

Doğu Anadolu Fayı Üzerinde Küçük Deprem Çalışmaları

AHMET ERCAN

İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeofizik Kürsüsü

ÖZ: Doğu Anadolu fayının 39° - 38° enlemleri ve 38° - 40° boylamları arasında, Malatya-Pütürge kazası çevresinde, 105 gün süre ile yapılan küçükdeprem (microearthquake) çalışmaları, bölgede günde ortalama 5 tane, büyüklüğü 3'ten küçük sarsıntı olduğunu göstermektedir. Toplu fay düzlemi bulguları, atımın sol yönlü olduğunu göstermekte ve ikincil fayların birçoğunda da atım yönünün ana faya uygun olabileceği sanılmaktadır. Gerilim boşalmanın çoğunlukla ana fay boyunca uzanması ve günde 10^{16} erg'lik etkinlik, fayın dinlenme süresinde canlılığını koruduğunu kanıtlamaktadır. Şiro çayı ile Fırat nehrinin kesiştiği Doğanıyol bucağı çevresi, bölgede fayın en devingen olduğu ve karmaşık atımların toplandığı yer görünümündedir.

ABSTRACT: During the summer of 1977, three high-frequency, high-gain, and portable seismographs were operated, in latitudes of 38° - 39° and in longitudes of 38° - 40° , around city of Pütürge of Malatya province, in Turkey. These 105 days long microearthquake recordings indicated daily average of 5 events, with the magnitudes less than 3. This activity had a 'b' value of 1.168 over 1.5 units of magnitude. A close correspondence was found between the major fault and high microearthquake activity. The composite fault plane solution confirmed a left handed strike-slip motions, for the most of secondary faults. Average daily energy release of 10^{16} erg and explicit alignment of strain-release contours along the East Anatolian Fault were some indications of continuous tectonic activity, in the region, in the quiet period. The highest activity, in the area, recorded was about town of Doğanıyol, situated at approximately crossing point of two rivers, named Fırat and Şiro, flowing on the of top the major fault trace.

GİRİŞ

Doğu Anadolu Fayı, kuzeyde Karlıova'dan başlayarak güneybatıya doğru uzanan ve Anadolu levhasını sınırlayan önemli bir tektonik oluşumdur (Arpat ve Şaroğlu, 1975; Vine, 1966; McKenzie, 1970a,b; Khan, 1975; Arpat, 1977). Sol yönlü doğrultu atımlı bu fayın canlılığını koruduğu belirtilerinin gözlenen genç yüzeysel değişiklikler ve fay boyunca rastlanan kentsel kalıntılar olduğu değerlendirilmiştir (Arpat, 1977). Nitekim, aygıtsal deprem algılarının başladığı

20. yüzyıl başlarından beri fayın yalnız küçük bir parçasını oluşturan 38° - 39° enlemleri ve 38° - 40° boylamları arasındaki alanda 14 tane 4.5'dan büyük depremlerin gözlenmesi (Ergin v.d., 1967), bölgede gerilimin yaklaşık 5 yılda bir boşaldığı izlenimini uyandırmaktadır. Günümüzde suskunluk döneminde olan fayın Pütürge-Sivrice bölümünün gerilim durumunu incelemek üzere, üç aylık kısa bir süre için yukarıda verilen sınırlar içinde küçükdeprem çalışmaları Temmuz 1977'den Ekim 1977'ye değin sürdürülmüştür (Şekil 1).



KOTİN, 1977'DEN
TÜRKİYEİN BASITLEŞTİRİLMİŞ TEKTONİK HARİTASI

1. Karasal Fasies
2. Lagün Fasiesi
3. Denizel Fasies
4. Orta Alpin Kıvrımları
5. Erken Alpin Kıvrımları
6. Paleozoik Masifler
7. Sönmüş volkanlar
8. Normal faylar, grabenler
9. Sındırmeler
10. Doğru tuzlu etimli faylar

38° +
39°

20. YÜZYIL DEPREMLERİ
● M>4-6 Richter

ÖLÇEK : 1 / 500 000

0 5 10 15 20 25



Şekil 1: Doğu Anadolu Fayı boyunca küçükdeprem çalışmalarının sürdürüldüğü geniş alan. (Kotin, 1977'den)

DEPREM GÖZLEM YERLERİ VE KULLANILAN AYGITLAR

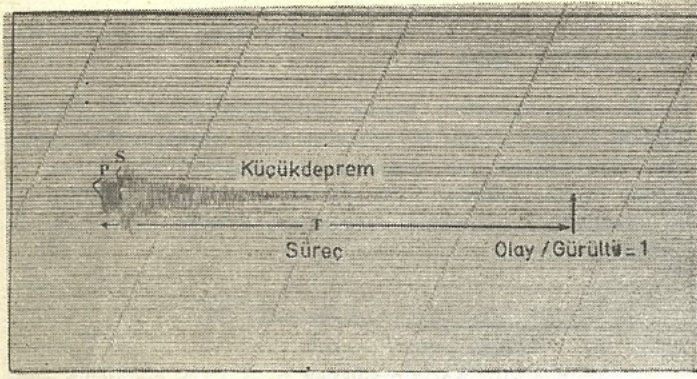
Massachusetts Institute of Technology ve İstanbul Teknik Üniversitesi aygıtsal olanaklarının kullandığı bu çalışmada, elde bulunan üç Sprengnether MEQ-800 kısa dönemli, yüksek kazançlı, taşınabilir deprem alıcı takımı (kayıdıcı, sismometre ve WWVT radyo) fayı içine alacak biçimde, kenarları yaklaşık 90'ar kilometrelik bir üçgenin köşelerine yerleştirilmiştir. Gözlem yerleri; kuzeyde Hazar Gölü kıyısında Güneyköy (Elâzığ), batıda İspendere içmeleri (Malatya) ve güneyde faya 5 kilometre uzakta bulunan Pütürge (Malatya) kentleridir (Şekil 1). Sonraları çok küçük depremleri de algılayabilme amacıyla üçgenin iki ayağı Doğanyol ve Aslankent'e (Malatya) taşınmıştır. Bunlarla birlikte Pütürge özekli yaklaşık 18 kilometre yarıçaplı, altı noktalı, teybe alıcı uzak iletişim (Radio-link) dizgesi de kurulmuştur. Burada sunulan bilgiler yalnız taşınır alıcılardan elde edilen bilgileri kapsamaktadır.

Richter büyüklükleri (magnitudes) 4'ten küçük ve dönemleri yaklaşık 0.1 saniyeden 3 saniyeye değin değişen, küçükdeprem olaylarını algılayabilmek için alıcıların süzücüleri (filters) 0.5 ile 5 hertz arasında en dengeli tepkiyi ve

rebilecek biçimde ayarlanmıştır. 30 cm'lik tamburları olan yazıcılar 2 mm çizgi aralığı ve 60 mm/dakika hızla 26 saat sürekli algılama yapabilecek özelliktedir. Aygıtlar 60'dan 120 dB'le değin değişen yüksek kazançlı yükselteç kademelerini içermektedir. Bu kademelerden 90 dB olanı, olay/gürültü oranına göre çevresel gürültüleri ayırdedebilecek nitelikte olduğu için algılama süresince kullanılmış, sürekli algılamayı sağlamak amacıyla da ± 24 voltluk oto aküleri ile dıştan besleme yapılmıştır. 1 saniye öz dönemli sismometreler taşıt gürültülerinden en az 1 km uzağa ve düzlenmiş köklü kayalar üzerine yerleştirilmiştir. Zamanlama; her kâğıt değiştiriminde, 5, 10, 15 Mhz'de yayın yapan WWVT radyoları ile yapılmıştır. Ölçü süresince aygıtların saatleri ile ilgili herhangi bir sorunla karşılaşmamıştır.

DEPREMLERİN BÜYÜKLÜKLERİ VE OLUŞAN SAYILAR

105 günlük çalışma süresinde algılanan Richter ölçeğine göre en büyük deprem 3.3 ve en küçük deprem ise 0.5 büyüklüğündedir. Küçük depremler bir bölgenin sarsılabilirliğini (seismicity) simgeleyen sık ve küçük erk boşalmıdır. Bu depremler kısa dönemleri (0.1-5 saniye) ya da sık-



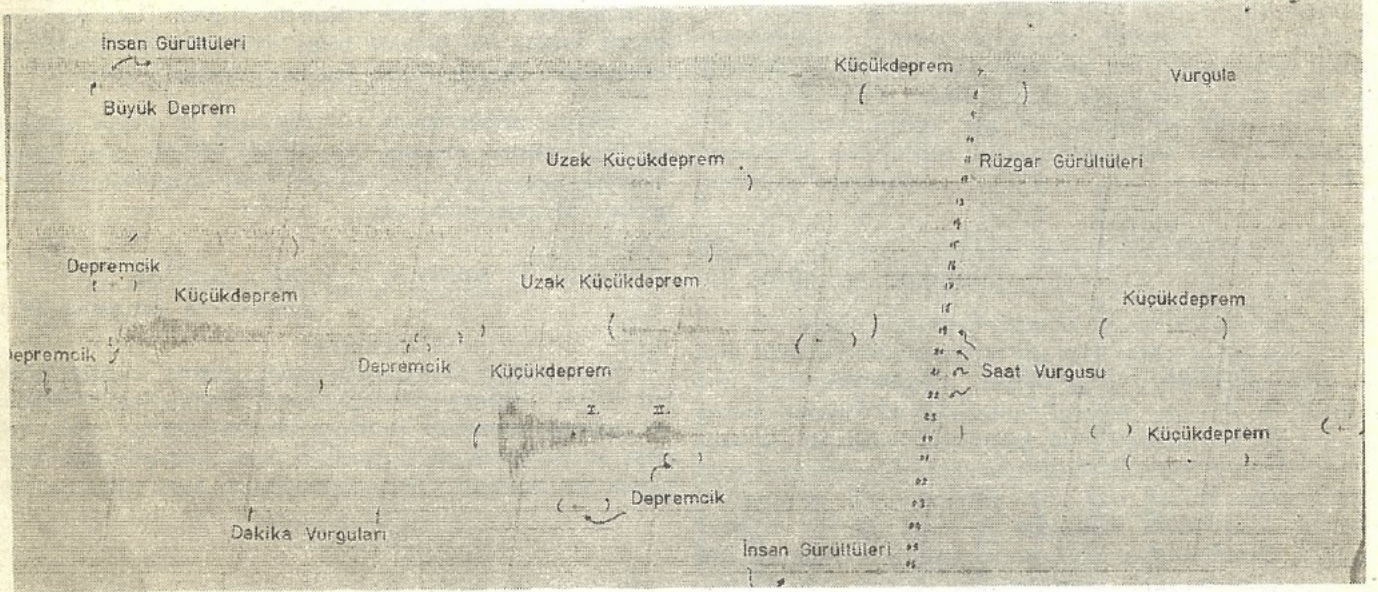
(a)

lıkları (0.2-10 saniye/saniye) ve çabuk sönümlenmeleri ile büyük depremlerden ayırt edilebilirler (Şekil 2 a, b, c).

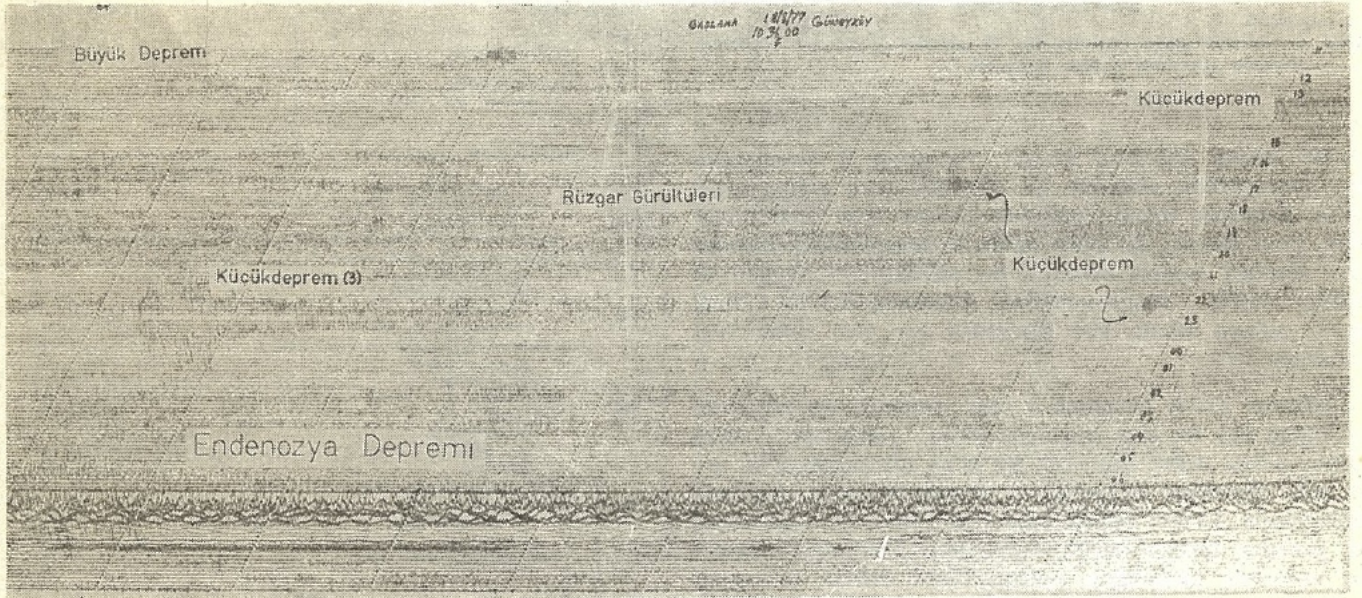
Depremlerle çıkan erkin ölçüsüne bağlı olan büyüklükler, oluşumun sönüm sürecinden, izleyen deneysel bağıntının kullanılmasıyla bulunmuştur.

$$M = -0.83 + 1.59 \log_{10} (\text{Süreç})$$

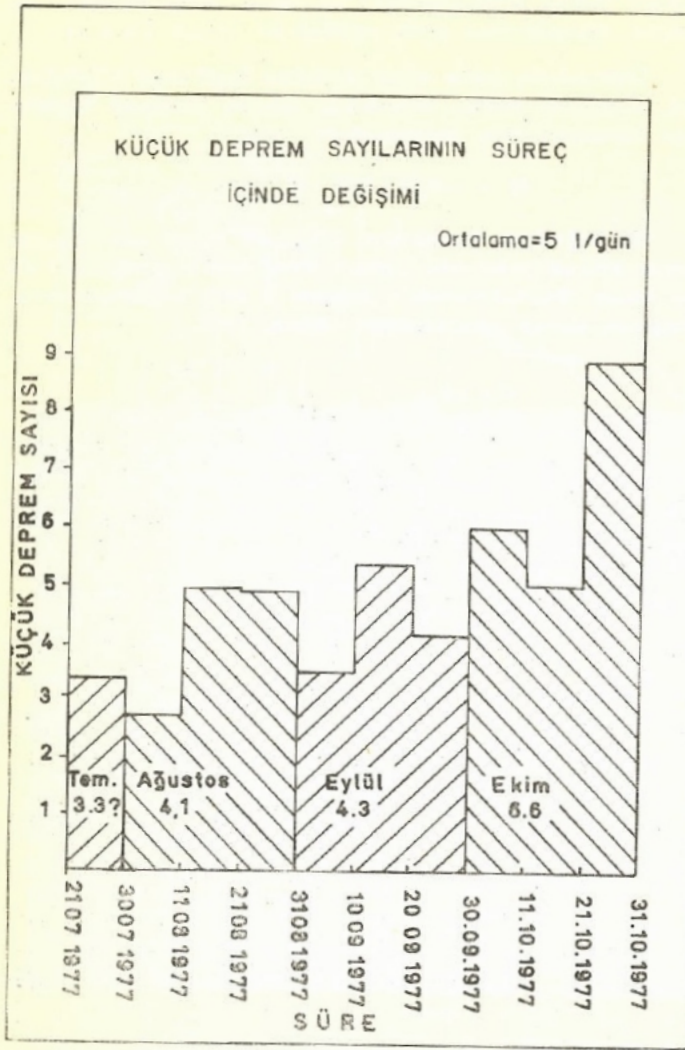
Bu bağıntının katsayıları, 1973-1974 yılları arasında çalışma bölgesi yakınında yapılan araştırmalar sonucunda elde edilen Wood-Anderson'a eşlenik, 3 ayrı bağıntının ortalamasını alarak çıkartılmıştır (Alsan, 1975).



(b)



Sekil 2: Kısa dönemli örnek küçükdeprem algıları. Küçükdepremler P ve S evrilerinden ve sönümlerinden tanımlar. Depremciklerin süreçleri göreceli olarak daha küçüktür. Zaman vurguları her dakikada ve saatte vurulur. İki vurgu arasındaki uzaklık 60 mm dir. Her saat başında bir ise vurgu genişliği artar. a — Örnek bir küçükdeprem ve birimleri. b— Bir günlük algı ve üzerindeki olaylar. c — Çok gürültülü ve büyük olaylar içeren ilginç bir algı.



Şekil 3: Küçükdeprem sayılarında 10 günlük toplamlar gözönüne alınarak çıkarılan zaman değişimi.

Bir küçük depremin süreci; ilk gelen P dalgasından (P_s) olay/gürültü oranının 1'e düştüğü yere değin geçen saniye türünden zaman aralığıdır. Ancak bazı araştırmacılar süreç sınırı olarak, ilk gelen dalga ile olay/gürültü oranının 4/1'e düştüğü zaman aralığını da almaktadır (Combs ve Hadley, 1977). Değerlendirilen küçükdepremlerin tümü (ts-tp) zaman aralığı 12.5 saniyeden dar olan yakın depremlerdir.

Bölgede günde ortalama 5 tane küçükdeprem olmaktadır (Şekil 3). Bu sayı yaz aylarından sonbahara doğru 3.3'den 6.6'ya değin doğrusal bir artış göstermektedir. Şekil 4'te gösterilen depremlerin oluşum-büyüklik dağılımı, düzeneklerin 1.5'dan büyük olan depremleri iyi algılamasının yanısıra 1.5'dan küçük depremleri gürültüye karışmaları nedeniyle kaçırıldığını belirtmektedir. Küçük depremlerin günlere göre dağılımı ise uzak ve büyük depremlerle karşılaştırmalı olarak Şekil 5 a, b, c'de verilmektedir. Bu dağılımın yaklaşık 11 ve 27.7 günlük dönemsel artışları içerdiğinin belirtileri Fourier genlik spektrumundan gözlenirse de, sürenin kısırlığı bu dönemselliklerin gelgit ve yarım aylık

gerilim olayları ile ilişkili olup olmadığını açıkça kanıtlayamamaktadır (Şekil 6).

M büyüklüğünden büyük depremlerin toplam oluşum sayısını belirten N'nin 10 tabanına göre logaritmasının, deprem büyüklüğüne göre değişimi olan dağılımı uygulanan en küçük kareler yöntemi, 105 günlük veri için büyüklük-sıklık (magnitude-frequency) bağıntısını izleyen katsayılar ile vermiştir:

$$\log_{10} N = 4.414 - 1.168 M$$

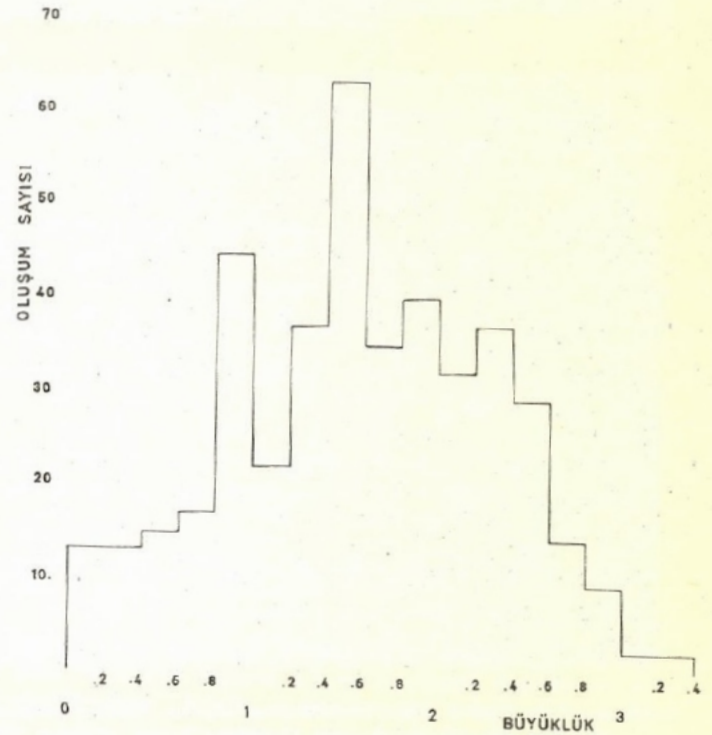
Ortamın etkinliğini simgeleyen $b = 1.168$ değerinin saptanmasında 1.5 ile 3.3 büyüklüğünde olan depremler gözönüne alınmıştır. "b"nin elde edilen bu değeri, Üçer ve diğerlerince (1974) söz konusu bölge için büyük depremlerin kullanılması ile elde edilen değerin yaklaşık 2 katıdır.

Bölgede M'den büyük bir depremin, D zaman aralığında (yıl) oluşma olasılığı, P (M, D), üzerine bilgi izleyen "deprem çekincesi" (Earthquake risk) bağıntısının kullanılması ile elde edilebilir.

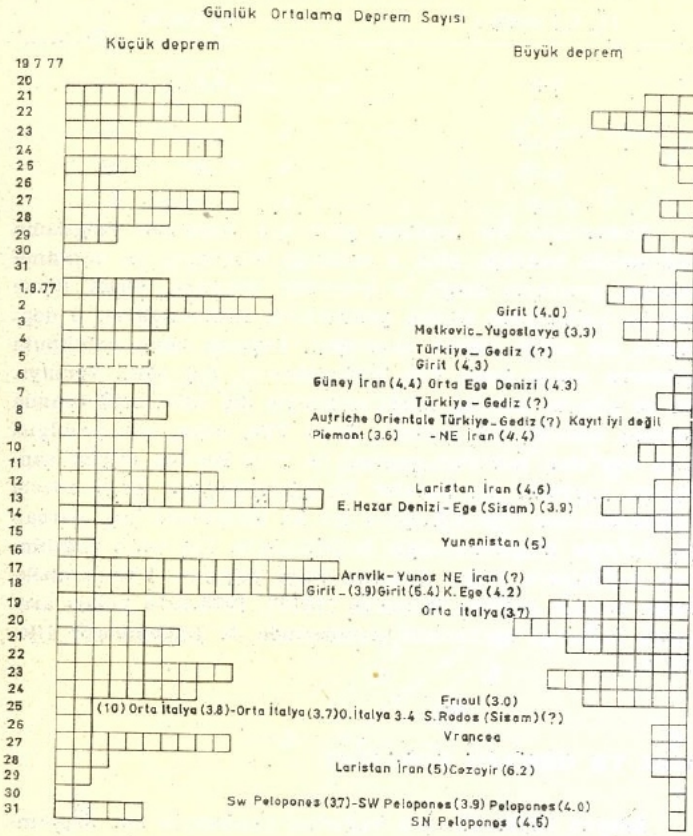
$$P(M, D) = 1 - \exp(-N(M) \cdot D)$$

(Tabban ve Gençoğlu, 1975)

M'den büyük depremlerin yıllık oluşum sıklığını belirten N (M) değeri, (2) bağıntısında verilmektedir. Değini- len zaman-büyüklik-sınırlı-gözlemsel bilgiye göre, bölgede, 30 yıl içinde %100 olasılıkla 5'ten, %28 olasılıkla 6'dan büyük bir depremin olması beklenebilir. Aynı bağıntılar 100



Şekil 4: Doğu Anadolu Fayı yöresinde küçük deprem oluşumlarının büyüklüklerinin değişimi.



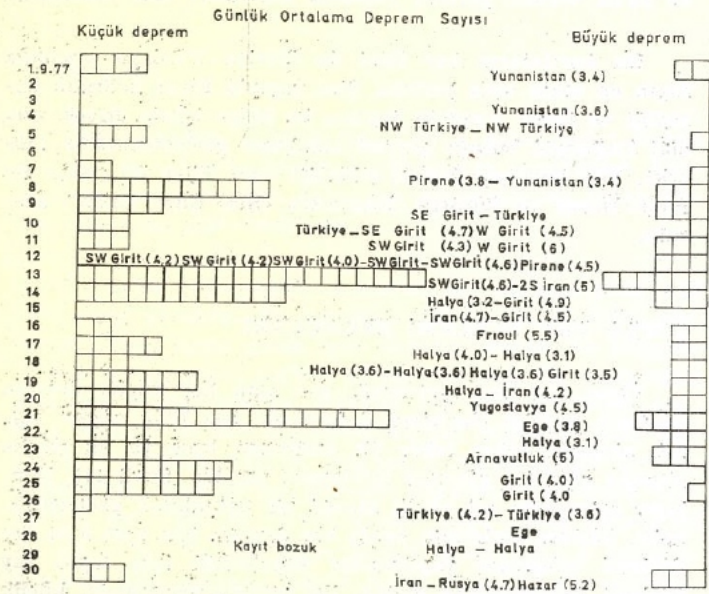
(a)

yıllık dönemde 6'dan büyük bir deprem olasılığının %63 olduğunu belirtmektedir. Bununla birlikte çağdaş ve 4'ten büyük depremleri inceleyerek sürdürülen çalışmalarında Tabban ve Gençoğlu (1975) bölgede, 100 yıl için 7.5'dan büyük deprem olma olasılığının %58 ve bu büyüklükteki depremlerin dönemselliğinin yaklaşık 115 yıl olduğunu belirtmişlerdir. Ancak, bölge sınırları içine Doğu Anadolu Fayının yanı sıra, Kuzey Anadolu Fayı özelliklerini içeren Güney Van Faylarının da alınmış olması nedeniyle bulunan dönemsellik değerinin daha durgun olan Doğu Fayı için beklenenden küçük, olasılık değerinin ise beklenenden büyük çıktığı izlenimini uyandırmaktadır.

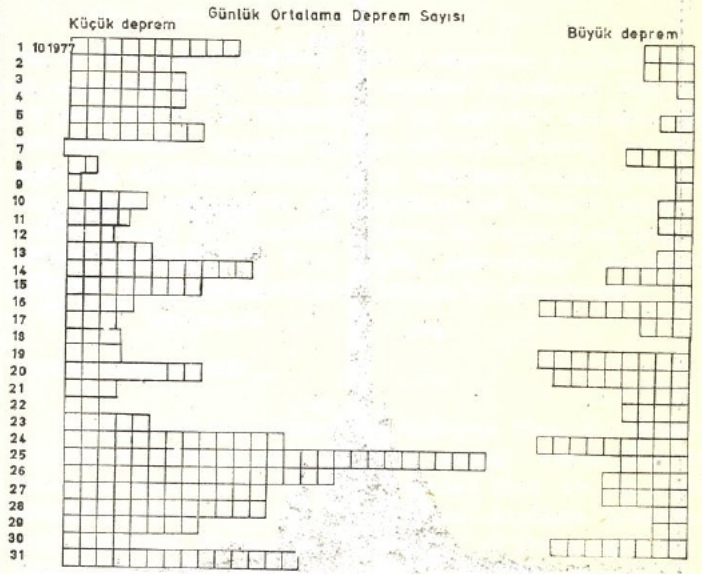
Bölgesel tektonizma ile ilgili küçük depremlerin aylara bağlı olarak bir değişim göstermediği sanılsa da, ortam en çok gerilim boşalmasını yaklaşık 10^{18} erg ile yaz aylarında yapmaktadır. Bunun açık kanıtı algılanan 2.7-3.3 büyüklüğündeki 13 depremin 12 tanesinin yaz dönemi içine düşmesidir. Sonbaharda küçük deprem sayısındaki artış günde 6.6 ile ortalamayı aşmış olsa bile içerdikleri küçük erg, bunların daha çok yöresel artık gerilimlerden kaynaklandığı düşüncesini uyandırmır.

KÜÇÜK DEPREM ODAKLARININ ARAŞTIRILMASI VE HIZIN SAPTANMASI

Bir küçük depremin odağını en az yarımlığı ile bulmak için aynı bir olayın en az üç ayrı yerden gözlenmesi, gözlem yerlerinin deprem odağına göre konumunun uygun seçilmiş olması, zamanlamasının güvenli yapılmış ve ortamın deprem dalgasını yayındırma özelliklerinin çok iyi bilinmiş olması gerekir. Uygulamada derinliğe göre ortamda 4.6'dan 6 km/sn'ye değin değişen ayrı ayrı hızlar seçildi. Yakın odaklar için ilk gelen P_g dalgasının hızını, kaba da olsa, deneme-yanılma yaklaşımı ile saptamak için küçük depremlerin kaynağı olduğu sanılan Doğu Anadolu Fayının 5 ki-



(b)



(c)

Şekil 5: a, b, c. Algılama süresince küçük ve büyük depremlerin sayısında günlük değişim. Sağdakiler yakın küçükdepremler (ts - tp 12.5 -sn'den küçük), soldakiler uzak küçükdepremler ve ortadakiler o gün olduğu bildirilen büyükdepremler.

lometrelik çevresine deprem alıcılar yerleştirildi. Belli bir süre algılama sonunda, depremlerden en küçük " t_s-t_p " aralığını içerenlerin (+1 saniye) o yörede gözlem yerlerine en yakın olan deprem kaynağını simgelediği var sayıldı ($x = 5$ km). Sığ odak olduğu var sayılan küçükdepremin en iyi konumunu veren üç çemberin bir noktada kesişme koşulu elde edilinceye değin Wadati çizelgesi aracılığı ile r-Poisson oranı değiştirilerek en iyi orijin zamanı değeri ve Poisson oranı saptandı. Daha sonra uzaklığın t_p 'ye bölünmesi ile V_p hızı yaklaşık olarak elde edildi. Bu işlemlerde kullanılan bağıntı;

$$x = \left[\sqrt{\frac{2(1-r)}{(1.2r)}} - 1 \right]^{-1} \cdot V_p \cdot t_{sp}$$

dir. Bulunan Poisson oranı $r = 0.28$ ve yakın çevresi için en uygun P dalgası hızı $V_p = 4.6$ km/sn'dir. Bu bulgular uyarınca tüm depremler için x odak uzaklığını bulmada izlenen deneysel bağıntı kullanılmıştır.

$$x = 1.236 V_p \cdot t_{sp}$$

Sığ ve yakın depremler için $V_p = 4.6-5$ yeterli büyüklükte sayılabilmeye karşın (t_s-t_p) aralığının genişlemesine koşut olarak artan odak uzaklıkları için kullanılan hız değerlerinin artırılması gereklidir. Bu nedenle değişen (t_s-t_p) aralığı için izleyen hız kesiti benimsenmiştir.

(t_s-t_p) saniye	V_p km/sn
0-3	4.6-5
3-5	5.0-5.2
5-10	5.5
10-	6

Yukarıdaki hız kesitine göre her depremin algılama noktasında uzaklığı olan x uzaklığı bulunmuş ve algılama noktası çemberin özeği, x çemberin yarıçapı olmak üzere gözlem yerlerinden çizilen çemberlerin kesim noktası o depremin dış odağı olarak alınmıştır. Deprem odak dağılımını gösteren sonuç Şekil 7'de verilmektedir. Sığ odak varsayımı ve gözlem noktası azlığı nedeniyle dış odak belli oranda kaymış olabilir. Bu nedenle, Şekil 7'de, odak yeri yanlışlığı ± 15 km olan noktalar çember ile ± 15 km'den büyük sapsmaları içerenler ise kareler ile gösterilmiştir. Depremlerin büyüklüklerine ilişkin bilgiler ise bu simgelerin boş, parçalı ya da dolu gölgelenmesiyle belirtilmiştir. Dış odak dağılımları çoğunlukla Doğu Anadolu Fayı boyunca kümelenmektedir. Benzer dağılım, Alsan'ın (1975), 1973-1974 yılları arasında topladığı verilerinin çizimlerinde de gözlenmiştir (Şekil 8).

ERK VE GERİLİM BOŞALIMI

İzleyen büyüklük-erk bağıntısı yardımıyla her depremle açığa çıkan erk (E) ve gerilim boşalımı (strain-release- $\log_{10} E$) saptanmıştır.

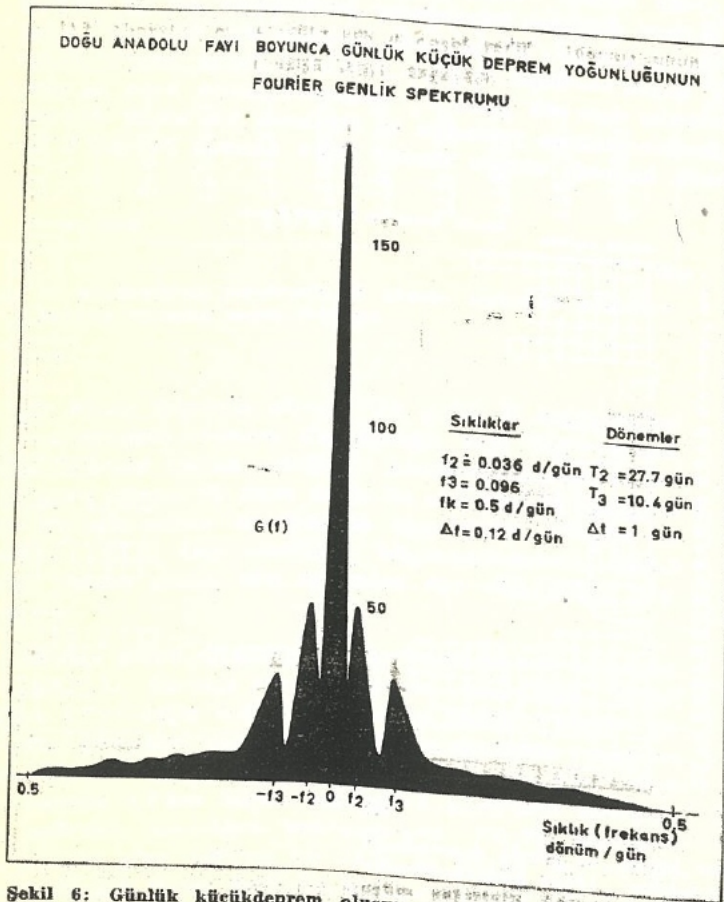
$$\log_{10} E = 9.4 + 2.14 M - 0.054 M^2$$

Eş gerilim boşaltan noktaların birleştirilmesiyle Şekil 9 ve 10'da verilen gerilim boşalımı haritaları elde edilmiştir.

Bu haritaların her ikisi de Sivrice-Pütürge arasında fayın en etkin olan yerinin, Şiro çayıyla Fırat nehrinin kesiştiği ve Doğu Anadolu fayının bu bölge içinde dirsek verdiği Doğanyol bucağı çevresi olduğunu göstermektedir (10⁶ erk), Fay boyunca önemli etkinliği olan diğer iki parça ise Paflu-Hazar ve Pütürge-Başmezra (Şiro Çayı Vâdisi) arasındadır.

TOPLU FAY DÜZLEMİ BULGULARI

Önce ana fay çevresinde yer alan her küçük deprem odasının gerilim çizgisinin doğrultusu ana faya uygun olarak alınarak teker teker ilk vurgunun itme ya da çekme oluşuna göre bir güvence incelemesi yapıldı (Şekil 11). Bunların çoğunluğu sol yönlü atımla bir uyumluluk göstermektedir. Gözlem yerlerinin azlığı her deprem için ayrı ayrı fay düzlemi çalışması yapılmasını engellediği için toplu fay düzlemi incelenmesine gidildi. Bu çalışma sonucunda, küçük depremlerin ilk vurgu itme-çekme özelliklerinin kuzeyle yaklaşık 77° açı yapan bir gerilim çizgisine uyumlu olarak toplandıkları gözlemlendi (Şekil 12). Bu nedenle, ana fay boyunca oluşan kırıkların da özelliğinin çoğunlukla sol atımlı olabileceği söylenebilir.



Şekil 6: Günlük küçükdeprem oluşum sayısının Fourier genlik spektrumu.

38°
38°+

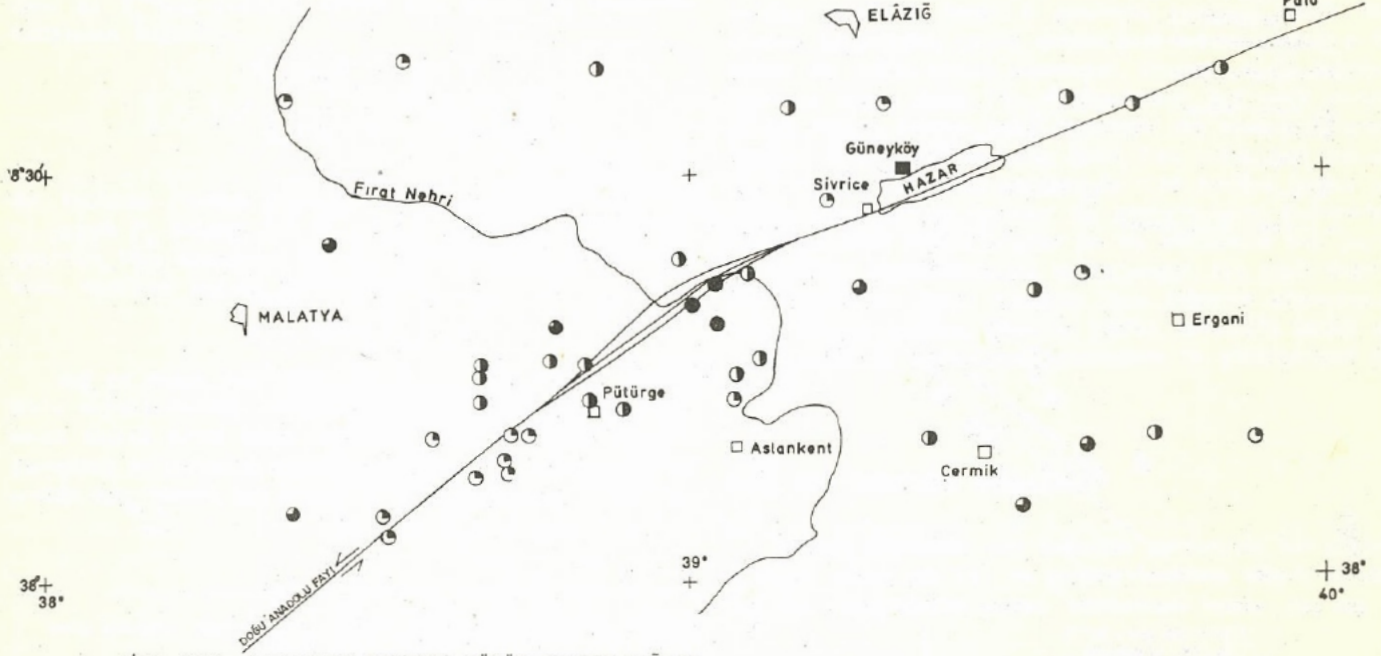
+ 39°
39°

+ 39°
40°

$$M = -0,83 + 1,59 \log(\text{Süreç})$$

Küçük deprem büyüklükleri

- $2,5 \leq M \leq 3$
- $2 \leq M < 2,5$
- $1,5 \leq M < 2$
- $1 \leq M < 1,5$
- $0 \leq M < 1$



ŞİRO ÇAYI (DOĞU ANADOLU FAYI) BOYUNCA KÜÇÜK DEPREM DAĞILIMI

(Alsan, 1975 çalışmasından seçilen depremler kullanılmıştır)

Süre bir yıl (1973-1974)

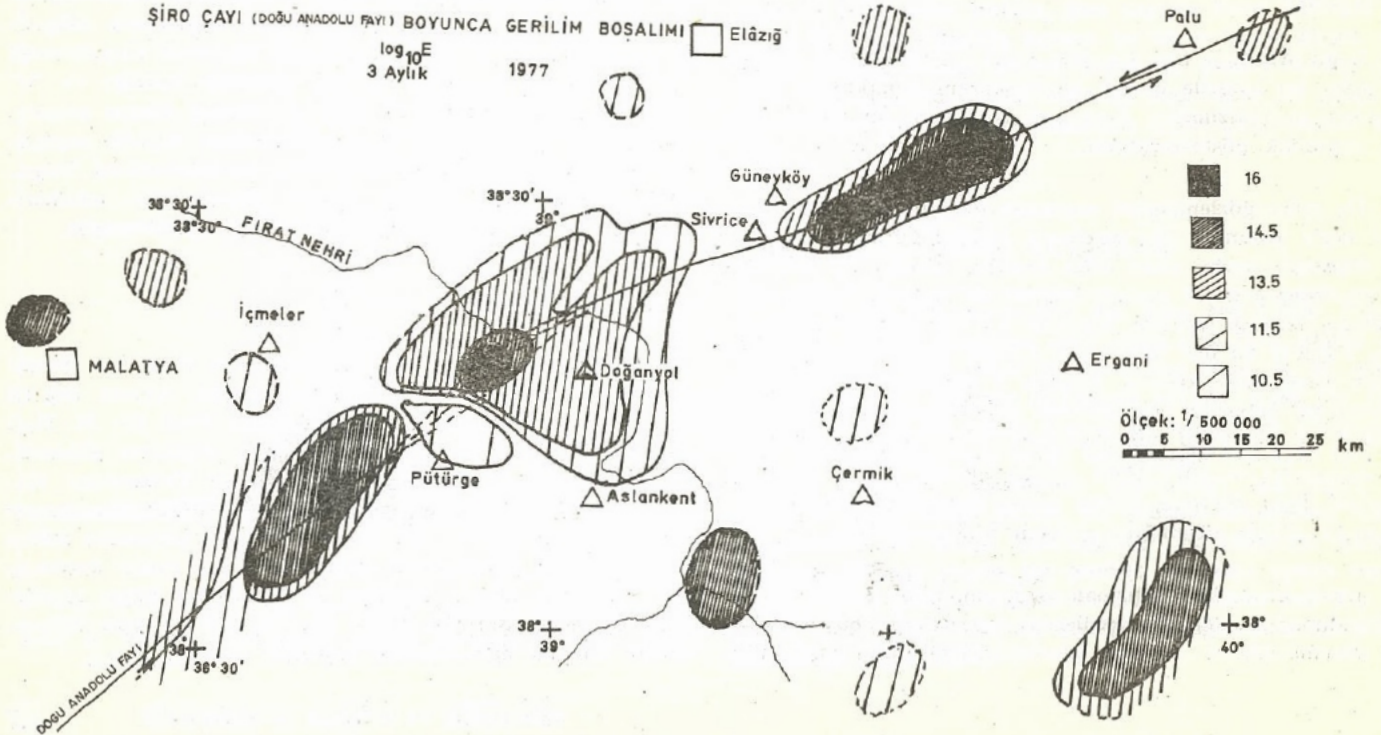
Ölçek: 1/500 000

0 5 10 15 20 25 km.

Sekil 8: (1973-1974) yılları arasındaki çalışmalardan seçilen, Şiro-Fırat vadisi Doğu Anadolu Fayı boyunca küçükdeprem büyüklükleri ve dış odakların yersel dağılımları.

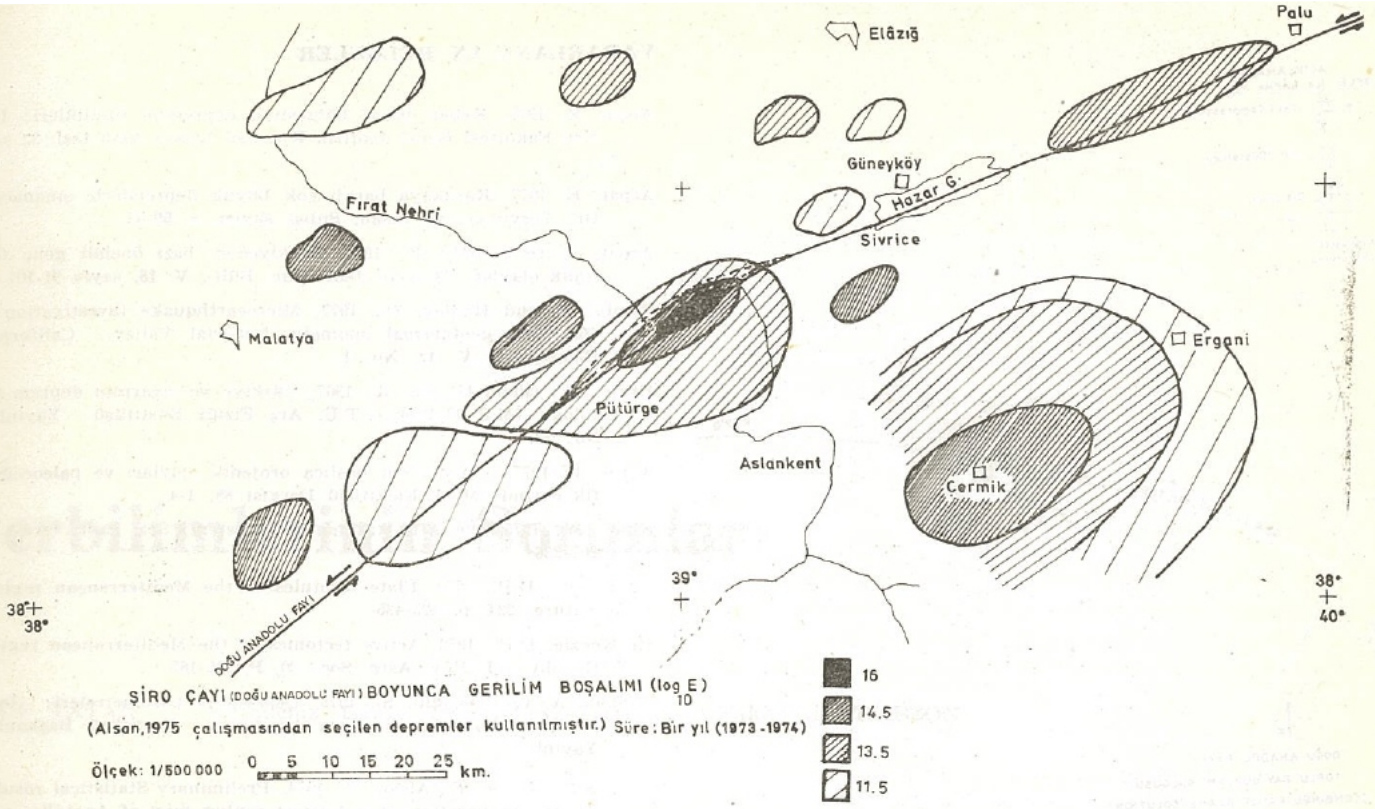
ŞİRO ÇAYI (DOĞU ANADOLU FAYI) BOYUNCA GERİLİM BOŞALIMI

$\log_{10} E$
3 Aylık
1977

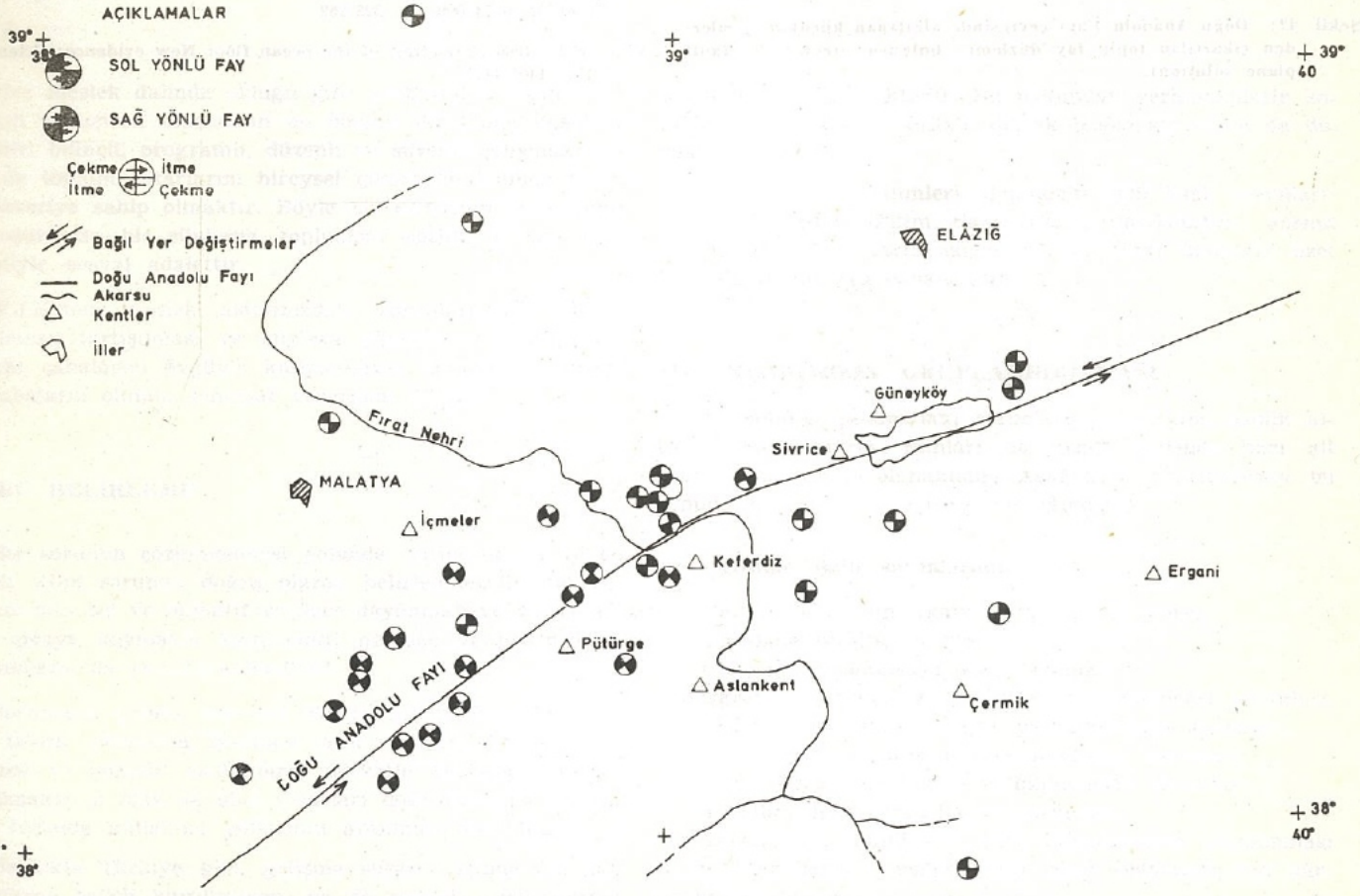


Ölçek: 1/500 000
0 5 10 15 20 25 km.

Sekil 9: Şiro-Fırat vadisi Doğu Anadolu Fayı boyunca gerilim erki boşalımı.



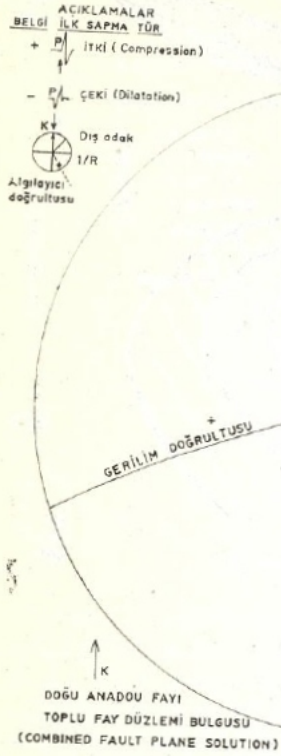
Şekil: 10. Şiro-Fırat vadisi Doğu Anadolu Fayı boyunca gerilim erki boşalımı, (1973-1974).



DOĞU ANADOLU FAYI BOYUNCA DDAKLARDAKİ İLK İTKİ-ÇEKİNİN SOL ATILIMLI ANA FAYLA UYUMLULUĞU

1977
ÖLÇEK: 1/500 000
0 5 10 15 20 25

Şekil 11: Doğu Anadolu Fayı boyunca dış odaklardaki ilk itki-çekinin sol atımlı ana kırıkla uyumluluğu.



Şekil 12: Doğu Anadolu Fayı çevresinde algılanan küçükdepremlerden çıkartılan toplu fay düzlemi bulgusu (combined fault plane solution).

YARARLANILAN BELGELER

- Alsan, E. 1975, Keban baraj bölgesinin depremsel özellikleri; İ.Ü. Fen Fakültesi Genel Jeofizik Kürsüsü Lisans üstü tezi, 32 sayfa.
- Arpat, E. 1977, Karakaya barajı çok büyük depremlerle sınılanacaktır; Yeryuvarı ve İnsan, Şubat sayısı, s. 59-62.
- Arpat, E. ve Şaroğlu, F., 1975, Türkiyedeki bazı önemli genç tektonik olaylar; Türkiye Jeol. Kur. Bült., V. 18, sayfa 91-101.
- Combs, J. and Hadley, D., 1977, Microearthquake investigation of the Mesa geothermal anomaly, Imperial Valley, California; Geophysics, V. 42, No. 1.
- Ergin, K., Güçlü U., Uz. Z., 1967, Türkiye ve civarının deprem kataloğu (M.S 11-1964) İ.T.Ü. Arz Fizigi Enstitüsü Yayınları No: 24.
- Ketin, İ., 1977, Türkiye'nin başlıca orojenik olayları ve paleocoğrafik evrimi; MTA Enstitüsü Dergisi 88, 1-4.
- Khan, M., 1975 The Afro-Arabian rift system; Sei. Prof. Oxf., 62, 207-236
- Mc Kenzie, D.P., 1970, Plate tectonics of the Mediterranean region; Nature, 224, p. 425-435.
- Mc Kenzie, D.P., 1972, Active tectonics of the Mediterranean region, Geophys., J. Roy. Astr. Soc., 30, P. 109-185.
- Tabban, A. ve Gencoğlu, S., 1975, Deprem ve parametreleri; İmar ve İskan Bakanlığı Deprem Araştırma Enstitüsü Başkanlığı Yayınları.
- Ücer, S.B., Ayhan, E., Alsan, E., 1974, Preliminary Statistical results, for the preparation of a seismic zoning map of Anatolia, proceeding of the seminar on seismic zoning maps; Unesco, Project Rem/74/009, P. 225-252.
- Vine, F.J., 1966 Spreading of the ocean floor New evidence; Science, 154, 1405-1415.