

کاربرد مدل رگرسیون چندجمله‌ای برای برآورد بزرگی و زمان وقوع پس‌لرزه اصلی زلزله‌های بزرگ با استفاده از الگوی طبقه‌بندی پس‌لرزه‌ها

علی‌اکبر یحیی‌آبادی^۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱۱/۰۵

سید قاسم رستمی^۱

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۰۲/۰۱

چکیده

تحلیل زمانی و مکانی پس‌لرزه‌های یک زمین‌لرزه، در کانون توجه پژوهشگران علم زلزله‌شناسی قرار دارد. این موضوع به دلایل مختلف، از جمله ضرورت برآورد بزرگی و زمان وقوع پس‌لرزه اصلی در بازه زمانی معین پس از وقوع یک زلزله بزرگ در مدیریت بحران اهمیت دارد. از اهداف این پژوهش، شناسایی ارتباط بین بزرگی و زمان وقوع پس‌لرزه اصلی با الگوی رویداد پس‌لرزه‌ها در چند ساعت اولیه پس از وقوع یک زلزله بزرگ است. بدین منظور، یک مدل رگرسیون چندجمله‌ای با ۱۵ پارامتر مختلف که در برگزیده اطلاعات مربوط به زلزله اصلی و اطلاعات برداشت شده از اولین پس‌لرزه‌های رویداده پس از وقوع زلزله اصلی می‌باشد، پیشنهاد گردید. این ۱۵ پارامتر بر اساس بررسی ضرایب همبستگی پارامترهای مختلف با بزرگی و زمان وقوع پس‌لرزه اصلی انتخاب شده‌اند. ضرایب مدل پیشنهادی با استفاده از ۳۲ رویداد بزرگ ثبت شده مربوط به زلزله‌های اصلی با بزرگی بیش از ۵/۶ در ۱۳ سال منتهی به سال ۲۰۲۰ در محدوده کشور ایران و به کمک روش کمترین خطای مربعات برآورد شد. همزمان، آزمون فاکتور واریانس ثانویه برای پذیرش ضرایب و بررسی پایداری مدل به روش شبیه‌سازی خطای عمدی بر روی ضرایب و آزمون باقیمانده‌های خطا انجام شده است. برای یافتن بهترین مدل، با طبقه‌بندی داده‌ها در دو بازه مختلف، ۶۰ حالت در نظر گرفته شده است. بازه اول بررسی پس‌لرزه‌ها در دوره‌های زمانی ۱، ۲، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱ و ۲۴ ساعت و بازه دوم انتخاب بزرگ‌ترین پس‌لرزه در دوره ۲، ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ روز، بعد از زلزله اصلی است. در نتیجه با تحلیل خطای مدل‌ها در برآورد دو پارامتر بزرگی و زمان وقوع پس‌لرزه اصلی، سه مدل برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت پیشنهاد گردید. این مدل‌ها می‌توانند، بزرگی و زمان وقوع بزرگ‌ترین پس‌لرزه در بازه‌های ۲ روزه، ۸ روزه و ۲۰ روزه را با دقت قابل قبول (برای هر سه مدل، دقت متوسط ۰/۱۸ در بزرگی به مقیاس ناتلی و دقت متوسط ۱۸/۱ ساعت در زمان وقوع) برآورد کنند. دقت مدل‌های پیشنهادی با استفاده از ۹ زلزله رویداده در کشورهای ایران و ترکیه، که از آن‌ها در تولید مدل استفاده نشده است اما در چشمه‌های زمین‌لرزه‌ای با ساختار مشابه قرار دارند، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که مدل بزرگی وقوع پس‌لرزه اصلی قادر است با خطای نسبی کمتر از ۴/۵ درصد، بزرگای قوی‌ترین پس‌لرزه رویداده در دوره‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت را پیش‌بینی کند. درحالی‌که مدل زمان وقوع پس‌لرزه با خطای نسبی متوسط ۷/۲ درصد، از دقت پایین‌تری برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: پس‌لرزه اصلی، بزرگی زلزله، زمان وقوع، رگرسیون چندجمله‌ای، زلزله بزرگ، الگوی طبقه‌بندی

۱- مربی گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد (نویسنده مسئول) gh.rostami@ub.ac.ir

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد a.yahyaabadi@ub.ac.ir

۱- مقدمه

مدل‌ها نیز وجود داشته، که به تدریج در تحقیقات مختلف به آن‌ها پرداخته شده است (Enescu, Mori, & Miyazawa, 2007:9). این تحقیقات بیشتر در زمینه مدل‌سازی توزیع و پخش پس‌لرزه‌ها به‌طور متوسط انجام شده است. در پژوهش‌هایی که در ایران انجام شده، توزیع زمین‌لرزه‌ها به کمک منحنی پوش پیشنهاد شده است (ریاضی و قیطانچی، ۱۳۸۴). همچنین امروزه بر روی ارتباط پس‌لرزه‌ها با ویژگی‌های ساختاری گسل و شرایط فیزیکی و محلی، تحقیقات زیادی انجام شده است (Christophersen & Smith, 2000:2). در مواردی هم که پس‌لرزه‌ها روند کاهشی ندارند، از مدل‌های دیگری نظیر مدل ETAS استفاده شده است (داودی، و همکاران، ۱۳۹۷: ۳۸).

پس از وقوع یک زمین‌لرزه نسبتاً بزرگ، با توجه به میزان گسیختگی گسل و مکانیسم حرکت پوسته در کانون زلزله، تا مدت زمانی معین تعدادی پس‌لرزه (وابسته به زلزله اصلی) در پنجره زمانی و مکانی اتفاق می‌افتد (داودی و همکاران، ۱۳۹۷: ۳۵). امروزه مطالعه پس‌لرزه‌ها از چند بُعد حائز اهمیت است. از یک طرف پس‌لرزه‌ها نمایانگر یک چشمه زلزله بوده و از الگوی خاصی پیروی می‌کند (ریاضی‌راد، ۱۳۸۵). لذا، در برآورد انرژی آزاد شده، روند مهاجرت پس‌لرزه‌ها، تعیین گسل‌های پنهان و تکمیل و اصلاح نقشه‌های خطرپذیری زلزله حائز اهمیت می‌باشند (Ogata & Shimazaki, 1984:1757-1765).

جدول ۱: پنجره زمانی و مکانی پس‌لرزه‌ها بر حسب بزرگی زلزله اصلی (Gardner & Knopoff, 1974:1366)

فاصله زمانی (روز)	فاصله مکانی (کیلومتر)	بزرگی زلزله (ریشتر)
۶	۱۹/۵	۲/۵
۱۱/۵	۲۲/۵	۳/۰
۲۲	۲۶	۳/۵
۴۲	۳۰	۴/۰
۸۳	۳۵	۴/۵
۱۵۵	۴۰	۵/۰
۲۹۰	۴۷	۵/۵
۵۱۰	۵۴	۶/۰
۷۹۰	۶۱	۶/۵
۹۱۵	۷۰	۷/۰
۹۶۰	۸۱	۷/۵
۹۸۵	۹۴	۸/۰

در برخی تحقیقات، توسعه مدل‌ها از طریق مطالعات خاص بر روی پس‌لرزه‌های زلزله‌های بزرگ در بعضی مناطق جهان نیز انجام شده است. از جمله می‌توان به مدل‌سازی احتمالی پس‌لرزه ۱۱ زلزله مهم در منطقه جنوب

از طرف دیگر، آگاهی از شدت و زمان تقریبی پس‌لرزه اصلی، می‌تواند در آمادگی و جلوگیری از آسیب‌های بعد از زلزله اصلی، نقش بسزایی داشته باشد. چه بسا، ممکن است یک پس‌لرزه اصلی بتواند ساختمان‌هایی که دچار آسیب شده‌اند، را مورد تهدید جدی قرار دهد. به‌طور دقیق نمی‌توان پس‌لرزه‌ها را از سایر زلزله‌های مرتبط با یک گسل که در فاصله زمانی و مکانی از زلزله اصلی روی می‌دهند، جدا کرد. اما، مهم‌ترین جداسازی عمومی مربوط به تحقیق گاردنر و نوپوف است، که نتایج آن در جدول ۱ خلاصه شده است.

از خصوصیات مهم پس‌لرزه‌ها برای اکثر زمین‌لرزه‌ها، کاهش تعداد و کاهش بزرگی آن‌ها، با گذشت زمان است که تحقیقات زیادی بر روی مدل‌های این کاهش صورت گرفته است.

اولین مطالعه بنیادی روی این موضوع منجر به قانون هیپربولیک آموری شد (Omori, 1894:115)، که بعدها توسط ژاپن اصلاح گردید (Utsu, 1970:144). در ادامه این اقدامات، ادغام رابطه معروف گوتنبرگ-ریشتر با قانون آموری نیز صورت گرفته است (Reasenber & Jones, 1989: 1173). مشکلات زیادی در ثبت پس‌لرزه‌های اولیه و تعیین پارامترهای این

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (۱۳۸۷)

کاربرد مدل رگرسیون چندجمله‌ای... / ۱۱۳

اصلی، به اتمام رسیده و پس از آن روند کاهشی آن‌ها شروع می‌شود (کامران‌زاد و همکاران ۱۳۹۴: ۱۴۵).

در این پژوهش، تلاش شد تا بر مبنای اطلاعات پس‌لرزه‌های رویداده در چند ساعت ابتدایی بعد از وقوع زلزله اصلی، زمان و بزرگی پس‌لرزه اصلی برآورد شود. تعیین حداقل زمان مورد نیاز برای برداشت اطلاعات پس‌لرزه‌های رویداده پس از وقوع زلزله اصلی، به‌عنوان ورودی مدل با هدف پیش‌بینی مشخصات پس‌لرزه اصلی، مدنظر بوده است.

بدین منظور، پس‌لرزه‌های مربوط به زلزله‌های بزرگ (که در طول یک هفته حداقل ۱۰ پس‌لرزه دارند) در گروه‌های مختلف چند ساعته طبقه‌بندی شدند. با توجه به این‌که، زلزله‌ها از نظر تراکم پس‌لرزه‌ها در ساعات اولیه متفاوت می‌باشند، یک مدل چندجمله‌ای متشکل از ۱۵ پارامتر وابسته، شامل اطلاعات مربوط به اولین پس‌لرزه‌های رویداده، انتخاب و ضرایب مدل بر اساس داده‌های مربوط به ۳۲ زلزله ثبت شده در ایران به‌دست آمد. در انتها، بهترین مدل‌ها از نظر کم‌ترین خطا انتخاب و دقت آن‌ها در پیش‌بینی بزرگی و زمان وقوع پس‌لرزه اصلی برای ۸ زلزله دیگر در ایران و ترکیه (که از اطلاعات آن‌ها در ساخت مدل استفاده نشده است)، مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- داده‌های مورد استفاده

پهنه وسیع ایران در مسیر کمربند آلپ-همیالیا قرار گرفته و بر طبق نقشه‌های خطرپذیری زلزله، اکثر مراکز جمعیتی کشور در مناطق با خطر نسبی زیاد تا خیلی زیاد قرار دارند. بررسی کاتالوگ‌های زلزله ایران در ۱۳ سال منتهی به سال ۲۰۲۰ نشان می‌دهد، هر سال به‌طور متوسط، ۳۳۰۰ زمین‌لرزه در محدوده ۲/۵ تا ۳/۵ ریشتر، تعداد ۴۸۰ زمین‌لرزه در محدوده ۳/۵ تا ۴/۵ ریشتر، تعداد ۵۵ زمین‌لرزه در محدوده ۴/۵ تا ۵/۵ ریشتر، تعداد ۵ زمین‌لرزه در محدوده ۵/۵ تا ۶/۵ ریشتر و هر ۲/۶ سال یک زلزله بزرگ‌تر از ۶/۵ ریشتر روی داده است.

شرق اسپانیا، برای تجزیه و تحلیل مکانی و زمانی آن‌ها اشاره کرد. اساس این تحقیق نیز برآورد پارامترهای مدل اصلاح شده آموری و آموری-اوتسو و توسعه آن‌ها است (Hamdache, Peláez, & Talbi, 2013:57-67).

به‌طور مشابه، برای دستیابی به الگوی پس‌لرزه‌ها در زمین‌لرزه‌های دوقولو، یک مطالعه خاص بر پایه قانون آموری-اوتسو برای زلزله‌های دوقولوی در مرکز کشور نپال انجام شده است (Thapa, Tao, Fan, & Tao, 2018:5-9). در یک مطالعه دیگر، تجزیه و تحلیل آماری کمیت بزرگی پس‌لرزه‌ها در دامنه زمان و مکان برای زلزله ۶/۵ ریشتری در کشور ترکیه انجام شده است.

این مطالعه پس از بررسی چند مدل، قانون اصلاح شده آموری را منطبق بر بیش از ده هزار پس‌لرزه در زلزله مذکور انتخاب می‌نماید (Öztürk & Şahin, 2019:5-23). در جای دیگر، یکی از روش‌های پیشنهاد شده برای جایگزین کردن قانون آموری و اوتسو، استفاده از مدل فیزیکی با بکار بردن کمیت‌های وابسته به گسل، نظیر درجه حرارت هوا و کاهش تنش تجمعی است (Marcellini, 1997:139-140).

اخیراً نیز مقایسه بین دو روش رگرسیون لجستیک ساده و الگوریتم هوش مصنوعی (ML) از طریق کمیت‌های وابسته به گسل (نظیر تغییرات استرس، نرخ لغزش و فاصله هندسی تا کانون زلزله)، برای مدل‌سازی مکانی پس‌لرزه‌های زلزله ۷/۳ ریشتری کرمانشاه در سال ۱۳۹۶ انجام شده است (Karimzadeh, Matsuoka, Kuang, & Ge, 2019:5-8).

با توجه به تجربه موفق استفاده از مدل‌های ریاضی در برآورد بزرگی و زمان وقوع زلزله‌ها (رستمی و یحیی‌آبادی، ۱۳۹۸)، در این مطالعه نیز از مدل‌های چندجمله‌ای در مطالعه رفتار پس‌لرزه‌ها استفاده شده است.

بررسی اولیه این مقاله بر روی پس‌لرزه‌های رویداده در زلزله‌های مختلف نشان داد که توزیع پس‌لرزه‌ها در ۲۴ ساعت ابتدایی در مدل‌سازی پس‌لرزه‌ها حائز اهمیت است. به‌طوری‌که بر طبق قانون آموری و با توجه به رفتار گسل، آشفستگی پس‌لرزه‌ها از ۰/۵ تا ۲۰ ساعت پس از زلزله

نیز مدنظر نبوده است. زیرا رفتار منابع لرزه‌زا در مناطق مختلف جغرافیایی با یکدیگر متفاوت است.

- برخی زلزله‌های بزرگ، خود پس‌لرزه یک زلزله بزرگ‌تر هستند که نمی‌توان از آن‌ها در این تحقیق استفاده کرد.

بررسی اولیه بر روی این زمین‌لرزه‌ها نشان داد که بزرگی (M_a) و زمان وقوع پس‌لرزه اصلی (dt_a)، در مدت زمان ۲۴ روز پس از وقوع زلزله اصلی، همبستگی معنی‌داری با بزرگی زلزله اصلی (M) و تعداد پس‌لرزه‌های رویداده در ۱۲ ساعت اولیه (n) دارد.

با برازش این داده‌ها از طریق تابع چندجمله‌ای زیر، می‌توان به نتایجی رسید که استفاده از آن‌ها در ادامه تحقیق مفید خواهد بود:

$$M_a = a_1 + \frac{a_2}{M} + a_3n + a_4n \times M + a_5n^2 \dots \quad (1)$$

$$+ a_6M \times n^2 + a_7 \frac{M}{n^2} + a_8(M + n)$$

$$dt_a = b_1 + \frac{b_2}{M} + b_3n + b_4n \times M + b_5n^2 \dots \quad (2)$$

$$+ b_6M \times n^2 + b_7 \frac{M}{n^2} + b_8(M + n)$$

در این دو مدل، کمیت‌ها شامل بزرگی پس‌لرزه اصلی (M_a)، زمان وقوع پس‌لرزه اصلی (dt_a)، بزرگی زلزله اصلی (M) و تعداد پس‌لرزه‌ها در ۱۲ ساعت ابتدایی پس از وقوع زلزله اصلی (n) است. ضرایب این دو مدل (a_1 تا a_8 و b_1 تا b_8) به روش کمترین خطای مربعات برآورد شدند. سپس نمودارهای هم‌تراز بزرگی پس‌لرزه اصلی و زمان وقوع آن برحسب بزرگی زلزله اصلی (M) و تعداد پس‌لرزه‌های رویداده در ۱۲ ساعت اولیه (n)، مطابق نگاره‌های ۱ و ۲ رسم شد.

با بررسی نگاره ۱ می‌توان به نتایج زیر در خصوص پیش‌بینی بزرگی پس‌لرزه اصلی (M_a) دست یافت:
- برای زلزله‌های با بزرگی کمتر از ۶/۵ در مقیاس ناتلی، با افزایش تعداد پس‌لرزه‌ها، بزرگی پس‌لرزه اصلی نیز افزایش می‌یابد.

با توجه به جدول ۱، تنها زلزله‌های بزرگ منجر به پس‌لرزه‌هایی در یک دوره زمانی طولانی مدت می‌شوند. لذا در این مقاله به منظور مدل‌سازی مناسب، از زلزله‌های با بزرگی بیشتر از ۵/۶ در مقیاس ناتلی در محدوده طول جغرافیایی ۴۲ تا ۶۴ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۴ تا ۴۱ درجه شمالی استفاده شد. ضمناً زلزله‌هایی که در ۲۴ ساعت اول دارای پس‌لرزه قابل ملاحظه‌ای نیستند (خصوصاً زلزله‌های منطقه جنوب شرق ایران-مرز پسته هندی و عربی که کمتر از ۱۰ پس‌لرزه در طول یک هفته بعد از وقوع زلزله اصلی دارند) از لیست زلزله‌های مورد مطالعه حذف شده‌اند.

بازه زمانی برای دسترسی به داده‌های مورد نظر از ابتدای سال ۲۰۰۶ تا پایان سال ۲۰۱۹ است. منبع مورد استفاده برای جمع‌آوری داده‌ها، کاتالوگ زلزله‌های منتشر شده در سایت مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IRSC) و همچنین برای ارزیابی مدل‌ها، سایت مرکز بین‌المللی لرزه‌شناسی (ISC) است.

تمامی پس‌لرزه‌ها، دارای بزرگی بیشتر از ۲/۵ در مقیاس ناتلی هستند. مجموعاً ۳۲ زلزله برای این تحقیق انتخاب شدند که مشخصات آن‌ها شامل بزرگی زلزله، زمان و مکان وقوع، عمق کانونی و تعداد پس‌لرزه‌ها در بازه ۲۰ روزه در جدول ۲ ارائه شده است.

شایان ذکر است ۳۲ زلزله عنوان شده در جدول ۲ حداکثر تعداد رخداد زلزله‌ای است که می‌توان برای مدل‌سازی در این پژوهش مورد استفاده قرار داد. به دلایل زیر استفاده از تعداد بیشتر رویداد زلزله در این پژوهش میسر نبوده است:
- تعداد زلزله‌های بزرگ که دارای پس‌لرزه‌های قابل ملاحظه بوده و توسط دستگاه‌های شتاب‌نگار ثبت شده باشند، در ایران محدود است.

- زلزله‌های با بزرگی کمتر از ۵/۵ در مقیاس ناتلی، دارای پس‌لرزه اصلی با بزرگی قابل ملاحظه‌ای نیستند. در نتیجه استفاده از آن‌ها در مدل‌سازی ممکن نیست.
- استفاده از زلزله‌های بزرگ ثبت شده در سایر نقاط جهان

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سیر)

کاربرد مدل رگرسیون چندجمله‌ای... / ۱۱۵

جدول ۲: زلزله‌های ثبت‌شده‌ی مورد استفاده در این پژوهش از ابتدای سال ۲۰۰۶ تا اکتبر ۲۰۱۹

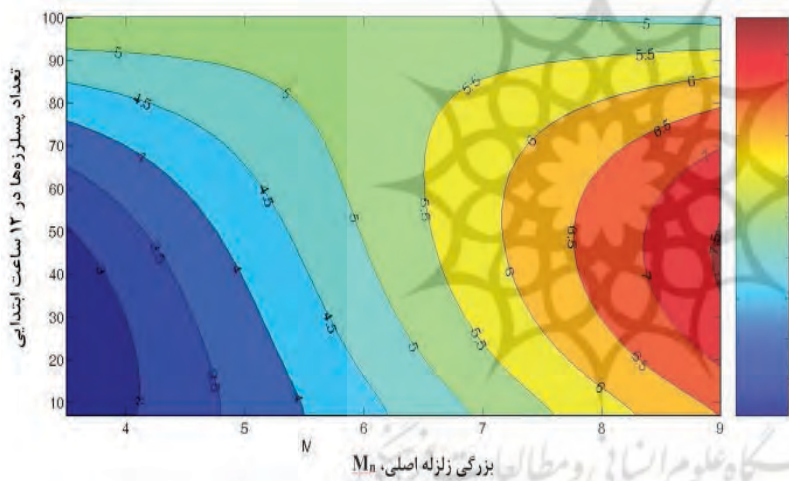
ردیف	زمان وقوع زلزله (تاریخ میلادی-زمان جهانی)						عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	عمق (km)	بزرگی (Mn)	تعداد پس‌لرزه بعد از ۲۰ روز
	سال	ماه	روز	ساعت	دقیقه	ثانیه					
1	2006	2	28	7	31	3.6	28.117	56.759	15.6	5.7	32
2	2006	3	25	7	29	0.1	27.451	55.44	21.7	6.0	83
3	2006	3	31	1	17	2.3	33.514	48.849	16.0	6.1	199
4	2007	6	18	14	29	50.9	34.498	50.866	14.0	5.9	60
5	2008	8	27	21	52	40.7	32.344	47.325	20.5	5.7	198
6	2008	9	10	11	0	35.3	27.002	55.829	9.5	6.0	120
7	2010	7	20	19	38	12	27.04	53.899	9.5	5.8	74
8	2012	12	5	17	8	11.6	33.493	59.547	7.8	5.6	24
9	2010	7	31	6	52	57.8	29.703	56.812	4.0	5.8	36
10	2010	8	27	19	23	49.5	35.488	54.466	6.7	5.9	55
11	2010	9	27	11	22	47.9	29.693	51.618	26.1	6.1	102
12	2010	12	20	18	41	58.3	28.443	59.153	13.3	6.5	282
13	2011	1	27	8	38	32.8	28.289	58.948	10.0	6.0	151
14	2011	10	23	10	41	27.8	38.665	43.708	18.0	7.1	118
15	2013	11	28	13	51	34	29.317	51.311	7.9	5.6	130
16	2018	1	11	6	59	29.8	33.712	45.693	8.4	5.6	390
17	2012	8	11	12	23	15.2	38.393	46.806	9.0	6.5	816
18	2018	7	22	5	7	2.4	27.564	54.949	18.8	5.6	29
19	2013	4	9	11	52	49.1	28.467	51.568	11.3	6.4	591
20	2013	4	16	10	44	21	28.09	62.04	92.0	7.8	18
21	2013	5	11	2	8	8.5	26.598	57.846	14.5	6.2	294
22	2017	4	5	6	9	8.5	35.847	60.339	6.0	6.0	427
23	2017	5	13	18	0	59.3	37.651	57.22	7.7	5.7	43
24	2017	11	12	18	18	16.2	34.772	45.762	18.1	7.3	1295
25	2013	11	22	18	30	57.5	34.289	45.555	10.0	5.8	159
26	2014	8	18	2	32	4.1	32.711	47.638	10.0	6.3	787
27	2017	12	1	2	32	44.3	30.738	57.372	8.1	6.2	1147
28	2018	7	22	10	7	25.2	34.63	46.255	8.0	5.7	680
29	2018	7	22	20	39	14.6	30.349	57.501	7.1	5.8	108
30	2018	9	7	6	23	35.3	28.156	59.46	8.2	5.7	46
31	2018	11	25	16	37	31.8	34.359	45.712	10.5	6.4	463
32	2019	7	8	7	0	31.7	31.888	49.548	15.0	5.7	66

برای زلزله‌های با بزرگی بیشتر از ۶/۵ در مقیاس ناتلی، وضع به گونه دیگری است. به طوری که وقتی تعداد پس‌لرزه‌ها در ۱۲ ساعت اولیه، در محدوده ۴۰ تا ۶۰ پس‌لرزه باشد، بزرگ‌ترین پس‌لرزه اتفاق می‌افتد. اما در صورتی که تعداد پس‌لرزه‌ها، خارج از محدوده ۴۰ تا ۶۰ پس‌لرزه باشد، بزرگی پس‌لرزه اصلی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، اگر تعداد پس‌لرزه‌ها خیلی کمتر یا خیلی بیشتر از تعداد ۵۰ پس‌لرزه باشد، آنگاه پس‌لرزه اصلی از شدت زیادی برخوردار نیست. به همین ترتیب با بررسی نگاره ۲ می‌توان به نتایج زیر در خصوص زمان وقوع پس‌لرزه اصلی دست یافت:

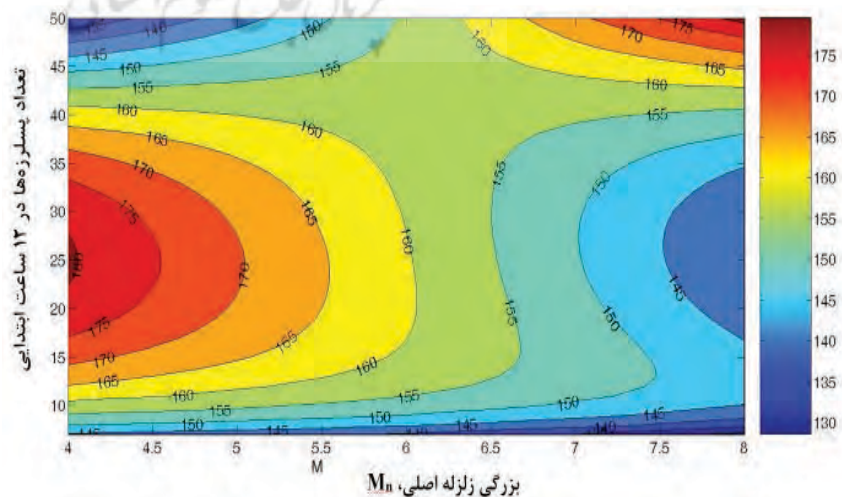
- برای زلزله‌های با بزرگی بین ۶ تا ۶/۵ در مقیاس ناتلی، اگر تعداد پس‌لرزه‌ها در ۱۲ ساعت اولیه بیشتر از ۱۰ باشد، پس‌لرزه اصلی در حدود ۱۵۵ تا ۱۶۰ ساعت (به طور متوسط ۶/۵ روز) بعد از وقوع زلزله اصلی، اتفاق می‌افتد.

- برای زلزله‌های بزرگ‌تر از ۶/۵ در مقیاس ناتلی، برای حالتی که تعداد پس‌لرزه‌ها در ۱۲ ساعت اول بیشتر از ۳۵ پس‌لرزه باشد، با زیاد شدن تعداد پس‌لرزه‌ها، فاصله زمانی وقوع پس‌لرزه اصلی، افزایش می‌یابد.

- به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد پس‌لرزه‌ها، در زلزله‌های کمتر از ۶ در مقیاس ناتلی، پس‌لرزه اصلی زودتر اتفاق می‌افتد. اما در زلزله‌های بزرگ‌تر از ۷ در مقیاس ناتلی، پس‌لرزه اصلی دیرتر اتفاق می‌افتد.



نگاره ۱: منحنی‌های همتراز پیش‌بینی بزرگی پس‌لرزه اصلی بر حسب بزرگی زلزله اصلی و تعداد پس‌لرزه‌ها در ۱۲ ساعت اولیه



نگاره ۲: منحنی‌های همتراز پیش‌بینی زمان وقوع پس‌لرزه اصلی بر حسب بزرگی زلزله اصلی و تعداد پس‌لرزه‌ها در ۱۲ ساعت اولیه

اصلی، مربوط به کمیت‌های n_3 و $n_{1/2}$ است. یعنی بزرگی پس‌لرزه اصلی، ارتباط خوبی با تعداد زلزله‌های طبقه‌بندی شده در گروه $2/5$ تا $3/5$ ریشتر در بازه زمانی اول یعنی بازه (dt_1) و با شدت بیشتر با تعداد کل پس‌لرزه‌ها در مدت زمان نصف بازه زمانی اول ($dt_1/2$) دارد. همچنین بیشترین ضریب همبستگی با زمان وقوع پس‌لرزه اصلی، مربوط به پارامترهای n_5 و M می‌باشد. به عبارت دیگر، ارتباط زیادی بین زمان وقوع پس‌لرزه اصلی با تعداد پس‌لرزه‌های گروه $4/5$ تا $5/5$ ریشتر در بازه اول و بزرگی زلزله اصلی برقرار است.

جدول ۳: معرفی کمیت‌های لازم برای طبقه‌بندی پس‌لرزه‌ها و مدل‌های برآورد بزرگی و زمان وقوع پس‌لرزه اصلی

JD	روز ژولین وقوع زلزله اصلی:
M	بزرگی زلزله اصلی در مقیاس ناتلی:
λ	طول جغرافیایی بر حسب درجه:
φ	عرض جغرافیایی بر حسب درجه:
h	ساعت وقوع زلزله بر حسب زمان جهانی:
n_1	تعداد پس‌لرزه‌ها در بازه dt_1 :
$n_{1/2}$	تعداد پس‌لرزه‌ها در بازه $dt_1/2$:
$n_{1/4}$	تعداد پس‌لرزه‌ها در بازه $dt_1/4$:
n_3	تعداد پس‌لرزه‌ها با بزرگی $2/5$ تا $3/5$ در بازه dt_1 :
n_4	تعداد پس‌لرزه‌ها با بزرگی $3/5$ تا $4/5$ در بازه dt_1 :
n_5	تعداد پس‌لرزه‌ها با بزرگی $4/5$ تا $5/5$ در بازه dt_1 :
n_6	تعداد پس‌لرزه‌ها با بزرگی بزرگ‌تر از $5/5$ در بازه dt_1 :
dt_3	متوسط فاصله زمانی بین پس‌لرزه‌ها با بزرگی $2/5$ تا $3/5$:
dt_4	متوسط فاصله زمانی بین پس‌لرزه‌ها با بزرگی $3/5$ تا $4/5$:
dt_5	متوسط فاصله زمانی بین پس‌لرزه‌ها با بزرگی $4/5$ تا $5/5$:
dt_6	متوسط فاصله زمانی بین پس‌لرزه‌ها با بزرگی بزرگ‌تر از $5/5$:

۳- مدل‌های برآورد بزرگی و زمان وقوع پس‌لرزه اصلی یک زمین‌لرزه بزرگ

برای انتخاب مدل مناسب، با استفاده از روش آنالیز اولیه (Pre Analysis)، مدل‌های ریاضی خطی و غیرخطی با پارامترهای مختلف انتخاب شد. سپس با بررسی خطاها در هر یک از آن‌ها از طریق برازش داده‌ها در هر یک از مدل‌ها، در نهایت یک مدل رگرسیون چندجمله‌ای برای برآورد زمان و بزرگی پس‌لرزه اصلی یک زلزله بزرگ پیشنهاد شد. شایان ذکر است استفاده از این روش در مقایسه با دیگر روش‌های برازش و رگرسیون دارای خطای کمتری می‌باشد (Ikram and U. Qamar 2016: 2-4). لذا، در تحقیقات قبلی نیز برای برآورد و پیش‌بینی پارامترهای مختلف زلزله، از جمله بزرگی و موقعیت آن مورد بررسی قرار گرفته است (Asencio et al., 2018: 2-3 & Castellaro, et al., 2006: 913-915).

در ابتدا توضیحاتی در ارتباط با ساخت این مدل و پارامترهای آن ارائه می‌شود. در اولین گام، دو بازه زمانی به شرح زیر انتخاب شد:

- بازه زمانی اول برای طبقه‌بندی پس‌لرزه‌ها (dt_1)، که در این مدت پس از زلزله اصلی، تمام پس‌لرزه‌های ثبت شده به‌عنوان ورودی مدل انتخاب و مطابق جدول ۳، کلیه داده‌های جدول ۲ طبقه‌بندی شدند تا بر اساس آن‌ها بتوان زمان و بزرگی پس‌لرزه اصلی را پیش‌بینی کرد. برای بازه زمانی اول (dt_1)، زمان‌های ۱، ۲، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱ و ۲۴ ساعت پیشنهاد شده است.

- بازه زمانی برآورد مشخصات بزرگ‌ترین پس‌لرزه بعد از وقوع زلزله اصلی به‌عنوان پس‌لرزه اصلی (dt_2)، که برای این بازه زمانی، مقادیر ۲، ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ روز پیشنهاد شده است.

پس از بررسی پس‌لرزه‌ها، وابستگی نسبی بین کمیت‌های انتخاب شده در جدول ۳، با بزرگی و زمان وقوع پس‌لرزه اصلی مشهود است.

ضرایب همبستگی برای این کمیت‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. بیشترین ضریب همبستگی با بزرگی پس‌لرزه

هر یک از آن‌ها و استفاده از روش برآورد کمترین خطای مربعات نیاز است. بدین منظور، بزرگی پس‌لرزه‌های اصلی در یک بردار، که با y نامگذاری می‌شود، در نظر گرفته شد و ماتریس ضرایب مدل (A) به صورت روابط ۵ و ۶ تشکیل شد. از همین روش نیز برای برآورد ضرایب مدل پیش‌بینی زمان وقوع پس‌لرزه اصلی، به صورت روابط ۷ و ۸ استفاده شد. در صورتی که مشکل تکینگی (سینگولاریتی) در ماتریس معکوس وجود داشته باشد، برای رفع آن از روش منظم‌سازی تیخونوف استفاده می‌شود.

(۵)

$$\begin{bmatrix} M_{d1} \\ M_{d2} \\ M_{d3} \\ \vdots \\ M_{dn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & M_1 & M_1^2 & M_1^3 & n_{1,3}M_1 & n_{2,1} & n_{2,1}^2 & dt_{3,1} & n_{4,1} \\ 1 & M_1 & M_1^2 & M_1^3 & n_{1,3}M_1 & n_{2,1} & n_{2,1}^2 & dt_{3,1} & n_{4,1} \\ 1 & M_1 & M_1^2 & M_1^3 & n_{1,3}M_1 & n_{2,1} & n_{2,1}^2 & dt_{3,1} & n_{4,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & M_1 & M_1^2 & M_1^3 & n_{1,3}M_1 & n_{2,1} & n_{2,1}^2 & dt_{3,1} & n_{4,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \\ a_8 \\ a_9 \end{bmatrix}$$

با توجه به کمیت‌های انتخاب شده در جدول ۳، مدلی برای برآورد بزرگی (M_a) و فاصله زمانی (dt_a) پس‌لرزه اصلی به صورت روابط ۳ و ۴ در نظر گرفته شد:

(۳)

$$\begin{aligned} M_a = & a_1 + a_2M + a_3M^2 + a_4M^3 + a_5M \times n_{1...} \\ & + a_6n_3 + a_7n_3^2 + a_8dt_3 + a_9n_4 + a_{10}n_4^2... \\ & + a_{11}dt_4 + a_{12}n_5 + a_{13}n_5^2 + a_{14}dt_5 + a_{15}n_6... \\ & + a_{16}dt_6 + a_{17}n_{1/4} + a_{18}n_{1/2} + a_{19}n_1 + a_{20}h... \\ & + a_{21}h^2 + a_{22}\varphi + a_{23}\lambda + a_{24}\varphi \times \lambda... \\ & + a_{25}n_3 \times dt_3 + a_{26}n_4 \times dt_4 + a_{27}n_5 \times dt_5 \end{aligned}$$

(۴)

$$\begin{aligned} dt_a = & b_1 + b_2M + b_3M^3 + b_4M^4 + b_5M \times n_{1...} \\ & + b_6n_3 + b_7n_3^2 + b_8dt_3 + b_9n_4 + b_{10}n_4^2... \\ & + b_{11}dt_4 + b_{12}n_5 + b_{13}n_5^2 + b_{14}dt_5 + b_{15}n_6... \\ & + b_{16}dt_6 + b_{17}n_{1/4} + b_{18}n_{1/2} + b_{19}n_1 + b_{20}/h... \\ & + b_{21}/h^2 + b_{22}/\varphi + b_{23}/\lambda + b_{24}\varphi \times \lambda... \\ & + b_{25}n_3 \times dt_3 + b_{26}n_4 \times dt_4 + b_{27}n_5 \times dt_5 \end{aligned}$$

برای تعیین ضرایب هر مدل (a_1 تا a_{27} و b_1 تا b_{27})، به اطلاعات ۳۲ زلزله انتخاب شده، طبقه‌بندی پس‌لرزه‌های

(۶)

$$y_{n \times 1} = A_{n \times m} \cdot X_{m \times 1} \Rightarrow X = (A^T A)^{-1} A^T y$$

جدول ۴: ضریب همبستگی بین بزرگی و زمان وقوع پس‌لرزه اصلی با پارامترهای انتخاب شده برای مدل پیش‌بینی پس‌لرزه بر حسب درصد

dt_6	n_6	dt_5	n_5	dt_4	n_4	dt_3	n_3	پارامترها
-4.3	-5.2	-5.3	-0.9	4.4	-17.0	-6.1	48.2	همبستگی با بزرگی پس‌لرزه
21.2	17.7	42.5	49.6	24.2	38.5	-1.2	-7.2	همبستگی با زمان وقوع پس‌لرزه

ادامه جدول ۴: ضریب همبستگی بین بزرگی و زمان وقوع پس‌لرزه اصلی با پارامترهای انتخاب شده برای مدل پیش‌بینی پس‌لرزه بر حسب درصد

h	λ	φ	n_1	$n_{1/2}$	$n_{1/4}$	M	JD	پارامترها
4.7	2.7	-3.7	21.5	44.3	30.2	-6.0	28.1	همبستگی با بزرگی پس‌لرزه
-24.4	-20.5	1.4	32.2	17.2	8.4	48.4	-4.6	همبستگی با زمان وقوع پس‌لرزه

۴- یافته‌ها و انتخاب مدل‌های سه گانه

با توجه به مدل‌های ارائه شده در بخش سوم مقاله، به کمک اطلاعات مربوط به ۳۲ زلزله مندرج در جدول ۲، ابتدا ضرایب مدل بزرگی و مدل زمان وقوع پس‌لرزه اصلی برای هر یک از ۶۰ حالت مربوط به مقادیر مفروض برای dt_1 و dt_2 محاسبه شده است (انتخاب زمان‌های ۱، ۲، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱ و ۲۴ ساعت برای بازه زمانی اول و زمان‌های ۲، ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ روز برای بازه دوم منجر به ۶۰ حالت خواهد شد).

خطاهای هر حالت، برای مدل برآورد بزرگی پس‌لرزه اصلی در جدول ۵ و برای مدل برآورد فاصله زمانی پس‌لرزه اصلی در جدول ۶ تنظیم شده است. منحنی‌های هم‌تراز ریشه خطای مربعی متوسط در کلیه حالت‌های ۶۰ گانه برای مدل پیش‌بینی بزرگی پس‌لرزه اصلی در نگاره ۳ و به‌طور مشابه برای مدل پیش‌بینی فاصله زمانی پس‌لرزه اصلی در نگاره ۴ نمایش داده شده است.

این نگاره‌ها نشان می‌دهند که برای پیش‌بینی بزرگی پس‌لرزه اصلی در دوره ۴ روزه بعد از وقوع زلزله اصلی (یعنی dt_2 برابر ۴ روز)، بهترین مدل از نظر کمترین خطا، مربوط به حالت طبقه‌بندی پس‌لرزه‌ها با استفاده از بازه زمانی dt_1 برابر ۱ و ۲۱ ساعت است. همچنین می‌توان مشاهده کرد، برای پیش‌بینی فاصله زمانی پس‌لرزه اصلی در دوره ۲ روزه بعد از وقوع زلزله اصلی، بهترین مدل از نظر کمترین خطا می‌تواند برای حالت طبقه‌بندی پس‌لرزه‌ها در حالت ۲۱ و ۲۴ ساعت اولیه باشد.

با توجه به اهمیت پیش‌بینی سریع و براساس بررسی خطاهای مدل در حالات ۶۰ گانه مندرج در جداول ۵ و ۶، سه مدل برای برآورد بزرگ‌ترین پس‌لرزه در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت (۲ روزه)، میان‌مدت (۸ روزه) و بلندمدت (۲۰ روزه) مطابق مشخصات جدول ۷ پیشنهاد شده است. ضرایب هر یک از این سه حالت را برای دو مدل بزرگی و مدل فاصله زمانی، می‌توان در جدول ۷ مشاهده نمود.

(۷)

$$\begin{bmatrix} dt_{11} \\ dt_{12} \\ dt_{13} \\ \vdots \\ dt_{60} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & M_1 & M_1^2 & M_1^3 & n_1 M_1 & n_1^2 & n_1^3 & dt_{11} & n_{21} & \vdots \\ 1 & M_1 & M_1^2 & M_1^3 & n_{21} M_1 & n_{21}^2 & n_{21}^3 & dt_{21} & n_{21} & \vdots \\ 1 & M_1 & M_1^2 & M_1^3 & n_3 M_1 & n_3^2 & n_3^3 & dt_{31} & n_{21} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & M_1 & M_1^2 & M_1^3 & n_{60} M_1 & n_{60}^2 & n_{60}^3 & dt_{60} & n_{21} & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \\ b_7 \\ b_8 \\ b_9 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

(۸)

$$y'_{n \times 1} = B_{n \times m} \cdot X'_{m \times 1} \Rightarrow X' = (B^T B)^{-1} B^T y'$$

برای بررسی خطای هر مدل پیش‌بینی، بردار باقیمانده‌ها (یا خطاها) طبق رابطه (۹) محاسبه و خطای مربعی متوسط این بردار (MSE)، به‌عنوان ملاک خطای مدل، مورد ارزیابی قرار گرفت:

$$e = y - AX \quad e' = y' - BX' \quad (۹)$$

برای ارزیابی خطای MSE، مدل‌های مختلف بررسی شد. چنانچه عنوان شد، برای بازه زمانی اول (dt_1)، زمان‌های ۱، ۲، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱ و ۲۴ ساعت و برای بازه دوم (dt_2)، زمان‌های ۲، ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ روز، در نظر گرفته شد، یعنی در مجموع ۶۰ مدل مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تمام این ۶۰ حالت، ضرایب مدل و خطای متناظر MSE محاسبه شد.

در نهایت، مدل با کمترین خطای MSE به‌عنوان مدل مناسب برای برآورد پس‌لرزه اصلی یک زلزله مشخص انتخاب خواهد شد. ارزیابی ضرایب به‌دست آمده به‌واسطه‌ی تست فاکتور واریانس ثانویه و ارزیابی پایداری ضرایب از طریق تست باقیمانده‌های داده‌های برآورده شده با روش شبیه‌سازی اعمال خطای عمدی به ضرایب، قابل انجام است

جدول ۵: خطا و محدوده خطای مدل پیش‌بینی بزرگی پس‌لرزه اصلی برای الگوهای مختلف طبقه‌بندی پس‌لرزه‌ها

متوسط فاصله زمانی پس‌لرزه اصلی (ساعت)	متوسط بزرگی پس‌لرزه اصلی (Mn)	حداکثر خطا	حداقل خطا	ریشه MSE	dt_2 (روز)	dt_1 (ساعت)
		برای بزرگی در مقیاس ناتلی (Mn)				
12.2	4.7	0.428	-0.632	0.208	2	1
14.0	4.6	0.933	-0.669	0.336	2	2
15.2	4.6	0.681	-0.633	0.307	2	3
18.1	4.5	0.504	-0.662	0.237	2	6
20.0	4.4	0.781	-0.412	0.244	2	9
24.5	4.3	0.744	-0.605	0.290	2	12
26.7	4.2	0.897	-0.533	0.255	2	15
29.5	4.1	0.628	-0.400	0.223	2	18
33.3	4.0	0.644	-0.661	0.233	2	21
34.9	4.0	0.535	-0.455	0.243	2	24
21.0	4.7	0.517	-0.621	0.238	4	1
22.8	4.7	0.959	-0.674	0.330	4	2
23.9	4.7	0.732	-0.597	0.328	4	3
28.2	4.6	0.842	-0.789	0.333	4	6
30.5	4.5	0.495	-0.590	0.230	4	9
37.2	4.5	0.638	-0.481	0.233	4	12
39.7	4.4	0.662	-0.577	0.265	4	15
45.2	4.3	0.770	-0.507	0.248	4	18
48.2	4.2	0.586	-0.323	0.192	4	21
50.0	4.2	0.377	-0.519	0.213	4	24
30.2	4.8	0.550	-0.791	0.298	8	1
32.0	4.8	0.958	-0.505	0.316	8	2
32.9	4.7	0.681	-0.558	0.294	8	3
43.7	4.6	0.691	-0.611	0.291	8	6
44.6	4.6	0.409	-0.658	0.237	8	9
53.1	4.6	0.649	-0.529	0.236	8	12
55.6	4.5	0.429	-0.793	0.297	8	15
66.6	4.4	0.574	-0.802	0.245	8	18
73.5	4.4	0.525	-0.679	0.257	8	21
79.9	4.4	0.604	-0.537	0.281	8	24
47.4	4.9	0.560	-0.592	0.261	12	1

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سیر)

کاربرد مدل رگرسیون چندجمله‌ای... / ۱۲۱

ادامه جدول ۵: خطا و محدوده خطای مدل پیش‌بینی بزرگی پس‌لرزه اصلی برای الگوهای مختلف طبقه‌بندی پس‌لرزه‌ها

متوسط فاصله زمانی پس‌لرزه اصلی (ساعت)	متوسط بزرگی پس‌لرزه اصلی (Mn)	حداکثر خطا	حداقل خطا	ریشه MSE	dt_2 (روز)	dt_1 (ساعت)
		برای بزرگی در مقیاس ناتلی (Mn)				
63.3	4.8	0.588	-0.537	0.222	12	3
78.2	4.8	0.600	-0.675	0.269	12	6
79.1	4.7	0.553	-0.733	0.261	12	9
87.6	4.7	0.515	-0.560	0.230	12	12
88.2	4.6	0.577	-0.612	0.286	12	15
99.2	4.6	0.608	-0.856	0.268	12	18
106.2	4.5	0.519	-0.851	0.253	12	21
112.5	4.5	0.599	-0.740	0.301	12	24
47.4	4.9	0.560	-0.592	0.261	16	1
62.5	4.8	0.880	-0.560	0.287	16	2
63.3	4.8	0.588	-0.537	0.222	16	3
78.2	4.8	0.600	-0.675	0.269	16	6
88.0	4.7	0.542	-0.735	0.263	16	9
100.8	4.7	0.518	-0.563	0.232	16	12
101.5	4.6	0.605	-0.649	0.296	16	15
112.5	4.6	0.616	-0.861	0.273	16	18
119.4	4.5	0.512	-0.835	0.251	16	21
125.8	4.5	0.592	-0.719	0.297	16	24
47.4	4.9	0.560	-0.592	0.261	20	1
62.5	4.8	0.880	-0.560	0.287	20	2
63.3	4.8	0.588	-0.537	0.222	20	3
78.2	4.8	0.600	-0.675	0.269	20	6
88.0	4.7	0.542	-0.735	0.263	20	9
112.2	4.7	0.514	-0.568	0.235	20	12
112.9	4.7	0.613	-0.631	0.294	20	15
123.9	4.6	0.614	-0.833	0.273	20	18
130.8	4.5	0.516	-0.811	0.251	20	21
137.2	4.5	0.580	-0.708	0.298	20	24

جدول ۶: خطا و محدوده خطای مدل پیش‌بینی فاصله زمانی پس‌لرزه اصلی برای الگوهای طبقه‌بندی پس‌لرزه‌ها

متوسط بزرگی پس‌لرزه اصلی (M_n)	متوسط فاصله زمانی پس‌لرزه اصلی (ساعت)	حداکثر خطا	حداقل خطا	ریشه MSE	dt_2 (روز)	dt_1 (ساعت)
		برای فاصله زمانی بر حسب ساعت				
4.7	12.2	12.229	-11.154	5.282	2	1
4.6	14.0	18.314	-10.206	5.542	2	2
4.6	15.2	15.141	-12.949	6.171	2	3
4.5	18.1	23.533	-16.788	8.882	2	6
4.4	20.0	23.799	-13.161	6.769	2	9
4.3	24.5	15.293	-12.333	7.156	2	12
4.2	26.7	18.339	-16.570	6.607	2	15
4.1	29.5	14.503	-10.019	5.707	2	18
4.0	33.3	8.787	-12.311	3.741	2	21
4.0	34.9	8.218	-10.742	4.028	2	24
4.7	21.0	44.961	-27.401	13.625	4	1
4.7	22.8	30.038	-32.689	11.457	4	2
4.7	23.9	36.187	-18.576	11.033	4	3
4.6	28.2	31.600	-33.341	14.303	4	6
4.5	30.5	38.423	-27.660	13.564	4	9
4.5	37.2	33.156	-28.633	13.114	4	12
4.4	39.7	38.423	-26.912	13.343	4	15
4.3	45.2	27.286	-23.936	10.844	4	18
4.2	48.2	32.740	-29.695	11.560	4	21
4.2	50.0	34.100	-24.965	12.901	4	24
4.8	30.2	38.786	-41.621	16.768	8	1
4.8	32.0	71.506	-55.492	24.422	8	2
4.7	32.9	48.996	-56.980	22.193	8	3
4.6	43.7	50.817	-74.606	24.640	8	6
4.6	44.6	71.214	-52.764	28.089	8	9
4.6	53.1	70.243	-59.741	27.799	8	12
4.5	55.6	65.912	-54.302	26.798	8	15
4.4	66.6	40.557	-41.912	21.417	8	18
4.4	73.5	42.350	-66.792	24.864	8	21
4.4	79.9	54.181	-48.884	23.350	8	24

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)

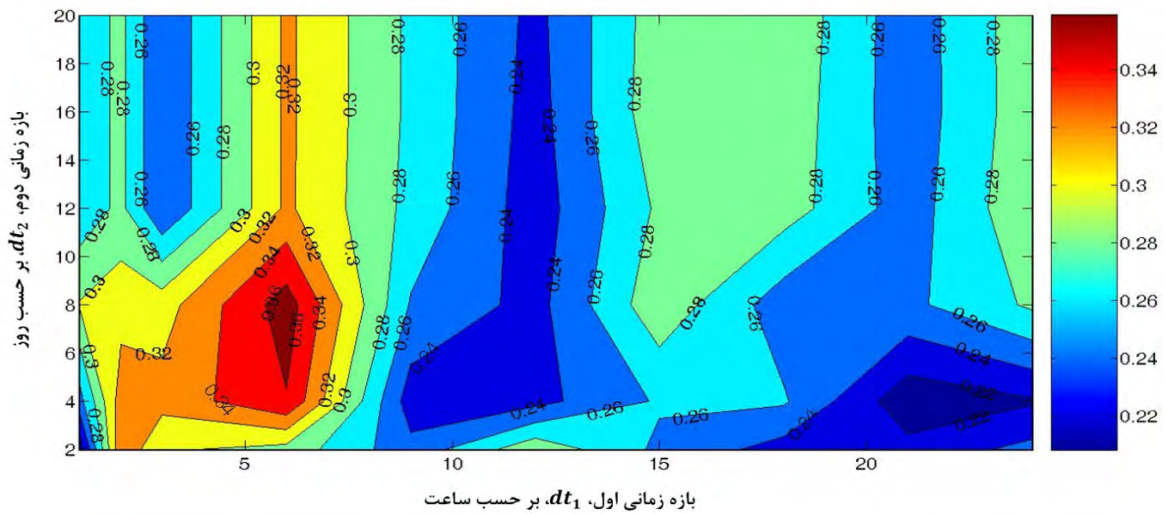
کاربرد مدل رگرسیون چندجمله‌ای... / ۱۲۳

ادامه جدول ۶: خطا و محدوده خطای مدل پیش‌بینی فاصله زمانی پس‌لرزه اصلی برای الگوهای طبقه‌بندی پس‌لرزه‌ها

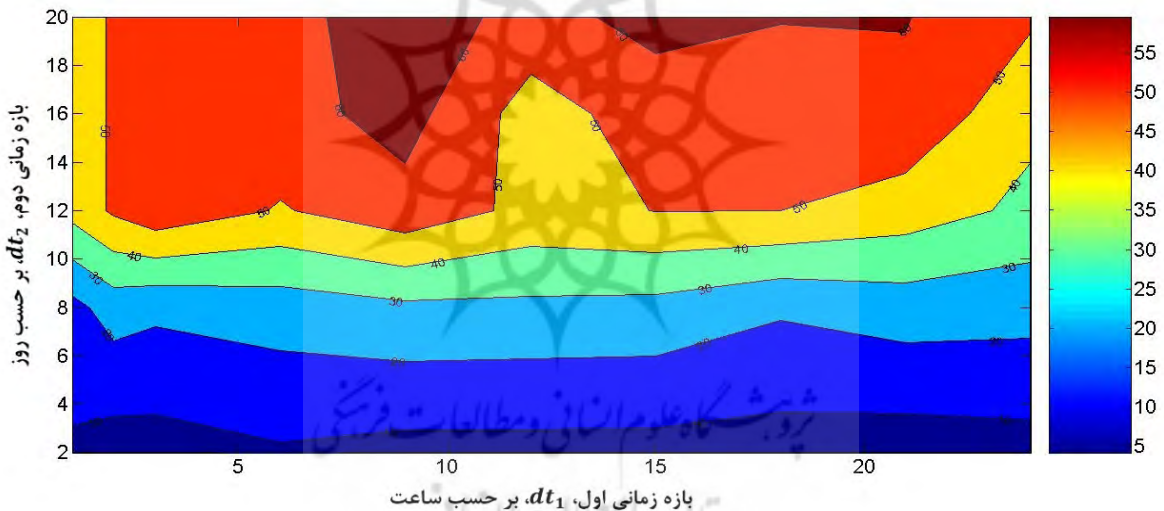
متوسط بزرگی پس‌لرزه اصلی (Mn)	متوسط فاصله زمانی پس‌لرزه اصلی (ساعت)	حداکثر خطا	حداقل خطا	ریشه MSE	dt_2 (روز)	dt_1 (ساعت)
		برای فاصله زمانی بر حسب ساعت				
4.9	47.4	94.806	-89.555	43.450	12	1
4.8	62.5	137.984	-93.821	51.477	12	2
4.8	63.3	121.598	-118.600	57.222	12	3
4.8	78.2	101.706	-111.500	49.167	12	6
4.7	79.1	108.851	-121.013	56.647	12	9
4.7	87.6	118.274	-125.739	47.176	12	12
4.6	88.2	152.537	-141.123	50.144	12	15
4.6	99.2	102.687	-96.604	49.988	12	18
4.5	106.2	100.863	-117.064	44.954	12	21
4.5	112.5	116.008	-76.804	37.754	12	24
4.9	47.4	94.806	-89.555	43.450	16	1
4.8	62.5	137.984	-93.821	51.477	16	2
4.8	63.3	121.598	-118.600	57.222	16	3
4.8	78.2	144.716	-107.411	56.500	16	6
4.7	88.0	122.537	-135.329	63.588	16	9
4.7	100.8	109.439	-147.066	45.735	16	12
4.6	101.5	169.129	-125.358	54.573	16	15
4.6	112.5	133.355	-128.236	55.503	16	18
4.5	119.4	124.962	-141.427	58.044	16	21
4.5	125.8	103.884	-103.979	42.352	16	24
4.9	47.4	94.806	-89.555	43.450	20	1
4.8	62.5	137.984	-93.821	51.477	20	2
4.8	63.3	121.598	-118.600	57.222	20	3
4.8	78.2	144.716	-107.411	56.500	20	6
4.7	88.0	126.900	-139.223	65.975	20	9
4.7	112.2	125.991	-145.600	56.265	20	12
4.7	112.9	193.041	-164.562	63.296	20	15
4.6	123.9	121.950	-122.613	60.387	20	18
4.5	130.8	125.261	-148.399	60.365	20	21
4.5	137.2	119.363	-111.443	51.541	20	24

جدول ۷: ضرایب مدل‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت برای پیش‌بینی بزرگی و زمان وقوع پس‌لرزه اصلی

(مدل بلندمدت) پیش‌بینی ۲۰ روزه برحسب داده‌های ۱ و ۳ ساعت ابتدایی		(مدل میان‌مدت) پیش‌بینی ۸ روزه برحسب داده‌های ۱ و ۹ ساعت ابتدایی		(مدل کوتاه‌مدت) پیش‌بینی ۲ روزه برحسب داده‌های ۱ و ۲۱ ساعت ابتدایی		شماره شهر ز.
مدل فاصله زمانی	مدل بزرگی	مدل فاصله زمانی	مدل بزرگی	مدل فاصله زمانی	مدل بزرگی	
-206.93	-174.87	-694.30	-220.49	142.81	-20.373	1
69.412	104.73	253.24	150.07	-55.038	14.098	2
-1.9887	-16.343	-6.5647	-23.886	1.3802	-1.5247	3
0.1601	0.8484	0.5162	1.2637	-0.1088	0.0568	4
0.4799	0.0012	0.9562	0.0034	0.0056	-0.1597	5
40.606	34.693	136.04	44.053	-28.535	4.8298	6
-0.0663	0.0010	-0.0353	-0.0014	-0.0007	-0.0194	7
-1.5725	-0.1671	-2.2461	0.2964	0.2020	2.5578	8
36.079	34.811	132.94	43.922	-28.608	4.8352	9
0.4376	-0.0069	-0.0059	-0.0003	-0.0008	0.0098	10
-6.4698	0.1862	-17.027	-0.1892	-0.0660	3.9765	11
42.250	34.737	134.84	43.738	-28.773	4.8604	12
2.6443	-0.0129	-0.5130	-0.0133	0.0011	-0.1176	13
52.074	-0.3605	-16.519	-0.4255	-0.0617	-0.1468	14
46.376	35.869	149.58	44.756	-28.194	2.4317	15
-10.186	-0.2933	-19.335	-0.3315	0.0159	4.4356	16
-2.7277	-0.1199	-2.1337	0.1622	-0.0669	0.4939	17
0.2479	0.11573	0.5091	-0.0675	0.0575	-0.3209	18
-41.622	-34.768	-140.90	-43.988	28.588	-3.4164	19
-25.828	-0.0341	-87.049	-0.1659	10.909	-0.1817	20
78.641	-1.74E-5	338.63	0.0045	-35.259	0.0043	21
743.45	-0.2144	711.27	-1.2727	76.928	-0.3534	22
1092.4	-0.1584	1319.9	-0.7913	-26.067	-0.2038	23
0.0089	0.0039	0.0114	0.0231	0.0005	0.0061	24
-2.5280	0.1122	0.0781	-0.1554	-0.0912	-2.4268	25
1.9337	0.1628	16.670	0.2111	-0.0491	-3.1235	26
-71.186	0.2245	13.864	0.3614	0.0557	1.2448	27



نگاره ۳: منحنی‌های همتراز ریشه خطای مربعی متوسط برای مدل پیش‌بینی بزرگی پس‌لرزه اصلی بر حسب مقیاس ناتلی



نگاره ۴: منحنی‌های همتراز ریشه خطای مربعی متوسط برای مدل پیش‌بینی زمان وقوع پس‌لرزه اصلی بر حسب ساعت

هر مدل، به روش اعمال خطای عمودی به هر ضریب و انجام آزمون باقیمانده‌ها بر روی مشاهدات برآورد شده، از طریق شبیه‌سازی خطا انجام شد (K.Garbade 1977, 54-63). نتایج آزمون در جدول ۹ ارائه شده است. این آزمون نشان داد ضرایب هر سه مدل کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت برای برآورد بزرگی و فاصله زمانی پس‌لرزه اصلی در سطح اطمینان ۹۵ و ۹۹ درصد پایدارند. در نهایت متوسط دقت برآورد هر مدل در جدول ۱۰ ارائه شده است.

برای اطمینان از سرشکنی خطا و برآورد صحیح در هر مدل، آزمون فاکتوروارینانس ثانویه انجام شد که نتایج در جدول ۸ نشان داده شده است. با توجه به این‌که محدوده این آزمون خنثی ۲ در سطح اطمینان ۹۵ درصد و درجه آزادی ۵، از حداقل ۰/۱۶۶ تا حداکثر ۲/۵۶۶ است، آزمون همه مدل‌ها پذیرفته شد، به جزء مدل بلندمدت برای برآورد فاصله زمانی پس‌لرزه اصلی که نشان‌دهنده ضعف این مدل برای پیش‌بینی بلندمدت است. بررسی پایداری ضرایب

جدول ۸: مقادیر فاکتور واریانس ثانویه هر مدل برای آزمون بعد از برآورد ضرایب

مدل برآورد فاصله زمانی		مدل برآورد بزرگی		نوع مدل
فاکتور واریانس ثانویه	dt_1 (ساعت)	فاکتور واریانس ثانویه	dt_1 (ساعت)	
۰/۲۱۹	۲۱	۰/۳۰۵	۱	کوتاهمدت (dt_2 برابر با ۲ روز)
۱/۷۸۷	۱	۰/۲۴۳	۹	میانمدت (dt_2 برابر با ۸ روز)
۱۲/۰۰۲	۱	۰/۳۱۳	۳	بلندمدت (dt_2 برابر با ۲۰ روز)

جدول ۹: مقادیر آزمون باقیمانده‌های برآورد شده مطابق خطای عمدی شبیه‌سازی شده در سه سطح برای پایداری ضرایب هر مدل

مدل برآورد فاصله زمانی				مدل برآورد بزرگی				نوع مدل
1s	2s	3s	dt_1 (ساعت)	1s	2s	3s	dt_1 (ساعت)	
۰/۳۵۴	۰/۵۱۵	۲/۵۰۴	۲۱	۰/۳۰۶	۰/۳۰۸	۰/۳۰۸	۱	کوتاهمدت (dt_2 برابر با ۲ روز)
۱/۸۲۵	۲/۰۴۷	۲/۴۸۶	۱	۰/۲۸۰	۰/۸۴۹	۲/۳۰۱	۹	میانمدت (dt_2 برابر با ۸ روز)
۱۲/۰۱۶	۱۲/۰۶۵	۱۲/۱۴۴	۱	۰/۳۵۸	۰/۷۴۹	۰/۸۱۴	۳	بلندمدت (dt_2 برابر با ۲۰ روز)

جدول ۱۰: دقت متوسط برآورد بزرگی و فاصله زمانی بزرگ‌ترین پس‌لرزه بعد از وقوع زلزله اصلی، با مدل‌های کوتاهمدت، میانمدت و بلندمدت

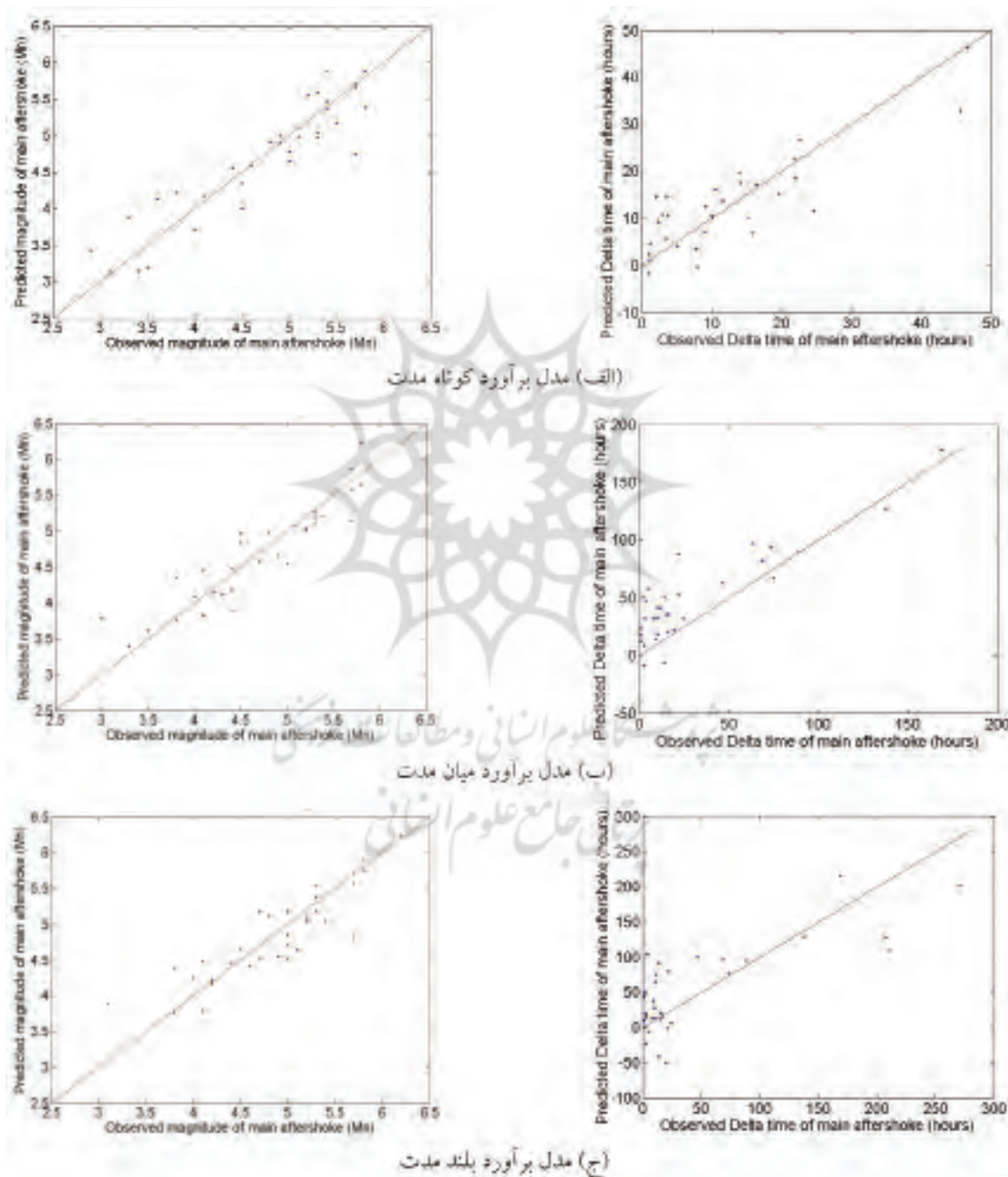
مدل برآورد فاصله زمانی		مدل برآورد بزرگی		نوع مدل
دقت بر حسب ساعت	dt_1 (ساعت)	دقت بر حسب M_n	dt_1 (ساعت)	
$\pm 3/1$	۲۱	$\pm 0/21$	۱	کوتاهمدت (dt_2 برابر با ۲ روز)
$\pm 19/3$	۱	$\pm 0/23$	۹	میانمدت (dt_2 برابر با ۸ روز)
$\pm 38/5$	۱	$\pm 0/22$	۳	بلندمدت (dt_2 برابر با ۲۰ روز)

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (۳۳)

کاربرد مدل رگرسیون چندجمله‌ای... / ۱۲۷

خطای هر مدل به‌طور جداگانه بررسی شده و نمودارهای همبستگی بین داده‌های مدل شده و داده‌های واقعی نیز بدست آمده است. نمودارهای همبستگی برای مدل‌های پیش‌بینی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت، در

نگاره ۵ به‌طور جداگانه نشان داده شده است. هر یک از این نمودارها، نشان‌دهنده همبستگی قابل قبول به ویژه بین بزرگی داده‌های واقعی و داده‌های پیش‌بینی شده برای ۳۲ رویداد مورد استفاده در این مدل‌سازی است.



نگاره ۵: نمودار همبستگی بین داده‌های مدل شده و داده‌های واقعی در برآورد بزرگی و فاصله زمانی وقوع پس‌لرزه اصلی

جدول ۱۱: مشخصات زلزله‌های مورد استفاده برای ارزیابی توانایی مدل‌های پیشنهادی و کمیت‌های طبقه‌بندی پس‌لرزه‌های مدل کوتاه‌مدت

ردیف	سال	ماه	روز	زمان جهانی	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	بزرگی (Mn)	n3	dt3	n4	dt4	n5	dt5	n6	dt6	n1/4	n1/2	n1
1	2019	11	7	22.78	37.7	47.5	5.9	6	0.14	6	0.12	0	0	0	0	4	7	13
2	2019	3	20	6.57	37.4	29.5	5.6	8	0.12	4	0.19	1	0.1	0	0	5	9	14
3	2011	9	22	3.37	39.7	38.7	5.6	12	0.08	1	0.12	0	0	0	0	4	8	14
4	2007	2	21	11.09	38.3	39.3	5.9	11	0.09	1	0.71	0	0	0	0	3	7	13
5	2010	3	8	2.54	38.8	40.0	6.0	15	0.06	1	0.79	0	0	0	0	5	7	17
6	2003	5	1	0.46	39.0	40.5	5.3	7	0.14	4	0.23	0	0	0	0	2	2	12
7	2020	01	02	4.49	34.03	60.30	5.8	7	0.41	3	0.75	0	0	0	0	3	5	11
8	2020	02	23	16.01	38.49	44.56	5.9	12	0.23	13	0.19	0	0	0	0	9	17	26
9	2020	06	09	17.30	27.63	53.43	5.7	0	0	1	0.42	0	0	0	0	2	26	55

مدل کوتاه‌مدت و میان‌مدت خطای کمتری در پیش‌بینی بزرگی پس‌لرزه اصلی دارند.

جدول ۱۲: خطای پیش‌بینی بزرگی و فاصله زمانی پس‌لرزه اصلی با استفاده از مدل کوتاه‌مدت برای زلزله‌های مورد ارزیابی

شماره زلزله	پس‌لرزه اصلی		کوتاه‌مدت (یک ساعته، دو روز)	
	بزرگی (Mn)	فاصله زمانی (روز)	خطا در بزرگی (Mn)	خطا در فاصله زمانی (ساعت)
1	4.8	0.63	0.06	4.7
2	4.2	0.46	0.04	2.2
3	4.2	0.28	-0.15	-0.8
4	3.5	0.25	-0.48	-0.0
5	5.5	0.22	-0.03	-3.5
6	4.5	0.38	-0.13	0.7
7	4.6	0.23	-0.21	2.2
8	4.2	1.93	0.08	3.5
9	4.1	1.39	0.25	9.1
میانگین قدرمطلق	4.4	0.64	0.15	2.96

۵- ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی پس‌لرزه اصلی در اینجا به منظور ارزیابی مدل‌های پیشنهادی پژوهش حاضر، از زلزله‌هایی که در منطقه ایران یا نزدیک به آن رخ داده، استفاده شده است. بدین منظور، از زلزله‌های بزرگ‌تر از ۵/۶ ریشتر که بعد از ساخت مدل در ایران اتفاق افتاده‌اند (زلزله‌های شماره ۱، ۲، ۷، ۸، ۹ در جدول ۱۱) و همچنین چند زلزله مختلف در کشور ترکیه به دلیل نزدیکی به ایران (زلزله‌های ۳ تا ۶ در جدول ۱۱)، استفاده شد. ارزیابی مدل انتخاب شده براساس طبقه‌بندی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت به‌طور جداگانه انجام شده است. به‌عنوان نمونه، پارامترهای مربوط به طبقه‌بندی پس‌لرزه‌های مدل کوتاه‌مدت در جدول ۱۱ نشان داده شده است. نتایج خطا برای هر زلزله و برای هر مدل در جداول ۱۲ تا ۱۴ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، میانگین قدر مطلق خطاها (سطر آخر هر جدول) در پیش‌بینی مقدار بزرگی برای هر یک از سه مدل کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت به ترتیب برابر ۰/۱۵، ۰/۱۸ و ۰/۲۳ و با میانگین ۰/۱۸ در مقیاس ناتلی می‌باشد (خطای نسبی برابر ۳/۱، ۳/۱ و ۴/۳ درصد بزرگی پس‌لرزه اصلی است). به عبارتی، دو

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (۱۳۸۳)

کاربرد مدل رگرسیون چندجمله‌ای... / ۱۲۹

اما در پیش‌بینی فاصله زمانی پس‌لرزه اصلی، خطا برای سه حالت کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت به ترتیب برابر با ۲/۹۶، ۱۵/۲ و ۳۶/۳ ساعت و با میانگین ۱۸/۱ ساعت (خطای نسبی به ترتیب ۱۹/۲، ۱۵/۲ و ۲۶/۳ درصد) است. به این ترتیب مدل بلندمدت منجر به خطای بیشتری در پیش‌بینی فاصله زمانی پس‌لرزه اصلی می‌شود. لذا با توجه به ساختار احتمالی داده‌های زمانی زلزله، به نظر می‌رسد مدل رگرسیون چندجمله‌ای قادر به پیش‌بینی فاصله زمانی پس‌لرزه اصلی برای دوره‌های بلندمدت نیست.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، براساس اطلاعات مربوط به ۳۲ زلزله رخ داده در سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۰، یک مدل رگرسیون چندجمله‌ای برای پیش‌بینی بزرگی و زمان وقوع پس‌لرزه اصلی در یک بازه زمانی مشخص، پیشنهاد شد. پارامترهای این مدل، دربرگیرنده اطلاعات مربوط به زلزله اصلی و اولین پس‌لرزه‌های رویداده پس از زلزله اصلی هستند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد:

- می‌توان بزرگای قوی‌ترین پس‌لرزه در دوره‌های کوتاه‌مدت (پیش‌بینی ۲ روزه)، میان‌مدت (پیش‌بینی ۸ روزه) و بلندمدت (پیش‌بینی ۲۰ روزه) را تنها براساس اطلاعات مربوطه به طبقه‌بندی پس‌لرزه‌ها در ۱، ۹ و ۳ ساعت ابتدایی بعد از وقوع زلزله اصلی پیش‌بینی کرد.
- بین دو مدل برآورد بزرگی و برآورد زمان پس‌لرزه اصلی، می‌توان مدل بزرگی را بهتر از مدل زمان وقوع پس‌لرزه اصلی دانست. لذا بر اساس جداول ۶ و ۱۱، پیش‌بینی زمان وقوع پس‌لرزه اصلی برای سه حالت کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت، با دقت متوسط ۲۰/۳ ساعت و بیشترین خطای ۹۴/۸ ± ساعت، چندان مطلوب نیست. در صورتی که مدل بزرگی با دقت متوسط ۰/۲۲ و بیشترین خطای ۰/۶ ± در مقایسه ناتلی (براساس جداول ۵ و ۱۱)، می‌تواند نتایج خوبی را برای پیش‌بینی به‌دنبال داشته باشد.
- با توجه به موفقیت این مدل‌سازی در برآورد بزرگی

جدول ۱۳: خطای پیش‌بینی بزرگی و فاصله زمانی پس‌لرزه اصلی با استفاده از مدل میان‌مدت برای زلزله‌های مورد ارزیابی

شماره زلزله	پس‌لرزه اصلی		میان‌مدت (۹ ساعته، ۸ روز)	
	بزرگی (Mn)	فاصله زمانی (روز)	خطا در بزرگی (Mn)	فاصله زمانی (ساعت)
1	4.8	0.63	-0.17	-4.5
2	4.3	7.20	0.04	-3.6
3	3.9	4.29	-0.21	-17.5
4	4.9	7.37	0.00	33.9
5	4.7	0.52	0.22	-11.5
6	4.6	7.05	0.07	9.7
7	4.0	3.22	-0.29	9.9
8	4.2	1.93	-0.13	2.4
9	5.2	5.03	0.53	44.1
میانگین قدرمطلق	4.5	4.14	0.18	15.2

جدول ۱۴: خطای پیش‌بینی بزرگی و فاصله زمانی پس‌لرزه اصلی با استفاده از مدل بلندمدت برای زلزله‌های مورد ارزیابی

شماره زلزله	پس‌لرزه اصلی		بلندمدت (۳ ساعته، ۲۰ روز)	
	بزرگی (Mn)	فاصله زمانی (روز)	خطا در بزرگی (Mn)	فاصله زمانی (ساعت)
1	4.8	0.63	0.03	-84.5
2	5.1	11.20	0.07	-11.7
3	4.4	8.04	-0.07	45.6
4	4.9	7.37	-0.34	28.4
5	5.5	0.22	0.42	10.6
6	4.6	7.05	0.03	22.2
7	4.6	0.23	-0.45	-1.85
8	4.4	11.93	-0.32	89.1
9	5.2	5.03	0.36	33.2
میانگین قدرمطلق	4.8	5.74	0.23	36.3

پس‌لرزه‌های ایران. مقاله ارائه شده در دهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس.

۴- ریاضی‌راد، قیطانچی؛ زهره‌السادات، محمدرضا. (۱۳۸۴). بررسی آهنگ کاهش پس‌لرزه. مقاله ارائه شده

در دوازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک، سازمان زمین‌شناسی، تهران، ایران.

۵- کامران‌زاد، موسوی، مجرب، معماریان؛ فرناز، لاله‌سادات، مسعود، حسین (۱۳۹۴). بررسی رفتار کاهندگی

پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه‌های متوسط تا بزرگ در فلات ایران.

فصلنامه علمی پژوهشی علوم زمین، بهار ۹۴، سال ۲۴، شماره ۹۵، ص ۱۴۳ تا ۱۵۴.

۶- مرکز لرزه‌نگاری ایران، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران، (www.irsc.ut.ac.ir).

7- Asencio-Cortés, G., Morales-Esteban, A., Shang, X., & Martínez-Álvarez, F. (2018). Earthquake prediction in California using regression algorithms and cloud-based big data infrastructure. *Computers & Geosciences*, 115, 198-210.

8- Bulletin of International Seismological Center, (www.isc.ac.uk).

9- Castellaro, S., Mulargia, F., & Kagan, Y. Y. (2006). Regression problems for magnitudes. *Geophysical Journal International*, 165(3), 913-930.

10- Christophersen, A., & Smith, E. G. (2000). A global model for aftershock behaviour. Paper presented at the Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.

11- Enescu, B., Mori, J., & Miyazawa, M. (2007). Quantifying early aftershock activity of the 2004 mid-Niigata Prefecture earthquake (Mw6. 6). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B4).

12- Garbade, K (1977). Two methods for examining the stability of regression coefficients. *Journal of the American Statistical Association*. Vol 72, No 537, pp 54-63.

13- Gardner, J., & Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bulletin of the Seismological*

پس‌لرزه اصلی، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی از این نوع مدل‌ها برای بررسی وقوع پس‌لرزه اصلی زلزله‌های دیگر مناطق جهان که دارای رفتار منابع لرزه‌زای مشابه هستند، استفاده شود.

● برای هر سه مدل پیش‌بینی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت بزرگی زلزله اصلی، برداشت اطلاعات مربوط به پس‌لرزه‌ها در حداقل ۱ و حداکثر ۹ ساعت ابتدایی پس از وقوع زمین‌لرزه اصلی، برای طبقه‌بندی پس‌لرزه‌ها و ورود کمیت‌ها به مدل، کفایت می‌کند.

● مدل‌های چندجمله‌ای که ضرایب آن‌ها از زلزله‌های یک منطقه به دست آمده‌اند، می‌توانند با دقت مناسبی برای پیش‌بینی بزرگی پس‌لرزه‌ها در آن منطقه استفاده شوند.

● از مدل‌های پیشنهادی در این پژوهش نمی‌توان برای برآورد مشخصات پس‌لرزه‌ها در مناطقی نظیر جنوب شرق ایران که زلزله‌های آن دارای پس‌لرزه‌های قابل توجهی نیستند، استفاده کرد.

۷- قدردانی

نگارندگان از مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IRSC)

و مرکز بین‌المللی زلزله (ISC) به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های لرزه‌نگاری مورد استفاده در این مقاله، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۸- منابع و مآخذ

۱- داودی، توکلی، جلیلیان، زارع؛ ...، عبدالله، مهدی. (۱۳۹۷). خوشه‌بندی کاتالوگ لرزه‌ی و مدل‌سازی پس‌لرزه‌ها با استفاده از مدل ETAS. *مجله علمی پژوهشی مهندسی عمران شریف*، ۲(۴)، ۳۵-۴۲.

۲- رستمی، یحیی‌آبادی؛ سید قاسم، علی‌اکبر (۱۳۹۸). مدل‌سازی فرکانسی وقوع زلزله‌ها با استفاده از تابع تبدیل فوریه. *فصلنامه علمی پژوهشی مدل‌سازی در مهندسی*، ۱۷۳۰، ۱۷۹۵۴، ۲۰۱۹، [doi:10.22075/jme](https://doi.org/10.22075/jme).

۳- ریاضی‌راد، زهره‌السادات (۱۳۸۵). مدل‌سازی

Society of America, 64(5), 1363-1367.

14- Hamdache, M., Peláez, J., & Talbi, A. (2013). Analysis of aftershock sequences in South and Southeastern Spain. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 63, 55-76.

15- Harte D.S (2018). Effect of size parameter estimates and earthquake forecasts. *Geophysical Journal International*, V. 214 Aug 2018, 759-772.

16- Ikram A and U. Qamar (2016). Seismic data analysis for earthquake prediction: A machine learning aproch. Computer engineering department, National University of Sciences and Technology (NUST).

17 -Karimzadeh, S., Matsuoka, M., Kuang, J., & Ge, L. (2019). Spatial Prediction of Aftershocks Triggered by a Major Earthquake: A Binary Machine Learning Perspective. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(10), 462.

18- Marcellini, A. (1997). Physical model of aftershock temporal behaviour. *Tectonophysics*, 277(1-3), 137-146.

19- Ogata, Y., & Shimazaki, K. (1984). Transition from aftershock to normal activity: the 1965 Rat Islands earthquake aftershock sequence. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74(5), 1757-1765.

20- Omori, F. (1894). On the after-shocks of earthquakes (Vol. 7): Imperial University, Japan.

21- Öztürk, S., & Şahin, Ş. (2019). A statistical space-time-magnitude analysis on the aftershocks occurrence of the July 21th, 2017 MW= 6.5 Bodrum-Kos, Turkey, earthquake. *Journal of Asian Earth Sciences*, 172, 443-457.

22- Reasenber, P. A., & Jones, L. M. (1989). Earthquake hazard after a mainshock in California. *Science*, 243(4895), 1173-1176.

23- Thapa, D. R., Tao, X., Fan, F., & Tao, Z. (2018). Aftershock analysis of the 2015 Gorkha-Dolakha (Central Nepal) earthquake doublet. *Heliyon*, 4(7), e00678.

24- Utsu, T. (1970). Aftershocks and earthquake statistics (1): Some parameters which characterize an aftershock sequence and their interrelations. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Series 7, Geophysics*, 3(3), 129-195.



پروہشگاہ علوم انسانی و مطالعات فرہنگی
پرتال جامع علوم انسانی