

استفاده از روش باز نمونه‌گیری داده‌ها در تدقیق رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین بور - اتکینسون ۲۰۰۸

زینب رفیعی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علیرضا آذربخت* (دانشیار)

زینت رجیبی (کارشناس ارشد)

مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اروم

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۸ (دوره ۲ - ۳۵، شماره ۴/۱، ص. ۱۳۱-۱۳۹، یادداشت شتی)

در بیشتر مطالعات بررسی کاهش خسارت‌های ناشی از زلزله، اقدام به تحلیل خطر زلزله و همچنین پیش‌بینی جنبش حرکت زمین توسط روابطی موسوم به روابط پیش‌بینی حرکت زمین انجام می‌شود. هدف نوشتار حاضر، دستیابی به رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین با میزان پایداری بالاست. بدین منظور، به بهینه‌سازی ضرایب مدل پیش‌بینی بور و اتکینسون (۲۰۰۸) پرداخته شده است. برای تحقق هدف ذکر شده از الگوریتم ژنتیک با تابع هدف معیار بیشینه‌ی درست‌نمایی برای افزایش میزان تناسب رابطه بر روی مجموعه‌ی داده‌های مورد استفاده و تابع هدف باز نمونه‌گیری داده‌ها برای افزایش پایداری رابطه استفاده شده است. داده‌های مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر، بخشی از داده‌های جهانی مرکز مطالعات مهندسی زلزله‌ی پاسفیک با تعداد ۱۵۳۴۸ رکورد بوده است. به منظور ارزیابی مدل اشاره شده، آزمون‌های آماری بر روی آن انجام و نتایج به دست آمده با ۸ مدل از روابط نسل جدید مقایسه شده است. نتایج مقایسه‌ی پژوهش حاضر حاکی از آن است که مدل به دست آمده، کمترین میزان بیشینه‌ی درست‌نمایی (LLH) به مقدار ۱/۹ و همچنین پایدارترین رابطه از نظر معیار باز نمونه‌گیری داده (RSA) با نموداری صعودی و نزدیک‌ترین به عدد ۱ است. نتایج سایر آزمون‌های آماری، از جمله: معیارهای خطا، معیار ضریب تعیین، و معیار کارایی با نتایج به ترتیب ۰/۸۶، ۰/۹۸ و ۸۸/۱۹ نیز حاکی از قابل قبول بودن و کارایی بالای مدل اشاره شده است.

واژگان کلیدی: مدل کاهندگی بور و اتکینسون (۲۰۰۸)، بیشینه‌ی شتاب زمین، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، مرکز مطالعات مهندسی زلزله‌ی پاسفیک، بیشینه‌ی درست‌نمایی، باز نمونه‌گیری داده.

z.rafee1990@yahoo.com
a-azarbakht@araku.ac.ir
matinrajabi@yahoo.com

۱. مقدمه

یکی از اصلی‌ترین اجزاء تحلیل خطر لرزه‌ی است.^[۱] تاکنون روابط پیش‌بینی حرکت زمین متعددی توسط برخی پژوهشگران برای نواحی مختلف لرزه‌خیز ارائه شده است که هر کدام از آن‌ها نقاط ضعف و قدرتی دارند. با گذشت زمان و ارائه‌ی روش‌های جدید ریاضی و آماری، ارائه‌ی یک رابطه‌ی کاهندگی که بتواند نتایج قابل‌قبولی در آزمون‌های اخیر داشته باشد، امری ضروری و مهم به نظر می‌رسد.

در سال ۲۰۰۹، مطالعه‌ی که منجر به حصول یک رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین جدید براساس روش برنامه‌نویسی ژنتیک شده است، توسط کابالار و سویک برای ناحیه‌ی لرزه‌خیز ترکیه صورت گرفته است،^[۲] که در آن با استفاده از مجموعه‌ی از معتبرترین داده‌های ترکیه، مدل کاهندگی جهت پیش‌بینی بیشینه‌ی شتاب زمین

با توجه به ماهیت تصادفی پدیده‌ی زلزله، برآورد نیروهای ناشی از زلزله در چارچوبی به نام تحلیل خطر لرزه‌ی^(۱) صورت می‌پذیرد.^[۱] تحلیل خطر لرزه‌ی، شامل مراحل مختلف، از جمله: برآورد پارامترهای جنبش نیرومند زمین با استفاده از معادلات پیش‌بینی حرکت زمین (GMPEs)^(۲) است. با توجه به اینکه پارامترهای جنبش زمین با دور شدن از منبع زمین‌لرزه کاهش می‌یابند، این مدل‌ها به مدل‌های کاهندگی معروف هستند. بنابراین از مهم‌ترین اهداف پژوهشگران در تحلیل خطر لرزه‌ی، پیدا کردن مناسب‌ترین و کاراترین رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین به‌عنوان

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۹/۲۹، اصلاحیه ۱۳۹۷/۱/۱۴، پذیرش ۱۳۹۷/۱/۲۸.

DOI:10.24200/J30.2018.5685.2262

۲. داده‌ها و روابط مورد استفاده

داده‌های نسل جدید روابط پیش‌بینی حرکت زمین (۲۰۱۴)، بانک اطلاعاتی جامعی است که شامل ۱۵۳۴۸ رکورد از رکوردهای ثبت شده از زلزله‌های سطحی پوسته‌ی در نواحی فعال لرزه‌ی در سراسر جهان است. از جمله پارامترهای موجود در داده‌های ذکر شده، بزرگا و مکان است.

پارامترهای مورد نیاز در رابطه‌ی منتخب ارائه شده در پژوهش حاضر، بزرگا^۱ (M)، فاصله (R_{JB})^{۱۱}، سرعت موج برشی (V_{S30})^{۱۲}، نوع گسلش^{۱۳} و پیشینه‌ی شتاب مشاهده شده‌ی زمین‌لرزه (PGA) است. مجموعه داده‌های مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر، بخشی از پایگاه داده‌های نسل جدید روابط پیش‌بینی حرکت زمین در سال ۲۰۱۴ است که براساس محدودیت‌های ارائه شده در نوشتار کمپل و بزرگ‌نیا (۲۰۱۴) به دست آمده است.^{۱۴} لازم به ذکر است که محدودیت‌های اخیر مشابه با محدودیت‌های ارائه شده در نوشتار بور و آتکینسون (۲۰۱۴) بوده است که به دلیل شفاف بیان نشدن در نوشتار بور و آتکینسون، از نوشتار کمپل و بزرگ‌نیا (۲۰۱۴) استفاده شده است. تابع منتخب به منظور بهینه‌سازی در مطالعه‌ی حاضر، رابطه‌ی بور و آتکینسون (۲۰۰۸) است. رابطه‌ی بور و آتکینسون (۲۰۰۸)، یکی از روابط پیش‌بینی حرکت زمین نسل جدید است که سازگاری مناسبی بین مقادیر پیشینه‌ی شتاب زمین مشاهده شده و پیش‌بینی شده دارد. علت انتخاب رابطه‌ی ذکر شده از بین روابط نسل جدید، کم بودن تعداد پارامترهای ورودی آن است که می‌تواند باعث کاهش عدم قطعیت‌های حاصل از تبدیل پارامترها (به ویژه در مناطقی که پایگاه داده‌های آن‌ها از نظر پارامترهای لرزه‌ی ناقص است) شود. رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین بور و آتکینسون (۲۰۰۸) با استفاده از زیرمجموعه‌ی از داده‌های نسل جدید روابط پیش‌بینی حرکت زمین شامل ۱۵۷۴ رکورد از ۵۸ رکورد زلزله و با هدف تخمین پیشینه‌ی شتاب زمین، پیشینه‌ی سرعت زمین و طیف پاسخ شتاب براساس میرایی ۰.۵٪ برای دوره‌های تناوب بین ۱۰-۱۰۰٪ ثانیه حاصل شده است. ورودی‌های رابطه‌ی ذکر شده‌ی پیش‌بینی حرکت زمین عبارت‌اند از: بزرگا (M)، فاصله‌ی افقی تا محل گسیختگی (R_{JB})، سرعت موج برشی در عمق ۳۰ متری (V_{S30}) و نوع گسلش (رابطه‌ی ۱).^{۱۵}

$$\ln Y = F_M(M) + F_D(R_{JB}, M) + F_S(V_{S30}, R_{JB}, M) + \varepsilon \sigma T \quad (1)$$

و روابط ۲ و ۳، به ترتیب توابع بزرگا و فاصله هستند.

$$a) M \leq M_h$$

$$F_M(M) = e_0 U + e_1 SS + e_2 NS + e_3 RS + e_4(M - M_h) + e_5(M - M_h)^2 \quad (الف)$$

$$b) M > M_h$$

$$F_M(M) = e_0 U + e_1 SS + e_2 NS + e_3 RS + e_4(M - M_h) \quad (ب)$$

که در آن‌ها، مقادیر U ، SS ، NS و RS بیانگر اثر نوع گسلش هستند و به ترتیب: به نوع گسلش نامشخص، امتداد لغز، نرمال و معکوس اشاره دارند و مقادیر آن‌ها در جدول ۱ مشخص شده است.

استخراج شده است. نتایج حاصل از بررسی‌های به عمل آمده در مطالعه‌ی اخیر، نشان‌دهنده‌ی سازگاری مناسب بین مقادیر پیشینه‌ی شتاب زمین (PGA)^۲ در حالت مشاهده شده و پیش‌بینی شده توسط رابطه‌ی به دست آمده از برنامه‌نویسی ژنتیک است.

همچنین کرمانی و همکاران (۲۰۰۹)، یک رابطه‌ی جدید پیش‌بینی حرکت زمین جهت پیش‌بینی پیشینه‌ی شتاب زمین با استفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک به دست آوردند.^{۱۶} که با در نظر گرفتن زیرمجموعه‌ی شامل ۸۰۹ رکورد از ۵۳ زمین‌لرزه‌ی موجود در مجموعه داده‌های مرکز مطالعات مهندسی زلزله‌ی پاسفیک استخراج شده بود. همچنین به منظور ارزیابی مدل‌های به دست آمده در مطالعه‌ی انجام شده، معیار ضریب تعیین (R^2) و دو معیار خطا، شامل: میانگین مطلق خطا (MAE)^۴ و ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE)^۵ برای مکانیزم‌های مختلف گسلش محاسبه و ارزیابی شده‌اند.

آذربخت و همکاران (۲۰۱۳)،^{۱۷} نیز با ارائه‌ی روش بازنمونه‌گیری داده‌ها (RSA)^۶، یک روش نوین دیگر در زمینه‌ی تحلیل حساسیت روابط پیش‌بینی حرکت زمین به داده‌های ورودی ارائه کرده‌اند که مبنای مطالعه برای دستیابی به رابطه‌ی جدیدی براساس روش برنامه‌نویسی ژنتیک جهت پیش‌بینی پیشینه‌ی شتاب زمین، برای ناحیه‌ی لرزه‌خیز ایران قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از ارزیابی مدل حاصل با مدل‌های موجود، از طریق چند روش آماری و ریاضی و همچنین رویکرد جدید تحلیل حساسیت با استفاده از بازنمونه‌گیری از داده‌ها برای تشخیص پایداری مدل‌ها، حاکی از دقت بالای رابطه‌ی مذکور است.^{۱۸}

همچنین از دیگر مطالعات انجام شده در زمینه‌ی تحلیل حساسیت بر پایه‌ی الگوریتم‌های تکاملی در زمینه‌ی تولید رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین، مطالعه‌ی جلالوندی و آذربخت (۲۰۱۵) است که برای فلات ایران صورت گرفته و برای دوره‌های زمانی صفر تا ۲ ثانیه ارائه شده است. به منظور ارزیابی مدل مذکور، آزمون‌های آماری مختلفی بر روی آن انجام شده و نتایج به دست آمده نشان داده است که مدل به دست آمده در روش بازنمونه‌گیری داده‌ها، نسبت به سایر مدل‌های مورد ارزیابی، بهترین عملکرد و پایداری مناسبی دارد.^{۱۹}

در سال ۲۰۰۸، نیز با ارائه‌ی مجموعه‌ی از داده‌های جهانی توسط مرکز مطالعات مهندسی زلزله پاسفیک،^{۲۰} نسل جدید معادلات پیش‌بینی حرکت زمین (NGA)^۸ ارائه شد که قید استفاده از آن‌ها، فقط فعالیت منطقه از نظر زمین‌ساختی و وقوع زلزله‌ها در قشر کم‌عمق زمین است.^{۸-۱۱} همچنین متعاقباً در سال ۲۰۱۴، با بروزرسانی مجموعه داده‌های موجود، روابط نسل جدید توسعه یافتند و روابط پیش‌بینی حرکت زمین (۲۰۱۴) ارائه شدند.^{۱۲-۱۵} با توجه به نتایج به دست آمده در برخی پژوهش‌های پیشین،^{۱۶-۱۷} روابط به دست آمده با استفاده از داده‌های نسل جدید روابط پیش‌بینی حرکت زمین، در برخی آزمون‌های آماری از جمله لگاریتم درست‌نمایی (LLH)^۹ نتایج قابل‌قبولی را داشته‌اند. نتایج حاصل از آزمون بازنمونه‌گیری داده‌ها بر روی روابط اخیر، نشان‌دهنده‌ی عدم پایداری آن‌ها و عدم لحاظ کردن این موضوع در تولید روابط پیش‌بینی حرکت زمین هستند. بنابراین با توجه به جامع بودن روابط پیش‌بینی حرکت زمین در سطح جهانی، هدف اساسی از انجام مطالعه‌ی حاضر، بهبود نسل جدید روابط پیش‌بینی حرکت زمین با استفاده از الگوریتم ژنتیک در جهت افزایش پایداری آن‌ها در مقابل انواع پارامترهای لرزه‌ی ورودی است. برای تحقق هدف مورد نظر با استفاده از روش بازنمونه‌گیری داده‌ها، انتظار می‌رود با بالارفتن تعداد داده‌های موجود، پاسخ دقیق‌تری از رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین حاصل شود.^{۲۱}

$$V_r < V_{Sr0} < V_{ref} \rightarrow$$

$$b_{nl} = b_r \ln(V_{Sr0}/V_{ref}) / \ln(V_r/V_{ref})$$

$$V_{ref} \leq V_{Sr0} \rightarrow b_{nl} = 0$$

$$V_1 = 180 \text{ m/s}, V_r = 300 \text{ m/s} \quad (6 \text{ ج})$$

همچنین در معادلات اخیر $e_0, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8, e_9, e_{10}, e_{11}, e_{12}, e_{13}, e_{14}, e_{15}, e_{16}, e_{17}, e_{18}, e_{19}, e_{20}$ به منظور ارزیابی مدل به دست آمده در تخمین پارامتر بیشینه شتاب، به ارزیابی آن با استفاده از آزمون‌های آماری و سپس مقایسه‌ی آن با برخی روابط پیش‌بینی حرکت زمین پرداخته شده است. مدل‌های کاهندگی مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر جهت ارزیابی و مقایسه، روابط پیش‌بینی حرکت زمین نسل جدید در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ است.

پروژه‌ی تولید نسل جدید مدل‌های کاهندگی، مجموعه‌ی روابط پیش‌بینی حرکت زمین منتخب را برای استفاده در شرایط جغرافیایی گوناگون توسعه بخشیده و یگانه قید استفاده از روابط ذکر شده، فعالیت منطقه از نظر زمین‌ساختی و وقوع زلزله‌ها در قشر کم عمق زمین است. در حین پیشبرد پروژه‌ی نسل جدید روابط پیش‌بینی حرکت زمین، هر تیم توسعه‌دهنده به اطلاعات جامعی از مجموعه‌ی داده‌های مورد استفاده نیازمند است که از جمله می‌توان به اطلاعات پیرامون پارامترهای منبع لرزه‌ی، فاصله‌ی منشأ رخداد تا محل، شرایط محلی ایستگاه ثبت شتاب‌نگاشت و موارد دیگر اشاره کرد. از دیگر ویژگی‌های روابط حاصل شده از طریق پروژه‌ی حاضر، جامعه‌ی آماری بالای مجموعه‌ی داده‌هاست. در مطالعه‌ی حاضر، مدل‌های بور و آنکینسون (۲۰۰۸)، کمپل و بزرگ‌نیا (۲۰۰۸)، آبراهامسون و سیلوا (۲۰۰۸)، چپو و یانگز (۲۰۰۸)، بور و آنکینسون (۲۰۱۴)، کمپل و بزرگ‌نیا (۲۰۱۴)، آبراهامسون و سیلوا (۲۰۱۴)، چپو و یانگز (۲۰۱۴) ارزیابی شده‌اند. در جدول ۲، جزئیات مربوط به مدل‌های منتخب ارائه شده است.

۳. روش پژوهش

در مطالعه‌ی حاضر، به منظور بهینه‌سازی رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین مورد نظر در جهت بهبود پایداری آن، از الگوریتم ژنتیک چندهدفه استفاده شده است. به طوری که توابع هدف به طور جداگانه بهینه شده‌اند. برای آماده‌سازی داده‌های مورد استفاده، در ابتدا مجموعه‌ی داده‌ها به دو گروه آموزشی^{۱۴} (شامل ۸۰٪ مجموعه‌ی داده‌ها) و آزمایشی^{۱۵} (شامل ۲۰٪ مجموعه‌ی داده‌ها) تقسیم شده‌اند. انتخاب درصدی مورد نظر به گونه‌ی بوده است که مجموعه‌ی داده‌های آموزشی شامل بیشینه‌ی داده‌ها باشد تا بتوان با استفاده از داده‌های بیشتری رابطه را بهینه ساخت. از طرفی، مجموعه‌ی داده‌های آزمایشی به میزانی باشد که نتایج حاصل از آزمایش با استفاده از آن‌ها قابل اعتماد باشد و بتوان روی نتایج حاصل تصمیم‌گیری کرد. مجموعه‌ی داده‌های ذکر شده به صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت انتخاب شده‌اند. هدف از تقسیم‌بندی انجام شده، بررسی صحت و دقت مدل‌های به دست آمده براساس مجموعه‌ی داده‌های آموزشی، توسط مجموعه‌ی داده‌های آزمایشی است. در جدول ۳، تنظیمات پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک نمایش داده شده است.

برای بهینه‌سازی رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین مورد مطالعه، از توابع LLH و RSA استفاده شده است. LLH لگاریتم درست‌نمایی است که هر اندازه مقدار

جدول ۱. ضرایب مربوط به متغیرهای ساختگی انواع مختلف گسلس.^[۸]

نوع گسلس	U	SS	NS	RS
نامشخص	۱	۰	۰	۰
امتداد لغز	۰	۱	۰	۰
زمال	۰	۰	۱	۰
معکوس	۰	۰	۰	۱

$$F_D(R_{JB}, M) = [c_1 + c_2(M - M_{ref})] \ln(R/R_{ref}) + c_3(R - R_{ref}) \quad (3)$$

که در آن، $R = \sqrt{R_{JB}^2 + h^2}$ و R_{ref} فاصله‌ی مرجع و مساوی ۱ است.

$$F_S = F_{LIN} + F_{NL} \quad (4)$$

که در آن، F_{NL} و F_{LIN} به ترتیب روابط خطی و غیرخطی مربوط به عبارت آثار محل هستند که مطابق روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند:

$$F_{LIN} = b_{lin} \ln(V_{Sr0}/V_{ref}) \quad (5)$$

که در آن، b_{lin} ضریب وابسته به دوره‌ی تناوب و V_{ref} سرعت مرجع مشخص و برابر ۷۶۰ متر بر ثانیه است.^[۸]

$$a) pga \ll nl \leq a_1 \quad (6 \text{ الف})$$

$$F_{NL} = b_{nl} \ln(pga_low / a_1)$$

$$b) a_1 < pga \ll nl \leq a_2$$

$$F_{NL} = b_{nl} \ln(pga_low / a_1) + c[\ln(pga \ll nl / a_1)]^2 + d[\ln(pga \ll nl / a_1)]^3 \quad (6 \text{ ب})$$

$$c) a_2 < pga \ll nl$$

$$F_{NL} = b_{nl} \ln(pga \ll nl / a_1)$$

$$a_1 = 0.1^3 g$$

$$a_2 = 0.1^9 g$$

$$pga_low = 0.1^6 g$$

$$pga \ll nl = \text{predicted PGA, in g for}$$

$$V_{ref} = 760 \text{ m/s (by } F_S = 0 \text{ and } \varepsilon = 0.)$$

$$c = (3\Delta y - b_{nl}\Delta x) / \Delta x^2$$

$$d = -(2\Delta y - b_{nl}\Delta x) / \Delta x^3$$

$$\text{Where } \Delta x = \ln(a_2/a_1),$$

$$\Delta y = b_{nl} \ln(a_2/pga_low)$$

$$V_{Sr0} \leq V_1 \rightarrow b_{nl} = b_1$$

$$V_1 < V_{Sr0} \leq V_r \rightarrow$$

$$b_{nl} = (b_1 - b_r) \ln(V_{Sr0}/V_r) / \ln(V_1/V_r) + b_r$$

جدول ۲. جزئیات مربوط به مدل‌های کاهندگی ارزیابی شده در مطالعه‌ی حاضر.

ردیف	رابطه پیش‌بینی حرکت زمین	مخفف	منطقه‌ی حاکم	فاصله (کیلومتر)	بزرگی گشتاوری	مرجع
۱	بور و اتکینسون ۲۰۰۸	BA۰۸	کالیفرنیا	۰-۲۰۰	۵-۸	[۸]
۲	کمپل و بزرگ‌نیا ۲۰۰۸	CB۰۸	کالیفرنیا	۰-۲۰۰	۴-۷٫۵	[۹]
۳	آبراهامسون و سیلوا ۲۰۰۸	AS۰۸	کالیفرنیا	۰-۲۰۰	۵-۸٫۵	[۱۰]
۴	چیو و یانگز ۲۰۰۸	CY۰۸	کالیفرنیا	۰-۲۰۰	۴-۸	[۱۱]
۵	بور و اتکینسون ۲۰۱۴	BSSA۱۴	کالیفرنیا	۰-۴۰۰	۳-۸٫۵	[۱۲]
۶	کمپل و بزرگ‌نیا ۲۰۱۴	CB۱۴	کالیفرنیا	۰-۳۰۰	۳٫۳-۸	[۱۳]
۷	آبراهامسون و سیلوا ۲۰۱۴	ASK۱۴	کالیفرنیا	۰-۳۰۰	۳-۸٫۵	[۱۴]
۸	چیو و یانگز ۲۰۰۱۴	CY۱۴	کالیفرنیا	۰-۳۰۰	۳٫۵-۸	[۱۵]

جدول ۳. پارامترهای منتخب در الگوریتم ژنتیک.

تعداد کل داده‌ها	۱۵۳۴۸
داده‌های آموزشی	۱۲۲۷۹
داده‌های آزمایشی	۳۰۷۰
جمعیت	۵۰۰
نسل	۲۰۰
تعداد نخه	۵۰
ضریب ترکیب	۰٫۷

$MedPv_M100$ مقدار میانه‌ی P_b برای پارامتر M برای 100% از داده‌ها؛
 $MedPv_R90$ مقدار میانه‌ی P_b برای پارامتر R برای 90% از داده‌ها؛
 $MedPv_R100$ مقدار میانه‌ی P_b برای پارامتر R برای 100% از داده‌ها؛
 $MedPv_Vs90$ مقدار میانه‌ی P_b برای پارامتر V_s برای 90% از داده‌ها؛
 $MedPv_Vs100$ مقدار میانه‌ی P_b برای پارامتر V_s برای 100% از داده‌ها هستند.

با تکرار برنامه و تغییر تعداد جمعیت، نسل و عملگر تقاطع، بهترین ضرایب به‌دست آمده انتخاب شده است. ضرایب بهینه شده مطابق جدول ۴ به‌دست آمده است. براساس مقایسه‌ی انجام شده مشاهده می‌شود که ضرایب به‌دست آمده با ضرایب اصلی تفاوت دارند. تمامی تغییرات مذکور، در روند بهینه‌سازی رابطه تأثیر داشته‌اند؛ اما برخی ضرایب اختلاف زیادی با ضرایب اصلی در رابطه‌ی بور و اتکینسون (۲۰۰۸) دارند. از جمله‌ی ضرایب مورد اختلاف، می‌توان ضرایب e_5 ، e_4 و b_2 را نام برد. با توجه به معادله‌های (۲الف) و (۲ب) در رابطه‌ی بور و اتکینسون (۲۰۰۸)، ضرایب‌های e_5 و e_4 مربوط به توابع بزرگا هستند. در بخش ۴-۴ نوشتار حاضر مشاهده خواهد شد که تغییرات ذکر شده در پارامترهای مرتبط به توابع بزرگا، سبب بهبود در نمودارهای RSA برای پارامتر بزرگا در رابطه‌ی بهینه شده، نسبت به رابطه‌ی اصلی بور و اتکینسون (۲۰۰۸) شده است. ضریب b_2 مربوط به توابع سرعت برشی، توابع بزرگا و توابع فاصله است. با توجه به معادله‌ی ۴، در رابطه‌ی بور و اتکینسون (۲۰۰۸)، ضریب b_2 برای محاسبه‌ی مقدار b_{n1} استفاده شده است. مقادیر b_{n1} به‌دست آمده با استفاده از ضریب b_2 ، به‌طور مستقیم و غیرمستقیم در معادله‌ی ۶ برای به‌دست آوردن تابع FNL و تابع FNL نیز با توجه به معادله‌ی ۴ برای محاسبه‌ی FS استفاده شده است. این در حالی است که FS با توجه به معادله‌ی ۱ تابعی از پارامترهای V_{S3} ، $R_{j\theta}$ و M است. با توجه به نمودارهای آزمون RSA در بخش ۴-۴، می‌توان بیان کرد که تغییرات در ضریب b_2 ، کمک به بهبود نمودارهای RSA برای پارامتر سرعت موج برشی، فاصله ($R_{j\theta}$) و بزرگا کرده است؛ به‌طوری که تمامی نمودارهای RSA ، روندی صعودی و بیشتر آن‌ها مقداری نزدیک به ۱ دارند.

۴. بحث در نتایج

۴.۱. معیار خطا

معیارهای خطا، شاخص‌هایی هستند که جهت ارزیابی صحت پیش‌بینی مدل استفاده می‌شوند و هر چه کمتر باشند، نمایانگر پیش‌بینی دقیق‌تر روابط هستند. [۱۸]

LLH کمتر باشد، تناسب رابطه بر روی مجموعه‌ی داده‌های مورد استفاده بیشتر است. RSA شاخصی برای بررسی میزان پایداری روابط پیش‌بینی حرکت زمین با تکیه بر تعیین میزان انحراف بین باقیمانده‌ها در مقابل انواع مختلف پارامترهای لرزه‌ی ورودی است. [۱۵]

بدین منظور برای کاهش میزان انحراف باقیمانده‌ها در مقابل پارامترهای ورودی، توابع هدف به‌صورت معادلات ۷ الی ۱۰ تعریف شده‌اند. به‌منظور معنی‌دار کردن و همچنین امکان تفسیر میزان انحراف باقیمانده‌ها، آزمون فرض آماری تعریف شده است. این آزمون با فرض تهی شیب و عرض از مبدأ خط حاصل از درون‌یابی خطی بر مجموعه‌ی داده‌ها (باقیمانده‌ها) برابر صفر تعریف می‌شود. هر اندازه مقدار p -value به ۱ نزدیک‌تر باشد، مدل کاهندگی انحراف کمتری و پایداری بیشتری در پیش‌بینی جنبش‌های زمین دارد. p -value‌ها دو پارامتر شیب و عرض از مبدأ را محاسبه می‌کنند. P_b نشان‌دهنده‌ی p -value شیب و P_a نشان‌دهنده‌ی p -value عرض از مبدأ خط برازش شده بر روی باقیمانده‌ها هستند.

$$Fitness\ function\ 1 = 0.7 * (1 - MedPv_M90) + (1 - MedPv_M100) \quad (7)$$

$$Fitness\ function\ 2 = 0.7 * (1 - MedPv_R90) + (1 - MedPv_R100) \quad (8)$$

$$Fitness\ function\ 3 = 0.7 * (1 - MedPv_Vs90) + (1 - MedPv_Vs100) \quad (9)$$

$$Fitness\ function\ 4 = LLH \quad (10)$$

که در آن‌ها:

$MedPv_M90$ مقدار میانه‌ی P_b برای پارامتر M برای 90% از داده‌ها؛

جدول ۴. ضرایب مدل استخراج شده الگوریتم ژنتیک برای مجموعه‌ی داده‌های ۱۵۳۴۸.

ضرایب	مدل بهینه شده	مدل اصلی بور و آنکینسون (۲۰۰۸)	ضرایب	مدل اصلی بور و آنکینسون (۲۰۰۸)	مدل بهینه شده	ضرایب
e_0	-۰٫۴۹۴	-۰٫۵۳۸	c_2	۰٫۱۰۰	۰٫۱۲۰	
e_1	-۰٫۶۳۲	-۰٫۵۰۴	c_3	-۰٫۰۱۳	-۰٫۰۱۲	
e_2	-۰٫۷۱۹	-۰٫۷۵۵	H	۱٫۲۶۲	۱٫۳۵۰	
e_3	-۰٫۷۳۹	-۰٫۵۱۰	$Blin$	-۰٫۴۶۳	-۰٫۳۶۰	
e_4	۰٫۵۰۱	۰٫۲۸۸	b_1	-۰٫۴۲۰	-۰٫۶۴۰	
e_5	-۰٫۲۲۴	-۰٫۱۰۲	b_2	-۰٫۲۸۱	-۰٫۱۴۰	
e_6	۰٫۰۷۹	۰٫۰۰۰	Sigtu	۰٫۵۴۵	۰٫۵۶۶	
c_1	-۰٫۵۶۱	-۰٫۶۶۱	Sigtm	۰٫۶۹۹	۰٫۵۶۴	

از مطالعه‌ی حاضر، از دو معیار خطای ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (رابطه‌ی ۱۱) و میانگین مطلق خطا (رابطه‌ی ۱۲) استفاده شده است:

در معیارهای خطا، رابطه‌ی بهینه شده در مقایسه با رابطه‌های نسل جدید ۲۰۰۸، به جز معیار RMSE در قسمت باقیمانده‌های فرارخدادی، نتیجه‌ی بهتری داشته‌اند. می‌توان نتیجه گرفت رابطه‌ی بهینه شده برای مجموعه‌ی ۱۵۳۴۸ رکورد، نسبت به روابط نسل جدید ۲۰۰۸، رفتار مناسب‌تری دارد. با مقایسه‌ی رابطه‌های بهینه شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک و رابطه‌های نسل جدید ۲۰۱۴، می‌توان بیان کرد که رابطه‌ی بهینه شده برای مجموعه‌ی ۱۵۳۴۸ تا بی در تمامی معیارها، نتایجی قابل قبول و در حدود رابطه‌های نسل جدید ۲۰۱۴ دارد.

در مطالعه‌ی حاضر، از دو معیار خطای ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (رابطه‌ی ۱۱) و میانگین مطلق خطا (رابطه‌ی ۱۲) استفاده شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X_{obs} - X_{pre})^2}{N}} \quad (11)$$

$$MAE = \frac{\sum |X_{obs} - X_{pre}|}{N} \quad (12)$$

که در آن‌ها، X_{obs} مقدار مشاهده شده رکورد، X_{pre} مقدار پیش‌بینی شده توسط روابط و N تعداد شتاب‌نگاشت‌هاست.

۲.۴. معیار ضریب تعیین

یک مدل کاهندگی، زمانی به‌عنوان یک مدل مناسب پیش‌بینی در نظر گرفته می‌شود که قدرت توضیح‌دهندگی آن که توسط ضریب تعیین (R^2) اندازه‌گیری می‌شود، حتی‌الامکان بالا باشد. ضریب تعیین، شاخصی است که نشان می‌دهد تا چه اندازه معادله‌ی رگرسیونی نمونه‌ها، داده‌ها را به نكویی برازش می‌کند (رابطه‌ی ۱۳):

$$R^2 = \frac{\sum (X_{obs})^2 - \sum (X_{obs} - X_{pre})^2}{\sum (X_{obs})^2} \quad (13)$$

۳.۴. معیار کارایی

معیار کارایی (E) توسط ناش و ساتکلیف (۱۹۷۰)،^[۱۹] به‌صورت رابطه‌ی ۱۴ ارائه شده است:

$$E = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N (LnY_i - Ln\hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (LnY_i - \overline{LnY})^2} \right] \times 100 \quad (14)$$

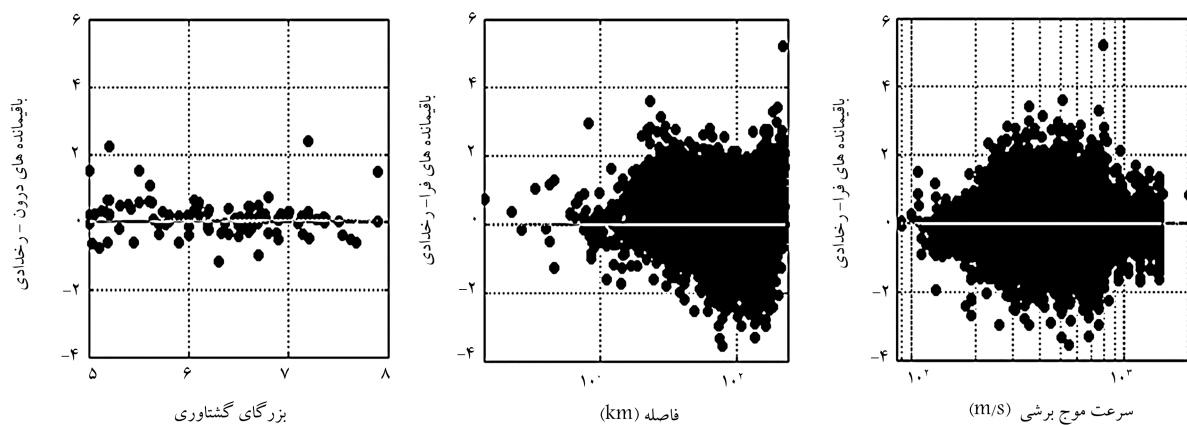
رابطه‌ی ناش و ساتکلیف (۱۹۷۰)، میزان کارایی رابطه‌ی مورد بررسی را نشان می‌دهد و میزان آن بین $-\infty$ و 100% متغیر است و هر چه میزان آن بیشتر باشد، همبستگی بین داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های محاسباتی بالاتر خواهد بود. در جدول ۵، نتایج حاصل از معیارهای خطا، ضریب تشخیص، ضریب ناش - ساتکلیف و LLH ارائه شده است که با توجه به آن، رابطه‌ی به‌دست آمده با استفاده

۴.۴. بررسی انحراف باقیمانده‌ها

از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های یک مدل کاهندگی مطلوب برای استفاده در یک ساختگاه، عدم انحراف باقیمانده‌ها در برابر پارامترهای لرزه‌ی متفاوت، مانند: بزرگا، فاصله و یا سرعت موج برشی است. به‌منظور معنی‌دار کردن و همچنین ایجاد امکان تفسیر میزان انحراف باقیمانده‌ها، آزمون فرض آماری تعریف و از p-value آن جهت تفسیر نتایج استفاده می‌شود.

آزمون فرض آماری ذکر شده با فرض تهی شیب و عرض از مبدأ خط حاصل از درون‌یابی خطی بر مجموعه‌ی داده‌ها (باقیمانده‌ها) برابر صفر تعریف می‌شود. هر اندازه p-value به ۱ نزدیک‌تر باشد، مدل کاهندگی انحراف کمتری دارد و رابطه‌ی موردنظر، توانایی بیشتری در پیش‌بینی جنبش‌های زمین دارد p-value ها دو پارامتر شیب و عرض از مبدأ را محاسبه می‌کنند. P_b نشان‌دهنده‌ی p-value شیب و P_a نشان‌دهنده‌ی p-value عرض از مبدأ خط برازش شده بر روی باقیمانده‌ها هستند. هر اندازه میزان میانگین باقیمانده‌ها به صفر نزدیک‌تر باشد، رابطه دقت بیشتری در پیش‌بینی خواهد داشت. درنهایت با در نظر گرفتن ۳ مقدار P_b ، P_a و میانگین باقیمانده‌ها، روابط با کمترین انحراف مشخص خواهند شد. شکل ۱ و جدول ۶، نتایج به‌دست آمده‌ی حاصل از بررسی باقیمانده‌ها برای رابطه‌ی به‌دست آمده با الگوریتم ژنتیک است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از جدول ۶، رابطه‌ی BSSA۱۴، رابطه‌ی بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک و رابطه‌ی CY۱۴ کمترین میانگین باقیمانده را دارند. میزان انحراف باقیمانده‌ها در برابر موج برشی و فاصله، برای مدل به‌دست آمده از الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد که رابطه‌ی بهینه شده، دقیق‌ترین رابطه با کمترین



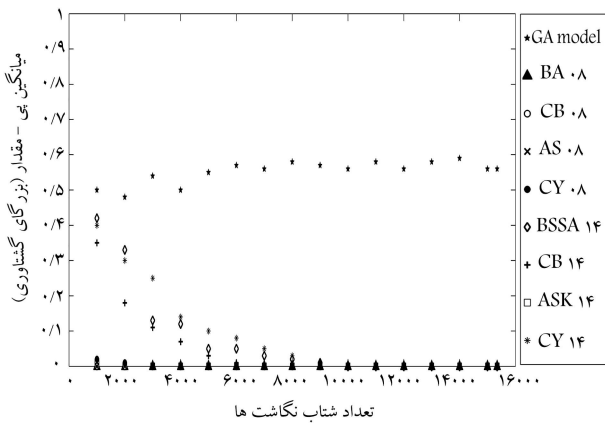
شکل ۱. توزیع باقیمانده‌ها در برابر پارامترهای لرزه‌ی مدل به‌دست آمده با ضرایب بهینه شده برای پارامتر PGA با استفاده از داده‌های مجموعه‌ی ۱۵۳۴۸ تایی.

جدول ۵. نتایج سنجش معیارهای: خطا، ضریب تعیین، کارایی و روش نظری - اطلاعاتی (معیار LLH).

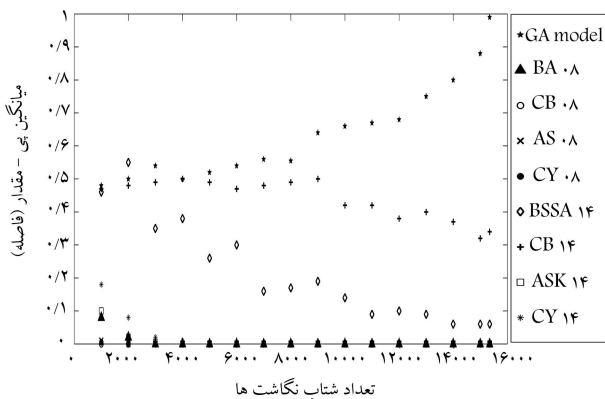
MAE			RMSE			R^2	LLH	E(%)	رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین
$r_{ij}^{[intra]}$	$r_i^{[inter]}$	r_{ij}	$r_{ij}^{[intra]}$	$r_i^{[inter]}$	r_{ij}				
۰٫۵۵	۰٫۳۹	۰٫۶۷	۰٫۷۱	۰٫۴۸	۰٫۸۶	۰٫۹۸	۱٫۹۰	۸۸٫۱۹	مدل بهینه شده
۰٫۵۵	۰٫۹۳	۱٫۰۶	۰٫۷۱	۱٫۱۲	۱٫۳۲	۰٫۹۶	۴٫۴۸	۷۲٫۰۹	BA۰۸
۰٫۶۵	۱٫۲۵	۱٫۳۷	۰٫۸۴	۱٫۴۷	۱٫۶۹	۰٫۹۳	۷٫۸۶	۵۴٫۶۲	CB۰۸
۰٫۵۵	۱٫۰۳	۱٫۱۴	۰٫۷۰	۱٫۲۲	۱٫۴۱	۰٫۹۵	۳٫۵۴	۶۸٫۵۰	AS۰۸
۰٫۵۵	۰٫۴۰	۰٫۶۸	۰٫۷۰	۰٫۵۱	۰٫۸۷	۰٫۹۸	۲٫۳۳	۸۸٫۰۹	CY۰۸
۰٫۵۳	۰٫۳۸	۰٫۶۵	۰٫۶۸	۰٫۴۶	۰٫۸۳	۰٫۹۸	۱٫۷۷	۸۹٫۱۷	BSSA۱۴
۰٫۵۴	۰٫۳۳	۰٫۶۳	۰٫۶۹	۰٫۴۱	۰٫۸۰	۱٫۰۰	۱٫۷۲	۷۰٫۵۱	CB۱۴
۰٫۵۳	۰٫۳۷	۰٫۶۵	۰٫۶۸	۰٫۴۷	۰٫۸۳	۰٫۹۸	۱٫۷۶	۸۹٫۱۶	ASK۱۴
۰٫۵۳	۰٫۳۴	۰٫۶۴	۰٫۶۹	۰٫۴۴	۰٫۸۱	۰٫۹۸	۱٫۷۸	۸۹٫۵۳	CY۱۴

جدول ۶. نتایج بررسی میزان انحراف باقیمانده‌ها برای پارامتر PGA.

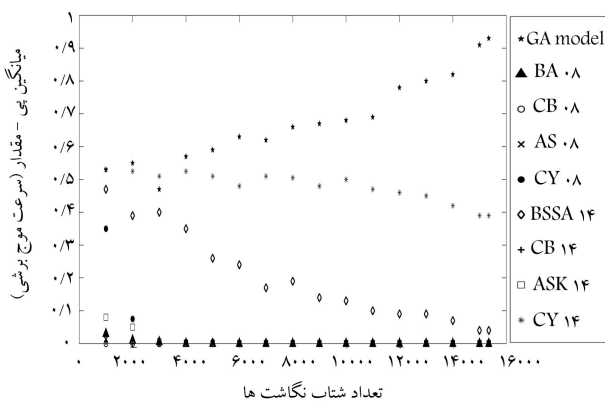
پی - مقدار						میانگین باقیمانده‌ها	رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین
انحراف باقیمانده‌ها در برابر سرعت موج برشی		انحراف باقیمانده‌ها در برابر معیار فاصله		انحراف باقیمانده‌ها در برابر بزرگای گشتاوری			
P_b	P_a	P_b	P_a	P_b	P_a		
۰٫۷۱	۰٫۹۳	۰٫۷۱	۰٫۹۹	۰٫۴۸	۰٫۴۹	۰٫۰۳	مدل بهینه شده
۰٫۷۱	۰٫۰۰	۰٫۷۱	۰٫۰۰	۰٫۵۰	۰٫۰۰	-۰٫۸۳	BA۰۸
۰٫۸۴	۰٫۰۰	۰٫۷۶	۰٫۰۰	۰٫۵۹	۰٫۰۰	-۰٫۳۱	CB۰۸
۰٫۷۰	۰٫۰۰	۰٫۷۰	۰٫۰۰	۰٫۴۶	۰٫۰۰	-۰٫۹۷	AS۰۸
۰٫۷۰	۰٫۰۰	۰٫۷۰	۰٫۰۰	۰٫۴۶	۰٫۰۰	-۰٫۲۰	CY۰۸
۰٫۶۸	۰٫۰۴	۰٫۶۸	۰٫۰۶	۰٫۴۶	۰٫۰۰	۰٫۰۱	BSSA۱۴
۰٫۶۹	۰٫۰۰	۰٫۶۹	۰٫۳۴	۰٫۴۱	۰٫۰۰	۰٫۰۵	CB۱۴
۰٫۶۸	۰٫۰۰	۰٫۶۸	۰٫۰۰	۰٫۴۴	۰٫۰۰	-۰٫۰۷	ASK۱۴
۰٫۶۹	۰٫۳۹	۰٫۶۹	۰٫۰۰	۰٫۴۳	۰٫۰۰	۰٫۰۳	CY۱۴



شکل ۲. میانگین p-value های حاصل از انحراف باقیمانده‌ها در برابر بزرگی گشتاوری در تحلیل حساسیت.



شکل ۳. میانگین p-value های حاصل از انحراف باقیمانده‌ها در برابر فاصله در تحلیل حساسیت.



شکل ۴. میانگین p-value های حاصل از انحراف باقیمانده‌ها در برابر سرعت موج برشی در تحلیل حساسیت.

فواصل میان منابع تولید بزرگا و ساختگاه، ارائه‌ی مدل پیش‌بینی جنبش زمین بر مبنای بزرگا، فاصله و دیگر پارامترهای لرزه‌یی و درنهایت، ترکیب احتمالات به‌دست آمده در مراحل ذکرشده از محاسبات احتمالاتی و تئوری‌های آماری است.^[۲۰] در شکل ۵، منحنی خطر ترسیم شده با استفاده از رابطه‌ی به‌پیمه شده توسط الگوریتم ژنتیک و مقایسه‌ی آن با منحنی خطر به‌دست آمده از رابطه‌ی بور و آنکینسون (۲۰۰۸) مشاهده می‌شود. برای ترسیم منحنی خطر ذکر شده، منبع

میزان انحراف است. با توجه به میزان انحراف باقیمانده‌ها در برابر بزرگی گشتاوری، رابطه‌ی به‌پیمه شده توسط الگوریتم ژنتیک نسبت به بقیه‌ی روابط، کمترین میزان انحراف را دارد. با این حال مدل‌های بور و آنکینسون (۲۰۰۸) و کمیل و بزرگ‌نیا (۲۰۰۸) در مقدار p-value عرض از مبدأ خط برازش شده برای نمودار بزرگا در برابر باقیمانده‌های درون رخدادی، نسبت به مدل به‌پیمه شده کمی دست بالا پیش‌بینی می‌کنند. با این تفاسیر، می‌توان رابطه‌ی به‌پیمه شده را قابل قبول انگاشت. از آنجا که صلاحیت استفاده از یک مدل کاهندگی نباید وابسته به اندازه‌ی مجموعه‌ی داده‌ها باشد، یافتن یک مجموعه داده‌ی بزرگ و قابل اعتماد در بسیاری از مواقع غیرممکن به نظر می‌رسد، بررسی عدم حساسیت روابط پیش‌بینی حرکت زمین نسبت به تغییر اندازه‌ی مجموعه‌ی داده‌های یک ساختگاه در مطالعه‌ی حاضر به‌عنوان معیاری نوین جهت بررسی پایداری روابط پیش‌بینی حرکت زمین مورد مطالعه واقع شده است. هر رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین براساس یک مجموعه‌ی داده از حرکت‌های زمین به‌دست آمده است و با رخدادهای بیشتر می‌توان پایگاه داده‌ها را به‌روزرسانی کرد. با این حال یک تغییر کوچک در پایگاه داده‌های حرکت زمین نباید تأثیر قابل توجهی در خروجی مدل کاهندگی داشته باشد. به بیان دیگر، اگر یک رابطه نسبت به یک تغییر کوچک در مجموعه‌ی داده‌ها به شدت حساسیت نشان دهد، پایداری آن رابطه بسیار کم است و مقادیر پیش‌بینی شده توسط آن غیرقابل اعتماد و عدم قطعیت در این مدل قابل توجه است. جهت ارزیابی پایداری روابط پیش‌بینی حرکت زمین، از رویکرد نوین تحلیل حساسیت در برابر بازنمونه‌گیری از داده‌ها استفاده شده است.^[۵] ایده اصلی روش تحلیل حساسیت، بررسی میزان پایداری روابط پیش‌بینی حرکت زمین با تکیه بر تعیین میزان انحراف بین باقیمانده‌ها در مقابل انواع مختلف پارامترهای لرزه‌یی ورودی است. آزمون فرض صفر به‌عنوان عدم وجود انحراف در خط برازش داده شده براساس درون‌یابی خطی برای مجموعه‌ی داده‌ها با سطح معناداری ۰٫۰۵ در نظر گرفته شده است. به‌منظور بررسی پایداری روابط پیش‌بینی حرکت زمین برای پارامتر PGA، روابط پیش‌بینی حرکت زمین منتخب با مجموعه‌ی داده‌های ۱۵۳۴۸ شتاب‌نگاشت، براساس روش RSA بررسی شده است. شکل‌های ۲ الی ۴، نشان‌دهنده‌ی نتایج حاصل از بازنمونه‌گیری مجموعه‌ی داده‌ها در برابر پارامترهای بزرگی گشتاوری، فاصله (R_z) و سرعت موج برشی هستند.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از روش بازنمونه‌گیری داده‌ها مشاهده می‌شود که مقدار p-value نهایی در نمودار RSA برای پارامتر بزرگا برای رابطه‌ی به‌پیمه شده با استفاده از مجموعه داده‌های ۱۵۳۴۸ تایی، روندی صعودی دارد؛ در حالی که نمودار اخیر برای رابطه‌های نسل جدید ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ روندی در حدود صفر دارند. در نمودار RSA، مقدار p-value نهایی برای پارامتر فاصله برای رابطه‌ی به‌پیمه شده با استفاده از مجموعه‌ی داده‌ی ۱۵۳۴۸ تایی در حدود ۱ است، در حالی که مقدار اخیر برای روابط نسل جدید ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴، به جز رابطه‌ی کمیل و بزرگ‌نیا (۲۰۱۴) که در حدود ۰٫۴ است، به‌طور مشابه با پارامتر بزرگا، روندی رو به صفر دارد. لذا، می‌توان بیان کرد که رابطه‌ی به‌پیمه شده توسط الگوریتم ژنتیک بهترین و قابل قبول‌ترین رفتار را دارد.

۵.۴. تأثیر روابط پیش‌بینی حرکت زمین در تحلیل احتمالاتی خطر زلزله

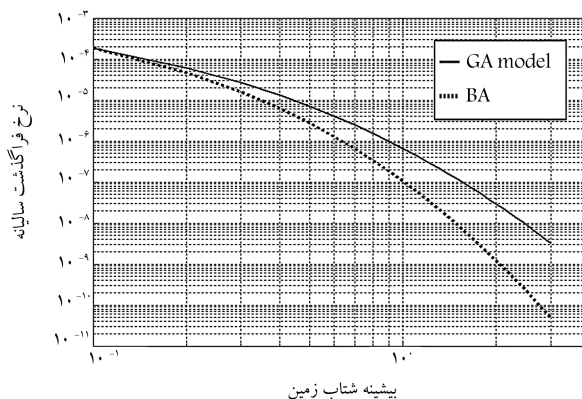
منحنی خطر لرزه‌یی می‌تواند به‌عنوان مهم‌ترین نتیجه‌ی تحلیل خطر در نظر گرفته شود. به‌طورکلی می‌توان گفت تحلیل خطر لرزه‌یی احتمالاتی، شامل مراحل: شناسایی تمام منابع تولیدکننده‌ی زمین‌لرزه، شناخت و توصیف نحوه‌ی توزیع بزرگا، توصیف

۵. نتیجه‌گیری

مدل به‌دست آمده طی مطالعه‌ی حاضر، با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای مجموعه داده‌ی ۱۵۳۴۸ تایی، به‌عنوان روابط پیش‌بینی حرکت زمین با کارایی و دقت بالا در پیش‌بینی بیشینه‌ی شتاب زمین (PGA)، با استفاده از یک کاتالوگ لرزه‌ی جهانی، شامل زلزله‌های سال‌های ۱۹۴۱ تا ۲۰۱۱ میلادی حاصل شده است. مدل کاهندگی ذکر شده با معرفی تابع هدف به‌منظور کاهش میزان LLH و همچنین افزایش پایداری رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین به‌دست آمده و صحت این امر از نتایج حاصل از آزمون‌های ریاضیاتی و آماری معرفی شده در طی گزارش تأیید شده است. یافته‌های مطالعه‌ی حاضر حاکی از آن است که مدل بهینه شده از نظر دقت در پیش‌بینی، مدل مطلوبی محسوب می‌شود. رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین، رابطه‌ی است که در بین سایر مدل‌ها با پیش‌بینی تقریباً متعادل، کمترین میزان انحراف باقیمانده‌های درون رخدادی در برابر بزرگای گشتاوری و همچنین کمترین انحراف باقیمانده‌های فرارخدادی در برابر پارامترهای فاصله و سرعت موج برشی را دارد و در مقایسه با روابط اصلی نسل جدید (۲۰۱۴)، پایداری بسیار مناسبی در برابر افزایش تعداد داده‌ها دارد و با تغییر در تعداد داده‌های مورد استفاده، پاسخ دقیق‌تری از رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین حاصل می‌شود. مقایسه‌ی نتایج آزمون‌های آماری و معیارهای مختلف خطا (مانند RMSE و MAE)، معیار کارایی، معیار ضریب تعیین، و معیارهای درست‌نمایی LH، LLH و EDR با سایر روابط منتخب گواهی بر برتری مدل بهینه شده به‌عنوان یک مدل جهانی است.

پایداری مدل بهینه شده با تکیه بر نتایج تحلیل حساسیت و از طریق بازنمونه‌گیری از مجموعه‌ی داده‌ها، کاملاً آشکار است و می‌توان گفت در بین سایر روابط با پیش‌بینی مناسب، رابطه‌ی ارائه شده کمترین حساسیت را از خود نشان داده است. مطابق انتظار اولیه، با بیشتر شدن تعداد داده‌ها، پایداری رابطه‌ی بهینه شده برای مجموعه‌ی ۱۵۳۴۸ بیشتر شده است. این روند بهبودی در نتایج حاصل از نمودارهای روش بازنمونه‌گیری داده‌ها مشاهده می‌شود.

با نتایج حاصل از مقایسه‌ی رابطه‌ی بهینه شده برای مجموعه‌ی داده‌های ۱۵۳۴۸ تایی با سایر روابط منتخب بر آن است که رابطه‌ی بور و آنکینسون (۲۰۰۸) با ضرایب بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک برای مجموعه‌ی داده‌های ۱۵۳۴۸ تایی برای PGA، به‌عنوان یک مدل جهانی از باقی رابطه‌ها برتر است.



شکل ۵. منحنی خطر برای رابطه‌ی بور و آنکینسون (۲۰۰۸) و رابطه‌ی بهینه شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک.

جدول ۷. پارامترهای در نظر گرفته شده برای منبع خطی.

پارامتر	مقدار
طول گسل (L)	۳۹۸
پارامتر لرزه‌خیزی (گوتبرگ - ریشتر)	۰٫۵
نرخ رخداد زلزله‌های بزرگتر از بزرگای کمیته (λ)	۰٫۰۲
فاصله منبع تا گسل (R)	۲۰-۲۰۰
بزرگا (M)	۳-۸

به‌صورت خطی در نظر گرفته شده است. جدول ۷، سایر پارامترهای در نظر گرفته شده برای منبع مذکور است.

با توجه شکل ۵، منحنی خطر ترسیم شده با استفاده از رابطه‌ی بهینه شده، بالاتر از منحنی خطر ترسیم شده برای رابطه‌ی بور و آنکینسون (۲۰۰۸) است. این بدین معناست که برای یک PGA یکسان، منحنی خطر رابطه‌ی بهینه شده، مقدار نرخ فراگذشت سالیانه‌ی بالاتری نسبت به رابطه‌ی بور و آنکینسون (۲۰۰۸) دارد. می‌توان بیان کرد که رابطه‌ی بهینه شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک، محافظه‌کارانه‌تر از رابطه‌ی بور و آنکینسون (۲۰۰۸) است. این اختلاف در نمودار، با افزایش مقدار PGA بیشتر می‌شود؛ به‌طوری‌که برای PGAهای بزرگ‌تر و پراهمیت‌تر، تفاوت ذکر شده بیشتر اهمیت می‌یابد.

پانویس‌ها

1. seismic hazard analysis
2. ground motion prediction equations (GMPEs)
3. peak ground acceleration (PGA)
4. mean absolute error
5. root mean square error
6. Re-sampling analysis (RSA)
7. Pacific earthquake engineering research center
8. next generation attenuation of ground motion (NGA)
9. Log-likelihood (LLH)
10. magnitude

11. joyner-boore distance (R_{jb})
12. shear-wave velocity over a subsurface depth of 30 meters (V_{s30})
13. fault type
14. training
15. testing

منابع (References)

1. McGuire, R.K. "Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: Closing the Loop", *Bulletin of*

- the Seismological Society of America*, **85**(5), pp. 181-200 (1995).
2. Bommer, J.J., Douglas, J., Scherbaum, F. and et al. "On the selection of ground-motion prediction equations for seismic hazard analysis", *Seismological Research Letter*, **81**(5), pp. 783-793 (2010).
 3. Cabalar, A.F. and Cevik, A. "Genetic programming-based attenuation relationship: An application of recent earthquakes in Turkey", *Computers & Geo Sciences*, **35**(9), pp. 1884-1896 (2009).
 4. Kermani, E., Jafarian, Y. and Baziar, M.H. "New predictive models for the ratio v_{max}/a_{max} of strong ground motions using genetic programming", *International Journal of Civil Engineering*, **7**(4), pp. 246-239 (2009).
 5. Azarbakht, A., Rahpeyma, S. and Mousavi, M. "A new methodology for assessment the stability of ground motion prediction equations", *Journal of Bulletin of the Seismological Society of America*, **104**(3), pp. (2014).
 6. Rahpeyma, S. and Azarbakht, A. "Improvement of existing attenuation relationships by using genetic optimization techniques for Iran's tectonic regions", Thesis for MSC, Arak University (2013).
 7. Jalalvandi, S. and Azarbakht, A. "Improvement of response spectral attenuation relationship according to advanced acceptable criteria for Iran's tectonic regions", Thesis for MSC, Arak University (2016).
 8. Boore, D.M. and Atkinson. "Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 sec and 10.0 sec.", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 99-138 (2008).
 9. Campbell K.W. and Bozorgnia, "NGA ground motion model for the geometric mean horizontal 139 component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 sec.", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 139-171 (2008).
 10. Abrahamson, N., Silva, W. "Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 67-97 (2008).
 11. Chiou, B.S. and Youngs, R.R. "An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 173-215 (2008).
 12. Boore, D.M., Stewart, J.P., Seyhan, E. and et al. "NGA-West 2 equations for predicting PGA, PGV, and 5%-damped PSA for shallow crustal earthquakes", *Earthquake Spectra*, **30**(3), pp.1026-1067 (2014).
 13. Campbell, K.W. "NGA-West2 Campbell-Bozorgnia ground motion model for the horizontal components of PGA, PGV, and 5%-damped elastic pseudo-acceleration response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 sec.", *Earthquake Spectra*, **30**(3), pp. 1087-1115 (2014).
 14. Abrahamson, N.A., Silva, W.J. and Kamai. R. "Update of the AS08 ground-motion prediction equations based on the NGA-west2 data set.", *Pacific Engineering Research Center Report*, 144 p. (2013).
 15. Chiou, B.S.J. and Youngs, R.R. "Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra", *Earthquake Spectra*, **30**(3), pp. 1117-1153 (2014).
 16. Azarbakht, A., Rajabi, Z. and Rahpeyma, S. "Stability assessment of GMPES for Iranian ground motion database", *7th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering* (2015).
 17. Shahvar, N. and Azarbakht, A. "Assessment of the NGA 2014 GMPEs by using Advanced statistical techniques", Thesis for MSC, Arak University (1394).
 18. Turchin, P., Grinin, L., Munck V.C. and et al. "History and mathematics: Historical dynamics and development of complex societies", Moscow, Komkniga/URSS, 216 p. (2007).
 19. Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. "River flow forecasting through conceptual models: Part I, a discussion of principles", *Journal of Hydrology*, **10**(3), pp. 282-290 (1970).
 20. Baker, J.W. "An Introduction to probabilistic seismic hazard analysis (PSHA)", version 1.3, p. 72 (2008) (Available online : <http://www.stanford.edu/~bakerjw>).