



A Statistical Analysis and Evaluation on the Earthquake Forecasting and Hazard for Lake Van and its adjacent area (Türkiye)

Serkan Ozturk¹ and Hamdi Alkan²

¹ Gumushane University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Geophysics, Baglarbasi 29100 Gumushane, Türkiye

² Van Yuzuncu Yil University, Faculty of Engineering, Department of Geophysics, Tusba 65080 Van, Türkiye
ORCID: 0000-0003-1322-5164, 0000-0003-3912-7503

Keywords

Lake Van, *b*-value, Z-value, Combined forecast method, Earthquake hazard

Highlights

* Lake Van and its adjacent area, seismicity
* *b*-value, Z-value, RI model, PI model, hotspot region
* Combined earthquake forecasting in the intermediate term and hazard analysis

Aim

Make a statistical evaluation of the earthquake forecasting and hazard for Lake Van and its adjacent area

Location

Lake Van and its adjacent area

Methods

Gutenberg-Richter Relation, Standard Normal Deviate, Relative Intensity, Pattern Informatics, Combined Forecast Method

Results

In this study, the current earthquake hazard is tried to present at the beginning of 2020 and earthquake forecasting is made for the next five years between 2022 and 2027 for Lake Van and its adjacent area, Türkiye

Supporting Institutions

--

Financial Disclosure

The author declares that this study has received no financial support

Peer-review

Externally peer-reviewed

Conflict of Interest

The author has no conflicts of interest to declare

Manuscript

Research Article

Received: 25.04.2022

Revised: 05.08.2022

Accepted: 13.10.2022

Printed: 30.12.2022

DOI

10.46464/tdad.1108730



Content of this journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International Non-Commercial License

Corresponding Author

Serkan Ozturk

Email: serkanozturk@gumushane.edu.tr

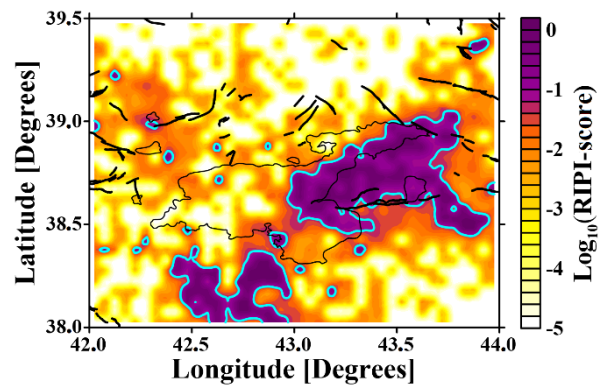


Figure
Forecast map with the combined method (RIPI) for the future 5-years between 2022 and 2027

How to cite:

Ozturk S., Alkan H., 2022. A Statistical Analysis and Evaluation on the Earthquake Forecasting and Hazard for Lake Van and its adjacent area (Türkiye), Turk Deprem Arastirma Dergisi 4(2), 191-209, <https://doi.org/10.46464/tdad.1108730>



Van Gölü ve Civarı (Türkiye) İçin Deprem Tahmini ve Tehlikesi Üzerine İstatistiksel Bir Analiz ve Değerlendirme

Serkan Öztürk¹ ve Hamdi Alkan²

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

² *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Tuşba 65080 Van, Türkiye*
ORCID: 0000-0003-1322-5164, 0000-0003-3912-7503

ÖZET

Bu çalışmada, Van Gölü ve civarı için güncel deprem tehlikesi ortaya konmaya çalışılmış ve gelecek beş yıl için deprem tahmini yapılmıştır. Bu amaçla, *b*-değeri, *Z*-değeri, göreceli yoğunluk (RI) ve oluşum bilgisi (PI) verilerinin birlikte kullanımı ile istatistiksel bir analiz gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, orta vadede deprem tahmini ve tehlikesi için literatürdeki farklı sismolojik ve jeofiziksel değişkenleri analiz eden çalışmalarla detaylı bir tartışma yapılmıştır. Bu parametreler arasındaki ilişkiler daha doğru ve güvenilir yaklaşımlar ortaya koymuştur. Sonuç olarak, 2022 yılı başında, özellikle düşük *b*-değeri ve yüksek *Z*-değerine sahip bölgelerle birleştirilmiş tahmin haritasında 2022-2027 yılları arasındaki sıcak noktalar (olası deprem bölgeleri) Çaldıran, Yeniköşk, Erciş ve Malazgirt fayları ile Saray ve Van Fay zonlarını içeren Muradiye, Çaldıran, Özalp, Van şehir merkezi ve Gevaş civarında tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler

Van Gölü, *b*-değeri, *Z*-değeri, Birleşik tahmin yöntemi, Deprem tehlikesi

Öne Çıkanlar

- * Van Gölü ve civarı, deprensellik.
- * *b*-değeri, *Z*-değeri, RI modeli, PI modeli, sıcak nokta.
- * Orta vadede birleştirilmiş deprem tahmini ve tehlike analizi.

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 25.04.2022

Düzeltilme: 05.08.2022

Kabul: 13.10.2022

Basım: 30.12.2022

DOI

10.46464/tdad.1108730

Sorumlu yazar

Serkan Öztürk

Eposta:

serkanozturk@gumushane.edu.tr

A Statistical Analysis and Evaluation on the Earthquake Forecasting and Hazard for Lake Van and its adjacent area (Türkiye)

Serkan Ozturk¹ and Hamdi Alkan²

¹ *Gumushane University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Geophysics, Baglarbasi 29100 Gumushane, Türkiye*

² *Van Yuzuncu Yil University, Faculty of Engineering, Department of Geophysics, Tusba 65080 Van, Türkiye*
ORCID: 0000-0003-1322-5164, 0000-0003-3912-7503

ABSTRACT

In this study, current earthquake hazard is tried to present and earthquake forecasting is made for Lake Van and its adjacent area for the next five years. For this purpose, a statistical analysis is achieved with the concomitant use of the *b*-value, *Z*-value, relative intensity (RI) and pattern informatics (PI) data. In addition, for the earthquake forecasting in the intermediate term and hazard, a comprehensive discussion is made with the studies analyzing the different seismological and geophysical variables in literature. The relations between these parameters reveal more accurate and reliable approaches. Consequently, at the beginning of 2022, particularly the areas having small *b*-value and large *Z*-value with the hotspots (possible earthquake areas) between 2022 and 2027 from the combined forecast map are determined in and around Muradiye, Çaldıran, Özalp, Van city centre and Gevaş including Çaldıran, Yeniköşk, Erciş and Malazgirt faults with Saray and Van Fault zones.

Keywords

Lake Van, *b*-value, *Z*-value, Combined forecast method, Earthquake hazard

Highlights

- * Lake Van and its adjacent area, seismicity.
- * *b*-value, *Z*-value, RI model, PI model, hotspot region.
- * Combined earthquake forecasting in the intermediate term and hazard analysis.

Manuscript

Research Article

Received: 25.04.2022

Revised: 05.08.2022

Accepted: 13.10.2022

Printed: 30.12.2022

DOI

10.46464/tdad.1108730

Corresponding Author

Serkan Ozturk

Email:

serkanozturk@gumushane.edu.tr

1. GİRİŞ

Depremlerin bölge-zaman oluşumları rastgele değildir ve çoğu zaman bir öncü veya belirti vermeden meydana gelir. Bu da depremleri en tehlikeli ve en yıkıcı doğal afetlerden biri yapar. Dolayısıyla depremlerin tahmini istatistiksel bir tabana oturtulabilirse deprem oluşumlarının istatistiksel karakterleri, gelecekteki olası depremlerin tahmininde oldukça önemli hale gelir. Deprem tahmin yöntemleri genellikle iki sınıfta toplanabilir: birinci yaklaşım öncü değişimlerin deneysel ölçümlerini dikkate alırken, ikinci yaklaşım sismik aktivitenin istatistiksel oluşumunu kullanır (Holliday ve diğ. 2007). Buna bağlı olarak Türkiye ve Dünya'nın farklı deprem bölgeleri için deprem oluşumlarının bölge-zaman analizlerini ve deprem tahmini çalışmalarını kapsayan farklı birçok fiziksel model, ölçek yasaları, parametreler, gözlemler ve yaklaşımları kullanan çok sayıda çalışma mevcuttur (Varatos ve Alexopoulos 1984, Keilis-Borok 1996, Tiampo ve diğ. 2002, Polat ve diğ. 2008, Utkucu ve diğ. 2013, Ozturk 2020, Ozer ve diğ. 2022).

Deprem istatistiği çalışmalarında en iyi bilinen ve en sık kullanılan parametrelerden birisi deprem dağılımlarının magnitüd-frekans ilişkisini ortaya koyan Gutenberg-Richter (G-R) ilişkisidir (Gutenberg ve Richter 1944). G-R ilişkisindeki b -değeri, yalnızca küçük ve büyük depremlerin göreceli oranlarını yansıtmaz, bununla birlikte gerilmenin bölge-zaman-derinlik değişimleri ve bölgenin sismojenik özellikleriyle de ilişkilidir. Dolayısıyla, depremlerin oluşum sayıları ile sismik moment, enerji veya fay uzunluğu arasındaki ilişki b -değerinin analizi ile açıklanabilir. Dünyanın farklı sismotektonik bölgeleri için G-R ilişkisini kullanan birçok çalışma mevcuttur (Enescu ve Ito 2002, Scholz 2015) ve bu çalışmalardan elde edilen bulgular deprem dağılımlarının fraktal özelliklerinin gelecek deprem oluşumları ve sismojenik gerilme durumuyla ilişkili olabileceğini ortaya koymaktadır.

Deprem davranışları üzerine diğer önemli bir istatistik, depremin öncüsü veya işaretçisi olarak depremsellik oranının anormal bölge-zaman değişimlerinin incelenmesini kapsar. Öncü sismik durgunluk varsayımı, bir deprem bölgesindeki mevcut deprem aktivite oranına kıyasla ortalama depremsellikteki önemli bir azalış olarak tanımlanabilir (Wiemer ve Wyss 1994). Ana şoktan önceki öncü sismik durgunluk olgusu üzerine çok sayıda çalışma mevcuttur (Console ve diğ. 2000, Ozturk 2011; 2020, Derode ve diğ. 2021). Bu çalışmalardan elde edilen genel bulgular ise, deprem odak bölgesi ve civarında ana şoktan önceki birkaç yıl içerisinde deprem aktivitesinde önemli bir azalışın gözlenmiş olmasıdır.

G-R ilişkisi ve öncü sismik durgunluk analizlerine ek olarak, deprem tahmini için alternatif bir yaklaşım sunulmuştur (Rundle ve diğ. 2002, Tiampo ve diğ. 2002). Bu yaklaşım, Oluşum Bilgisi (Pattern Informatics, PI) olarak adlandırılır ve depremselliğin güçlü bölge-zaman ilişkisine dayandırılır. Bu tahmin yöntemi öncü sismik aktivite veya durgunluğu tanımlamak için kullanılabilir ve elde edilen sonuçlar, depremlerin gelecek bir zaman aralığında, genellikle 5-10 yıl içerisinde, meydana gelebileceği sismojenik bir alanı ortaya koyabilir (Holliday ve diğ. 2006). PI yönteminden elde edilen bulgular özellikle Göreceli Yoğunluk (Relative Intensity, RI) analizinden elde edilen verilerle birlikte değerlendirildiğinde önemli sonuçlar ortaya çıkar. RI yöntemi, deprem tahmini için diğer bir alternatif yöntemdir ve orta büyüklükteki geniş deprem aktivite bölgelerini ortaya koyabilir. Sonuçta bu tahminler, çoğu orta büyüklükte ve yakın geçmişte olmuş depremlerin gelecekteki olası depremlerin meydana gelebileceği yerleri ortaya koyabileceği hipotezine dayalıdır (Holliday ve diğ. 2005; 2006).

Türkiye, sismotektonik açıdan dünyanın en önemli bölgelerinden bir tanesidir ve dolayısıyla, depremlerin istatistiksel davranışları ve deprem tehlikesi üzerine bölgede çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Doğu Anadolu Bölgesi (DAB), orta ve uzun vadede güçlü ve yıkıcı deprem oluşumları açısından Türkiye'nin en aktif bölgelerinden biridir (Biro ve diğ. 2020, Bayrak ve diğ. 2021). Özellikle, Van ve civarında aletsel dönemde, 29 Nisan 1903 Malazgirt ($M_s=6.7$, yüzey dalgası magnitüdü), 10 Eylül 1941 ($M_s=5.9$), 26 Şubat 1960 Başkale-Van ($M_s=5.8$), 24 Kasım 1976 Muradiye-Van ($M_s=7.5$), 25 Haziran 1988 Van Gölü ($M_s=5.3$), 15 Kasım 2000 Gevaş-

Van ($M_s=5.0$), 23 Ekim 2011 Van ($M_s=7.2$), 24 Haziran 2012 Karagündüz-Van ($M_s=5.0$) ve 6 Aralık 2021 Van Gölü ($M_s=5.0$) depremleri gibi güçlü ve yıkıcı depremler meydana gelmiştir (KRDAE-BDTİM, 2022). Van Gölü ve civarı için farklı içerikte birçok çalışma mevcut olmasına rağmen, bu tür değerlendirmeler ve gelecekteki olası depremlerin tahmini üzerine çalışmaların sayısı oldukça azdır. Dolayısıyla bu çalışmanın amacı, 2022 başlangıcı itibarıyla Van Gölü ve civarındaki deprem aktivitesinin bölge-zaman değerlendirmesini yaparak deprem tahmini ve tehlikesi için farklı bir bakış açısı sunmaktır. Bu amaçla, G-R ilişkisindeki b -değeri, standart normal sapma (öncü sismik durgunluk) Z -değeri üzerine detaylı istatistiksel analizler yapılmış, PI ve RI algoritmaları ile bunların birleşiminin (RIPI) bu bölgedeki güçlü/büyük depremlerin tahmini için kullanılabilirliği ilk olarak test edilmiştir. Ayrıca, orta vadede deprem tahmini için daha güvenilir ve daha doğru yorumlar yapabilmek amacıyla farklı sismolojik ve jeofiziksel değişkenleri içeren çalışmalarla detaylı bir tartışma yapılmıştır. Böylece, Van Gölü ve civarı için gelecekte beklenebilecek depremlerin zaman ve bölge oluşumlarının istatistiksel bir değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

2. İSTATİSTİKSEL YÖNTEMLER

Van Gölü ve civarı için deprem tahmini ve tehlikesi üzerine yapılan istatistiksel değerlendirmeler, G-R ilişkisindeki b -değeri ve ilişkili olarak tamlık magnitudü M_c -değeri, standart normal sapma Z -değeri (sismik durgunluk), göreceli yoğunluk (RI) ve oluşum bilgisi (PI) gibi sismotektonik parametrelerin bölge-zaman değişimlerinin analizi ile gerçekleştirilmiştir.

2.1) Gutenberg-Richter İlişkisi ve Magnitud-Deprem Sayısı Analizi (b -değeri)

Deprem oluşumlarının magnitud-frekans ilişkisi Gutenberg-Richter (1944) tarafından bir ölçek yasası ile verilmiştir. Deprem istatistiğinin bu temel bağıntısı 1 numaralı denklemle verilir:

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

Burada $N(M)$, magnitudü M 'ye eşit veya daha büyük olan depremlerin belirli bir zaman aralığındaki kümülatif sayısı, a ve b -değerleri pozitif katsayıdır. b -değeri magnitud-frekans dağılımının eğiminden hesaplanırken, a -değeri sismik aktivite oranı ile ilişkilidir. a -değeri farklı bölgeler için önemli değişimler gösterir ve bu değişimler çalışma alanının boyutuna, kataloğun süresine ve deprem sayısına bağlıdır. b -değeri dünyanın farklı sismotektonik bölgeleri için 0.3-2.0 arasında değişim gösterir (Utsu 1971) ve ortalama b -değeri 1.0 civarındadır (Frohlich ve Davis 1993). Tektonik özellikler, anizotropik yapı ve gerilme değişimleri gibi birçok faktör b -değerindeki değişimleri etkiler. Ayrıca, jeolojik yapı, çatlak yoğunluğu, termal gradyan, malzeme özellikleri, fay uzunluğu, sismik dalga hızlarındaki değişimler ve soğurulma, deformasyon koşulları ve atım dağılımı gibi birçok özellik b -değeri üzerinde etkilidir (Scholz 2015).

Özellikle b -değeri tahmininde ve sismik durgunluk hesaplamalarında kaliteli ve güvenilir istatistiksel sonuçlar için tamlık magnitudü, M_c -değeri, önemli parametrelerden bir tanesidir ve bu tür tahminler analizlerin ilk aşaması olarak düşünülmelidir. M_c -değeri tam bir veri setinin minimum magnitudü olarak tanımlanır ve depremlerin magnitud-frekans bağıntısından tahmin edilebilir (Wiemer ve Wyss 2000). M_c -değerinin zamanla değişimi istatistiksel sonuçları etkiler ve dolayısıyla doğru tahminler için maksimum deprem sayısının kullanılması hedeflenir. Sonuçta, bu çalışma kapsamında, zamanla M_c -değerindeki değişimlerin analizi ilk adım olarak gerçekleştirilmiştir. Çünkü bu değer, b -değeri, sismik durgunluk, RI, PI ve birleştirilmiş tahmin haritalarının hazırlanması için kullanılmıştır.

2.2) Standart Normal Sapma ve Öncü Sismik Durgunluk (Z-değeri)

Sismik durgunluk hipotezi ilkez Wyss ve Haberman (1988) tarafından önerilmiştir ve sismojenik bir zonda meydana gelen deprem aktivitesindeki önemli bir azalma öncü durgunluk olarak tanımlanmıştır (Wiemer ve Wyss 1994). Depremsellik oran değişimlerini tanımlayan birçok farklı yöntem mevcuttur ve bu uygulamaların çoğu ana şoklardan önceki sismik durgunluğun bölge-zaman modellemesini kullanır. Bu tür değerlendirmeler içerisinde en yaygın uygulamalardan biri standart normal sapma Z-değeri olarak verilir ve ZMAP yazılımında (Wiemer 2001) verilen yöntem Wiemer ve Wyss (1994) tarafından tanımlanır. Standart normal sapma Z-testi, standart sapma birimindeki güven seviyesinin istatistiksel değerlendirmesi için Uzun Vadeli Ortalama LTA(t) fonksiyonunu kullanır:

$$Z(t) = \frac{R_1 - R_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (2)$$

Denklem 2'de R_1 ; tüm zaman penceresindeki ortalama depremsellik oranı (deprem sayısı), R_2 ; düşünülen zaman penceresindeki ortalama aktivite oranı, σ_1 ; R_1 zaman penceresindeki sismik yoğunluk fonksiyonunun standart sapması, σ_2 ; R_2 zaman penceresindeki sismik yoğunluk fonksiyonunun standart sapması, n_1 ; R_1 zaman diliminde ölçülen depremsellik oranındaki örneklerin sayısı ve n_2 ; R_2 zaman diliminde ölçülen depremsellik oranındaki örneklerin sayısı ile ilişkilidir. Z-değeri zamanın bir fonksiyonu olarak tahmin edilir ve tüm zaman penceresinin kataloğun periyodu boyunca kaymasını sağlar.

2.3) Göreceli Yoğunluk (RI) ve Oluşum Bilgisi (PI)

Deprem tahmini için alternatif bir yaklaşım, geçmişteki küçük deprem oluşum oranlarının kullanılmasını ve yüksek sismik aktivite veya durgunluk gösteren bölgelerin dikkate alınmasını kapsar. Bu bölgeler gelecekte olması muhtemel büyük depremlerin beklendiği yerlerdir (Holliday ve diğ. 2007). Bu yöntemler aslında deprem kestirimi yapmaz fakat depremlerin gelecek 5-10 yıllık içerisinde meydana gelmesi muhtemel sismojenik bölgeleri (sıcak noktalar) tahmin eder. RI ve PI yöntemleri birçok çalışmada bulunabilir ve RI tahmin yöntemi beş adımda açıklanabilir (Nanjo ve diğ. 2006a; b, Holliday ve diğ. 2005; 2006; 2007):

- i. Çalışma alanı doğrusal bir Δx grid aralığına bölünür.
- ii. j grid aralığındaki küçük bir M_c -değerinden büyük veya ona eşit bir M magnitüdü depremlerin sayısı t_s , t_E (sırasıyla kataloğun başlangıç ve bitiş zamanları) zaman aralığı için hesaplanır. Bu sayı $n_j(t_s, t_E)$ olarak tanımlanan gün başına düşen sayıyı hesaplamak için kullanılan ortalamadır.
- iii. Bu sayının göreceli değeri RI-değeridir. Bu değer $n_j(t_s, t_E)/n_{\max}$ formunda verilir. Burada n_{\max} , $n_j(t_s, t_E)$ 'nin en yüksek değeridir ve RI-değeri 0-1 arasında değişim gösterir.
- iv. Başlangıç bir w -değeri için 0-1 aralığı ($0 \leq w \leq 1$) dikkate alınırsa, gelecek büyük depremlerin yalnızca w değerinden daha büyük RI-değerine sahip grid içerisinde olması beklenir. Başlangıçtaki w -değerinden daha küçük RI-değerine sahip gridler, gelecek büyük deprem oluşumlarının beklenmediği alanlardır.
- v. Sonuçta, RI tahmin çerçevesine göre, büyük olayların daha yüksek deprem aktivitesine sahip bölgelerde olması beklenir.

PI yöntemi ise on iki adımda verilebilir (Nanjo ve diğ. 2006b):

- i. RI tahmininde olduğu gibi, çalışma alanı doğrusal bir Δx grid aralığına bölünür.
- ii. t_0 ile tanımlanan alandan itibaren $M \geq M_c$ olan bölgedeki tüm olaylar hesaplamaya katılır.

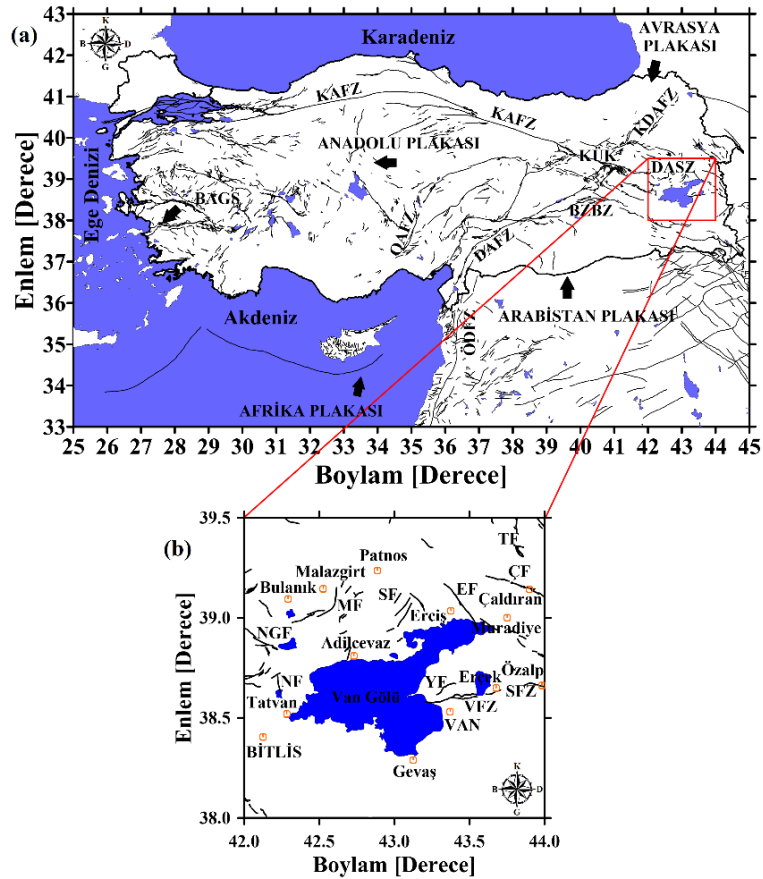
- iii. Üç referans zaman aralığı dikkat alınır:
- t_b-t_1 arasındaki bir referans zaman aralığı.
 - t_b-t_2 ($t_2 > t_1$) arasındaki ikinci bir zaman aralığı. Dolayısıyla, sismik aktivite değişimlerinin hesaplandığı değişim periyodu t_1-t_2 aralığında değişir. t_b zamanı t_0-t_1 aralığında seçilir. Burada amaç, t_b ile t_1 referans aralığına kıyasla t_1-t_2 arasındaki değişim periyodu içerisinde anormal sismik aktivite değişimlerini hesaplamaktır.
 - t_2-t_3 arasındaki tahmin zamanı tahminin geçerli olduğu aralıktır. Değişim ve tahmin aralıkları aynı uzunlukta olmalıdır.
- iv. Bir zaman periyodu için bir grid içerisindeki deprem yoğunluğu, zaman periyodu boyunca oluşan $M \geq M_c$ olan bir depremin ortalama sayısıdır. Referans periyodu t_b-t_1 üzerindeki j gridinin deprem yoğunluğu $n_j(t_b, t_1)$, t_b-t_1 arasındaki ortalama deprem sayısıdır. t_b-t_2 periyodu üzerindeki j gridinin deprem yoğunluğu $n_j(t_b, t_2)$, t_b-t_2 arasındaki ortalama deprem sayısıdır.
- v. İki farklı zaman periyodundaki deprem yoğunluklarını kıyaslamak için benzer istatistiksel özelliklere sahip olmaları gerekir. Dolayısıyla, deprem yoğunlukları, tüm grid bölgelerini ortalama deprem aktivitesinden çıkarılarak ve tüm grid bölgelerindeki deprem aktivitesinin standart sapmasına bölünerek standart hale getirilir (normalize edilir). Bu standart hale getirilmiş yoğunluklar $n_j^*(t_b, t_1)$ ve $n_j^*(t_b, t_2)$ olarak tanımlanır.
- vi. j gridi içerisindeki anormal depremsellik ölçümü, standart hale getirilmiş iki deprem yoğunluğu arasındaki farktır, $\Delta n_j^*(t_b, t_1, t_2) = n_j^*(t_b, t_2) - n_j^*(t_b, t_1)$.
- vii. Deprem aktivitesindeki rastgele dalgalanmaların göreceli önemini azaltmak için, ortalama değişim $\Delta n_j^*(t_b, t_1, t_2)$, $t_0 - t_1$ arasındaki tüm olası başlangıç zamanları t_b üzerinde hesaplanır ve sonuç $\Delta n_j^*(t_0, t_1, t_2)$ olarak verilir.
- viii. j gridi içerisindeki gelecek depremin olasılığı $P_j(t_0, t_1, t_2)$, ortalama yoğunluk değişiminin karesi olarak tanımlanır, $P_j(t_0, t_1, t_2) = \{\Delta n_j^*(t_0, t_1, t_2)\}^2$.
- ix. Değişim bölgelerini tanımlayabilmek için geçmiş aktiviteye kıyasla $P_j(t_0, t_1, t_2)$ olasılığındaki değişimin hesaplanması gerekir, yani ortalama olasılık tüm grid bölgeleri üzerinden çıkarılır $\langle P_j(t_0, t_1, t_2) \rangle$. Olasılıktaki bu değişim $P_j'(t_0, t_1, t_2) = P_j(t_0, t_1, t_2) - \langle P_j(t_0, t_1, t_2) \rangle$ şeklinde tanımlanır.
- x. Olasılıktaki değişimin göreceli değeri PI-değeridir. Bu değer $P_j'(t_0, t_1, t_2)/P_{\max}$ formunda verilir. Burada P_{\max} , $P_j'(t_0, t_1, t_2)$ 'nin en büyük değeridir. Geçmiş aktiviteye kıyasla deprem aktivitesi veya durgunluğu ile ilgilenildiği için eğer gridler sıfırdan küçük PI-değerine sahipse bu değerler sıfır olarak kabul edilir. Dolayısıyla PI-değeri 0-1 arasında hesaplanır.
- xi. Eğer başlangıç w -değeri için 0-1 aralığı dikkate alınırsa gelecek büyük depremler bu w -değerinden daha büyük PI-değerlerinin olduğu gridlerde beklenir. Başlangıç w -değerinden daha küçük PI-değerine sahip gridler, gelecek büyük deprem oluşumlarının beklenmediği bölgelerdir.
- xii. Sonuçta, PI tahmin çerçevesine göre, büyük olayların daha yüksek deprem aktivitesine veya durgunluğa sahip bölgelerde olması beklenir.

PI uygulamasından elde edilen sonuçlar beklenen depremin olası yerini verir ve PI ile RI değerleri bir tahmin haritası oluşturmak için birleştirilir. Bu tahmin haritası gelecek 5-10 yıllık zaman aralığında olasılık için tekrar standart hale getirilir. Yöntemin uygulaması üç adımda açıklanabilir (Holliday ve diğ. 2007):

- İlk adımda, tüm bölgeler için göreceli bir yoğunluk haritası hazırlanır ve 10^{-1} 'den büyük göreceli değerler 10^{-1} olarak, 10^{-4} 'ten daha küçük sıfır olmayan değerler ise 10^{-4} olarak tanımlanır. Son adımda ise, sıfır deprem geçmişine sahip her bir gride 10^{-5} değeri atanır.
- PI hesabı, çalışma alanının çoğunlukla aktif bölgesinin %10'un üzerinde gerçekleştirilir. Hesaplamalar için t_0 , t_1 , ve t_2 zamanları tanımlanır. Gelecek depremlerin sıcak noktalarda olması beklendiği için bu depremler birim olasılık değeri içerisinde verilir.
- Son adımda, RI haritası üzerinde PI haritası ve onun Moore civarı (piksel + sekiz komşu bölge) üst üste getirilerek birleştirilmiş tahmin haritası elde edilir. Tüm sıcak nokta pikselleri (deprem beklenen bölgeler) 1 olasılığına sahipken diğer tüm pikseller 10^{-1} - 10^{-5} arasında olasılıklara sahiptir.

3. ÇALIŞMA ALANININ TEKTONİK YAPISI ve DEPREM VERİSİ

Doğu Anadolu Bölgesi, Alp-Himalaya orojenik sisteminde oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir ve güneyde Arabistan plakası ile kuzeydeki Avrasya plakası arasındaki aktif çarpışma zonundan oldukça etkilenir. Bu ana plakaların K-G yönlü basınç tektonik rejimleri ~13 milyon yıl önce başlamıştır ve halen devam etmektedir. Bu gerilme tektoniği, sağ yönlü doğrultu atımlı fay olan Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ve sol yönlü doğrultu atımlı fay olan Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) olarak tanımlanan iki büyük transform fay boyunca Anadolu Plakasından saat yönünün tersine ve batıya doğru bir kaçışına neden olur. Bu iki fay zonu Karlıova Üçlü Kesişim (KÜK) noktasında birleşir ve bu basınç rejimi bölgede farklı birçok fay ve fay segmentine neden olur (Şekil 1a). Van Gölü bölgesi KÜK noktasının güneydoğusunda (~125 km) ve Bitlis Zagros Bindirme Zonunun (BZBZ) kuzeyinde (~100 km) bulunur (Bozkurt 2001, Keskin 2003, Reilinger ve diğ. 2006, Alkan ve diğ. 2020). Van Gölü güncel olarak üç derin havzadan (Kuzey, Tatvan ve Deveboynu havzaları) ve taban sırtından (Kuzey ve Ahlat) oluşur ve genel olarak K-G uzanımlı oblik faylar ile karakterize edilir (Cukur ve diğ. 2017). Ayrıca, Türkiye ve civarındaki tektonik yapı genel hatlarıyla Şekil 1a'da verilmiştir. Türkiye ve civarı için diğer tektonik yapılar genel hatlarıyla Batı Anadolu Graben Sistemi (BAGS), Orta Anadolu Fay Zonu (OAFZ), Ölü Deniz Fay Zonu (ÖDFZ), Kuzeydoğu Anadolu Fay Zonu (KDAFZ) ve Doğu Anadolu Sıkıştırma Zonu (DASZ) olarak verilebilir.

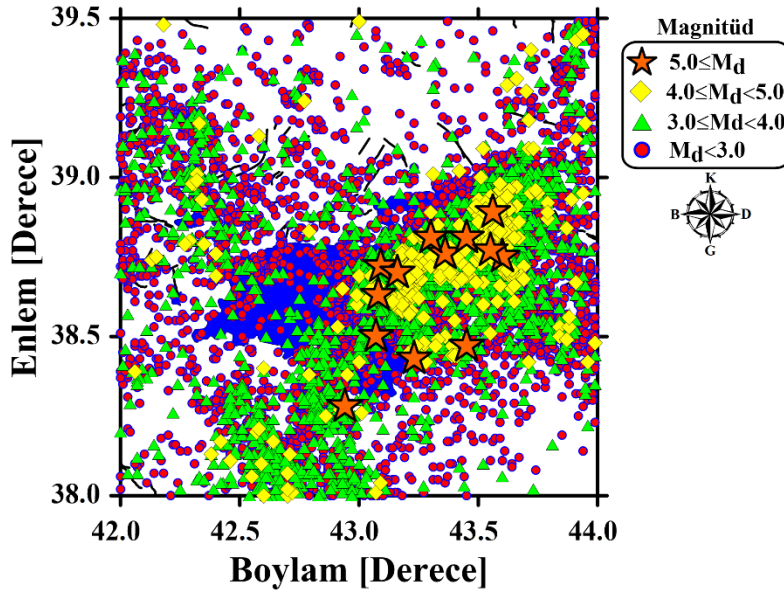


Şekil 1: a) Türkiye ve civarındaki ana tektonik yapılar (Bozkurt 2001 ve Emre ve diğ. 2018'den değiştirilerek alınmıştır.) (Geniş oklar plaka hareket yönlerini göstermektedir. Çalışma alanı kırmızı dikdörtgen içerisinde verilmiştir.), b) Van Gölü ve civarındaki aktif tektonik faylar (Emre ve diğ. 2018'den değiştirilerek alınmıştır.) (Fay isimleri metin içerisinde tanımlanmıştır. Kahverengi daireler yerleşim merkezlerini göstermektedir.)

Figure 1: a) Main tectonic structures in and around Türkiye (modified from Bozkurt 2001; Emre et al. 2018) (Large arrows indicate the direction of plate movements. The study area is given in red rectangular.), b) Active tectonic faults in Lake Van and its adjacent areas (modified from Emre et al. 2018.) (Names of faults are defined in the text. Brown circles show the settlements.)

Van Gölü ve civarındaki aktif faylar ve fay zonları Emre ve diğ. (2018) tarafından yapılan çalışmada detaylı olarak tanımlanmış olup Şekil 1b'de gösterilmiştir. Çalışma bölgesi ve civarındaki ana tektonik yapılar Erciş Fayı (EF), Çaldıran Fayı (ÇF), Süphan Fayı (SF), Nemrut Fayı (NF), Nazik Gölü Fayı (NGF), Malazgirt Fayı (MF), Yeniköşk Fayı (YF), Saray Fay Zonu (SFZ) ve Van Fay Zonu (VFZ) olarak verilebilir. EF, ÇF, NGF ve SFZ sağ yönlü doğrultu atımlı faylar iken, SF ve MF ana sol yönlü doğrultu atımlı fay karakteristiğine sahiptir. Bununla birlikte, YF ve VFZ D-B uzanımlı ters fay veya bindirme fayı iken, NF ve Tendürek Fayı (TF) gibi genişleme çatlakları normal faylanma mekanizması gösterirler.

Bu çalışma kapsamında kullanılan deprem verisinin 1970-2006 yılları arasındaki kısmı Öztürk (2009)'tan alınmıştır (detaylar için Bayrak ve diğ. 2009). Bu katalog süre magnitudü M_d için homojendir ve 1970-2006 yılları arasında 392 deprem mevcuttur. Bu kataloğa ek olarak 2006-2022 yılları arasındaki deprem verisi KRDAE-BDTİM (2022) web sayfasından derlenmiştir ve bu zaman aralığında 13786 depremi içermektedir. Çalışma alanını kapsayan DAB için sismojenik derinlik 40-45 km arasında tanımlandığı için (Alkan ve diğ. 2020) istatistiksel analizler için sığ depremler (derinlik <70 km) kullanılmıştır. Sonuç olarak, 28 Kasım 1970 ile 31 Aralık 2021 arasında yaklaşık 51.09 yıllık bir zaman diliminde magnitudleri $1.0 \leq M_d \leq 6.6$ arasında değişen 14178 depremi içeren bir katalog oluşturulmuştur. Depremlerin episantır dağılımı Şekil 2'de verilmiştir.

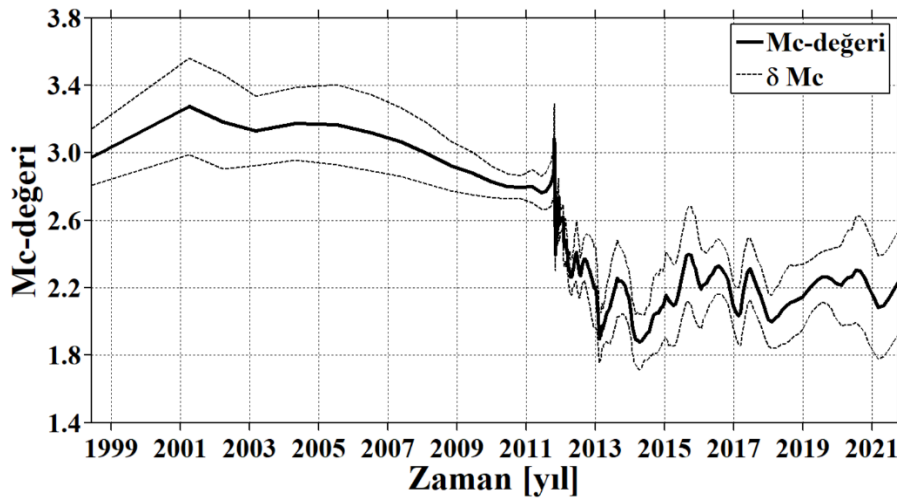


Şekil 2: Van Gölü ve civarı için 1970-2022 yılları arasında $M_d \geq 1.0$ olan 14178 sığ depremin (Öztürk 2009, KRDAE-BDTİM, 2022) episantır dağılımı (Deprem büyüklükleri farklı sembollerle çizilmiştir.)
Figure 2: Epicenter distributions of 14178 shallow earthquakes with $M_d \geq 1.0$ between 1970 and 2022 for Lake Van and its adjacent areas (The earthquake magnitudes are drawn with different symbols.)

4. BULGULAR

Bu çalışma kapsamında, son yıllarda deprem oluşumları açısından Türkiye'nin en aktif alanlarında biri olan ve çok sayıda orta büyüklükte ve güçlü/yıkıcı depremlerin meydana geldiği Van Gölü ve civarı için deprem tahmini ve tehlikesi üzerine istatistiksel bir analiz ve değerlendirme yapılmıştır. Bu amaçla, G-R ilişkisindeki b -değeri, öncü sismik durgunluk Z -değeri, göreceli yoğunluk, oluşum bilgisi ve birleşik tahmin modeli gibi çoklu parametreler değerlendirilerek 2022 başlangıcı için tehlike analizi ve 2022-2027 yılları arası içinde deprem tahminine yönelik bölge-zaman analizleri gerçekleştirilmiştir.

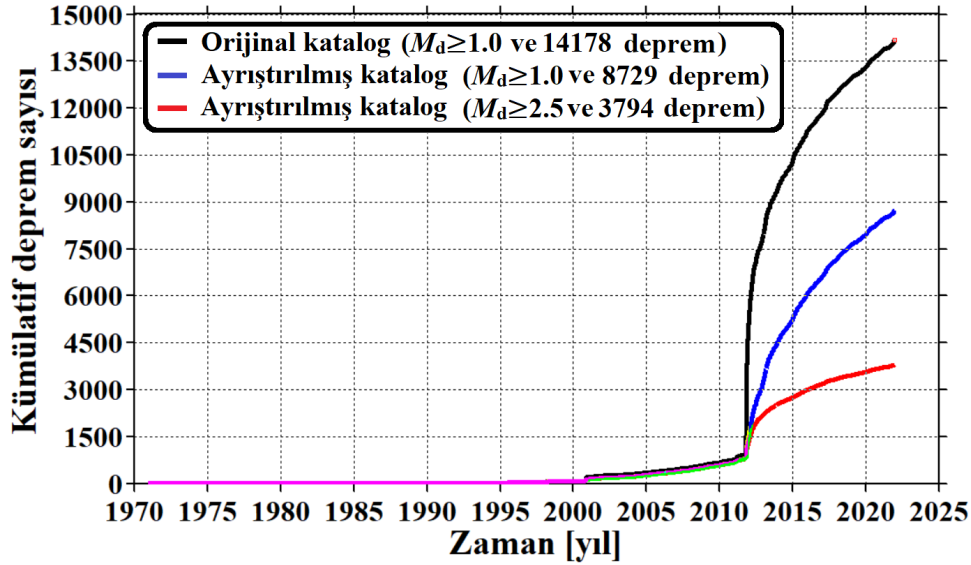
Daha önce ifade edildiği gibi, tamlik magnitüdü M_c -değerinin zamana bağlı değişim analizi istatistiksel çalışmaların ilk aşamasında dikkatli şekilde yapılmalıdır. Bununla birlikte, kaliteli sonuçlar için maksimum deprem sayısının kullanımı oldukça önemlidir. Depremin hemen sonrasında kayıt ağının kurulamayışi aktivitenin yüksek olduğu dönemde küçük depremlerin kayıt edilmesini zorlaştırabilmekte ve dolayısıyla kataloğun ilk dönemlerinde M_c -değeri yüksek olabilmektedir. M_c -değerinin tahmini, magnitüd-deprem sayısı dağılımına ve M_c -değerinin yaklaşık ilk dizisi olarak bu dağılımın ilk türevinin maksimum değer hesabına dayanır (Wiemer ve Wyss 2000). Her bir pencere başına belli sayıda deprem dikkate alınarak bu deprem dizisi için ortalama bir magnitüd değeri hesaplanır ve her bir pencere için hesaplanan bu değer o pencereyi kapsayan zaman aralığı için ortalama M_c -değeri olarak kabul edilir. Dolayısıyla, M_c -değerinin hesabı üst üste binen hareketli pencere tekniği kullanılarak maksimum olasılık yöntemiyle zamanın bir fonksiyonu olarak hesaplanabilir. Bu çalışmada da hareketli zaman penceresi tekniği kullanılarak ve pencere başına 250 deprem alınarak M_c -değerinin zamanla değişimi analiz edilmiştir. Bu analiz için 14178 depremi içeren orijinal deprem kataloğu kullanılmıştır ve M_c -değerinin zamanla değişimi Şekil 3'te verilmiştir. M_c -değeri 2011 yılına kadar nispeten büyüktür ve 2.8-3.3 arasında iken, 2012'den sonra 2.0-2.5 arasında değişim gösterir. Genel olarak, M_c -değerindeki değişimler zaman içerisinde sabit değildir ve 1970-2022 arasında 1.8-3.3 arasında bir değişim söz konusudur. Sonuçta, bu çalışma b -değeri, Z -değeri RI ve PI istatistiklerini içerdiği için M_c -değeri analizi ilk adım olarak gerçekleştirilmiştir. $M_c=2.5$ değeri uygundur ve bu alanda yapılmış çalışmalarla da uyumludur.



Şekil 3: Çalışma alanı için M_c -değeri ve standart sapmasının (δM_c) zamanla değişimi
Figure 3: Temporal changes of M_c -value and its standard deviation (δM_c) for the study area

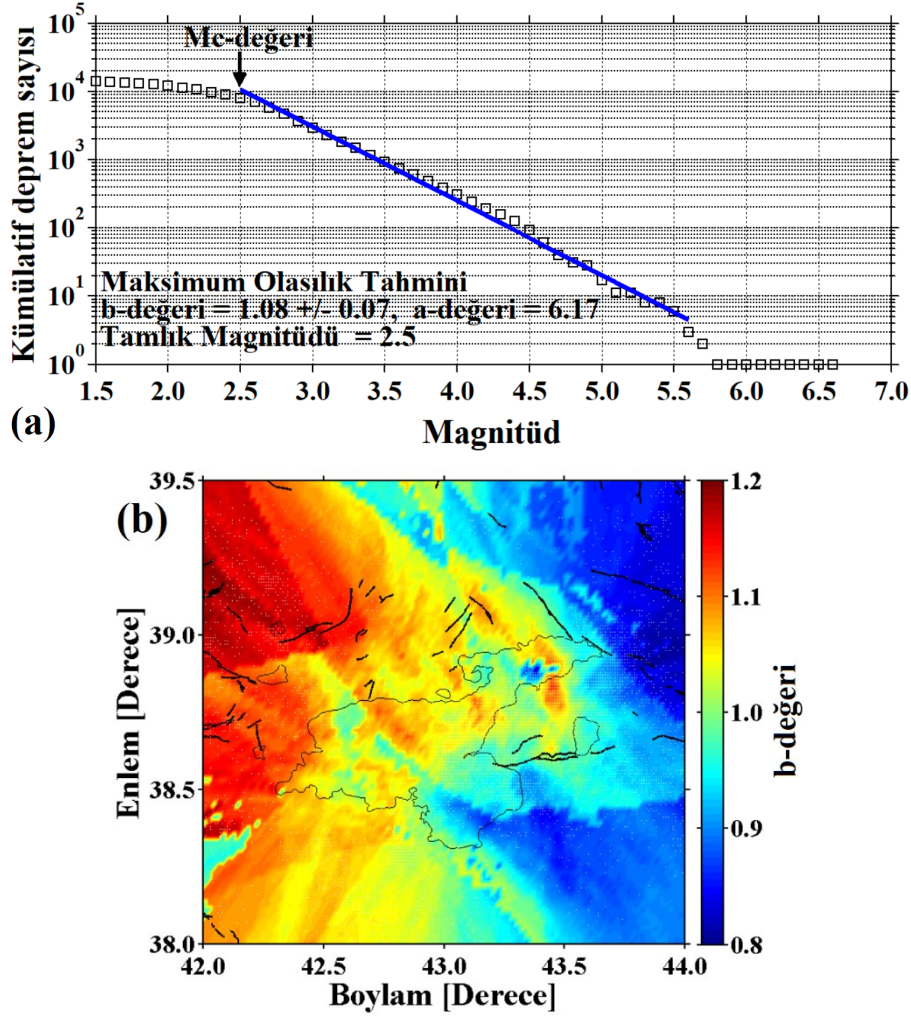
Deprem kataloglarından ikincil olayların (deprem yığılımları, öncü ve artçı şoklar gibi) ayrılması özellikle deprensellik oran değişimlerinin değerlendirilmesinde deprem istatistiğinin en önemli aşamalarından biridir (Mizrahi ve diğ. 2021). Bu işlem bir katalogdaki bağımlı ve bağımsız olayları ayırıştırır ve tüm ana olaylar her bir kümeden uzaklaştırılarak tüm birincil olaylar ayrı bir deprem olarak kayıt edilir (Arabasz ve Hill 1996). Bu çalışmada, deprem katalogunu ayırştırmak için ZMAP programı içerisinde mevcut olan Reasenber (1985) algoritması kullanılmıştır. Ayırıştırma işleminden sonra depremlerin yaklaşık %38.43'ü (5449 deprem) katalogdan çıkarılmış ve geriye 8729 deprem kalmıştır. Deprem kataloğu için tamlik magnitüdü $M_c=2.5$ alınmıştır. $M_d<2.6$ olan 4934 deprem mevcuttur ve bu depremler katalogdan çıkarılmıştır. Son adımda, ayırıştırma işlemi ve $M_d<2.6$ olan depremlerin uzaklaştırılması birlikte orijinal katalogun yaklaşık %73.24'ü çıkarılmıştır. Sonuç olarak, sismik durgunluk analizi için 3794 depremi içeren bağımsız, homojen ve tekdüze bir katalog elde edilmiştir.

Zamanın bir fonksiyonu olarak kümülatif deprem sayıları, orijinal katalogdaki $M_d \geq 1.0$ olan 14178 deprem için, ayrıştırılmış katalogdaki $M_d \geq 1.0$ olan 8729 deprem için ve ayrıştırılmış katalogdaki $M_d \geq 2.5$ olan 3794 deprem için Şekil 4'te verilmiştir. 1970-2001 yılları arasında önemli bir aktivite gözlenmezken, 2001-2011 yılları arasında sadece birkaç deprem göze çarpmaktadır. Bununla birlikte, 23 Ekim 2011 Van depreminden sonra deprem sayısında önemli bir artış gözlenmiştir. Şekil 4'te görüldüğü gibi, $M_d \geq 2.5$ olan ayrıştırılmış deprem kataloğu orijinal kataloğa göre daha düz bir eğime sahiptir. Sonuç olarak, ayrıştırma işleminden ve $M_d < 2.6$ olan depremlerin katalogdan çıkarılmasından sonra istatistiksel bölge-zaman analizleri için çalışmanın amacına daha uygun tekdüze ve bağımsız bir katalog elde edilmiştir.



Şekil 4: Orijinal ve ayrıştırılmış kataloglar için kümülatif deprem sayılarının zamanla değişimleri
Figure 4: Temporal variations of cumulative earthquake numbers for original and declustered catalogs

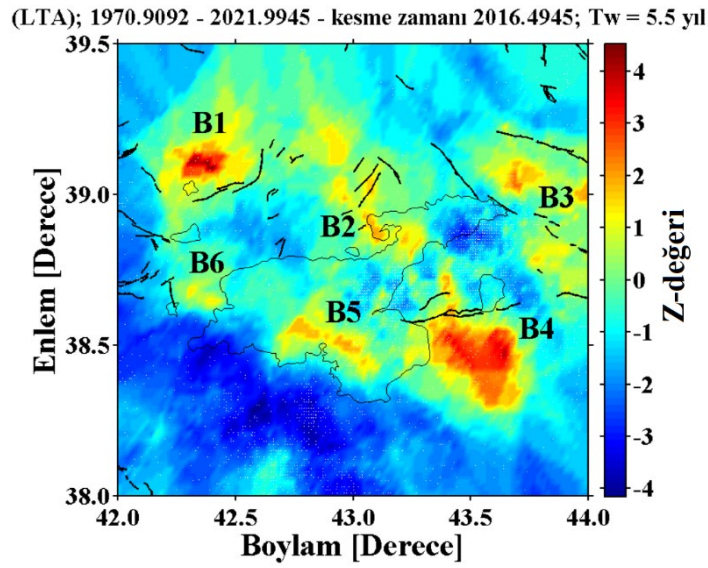
G-R ilişkisindeki b -değeri ve bölgesel değişimi Şekil 5'te verilmiştir. b -değeri maksimum olasılık yöntemi kullanılarak ve $M_c=2.5$ alınarak 1.08 ± 0.07 olarak hesaplanmıştır (Şekil 5a). Daha önce ifade edildiği gibi, b -değeri çalışma bölgesine bağlı olarak küresel ölçekte 0.3-2.0 arasında değişim göstermektedir. Tektonik depremler için b -değerinin 0.5-1.5 arasında değiştiği ve ortalama b -değerinin 1.0 civarında olduğu ifade edilmiştir (Frohlich ve Davis 1993). Dolayısıyla, Van Gölü ve çevresi için hesaplanan b -değerinin G-R ilişkisi ile iyi uyumlu olduğu söylenebilir. 14178 depremi içeren orijinal katalog kullanılarak hesaplanan b -değerinin bölgesel değişimi Şekil 5b'de verilmiştir. ZMAP yazılımı kullanılarak hareketli pencere tekniği ile pencere başına 850 deprem dikkate alınmış, çalışma alanı enlem ve boylamda $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ lik grid aralıklarına bölünmüştür. b -değeri 0.8-1.2 arasında değişim göstermektedir. Ortalama $b=1.0$ değerinden daha büyük değişimler (>1.0) Van Gölü'nün Patnos, Malazgirt, Bulanık, Tatvan, Adilcevaz, Gevaş ve Erciş'i içine alan kuzey, kuzeybatı, güney ve güneybatı kısımlarında hesaplanmıştır ve bu kısımlar SF, MF, NGF ve NF'yi kapsamaktadır. Bununla birlikte, daha düşük b -değerleri (<1.0) genellikle TF, EF, YF, VFZ ve SFZ boyunca Çaldıran, Muradiye, Özalp, Erçek ve Van şehir merkezini içine alan Van Gölü'nün kuzey, kuzeydoğu, doğu ve güneydoğu kısımlarında gözlenmiştir (Şekil 5b). Büyük b -değerine sahip alanlar genel olarak küçük magnitudlü deprem oluşumlarına sahipken, küçük b -değerli alanlar genellikle büyük magnitudlü depremlerin (Şekil 2) meydana geldiği bölgelerdir. Sonuç olarak, G-R ilişkisindeki b -değeri sismotektonik yapıyla oldukça uyumlu sonuçlar ortaya koymuştur.



Şekil 5: a) Çalışma alanı için magnitüd-deprem sayısı grafiği ve G-R ilişkisindeki b-değeri (*b*-değeri, standart sapması, *a*-değeri ve *Mc*-değeri şekil üzerinde verilmiştir.), b) Bölgesel *b*-değeri haritası
 Figure 5: a) Magnitude-frequency graphic and *b*-value in G-R relation for the study area (*b*-value, its standard deviation, *a*-value and *Mc*-value are given in the figure.), b) Regional *b*-value map

Çalışma alanındaki depremsellik oranını ortaya koyan öncü sismik durgunluğu hesaplayabilmek için *b*-değeri hesabında olduğu gibi, çalışma alanı $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ lik grid aralıklarına bölünmüştür. Sonra, hareketli bir zaman penceresi T_w kullanılarak maksimum yarıçaplı bir bölge içerisinde tanımlanan örnekleme aralığı ile deprem aktivitesindeki oran değişimleri belirlenmiştir (Wiemer ve Wyss 1994). Zaman içerisinde sürekliliği ve daha yoğun bir aktiviteyi elde edebilmek için her bir grid aralığındaki deprem oluşumları genellikle bir aylık zaman dilimleri olarak gruplandırılır. T_w değeri genellikle durgunluk sinyalinin belirginleşirmeye bağlı olarak seçilir ve T_w 'nin seçimi sonuçları hiçbir şekilde etkilemez. Güvenilir sonuçlar için, sonuçların T_w değerinden bağımsız olması beklenir. Durgunluğun ne zaman sona ereceği bilinmediği için zaman penceresi 1.5-5.5 yıl arasında değiştirilir. Çünkü bu değer, dünyanın farklı bölgeleri için kabuksal ana şoklardan önce rapor edilen sismik durgunluk oranı ile uyumludur. Van Gölü ve civarı için Z-değeri haritası oluşturulurken, zaman penceresi 1.5-5.5 yıl seçilerek değerlendirmeler yapılmış ancak durgunluğun bölgesel olarak en iyi görüntüsünü veren zaman penceresi değeri kullanılarak durgunluk haritası oluşturulmuştur. Sonuçta, Z-değerinin hesabı için en iyi görüntüyü vermesi açısından zaman penceresinin uzunluğu $T_w=5.5$ yıl olarak alınmış ve $M_d \geq 2.5$ olan 3794 depremi içeren ayrıştırılmış katalog kullanılmıştır, çünkü sismik durgunluk bölgeleri bu zaman penceresi için daha net gözlenmiştir. 2022 başlangıcı için güncel Z-değeri haritası Şekil 6'da verilmiştir ve sismik durgunluk alanları (kırmızı bölgeler): (i) $39.10^\circ\text{K}-42.36^\circ\text{D}$ (bölge B1, Malazgirt Fayı'nı içeren Malazgirt-Bulanık

arası, (ii) 38.97°K-43.08°D (bölge B2, Süphan Fayı'nı içeren Patnos ve Erciş arası, (iii) 38.94°K-43.84°D (bölge B3, Çaldıran Fayı ve Saray Fay Zonu'nu içeren Muradiye, Çaldıran ve Özalp arası, (iv) 38.48°K-43.52°D (bölge B4, Yeniköşk Fayı ve Van Fay Zonu'nu içeren Van ve Erçek arası, (v) 38.54°K-42.91°D (bölge B5, Van Gölü'nün kuzey kısmında Gevaş'ın kuzeybatısı ve (vi) 38.68°K-42.36°D (bölge B6, Nemrut Fayı'nı içeren Tatvan'ın kuzeyi) merkezli olarak belirlenmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi Z-değeri yaklaşık olarak -4 ile 4 arasında değişim göstermektedir ve bu değişim sismik durgunluğun büyüklüğü (kırmızı bölgeler) ve olağan (background) deprem aktivitesinin seviyesi (mavi bölgeler) ile orantılıdır. Sonuç olarak, bu durgunluk alanları önemli olabilir ve Z-değeri analizleri farklı istatistiksel parametrelerle birlikte yapılacak değerlendirmelerle deprem tahminindeki öncülerin güvenilirliğini artırabilir.

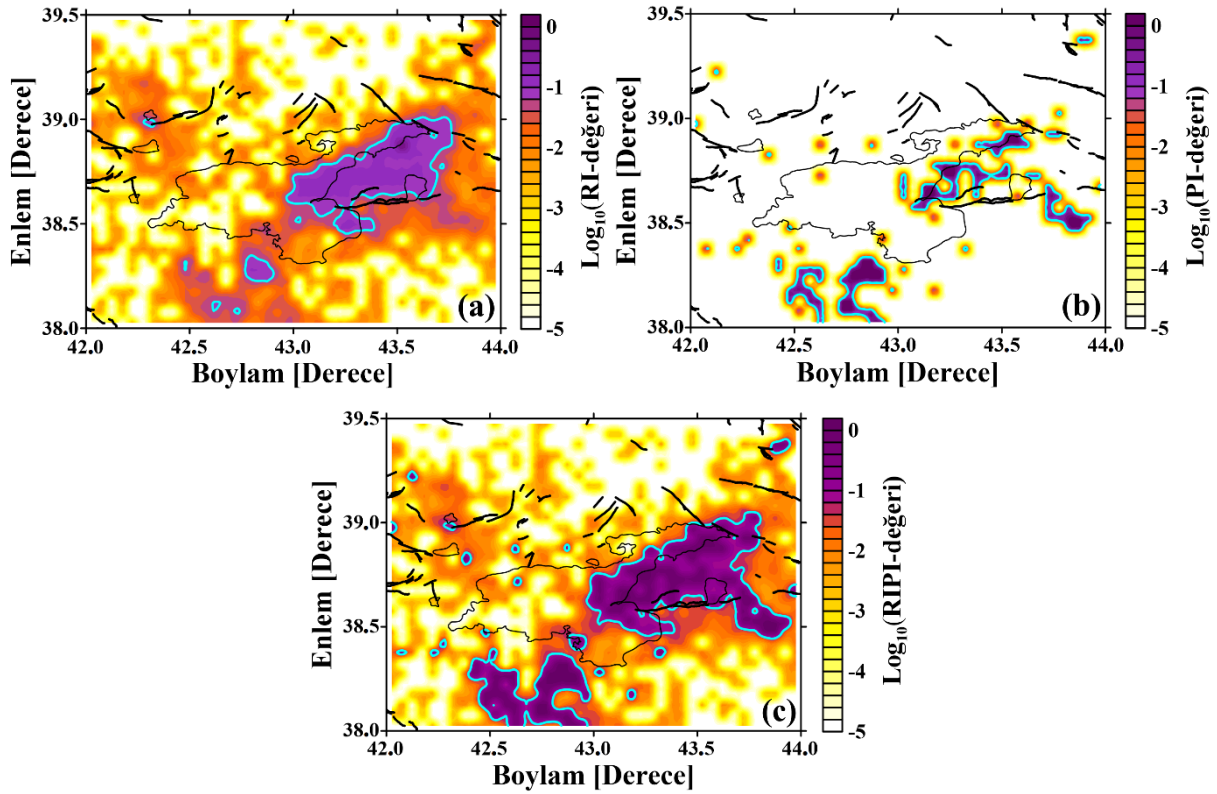


Şekil 6: 2022 başlangıcında Van Gölü ve civarı için güncel Z-değeri ve sismik durgunluk (Analiz için $M_d \geq 2.5$ olan ayrıştırılmış deprem kataloğu kullanılmıştır.)

Figure 6: Current Z-value and seismic quiescence for Lake Van and its adjacent area at the beginning of 2022 (Declassified earthquake catalog with $M_d \geq 2.5$ is used for the analysis.)

Van Gölü ve civarı için RI, PI ve birleştirilmiş tahmin haritaları Şekil 7'de verilmiştir. b -değeri ve Z-değerinde olduğu gibi çalışma alanı $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ lik grid aralıklarına ($\Delta x = 0.02^\circ$) bölünmüş ve M_c -değeri 2.5 olarak alınmıştır. Ardından, tahmin periyodu süresince bölgede oluşan büyük depremler $M_d \geq 5.0$ olan olayların sayısı ile gelecek 5 yıllık periyod için tanımlanmıştır. Son adımda, t_s , t_E , t_0 , t_1 , t_2 , t_3 zamanları ve zaman aralıkları tanımlanmıştır. Değişim aralığı 1 Ocak 2017 ile 1 Ocak 2022 arasında, tahmin aralığı ise 1 Ocak 2022 ile 1 Ocak 2027 arasında seçilmiştir. Dolayısıyla, $t_3 = 1$ Ocak 2027, $t_E = t_2 = 1$ Ocak 2022, $t_1 = 1$ Ocak 2017, ve $t_s = t_0 = 28$ Kasım 1970 (başlangıç zamanı $t_0 = 1970$, değişim periyodu aralığı 2017-2022 ve tahmin periyodu aralığı 2022-2027) olarak tanımlanmıştır. Yapılan çalışmalar değişim aralığı ile tahmin aralığının eşit olması gerektiğini ortaya koymaktadır (Tiampo ve diğ. 2002, Holliday ve diğ. 2006). Bu giriş parametreleri kullanılarak Van Gölü ve civarı için güçlü depremlerin bölgesel ve zamansal tahminleri orta vadede ($t_3 - t_2 = 5$ yıl, Ocak 2022 ile Ocak 2027 arası) gerçekleştirilmiştir. Birleştirilmiş tahmin haritası, RI (Şekil 7a) ve PI (Şekil 7b) haritalarının birleştirilmesi ile elde edilmiştir (Şekil 7c). b -değeri hesabında olduğu gibi orijinal katalog kullanılmıştır (Nanjo 2006b). Şekil 7'den görüldüğü gibi, deprem tahmin bölgeleri PI ve RI haritalarının birleştirilmesi ile daha net olarak ortaya konulmuştur. Bu yöntemler çerçevesinde büyük depremler, daha yüksek deprem aktivitesi veya durgunluk olan bölgelerde beklenir. Gelecekte deprem olması beklenen bölgeler (sıcak noktalar) için 0-5 birim arasında değişen

değerler tanımlanmıştır. Negatif değerlerden pozitif değerlere çıkıldıkça deprem beklenen bölgeler bir olasılığına sahiptir ve negatif değerli bölgeler ise gelecekte deprem beklenmeyecek bölgeler olarak verilir. Gelecekteki depremlerin sıcak noktalarda olması beklendiği için bu depremler birim olasılık değeri içerisinde verilir. Şekil 2'deki episantr haritasından görüleceği üzere, yüksek aktiviteli bölgeler ile magnitüdü 5.0'dan daha büyük güçlü depremlerin olduğu bölgeler RI, PI ve birleştirilmiş tahmin haritası üzerinde gelecek 5 yıl içerisinde deprem beklenebilecek bölgelerle uyumludur. Şekil 7c'de görüldüğü gibi, 2022-2027 yılları arasında $M_d \geq 5.0$ olan deprem oluşumları için bazı tahmini sıcak noktalar (sıfır değerli bölgeler) tespit edilmiştir. Bu alanlar, Gevaş ve civarını içeren Van Gölü'nün güneyi, Bulanık ve civarı, YF, VFZ ve SFZ civarında Muradiye-Çaldıran-Van-Erçek arasında EF'nin bazı kısımlarını içeren Van Gölü'nün doğusu olarak verilebilir. Sonuç olarak, bu alternatif yöntemler gelecekte olması muhtemel depremlerin yeri ve zamanını tahmin etmeyi amaçlar ve orta vadede deprem tahmini sunar.



Şekil 7: 2022-2027 yılları arasındaki gelecek 5 yıl için; a) Göreceli yoğunluk yöntemi ile tahmin haritası, b) Oluşum bilgisi yöntemi ile tahmin haritası, c) Birleştirilmiş yöntem ile tahmin haritası (PI-değeri, RI-değeri ve RIPI-değeri logaritmik ölçekte verilmiştir.)

Figure 7: For the future 5-years between 2022 and 2027; a) Forecast map with relative intensity method, b) Forecast map with pattern informatics method, c) Forecast map with the composite method (PI-score, RI-score and RIPI-score are given on a logarithmic scale.)

b -değeri ve Z -değeri ile birleştirilmiş RI ve PI haritalarından görüleceği üzere, düşük b -değeri, yüksek Z -değeri ve tahmin haritası üzerindeki bazı sıcak noktaların aynı bölgelerde tahmin edildiği görülebilir. Örneğin, düşük b -değeri ve yüksek Z -değeri ÇF ve SFZ'yi içeren Muradiye-Çaldıran-Özalp arasında (Z -değeri haritasında B3 bölgesi), Van ve Erçek arasında YF ve VFZ civarında (B4 bölgesi), Gevaş'ın güneybatısı ve Van Gölü'nün güney kısmında (B5 bölgesi) gözlenmiştir. Düşük b -değerleri ve tahmini sıcak noktalar EF, YF, VFZ ve SFZ'yi içeren Muradiye-Van-Erçek-Özalp-Çaldıran arasında tahmin edilmiştir. Ayrıca, yüksek Z -değerleri ile tahmini sıcak noktalar, MF'yi içeren Malazgirt ve Bulanık arasında (B1 bölgesi), SFZ ve ÇF'yi içeren Muradiye-Çaldıran ve Özalp arasında (B3 bölgesi), YF ve VFZ'yi içeren Van ve Erçek

arasında (B4 bölgesi) ve Gevaş'ın kuzeybatı kısmında Van Gölü'nün güneyinde (B5 bölgesi) hesaplanmıştır. Daha öncede ifade edildiği gibi, düşük b -değerli bölgelerin yüksek gerilme alanları ile ilişkili olduğu, ayrıca düşük b -değeri ile yüksek Z -değerine (depremlerin oluşumundan birkaç yıl öncesinde ana şok episantrı civarında deprem aktivitesinde azalmanın yüksek olduğu bölgeler) sahip alanların gelecekteki güçlü/büyük deprem oluşumları için en olası bölgeler olduğu düşünülebilir. Bununla birlikte, geçmişteki depremlerin bölge-zaman oluşumlarının analizi ile elde edilen tahmin haritası 2022-2027 yılları arasında olabilecek $M_d \geq 5.0$ olan depremlerin olası konumlarını işaret edebilir. Sonuç olarak, tüm bu parametrelerden elde edilen anomali bölgeleri genellikle aynı alanlarda gözlenmiştir ve dolayısıyla bu bölgeler deprem tehlikesi açısından dikkate alınmalıdır.

5. TARTIŞMA

Van Gölü ve civarındaki deprem oluşumları için farklı sismolojik ve jeofiziksel parametreleri kullanarak yapılan birçok çalışma mevcuttur. Bu amaçla, bazı araştırmacılar sismik, tektonik, yapısal veya gerilme parametreleri kullanarak detaylı değerlendirmeler yapmışlardır ve önemli sonuçlar ortaya koymuşlardır (Selcuk ve diğ. 2010, Irmak ve diğ. 2012, Ozturk 2018, Toker ve diğ. 2021). Bu çalışmalar, Van Gölü ve civarının yakın gelecekte güçlü veya yıkıcı bir depremin oluşumu ile ilişkili olarak yüksek seviyede deprem tehlikesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Doğu Anadolu Bölgesi'nin bu kısmı için farklı içerikte birçok çalışma olmasına rağmen, deprem tahminlerini içeren bu tür istatistiksel depremsellik analizleri nispeten azdır. Dolayısıyla, çalışma kapsamında Van Gölü ve civarı için deprem potansiyelini araştırmak ve deprem tahmini yapabilmek için detaylı bir bölge-zaman analizi gerçekleştirilmiştir.

Secuk ve diğ. (2010) tarafından yapılan çalışmada, Van Gölü havzası için 1907-2010 yılları arasındaki bölgesel deprem verisi kullanılarak olasılıksal yaklaşım ile deprem tehlike değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışmada, $M_s \geq 4.0$ olan depremlerin geri dönüşüm periyotları Gutenberg-Richter parametrelerini tahmin etmek için kullanılmıştır. Ayrıca, 100 ve 475 yıllık tekrarlama aralıkları için havzanın izo-korelasyon haritaları üretilmiştir. Elde edilen tehlike haritalarında tahmin edilen en büyük deprem tehlike seviyesi Van Gölü'nün kuzeydoğu, kuzeybatı ve güneybatı kısımlarında (0.25 g civarında PGA değeri) ve Göl ile kıyılarında (0.10-0.20 g arasında PGA değeri) gözlenmiştir. Buna bağlı olarak, Van Gölü havzasının birinci dereceden deprem bölgesi olması için öneride bulunulmuştur. Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında elde edilen sismotektonik deprem parametreleri arasındaki ilişkiler ve bulgular Selcuk ve diğ. (2010) tarafından elde edilen sonuçlarla oldukça uyumludur ve bu sonuçlar çalışma alanında orta/uzun vadede önemli bir deprem tehlikesinin varlığına işaret etmektedir.

Irmak ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmada, 23 Ekim 2011 Van depreminin ($M_w=7.1$) kırılma süreci ve artçı şokları tektonik açıdan analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, Van Gölü havzasının aktif tektonik yapısını ortaya koyabilmek için, fay düzlem çözümleri ile ilişkili sonuçlarını yüzey kırık geometrisi ile karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar, Van depreminin DASZ'de Van ve Erçek arasında kuzeydoğu-güneybatı eğilimli ters bir ana fay düzlemi üzerinde meydana geldiğini göstermektedir. Toplam atım dağılımı üzerindeki analiz sonuçlarına göre, fay düzleminin hiposantır bölgesi üzerinde büyük bir atıma sahip geniş bir asperite bölgesinin varlığına işaret edilmiş ve özellikle güneybatı yönlü olmak üzere kuzeydoğu yönünde iki taraflı yayılan ve hiposantır civarında kademeli olarak genişleyen oldukça düz bir kırık ortaya konulmuştur. Sonuç olarak, bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile Irmak ve diğ. (2012) tarafından ortaya konulan sonuçlar birbirleri ile tutarlıdır ve bu çalışmaların birlikte değerlendirilmesi orta/uzun vadede deprem tehlike değerlendirmeleri için faydalı sonuçlar ortaya koyabilir.

Ozturk (2018), G-R ilişkisindeki b -değeri, fraktal boyut D_c -değeri, standart normal sapma Z -değeri ve bu parametreler arasındaki ilişkileri dikkate alarak, Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi için deprem aktivitesinin bölge-zaman analizlerini gerçekleştirmiştir. Bu çalışma kapsamında, daha yüksek Z -değeri ve daha düşük b -değerine sahip alanların gelecek deprem oluşumları

için en olası bölgeler olabileceği ifade edilmiştir. Bu kapsamda Ozturk (2018), bu tür sismotektonik değişkenler arasındaki ilişkilerin deprem tehlike potansiyelinin ortaya konulmasında önemli ipuçları verebileceğini ve buna bağlı olarak deprem oluşumları için yapılacak bu tür tanımlamaların deprem tahminlerinde önemli bir araç olarak kullanılabilceğini göstermiştir. Mevcut çalışmada, Tartışma kısmında ifade edildiği gibi aynı alanda gözlenen küçük *b*-değeri, büyük *Z*-değeri ve sıcak noktalar mevcuttur ve sonuçta EF, YF, VFZ ve SFZ'yi içeren Van, Muradiye, Çaldıran, Özalp ve Gevaş gibi anomali bölgelerine dikkat edilmelidir.

Toker ve diğ. (2021) telesismik dalga formlarını kullanarak 23 Ekim 2011 Van depreminin tetiklediği fay dışı doğrultu atımlı hareketler için birleştirilmiş bir yaklaşım sunmuşlardır. Yaptıkları çalışmada, kabuk ve kabuk altı yapılarda gerilme dağılımlarındaki yanal değişimlerinin yerel bir kaynağının bölgesel gerilme alanlarını belirgin olarak etkilediği ifade edilmiştir. Belirgin bir şekilde tetiklenen atım depremi olarak doğrultu atımlı hareketin çalışma alanı altındaki mantonun yokluğunda kabuk altındaki sünek süreçlerle oluşturulduğu veya aktivite edilmiş olabileceği hipotezi ortaya konulmuştur. Elde ettikleri bulgulara göre, fay dışı artçı şoklarla ilişkili analizler, 2011 Van depremi kabuk altı deformasyon üzerindeki gerilme alan sınırlamaları hakkında yeni detaylar ortaya koymuştur. Bu değerlendirmenin ayrıca, Van Gölü ve Erçek Gölü altında tüm kabuk nedeniyle uzanım gösteren ve fay alanı dışında yeni bir transfer fay ile gerilme etkileşiminin rolü hakkında önemli bilgiler sağladığı ifade edilmiştir. Sonuçta, gerilme alan sınırlamaları üzerine yapılan değerlendirilmelerin, yeni bir sismojenik fay aktivite mekanizmasını tanımlamada ve deprem tehlikesini tahmin edebilmede gerilme transferinin neden olduğu fay dışı bir deprenselliğin tespitine imkân sağlayabileceği ifade edilmiştir. Bu nedenle, bu tür çalışmalar mevcut çalışmada olduğu gibi farklı istatistiksel deprem parametreleri ile desteklenmeli ve çalışma alanı için orta/uzun vadede deprem tehlike potansiyeli için çok parametrelili birleşik bir değerlendirme dikkate alınmalıdır.

Mevcut literatür çalışmaları ve bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular dikkate alındığında, *G-R* ilişkisindeki *b*-değeri, standart normal sapma *Z*-değeri, *RI* ve *PI* yöntemlerinden elde edilen sıcak noktalar gibi sismotektonik parametrelerin birleştirilmiş bir değerlendirmesi Van Gölü ve civarındaki deprem tehlike değerlendirmesi ve tahmini için birincil ve daha güvenilir kanıtlar sağlamıştır. Van Gölü ve civarı geçmişte güçlü/yıkıcı depremlere maruz kalmıştır ve son yıllarda bu bölgede çok sayıda orta büyüklükte deprem meydana gelmiştir. Dolayısıyla, bu bölgede gelecek deprem oluşumları için yapılacak çalışmalar oldukça önemlidir ve bu tür değerlendirmeler farklı jeofiziksel parametrelerin izlenmesine veya analizine dayalı olarak yapılmalıdır. Bu çalışmada kullanılan güncel veri ve parametreler dikkate alındığında, düşük *b*-değeri ve yüksek *Z*-değerli bölgeler ile birleşik tahmin haritasından elde edilen sıcak nokta bölgelerinin literatür çalışmalarında kullanılan diğer jeofiziksel parametrelerle desteklendiği görülmektedir. Sonuç olarak, anomali gözlenen bu bölgelere özel bir önemiyet verilmelidir çünkü farklı sismotektonik parametreler arasındaki bölge-zaman ilişkileri, Van Gölü ve civarındaki orta vadede güçlü/yıkıcı deprem tahminlerine ve deprem tehlikesi değerlendirmelerine derinlik katabilir.

6. SONUÇLAR

Van Gölü ve civarı (Türkiye) için güçlü/büyük depremlerin güvenilir tahmini ve güncel tehlike analizleri sismotektonik *b*-değeri, öncü sismik durgunluk *Z*-değeri, *RI*, *PI* ve birleştirilmiş *RIPI* yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 38.0°K-39.5°K enlemleri ile 42.0°D-44.0°D boylamları arasındaki 14178 sığ (derinlik < 70 km) depremi içeren ve 28 Kasım 1970 ile 31 Aralık 2021 yılları arasında magnitüdüleri $1.0 \leq M_d \leq 6.6$ arasında değişen deprem kataloğu kullanılmıştır. Bu çalışmanın en önemli noktası, başta *RI* ve *PI* yöntemleri olmak üzere diğer tekniklerin Türkiye'nin bu kısmında beklenen için güçlü/büyük depremlerin tahmini için ilk kez bir arada analiz edilmiş ve değerlendirilmiş olmasıdır.

Daha düşük *b*-değeri, daha yüksek *Z*-değeri ve birleştirilmiş tahmin haritasından elde edilen sıcak nokta bölgeleri, Çaldıran, Yeniköşk, Erciş ve Malazgirt fayları ile Saray ve Van Fay

Zonlarını içerisinde alan Muradiye, Çaldıran, Özalp, Erçek, Van şehir merkezi ve Gevaş'ı kapsamaktadır. Düşük b -değerinin gerilmedeki artışla olan ilişkisi ve yüksek Z -değerinin de depremlerin oluşumundan birkaç yıl önce ana şok episantırı civarında deprem aktivitesindeki azalışla olan ilişkileri dikkate alındığında, anomali veren bölgelerin gelecek deprem oluşumları için en olası alanlar olabileceği yorumu yapılabilir. Ayrıca, 2022-2027 yılları arasında 5 yıllık bir zaman dilimi içerisindeki $M_w \geq 5.0$ olan gelecek deprem oluşumları için yapılan tahminler diğer sismotektonik parametrelerden elde edilen sonuçlarla ve anomali bölgeleriyle oldukça uyumludur. Dolayısıyla, analiz edilen tüm parametrelere ait anomali bölgeleri genel olarak aynı alanlarda tahmin edilmiştir ve bu bölgelerdeki tehlike yüksektir. Bu değişkenler arasındaki ilişki Van Gölü ve civarındaki tektonik, sismik ve yapısal özelliklerin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayabilir. Literatür çalışmalarına ve elde edilen bulgulara bağlı olarak, gelecekte beklenebilecek depremlerin yerini ve zamanının tahmin edebilmek için çoklu parametre analizinin bir kombinasyonu daha umut verici bir strateji olacaktır. Sonuç olarak bu çalışma, Türkiye'nin farklı bölgelerindeki orta-uzun vadede deprem tahmini ve tehlike analizleri için teşvik edici sonuçlar ortaya koymuştur.

TEŞEKKÜR

ZMAP yazılımını sağlayan Prof. Dr. Stefan Wiemer'e, RI ve PI modellemesinde katkıda bulunan Dr. Kazuyoshi Z. Nanjo'ya, yapıcı tavsiyelerde bulunan hakemlere ve Editöre teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Alkan H., Cinar H., Oreshin S., 2020. Lake Van (southeastern Turkey) experiment: Receiver function analyses of lithospheric structure from teleseismic observations, *Pure and Applied Geophysics* 177, 3891-3909.

Arabasz W.J., Hill S.J., 1996. Applying Reasenbergs cluster analysis algorithm to regional earthquake catalogs outside California (abstract), *Seismological Research Letters* 67(2), 30.

Bayrak E., Ozer C., Cakici H., Kocadagistan M.E., 2021. January 24, 2020 Sivrice (Turkey) earthquake (Mw6.8): Evaluation of Ground-Motion Prediction Equations and Engineering Seismology Studies, *Turk Deprem Arastirma Dergisi* 3(2), 125-148, <https://doi.org/10.46464/tdad.1003057>

Bayrak Y., Ozturk S., Cinar H., Kalafat D., Tsapanos T.M., Koravos G.Ch., Leventakis G.A., 2009. Estimating earthquake hazard parameters from instrumental data for different regions in and around Turkey, *Engineering Geology* 10, 200-210.

Biro Y., Siyahi B., Akbas B., 2020. The Spectral Decay Parameter κ (kappa) for the Near Site Events in Van Region, *Turk Deprem Arastirma Dergisi* 2(1), 1-13, <https://doi.org/10.46464/tdad.727847>

Bozkurt E., 2001. Neotectonics of Turkey-a synthesis, *Geodinamica Acta* 14, 3-30.

Console R., Montuori C., Murru M., 2000. Statistical assessment of seismicity patterns in Italy: Are they precursors of subsequent events?, *Journal of Seismology* 4, 435-449.

Cukur D., Krastel S., Tomonaga Y., Schmincke H.U., Sumita M., Meydan A.F., Cagatay M.N., Toker M., Kim S.P., Kong G.S., Horozal S., 2017. Structural characteristics of the Lake Van Basin, eastern Turkey, from high-resolution seismic reflection profiles and multibeam echosounder data: geologic and tectonic implications, *International Journal of Earth Sciences* 106, 239-253.

Derode B., Madariaga R., Campos J., 2021. Seismic rate variations prior to the 2010 Maule, Chile Mw 8.8 giant megathrust earthquake, *Nature* 11, 2705.

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.

Enescu B., Ito K., 2002. Spatial analysis of the frequency-magnitude distribution and decay rate of aftershock activity of the 2000 Western Tottori earthquake, *Earth Planets and Space* 54, 847-859.

Frohlich C., Davis S., 1993. Teleseismic *b*-values: Or, much ado about 1.0, *Journal of Geophysical Research* 98(B1), 631-644.

Gutenberg R., Richter C.F., 1944. Frequency of earthquakes in California, *Bulletin of the Seismological Society of America* 34, 185-188.

Holliday J.R., Nanjo K.Z., Tiampo K.F., Rundle J.B., Turcotte D.L., 2005. Earthquake forecasting and its verification, *Nonlinear Process in Geophysics* 12, 965-977.

Holliday J.R., Rundle J.B., Tiampo K.F., Turcotte D.L., 2006. Using earthquake intensities to forecast earthquake occurrence time, *Nonlinear Process in Geophysics* 13, 585-593.

Holliday J.R., Chen C-C., Tiampo K.F., Rundle J.B., Turcotte D.L., Donnellan A., 2007. A RELM earthquake forecast based on Pattern Informatics, *Seismological Research Letters* 78(1), 87-93.

Irmak T.S., Dogan B., Karakas A., 2012. Source mechanism of the 23 October 2011, Van (Turkey) earthquake (Mw=7.1) and aftershocks with its tectonic implications, *Earth Planets Space* 64, 991-1003.

Keilis-Borok V.I., 1996. Intermediate term earthquake prediction, *The Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 93, 3748-3755.

Keskin M., 2003. Magma generation by slab steepening and breakoff beneath a subduction–accretion complex: an alternative model for collision-related volcanism in Eastern Anatolia, Turkey, *Geophysics Research Letters* 30(24), 8046.

KRDAE-BDTİM, 2022. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi Deprem Kataloğu, Erişim adresi: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb>

Mizrahi L., Nandan S., Wiemer S., 2021. The effect of declustering on the size distribution of mainshocks. *Seismological Research Letters* 92(4), 2333-2342.

Nanjo K.Z., Rundle J.B., Holliday J.R., Turcotte D.L., 2006a. Pattern Informatics and its application for optimal forecasting of large earthquakes in Japan, *Pure and Applied Geophysics* 163, 2417-2432.

Nanjo K.Z., Holliday J.R., Chen C.-C., Rundle J.B., Turcotte D.L., 2006b. Application of modified pattern informatics method to forecasting the locations of future large earthquakes in the central Japan, *Tectonophysics* 424, 351-366.

Ozturk S., 2011. Characteristics of seismic activity in the western, central and eastern parts of the North Anatolian Fault Zone, Turkey: temporal and spatial analysis, *Acta Geophysica* 59, 209-238.

- Ozturk S., 2018. Earthquake hazard potential in the Eastern Anatolian region of Turkey: seismotectonic b and D_c -values and precursory quiescence Z -value. *Frontiers of Earth Sciences* 12(1), 215-236.
- Ozturk 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.
- Ozer C., Ozturk S., Pamuk E., 2022. Tectonic and structural characteristics of Erzurum and its surroundings (Eastern Turkey): a detailed comparison between different geophysical parameters, *Turkish Journal of Earth Sciences* 31(1), 85-108.
- Öztürk S., 2009. An application of the earthquake hazard and aftershock probability evaluation methods to Turkey earthquakes. PhD Thesis, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey (in Turkish with English abstract), pp 346.
- Polat O., Gok E., Yılmaz D., 2008. Earthquake hazard of the Aegean extension region (West Turkey), *Turkish Journal of Earth Sciences* 17, 593-614.
- Reasenberg P.A., 1985. Second-order moment of Central California seismicity, 1969-1982, *Journal of Geophysical Research* 90(B7), 5479-5495.
- Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., 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* 111, B05411.
- Rundle J.B., Tiampo K.F., Klein W., Martins J.S.S., 2002. Self-organization in leaky threshold systems: The influence of near-mean field Dynamics and its implications for earthquakes, neurobiology and forecasting, *The Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 99 (Supplement 1), 2514-2521.
- Scholz C.H., 2015. On the stress dependence of the earthquake b value, *Geophysical Research Letters* 42, 1399-1402.
- Selcuk L., Selcuk A.S., Beyaz T., 2010. Probabilistic seismic hazard assessment for Lake Van basin, Turkey, *Natural Hazards* 54, 949-965.
- Tiampo K.F., Rundle J.B., McGinnis S.A., Klein W., 2002. Pattern dynamics and forecast methods in seismically active regions, *Pure and Applied Geophysics* 159, 2429-2467.
- Toker M., Pinar A., Hoskan N., 2021. An integrated critical approach to off-fault strike-slip motion triggered by the 2011 Van mainshock (Mw 7.1), Eastern Anatolia (Turkey): New stress field constraints on subcrustal deformation, *Journal of Geodynamics* 147 (101861), 1-25.
- Utkucu M., Durmus H., Yalcin H., Budakoglu E., Isik E., 2013. Coulomb static stress changes before and after the 23 October 2011 Van, Eastern Turkey, earthquake (Mw=7.1): implications for the earthquake hazard mitigation, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13, 1-14.
- 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 the Faculty of Science, Hokkaido University Series VII (Geophysics)* 3, 379-441.

Varotsos P., Alexopoulos K., 1984. Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes. II. determination of epicenter and magnitude, *Tectonophysics* 110, 99-125.

Wiemer S., 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP, *Seismological Research Letters* 72(2), 373-382.

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 of the Seismological Society of America* 90(3), 859-869.

Wyss M., Habermann R.E., 1988. Precursory seismic quiescence, *Pure and Applied Geophysics* 126(2-4), 319-332.

ARAŞTIRMA VERİSİ (*Research Data*)

Çalışma kapsamında kullanılan deprem kataloğunun 1970-2006 yılları arasındaki kısmı Öztürk (2009)'dan alınmış (detaylar için Bayrak ve diğ. 2009), 2006-2022 yılları arasındaki kısmı ise KRDAE-BDTİM (2022)'den derlenmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ (*Conflict of Interest / Relationship*)

Araştırma kapsamında yer alan bilgiler; herhangi bir kişiye, kuruma, ekipmana çıkar sağlamayı veya kişisel/kurumsal menfaat kazandırmayı amaçlamamaktadır. Aynı şekilde çalışmada yer alan hususlar objektif değerlendirme sınırları dışına çıkarak herhangi bir şekilde kişi, kurum, kuruluş nezdinde zarara, kastı aşan kötü niyetli yoruma ya da itibar kaybına yol açmamaktadır.

YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI (*Author Contributions*)

- Çalışmanın tasarlanması (*Designing of the study*): S.Ö., H.A.
- Literatür araştırması (*Literature research*): S.Ö., H.A.
- Saha çalışması, veri temini/derleme (*Fieldwork, collection/compilation of data*): S.Ö., H.A.
- Verilerin işlenmesi/analiz edilmesi (*Processing/analysis of data*): S.Ö., H.A.
- Şekil/Tablo/Yazılım hazırlanması (*Preparation of figures/tables/software*): S.Ö., H.A.
- Bulguların yorumlanması (*Interpretation of findings*): S.Ö., H.A.

Makale yazımı, düzenleme, kontrol (*Writing, editing and checking of manuscript*): S.Ö., H.A.