

Arabistan-Avrasya kıtasal çarpışma bölgesindeki depremlerin benzerlik ilişkileri

Onur TAN*, **Tuncay TAYMAZ**

İTÜ Maden Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 34390, Ayazağa, İstanbul

Özet

Depremlerin kaynak mekanizması ve kırılma süreçlerinin incelenmesiyle elde edilen faylanma parametrelerinin birbirleriyle olan ilişkileri sismolojideki temel konulardan biridir. Bu çalışmada Arabistan-Avrasya kıtasal çarpışma bölgesinde meydana gelmiş depremlere ait büyüklük, faylanma alanı, gerilme düşümü gibi parametrelerin birbirleriyle ilişkileri incelenmiştir. Sismik momentin, m_b ve M_s büyüklükleriyle olan ilişkisi için bölgeye özgü yeni eşitlikler belirlenmiş ve bunların dünya genelindeki depremlerin kullanılmasıyla belirlenenlerden daha farklı olduğu görülmüştür. Ayrıca 20 depreme ait kayma dağılımı modellenmesi sonuçlarından yararlanılarak belirlenen, sismik momentin diğer parametrelerle ilişkilerini içeren gözlemsel bağıntılar belirlenmiştir. Bu bağıntılar özellikle tarihsel depremlerin daha iyi anlaşılması açısından önem taşır.

Anahtar Kelimeler: *Deprem kaynak parametreleri, ölçekleme ilişkileri, aktif faylanma, doğu Akdeniz, güncel levha etkileşimi.*

Self-similarity of the earthquakes occurred in the Eurasia-Arabia collision zone

Abstract

The relationship of faulting parameters obtained by analyzing the earthquake focal mechanisms and rupture histories is one of the main topics of seismology. In this study, we have studied the relationship of the parameters such as magnitude, rupture area, stress drop of the earthquakes occurred in the Eurasia-Arabia collision zone. We used two inversion techniques to find out the source parameters. First, the long period and broad-band body waveforms recorded by GDSN stations in the distance range of 30°–90° were inverted and the fault orientation, centroid depth, seismic moment and source time function of each event were obtained with minimum misfit solution. Second method is the slip distribution inversion using high frequency broad-band data. The fault plane was divided into several sub-faults and rupture history of each sub-faults were described by triangles. Total fault area, rupture propagation in time and overall source time function were then obtained using minimum misfit solution of inversion. The resulting earthquake parameters results were graphed and the least-square relation equations were fitted. These new equations represent the regional behavior of the earthquakes and are different from that of previous studies using global databases. The present equations are important to resolve the parameters of historical earthquakes in the collision zone.

Keywords: *Earthquake source parameters, scaling laws, active faulting, eastern Mediterranean, current plate interactions.*

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Onur TAN. tano@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 60 87.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Maden Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Kafkasya, Doğu Anadolu ve Kuzeybatı İran depremlerinin kaynak mekanizması özellikleri ve yırtılma süreçleri" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 05.10.2004 tarihinde dergiye ulaşılmış, 25.11.2004 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.05.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

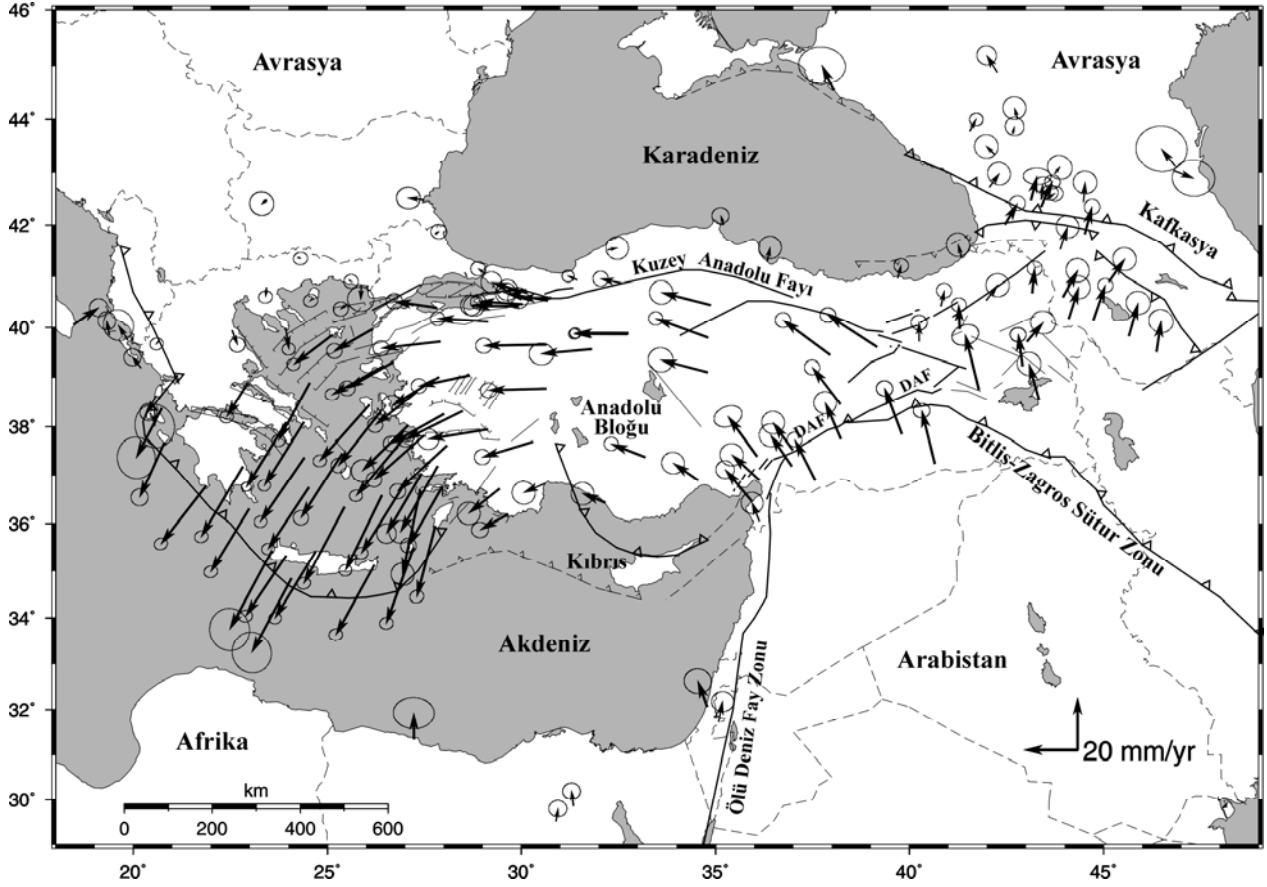
Giriş

Yunanistan'dan Hazar Denizi'ne kadar uzanan geniş bir alanı kaplayan Doğu Akdeniz bölgesi tektonik olarak iki büyük levha hareketinin etkisi altındadır. Bunlardan biri Helen (Ege) Yayı boyunca gözlenen dalma-batma, diğeri ise Arabistan Levhası'nın kuzeye doğru olan hareketidir. Arabistan Levhası'nın bu davranışı Avrasya Levhası ile çarpışmasına neden olmuş ve dünyada gözlenen en geç ve aktif kıtasal çarpışmalarından birini oluşturmuştur. Günümüz GPS çalışmalarında levhaların ve aralarında kalan daha küçük ölçekli blokların birbirlerine göre hareketleri net olarak gözlenmektedir (Şekil 1). Bu tektonik davranış, aktif faylanmaları meydana getirmektedir ve deprem dağılımları bu zonlar boyunca yoğunlaşmaktadır (Şekil 2). Yer bilimleri açısından doğal bir laboratuvar olan Doğu Akdeniz Bölgesi'nin batısında baskın hareket Ege Denizi altına doğru olan dalma-batma ve Anadolu Bloğu'nun saatin tersi yöndeki rotasyonla güneybatıya ilerlemesidir. Hem açılma rejimi hem de yanal hareketler nedeniyle normal ve doğrultu atımlı faylar tüm Ege Bölgesi'nde etkin rol oynar. Doğuda ise normal faylanmalar yerine bindirme ve ters faylar ağırlıkla görülmektedir. Bugüne kadar yapılan odak mekanizması çözümleri bölgedeki genel davranışı gösterse de her bir depremi tek tek ele aldığımızda faylanma özelliklerinin farklılaştığı görülür. Bunun yanında hem sismolojik hem de jeolojik gözlemlerden elde edilen yerel faylanma özellikleriyle tam olarak uyuşmayan deprem mekanizmalarına da rastlanmaktadır. Bu durumda her bir depremin özelliklerini daha ayrıntılı öğrenmek tektonik problemleri aydınlatmada önemli yararlar sağlayacaktır. Bugüne kadar yapılan GPS incelemeleri bölgenin kinematik özellikleri hakkında genel bilgiler vermektedir. Ancak, her bir fay sistemi üzerinde hatta aynı fay zonu üzerindeki değişik kesimlerde meydana gelen depremlerin birbirlerinden farklı davranış özellikleri gösterdiği görülmektedir.

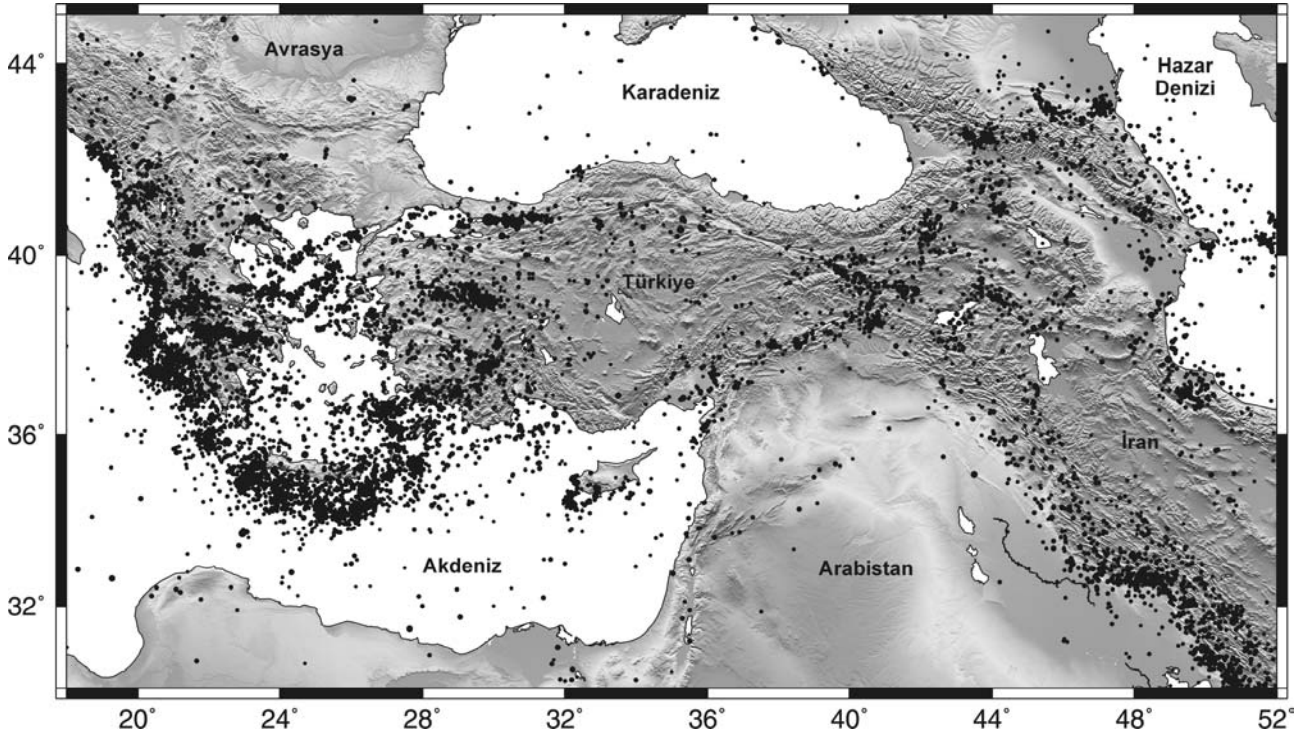
Depremlerin oluşum süreçlerinin birbirlerine olan benzerliğini (*self-similarity*) incelerken dinamik parametrelerin ölçeklenmesinde kullanılan veri grubu önem taşır. Özellikle parametrelerin belirlenmesinde izlenen yola göre birbirinden farklı ilişki değerleri bulunmuş olabilir. Diğer yandan bu tip çalışmalarda kullanılan dep-

remler dünyanın farklı bölgelerinde ve farklı tektonik çevrelerde meydana gelmiştir. Ayrıca sismolojik kayıtların olmadığı tarihsel depremler de hesaplamalara dahil edilmektedir. Zamanında çok gerilere giderek veri sayısını artırma düşüncesi doğru gibi görünse de bu depremlere ait değerler (örn. sismik moment) göreceli olarak hesaplanır. Yeni ilişki bağıntıları bularak geçmişteki depremler hakkında bilgi edinmeye çalışırken, onlarla ilgili ikincil yollardan elde edilmiş verileri kullanmanın çok doğru olduğunu söyleyemeyiz. Yapılması gereken, güncel teknoloji ile toplanan verilerle belirlenen bağıntılar yardımıyla tarihsel depremlere bir yaklaşım yapmaktır. Bunun yanında bölgesel özellikleri küresel ilişki bağıntıları içinde kaybetmemek için ilgilenilen bölgedeki depremlerin parametrelerini kullanmak daha doğru olacaktır. Bu nedenle, bu çalışmada sadece incelenen bölge içinde meydana gelmiş depremlere ait veriler kullanılmıştır.

Depremlerin davranışını anlamak için fay alanı ve yer değiştirme miktarı gibi faylanma parametrelerinin birbirleriyle olan ilişkileri bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir (örn. Aki, 1967; Scholz, 1982; Wells ve Coppersmith, 1994; Mai ve Beroza, 2000; Stirling vd., 2002). Bu çalışmaların bazılarında parametre ilişkileri için deneysel bağıntılar da verilmiştir. Wells ve Coppersmith (1994), 1800'lü yıllardan günümüze kadar meydana gelmiş çok sayıda depreme ($M > 4.5$) ait dinamik parametreleri ilişkilendirirken, Mai ve Beroza (2000) sadece kayma dağılımı incelenen son 20 yıl içindeki bazı depremleri ($M_w > 5.5$) kullanmışlardır. Ancak günümüzde kırılmanın fay düzlemi üzerindeki dağılımını incelemek ve daha gerçekçi kırılma parametreleri belirlemek için yapılan çalışma sayısı azdır. Arabistan-Avrasya kıtasal çarpışma bölgesini içine alan Türkiye, Kafkasya ve Kuzeybatı İran'daki depremler için ise (17 Ağustos 1999 Gölcük-İzmit depremi hariç; Yagi ve Kikuchi, 2000) benzer analizler yapılmamıştır. Bu nedenle bu konuda çok fazla veri eksikliği bulunmaktadır. Sismolojik ve jeodetik verilere bağlı yapılan daha doğru gözlemlerle bölgesel deprem davranışları ortaya konabilirse tarihsel depremlere ilişkin daha iyi yaklaşımlar yapılabilir. Bu çalışmada elde edilen deprem parametreleri bu veri grubuna yeni katkılar sağlayacaktır.



Şekil 1. Doğu Akdeniz Bölgesi'ndeki ana tektonik unsurlar ve GPS hız vektörleri
Daireler %95 güvenlik elipslerini temsil eder (McClusky vd., 2000)



Şekil 2. Doğu Akdeniz Bölgesi'nin 1964-2001 yılları arasındaki depremselliği (ISC, $M \geq 4.0$)
Topoğrafya için NASA-SRTM verisi kullanılmıştır.

Veri

Bu çalışmada kullanılan deprem verilerini iki kısımda toplamak gerekir. İlk grupta depremlerin büyüklük ilişkilerinin incelenmesi için kullanılan odak mekanizması ters çözümü sonuçları, diğeri ise kırılma yayılımı ve faylanma alanı hakkında genel bilgiler veren kayma dağılımı modellenmesi sonuçlarıdır.

Bölgede meydana gelen depremlerin büyüklüğü ve sismik momentleri arasındaki ilişkiyi incelemek için dalga şekli ters çözümü ile belirlenen sismik moment değerleri dikkate alınmıştır. Dalga şekli ters çözümü son 20 yıldır bir çok depremin kırılma mekanizmasını anlamak için kullanılan bir yöntemdir. Yöntemin ağırlıklı olarak kullanılması Nábělek (1984)'den sonra başlamıştır. Sismolojide temel araştırma tekniklerinden biri olan yöntem bir çok çalışmada kullanılmıştır (örn. McCaffrey ve Nábělek, 1987; Molnar ve Lyon-Caen, 1989; Taymaz vd., 1991a; Jackson vd., 2002). Odak mekanizması çözümleri faylanmanın yönelimi (doğrultu, dalım, kayma açısı), derinliği ve sismik momenti gibi çok temel parametrelerin belirlenmesini sağlar. Bu amaçla deprem merkez üssünden (episantır) 30°-90° uzaklıklar arasında kalan deprem istasyonlarında kaydedilen uzun periyot ve geniş-bant P ve SH sismogramları kullanılır. Duraylı bir ters çözüm olmak şartıyla en uygun çözüme genelde yapay ve gerçek dalga şekillerinin görsel uyumuyla karar verilir. Veri grubunun büyük bir kısmını bu çalışmadaki ve diğer araştırmacıların odak mekanizması ters çözüm sonuçları oluşturmaktadır. Cisim dalgaları kullanılarak incelenememiş bazı depremlere ait sismik moment değerleri ise Harvard-CMT kataloğundan temin edilmiştir. Cisim ve yüzey dalgası büyüklükleri ise günümüzde en güvenilir kaynak olan Int. Seismological Centre (ISC) bültenlerinden alınmıştır. Şekil 3'de beyaz karelerle gösterilen depremler büyüklük ve sismik moment arasındaki ilişkilerin belirlenmesinde kullanılmıştır.

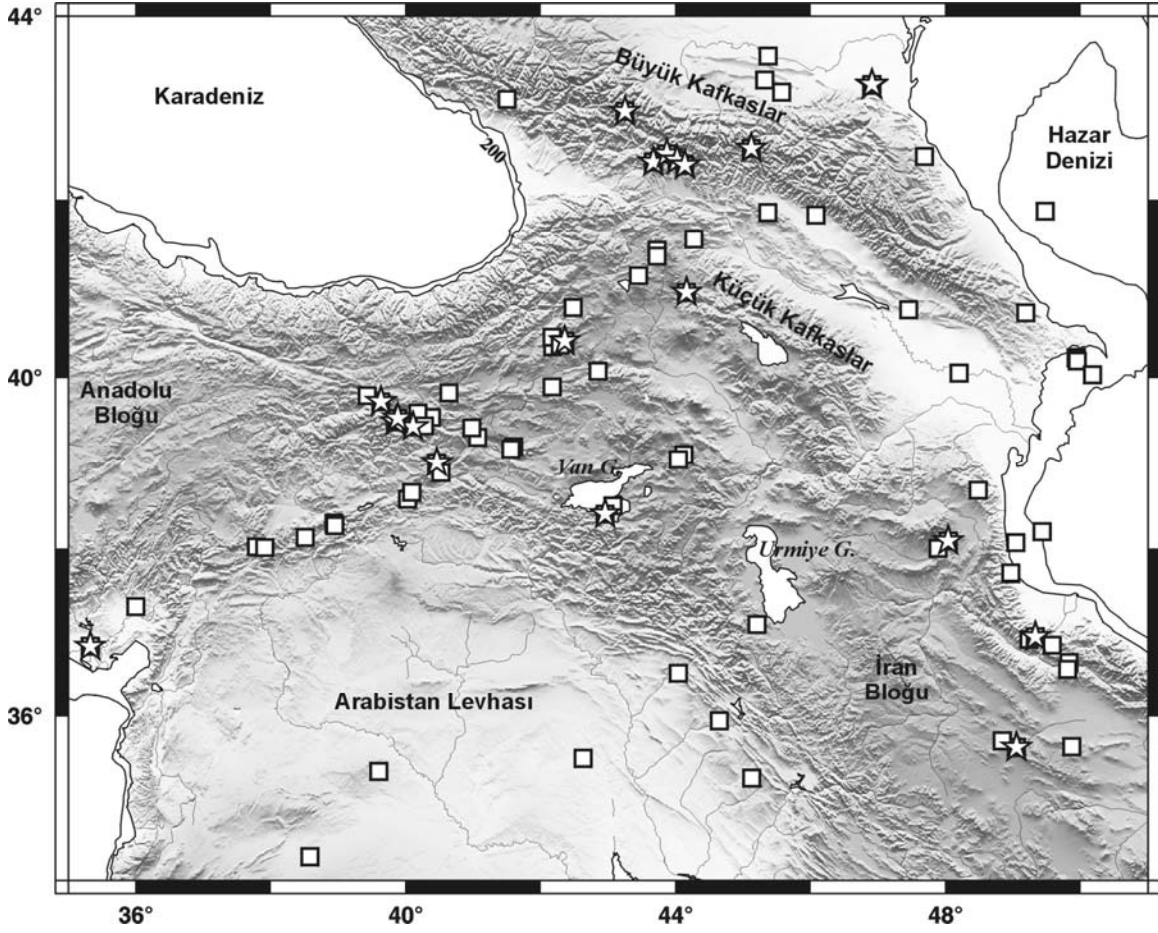
İkinci veri grubunu oluşturan kayma dağılımı modellenmesi değerleri (Tablo 1) ise ilk olarak Kikuchi vd. (2000) ile Yagi ve Kikuchi (2000) tarafından kullanılan yöntemle belirlenmiştir.

Bu yöntemde, en küçük hatalı odak mekanizması çözümüyle belirlenen doğrultu, dalım, kayma açısı, derinlik ve sismik moment parametrelerinden yararlanılmıştır. Yüksek frekanslı (0.01-1.00 Hz) geniş-bant (BB) P kayıtları ters çözülerek kırılmanın fay düzlemi üzerinde zaman içindeki yayılımı belirlenmeye çalışılmaktadır. Bu amaçla fay düzlemi $M \times N$ parçaya bölünmüş ve her bir parçadaki kırılma L adet ikizkenar üçgenden oluşan kaynak zaman fonksiyonu ile tanımlanır. Yapay olarak üretilen dalga şekillerinin gözlemsel veri ile uyumuna bakılarak en küçük hatalı çözüme karar verilir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken nokta kırılma şeklinin ve detayların eldeki verinin frekans içeriğine bağlı olarak fiziksel anlamda mantıklı olmasıdır. Kırılmanın detaylarını yakalamak için en önemli veri ivme kayıtlarıdır. Ancak Türkiye ve çevresinde meydana gelen orta ve büyük ölçekli depremlerin ivme kayıtları sadece bir kaç deprem için mevcuttur. Kayıtların bir çoğu deprem merkez üssünden uzak olduğundan yer değiştirme ortamına dönüştürme için yeterli sinyal/gürültü oranına sahip değildirler. Bu nedenle, ağırlıklı kırılma mekanizması hakkında genel bilgiler taşıyan telesismik kayıtlar kullanılmıştır.

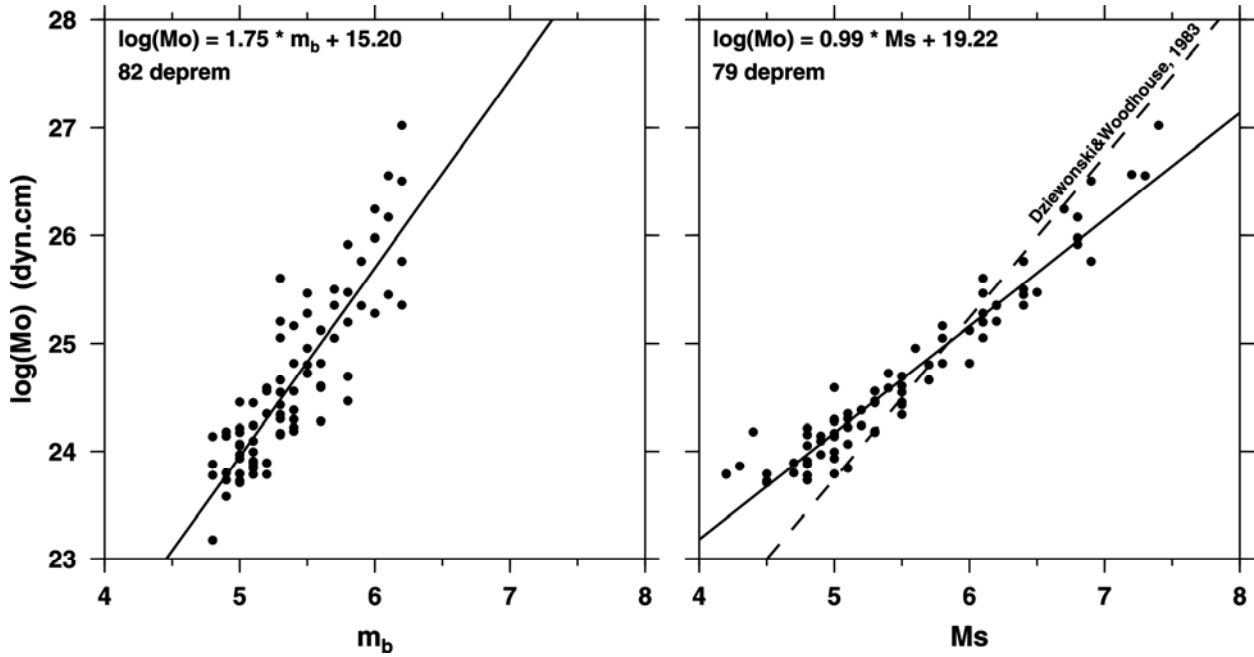
Bölgede meydana gelmiş 40 civarında orta ve büyük ölçekli depreme ait odak mekanizması çözümlerimiz ve bunlardan 20 tanesine ait kayma dağılımı modellenmeleri (bkz. Tablo 1) bu çalışmanın temelini oluşturur. Özellikle büyüklük ilişkileri için daha önce yapılmış ters çözüm çalışması sonuçlarının da eklenmesiyle bölgedeki depremlerin dinamik parametrelerinin birbirleriyle olan ilişkileri ayrıntılı olarak incelenmiş ve en küçük kareler anlamında matematik bağlantılar elde edilmiştir.

$m_b - M_s - M_0$ ilişkisi

Tarihsel depremlerin sismik moment değerini belirlemede en çok kullanılan parametre büyüklüktür. Sismik moment, özellikle yüzey dalgası büyüklüğü M_s 'den hesaplanır. Şekil 4'de inceleme bölgesinde ve 1960 yılından sonra meydana gelmiş ~80 depremin ters çözüm yöntemleriyle belirlenen sismik momentlerinin, Int. Seismological Centre (ISC) tarafından rapor edilen büyüklükleri ile ilişkisi verilmiştir.



Şekil 3. Bu çalışmada kullanılan depremlerin lokasyonları. Beyaz kareler M_o - m_b - M_s ilişkisi için kullanılan, yıldızlar ise Tablo 1’de verilen depremleri temsil eder



Şekil 4. İncelenen bölgedeki depremlerin cisim (m_b) ve yüzey (M_s) dalgası büyüklüklerinin sismik moment (M_o) ile en küçük kareler anlamında ilişkileri

Tablo 1. Kayma dağılımı modellenmesi ile belirlenen sismik moment (M_0), uzunluk (L), genişlik (W), alan (S), gerilme düşümü ($\Delta\sigma$), maksimum (D_{maks}) ve ortalama yer değiştirme (D_{ort}) miktarları

No	Tarih	Bölge	M_0 ($\times 10^{16}$ Nm)	M_w	L (km)	W (km)	S (km^2)	$\Delta\sigma$ (bar)	D_{maks} (cm)	D_{ort} (cm)
1	07.12.1988	Spitak-Ermenistan	1579	6.8	28	12	336	64	270	157
2	20.06.1990	Manjil-İran	16600	7.3	100	30	3100	24	355	180
3	29.04.1991a	Racha-Gürcistan	1952	6.9	25	24	600	33	274	108
4	29.04.1991b	Racha-Gürcistan	116	6.1	10	7	72	48	104	54
5	03.05.1991	Racha-Gürcistan	20	5.6	6	5	30	31	46	23
6	15.06.1991	Racha-Gürcistan	129	6.2	8	8	64	63	118	68
7	04.07.1991	Racha-Gürcistan	6	5.3	4	3	12	39	37	18
8	13.03.1992	Erzincan-Türkiye	1374	6.7	28	15	420	40	116	110
9	15.03.1992	Pülümür-Türkiye	46	5.8	7	6	42	43	105	37
10	23.10.1992	Barisokho-Gürcistan	209	6.2	11	7	77	77	231	91
11	05.12.1995	Pülümür-Türkiye	45	5.7	7	9	55	28	42	28
12	28.02.1997	Savalan-İran	208	6.1	13	10	130	35	130	53
13	27.06.1998	Adana-Türkiye	296	6.2	7	11	77	110	225	128
14	31.01.1999	Dağıstan-Rusya	31	5.6	6	7	42	29	53	25
15	21.02.1999	Dağıstan-Rusya	9	5.3	5	7	35	11	18	9
16	03.12.1999	Narman -Türkiye	23	5.6	6	5	30	36	57	26
17	15.11.2000	Van-Türkiye	39	5.7	10	10	105	9	23	12
18	22.06.2002	Avaj-İran	459	6.4	11	11	126	82	295	122
19	27.01.2003	Pülümür-Türkiye	86	6.0	9	9	80	30	82	36
20	01.05.2003	Bingöl-Türkiye	349	6.3	12	14	168	40	110	69

Bu depremlerden yarısı tarafımızdan bu çalışmada incelenmiştir (örn. Tan ve Taymaz, 2003; Taymaz ve Tan, 2003), diğer yarısı ise farklı araştırmacılar tarafından (Taymaz vd., 1991b; Campos vd. 1994, Taymaz, 1997) ve Harvard-CMT kataloğundan alınmıştır. Bilindiği gibi cisim dalgası büyüklüğü (m_b) 5.5 civarlarında doygunluğa ulaşmaya başlar (Geller, 1976; Lay ve Wallace, 1995). Şekil 4'den m_b 'nin ~ 6.0 'da tamamen doygunluğa ulaştığı ise açıkça görülmektedir. Bölge için toplam 82 depreme ait m_b değeri mevcuttur ve sismik momentle aralarındaki doğrusal ilişki

$$\log(M_0) = 1.75^{\pm 0.11} \cdot m_b + 15.20^{\pm 0.59} \quad (1)$$

$(r^2 = 0.76)$

ile ifade edilebilir. Ancak ~ 7.2 'de başlayıp ~ 8.0 civarında tamamen doygunluğa ulaşan M_s daha iyi bir ilişki göstermektedir. Toplam 79 deprem kullanılarak elde edilen en küçük kareler anlamındaki doğru

$$\log(M_0) = 0.99^{\pm 0.03} \cdot M_s + 19.22^{\pm 0.17} \quad (2)$$

$(r^2 = 0.93)$

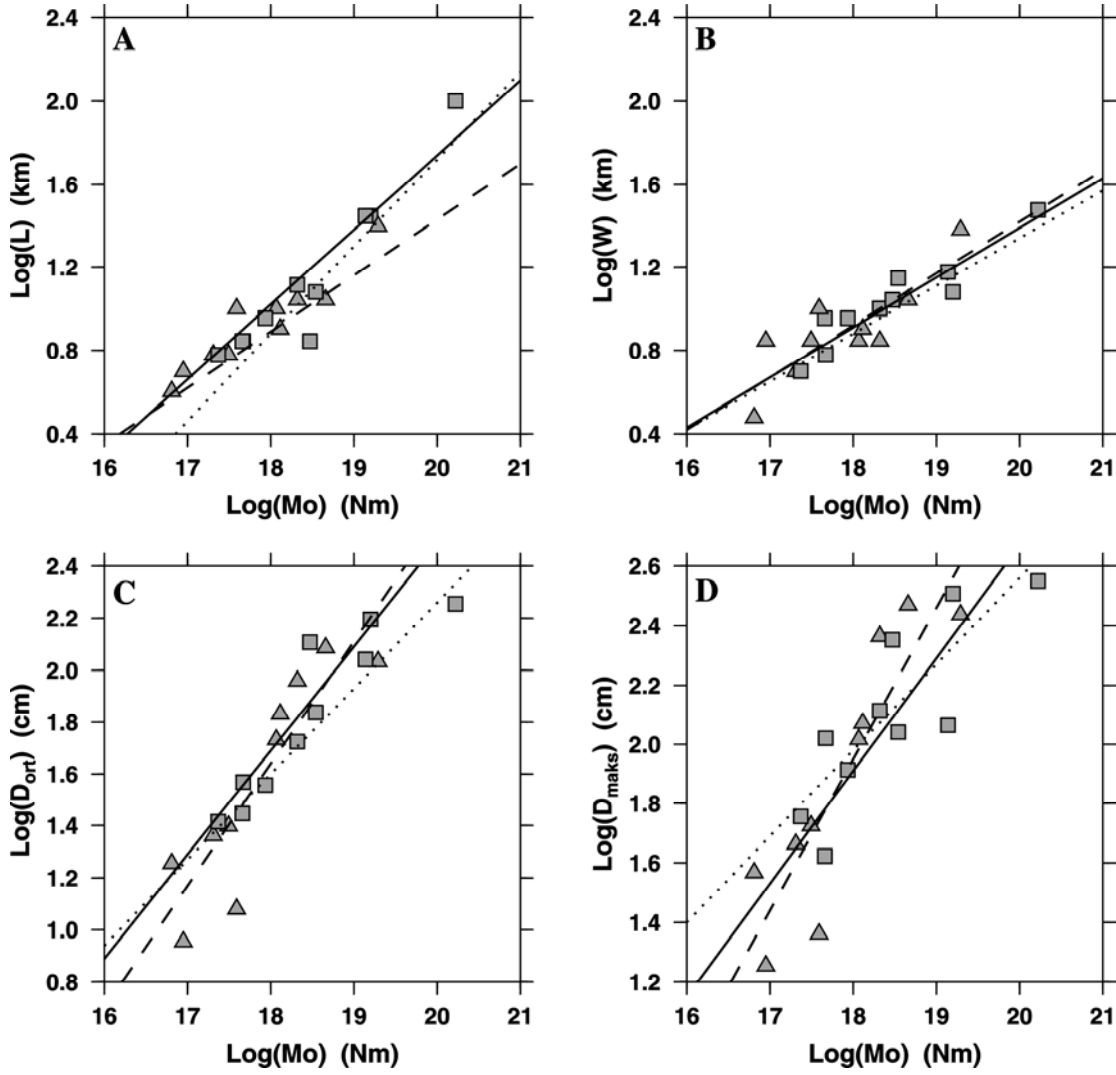
formülü ile ~ 95 'lik bir uyumla veriyi temsil eder. Bu ifadeler sismik momentin $\text{dyn}\cdot\text{cm}$ olması halinde geçerlidir. Diğer yandan, Şekil 4'de kesikli çizgi Dziewonski ve Woodhouse (1983) tarafından verilen

$$\log(M_0) = 1.5 \cdot M_s + 16.1 \quad (3)$$

eşitliğini temsil eder. Görüldüğü gibi küresel ölçekteki depremlerin kullanılmasıyla elde edilen ilişki katsayıları Avrasya-Arabistan kıtasal çarpışma bölgesindeki depremleri tam olarak temsil edememektedir.

Sismik moment - fay alanı ilişkisi

Deprem sırasında oluşan faylanmanın boyutunu belirlemek en temel problemlerden biridir. Yakın tarihteki depremler için elde edilen sismolojik ve jeodetik verilerle belirli ölçüde bunu öğrenebildiğimiz halde geçmişte meydana gelmiş ve oransal olarak da fazla olan büyük depremler hakkında bilgilerimiz çok daha kısıtlıdır. Bu depremlerin eğer varsa yüzey kırığına bağlı olarak kırılma alanı kestirilmeye çalışılır. Diğer bir yaklaşım şekli de farklı çalışmalardan elde edilen



Şekil 5. Sismik momentin, faylanma parametreleri ile ilişkileri Açıklama için metne bakınız
 □: Doğrultu atımlı faylanma, Δ: Ters faylanma

deneysel bağıntıları kullanılmaktadır. Arabistan-Avrasya kıtasal çarpışma bölgesine ait bu tip bir amprik bağıntı bulabilmek için orta ve büyük ölçekli ($M_w > 5.5$) 20 depreme ait kayma dağılımı modellenmesi yapılmıştır. Kırılmanın zaman ve uzaydaki davranışını belirlemek için matematiksel detayları Yagi ve Kikuchi (2000) ve Yagi vd. (2004)'de tanımlanan ters çözüm algoritması kullanılmıştır. Tablo 1'de dalga şekli ters çözüm sonuçlarına dayanılarak belirlenen faylanma parametreleri verilmiştir. Şekil 5'de sismik momentin (M_0) faylanmanın uzunluğu (L), eni (W), ortalama (D_{ort}) ve maksimum (D_{maks}) yer değiştirme ile ilişkileri verilmiştir. Noktalı çizgi doğrultu atımlı faylanmaları, kesikli çizgi ters faylanmaları, düz çizgi ise tüm

depremleri temsil eden en küçük kareler anlamında doğrulardır. Elde edilen verilere göre fayın uzunluğu (L) ile depremin büyüklüğü arasındaki ilişki doğrultu atımlı ve ters faylanmalar için birbirinden farklıken fayın eni (W) için çok daha benzer bir ilişki görülmektedir. Bunun nedeni özellikle doğrultu atımlı faylarda, faylanmanın eninin kırılğan şizosfer kalınlığına kadar artması ve durmasıdır (bkz. Scholz, 1990). Faylanma sırasında meydana gelen yer değiştirme değerleri de doğrusal ilişkiler gösterir. Ancak D_{maks} değerleri D_{ort} değerlerine göre daha saçılmış bir görüntü verirler. Sismik momentin artmasıyla ters faylanmalara ait D_{ort} değeri doğrultu atımlara oranlara biraz daha hızlı artar.

Tablo 2. Sismik momentin diğer faylanma parametreleriyle ilişki eşitlikleri.

log (Y)	=	a ^{±hata}	·	log (X)	+	b ^{±hata}	r²
Tüm (20 deprem)							
log (L)	=	0.36 ^{±0.03}	·	log (M ₀)	-	5.46 ^{±0.57}	0.88
log (W)	=	0.24 ^{±0.03}	·	log (M ₀)	-	3.41 ^{±0.51}	0.80
log (D _{ort})	=	0.40 ^{±0.05}	·	log (M ₀)	-	5.51 ^{±0.82}	0.81
log (D _{maks})	=	0.38 ^{±0.05}	·	log (M ₀)	-	4.93 ^{±0.99}	0.73
log (S)	=	0.60 ^{±0.05}	·	log (M ₀)	-	8.94 ^{±0.83}	0.91
Ters faylanma (10 deprem)							
log (L)	=	0.27 ^{±0.03}	·	log (M ₀)	-	3.97 ^{±0.62}	0.89
log (W)	=	0.25 ^{±0.06}	·	log (M ₀)	-	3.58 ^{±1.05}	0.69
log (D _{ort})	=	0.47 ^{±0.09}	·	log (M ₀)	-	6.82 ^{±1.53}	0.79
log (D _{maks})	=	0.51 ^{±0.09}	·	log (M ₀)	-	7.24 ^{±1.61}	0.80
log (S)	=	0.53 ^{±0.09}	·	log (M ₀)	-	7.58 ^{±1.52}	0.83
Doğrultu atımlı faylanma (10 deprem)							
log (L)	=	0.42 ^{±0.05}	·	log (M ₀)	-	6.68 ^{±0.89}	0.91
log (W)	=	0.23 ^{±0.03}	·	log (M ₀)	-	3.26 ^{±0.56}	0.88
log (D _{ort})	=	0.33 ^{±0.05}	·	log (M ₀)	-	4.34 ^{±0.94}	0.84
log (D _{maks})	=	0.39 ^{±0.07}	·	log (M ₀)	-	3.24 ^{±1.25}	0.70
log (S)	=	0.67 ^{±0.05}	·	log (M ₀)	-	10.15 ^{±0.95}	0.95

Sismik moment ile dinamik parametreler arasındaki ilişki katsayıları ve bunlara ait hata oranları Tablo 2’de verilmektedir. a ve b en küçük karelere uygun doğrunun katsayılarıdır. Korelasyon katsayısı (r^2) doğrunun veriyle ne kadar uyumlu olduğunu gösterir ve $r^2=1.0$ uyumun %100 olduğu anlamına gelir.

Uygulama: 1930 Salmas ve 1988 Spitak Depremleri

Türkiye-İran sınırına yakın Urmiye Gölü civarında meydana gelen 6 Mayıs 1930 Salmas depremi için sadece $M_s=7.2$ ve 30 km yüzey kırığı boyu hakkında bilgi vardır (Ambraseys ve Jackson, 1998). Eğer sismik moment değerini Dziewonski ve Woodhouse (1983) tarafından verilen Denklem 3 ile hesaplırsak $M_0=79.4 \times 10^{18}$ Nm ($M_w=7.2$) buluruz. Bu değeri Mai ve Beroza (2000) tarafından tüm faylanma tipleri için verilen eşitlikte kullanırsak faylanmanın olası boyu,

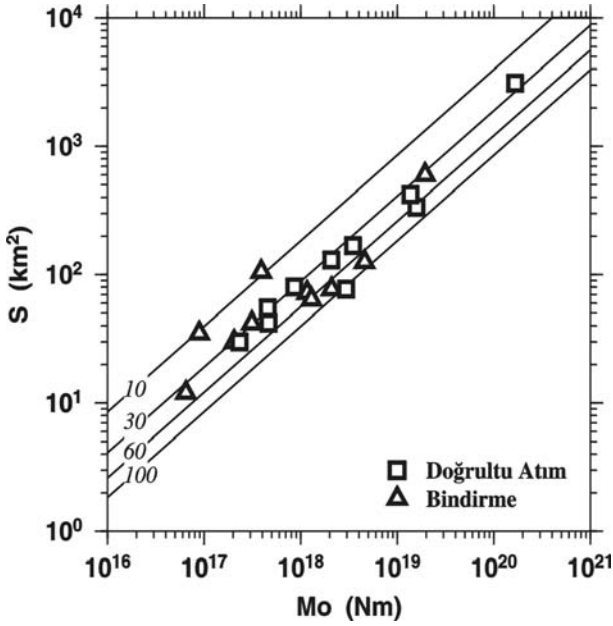
$$\log(L) = 0.35 \cdot \log(M_0) - 5.20 \Rightarrow L = 58 \text{ km} \quad (4)$$

hesaplanır. Bu çalışmada bulduğumuz Denklem 2’deki M_s - M_0 ilişkisini kullandığımızda ise $M_0=22 \times 10^{18}$ Nm ($M_w=6.8$) bulunur. Bu sismik moment değerini Tablo 2’de verilen hem genel hem de doğrultu atımlı faylanma için belirlenen ifadelerle yerleştirelim:

$$\log(L) = 0.36 \cdot \log(M_0) - 5.46 \Rightarrow L = 32 \text{ km} \quad (5)$$

$$\log(L) = 0.42 \cdot \log(M_0) - 6.68 \Rightarrow L = 28 \text{ km} \quad (6)$$

Bu çalışmada elde edilen ilişki katsayıları ile hesaplanan 28 ve 32 km faylanmanın uzunluğu yüzey gözlemleriyle (30 km) çok iyi uyum sağlamaktadır. Burada temel unsur sismik momentin genel olarak kullanılan M_s - M_0 ifadesinde daha büyük hesaplanmasıdır. Sadece Mai ve Beroza (2000) tarafından verilen katsayıları kontrol etmek için, hesapladığımız $M_0=22 \times 10^{18}$ Nm değerini Denklem 4’de kullandığımızda fayın uzunluğu $L=40$ km hesaplanır. Aynı çalışmada verilen diğer katsayılar ise bu uzunluğu 60 km’ye kadar çıkarmaktadır.



Şekil 6. Sismik moment fay alanı ilişkisi.
Açıklama için metne bakınız

Elde edilen ifadeleri daha yakın tarihli 7 Aralık 1988 Spitak depremine uygularsak, yüzey dalgası büyüklüğü $M_s=6.9$ olan bu deprem için Denklem 2'den amprik sismik moment değeri $M_0=1.12 \times 10^{19}$ Nm bulunur. Spitak depremi oblik faylanma gösterdiği için hesaplanan sismik moment değerini Denklem 5'de yerine koyarsak

$$\log(L) = 0.36 \cdot \log(1.12 \times 10^{19}) - 5.46 \quad (7)$$

faylanmanın uzunluğu $L=25$ km bulunur. Yüzey kırıklarının boyunun 23 km olduğu (Philip vd., 1992) ve geniş-bant verilerinin ters çözümünden kırılmanın boyunun 28 km belirlendiği (Tablo 1) göz önünde tutulursa hesaplanan $L=25$ km fay uzunluğu oldukça iyi bir sonuçtur. Wells ve Coppersmith (1994) ise 7 Aralık 1988 Spitak depremi için yer altında meydana gelmiş kırılma boyunu 38 km olarak vermektedir.

Gerilme düşümü

Depremlerin en önemli dinamik parametrelerinden biri de *gerilme düşümü* ($\Delta\sigma$). Fay düzlemi üzerinde bir noktadaki kırılma öncesi ve sonrasındaki gerilme farkını ifade eder ve bu değer her nokta için farklıdır. Fay alanı üzerindeki gerilme düşümleri toplamının fay alanına bölünmesi ile *statik gerilme düşümü* tanımlanır.

Aki (1972), sismik moment (M_0) ve fay alanına (S) bağlı olarak

$$\Delta\sigma = c \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{\sqrt[3]{S^2}} \quad (8)$$

ifadesini vermiştir. c , fayın şekline ve hareketine göre değişen katsayıdır ve pratikte 2.4 ile 5 arasındadır. Dairesel kırılma için $c=2.4$, eliptik kırılma için ise $c=2.5$ alınabilir (Aki, 1972; Kikuchi vd, 1993). μ katılık sabitidir ve genel olarak 3×10^{11} dyn·cm² kabul edilir. Bir deprem için belirlenen gerilme düşümü değerleri birbirlerinden çok farklı olabilir. Artçı sarsıntı dağılımı, cisim dalgası spektrumu, kuvvetli yer hareketi kayıtları kullanılarak yapılan hesaplamalar gibi farklı yöntemlerden elde edilen gerilme düşümü değerleri arasında 4-5 kata varan farklılıklar ortaya çıkarmaktadır ve bu belirsizlik çok iyi bilinen temel bir problemdir (Lay ve Wallace, 1995). Bu yüksek oranlı fark hatadan değil olayın fiziksel tanımındaki yetersizlikten kaynaklanır. Hesaplamalarda ana parametre fayın boyutları ve sismik momenttir. Ters çözümde sismik moment değeri önemsiz derecede değişme gösterirken fay alanındaki değişim parametrelerin hesaplanmasında önem kazanır. Seçilecek fay alanı farklı değerlerin hesaplanmasına neden olacaktır. Bu nedenle faylanma alanının belirlenmesinde dikkatli davranılmalıdır.

Kanamori ve Anderson (1975) depremler sırasında meydana gelen gerilme düşümünün ($\Delta\sigma$) genel olarak 30-100 bar arasında olduğunu belirtmiştir. Daha sonraları yapılan çalışmalarda da bu görüşün doğruluğu kanıtlanmaktadır. Levha sınırlarında düşük gözlenen gerilme düşümü, levha içi depremlerde 100 bar civarlarındadır. Bunu oluşturan nedenlerden biri düşük hareket hızı ve kırılma yüzeyindeki kil gibi kaymayı kolaylaştıracak malzeme içeren zonun oldukça ince (1-10 m) olmasıdır. Levha sınırını oluşturan faylarda ise bu zonun genişliği 100-1000 m kadar olabilir. Az miktardaki fay kili sürtünmeyi artırır (Scholz, 1990). Diğer bir neden ise levha içi depremlerin tekrarlanma aralığının uzun ve fay boyunun daha kısa olmasıdır (Lay ve Wallace, 1995). Kayma dağılımı modellenmesi yapılan 20 depremden elde edilen fay

alanı ve sismik moment değerleri kullanılarak hesaplanan gerilme düşümü değerleri grafiklendiğinde çoğunluğunun 30-60 bar arasında olduğu görülür. Şekil 6, Tablo 1'de verilen sismik moment ve faylanma alanı arasındaki ilişkiyi gösterir. Düz çizgiler sabit gerilme (10-100 bar) değerleri temsil eden doğrulardır. İncelenen depremler içinde 27 Haziran 1998 Adana depremi en yüksek gerilme düşümü değerine sahiptir (110 bar). Bunun temel nedeni bulunan fay alanının oldukça küçük (77 km²) olmasıdır.

Sonuçlar

Bu çalışmada Arabistan-Avrasya kıtasal çarpışma bölgesinde meydana gelmiş önemli depremlere ait parametrelerin birbirleriyle ilişkisi incelenmiştir. Dalga şekillerinin ters çözümüyle belirlenmiş sismik moment değerlerinin m_b ve M_s büyüklükleriyle olan ilişkisi için bölgeye özgü yeni eşitlikler ortaya konmuştur. Yeni m_b - M_0 ve M_s - M_0 ilişki katsayıları, dünya genelindeki depremlerin kullanılmasıyla belirlenen değerlerden farklıdır ve bölgedeki depremleri daha iyi temsil eder. Diğer yandan 20 depreme ait kayma dağılımı modellenmesi sonuçlarından yararlanılarak sismik momentin diğer parametrelerle ilişkilerini gösteren logaritmik bağıntılar da belirlenmiştir. Bu bağıntılar özellikle tarihsel depremlerin daha iyi anlaşılması açısından önem taşır.

Teşekkür

Katkılarından dolayı Dr. Peter Zwick, Dr. Robert McCaffrey, Dr. Geoffrey Abers, Dr. Yugi Yagi, Dr. Alessia Maggi'ye teşekkür ederiz. Bu çalışmada kullanılan deprem verileri IRIS (Washington Üniversitesi), Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Deprem Araştırma Dairesi ile Dr. Özer Kenar ve Arş. Gör. Serkan Irmak (Kocaeli Üniversitesi, YUBAM) tarafından sağlanmıştır. Bilgi işlem ve laboratuvar alt yapısının güçlenmesindeki katkılarından dolayı İTÜ Rektörlüğüne ve İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsüne teşekkür ederiz. Bu çalışma kısmen, TÜBİTAK-YDABAG ve TÜBA (TT/TÜBA-GEİP/2001-2-17) tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Aki, K., (1967). Scaling law of seismic spectrum, *Journal of Geophysical Research*, **72**, 1217-1231.
- Aki, K., (1972). Earthquake mechanism, *Tectonophysics*, **13**, 423-446.
- Ambraseys, N. N. ve Jackson, J. A., (1998). Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region, *Geophysical Journal International*, **133**, 390-406.
- Campos, J., Madariaga, R., Nabelek, J., Bukchin, B. G. ve Deschamps, A., (1994). Faulting process of the 1990 June 20 Iran earthquake from broadband records, *Geophysical Journal International*, **118**, 31-46.
- Dziewonski, A. ve Woodhouse, J.H., (1983). An experiment in systematic study of global seismicity: Centroid-moment tensor solution for 201 moderate and large earthquakes of 1981, *Journal of Geophysical Research*, **88**, 3247-3271.
- Geller, R. J., (1976). Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **66**, 1501-1523.
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M. ve Bebarian, M., (2002). Active tectonics of the South Caspian, *Geophysical Journal International*, **148**, 214-245.
- Kanamori, H. ve Anderson, D. L., (1975). Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **65**, 1073-1095.
- Kikuchi, M., Kanamori, H. ve Stake, K., (1993). Source complexity of the 1988 Armenian earthquake: Evidence for a slow after-slip event, *Journal of Geophysical Research*, **98**, 15797-15808.
- Kikuchi, M., Yagi, Y. ve Yamanaka, Y., (2000). Source Process of Chi-Chi, Taiwan Earthquake of September 21, 1999 Inferred from Teleseismic Body waves, *Bulletin. Earthquake Research Institute, Univ. Tokyo*, **75**, 1-13.
- Lay, T. ve Wallace, T.C., (1995). Modern Global Seismology, 521 sh., Academic Press, San Diego, USA.
- Mai, P. M. ve Beroza, G. C., (2000). Source scaling properties from finite-fault-rupture models, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **90**, 604-615.
- McCaffrey, R. ve Nábélek, J. L., (1987). Earthquakes, gravity, and the origin of the Bali Basin: an example of a nascent continental fold-and-thrust belt, *Journal of Geophysical Research*, **92**, 441-460.

- McClusky, S., et al., (2000). Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus, *Journal of Geophysical Research*, **105**, 5695-5719.
- Molnar, P. ve Lyon-Cáaen, H., (1989). Fault plane solutions of earthquakes and active tectonics of the Tibetan Plateau and its margins, *Geophysical Journal International*, **99**,123-153.
- Nábělek, J. L., (1984). Determination of earthquake source parameters from inversion of body waves, *PhD Thesis*, M.I.T., Massachusetts, U.S.A
- Philip, H., Rogozhin, E., Cisternas, A., Bousquet, J.C., Borisov, B. ve Karakhanian, A., (1992). The Armenian earthquake of 1988 December 7: faulting and folding, neotectonics and paleoseismicity, *Geophysical Journal International*, **110**, 141-158.
- Scholz, C. H., (1982). Scaling laws for large earthquakes: consequences for physical models, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **72**, 1-14.
- Scholz, C. H., (1990). The Mechanics of Earthquakes and Faulting, 439 sh., Cambridge University Press.
- Stirling, M., Rhoades, D. ve Berryman, K., (2002). Comparison of earthquake scaling relations derived from data of the instrumental and preinstrumental era, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **92**, 812-830.
- Tan, O. ve Taymaz, T., (2003). Seismotectonics of Eastern Anatolia at the Intersections of East and North Anatolian Fault Zones and Along the Caucasus - Source and Rupture Histories of the Recent Destructive Earthquakes. *International Workshop on the North Anatolian, East Anatolian and Dead Sea Fault Systems: Recent Progress in Tectonics and Paleoseismology and Field Training Course in Paleoseismology*, P.160, Middle East Technical University (METU), 31 August - 12 September 2003, Ankara, Turkey.
- Taymaz, T (1997). Doğu Anadolu Bölgesi'nin Aktif Tektoniği: Yıkıcı Depremlerin Kaynak Mekanizmaları ve Tektonik Yerleşim, TÜBİTAK, YDABÇAG Projesi, Final Raporu, No: YBAG-100, Ocak, 1997.
- Taymaz, T., Jackson, J. A. ve McKenzie, D., (1991a). Active Tectonics of the North and Central Aegean Sea, *Geophysical Journal International*, **106**, 43-490.
- Taymaz, T., Eyidoğan, H. ve Jackson, J., (1991b). Source Parameters of large earthquakes in the East Anatolian Fault Zone (Turkey), *Geophysical Journal International*, **106**, 537-550.
- Taymaz, T. ve Tan, O., (2003). Seismotectonics of East Anatolian Fault Zone (EAFZ) and Surroundings: Source Mechanisms and Rupture Histories of January 27, 2003 (Mw=6.0) Pülümür and May 1, 2003 (Mw=6.3) Bingöl Earthquakes. *International Workshop on the North Anatolian, East Anatolian and Dead Sea Fault Systems: Recent Progress in Tectonics and Paleoseismology and Field Training Course in Paleoseismology*, P.161, Middle East Technical University (METU), 31 August - 12 September 2003, Ankara, Turkey.
- Wells, D. L. ve 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.
- Yagi, Y. ve Kikuchi, M., (2000). Source rupture process of the Kocaeli, Turkey, earthquake of August 17, 1999, obtained by joint inversion of near-field data and teleseismic data, *Geophysical Research Letters*, **27**, 1969-1972.
- Yagi, Y., Mikumo, T. ve Pacheo, J., (2004). Source rupture process of the Tecoman, Colima, Mexico earthquake of January 22, 2003, determined by joint inversion of teleseismic body wave and near-field data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, baskıda.