerekli olan parametreler belirlendi. Narman-Horasan depreminin telesismik kayıtları GDSN'nin CD-ROM'larından elde edildi. Analiz sonucunda bu depremin oldukça karmaşık bir kırılma oluşumu ile meydana geldiği bulundu. Gözlemsel sismogramlara bakılınca bu depremin kırılma oluşumu 150 saniye civarında olduğu görülmektedir. Deprem 5 şokla meydana geldiği ve toplam sismik moment değeri $1.6 \times 10^{26} \text{ dyn.cm}$ olarak bulunmuştur. Sol atımlı faylanmanın hakim olduğu depreminde subeventlerin biri ters faylanma

mekanizmasına sahiptir. Bu 5 subeventten oluşan toplam sismik momentin nondouble-couple bileşenine sahip olduğu görülmektedir. Subeventlerin mekanizma çözümleri, kaynak fonksiyonlarının zamansal dağılımı, gözlemsel ve yapay sismogramlar Şekil 2 de verilmektedir. Çizelge 2 de ise bu bunların kaynak parametreleri görülmektedir.



Şekil 2: 30 Ekim 1983 Narman-Horosan depreminin kaynak fonksiyonları, mekanizmaları ve gözlemsel ve yapay sismogramları gösterilmektedir. Taralı yerler sıkışma bölgeleridir. İstasyon adlarının üstündeki rakamlar mikron olarak yer hareketini ve altındaki rakamlar yapay ve gözlemsel sismogramların oranlarıdır.

Figure 2: Source time functions, the mechanism of the subevents, the total mechanism, and the calculated (down) and observed (up) Green's functions of the 30 October 1983 Narman-Horosan earthquake. The shaded regions of the focal spheres indicate compressional regions. The numbers shown for waveforms are peak-to-peak amplitudes in microns (up) and the amplitude ratio of calculated to observed seismograms (bottom).

No	Time sec	Distance km	Depth km	$M_0 \times 10^{25}$ dyn-cm	Strike deg	Dip deg	Slip deg
1	0.0	0.0	3	8.7	223.0	77.2	36.2
2	18.0	-20	6	2.3	33.6	80.2	7.8
3	40.0	-20	12	4.0	77.7	85.5	-7.4
4	82.0	-20	15	5.8	56.9	77.9	30.8
5	99.0	30.0	15	1.2	57.1	54.3	59.5
Total moment				15.8	230.1	85.9	12.3

Çizelge 2. 30 Ekim 1983 Narman-Horosan depreminin kaynak parametreleri. Uzaklık, referans noktasından olan mesafedir. Zaman, her subeventin oluş zamanıdır.

Table 2. Source parameters of the subevents and total seismic moment of the 30 October, 1983 Narman-Horosan earthquake. The distance is relative to the reference point. The time represent the onset time of each subevent.

KAYNAKLAR

- Aki, K. and Richards, P.G. 1980, *Quantitative Seismology*, W. H. Freeman and Company, San Francisco
- Jackson, J and McKenzie, D. 1988, The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East, *Geophysical Journal* 93, 45-73
- Kanamori, H., and Anderson, D. L. 1975, Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 65, 1073-1096.
- Kikuchi, M., and Kanamori, H. 1986, Inversion of complex body waves-II, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 43, 205-222.
- Kikuchi, M., and Kanamori H. 1991, Inversion of complex body waves -III, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 81, 2335-2359, 1991.