



Probabilistic Seismic Hazard Analysis of Hamadan Province Using Monte Carlo Simulation and Evaluation of Standard 2800

Kiani, A.¹ | Sadidkhouy, A.¹

1. Department of Seismology, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: a.kiani.nd.com@gmail.com

(Received: 2 March 2026, Revised: 18 May 2026, Accepted: 30 June 2026, Published online: 5 Sep 2026)

Summary

The aim of this study is to carry out a detailed Probabilistic Seismic Hazard Assessment (PSHA) for Hamadan Province in western Iran, with particular emphasis on the seismogenic potential of the Nahavand Fault, and to compare the results with the design provisions of Iranian Seismic Code Standard No. 2800. The region lies within the active Zagros fold-and-thrust belt, where complex fault systems and heterogeneous seismicity patterns necessitate site-specific hazard analyses, especially for critical facilities. In this context, we assembled a homogenized earthquake catalog for the period 1990–2025, converted to moment magnitude using empirical relations developed for the Iranian plateau, and delineated seismogenic sources based on neotectonic, geological, and seismological evidence. Special attention was given to the geometry and segmentation of the Nahavand Fault, including its southern termination, where negative flower structures and distributed deformation indicate ongoing transpressional activity.

Ground motion parameters were estimated through Monte Carlo simulation of 50,000 stochastic earthquake scenarios combined with a logic-tree framework to account for epistemic uncertainties in source characterization and ground motion prediction equations (GMPEs). The logic tree incorporates alternative source models for the Nahavand Fault (linear fault source versus areal seismogenic zone), different magnitude–frequency distributions, and multiple regionally compatible GMPEs. For each realization, synthetic ground motion fields were generated and uniform hazard spectra (UHS) were derived at representative sites across the province for return periods of 475 and 2475 years, corresponding to standard and maximum-considered earthquake levels, respectively.

The results for a 475-year return period indicate a distinctly non-uniform spatial distribution of seismic hazard in Hamadan Province. The highest levels are obtained in Nahavand County, where the maximum peak ground acceleration (PGA) reaches 0.466g. This value is approximately 33.1% higher than the upper bound of the “very high relative hazard” zone defined in Standard 2800 for the region. Elevated hazard levels are also observed in areas located in close proximity to the mapped trace of the Nahavand Fault and its adjacent segments, reflecting the dominant contribution of this structure to seismic risk in the southern part of the province. For the 2475-year return period, the estimated spectral accelerations in the short- and intermediate-period ranges at sites situated near the fault trace exceed the corresponding code-based design values prescribed in Standard 2800, particularly for fundamental periods relevant to low- to mid-rise buildings.

These results should, however, be interpreted in light of the assumptions and limitations inherent in site-specific PSHA. The hazard estimates are conditioned on the adopted source geometry, maximum magnitude, recurrence parameters, selected GMPEs, and the quality and completeness of the input data. Epistemic uncertainties are explicitly treated through the logic-tree approach, while aleatory variability is represented by the dispersion in ground motion predictions; nevertheless, residual model uncertainty remains. Consequently, the findings are not intended to imply a general inadequacy or invalidation of the national seismic zonation framework or the philosophy of Standard 2800. Rather, they underscore the importance of conducting detailed local hazard assessments for critical structures, lifelines, and strategic facilities located in the vicinity of major active faults such as the Nahavand Fault. In such contexts, reliance solely on broad-scale national zoning maps may underestimate the true site-specific hazard, whereas complementary PSHA can provide more realistic input motions for performance-based seismic design and risk mitigation.

Keywords: Probabilistic Seismic Hazard Assessment (PSHA); Monte Carlo simulation; logic tree; Nahavand Fault; Hamadan Province; Standard No. 2800; Uniform Hazard Spectrum.

Cite this article: Kiani, A., & Sadidkhouy, A. (2026). Probabilistic Seismic Hazard Analysis of Hamadan Province Using Monte Carlo Simulation and Evaluation of Standard 2800. *Journal of the Earth and Space Physics*, 52(2), 259-270. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2026.410880.1007759>

E-mail: (1) asadid@ut.ac.ir



© Authors Retain the Copyright and Full Publishing Rights.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2026.410880.1007759>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی استان همدان با رویکرد شبیه‌سازی مونت کارلو و ارزیابی کفایت آیین‌نامه ۲۸۰۰ در پهنه گسلی نهاوند

احمد کیانی^۱ | احمد سدیدخوی^۱

۱. گروه زلزله‌شناسی، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: a.kiani.nd.com@gmail.com

(دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۱۱، بازنگری: ۱۴۰۵/۲/۲۸، پذیرش نهایی: ۱۴۰۵/۴/۹، انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۶/۱۴)

چکیده

هدف از این پژوهش، ارزیابی دقیق خطر لرزه‌ای احتمالاتی (PSHA) در استان همدان با تأکید بر پتانسیل لرزه‌زایی گسل نهاوند و مقایسه نتایج با استاندارد ۲۸۰۰ ایران است. بدین منظور، با بهره‌گیری از شبیه‌سازی تصادفی مونت کارلو (با تولید ۵۰۰۰۰ سناریوی لرزه‌ای) و به‌کارگیری ساختار درخت منطقی برای مدیریت عدم قطعیت‌های معرفتی، پارامترهای جنبش زمین برآورد شد. در مدل‌سازی چشمه‌ها، بر پایه شواهد نوزمین‌ساختی نظیر ساختار گلی منفی در پایانه جنوبی گسل، وزن ۹۰ درصد به مدل چشمه خطی نهاوند اختصاص یافت. نتایج برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال نشان می‌دهد که توزیع خطر در سطح استان ناهمگن بوده و بیشینه شتاب افقی زمین (PGA) در شهرستان نهاوند برابر با 0.466 g است که حدود $33/1$ درصد بالاتر از حد بالای پهنه با خطر بسیار زیاد در استاندارد ۲۸۰۰ می‌باشد. همچنین، تحلیل خطر برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال نشان می‌دهد که در محدوده‌های واقع در مجاورت گسل، به‌ویژه تحت‌تأثیر ویژگی‌های هندسی و لرزه‌زمین‌ساختی محلی، شتاب طیفی در دوره‌های کوتاه و متوسط از مقادیر آیین‌نامه‌ای فراتر می‌رود. این یافته‌ها بر لزوم بازنگری در ارزیابی خطر لرزه‌ای جنوب استان همدان و ضرورت انجام تحلیل‌های ساختگاه‌ویژه برای سازه‌های با اهمیت بالا در مناطق نزدیک گسل‌های فعال تأکید دارند. افزون بر این، به‌منظور تفسیر صحیح نتایج، باید توجه داشت که برآوردهای خطر به مفروضات مدل‌سازی چشمه، روابط پیش‌بینی حرکت نیرومند و کیفیت داده‌های ورودی وابسته است و از این‌رو نتایج در چارچوب عدم قطعیت‌های موجود قابل تحلیل و تعمیم خواهند بود.

واژه‌های کلیدی: تحلیل خطر احتمالاتی (PSHA)، شبیه‌سازی مونت کارلو، گسل نهاوند، استاندارد ۲۸۰۰، طیف پاسخ یکنواخت.

۱. مقدمه

بزرگتر از ۵ در پهنه‌های مختلف فلات ایران است (طالبی و همکاران، ۲۰۱۷). توسعه روزافزون زیرساخت‌های شهری و صنعتی در این استان، ایجاب می‌کند که شناخت دقیقی نسبت به پتانسیل لرزه‌خیزی منطقه و گسل‌های فعال آن وجود داشته باشد.

یکی از چالش‌های اساسی در مهندسی زلزله کشور، اتکا به نقشه‌های پهنه‌بندی ملی (نظیر استاندارد ۲۸۰۰) است که عمدتاً بر اساس رویکردهای پهنه‌ای (Area Source) تدوین شده‌اند. اگرچه این استاندارد مرجع اصلی طراحی است، اما مطالعات ناحیه‌ای دقیق‌تر نشان می‌دهند که در

فلات ایران به‌عنوان بخشی از کمربند لرزه‌خیز آلپ-همیالیا، همواره در معرض مخاطرات ناشی از زمین‌لرزه‌های مخرب قرار داشته است. در این میان، استان همدان به‌دلیل موقعیت خاص ژئودینامیکی و قرارگیری در محل تلاقی دو ایالت لرزه‌زمین‌ساختی عمده، یعنی زون زاگرس چین‌خورده-رانده (MRF) و پهنه ایران مرکزی، از پیچیدگی‌های تکتونیکی ویژه‌ای برخوردار است (ایزدی‌کیان و همکاران، ۱۴۰۳). در این راستا، مدل‌سازی‌های پیش‌بینی احتمالاتی بلندمدت نیز نشان‌دهنده غیریکنواخت بودن نرخ رخداد زمین‌لرزه‌های با بزرگی

استناد: کیانی، احمد و سدیدخوی، احمد (۱۴۰۵). تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی استان همدان با رویکرد شبیه‌سازی مونت کارلو و ارزیابی کفایت آیین‌نامه ۲۸۰۰ در پهنه گسلی نهاوند.

مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۲(۲)، ۲۵۹-۲۷۰. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2026.410880.1007759>

رایانامه: (۱) asadid@ut.ac.ir



ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2026.410880.1007759>

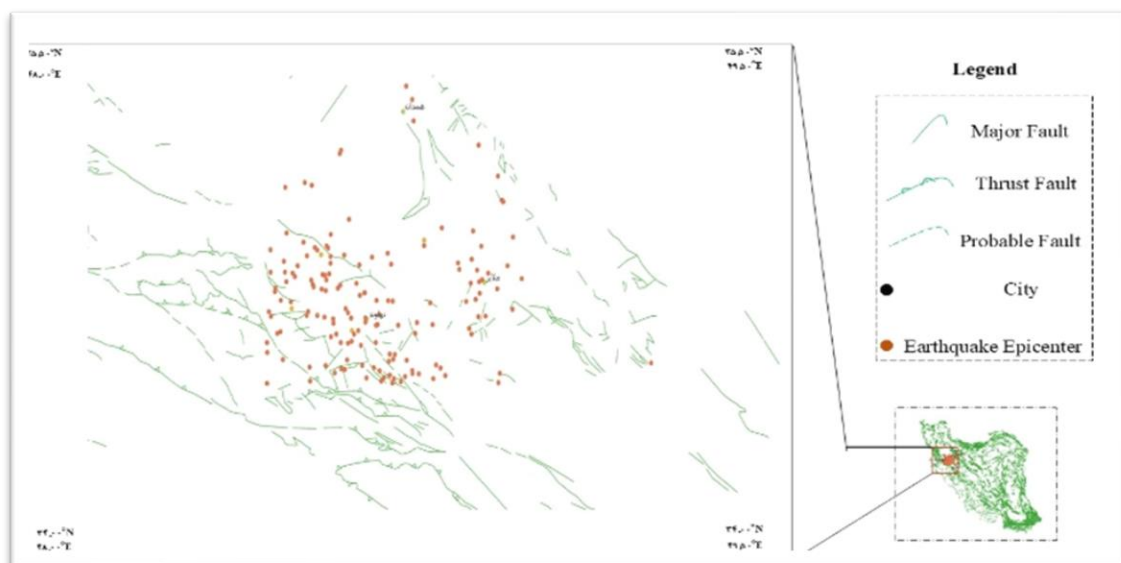
اصلی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ به‌طوری‌که مطابق با پژوهش‌های پیشین همانند حیدری و میرزایی (۱۳۸۸)، این گسل مسبب رخداد‌های لرزه‌ای مهمی از جمله زمین‌لرزه ۱۶ اوت ۱۹۵۸ نهاوند با بزرگی ۶/۶ (Ms) و احتمالاً زمین‌لرزه ۱۳ دسامبر ۱۹۵۷ فارسینج (مرتبط با بخش پنهان گسل) بوده است.

به‌منظور بررسی عینی این پتانسیل لرزه‌زایی، شکل ۱ نقشه توزیع کانون زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده توسط شبکه لرزه‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران را در سطح استان نمایش می‌دهد. تحلیل بصری این نقشه، همبستگی آشکاری را میان تمرکز کانون‌های لرزه‌ای و هندسه گسل‌های فعال (به‌ویژه گسل نهاوند) در نواحی جنوبی و جنوب غربی استان تأیید می‌کند. این الگوی خوشه‌ای از لرزه‌خیزی، ضمن مطابقت با رخداد‌های تاریخی ذکر شده، نشان‌دهنده آن است که منطقه مذکور از نرخ لرزه‌خیزی فعال‌تری نسبت به سایر نواحی استان برخوردار است؛ موضوعی که دقت‌سنجی مدل‌های لرزه‌ساختاری در مقیاس محلی و بازنگری در پارامترهای پهنه‌بندی برای سازه‌های حساس را ضروری می‌سازد.

مجاورت گسل‌های فعال محلی، خطر لرزه‌ای ممکن است فراتر از مقادیر پیش‌بینی شده در آیین‌نامه باشد (بیت‌اللهی، ۱۳۹۹).

مسئله اصلی این پژوهش، بررسی دقیق وضعیت لرزه‌خیزی جنوب استان همدان با تمرکز بر «گسل نهاوند» است. شواهد نوزمین‌ساختی و لرزه‌خیزی دستگاہی اخیر (مانند زمین‌لرزه ۳ فروردین سال ۱۴۰۰) نشان می‌دهند که گسل نهاوند به‌عنوان بخشی از گسل اصلی عهد حاضر زاگرس، پتانسیل ایجاد جنبش‌های نیرومند زمین را دارد که ممکن است در مدل‌های پهنه‌ای کلاسیک به‌خوبی لحاظ نشده باشد. با توجه به پیچیدگی‌های تکتونیکی و عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای لرزه‌خیزی، روش‌های قطعی یا احتمالی کلاسیک ممکن است خطای قابل‌توجهی داشته باشند. از این‌رو، استفاده از رویکرد شبیه‌سازی مونت کارلو و درخت منطقی برای مدیریت این عدم قطعیت‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

استان همدان به واسطه قرارگیری در پهنه لرزه‌زمین‌ساختی زاگرس، تحت تأثیر فعالیت گسل‌های تراستی و امتدادلغز متعددی است که نقش بسزایی در لرزه‌خیزی منطقه دارند. در این میان، گسل نهاوند به‌عنوان یک ساختار لرزه‌زای



شکل ۱. نقشه لرزه‌زمین‌ساختی و توزیع رومرکز زمین‌لرزه‌های استان همدان در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۵ میلادی؛ داده‌های رومرکز بر پایه کاتالوگ مرکز لرزه‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و لایه‌های گسلی بر اساس شیب‌فایل‌های سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور ترسیم شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پراکندگی خوشه‌ای رومرکزها، همبستگی مکانی آشکاری با گسل‌های اصلی منطقه، به‌ویژه گسل فعال نهاوند در پهنه جنوبی استان دارد که نشان‌دهنده تداوم فعالیت لرزه‌ساختاری این ساختارها در دهه‌های اخیر است.

در پهنه استان همدان و مدیریت عدم قطعیت‌های معرفتی (Epistemic Uncertainties) از طریق چارچوب درخت منطقی (Logic Tree) است. در این راستا، با تمرکز بر ویژگی‌های لرزه‌خیزی منطقه، تحلیل‌ها برای دو دوره بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال انجام شده است.

در این پژوهش، سطوح خطر لرزه‌ای برای شرایط ساختگاهی متناظر با خاک نوع ۲ بر اساس طبقه‌بندی آیین‌نامه‌ای محاسبه شده است. بدین ترتیب، تحلیل‌های مربوط به پاسخ دینامیکی سازه‌ها، اندرکنش خاک و سازه، و جزئیات اثرات میدان نزدیک، در زمره موضوعات تخصصی مرحله طراحی سازه‌ای قرار گرفته و خارج از حیطه این مطالعه محسوب می‌شوند. نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان مبنای لرزه‌ای اولیه برای مطالعات تکمیلی در زمینه طراحی و ارزیابی عملکرد سازه‌ها و زیرساخت‌های مهم استان مورد استفاده قرار گیرد.

۲-۱. تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی

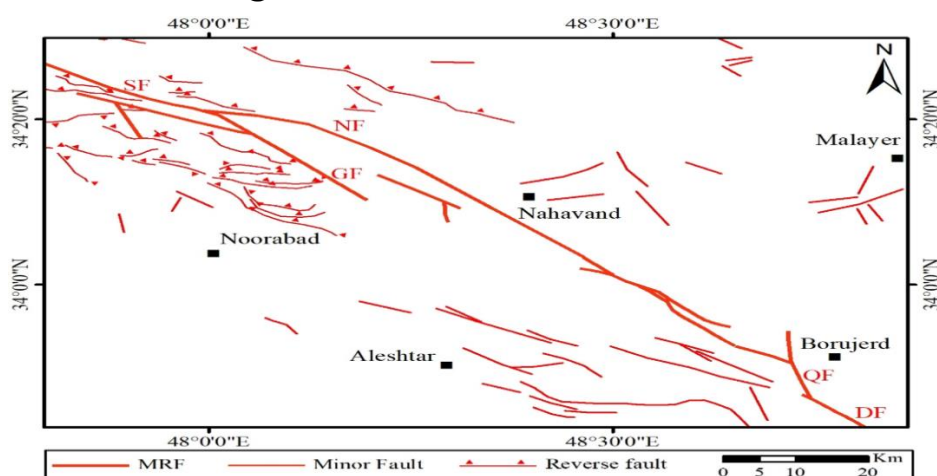
در این پژوهش، کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها شامل ۲۰۴ رویداد تاریخی و دستگاهی در بازه زمانی ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۵ میلادی گردآوری شد. داده‌های دستگاهی از پایگاه‌های USGS، IIEES و داده‌های تاریخی از منابع محلی و اسناد تاریخی معتبر ایران استخراج شد.

استان همدان از نظر زمین‌شناسی ساختمانی شامل دو بخش متمایز است: نواحی شمالی و مرکزی که بخشی از زون سندج-سیرجان و ایران مرکزی محسوب می‌شوند و نواحی جنوبی (مانند نهاوند و ملایر) که تحت تأثیر مستقیم زون رانده زاگرس قرار دارند (حیدری و میرزائی، ۱۳۸۸). همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، گسل نهاوند با سازوکار امتدادلغز راست‌گرد و مؤلفه معکوس، مهم‌ترین ساختار لرزه‌زا در جنوب استان است. مطالعات اخیر وجود ساختار «گل منفی» (Negative Flower Structure) در انتهای جنوبی این گسل را تأیید کرده‌اند که نشان‌دهنده تمرکز تنش و پتانسیل گسیختگی سطحی است (ایزدی کیان و همکاران، ۱۴۰۳).

۲. روش پژوهش

در بخش روش‌شناسی این پژوهش، جهت غلبه بر محدودیت‌های محاسباتی و تقریب‌های ریاضی ناشی از انتگرال‌گیری عددی در روش‌های کلاسیک PSHA، (کورنل، ۱۹۶۸) از رویکرد شبیه‌سازی تصادفی مونت کارلو استفاده شده است (کروسه و همکاران، ۲۰۱۴). این روش با تولید ۵۰,۰۰۰ سناریوی لرزه‌ای مصنوعی برای هر ساختگاه، پایداری آماری مطلوبی را در برآورد توزیع احتمالاتی جنبش زمین فراهم می‌سازد.

هدف محوری این مطالعه، تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی



شکل ۲. نقشه گسل‌های فعال کواترنری در گستره طرح مورد مطالعه و موقعیت گسل نهاوند در زون زاگرس. خطوط قهوه‌ای نشان‌دهنده گسل‌های منطقه شامل سیستم گسل اصلی زاگرس (MRF) و گسل‌های فرعی (Minor Faults) و گسل‌های نهاوند (NF)، گسل گرین (GF)، گسل قارون (QF)، گسل درود (DF) و گسل سیلاخور (SF) هستند. این نقشه با ویرایش از علی‌پور و آقایی (۲۰۲۵) تهیه شده است.

محاسبه می‌شوند. روش آکی یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای برآورد مقدار b در کاتالوگ‌های پیوسته و بدون گروه‌بندی است، اما دقت آن در مواردی که داده‌های بزرگ به صورت بازه‌ای یا گرد شده گزارش شده باشند کاهش می‌یابد. روش یوتسو نیز با ارائه اصلاحاتی در برآورد آماری، تلاش می‌کند عدم قطعیت‌های ناشی از اندازه نمونه را کاهش دهد، با این حال همچنان نسبت به گروه‌بندی بزرگ‌ها و انتخاب بزرگ‌ای حد کامل بودن کاتالوگ (Mc) حساس است.

در مقابل، روش بندر (۱۹۸۳) با در نظر گرفتن ماهیت داده‌های گروه‌بندی شده بزرگ و ارائه فرمول‌بندی اصلاح شده برای تابع درست‌نمایی، پایداری آماری بیشتری در کاتالوگ‌هایی دارد که بزرگ‌ها با دقت محدود (مانند $0/1$ یا $0/2$ واحد بزرگ) گزارش شده‌اند. از آنجا که در کاتالوگ مورد استفاده در این پژوهش بخشی از داده‌های تاریخی و اولیه به صورت گروه‌بندی شده ثبت شده‌اند، استفاده از روش بندر باعث کاهش سوگیری آماری و افزایش پایداری برآورد ضرایب لرزه‌خیزی می‌شود. بر اساس محاسبات انجام شده، مقدار ضریب لرزه‌خیزی (b -value) برابر با $0/623$ و مقدار نرخ فعالیت سالیانه (a -value) برابر با $5/237$ برآورد شد. خلاصه پارامترهای لرزه‌خیزی ورودی به مدل در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۲. مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها (درخت منطقی)

در تحلیل خطر لرزه‌ای، مدیریت عدم قطعیت‌های معرفتی (Epistemic Uncertainty) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بدین منظور، ساختار درخت منطقی (بامر و استافورد، ۲۰۱۶) در دو شاخه اصلی «چشمه‌های لرزه‌زا» و «روابط کاهندگی» توسعه یافت (شکل ۳).

به منظور دستیابی به یک کاتالوگ لرزه‌ای همگن، تمامی داده‌های بزرگ‌ای ثبت شده به مقیاس بزرگ‌ای گشتاوری (M_w) تبدیل شدند. این فرایند بر اساس روابط تجربی توسعه یافته برای فلات ایران توسط موسوی بفروئی و همکاران (۲۰۱۴) و با بهره‌گیری از روش رگرسیون متعامد عمومی (GOR) انجام پذیرفت. برای برآورد ابعاد گسیختگی گسل، از روابط تجربی ولز و کاپرسمیت (۱۹۹۴) استفاده شد که ارتباط بین بزرگی زمین لرزه و پارامترهای هندسی گسیختگی شامل طول، عرض، مساحت و جابجایی سطحی را ارائه می‌کنند. سپس، به منظور حذف رویدادهای وابسته (پیش لرزه و پس لرزه) و استخراج کاتالوگ پس لرزه‌زدایی شده، خوشه‌زدایی با استفاده از الگوریتم ریزنبرگ (گاردنر و کناپوف، ۱۹۷۴) انجام شد. این روش با تعریف پنجره‌های زمانی-مکانی پویا بر اساس فاصله بین رویدادها و نرخ لرزه‌خیزی زمینه، رویدادهای مرتبط را به صورت خوشه‌ای شناسایی کرده و از کاتالوگ مستقل سازی می‌کند؛ از این رو نسبت به تغییرات محلی نرخ رخداد و الگوی خوشه‌بندی انعطاف پذیرتر است. در مقایسه، روش گاردنر-کناپوف (گاردنر و کناپوف، ۱۹۷۴) عمدتاً بر پنجره‌های زمانی-مکانی تجربی و از پیش تعریف شده (تابع بزرگ‌ها) متکی است و ساده‌تر، اما کم‌انعطاف‌تر در برابر ناهمگنی‌های مکانی-زمانی خوشه‌هاست. که در نهایت منجر به باقی ماندن ۱۳۶ رویداد مستقل شد. به منظور برآورد ضرایب رابطه گوتنبرگ-ریشتر از روش بیشینه درست‌نمایی بندر (بندر، ۱۹۸۳) استفاده شد. در مطالعات لرزه‌خیزی، ضرایب این رابطه معمولاً با چند روش آماری از جمله روش بیشینه درست‌نمایی آکی (آکی، ۱۹۶۵)، روش اصلاح شده اوتسو/یوتسو (اوتسو، ۱۹۶۵) و روش بندر (بندر، ۱۹۸۳)

جدول ۱. پارامترهای لرزه‌خیزی برآورد شده برای گستره مورد مطالعه با استفاده از روش بیشینه درست‌نمایی بندر (۱۹۸۳) و کاتالوگ لرزه‌ای تا سال ۲۰۲۵.

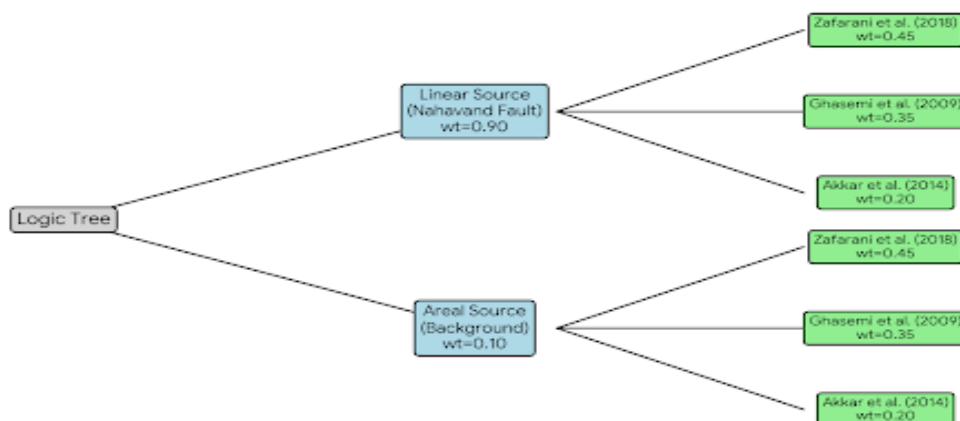
پارامتر	مقدار	توضیحات
بزرگ‌ای آستانه (Mc)	۲/۵۵	بر اساس تحلیل کاتالوگ
ضریب لرزه‌خیزی (b -value)	۰/۶۲۳	خطای استاندارد: ۰/۰۴ بندر (۱۹۸۳)
نرخ فعالیت سالانه (a -value)	۵/۲۳۷	نرمال سازی شده در سال

را نسبت به پهنه‌بندی‌های کلی آیین‌نامه نشان می‌دهد. اگرچه سطح خطر مبنای استاندارد ۲۸۰۰ دوره بازگشت ۴۷۵ سال است، اما نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که برای سازه‌های حساس و حیاتی، رویکرد آیین‌نامه‌ای فعلی (با فرض ضریب رفتار ثابت) ممکن است نیازمند بازنگری در قالب تحلیل‌های دقیق‌تر لرزه‌ساختاری باشد تا ظرفیت واقعی مورد نیاز در برابر رویدادهای با دوره بازگشت طولانی (۲۴۷۵ سال) برای مدیریت ریسک محقق شود. به‌منظور ارزیابی پایداری نتایج، عدم قطعیت‌های معرفتی و تصادفی مؤثر بر تحلیل خطر لرزه‌ای در قالب چهار مؤلفه اصلی شامل مدل چشمه، پارامترهای گسل، روابط کاهندگی و نمونه‌برداری آماری بررسی شد. عدم قطعیت معرفتی مرتبط با مدل چشمه از طریق درخت منطقی وزن‌دار، و عدم قطعیت پارامترهای گسل با تحلیل حساسیت نسبت به نرخ لغزش و M_{max} کنترل شد. همچنین، عدم قطعیت ناشی از انتخاب روابط کاهندگی با ترکیب وزنی چند رابطه منتخب، و عدم قطعیت تصادفی با اجرای شبیه‌سازی مونت کارلو در ۵۰۰۰۰ تکرار کاهش یافت. نتایج نشان داد که بیشترین دامنه تغییر در PGA به انتخاب مدل چشمه و سپس پارامترهای گسل مربوط است، در حالی که سهم روابط کاهندگی و نمونه‌برداری آماری کمتر است. بر مبنای ترکیب مربعی این مؤلفه‌ها، عدم قطعیت کل PGA در محدوده $\pm 18\%$ تا $\pm 25\%$ درصد قرار گرفت (جدول ۳).

در شاخه چشمه‌ها، با توجه به شواهد نوزمین‌ساختی و پتانسیل گسل نهاوند، وزن غالب (۹۰ درصد) به مدل چشمه خطی و وزن (۱۰ درصد) به مدل چشمه ناحیه‌ای (جهت پوشش لرزه‌خیزی پس‌زمینه) اختصاص یافت. در شاخه روابط کاهندگی نیز از ترکیب وزنی سه رابطه معتبر سازگار با پوسته زاگرس (آکار و همکاران، ۲۰۱۴؛ قاسمی و همکاران، ۲۰۰۹؛ ظفرانی و همکاران، ۲۰۱۸) استفاده شد. مقادیر شتاب حداکثر زمین (PGA) حاصل از این پژوهش با مقادیر پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ در جدول ۲ مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در شهرستان نهاوند، مقدار PGA محاسبه‌شده برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال ($0.46g$)، حدود ۳۳ درصد فراتر از مقدار مبنای آیین‌نامه ($0.35g$) است. این تفاوت در مقادیر، بیش از هر چیز متأثر از بهبود در پارامترسازی مدل چشمه‌های لرزه‌زا، به‌کارگیری هندسه دقیق‌تر گسل نهاوند و لحاظ کردن اثر فاصله ساختگاه تا گسل (Site-to-Source Distance) در محاسبات قطعی است، که در تحلیل‌های پهنه‌بندی ملی به‌صورت میانگین‌گیری لحاظ می‌شود.

همچنین در دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال، بیشینه شتاب در نهاوند به رقم قابل‌توجه $0.913g$ می‌رسد که نشان‌دهنده اهمیت تحلیل‌های سایت‌ویژه (Site-Specific) در مناطق دارای لرزه‌خیزی فعال و هندسه گسلی پیچیده است. در مقابل، برای سایر شهرستان‌های استان که در فاصله دورتری از گسل مسبب قرار دارند، نتایج این پژوهش مقادیر کمتری

Logic Tree Structure for PSHA



شکل ۳. ساختار درخت منطقی (Logic Tree) و ضرایب وزنی اختصاص‌یافته به مدل‌های چشمه لرزه‌زا و روابط کاهندگی (GMPES).

جدول ۲. مقایسه مقادیر شتاب حداکثر زمین (PGA) حاصل از این پژوهش با مقادیر پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰.

شهرستان	پهنه خطر (استاندارد ۲۸۰۰)	PGA آیین‌نامه ۴۷۵ (سال)	PGA این پژوهش ۴۷۵ (سال)	PGA این پژوهش ۲۴۷۵ (سال)	اختلاف ۴۷۵ سال با آیین‌نامه (%)
نهاوند	بسیار زیاد (IV)	۰/۳۵	۰/۴۶۶	۰/۹۱۳	+۳۳/۱
تویسرکان	بسیار زیاد (IV)	۰/۳۵	۰/۲۸۲	۰/۴۱۴	-۱۹/۴
ملایر	زیاد (III)	۰/۳	۰/۲۲۷	۰/۲۷۲	-۲۴/۳
همدان	زیاد (III)	۰/۳	۰/۱۸۱	۰/۲۴۱	-۳۹/۷
اسدآباد	متوسط (II)	۰/۲۵	۰/۱۷	۰/۲۹۲	-۳۲/۰
بهار	متوسط (II)	۰/۲۵	۰/۱۶۵	۰/۲۳۷	-۳۴/۰
کبودرآهنگ	متوسط (II)	۰/۲۵	۰/۱۲۱	۰/۲۲	-۵۱/۶
فامنین	متوسط (II)	۰/۲۵	۰/۱۱۱	۰/۲۲۷	-۵۵/۶
درگزین	متوسط (II)	۰/۲۵	۰/۱۰۳	۰/۲۲۶	-۵۸/۸
رزن	متوسط (II)	۰/۲۵	۰/۰۸۶	۰/۲۲۴	-۶۵/۶

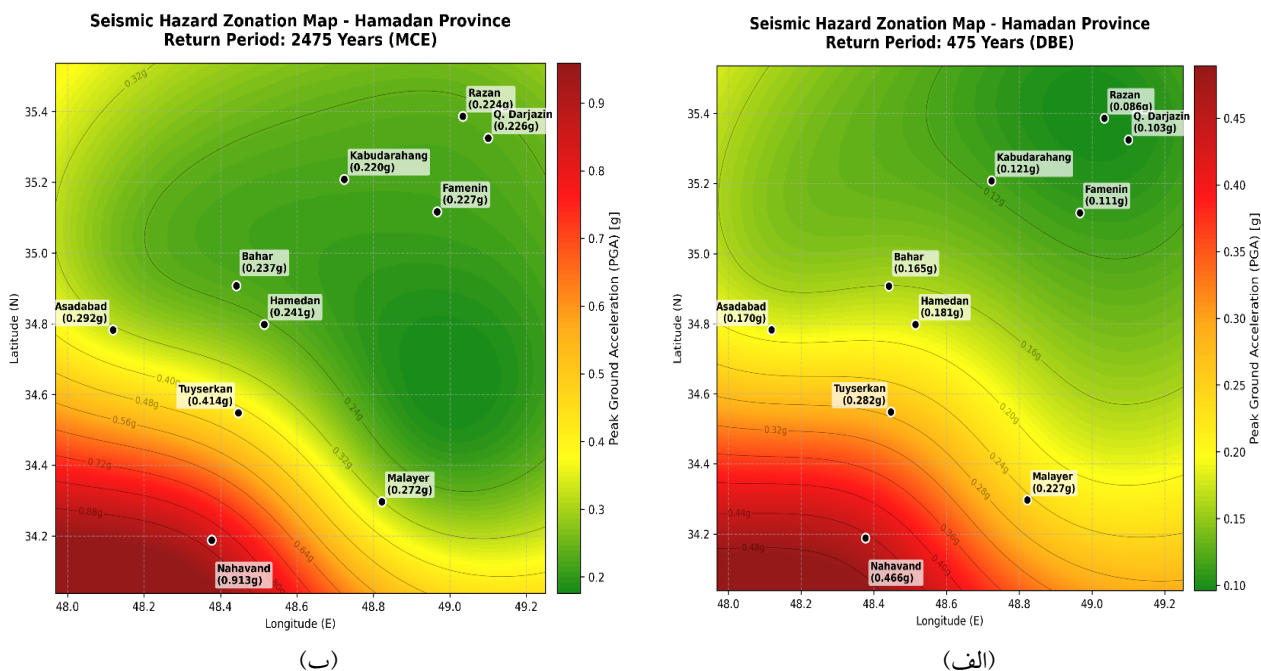
جدول ۳. منابع اصلی عدم قطعیت در تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی و روش‌های به‌کاررفته برای کنترل آنها.

روش کنترل در این مطالعه (Control Method in this Study)	محدوده بر تأثیر PGA (PGA Influence Range)	منبع عدم قطعیت (Source of Uncertainty)
استفاده از درخت منطقی با وزن‌دهی (Using weighted logic tree)	±۱۵-۲۰٪	انتخاب مدل چشمه (Source Model Selection)
تحلیل حساسیت با تغییر نرخ لغزش و Mmax (And Mmax slip rate sensitivity analysis with change)	±۱۰-۱۵٪	پارامترهای گسل (Fault Parameters)
ترکیب رابطه با وزن‌های بهینه (Combination of relations with optimal weights)	±۸-۱۲٪	روابط کاهندگی (Attenuation Relations)
نمونه مونت کارلو Monte Carlo Simulation 50,000	±۵-۸٪	نمونه‌برداری آماری (Statistical Sampling)

شتاب در نزدیکی گسل به حدود 0.913 g می‌رسد. این توزیع شتاب، حاصل از مدل‌سازی دقیق‌تر هندسه گسل و لحاظ کردن تأثیر فاصله ساختگاه تا چشمه در تحلیل‌های احتمالاتی است. با این وجود، شایان ذکر است که در این مدل‌سازی، فرض بر عملکرد چشمه‌های لرزه‌زا بر اساس روابط کاهندگی استاندارد (GMPEs) بوده و پدیده‌های دینامیکی خاص حوزه نزدیک نظیر اثرات جهت‌یافتگی (Directivity) و پالس‌های سرعت به صورت صریح مدل‌سازی نشده‌اند. از این‌رو، مقادیر به‌دست‌آمده نشان‌دهنده پتانسیل لرزه‌ای بر پایه مدل‌سازی لرزه‌ساختاری است و بررسی جزئیات دینامیکی حوزه نزدیک، نیازمند مطالعات تخصصی تکمیلی در آینده خواهد بود.

شکل ۴ الگوی توزیع مکانی بیشینه شتاب افقی زمین (PGA) را در سطح استان همدان برای دو دوره بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال نشان می‌دهد. مطابق با نقشه ۴-الف، در سطح خطر مبنا (۴۷۵ سال)، منحنی‌های هم‌شتاب با مقادیر فراتر از 0.35 g عمدتاً در نیمه جنوبی استان و در مجاورت هندسه گسل نهاوند متمرکز شده‌اند. این الگو مؤید آن است که نرخ خطر لرزه‌ای در جنوب استان (به‌ویژه شهرستان‌های نهاوند و تویسرکان) به دلیل نزدیکی به چشمه‌های لرزه‌زای فعال، تفاوت ملموسی با نواحی شمالی استان (مانند رزن و کبودرآهنگ) دارد.

در نقشه ۴-ب (دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال؛ متناظر با سطح خطر ۲ در نشریه ۳۶۰)، گسترش نواحی با شتاب بسیار بالا (رنگ‌های طیف گرم) مشهود است، به‌طوری که مقادیر



شکل ۴. الف). نقشه‌های پهنه‌بندی بیشینه شتاب افقی زمین (PGA) در استان همدان؛ دوره بازگشت ۴۷۵ سال، ب). نقشه‌های پهنه‌بندی بیشینه شتاب افقی زمین (PGA) در استان همدان؛ دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. تحلیل حساسیت نسبت به شرایط ساختگاهی

به‌منظور ارائه تصویری جامع از رفتار لرزه‌ای ساختگاه‌های مختلف در سطح استان، تحلیل خطر برای سه کلاس خاک متفاوت بر اساس میانگین سرعت موج برشی در ۳۰ متر فوقانی (V_{s30}) انجام پذیرفت. این تحلیل امکان بررسی اثر تشدید خاک بر شتاب‌های طیفی را فراهم می‌آورد. نتایج تفصیلی پارامترهای جنبش زمین (شامل PGA و شتاب طیفی در پریودهای مختلف) برای دو سطح خطر (۴۷۵ سال) و سطح خطر (۲۴۷۵ سال) در جدول ۴ خلاصه شده است.

۳-۲. توزیع طیفی خطر در گستره استان

جهت مقایسه همگن سطح خطر در شهرستان‌های مختلف، منحنی‌های طیف پاسخ یکنواخت (UHS) با فرض شرایط ساختگاهی یکسان (خاک نوع II با میانگین سرعت ۵۵۰ متر بر ثانیه) ترسیم شد (شکل ۵-الف و ب).

در شکل ۵-الف که مربوط به دوره بازگشت ۴۷۵ سال است، اگرچه نه‌اند همچنان بالاترین سطح خطر را دارد،

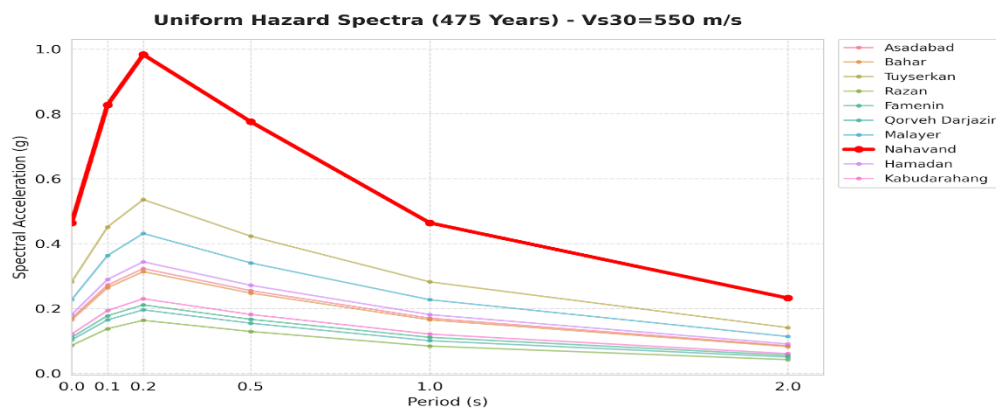
به‌منظور سنجش تأثیر عدم قطعیت ناشی از وزن‌دهی در مدل چشمه، یک تحلیل حساسیت بر روی پارامتر وزن گسل نه‌اند انجام شد. دو سناریوی جایگزین برای ساختار درخت منطقی در نظر گرفته شد: یک سناریوی محافظه‌کارانه (کاهش وزن گسل به $0/8$ و افزایش وزن مدل پهنه‌ای به $0/2$) و یک سناریوی حداکثری (تخصیص وزن کامل ۱۰۰ درصد به گسل نه‌اند). برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال، مقادیر شتاب حداکثر زمین (PGA) محاسبه‌شده برای شهرستان نه‌اند در این دو سناریو به ترتیب $0/442\text{ g}$ و $0/481\text{ g}$ بود. این مقادیر، حتی در بدبینانه‌ترین حالت (سناریوی محافظه‌کارانه)، به‌طور معناداری (حدود ۲۶٪) از حد بالای پهنه با خطر نسبی بسیار زیاد در استاندارد ۲۸۰۰ ($0/35\text{ g}$) فراتر هستند. این نتیجه، استحکام یافته اصلی تحقیق را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که کم‌برآوردی خطر لرزه‌ای در حوزه نزدیک گسل نه‌اند توسط ضوابط پهنه‌بندی ملی، پدیده‌ای پایدار و مستقل از تغییرات معقول در وزن‌دهی چشمه‌ها است.

به‌طوری‌که طیف این شهر با یک جهش ناگهانی از سایر منحنی‌ها جدا شده و شتاب‌های بسیار بزرگی را در پریودهای کوتاه و متوسط تجربه می‌کند.

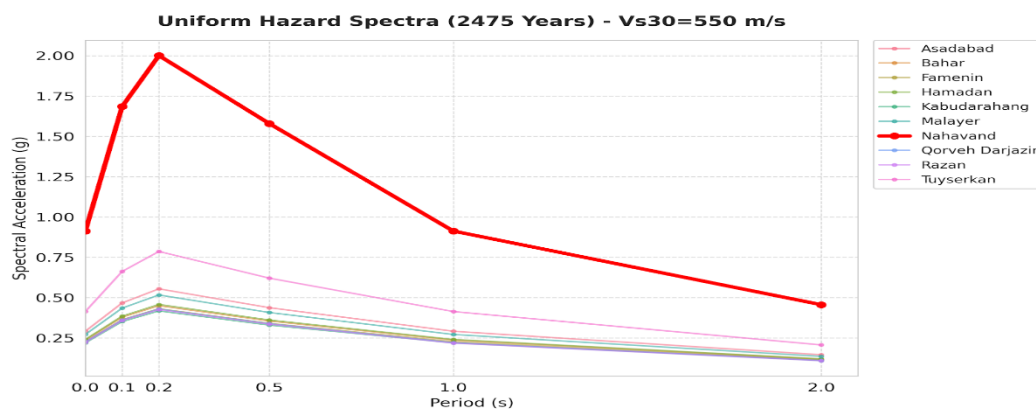
اما اختلاف آن با سایر شهرها (مانند تویسرکان) کمتر است. اما در شکل ۵-ب که مربوط به دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال است، تمایز رفتار گسل نهاوند کاملاً آشکار می‌شود،

جدول ۴. مقادیر پارامترهای جنبش زمین برای حالت میانگین خاک نوع II ($V_{s30}=550$ m/s)

شهرستان	PGA (۴۷۵)	PGA (۲۴۷۵)	$s_{0.1}SA$ (۴۷۵)	$s_{0.1}SA$ (۲۴۷۵)	$s_{0.2}SA$ (۴۷۵)	$s_{0.2}SA$ (۲۴۷۵)	$s_{0.5}SA$ (۴۷۵)	$s_{0.5}SA$ (۲۴۷۵)	$s_{1.0}SA$ (۴۷۵)	$s_{1.0}SA$ (۲۴۷۵)	$s_{2.0}SA$ (۴۷۵)	$s_{2.0}SA$ (۲۴۷۵)
نهاوند	۰/۴۶۶	۰/۹۱۳	۰/۸۳	۱/۶۹	۰/۹۸	۲/۰۰	۰/۷۸	۱/۵۸	۰/۴۶	۰/۹۱	۰/۲۳	۰/۴۶
تویسرکان	۰/۲۸۲	۰/۴۱۴	۰/۴۵	۰/۶۶	۰/۵۴	۰/۷۹	۰/۴۲	۰/۶۲	۰/۲۸	۰/۴۱	۰/۱۴	۰/۲۱
ملایر	۰/۲۲۷	۰/۲۷۲	۰/۳۶	۰/۴۴	۰/۴۳	۰/۵۲	۰/۳۴	۰/۴۱	۰/۲۳	۰/۲۷	۰/۱۱	۰/۱۴
همدان	۰/۱۸۱	۰/۲۴۱	۰/۲۹	۰/۳۹	۰/۳۴	۰/۴۶	۰/۲۷	۰/۳۶	۰/۱۸	۰/۲۴	۰/۰۹	۰/۱۲
اسدآباد	۰/۱۷۰	۰/۲۹۲	۰/۲۷	۰/۴۷	۰/۳۲	۰/۵۶	۰/۲۶	۰/۴۴	۰/۱۷	۰/۲۹	۰/۰۹	۰/۱۵
بهار	۰/۱۶۵	۰/۲۳۷	۰/۲۶	۰/۳۸	۰/۳۱	۰/۴۵	۰/۲۵	۰/۳۶	۰/۱۷	۰/۲۴	۰/۰۸	۰/۱۲
کیودراهنک	۰/۱۲۱	۰/۲۲۰	۰/۱۹	۰/۳۵	۰/۲۳	۰/۴۲	۰/۱۸	۰/۳۳	۰/۱۲	۰/۲۲	۰/۰۶	۰/۱۱
فامنین	۰/۱۱۱	۰/۲۲۷	۰/۱۸	۰/۳۶	۰/۲۱	۰/۴۳	۰/۱۷	۰/۳۴	۰/۱۱	۰/۲۳	۰/۰۶	۰/۱۱
درگزین	۰/۱۰۳	۰/۲۲۶	۰/۱۷	۰/۳۶	۰/۲۰	۰/۴۳	۰/۱۵	۰/۳۴	۰/۱۰	۰/۲۲	۰/۰۵	۰/۱۱



(الف)



(ب)

شکل ۵. الف) طیف پاسخ برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال ($V_s=550$ m/s) این نمودار نشان‌دهنده سطوح بالاتر خطر در نهاوند نسبت به سایر شهرها حتی در سطح زلزله طرح (بر اساس استاندارد ۲۸۰۰)، ب) طیف پاسخ برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال ($V_s=550$ m/s) این نمودار افزایش قابل توجه شتاب در نهاوند را برای زلزله‌های با دوره بازگشت طولانی نشان می‌دهد (دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای-سطح خطر ۲).

۳-۳. ارزیابی کفایت آیین‌نامه ۲۸۰۰ و بحث پیرامون زلزله‌های شدید

حیاتی‌ترین هدف این پژوهش، سنجش کفایت ضوابط فعلی طراحی لرزه‌ای در برابر ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی منطقه است.

بدین منظور، طیف پاسخ ویژه ساختگاه شهر نهاوند در دو سطح خطر (۴۷۵ سال) و (۲۴۷۵ سال) با طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ (برای منطقه با خطر نسبی بسیار زیاد و خاک نوع II) مقایسه شده است (شکل ۶).

تحلیل شکل (۶):

۱. در سطح خطر ۴۷۵ سال (منحنی آبی)، نتایج این پژوهش همپوشانی نزدیکی با طیف استاندارد (منحنی مشکی) دارد، هرچند در بازه پریودهای ۰/۱ تا ۰/۵ ثانیه، مقادیر به‌دست‌آمده حدود ۱۵ درصد فراتر از آیین‌نامه است. این بدان معناست که حاشیه ایمنی آیین‌نامه حتی برای زلزله‌های طرح نیز در نهاوند محدود است.

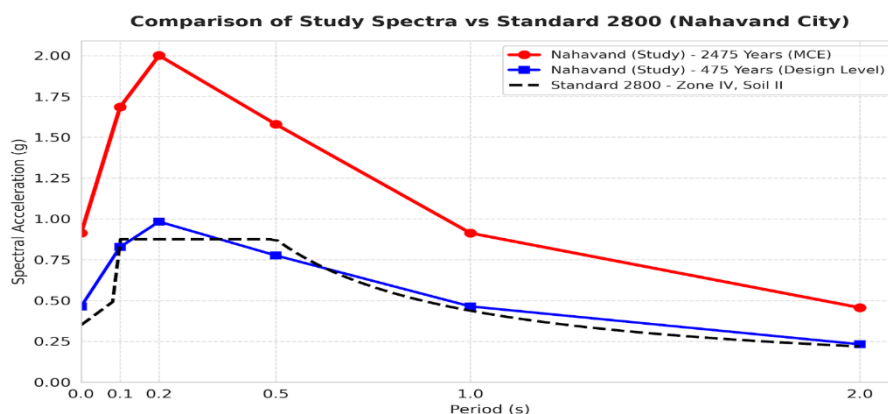
۲. در سطح خطر ۲۴۷۵ سال (منحنی قرمز)، بیشترین انحراف مقادیر طیفی نسبت به طیف استاندارد مشاهده می‌شود. مقدار شتاب طیفی در پریود ۰/۲ ثانیه به حد بحرانی $2/00 \text{ g}$ می‌رسد که بیش از $2/3$ برابر مقدار متناظر در طیف طرح استاندارد است. این افزایش قابل ملاحظه، عمدتاً ناشی از نزدیکی ساختگاه نهاوند به گسل فعال در این پژوهش است.

لازم به ذکر است که در چارچوب مدل حاضر، مدل‌سازی صریح و اختصاصی اثرات حوزه نزدیک (Near-Fault)

(Effects) مانند پالس‌های سرعت و directivity به کار گرفته نشده و نتایج حاضر صرفاً بازتاب‌دهنده تأثیر فاصله کم تا گسل در قالب روابط کاهندگی به کار رفته است. لازم به ذکر است که در چارچوب مدل به کار رفته در این پژوهش، برآورد جنبش زمین بر اساس روابط کاهندگی منتخب و پارامترهای متداول در تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی انجام شده است. در این چارچوب، رفتار جنبش زمین در فواصل مختلف از گسل‌ها از طریق روابط کاهندگی لحاظ شده و بررسی جزئیات پدیده‌های خاص مرتبط با زلزله‌های حوزه نزدیک، نظیر مشخصه‌های پالس گونه جنبش زمین، خارج از دامنه این مطالعه در نظر گرفته شده است.

اگرچه سطح خطر مبنای طراحی در استاندارد ۲۸۰۰ عمدتاً بر دوره بازگشت ۴۷۵ سال استوار است، در بسیاری از مطالعات خطر لرزه‌ای، بررسی سطوح خطر متناظر با دوره بازگشت‌های بزرگ‌تر نیز به منظور شناخت جامع‌تر پتانسیل لرزه‌ای منطقه انجام می‌شود. بر همین اساس، در این پژوهش علاوه بر سطح خطر ۴۷۵ سال، تحلیل‌ها برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال نیز ارائه شده است تا دامنه تغییرات شدت جنبش زمین در سناریوهای با احتمال وقوع کمتر نیز مورد بررسی قرار گیرد.

نتایج حاصل می‌تواند به عنوان مبنایی برای مطالعات تکمیلی در حوزه طراحی لرزه‌ای، ارزیابی عملکرد سازه‌ها و برنامه‌ریزی مدیریت ریسک لرزه‌ای در مناطق مجاور گسل نهاوند مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۶. مقایسه طیف پاسخ ویژه ساختگاه شهر نهاوند در دو سطح خطر (۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال) با طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش ۴) برای منطقه با خطر بسیار زیاد.

۴. نتیجه‌گیری

و محدود به محدوده مطالعاتی مذکور است. بنابراین، این پژوهش نه تنها ناقض فلسفه پهنه‌بندی ملی نیست، بلکه به عنوان سندی در جهت «دقیق‌سازی و بهبود پارامترهای لرزه‌ای» در سطوح محلی و در راستای ارتقای تاب‌آوری سازه‌ها در برابر زلزله‌های با دوره بازگشت طولانی ارزیابی می‌شود.

مراجع

ایزدی کیان، ل.؛ علیپور، ر. و شهریاری، ی. (۱۴۰۳). بررسی ساختاری و فرکتالی پایانه جنوبی گسل نهاوند. *زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته*، ۱۴(۳)، ۵۷۸-۵۹۷.

بیت‌اللهی، ع. (۱۳۹۹). گزارش زمین‌لرزه‌های مهرماه ۱۳۹۹ نهاوند (استان همدان). گزارش فنی، تهران: بخش زلزله‌شناسی مهندسی و خطرپذیری، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

حیدری ر. و میرزایی ن. (۱۳۸۸). الگوی لرزه‌زمین‌ساختی گسل اصلی عهد حاضر زاگرس بین ۳۳ تا ۳۵ درجه عرض شمالی، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۵(۳)، ۸۳-۹۶.

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (۱۳۹۳). آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) (ویرایش چهارم). نشریه شماره ۴۸۵. تهران: نشر مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

در این پژوهش، تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی استان همدان با تمرکز بر گسل نهاوند و با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو انجام شد. یافته‌های کلیدی پژوهش به شرح زیر است:

۱. گسل نهاوند، با تکیه بر شواهد نوزمین‌ساختی و ثبت لرزه‌خیزی دهه‌های اخیر، به عنوان ساختار لرزه‌زای غالب در جنوب استان شناسایی شد. نتایج نشان می‌دهد که این گسل، نقش مؤثری در تبیین سطح خطر لرزه‌ای منطقه دارد.
۲. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده، شتاب طیفی در شهر نهاوند برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال در خاک نوع II، به مقادیر قابل توجهی می‌رسد که در برخی پربوده‌های کوتاه و میان‌مرتبه، فراتر از طیف طرح آیین‌نامه ۲۸۰۰ است. این تفاوت در مقیاس محلی، ناشی از ویژگی‌های خاص هندسی گسل و نزدیکی ساختگاه به چشمه لرزه‌زا است.
۳. یافته‌های این مطالعه بر این نکته تأکید دارند که نقشه‌های پهنه‌بندی ملی، اگرچه برای مدیریت کلان خطر لرزه‌ای و ساخت‌وسازهای عمومی بسیار ارزشمند هستند، اما در مجاورت گسل‌های فعال، به کارگیری پارامترهای لرزه‌زای دقیق‌تر (Parameters Refined Source) و تحلیل‌های ساختگاه‌ویژه، برای برآورد واقع‌بینانه‌تر خطر جهت سازه‌های با اهمیت بالا و حیاتی، اجتناب‌ناپذیر است.
۴. تأکید می‌شود که نتایج حاصله، ماهیتی مشروط به فرضیات مدل چشمه و روابط کاهندگی انتخاب‌شده داشته

Aki, K. (1965). Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. *Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ.*, 43, 237-239.

Akkar, S., Sandikkaya, M. A., & Bommer, J. J. (2014). Empirical ground-motion models for point-and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bulletin of earthquake engineering*, 12(1), 359-387.

Alipoor, R., & Aghayani, E. (2025). The NW extension of the Nahavand Fault along the Main Recent Fault, west Iran. *PLoS One*, 20(6), e0326603.

Bender, B. (1983). Maximum likelihood estimation of b values for magnitude grouped data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73(3), 831-851.

Bommer, J. J., & Stafford, P. J. (2016). Seismic hazard and earthquake actions. In *Seismic design of buildings to eurocode 8* (pp. 21-54). CRC Press.

Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the seismological society of America*, 58(5), 1583-1606.

Gardner, J. K., & Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian?. *Bulletin of the seismological society of America*, 64(5), 1363-1367.

Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima, Y., & Koketsu, K. (2009). An empirical spectral ground-motion model for Iran. *Journal of seismology*, 13(4), 499-515.

Kroese, D. P., Brereton, T., Taimre, T., & Botev, Z. I. (2014). Why the Monte Carlo method is so

- important today. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 6(6), 386-392.
- Mousavi-Bafrouei, S. H., Mirzaei, N., & Shabani, E. (2014). A declustered earthquake catalog for the Iranian Plateau. *Annals of geophysics*, 57(6).
- Reasenber, P. (1985). Second-order moment of central California seismicity, 1969–1982. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B7), 5479-5495.
- Talebi, M., Zare, M., Peresan, A., & Ansari, A. (2017). Long-term probabilistic forecast for $M \geq 5.0$ earthquakes in Iran. *Pure and Applied Geophysics*, 174(4), 1561-1580.
- Zafarani, H., Luzi, L., Lanzano, G., & Soghrat, M. R. (2018). Empirical equations for the prediction of PGA and pseudo spectral accelerations using Iranian strong-motion data. *Journal of Seismology*, 22(1), 263-285.
- Wells, D. L. & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America* (1994) 84 (4), 974–1002.