



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Hakkari ve Civarının (Güneydoğu Anadolu, Türkiye) Güncel Deprem Potansiyeli: Bölge-Zaman-Magnitüd Analizleri

Serkan ÖZTÜRK¹, Hamdi ALKAN^{*2}

¹Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane, Türkiye

²Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 65080, Van, Türkiye
Serkan ÖZTÜRK, ORCID No: 0000-0003-1322-5164, Hamdi ALKAN, ORCID No: 0000-0003-3912-7503

*Sorumlu yazar e-posta: hamdialkan@yyu.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 07.02.2024
Kabul: 31.07.2024
Online Ağustos 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1433478](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1433478)

Anahtar Kelimeler

b-değeri,
Deprem olasılığı,
Gerilme,
Hakkari,
Tekrarlama periyodu,
Z-değeri

Öz: Hakkari (Türkiye), deprensellik ve tektonizma olarak Güneydoğu Anadolu Bölgesinin en aktif illerinden bir tanesidir. Aletsel ve tarihsel dönemde, Hakkari ili ve civarında bulunan bu fay ve fay zonları birçok yıkıcı/hasar verici deprem üretmiştir. Son yıllarda Aralık 2023 (Mw=4.7) ve Şubat 2024'de (Mw=4.3) meydana gelen depremler, bu bölgedeki güncel deprenselliğin önemli göstergelerindedir. Analizlerden elde edilen bulgulara göre, bölgede ortalama *b*-değeri 0.88 ± 0.09 olup en düşük *b*-değerleri Yüksekova-Şemdinli Fay Zonu civarında gözlenmiştir. Buna ek olarak, pozitif Coulomb gerilme değişimleri Hakkari ili ve civarında KB-GD ve KD-GB yönlü olarak ortaya çıkmıştır. Diğer taraftan, seçilen bölge için Mw=5.0 büyüklüğündeki bir depremin tekraralama zamanı ~16 yıldır. Ayrıca, Mw=5.0 büyüklüğündeki bir depremin 10, 16 ve 20 yılda oluşma olasılıkları ise sırasıyla ~%45, ~%62 ve ~%69 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, bu çalışmada hesaplanan sismotektonik parametrelerin birlikte değerlendirilmesi ile Hakkari ili ve civarının güncel sismik tehlike potansiyeli ortaya çıkarılmıştır.

Current Earthquake Potential of Hakkari and its Surroundings, Southeast Anatolia, Türkiye: Region-Time-Magnitude Analyses

Article Info

Received: 07.02.2024
Accepted: 31.07.2024
Online August 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1433478](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1433478)

Keywords

b-value,
Earthquake probability,
Hakkari,
Return period,
Stress,
Z-value

Abstract: Hakkari, Türkiye, is one of the most active provinces of the Southeast Anatolian Region in terms of seismicity and tectonism. During the instrumental and historical period, these fault systems in the Hakkari region have produced many destructive/damaging earthquakes. The earthquakes that occurred in December 2023 (Mw=4.7) and February 2024 (Mw=4.3) in recent years are important indicators of current seismicity in this region. According to the results obtained from the analyses, the average *b*-value in the study region is 0.88 ± 0.09 and the lowest *b*-values are observed around the Yüksekova-Şemdinli Fault Zone. In addition, positive Coulomb stress changes have been observed in and around Hakkari in NW-SE and NE-SW directions. On the other hand, the return period of an earthquake with a magnitude of Mw=5.0 for the selected region is ~16 years. Also, the occurrence probabilities of an earthquake with a magnitude of Mw=5.0 in 10, 16 and 20 years is calculated as ~45%, 62% and ~69%, respectively. In conclusion, the current seismic hazard potential of Hakkari province and its surroundings has been revealed with the combination of sismotectonic parameters calculated in this study.

1. Giriş

Deprem oluşumlarının bölge-zaman-magnitüd karakteristiklerini tanımlayabilmek için hem Türkiye hem de dünyanın farklı bölgelerini içerisine alan, istatistiksel ve fiziksel modellerle birlikte farklı yöntemlerin kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur. Sismotektonik olarak aktif olan bölgelerde deprem oluşumlarının niceliksel olarak değerlendirilebilmesi ve birincil faydalı bilgilerin sağlanabilmesi için genellikle deprem istatistiğinin temeli olan b -değeri, standart normal sapma Z -değeri (sismik durgunluk), M_c -değeri (tamlik magnitüdü, kesme magnitüdü veya süreklilik magnitüdü) analizleri, depremlerin tekrarlamaya periyodu, oluşma olasılıkları ve gerilme değişimleri gibi temel ve en sık kullanılan ölçeklendirme parametreleri tercih edilir ve bu parametrelerin detaylı analizleri ile depremlerin davranış modelleri hakkında oldukça önemli bulgulara ulaşılmıştır (Hirata, 1989; Frohlich & Davis, 1993; Wiemer & Wyss, 2000; Wu & Chiao, 2006; Katsumata, 2011; Öztürk, 2018; 2020; Coban & Sayıl, 2019; Nanjo, 2020; Yaghmaei-Sabegh & Ostadi-Asl, 2021; Sinaga ve ark., 2022; Alkan ve ark., 2023; Öztürk & Alkan, 2023a). Bu çalışma kapsamında istatistiksel ve sismotektonik analizler için düşünülen değerlendirme parametreleri ise: (i) tamlik magnitüdü (M_c -değeri) analizi ve depremlerin magnitüd-frekans içeriğini tanımlayan b -değeri, (ii) farklı magnitüd değerlerindeki depremlerin tekrarlamaya periyodları ve oluşma olasılıkları, (iii) depremlerin oluşumundan önce aktivite oranındaki azalmayı ifade eden Z -değeri ve (iv) Coulomb gerilme değişimleri olarak verilebilir.

Depremlerin magnitüdü ve meydana gelme sıklığı magnitüd-frekans ilişkisi ile tanımlanır (Gutenberg & Richter, 1944) ve Gutenberg-Richter (G-R) ilişkisinin b -değeri ile verilir. Bu dağılım istatistiksel sismolojide ve deprem tehlike çalışmalarında en sık kullanılan ilişkidir çünkü güçlü/ yıkıcı depremlerin tekrarlamaya periyodlarının ve oluşma olasılıklarının tahmini için gereklidir. b -değerinin bölgesel ve zamana bağlı değişimleri, sismotektonik ortamların özellikleri, gerilmenin bölge-zaman-derinlik değişimleri ile küçük ve büyük depremlerin rölatif oranlarını tanımlayabilmek için kullanılabilir (Scholz, 1968). Genel bir ifadeyle, sismotektonik olarak aktif bir bölge için b -değerinde bir azalma eğilimi varsa o bölgede deprem olma ihtimalinin olduğu şeklinde yorumlanabilir. Deprem oluşumlarının bölge-zaman-magnitüd davranışlarının tanımlanmasına yönelik diğer önemli bir araç ise sismik aktivitedeki değişimlerinin değerlendirilmesidir çünkü durgunluk periyodu güçlü bir şekilde sismik ve tektonik oluşumlara bağlıdır. Wyss & Martirosyan (1998) sismik durgunluğu, mevcut aktivite oranına kıyasla ortalama deprensellik oranındaki önemli bir azalma olarak tanımlanmıştır. Deprensellik oranındaki bu durgunluk, ana şokun oluşumundan birkaç yıl önce deprem odak bölgesi ve civarında gözlenebilir veya bu azalma nispeten kısa bir zaman dilimi ile deprensellikteki artma eğilimine bağlı olarak ayırt edilebilir (Wyss & Haberman, 1988). b -değeri ve Z -değerine ek olarak, Coulomb gerilme analizleri bir bölgede önceki depremlerin yüklediği gerilimin artım miktarını gözleyebilmek açısından oldukça önemlidir. Gerilme, büyük depremlerden önce yüklem döngüsü boyunca artabilir veya hızla azalabilir. Bu nedenle deprem kaynaklı kabuk deformasyonu, deprem bölgesi ve çevresinde gerilme değişimlerine neden olur. Deprem fiziği açısından bakıldığında bir sonraki büyük depremin olası konumu, önceki depremlerin yüklediği gerilmenin durumuna ve mevcut sismotektonik koşullara bağlıdır. Bu nedenle gerilme değişimleri, deprem etkileşimleri açısından önemlidir ve ön deprem tahminleri için kullanılabilir. Son yıllarda yapılan çalışmalar depremlerin kabukta gerilme birikimine neden olduğunu ve bu sürecin civar faylardaki depremleri tetikleyebileceğini göstermektedir (King ve ark., 1994; Toda ve ark., 2011; Ahadov & Jin, 2019; Nanjo, 2020; Alkan ve ark., 2023).

Türkiye, sismik ve tektonik olarak dünyanın en aktif bölgelerinden biridir. Bu nedenle, son yıllarda, Türkiye'nin farklı sismotektonik bölgelerindeki deprem tehlikesini/potansiyelini ortaya koyabilmek için deprem davranışlarının tanımlanması amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Özellikle, Türkiye'nin doğu ve güney doğu Anadolu bölgeleri orta ve uzun vadede büyük depremlerin oluşumu açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Çalışma alanındaki Yüksekova-Şemdinli Fay Zonu (YŞFZ) Türkiye'deki önemli sismik boşluklardan biridir ve bölgedeki sismotektonik yapı, YŞFZ ve civarında bir depremin etkisini artırabilecektir. Dolayısıyla bu çalışmanın temel amacı, 2024 yılı başlangıcında Güneydoğu Anadolu Bindirme Zonu (GABZ) ve YŞFZ civarındaki deprenselliğin bölge-zaman-magnitüd analizlerinin gerçekleştirilmesi ile deprem tahmini ve tehlikesinin değerlendirilebilmesi için farklı bir bakış açısı sunmaktır. İstatistiksel analizler için ZMAP, Coulomb 3.4 ve Generic Mapping Tools, GMT yazılımları kullanılmıştır (Wiemer, 2001; Toda ve ark., 2011; Wessel ve ark., 2019). Elde edilecek bulgular sadece deprem davranışlarının tanımlanması açısından önemli olmayacak, aynı zamanda çalışma alanındaki deprem oluşumlarının anlaşılmasına da katkı sağlayacaktır. Dolayısıyla, bu

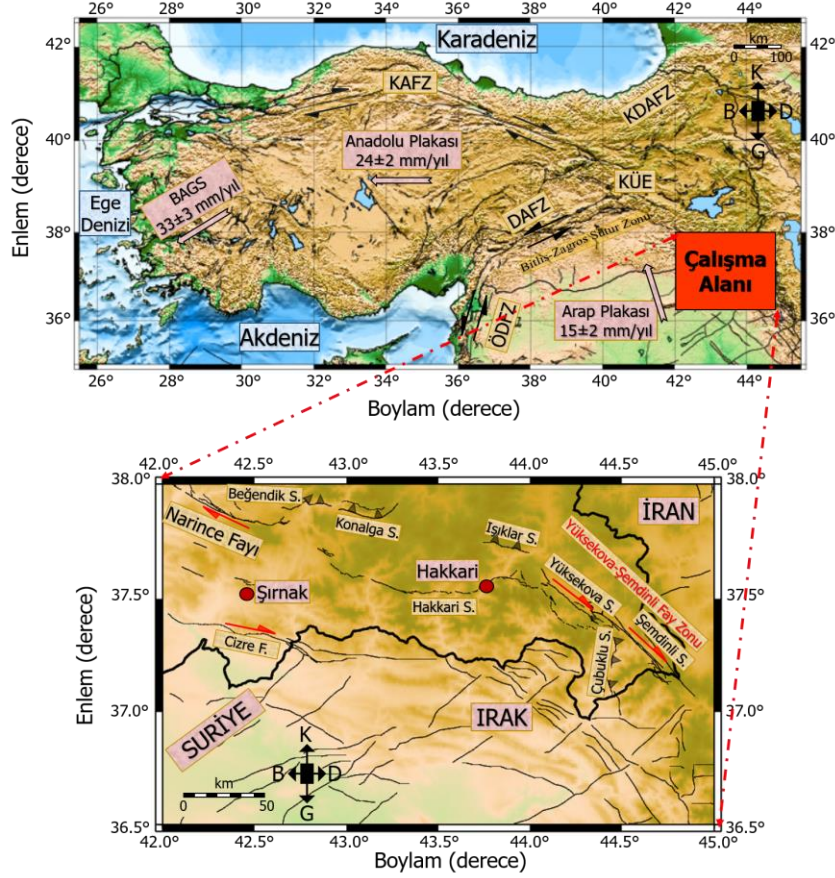
parametreler Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu Bölgesinde ve yakın civarında yaşanabilecek bir sonraki deprem oluşumunun gerçek zamanlı olarak araştırılmasına yönelik değerli bulguları da sağlayabilecektir.

2. Hakkari ve Civarının Sismotektonik Yapısı ve Analiz Verileri

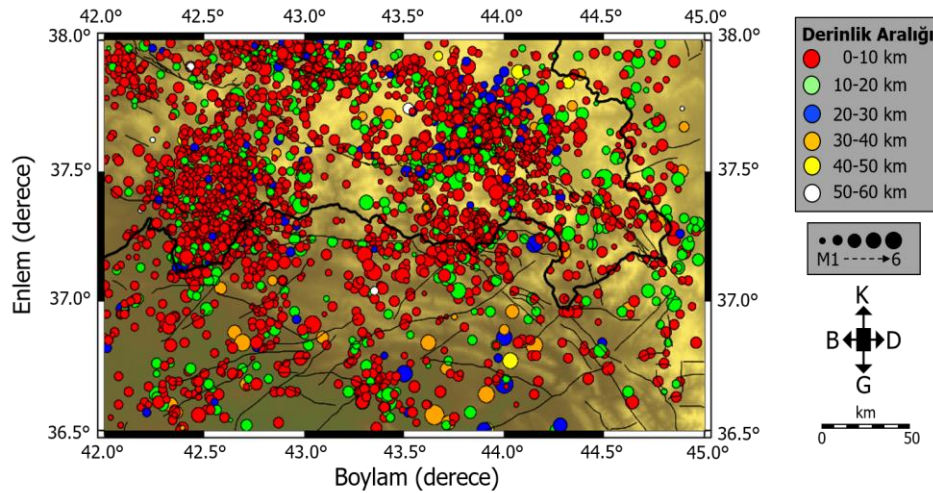
Anadolu Plakası (Türkiye) Alp-Himalaya orojenik kuşağının Doğu Akdeniz kısmındadır ve ~12 My öncesinden (Serravalien) günümüze kadar Avrasya Plakası, Afrika Plakası ve Arap Plakasının göreceli tektonik hareketlerine maruz kalmıştır (Irmak ve ark., 2012; Emre ve ark., 2018). Bu ana tektonik yapılara göre, Arap Plakası Bitlis-Zagros Bindirme Zonu (BZBZ) boyunca kuzey yönünde (~18 mm/yıl) Avrasya Plakasına doğru (~5 mm/yıl) hareket etmektedir (Reilinger ve ark., 2006). Arap ve Avrasya Plakaları arasındaki bu çarpışma tektoniği, Anadolu Plakasının saat yönünün tersine dönmesine ve batıya doğru hareketine (~24 mm/yıl) yol açmaktadır (Şengör & Yılmaz, 1981; Bozkurt, 2001; Reilinger ve ark., 2006). Batıya doğru olan bu hareket Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) ve Batı Anadolu Graben Sistemi (BAGS) olarak adlandırılan üç ana tektonik birimi (Şekil 1) oluşturmaktadır. Diğer yandan, Afrika Plakası daha yavaş bir hızla Arap Plakasından kuzeye doğru hareket etmekte ve Ölü Deniz Fay Zonu (ÖDFZ) bu plakalar arasındaki farklı hareketi oluşturmaktadır (Türkoğlu ve ark., 2015). Batı Anadolu Bölgesindeki genişleme deformasyonu, Anadolu Plakasının batıya doğru hareketi ve dahan Afrika Plakasının ile tektonik deformasyonu şekillendiren Orta Anadolu Bölgesinin aşağı yöndeki hareketiyle gelişmektedir (Delph ve ark., 2015; Alkan, 2022).

Doğu Anadolu Bölgesi (DAB) hem aletsel ve tarihsel dönemde sismotektonik açıdan en aktif bölgelerden biridir. Bu aktif depremsellik, kuzey-güney yönlü tektonik rejim, doğrultu atımlı faylar, bindirme fayları ve normal faylardan kaynaklı güncel deformasyonlardan kaynaklanır (Şengör & Yılmaz, 1981; Emre ve ark., 2018). Çalışma alanı, DAB'nin güneydoğusunda yer almakta olup GABZ ve YŞFZ gibi önemli iki tektonik yapıdan oluşmaktadır. Yüksekova-Şemdinli, genel olarak kalın alüvyon ve konsolide olmamış kil, çimentolu çakıl, kum ve silt gibi jeolojik birimlerin yer aldığı suya dolgun yapılar üzerinde yerleşmiştir (Akkaya ve ark., 2013; Akkaya, 2015). Bu jeolojik yapılar ve yeraltı su seviyesi, YŞFZ ve civarında meydana gelebilecek depremi önemli ölçüde tetikleyebilir ve deprem riskini artırabilir. YŞFZ'nin özelliği sağ yanal doğrultu atımlı mekanizmaya sahip olması ve 2 segmentten oluşmasıdır. Buna karşın, GABZ düşük açılı bindirme fayları ile karakterize edilir ve 12 segmentten oluşur (Emre ve ark., 2018). 1503 Hakkari (IX şiddetinde), 1884 Pervari-Siirt (VIII şiddetinde), 19 Nisan 1947 Ortaköy (moment magnitüdü $M_w=5.6$), 3 Aralık 1984 Konalga ($M_w=5.7$), 26 Şubat 2000 Şemdinli ($M_w=5.2$), 25 Ocak 2005 Hakkari-Sütlüce ($M_w=5.9$), 27 Ekim 2011 Hakkari (lokal magnitüd $M_L=5.6$), 5 Ağustos 2012 Şırnak ($M_L=5.3$) gibi aletsel ve tarihsel dönemde meydana gelmiş birçok güçlü/yıkıcı depremin kaynağı bu tektonik yapılarıdır (AFAD-Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı, deprem kataloğu: AFAD (2024); USGS-United States of Geological Service, deprem kataloğu: USGS (2024)). Ayrıca, yakın zamanda meydana gelmiş olan 31 Aralık 2023 Yazılı-Yüksekova ($M_w=4.7$) depremi bu bölgedeki sismotektonik aktivitenin ve son deprem oluşumlarının detaylı olarak analiz edilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

Bu çalışma kapsamında, deprem potansiyelinin bölge-zaman-magnitüd analizini yapabilmek için 1905-2018 yılları arasında M_w magnitüdüne göre homojen olan deprem verisi Tan (2021)'den alınmıştır. Bu veriye ek olarak 2018-2024 yılları arasında M_L magnitüdüne sahip deprem kataloğu Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'nden (KRDAE) derlenmiştir. 2018-2024 yılları arasında M_w magnitüdüne göre homojen bir katalog oluşturabilmek amacıyla Tan (2021) tarafından M_w-M_L dönüşümleri için önerilen ampirik ilişki ($M_w=1.017*M_L-0.012$) kullanılmıştır. Bu aşamadan sonra, çalışma alanındaki veriler seçilmiş ve 26 Ekim 1958-31 Aralık 2023 tarihleri arasında magnitüdü $1.0 \leq M_w \leq 6.0$ aralığında değişen yaklaşık 65.18 yıllık süreçte 3257 sığ (derinliği 70 km'den düşük) depremi içeren bir deprem kataloğu oluşturulmuştur. Çalışma bölgesi için aletsel dönemdeki deprem verisi Şekil 2'de gösterilmiştir. Ayrıca, Coulomb gerilme değişimleri, gelecek deprem tehlikesi için modellenmiş ve yorumlanmıştır. Bu amaçla, $M \geq 4.0$ olan 23 deprem kullanılmış ve bu depremlere bilgiler ve ait odak mekanizması çözümleri Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1. (Üst) Türkiye ve civarındaki tektonik yapılar (Emre ve ark., 2018 'ten değiştirilerek alınmıştır). Büyük oklar plaka hareket yönlerini göstermektedir (Reilinger ve ark. (2006)'dan alınmıştır). Çalışma alanı kırmızı dikdörtgen alan içerisinde gösterilmiştir. Kısaltmalar: BAGS: Batı Anadolu Graben Sistemi; KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu; DAFZ: Doğu Anadolu Fay Zonu; KDAFZ: Kuzeydoğu Anadolu Fay Zonu; ÖDFZ: Ölü Deniz Fay Zonu; KÜE: Karlıova Üçlü Eklemi. (Alt) Çalışma alanındaki aktif tektonik (Emre ve ark. (2018)'den değiştirilerek alınmıştır). Şehir konumları bordo dairelerle verilmiştir.



Şekil 2. Çalışma bölgesinde 26 Ekim 1958-31 Aralık 2023 yılları arasında $M_w \geq 1.0$ olan 3257 sığ depremin episantr dağılım haritası (Tan, 2021)' den ve KRDAE web sayfasından temin edilmiştir (KOERI, 2024). Depremlerin magnitüd ve derinlik dağılımları farklı sembollerle gösterilmiştir.

Çizelge 1. Coulomb gerilme değişimlerini hesaplamak için kullanılan depremlerin odak mekanizması çözümleri (Depremlere ait odak mekanizması çözümleri USGS (<https://www.usgs.gov/>), G-CMT (<https://www.globalcmt.org/>), KRDAE (<http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/tr/>) ve AFAD (<https://tdvms.afad.gov.tr/>) web sitelerinden alınmıştır) (D/E/K: Doğrultu/Eğim/Atım)

No	Tarih (UTC)	Derinlik (km)	Magnitüd	Enlem (°K)	Boylam (°D)	D/E/A (°)	Yer
1	25/01/2005 16:44:16	13.2	M _w =5.9	37.622	43.703	301°/78°/-169°	Hakkari (Merkez)
2	29/05/2011 11:02:29	11.2	M _L =4.6	37.216	42.560	58°/78°/4°	Şırnak (Silopi)
3	27/10/2011 08:04:22	20.0	M _w =5.1	37.256	43.860	310°/75°/-174°	Hakkari (Çukurca)
4	02/11/2011 11:43:02	7.78	M _L =4.8	37.253	43.900	156°/80°/-179°	Hakkari (Çukurca)
5	02/11/2011 18:32:50	7.79	M _L =4.1	37.252	43.891	288°/70°/-143°	Hakkari (Çukurca)
6	06/12/2011 15:46:25	3.19	M _L =4.6	37.263	43.876	312°/83°/-166°	Hakkari (Çukurca)
7	14/06/2012 05:50:01	11.1	M _L =4.0	37.224	42.435	139°/56°/95°	Şırnak (Silopi)
8	14/06/2012 05:52:51	11.6	M _w =5.2	37.157	42.443	318°/30°/121°	Şırnak (Silopi)
9	15/06/2012 23:48:14	8.69	M _L =4.2	37.209	42.458	118°/80°/-168°	Şırnak (Silopi)
10	05/08/2012 20:37:21	12.94	M _L =5.3	37.463	42.979	71°/71°/59°	Şırnak (Uludere)
11	25/02/2013 08:03:44	4.09	M _L =4.1	37.188	44.752	259°/62°/-143°	Hakkari (Şemdinli)
12	11/03/2013 14:57:93	12.0	M _w =5.2	36.560	43.360	277°/41°/90°	Kuzey Irak
13	13/03/2013 06:22:58	4.07	M _L =4.8	36.565	43.342	271°/48°/47°	Hakkari (Çukurca)
14	03/04/2014 13:56:13	12.0	M _w =4.2	37.845	42.972	324°/82°/-166°	Van (Çatak)
15	01/06/2015 14:54:16	12.6	M _w =4.0	37.508	43.882	227°/50°/16°	Hakkari (Merkez)
16	01/09/2015 14:14:04	14.95	M _w =4.2	37.472	42.992	114°/70°/126°	Şırnak (Uludere)
17	12/12/2015 15:48:25	9.96	M _w =4.1	37.882	43.521	303°/76°/166°	Van (Gürpınar)
18	18/04/2017 22:40:54	14.16	M _w =4.0	37.543	42.673	338°/76°/-172°	Şırnak (Merkez)
19	02/12/2017 11:58:04	8.0	M _w =4.4	37.710	44.580	186°/59°/115°	Hakkari (Esendere)
20	22/11/2018 05:50:52	6.97	M _w =4.1	37.259	42.464	325°/29°/130°	Şırnak (Silopi)
21	07/08/2020 19:20:12	10.0	M _w =4.8	37.949	42.660	143°/59°/-111°	Siirt (Beğendik)
22	31/12/2023 16:37:55	10.0	M _w =4.4	37.380	44.000	312°/55°/179°	Hakkari (Yüksekova)
23	31/12/2023 17:06:04	2.52	M _w =4.6	37.340	44.100	134°/85°/-133°	Hakkari (Yüksekova)

3. Materyal ve Yöntem

3.1. *b*-değeri (Gutenberg-Richter ilişkisi), *Mc*-değeri (tamlık magnitüdü), oluşma olasılıkları (*P*(*M*)) ve tekrarlama periyodu (*Q*)

Deprem oluşumlarının magnitüd-deprem sayısı ilişkisi için ampirik bir ölçek yasası [Gutenberg & Richter \(1944\)](#) tarafından tanımlanmıştır. Bu form deprem istatistiğinin temel bağıntısıdır ve aşağıdaki denklemle verilir:

$$\log_{10}N(M) = a - bM \quad (1)$$

Bu denklemde $N(M)$; magnitüdü M 'ye eşit veya ondan büyük olan belirli bir zaman periyodundaki olayların kümülatif sayısıdır. a ve b -değerleri pozitif katsayılardır. b -değeri magnitüd-deprem sayısı ilişkisinin eğiminden hesaplanır. Bununla birlikte, a -değeri deprensellik oranı ile ilişkilidir. Farklı sismik alanlar için a -değerindeki değişimler deprem kataloğunun süresi, çalışma alanının boyutu ve deprem sayısı ile ilişkilidir. Yapılan çalışmalar b -değerinin dünyanın farklı bölgeleri için 0.3-2.0 arasında değişim gösterdiğini ortaya koymuştur ([Utsu, 1971](#)). Ortalama b -değeri ise 1.0 civarındadır ([Frohlich & Davis, 1993](#)). b -değeri, büyük ve küçük depremlerin göreceli dağılımlarıyla ilişkilidir. Bununla birlikte, tektonik özellikler, gerilme heterojeniteleri ve anizotropik yapı gibi birçok faktör b -değerindeki değişimleri etkileyebilir. b -değeri ile gerilme dağılımı arasında negatif bir ilişki vardır. Ayrıca, jeolojik yapılar, fay uzunluğu, çatlak yoğunluğu, ısısal değişimler, malzeme özellikleri, sismik dalga hız değişimleri, sismik soğrulma, yamulma ve eğim değişimleri gibi birçok parametre b -değerindeki değişimleri etkiler ([Mogi, 1962](#); [Schorlemmer ve ark., 2005](#); [Scholz, 2015](#)). Magmatik zonlarda deprem aktivitesi nispeten yüksek b -değeri ile karakterize edilir. Dolayısıyla, küçük ama etkili gerilme değişimleri yüksek gözenek basıncıyla ve jeotermal değişimlerle ilişkili olabilir ([Abdelfattah ve ark., 2020](#)). Sonuç olarak, b -değerinin bir bölgedeki deprem potansiyelini ortaya koymada oldukça önemli bir parametre olduğu düşünülür.

Belirli periyodlarda ve farklı magnitüd değerlerindeki depremler için oluşma olasılıkları G-R ilişkisi dikkat alınarak aşağıdaki denklemle verilir ([Tabban & Gencoğlu, 1975](#)):

$$P(M) = 1 - e^{-N(M)*Tr} \quad (2)$$

Burada $P(M)$; en azından bir depremin belirli Tr periyodlarındaki oluşma olasılığıdır. $N(M)$ ve M değerleri 1. denklemden elde edilir. 2. denklem Poisson dağılımının bir sonucudur. $N(M)$ ayrıca, yıl bazında depremlerin sayısını ifade eder. Bununla birlikte, belirli magnitüd değerlerindeki herhangi bir depremin tekrarlama periyodu ise aşağıdaki denklemle verilir ([Tabban & Gencoğlu, 1975](#)):

$$Q = 1/N(M) \quad (3)$$

Burada Q ; bir depremin tekrarlama periyodudur ve magnitüdü M 'ye eşit ve ondan büyük olan bir deprem için beklenen zaman aralığıdır.

b -değerinin tahmininde ve sismik durgunluğun analizinde güvenilir ve kaliteli istatistiksel sonuçlar için en yüksek veri sayısının kullanımı önemlidir. Dolayısıyla tamlık magnitüdü çok önemli bir parametredir ve bu tür bir tahmin, analizler için ilk aşama olarak gerçekleştirilmelidir. Mc -değeri, tam bir deprem kaydının en düşük magnitüdü olarak tanımlanır ve verinin %90-95'inin bir güç yasası ile temsil edilebildiği magnitüd değeri olarak verilir. Kayıt ağlarının depremden sonraki süreçte hemen kurulamayışı deprem aktivitesinin yüksek olduğu dönemde küçük olayların kayıt edilmesini zorlaştırır ve buna bağlı olarak ta veri setinin ilk dönemlerinde tamlık magnitüdü yüksek olur. Mc -değerinin hesabı, magnitüd-deprem sayısı dağılımına ve Mc -değerinin yaklaşık ilk dizisi olarak bu dağılımın ilk türevinin maksimum değer hesabına dayanır ([Wiemer & Wyss, 2000](#)). Belli sayıda depremi kapsayan her pencere içerisindeki olaylar dikkate alınarak bu deprem dizisi için ortalama bir büyüklük değeri hesaplanır ve her bir pencere için hesaplanan bu değer o pencerenin zaman aralığı için ortalama tamlık magnitüdü olarak kabul edilir. Dolayısıyla, zamanın bir fonksiyonu olarak tamlık magnitüdünün hesabı, hareketli ve üst üste binen pencere yöntemi kullanılarak maksimum olasılık tekniğiyle yapılabilir.

3.2. Ayırıştırma (kümesizleştirme, decluster) işlemi ve standart normal sapma (Z-değeri)

Deprem yığılımları, öncü şoklar, artçı şoklar ve patlatmalar gibi ikincil olayların deprem kataloglarından ayrılması, deprem tehlike analizlerinin ve deprensellik oran değişimlerinin değerlendirilebilmesi için niceliksel deprem istatistiklerinde en temel aşamalardan biridir. Kümelenme yaklaşımında, bir katalog bağımlı ve bağımsız olaylar ayırıştırılır. Bu ayırıştırma işlemi bütün ana olayları her bir gruptan ayırır ve bütün birincil depremler farklı bir olay olarak kaydedilir. Dolayısıyla, deprem tahmin modellerinde tekdüze bir deprem verisi elde edebilmek için kataloglara ayırıştırma işlemi uygulanmalıdır. Bu çalışmada, deprem kataloğunun ayırıştırılabilmesi için, [Reasenberg \(1985\)](#) tarafından tanımlanan ve *ZMAP* yazılımında mevcut olan ayırıştırma algoritması kullanılmıştır.

Sismik durgunluk hipotezi ilk kez [Wyss & Habermann \(1988\)](#) tarafından önerilmiştir. Bu hipoteze göre, sismojenik bir zonun sınırlı bir kısmında deprem aktivitesinde önemli bir azalma olur ve aktivitedeki bu düşüş sismik durgunluk olarak tanımlanır ([Wiemer & Wyss, 1994](#)). Deprem aktivitesindeki değişimleri tanımlayan ve karakterize eden farklı modeller mevcuttur. Bu modellerin çoğu ana olaylardan önceki durgunluğun bölge-zaman değişimlerini kullanır. *ZMAP* yazılımında kullanılan yöntem [Wiemer & Wyss \(1994\)](#) tarafından önerilmiştir ve bu tür uygulamalar içerisinde en yaygın yöntemlerden bir tanesi de standart normal sapma Z-testidir. *ZMAP* tekniği, deprem aktivitesinde mevcut olan durgunluğu ortaya koyabilmek için kullanılır. Z-testi, standart sapma biriminde güven seviyesinin istatistiksel olarak değerlendirilebilmesi için *LTA(t)* fonksiyonunu (Long Term Average, Uzun Vadeli Ortalama) oluşturur ([Wiemer & Wyss, 1994](#)):

$$Z(t) = \frac{R_1 - R_2}{[(\sigma_1^2/n_1) + (\sigma_2^2/n_2)]^{1/2}} \quad (4)$$

Burada R_1 ; tüm periyotlardaki ortalama deprensellik oranı (deprem sayısı), R_2 ; düşünülen periyottaki ortalama deprensellik oranıdır. σ_1 ve σ_2 ; bu periyotlardaki deprem yoğunluk fonksiyonlarının standart sapmaları, n_1 ve n_2 ise ölçülen sismik aktivite oranındaki örneklerin sayısı ile ilişkili parametrelerdir. Z-değeri zamanın bir fonksiyonu olarak hesaplanır ve *LTA* olarak tanımlanır.

3.3. Coulomb gerilme değişimleri

Coulomb gerilme analizi, kaynak fayda bir kopmanın meydana geldiği durumlarda gerilme koşullarını ortaya koyabilmek için kullanılan oldukça kullanışlı bir yaklaşımdır. Alıcı fay üzerindeki Coulomb kopma gerilmesinin ($\Delta\sigma_{cfs}$) değişimi aşağıdaki denklemle verilir ([King ve ark., 1994](#)):

$$\Delta\sigma_{cfs} = \Delta\tau_s + \mu' \Delta\sigma_{n'} \quad (5)$$

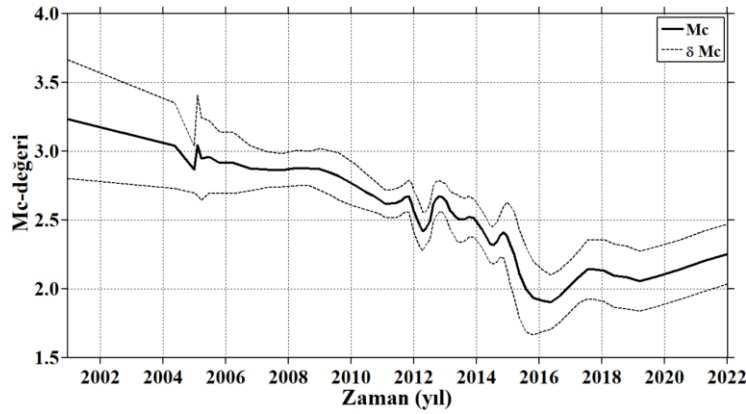
Burada $\Delta\tau_s$; alıcı fay atımının pozitif yönüyle ilişkili makaslama gerilmesi değişimi, $\Delta\sigma_{n'}$; fay düzlemi boyunca ki normal gerilme değişimi ve μ' ise fay üzerindeki efektif sürtünme katsayısıdır ([Toda ve ark., 2011](#)). μ' , gözenek basıncı değişimlerinin etkilerini dahil etmek anlamına gelir ve 0-1 arasında değişir. Seçilen depremlerin odak mekanizması çözümleri genellikle doğrultu atımlı ve ters fay mekanizmasına sahiptir. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında elastik yarı-sonsuz bir ortamda 0.4 olarak alınmıştır ([King ve ark., 1994](#)). Boyutsuz Poisson oranı (ν) 0.25 ve Young modülü (E) ise 8×10^5 bar olarak alınmıştır. ± 0.1 aralığında değişen Coulomb gerilme değeri gelecek deprem tehlikesini tahmin etmede katkı sağlar ([Yadav ve ark., 2012](#)). Pozitif Coulomb gerilme değişimi, fayı gevrek kırılmaya doğru iten gerilme artışı gösterirken, Coulomb gerilme dağılımındaki negatif değişimler ise depremin kırılmaya neden olmasını engelleyen gerilme boşalımı ile ilişkilidir ([Stein ve ark., 1994](#); [Liao ve ark., 2022](#)).

4. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada temel amaç, deprem oluşumlarının bölge-zaman-magnitüd davranışlarını tanımlayabilmek için tamlık magnitüdü M_c -değeri, G-R ilişkisindeki b -değeri, depremlerin tekrarlama periyotları ve oluşma olasılıkları, öncü sismik durgunluk Z-değeri ve Coulomb gerilme değişimleri gibi

istatistiksel parametreler analiz edilerek 2024 yılı başlangıcında Hakkari ve civarındaki deprem tehlikesi ve gelecek deprem potansiyeli için bazı ön bulguları ortaya koyabilmektedir.

Deprem kataloglarında minimum magnitüd zamanla değişim gösterdiği için istatistiksel deprensellik analizlerinde tamlık magnitüdü M_c -değerinin seçimi oldukça önemlidir ve bu tür çalışmaların ilk aşaması olmalıdır. Ayrıca bu tür çalışmalarda, güvenilir sonuçların elde edilebilmesi için maksimum deprem sayısının kullanılması hedeflenir. Yöntem kısmında bahsedildiği gibi M_c -değerinin ve standart sapmasının zamana bağlı değişimleri hareketli zaman penceresi tekniği kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 3'te verilmiştir. Analizlerde $M_w \geq 1.0$ olan ve 3257 depremi içeren tam katalog verisi dikkate alınmış ve M_c -değerinin hesabı için pencere başına 200 olay ile örnekleme yapılmıştır. M_c -değeri, 2014 yılına kadar 2.5-3.2 arasında değişim gösterdiği görülmektedir. 2014 yılından itibaren 2.5 değerinin altına düşmekte ve 2014 yılından 2024 yılına kadarki on yıllık süreçte 2.3-2.5 arasında dalgalanma göstermektedir. M_c -değerindeki zamana bağlı değişimler durağan değildir ve 1958-2024 yılları arasında ortalama 2.5 değeri civarında dağılım gösterdiği görülmektedir. Sonuç olarak, çalışma kapsamında b -değeri, Z -değeri, tekrarlama periyodu, oluşma olasılıkları ve gerilme analizi gibi istatistikler yapılacağı için M_c -değerinin belirlenmesi ilk adım olarak gerçekleştirilmiş ve M_c -değeri ortalama 2.5 olarak varsayılmıştır. Bu değer, Öztürk & Alkan (2023b) tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarıyla da uyumludur.

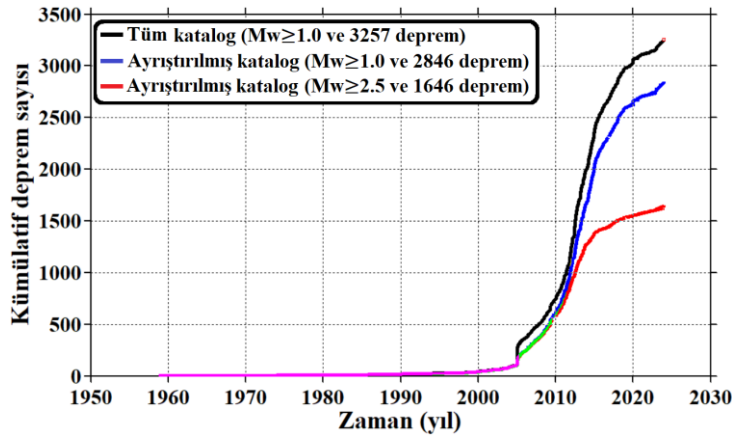


Şekil 3. M_c -değerinin zamanla değişimi. Kesikli çizgi standart sapmayı (δM_c) göstermektedir.

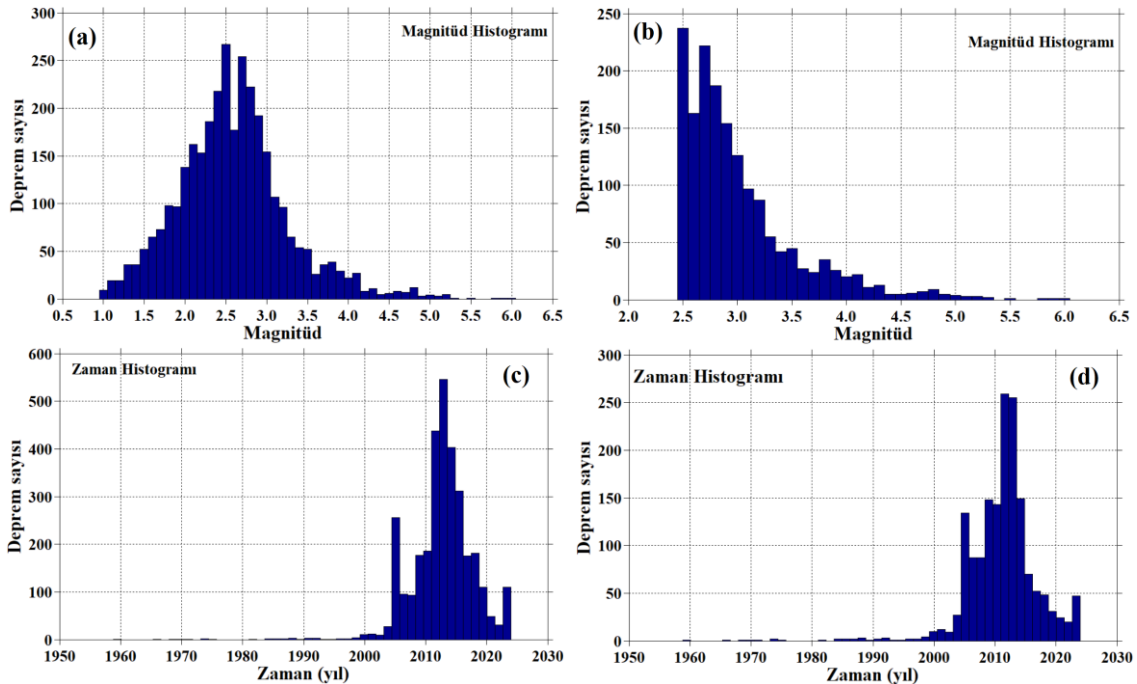
Veri bölümünde ifade edildiği gibi tam katalog içerisinde 1958-2024 yılları arasında $M_w \geq 1.0$ olan toplam 3257 deprem mevcuttur. Ayırıştırma işlemi uygulandıktan sonra 411 deprem (%12.62) katalogdan çıkarılmıştır. $M_c=2.5$ dikkate alınarak, ayırıştırılmış katalog içerisindeki $M_w < 2.5$ olan 1200 deprem de katalogdan çıkarılmıştır. Ayırıştırma işlemi ve M_c -değeri dikkate alınarak yapılan eliminasyon işlemi sonucunda toplamda 1611 (%49.46) deprem katalogdan çıkarılmıştır. Böylece, sismik durgunluk analizleri için daha homojen, standart ve bağımsız bir deprem kataloğu oluşturulmuştur. Şekil 4, farklı magnitüd değerleri ve ayırıştırılmış kataloglar için zamanın bir fonksiyonu olarak kümülatif deprem sayısını göstermektedir. Tam deprem kataloğu $M_w \geq 1.0$ olan 3257 depremi (siyah çizgi), ayırıştırılmış ancak tüm deprem verisini kullanan deprem kataloğu $M_w \geq 1.0$ olan 2846 depremi (mavi çizgi), ayırıştırılmış ve M_c -değerini dikkate alan deprem kataloğu ise $M_w \geq 2.5$ olan 1646 depremi (kırmızı çizgi) içermektedir (Şekil 4). 1958 ile 2000 yılları arasında sismik aktivitede önemli bir dalgalanma yoktur ve 2001-2005 yılları arasında çok az bir deprensellik değişimi mevcuttur. Bununla birlikte 25 Ocak 2005 Hakkari depreminden sonra sismik aktivitede önemli bir artışın olduğu görülmektedir. Şekil 4'ten görüldüğü gibi, $M_w \geq 2.5$ olan ayırıştırılmış deprem kataloğunun kümülatif sayı eğrisi tam deprem kataloğuna kıyasla daha düzgün bir yönelime sahiptir. Literatür çalışmaları, M_c -değerini dikkate alan ayırıştırma çalışmalarının, öncü şok, artçı şok veya deprem yığılımı gibi bağımlı aktivitelerin katalogdan uzaklaştırılabilmesi için gerekli olduğunu göstermektedir. Ayrıca, deprensellik oran değişimlerinin istatistiksel olarak değerlendirilebilmesi için bu işlemin birincil adım olarak yapılması gerekmektedir (Katsumata & Kasahara, 1999; Joseph ve ark., 2011). Sonuçta, ayırıştırma ve sonrasında $M_w < 2.5$ olan depremlerin katalogdan elenmesi ile bağımlı olaylardan temizlenmiş, sismik durgunluk analizleri için tekdüze ve daha güvenilir bir deprem kataloğu elde edilmiştir.

Şekil 5, Hakkari ve civarında magnitüdü $1.0 \leq M_w \leq 6.0$ arasında değişen yaklaşık 3257 sığ depremin (70 km'den küçük) magnitüd ve zaman histogramlarını göstermektedir. Şekil 5a'da görüldüğü

gibi, deprem magnitüdlerinin büyük çoğunluğu 2.0-3.0 arasında değişmektedir ve $M_w=2.5$ değerinde maksimum sayıya ulaşmıştır. Katalog içerisinde $M_w>3.0$ olan 2473 deprem, $3.0 \leq M_w < 4.0$ arasında 658 deprem, $4.0 \leq M_w < 5.0$ arasında 109 deprem ve $5.0 \leq M_w$ olan 17 deprem mevcuttur. Ayrıca, ayrıştırılmış katalog için magnitüd histogramı Şekil 5b’de verilmiştir. Sonuç olarak, Hakkari ve civar için magnitüdü 2.0-3.0 arasında değişen depremlerin daha sık meydana geldiği söylenebilir. Küçük depremlerin sayılarında gözlenen bu artma eğilimi son yıllarda Hakkari ve civarındaki gerilme artışının bir belirtisi olarak yorumlanabilir. 1958-2024 yılları arasında yaklaşık 65.18 yıllık süreçte meydana gelen depremlerin zaman histogramı Şekil 5c’de verilmektedir. 1958-2005 yılları arasındaki depremsellik oldukça azdır ve bu zaman aralığında 105 deprem meydana gelmiştir. 2005-2011 yılları arasındaki deprem aktivitesi güçlü artış ve azalmalar göstermesine rağmen, 2011 yılından itibaren deprem sayısında genel bir azalma söz konusudur. 2005-2011 yılları arasında 1121 deprem gözlenirken 2012-2024 yılları arasında toplamda 2031 deprem meydana gelmiştir. Bununla birlikte, 2021 yılından itibaren deprem aktivitesinin yeniden artmaya başladığı görülmektedir. Tüm kataloga ek olarak, ayrıştırılmış katalog için zaman histogramı Şekil 5d’de verilmiştir. Dolayısıyla, bu tür istatistiksel analizler depremsellik oran değişimlerinin gözlenebilmesi için ilksel bilgiler sağlayabilir ve bu tür değişimler Hakkari ve civarındaki öncü sismik durgunluk değerlendirmesi için kullanılabilir.

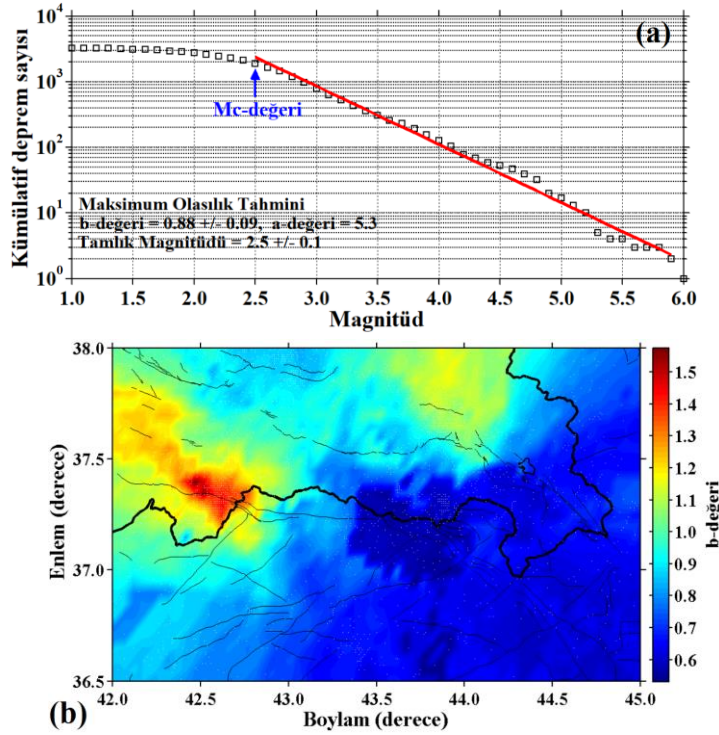


Şekil 4. Tüm ve ayrıştırılmış veri setleri için zamanın bir fonksiyonu olarak kümülatif deprem sayısı.



Şekil 5. Hakkari ve civarı için 1958-2024 yılları arasındaki depremlerin (a) tüm katalog için magnitüd histogramı, (b) ayrıştırılmış katalog ($M_w \geq 2.5$) için magnitüd histogramı, (c) tüm katalog için zaman histogramı, (d) ayrıştırılmış katalog ($M_w \geq 2.5$) için zaman histogramı.

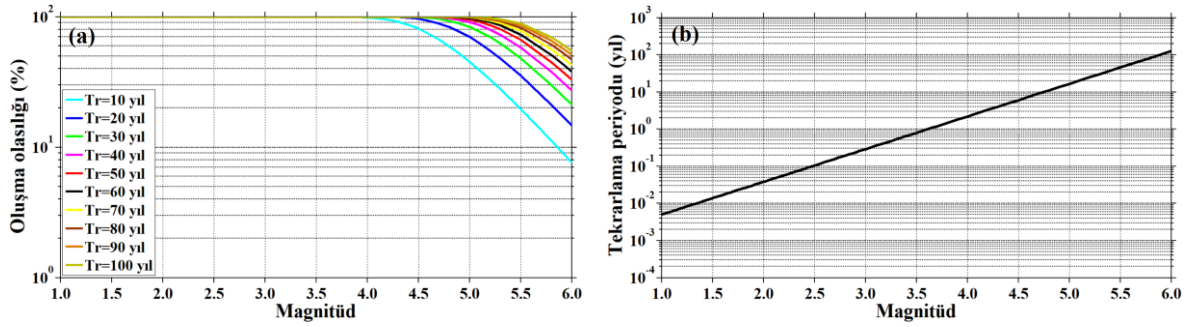
Şekil 6, b -değeri ve bölgesel değişim haritasını göstermektedir. b -değeri, tüm deprem kataloğu kullanılarak ve $M_c=2.5$ alınarak maksimum olasılık yöntemi ile 0.88 ± 0.09 olarak hesaplanmıştır (Şekil 6a). Küresel ölçekte b -değerinin 0.3-2.0 arasında değiştiği bilinir. Ortalama b -değeri 1.0 olarak önerilmekle birlikte tektonik depremler 0.5-1.5 arasında değişen b -değerlerine sahiptir. Dolayısıyla, Hakkari ve civarı için hesaplanan $b=0.88$ değerinin G-R ilişkisiyle iyi uyum sağladığı ve ortalama b -değerine kıyasla nispeten küçük bir değer olduğu söylenebilir. Bu da Türkiye'nin bu kısmında artan bir gerilme durumunun olabileceği şeklinde yorumlanabilir. b -değerinin bölgesel değişimi hareketli pencere tekniği ile pencere başına 400 deprem kullanılarak enlem ve boylamda $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ grid aralığı ile hesaplanmış ve Şekil 6b'de verilmiştir. Bölgesel b -değeri 0.53-1.53 arasında değişim göstermektedir. Frohlich & Davis (1993)'e göre deprem oluşumları için b -değeri, ortalama 1.0 civarında G-R ilişkisi ile iyi temsil edilir. Bu tanımlamaya göre, büyük b -değerleri ($b>1.0$) Cizre fayını içeren Şırnak ve civarında, Narince segmentini içerisine alan Güneydoğu Anadolu Bindirme Zonunda, Işıklar segmenti ve kuzeyini içerisine alan bölgede gözlenmiştir. Bununla birlikte düşük b -değerleri ($b<1.0$), Beğendik, Konalga, Hakkari, Yüksekova, Şemdinli ve Çubuklu segmentlerinde gözlenirken en düşük b -değerlerinin büyük magnitüdü deprem oluşumlarıyla (Şekil 2) ilişkili olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, b -değeri dağılımı deprem aktivitesiyle iyi uyum içerisindedir.



Şekil 6. (a) G-R ilişkisi ve b -değeri. b -değeri, standart sapması, a -değeri ve M_c -değeri de şekil üzerinde verilmiştir. (b) b -değeri bölgesel değişim haritası.

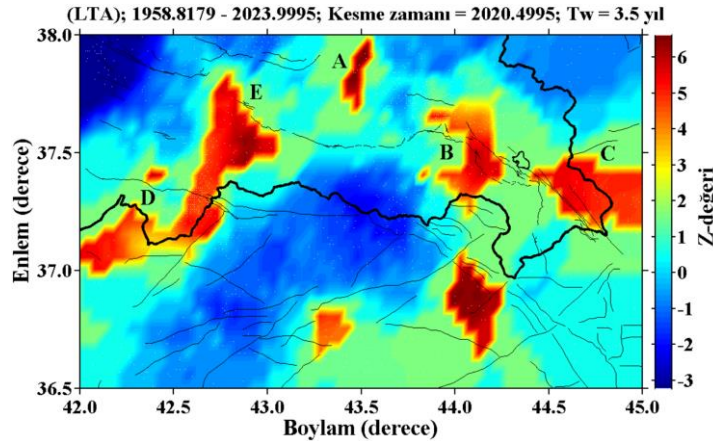
Bir bölgenin deprem potansiyelinin istatistiksel olarak değerlendirilmesinde en önemli araçlardan biri deprem oluşumlarının tekrarlaması periyodu ile oluşma olasılıklarının hesaplanmasıdır. Çalışma kapsamında tüm magnitüd seviyelerindeki bu tür değişimler Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7a'da görüldüğü gibi, farklı T_r (recurrence time, return period, tekrarlamama zamanı) periyodlar için %~80-100 arasında değişen en yüksek oluşma olasılıkları $1.0 \leq M_w < 4.5$ aralığındaki depremler için tahmin edilmiştir. $M_w=5.0$ büyüklüğündeki depremler için farklı T_r periyodlarındaki oluşma olasılıkları %~40-100 arasında değişim göstermektedir. Ayrıca, $M_w=5.5$ ve $M_w=6.0$ olan depremlerin $T_r=10$ ve $T_r=20$ yılda oluşma olasılıkları %20'den küçükken, bu büyüklükteki depremlerin $T_r=30$ ve daha uzun periyodlardaki oluşma olasılıkları %20'den büyüktür. Şekil 7a'ya göre, $M_w=5.0$ büyüklüğündeki bir depremin $T_r=10, 20, 50, 70$ ve 100 yılda oluşma olasılıkları sırasıyla %~45.20, %~69.97, %~95.06, %~98.52 ve %~99.76 olarak verilebilir. $M_w=5.5$ büyüklüğündeki bir depremin $T_r=10, 20, 50, 70$ ve 100 yılda oluşma olasılıkları ise sırasıyla %~19.62, %~35.39, %~66.44, %~73.31 ve %~88.74 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, çalışma alanı içerisinde meydana gelmiş en büyük deprem olan $M_w=6.0$ için

$T_r=10, 20, 50, 70$ ve 100 yılda oluşma olasılıkları ise sırasıyla $\% \sim 7.62, \% \sim 14.66, \% \sim 32.72, \% \sim 49$ ve $\% \sim 54.73$ olarak tahmin edilmiştir. Bu belirli magnitüd değerlerine ek olarak bütün magnitüd seviyeleri için farklı T_r periyodlarındaki oluşma olasılıkları Şekil 7a'dan görülebilir. Oluşma olasılıklarıyla birlikte, tüm magnitüd değerleri için depremlerin tekrarlamaya periyodları Şekil 7b'de verilmiştir. Nispeten küçük tekrarlamaya periyodları ($< \sim 1$ yıl) magnitüdü $M_w=1.0-3.6$ arasındaki depremler için gözlenirken, $\sim 1-10$ yıllık tekrarlamaya periyoduna sahip depremler magnitüdü $M_w=3.6-4.7$ arasında değişen depremler için hesaplanmıştır. $\sim 10-20$ yıl arasındaki tekrarlamaya periyodları $M_w=5.0-5.1$ aralığındaki depremler için tahmin edilmişken, 20 yıldan daha uzun tekrarlamaya periyoduna sahip depremler ise $M_w=5.1$ 'den büyüktür. Şekil 7b'ye göre, $M_w=5.0, 5.5$ ve 6.0 olan depremlerin tekrarlamaya zamanları sırasıyla $\sim 16.63, \sim 45.80$ ve ~ 126.30 yıl olarak verilebilir. Ayrıca, farklı magnitüd seviyeleri için tekrarlamaya periyodları Şekil 7b'dan tahmin edilebilir. Elde edilen sonuçlar, $M_w=4.0-5.0$ aralığındaki depremlerin tekrarlamaya periyodlarının diğer depremlere göre daha kısa ve oluşma olasılıklarının daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuçta, bu tahminler çalışma alanı veya Türkiye'nin aktif tektonik bölgelerindeki deprem potansiyelini ortaya koymada ilksel ve kayda değer bulgular sağlayabilir.



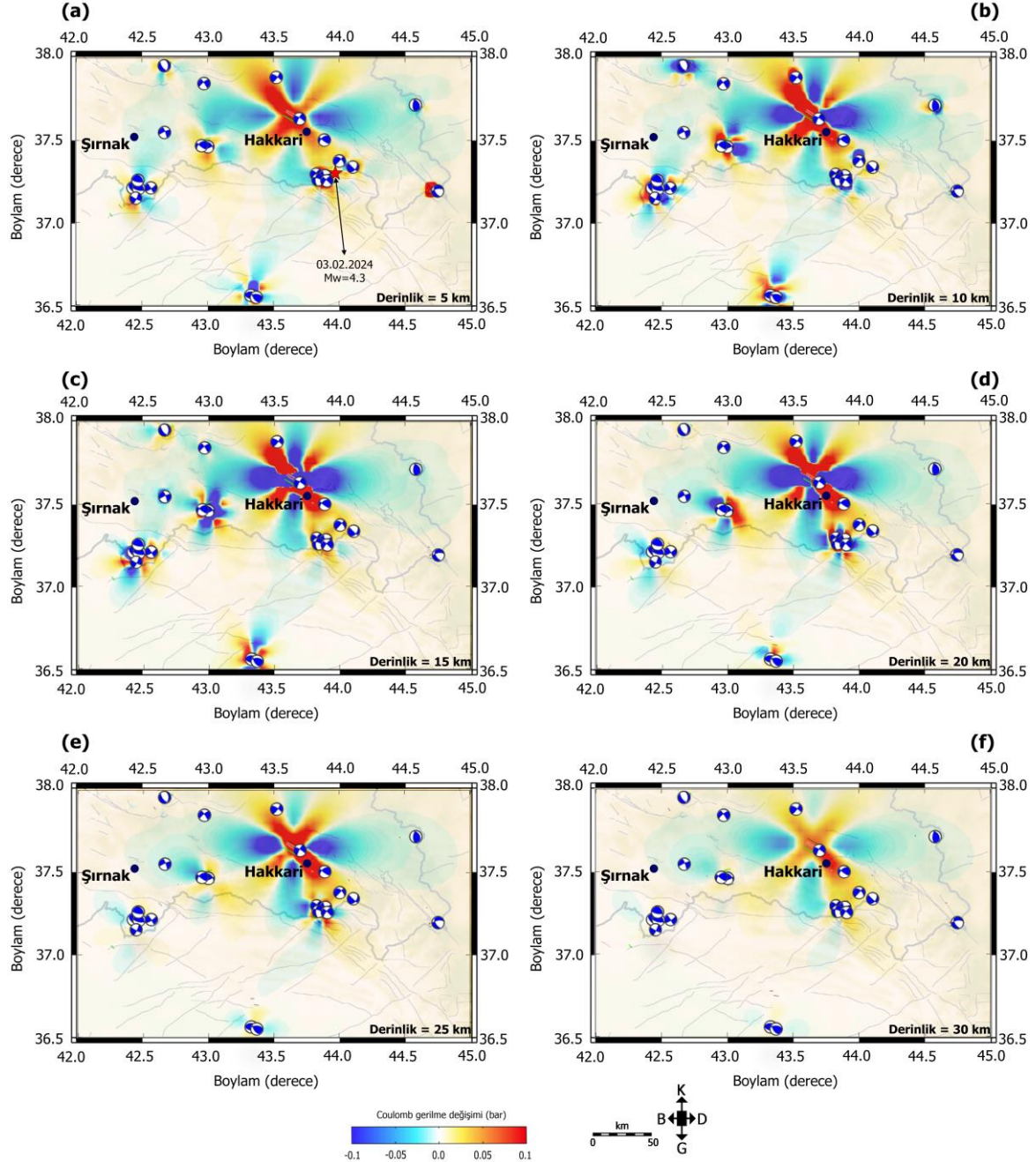
Şekil 7. (a) $T_r=10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$ ve 100 yıllık periyodlar için deprem oluşma olasılıkları. (b) Depremlerin tekrarlamaya periyodları.

Daha önce de ifade edildiği gibi, bir bölgedeki depremsellik oranını ortaya koyan deprem aktivitesindeki öncü durgunluğun tanımı deprem tahmini için önemli bulgular ortaya koyabilir. Bu amaçla, b -değeri hesabında olduğu gibi, çalışma alanı enlem ve boylamda $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ grid aralıklarına bölünmüş ve zaman penceresinin uzunluğu $T_w=3.5$ yıl alınarak Z -değeri haritası oluşturulmuştur (Şekil 8). Bu analiz için $M_w \geq 2.5$ olan ve 1646 depremi içeren ayrıştırılmış katalog kullanılmıştır. Şekil 8'de görüldüğü gibi, 2024 yılı başlangıcında Türkiye sınırları içerisinde sismik durgunluk gösteren 5 bölge tespit edilmiştir. Bu bölgeler, Konalga segmentinin doğu kısmı (A bölgesi), Işıklar segmenti ve güneyi (B bölgesi), Yüksekova-Şemdinli Fay Zonu (C bölgesi), Cizre fayı ve civarı (D bölgesi), Narince segmenti ile Hakkari segmenti arasında kalan ve Güneydoğu Anadolu Bindirme Zonunu içeren bölgeler (E bölgesi) olarak verilebilir. Sonuç olarak, durgunluk görülen anomali bölgeleri önemli olabilir ve bu detaylı Z -testi sonuçları çalışma alanı için deprem tahmininde öncü belirtilerin güvenilirliğini artırabilir.



Şekil 8. Z -değeri bölgesel değişim haritası. 2024 yılı başlangıcında sismik durgunluk gösteren bölgeler (A, B, C, D, E, F ve G) $T_w=3.5$ yıllık pencere aralığı ile hesaplanmıştır.

Şekil 9'da farklı derinlik aralıkları (5, 10, 15, 20, 25, 30 km) için Coulomb gerilme değişimi sonuçları gösterilmiştir. Coulomb gerilme transferi sonucu elde edilen pozitif değerler artan gerilimi ifade ederken negatif değerler ise gerilimin azaldığını ifade etmektedir (Alkan ve ark., 2021; Alkan & Bayrak, 2022). Tüm derinlik seviyelerindeki gerilme değişimleri dikkate alındığında, ilk olarak Hakkari ili civarında KB-GD ve KD-GB yönünde 4 adet pozitif Coulomb gerilme lobu göze çarpmaktadır. Bu bölgeler Işıklar, Yüksekova, Şemdinli ve Çubuklu segmentlerinin bulunduğu Yüksekova-Şemdinli Fay Zonu ve Güneydoğu Anadolu Terslenme zonunu içeren bölgelerdir. Özellikle sıg derinliklerde, bu segmentler civarında pozitif gerilme değerleri (~0.1 bar) gözlemlenmiştir.



Şekil 9. Çizelge 1'de verilen depremlerin odak mekanizması çözümleri kullanılarak Hakkari ve civarında farklı derinlikler: (a) 5 km, (b) 10 km, (c) 15 km, (d) 20 km, (e) 25 km ve (f) 30 km için Coulomb gerilme değişim haritaları. 2005 ve 2023 yılları arasında meydana gelen 23 adet depremin ($4.0 \leq M_w \leq 5.9$) odak mekanizması çözümleri mavi plaj topları ile gösterilmiştir. 5 km derinlik haritasında kırmızı yıldız ile gösterilen deprem 03.02.2024 tarihinde meydana gelen Hakkari depremini temsil etmektedir (Depremin episantr bilgileri AFAD web sitesinden alınmıştır (<https://deprem.afad.gov.tr/event-catalog>)).

Şekil 9a'da kırmızı yıldız ile gösterilen deprem ($M_w=4.3$) 03.02.2024 tarihinde Hakkari'nin yaklaşık olarak güney doğusunda meydana gelmiştir (AFAD, 2024) ve bindirme tektoniği ile ilişkilidir. AFAD'ın odak mekanizması çözümlemesine göre sığ bir depreme ($h=7.0$ km) karşılık gelen bu depremi episantr noktası bu çalışmada hesaplanan pozitif Coulomb gerilme alanı içine düşmektedir. Bunun aksine, Hakkari ili ve civarında özellikle 15 km derinlik seviyesinin devamında yaklaşık olarak K-G ve D-B yönünde negatif gerilme lobları ortaya çıkmıştır. Bu durum, artan derinliklerde gerilme değerlerinin negatif olduğunu ve herhangi bir sismik aktivite olabilme ihtimalinin daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Diğer taraftan, çalışma alanının batısında Şırnak ilinin hemen kuzeyinde yer alan Narince fayı, Beğendik fayı ve Konalga fayı civarında ise küçük ölçekte pozitif ve negatif anomaliler göze çarpmaktadır. Tüm derinlik haritaları incelendiğinde Şırnak ilinin kuzeyine nazaran güneyinde 20 km derinlik seviyesine kadar pozitif gerilme (>0 bar) değerleri gözlenmektedir.

Anadolu & Kalyoncuoğlu (2010), Hakkari ve civarını da içerisine alan Güneydoğu Anadolu bölgesinin deprem tehlikesini ortaya koyabilmek için, depremlerin magnitüd-frekans içeriğini ortaya koyan b -değerini, depremlerin oluşma olasılıklarını ve geri dönüşüm periyotlarını hesaplamışlardır. Bitlis-Zagros Bindirme Zonu, DAFZ ile KAFZ'ın kesiştiği Erzincan-Elazığ-Muş-Erzurum bölgelerinde ve Van Gölü'nün kuzeydoğusunda düşük b -değerleri gözlemlemişler, çalışma alanı içerisinde 100 yıllık bir süreçte magnitüdü 6.5'e eşit ve büyük bir depremin oluşma olasılığını ise %70-75 arasında vermişlerdir. Bu büyüklükte bir depremin tekrarlama zamanını ise 50 yıldan daha az bir süreyle vermişlerdir. Düşük b -değerlerinin yüksek gerilme değişimleriyle ilişkili olması nedeniyle bu bölgelerin deprem tehlikesi altında olduğunu ifade etmişlerdir. Hakkari ve civarındaki deprem tehlikesinin ortaya konmaya çalışıldığı bu çalışmada da bu parametreler analiz edilmiş ve Anadolu & Kalyoncuoğlu (2010)'dan elde edilen sonuçlara benzer değerlendirmeler yapılmıştır.

Akkaya ve ark. (2013), Yüksekova (Hakkari) ve civarının deprem potansiyeli ve tehlike durumunu ortaya koyabilmek için ivme değerleri, depremlerin magnitüd-frekans ilişkisi, oluşma olasılıkları ve geri dönüşüm periyotları gibi sismotektonik parametreleri analiz etmişlerdir. Tamlık magnitüdü $M_c=3.0$ alınarak b -değeri 0.761 ± 0.04 olarak hesaplanmış olup, bu düşük b -değerinin bölgedeki kırıklı yapı ve heterojeniteyle, büyük gerilme ve yamulmayla, büyük deformasyon hızıyla ve büyük faylarla ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir. Magnitüdü 5.0 olan bir deprem için geri dönüşüm periyodu 2 yıl ve 10 yılda olma olasılığı ise %100 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, $M=6.0$ büyüklüğündeki bir depremin 10 yıl içerisinde oluşma olasılığı %78 ve tekrarlama periyodu ise 15 yıl olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular neticesinde ve Yüksekova civarındaki faylarda son dönemlerde büyük depremlerin kaydedilmemiş olması nedeniyle deprem potansiyelinin yüksek olduğu ifade edilmiştir. Mevcut çalışma kapsamında elde edilen bulguların Akkaya ve ark. (2013) tarafından elde edilen sonuçlarla benzer olduğu görülmektedir.

Akkaya (2015), Yüksekova ve civarının yerel zemin özelliklerini araştırmak için HVSR ölçümleri alıp, bölgenin sismotektonik özelliklerini değerlendirmiştir. Bölgedeki önemli tektonik yapılar olarak YŞFZ, Başkale Fay Zonu ve BZBZ, Salmas Fay Zonu ve Main Recent Fault Zonu olarak tanımlamıştır. Bu fay ve fay zonları ile ilişkili olarak bölgede aletsel dönemde meydana gelen önemli/yıkıcı depremleri 1908 Başkale ($M=6.0$), 1930 Salmas-Iran ($M=7.2$), 2005 Hakkari-Sütlüce ($M_w=5.9$) ve 2011 Yüksekova ($M=5.2$) olarak sıralamıştır. Yüksekova bölgesinin genellikle Kuvaterner çökelleri üzerindeki konsolide olmamış killi birimler ile birlikte gevşek-orta derecede çimentolanmış çakıl, kum, siltli birimlerden oluşmasından dolayı, yukarıda bahsedilen fay ve fay zonlarının üreteceği yıkıcı bir depremin önemli ölçüde zarara neden olacağını ifade etmiştir.

Taghipour ve ark. (2018), KB İran'daki aktif doğrultu atımlı fay zonlarının dağılımını incelemişlerdir. YŞFZ'nun doğusunda ve Main Recent Fay Zonunun kuzeyinde bulunan ve 7 alt-segmentten meydana gelen Salmas ve Maragheh Fay Zonlarının genellikle sağ yönlü doğrultu atımlı fay mekanizmasına sahip olduklarını belirtmişlerdir. Diğer taraftan, yaklaşık 4.0 mm/yıl'lık GPS hızı ile Türkiye-İran Plakalarındaki faylanmaya katkı sağladıklarını ifade etmişlerdir. Buna ek olarak, Niassarifard ve ark. (2021), kuzeybatı İran ve güneydoğu Anadolu'nun bölgedeki ana fay zonlarından dolayı tektonik kaçış, blok ötelenmesi ve lokal genişleme gibi farklı tektonik süreçlerin etkisiyle aktif gerilme alanından etkileneceğini belirtmişlerdir.

Öztürk (2015) Hakkari ve civarını içerisine alan Doğu Anadolu bölgesi civarında çoklu parametre kullanımı ile orta vadede beklenen güçlü depremlerin tahmini üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışma kapsamında, G-R ilişkisindeki b -değeri, tamlık magnitüdü M_c -değeri, fraktal boyut D_c -değeri, göreceli yoğunlaşma ve oluşum bilgilerine dayalı analizler gerçekleştirmiştir. Elde edilen

bulgular neticesinde, bu çalışmanın sınırları içerisinde yer alan Yüksekova-Şemdinli Fay Zonu civarında 2014-2024 yılları arasında deprem oluşma olasılığının yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Benzer parametrelerin kullanıldığı fakat yalnızca Hakkari ve civarını içerisine alan ve benzer bir çalışma Öztürk & Alkan (2023b) tarafından gerçekleştirilmiştir. Öztürk & Alkan (2023b), 1958-2022 yılları arasındaki deprem verisini kullanarak yaptıkları analizlerde, tamlık magnitüdünü $M_c=2.5$ almışlar ve $b=0.83\pm 0.05$ olarak hesaplamışlardır. Ayrıca, $M_w=5.0$, 5.5 ve 5.9 büyüklüğündeki depremlerin orta vadede (10 yıl) gerçekleşme olasılıklarını sırasıyla $\sim 68.39\%$, $\sim 35.79\%$ ve $\sim 18.64\%$ olarak, geri dönüşüm periyodlarını ise sırasıyla ~ 9 , ~ 23 ve ~ 48 yıl olarak tahmin etmişlerdir. Ayrıca, Beğendik, Konalga, Hakkari, Yüksekova, Şemdinli ve Çubuklu segmentlerinde düşük b -değerleri, Konalga, Hakkari, Işıklar ve Çubuklu segmentlerinde pozitif gerilme değerleri gözlemlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar dikkate alındığında literatürdeki çalışmalarla da uyumlu olduğu görülmektedir.

5. Sonuç

Bu çalışmada Türkiye'nin doğusunda yer alan Hakkari ili ve civarındaki Güneydoğu Anadolu Bindirme Zonu, Yüksekova-Şemdinli Fay Zonu, Narince Fayı ve Cizre Fayı gibi doğrultu atımlı fay ve ters fay mekanizmalarına sahip tektonik birliklerin gelecek deprem üretme potansiyeli sismotektonik b -değeri, öncü suskunluk Z -değeri, Coulomb gerilme değişimi, deprem oluşma olasılığı ve tekrarlama periyodu gibi sismolojik parametreler ile araştırılmıştır. Aletsel dönem deprenselliği incelendiğinde, bölgede genellikle orta büyüklükte depremler meydana gelmiştir. Son yıllarda büyük/yıkıcı deprem meydana gelmemekle birlikte, en son 2005 yılında Hakkari'de (Sütlüce) $M_w=5.9$ büyüklüğünde bir deprem Yüksekova-Şemdinli Fay Zonu civarında meydana gelmiştir. Bu doğrultuda ilk olarak 36.5°K - 38°K enlem ve 42.0°D - 45°D boylam koordinatları için çalışma bölgesinde meydana gelen depremler seçilmiştir.

Yukarıda bahsedilen sismolojik parametrelerin hesaplanması için 1958-2023 yılları arasında magnitüdüleri $1.0 \leq M_w \leq 6.0$ arasında değişen 3257 sığ deprem seçilerek homojen deprem kataloğu oluşturulmuştur. Coulomb gerilme değişimlerinin hesaplanması için ise 2005 yılı başlangıcı itibari ile büyüklüğü $M_w \geq 4.6$ olan 23 adet sığ depremin odak mekanizması çözümleri kullanılmıştır. Kesme magnitüdü $M_c=2.5$ alınarak elde edilen b -değerleri 0.53 - 1.53 arasında değişmektedir ve ortalaması ~ 0.88 olarak hesaplanmıştır. Düşük b -değerlerinin artan gerilme ile ilişkili olduğu dikkate alındığında, özellikle en düşük b -değerleri Yüksekova, Şemdinli ve Çubuklu segmentleri civarında gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, farklı derinlik değerleri için hesaplanan Coulomb gerilme değişimi haritalarında da Yüksekova-Şemdinli Fay Zonu civarında pozitif gerilme lobları (≥ 1.0 bar) ortaya çıkmıştır. Hesaplanan bu iki sismolojik parametreye ek olarak, herhangi bir anaşok öncesi ilgili bölgedeki sismik aktivitenin düşüşüne karşılık gelen sismik durgunluk değeri (Z -değeri), özellikle Yüksekova-Şemdinli Fay Zonu, Cizre fayı ve Narince segmenti civarının büyük değerlere karşılık geldiği gözlemlenmiştir. Çalışma bölgesinin geçmiş deprenselliği, hesaplanan deprem tekrarlama periyodu ve deprem oluşma olasılıkları dikkate alındığında, 2024 yılı itibari ile orta vadede (~ 10 yıl) magnitüdü $M_w \geq 5.0$ olan bir depremin meydana gelme ihtimalinin oldukça yüksektir ($\geq \sim 45\%$). Sonuç olarak, hesaplanan bu sismotektonik parametreler arasındaki ilişki, Hakkari ve civarındaki deprem gelecek deprem oluşumlarını değerlendirebilmek için önemli katkılar sağlayacak ve dolayısıyla güncel deprem tehlikesi ve potansiyeli için öncül bilgiler sağlayacaktır.

Teşekkür

Bazı şekiller ZMAP (Wiemer, 2001) ve GMT (Wessel ve ark., 2019) kullanılarak oluşturulmuştur. Coulomb gerilme haritaları Coulomb 3.4 (Toda ve ark., 2011) kullanılarak hazırlanmıştır. Tektonik birimler Emre ve ark., (2018)'ten alınmıştır. Deprem kataloğu Tan (2021) ve Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü web sayfasından (KRDAE, www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/), odak mekanizması çözümlerine ait bilgiler ise Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığından (AFAD, www.afad.gov.tr) temin edilmiştir.

Kaynakça

- Abdelfattah, A. K., Jallouli, C., Qaysi, S., & Al-Qadasi, B. (2020). Crustal stress in the Northern Red Sea Region as inferred from seismic b -values, seismic moment release, focal mechanisms, gravity, magnetic, and heat flow data. *Surveys in Geophysics*, *41*, 963-986. <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09602-8>
- AFAD. (2024). Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı, deprem kataloğu. Erişim tarihi: 31.01.2024. <https://deprem.afad.gov.tr/home-page>
- Ahadov, B., & Jin, S. (2019). Effects of Coulomb stress change on $M_w > 6$ earthquakes in the Caucasus region. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, *29*(106326), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2019.106326>
- Akkaya, İ., Şengül, M. A., Özvan, A., & Tapan, M. (2013). Yüksekova (Hakkari) bölgesinin depremselliği ve sismik tehlike analizleri. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, *26*(1), 37-51.
- Akkaya, İ. (2015). The application of HVSR microtremor survey method in Yüksekova (Hakkari) gion, Eastern Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, *109*, 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.05.018>
- Alkan, H., Büyüksaraç, A., Bektaş, Ö., & Işık, E. (2021). Coulomb stress change before and after 24.01.2020 Sivrice (Elazığ) Earthquake ($M_w = 6.8$) on the East Anatolian Fault Zone. *Arabian Journal of Geosciences*, *14*, 2648. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09080-1>
- Alkan, H. (2022). Crustal structure in and around the East Anatolian volcanic belt by using receiver functions stacking. *Journal of African Earth Sciences*, *191*, 104532, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104532>
- Alkan, H., & Bayrak, E. (2022). Coulomb stress changes and magnitude-frequency distribution for Lake Van region. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, *168*(168), 141-156. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.990666>
- Alkan, H., Öztürk, S., & Akkaya, İ. (2023). Seismic hazard implications in and around the Yedisu seismic gap (Eastern Türkiye) based on Coulomb stress changes, b -values, and S-wave velocity. *Pure and Applied Geophysics*, *180*, 3227-3248. <https://doi.org/10.1007/s00024-023-03342-7>
- Anadolu, N. C., & Kalyoncuoğlu, Ü. Y. (2010). Güneydoğu Anadolu bölgesinin depremselliği ve deprem tehlike analizi. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *14*(1), 84-94.
- Bozkurt, E. (2001). Neotectonics of Türkiye-a synthesis. *Geodinamica Acta*, *14*(1-3), 3-30. <https://doi.org/10.1080/09853111.2001.11432432>
- Coban, K. H., & Sayıl, N. (2019). Evaluation of earthquake recurrences with different distribution models in western Anatolia. *Journal of Seismology*, *23*, 1405-1422. <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09876-5>
- Delph, J. R., Biryol, C. B., Beck, S. L., Zandt, G., & Ward, K. M. (2015). Shear wave velocity structure of the Anatolian Plate: anomalously slow crust in southwestern Turkey. *Geophysical Journal International*, *202*(1), 261-276. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv141>
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Şaroğlu, F., Olgun, Ş., Elmacı, H., & Çan, T. (2018). Active fault database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *16*(8), 3229-3275. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0041-2>
- Frohlich, C., & Davis, S. (1993). Teleseismic b -values: Or, much ado about 1.0. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *98*(B1), 631-644. <https://doi.org/10.1029/92JB01891>
- GCMT. (2024). Global Centroid-Moment-Tensor. Erişim tarihi: 31.01.2024. <https://www.globalcmt.org/>
- Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *34*, 185-188. <https://doi.org/10.1785/BSSA0340040185>
- Hirata, T. (1989). Correlation between the b -value and the fractal dimension of earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *94*, 7507-7514. <https://doi.org/10.1029/JB094iB06p07507>
- Irmak, T. S., Doğan, B., & Karakaş, A. (2012). Source mechanism of the 23 October 2011, Van (Turkey) earthquake ($M_w=7.1$) and aftershocks with its tectonic implications. *Earth, Planets and Space*, *64*, 991-1003. <https://doi.org/10.5047/eps.2012.05.002>

- Joseph, J. D. R., Rao, B., Anoop, M.B. (2011). A study on clustered and de-clustered world-wide earthquake data using G-R recurrence law. *International Journal of Earth Science and Engineering*, 4, 178-182.
- Katsumata, K., & Kasahara, M. (1999). Precursory seismic quiescence before the 1994 Kurile earthquake (Mw=8.3) revealed by three independent seismic catalogs. *Pure and Applied Geophysics*, 155, 443-470. <https://doi.org/10.1007/s000240050274>
- Katsumata, K. (2011). A long-term seismic quiescence started 23 years before the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M=9.0). *Earth Planets Space*, 63, 709-712. <https://doi.org/10.5047/eps.2011.06.033>
- King, G. C., 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.
- KOERI. (2024). Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü. Erişim tarihi: 31.01.2024. <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/tr/>
- Liao, B. Y., Huang, H. C., & Xie, S. (2022). The source characteristics of the Mw6.4, 2016 Meinong Taiwan earthquake from teleseismic data using the hybrid homomorphic deconvolution method. *Applied Sciences*, 12(494), 1-13. <https://doi.org/10.3390/app12010494>
- Mogi, K. (1962). Magnitude-frequency relation for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo University*, 40, 831-853.
- Nanjo, K. Z. (2020). Were changes in stress state responsible for the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes? *Nature Communication*, 11 (3082), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16867-5>
- Niassarifard, M., Shabaniyan, E., Azad, S.S., & Madanipour, S. (2021). New tectonic configuration in NW Iran: Intracontinental dextral shear between NW Iran and SE Anatolia. *Tectonophysics*, 811, 228886. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228886>
- Öztürk, S. (2015). Depremselliğin fractal boyutu ve beklenen güçlü depremlerin orta vadede bölgesel olarak tahmini üzerine bir modelleme: Doğu Anadolu Bölgesi, Türkiye. *Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi*, 5(1), 1-23.
- Öztürk, S. (2018). Earthquake hazard potential in the eastern Anatolian region of Turkey: seismotectonic *b* and *Dc*-values and precursory quiescence *Z*-value. *Frontiers of Earth Science*, 12(1), 215–236. <https://doi.org/10.1007/s11707-017-0642-3>
- Öztürk, S. (2020). A study on the variations of recent seismicity in and around the Central Anatolian region of Turkey. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 301 (106453), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106453>
- Öztürk, S., & Alkan, H. (2023a). Multiple parameter analysis for assessing and forecasting earthquake hazards in the Lake Van region, Turkey. *BALTICA*, 36(2), 133-154. <https://doi.org/10.5200/baltica.2023.2.4>
- Öztürk, S., & Alkan, H. (2023b, Mayıs). *Current earthquake hazard in and around the southeastern part of Türkiye: Evaluation of the multiple parameters*. 10th International Mardin Artuklu Scientific Researches Conference, Mardin, Türkiye, 95-105.
- Reasenber, P. (1985). Second-order moment of Central California seismicity, 1969-1982. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B7), 5479-5495. <https://doi.org/10.1029/JB090iB07p05479>
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, ... & Karam, G. (2006). GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111, B05411, 1-26. <https://doi.org/10.1029/2005JB004051>
- Scholz, C. H. (1968). The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58, 399-415. <https://doi.org/10.1785/BSSA0580010399>
- Scholz, C. H. (2015). On the stress dependence of the earthquake *b* value. *Geophysical Research Letters*, 42, 1399-1402. <https://doi.org/10.1002/2014GL028663>
- Schorlemmer, D., Wiemer, S., & Wyss, M. (2005). Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes. *Nature*, 437. <https://doi.org/10.1038/nature04094>

- Sinaga, G. H. D., Silaban, W., & Simanullang, A.F. (2022). Analysis of Coulomb stress of Sumatera earthquake against pyroclastic flow of mount Sinabung as data Prone Volcano disaster. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 13(1), 793-803. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2022.13.1.0086>
- Stein, R. S., King, G. C. P., & Lin, J. (1994). Stress Triggering of the 1994 M = 6.7 Northridge, California, earthquake by its predecessors. *Science*, 265(5177), 1432-1435. <https://doi.org/10.1126/science.265.5177.1432>
- Şengör, A. M. C., & Yılmaz, Y. (1981). Tethyan evolution of Türkiye: a plate Tectonic approach. *Tectonophysics*, 75,181-241. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90275-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90275-4)
- Tabban, A., & Gencoğlu, S. (1975). Earthquake and its parameters. *Bulletin of the Earthquake Research Institute of Turkey*, 11, 7-83.
- Taghipour, K., Khatib, M. M., Heyhat, M., Shabanian, E., & Vaezihir, A. (2018). Evidence for distributed active strike-slip faulting in NW Iran: The Maragheh and Salmas fault zones. *Tectonophysics*, 742, 15-33. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.05.022>
- Tan, O. (2021). A homogeneous earthquake catalogue for Turkey. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(7), 2059-2073. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2059-2021>
- Toda, S., Stein, R. S., & Lin, J. (2011). Widespread seismicity excitation throughout central Japan following the 2011 M=9.0 Tohoku earthquake and its interpretation by Coulomb stress transfer. *Geophysical Research Letters*, 38(7), L00G03, 1-5. <https://doi.org/10.1029/2011GL047834>
- Türkoğlu, E., Unsworth, M., Bulut, F., & Çağlar, İ. (2015). Crustal structure of the North Anatolian and East Anatolian Fault Systems from magnetotelluric data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 241, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2015.01.003>
- USGS. (2024). United States Geological Survey. Erişim tarihi: 31.01.2024. <https://www.usgs.gov/>
- Utsu, T. (1971). Aftershock and earthquake statistic (III): Analyses of the distribution of earthquakes in magnitude, time and space with special consideration to clustering characteristics of earthquake occurrence (1). *Journal of Faculty of Science Hokkaido University Series VII (Geophysics)*, 3(5), 379-441. <http://hdl.handle.net/2115/8688>
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., & Tian, D. (2019). The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 5556-5564. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>
- Wiemer, S., & Wyss, M. (1994). Seismic quiescence before the Landers (M=7.5) and Big Bear (6.5) 1992 earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(3), 900-916.
- Wiemer, S., & Wyss, M. (2000). Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan. *Bulletin Seismological Society of America*, 90(4), 859-869. <https://doi.org/10.1785/0119990114>
- Wiemer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(2), 373-382. <https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373>
- Wu, Y. M., & Chiao, Y. L. (2006). Seismic quiescence before the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Mw7.6 earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96 (1), 321-327. <https://doi.org/10.1785/0120050069>
- Wyss, M., & Habermann, R. E. (1988). Precursory seismic quiescence. *Pure and Applied Geophysics*, 126(2-4), 319-332. <https://doi.org/10.1007/BF00879001>
- Wyss, M., & Martirosyan, A. H. (1998). Seismic quiescence before the M7, 1988, Spitak earthquake, Armenia. *Geophysical Journal International*, 134(2), 329-340. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1998.00543.x>
- Yadav, R. B. S., Gahalaut, V. K., Chopra, S., Bin, S. (2012). Tectonic implications and seismicity triggering during the 2008 Baluchistan, Pakistan earthquake sequence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 45, 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.10.003>
- Yaghmaei-Sabegh, S., & Ostadi-Asl, G. (2021). Estimating of the b-value based on the characteristic earthquake model. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 15(03), 2150015. <https://doi.org/10.1142/S1793431121500159>