



Stress Tensor and Coulomb Analysis for Erzurum and Its Surroundings

Erdem Bayrak^{1,2}, Çağlar Ozer^{2,3} and Sukran Perk²

¹ Ataturk University, Oltu Earth Sciences Faculty, Department of Geology, Erzurum, Turkey

² Ataturk University, Earthquake Research Center, Erzurum, Turkey

³ Ataturk University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Erzurum, Turkey
ORCID: 0000-0001-9907-1463, 0000-0001-5401-2013, 0000-0003-2229-9632

Keywords

Coulomb Stress Analysis, Stress Tensor Analysis, Eastern Anatolian Fault Zone, North Anatolian Fault Zone

Highlights

- * The dominant stress regime was investigated by stress tensor analysis
- * Stress change was modelled by Coulomb stress analysis
- * It is observed that the stress is increased around North Anatolian Fault Zone, Horasan-Narman and Askale faults

Acknowledgements

The data is provided from Disaster and Emergency Management Authority, Presidential of Earthquake Department.

Aim

In this study, the stress tensor and coulomb stress change were modelled for Erzurum and its surroundings.

Location

Erzurum (Eastern Turkey) and its surroundings.

Methods

Coulomb stress variation was obtained using focal mechanism solutions for Erzurum and its surroundings.

Results

According to the stress tensor analysis results, the principal stress axes are compatible with strike-slip faults due to the tectonic regime in the region. Especially, increase in stress is observed in the North Anatolian Fault Zone, Horasan-Narman Fault and Askale Fault.

Supporting Institutions

Calculations were conducted in the Seismological Laboratory of the Earthquake Research Centre of Ataturk University, Erzurum.

How to cite

Bayrak E., Ozer C., Perk S., 2020. Stress Tensor and Coulomb Analysis for Erzurum and Its Surroundings, Turk. J. Earthq. Res. 2 (1), 101-114, <https://doi.org/10.46464/tdad.737222>

Manuscript

Research Article

Received: 15.05.2020

Revised: 22.06.2020

Accepted: 23.06.2020

Printed: 30.06.2020

DOI

10.46464/tdad.737222

Corresponding Author

Erdem Bayrak

Email: erdembayrak@atauni.edu.tr

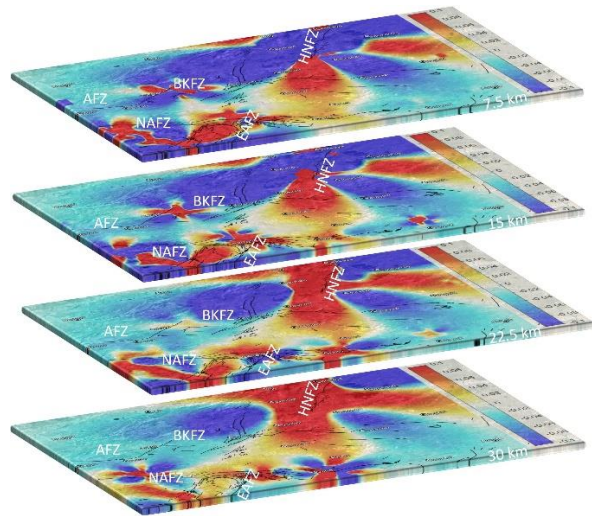


Figure
Coulomb stress change maps of the study area



Erzurum ve Çevresi İçin Gerilme Tensör ve Coulomb Analizleri

Erdem Bayrak^{1,2}, Çağlar Özer^{2,3} ve Şukran Perk²

¹ Atatürk Üniversitesi, Oltu Yer Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

² Atatürk Üniversitesi, Deprem Araştırma Merkezi, Erzurum, Türkiye

³ Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye
ORCID: 0000-0001-9907-1463, 0000-0001-5401-2013, 0000-0003-2229-9632

ÖZET

Bu çalışmada Erzurum ve çevresi için gerilme tensör analizi ile hâkim gerilme rejimi araştırılmış, Coulomb gerilme analizi ile gerilme değişimi modellenmiştir. Her iki analiz için veri seti 1966-2019 yılları arasında meydana gelen 58 adet depreme ($4.0 \leq M_w \leq 6.9$) ait odak mekanizması çözümlerinden oluşmaktadır. Gerilme tensör analiz sonuçlarına göre en büyük (σ_1) ve en küçük (σ_3) asal gerilme eksenleri yatayda, orta asal gerilme (σ_2) eksenine ise düşeyde çıkmış ve bu sonucun bölgedeki tektonik rejime bağlı doğrultu atımlı faylar ile uyumlu olduğu görülmüştür. Odak mekanizma çözümlerinden hareketle azimut ve dalım değerleri kullanılarak Coulomb gerilme değişimi elde edilmiştir. Özellikle Kuzey Anadolu Fay Zonu, Horasan-Narman Fayı ve Aşkale Fayında gerilmelerde artış olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler

Coulomb Gerilme Analizi, Gerilme Tensör Analizi, Doğu Anadolu Fay Zonu, Kuzey Anadolu Fay Zonu

Öne Çıkanlar

- * Gerilme tensör analizi ile hâkim gerilme rejimi araştırılmıştır
- * Coulomb gerilme analizi ile gerilme değişimi modellenmiştir
- * Özellikle Kuzey Anadolu Fay Zonu, Horasan-Narman Fayı ve Aşkale Fayında gerilmelerde artış olduğu tespit edilmiştir

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 15.05.2020

Düzeltilme: 22.06.2020

Kabul: 23.06.2020

Basım: 30.06.2020

DOI

10.46464/tdad.737222

Sorumlu yazar

Erdem Bayrak

Eposta:

erdembayrak@atauni.edu.tr

Stress Tensor and Coulomb Analysis for Erzurum and Its Surroundings

Erdem Bayrak^{1,2}, Çağlar Özer^{2,3} and Sukran Perk²

¹ Ataturk University, Oltu Earth Sciences Faculty, Department of Geology, Erzurum, Turkey

² Ataturk University, Earthquake Research Center, Erzurum, Turkey

³ Ataturk University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Erzurum, Turkey

ORCID: 0000-0001-9907-1463, 0000-0001-5401-2013, 0000-0003-2229-9632

ABSTRACT

In this study, the dominant stress regime was investigated by stress tensor analysis, and stress change was modelled by Coulomb stress analysis for Erzurum and its surroundings. The data set consists of 58 earthquakes ($4.0 \leq M_w \leq 6.9$) focal mechanism solutions, occurred between 1966 and 2019 for both analyses. According to the stress tensor analysis results, the largest (σ_1) and smallest (σ_3) principal stress axes are horizontal and the middle principal stress (σ_2) axis is vertical, which are compatible with strike-slip faults due to the tectonic regime in the region. Based on focal mechanism solutions, Coulomb stress variation was obtained by using azimuth and dip values of the principal stress axes. Especially, increase in stress is observed in the North Anatolian Fault Zone, Horasan-Narman fault and Askale fault.

Keywords

Coulomb Stress Analysis, Stress Tensor Analysis, Eastern Anatolian Fault Zone, North Anatolian Fault Zone

Highlights

- * The dominant stress regime was investigated by stress tensor analysis
- * Stress change was modelled by Coulomb stress analysis
- * It is observed that the stress is increased around North Anatolian Fault Zone, Horasan-Narman and Askale faults

Manuscript

Research Article

Received: 15.05.2020

Revised: 22.06.2020

Accepted: 23.06.2020

Printed: 30.06.2020

DOI

10.46464/tdad.737222

Corresponding Author

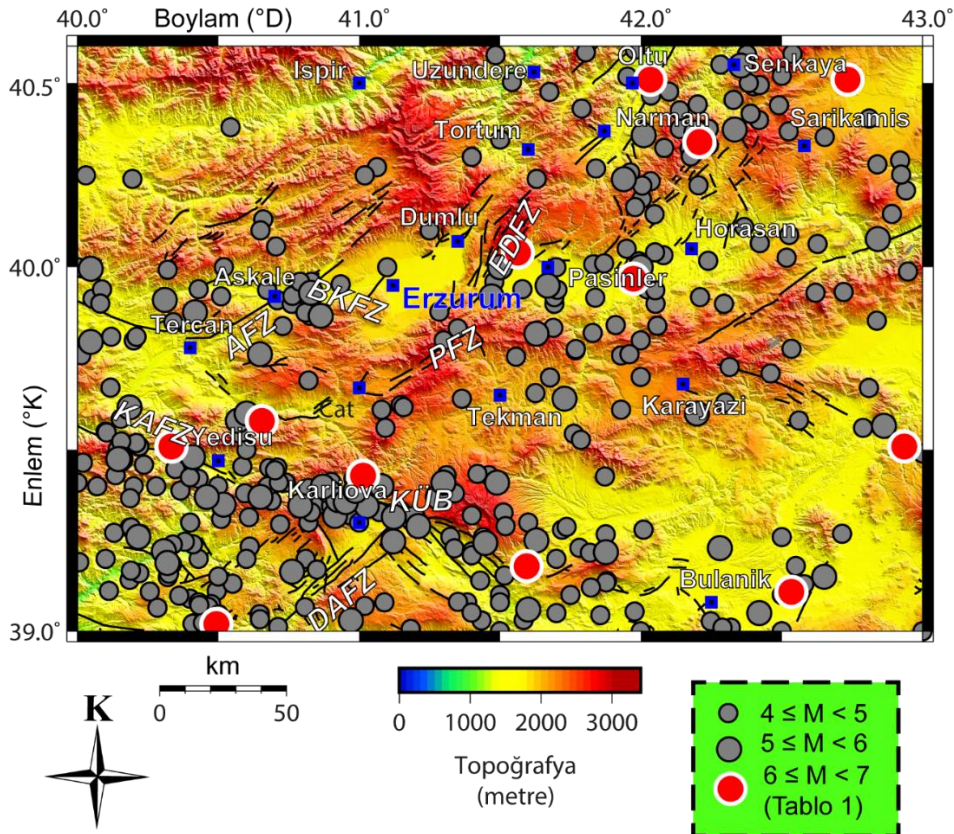
Erdem Bayrak

Email:

erdembayrak@atauni.edu.tr

1. GİRİŞ

Alp-Himalaya Orojenezi içerisinde yer alan Doğu Anadolu Bölgesi, tektonik hareketler sebebiyle aktif bir sismik etkinliğe sahiptir. Arap Levhası'nın kuzey ve Avrasya Levhası'nın güney yönlü hareketi ile Afrika Levhasının hareketi kıtasal yamulma karakteristiğini desteklemektedir. Bu göreceli hareketler sonucunda Anadolu Bloğu Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ve Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) boyunca batıya itilmekte ve diğer yandan Karlıova Üçlü Birleşim (KÜB) kavşağının doğu kısmında ise bindirme tektoniği etkisi altında kabuk kısalarak kalınlaşmaktadır. Doğu Anadolu Bölgesi'nin engebeli olmasının tektonik temelini bu etkiler oluşturmaktadır (Şekil 1). Arap ve Avrasya Levhaları'nın göreceli hareketlerinin halen etkin olması, KAFZ ve DAFZ yardımıyla, Anadolu Levhası'nın batıya kaçışını gerçekleştirmektedir (Şengör 1980). Çalışma alanının güney-batısında üç önemli tektonik birim bulunmaktadır. Dünya'daki en etkin fay zonlarından olan KAFZ, 1200 km uzunluğunda sağ yönlü doğrultu atımlı bir fay olup sismik açıdan Anadolu Bloğu'nun en etkin tektonik unsurudur (Sengor ve diğ. 2005). Anadolu Bloğu üzerindeki bir diğer etkin fay zonu olan DAFZ, 550 km uzunluğunda olup sol yönlü doğrultu atımlı karakteristik göstermektedir. KAFZ ve DAFZ'nin kesiştiği KÜB kavşağı, Doğu Anadolu Bölgesi'nde gelecek 100 yıl içerisinde büyük magnitüdü deprem olma olasılığı en yüksek alanların başında gelmektedir (Bayrak ve diğ. 2015). Ayrıca, çalışma alanı içerisindeki en büyük il olan Erzurum ve çevresinde dört temel tektonik unsur daha dikkat çekmektedir. Bunlar batıdan doğuya doğru sırasıyla (Şekil 1); sol yönlü doğrultu atım karakteristiği gösteren Aşkale Fay Zonu (AFZ), Başköy-Kandilli Fay Zonu (BKfZ), sol yanal atımlı ters faylardan oluşan Palandöken Fay Zonu (PFZ) ve sol yönlü doğrultu atımlı Erzurum-Dumlu Fay Zonu (EDFZ)'dir (Kocayigit ve Canoglu 2017, Ozer 2019, Ozer ve Ozyazicioglu 2019, Ozer ve diğ. 2019a,b).



Şekil 1: Çalışma alanında 1900-2020 yılları arasında $M \geq 4.0$ magnitüdü depremlerin episentr dağılımı ve tektonik yapılar (Faylar Emre ve diğ. (2013; 2018), depremler ise AFAD web sitesinden elde edilmiştir. Kırmızı daireler Tablo 1'deki depremleri göstermektedir.) (AFZ: Aşkale Fay Zonu, BKfZ: Başköy-Kandilli Fay Zonu, PFZ: Palandöken Fay Zonu, EDFZ: Erzurum-Dumlu Fay Zonu, DAFZ: Doğu Anadolu Fay Zonu, KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu, KÜB: Karlıova Üçlü Birleşimi)

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı'ndan (AFAD 2020a) alınan verilere göre 1900-2020 yılları arasında çalışma alanı içerisinde büyüklüğü $M_w \geq 4.0$ olan toplam 401 adet deprem meydana gelmiştir. Bu depremlerin önemli bir kısmı yukarıda bahsedilen tektonik unsurlar üzerinde yoğunlaşmaktadır (Şekil 1). Çalışma alanında son 120 yıldaki en büyük deprem 1966 yılında meydana gelen 6.9 (M_s) büyüklüğündeki depremdir. Son 20 yıllık periyotta magnitudü 6'dan büyük yalnızca bir deprem meydana gelmiştir. Bu deprem 1 Mayıs 2003 tarihindeki 6.3 (M_w) büyüklüğündeki Bingöl depremidir (Tablo 1). Bingöl depremi; 177 kişinin hayatını kaybetmesine, 530 kişinin yaralanmasına, 308 binanın yıkılmasına ve 2000'den fazla yapının kullanılmaz hale gelmesine sebep olmuştur (Yalçınkaya 2003).

Tablo 1: Çalışma alanında 1900-2020 yılları arasında meydana gelmiş büyük depremler ($M \geq 6$). M_s : Yüzey Dalgası Büyüklüğü, M_w : Moment Magnitud (AFAD 2020a)

Sayı	Tarih	Enlem (K°)	Boylam (D°)	Derinlik (km)	Tür	Büyüklük
1	1901-11-08 10:18:00	40.03	41.53	10.0	M_s	6.1
2	1903-04-28 23:46:00	39.10	42.50	30.0	M_s	6.3
3	1906-09-28 05:50:00	40.50	42.70	30.0	M_s	6.2
4	1906-12-28 00:00:00	40.50	42.00	30.0	M_s	6.0
5	1924-09-13 14:34:14	39.96	41.94	10.0	M_s	6.8
6	1935-05-01 10:24:35	39.50	43.00	35.0	M_s	6.0
7	1941-09-10 21:53:00	39.50	43.00	35.0	M_s	6.0
8	1949-08-17 18:44:20	39.57	40.62	40.0	M_s	6.7
9	1966-08-19 12:22:11	39.17	41.56	26.0	M_s	6.9
10	1966-08-20 11:59:09	39.42	40.98	14.0	M_s	6.2
11	1967-07-26 18:53:00	39.50	40.30	10.0	M_s	6.0
12	1983-10-30 04:12:29	40.33	42.17	15.0	M_w	6.6
13	2003-05-01 00:27:05	39.01	40.46	10.0	M_w	6.3

Çalışma alanının yüksek deprem etkinliğine sahip olması yer bilimcilerin ilgisini çekmekte olup, bu bölgede son on yılda birçok çalışma yapılmıştır. Ozeren ve Holt (2010) Küresel Konumlama Sistemi (KKS) verilerini kullanarak, Anadolu Bloğunun doğu kısmında Moho derinliğinin ~45 km kalınlığa ulaştığını rapor etmiştir. Sertcelik (2012) yürüttüğü soğurulma çalışmasında, KÜB kavşağındaki Koda değerlerinin yüksekliğine dikkat çekmiştir. Skobeltsyn ve diğ. (2014) üst manto S-dalgası hız modelinden ürettikleri sonuçlara göre Doğu Anadolu'daki yüksek topoğrafyanın kalın kabuk yerine sıcak astenosfer ile ilişkili olduğu fikrini ileri sürmüşlerdir. Maden ve diğ. (2015) gravite ve manyetik veriler yardımıyla yaptıkları çalışmada Moho ve Conrad derinliklerini sırasıyla 43.0 ve 20.9 km olarak rapor etmişlerdir. Maden ve Ozturk (2015), yüzeydeki yüksek ısı akısı değerlerine sahip volkanik zincirlerin altındaki depremlerin diğer depremlere nazaran büyüklüğünün küçük olduğunu ve Mohonun derinde olduğu fikrini ileri sürmüşlerdir. Simao ve diğ. (2016) KKS ve deprem verilerini kullanarak yürüttükleri çalışmada Türkiye'nin doğu kısmının Avrasya ve Arap Levhalarının çarpışması sonucu anizotropik bir deformasyon etkisi altında olduğunu belirtmişlerdir. Kocyigit ve Canoglu (2017) Erzurum çek-ayır havzasında yürüttükleri çalışmada Erzurum ili ve çevresinde büyük magnitudlü deprem üretme potansiyeli olan tektonik bölgelere dikkat çekmiştir. Bayrak ve diğ. (2019) yeni azalım ilişkileri yardımıyla geliştirdikleri matematiksel modelde 2003 Bingöl

depremi için şiddet tahmin modelleri önermişlerdir. Bayrak (2019) Erzurum ve civarı için yapmış olduğu çalışmada b-değerlerinin 0.5-1.5 arasında değiştiğini gözlemlemiştir. Ozer ve diğ. (2019a) yürüttükleri yerel deprem tomografisi çalışmasında Doğu Anadolu Bölgesinde Conrad süreksizliğinin ~20 km ve Moho süreksizliğinin de 30 ile 40 km arasında değiştiğini öne sürmüşlerdir. Ozer ve Bayrak (2020), 11 Mayıs 2017 tarihinde meydana gelen 4.7 (M_w) büyüklüğündeki depremin ana ve artçı şoklarını kullanarak Coulomb stress değişimlerini inceledikleri çalışmada; Tercan, Maden, Ilıca ve Çat bölgesinin kuzeyinde ~1 bar'lık bir gerilme yüklendiğini rapor etmişlerdir. Bayrak ve diğ. (2020) ise yine bu 4.7 büyüklüğündeki deprem kaydı ile farklı azalım ilişkileri kullanarak ivme değerlerini karşılaştırmış ve Sadigh ve diğ. (1997) azalım ilişkisinin diğer azalım ilişkilerine nazaran Erzurum ili için daha uygun olduğunu tespit etmiştir.

Bu çalışmada; 40.0° – 43.0°D boylamları ile 39.0° - 40.6°K enlemleri arasında kalan bölgedeki magnitudü 4'ten büyük depremlerin odak mekanizma çözümleri yardımıyla gerilme tensör ve Coulomb gerilme analizleri yapılmıştır. Yapılan bu analizler ile bölgesel tektonik unsurların saptanması ve gelecekte deprem üretme potansiyeline sahip alanların belirlenmesi amaçlanmaktadır.

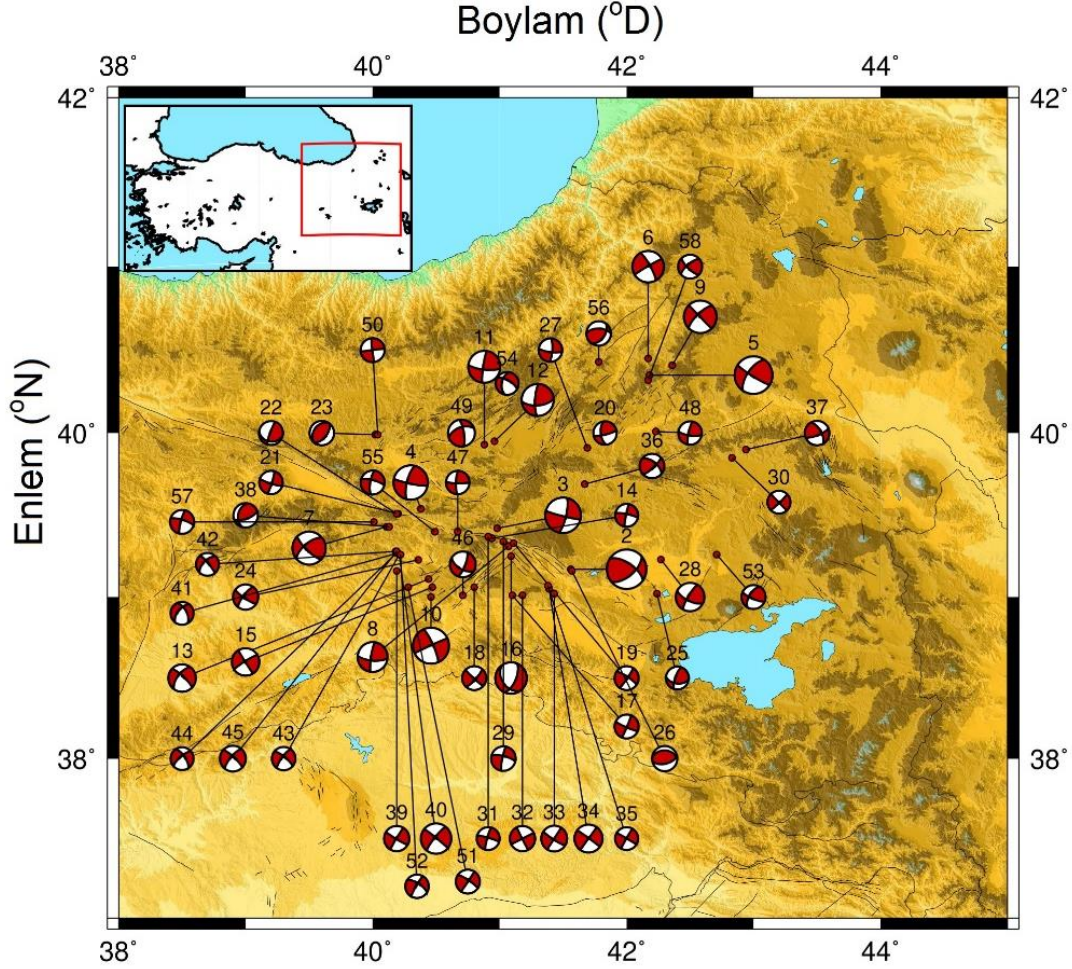
2. VERİ

Gerilme tensör ve Coulomb gerilme analizleri için çalışma alanında 1966-2019 yılları arasında meydana gelen 58 adet depreme ait odak mekanizması sonuçları kullanılmıştır. Tablo 2 bu depremlerin oluş zamanı, büyüklük ve derinlik ile doğrultu, eğim ve dalım değerlerini göstermektedir. Odak mekanizma çözümlerine bakıldığında doğrultu atımlı ve ters fayların etkin olduğu görülmektedir (Şekil 2).

Tablo 2: Çalışma alanında (39°-40.6°K Enlem ve 40°-43°D Boylam) meydana gelen depremlere ait odak mekanizması çözümleri (2007 yılından sonra meydana gelen depremlere ait odak mekanizma çözümleri AFAD web sitesinden alınmıştır.)

No	Yıl	Ay	Gün	Enlem (°K)	Boylam (°D)	Mag. (M_w)	h (km)	Doğrultu (°)	Eğim (°)	Dalım (°)	Referans
1	1966	3	7	39.20	41.60	5.6	26	310	60	143	McKenzie (1972)
2	1966	8	19	39.17	41.56	6.9	33	304	64	147	McKenzie (1972)
3	1966	8	20	39.42	40.98	6.2	12	104	86	-166	McKenzie (1972)
4	1967	7	26	39.54	40.38	6.0	33	102	84	162	McKenzie (1972)
5	1983	10	30	40.35	42.18	6.6	9	215	64	7	Eyidogan ve diğ. (1999)
6	1983	10	30	40.45	42.17	5.5	6	240	87	-11	Eyidogan ve diğ. (1999)
7	1995	12	5	39.43	40.11	5.8	13	134	76	155	Tan ve Taymaz (2003)
8	1998	4	13	39.31	41.07	5.2	10	95	70	170	Tan (2004)
9	1999	12	3	40.41	42.36	5.7	13	226	73	1	Tan ve Taymaz (2006)
10	2003	5	1	39.00	40.46	6.3	10	336	80	-178	Tan ve Taymaz (2004)
11	2004	3	25	39.93	40.88	5.6	12	188	84	15	Tan (2004)
12	2004	3	28	39.95	40.96	5.6	7	183	76	29	Tan (2004)
13	2007	3	8	39.11	40.44	4.8	26	313	79	-152	AFAD 2020b
14	2007	3	9	39.36	40.94	4.0	5	282	81	-175	AFAD 2020b
15	2007	3	9	39.06	40.47	4.8	5	238	85	2	AFAD 2020b
16	2007	8	25	39.25	41.09	5.5	23	145	42	-140	AFAD 2020b
17	2007	10	28	39.01	41.10	4.2	17	23	87	-6	AFAD 2020b
18	2010	4	11	39.06	40.80	4.2	18	42	79	-3	AFAD 2020b
19	2010	5	22	39.33	41.11	4.2	13	34	86	11	AFAD 2020b
20	2010	7	18	40.00	41.83	4.1	13	77	79	149	AFAD 2020b
21	2010	11	6	39.51	40.20	4.1	12	108	82	-173	AFAD 2020b
22	2010	11	7	39.51	40.19	4.2	10	99	29	167	AFAD 2020b

23	2010	12	26	39.99	40.02	4.3	12	38	56	91	AFAD 2020b
24	2011	3	6	39.2282	40.36	4.4	11	217	74	10	AFAD 2020b
25	2011	10	23	39.02	42.24	4.0	11	199	75	41	AFAD 2020b
26	2011	11	17	39.16	41.57	4.4	19	273	35	103	AFAD 2020b
27	2012	1	21	39.91	41.69	4.1	19	4	76	-14	AFAD 2020b
28	2012	3	26	39.23	42.27	5.0	16	116	67	168	AFAD 2020b
29	2012	4	4	39.34	41.03	4.3	18	284	73	-172	AFAD 2020b
30	2012	5	9	39.85	42.83	4.0	8	46	85	-2	AFAD 2020b
31	2012	12	12	39.37	40.91	4.0	14	286	84	-172	AFAD 2020b
32	2013	5	15	39.01	41.18	4.4	15	153	88	180	AFAD 2020b
33	2013	9	16	39.02	41.43	4.5	19	33	90	-7	AFAD 2020b
34	2013	9	17	39.05	41.39	4.9	19	216	90	-3	AFAD 2020b
35	2013	9	17	39.07	41.38	4.0	21	210	88	-1	AFAD 2020b
36	2013	9	18	39.69	41.67	4.3	11	47	76	30	AFAD 2020b
37	2013	10	4	39.9	42.94	4.3	21	68	75	28	AFAD 2020b
38	2015	2	9	39.43	40.13	4.3	13	70	66	122	AFAD 2020b
39	2015	9	7	39.16	40.19	4.4	17	121	86	177	AFAD 2020b
40	2015	12	2	39.26	40.21	5.3	10	309	87	-171	AFAD 2020b
41	2015	12	3	39.27	40.20	4.0	9	219	59	-39	AFAD 2020b
42	2015	12	3	39.28	40.18	4.0	9	225	61	-11	AFAD 2020b
43	2015	12	4	39.26	40.21	4.1	9	216	76	-13	AFAD 2020b
44	2015	12	4	39.27	40.19	4.0	11	229	73	-23	AFAD 2020b
45	2015	12	7	39.28	40.19	4.5	9	220	75	-11	AFAD 2020b
46	2016	6	10	39.01	40.71	4.5	12	21	74	-33	AFAD 2020b
47	2016	6	21	39.40	40.67	4.1	18	91	85	167	AFAD 2020b
48	2017	3	24	40.01	42.23	4.1	7	192	79	18	AFAD 2020b
49	2017	5	11	40.05	40.70	4.7	6	250	55	162	AFAD 2020b
50	2018	3	3	39.99	40.04	4.2	8	263	89	-178	AFAD 2020b
51	2018	3	7	39.06	40.28	4.2	12	34	89	10	AFAD 2020b
52	2018	3	7	39.26	40.22	4.1	10	303	68	-172	AFAD 2020b
53	2018	10	18	39.26	42.71	4.2	11	211	60	15	AFAD 2020b
54	2018	11	10	40.27	41.06	4.0	17	300	68	-137	AFAD 2020b
55	2019	1	1	39.40	40.49	4.2	11	284	74	-163	AFAD 2020b
56	2019	7	15	40.43	41.78	4.3	7	36	49	47	AFAD 2020b
57	2019	12	22	39.46	40.01	4.2	13	287	76	-170	AFAD 2020b
58	2019	12	29	40.32	42.17	4.2	7	134	74	159	AFAD 2020b



Şekil 2: Erzurum ili ve çevresini etkileyen önemli depremlerin fay kinematik çözümleri (KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu, DAFZ: Doğu Anadolu Fay Zonu, BZSZ: Bitlis-Zagros Sütur Zonu, Odak mekanizma çözüm parametreleri Tablo 2'de sunulmuştur.)

3. YÖNTEM

3.1) Gerilme Tensör Analizi

Deprem odak mekanizması sonuçlarından gerilme tensör analizi için birçok ters çözüm yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemlerden en çok bilinenleri ise Gephart ve Forstyh (1984) ve Michael (1984)'tür. Bu algoritmalar ile üç asal gerilme ekseninin yönleri ve nispi büyüklükleri için R şekil parametresi Denklem 1'deki gibi çözülür:

$$R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (1)$$

Burada σ_1 , σ_2 ve σ_3 sırasıyla en büyük, orta ve en küçük gerilmeleri göstermektedir.

Michael (1984) yöntemine göre fayın yapısı bilinmelidir. Eğer fay parametreleri yanlış kullanılırsa gerilme analizi sonuçlarındaki hata payı artacaktır (Vavrycuk 2014). Michael (1987) yöntemin doğruluğunu araştırmak için bazı sayısal analizler yapmış ve R değerinde sapmalar olduğunu belirlemiştir. Vavrycuk (2014) bu hata oranını azaltmak için yinelemeli gerilme analizi yöntemini önermiştir. Bu yöntemde başlangıçta herhangi bir kısıtlama olmaksızın, fay parametreleri bilgilerini kullanmadan Michael (1984) yöntemine göre çözüm yapılır. Asal

gerilme eksenleri ve şekil parametresi belirlendikten sonra, bu parametreler ters çözüm yapılan odak mekanizmalarının durağanlık analizinde kullanılır. Fay düzlemleri, daha kararsız olan düğüm düzlemleridir. İlk yinelemede bulunan fay düzlemleri, Michael'in yöntemi kullanılarak tekrar yapılan ikinci yinelemede kullanılır. Gerilme uygun değerlere yaklaşıncaya kadar bu yöntem tekrarlanır (Vavrycuk 2014).

3.2) Coulomb Stress Analizi

Coulomb gerilme analizi hem kesme hem de normal gerilme değerlerine bağlıdır ve Denklem 2 ile ifade edilir (Stein ve diğ. 1992, King ve diğ. 1994, Toda ve diğ. 1998):

$$\Delta CFF = \Delta\tau + \mu' (\Delta\sigma_n + \Delta P) \quad (2)$$

$\Delta\tau$ kesme gerilme değişimi (fay kayması yönünde pozitif), $\Delta\sigma$ normal gerilme değişimi (pozitif değerler sıkışmayı ifade eder), ΔP faydaki boşluk basıncı değişimi (pozitif değerler sıkışmayı ifade eder), μ' sürtünme katsayısıdır. Sürtünme katsayısı değeri 0-1 arasında değişmektedir.

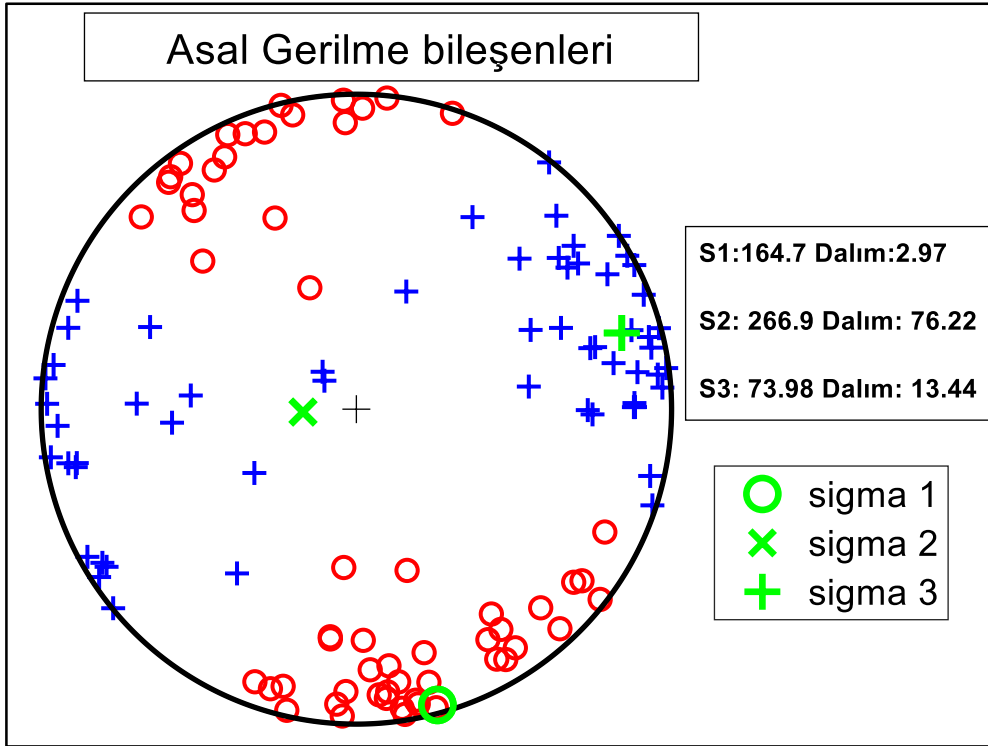
Coulomb gerilme değişimindeki pozitif değerler faylanmanın bir deprem nedeni ile kırılma olasılığının arttığını ifade etmektedir. Coulomb gerilme değişimini etkileyen faktörler; fayın geometrisi, faylanma veya yüzeyin (en uygun şekilde yönlendirilmiş düzlem) geometrisi ve kayma durumu, bölgesel gerilme ve görünür sürtünme katsayısıdır (Papadimitriou 2002, Bayrak ve diğ. 2013). Coulomb gerilme değerindeki değişimin 0.1 ile 1 bar arasında olmasının gelecekte bir deprem tetikleme için yeterli olduğu düşünülmektedir. Fakat gerilim tetikleme için herhangi bir eşik değeri bulunmamaktadır (Ziv ve Rubin 2000).

4. BULGULAR

4.1) Gerilme Tensör Analizi

Bu çalışmada yinelemeli ters çözüm yöntemi kullanılarak bölgede hâkim gerilme rejimi incelenmiştir. Bu analiz için çalışma alanında meydana gelen 58 adet depreme ait odak mekanizması çözümleri kullanılmıştır (Tablo 2). Yinelemeli ters çözüm yöntemi için Matlab dilinde oluşturulan Stressinverse programı kullanılmıştır (Vavrycuk 2014).

Gerilme tensör analizi sonuçlarına göre gerilme bileşenleri Şekil 3'te görülmektedir. Maksimum gerilme bileşeni (σ_1) KB- GD, orta gerilme bileşeni (σ_2) yaklaşık düşey ve minimum gerilme bileşeni (σ_3) ise yaklaşık KD-GB doğrultuludur. Faylanma tipini karakterize eden şekil parametresi (R) 0-1 arasında değişen değerler almakta, 0 değeri tek eksenli sıkışma, 0.5 değeri doğrultu atımlı fay ve 1.0 değeri ise tek eksenli açılmayı ifade etmektedir (Iturrieta ve diğ. 2017). Bu çalışmada şekil parametresi 0.84 olarak elde edilmiş ve bu da doğrultu atımlı hareket ile birlikte açılma rejimini ifade etmektedir.



Şekil 3: P- ve T-eksenleri dağılımı (Kırmızı daireler P-, mavi artılar ise T-ekseni değerlerini göstermektedir.)

P- ve T-eksenleri dağılımı grafiği (Şekil 3) bölgede KB-GD doğrultulu sıkışma ve KD-GB doğrultulu açılma olduğunu ortaya koymaktadır ve bu eksenlerin doğrultuları da bölgedeki tektonik rejim ile uyumludur. Ayrıca Zoback (1992)'nin gerilme bileşenlerinin dalım açısı değerlerine göre yaptığı sınıflama kullanılarak, bölgedeki ana tektonik unsurun (deprem üreten) doğrultu atımlı faylanma tipinde olduğu belirlenmiştir (Tablo 3).

Tablo 3: Asal eksenlere göre tektonik yapının türünün belirlenmesi (Zoback, 1992)

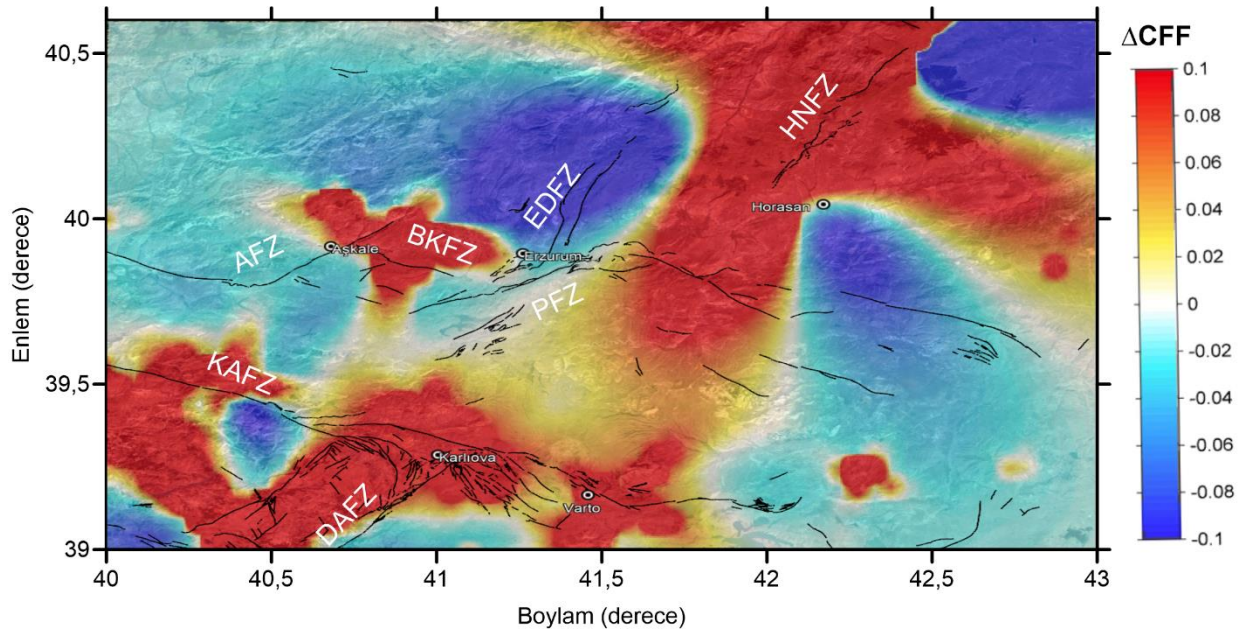
P/S1-ekseni	B/S2-ekseni	T/S3-ekseni	Tektonizma
$pl > 52$		$pl < 35$	Normal Fay
$40 < pl < 52$		$pl < 20$	Doğrultu atım bileşenli Normal Fay
$pl < 40$	$pl > 45$	$pl < 20$	Doğrultu Atımlı Fay
$pl < 20$	$pl > 45$	$pl < 40$	Doğrultu Atımlı Fay
$pl < 20$		$40 < pl < 52$	Doğrultu atım bileşenli Ters Fay
$pl < 35$		$pl > 52$	Ters Fay

4.2) Coulomb Gerilme Analizi

Çalışma alanının bölgesel gerilme parametreleri belirlendikten sonra Coulomb gerilme analizi yapılmıştır. Coulomb gerilme analizi için Coulomb 3.4 (Lin ve Stein 2004, Toda ve diğ. 2005) programı kullanılmıştır. Coulomb gerilme analizi için 58 adet depreme ait odak mekanizması çözümleri kullanılmıştır (Tablo 2). Coulomb gerilmesi sonucu elde edilen pozitif değerler artan

gerilimi ifade ederken negatif değerler ise gerilimin azaldığını ifade etmektedir. Lin ve Stein (2004) Coulomb gerilme analizinde kullanılan sürtünme katsayısı değerinin doğrultu atımlı faylarda 0.4 olduğunu belirtmiştir ve bu çalışmada da 0.4 olarak kullanılmıştır. Kesme modülü ve Poisson oranı ise sırasıyla 80 GPa ve 0.25 olarak seçilmiştir.

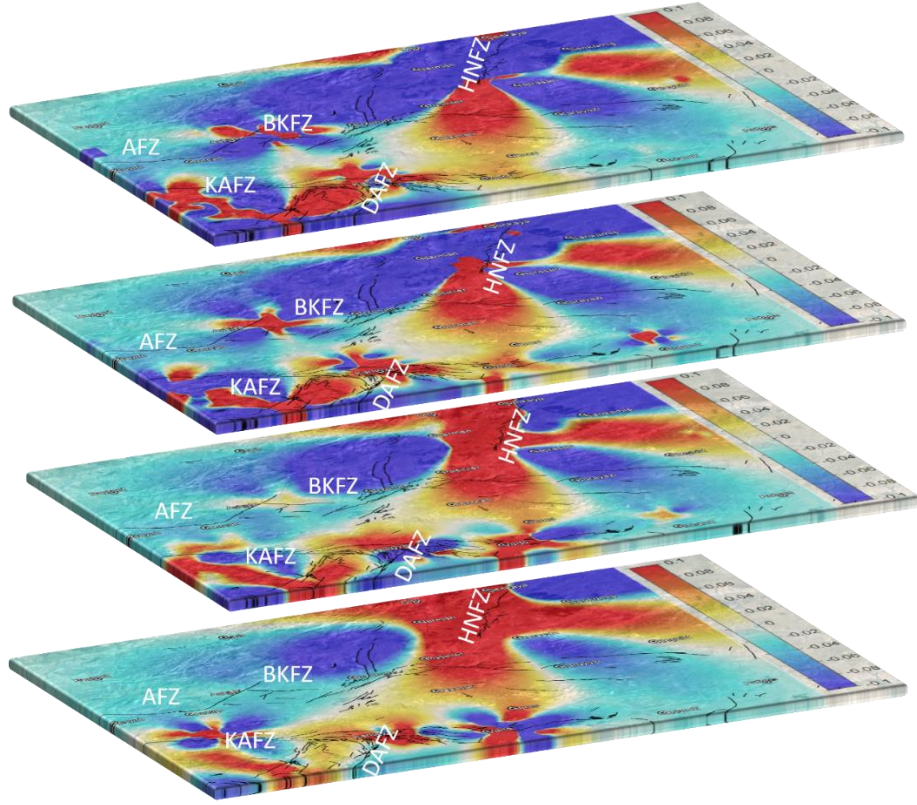
0-30 km derinliği için hesaplanan Coulomb gerilme değişim haritası Şekil 4'te sunulmaktadır. Özellikle Horasan-Narman, Kuzey Anadolu ve Aşkale fay zonlarında pozitif Coulomb gerilme değerleri gözlenmiştir. Horasan-Narman fayında son olarak 1983 yılında 6.6 (M_w) büyüklüğünde yıkıcı bir deprem meydana gelmiştir. Aşkale Fayı üzerinde ise 2004 yılında üç gün ara ile meydana gelen 5.6 (M_w) büyüklüğündeki depremler Aşkale ve civarındaki köylerde can ve mal kaybına neden olmuştur. Pozitif Coulomb gerilme değeri gözlenen KAFZ'nun doğu kesimi ise Doğu Anadolu Fay Zonu ile birleşerek Karlıova Üçlü Birleşimini oluşturmuştur. Bu üç fayın birleştiği alanda yıkıcı depremler meydana gelmektedir. 14 ve 15 Haziran 2020 tarihlerinde de sırasıyla 5.7 ve 5.6 (M_w) büyüklüğünde iki orta büyüklükte deprem Karlıova-Bingöl'de meydana gelmiştir (AFAD 2020a).



Şekil 4: 0-30 km derinliği için hesaplanan Coulomb gerilme değerleri (AFZ: Aşkale Fay Zonu, KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu, DAFZ: Doğu Anadolu Fay Zonu, BKfZ: Başköy-Kandilli Fay Zonu, HNFZ: Horasan-Narman Fay Zonu, PFZ: Palandöken Fay Zonu)

Ayrıca farklı derinlik değerleri (7.5, 15, 22.5 ve 30 km) için de Coulomb gerilme değişimi Şekil 5'te gösterilmiştir. Horasan-Narman Fay Zonu için 7.5 ve 15 km derinliklerinde fay boyunca negatif değişim gözlenirken artan derinliklerde pozitif değerler gözlenmiştir. Aşkale fayı için tam tersi durum söz konusu olup, 7.5 ve 15 km derinliklerinde pozitif değerler göze çarparken, 22.5 ve 30 km derinliklerinde ise negatif değerler gözlenmiştir. KAFZ'de artan derinliklerde pozitif gerilme değerlerinden negatif değerlere doğru bir düşüş meydana geldiği görülmektedir. Bu durum Coulomb gerilme değerinin tektonik koşullara göre değişkenlik göstermesi ile ilintilidir.

Bölgesel gerilme değişimini ifade eden diğer bir parametre ise b-değeridir. Bu çalışmada elde edilen Coulomb gerilme değişim değerleri ile Bayrak (2019)'un yapmış olduğu çalışmadaki b-değerleri karşılaştırılmıştır. Düşük b-değeri ile pozitif Coulomb değerleri KAFZ, Horasan Fayı, Aşkale Fayı civarında gözlenmiştir. Bu sebeple bu alanlarda gerilim birikiminin yüksek olduğu düşünülmektedir. Yüksek b-değerleri ile negatif Coulomb değerleri ise çalışma alanının kuzeydoğusunda gözlenmiştir.



Şekil 5: Farklı derinlikler için hesaplanan Coulomb gerilme haritaları (Haritalar yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla 7.5, 15, 22.5 ve 30 km derinlikleri için hesaplanmıştır. AFZ: Aşkale Fay Zonu, KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu, DAFZ: Doğu Anadolu Fay Zonu, BKFZ: Başköy-Kandilli Fay Zonu, HNFZ: Horasan-Narman Fay Zonu)

5. SONUÇLAR

Erzurum ve civarında hem tarihsel hem de aletsel dönemde can ve mal kaybına neden olan büyük depremler meydana gelmiştir. Bu depremlerin çoğu DAFZ, KAFZ ve KÜB üzerinde meydana gelmiştir. Bu çalışmada 58 adet depreme ait odak mekanizma çözümleri kullanılarak gerilme tensör ve Coulomb gerilme analizleri yapılmıştır. Gerilme tensör ters çözüm sonuçlarına göre en büyük bileşen σ_1 KB-GD doğrultulu, en küçük bileşen σ_3 KD-GB doğrultulu olup, jeolojik olarak bölgede doğrultu atımlı faylanma rejimi gözlenmiştir. Coulomb gerilme analizi sonuçlarına göre, özellikle Kuzey Anadolu Fay Zonu, Horasan-Narman Fayı ve Aşkale Fayında gerilmenin arttığı görülmüştür ve bu fay zonları gelecekte deprem üretme potansiyeline sahip alanlar olarak düşünülmektedir. Ayrıca b-değerleri (Bayrak 2019) ile Coulomb gerilme değerleri karşılaştırılmış ve bu iki parametrenin uyumlu olduğu gözlenmiştir. Daha düşük b-değerli bölgelerin gerilme birikiminin arttığı pozitif Coulomb değerine sahip olduğu, yüksek b-değerli bölgelerin ise negatif Coulomb değerli olduğu ortaya çıkmıştır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu araştırmaya veri desteği sağlayan (lokasyon ve odak mekanizma çözümleri) T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) Deprem Dairesi Başkanlığı'na teşekkür eder. Şekil 1 ve 2 GMT programı (Wessel ve diğ. 2013) kullanılarak hazırlanmıştır. Şekillerde kullanılan fay verileri MTA çizim editöründen (Emre ve diğ. 2013; 2018) sayısallaştırılmıştır. Gerilme tensör analizi için StressInverse (Vavrycuk 2014), Coulomb gerilme analizi için ise Coulomb 3.4 (Lin ve Stein 2004, Toda ve diğ. 2005) programları kullanılmıştır. Yapılan analiz ve hesaplamalarda Atatürk Üniversitesi Deprem Araştırma Merkezi bilgisayar altyapısı kullanılmıştır.

KAYNAKLAR

AFAD, 2020a. Erişim adresi: <https://deprem.afad.gov.tr/depremkatalogu>

AFAD, 2020b. Erişim adresi: <https://deprem.afad.gov.tr/faycozumleri>

Bayrak Y., Yadav R.B.S., Kalafat D., Tsapanos T.M., Cinar H., Singh A.P., Bayrak E., Yilmaz S., Ocal F., Koravos G., 2013. Seismogenesis and earthquake triggering during the Van (Turkey) 2011 seismic sequence. *Tectonophysics* 601, 163-176.

Bayrak E., Yilmaz S., Softa M., Turker T., Bayrak Y., 2015. Earthquake hazard analysis for East Anatolian Fault Zone, Turkey, *Natural Hazards* 76, 1063–1077.

Bayrak E., 2019. Earthquake Hazard Analysis For Erzurum, Eastern Turkey, 4. International Conference on Civil, Environmental, Geology and Mining Engineering, 20-22 April 2019, Trabzon, Turkey, 731-740.

Bayrak E., Nas M., Bayrak Y., 2019. New macroseismic intensity predictive models for Turkey, *Acta Geophysica* 67, 1483–1513.

Bayrak E., Ozer C., Perk S., 2020. The Ground-Motion Attenuation Comparison: A case study for the 2017/05/11 Askale earthquake (Mw4.7), *Brilliant Engineering* 3, 22-26.

Emre Ö., Duman T.Y., Özalp S., Elmacı H., Olgun S., Şaroglu F., 2013. 1/1.250.000 scaled Turkey active fault map, General Directorate of Mineral Research and Exploration Special Publication, Erişim adresi: <http://www.mta.gov.tr/>

Emre O., Duman T. Y., Ozalp S., Saroglu F., Olgun S., Elmaci H., Can T., 2018. Active fault database of Turkey, *Bulletin of Earthquake Engineering* 16, 3229-3275.

Eyidogan H., Nalbant S.S., Barka A., King G.C.P., 1999. Static stress changes induced by 1934 Pasinler (M=6.8) and 1983 Horasan-Narman (M=6.8) earthquakes, Northeastern Turkey. *Terra Nova* 11, 38–44.

Gephart J.W., Forsyth D.W., 1984. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: application to the San Fernando earthquake sequence, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B11), 9305-9320.

Iturrieta P.C., Hurtado D.E., Cembrano J., Stanton-Yonge A., 2017. States of stress and slip partitioning in a continental scale strike-slip duplex: Tectonic and magmatic implications by means of finite element modeling, *Earth and Planetary Science Letters* 473,71-82.

King G.C.P, Stein R.S., Lin J., 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America* 84(3) , 935–953.

Kocyigit A., Canoglu M.C., 2017. Neotectonics and Seismicity of Erzurum Pull-apart Basin, East Turkey, *Russian Geology and Geophysics* 58, 99-122.

Lin J., Stein R.S., 2004. Stress triggering in thrust and subduction earthquakes and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 109.

Maden N., Aydin A., Kadirov F., 2015. Determination of the Crustal and Thermal Structure of the Erzurum-Horasan-Pasinler Basins (Eastern Turkey) Using Gravity and Magnetic Data, *Pure Appl. Geophys.* 172, 1599–1614.

Maden N., Ozturk S., 2015. Seismic b-Values, Bouguer Gravity and Heat Flow Data Beneath Eastern Anatolia, Turkey: Tectonic Implications, *Surveys in Geophysics* 36, 549–570.

McKenzie D., 1972. Active tectonics of the Mediterranean Region. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society* 30, 109–185.

Michael A.J., 1984. Determination of stress from slip data: faults and folds. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 89(B13), 11517-11526.

Michael A.J., 1987. Use of focal mechanisms to determine stress: a control study. *Journal Geophysical Research* 92(B1), 357–368.

Ozer C., Ozyazicioglu M., Gok E., Polat O., 2019a. Imaging the Crustal Structure Throughout the East Anatolian Fault Zone, Turkey, by Local Earthquake Tomography, *Pure and Applied Geophysics* 176 (6), 2235-2261.

Ozer C., Kocadagistan M.E., Perk S., 2019b. Earthquake Monitoring Network of Erzurum: ATANET, *International Journal of Scientific and Technological Research* 5 (8), 35-47 (in Turkish).

Ozer C., Ozyazicioglu M., 2019. The Local Earthquake Tomography of Erzurum (Turkey) Geothermal Area, *Earth Sciences Research Journal* 23 (3), 209-223.

Ozer C., 2019. Investigation of the Local Soil Effects of Erzurum and Its Surroundings Using SSR and HVSR Methods, *DEU Journal of the Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering* 21 (61), 247-257 :10.21205/deufmd.2019216124 – (in Turkish).

Ozer C., Bayrak E., 2020. Coulomb Stress Changes after 11 May 2017 Askale-Erzurum (NE Turkey) Earthquake (Mw = 4.7). *International Journal of Earth Sciences Knowledge and Applications* 2 (1) 13-18.

Ozeren M.S., Holt W.E., 2010. The dynamics of the eastern Mediterranean and eastern Turkey, *Geophysical Journal International* 183 (3) , 1165–1184, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04819.x.

Papadimitriou E.E., 2002. Mode of strong earthquake recurrence in the central Ionian Islands (Greece): possible triggering due to Coulomb stress changes generated by the occurrence of previous strong shocks. *Bulletin of the Seismological Society of America* 92, 3293–3308.

Sadigh K., Chang C., Egan J., Makdisi F., Youngs R., 1997. Attenuation Relationships for Shallow Crustal Earthquakes Based on California Strong Motion Data, *Seismological Research Letters* 68:1, 180-189.

Sengor A.M.C., Tuysuz O., Imren C., Sakinc M., Eyidogan H., Gorur N., Le Pichon X., Rangin C., 2005. The North Anatolian Fault: A New Look, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 33, 37-112.

Sertcelik F., 2012. Estimation of Coda Wave Attenuation in the East Anatolia Fault Zone, Turkey, *Pure Appl. Geophys.* 169 (2012), 1189–1204.

Simao N.M., Nalbant S.S, Sunbul F., Komec Mutlu A., 2016. Central and eastern Anatolian crustal deformation rate and velocity fields derived from GPS and earthquake data, *Earth and Planetary Science Letters* 433, 89–98.

Skobeltsyn G., Mellors R., Gok R., Turkelli N., Yetirmishli G., E. Sandvol E., 2014. Upper mantle S wave velocity structure of the East Anatolian-Caucasus region, *Tectonics* 33, 207–221, doi:10.1002/2013TC003334.

Şengör A.M.C., 1980. Türkiye'nin neotektoniğinin esasları, Türkiye Jeoloji Kurumu, Konferans serisi:2.

Stein R.S., King G.C.P, Lin J., 1992. Change in failure stress on the southern San Andreas fault system caused by the 1992 magnitude= 7.4 Landers earthquake, *Science* 258, 1328–1332.

Tan O, 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, Middle East Technical University (METU) – Ankara, Abstracts, p. 160.

Tan O., 2004. The Source Mechanism Properties and Rupture Histories of the Caucasian, Eastern Anatolian and North Western Iranian Earthquakes. PhD Thesis, İstanbul Technical University, İstanbul, Turkey [in Turkish with English abstract].

Tan, O., Taymaz, T., 2004. Seismotectonics of the Caucasus and surrounding regions: source parameters and rupture histories of recent destructive earthquakes. AGU Fall Meeting, Session T14, San Francisco-California, EOS Transactions 85, 47.

Tan O., Taymaz T., 2006. Active tectonics of the Caucasus: earthquake source mechanisms and rupture histories obtained from inversion of teleseismic body waveforms. In: Dilek, Y. & Pavlides, S. (eds), Postcollisional Tectonics and Magmatism in the Mediterranean Region and Asia. *Geological Society of America Special Paper* 409, 531–578.

Toda S., Stein R.S., Reasenber P.A., Dieterich J.H., 1998. Stress transferred by the Mw = 6.5 Kobe, Japan, shock: effect on aftershocks and future earthquake probabilities. *Journal of Geophysical Research* 103, 24543–24565.

Toda S., Stein R.S., Richards-Dinger K., Bozkurt S.B., 2005. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: animations built on earthquake stress transfer, *Journal of Geophysical Research* 110 (5), doi:10.1029/2004JB003415.

Vavrycuk V., 2014. Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms, *Geophysical Journal International* 199(1), 69-77.

Yalçinkaya E., 2003. 1 Mayıs 2003 Bingöl depremi (Mw=6.4) kuvvetli hareket kayıtlarının incelenmesi, *Yerbilimleri* 24 (28) , 99-108.

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

Ziv A., Rubin A.M., 2000. Static stress transfer and earthquake triggering: No lower threshold in sight?, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 105(B6), 13631–13642.

Zoback M. L., 1992. First-and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B8), 11703-11728.