

Original Research Paper

Comparison of stress-based metrics for Near-Real-Time estimation of aftershock spatial patterns

Asghar Rastbood*¹ and Ebrahim Aghazadeh Chakherlou¹

¹ Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2025 August 05

Accepted: 2025 December 14

Available online: 2026 March 21

Keywords:

Mainshock

Aftershock

Spatial pattern

Coulomb stress change

Maximum shear stress

Von-Mises

ABSTRACT

Aftershocks result from stress changes caused by previous mainshocks. While Omori's and Bath's laws adequately describe their temporal evolution and maximum magnitude, estimating their spatial patterns remains challenging. This study aims to introduce suitable stress metrics for near-real-time estimation of aftershock spatial patterns by examining the spatial relationship between aftershocks and six scalar stress metrics: the first, second, and third invariants of the stress tensor, maximum shear stress, von Mises stress, and Coulomb failure stress (Δ CFS) across 199 global coseismic slip distributions. In calculating Δ CFS, the receiver fault orientation was assumed equal to the mean orientation of the main fault, with a friction coefficient of 0.4. The classification accuracy of aftershock and non-aftershock zones was evaluated using receiver operating characteristic (ROC) analysis. The area under the ROC curve (AUC) was 0.78 for maximum shear stress and von Mises stress, 0.63 for Δ CFS, and 0.55, 0.37, and 0.49 for the first, second, and third stress invariants, respectively. The results demonstrate that maximum shear stress and von Mises stress, which are independent of receiver geometry, significantly outperform Δ CFS and the stress invariants, making them optimal metrics for near-real-time estimation of aftershock spatial patterns.

1. Introduction

Aftershocks represent a significant secondary hazard following major earthquakes, causing additional damage to already compromised infrastructure and posing ongoing risks to affected communities. These events are mechanically linked to stress perturbations induced by preceding mainshocks, yet their spatial distribution remains notoriously difficult to estimate. While empirical laws such as Omori's law for temporal decay and Bath's

law for maximum magnitude describe temporal characteristics, no universally accepted physical model adequately explains spatial clustering patterns. For decades, the Coulomb Failure Stress (CFS) criterion has dominated studies of aftershock triggering. This model calculates the Coulomb failure stress as

$$CFS = \tau - \mu(\sigma_n) \quad (1)$$


where τ is shear stress, σ_n normal stress, μ friction coefficient,


* Corresponding author: Asghar Rastbood; E-mail: arastbood@tabrizu.ac.ir

Citation:

Rastbood, A. and Aghazadeh Chakherlou, A., 2026. Comparison of stress-based metrics for Near-Real-Time estimation of aftershock spatial patterns. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 36(1), 139, 57-78. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.538983.2215>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2025.538983.2215

 dor: 20.1001.1.10237429.1405.36.1.4.2



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

and p pore pressure, with positive values theoretically promoting failure. Despite its widespread adoption, fundamental limitations plague the CFS approach, including the persistent stress shadow paradox where aftershocks frequently occur in zones estimated to be seismically quiet (e.g., 30% of 1992 Landers aftershocks occurred in $\Delta CFS < 0$ regions), and unresolved ambiguities in receiver fault geometry specifications. Recent studies by Meade et al. (2017) and DeVries et al., (2018) have proposed receiver-independent stress metrics such as maximum shear stress (τ_{max}) and von Mises stress (σ_{vm}) as superior alternatives. This study addresses this critical knowledge gap by conducting the most comprehensive global evaluation to date, systematically testing six scalar stress metrics across 199 global coseismic slip distributions to identify optimal physics-based estimators of aftershock spatial locations and advance seismic hazard forecasting capabilities. Fig. 1 shows samples of static stress fields and ROC curves for the 1992 Landers earthquake (Cohee and Beroza, 1994).

2. Research methodology

The investigation employed a rigorous multi-phase methodology beginning with data acquisition from authoritative sources. Source models comprised 199 finite-fault slip distributions meticulously curated from the SRCMOD database (Mai and Thingbaijam, 2014), representing earthquakes spanning moment magnitudes from Mw 4.4 to 9.2 occurring between 1906 and 2024. These were supplemented by 116,814 instrumentally recorded aftershocks from the International Seismological Centre (ISC) catalog, constrained to events occurring within one year post-mainshock and confined to three-dimensional volumes extending 100 km laterally and 50 km in depth from the rupture planes. The computational domain was discretized into $5 \times 5 \times 5$ km³ voxels, creating approximately 6.6 million grid cells for systematic analysis. Stress tensor calculations utilized Triangular Dislocation Elements (TDEs) in a homogeneous elastic half-space framework (Nikkhoo and Walter, 2015), which compute displacement and stress fields from slip discontinuities. Six scalar stress metrics were derived from the computed stress tensors: the classical Coulomb Failure Stress ΔCFS , the maximum shear stress,

$$\Delta \tau_{max}(\chi) = |\chi_1 - \chi_3| / 2 \tag{2}$$

the von Mises yield criterion $\sqrt{3\Delta J_2}$ representing distortional energy

$$\sqrt{3\Delta J_2} = \sqrt{\Delta I_1^2(\sigma) - 3\Delta I_2(\sigma)} \tag{3}$$

and the first (ΔI_1), second (ΔI_2), and third (ΔI_3) invariants of the stress tensor.

$$\Delta I_1(\chi) = \chi_1 + \chi_2 + \chi_3 \tag{4}$$

$$\Delta I_2(\chi) = \chi_1 \chi_2 + \chi_2 \chi_3 + \chi_1 \chi_3 \tag{5}$$

$$\Delta I_3(\chi) = \chi_1 \chi_2 \chi_3 \tag{6}$$

where χ_i represent principal stresses. Validation employed

Receiver Operating Characteristic (ROC) analysis, a robust statistical technique for evaluating binary classifiers. Each grid cell was labeled as “aftershock” (containing ≥ 1 recorded event) or “non-aftershock” based on the ISC catalog. For each stress metric, classification thresholds were systematically varied, and performance metrics were calculated. True Positive Rate as:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \tag{7}$$

and False Positive Rate as:

$$FPR = \frac{FP}{TN + FP} \tag{8}$$

where TP, FP, TN and FN define True Positive (Correctly estimated aftershock cells), False Positive (Non-aftershock cells misclassified as aftershocks), True Negative (Correctly estimated non-aftershock cells), and False Negative (Aftershock cells misclassified as non-aftershocks), respectively. Fig. 2 defines the four categories for binary classification in ROC analysis. ROC curves were generated by plotting TPR against FPR across all thresholds, with the Area Under the Curve (AUC) providing a scalar measure of overall estimative power (AUC=0.5 indicating random guessing; AUC=1.0 representing perfect estimation). This comprehensive approach ensured a statistically rigorous comparison of each metric’s ability to distinguish aftershock-prone locations.

Furthermore, our methodological framework was designed with computational efficiency and real-time operational applicability as primary considerations. A key practical goal of this study is to identify stress metrics viable for immediate deployment in rapid aftershock hazard assessment following a mainshock. In such time-critical operational scenarios, detailed focal mechanisms for all potential receiver faults—required for rigorous ΔCFS calculation—are subject to significant delays and are not available instantaneously. In contrast, receiver-independent metrics like maximum shear stress and von Mises stress, as well as the ΔCFS calculated based on the main fault’s average orientation, depend solely on the mainshock rupture model. This allows for their computation and delivery within minimal timeframes. Therefore, the chosen framework represents an optimal balance between estimation accuracy and computational practicality for near-real-time forecasting, relying only on an initial source model and making it directly suitable for integration into rapid warning systems.

3. Results

The global performance assessment across all 199 earthquakes yielded a clear hierarchy of estimative capability based on merged AUC values. Maximum shear stress and von Mises stress emerged as superior metrics with nearly identical merged AUC values of 0.787 and 0.788, respectively, significantly outperforming the classical Coulomb Failure Stress (ΔCFS), which achieved a merged

AUC of 0.626. This represents a substantial performance gap of +0.161 AUC points for maximum shear stress and +0.162 for von Mises stress compared to Δ CFS. The stress invariants demonstrated progressively poorer performance: the first invariant (ΔI_1) achieved a merged AUC of 0.553, followed by the third invariant (ΔI_3) at 0.491, with the second invariant (ΔI_2) performing worst at 0.378, falling significantly below the random classification threshold.

Detailed case studies of individual earthquakes reinforced these global trends. For the 1992 Landers Mw 7.3 event, maximum shear stress achieved an AUC of 0.87 compared to Δ CFS's 0.61, with the latter failing to estimate 29% of aftershocks occurring within its designated stress shadows (Fig. 1).

The 1978 Tabas Mw 7.1 earthquake in Iran showed similar results, with von Mises attaining an AUC of 0.848 versus Δ CFS's 0.614, while ΔI_2 performed disastrously below random chance (AUC=0.261), suggesting shear-dominant triggering mechanisms (Figs. 3, 4 and 5).

Analysis of the 1997 Zirkuh M_w 7.2 earthquake revealed von Mises attaining an AUC of 0.866 versus Δ CFS's 0.618, which marginally exceeds random guessing while ΔI_2 performed disastrously below random chance (AUC=0.261) (Figs. 6, 7 and 8).

Analysis of the 2003 Bam Mw 6.5 earthquake revealed maximum shear stress excelling (AUC=0.855) while Δ CFS struggled (AUC=0.571), though ΔI_1 showed moderate skill (AUC=0.730), hinting at a potential role for volumetric stress components in specific tectonic contexts (Figs. 9, 10 and 11). Global comparison of stress metrics using aggregated ROC curves is shown in Fig. 12. According to Figures 12-a and 12-b, the superior performance of the receiver-independent criteria, namely maximum shear stress (AUC = 0.788) and von Mises stress (AUC = 0.787), is clearly evident from the highest position of their curves and their largest AUC values. The confidence intervals of these two criteria, which lie entirely within the superior performance range, indicate high statistical stability and the reliability of these estimates on a global scale and Δ CFS (AUC = 0.626) ranks third.

Spatial pattern simulations using idealized fault models revealed fundamental mechanistic differences. For a strike-slip fault, Δ CFS estimated aftershock occurrence only within distinct lobes extending from the rupture tips, while maximum shear stress and von Mises consistently estimated enhanced stress encircling the entire rupture plane, correlating better with observed halo distributions of seismicity (Fig. 13). The location estimation based on the Coulomb failure stress criterion for ideal dip slip fault determines a low hazard of aftershocks on the surface image of the main earthquake rupture plane and a high hazard in the lobes extending from the end of the main earthquake rupture plane, and at the lower end of the surface image (Fig. 14-a). In contrast, the estimation based on the maximum shear stress and the von Mises criterion shows that the

aftershock hazard can increase from the main earthquake fault in all directions, especially on the surface image of the fault (Fig. 14-b and 14-c). Crucially, statistical testing confirmed that maximum shear stress and von Mises outperformed Δ CFS in 92.4% of cases, with no significant correlation found between metric performance and earthquake magnitude, depth, or tectonic setting, underscoring the broad applicability of the findings.

3. Discussion

The demonstrable superiority of τ_{\max} and σ_{vM} fundamentally stems from their inherent independence from receiver fault assumptions. Unlike Δ CFS, which requires explicit specification of often-unknown fault orientation and friction parameters, τ_{\max} directly quantifies the peak shear stress available to overcome frictional resistance – a first-order physical control on brittle failure initiation in the crust. Similarly, σ_{vM} , as a well-established yield criterion in continuum mechanics, identifies regions where the differential stress approaches the crust's failure envelope, effectively bypassing the geometric uncertainties that plague Δ CFS calculations. Computationally, this translates to significant advantages: τ_{\max} and σ_{vM} eliminate the substantial uncertainties introduced by varying friction coefficients (μ typically ranging 0.0 – 0.8 in studies) and ambiguities in receiver fault geometry, which Segou and Parsons (2020) showed often host only 35% of aftershocks even when defined as “optimally oriented.” The moderate performance of Δ CFS (median AUC \approx 0.63) reflects its inherent theoretical and practical limitations. The persistent violation of estimated stress shadows, with 18–34% of aftershocks occurring where Δ CFS $<$ 0 across the dataset, directly challenges a core tenet of the Coulomb hypothesis. Furthermore, Δ CFS estimations exhibited significant sensitivity to the chosen friction coefficient, introducing substantial model uncertainty. Geomechanically, the success of τ_{\max} underscores that aftershock nucleation is primarily governed by locations where shear stress concentrations exceed local strength thresholds, irrespective of specific pre-defined failure planes. The relevance of σ_{vM} , representing the distortional strain energy, aligns with its physical interpretation as a scalar measure of shear stress intensity driving material towards yield. Conversely, the poor performance of the stress invariants, particularly ΔI_2 and ΔI_3 (AUC $<$ 0.5 in 87% of earthquakes), strongly indicates that isotropic stress components and pressure-sensitive mechanisms play minimal roles in immediate aftershock triggering. Methodologically, the ROC framework proved robust despite severe class imbalance (74,000 aftershock cells versus 6.6 million non-aftershock cells), with AUC providing a stable performance metric. While the study focused on static stress changes, acknowledging the exclusion of potential contributions from dynamic triggering or viscoelastic relaxation (e.g., Pollitz and Sacks, 2002), the consistent dominance of τ_{\max}

and σ_{VM} suggests static stress transfer exerts the primary control on the initial spatial distribution of aftershocks. The findings resonate strongly with recent machine learning studies; DeVries et al. (2018) demonstrated neural networks implicitly prioritize τ_{max} -like features when estimating aftershock locations, providing independent corroboration of its physical significance. Importantly, the performance advantage held across diverse tectonic settings (subduction zones, continental strike-slip, and thrust systems), indicating broad universality for τ_{max} and σ_{VM} as estimative tools.

4. Conclusion

This comprehensive global analysis yields three principal findings with profound implications for earthquake science and hazard mitigation. Firstly, maximum shear stress and von Mises stress are unequivocally established as the optimal physics-based metrics for estimating aftershock spatial distributions, significantly outperforming the classical Coulomb Failure Stress (ΔCFS) by a substantial median margin of 0.161-0.162 AUC points across 199 diverse earthquakes. Secondly, the stress tensor invariants ($\Delta I_1, \Delta I_2, \Delta I_3$), particularly the second and third invariants, proved inadequate estimators, performing near or substantially below the level of random classification. Thirdly, the systematic limitations of ΔCFS , including frequent stress shadow violations (18-34% of aftershocks in $\Delta CFS < 0$ zones) and high sensitivity to poorly constrained parameters like friction coefficient and receiver fault

geometry, underscore fundamental challenges in its application. These results translate into actionable recommendations for seismic hazard operations: operational forecasting systems, such as the USGS ShakeMap-based Aftershock Forecasting (STEP) system, should urgently integrate maximum shear stress and/or von Mises calculations into their workflows to enhance the spatial accuracy of rapid aftershock hazard assessments; emergency response teams should utilize maximum shear stress hazard maps to prioritize inspections and resource allocation in high-risk zones immediately following major earthquakes; and geophysical monitoring networks should strategically deploy strainmeters in regions identified with elevated maximum shear stress following mainshocks to capture critical deformation processes. Future research must focus on developing hybrid models that combine the physical basis of maximum shear stress / von Mises with the pattern recognition capabilities of deep learning for real-time, high-resolution forecasts. In conclusion, this study resolves a longstanding debate by demonstrating that receiver-independent stress metrics, particularly maximum shear stress and von Mises, provide superior, physically consistent, and computationally efficient estimations of aftershock locations compared to classical Coulomb failure theory. Their implementation marks a significant advancement towards physics-based, operational seismic hazard assessment with the potential to save lives and reduce economic losses globally.

مقایسه معیارهای تنش برای برآورد نزدیک به آنی الگوی مکانی پس لرزه‌ها

اصغر راست بود* و ابراهیم آقازاده چاخرلو^۱

^۱ گروه نقشه برداری، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

پس لرزه‌ها در اثر تغییرات تنش ناشی از زمین لرزه‌های اصلی پیشین رخ می‌دهند. اگرچه قوانین اوموری (Utsu, 1961) و بث (Bath, 1965) ویژگی‌های زمانی و بزرگ‌ترین پس لرزه را به خوبی توصیف می‌کنند، برآورد الگوهای مکانی آن‌ها چالشی باقی مانده است. این پژوهش با هدف معرفی معیارهای تنش مناسب برای برآورد نزدیک به آنی الگوی مکانی پس لرزه‌ها، رابطه مکانی آن‌ها را با ۶ معیار زده‌ای تنش شامل ناوردهای اول، دوم و سوم تانسور تنش، بیشینه تنش برشی، فون میزس و تنش شکست کولمب (ΔCFS) در ۱۹۹ توزیع لغزش همالزهای جهانی بررسی کرده است. در محاسبه ΔCFS ، جهت‌گیری صفحه گسل گیرنده معادل میانگین جهت‌گیری گسل اصلی و ضریب اصطکاک 0.4 در نظر گرفته شد. دقت طبقه‌بندی مناطق دارای پس لرزه و فاقد آن با تحلیل منحنی ویژگی عملکرد گیرنده (ROC) ارزیابی شد. سطح زیر منحنی ROC یعنی AUC برای بیشینه تنش برشی و فون میزس 0.78 ، برای ΔCFS 0.63 و برای ناوردهای اول تا سوم تانسور تنش به ترتیب 0.55 ، 0.37 و 0.49 به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد معیارهای بیشینه تنش برشی و فون میزس، که مستقل از جهت‌گیری گیرنده هستند، به طور معناداری از ΔCFS و ناوردهای تنش عملکرد بهتری دارند و می‌توانند به عنوان معیارهای بهینه برای برآورد نزدیک به آنی الگوهای مکانی پس لرزه‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:

زمین لرزه اصلی

پس لرزه

الگوی مکانی

تنش شکست کولمب

بیشینه تنش برشی

فون میزس

۱- پیش‌نوشتار

زمین لرزه‌های بزرگ سبب تغییر شکل‌های دائمی پوسته اطراف شده و تنش‌ها را بر روی گسل‌های مجاور به طور دائم تغییر می‌دهند. به طور کلی پذیرفته شده است که پس لرزه‌ها ناشی از تغییرات تنش مربوط به زمین لرزه اصلی هستند، پس تغییرات تنش می‌تواند سبب چکانش پس لرزه‌ها شود. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که تغییرات تنش ناشی از زلزله‌های بزرگ ممکن است بر مکان رویدادهای بعدی تاثیر بگذارند (Deng and Sykes, 1996, 1997a, 1997b; King et al., 1994; Nostro et al., 1997; Reasenber and Simpson, 1992). تغییرات تنش ایستا برای توضیح برهم کنش زمین لرزه‌ها در طول هزاران کیلومتر و مقیاس‌های زمانی دهه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Stein et al., 1997)، اما پس لرزه‌ها متداول‌ترین شواهد از آغاز و برهم کنش‌های زلزله در حوزه نزدیک (کمتر از ۱۰۰ کیلومتر) و کوتاه‌مدت (کمتر از یک سال) را ارائه می‌دهند (Freed, 2005). در سه دهه گذشته، معیار تغییر تنش شکست کولمب (ΔCFS) یک چارچوب

زمین لرزه‌های بزرگ به طور معمول با دنباله‌ای از زمین لرزه‌های کوچک‌تر به نام پس لرزه همراه هستند که می‌توانند برای ماه‌ها تا سال‌ها پس از رویداد اصلی ادامه یابند. گاه این پس لرزه‌ها می‌توانند به اندازه زمین لرزه اصلی یا حتی بدتر، مخرب و کشنده باشند، برای مثال رویداد ۲۰۱۱ کرایست چرچ با بزرگای 6.2 که توسط زمین لرزه اصلی دارفیلد با بزرگای 7.1 چکانده شد (Stramondo et al., 2011). بنابراین پس لرزه‌ها پتانسیل ایجاد خسارات اضافی و تلفات جانی را دارند. اگرچه قوانین تجربی اوموری (Utsu, 1961) و بث (Bath, 1965) به خوبی ویژگی‌های زمانی و بزرگ‌ترین پس لرزه را توصیف می‌کنند، اما پیش‌بینی الگوهای مکانی آن‌ها همچنان یکی از چالش‌های اصلی در لرزه‌زمین‌ساخت به‌شمار می‌رود. درک این الگوهای مکانی بلافاصله پس از یک زمین لرزه بزرگ برای برنامه‌ریزی فعالیت‌های نجات، تصمیم‌گیری‌های اضطراری و کاهش خطر در منطقه فاجعه‌دیده از اهمیت بالایی برخوردار است.

* نویسنده مسئول: اصغر راست بود؛ E-mail: arastbood@tabrizu.ac.ir

ماخذنگاری:

راست بود، ا. و آقازاده چاخرلو، ا.، ۱۴۰۵، مقایسه معیارهای تنش برای برآورد نزدیک به آنی الگوی مکانی پس لرزه‌ها. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۶(۱)، ۵۷-۷۸. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.538983.2215>

doi: 10.22071/gsj.2025.538983.2215



doi: 20.1001.1.10237429.1405.36.1.4.2

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

زمین لرزه های گذشته، می تواند یک توضیح فیزیکی برای ۸۹ درصد از پس لرزه های تحلیل شده در طول این توالی ارائه دهد (Segou and Parsons, 2020). تعدادی از مطالعات، تغییرات کوچکی در معیار کلاسیک تنش شکست کولمب، مانند تغییر ضریب اصطکاک موثر، پیشنهاد کرده اند (Kagan and Jackson, 1998; King et al., 1994; Reasenberg and Simpson, 1992). با این حال، ارزیابی دقیق اثربخشی معیار تنش شکست کولمب و جایگزین های آن دشوار است، زیرا ادبیات گسترده در مورد چکانش پس لرزه تحت تاثیر مطالعاتی است که بر تعداد کمی از زلزله های اصلی (کمتر از ۳) و پس لرزه های آن ها تمرکز دارند (Parsons et al., 1999; Hardebeck et al., 1998; King et al., 1994; Reasenberg and Simpson, 1992). زمین لرزه های بزرگ و پس لرزه های آن ها را می توان به عنوان آزمایش های طبیعی مکرر در نظر گرفت: هر زلزله اصلی سبب تغییرات تنش می شود و پس لرزه های بعدی، پاسخ پوسته را ثبت می کنند. از این دیدگاه، یک زمین لرزه اصلی و پس لرزه های آن مشابه تنها یک آزمایش در آزمایش های مکرر هستند و نتایج ممکن است نماینده کل نباشند. برای درک جامع تر از نحوه چکانش پس لرزه ها و برآورد دقیق تر آن ها در سراسر جهان، باید زمین لرزه های اصلی متعددی از کل زمین در نظر گرفته شوند.

راهبرد دوم که رویکرد بنیادی تری به شمار می رود، معرفی معیارهای جایگزین مستقل از گیرنده است که نیاز به فرضیات کمتری دارند. در این میان، معیارهای مبتنی بر تانسور تنش کامل - مانند بیشینه تنش برشی (τ_{max}) و تنش فون میزس (σ_{vm}) به دلیل در نظر گیری تمامی مولفه های تنش و عدم وابستگی به جهت گیری خاص، توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده اند. میدا و همکاران (Meade et al., 2017) با انجام یک تحلیل کامل از معیارهای نرده ای مختلف نشان دادند که تعدادی از معیارهای نرده ای جایگزین، که نیازی به مشخص کردن سازوکار گیرنده ندارند، برآورد کننده های بهتری برای مکان های پس لرزه نسبت به ΔCFS برای جهت گیری ثابت گیرنده هستند. معیارهای نرده ای تنش برتر شامل بیشینه برش، معیار تسلیم فون میزس و مجموع مقادیر مطلق مولفه های مستقل تانسور تغییر تنش هستند. آسایش و همکاران (Asayesh et al., 2023) به بررسی اثرات پس لرزه های بزرگ بر پیش بینی مکانی پس لرزه ها در زنجیره زمین لرزه ۲۰۱۹-۲۰۱۷ باختر ایران می پردازند. مزیت این مقاله شامل استفاده از معیار ارزیابی جدید برای داده های نامتوازن، بررسی تاثیر شبکه بندی، قطع بزرگایی و دوره های زمانی مختلف، و همچنین در نظر گیری اثرات ایستایی ناشی از پس لرزه های بزرگ است. با این حال عدم در نظر گیری کامل رویدادهای کوچک تر، وابستگی نتایج به مدل های منبع و پارامترهای پس زمینه، و عدم توجه کافی به عوامل پویا و پسالرزه ای مانند تغییرات تنش پویا و رهاشدگی گران روی کشسان معایب این پژوهش هستند.

همچنین رویکردهای مبتنی بر یادگیری ماشین نیز در سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته اند. دی وریس و همکاران (DeVries et al., 2018) نشان دادند که تکنیک های شبکه عصبی عمیق (DNN) آشکارا از برآوردهای مبتنی بر ΔCFS بهتر عمل می کنند. هرچند میگنان و بروکارو (Mignan and Broccardo, 2019) نشان دادند که حتی یک نورون تنها نتایج مشابهی با DNN پیچیده ارائه می دهد و مدلی برای توزیع پس لرزه ها پیشنهاد کردند که فقط به میانگین لغزش زمین لرزه اصلی و فاصله تا صفحه گسیختگی بستگی دارد. موفقیت نشان داده شده این مدل ساده، سودمندی محاسبات تانسور تنش را بیشتر زیر سوال برده است. در پژوهش دیگری توسط ژیعون و همکاران (Zhijun et al., 2023) رویکردی نوآورانه در استفاده از یادگیری ماشین برای پیش بینی مدت زمان پس لرزه ها ارائه شده است. از مزیت های آن می توان به طراحی مدل ساده سه لایه با دقت گزارش شده ۹۰٪ در آموزش و ۱۰۰٪ در آزمون، و تمرکز کاربردی بر کاهش خسارات جانی اشاره کرد. با این حال، مقاله دارای معایب جدی از جمله گزارش دقت ۱۰۰٪ که نشان دهنده احتمال قوی بیش از آن است یا تقسیم بندی نادرست داده ها، حجم به نسبت کم داده ها (۸۵۵ نمونه)، و ارائه ناکافی جزئیات پیاده سازی و ارزیابی مدل می باشد. این کاستی ها قابلیت

نظری مسلط پذیرفته شده و پر کاربرد برای تبیین چکانش پس لرزه ها و الگوهای مکانی آن ها بوده است که در قالب فرضیه انتقال تنش ایستا به عنوان یک معیار ایستای کمی سازی نرده ای وضعیت تنش برای توضیح الگوهای مکانی پس لرزه ها مورد استفاده قرار می گیرد و به صورت زیر تعریف می شود (Harris and Simpson 1992; King et al., 1994; Toda et al., 1998; Parsons et al., 1999; Asayesh et al., 2020; Jamalreyhani et al., 2020):

$$CFS = \tau - \mu(\sigma - p) \quad (1)$$

که در آن τ تنش برشی در جهت لغزش روی صفحه گسل، σ تنش نرمال (مثبت برای فشارش) و μ ضریب اصطکاک و p فشار سیال منفذی است. تغییرات مثبت CFS ، $\Delta CFS > 0$ نشان دهنده مناطقی با پتانسیل فعالیت پس لرزه ای است، در حالی که فعالیت پس لرزه ای در مناطقی که تغییرات تنش منفی است ($\Delta CFS < 0$)، که به اصطلاح سایه های تنش نامیده می شوند، انتظار نمی رود (Harris and Simpson 1992). مناطقی که تنش شکست کولمب در آن ها افزایش یافته است، با مکان های پس لرزه ها پس از زلزله های بزرگ در ژاپن (Toda et al., 1998)، کالیفرنیا (Parsons et al., 1999; Reasenberg and Simpson, 1992) و بسیاری از مکان های دیگر در سراسر جهان (Jacques et al., 1996; Nostro et al., 1997) مرتبط بوده اند.

با وجود این مثال ها، معیار تنش شکست کولمب در هر موردی موفق نیست و کاربرد این مدل با چالش های جدی مواجه است. اولین چالش، حساسیت بالای ΔCFS به پارامترهای ناشناخته است. جهت گیری بهینه صفحه گسل گیرنده، ضریب اصطکاک موثر و تغییرات فشار منفذی پارامترهایی هستند که در عمل به دقت مشخص نیستند و برآوردهای ΔCFS را با عدم قطعیت زیادی مواجه می سازند (Harris and Simpson, 2009; Hainzl et al., 1992). دومین چالش، وجود موارد نقض متعدد است؛ از جمله زمین لرزه نورتریج در سال ۱۹۹۴ که در آن تغییرات تنش شکست کولمب نتوانست مکان پس لرزه ها را به طور شایان توجهی بهتر از مجموعه ای از رویدادهای تصادفی توزیع شده توضیح دهد (Hardebeck et al., 1998). همچنین پس از زمین لرزه های لندرز در سال ۱۹۹۲ و کوبه در سال ۱۹۹۵ در کالیفرنیا و ژاپن، میزان لرزه خیزی در همه جا افزایش یافت (Mallman and Zoback, 2007) که نشان می دهد کاهش تنش شکست کولمب مانع از شکست در سایه های تنش در مجاورت این زلزله های اصلی نشده است. قابلیت کاربرد فرضیه CFS همچنین به دلیل عدم تاثیر چکانش تنش پویا (Felzer and Brodsky, 2006) و فقدان شواهد مشاهداتی واضح برای سایه های تنش مبهم است (Harris and Simpson, 2002; Felzer and Brodsky, 2005). افزون بر این، محاسبات ΔCFS با عدم قطعیت های بزرگی مانند عدم منحصر به فرد بودن وارون سازی های لغزش (Hainzl et al., 2009)، چکانش تنش ثانویه (Helmstetter et al., 2005) و سازوکارهای ناشناخته گسل گیرنده مواجه است.

در پاسخ به این محدودیت ها، دو راهبرد اصلی در پژوهش های اخیر مطرح شده است. راهبرد اول، اصلاح و بهبود مدل های ΔCFS از طریق در نظر گیری توزیع های احتمالی برای جهت گیری صفحه گیرنده یا استفاده از صفحه بهینه است (King et al., 1994; Lin and Stein, 2004; Toda, 2008). هر دو رویکرد دارای ناشناخته هایی مانند هندسه های گسلی که به خوبی تعیین نشده اند، گسل های ناشناخته و میدان تنش پس زمینه نامشخص هستند. برای حل این مشکلات، استیسی و همکاران (Stacy et al., 2005) پیشنهاد کردند که از روندهای گسلی منطقه ای برای تثبیت امتداد گسل استفاده شود و فقط شیب و ریک بهینه شوند. هایتزل و همکاران (Hainzl et al., 2010) نیز محاسبه ΔCFS بر روی توزیع های جهت گیری های ممکن گسل گیرنده را پیشنهاد کردند. تحلیل اخیر توالی، El Mayor-Cucapah (2010) M 7.2 نشان داد که پس لرزه ها به ندرت در صفحه با جهت گیری بهینه رخ می دهند (۳۵ درصد از کل رویدادها). از سوی دیگر، تنش کل تعیین شده شامل همالرز و پس زمینه بر روی تمام صفحات گسیختگی ممکن با قیدهای گرفته شده از گسیختگی های

نامعلوم یا با عدم قطعیت زیادی همراه هستند برای کاربردهای عملیاتی آنی با محدودیت جدی مواجه است.

۲- روش پژوهش

در این پژوهش از مدل های گسیختگی گسل محدود از پایگاه داده SRCMOD (https://equake&hyphen.rc.info/SRCMOD/) که توسط می و تینگ بایجام (Mai and Thingbaijam, 2014) تهیه شده است، استفاده می شود. تا تاریخ ۲ دسامبر ۲۰۲۴، این پایگاه داده شامل ۴۷۳ مدل از ۲۲۸ زمین لرزه از سال ۱۹۰۶ است. مدل های توزیع لغزش زمین لرزه های اصلی بر اساس وارون سازی تکی یا مشترک داده های لرزه ای، ژئودتیکی و دیگر انواع داده های ژئوفیزیکی موجود به دست آمده اند؛ فهرست کاملی از منابع را می توان در <http://equake-rc.info/SRCMOD/searchmodels/allevnts/> یافت. برای تحلیل، از ۲۰۶ مورد از این توزیع های لغزشی استفاده شد؛ ۲۶۷ مدل گسیختگی باقی مانده به دلیل بی نظمی در قالب بندی قابل خواندن و استفاده در این پژوهش نبودند. این کاتالوگ به شکل یک فایل pickle (با فرمت دودویی) از داده های منتشر شده توسط دی وریس و همکاران (DeVries et al., 2018) گرفته شده است.

تغییرات تنش ناشی از هر ۲۰۶ گسیختگی رویداد زمین لرزه اصلی ($M_w=4.4$) تا $M_w=9.2$ در بازه زمانی ۱ سال در حجمی به وسعت ۱۰۰ کیلومتر از صفحه گسیختگی زمین لرزه اصلی به صورت مسطحاتی و با دامنه عمقی از صفر تا ۵۰ کیلومتر به صورت قائم (به عنوان مثال، شکل های ۱-a تا c و ۱-e تا g)، شبکه بندی شده در سلول های $5 \times 5 \times 5$ کیلومتر محاسبه شد. استفاده از یک پنجره ثابت برای تمام زمین لرزه ها، امکان مقایسه سامانه مند و عادلانه بین رویدادهای مختلف را فراهم می آورد. تانسورهای تنش در هر مرکز سلول شبکه به شش معیار تنش نرده ای مختلف تبدیل شدند. این معیارها بر اساس مطالعات پیشین (به عنوان مثال، تغییر تنش شکست کولمب و تغییرات ضرایب اصطکاک μ (King et al., 1994; Reasenberg and Simpson, 1992) و همچنین تعدادی از مقیاس بندی های جایگزین تانسور تنش (به عنوان مثال، ناوردهای اول، دوم و سوم) که تا به امروز در مطالعات مربوط به چکانش زمین لرزه در نظر گرفته نشده اند، انتخاب شدند. تمام مقیاس بندی های تانسور تنش با استفاده از تانسورهای تنش کامل برآورد می شوند. برخی از معیارهای تنش نرده ای خاص (به عنوان مثال تنش شکست کولمب کلاسیک) به جهت گیری منبع اصلی زلزله و صفحه گیرنده بستگی دارند؛ برای این معیارها، جهت گیری صفحه گیرنده پس لرزه برابر با جهت گیری متوسط گسل منبع (زلزله اصلی) فرض می شود. با توجه به ابهامات احتمالی در امتداد و شیب، چهار نسخه تغییر تنش شکست کولمب کلاسیک محاسبه شده و از بهترین قرارداد علامت برای $\Delta CFS(\sigma, 0.4)$ برای هر توزیع لغزش استفاده می شود.

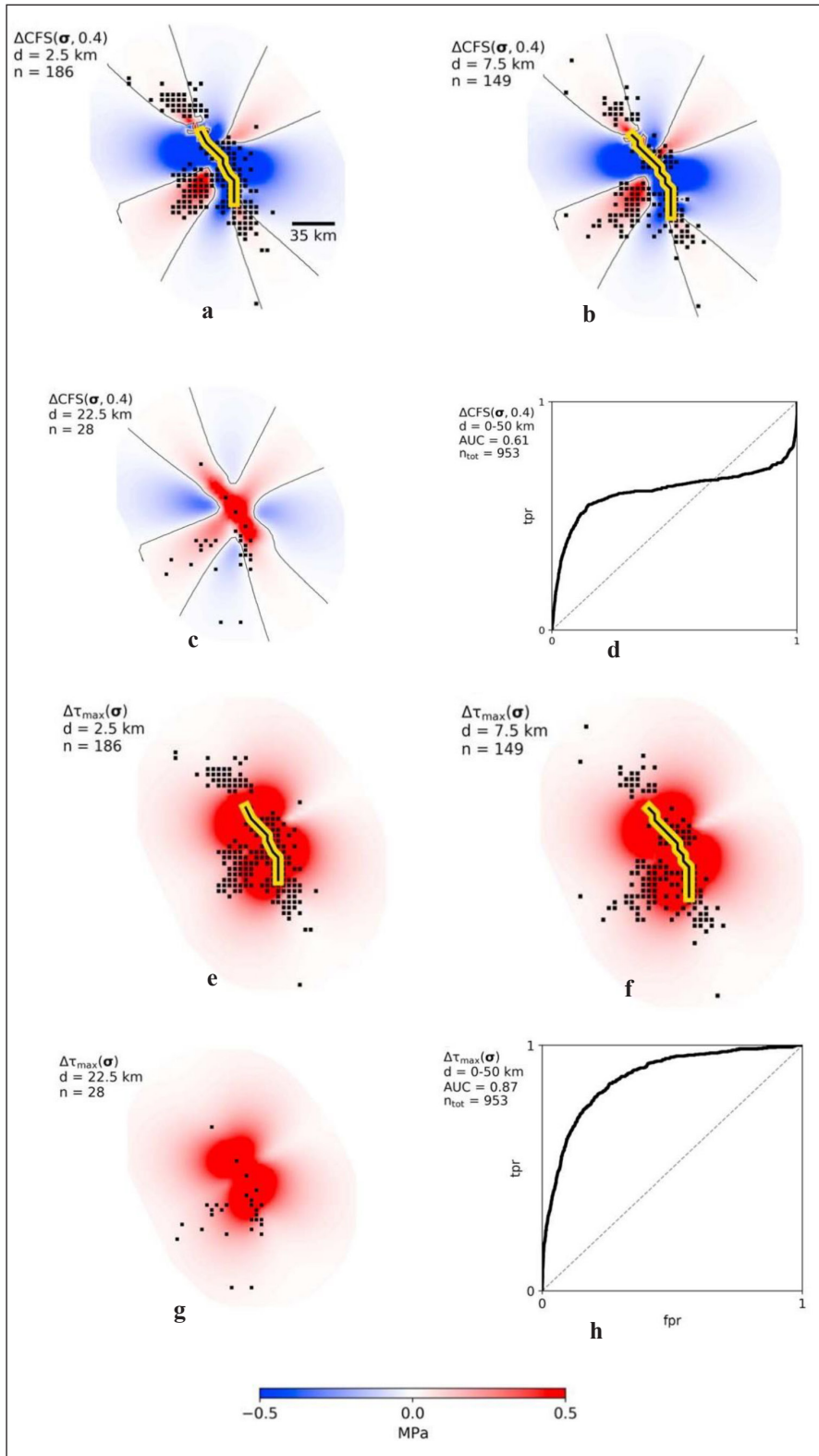
پس لرزه های رخ داده در فاصله زمانی یک سال پس از زمین لرزه اصلی (در مجموع ۱۱۶۸۱۴ پس لرزه) از کاتالوگ رویدادهای مرکز بین المللی لرزه نگاری (ISC) گردآوری شدند. این رویدادها، با وجود این که احتمالاً برخی از آن ها به زلزله اصلی مربوط نبوده اند، به عنوان پس لرزه در نظر گرفته شدند. با توجه به این که هدف اصلی این مطالعه، مقایسه عملکرد معیارهای مختلف تنش در پیش بینی مکان پس لرزه ها در شرایط یکسان است، حتی اگر برخی از رویدادهای ISC پس لرزه هم نباشند، این نوفه (نویز) به طور یکسان بر تمام معیارها تاثیر می گذارد. بنابراین، تفاوت نسبی بین معیارها همچنان معتبر است.

هفت مورد از ۲۰۶ توزیع لغزش، هیچ پس لرزه ای در حجم (کمتر از ۱۰۰ کیلومتر از زمین لرزه اصلی به صورت مسطحاتی و کمتر از ۵۰ کیلومتر به صورت قائم) و پنجره زمانی (کمتر از یک سال از زمین لرزه اصلی) در نظر گرفته شده نداشتند و از تحلیل حذف شدند. ۱۹۹ توزیع لغزش باقی مانده اساس این مطالعه را تشکیل می دهند.

تعمیم و اعتبار نتایج را زیر سؤال می برد. هاردبک و همکاران (Hardebeck et al., 2024) مروری جامع از وضعیت فعلی پیش بینی پس لرزه ها ارائه می دهند و به مقایسه مدل های آماری (مانند ETAS و STEP)، فیزیکی (مانند CRS) و روش های مبتنی بر یادگیری ماشین می پردازند. از مزیت های آن می توان به پوشش گسترده روش های پیش بینی، اشاره به کاربردهای عملی در مدیریت بحران، و بررسی مزایا و محدودیت های هر روش اشاره کرد. با این حال، مقاله به طور مشخص به این عیب اصلی اشاره دارد که هیچ یک از مدل های فیزیکی یا یادگیری ماشین تاکنون نتوانسته اند به صورت پیوسته و قابل اطمینان از مدل های آماری ساده (مانند ETAS) پیشی بگیرند. همچنین، وابستگی شدید به داده های با کیفیت، مشکل در مدل سازی عوامل پویا و پسالرزه ای، و چالش های آزمون و ارزیابی مدل ها از دیگر محدودیت های مطرح شده هستند.

اگرچه مطالعات موردی نشان داده اند که معیارهای جایگزین می توانند عملکرد مطلوبی داشته باشند، اما مقایسه سامانه مند (سیستماتیک) و کمی این معیارها در مقیاس بزرگ و با روش شناسی یکسان همچنان به عنوان یک شکاف دانش در این حوزه مطرح است. بیشتر مطالعات پیشین بر تعداد محدودی از زمین لرزه ها متمرکز بوده اند یا روش های ارزیابی ناهمگونی را به کار گرفته اند. شارما و همکاران (Sharma et al., 2020) کلیه نتایج پیشین را با استفاده از همه وارون سازی های لغزش موجود از پایگاه داده SRCMOD (Mai and Thingbaijam, 2014) به چالش کشیدند و دریافتند که ΔCFS حل شده روی صفحه های با جهت گیری بهینه یا محاسبه شده برای سازوکار متغیر، نتایج ΔCFS را به طور شایان توجهی بهبود می بخشد. با این حال، معیارهای تنش نرده ای بیشینه برش و فون میزس همچنان بهتر از همه معیارهای وابسته به گیرنده عمل کردند.

هدف اصلی این مطالعه، پر کردن این شکاف دانش از طریق مقایسه سامانه مند ۶ معیار تنش مختلف - شامل معیار کلاسیک ΔCFS ، معیارهای مستقل از گیرنده و ناوردهای تانسور تنش - بر روی ۱۹۹ توزیع لغزش همالرزه ای و پس لرزه های آن ها در سطح جهان است. برای دستیابی به این هدف، از تحلیل ویژگی عملکرد گیرنده (ROC) به عنوان یک معیار کمی استاندارد برای ارزیابی عملکرد هر معیار در برآورد استفاده شده است. تحلیل ROC معمولاً برای ارزیابی دقت آزمایش های پزشکی تشخیصی استفاده می شود؛ در اینجا از این روش برای ارزیابی نرخ طبقه بندی مثبت-درست و مثبت-نادرست مناطق دارای پس لرزه و بدون پس لرزه استفاده می شود. این رویکرد امکان می دهد تا توانایی برآورد هر معیار تنش یا به عبارت دیگر، توانایی هر معیار برای تمایز دقیق یا طبقه بندی مناطق با و بدون پس لرزه به طور کامل ارزیابی شود. نوآوری این پژوهش در به کارگیری یک چهارچوب روش شناختی یکپارچه برای مقایسه عادلانه معیارهای مختلف، استفاده از مجموعه داده ای کم سابقه از نظر گستردگی و تنوع، و ارائه تحلیلی کمی از عملکرد معیارهای مختلف در محیط های زمین ساختی گوناگون است. تمرکز روی تغییرات تنش ایستا است، اگرچه منابع دیگر تنش مانند تغییرات تنش پویا (Felzer and Brodsky, 2005, 2006; Kilb et al., 2000)، تغییرات تنش ثانویه (Meier et al., 2014) و تغییرات تنش پسالرزه ای (Pollitz and Sacks, 2002) نیز ممکن است مهم باشند. تحلیل ROC نشان می دهد که دو معیار تنش ایستا یعنی بیشینه تنش برشی و فون میزس به طور شایان توجهی بهتر از تخصیص تصادفی عمل می کنند. معیارهای تنش باقی مانده، از جمله معیار کلاسیک تنش شکست کولمب، تا حدودی از حدس تصادفی قابل تشخیص هستند. افزون بر این، کارآیی محاسباتی بالاتر و عدم وابستگی به پارامترهای ناشناخته گسل گیرنده در معیارهای بیشینه تنش برشی و فون میزس، این دو معیار را به گزینه هایی ایده آل برای برآورد نزدیک به آنی الگوی مکانی پس لرزه ها تبدیل می کند، در حالی که معیار کلاسیک تنش شکست کولمب به دلیل نیاز به تعیین جهت گیری صفحه گسل گیرنده و ضریب اصطکاک که در لحظه رخداد زمین لرزه اصلی معمولاً



شکل ۱- نمونه‌هایی از میدان‌های تنش ایستا و منحنی‌های ویژگی عملکرد گیرنده مربوطه برای توزیع لغزش زمین‌لرزه سال ۱۹۹۲ لندرز $M_w = 7.3$ کالیفرنیا (Cohee and Beroza, 1994). a تا c) نمای نقشه از مقادیر $\Delta CFS(\sigma, 0.4)$ تا فاصله ۱۰۰ کیلومتری از گسل به ترتیب در ژرفاهای ۲/۵، ۷/۵ و ۲۲/۵ کیلومتری. مربع‌های سیاه نشان‌دهنده سلول‌های شبکه‌ای هستند که در آن‌ها یک یا چند پس‌لرزه در عرض ۱ سال پس از زمین‌لرزه اصلی رخ داده است. خط ضخیم زرد و سیاه نشان‌دهنده میزان گسیختگی زمین‌لرزه اصلی در هر ژرفا است. نمودار مقیاس در شکل a-۱ با خط سیاه ضخیم نشان داده شده است. d) منحنی ویژگی عملکرد گیرنده برای این توزیع لغزش خاص (Cohee and Beroza, 1994) و معیار $\Delta CFS(\sigma, 0.4)$ شامل تمام سلول‌های شبکه و تمام پس‌لرزه‌ها در عرض یک سال پس از زلزله اصلی. خط چین مشکی، مرز معیار حدس تصادفی ($AUC = 0.5$) را نشان می‌دهد. قرارگیری منحنی در بالای این خط و مقدار $AUC = 0.61$ نشان می‌دهد این معیار در پیش‌بینی مکان پس‌لرزه‌ها بهتر از حدس تصادفی عمل کرده است. e تا h) مشابه شکل‌های a-۱ تا d-۱ برای میدان تنش ایستای متفاوت، $\Delta \tau_{max}(\sigma)$ است. منحنی ROC آشکارا بالای خط مرجع قرار دارد و مقدار $AUC = 0.87$ نشان‌دهنده عملکرد برتر این معیار در مقایسه با حدس تصادفی و ΔCFS است.

Figure 1. Examples of static stress fields and corresponding Receiver Operating Characteristic (ROC) curves for the slip distribution of the 1992 Landers, California, $M_w=7.3$ earthquake (Cohee and Beroza, 1994). a to c) Map view of $\Delta CFS(\sigma, 0.4)$ values up to a distance of 100 km from the fault at depths of 2.5, 7.5, and 22.5 km, respectively. Black squares indicate grid cells where one or more aftershocks occurred within 1 year of the mainshock. The thick yellow and black line shows the extent of the mainshock rupture at each depth. The scale bar in Figure 1-a is indicated by a thick black line. d) Receiver Operating Characteristic (ROC) curve for this specific slip distribution and the $\Delta CFS(\sigma, 0.4)$ metric, including all grid cells and all aftershocks within one year of the mainshock. The black dashed line indicates the boundary for random guessing ($AUC = 0.5$). The curve's position above this line and the AUC value of 0.61 indicate that this metric performs better than random guessing in predicting aftershock locations. e to h) Similar to Figures 1-a to 1-d, but for a different static stress field, $\Delta \tau_{max}(\sigma)$. The ROC curve is clearly above the reference line, and the AUC value of 0.87 indicates the superior performance of this metric compared to random guessing and ΔCFS .

۲-۱- ملاحظات و محدودیت های روش شناختی

این مطالعه با هدف انجام یک مقایسه سامنه مند و عادلانه در مقیاس جهانی طراحی شده است. دستیابی به این هدف مستلزم به کارگیری یک چارچوب روش شناختی یکنواخت برای تمامی ۱۹۹ زمین لرزه است. با این حال، انتخاب این چهارچوب یکپارچه، مستلزم در نظرگیری آگاهانه چندین محدودیت مهم است. **الف) تعریف عملیاتی پس لرزه ها:** در این پژوهش، تمامی رخداد های لرزه ای ثبت شده در کاتالوگ ISC که در پنجره مکانی (شعاع ۱۰۰ کیلومتر) و زمانی (۱ سال) تعریف شده حول هر زمین لرزه اصلی رخ داده اند، به عنوان پس لرزه در نظر گرفته شده اند. این رویکرد ممکن است شامل رویداد های پس زمینه ای باشد که به طور مستقیم توسط زمین لرزه اصلی چکانده نشده اند (مثبت های کاذب) و نیز ممکن است برخی پس لرزه های کوچک به دلیل ناکامل بودن کاتالوگ از قلم افتاده باشند (منفی های کاذب). اگرچه روش های پیشرفته تری مانند مدل سازی ETAS یا محاسبه بزرگای بستگی (Mc) برای هر رویداد به طور جداگانه می توانند این مسئله را کاهش دهند، اما اجرای آن ها بر روی مجموعه داده ای با این گسترش و تنوع، به ناهمگنی در پردازش داده ها و در نتیجه تضعیف قابلیت مقایسه پذیری سامنه مند نتایج می انجامد. بنابراین، عمداً رویکرد ساده تر و یکنواخت تری انتخاب شده است. این فرض مبتنی بر این است که نوفه (نویز) ناشی از این طبقه بندی تقریباً به طور یکسان بر همه معیارهای تنش تاثیر می گذارد و در نتیجه تفاوت های نسبی مشاهده شده در عملکرد معیارها (مانند AUC) همچنان معتبر و قابل استناد است.

ب) فرضیات مربوط به معیار وابسته به گیرنده (ACFS): محاسبه تغییرات تنش شکست کولمب (ACFS) به طور ذاتی به پارامترهای ناشناخته یا دارای عدم قطعیت، از جمله جهت گیری صفحه گسل گیرنده، ضریب اصطکاک (μ) و فشار منغذی (p) وابسته است. در مقیاس این مطالعه، دسترسی به سازوکار کانونی دقیق برای تمامی پس لرزه ها امکان پذیر نیست. بنابراین، مطابق رویکردی متداول در مطالعات گسترده مقیاس، جهت گیری صفحه گیرنده برای هر زمین لرزه معادل میانگین جهت گیری گسل منبع اصلی در نظر گرفته شده است. برای کاهش عدم قطعیت ناشی از ضریب اصطکاک، ACFS برای مقادیر مختلف μ از صفر تا ۰/۸ محاسبه و نسخه بهینه μ برابر ۰/۴ برای تحلیل نهایی انتخاب شد. همچنین، به دلیل نبود داده های یکپارچه، اثر فشار منغذی (p) در نظر گرفته نشده است. این چهارچوب ساده شده به طور آگاهانه ای انتخاب شده است، زیرا با هدف کاربردی این پژوهش - یعنی توسعه یک سیستم برای برآورد نزدیک به آنی الگوی مکانی پس لرزه ها - همسو است. در شرایط عملیاتی آنی، دسترسی به پارامترهای دقیق و نامعلومی مانند جهت گیری گسل های گیرنده مجزا یا تغییرات فشار منغذی، امکان پذیر نیست. بنابراین، ارزیابی معیارها تحت این شرایط ساده شده و یکنواخت، نماینده ای منصفانه از کارایی واقعی آن ها در یک چهارچوب کاربردی فراهم می کند. این رویکرد به ویژه آزمون معیارهای مستقل از گیرنده (مانند بیشینه تنش برشی و فون میزس) را که ذاتاً فاقد چنین نیازمندی های پارامتریکی پیچیده هستند، در کانون توجه قرار می دهد.

۲-۲- معیارهای نرده ای تنش

محاسبات میدان تنش در فضایی به شعاع ۱۰۰ کیلومتر از صفحه گسل و در بازه عمقی صفر تا ۵۰ کیلومتر، مبتنی بر مدل های گسیختگی گسل محدود صورت پذیرفت. با استفاده از تانسور تنش در یک حجم شبکه بندی شده ۵ × ۵ × ۵ کیلومتر، در حالت کلی ۳۹ معیار نرده ای فیزیکی براساس تانسور تنش و یک معیار فاصله براساس هندسه قابل تعریف است. معیارهای فیزیکی براساس تانسور تنش کامل (σ) یا انحرافی (σ') قابل تعریف هستند. معیارهای پایه ای تانسور تنش مانند بیشینه تنش برشی، ناورداها و مجموع بزرگی های مؤلفه های تنش بر اساس مبانی تئوری الاستیسیته و مکانیک محیط های پیوسته تعریف می شوند (Jaeger et al., 2007) و عبارتند از:

$$\Delta T_{max}$$

$$\Delta \tau_{max}(\chi) = |\chi_1 - \chi_3| / 2 \quad (2)$$

که در آن χ نشان دهنده تانسور تنش کامل یا تانسور تنش انحرافی بوده و χ_۱ و χ_۳ مقادیر ویژه متناظر یعنی تنش های اصلی هستند.

ناوردای اول تانسور تنش (ΔI_۱) و قدر مطلق آن |ΔI_۱|،

$$\Delta I_1(\chi) = \chi_1 + \chi_2 + \chi_3 \quad (3)$$

ناوردای دوم تانسور تنش (ΔI_۲) و قدر مطلق آن |ΔI_۲|،

$$\Delta I_2(\chi) = \chi_1 \chi_2 + \chi_2 \chi_3 + \chi_1 \chi_3 \quad (4)$$

ناوردای سوم تانسور تنش (ΔI_۳) و قدر مطلق آن |ΔI_۳|،

$$\Delta I_3(\chi) = \chi_1 \chi_2 \chi_3 \quad (5)$$

مجموع بزرگی های مؤلفه های تنش، m(Δχ)

$$m(\Delta\chi) = |\Delta\chi_{xx}| + |\Delta\chi_{yy}| + |\Delta\chi_{zz}| + |\Delta\chi_{xy}| + |\Delta\chi_{xz}| + |\Delta\chi_{yz}| \quad (6)$$

معیار تسلیم فون میزس، $\sqrt{3\Delta I_2}$ ، یک نسخه مقیاس شده از ناوردای دوم تانسور تغییر تنش انحرافی است. اگر معیار فون میزس یک ماده تحت بار، برابر یا بزرگ تر از حد تسلیم باشد، آن ماده تسلیم خواهد شد. این معیار که در مکانیک شکست و مطالعات چکانش زمین لرزه نیز مورد استفاده قرار گرفته است (DeVries et al., 2018) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\sqrt{3\Delta I_2} = \sqrt{\Delta I_1^2(\sigma) - 3\Delta I_2(\sigma)} \quad (7)$$

تغییر تنش شکست کولمب، ΔCFS(χ, μ)، به طور گسترده در مطالعات انتقال تنش به کار می رود (King et al., 1994). معیارهای فیزیکی حاصل از تغییر تنش شکست کولمب عبارتند از:

خود تغییر تنش شکست کولمب، ΔCFS(χ, μ)، با ضرایب اصطکاک μ=0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 و قدر مطلق آن |ΔCFS(χ, μ)| (Meade et al., 2017):

$$\Delta CFS(\chi, \mu) = (n_{\perp} \cdot \chi) \cdot n_{\parallel} - \mu(n_{\perp} \cdot \chi) \cdot n_{\perp} \quad (8)$$

که در آن n_∥ و n_⊥ به ترتیب بردارهای واحد عمود بر جهت گیری متوسط صفحه گسل اصلی و موازی با جهت متوسط لغزش لرزه اصلی هستند. مؤلفه نرمال معیار شکست کولمب با ضریب اصطکاک μ=0.4، ΔCFS_n(χ) و قدر مطلق آن |ΔCFS_n(χ)| (Meade et al., 2017):

$$\Delta CFS_n(\chi) = -\mu(n_{\perp} \cdot \chi) \cdot n_{\perp} \quad (9)$$

مؤلفه برشی معیار شکست کولمب ΔCFS_f(χ) (Meade et al., 2017):

$$\Delta CFS_f(\chi) = |(n_{\perp} \cdot \chi) \cdot n_{\parallel}| + |(n_{\perp} \cdot \chi) \cdot (n_{\parallel} \times n_{\perp})| \quad (10)$$

معیار شکست کولمب کل با ضریب اصطکاک μ=0.4، ΔCFS_{total}(χ, μ) و قدر مطلق آن |ΔCFS_{total}(χ, μ)| (Meade et al., 2017):

$$\Delta CFS_{total}(\chi, \mu) = |(n_{\perp} \cdot \chi) \cdot n_{\parallel}| + |(n_{\perp} \cdot \chi) \cdot (n_{\parallel} \times n_{\perp})| - \mu(n_{\perp} \cdot \chi) \cdot n_{\perp} \quad (11)$$

و در نهایت معیار نزدیک ترین فاصله، r، براساس هندسه به صورت زیر تعریف می شود (Meade et al., 2017):

$$r = \min(\sqrt{(\chi - \chi_f)^2 + (y - y_f)^2}) \quad (12)$$

که در آن x و y موقعیت های مکانی سلول شبکه ای و x_f و y_f مکان های صفحه گسیختگی زمین لرزه اصلی هستند.

در این پژوهش، از بین ۴۰ معیار تنش یاد شده، معیارهای بیشینه تنش برشی (رابطه ۲)، ناورداهای اول، دوم و سوم تنش (روابط ۳، ۴ و ۵)، معیار تسلیم فون میزس (رابطه ۷)، چهار معیار تنش شکست کولمب (روابط ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱) برای ارزیابی انتخاب شدند. کلیه معیارها براساس تانسور تنش کامل محاسبه شدند.

در این حالت، مسئله ای که باید حل شود یک مسئله طبقه بندی دودویی است: هدف ارزیابی دقتی است که با آن می توان از هر معیار تنش برای طبقه بندی سلول های شبکه ای ۵ × ۵ × ۵ کیلومتر در حجم اطراف زمین لرزه اصلی به عنوان «حاوی پس لرزه» یا «بدون پس لرزه» استفاده کرد. آماره هایی مانند نرخ دقت یا نرخ طبقه بندی نادرست می توانند در برنامه بسیار گمراه کننده باشند زیرا حدود ۷۴۰۰۰ سلول شبکه ای حاوی پس لرزه و بیش از ۲ مرتبه بزرگ تر سلول های شبکه (حدود

آستانه‌ها با مقادیر تغییر تنش تعریف می‌شوند، که در آن مقادیر تنش ابتدا به ترتیب صعودی مرتب می‌شوند و سپس هر مقدار تنش به عنوان حد آستانه برای محاسبه TPR و FPR استفاده می‌شود.

برای ساخت منحنی ROC، نرخ مثبت واقعی (نسبت تعداد طبقه‌بندی‌های مثبت واقعی به تعداد کل موارد مثبت، یا در این مورد، نسبت تعداد سلول‌های شبکه‌ای که به درستی به عنوان حاوی پس‌لرزه شناسایی شده‌اند به تعداد کل سلول‌های شبکه‌ای که حاوی پس‌لرزه هستند) در برابر نرخ مثبت کاذب (نسبت تعداد طبقه‌بندی‌های مثبت کاذب به تعداد کل موارد منفی، یا در این مورد نسبت تعداد سلول‌های شبکه‌ای که به اشتباه به عنوان حاوی پس‌لرزه تشخیص داده شده‌اند به تعداد سلول‌های شبکه‌ای که حاوی پس‌لرزه نیستند) برای محدوده آستانه‌های آزمون ممکن رسم می‌شود. به این ترتیب، منحنی ROC عملکرد یک آزمون را در تمام آستانه‌های ممکن نشان می‌دهد.

سطح زیر منحنی ROC یعنی AUC عملکرد کلی یک آزمون را در تمام آستانه‌ها کمی می‌کند؛ یک آزمون کامل با $AUC = 1$ مطابقت دارد. یک آزمون با طبقه‌بندی تصادفی داده‌های دودویی، نرخ‌های برابری از طبقه‌بندی مثبت-درست و مثبت-نادرست دارد. برای چنین حالتی، مقدار AUC یک منحنی ROC برابر با 0.5 است. بنابراین در فضای ROC، یک آزمون تشخیصی (یا روش طبقه‌بندی دودویی) که بهتر از حدس تصادفی نیست، نزدیک به یک خط $1:1$ ترسیم می‌شود (نرخ‌های برابر از طبقه‌بندی‌های مثبت کاذب و مثبت واقعی). مدلی که $AUC > 0.5$ داشته باشد، بهتر از یک طبقه‌بندی‌کننده تصادفی است. بنابراین آزمونی که موثرتر از حدس تصادفی باشد، بالای خط $1:1$ رسم می‌شود، زیرا آزمون‌های موثر، نرخ مثبت واقعی بالاتری نسبت به نرخ‌های مثبت کاذب خواهند داشت. مدلی که عملکرد بهتری از یک طبقه‌بندی‌کننده تصادفی ($AUC < 0.5$) نداشته باشد، می‌تواند رد شود. بنابراین، از تحلیل ROC برای سنجش دقت معیارهای تنش برای طبقه‌بندی مناطق یا بدون پس‌لرزه استفاده می‌شود.

منحنی‌های ROC مزایای زیادی نسبت به آماره‌هایی مانند نرخ طبقه‌بندی نادرست دارند. اول و مهم‌تر از همه، منحنی‌های ROC کارایی یک آزمون معین را برای همه آستانه‌های ممکن تجسم می‌کنند؛ در حالی که نرخ طبقه‌بندی نادرست، میزان خطا، فقط برای یک آستانه است. از نظر احتمالاتی، AUC احتمال این است که با توجه به نمونه‌های مثبت و منفی که به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند، آزمون، نمونه منفی را پایین‌تر از نمونه مثبت رتبه‌بندی کند.

۶/۶ میلیون) سلول شبکه‌ای بدون پس‌لرزه وجود دارد. تحلیل ROC برای این کاربرد مناسب است زیرا به عدم تعادل کلاس حساس نیست؛ نرخ طبقه‌بندی مثبت کاذب و مثبت واقعی به تعداد مطلق سلول‌های شبکه «مثبت» (با پس‌لرزه) یا «منفی» (بدون پس‌لرزه) بستگی ندارد.

در ادامه، نخست، مولفه‌های تانسور تغییر تنش برای همه زمین‌لرزه‌ها تولید شد. برای محاسبه مولفه‌های تنش از المان‌های نابرجایی مثلثی (TDE) در نیم‌فضای کشسان همگن استفاده شد. تئوری نابرجایی ابزاری فراگیر است که برای مدل‌سازی پاسخ شبه‌ایستای پوسته زمین به گسلش و زلزله استفاده می‌شود. جابه‌جایی‌ها، کرنش‌ها و تنش‌های ناشی از لغزش یکنواخت روی یک المان نابرجایی مثلثی در یک نیم‌فضای کشسان همگن محاسبه می‌شود. شرح الگوریتم‌ها و نگاهی به تاریخچه توسعه این تئوری را می‌توان در نیک‌خو و والتر (Nikkhoo and Walter, 2015) یافت. در ادامه برآورد مستقیم تنش شکست کولمب، بیشینه تنش برشی و معیار تسلیم فون‌میزس و ناوردهای اول، دوم و سوم تانسور تنش از احتمالات پس‌لرزه برای زمین‌لرزه‌ها با استفاده از مولفه‌های ورودی تنش انجام شده و تحلیل ROC انجام می‌شود.

۲-۳- تحلیل منحنی ROC

برای ارزیابی توانایی هر معیار تنش جهت برآورد و توضیح مکان‌های پس‌لرزه با طبقه‌بندی دودویی، از تحلیل ویژگی عملکرد گیرنده ROC (receiver operating characteristic) استفاده می‌شود. منحنی‌های ROC به طور گسترده برای ارزیابی کارایی طبقه‌بندی‌کننده‌های دودویی و آزمایش‌های تشخیصی در پزشکی، یادگیری ماشین و بسیاری از زمینه‌های دیگر استفاده می‌شوند (Fawcett, 2006). در مطالعات پیشین نیز تحلیل ROC برای رتبه‌بندی عملکرد معیارهای تنش معرفی و استفاده شده است (Meade et al., 2017; DeVries et al., 2018).

در تحلیل ROC، یک جدول دو در دو (شکل ۲) برای مقایسه نتایج خروجی‌های مدل با پس‌لرزه‌های مشاهده‌شده تعریف شده است. برای آستانه‌های مختلف، تعداد موارد مثبت واقعی (TP)، مثبت کاذب (FP)، منفی واقعی (TN) و منفی کاذب (FN) شمارش می‌شوند و نرخ مثبت واقعی (TPR) و نرخ مثبت کاذب (FPR) به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (13)$$

$$FPR = \frac{FP}{TN + FP} \quad (14)$$

		Observation	
		With Earthquake	Without Earthquake
Model	With Earthquake	True Positive (TP)	False Positive (FP)
	Without Earthquake	False Negative (FN)	True Negative (TN)

شکل ۲- جدولی که کلاس‌های مثبت درست، منفی درست، مثبت کاذب و منفی کاذب را تعریف می‌کند.

Figure 2. Table defining the true positive, true negative, false positive, and false negative classes.

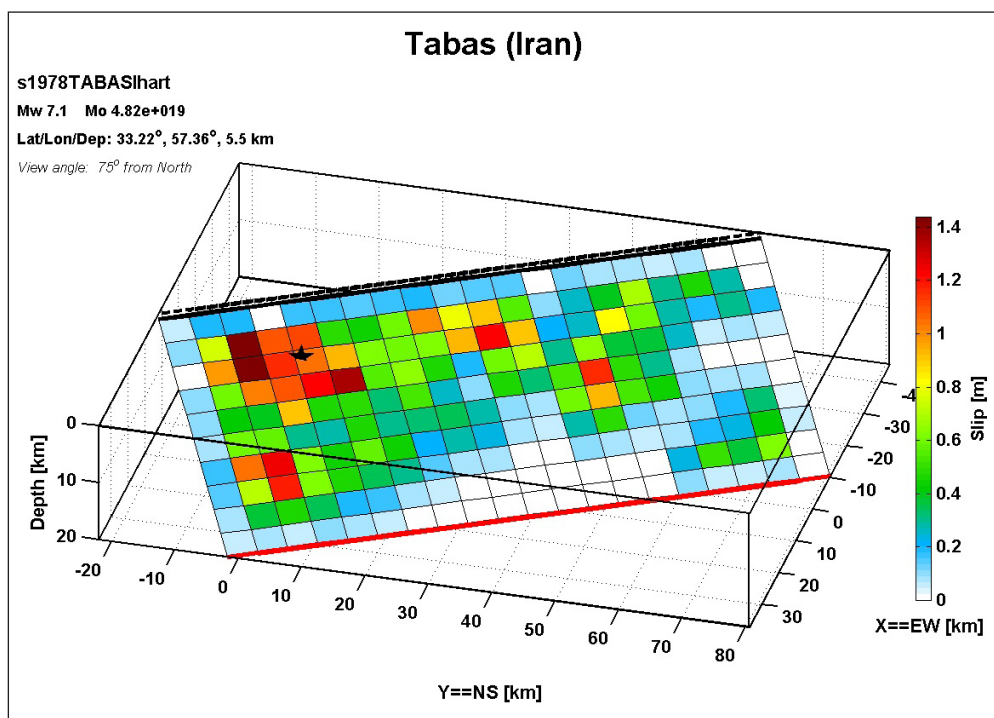
۳- داده ها و اطلاعات

منحنی های ROC شش معیار تنش $\Delta\tau_{max}$ ، $\Delta CFS(\mu=0.4)$ ، $\sqrt{3}\Delta I_2$ ، ΔI_1 و ΔI_3 برای توزیع لغزش ناشی از این زمین لرزه در شکل ۵ نشان داده شده است. محور افقی نرخ مثبت کاذب (FPR) که نسبت سلول های فاقد پس لرزه که به اشتباه به عنوان «پرخطر» طبقه بندی شده اند را نشان می دهد. محور عمودی نرخ مثبت واقعی (TPR) که نسبت سلول های دارای پس لرزه که به درستی به عنوان «پرخطر» شناسایی شده اند را نشان می دهد. خط چین مورب مشکی نشان دهنده مرز معیار حدس تصادفی ($AUC = 0.5$) است. قرارگیری آشکار منحنی در بالای این خط نشان دهنده عملکرد بهتر از حدس تصادفی و قرارگیری در پایین آن نشان دهنده عملکرد ضعیف تر است. برای بیشینه تنش برشی، منحنی ROC بالای خط ۱:۱ با $AUC = 0.87$ قرار دارد، که نشان می دهد این معیار تنش برای تمایز سلول های شبکه ای با و بدون پس لرزه در حجم اطراف زمین لرزه اصلی طیس با دقت بیشتری نسبت به یک طبقه بندی کننده تصادفی استفاده شود. همین وضعیت برای معیار فون میزس با $AUC=0.848$ برقرار است. در مقابل، منحنی ROC مربوط به تنش شکست کولمب با بیشترین مقدار AUC برابر با ۰.۶۱۴ نشان می دهد که استفاده از این معیار نرده ای برای طبقه بندی سلول های شبکه، کمی بهتر از انتساب تصادفی است. همین وضعیت برای ناوردای دوم ($AUC = 0.614$) و سوم ($AUC = 0.551$) تانسور تنش نیز برقرار است. برای ناوردای اول تانسور تنش، منحنی ROC پایین خط ۱:۱ با $AUC = 0.357$ قرار دارد، که نشان می دهد این معیار تنش نمی تواند برای تمایز سلول های شبکه ای با و بدون پس لرزه در حجم اطراف زمین لرزه اصلی طیس با دقت بیشتری نسبت به یک طبقه بندی کننده تصادفی استفاده شود.

شکل ۶ توزیع لغزش ناشی از زمین لرزه ۱۹۹۷ زیر کوه با بزرگی $M_w=7.2$ را نشان می دهد (Sudhaus and Jonsson, 2011).

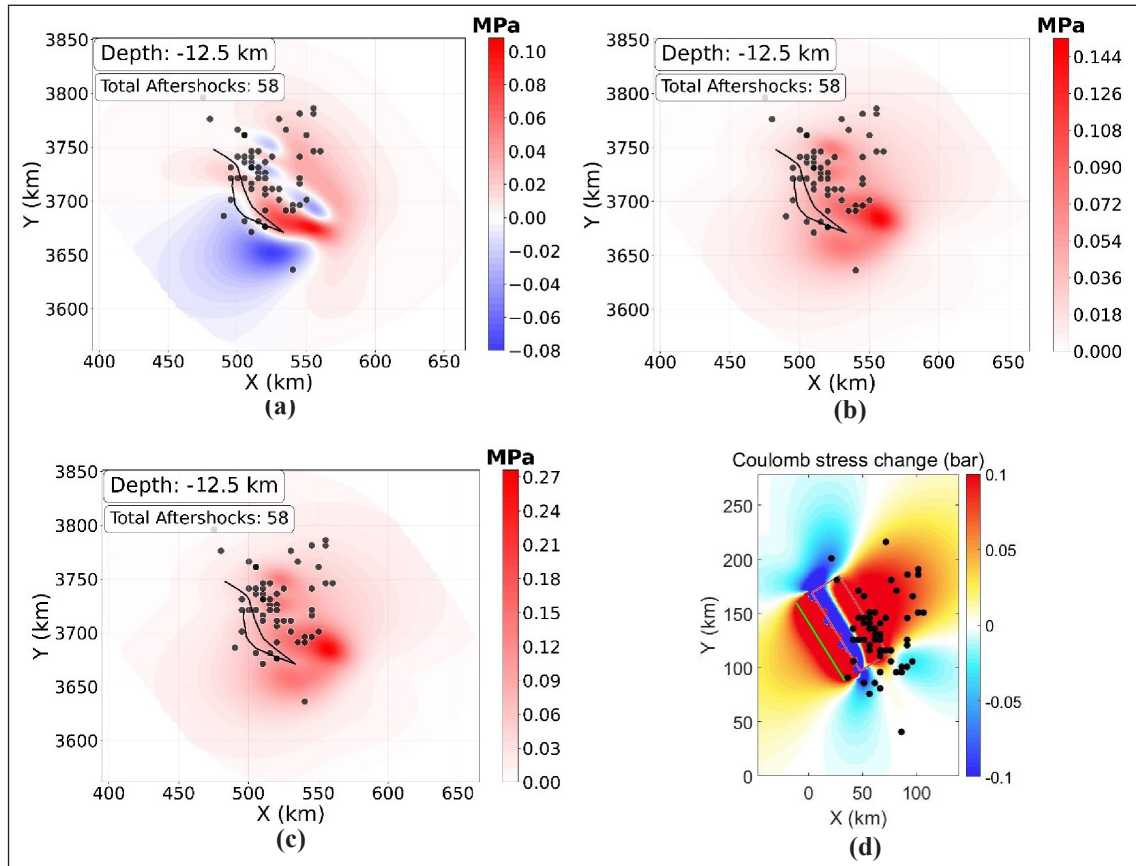
برای هر یک از ۱۹۹ توزیع لغزش و برای هر معیار تنش در نظر گرفته شده، یک منحنی ROC ساخته شده و مقدار AUC مربوطه محاسبه می شود (۶ معیار $\times 199$ توزیع لغزش = ۱۱۹۴ منحنی ROC و مقادیر AUC در مجموع). با تحلیل AUC، می توان معیارهای تنش را بر اساس توانایی شان در طبقه بندی صحیح وقوع یا عدم وقوع پس لرزه در یک سلول شبکه ای رتبه بندی کرد. شکل ۱ منحنی های ROC را برای یکی از توزیع های لغزش زمین لرزه لندرز با بزرگی $M_w=7.4$ در سال ۱۹۹۴ نشان می دهد (Coheo and Beroza, 1994). برای بیشینه تنش برشی (شکل ۱-h)، منحنی ROC بالای خط ۱:۱ با $AUC = 0.87$ قرار دارد، که نشان می دهد این معیار تنش می تواند برای تمایز سلول های شبکه ای با و بدون پس لرزه در حجم اطراف زمین لرزه اصلی لندرز با دقت بیشتری نسبت به یک طبقه بندی کننده تصادفی استفاده شود. در مقابل، منحنی ROC مربوط به تنش شکست کولمب کلاسیک ($AUC = 0.61$)؛ شکل (d-۱) نشان می دهد که استفاده از این معیار نرده ای برای طبقه بندی سلول های شبکه، کمی بهتر از انتساب تصادفی است. دقتی که هر معیار تنش می تواند برای طبقه بندی سلول های شبکه در حجم اطراف زمین لرزه اصلی استفاده شود، به عنوان توانایی تمایز یا عملکرد معیار شناخته می شود.

شکل ۳ توزیع لغزش ناشی از زمین لرزه $M_w=7.1$ سال ۱۹۷۸ طیس را نشان می دهد (Hartzell and Mendoza, 1991). نمای نقشه مقادیر $\Delta CFS(\sigma, 0.4)$ ، $\Delta\tau_{max}$ و $\sqrt{3}\Delta I_2$ در ژرفای ۱۲/۵ کیلومتری به ترتیب در شکل های ۴-a، b و c نشان داده شده است. دایره های سیاه نشان دهنده سلول های شبکه ای هستند که در آن ها یک یا چند پس لرزه در عرض ۱ سال پس از زمین لرزه اصلی رخ داده است. خط سیاه نشان دهنده رد سطحی گسل طیس است. شکل d-۴ نمای نقشه از مقادیر ΔCFS را با در نظر گرفتن ویژگی های گسل های گیرنده برگرفته از بربریان (Berberian, 1982) نشان می دهد. تفاوت در طرح توزیع ΔCFS کاملاً منطقی است.



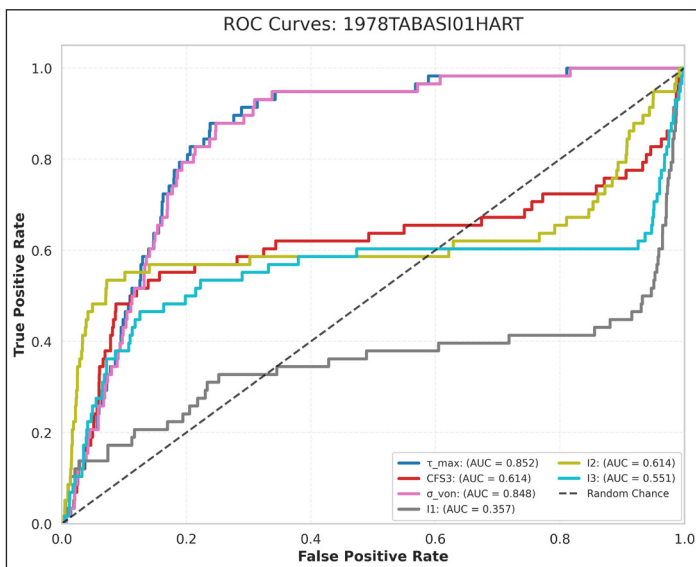
شکل ۳- توزیع لغزش ناشی از زمین لرزه $M_w=7.1$ سال ۱۹۷۸ طیس (Hartzell and Mendoza, 1991).

Figure 3. Slip distribution caused by the 1978 Tabas earthquake $M_w=7.1$ (Hartzell and Mendoza, 1991).



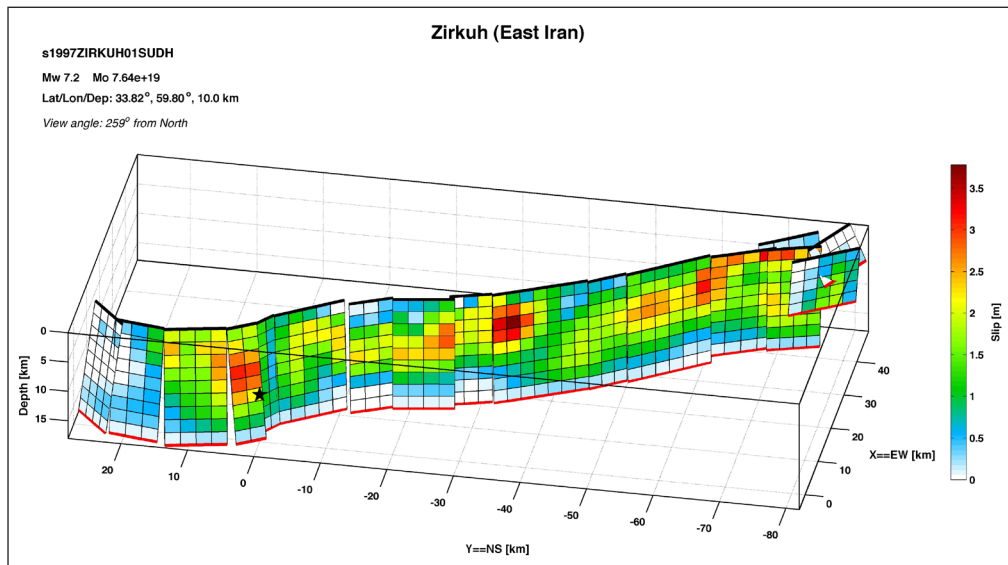
شکل ۴- نمای نقشه از مقادیر (a) $\Delta CFS(\sigma, 0.4)$ و (b) $\Delta\tau_{max}$ و (c) $\sqrt{3}\Delta I_2$ در ژرفای ۱۲/۵ کیلومتری برای زمین لرزه $M_w=7.1$ سال ۱۹۷۸ طبس. دایره‌های سیاه نشان‌دهنده سلول‌های شبکه‌ای حاوی پس‌لرزه هستند. خط سیاه نشان‌دهنده رد سطحی گسل طبس است. (d) نمای نقشه از مقادیر ΔCFS با در نظر گرفتن ویژگی‌های گسل‌های گیرنده. تفاوت در طرح توزیع ΔCFS قابل مشاهده است.

Figure 4. Map view of values for a) $\Delta CFS(\sigma, 0.4)$, b) $\Delta\tau_{max}$, and c) $\sqrt{3}\Delta I_2$ at a depth of 12.5 km for the $M_w=7.1$, 1978 Tabas earthquake. Black circles indicate grid cells containing aftershocks. The black line shows the surface trace of the Tabas fault. d) Map view of ΔCFS values incorporating the specifications of the receiver faults (from Berberian, 1982). The difference in the distribution of the two ΔCFS is quite logical.



شکل ۵- منحنی‌های ویژگی عملکرد گیرنده (ROC) برای ۶ معیار تنش مورد بررسی در زمین لرزه ۱۹۷۸ طبس. منحنی‌ها عملکرد معیارهای $\Delta CFS(\mu=0.4)$ ، $\sqrt{3}\Delta I_2$ ، $\Delta\tau_{max}$ ، ΔI_1 ، ΔI_2 و ΔI_3 را در طبقه‌بندی سلول‌های دارای پس‌لرزه و فاقد پس‌لرزه مقایسه می‌کنند. همان‌گونه که مقادیر AUC نشان می‌دهد، معیارهای بیشینه تنش برشی و فون میزس با مقادیر AUC نزدیک به ۰/۸۵ به طور شایان توجهی از سایر معیارها بهتر عمل کرده‌اند، در حالی که ناوردای اول عملکردی ضعیف‌تر از حد تصادفی ($AUC < 0.5$) دارد.

Figure 5. Receiver Operating Characteristic (ROC) curves for the six investigated stress metrics in the 1978 Tabas earthquake. The curves compare the performance of the metrics $\Delta CFS(\mu=0.4)$ ، $\Delta\tau_{max}$ ، $\sqrt{3}\Delta I_2$ ، ΔI_1 ، ΔI_2 ، and ΔI_3 ، in classifying cells with and without aftershocks. As the AUC values show, the Maximum Shear Stress and Von Mises metrics, with AUC values close to 0.85, performed significantly better than the other metrics, while the First Invariant performed worse than random guessing ($AUC < 0.5$).



شکل ۶- توزیع لغزش ناشی از زمین لرزه $M_w=7.2$ سال ۱۹۹۷ زیر کوه (Sudhaus and Jonsson, 2011).

Figure 6. Slip distribution caused by the 1997 Zirkuh earthquake with a $M_w=7.2$ (Sudhaus and Jonsson, 2011).

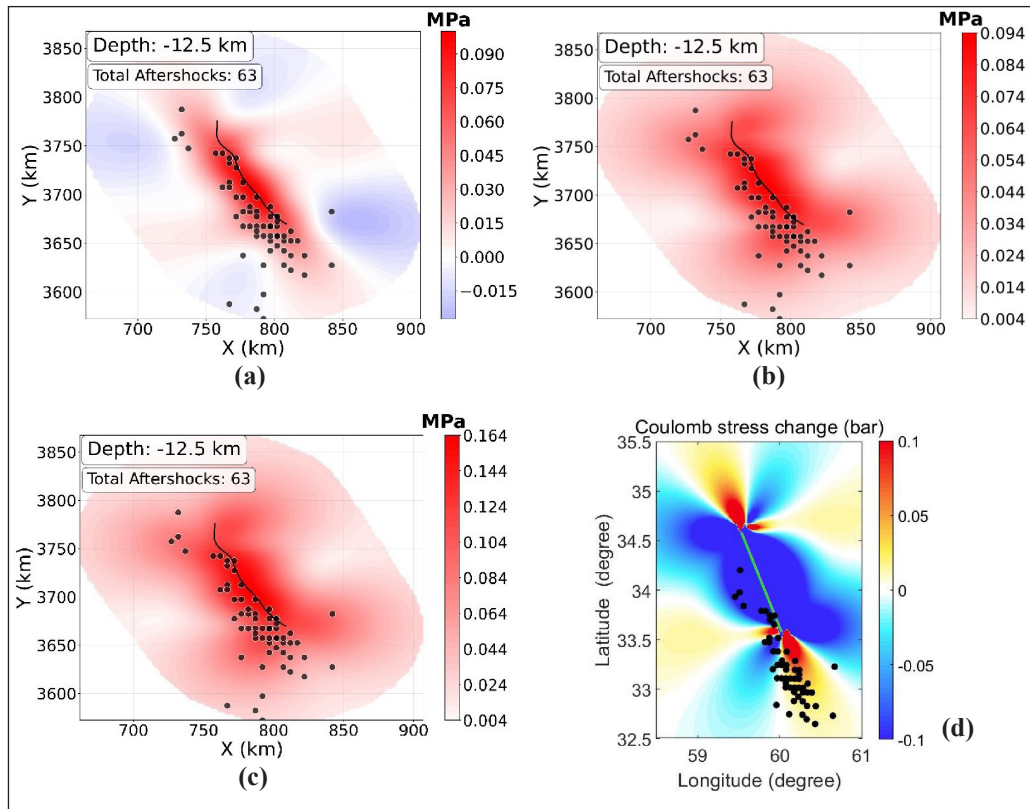
گیرنده برگرفته از آسایش و همکاران (Asayesh, et al., 2020) نشان می دهد. منحنی های ROC شش معیار تنش $\Delta I_3, \Delta I_2, \Delta I_1, \sqrt{3\Delta J_2}, \Delta \tau_{max}, \Delta CFS(\mu=0.4)$ برای توزیع لغزش ناشی از این زمین لرزه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. برای معیار بیشینه تنش برشی، منحنی ROC بالای خط ۱:۱ با $AUC = 0.855$ قرار دارد، که نشان می دهد این معیار تنش می تواند برای تمایز سلول های شبکه ای با و بدون پس لرزه در حجم اطراف زمین لرزه اصلی زیر کوه با دقت بیشتری نسبت به یک طبقه بندی کننده تصادفی استفاده شود. همین وضعیت برای معیار فون میزس با $AUC = 0.854$ و نوردای اول تنش با $AUC = 0.730$ برقرار است. مقدار شایان توجه AUC برای نوردای اول تنش به نقش بالقوه مؤلفه های تنش حجمی در زمین ساخت خاص این منطقه اشاره دارد. منحنی ROC مربوط به تنش شکست کولمب با بیشترین مقدار AUC با 0.571 نشان می دهد که استفاده از این معیار نرده ای برای طبقه بندی سلول های شبکه، کمی بهتر از انتساب تصادفی است. برای نوردای دوم و سوم تانسور تنش، منحنی ROC پایین خط ۱:۱ به ترتیب با $AUC = 0.344$ و $AUC = 0.499$ قرار دارد، که نشان می دهد این دو معیار تنش نمی توانند برای تمایز سلول های شبکه ای با و بدون پس لرزه در حجم اطراف زمین لرزه اصلی زیر کوه با دقت بیشتری نسبت به یک طبقه بندی کننده تصادفی استفاده شوند. مقدار بزرگ AUC برای بیشینه تنش برشی هر سه زمین لرزه نشان دهنده سازو کارهای چکانش چیره برشی است.

جدول ۱ مقادیر سطح زیر منحنی (AUC) را برای ۶ معیار تنش مورد مطالعه در ۳ زمین لرزه برگزیده نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، در هر ۳ رویداد، معیارهای بیشینه تنش برشی و فون میزس به طور سامانه مند و با اختلاف شایان توجهی بالاترین مقادیر AUC (بین 0.848 تا 0.866) را به خود اختصاص داده اند. در مقابل، معیار کلاسیک تنش شکست کولمب (ΔCFS) با مقادیر AUC بین 0.571 تا 0.618 ، عملکردی به مراتب ضعیف تر دارد. عملکرد نوردای تانسور تنش نیز ناهمگون و عموماً ضعیف است، به طوری که نوردای اول در زمین لرزه طبس و نوردای دوم در زمین لرزه زیر کوه حتی از حد آستانه تصادفی نیز ضعیف تر عمل کرده اند. این الگوی یکسان در زمین لرزه های با سازو کارهای گسلش مختلف (امتداد لغز و معکوس) و در مناطق زمین ساختی متفاوت، نشان دهنده استحکام و برتری ذاتی معیارهای مستقل از گیرنده در برآورد الگوی مکانی پس لرزه ها است.

نمای نقشه مقادیر $\Delta CFS(\sigma, 0.4)$ و $\Delta \tau_{max}$ و $\sqrt{3\Delta J_2}$ در ژرفای 12.5 کیلومتری به ترتیب در شکل های a-v، b و c نشان داده شده است. دایره های سیاه نشان دهنده سلول های شبکه ای هستند که در آن ها یک یا چند پس لرزه در عرض ۱ سال پس از زمین لرزه اصلی رخ داده است. خط سیاه نشان دهنده رد سطحی گسل آبی است. شکل d-v نمای نقشه از مقادیر ΔCFS را با در نظر گرفتن ویژگی های گسل های گیرنده برگرفته از قیطانچی و ریسی (Gheitanchi and Raeesi, 2004) نشان می دهد. کاهش تنش شکست کولمب به خوبی مانع از شکست در سایه های تنش در مجاورت زمین لرزه اصلی نشده است.

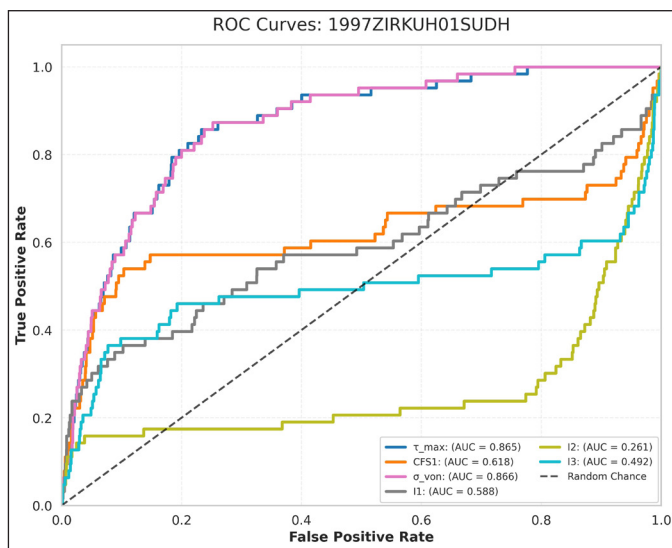
منحنی های ROC شش معیار تنش $\Delta I_3, \Delta I_2, \Delta I_1, \sqrt{3\Delta J_2}, \Delta \tau_{max}, \Delta CFS(\mu=0.4)$ برای توزیع لغزش ناشی از این زمین لرزه در شکل ۸ نشان داده شده است. برای معیار فون میزس، منحنی ROC بالای خط ۱:۱ با $AUC = 0.866$ قرار دارد، که نشان می دهد این معیار تنش می تواند برای تمایز سلول های شبکه ای با و بدون پس لرزه در حجم اطراف زمین لرزه اصلی زیر کوه با دقت بیشتری نسبت به یک طبقه بندی کننده تصادفی استفاده شود. همین وضعیت برای معیار بیشینه تنش برشی با $AUC = 0.865$ برقرار است. در مقابل، منحنی ROC مربوط به تنش شکست کولمب با بیشترین مقدار AUC برابر با 0.618 نشان می دهد که استفاده از این معیار نرده ای برای طبقه بندی سلول های شبکه، کمی بهتر از انتساب تصادفی است. همین وضعیت برای نوردای اول تانسور تنش نیز برقرار است. برای نوردای دوم و سوم تانسور تنش، منحنی ROC پایین خط ۱:۱ به ترتیب با $AUC = 0.261$ و $AUC = 0.492$ قرار دارد، که نشان می دهد این دو معیار تنش نمی توانند برای تمایز سلول های شبکه ای با و بدون پس لرزه در حجم اطراف زمین لرزه اصلی زیر کوه با دقت بیشتری نسبت به یک طبقه بندی کننده تصادفی استفاده شوند.

شکل ۹ توزیع لغزش ناشی از زمین لرزه 2003 بم با بزرگی $M_w=6.5$ را نشان می دهد (Poïata et al., 2012). نمای نقشه مقادیر $\Delta CFS(\sigma, 0.4)$ و $\Delta \tau_{max}$ و $\sqrt{3\Delta J_2}$ در ژرفای $5/5$ کیلومتری به ترتیب در شکل های a-10، b و c نشان داده شده است. دایره های سیاه نشان دهنده سلول های شبکه ای هستند که در آن ها یک یا چند پس لرزه در عرض ۱ سال پس از زمین لرزه اصلی رخ داده است. خط سیاه نشان دهنده رد سطحی گسل بم است. شکل d-10 نمای نقشه از مقادیر ΔCFS را با در نظر گرفتن ویژگی های گسل های



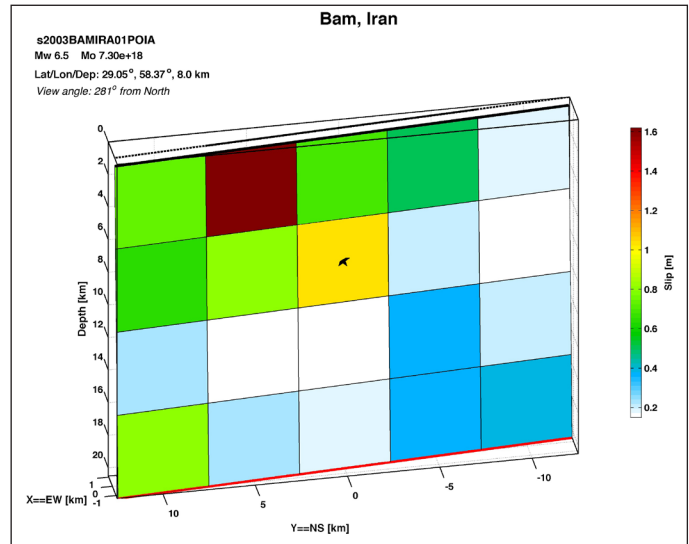
شکل ۷- نمای نقشه از مقادیر (a) $\Delta CFS(\sigma,0.4)$ ، (b) $\Delta\tau_{max}$ و (c) $\sqrt{3}\Delta J_2$ در ژرفای ۱۲/۵ کیلومتری برای زمین‌لرزه $M_w=7.2$ سال ۱۹۹۷ زیرکوه. دایره‌های سیاه نشان‌دهنده سلول‌های شبکه‌ای حاوی پس‌لرزه هستند. خط سیاه نشان‌دهنده رد سطحی گسل آبی‌ز است. (d) نمای نقشه از مقادیر ΔCFS با در نظر گرفتن ویژگی‌های گسل‌های گیرنده. رخداد شکست در سایه‌های تنش در مجاورت زمین‌لرزه اصلی مشاهده می‌شود.

Figure 7. Map view of values for a) $\Delta CFS(\sigma,0.4)$, b) $\Delta\tau_{max}$, and c) $\sqrt{3}\Delta J_2$ at a depth of 12.5 km for the $M_w=7.2$ 1997 Zirkuh earthquake. Black circles indicate grid cells containing aftershocks. The black line shows the surface trace of the Abiz fault. d) Map view of ΔCFS values incorporating the specifications of the receiver faults from Gheitanchi and Raeesi (2004). The reduction in Coulomb Failure Stress did not well prevent failure in the stress shadows adjacent to this mainshock.



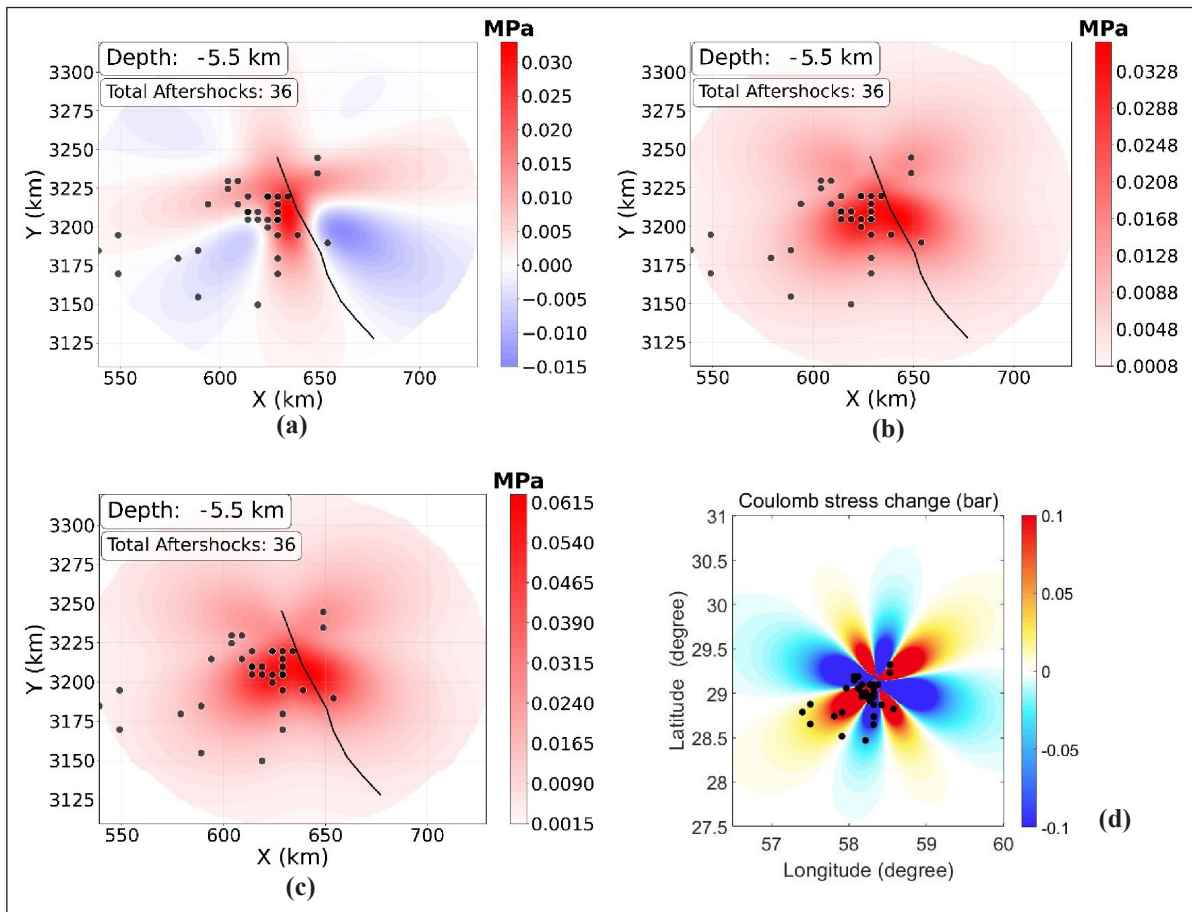
شکل ۸- منحنی‌های ویژگی عملکرد گیرنده (ROC) برای شش معیار تنش مورد بررسی در زمین‌لرزه ۱۹۹۷ زیرکوه. منحنی‌ها عملکرد معیارهای $\Delta CFS(\mu=0.4)$ ، $\Delta\tau_{max}$ ، $\sqrt{3}\Delta J_2$ ، ΔI_1 ، ΔI_2 و ΔI_3 را در طبقه‌بندی سلول‌های دارای پس‌لرزه و فاقد پس‌لرزه مقایسه می‌کنند. مقادیر AUC تایید می‌کند که معیارهای فون‌میزس و بیشینه تنش برشی با مقادیر حدود $\Delta I_1/\Delta I_2$ ، بهترین عملکرد را داشته‌اند، در حالی که ناوردای دوم (ΔI_2) عملکردی ضعیف‌تر از حدس تصادفی ($AUC < 0.5$) دارد.

Figure 8. Receiver Operating Characteristic (ROC) curves for the six investigated stress metrics in the 1997 Zirkuh earthquake. The curves compare the performance of the metrics $\Delta CFS(\mu=0.4)$ ، $\Delta\tau_{max}$ ، $\sqrt{3}\Delta J_2$ ، ΔI_1 ، ΔI_2 ، and ΔI_3 in classifying cells with and without aftershocks. The AUC values confirm that the Von Mises and Maximum Shear Stress metrics, with values around 0.87, had the best performance, while the Second Invariant performed worse than random guessing ($AUC < 0.5$).



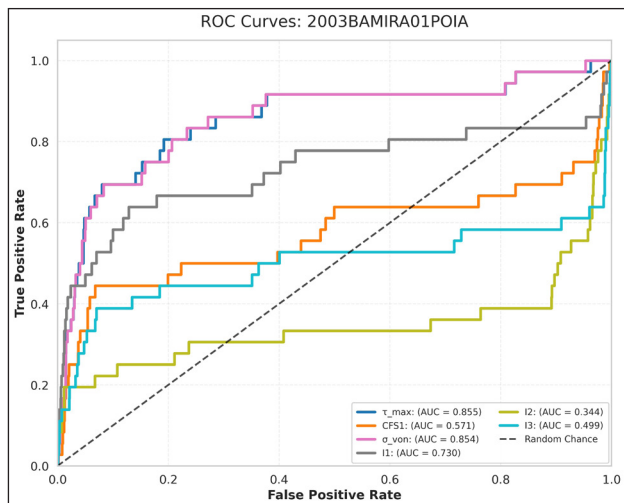
شکل ۹- توزیع لغزش ناشی از زمین‌لرزه $M_w=6.5$ سال ۲۰۰۳ بم (Poiata et al., 2012).

Figure 9. Slip distribution caused by the 2003 Bam $M_w=6.5$ earthquake (Poiata et al., 2012).



شکل ۱۰- نمای نقشه از مقادیر (a) $\Delta CFS(\sigma,0.4)$ و $\Delta\tau_{max}$ (b) در ژرفای ۵/۵ کیلومتری برای زمین‌لرزه $M_w=6.5$ سال ۲۰۰۳ بم. دایره‌های سیاه نشان‌دهنده سلول‌های شبکه‌ای حاوی پس‌لرزه هستند. خط سیاه نشان‌دهنده رد سطحی گسل بم است. (d) نمای نقشه از مقادیر ΔCFS با در نظر گرفتن ویژگی‌های گسل‌های گیرنده.

Figure 10. Map view of values for a) $\Delta CFS(\sigma,0.4)$, b) $\Delta\tau_{max}$, and c) $\sqrt{3}\Delta J_2$ at a depth of 5.5 km for the $M_w=6.5$, 2003 Bam earthquake. Black circles indicate grid cells containing aftershocks. The black line shows the surface trace of the Bam fault. (d) Map view of ΔCFS values incorporating the specifications of the receiver faults from Asayesh, et al., (2020).



شکل ۱۱- منحنی‌های ویژگی عملکرد گیرنده (ROC) برای شش معیار تنش مورد بررسی در زمین‌لرزه ۲۰۰۳ بم. منحنی‌ها عملکرد معیارهای $\Delta CFS(\mu=0.4)$ ، $\Delta\tau_{max}$ ، $\sqrt{3}\Delta I_2$ ، ΔI_1 ، ΔI_2 ، ΔI_3 را در طبقه‌بندی سلول‌های دارای پس‌لرزه و فاقد پس‌لرزه مقایسه می‌کنند. در این زمین‌لرزه، معیارهای بیشینه تنش برشی و فون میزس با حدود ۰/۸۵ بهترین عملکرد را نشان می‌دهند. قابل توجه است که ناوردای اول نیز در این مورد خاص عملکرد نسبتاً خوبی داشته است، در حالی که ناوردای دوم عملکردی ضعیف‌تر از حدس تصادفی ($AUC < 0.5$) دارد.

Figure 11. Receiver Operating Characteristic (ROC) curves for the six investigated stress metrics in the 2003 Bam earthquake. The curves compare the performance of the metrics $\Delta CFS(\mu=0.4)$ ، $\Delta\tau_{max}$ ، $\sqrt{3}\Delta I_2$ ، ΔI_1 ، ΔI_2 ، and ΔI_3 in classifying cells with and without aftershocks. In this earthquake, the Maximum Shear Stress and Von Mises metrics, with AUC around 0.85, show the best performance. It is noteworthy that the first invariant also performed relatively well ($AUC = 0.73$) in this specific case, while the Second Invariant performed worse than random guessing ($AUC < 0.5$).

جدول ۱- مقایسه مقادیر AUC معیارهای تنش برای سه زمین‌لرزه. معیارهای بیشینه تنش برشی و فون میزس با بالاترین مقادیر بهتر از سایر معیارها عمل کرده‌اند.

Table 1. Comparison of AUC values for the stress metrics for three earthquakes. The Maximum Shear Stress and Von Mises metrics performed better than the other metrics with the highest values.

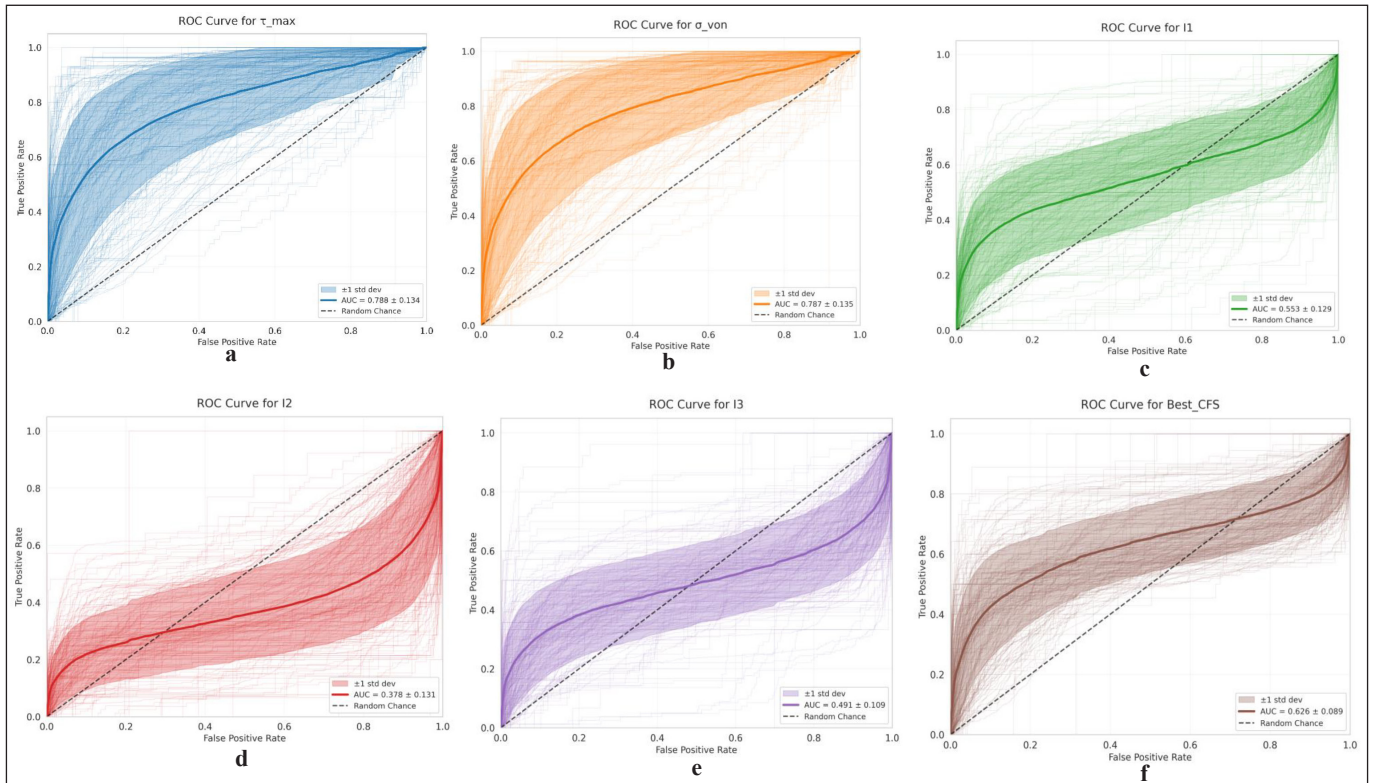
ΔI_3	ΔI_2	ΔI_1	$\sqrt{3}\Delta I_2$	$\Delta\tau_{max}$	ΔCFS	Number of aftershocks	Earthquake
0.551	0.614	0.357	0.848	0.852	0.614	58	1978 $M_w=7.1$ Tabas earthquake
0.492	0.261	0.588	0.866	0.865	0.618	63	1997 $M_w=7.2$ Zirkuh earthquake
0.499	0.344	0.730	0.854	0.855	0.571	36	2003 $M_w=6.5$ Bam earthquake

(شکل‌های ۱۲- c تا e). نمودارهای شکل ۱۲ به صورت تجمیعی و با در نظرگیری عدم قطعیت‌های آماری، برتری قطعی معیارهای بیشینه تنش برشی و فون میزس را در پیش‌بینی الگوهای مکانی پس‌لرزه تایید می‌کنند. مطالعات موردی زلزله‌های منفرد نیز تقریباً تاییدکننده روندهای سراسری هستند.

در ادامه با توجه به نتایج رتبه‌بندی عملکرد معیارهای تنش، الگوهای مکانی ۳ معیار تنش یعنی بیشینه تنش برشی، معیار فون میزس و تنش شکست کولمب برای ۲ نوع گسلش امتدادلغز راست گرد و شیب‌لغز معکوس شبیه‌سازی می‌شود. شکل ۱۳ الگوهای مکانی معیارهای تنش را برای حالت مرجع شبیه‌سازی شده ایده‌آل یک زمین‌لرزه با لغزش یکنواخت ۱ متر بر روی یک گسل امتدادلغز راست گرد به طول ۶۰ کیلومتر (بزرگی گشتاوری $M_w \approx 7.0$) نشان می‌دهد. برآورد موقعیت مکانی براساس معیار تنش شکست کولمب برای این گسل امتدادلغز ایده‌آل، خطر کم پس‌لرزه‌ها را در مجاورت صفحه گسیختگی زمین‌لرزه اصلی و خطر زیاد را در بخش‌هایی (لوب‌هایی) که از انتهای صفحه گسیختگی زمین‌لرزه اصلی امتداد دارند، تعیین می‌کند (شکل ۱۳- a). در مقابل، برآورد مبتنی بر بیشینه تنش برشی و معیار فون میزس نشان می‌دهد که خطر پس‌لرزه می‌تواند از گسل اصلی زمین‌لرزه در همه جهات افزایش یابد (شکل‌های ۱۳- b و c).

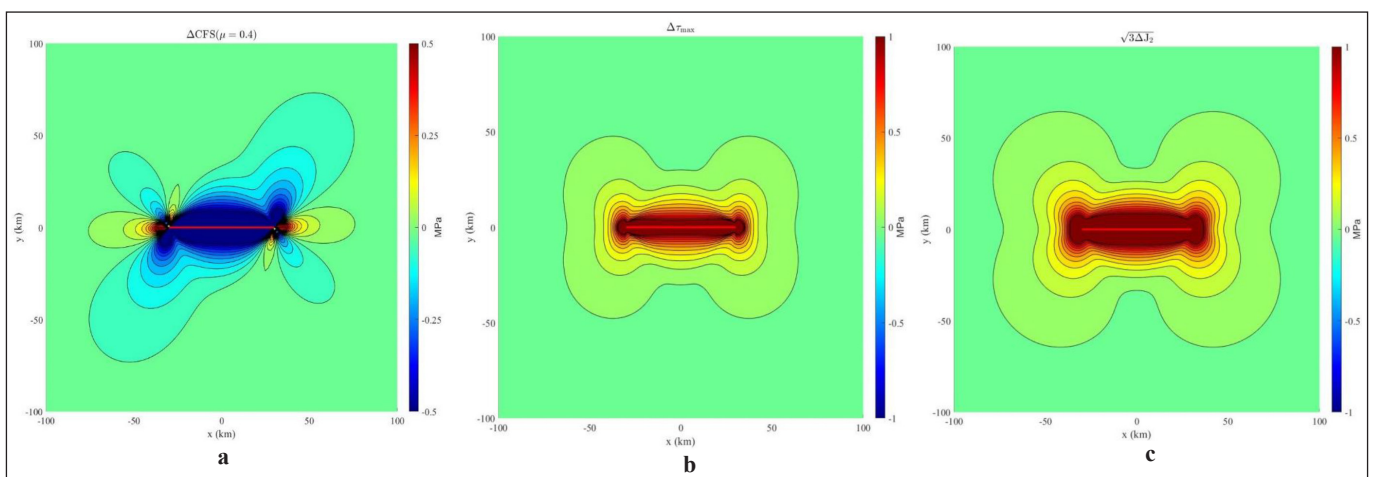
۳-۱- رتبه‌بندی عملکرد معیارهای تنش

با ترکیب هر جفت معیار توزیع لغزش-تنش برای تمام توزیع‌های لغزش و محاسبه مقادیر AUC ادغام‌شده (A_m)، توانایی کلی تمایز ۶ معیار تنش از بهترین عملکرد تا بدترین عملکرد رتبه‌بندی می‌شود. مطابق شکل ۱۲ فاصله اطمینان 1σ نیز برای هر معیار تنش به صورت نواحی سایه‌دار اطراف هر منحنی ترسیم شده است. هر منحنی اصلی که با خط ضخیم ترسیم شده است از ادغام نتایج حاصل از ۱۹۹ توزیع لغزش تشکیل شده است. مطابق شکل‌های ۱۲- a و b عملکرد برتر معیارهای مستقل از گیرنده، یعنی بیشینه تنش برشی ($AUC = 0.788$) و فون میزس ($AUC = 0.787$)، آشکارا با قرارگیری منحنی‌های آن‌ها در بالاترین موقعیت و داشتن بزرگ‌ترین مقادیر AUC قابل مشاهده است. فواصل اطمینان این دو معیار، که کاملاً در محدوده عملکرد برتر قرار دارد، نشان‌دهنده پایداری آماری بالا و قابلیت اطمینان این برآوردها در مقیاس جهانی است. تنش شکست کولمب در رتبه دوم ($A_m = 0.626$) قرار دارد (شکل ۱۲- f). مقادیر AUC ادغام‌شده شکاف عملکردی شایان توجه ۰/۱۶۱+ برای بیشینه تنش برشی و ۰/۱۶۲+ برای تنش فون میزس در مقایسه با ΔCFS را نشان می‌دهد. ناوردای اول تانسور تنش در رتبه چهارم ($A_m = 0.553$)، ناوردای سوم در رتبه پنجم ($A_m = 0.491$) و ناوردای دوم در رتبه ششم ($A_m = 0.378$) قرار دارند



شکل ۱۲- مقایسه عملکرد کلی معیارهای تنش با منحنی‌های ویژگی عملکرد گیرنده (ROC) ادغام‌شده. این شکل منحنی‌های ویژگی عملکرد گیرنده (ROC) ادغام‌شده را برای ۶ معیار تنش (a) $\Delta CFS(\mu=0.4)$ ، (b) $\Delta\tau_{max}$ ، (c) $\sqrt{3}\Delta I_2$ ، (d) ΔI_1 ، (e) ΔI_2 و (f) ΔI_3 به همراه فاصله اطمینان 1σ (نواحی سایه‌دار اطراف هر منحنی) نشان می‌دهد. هر منحنی اصلی (خطوط ضخیم) از ادغام نتایج حاصل از توزیع لغزش تشکیل شده است. عملکرد برتر معیارهای مستقل از گیرنده، یعنی بیشینه تنش برشی و فون میزس، با قرارگیری منحنی‌های آن‌ها در بالاترین موقعیت و داشتن بزرگ‌ترین مقادیر AUC آشکار است.

Figure 12. Comparison of the overall performance of stress metrics using aggregated Receiver Operating Characteristic (ROC) curves. This figure shows the aggregated ROC curves for the six stress metrics a) $\Delta CFS(\mu=0.4)$, b) $\Delta\tau_{max}$, c) $\sqrt{3}\Delta I_2$, d) ΔI_1 , e) ΔI_2 , and f) ΔI_3 , along with the 1σ confidence interval (shaded areas around each curve). Each main curve (thick lines) is composed of aggregated results from 199 slip distributions. The superior performance of the receiver-independent metrics, namely Maximum Shear Stress and Von Mises, is evident from their curves being in the highest position and having the largest AUC values.



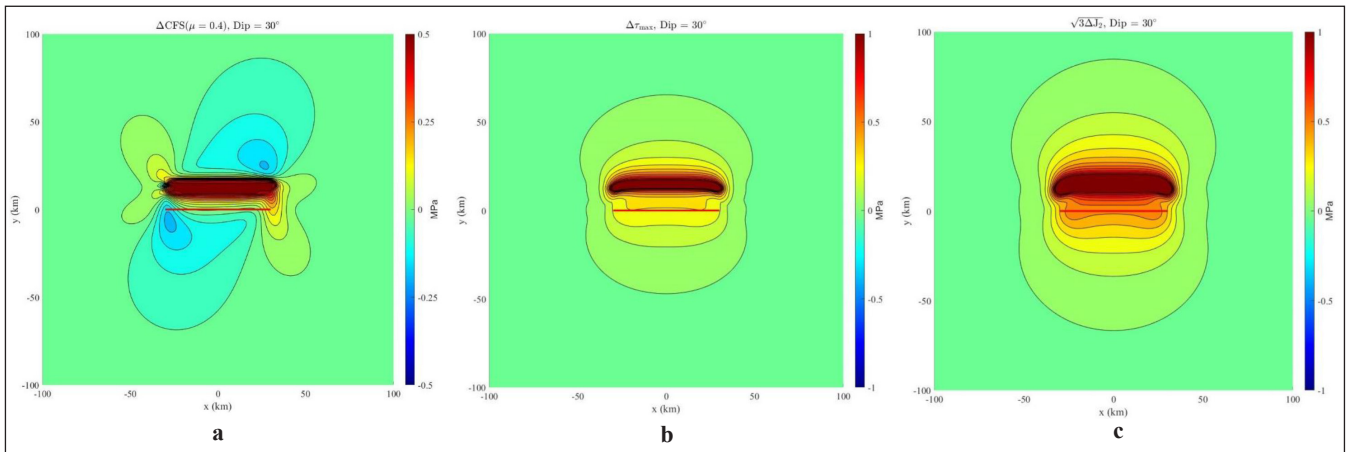
شکل ۱۳- مقایسه عملکرد. a تا c) برای یک حالت شبیه‌سازی از یک گسل امتدادلغز راست گرد به طول ۶۰ کیلومتر (خطوط قرمز) در ژرفای ۱۰ کیلومتری، مقایسه‌ای از الگوهای مکانی (a) $\Delta CFS(\mu=0.4)$ ، (b) $\Delta\tau_{max}$ و (c) $\sqrt{3}\Delta I_2$ ، میانگین‌گیری شده در امتداد گسل نشان داده شده است.

Figure 13. Performance comparison. a to c), for a simulated case of a 60 km long right-lateral strike-slip fault (red lines) at a depth of 10 km, a comparison of the spatial patterns of a) $\Delta CFS(\mu=0.4)$, b) $\Delta\tau_{max}$ and c) $\sqrt{3}\Delta I_2$, averaged along the fault, is shown.

مبتنی بر بیشینه تنش برشی و معیار فون میزس نشان می‌دهد که خطر پس‌لرزه می‌تواند از گسل اصلی زمین‌لرزه در همه جهات، به‌ویژه روی تصویر سطحی گسل افزایش یابد (شکل‌های ۱۴- b و c).

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان می‌دهند که برآورد مبتنی بر بیشینه تنش برشی و معیار فون میزس با ایده سایه‌های تنش کاملاً تعریف‌شده بلافاصله در مجاورت زلزله اصلی چه در حالت امتدادلغز و چه در حالت شیب‌لغز سازگار نیست.

مطابق شکل ۱۴، الگوهای مکانی معیارهای تنش برای حالت مرجع شبیه‌سازی شده ایده‌آل یک زمین‌لرزه با لغزش یکنواخت ۱ متر بر روی یک گسل شیب‌لغز معکوس به طول ۶۰ کیلومتر نشان داده شده است. برآورد موقعیت مکانی براساس معیار تنش شکست کولمب برای این گسل شیب‌لغز ایده‌آل، خطر کم پس‌لرزه‌ها را در روی تصویر سطحی صفحه گسیختگی زمین‌لرزه اصلی و خطر زیاد را در بخش‌هایی (لوب‌هایی) که از انتهای صفحه گسیختگی زمین‌لرزه اصلی امتداد دارند، و در انتهای پایینی تصویر سطحی تعیین می‌کند (شکل ۱۴- a). در مقابل، برآورد



شکل ۱۴- مقایسه الگوهای مکانی معیارهای تنش. (a-c) مشابه شکل ۱۳ (a-13-c)، ولی برای یک زمین‌لرزه رانشی ایده‌آل. شیب صفحه گسل ۳۰ درجه به سمت شمال است و خط قرمز اثر سطحی گسل است. ژرفای نشان داده شده ۱۰ کیلومتر است.

Figure 14. Comparison of spatial patterns of stress metrics. a-c), similar to Fig. 13 (a- c), but for an ideal thrust earthquake. The fault plane dips 30 degrees to the north and the red line is the surface trace of the fault. The depth shown is 10 km.

۴- بحث

سایر منابع تغییر تنش ممکن است بر مکان‌های پس‌لرزه تاثیر بگذارد، اما احتمالاً کنترل‌کننده‌های اصلی نیستند.

همچنین، باید به این نکته اشاره کرد که ملاحظات مربوط به سرعت محاسبات و قابلیت اجرای آنی (Real-time) نیز در انتخاب چارچوب این پژوهش نقش داشته است. یکی از اهداف کاربردی این مطالعه، ارائه معیارهایی است که بتوانند بلافاصله پس از رخداد یک زمین‌لرزه اصلی برای برآورد سریع و عملیاتی خطر پس‌لرزه به کار گرفته شوند. در چنین شرایطی، دسترسی به سازوکار دقیق تمامی پس‌لرزه‌ها (برای محاسبه ΔCFS واقعی) با تاخیر زمانی شایان توجهی همراه است و در لحظه رخداد در دسترس نیست. در مقابل، معیارهای مستقل از گیرنده مانند بیشینه تنش برشی و فون میزس و همچنین محاسبه ΔCFS بر اساس میانگین جهت‌گیری گسل اصلی، تنها به مدل گسیختگی زمین‌لرزه اصلی متکی هستند و می‌توانند در کمترین زمان ممکن محاسبه و ارائه شوند. بنابراین، چهارچوب به کار گرفته شده در این پژوهش، با در نظرگیری تعادل بهینه بین دقت و کارایی محاسباتی برای اهداف عملیاتی برآورد نزدیک به آنی، انتخاب شده است. این چهارچوب محاسباتی تنها به یک مدل اولیه از گسیختگی گسل اصلی متکی است و می‌تواند بلافاصله پس از وقوع یک زمین‌لرزه بزرگ در سامانه‌های هشدار سریع ادغام شود.

این نتایج به توصیه‌های عملی برای عملیات خطر لرزه‌ای تبدیل می‌شوند: سیستم‌های برآورد عملیاتی، مانند سیستم برآورد پس‌لرزه مبتنی بر نقشه لرزه‌ای USGS (STEP)، باید فوراً محاسبات بیشینه تنش برشی و یا فون میزس را در گردش کار خود ادغام کنند تا دقت مکانی ارزیابی‌های سریع خطر پس‌لرزه را افزایش دهند؛

اگرچه تنش شکست کلاسیک کولمب به‌طور گسترده برای چندین دهه در مطالعات چکانش زمین‌لرزه مورد استفاده قرار گرفته است (King et al., 1994)، این کمیت را می‌توان برای تمایز بین سلول‌های شبکه‌ای با و بدون پس‌لرزه با دقت بیشتری نسبت به تخصیص تصادفی تنها در ۵۱ تا ۶۴ درصد از ۱۹۹ توزیع لغزش مورد استفاده قرار داد. بیشینه تنش برشی و معیار تسلیم فون میزس به‌طور مداوم و شایان توجهی بهتر از یک طبقه‌بندی‌کننده تصادفی عمل می‌کنند. به‌طور کلی، این نتیجه قویاً نشان می‌دهد که بیشینه تنش برشی و معیار تسلیم فون میزس باید در مطالعات آنی مربوط به چکانش زمین‌لرزه و انتقال تنش در نظر گرفته شوند.

البته، تعدادی فرضیات ساده‌سازی ضمنی در این تحلیل وجود دارد. منابع تنش وابسته به زمان را که می‌توانند بر توزیع مکانی پس‌لرزه‌ها در طول زمان تاثیر بگذارند، مانند چکانش ثانویه پس‌لرزه (Meier et al., 2014)، تغییرات تنش پویا (Felzer and Brodsky, 2005, 2006; Kilb et al., 2000; van der Elst and Brodsky, 2010)، یا تغییرات تنش پس‌لرزه‌ای (Pollitz and Sacks, 2002)، در نظر گرفته نشده است. تغییرات تنش پویا برای توضیح مکان‌های پس‌لرزه بلافاصله (کمتر از ۱ هفته) پس از لرزه‌های اصلی بزرگ مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Prejean et al., 2004)، در حالی که تغییرات تنش گران‌روی کشسان و ایجاد پس‌لرزه ثانویه ممکن است در مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر (روز-سال) مهم باشند (Lorenzo-Martin et al., 2006; Pollitz and Sacks, 2002; To et al., 2004). با این حال، توانایی تشخیص مقادیر تغییر تنش ایستا از جمله بیشینه تنش برشی و معیار تسلیم فون میزس ناشی از زلزله‌های اصلی به تنهایی نشان می‌دهد که اگرچه

سوم، عملکردی نزدیک یا به طور شایان توجهی پایین تر از سطح طبقه‌بندی تصادفی داشتند. بیشتر شدن مقدار AUC مربوط به یک معیار تنش در مورد بک زمین لرزه خاص را می‌توان به تاثیر بیشتر آن معیار در چکانش پس‌لرزه‌ها برای آن زمین لرزه خاص تعبیر کرد.

این مطالعه با وجود دستاوردهای یادشده، از چند محدودیت عمده برخوردار است. نخست، تمرکز اصلی این پژوهش بر تغییرات تنش ایستا بوده و اثرات تغییرات تنش پویا، تغییرات تنش ناشی از پس‌لرزه‌های بزرگ ثانویه، و فرایندهای وابسته به زمان مانند تغییرات تنش گرانروی کشسان در نظر گرفته نشده‌اند. دوم، مدل‌های توزیع لغزش به کاررفته از پایگاه داده SRCMOD ممکن است با عدم قطعیت‌هایی در پارامترهای منبع و هندسه گسل همراه باشند که بر دقت میدان‌های تنش محاسبه‌شده تاثیر می‌گذارد. سوم، فرض جهت‌گیری متوسط صفحه گسل برای محاسبه معیارهای وابسته به گیرنده مانند (ΔCFS) می‌تواند با واقعیت سازوکار گسل‌های محلی تفاوت داشته باشد. همچنین، استفاده از یک پنجره ثابت مکانی ($5 \times 10 \times 10$ کیلومتر) و زمانی (یک سال) برای تمام زمین‌لرزه‌ها ممکن است سبب شود تا برخی از رویدادهای دورافتاده یا با تاخیر زمانی طولانی تر در تحلیل در نظر گرفته نشوند. در نهایت، اگرچه از مجموعه‌داده‌ای گسترده استفاده شده، اما ممکن است تنوع محیط‌های زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی به طور کامل پوشش داده نشده باشد.

بر اساس یافته‌های این پژوهش و به منظور تعمیق بیشتر نتایج، بررسی تاثیر دقت سازوکار گیرنده بر کارایی معیارهای تنش، به عنوان یک مسیر پژوهشی آینده پیشنهاد می‌شود. در این راستا، می‌توان عملکرد ΔCFS محاسبه‌شده بر اساس سازوکارهای واقعی پس‌لرزه‌ها را با ΔCFS مبتنی بر جهت‌گیری میانگین گسل اصلی که در این پژوهش به کار گرفته شد به صورت سامانه‌مند مقایسه کرد. چنین تحلیلی نه تنها میزان حساسیت ΔCFS به عدم قطعیت‌های مربوط به صفحه گیرنده را به طور تجربی کمی‌سازی می‌کند، بلکه قدرت واقعی معیارهای مستقل از گیرنده مانند بیشینه تنش برشی و فون‌میزس را در شرایطی که داده‌های ایده‌آل در دسترس هستند، محک می‌زند. انتظار می‌رود این مقایسه، برتری ذاتی معیارهای مستقل از گیرنده را حتی آشکارتر سازد و مبنای محکم‌تری برای اولویت‌بندی آن‌ها در مدل‌های عملیاتی آبی فراهم آورد.

تحقیقات آینده بایستی بر توسعه مدل‌های ترکیبی که مبنای فیزیکی بیشینه تنش برشی و فون‌میزس را با قابلیت‌های تشخیص الگوی یادگیری ژرف برای برآوردهای آبی و با وضوح بالا ترکیب می‌کنند، تمرکز کنند.

تیم‌های واکنش اضطراری باید از نقشه‌های خطر بیشینه تنش برشی برای اولویت‌بندی بازرسی‌ها و تخصیص منابع در مناطق پرخطر بلافاصله پس از زلزله‌های بزرگ استفاده کنند؛ و شبکه‌های پایش ژئوفیزیکی باید به طور استراتژیک کرنش‌سنج‌ها را در مناطقی که با بیشینه تنش برشی بالا پس از زلزله‌های اصلی شناسایی شده‌اند، مستقر کنند تا فرایندهای تغییر شکل بحرانی را ثبت کنند.

۵- نتیجه‌گیری

برآوردهای دقیق مکانی پس‌لرزه‌ها برای برنامه‌ریزی فعالیت‌های نجات و کاهش ریسک مهم هستند. بنابراین، مدل‌های برآورد مختلف باید پیش از کاربرد در موارد واقعی، به دقت آزمایش شوند. رخداد آن‌ها عمدتاً به تغییرات تنش ایستای ناشی از زلزله اصلی مربوط می‌شود، اگرچه اثرات دیگری مانند فرایندهای پویا یا پس‌لرزه‌ای و تغییرات مقاومت گسل نیز می‌توانند نقش مهمی ایفا کنند.

تغییرات تنش شکست کولمب ناشی از تک زمین‌لرزه‌های اصلی اغلب برای توضیح مکان پس‌لرزه‌های بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌رغم استفاده از محاسبات تنش شکست کولمب برای چندین دهه، کاربرد آن توسط مطالعات اخیر مورد تردید قرار گرفته و نشان داده شده است که در برآورد پس‌لرزه‌ها، سایر معیارهای نرده‌ای تنش و روش‌های پیشرفته مانند شبکه عصبی عمیق عملکرد بهتری دارند. با استفاده از تحلیل ویژگی عملکرد گیرنده (ROC)، توانایی پنج جایگزین برای تغییر تنش شکست کولمب جهت تمایز مابین مناطق با و بدون پس‌لرزه برای ۱۹۹ زمین‌لرزه اصلی مختلف در سراسر جهان (توزیع لغزش) ارزیابی و مقایسه شد.

تحلیل‌های پژوهش اخیر در برآوردهای دودویی منطقه پس‌لرزه نشان داد که رویکرد کلاسیک محاسبه ΔCFS بهترین روش نیست و معیارهای نرده‌ای تنش مستقل از گیرنده از جمله بیشینه تنش برشی و معیار فون‌میزس عملکرد بهتری دارند و پیاده‌سازی آن‌ها نشان‌دهنده پیشرفت شایان توجهی به سمت ارزیابی خطر لرزه‌ای عملیاتی مبتنی بر فیزیک با پتانسیل نجات جان انسان‌ها و کاهش خسارات اقتصادی در سطح جهانی است. این مطالعه با نشان دادن اینکه معیارهای تنش مستقل از گیرنده، به ویژه بیشینه تنش برشی و فون‌میزس، برآوردهای برتر، سازگار از نظر فیزیکی و کارآمد از نظر محاسباتی را برای مکان‌های پس‌لرزه در مقایسه با نظریه کلاسیک شکست کولمب ارائه می‌دهند، به یک بحث طولانی مدت در این مورد پایان می‌دهد. به‌دست آمدن مقادیر بزرگ AUC برای بیشینه تنش برشی نشان‌دهنده سازوکارهای چکانش چیره برشی است. از طرفی ناوردهای تانسور تنش، به ویژه ناوردهای دوم و

References

- Asayesh B. M., Zafarani H., Hainzl S., Sharma S., 2023. Effects of large aftershocks on spatial aftershock forecasts during the 2017–2019 western Iran sequence, *Geophysical Journal International*, 232(1), 147–161, doi: 10.1093/gji/ggac333.
- Asayesh, B. M., Zafarani, H., and Tatar, M., 2020. Coulomb stress changes and secondary stress triggering during the 2003 (Mw 6.6) Bam (Iran) earthquake. *Tectonophysics*, 775, 228304.
- Bath, M., 1965. Lateral inhomogeneities in the upper mantle, *Tectonophysics*, 2, 483 – 514.
- Berberian, M., 1982. Aftershock tectonics of the 1978 Tabas-e-Golshan (Iran) earthquake sequence: a documented active ‘thin- and thick-skinned tectonic’ case. *Geophysical Journal International*, 68(2), 499-530.
- Cohee, B. P., and Beroza, G. C., 1994. Slip distribution of the 1992 Landers earthquake and its implications for earthquake source mechanics. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(3), 692–712.

- Deng, J., and Sykes, L. R., 1996. Triggering of 1812 Santa Barbara earthquake by a great San Andreas shock: Implications for future seismic hazards in southern California. *Geophysical Research Letters*, 23, 1155–1158. doi: 10.1029/96GL00738.
- Deng, J., and Sykes, L. R., 1997a. Evolution of the stress field in southern California and triggering of moderate-size earthquakes: A 200-year perspective. *Journal of Geophysical Research*, 102, 9859–9886. doi: 10.1029/96JB03897.
- Deng, J., and Sykes, L. R., 1997b. Stress evolution in southern California and triggering of moderate-, small-, and micro-size earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 102, 24,411–24,435. doi: 10.1029/97JB02127.
- DeVries, P.M., Vi'egas, F., Wattenberg, M. and Meade, B.J., 2018. Deep learning of aftershock patterns following large earthquakes, *Nature*, 560(7720), 632–634.
- Fawcett, T., 2006. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861–874. doi: 10.1016/j.patrec.2005.10.010.
- Felzer, K. R., and Brodsky, E. E., 2005. Testing the stress shadow hypothesis. *Journal of Geophysical Research*, 110, B05S09. doi: 10.1029/2004JB003277
- Felzer, K. R., and Brodsky, E. E., 2006. Decay of aftershock density with distance indicates triggering by dynamic stress. *Nature*, 441(7094), 735–738. doi: 10.1038/nature04799.
- Freed, A. M., 2005. Earthquake triggering by static, dynamic, and postseismic stress transfer. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33 (1), 335–367. doi: 10.1146/annurev.earth.33.092203.122505.
- Gheitanchi, M. R., and Raeesi, M., 2004. Analysis of the 1997 Zirkuh (Ghean-Birjand) aftershock sequence in east-central Iran. *Acta Seismologica Sinica*, 17(1), 38-46.
- Hainzl, S., Enescu, B., Cocco, M., Woessner, J., Catali, F., Wang, R., and Roth, F., 2009. Aftershock modeling based on uncertain stress calculations. *Journal of Geophysical Research*, 114, B05309. doi: 10.1029/2008JB006011.
- Hainzl, S., Zoller, G. and Wang, R., 2010. Impact of the receiver fault distribution on aftershock activity, *J. geophys. Res.*, 115(B5), doi:10.1029/2008JB006224.
- Hardebeck, J. L., Nazareth, J. J., and Hauksson, E., 1998. The static stress change triggering model: Constraints from two southern California aftershock sequences. *Journal of Geophysical Research*, 103, 24,427–24,437. doi: 10.1029/98JB00573.
- Hardebeck J. L., Llenos A. L., Michael A. J., Page M. T., Schneider M. and Elst N. J., 2024. Aftershock Forecasting, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 52, 61-84, doi: 10.1146/annurev-earth-040522-102129.
- Harris, R.A. and Simpson, R.W., 1992. Changes in static stress on southern California faults after the 1992 Landers earthquake, *Nature*, 360(6401), 251–254.
- Harris, R. A., and Simpson, R. W., 2002. The 1999 Mw 7.1 Hector mine, California, earthquake: A test of the stress shadow hypothesis? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(4), 1497–1512.
- Hartzell, S., and C. Mendoza. 1991. Application of an Iterative Least-Squares Wave-Form Inversion of Strong-Motion and Teleseismic Records to the 1978 Tabas, Iran, Earthquake. *Bull. Seis. Soc. Am* 81(2), 305-331.
- Helmstetter, A., Kagan, Y. Y., and Jackson, D. D., 2005. Importance of small earthquakes for stress transfers and earthquake triggering.
- Jacques, E., King, G. C., Tapponnier, P., Ruegg, J. C., and Manighetti, I., 1996. Seismic activity triggered by stress changes after the 1978 events in the Asal Rift, Djibouti. *Geophysical Research Letters*, 23, 2481–2484. doi: 10.1029/96GL02261.
- Jaeger, J., Cook, N., and Zimmerman, R., 2007. *Fundamental of Rock Mechanics*. doi: 10.1017/CBO9780511735349.
- Jamalreyhani, M., Buyukakpinar, P., Cesca, S., Dahm, T., Sudhaus, H., Rezapour, M., Isken, M.P., Maleki Asayesh, B. and Heimann, S., 2020. Seismicity related to the eastern sector of Anatolian escape tectonic: the example of the 24 January 2020 Mw 6.77 Elazığ-Sivrice earthquake, *Solid Earth Discuss.*, doi:10.5194/se-2020-55, 2020, 1–22.
- Kagan, Y. Y., and Jackson, D. D., 1998. Spatial aftershock distribution: Effect of normal stress. *Journal of Geophysical Research*, 103, 24,453–24,467. doi: 10.1029/98JB00699.
- Kilb, D., Gombert, J., and Bodin, P., 2000. Triggering of earthquake aftershocks by dynamic stress. *Nature*, 408(6812), 570–574. doi: 10.1038/35046046/10/1038.
- King, G. C., Stein, R., and Lin, J., 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(3), 935–953.
- Lin, J. and Stein, R.S., 2004. Stress triggering in thrust and subduction earthquakes and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults, *J. geophys. Res.*, 109(B2), doi:10.1029/2003JB002607.

- Lorenzo-Martín, F., Roth, F., and Wang, R., 2006. Elastic and inelastic triggering of earthquakes in the North Anatolian Fault zone. *Tectonophysics*, 424(3-4), 271–289. doi: 10.1016/j.tecto.2006.03.046.
- Mai, P. M., and Thingbaijam, K. K. S., 2014. Srcmod: An online database of finite-fault rupture models. *Seismological Research Letters*, 85(6), 1348–1357.
- Mallman, E. P., and Zoback, M. D., 2007. Assessing elastic Coulomb stress transfer models using seismicity rates in southern California and southwestern Japan. *Journal of Geophysical Research*, 112, B03304. doi: 10.1029/2005JB004076.
- Meade, B. J., DeVries, P. M., Faller, J., Viegas, F., and Wattenberg, M., 2017. What is better than coulomb failure stress? A ranking of scalar static stress triggering mechanisms from 105 mainshock-aftershock pairs. *Geophysical Research Letters*, 44, 11–409. doi: 10.1002/2017GL075875.
- Meier, M. A., Werner, M. J., Woessner, J., and Wiemer, S., 2014. A search for evidence of secondary static stress triggering during the 1992 Mw 7.3 Landers, California, earthquake sequence. *Journal of Geophysical Research*, 119, 3354–3370. doi: 10.1002/2013JB010385.
- Mignan, A., and Broccardo, M., 2019. One neuron versus deep learning in aftershock prediction. *Nature*, 574(7776), E1–E3.
- Nikkhoo M., Walter T. R., 2015. Triangular dislocation: an analytical, artefact-free solution, *Geophysical Journal International*, 201(2), 1119–1141. doi: 10.1093/gji/ggv035.
- Nostro, C., Cocco, M., and Belardinelli, M. E., 1997. Static stress changes in extensional regimes: An application to southern Apennines (Italy). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(1), 234–248.
- Parsons, T., Stein, R. S., Simpson, R. W., and Reasenber, P. A., 1999. Stress sensitivity of fault seismicity: A comparison between limited-offset oblique and major strike-slip faults. *Journal of Geophysical Research*, 104, 20,183–20,202. doi: 10.1029/1999JB900056.
- Poiata, N., Miyake, H., Koketsu, K., and Hikima, K., 2012. Strong Motion and Teleseismic Waveform Inversions for the Source Process of the 2003 Bam, Iran, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(4), 1477-1496.
- Pollitz, F. F., and Sacks, I. S., 2002. Stress triggering of the 1999 Hector Mine earthquake by transient deformation following the 1992 Landers earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(4), 1487–1496. doi: 10.1785/0120000918.
- Prejean, S. G., Hill, D. P., Brodsky, E. E., Hough, S. E., Johnston, M. J. S., Malone, S. D., ... Richards-Dinger, K. B., 2004. Remotely triggered seismicity on the United States west coast following the Mw 7.9 Denali fault earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(6B), S348–S359.
- Reasenber, P. A., and Simpson, R. W., 1992. Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake. *Science*, 255(5052), 1687–1690. doi: 10.1126/science.255.5052.1687.
- Segou, M., and Parsons, T., 2020. A new technique to calculate earthquake stress transfer and to probe the physics of aftershocks, *Bull. seism. Soc. Am.*, 110(2), 863–873.
- Sharma, S., Hainzl, S., Zoeller, G., and Holschneider, M., 2020. Is Coulomb stress the best choice for aftershock forecasting?, *J. geophys. Res.*, 125(9), doi: 10.1029/2020JB019553.
- Stea, S., Nalbant, S.S., McCloskey, J., Nostro, C., Scotti, O., and Baumont, D., 2005. Onto what planes should Coulomb stress perturbations be resolved?, *J. geophys. Res.*, 110(B5), doi:10.1029/2004JB003356.
- Stein, R. S., Barka, A. A., and Dieterich, J. H., 1997. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophysical Journal International*, 128(3), 594–604. doi: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb05321.x.
- Stramondo, S., Kyriakopoulos, C., Bignami, C., Chini, M., Melini, D., Moro, M., et al., 2011. Did the september 2010 (darfield) earthquake trigger the february 2011 (christchurch) event? *Scientific reports*, 1, 98.
- Sudhaus, H., Jönsson, S., 2011. Source model for the 1997 Zirkuh earthquake (Mw=7.2) in Iran derived from JERS and ERS InSAR observations. *Geophys. Jour. Intern.*, 185(2), 676-692.
- To, A., Bürgmann, R., and Pollitz, F., 2004. Postseismic deformation and stress changes following the 1819 Rann of Kachchh, India earthquake: Was the 2001 Bhuj earthquake a triggered event? *Geophysical Research Letters*, 31, L13609. doi: 10.1029/2004GL020220.
- Toda, S., Stein, R. S., Reasenber, P. A., Dieterich, J. H., and Yoshida, A., 1998. Stress transferred by the 1995 Mw = 6.9 Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities. *Journal of Geophysical Research*, 103, 24,543–24,565.

- Toda, S., 2008. Coulomb stresses imparted by the 25 March 2007 M w= 6.6 Noto-Hanto, Japan, earthquake explain its ‘butterfly’ distribution of aftershocks and suggest a heightened seismic hazard, *Earth, Planets Space*, 60(10), 1041–1046.
- Utsu, T., 1961, A statistical study on the occurrence of aftershocks. *Geophys. Mag.* 30, 521–605.
- van der Elst, N. J., and Brodsky, E. E., 2010. Connecting nearfield and far-field earthquake triggering to dynamic strain. *Journal of Geophysical Research*, 115, B07311. doi: 10.1029/2009JB006681.
- Zhijun L., Gege J., Hongmei Y., Chen C., Jiyong H., 2023. Aftershock predict based on convolution neural networks. *Academic Journal of Computing & Information Science*, 6(12), 90-96. doi: 10.25236/AJCIS.2023.061210.