

ارزیابی پایداری روابط کاهندگی نسبت به پایگاه داده‌های ایران

زینت رجیبی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علیرضا آذربخت* (دانشیار)

دانشکده‌ی عمران، دانشگاه اراک

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۶)
دوری ۲ - ۳۳، شماره ۱/۳، ص. ۵۷-۶۶

یکی از عناصر کلیدی در تحلیل خطر لرزه‌یی، انتخاب مناسب‌ترین مدل‌های پیش‌بینی حرکت زمین (GMPE) است. امروزه گسترش و تنوع مدل‌های کاهندگی قابل دسترس، این انتخاب را به یک چالش علمی تبدیل کرده است. به این منظور در مطالعه‌ی حاضر، ارزیابی پایداری مجموعه‌یی از مدل‌های پیش‌بینی حرکت زمین (GMPE) با استفاده از روش جدید تحلیل حساسیت در برابر باز نمونه‌گیری از داده‌ها (RSA) براساس مجموعه داده‌هایی از ایران مورد بررسی قرار گرفته است. براساس دیدگاه RSA، مدلی مناسب خواهد بود که افزایش اندازه‌ی داده‌ها سبب کاهش انحراف باقیمانده‌ها در برابر تمامی پارامترهای لرزه‌یی شود. نتایج مطالعه‌ی حاضر نشان می‌دهد که برخی از مدل‌های در نظر گرفته‌شده در نوشتار حاضر، نسبت به مجموعه داده‌های ایران کاملاً حساس هستند. همچنین بررسی پایداری روابط کاهندگی براساس روش RSA در ۸ دوره‌ی زمانی، نشان‌دهنده‌ی ناپایداری روابط کاهندگی در دوره‌های زمانی است.

واژگان کلیدی: تحلیل خطر لرزه‌یی، مدل‌های پیش‌بینی حرکت زمین، تحلیل حساسیت در برابر باز نمونه‌گیری از داده‌ها، مجموعه داده‌های ایران، RSA.

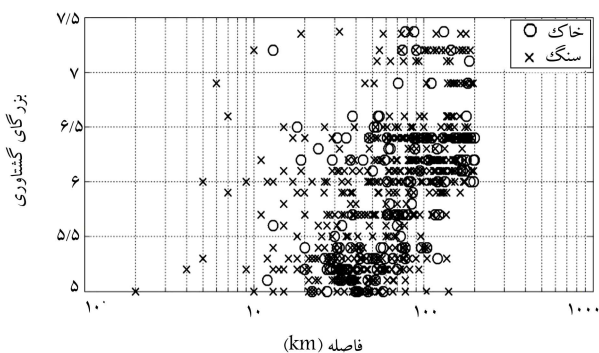
۱. مقدمه

از جمله متداول‌ترین روش‌ها در ارزیابی روابط کاهندگی در مناطق مختلف از جمله: اروپا، کالیفرنیا، خاورمیانه و ایران هستند. برای مثال روش LH که ابزاری قدرتمند در رتبه‌بندی روابط کاهندگی محسوب می‌شود، برای اولین بار به همراه یک سری از روش‌های آماری همچون روش مربع خی و روش کوموگروف برای ارزیابی روابط کاهندگی برای داده‌هایی از ناحیه‌ی فرانسه، آلمان، و سوئیس مورد استفاده قرار گرفته است.^[۶] اما وابستگی به تعداد مجموعه‌ی داده‌ها و همچنین یک سری از فرضیات اولیه (مثلاً تعیین آستانه‌ی پذیرش) از ضعف‌های روش مذکور است. بنابراین رویکرد نظری-اطلاعاتی LLH برای غلبه بر ضعف‌های ذکر شده پدید آمده است.^[۷] علاوه بر این، دو روش مبتنی بر درست‌نمایی LH و LLH با الهام گرفتن از سایر روش‌های تحلیل باقیمانده‌ها، پژوهشگران روشی مبتنی بر فاصله‌ی اقلیدسی را برای رتبه‌بندی با توجه به عدم قطعیت حرکت‌های زمین و اندازه‌گیری انحراف بین داده‌های مشاهداتی و تخمینی معرفی کرده‌اند که برای اولین بار جهت ارزیابی روابط کاهندگی اخیر مربوط به اروپا و خاورمیانه براساس شتاب‌نگاشت‌هایی از ترکیه، ایران، قفقاز، اردن و پاکستان استفاده شده است.^[۸] همچنین در سال‌های اخیر پژوهشگران مقالات جامعی در زمینه‌ی انتخاب و رتبه‌بندی روابط کاهندگی بر روی یک مجموعه داده‌ی مشخص براساس روابط کاهندگی محلی و جهانی منتخب با به‌کارگیری روش‌های کلاسیک و مدرن ارائه کرده‌اند که در همه‌ی آن‌ها مجموعه داده‌های استفاده شده در طول مطالعات مذکور ثابت فرض شده‌اند.^[۲-۴] با این حال، بررسی حساسیت روابط کاهندگی نسبت به مجموعه‌ی شتاب‌نگاشت‌های در نظر

پیش‌بینی معقول و منطقی از پارامترهای مورد انتظار حرکت زمین همچون بیشینه‌ی شتاب زمین (PGA)،^۱ بیشینه‌ی سرعت زمین (PGV)^۲ و شتاب طیفی (SA)^۳ نقش اساسی در ارزیابی قابلیت اعتماد در تحلیل خطر لرزه‌یی ایفا می‌کنند. در واقع معادلات پیش‌بینی حرکت زمین (GMPE)^۴ از مهم‌ترین مؤلفه‌های مؤثر در نتایج تحلیل خطر لرزه‌یی احتمالاتی (PSHA)^۵ هستند. زیاد شدن تعداد و کیفیت شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده از حرکات زمین در پایگاه‌های مختلف در سراسر جهان، تعداد زیادی روابط کاهندگی منطقه‌یی و سراسری در دهه‌های اخیر را نتیجه داده است.^[۱] با این حال، مدل‌های مختلف جهانی در شرایط زمین ساختی مختلف، خروجی‌های کاملاً متفاوتی را نتیجه می‌دهند.^[۲-۴] منشأ این تفاوت‌ها می‌تواند در پایگاه داده‌های در نظر گرفته‌شده، شکل ریاضیاتی مدل‌های کاهندگی روش در نظر گرفته‌شده برای توسعه‌ی مدل و انتخاب متغیرهای ورودی باشد.^[۵] روش‌های آماری و ریاضی زیادی همچون: مربع خی (chi-۲)،^۶ آزمون کوموگروف (K-S)،^۷ آزمون‌های نسبت خطا همانند مجذور مربعات خطا (RMSE)،^۸ متوسط قدرمطلق خطاها (MAE)،^۹ ضریب تعیین R^2 و ضریب کارایی E (ناش-ساتکلیف)،^{۱۰} برای ارزیابی سازگاری بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده‌ی حرکت زمین وجود دارند. همچنین دو روش مختلف LH و LLH در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۹ براساس بیشینه‌ی درست‌نمایی، برای ارزیابی روابط کاهندگی ارائه شده‌اند.^[۷] که

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۶/۲۸، اصلاحیه ۱۳۹۴/۹/۷، پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۴.



شکل ۱. توزیع بزرگا و فاصله‌ی شتاب‌نگاشت‌های به‌کاررفته در مطالعه‌ی حاضر.

این راستا، ساخت‌گاه‌های موجود در طبقه‌های I و II ($VS_{30} \geq 375 \text{ m/s}$) با عنوان ساخت‌گاه‌های سنگی و ساخت‌گاه‌های موجود در طبقه‌های III و IV ($VS_{30} < 375 \text{ m/s}$) با عنوان ساخت‌گاه‌های خاکی شناخته می‌شوند.

۳. روابط کاهندگی منتخب

با توجه به مطالعات صورت‌گرفته در ماهیت لرزه‌ی فلات ایران، می‌توان کلیه‌ی زلزله‌های این منطقه را رخدادهایی کم عمق و درون‌صفحه‌یی دانست.^[۱۵] علاوه بر آن پژوهشگران زلزله‌های تعدادی از نواحی کم عمق همچون ترکیه و کالیفرنیا از نظر طیف چشمه با مقایسه‌ی بر شباهت طیف چشمه‌ی آن‌ها تأکید داشته‌اند.^[۱۶] از مطالعه‌ی مذکور می‌توان نتیجه گرفت که کلیه‌ی زلزله‌های کم عمق (و طبیعاً زلزله‌های کم عمق ایران) از لحاظ طیف چشمه با هم شباهت زیادی دارند. براساس گزارش‌های مذکور معادلات پیش‌بینی حرکت زمین از این ۴ گروه انتخاب شده‌اند:

- گروه ۱: مدل‌های زمین لرزه‌یی که ویژه‌ی منطقه‌ی ایران طراحی شده‌اند.
- گروه ۲: مدل‌های زمین لرزه‌یی که ویژه‌ی منطقه‌ی اروپا و آسیای مرکزی طراحی شده‌اند.
- گروه ۳: مدل‌های کاهندگی نسل جدید (NGA) در سال ۲۰۰۸.
- گروه ۴: مدل‌های کاهندگی نسل جدید (NGA-West2) توسعه‌یافته در سال ۲۰۱۴.

نسل جدید روابط کاهندگی در سال ۲۰۰۸ برای استفاده در شرایط جغرافیایی گوناگون فقط برای زلزله‌های سطحی و کم عمق توسعه یافته‌اند. از ویژگی‌های مدل‌های ذکرشده می‌توان به استفاده از پارامترهای لرزه‌یی گوناگون و جدید، پیچیدگی فرم تابع، و همچنین جامعه‌ی آماری بالای پایگاه داده‌ها (۳۵۵۱ شتاب‌نگاشت ثبت شده از ۱۷۳ رخداد) اشاره کرد. همچنین از سال ۲۰۰۸ تاکنون، پایگاه داده‌های NGA با استفاده از زلزله‌هایی با بزرگای کوچک تا بزرگ از رخداد‌های سراسر جهان به‌روز شده است (۲۱۵۳۹ شتاب‌نگاشت ثبت شده از ۱۲۶۵ رخداد) و ۵ رابطه‌ی کاهندگی ۲۰۰۸ NGA با استفاده از این پایگاه داده توسعه و بهبود یافته‌اند. مدل‌های به‌روزشده‌ی این روابط در سال ۲۰۱۴ منتشر شده است که در مطالعه‌ی حاضر از هر دو گروه استفاده شده است. برخی از مطالعات اخیر، معیارهایی جهت انتخاب روابط کاهندگی منتخب ارائه کرده‌اند.^[۱۷] هشت نکته از معیارهای مذکور به‌کاررفته در مطالعه‌ی حاضر به این شرح است:

۱. مدل‌هایی که برای محیط‌های لرزه‌یی زمین ساختمانی نامناسب یا متفاوت با ناحیه‌ی موردنظر (مثلاً فورورانشی یا مناطق آتشفشانی) طراحی شده‌اند، حذف شوند.

گرفته‌شده، هنوز به مطالعات بیشتری نیاز دارد. به همین منظور در سال ۲۰۱۴، رویکردی نوین با عنوان تحلیل حساسیت در برابر باز نمونه‌گیری از داده‌ها با عنوان روش RSA^{۱۱} برای ارزیابی روابط کاهندگی ارائه شده و به منظور نشان دادن کاربرد روش RSA، پایداری ۴ رابطه‌ی ۲۰۰۸ NGA براساس پایگاه داده‌های مورد بررسی، ارزیابی شده و نتایج به‌دست آمده عدم پایداری و ثبات مدل‌ها را نسبت به پایگاه داده‌های مذکور نشان داده‌اند و به‌نظر می‌رسد که در استخراج نسل جدید روابط کاهندگی به این ویژگی توجهی نشده است.^[۱۵] نویسندگان نوشتار حاضر بر این باورند که روش RSA، ابراری قدرتمند در ارزیابی حساسیت مدل‌های کاهندگی محسوب می‌شود و می‌تواند به‌عنوان یک ویژگی محوری در انتخاب روابط کاهندگی در تحلیل خطر لرزه‌یی استفاده شود. در مطالعه‌ی حاضر، پایداری روابط کاهندگی منتخب براساس روش RSA و با استفاده از یک کاتالوگ لرزه‌یی مربوط به ناحیه‌ی ایران ارزیابی و مقایسه شده است. نتایج نوشتار حاضر می‌تواند در مطالعات تحلیل خطر لرزه‌یی ناحیه‌ی ایران استفاده شود.

۲. بانک اطلاعاتی زمین لرزه‌ها

پهنه‌ی ایران زمین در بخش میانی کمربند کوه‌زا و لرزه‌خیز آلپ-همیالیا، یکی از لرزه‌خیزترین مناطق جهان به شمار می‌رود و تاکنون مطالعات جامعی پیرامون ویژگی‌های زمین‌شناختی و همچنین ماهیت لرزه‌یی آنجا به انجام رسیده است. به علت کمبود دستگاه‌های ثبت شتاب‌نگاشت در مناطق با لرزه‌خیزی کم، پژوهشگران غالباً این قبیل نواحی را با نواحی لرزه‌خیزی بالا ترکیب کرده‌اند که در این حالت ایران به دو ناحیه‌ی لرزه‌خیز اصلی زاگرس و البرز-ایران مرکزی تقسیم‌بندی شده است.^[۱۸] بیشترین فعالیت‌های لرزه‌یی ایران در گسل‌های زاگرس متمرکز شده‌اند و رخداد‌های گسل‌های مرکزی ایران و سایر نقاط به نسبت کمتر است. اما با وجود اینکه رخداد‌های سالیانه در زاگرس به مراتب بیشتر از نواحی دیگر است، از نظر بزرگای زلزله رخداد‌های منطقه‌ی زاگرس اغلب مقدار کمتری نسبت به سایر نواحی دارند.^[۱۹]

مجموعه‌ی داده‌های جمع‌آوری شده برای مطالعه‌ی حاضر شامل ۶۹۱ شتاب‌نگاشت از ۸۵ رخداد ثبت شده بین سال‌های ۱۹۷۸ الی ۲۰۱۳ است که توسط شبکه‌ی شتاب‌نگاری ایران (ISMN) که از سال ۱۹۷۳ شروع به کار کرده و توسط مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (BHRC) اداره می‌شود، ثبت شده‌اند. شتاب‌نگاشت‌های انتخابی، دو مؤلفه‌ی افقی و یک مؤلفه‌ی قائم دارند که مقدار میانگین هندسی دو مؤلفه‌ی افقی به‌عنوان مقدار مشاهداتی داده‌ها در نظر گرفته شده است. همچنین برای کاستن از عدم قطعیت‌های حاصل از تبدیل مقیاس‌های مختلف پارامترهای لرزه‌یی، فقط رخداد‌هایی که بزرگای گشتاوری^{۱۲} آنها ثبت شده و پارامتر VS_{30} سرعت موج برشی خاک در آنها مشخص بوده است انتخاب شده‌اند.^[۱۳] بزرگای گشتاوری زلزله‌های انتخابی بین ۷/۴-۵، فاصله‌ی ثبت شده‌ی بین ۵ تا ۲۰۰ کیلومتر، سرعت موج برشی بین ۱۸۰-۱۳۰۰ متر بر ثانیه است. مکانیزم گسلش این رخداد‌ها عموماً امتداد لغز و معکوس است. در پیوست، فهرست رخداد‌های منتخب و اطلاعات مربوط به هر یک ارائه شده است. شکل ۱، نشان دهنده‌ی توزیع مقادیر فاصله در برابر بزرگای گشتاوری (Mw) ثبت شده‌ی مجموعه‌ی زمین لرزه‌های مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر است. مطابق شکل مذکور، ایستگاه‌های متعدد به ۲ گروه متفاوت بسته به نوع خاک تقسیم شده‌اند. معیار طبقه‌بندی خاک محل در مطالعه‌ی حاضر، طبقه‌بندی ذکرشده در آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ایران است.^[۱۴]

جدول ۱. جزئیات مربوط به مدل‌های کاهندگی مورد ارزیابی در مطالعه.

ردیف	رابطه‌ی کاهندگی	مخفف	منطقه‌ی حاکم	فاصله (کیلومتر)	بزرگای گشتاوری	گروه روابط	مرجع
۱	بور و اتکینسون (۲۰۰۸)	BA۰۸	کالیفرنیا	۰-۲۰۰	۵-۸	۳	[۲۰]
۲	کمپل و بزرگ‌نیا (۲۰۰۸)	CB۰۸	کالیفرنیا	۰-۲۰۰	۴-۷٫۵	۳	[۲۱]
۳	آبراهامسون و سیلوا (۲۰۰۸)	AS۰۸	کالیفرنیا	۰-۲۰۰	۵-۸٫۵	۳	[۲۲]
۴	چیو و یانگز (۲۰۰۸)	CY۰۸	کالیفرنیا	۰-۲۰۰	۴-۸	۳	[۲۳]
۵	کالکان و گولکان (۲۰۰۴)	KG۰۴	ترکیه	۱-۲۵۰	۴-۷٫۵	۲	[۲۴]
۶	آکار و کاکنان (۲۰۱۰)	AC۱۰	ترکیه	۰-۲۰۰	۳٫۵-۷٫۶	۲	[۲۵]
۷	زعفرانی و همکاران (۲۰۱۲)	Zeta۱۲	ایران	۱-۲۰۰	۴٫۴-۷٫۵	۱	[۲۶]
۸	قاسمی و همکاران (۲۰۰۹)	Getal۰۹	ایران	۵-۵۰۰	۵-۷٫۴	۱	[۲۷]
۹	بور و اتکینسون (۲۰۱۴)	BSSA۱۴	کالیفرنیا	۰-۴۰۰	۳-۸٫۵	۴	[۲۸]
۱۰	کمپل و بزرگ‌نیا (۲۰۱۴)	CB۱۴	کالیفرنیا	۰-۳۰۰	۳٫۳-۸	۴	[۲۹]
۱۱	آبراهامسون و سیلوا (۲۰۱۴)	ASK۱۴	کالیفرنیا	۰-۳۰۰	۳-۸٫۵	۴	[۳۰]
۱۲	چیو و یانگز (۲۰۱۴)	CY۱۴	کالیفرنیا	۰-۳۰۰	۳٫۵-۸	۴	[۳۱]

۲. مدل‌هایی که در یکی از نوشتارها با داوری معتبر (با ضریب تأثیر) یا در سایر نوشتارهای معتبر منتشر نشده باشند.

۳. مدل‌هایی که توسط یک مطالعه‌ی جدیدتر جایگزین شده‌اند، از بررسی‌ها حذف شوند.

۴. مدل‌هایی که اطلاعات کامل مجموعه داده‌های استفاده شده در استخراج رابطه ارائه نشده باشد.

۵. مدل‌هایی که در آن پارامترهای وابستگی غیرخطی به بزرگای یا جمله‌ی بیان‌گر کاهندگی وابسته به بزرگای نسبت به فاصله وجود ندارد، حذف شوند. [۱۷]، [۱۸] البته این مورد فقط باید در مدل‌های کاهندگی تجربی بررسی شود و نه در مدل‌های کاهندگی فیزیکی (بر مبنای شبیه‌سازی زلزله).

۶. مدل‌هایی که در آن جملات خطای مؤلفه‌های درون‌رخدادی و فرارخدادی مشخص نشده است، حذف شوند.

۷. مدل‌هایی که در آن‌ها از تعاریف متغیرهای نامناسب مانند M_L استفاده شده و یا اثر ساخت‌گاه در آن لحاظ نشده است، حذف شوند.

۸. محدوده‌ی کاربردی مدل خیلی کوچک‌تر از محدوده‌ی پارامترهای ورودی مجموعه‌ی داده‌های مورد استفاده جهت ارزیابی روابط کاهندگی و یا تحلیل خطر لرزه‌ی باشد حذف شوند.

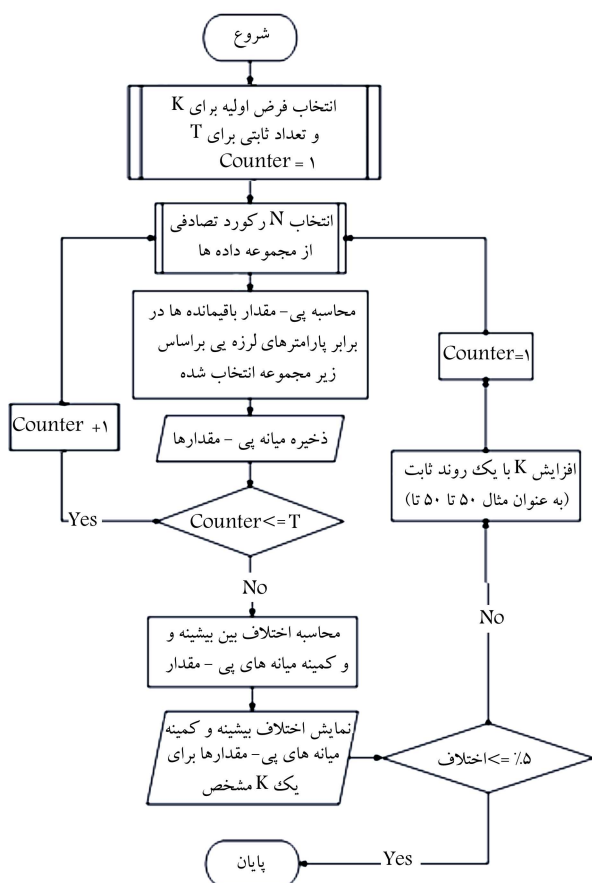
با اعمال این محدودیت‌ها، ۱۲ رابطه انتخاب شده است که جدول ۱ جزئیات مربوط به مدل‌های منتخب را نشان می‌دهد. همچنین این نکته قابل ذکر است که پارامترهای لرزه‌ی ورودی در این روابط به شکل‌های مختلفی تعریف شده‌اند. مثلاً پارامتر فاصله در شکل‌های مختلفی چون نزدیک‌ترین فاصله‌ی سطحی تا گسل، نزدیک‌ترین فاصله تا گسل و فاصله‌ی کانونی به کار می‌رود. در مطالعه‌ی حاضر، به منظور کاهش عدم قطعیت‌ها و فرضیات مربوط به پارامترهای متنوع لرزه‌ی در روابط کاهندگی منتخب از نتایج گزارش کاکلامنوس^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۱) استفاده شده است. [۱۹] اگرچه این نکته قابل ذکر است که عدم قطعیت‌های ایجاد شده در تبدیل پارامترهای مدل‌های ذکر شده می‌تواند تا حدی از اعتبار کلی نتایج بکاهد، اما در حال حاضر با توجه به اینکه بعید به نظر می‌رسد که پایگاه داده‌های ایران در

۴. روش تحلیل باز نمونه‌گیری از داده‌ها (RSA)

هر رابطه‌ی کاهندگی براساس یک مجموعه‌ی داده از حرکت‌های زمین توسعه داده شده است و بدیهی است که با رخدادهای بیشتر می‌توان پایگاه داده‌ها را به روز رسانی 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، مقادیر پیش‌بینی شده از طریق آن غیرقابل اعتماد و عدم قطعیت در مدل مذکور قابل توجه می‌شود.

ایده‌ی اصلی روش ذکر شده، بررسی میزان پایداری روابط کاهندگی با تکیه بر تعیین میزان انحراف بین باقیمانده‌ها در مقابل انواع مختلف پارامترهای لرزه‌ی ورودی است. [۵] آزمون فرض صفر به عنوان عدم وجود انحراف در خط برازش داده شده براساس درون‌یابی خطی برای مجموعه‌ی داده‌ها با سطح معناداری ۰٫۰۵ در نظر گرفته شده است. مراحل اصلی روش باز نمونه‌گیری از داده‌ها (RSA) در شکل ۲ ارائه و به این صورت خلاصه شده است:

- انتخاب رابطه‌ی کاهندگی؛
- برای هر رابطه‌ی کاهندگی تعداد رکورد کاهشی N ، براساس انتخاب تعداد تصادفی یک‌نواخت با توجه به توزیع باقیمانده‌ها و فاصله‌ی اندازه‌گیری شده انتخاب می‌شود (N باید کوچک‌تر از بیشینه‌ی مقدار شتاب‌نگاشت‌ها باشد).
- پی-مقدار مربوط به مؤلفه‌های باقیمانده (مثلاً باقیمانده‌های درون‌رخدادی و فرارخدادی) در برابر انواع مختلف پارامترهای ورودی (مثلاً: بزرگای، انواع فاصله‌ها، و سرعت موج برشی) و همچنین مقادیر مختلف شاخص‌های آماری (به عنوان مثال LLH ، R^2 و ...) براساس مجموعه‌ی داده‌های کاهش یافته که در مرحله‌ی ۲ توضیح داده شده است، محاسبه شود.



شکل ۳. مراحل اصلی در به دست آوردن K بهینه برای روش RSA [۵].

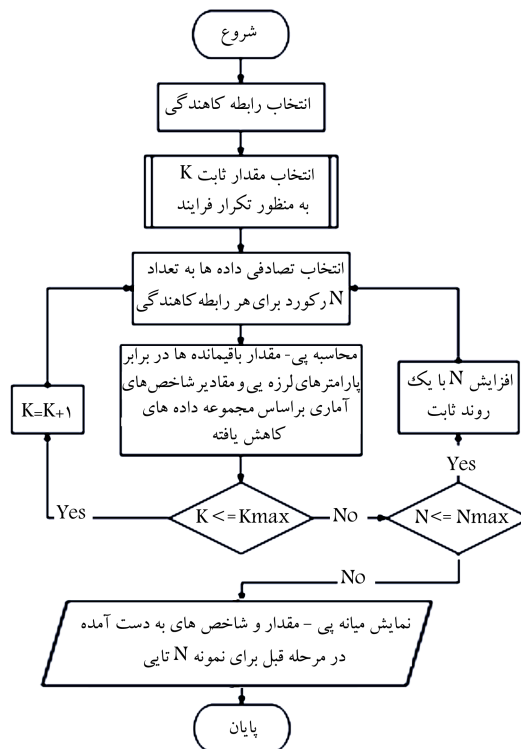
۷. سپس اختلاف‌های محاسبه شده در مرحله‌ی ۵ در مقابل K رسم شود.

به منظور اطمینان بیشتر در به دست آوردن K، میانگین پی-مقادیر برای مدل‌های AS، Zeta ۱۲ و BSSA ۱۴ براساس باقیمانده‌های فرارخدادی در مقابل R برای زیرمجموعه‌ی با ۵۰۰ داده و ۵۰ بار تکرار به دست آمده است. با توجه به محاسبات انجام شده، K بهینه برابر با ۴۰۰ به دست آمده است. بنابراین تمام محاسبات RSA در نوشتار حاضر براساس $K = 400$ انجام شده است.

۵. اجرای روش تحلیل باز نمونه‌گیری از داده‌ها بر روی

روابط کاهندگی منتخب

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 کاهندگی نسبت به تغییر اندازه‌ی مجموعه‌ی داده‌های یک ساخت‌گاه در نوشتار حاضر با به کار بردن معیار RSA جهت بررسی پایداری روابط کاهندگی مطالعه شده است. با استفاده از روش RSA می‌توان روابط پایدار برای یک ساخت‌گاه ویژه را تعیین کرد. در بخش حاضر، ابتدا پایداری پارامتر PGA روابط کاهندگی منتخب براساس روش RSA بررسی شده است. در مطالعه‌ی حاضر، انواع مختلف باقیمانده‌ها برای ۱۲ رابطه‌ی کاهندگی مذکور با در نظر گرفتن اثرات تصادفی کلی و با استفاده از رابطه‌ی ۱ تعریف شده



شکل ۲. مراحل اصلی در استفاده از روش باز نمونه‌گیری از داده‌ها [۵].

۴. به منظور افزایش دقت در انتخاب تصادفی مراحل ۱، ۲ و ۳ به میزان K بار تکرار شود.

۵. مراحل ۲، ۳ و ۴ برای یک تعداد مجموعه‌ی داده‌های اولیه‌ی فرض شده (N) تا بیشترین تعداد از کل داده‌ها با یک روند افزایشی ثابت تکرار شود.

۶. شاخص‌های به دست آمده در مرحله‌ی ۳ در مقابل تعداد داده‌ها (N) رسم شود. همچنین میانه‌ی هر شاخص، مرحله‌ی ۳ برای نمونه‌ی N تا بی به عنوان شاخص نهایی محاسبه شود.

قبل از محاسبه‌ی مقادیر RSA، ابتدا به منظور افزایش قابلیت اطمینان از نتایج RSA فاکتور K که در گام چهارم روش RSA بیان شده است به صورت مناسب تعیین می‌شود. روند انتخاب فاکتور K، به صورت این مراحل تعیین می‌شود (شکل ۳):

۱. یک فرضیه‌ی اولیه در مورد K انتخاب (مثلاً ۵۰) و تعداد ثابتی برای پارامتر N استفاده شود.

۲. پی-مقدار مربوط به باقیمانده‌ها در مقابل انواع مختلف پارامترهای ورودی، براساس زیرمجموعه‌های انتخاب شده (N ثابت) محاسبه شود (در پژوهش حاضر باقیمانده‌ی فرارخدادی در مقابل پارامتر فاصله محاسبه شده است).

۳. میانه‌ی پی-مقادیر محاسبه و ذخیره شود.

۴. به منظور افزایش دقت در روند انتخاب تصادفی مراحل ۱، ۲ و ۳ به میزان T بار تکرار شود (در پژوهش حاضر $T = 50$ فرض شده است).

۵. اختلاف بین بیشینه و کمینه‌ی میانه‌های پی-مقادیر محاسبه شود.

۶. مراحل ۱ تا ۵ هر بار با افزایش تدریجی K (در مطالعه‌ی حاضر ۵۰ تا ۵۰۰) تا زمانی که اختلاف در مرحله‌ی ۵ به کمتر از ۰/۰۵ برسد، تکرار شود.

است:

$$\ln Y_{ij} = \ln \hat{Y}_{ij} + \eta_i + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

که در آن η_i باقیمانده‌ی درون‌رخدادی i امین رخداد و $\ln \hat{Y}_{ij}$ و $\ln Y_{ij}$ به ترتیب مقدار متوسط پیش‌بینی شده، مقدار مشاهداتی و باقیمانده‌های فرارخدادی i امین رکورد از i امین رخداد است. فرض می‌شود که η_i و ε_{ij} از هم مستقل و توزیع نرمال با انحراف معیار به ترتیب τ^2 و σ^2 داشته باشند. در نمونه‌ی مذکور، باقیمانده‌ی کلی مدل برابر با مجموع باقیمانده‌های درون‌رخدادی و فرارخدادی است و به صورت روابط ۲ و ۳ محاسبه می‌شوند:

$$\eta_i = \frac{\tau^2 \sum_{j=1}^{N_i} r_{ij}}{\tau^2 N_i + \sigma^2} \quad (2)$$

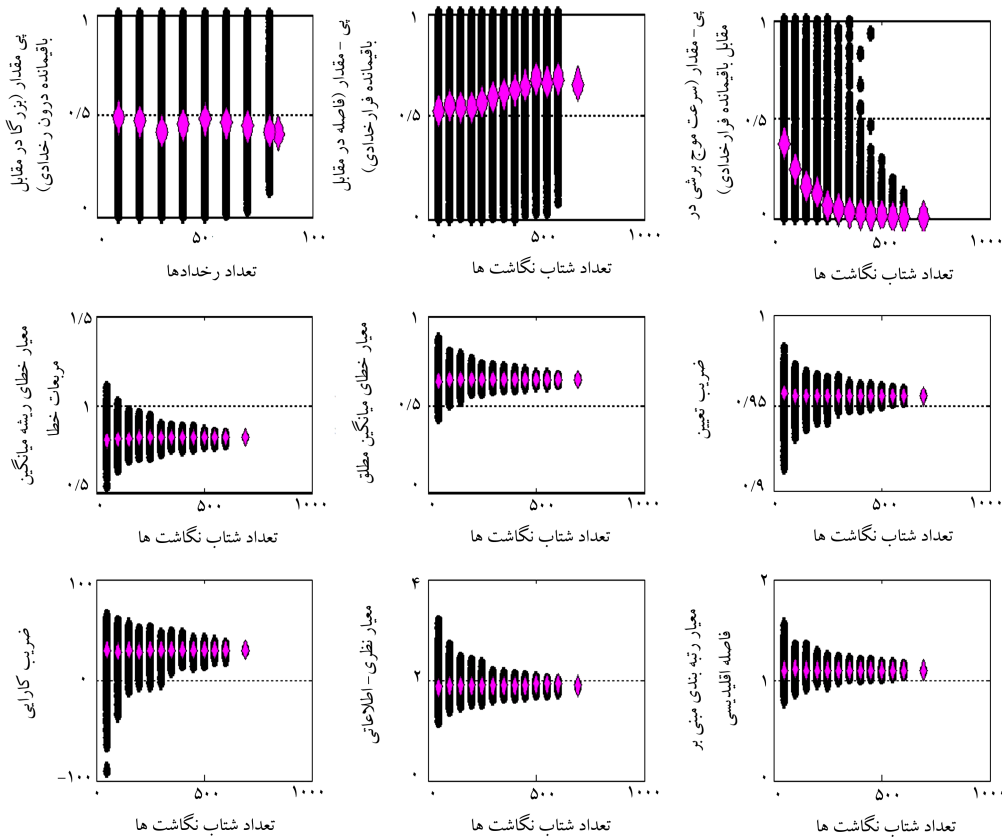
$$\varepsilon_{ij} = r_{ij} - \eta_i \quad (3)$$

لازم به ذکر است که برای رخدادهایی فقط با یک شتاب‌نگاشت، مقدار باقیمانده‌ی درون‌رخدادی به صورت رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود. همچنین در رخدادهای با تعداد شتاب‌نگاشت‌های زیاد، مقدار باقیمانده‌ی درون‌رخدادی با میانگین باقیمانده‌های شتاب‌نگاشت‌ها برابر است، [۳۲] که در آن‌ها N_i نشان‌دهنده‌ی تعداد شتاب‌نگاشت‌هاست.

$$\eta_i = r_i^{(inter)} = \frac{\tau^2}{\tau^2 N_i + \sigma^2} \quad (4)$$

با توجه به نکات ذکرشده، نتایج RSA در دوره‌ی زمانی ثابت ($T = 0.8$ s) یعنی پارامتر (PGA)، برای رابطه‌ی کاهندگی آبراهامسون و سیلوا (۲۰۰۸)، $AS_{0.8}$ با

۴۰۰ مجموعه‌ی داده که به صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت انتخاب شده‌اند ($K=400$)، در شکل ۴ مشاهده می‌شود. در شکل مذکور، پایداری روابط کاهندگی برای پارامترهای لرزه‌ی ورودی بزرگای گشتاوری، فاصله و سرعت موج برشی در مقابل باقیمانده‌های درون‌رخدادی و فرارخدادی (معادلات ۲ و ۳) و به علاوه معیار خطای ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین مطلق خطا، ضرایب تعیین (R^2)، ضریب کارایی (ضریب E) ناش و سانکلیف، معیار نظری-اطلاعاتی LLH و معیار رتبه‌بندی براساس فاصله‌ی اقلیدسی EDR در برابر باقیمانده‌ی کل نشان داده شده است. مطابق شکل ۴، مدل آبراهامسون و سیلوا (۲۰۰۸) ثبات کافی برای زیرمجموعه‌هایی از مجموعه‌ی داده‌های کلی مورد مطالعه، حتی در زمانی که تعداد داده‌های زیرمجموعه‌های مذکور به مقدار کلی داده‌ها نزدیک می‌شود، نشان نمی‌دهد. براساس دیدگاه RSA، مدل مناسب و پایدار در حالی که اندازه‌ی زیرمجموعه‌ی داده‌ها افزایش می‌یابد، عملکرد صعودی از خود نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، با افزایش تعداد داده‌ها در زیرمجموعه‌های مذکور، انحراف کمتری در مدل مشاهده می‌شود. [۵] مقدار میانه (نقاط لوزی شکل) در هر نمونه‌ی RSA در شکل ۴، در واقع روند RSA را در مقابل تعداد مختلف داده‌ها بیان می‌کند. مطابق شکل ۴، نتایج RSA روند پایداری را برای باقیمانده‌های درون‌رخدادی در مقابل بزرگای و همچنین باقیمانده‌های فرارخدادی در مقابل فاصله از خود نشان می‌دهد. در حالی که این روند در مورد باقیمانده‌های فرارخدادی در مقابل سرعت موج برشی نزولی است، که نشان‌دهنده‌ی نقص رابطه و انحراف باقیمانده‌ی فرارخدادی در برابر سرعت موج برشی براساس پایگاه داده‌های ایران است. همان‌گونه که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، نتایج معیارهای خطا RMSE، MAE، ضرایب تعیین R^2 و کارایی (E)R-squared، معیار نظری-اطلاعاتی LLH و شاخص

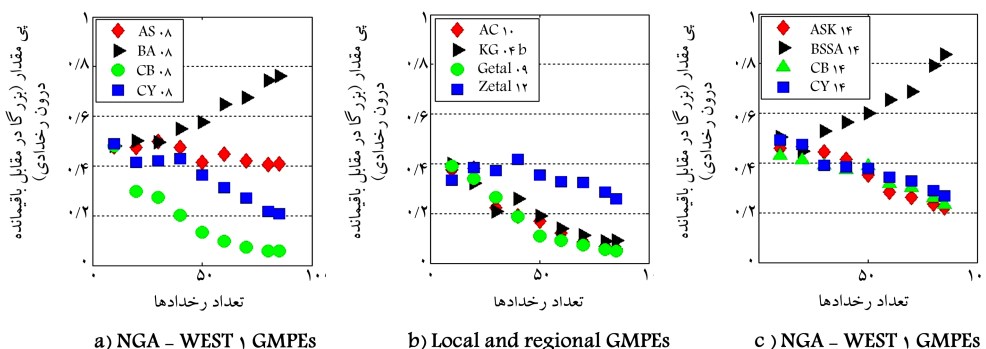


شکل ۴. تحلیل حساسیت رابطه‌ی آبراهامسون و سیلوا (۲۰۰۸) ($AS_{0.8}$).

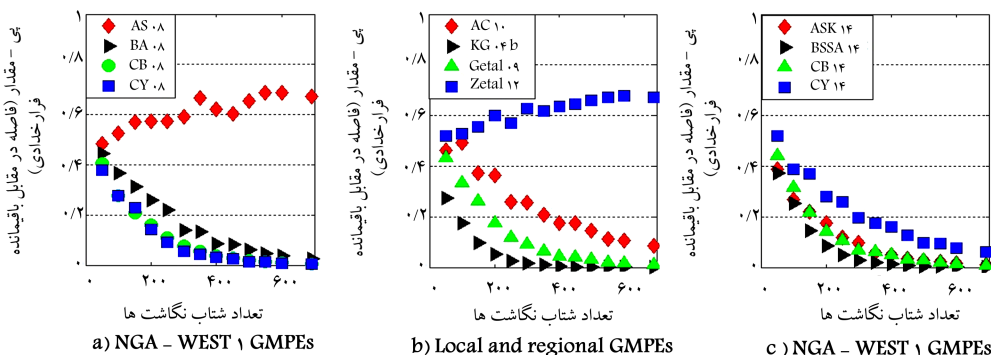
EDR، هم‌گرایی خوبی با افزایش تعداد داده‌ها و رسیدن به تعداد کلی داده‌ها دارند. به منظور مقایسه‌ی میزان پایداری روابط منتخب در کنار یکدیگر، میانه‌ی پی-مقدارهای ۴۰۰ مجموعه‌ی داده برای انواع باقیمانده‌ها در مقابل پارامترهای لرزه‌یی ورودی در کنار یکدیگر در شکل‌های ۵ تا ۷ رسم شده‌اند. قسمت سمت چپ شکل‌ها مربوط به مدل‌های ۱ NGA-west و قسمت راست شکل مربوط به مدل‌های ۲ NGA-west است. قسمت وسط نیز دو گروه روابط ویژه‌ی ایران و ویژه‌ی منطقه‌ی اروپا و خاورمیانه را نشان می‌دهد. برای مقایسه‌ی راحت‌تر دو گروه روابط NGA با هم، این روابط در دو طرف و به یک شکل هستند، اما به دلیل محدودیت تعداد صفحات نوشتار حاضر، نتایج آزمون‌های آماری معرفی‌شده در مطالعه ارائه نشده است. اما به‌عنوان یک نکته‌ی جالب نتایج معیارهای خطا RMSE، MAE، ضرایب تعیین (R^2) ، و کارایی R-squared (E)، معیار نظری-اطلاعاتی LLH و شاخص

EDR برای سایر مدل‌ها نیز همچون مدل آبراهامسون و سیلوا (۲۰۰۸) با افزایش تعداد داده‌ها و رسیدن به تعداد کلی داده‌ها ثابتی داشته‌اند. بدیهی است که نتایج RSA براساس یک آزمون آماری (مثلاً LLH و سایرین)، کاملاً مستقل از اندازه‌ی نمونه‌هاست و یک روند ثابت را دنبال می‌کند. این واقعیت از آنجا منشأ می‌گیرد، که همه‌ی روش‌های ذکرشده به نوعی میانگین‌گیری بر روی داده‌ها را در روند محاسبات خود لحاظ کرده‌اند.

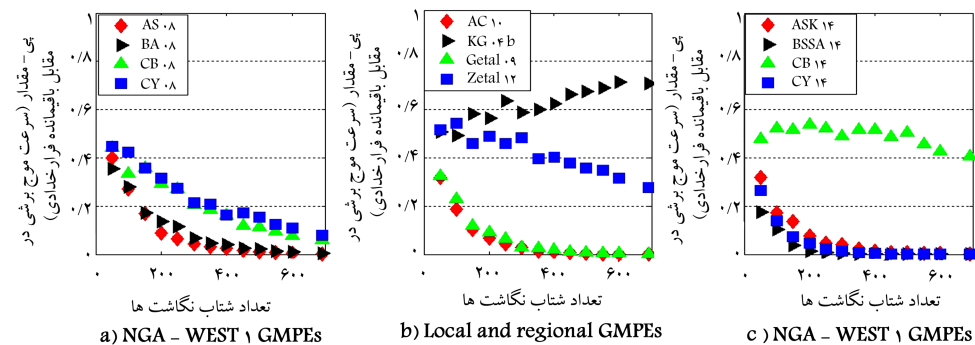
از سوی دیگر، نتایج RSA روابط کاهندگی برای پارامترهای مختلف لرزه‌یی در مقابل باقیمانده‌های درون‌رخدادی و فرارخدادی، یک روند ثابت رو به جلو را نشان نمی‌دهد. بررسی جزئیات بیشتر در شکل‌های ۵ الی ۷ نشان می‌دهد که در میان مدل‌های ۱ NGA-west و ۲ NGA-west، اگرچه مدل‌های بور و آنکینسون (۲۰۰۸ و ۲۰۱۴)، روند صعودی در مقابل پارامتر بزرگ دارند؛ اما در مقابل پارامترهای سرعت موج برشی و فاصله‌ی کاملاً ناپایدار هستند. همچنین مدل‌های آبراهامسون



شکل ۵. میانه‌ی پی-مقدارهای حاصل از انحراف باقیمانده‌های درون‌رخدادی در برابر بزرگای گشتاوری در تحلیل حساسیت روابط منتخب.



شکل ۶. میانه‌ی پی-مقدارهای حاصل از انحراف باقیمانده‌های فرارخدادی در برابر فاصله در تحلیل حساسیت روابط منتخب.



شکل ۷. میانه‌ی پی-مقدارهای حاصل از انحراف باقیمانده‌های فرارخدادی در برابر سرعت موج برشی در تحلیل حساسیت روابط منتخب.

دوره‌ی زمانی (۰/۱، ۰/۲، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۵، ۲) برای ۱۲ رابطه‌ی کاهندگی نیز محاسبه شده است، که به دلیل محدودیت تعداد صفحات نوشتار حاضر، فقط نتایج این بررسی‌ها در شکل‌های ۸ الی ۱۰ برای دوره‌های زمانی ۱، ۰/۵ و ۲ ثانیه ارائه شده است.

همان‌گونه که در شکل‌های ۸ الی ۱۰ مشاهده می‌شود، نتایج رتبه‌بندی براساس RSA برای روابط کاهندگی در دوره‌های زمانی مختلف متغیر است. مثلاً، مدل زعفرانی که در PGA به‌عنوان یک مدل مناسب شناخته شده بود، در دوره‌های زمانی دیگر مانند ۱ ثانیه (همچنین در ۰/۷۵ و ۱/۵ ثانیه) جزء مدل‌های نامناسب قرار گرفته است. روابط $AS_{0.8}$ ، $BA_{0.8}$ ، $ASK_{1.4}$ ، $CB_{1.4}$ و $CY_{1.4}$ در برابر بزرگای گشتاوری روابط $AS_{0.8}$ ، $BA_{0.8}$ و $Getal_{0.9}$ در برابر فاصله و روابط $KG_{0.4b}$ ، $AS_{0.8}$ و $Getal_{0.9}$ در برابر سرعت موج برشی در تمامی دوره‌های زمانی رفتاری نسبتاً مناسب و صعودی از خود نشان می‌دهند. نتایج RSA برای باقیمانده‌ی فرارخدادی در مقابل سرعت موج برشی در بیشتر مدل‌ها و دوره‌های زمانی مختلف، بیشتر از سایر پارامترهای لرزه‌ی ورودی، روند نزولی و نامناسب دارد و فقط مدل $KG_{0.4b}$ در تمام دوره‌ها و مدل‌های $Getal_{0.9}$ ، $Zetal_{1.2}$ و $AS_{0.8}$ در برخی از دوره‌های زمانی ثبات و روند بهتری دارند.

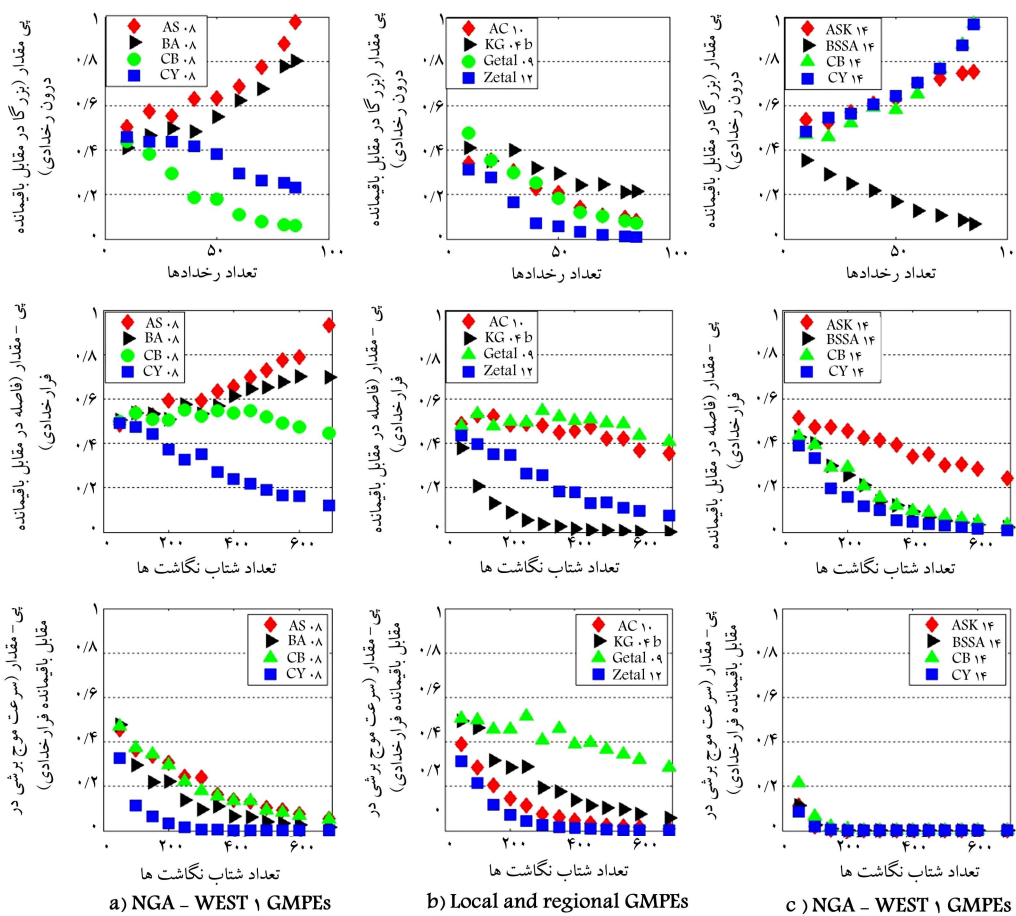
به‌عنوان یک نتیجه‌گیری می‌توان مدل‌های کاهندگی را در دوره‌های زمانی ناپایدار دانست. همچنین مدل قاسمی و همکاران (۲۰۰۹) در ۷ دوره‌ی زمانی، عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر مدل‌ها دارد و فقط در PGA عملکرد مطلوبی ندارد که با توجه به اینکه این مدل فقط برای Sa در دوره‌ی زمانی ۰/۵ تا ۳ ثانیه است و

و سیلوا (۲۰۰۸) و کمپل و بزرگ‌نیا (۲۰۱۴)، پایداری خوبی با داده‌های ایران فقط برای پارامتر فاصله و سرعت موج برشی را به ترتیب نشان می‌دهند. از سوی دیگر، در میان مدل‌های کاهندگی محلی و منطقه‌ی، مدل کالکان و گولکان (۲۰۰۴) در مقابل پارامترهای بزرگ و فاصله‌ی روند به شدت نزولی را از خود نشان می‌دهد. همچنین مدل‌های آکار و کاکنان و قاسمی و همکاران (۲۰۰۹)، عملکرد ضعیف و ناپایداری در مقابل تمام پارامترهای لرزه‌ی دارند. با توجه به موارد ذکرشده، همان‌طور که در شکل‌های ۲ الی ۴ مشاهده می‌شود، رابطه‌ی زعفرانی و همکاران (۲۰۱۲) تطابق و ثبات نسبتاً خوبی در مقابل تمام پارامترهای لرزه‌ی نشان می‌دهد. همچنین براساس نتایج RSA هر دو گروه از روابط NGA_{west1} و NGA_{west2} ، عملکرد ضعیفی را براساس داده‌های ناحیه‌ی ایران نشان می‌دهند. باید توجه داشت که این نتیجه‌گیری فقط برای پارامتر PGA ($T = 0.5$) معتبر است و نمی‌توان آن را برای سایر دوره‌های زمانی در نظر گرفت.

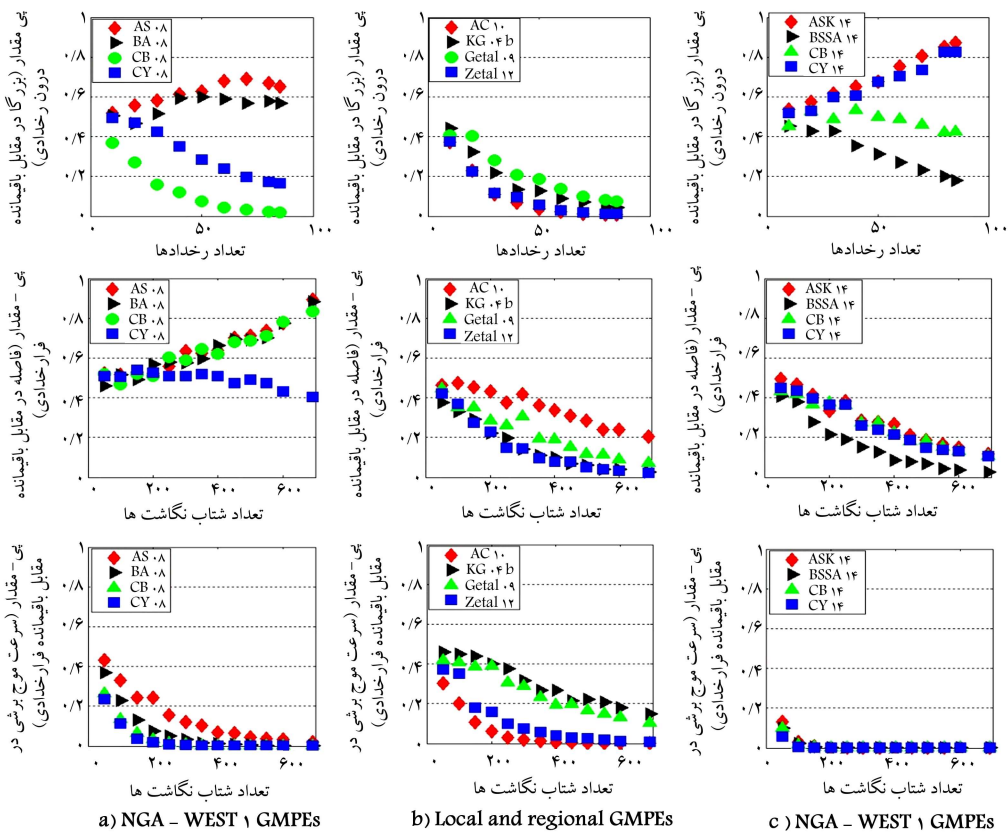
۶. بررسی پایداری روابط کاهندگی در دوره‌های زمانی

مختلف براساس روش RSA

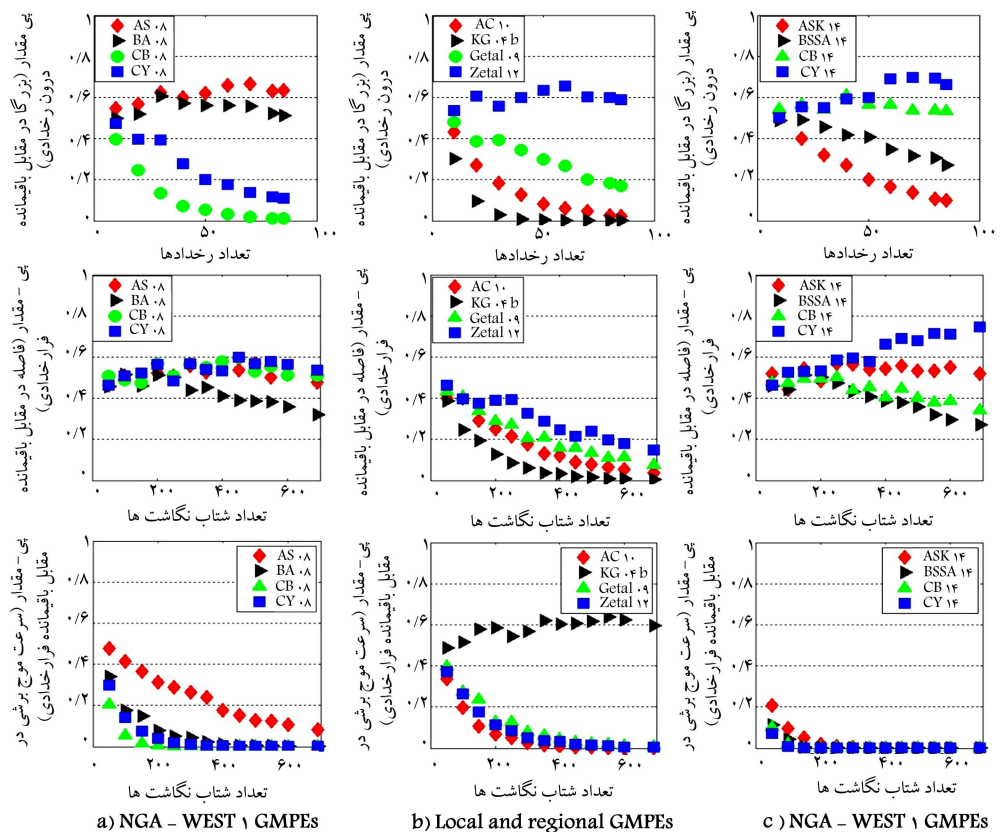
همان‌گونه که در بخش پیش بیان شده است، نتایج به‌دست‌آمده فقط برای پارامتر PGA معتبر است و نمی‌توان نتایج مذکور برای مدل را در همه‌ی دوره‌های زمانی تعمیم داد. به این منظور روش RSA برای پارامترهای لرزه‌ی ورودی، در Sa و



شکل ۸. میان‌بندی پی-مقدارهای حاصل از انحراف باقیمانده‌ها در برابر بزرگای گشتاوری، فاصله و سرعت موج برشی در تحلیل حساسیت برای پارامتر $Sa(T = 0.5)$.



شکل ۹. میانه‌ی پی -مقدارهای حاصل از انحراف باقیمانده‌ها در برابر بزرگای گشتاوری، فاصله و سرعت موج برشی در تحلیل حساسیت برای پارامتر $Sa(T = 1)$.



شکل ۱۰. میانه‌ی پی -مقدارهای حاصل از انحراف باقیمانده‌ها در برابر بزرگای گشتاوری، فاصله و سرعت موج برشی در تحلیل حساسیت برای پارامتر $Sa(T = 2)$.

سرعت موج برشی) نشان می‌دهد. مقایسه‌ی نتایج آزمون‌های آماری این مدل‌ها (ضریب کارایی، ضریب تعیین و معیار نظری-اطلاعاتی) با نتایج RSA ضرورت بررسی پایداری مدل‌های کاهندگی را با استفاده از روش RSA در انتخاب و رتبه‌بندی روابط کاهندگی نشان می‌دهد. به‌عنوان یک نتیجه مدل زعفرانی و همکاران (۲۰۱۲)، عملکرد باثبات‌تری را نسبت به پایگاه داده‌های ایران نسبت به سایر مدل‌های منتخب فقط در پارامتر PGA نشان می‌دهد.

همچنین بررسی پایداری روابط کاهندگی براساس روش RSA در ۸ دوره‌ی زمانی، نشان دهنده‌ی ناپایداری روابط کاهندگی در دوره‌های زمانی است. چرا که بیشتر مدل‌ها در بعضی از این ۸ دوره، عملکردی مناسب دارد و در بقیه نامناسب هستند. که این امر وجود چالش برای پژوهشگران را در استخراج روابط کاهندگی نشان می‌دهد. همچنین نتایج RSA نشان می‌دهند که روش‌های آماری به‌کار رفته در مطالعه‌ی حاضر (ضریب کارایی، ضریب تعیین و معیار نظری-اطلاعاتی) مستقل از اندازه‌ی نمونه‌ها هستند. لازم به تصریح است که تمامی نتایج حاصل در پژوهش حاضر بستگی به مقادیر انتخابی برای پارامترهای ورودی روش بازنمونه‌گیری داده‌ها و فرضیات مورد استفاده دارد. بدیهی است که انجام مطالعات آتی برای مجموعه‌ی داده‌های مناطق دیگر و همچنین برای کاتالوگ‌های کامل‌تر می‌تواند منجر به افزایش دقت در نتایج حاصل شده و یا تغییر برخی از نتایج شود.

در مطالعه‌ی حاضر از $Sa(T = 0.5)$ به‌عنوان PGA استفاده شده است. این مدل را می‌توان برای Sa نسبت به سایر مدل‌ها برای ناحیه‌ی ایران مطلوب‌تر دانست.

۷. نتیجه‌گیری

روش RSA براساس بازنمونه‌گیری از داده‌ها به‌صورت انتخاب تصادفی و یک‌نواخت مجموعه‌ی داده‌هایی از پایگاه کلی داده‌ها به‌منظور تعیین انحراف مدل کاهندگی تعریف شده است. این روش به‌عنوان ابزاری مفید، به‌صورت بصری با توجه به روند انحراف مدل می‌تواند در بهبود و انتخاب مناسب‌ترین روابط کاهندگی استفاده شود. این روش می‌تواند برای انواع مختلف پارامترهای لرزه‌یی و همچنین برای آزمون‌های آماری و ریاضی مختلف به‌کار برده شود. در مطالعه‌ی حاضر، از این روش به‌منظور ارزیابی پایداری روابط کاهندگی منتخب برای پایگاه داده‌های ایران شامل ۶۹۱ شتاب‌نگاشت از ۸۵ رخداد زمین‌لرزه، برای PGA و پارامتر Sa در ۷ دوره‌ی زمانی $(T = 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10)$ استفاده شده است. در برخی از موارد، نتایج حاصل از مطالعه، حساسیت و بی‌ثباتی قابل توجهی را برای مؤلفه‌های مختلف باقیمانده‌ها در برابر پارامترهای لرزه‌یی (بزرگ، فاصله و

پانویس‌ها

1. peak ground acceleration
2. peak ground velocity
3. spectral acceleration
4. ground motion prediction equations
5. probabilistic seismic hazard analysis
6. Chi-Square test
7. Kolmogorov-Smirnov test
8. root mean square error
9. mean absolute error
10. Nash-sutcliffe efficiency coefficient
11. Re-sampling analysis
12. moment magnitude
13. next generation attenuation models
14. Kakkamanos, et al.

منابع (References)

1. Douglas, J. "Ground motion estimation equations 1964-2010", Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, California (2011).
2. Shoja-Taheri, J., Naserieh, S. and Hadi, G. "A test of the applicability of NGA models to the strong ground-motion data in the Iranian plateau", *Earthquake Engineering*, **14**(2), pp. 278-292 (2010).
3. Kakkamanos, J. and Baise, L.G. "Model validations and comparisons of the next generation attenuation of ground motions (NGA-West) project", *Bulletin of the*

Seismological Society of America, **101**(1), pp. 160-175 (2011).

4. Mousavi, M., Ansari, A., Zafarani, H. and Azarbakht, A. "Selection of ground motion prediction models for seismic hazard analyzes in Zagros region", Iran, Accepted in journal of Earthquake Engineering (2012).
5. Azarbakht, A., Rahpeyma, S. and Mousavi, M. "A new methodology for assessment of the stability of ground-motion prediction equations", *Journal of Bulletin of the Seismological Society of America*, **104**(3), pp. 1147-1457 (2014).
6. Scherbaum, F., Cotton, F. and Smit, P. "On the use of response spectralreference data for the selection of ground-motion models for seismic hazard analysis: The case of rock motion", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **94**(6), pp. 341-348 (2004).
7. Scherbaum, F., Delavaud, E. and Riggelsen, C. "Model selection in seismic hazard analysis: An information-theoretic perspective", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **99**(6), pp. 3234-3247 (2009).
8. Kale, O. and Akkar, S. "A new procedure for selecting and ranking ground motion prediction equations (GMPEs): The euclidean distance-based ranking (EDR) method", *Journal of Bulletin of the Seismological Society of America*, **103**(2A), pp. 1069-1084 (2013).
9. Scasserra, G., Stewart, J.P., Bazzurro, P., Lanzo, G. and Mollaioli, F. "A comparison of NGA ground-motion prediction equations to Italian data", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **99**(5), pp. 2961-2978 (2009).

10. Zare, M. "Contribution a l'etude de mouvements forts en iran", Du Catalogue Aux Lois D'attenuation, Diss (1999).
11. Shoja-Taheri, J. and Niazi, M. "Seismicity of the Iranian plateau and bordering regions", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **71**(2), pp. 477-489 (1981).
12. BHRC, "Permanent committee for revising the Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings", Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings-Standard No. 2800, 2nd ed., Building and Housing Research Center, Tehran, Iran (1999).
13. Soghrat, M.R., Khaji, N. and Zafarani, H. "Simulation of strong ground motion in northern Iran using the specific barrier model", *Geophys. J. Int.*, **188**(2), pp. 645-679 (2012).
14. Ambraseys, N.N., Douglas, J., Sarama, S.K. and Smit, P.M. "Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earth-quakes using data from Europe and the Middle East: Horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration", *Bull. Earthquake Eng.*, **3**(1), pp. 1-53 (2005).
15. Berberian, M. "Contribution to the seismotectonics of Iran (Part 2)", Geological Survey of Iran, Report 39 (1976).
16. Chen, S.Z. and Atkinson, G.M. "Global comparisons of earthquake source spectra", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**(3), pp. 885-895 (2002).
17. Bommer, J.J., Douglas, J., Scherbaum, F., Cotton, F., Bungum, H. and Fah, D. "On the selection of ground-motion prediction equations for seismic hazard analysis", *Seismological Research Letter*, **81**(5), pp. 783-793 (2010).
18. Cotton, F., Pousse, G., Bonilla, F. and Scherbaum, F. "On the discrepancy of recent European ground-motion observations and predictions from empirical models: Analysis of KiK-net accelerometric data and point-sources stochastic simulations", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **98**(5), pp. 2244-2261 (2008).
19. Kakkamanos, J., Baise, L.G. and Boore, D.M. "Estimating unknown input parameters when implementing the NGA ground-motion prediction equations in engineering practice", *Earthquake Spectra*, **27**(4), pp. 1219-1235 (2011).
20. Boore, D.M. and Atkinson, G.M. "Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s.", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 99-138 (2008).
21. Campbell, K.W. and Bozorgnia, Y. "NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s.", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 139-171 (2008).
22. Abrahamson, N.A. and Silva, W.J. "Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground motion relations", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 67-97 (2008).
23. Chiou, B.S.J. 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).
24. Kalkan, E. and Gulkan, P. "Site-dependent spectra derived from ground motion records in Turkey", *Earthquake Spectra*, **20**(4), pp. 1111-1138 (2004).
25. Akkar, S. and Cagnan, Z. "A local ground-motion predictive model for Turkey, and its comparison with other regional and global ground-motion models", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**(6), pp. 2978-2995 (2010).
26. Zafarani, H. and Soghrat, M. "Simulation of ground motion in the Zagros region, Iran using the specific barrier model and stochastic method", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **102**(5), pp. 2031-2045 (2012).
27. Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima, Y. and Koketsu, K. "An empirical spectral ground-motion model for Iran", *Journal of Seismology*, **13**(4), pp. 499-515 (2009).
28. Boore, D.M., Stewart, J.P., Seyhan, E. and Atkinson, G.M. "NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes", *Earthquake Spectra*, **30**(3), pp. 1057-1085 (2014).
29. Campbell, K.W. and Bozorgnia, Y. "NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra", *Earthquake Spectra*, **30**(3), pp. 1087-1115 (2014).
30. Abrahamson, N.A., Silva, W.J. and Kamai, R. "Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions", *Earthquake Spectra*, **30**(3), pp. 1025-1055 (2014).
31. 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).
32. Abrahamson, N.A. and Youngs, R.R. "Short notes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **82**(1), pp. 505-510 (1992).

جدول الف. اطلاعات مربوط به رخدادهای ایران که در مطالعه‌ی حاضر مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

ردیف	تاریخ رخداد	بزرگای گشتاوری	گسل	تعداد شتاب‌نگاشت‌ها	ردیف	تاریخ رخداد	بزرگای گشتاوری	گسل	تعداد شتاب‌نگاشت‌ها	ردیف	تاریخ رخداد	بزرگای گشتاوری	گسل	تعداد شتاب‌نگاشت‌ها
۱	۱۹۷۸، ۰۹، ۱۶	۷، ۳۵	۱۱	۶	۴۵	۲۰۰۳، ۰۷، ۱۰	۶	۱۴	۴					
۲	۱۹۷۹، ۱۱، ۲۷	۷، ۱۰	۲۵	۸	۴۶	۲۰۰۳، ۰۸، ۲۱	۶	۱۸	۶					
۳	۱۹۸۱، ۰۷، ۲۸	۷، ۲۰	۱۵، ۲	۷	۴۷	۲۰۰۳، ۱۱، ۲۸	۵	۱۰	۲					
۴	۱۹۹۰، ۰۶، ۲۰	۷، ۳۷	۱۸	۵	۴۸	۲۰۰۳، ۱۲، ۲۶	۶، ۹	۷	۱۸					
۵	۱۹۹۴، ۰۶، ۲۰	۵، ۹۰	۸	۱۰	۴۹	۲۰۰۴، ۰۵، ۲۸	۶، ۴	۱۶	۳۹					
۶	۱۹۹۵، ۱۰، ۱۵	۵	۳۳	۲	۵۰	۲۰۰۴، ۱۰، ۷	۶، ۲	۳۴	۱۹					
۷	۱۹۹۶، ۱۰، ۱۸	۵، ۳	۳۳	۲	۵۱	۲۰۰۵، ۰۱، ۱۰	۵، ۳	۳۱	۱۴					
۸	۱۹۹۶، ۱۱، ۱۸	۵، ۲	۳۳	۲	۵۲	۲۰۰۵، ۰۲، ۲۲	۶، ۵	۱۰	۲۲					
۹	۱۹۹۷، ۰۲، ۴	۶، ۴	۱۰	۶	۵۳	۲۰۰۵، ۱۱، ۲۷	۵، ۷	۲۲	۱۰					
۱۰	۱۹۹۷، ۰۲، ۲۸	۶	۱۰	۱۴	۵۴	۲۰۰۶، ۰۳، ۳۰	۵، ۱	۱۵	۸					
۱۱	۱۹۹۷، ۰۳، ۲	۵، ۳	۱۰	۳	۵۵	۲۰۰۶، ۰۳، ۳۱	۶، ۱	۱۹، ۵	۲۱					
۱۲	۱۹۹۷، ۰۴، ۱۹	۵، ۵	۲۷	۲	۵۶	۲۰۰۶، ۰۳، ۳۱	۵، ۱	۱۷	۶					
۱۳	۱۹۹۷، ۰۵، ۵	۵، ۳	۳۳	۳	۵۷	۲۰۰۶، ۰۶، ۲۸	۵، ۷	۲۵، ۷	۴					
۱۴	۱۹۹۷، ۰۵، ۱۰	۷، ۲	۱۰	۱۸	۵۸	۲۰۰۸، ۰۵، ۵	۵، ۲	۱۰	۲					
۱۵	۱۹۹۷، ۰۶، ۲۵	۵، ۷	۱۵	۱۰	۵۹	۲۰۰۸، ۰۹، ۱۰	۶	۱۲، ۴	۱۰					
۱۶	۱۹۹۸، ۰۳، ۱۴	۶، ۶	۹	۶	۶۰	۲۰۰۸، ۰۹، ۱۱	۵، ۱	۶	۲					
۱۷	۱۹۹۸، ۰۴، ۱۰	۵، ۷	۳۳	۴	۶۱	۲۰۰۸، ۰۹، ۱۷	۵، ۲	۱۰	۳					
۱۸	۱۹۹۸، ۰۷، ۹	۵، ۹	۲۶	۱۳	۶۲	۲۰۰۸، ۱۲، ۷	۵، ۴	۱۰	۵					
۱۹	۱۹۹۸، ۰۸، ۲۱	۵	۴۹	۱۱	۶۳	۲۰۰۸، ۱۲، ۸	۵، ۱	۱۴	۵					
۲۰	۱۹۹۸، ۱۱، ۱۳	۵، ۴	۳۳	۴	۶۴	۲۰۱۲، ۰۱، ۱۹	۵، ۲	۱۴	۳					
۲۱	۱۹۹۹، ۰۳، ۴	۶، ۶	۲۶	۹	۶۵	۲۰۱۲، ۰۲، ۲۷	۵	۱۶	۳					
۲۲	۱۹۹۹، ۰۵، ۶	۶، ۳	۱۷، ۴	۱۶	۶۶	۲۰۱۲، ۰۷، ۱	۵، ۲	۱۸	۶					
۲۳	۱۹۹۹، ۰۵، ۶	۵، ۷	۴۷	۲	۶۷	۲۰۱۲، ۰۸، ۱۱	۶، ۱	۱۶	۳۲					
۲۴	۱۹۹۹، ۰۹، ۲۴	۵، ۲	۳۱	۷	۶۸	۲۰۱۲، ۰۸، ۱۱	۶، ۲	۱۲	۴۳					
۲۵	۱۹۹۹، ۱۰، ۳۱	۵، ۲	۳۳	۴	۶۹	۲۰۱۲، ۰۸، ۱۱	۵، ۱	۹	۳					
۲۶	۱۹۹۹، ۱۱، ۱۹	۵، ۴	۳۲	۱۴	۷۰	۲۰۱۲، ۰۸، ۱۴	۵، ۵	۱۸	۵					
۲۷	۱۹۹۹، ۱۱، ۲۶	۵، ۳	۱۷، ۵	۵	۷۱	۲۰۱۲، ۰۸، ۱۵	۵، ۳	۱۴	۳					
۲۸	۲۰۰۰، ۰۲، ۲	۵، ۳	۳۲	۳	۷۲	۲۰۱۲، ۱۱، ۷	۵، ۳	۵	۵					
۲۹	۲۰۰۰، ۰۳، ۵	۵، ۴	۲۲	۳	۷۳	۲۰۱۲، ۱۲، ۲۳	۵، ۱	۱۴	۹					
۳۰	۲۰۰۰، ۰۳، ۲۱	۵، ۴	۴۰	۳	۷۴	۲۰۱۳، ۰۱، ۲۱	۵، ۶	۱۶	۶					
۳۱	۲۰۰۰، ۰۵، ۳	۵، ۲	۳۳	۳	۷۵	۲۰۱۳، ۰۴، ۹	۶	۲۲	۱۵					
۳۲	۲۰۰۰، ۰۶، ۲۳	۵	۱۶	۶	۷۶	۲۰۱۳، ۰۴، ۹	۵، ۱	۱۲	۴					
۳۳	۲۰۰۰، ۰۸، ۱۶	۵	۲	۶	۷۷	۲۰۱۳، ۰۴، ۱۰	۵، ۵	۱۶	۵					
۳۴	۲۰۰۱، ۰۳، ۲۸	۵، ۳	۱۵	۵	۷۸	۲۰۱۳، ۰۴، ۱۰	۵، ۷	۱۰	۵					
۳۵	۲۰۰۲، ۰۲، ۱۷	۵، ۳	۳۳	۳	۷۹	۲۰۱۳، ۰۵، ۱	۵	۱۰	۳					
۳۶	۲۰۰۲، ۰۴، ۱۷	۵، ۲	۳۳	۳	۸۰	۲۰۱۳، ۰۵، ۶	۵	۳	۴					
۳۷	۲۰۰۲، ۰۴، ۱۹	۵، ۲	۱۸	۱۰	۸۱	۲۰۱۳، ۱۱، ۲۲	۵، ۶	۲۸	۶					
۳۸	۲۰۰۲، ۰۴، ۲۴	۵، ۳	۱۴	۶	۸۲	۲۰۱۳، ۱۱، ۲۲	۵، ۷	۲۸	۵					
۳۹	۲۰۰۲، ۰۶، ۲۲	۶، ۴	۱۲	۴۰	۸۳	۲۰۱۳، ۱۱، ۲۳	۵، ۱	۱۴	۳					
۴۰	۲۰۰۲، ۰۹، ۲	۵، ۲	۱۰	۵	۸۴	۲۰۱۳، ۱۱، ۲۴	۵، ۵	۲۸	۶					
۴۱	۲۰۰۲، ۱۲، ۲۴	۵، ۲	۲۶، ۹	۵	۸۵	۲۰۱۳، ۱۱، ۲۸	۵، ۷	۹	۱۳					
۴۲	۲۰۰۳، ۰۱، ۱۱	۵، ۲	۹	۳										
۴۳	۲۰۰۳، ۰۲، ۱۴	۵، ۸	۹	۳										
۴۴	۲۰۰۳، ۰۷، ۱۰	۵، ۸	۱۰	۵										