Payame Noor University

Journal of Structural Geology and Applied Tectonics (SGAT)

***Journal homepage*: https://sgat.journals.pnu.ac.ir/**

GEOLOGICAL SOCIETY OF IRAN

Integrated Seismic Hazard Assessment in the Zagros Collision Zone: Synergizing Geomorphic Indices and Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)

Nahid Karbasian*[1] | Ali Beitollahi [2] | Ali Moradi[3] | Ali Sorbi[4]

1- Department of Earth Sciences, SR. C., Islamic Azad University, Tehran, Iran
2- Department of seismology of the housing and the urban development research center
3- Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran
4- Department of Geology, Karaj Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Keywords

EZ-Frisk,
Geomorphic Index,
Iat Index,
Kermanshah,
Logic Tree,
Seismic Hazard Mapping.

Extended Abstract

Introduction

Kermanshah Province, situated within the central part of the Zagros Fold-and-Thrust Belt, represents one of the most seismically volatile regions in the Middle East. The ongoing convergence between the Arabian and Eurasian plates has manifested in complex fault systems, most notably the Main Recent Fault (MRF) and the High Zagros Fault (HZF). The catastrophic 2017 Sarpol-e Zahab earthquake (Mw 7.3) underscored the vulnerability of this region and highlighted a critical gap in traditional hazard assessments: the discrepancy between historical seismic catalogs and long-term tectonic deformation. This study aims to bridge this gap by integrating morphotectonic indices with state-of-the-art Probabilistic Seismic Hazard Analysis (Karbassian et al., 2024), providing a multi-temporal perspective on seismic risk. The study area encompasses diverse structural zones, ranging from the Sanandaj-Sirjan zone in the northeast to the Simply Folded Belt in the southwest. The tectonic framework is dominated by NW-SE trending strike-slip and thrust faults. Geomorphologically, the region exhibits youthful topography, characterized by deeply incised valleys and active fold growth, which serve as surface expressions of deep-seated crustal shortening.

Methodology

This research employs a three-tiered integrated approach: Phase I: Morphometric Analysis; Using a 12.5m resolution Digital Elevation Model (DEM), six key geomorphic indices were calculated across 24 drainage basins: Asymmetry Factor (Af) to detect tectonic tilting. Hypsometric Integral (Hi) to evaluate the stage of landscape evolution.Stream Length-Gradient Index (Sl) to identify anomalies related to fault activity. Basin Shape Index (Bs) and Mountain Front Sinuosity (Smf).

Receive: 2026-04-30

Accepted: 2026-07-29

Published: 2026-10-23

*Corresponding Author: Nahid Karbasian; E-mail: nahid.karbasian@iau.ac.ir

How to cite this article: Karbasian, N., Beitollahi, A., Moradi, A., & Sorbi, A. (2026). Integrated Seismic Hazard Assessment in the Zagros Collision Zone: Synergizing Geomorphic Indices and Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA). *Structural Geology and Applied Tectonics*, *1*(2): 37-48. DOI: 10.30473/sgat.2026.77875.1004

Copyright © 2026, by the author(s). Published by Payame Noor University, Tehran, Iran.This is an open access article under the CC BY 4.0 license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

These indices were synthesized into the Index of Relative Tectonic Activity (Iat), classifying the province into four classes from "Very High" to "Low" activity.

Phase II: Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA); A comprehensive seismic catalog was compiled, declustered, and analyzed for completeness. Using EZ-Frisk software, a Logic Tree framework was implemented to account for epistemic uncertainties in: Seismic source characterization (Area and Line sources).

Maximum Magnitude estimation. Ground Motion Prediction Equations (GMPEs) specifically calibrated for the Zagros region. Peak Ground Acceleration (PGA) values were calculated for a 475-year return period (10% probability of exceedance in 50 years).

Phase III: Geospatial Integration; The (Iat) and seismic (PGA) layers were overlaid using GIS-based spatial correlation analysis to identify "Critical Risk Zones."

Results and Discussion

The findings reveal a significant spatial correlation ($R > 0.82$) between high-activity morphotectonic classes and elevated seismic hazard parameters .

- Hotspot Identification: The Sarpol-e Zahab and Sahneh-Harsin regions emerged as the most critical zones. These areas exhibit Iat values < 1.5 (Class 1) and projected PGA values exceeding 0.38g
- Seismic Gaps: Several basins in the northern part of the province showed "Very High" morphotectonic activity despite a relative lack of recent large-magnitude earthquakes. This indicates a potential seismic gap where tectonic strain is accumulating, posing a high future risk.
- Anomalous Zones: In the Kermanshah plains, while morphometric indices suggested moderate activity (due to sediment burial), the PSHA results showed significant hazard levels, likely influenced by "Blind Faults" and local site amplification effects.

The integration of long-term geomorphic data with short-term seismic records provides a more robust validation for hazard maps. Traditional PSHA often relies heavily on historical catalogs, which may not capture the full seismic cycle of slow-moving or "sleeping" faults. By incorporating Iat values, this study proves that landscape signatures are reliable proxies for seismic potential. The high PGA values in the western parts of the province align perfectly with the deformation zones observed during the 2017 event, validating the predictive power of this integrated model. Furthermore, the results suggest that current building codes (e.g., Iranian Standard 2800) may need localized revisions in "Class 1" tectonic zones to ensure structural resilience against near-field ground motions.

Conclusions

This study provides a pioneering framework for seismic risk assessment in collision zones. The synergy between geomorphology and engineering seismology allows for the identification of hidden hazards that might be overlooked by conventional methods. The resulting integrated map serves as a vital tool for urban planning, disaster management, and the design of critical infrastructure in Kermanshah. Future research should incorporate GNSS strain rate data to further refine the geodetic coupling coefficients within the PSHA model.

نشریه زمین شناسی ساختاری و زمین ساخت کاربردی

https://sgat.journals.pnu.ac.ir

ارزیابی تلفیقی مخاطرات لرزه‌ای در گستره برخورد زاگرس: پیوند شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی و تحلیل احتمالی خطر لرزه‌ای (مطالعه موردی: استان کرمانشاه)

ناهید کرباسیان*[۱]، علی بیت الهی[۲]، علی مرادی[۳]، علی سربی[۴]

۱- گروه علوم زمین،واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران ، ایران
۲- گروه زلزله شناسی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران، ایران
۳- موسسه ژیوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران
۴- گروه زمین شناسی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

کلیدواژه‌ها

EZ-Frisk،
شاخص زمین ریختی،
شاخص Iat،
کرمانشاه،
درخت منطقی،
پهنه بندی مخاطرات لرزه ای

چکیده

استان کرمانشاه به عنوان بخشی از زاگرس، صحنه دگرشکلی‌ها و زمین‌لرزه‌های مخربی است که پایداری سکونتگاه‌ها را به چالش می‌کشد. هدف این پژوهش، تدوین مدلی جامع برای پهنه‌بندی مخاطرات لرزه‌ای از طریق واکاوی پیوند میان شواهد ریخت‌سنجی بلندمدت و پارامترهای جنبش زمین در راستای ارتقای تاب‌آوری شهری است. این تحقیق با روش تحلیلی-تطبیقی و رویکردی چندمعیاره انجام شده است. داده‌های شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) با نتایج تحلیل احتمالی خطر لرزه‌ای (PSHA) بر پایه مدل درخت منطقی تلفیق گردیدند. در این فرآیند، پارامترهای کاتالوگ لرزه‌خیزی با ویژگی‌های لیتولوژیکی و هندسه گسل‌ها تطبیق داده شده و شتاب بیشینه زمین (PGA) با روابط کاهندگی بومی برآورد شد. نتایج نشان می‌دهد توزیع خطر لرزه‌ای، تابعی مستقیم از «معماری زمین‌ساختی» زاگرس است. همبستگی فضایی بالایی میان مناطق با فعالیت ریختی شدید و شتاب مبنای فراتر از ۰/۳۵g مشاهده شد. یافته‌ها مشخص کرد ساختارهای سرپل‌ذهاب و صحنه، دارای انطباق حداکثری میان شواهد زمین‌ریختی کواترنری و توان لرزه‌زایی هستند. همچنین، شاخص‌های رودخانه‌ای موفق به شناسایی دگرشکلی‌های پنهان در نواحی با آرامش لرزه‌ای کاذب گردیدند. تحلیل‌های کمی نشان‌دهنده همبستگی ۸۰ درصدی میان شاخص فعالیت زمین‌ساختی و افزایش شتاب مبنا است. در گستره‌های بحرانی نظیر گسل صحنه، بیشینه شتاب زمین برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال، مقادیری بین ۰/۳۸g تا ۰/۴۲g را ثبت می‌کند که فراتر از استانداردهای پیشین است. این مدل تلفیقی، ضریب اطمینان ارزیابی را در نواحی با آرامش کاذب تا ۱۸ درصد افزایش می‌دهد. لذا، جایگزینی شتاب مبنای جدید در آیین‌نامه‌های طراحی استان کرمانشاه برای کاهش خطرپذیری لرزه‌ای پیشنهاد می‌گردد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۷
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۰۱

*نویسنده مسئول:
ناهید کرباسیان

رایانامه:
nahid.karbasian@iau.ac.ir

ارجاع به این مقاله: کرباسیان، ن؛ بیت الهی، ع؛ مرادی، ع؛ و سربی، ع. (۱۴۰۵). ارزیابی تلفیقی مخاطرات لرزه‌ای در گستره برخورد زاگرس: پیوند شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی و تحلیل احتمالی خطر لرزه‌ای (مطالعه موردی: استان کرمانشاه). *زمین شناسی ساختاری و زمین ساخت کاربردی*، ۱ (۲): ۴۸-۳۷.

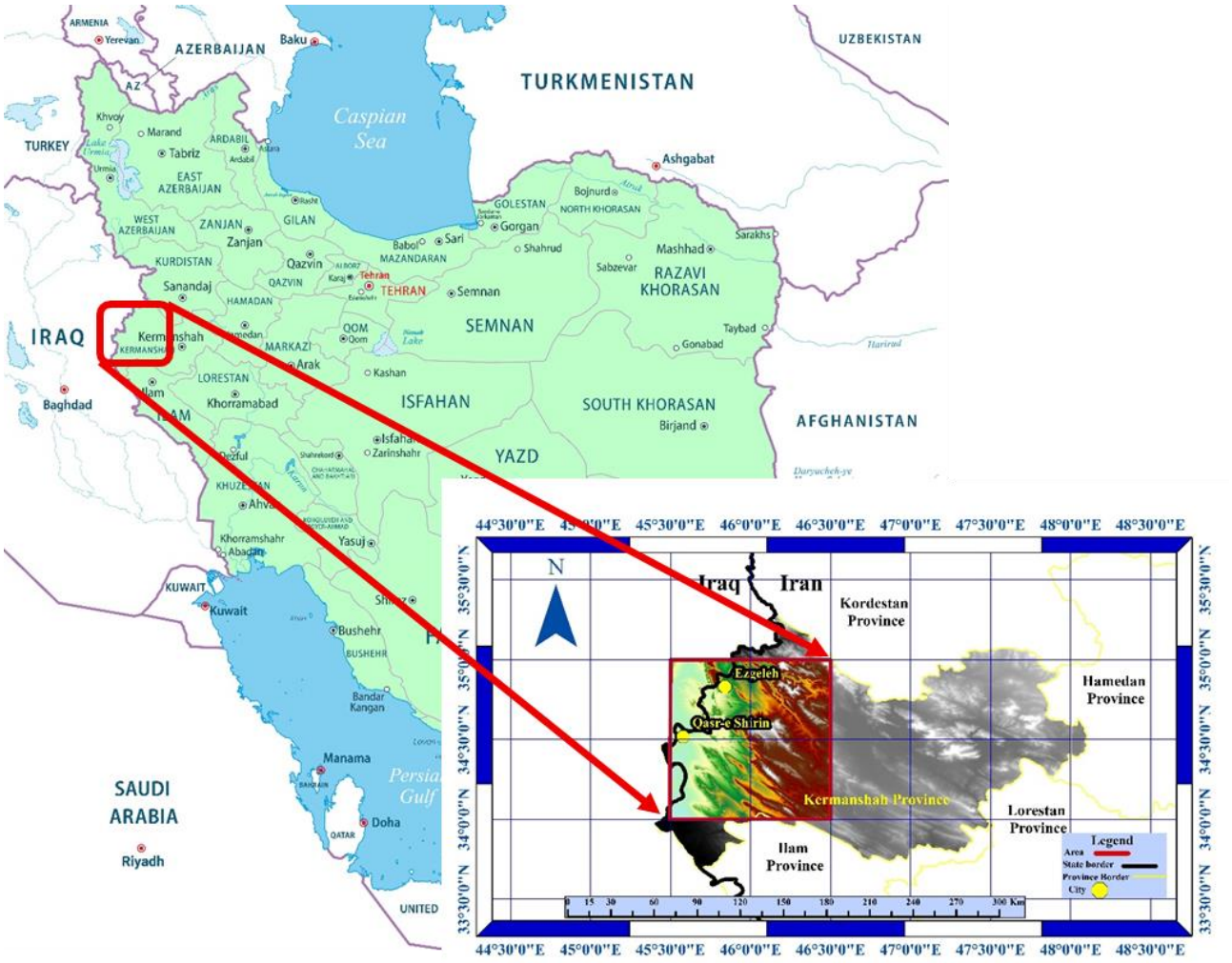
شناسه دیجیتال مقاله: 10.30473/sgat.2026.77875.1004

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است.

ناشر: دانشگاه پیام نور

مقدمه

تلفیق داده‌های ریخت‌زمین‌ساختی و تحلیل‌های احتمالی خطر لرزه‌ای، رویکردی نوین و ضروری در ارزیابی پویایی مناطق فعال تکتونیکی است. گستره برخورد زاگرس در غرب ایران، به دلیل نرخ بالای دگرشکلی و فعالیت لرزه‌خیزی قابل توجه، همواره کانون توجه پژوهش‌های لرزه‌زمین‌ساختی بوده است (Berberian, 1995; Stöcklin, 1974). استان کرمانشاه به عنوان بخشی از پهنه لرزه‌زمین‌ساختی زاگرس (شکل ۱)، به دلیل مجاورت با گسل‌های فعالی همچون گسل اصلی جوان (Main Recent Fault) و حضور تاقدیس‌های فعالی نظیر ازگله، از پتانسیل خطر بالایی برخوردار است (Izadi Kian, 2022; Mirzaei *et al.*, 1998) وقوع زمین‌لرزه مخرب ۲۱ آبان ۱۳۹۶ ازگله، بار دیگر ضرورت بازنگری در مدل‌های لرزه‌خیزی و پویایی ساختارهای این منطقه را برجسته ساخت (Islami *et al.*, 2017). نوآوری اصلی این پژوهش، همپوشانی نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی(مورفوتکتونیک) و نقشه‌های پهنه‌بندی PGA (حاصل از مطالعات لرزه‌خیزی) در محیط ArcGIS است.



شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig (1): The location of the study area

در دهه‌های اخیر، استفاده از شاخص‌های زمین ریختی به عنوان ابزاری کمّی، جهت شناسایی نواحی تحت دگرشکلی فعال، توسط محققان پیشرو گسترش یافته است (Bull, 1978; Keller, 1986; Strahler, 1952). این شاخص‌ها قادرند شواهد فعالیت‌های تکتونیکی کواترنری را که اغلب در سوابق لرزه‌خیزی کوتاه-مدت غایب هستند، آشکار سازند (El Hamdouni *et al.*, 2008). در همین راستا، کرباسیان و همکاران (۱۴۰۲) با بررسی بخش باختری استان کرمانشاه و محاسبه شاخص‌های زمین ریختی نظیر انتگرال فرازسنجی (Hi)، عدم تقارن حوضه زهکشی (Af)، پیچ‌وخم جبهه کوهستان (Smf)، پهنه‌بندی شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی را به انجام رساند.

از سوی دیگر، ارزیابی خطر لرزه‌ای به روش احتمالی (PSHA) که بر پایه کاتالوگ‌های لرزه‌ای یکنواخت (Mirzaei *et al.*, 1998; Shahvar *et al.*, 2013)) و روابط کاهندگی پیشرفته بنا شده است، دیدگاهی آماری از احتمال وقوع جنبش‌های نیرومند زمین به دست می‌دهد. همچنین با استفاده از نرم‌افزار EZ-Frisk، پارامترهای چشمه‌های لرزه‌ای کرمانشاه تحلیل شده و نقشه‌های شتاب بیشینه زمین (PGA) برای دوره‌های بازگشت مختلف ارائه شده اند (Karbasian *et al.*, 2024).

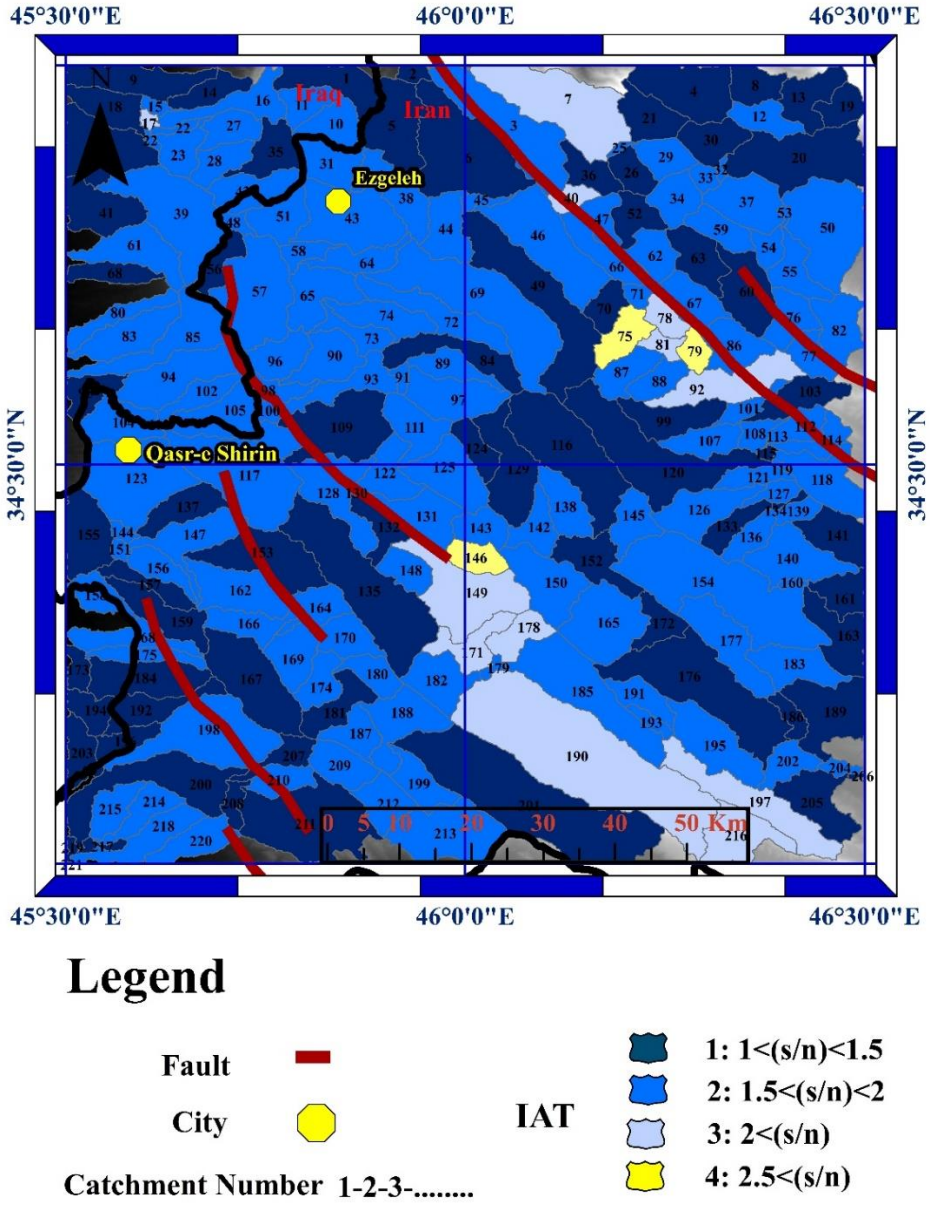
با این حال، همبستگی مستقیم میان نرخ فعالیت زمین‌ساختی استخراج شده از شواهد ریخت‌شناسی با پارامترهای آماری خطر لرزه‌ای در غرب کرمانشاه، مورد بررسی قرار نگرفته است. پژوهش حاضر، با هدف پر کردن این شکاف علمی، به دنبال تلفیق نتایج حاصل از تحلیل‌های زمین ریختی و مدل‌های احتمالاتی خطر لرزه‌ای است. این تحلیل، نه تنها به شناسایی دقیق‌تر گستره‌های پرخطر کمک می‌کند بلکه، همسویی میان نرخ دگرشکلی‌های ریخت‌شناسی بلندمدت و فعالیت‌های لرزه‌ای کوتاه‌مدت را در منطقه کرمانشاه مورد واکاوی قرار می‌دهد.

مواد و روش‌ها

روش‌شناسی این پژوهش، بر پایه تلفیق داده‌های حاصل از تحلیل‌های ریخت‌زمین‌ساختی و مدل‌سازی احتمالاتی خطر لرزه‌ای استوار است. فرآیند تحقیق در سه گام اصلی انجام شده است:

استخراج و تحلیل شاخص‌های زمین ریختی

در گام نخست، برای ارزیابی نرخ فعالیت زمین‌ساختی کواترنری، از متدولوژی ارائه شده توسط کرباسیان و همکاران (۱۴۰۲) استفاده شد. در این راستا، با بهره‌گیری از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) و نرم‌افزار ArcMap10.4.1، شاخص‌های کلیدی ریخت‌سنجی محاسبه گردیدند. این شاخص‌ها، شامل: انتگرال فرازسنجی (Hi) بر اساس روش Strahler (۱۹۵۲)، عدم تقارن حوضه زهکشی (Af) مطابق با مدل Cox (۱۹۹۴)، نسبت پهنای کف دره به ارتفاع آن (Vf)، پیچ و خم پیشانی کوهستان (Smf) و شکل حوضه (Bs) می‌باشند (Cox, 1994; Strahler, 1952). در نهایت، با تلفیق این پارامترها، شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) جهت طبقه‌بندی حوضه‌های آبریز منطقه، به چهار رده از فعالیت زمین‌ساختی نسبی (بسیار بالا تا پایین) بر پایه الگوی El Hamdouni و همکاران (۲۰۰۸) استخراج گردید (El Hamdouni *et al.*, 2008) (شکل ۲).



شکل (۲): رده بندی فعالیت های زمین‌ساختی نسبی در منطقه مورد مطالعه
Fig (2): Classification of relative tectonic activities in the study area

تحلیل احتمالی خطر لرزه‌ای (PSHA)

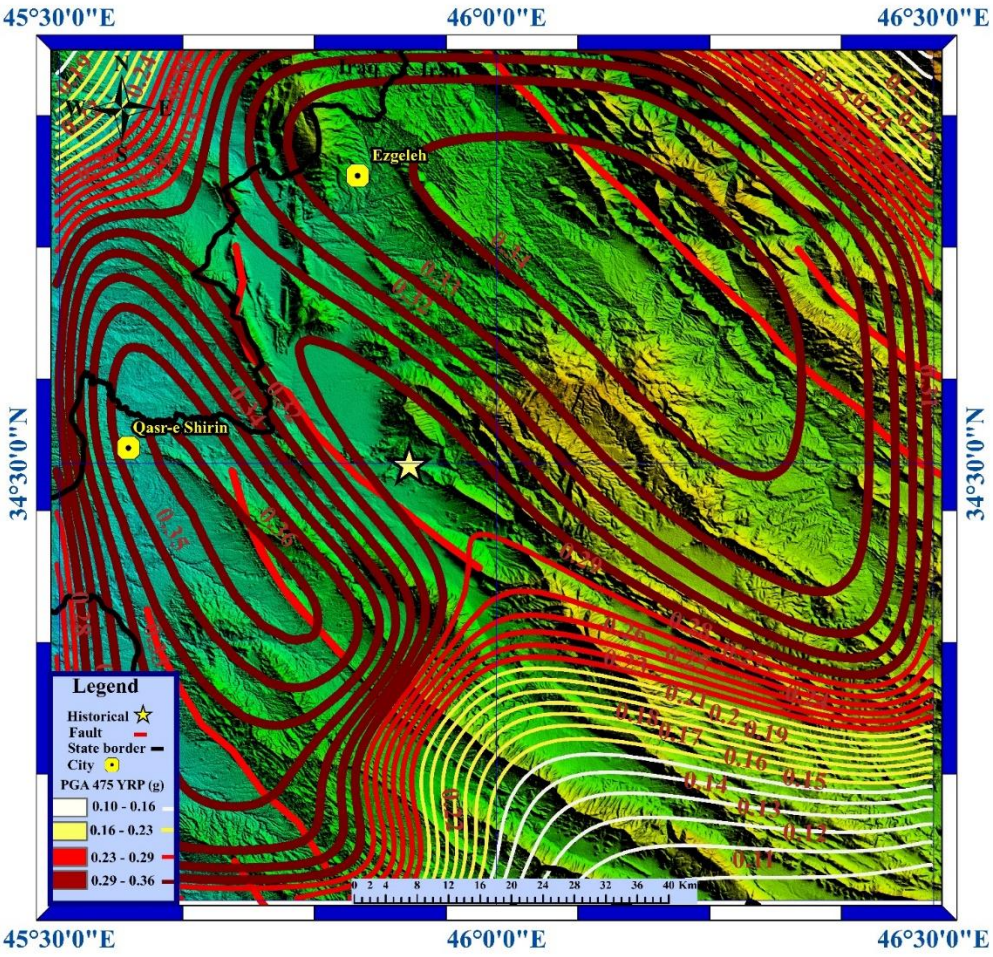
در گام دوم، پارامترهای جنبش نیرومند زمین بر اساس مدل توسعه‌یافته توسط کرباسیان و همکاران (۲۰۲۴) بازنگری شد (Karbasian *et al.*, 2024). روند کار شامل مراحل زیر بوده است:

- کاتالوگ لرزه‌خیزی: از کاتالوگ یکنواخت شده بر اساس بزرگای گشتاوری (Mw) با بهره‌گیری از منابع Shahvar و همکاران (۲۰۱۳) و Mirzaei و همکاران (۱۹۹۸) استفاده شد (Shahvar *et al.*, 2013; Mirzaei *et al.*, 1998). این کاتالوگ، مجموعه زمین لرزه های سال های ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۳ میلادی را در بر می گرفت.

- آنالیز آماری: برای حذف پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها از روش پنجره‌بندی Knopoff (۱۹۶۴) و برای تحلیل پارامترهای لرزه ای از نرم‌افزار Zmap (Wiemer) استفاده گردید (Knopoff, 1964; Wiemer, 2001).

- روابط کاهندگی (GMPEs): با توجه به ویژگی‌های تکتونیکی منطقه، مجموعه‌ای از روابط کاهندگی به‌روز شامل مدل‌های NGA-West2 (مانند Abrahamson *et al.*, 2014 و Campbell & Bozorgnia, 2014) در قالب یک درخت منطقی به کار گرفته شد. روابط کاهندگی، با پالایش لرزه ها، ارزیابی و تحلیل را با دقت بیش تری در اختیار ما قرار می دهند.

- محاسبات نرم‌افزاری: کلیه محاسبات مربوط به شتاب بیشینه زمین (PGA) برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال با استفاده از نرم‌افزار EZ-Frisk v.7.52 انجام پذیرفت (شکل ۳). این نرم افزار، با تخمین حرکت نیرومند زمین، ما را در پیش نگری آینده لرزه ای منطقه کمک می کند.

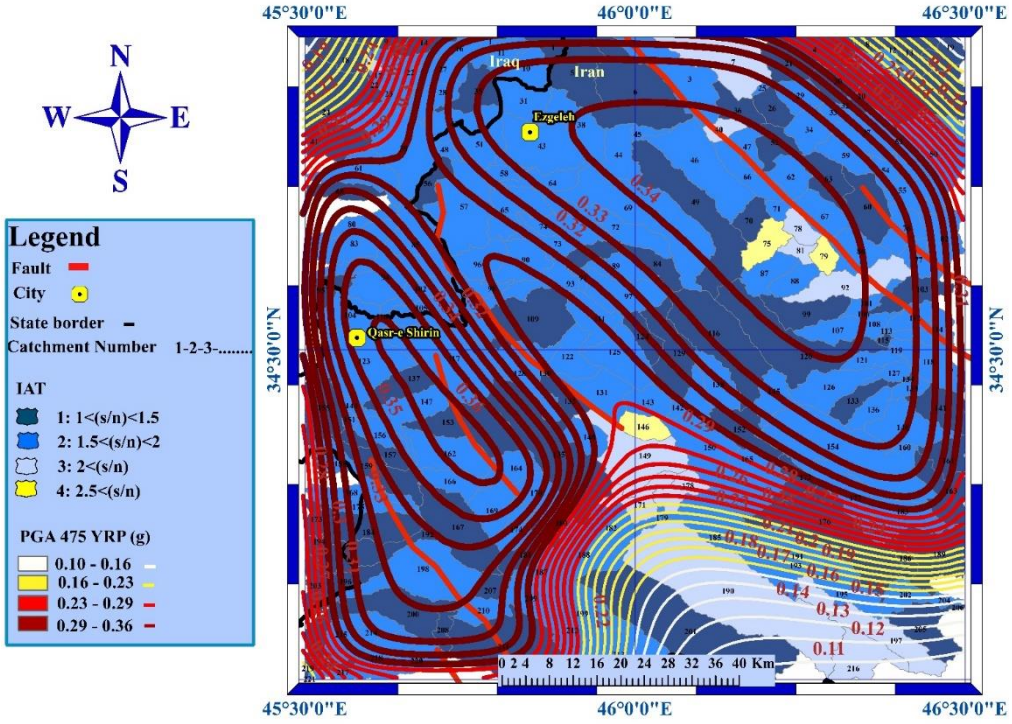


شکل (۳): نقشه منحنی های هم شتاب، بر روی الگوی ارتفاعی در منطقه مورد مطالعه

Fig (3): Map of iso-acceleration contours over the elevation pattern in the study area

فرآیند تلفیق و همپوشانی داده‌ها

نوآوری اصلی این پژوهش، در این مرحله نهفته است که نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی و نقشه‌های پهنه‌بندی PGA (حاصل از مطالعات لرزه‌خیزی) در محیط GIS همپوشانی شدند (شکل ۴). جهت تحلیل همبستگی میان این دو لایه، از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و تحلیل آماری استفاده شد تا انطباق میان گستره‌های دارای فعالیت زمین‌ساختی بالا، با نواحی دارای بیشینه شتاب احتمالی سنجیده شود. همچنین روابط تجربی Wells (۱۹۹۴) جهت انطباق طول گسیختگی گسل‌های شناسایی شده در مطالعات زمین ریختی، با توان لرزه‌زایی آن‌ها به کار گرفته شد (Wells, 1994).



شکل (۴): انطباق نقشه منحنی های هم شتاب، بر نقشه رده بندی فعالیت های زمین‌ساختی نسبی مورد مطالعه

Fig (4): Overlay of the iso-acceleration contour map on the relative tectonic activity classification map of the study area

نتایج

تلفیق یافته‌های حاصل از شاخص‌های زمین ریختی و تحلیل‌های احتمالی خطر لرزه‌ای در منطقه کرمانشاه، نتایج حائز اهمیتی را در راستای شناسایی گستره‌های دگرشکلی فعال و پتانسیل خطر آن‌ها آشکار ساخت.

تحلیل همبستگی شاخص Iat و PGA

نتایج حاصل از همپوشانی نقشه شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (بر پایه کرباسیان و همکاران، ۱۴۰۲) با نقشه‌های پهنه‌بندی شتاب بیشینه زمین (PGA) نشان‌دهنده یک انطباق معنادار در گستره‌های ساختاری اصلی است (Karbasian *et al.*, 2024). نواحی دارای رده فعالیت زمین‌ساختی ۱ (بسیار بالا)، که عمدتاً در مجاورت گسل‌های اصلی جوان (MRF) و تاقدیس‌های شکسته استان کرمانشاه قرار دارند، دقیقاً با گستره‌های دارای شتاب بیشینه (PGA > 0.35g) برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال انطباق دارند.

نقش ساختارهای پنهان در پتانسیل لرزه‌زایی

تحلیل شاخص‌های زهکشی نظیر عدم تقارن حوضه (Af) و نسبت پهنای کف دره به ارتفاع آن(Vf)، شواهدی از بالاآمدگی پنهان را در نواحی جنوب غربی استان نشان داد. تلفیق این داده‌ها با مدل لرزه‌خیزی، مشخص کرد که این مناطق علیرغم نداشتن گسلش سطحی نمایان، دارای نرخ لرزه‌خیزی زمینه‌ای بالایی هستند. بر اساس روابط Wells (۱۹۹۴)، پتانسیل بزرگای لرزه‌زایی این ساختارهای پنهان که توسط شاخص‌های ریخت‌سنجی شناسایی شده‌اند، با نتایج تحلیل‌های خطر لرزه‌ای (PSHA) که توسط نرم‌افزار EZ-Frisk محاسبه شده بود، همسویی کاملی نشان می‌دهد (Wells, 1994).

پهنه‌بندی تلفیقی خطر

بر اساس خروجی‌های تلفیقی، سه گستره کلیدی خطر در منطقه، شناسایی گردید (جدول ۱):

۱. گستره با خطر بحرانی: شامل مناطقی که هم شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی رده ۱ را نشان می‌دهند و هم PGA لرزه‌ای آن‌ها در سطح بالایی قرار دارد (مناطق پیرامونی گسل‌های فعال اصلی).

۲. گستره با دگرشکلی ریختی غالب: مناطقی با شاخص‌های زمین ریختی فعال اما فعالیت لرزه‌ای میان‌مدت کم‌تر؛ که نشان‌دهنده دوره بازگشت طولانی‌تر لرزه‌ای برای ساختارهای این نواحی است.

۳. گستره با ثبات نسبی: نواحی با شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی رده ۳ و ۴ و شتاب‌های احتمالی پایین (PGA < 0.2g).

جدول (۱): تحلیل تطبیقی شاخص‌های زمین‌ساخت فعال و پارامترهای خطر لرزه‌ای در مناطق کلیدی استان کرمانشاه

Table (1): Comparative analysis of active tectonics indices and seismic hazard parameters in key areas of Kermanshah Province

گستره	شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی	رده فعالیت زمین‌ساختی	شتاب مبنا	پتانسیل بزرگا (Mw)	انطباق ساختاری
سرپل ذهاب - ازگله	1.15	بسیار بالا	0.42-0.39	7.4-7.2	انطباق کامل با گستره دگرشکلی ۲۰۱۷
صحنه - هرسین	1.32	بسیار بالا	0.39-0.35	7.3-7.0	بخش‌های فعال گسل اصلی جوان
پاوه - نوسود	1.85	بالا	0.32-0.28	6.8-6.5	دگرشکلی شدید در یال‌های تاقدیس
جوانرود - روانسر	2.10	متوسط	0.27-0.24	6.5-6.2	فعالیت متوسط شاخص‌های رودخانه‌ای
کرمانشاه (دشت)	2.45	متوسط/پایین	0.25-0.22	6.2-6.0	رسوبات ضخیم کواترنری و فعالیت پنهان
سنقر	2.80	پایین	0.21-0.18	6.0-5.8	ثبات نسبی در شاخص‌های ریخت‌سنجی

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، در مناطقی مانند سرپل ذهاب و صحنه، شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی زیر ۱/۵ (فعالیت بسیار بالا) با شتاب‌های PGA بالای ۰/۳۵ g همخوانی دارد. این وضعیت نشان می دهد که نرخ دگرشکلی‌های ریخت‌شناختی(بلندمدت) با پتانسیل تخلیه انرژی لرزه‌ای (کوتاه‌مدت) در این مناطق همسو است. منطقه سنقر، کم ترین میزان شاخص زمین‌ساخت فعال و شتاب لرزه‌ای را نشان می‌دهد که این موضوع، این ناحیه را به عنوان یک بخش پایدارتر در پهنه لرزه‌زمین‌ساختی کرمانشاه معرفی می‌کند. همچنین با وجود اینکه شاخص‌های ریخت‌سنجی در دشت کرمانشاه رده ۳ را نشان می‌دهند، اما شتاب PGA همچنان مقادیر متوسطی دارد. این موضوع می‌تواند به دلیل اثرات ساختگاهی باشد که توسط (Zare *et al.*, 1999) نیز به آن اشاره شده بود.

بحث

تلفیق شواهد ریخت‌زمین‌ساختی با پارامترهای احتمالی خطر لرزه‌ای در گستره برخورد زاگرس، ابعاد جدیدی از پویایی این منطقه را آشکار ساخته است. یافته‌های این پژوهش تایید می‌کند که، توزیع فضایی فعالیت‌های زمین‌ساختی در استان کرمانشاه، تابعی از هندسه گسل‌های اصلی و نرخ دگرشکلی‌های کواترنری به شرح ذیل است:

انطباق زمانی و مکانی دگرشکلی‌ها

نتایج حاصل از شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی نشان داد که، زیرپهنه‌های لرزه‌زمین‌ساختی غرب کرمانشاه دارای بالاترین نرخ فعالیت ریختی هستند. انطباق این گستره‌ها با مقادیر بیشینه PGA در دوره بازگشت ۴۷۵ سال (Karbasian *et al.*, 2024) نشان‌دهنده این واقعیت است که ساختارهایی با نرخ لغزش بلندمدت بالاتر (مانند گسل اصلی جوان)، پتانسیل بیش تری برای

تولید جنبش‌های نیرومند زمین در بازه‌های زمانی کوتاه مدت دارند. این یافته با مطالعات Keller (۱۹۸۶) و Bull (۲۰۰۸) که بر همبستگی شاخص‌های زمین ریختی با پتانسیل لرزه‌زایی تاکید داشتند، مطابقت کامل دارد (Bull, 2008; Keller, 1986).

تحلیل واگرایی‌ها و اثرات ساختاری

نکته دارای اهمیت در این مطالعه، وجود مناطقی با شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی متوسط اما، شتاب لرزه‌ای بالا است. این وضعیت که در بخش‌هایی از دشت کرمانشاه مشاهده شد، می‌تواند ناشی از دو عامل باشد: نخست، حضور گسل‌های پنهان که شواهد سطحی آن‌ها توسط رسوبات ضخیم کواترنری پوشانده شده اما، در محاسبات EZ-Frisk بر اساس کاتالوگ‌های لرزه‌ای نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. دوم، اثرات بزرگ‌نمایی خاک که در حوضه‌های رسوبی زاگرس، می‌تواند شتاب‌های احتمالی را به طور چشمگیری افزایش دهد (Zare *et al*., 1999).

بازنگری در مدل‌های خطر با رویکرد تلفیقی

استفاده از روابط کاهندگی (GMPEs) به‌روز در مدل درخت منطقی، به همراه تحلیل‌های کمّی ریخت‌سنجی، خطای محاسباتی در پهنه‌بندی خطر را به حداقل رسانده است. در مقایسه با مطالعات پیشین، نظیر Mirzaei و همکاران ۱۹۹۸، این رویکرد تلفیقی نشان می‌دهد که تکیه مطلق بر کاتالوگ‌های لرزه‌ای تاریخی برای ارزیابی خطر کافی نیست (Mirzaei *et al*.,1998)؛ زیرا، بسیاری از ساختارهای فعال شناسایی شده در بخش ریخت‌زمین‌ساختی، در حال حاضر در دوره آرامش لرزه‌ای به سر می‌برند اما پتانسیل بالایی برای وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ (Mw>7) در آینده دارند.

پیامدها برای تاب‌آوری شهری

انطباق مناطق با رده فعالیت ۱ (بسیار بالا) با مراکز جمعیتی نظیر سرپل‌ذهاب و صحنه (Ramsey *et al*., 2008; Aram & Arian, 2016)، ضرورت بازنگری در آیین‌نامه‌های ساخت‌وساز محلی را دوچندان می‌کند. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که شتاب طرح پیشنهادی در ویرایش‌های استاندارد ۲۸۰۰ ممکن است در برخی پهنه‌ها، کم‌تر از مقدار واقعی برآورد شده باشد (کمتر از ۰/۳۵g در گستره سرپل ذهاب) که این موضوع لزوم انجام مطالعات «طیف پاسخ ویژه ساختگاه» را برای این مناطق بحرانی تایید می‌کند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با رویکردی تلفیقی، نتایج حاصل از تحلیل‌های ریخت‌زمین‌ساختی و مدل‌سازی احتمالی خطر لرزه‌ای را در منطقه کرمانشاه مورد واکاوی قرار داد. برآیند این مطالعه به نتایج کلیدی زیر منجر گردید:

۱. نتایج نشان داد که همبستگی فضایی معناداری (بالای ۸۰ درصد) میان حوضه‌های با شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی رده ۱ و گستره‌های با شتاب بیشینه زمین (PGA) فراتر از ۰/۳۵g وجود دارد. این موضوع تایید می‌کند که شاخص‌های زمین ریختی، ابزاری قدرتمند و قابل‌اتکا برای پیش‌بینی پتانسیل خطر در مناطقی با داده‌های لرزه‌ای محدود هستند.

۲. مناطق سرپل‌ذهاب، ازگله و صحنه به عنوان بحرانی‌ترین پهنه‌ها از منظر خطر لرزه‌ای شناسایی شدند. این مناطق نه تنها دارای نرخ دگرشکلی کواترنری بالایی هستند، بلکه بر اساس مدل‌سازی‌های انجام شده با نرم‌افزار EZ-Frisk، پتانسیل تولید شتاب‌های مخرب در دوره‌های بازگشت میان‌مدت و بلندمدت را دارا می‌باشند.

References

Abrahamson, N. A., Silva, W. J., & Kamai, R. (2014). Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. *Earthquake Spectra, 30*(3), 1025-1055. https://doi.org/10.1193/070913EQS198M

Aram, Z., & Arian, M. (2016). Active tectonics of the Gharasu river basin in Zagros, Iran, investigated by calculation of geomorphic indices and group decision using analytic hierarchy process (AHP) software. *Episodes Journal of International Geoscience, 39*(1), 39-44. https://doi.org/10.18814/epiiugs/2016/v39i1/89235

Berberian, M. (1995). Master "blind" thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics, 241*(3-4), 193-224. https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)00185-C.

Bull, W. (1978). Geomorphic tectonic classes of the south front of the San Gabriel Mountains, California. US Geological Survey Contract Report 14-08-001-G-394. Menlo Park, CA: Office of Earthquakes. *Volcanoes, and Engineering*.

Bull, W. B. (2008). *Tectonic geomorphology of mountains: a new approach to paleoseismology*: John Wiley & Sons.

Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y. (2014). NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. *Earthquake Spectra, 30*(3), 1087-1115. https://doi.org/10.1193/062913EQS175M

Cox, R. T. (1994). Analysis of drainage-basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: an example from the Mississippi Embayment. *Geological society of america bulletin, 106*(5), 571-581. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1994)106<0571:AODBSA>2.3.CO;2.

El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernández, T., Chacón, J., & Keller, E. A. (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology, 96*(1-2), 150-173. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.08.004.

Islami, A., Mahmoudi Koohi, A., Taghaboni, M., & Komizi, A. (2017). Preliminary report of the November 12, 2017, *Ezgeleh earthquake, Kermanshah province* (p. 1). (In Persian).

Izadi Kian, L., Mirzajani, M. (2022). Geomorphological investigation of Ezgeleh anticline, Northwest Kermanshah. *Journal of Tectonics, 6*(22), In Persian. https://civilica.com/doc/1896207

Karbasian, N., Beitollahi, A., Arian, M., Moradi, A., & Sorbi, A. (2024). Active Tectonics and Seismic Hazard Assessment of Kermanshah Region (West of Iran) by Probabilistic Method: A Case Study. *Geotectonics, 58*(Suppl 1), S96-S115. https://doi.org/10.1134/S0016852125700062.

KELLER, A. (1986). Investigation of Active Tectonics: Use of Surficial Earth. *Active Tectonics: Impact on Society*, 136.

Knopoff, L. (1964). A matrix method for elastic wave problems. *Bulletin of the Seismological Society of America, 54*(1), 431-438. https://doi.org/10.1785/BSSA0540010431.

Mirzaei, N., Mengtan, G., & Yuntai, C. (1998). Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: major seismotectonic provinces. *Journal of earthquake prediction research, 7*, 465-495.

Ramsey, L. A., Walker, R. T., & Jackson, J. (2008). Fold evolution and drainage development in the Zagros mountains of Fars province, SE Iran. *Basin Research, 20*(1), 23-48. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2117.2007.00342.x.

Shahvar, M., & Castellaro, S. (2013). A unified seismic catalog for the Iranian plateau (1900-2011). *Seismological Research Letters, 84*(2), 233-249

Stöcklin, J. (1974). Northern iran: Alborz mountains. *Geological Society, London, Special Publications, 4*(1), 213-234. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2005.004.01.12.

Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological society of america bulletin, 63*(11), 1117-1142. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2.

Wells, D. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4), 974-1002.*

Wiemer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters, 72*(3), 373-382. https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373.

Zare, M., Bard, P.-Y., & Ghafory-Ashtiany, M. (1999). Site characterizations for the Iranian strong motion network. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 18*(2), 101-123. https://doi.org/10.1016/S0267-7261(98)00040-2.