Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering

AKÜ FEMÜBİD **17** (2017) 035803(1122-1128) AKU J. Sci. Eng. **17** (2017) 035803 (1122-1128)
DOİ: 10.5578/fmbd.66126

Türkiye'de Jeodezik ve Sismik Yamulma Hızlarının Karşılaştırılması

Bahadır Aktuğ[1], Begüm Çıvgın[2]
[1, 2] *Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Ankara.*

e-posta: Bahadir.Aktug@ankara.edu.tr

Geliş Tarihi: 09.06.2017 ; Kabul Tarihi: 03.12.2017

Anahtar kelimeler
Yamulma hızları;
Gerilme azalması;
GNSS Hızları

Özet

Bir bölgenin sismik potansiyeli, çoğunlukla, modern jeodezik yöntemlerle gözlemlenen deformasyon hızları ve kataloglardaki aletsel dönem deprem kayıtları ile karakterize edilir. Birbiri ile ilişkili olmasına rağmen, zaman ve uzamda eksiklikler içeren sismik kataloglar, sismik yamulma hızlarının parametrizasyonu, sismik alanın ayrıklaştırılması ve sismik hacmin tanımlanmasındaki zorluk nedeniyle birbirleriyle doğrudan karşılaştırılmaları kolay değildir. Bu çalışmada, jeodezik ve sismik hızları elde etmek ve karşılaştırmak için en eksiksiz ve güncel kataloglar ve GNSS hızları kullanılmış, jeodezik ve sismik yamulma hızları ile gerilme azalımı ve ısı akısı arasındaki farklar karşılaştırılarak, bunların olası sonuçları ve korelasyonları analiz edilmiştir. Sonuçlar, bazı bölgelerin diğerlerinden daha fazla deprem potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

A Comparison of Geodetic and Seismic Strain Rates in Turkey

Keywords
Strain rate;
Stress drop;
GNSS Velocities

Abstract

The seismic potential of a region is often characterized by the deformation rates observed by the modern geodetic methods and seismic history during the instrumental period compiled in catalogues. While both are related, a direct comparison is not straightforward due to the various factors including the incomplete catalogues both in time and space, parameterization of seismic strain rates, discretization of seismic domain, and the difficulty in the definition of seismic volume. In this study, using the most complete seismic catalogue available for Turkey, GNSS velocities were employed to derive the geodetic strain rates and were compared with the seismic strain rates, the possible implications and correlation of the difference between geodetic and seismic rates with the static stress drop and heat flow were analyzed. The results show that several zones can be identified as having more seismic potential with respect to the others.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Jeodezik ve sismik yamulma hızlarının (strain rates) karşılaştırılması birçok araştırmacı için ilgi çekici biri konu olmakla birlikte, sismik yamulma hızlarını hesaplamak için çeşitli sınırlamalar bulunmaktadır. Tamamlanmamış deprem katalogları ve sismik yamulma hızlarının hesaplanmasında sismojenik derinlik ile ilgili varsayım, güvenilir yamulma hızlarının hesaplanmasını zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada jeodezik yamulma hızının sismik yamulma hızlarının üst limiti olduğu varsayılarak statik gerilme azalımını (static stress drop) hesaplamak için değiştirilmiş bir Kostrov integrali (Caporali vd., 2011) uygulanmıştır. Kullanılan yöntem, sismik yamulma hızlarının kataloğun tamlığına olan bağımlılığını kısmen ortadan kaldırmak için Gutenberg-Richter denklemini ve ampirik bağıntılarından yararlanmaktadır (Wells ve Coppersmith, 1996).

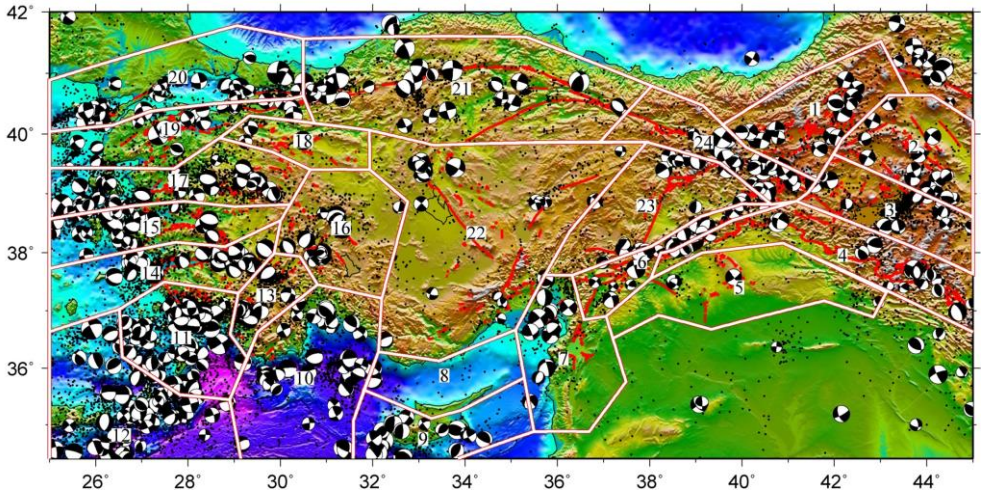
2. Veri ve Yöntem

Türkiye'nin sismik bölgelemesi (seismic zonation) konusunda yayınlanmış birçok çalışma vardır (Alptekin, 1978; Erdik vd., 1999; Bayrak vd., 2005; Kayabalı, 2002). Bu çalışmada, en son yayınlanmış olan (Bayrak vd., 2009)'daki sismik bölge sınırları kullanılmıştır. Bayrak vd. (2009), sismik kaynak

zonlarını belirlemede Alptekin (1978), Erdik vd. (1985), Yaltırak vd. (1998), Erdik vd. (1999), Jiménez vd. (2001) ve Kayabalı (2002)'nın çalışmalarını esas alarak Türkiye'de 24 bölge tanımlamışlardır (Şekil 1).

Deprem verisi, KRDAE (Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü) deprem kataloğundan, 1900 ve 2015 yılları arasındaki dönemi kapsayacak şekilde seçilmiştir (Kalafat vd., 2008).

Bayrak vd. (2009) tarafından belirlenen bölgelerdeki depremsellik, KRDAE kataloğundan alınan verilerle birlikte Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Deprem verileri Kalafat vd. (2008)'den ve sismik bölgeler Bayrak vd. (2009)'dan alınmıştır. Kalafat vd. (2008) tarafından verilen depremler, odak mekanizması çözülebilen 741 adet depremden oluşmakta olup, doğrudan büyüklük sınırı olmamakla birlikte M > 4.0 depremleri kapsamaktadır.

GPS hızları, Kreemer vd. (2014) tarafından yayınlanan küresel yamulma hızı modeli GSRM v.2.1 (Global Strain Rate Model)'den alınmıştır (Şekil 2). Her bir bölge için jeodezik yamulma hızı, Shen vd. (1996)'da verilen aradeğer hesaplama (interpolasyon) algoritması ile hesaplanmıştır. Shen vd. (1996)'nin yayınladığı yöntemde, her bir konumda uniform bir yamulma hızı alanı varsayımı yapılarak istasyon hızları ve bunların kovaryanslarından en küçük kareler ters çözümü ile altı adet parametre çözülmektedir. GNSS hızları ile ile kestirilen parametreler şu şekildedir: öteleme hız bileşenleri U_x ve U_y, dönme hızı ω ve yamulma hız bileşenleri τ_{xx}, τ_{yy} ve τ_{xy}. Tipik bir Gauss-Markov modeli olan bu model genel olarak

$$\begin{pmatrix} V_x^I \\ V_y^I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta x_I & \Delta y_I & 0 & \Delta y_I \\ 0 & 1 & 0 & \Delta x_I & \Delta y_I & -\Delta x_I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_x \\ U_y \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ \omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_x^I \\ \varepsilon_y^I \end{pmatrix} \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, V_x^I ve V_y^I $\vec{r}_I$ konumundaki *I*. İstasyonun hız bileşenleridir. Bağıntının sağ tarafındaki bütün değişkenler bir $\vec{R}$ konum vektörü ile gösterilen bir konumunda hesaplanmaktadır. Δx_I ve Δy_I, $\Delta\vec{R}_I = \vec{r}_I - \vec{R}$ nin vektör bileşenleridir. 2x6 boyutlu matris, kısmi türevler matrisidir ve ε_x^I ve ε_y^I ise bunlara karşılık gelen hız bileşenlerinin hatalarıdır. Kullanılan algoritmanın düzgünlüğünü (smoothness) göstermek amacıyla ara değer hesaplama ile elde edilen yamulma alanı, Şekil 3'te verilmektedir.

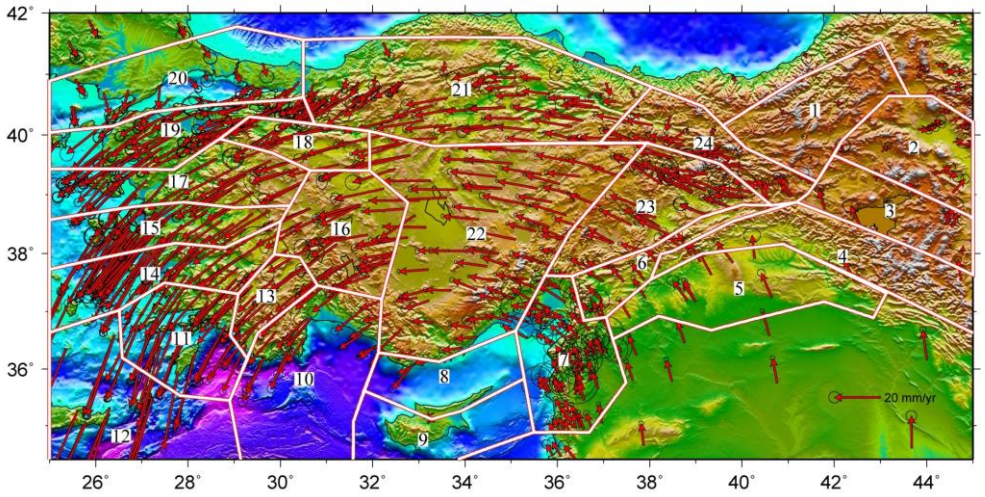
Her bölge için katalogda yer alan deprem büyüklüklerinin frekansa göre dağılımı Şekil 4'te görülmektedir. Büyüklüğü *M* ve daha büyük olan depremlerin belirli bir zaman periyodu için oluş sayısı *N* olmak üzere, Gutenberg-Richter deprem büyüklüğü-frekans bağıntısı $\log N(M)=a+bM$ ile verilir (Richter, 1958). Burada a ve b regresyon katsayılarıdır.

Genel Kostrov bağıntısı,

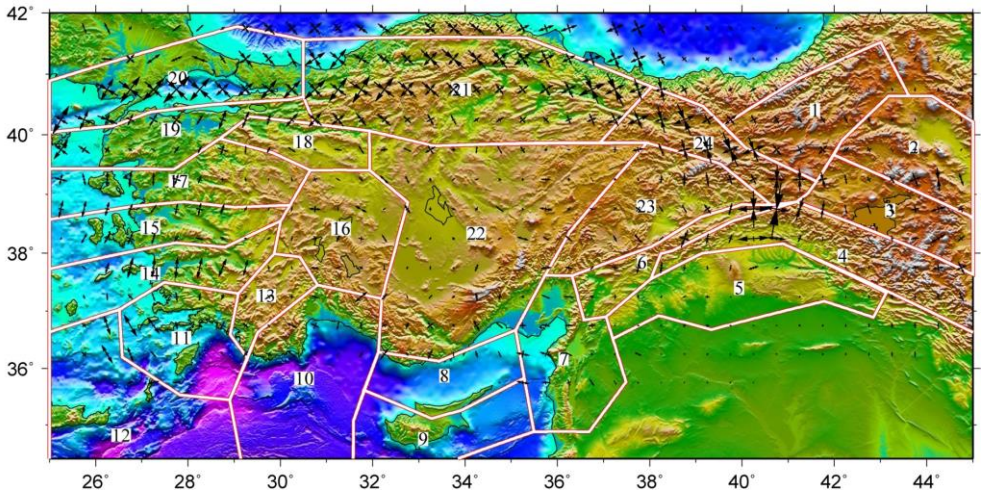
$$\dot{\varepsilon}_{seis} = \frac{1}{2\mu V \Delta t} \sum M_o \quad (2)$$

İle verilmektedir. Burada, M_0, sismik moment, *V*, sismojenik hacim ve μ, makaslama (shear) modülüdür. Yer değiştirme *u* ise, $M_o=\mu Au$

olduğundan, Caporali vd. (2011)'nden, (2) bağıntısı aşağıdaki gibi yazılabilir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan GPS verileri. Hız hata elipsleri %95 güven aralığındadır.



Şekil 3. GPS hızlarından hesaplanan yamulma hızları (Kreemer vd., 2014)

$$\dot{\varepsilon}_{seis} = \frac{\int_{m_{\min}}^{m_{\max}} N(m)A(m)u(m)dm}{2\int_{m_{\min}}^{m_{\max}} A(m)T(m)dm} \quad (3)$$

Bu bağıntıdaki terimlerin yerine ampirik bağıntılar kullanılabilir (Caporali vd., 2011).

$$\log(N(m)) = a_{GR} + b_{GR}m \quad (4)$$

$$\log(u(m)) = a_{AD} + b_{AD}m \quad (5)$$

$$\log(A(m)) = a_{RA} + b_{RA}m \quad (6)$$

Buradaki ortalama yer değiştirme (avarage displacement) (AD) ve fay üzerindeki kayma alanı (rupture area) (RA) için ampirik sabitler Wells ve Coppersmith (1994)'den alınmıştır. Gutenberg-Richter (GR) deprem-büyüklüğü frekans bağıntısı regresyon katsayıları ise Şekil 4'de verilen ve her bölge için ayrı ayrı hesaplanan büyüklük-frekans ilişkisinden alınmıştır.

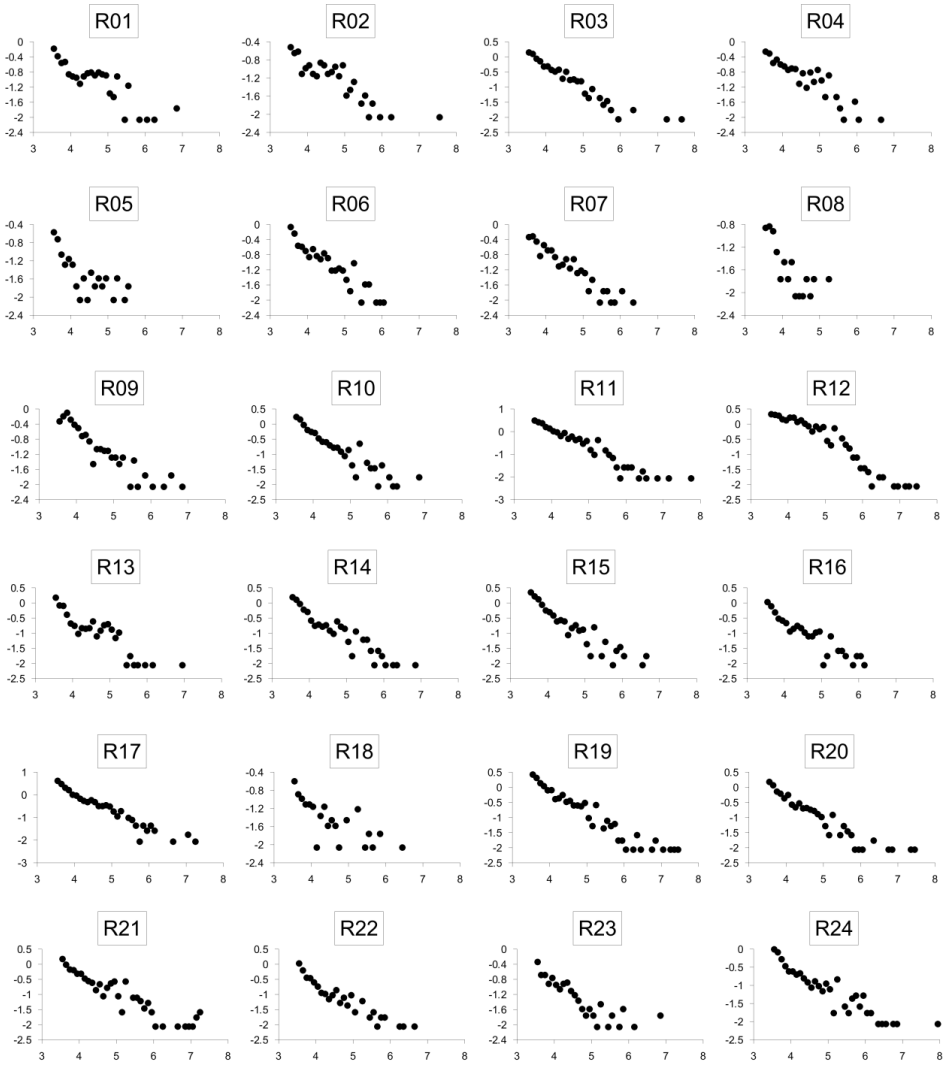
Bir deprem sırasındaki mekanik iş ve potansiyel enerji değişimi izleyen bağıntı ile verilir (Caporali vd., 2011).

$$\Delta\sigma A(m)T(m) = \mu A(m)u(m) \quad (7)$$

Böylece, sismojenik zonun kalınlığı, gerilme azalımı, yer değiştirme ve kesme modülünün bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir.

Bağıntı (3) yeniden düzenlenerek

$$\dot{\varepsilon}_{seis} = \frac{\Delta\sigma\,(10^{a_{GR}+a_{WC}+(b_{GR}+b_{WC})m_{\max}} - 10^{a_{GR}+a_{WC}+(b_{GR}+b_{WC})m_{\min}})b_{WC}}{2\mu\,(10^{a_{WC}+b_{WC})m_{\max}} - 10^{a_{WC}+b_{WC}m_{\min}})\,(b_{GR}+b_{WC})} \quad (8)$$



Şekil 4. Her bölge için deprem büyüklüğü-frekans ilişkisi. Düşey eksen yıllık deprem sayısının logaritmasını, yatay eksen deprem büyüklüğünü göstermektedir.

Caporali vd. (2011)'de verildiği şekilde yazılabilir. Jeodezik yamulma hızlarının, sismik yamulma hızlarından büyük veya en azından eşit olduğu varsayımı ile gerilme azalımı için üst limit

$$\Delta\sigma = \frac{2\mu\dot{\varepsilon}_{seis}(10^{a_{WC}+b_{WC})m_{\max}} - 10^{a_{WC}+b_{WC}m_{\min}})(b_{GR}+b_{WC})}{(10^{a_{GR}+a_{WC}+(b_{GR}+b_{WC})m_{\max}} - 10^{a_{GR}+a_{WC}+(b_{GR}+b_{WC})m_{\min}})b_{WC}} \quad (9)$$

İle hesaplanabilir.

Her bölge için, Gutenberg-Richter parametreleri, en büyük depremin büyüklüğü ve yılı ve hesaplanan jeodezik yamulma hızları Çizelge 1'de verilmektedir.

3. Analiz ve Sonuçlar

Statik gerilme azalımı ve her bir bölgede çeşitli parametreler, (3) bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır. Her bölge için hesaplanan statik gerilme azalımı, son en büyük depremden sonra geçen zaman ve jeodezik ve sismik yamulma hızları Şekil 5'de verilmektedir.

Kümülatif olarak biriken yamulmanın yıllık birikim miktarı jeodezik olarak ölçülebilmektedir. Depremlerin periyodik olduğu varsayımıyla, biriken yamulmalar sismik olarak boşalmaktadır. Bu anlamda jeodezik yamulma birikimi, sismik yamulmanın üst sınırını oluşturmaktadır. Sismik yamulma boşalımı (strain release), jeodezik yamulma hızlarından düşük çıkmasının temel olarak iki nedeni sayılabilir:

- Jeodezik olarak yamulma enerjisi biriktirmesine rağmen, henüz deprem ile biriken enerjinin boşaltılmamış olması
- Jeodezik olarak yamulma enerjisi biriktiriyor görünmesine rağmen, yapının reolojik özellikleri nedeniyle, beklenen miktarda enerji birikmemesi veya ölçülen yerdeğiştirmenin asismik olarak atılması

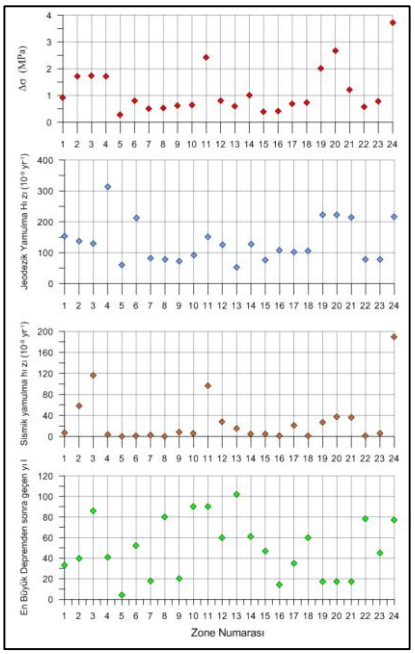
Birinci seçenek durumunda, göreli olarak deprem potansiyeli yüksek olarak bölgeler tespit edilebilirken, ikinci seçeneğin doğrulaması için bölgesel ısı akısının statik gerilme değerlendirilmesi gerekir. Bu amaçla, Şekil 6'da her bir bölgedeki gerilme azalımı haritası ve Şekil 7'de ısı akısı verisi (Tezcan, 1995), statik gerilme azalımı ile birlikte gösterilmektedir.

Çizelge 1. Dönüştürülerek birleşik hız alanına eklenen hızlar

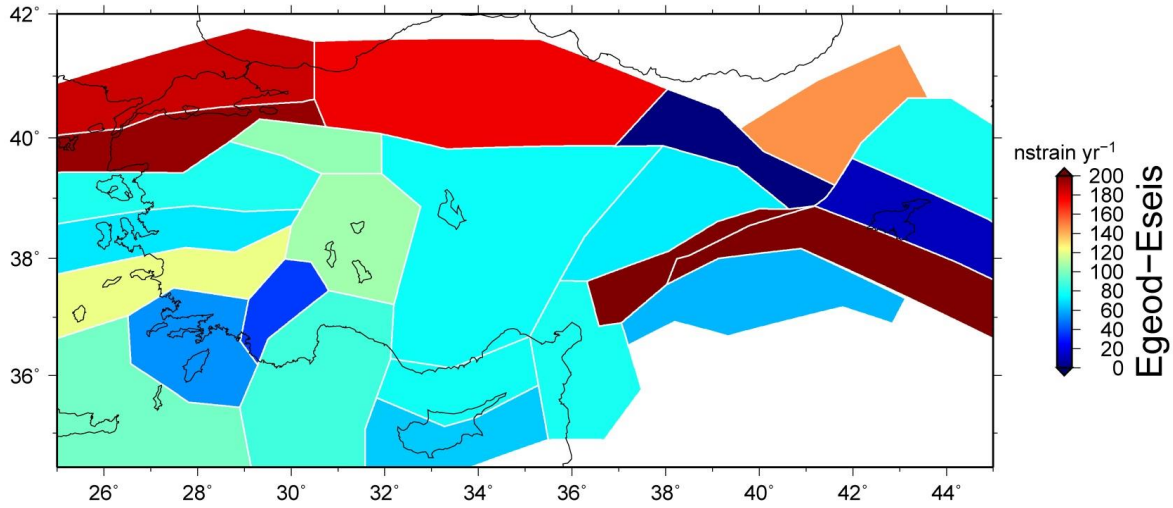
	a_{GR}	b_{GR}	$\dot{\varepsilon}_{GPS}$ (nstrain yr^{-1})	$\dot{\varepsilon}_{SEIS}$ (nstrain yr^{-1})	m_{max}	$year_{max-m}$	$\Delta\sigma$ (MPa)
1	1.48	-0.54	154.0	7.6	6.8	1983	0.92
2	0.92	-0.45	137.0	57.9	7.5	1976	1.72
3	2.15	-0.62	129.0	116.8	7.6	1930	1.75
4	1.86	-0.61	314.0	3.6	6.6	1975	1.71
5	0.77	-0.52	61.0	0.2	5.5	2012	0.29
6	2.28	-0.72	213.0	1.1	6.0	1964	0.81
7	2.04	-0.68	82.0	2.3	6.3	1998	0.49
8	1.31	-0.68	78.0	0.1	5.3	1936	0.53
9	1.93	-0.63	73.0	8.1	6.8	1996	0.62
10	2.54	-0.72	93.0	5.6	6.8	1926	0.64
11	3.09	-0.75	151.0	97.2	7.7	1926	2.43
12	3.24	-0.75	126.0	28.5	7.4	1956	0.80
13	2.36	-0.71	52.0	15.6	6.9	1914	0.60
14	2.48	-0.72	127.0	5.3	6.8	1955	1.01
15	2.68	-0.74	76.0	5.1	6.6	1969	0.39
16	2.26	-0.71	108.0	1.6	6.1	2002	0.41
17	2.99	-0.74	102.0	21.5	7.2	1981	0.70
18	0.43	-0.41	105.0	1.2	6.4	1956	0.73
19	2.55	-0.67	223.0	27.4	7.4	1999	2.02
20	2.09	-0.62	223.0	37.8	7.4	1999	2.68
21	1.89	-0.56	214.0	36.2	7.2	1999	1.21
22	1.90	-0.64	78.0	0.9	6.6	1938	0.58
23	1.12	-0.52	78.0	6.1	6.8	1971	0.78
24	1.53	-0.53	217.0	644.1	7.9	1939	3.73

En büyük jeodezik yamulma hızları Kuzey Anadolu Fay sistemi (KAFS) boyunca gözlemlenirken, sismik yamulma hızları ile azalmayan artık yamulma hızlarının en büyük değerleri Doğu Anadolu Fay sistemi (DAFS) boyunca gözlemlenmektedir. Bunun nedeni, son yüzyılda DAFS üzerinde olan büyük depremlerin az sayıda olması şeklinde yorumlanabilir. Büyük sismik yamulma bütçeleri olan diğer bölgeler, Batı Anadolu'da Menderes grabeni, Marmara ve Kuzeybatı Anadolu olarak tanımlanmıştır.

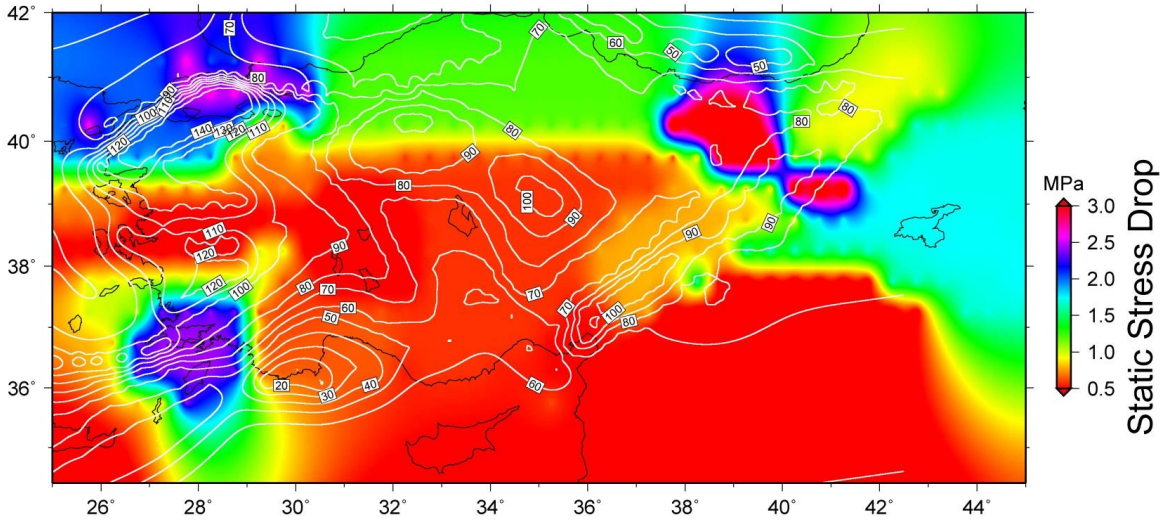
Özellikle, KAFS'nin doğu bölümü, orta ve batı bölümünün aksine, son yüzyılda birikmiş olan yamulmanın büyük miktarını açığa çıkarmış gibi görünmektedir. İlginç bir şekilde, Orta Anadolu'da yer alan sismik bölgelerde, yeterli miktarda gerilme boşalması olmaksızın, kayda değer miktarda yamulma birikimi gözlemlenmektedir. Dikkat edilmesi gereken belirli bir bölge, Marmara'da KAFS'nin güney kesimidir.



Şekil 5. Her bölge için hesaplanan parametreler



Şekil 6. Her bölgede sismik ve jeodezik yamulma hızlarının farkları.



Şekil 7. Isı akısı (Tezcan, 1995) ve statik gerilme azalımı.

Statik gerilme azalımı ile ısı akısı verisinin karşılaştırılması sonucunda iki parametre arasında net bir ilişki gözlenmemiştir. İzlenen yöntem deprem kataloğundaki eksikliği kısmen telafi etse de, uzun dönem statik gerilme azalımını hesaplamak için gerekli olan güvenilir tarihsel veri halen eksiktir. Düşük gerilme azalımı ve yüksek ısı akısı olan bölgeler gözlemlenirken, Marmara gibi bazı bölgelerde yüksek gerilme azalımı ve yüksek ısı akısı gözlemlenmektedir.

Teşekkür

Yazarlar makalenin geliştirilmesi yönünde yaptıkları yapıcı eleştiriler için editör ve ismi belirtilmeyen iki hakeme teşekkür ederler. Haritalar Generic Mapping Tools (GMT-5.4.2) yazılımı ile hazırlanmıştır (Wessel ve Smith 1991, 1995, 1998, Wessel vd. 2013)

5. Kaynaklar

Alptekin, Ö., 1978. Türkiye ve çevresindeki depremlerde manyitüd-frekans bağıntıları ve deformasyon boşalımı, Doçentlik tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 107.

Bayrak, Y., Öztürk, S., Çınar, H., Kalafat, D., Tsapanos, T. M., Koravos, G.Ch. and Leventakis, G-A., 2009. Estimating Earthquake Hazard Parameters from Instrumental Data for Different Regions in and around Turkey. *Engineering Geology*, **105**, 200-210.

Bayrak, Y., Yılmaztürk, A. and Öztürk, S., 2005. Relationships between fundamental seismic hazard parameters for the different source regions in Turkey. *Natural Hazards,* **36**, 445–462.

Caporali, A., Barba, S., Carafa, M.M.C., Devoti, R., Pietrantonio, G. and Riguzzi, F., 2011. Static stress drop as determined from geodetic strain rates and statistical seismicity. *Journal of Geophysical Research*, **116**, B02410.

Erdik, M., Alpay, B.Y., Onur, T., Sesetyan, K. and Birgoren, G., 1999. Assessment of earthquake hazard in Turkey and neighboring regions. *Annali di Geofisica*, **42**, 1125–1138.

Erdik, M., Doyuran, V., Akkaş, N. and Gülkan, P., 1985. A probabilistic assessment of the seismic hazard in Turkey. *Tectonophysics,* **117**, 295–344.

Jiménez, M.J., Giardini, D., Grünthal, G. and Sesame Working Group (Erdik, M., García- Fernández, M., Lapajne, J., Makropoulos, K., Muson, R., Papaioannou, Ch., Rebez, A., Riad, S., Sellami, S., Shapira, A., Slejko, D., Van Eck, T., El Sayed, A.), 2001. Unified seismic hazard modelling throughout the Mediterranean region. *Bolletino Di Geophysica Teorica Ed Applicata*, **42**, **1-2**, 3-18.

Kalafat, D., Kekovalı, K. and Pınar, A., 2008. A Cataloque of Sources Parameters of Moderate and Strong Earthquakes for Turkey and Surrounding Area. *Geophysical Research Abstracts*, **10**, EGU2008-A-07256, 2008, EGU General Assembly 2008, 13-18 April 2008, Vienna, Austria.

Kayabalı, K., 2002. Modeling of seismic hazard for Turkey using the recent neotectonic data. *Engineering Geology,* **63**, 221–232.

Kostrov, B.V., and Das, S., 1988. Principles of Earthquake Source Mechanics, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 286 pp.

Kreemer, C., Blewitt, G., and Klein, E.C., 2014. A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **15**, 3849-3889.

Shen, Z.K., Jackson, D.D. and Ge, X.B., 1996. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements. *Journal of Geophysical Research*, **101, B12**, 27957-27980.

Tezcan, A.K., 1995. Geothermal explorations and heat flow in Turkey, in: M. Yamano (Ed.), Terrestrial Heat Flow and Geothermal Energy in Asia, A.A. Balkema, Rotterdam, 23-42.

Wells, D.L. and 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.

Wessel, P. and Smith, W.H.F., 1991. Free software helps map and display data. *Eos Transactions American Geophysical Union*, **72**, 441.

Wessel, P. and Smith, W.H.F., 1995 New version of the Generic Mapping Tools released. *Eos Transactions American Geophysical Union*, **76**, 329.

Wessel, P. and Smith, W.H.F., 1998. New, improved version of the Generic Mapping Tools released. *Eos Transactions American Geophysical Union*, **79**, 579.

Wessel, P., Smith, W.H.F., Scharroo, R., Luis, J.F. and Wobbe, F., 2013. Generic Mapping Tools: Improved version released. *Eos Transactions American Geophysical Union*, **94**, 409-410.

Yaltırak, C., Alpar, B., Yüce, H., 1998. Tectonic elements controlling the evolution of the Gulf of Saros (Northeastern Aegean Sea, Turkey). *Tectonophysics*, **300**, 227–248.