

تخمین سریع بزرگی و فاصله رومرکزی زلزله به روش تک ایستگاه (B-Δ) برای شرق استان کرمان

شیلا رستمی^۱، محمدرضا سپهوند^{۲*}، مجید معهود^۳ و افسانه نصرآبادی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشکده علوم و فناوری های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

۲- استادیار؛ دانشکده علوم و فناوری های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

۳- استادیار؛ پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۰۶؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۸

* نویسنده مسئول مکاتبات: mrsepahvand@yahoo.com

چکیده

با توجه به خسارات جانی و مالی زلزله های بزرگ، طراحی و ایجاد سامانه های هشدار به هنگام در مناطق لرزه خیز ضروری است. هدف از طراحی سامانه های هشدار سریع، تخمین بزرگی زلزله و فاصله رومرکزی در یک زمان بسیار کوتاه و اعلام هشدار می باشد. روش جدیدی که در این سیستم ها بکار برده می شود، B-Δ است؛ که فاصله رومرکزی و بزرگی زلزله را بر اساس ثانیه های ابتدایی رسید موج P (معمولاً ۳ ثانیه)، با توجه به اطلاعات یک ایستگاه به صورت تقریبی برآورد می کند. در روش B-Δ با برازش تابعی ساده به بخش ابتدایی پوش نگاشت لرزه ای، ضرایب A (تغییرات دامنه با زمان) و B شیب برازش تابع به بخش ابتدایی موج P از روش کمترین مربعات محاسبه می شوند؛ که با استفاده از آنها می توان فاصله رومرکزی را تخمین زد. بر اساس نمودار بدست آمده از این برازش می توان رابطه خطی و معکوس $\log B$ و $\log \Delta$ را مشاهده نمود؛ که در آن Δ بیانگر فاصله رومرکزی است. این روش برای به دست آوردن بزرگی از حداکثر دامنه مشاهده شده در مدت زمان کوتاهی پس از دریافت موج P، استفاده می نماید. در این مطالعه با توجه به لرزه خیزی بالای استان کرمان و تجربه زمین لرزه های مخرب بسیار در سالهای اخیر سعی شده است تا نگاشتهای لرزه ای مورد بررسی قرار گیرد. لذا تعداد ۱۷۵ نگاشت مولفه قائم شتاب نگاشت های زلزله های نیمه شرقی استان کرمان از شبکه شتاب نگاری مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی دریافت شد. سپس بر روی ۹۲ نگاشت با کیفیت که دارای بازه بزرگی $M_w = 4-6/5$ و در فاصله کمتر از ۱۴۵ کیلومتر ثبت شده بودند، پردازش صورت گرفت و روابط فاصله رومرکزی $\log(\Delta) = -0.437 \log(B) + 1.889 \pm 0.57$ و بزرگی $M_{est} = 0.293 \log(P_{max}) - 0.692 \log(B) + 6.03$ برای مناطق مورد مطالعه محاسبه شد.

واژگان کلیدی

سامانه های هشدار سریع زلزله
فاصله رومرکزی
بزرگی زلزله
روش تک ایستگاه
روش B-Δ

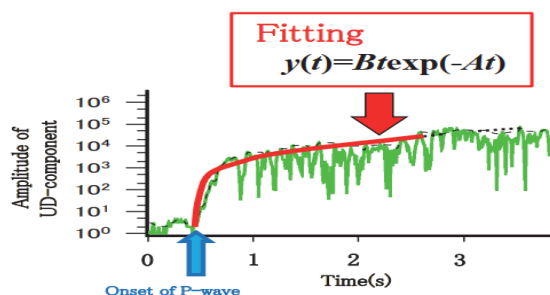
در این مطالعه به تخمین رابطه‌ای برای فاصله رومرکزی و رابطه‌ای برای بزرگی زلزله‌های شرق استان کرمان با استفاده از روش تک ایستگاه B-Δ پرداخته شد.

۲- داده‌ها

در این مطالعه ۱۷۵ داده شتاب‌نگاشت از ۲۱ زمین‌لرزه با بزرگای بین $4 < M < 7$ (رخ داده در شرق کرمان در طی سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۸) بررسی شد که از بین آنها ۹۲ داده از ۱۷ زلزله قابل پردازش بود و مورد بررسی قرار گرفت. این داده‌ها از شبکه شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی ایران دریافت و مورد استفاده قرار گرفتند. داده‌های شتاب‌نگاری این مرکز با شتاب‌سنج‌های سه مؤلفه‌ای از نوع دیجیتالی (SSA-2) با نرخ نمونه‌گیری ۲۰۰ نمونه در ثانیه ثبت و ضبط می‌شوند. در دستگاه‌های SSA-2 معمولاً شتاب‌های بالای (GAL) ۱۰ ثبت می‌شود.

۳- روش B-Δ

هر موج لرزه‌ای شکل پوش نگاشت ویژه متفاوتی را به خود اختصاص داده است، که به منبع و شرایط مشخص شده توسط بزرگی، عمق کانونی و فاصله رومرکزی مربوط است. با نمایش جنبش زمین در مقیاس لگاریتمی، این تفاوت‌ها را بهتر می‌توان دید (Odaka et al., 2003). این روش با مدل کردن رفتار افزایش دامنه چندثانیه ابتدایی موج P، برای فاصله رومرکزی و بزرگی زمین لرزه می‌تواند برآورد مناسبی فراهم آورد. این روش شبیه به سایر روش‌ها برای تخمین بزرگی و فاصله رومرکزی است و فرض می‌کند که دامنه امواج اولیه موج P نسبت به فازهای بعدی امواج S و امواج سطحی بسیار کم است و حاوی اطلاعات بسیار مهمی در مورد امواج قوی پیشرو می‌باشد (Wu and Kanamori, 2005a,b; Heidari, 2016).



شکل ۱: تخمین فاصله رومرکزی زلزله به روش B-Δ (Noda et al., 2012)

این روش برای تخمین فاصله رومرکزی زلزله از پوش مؤلفه قائم شتاب‌نگاشت استفاده می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، با برازش تابعی ساده مطابق رابطه (۱) به قسمت ابتدایی پوش نگاشت لرزه‌ای، ضرایب A و B از طریق روش کمترین مربعات و با همپوشانی این

کاهش اثرات مخرب از جمله تخریب زیرساخت‌ها، تلفات انسانی و صدمات از پتانسیل‌های سامانه‌های هشدار سریع می‌باشد. زیرا شناسایی علائم اولیه زمین لرزه‌های ویرانگر و صدور هشدار از حرکات شدید در حال وقوع زمین، توسط این سیستم‌ها^۱، امکان پذیر است. یک سامانه هشدار سریع زمین‌لرزه باید بتواند در چند ثانیه ابتدایی دریافت موج P بزرگی، فاصله رومرکزی و محل کانون زمین لرزه را تخمین بزند و برپایه این اطلاعات برای مناطق در معرض خطر امواج زیان بار زمین‌لرزه، هشدار صادر نماید (Heidari, 2016).

دو پارامتر موقعیت و بزرگی زلزله بیانگر خصوصیات زلزله‌های احتمالی در آینده می‌باشند، زیرا با ارزیابی این دو پارامتر می‌توان به ارزیابی مقدار خطر پرداخت. بزرگی زلزله متناسب با میزان انرژی آزاد شده در این رویداد تکنیکی است و به میزان لغزش گسل و مساحت گسیختگی بستگی دارد (معهود، ۱۳۹۵).

Nakamura (1988) سیستم هشدار و تشخیص فوری زمین‌لرزه^۲ را به منظور توقف ایمن سیستم ریلی شینکانسن در طی زلزله، که حدوداً ۲۰ سال پیش مورد استفاده عملی قرار گرفت، توسعه داد (Noda et al., 2012).

Odaka et al., (2003) روش جدید B-Δ را برای تخمین سریع فاصله رومرکزی و بزرگی زلزله با استفاده از اطلاعات تک ایستگاه و مدت زمان کوتاهی پس از ثبت امواج P معرفی نمودند. در سامانه هشدار سریع زلزله شینکانسن ژاپن از این روش برای برآورد بزرگی و فاصله رومرکزی زلزله استفاده می‌شود (Odaka et al., 2003).

موسسه تحقیقات فنی راه‌آهن (RTRI)^۳ یک سیستم هشدار سریع جدید برای شینکانسن ایجاد کرد و UrEDAS را در سال ۲۰۰۴-۲۰۰۵ با سیستم جدید جایگزین کرد (Noda et al., 2012).

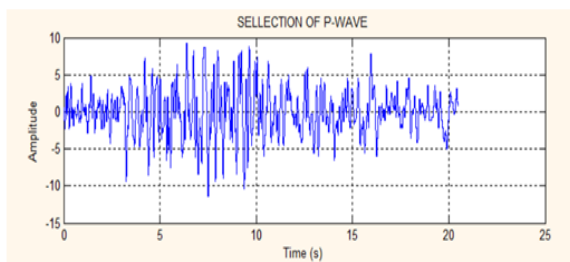
در سال‌های اخیر، تلاش‌های بسیاری توسط سازمان کاهش و مدیریت بلایای تهران TDMMO^۴ با همکاری آژانس همکاری بین المللی ژاپن JICA^۵ برای بهره برداری EEWs^۶ مشابه سایر کشورها، از جمله مکزیک، ژاپن، ایالات متحده، تایوان، ترکیه انجام شده و در حال حاضر سیستم هشدار سریع زلزله تهران که در مراحل نهایی آزمایشات خود به سر می‌برد نیز بر اساس روش B-Δ در دست طراحی است (حیدری و همکاران، ۱۳۹۵).

همچنین روابط بزرگی و فاصله رومرکزی بر اساس روش تخمین سریع تک ایستگاه، برای منطقه اهر-ورزقان در شمال غرب ایران نیز بدست آمده

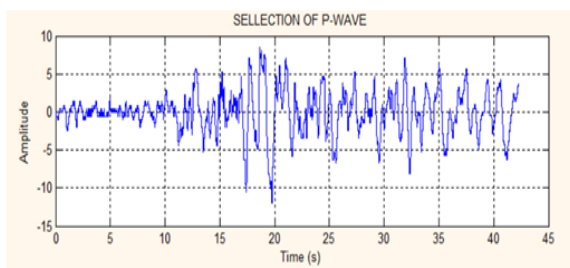
- 1 Earthquake Early Warning System (EEWS)
- 2 Urgent Earthquake Detection and Alarm System (UrEDAS)
- 3 Railway Technical Research Institute
- 4 Tehran Disaster Mitigation and Management Organization
- 5 Japan International Cooperation Agency
- 6 Early warning system

در بین شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده برای شرق استان کرمان، تعدادی نیز دارای نوفه و غیرقابل استفاده بودند؛ که در بررسی اولیه از دایره پردازش حذف شدند. وجود نوفه‌ها مانع از تعیین دقیق شروع موج P می‌شد. به طور کلی خطا در تعیین موج P به نوبه خود خطاهای دیگری را در پی خواهد داشت. در شکل ۳ دو نمونه از مؤلفه قائم شتاب‌نگاشت دارای نوفه به تصویر کشیده شده است.

الف



ب



شکل ۳: شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده دارای نوفه. الف) مؤلفه قائم شتاب‌نگاشت زلزله گلباف ۱۳۷۶ با بزرگی ۶/۲، ثبت شده در ایستگاه محمدآباد مسکون با فاصله رومرکزی ۱۴۲ کیلومتر. ب) مؤلفه قائم شتاب‌نگاشت زلزله بم ۱۳۸۲ با بزرگی ۶/۵، ثبت شده در ایستگاه زرنده با فاصله رومرکزی ۲۵۹ کیلومتر.

محاسبه پارامتر B

برای بدست آوردن دو پارامتر A و B از شکل موج‌های زمین‌لرزه، بر طبق روشی که Odaka et al., (2003) ارائه شده است، ابتدا باید برای بهبود نسبت سیگنال به نوفه، شکل موج‌های مربوطه ردیابی و فیلتر شوند تا بتوان زمان ورود موج P را به طور دقیق تعیین نمود.

همان طور که در تابع $y = Bt \cdot \exp(-At)$ نمایان است، تعیین زمان رسید موج P بسیار حساس می‌باشد و خطاهای کوچک در تعیین زمان رسید موج P ممکن است در تخمین پارامترهای کلیدی A و B خطاهای قابل توجهی را ایجاد نماید.

تابع بر روی پوش لگاریتمی مؤلفه قائم شتاب در ۳ ثانیه ابتدایی دریافت موج P بدست می‌آیند.

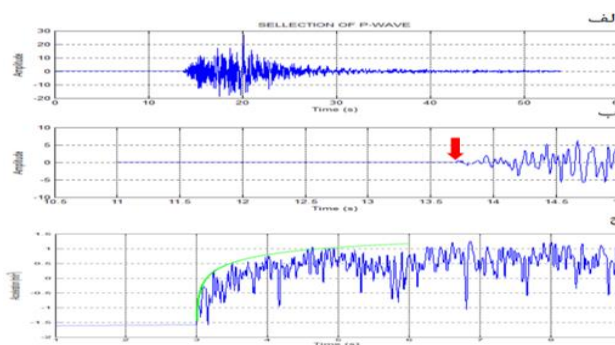
$$y(t) = Bt \cdot e^{-At} \quad (1)$$

سپس با استفاده از این ضرایب می‌توان فاصله رومرکزی زلزله را تخمین زد (هادی و همکاران، ۱۳۹۷).

در این رابطه ضریب A بیانگر تغییرات دامنه در طول زمان، ضریب B شیب برازش تابع به بخش ابتدایی موج P و همچنین $y(t)$ پوش نگاشت مشاهده شده و t از زمان رسیدن موج P در نظر گرفته می‌شود. برازش این تابع مانند یک فیلتر پائین‌گذر هموارسازی می‌کند و باعث می‌شود نوفه‌های فرکانس بالا تأثیری در نتایج حاصل شده، نداشته باشند (Odaka et al., 2003; Noda et al., 2012; Mahood, 2016).

بزرگی را با استفاده از حداکثر دامنه در ۳ ثانیه ابتدایی موج P می‌توان تخمین زد. بر اساس مطالعات انجام شده به دلیل این که مدت زمان گسیختگی و شکست برای زلزله‌های بزرگ (به عنوان مثال زلزله‌های با بزرگی ۸) بیشتر بوده و پنجره زمانی بیش از ۲ یا ۳ ثانیه مورد نیاز است، برآورد تقریبی بزرگی زلزله‌های بزرگ در بازه زمانی کوتاهی بعد از دریافت امواج P بسیار مشکل است. برای غلبه بر این مشکل نباید به یک پنجره زمانی ثابت اکتفا شود و می‌توان با تکرار پنجره‌های زمانی ۲ و ۳ و ... بزرگی را تخمین زد؛ همان‌گونه که (Noda et al., 2012) برای بهتر شدن نتایج در ژاپن از پنجره‌های متغیر زمانی به جای پنجره‌های ثابت زمانی در این روش استفاده کردند (معهود، ۱۳۹۵).

در شکل ۲ الف، مؤلفه عمودی یکی از شتاب‌نگاشت‌های زلزله حرجند به بزرگی ۵/۱ و فاصله ۲۰ کیلومتر که در مرداد ۱۳۹۷ رخ داده است، نمایش داده شده. در شکل ۲ ب شروع موج P را می‌توان مشاهده نمود. در شکل ۲ ج لگاریتم قدرمطلق دامنه پنجره زمانی ۳ ثانیه انتخاب شده به همراه منحنی برازش شده با رابطه تابع $Bt \cdot \exp(-At)$ به نمایش درآمده است.



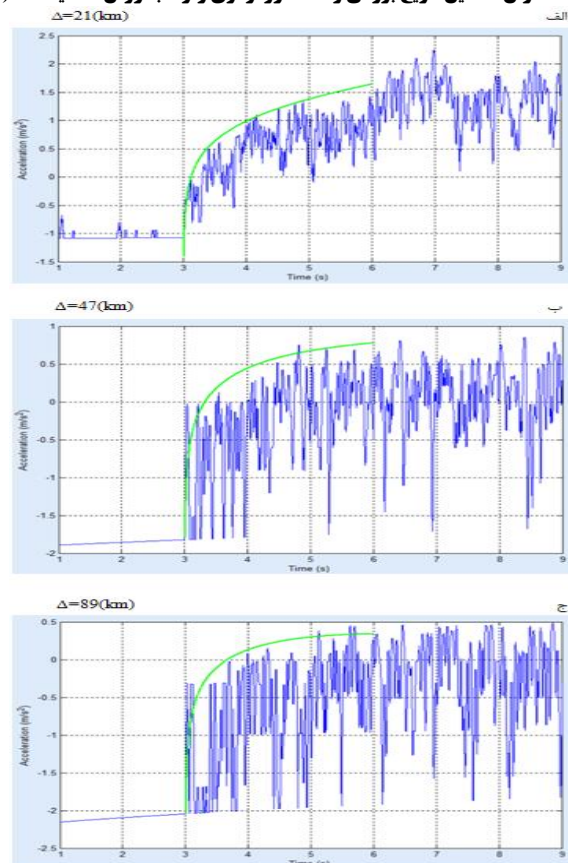
شکل ۲: الف) مؤلفه عمودی شتاب‌نگاشت ثبت شده در ایستگاه هینمان از زلزله حرجند با بزرگای ۵/۱ و فاصله رومرکزی ۲۰ کیلومتر. ب) نمایش شروع موج P. ج) نمایش لگاریتم قدر مطلق دامنه پنجره زمانی ۳ ثانیه انتخاب شده به همراه منحنی برازش شده با رابطه مذکور.

دامنه‌های کوچکتر اضافه می‌شوند. سپس پنجره زمانی ۳ ثانیه از بخش ابتدایی موج P انتخاب شده و تابع $y = Bt * \exp(-At)$ به آن برازش داده می‌شود (Heidari, 2016). به همین جهت از لگاریتم این تابع به عنوان $\ln(y) = \ln(Bt) - At$ استفاده می‌شود. بدین صورت پارامترهای A و B با استفاده از روش حداقل مربعات به سادگی محاسبه می‌شوند (حیدری، ۱۳۹۵).

با توجه به عمق کانونی زلزله، بزرگی آن و فاصله رومرکزی، شکل پوش نگاشت‌های لرزه‌ای با یکدیگر تفاوت دارند. بخش ابتدایی کم دامنه هر لرزه‌نگار نمایانگر نوفه است و شیب که به شدت یا به تدریج از سطح نوفه افزایش می‌یابد، نشانگر ورود موج P است. چند نمونه از شکل موج با فاصله رومرکزی متفاوت در شکل ۴ نشان داده شده است. سه نمودار نمایش داده شده لگاریتم مؤلفه‌های عمودی شتاب‌نگاشت‌های سه ایستگاه سرزه با فاصله رومرکزی ۲۱ کیلومتر، چاه ملک با فاصله رومرکزی ۴۷ کیلومتر و فهرج با فاصله رومرکزی ۸۹ کیلومتر از زمین لرزه محمدآباد ریگان با بزرگی $M_w=6.1$ می‌باشند؛ که در سال ۱۳۸۹ به وقوع پیوسته است. همان طور که در شکل مشخص است، شیب در حال افزایش B، با افزایش فاصله رومرکزی ملایم می‌شود. از این رو می‌توان گفت شیب نمودار و فاصله رومرکزی با یکدیگر رابطه عکس دارند. مطابق مطالعات Anderson and Chen, (1995) واقعیت دیگری که نیز مورد توجه است بیان می‌کند دامنه زلزله‌های بزرگ به تدریج با گذشت زمان افزایش می‌یابد در صورتیکه در زلزله‌های کوچک می‌توان شاهد کاهش سریع دامنه پس از ورود موج P بود. این دو ویژگی برای زمین‌لرزه‌های دیگر نیز رایج می‌باشد (Odaka et al., 2003; Anderson and Chen 1995). همان طور که قبلاً ذکر شد، پارامتر B شیب بخش اولیه موج P را تعریف می‌کند و پارامتر A بیانگر شدت افت دامنه بعد از افزایش اولیه با زمان است. هنگامی که A مثبت باشد، $B/(Ae)$ حداکثر دامنه را می‌دهد که این در زمین‌لرزه‌های کوچک مشاهده می‌شود. در زمین‌لرزه‌های کوچک دامنه به سرعت افزایش می‌یابد و بلافاصله پس از رسیدن موج P کاهش می‌یابد. اگر A منفی باشد دامنه به صورت نمایی با زمان افزایش می‌یابد؛ که این در زمین‌لرزه‌های بزرگ مشاهده می‌شود. در اینجا e به معنی پایه لگاریتم طبیعی است. هر چند به نظر می‌رسد که این تابع نسبتاً ساده است؛ اما پارامترهای A و B که از آن استخراج می‌شوند، از اهمیت بالایی برخوردارند و اطلاعات حیاتی در مورد منابع زلزله را نشان می‌دهند (Odaka et al., 2003).

کانون زلزله و بزرگی‌های در نظر گرفته شده، برای فاصله رومرکزی قسمت شرقی استان کرمان برآورد شده. رابطه (۲) برای ایستگاه‌های تا فاصله ۱۴۵ کیلومتری و بزرگی‌های $M_w=4$ به بالا و رابطه (۳) برای همین فاصله و بزرگی‌های $M_w=5$ به بالا بدست آمده که در هر کدام بیشترین اختلاف فاصله رومرکزی مشاهده شده $|\Delta_{obs} - \Delta_{est}|$ با فاصله رومرکزی تخمینی، به ترتیب برابر ۸۱/۵ و ۷۹/۲ کیلومتر می‌باشد.

$$\log(\Delta) = -0.521 \log(B) + 1.941 \pm 0.54 \quad (2)$$



شکل ۴: سه نمودار مربوط به زلزله‌ای در محمدآباد ریگان با بزرگی $M_w=6.1$ نشان داده شده. Δ بیانگر فاصله رومرکزی می‌باشد. محور افقی زمان را در واحدهای ۰/۱ ثانیه نشان می‌دهد و مربوط به فاصله نمونه‌گیری داده‌هاست. مقادیر مطلق مؤلفه عمودی شتاب‌نگاشت‌ها در مقیاس لگاریتمی ترسیم شده است. منحنی‌های سبز رنگ برازش تابع $Bt * \exp(-At)$ به ابتدای هر شتاب‌نگاشت می‌باشند؛ در حالی که A و B با استفاده از روش حداقل مربعات برای ۳ ثانیه اول پس از ورود فاز P پوش شکل موج مربوطه تعیین می‌شوند.

به دلیل این که در بیشتر مناطق ایران الگوی سرعت مناسبی وجود ندارد، زمان رسیدن موج P به صورت دستی مشخص می‌شود. پس از تعیین ابتدای موج P، زمان اندازه‌گیری لگاریتم مقادیر مطلق شکل موج فرا می‌رسد.

هنگام محاسبه لگاریتم برای جلوگیری از دامنه صفر، نوفه‌های کوچکی به

تخمین فاصله رومرکزی

تخمین فاصله رومرکزی زمین لرزه با استفاده از یک رابطه خطی و معکوس ایجاد شده بین $\log \Delta$ و $\log B$ بلافاصله پس از ورود موج P (پس از ۳ ثانیه)، صورت می‌پذیرد (Odaka et al., 2003). پس از محاسبه پارامترهای A و B، با استفاده از مقادیر لگاریتم فاصله رومرکزی و لگاریتم B در پنجره زمانی ۳ ثانیه چند رابطه بسته به فاصله ایستگاه‌ها تا

$|\Delta_{\text{obs}} - \Delta_{\text{est}}|$ همچنین در رابطه (۶) و (۷) ایستگاه‌هایی که در فاصله ۹۰ کیلومتری کانون زمین‌لرزه قرار دارند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ که به ترتیب برای زلزله‌های با بزرگی $M_w=4$ به بالا و $M_w=5$ به بالا می‌باشند. بیشترین مقدار اختلاف فاصله رومرکزی مشاهده شده با فاصله رومرکزی تخمینی، در هر کدام به ترتیب برابر ۳۶/۱ و ۳۳/۶ کیلومتر می‌باشد.

$$\log(\Delta) = -0.475 \log(B) + 1.884 \pm 0.58 \quad (۶)$$

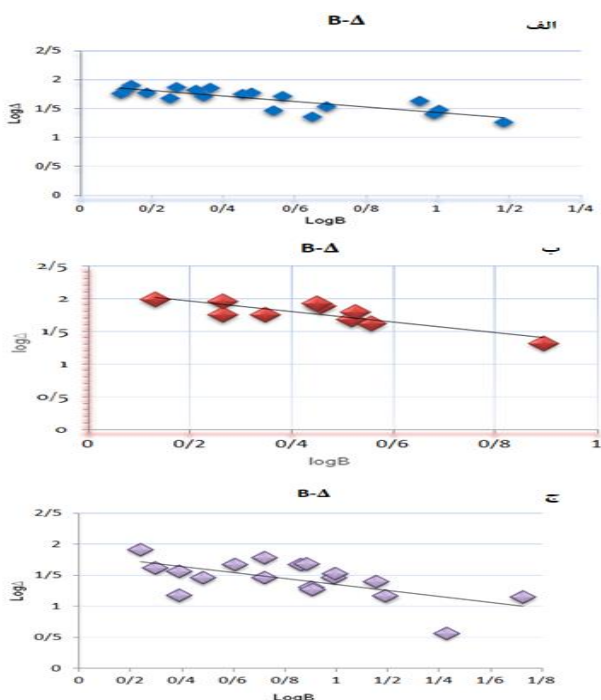
$$\log(\Delta) = -0.437 \log(B) + 1.889 \pm 0.57 \quad (۷)$$

با مشاهده شکل ۵ می‌توان به رابطه خطی و معکوس $\log \Delta$ و $\log B$ پی برد و نتیجه گرفت که با افزایش فاصله رومرکزی، شیب نمودار کاهش می‌یابد.

$$\log(\Delta) = -0.48 \log(B) + 1.83 \pm 0.38 \quad (۸)$$

$$\log(\Delta) = -0.8 \log(B) + 2.11 \pm 0.72 \quad (۹)$$

$$\log(\Delta) = -0.48 \log(B) + 1.9 \pm 0.68 \quad (۱۰)$$



شکل ۶: رابطه خطی بین ضریب B (شیب بخش ابتدایی پوش امواج P) و فاصله رومرکزی (A). الف) هجدک، ب) محمدآباد ریگان، ج) سیرچ (رستمی و همکاران الف، ب، پ، ۱۳۹۸).

رابطه پارامتر B و P_{max}

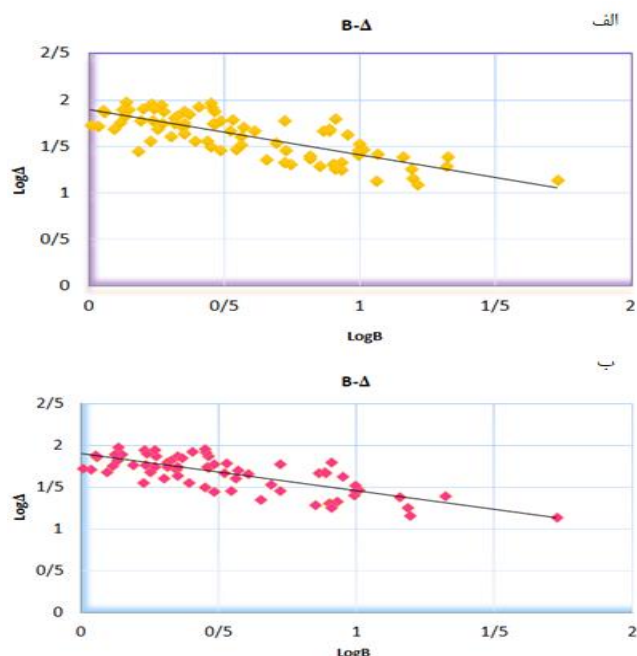
همان طور که ذکر شد، B بیانگر شیب ابتدای پوش منحنی موج لرزه‌ای می‌باشد و P_{max} مقدار حداکثر دامنه ۳ ثانیه ابتدایی موج P است. مطابق شکل ۷ حداکثر دامنه تقریباً به صورت خطی، با کاهش در پارامتر B برای زمین‌لرزه‌های مربوطه، کاهش می‌یابد. طبق رابطه معکوس $\log B$

$$\log(\Delta) = -0.481 \log(B) + 1.946 \pm 0.51 \quad (۳)$$

$|\Delta_{\text{obs}} - \Delta_{\text{est}}|$ این مقدار اختلاف در سامانه‌های هشدار سریع کارآمد نمی‌باشد. به همین دلیل روابطی برای فاصله رومرکزی شرق استان کرمان با در نظر گرفتن ایستگاه‌های در فاصله ۹۰ و ۱۰۰ کیلومتری کانون زمین‌لرزه بدست آمد. در رابطه (۴) و (۵) ایستگاه‌هایی که در فاصله ۱۰۰ کیلومتری کانون زمین‌لرزه قرار دارند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ که به ترتیب برای زلزله‌های با بزرگی $M_w=4$ به بالا و $M_w=5$ به بالا می‌باشند. بیشترین اختلاف فاصله رومرکزی مشاهده شده با فاصله رومرکزی تخمینی در هر کدام به ترتیب برابر ۴۵/۵ و ۴۳/۱ کیلومتر می‌باشد.

$$\log(\Delta) = -0.485 \log(B) + 1.895 \pm 0.58 \quad (۴)$$

$$\log(\Delta) = -0.447 \log(B) + 1.9 \pm 0.57 \quad (۵)$$



شکل ۵: نمودار $B-\Delta$ مربوط به شرق استان کرمان برای ایستگاه‌هایی که تا فاصله ۱۰۰ کیلومتری کانون زمین‌لرزه قرار دارند. الف) برای زلزله‌های بزرگتر از $M_w=4$ و ب) برای زلزله‌های بزرگتر از $M_w=5$.

همچنین طبق مطالعات انجام شده در ماه‌های اخیر، به طور مجزا برای سه منطقه از قسمت شرقی استان کرمان نیز، روابطی برای فاصله رومرکزی این مناطق برآورد شده است. رابطه (۸) برای فاصله رومرکزی زلزله‌های هجدک، رابطه (۹) برای فاصله رومرکزی زلزله‌های محمدآباد-ریگان و رابطه (۱۰) برای فاصله رومرکزی زلزله‌های سیرچ بدست آمده است. در شکل ۶ می‌توان رابطه خطی و معکوس بین $\log \Delta$ و $\log B$ حاصل از شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده از زلزله‌های این مناطق را مشاهده نمود (رستمی و همکاران، ۱۳۹۸a,b,c).

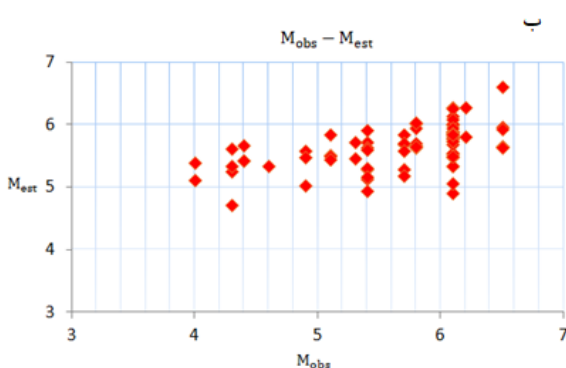
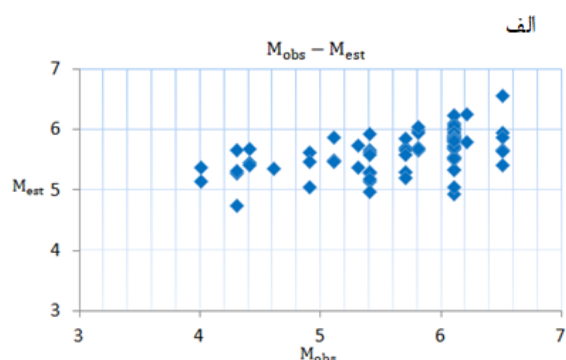
روابط (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) برای بزرگای شرق استان کرمان، به ترتیب برای فاصله های رومرکزی ۱۴۵، ۱۰۰ و ۹۰ کیلومتر بدست آمده‌اند؛ که بیشترین میزان اختلاف بزرگای مشاهده شده با بزرگای تخمینی، برای هرکدام به ترتیب برابر ۰/۹۵، ۰/۹ و ۰/۸۹ می‌باشد.

$$M_{est} = 0.272 \log P_{max} - 0.727 \log B + 6.113 \quad (15)$$

$$M_{est} = 0.228 \log P_{max} - 0.634 \log B + 6.061 \quad (16)$$

$$M_{est} = 0.293 \log P_{max} - 0.692 \log B + 6.03 \quad (17)$$

در شکل ۸ میزان اختلاف در بزرگای های تخمین زده شده و بزرگای های مشاهده شده توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی برای زلزله های بزرگتر از $M_w=4$ برای فاصله های رومرکزی ۱۰۰ و ۹۰ کیلومتر نمایش داده شده است.



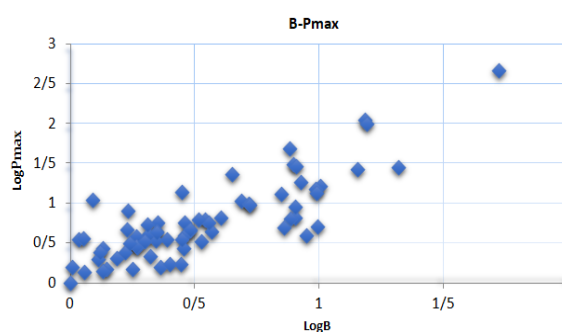
شکل ۸: مقایسه بزرگای های تخمین زده شده با بزرگای های مشاهده شده توسط سازمان تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی برای زلزله های بزرگتر از $M_w=4$ در شرق استان کرمان. الف) ایستگاه های تا فاصله ۱۰۰ کیلومتری از کانون زلزله. ب) برای ایستگاه های تا فاصله ۹۰ کیلومتری از کانون زلزله.

به دلیل خصوصیات تکتونیکی و فعالیت لرزه خیزی مناطق مختلف، هر منطقه دارای روابط ویژه ای می‌باشد. در شکل ۹ به مقایسه روابط بدست آمده در این مطالعه، منطقه اهر-ورزقان در شمال غرب ایران معهود (۱۳۹۵)، تهران حیدری (۱۳۹۵) و ژاپن Odaka et al., (2003) پرداخته شده است. همان طور که در شکل مشخص است، شیب نمودار تهران و شمال غرب ایران تقریباً یکسان است و نمودار بدست آمده برای ژاپن و این مطالعه دارای شیب متفاوتی می‌باشند؛ که این به سبب اختلاف در خصوصیات تکتونیکی و لرزه ای هر منطقه است.

LogΔ، با کاهش پارامتر B، فاصله رومرکزی (Δ) افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت بیشینه دامنه در ۳ ثانیه ابتدایی موج P با افزایش فاصله رومرکزی، کاهش می‌یابد.

برآورد بزرگی زلزله

(P_{max}) همان طور که ذکر شد، می‌توان فاصله رومرکزی را بلافاصله بعد از رسیدن موج P (۳ ثانیه) به صورت تقریبی برآورد نمود. در هشدار زود هنگام زلزله باید بتوان بزرگی را نیز به سرعت تخمین زد. بزرگی زلزله را می‌توان بر اساس بیشترین دامنه موج P در قسمت ابتدایی این موج، بدست آورد.



شکل ۷: رابطه خطی بین شیب بخش ابتدایی پوش موج P و بیشترین دامنه موج P در همان قسمت، برای زلزله های بزرگتر از ۵ شرق استان کرمان با در نظر گرفتن فاصله های رومرکزی تا ۱۰۰ کیلومتر.

با استفاده از رابطه (۱۱) می‌توان برای هر منطقه لرزه خیز، با توجه به پارامترهای آن منطقه بزرگی را تخمین زد. این رابطه، حداکثر دامنه موج P، را در هر دوره زمانی کوتاه (۳ ثانیه) پس از رسیدن موج P، نشان می‌دهد و ثابت های α ، β و γ در این رابطه برای داده های مربوط به زمین لرزه مورد نظر، با استفاده از روش حداقل مربعات تعیین می‌شوند.

$$M = \alpha \log(P_{max}) + \beta \log(B) + \gamma \quad (11)$$

($M_{obs} - M_{est}$) در این مطالعه ابتدا رابطه بزرگی برای بزرگای زلزله های شرق استان کرمان، با در نظر گرفتن ایستگاه هایی که به ترتیب تا فاصله ۱۴۵، ۱۰۰ و ۹۰ کیلومتری از کانون زلزله قرار دارند، برای زلزله های بزرگتر از $M_w=4$ بدست آمد. به ترتیب روابط (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) گویای روابط بزرگی برای این سه دسته فاصله رومرکزی است؛ که بیشترین مقدار اختلاف بزرگای مشاهده شده با بزرگای تخمین زده شده، در هرکدام به ترتیب برابر ۱/۴۱، ۱/۳۹ و ۱/۳۹ می‌باشد.

$$M_{est} = 0.815 \log(P_{max}) - 1.584 \log(B) + 5.973 \quad (12)$$

$$M_{est} = 0.765 \log(P_{max}) - 1.478 \log(B) + 5.914 \quad (13)$$

$$M_{est} = 0.824 \log(P_{max}) - 1.534 \log(B) + 5.868 \quad (14)$$

به دلیل این که این مقدار اختلاف در تخمین بزرگی زلزله کارآمد نمی‌باشد و برای بدست آوردن رابطه ای بهتر نیاز به شتاب نگاشت های بیشتری با بزرگای $M_w=4$ است؛ تصمیم بر آن شد تا رابطه بزرگا برای شرق استان کرمان با در نظر گرفتن زلزله های با بزرگای بیشتر از $M_w=4$ بدست آید.

خواهد آمد.

۵- منابع

حیدری، ر.، ۱۳۹۵، تخمین سریع فاصله رومرکزی زمین‌لرزه با استفاده از پوش موج P برای زمین‌لرزه‌های ایران، هفدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۲۱ تا ۲۳ اردیبهشت ماه ۱۳۹۵، صفحات ۱۱۹۶-۱۱۹۹.

رستمی، ش.، سپهوند، م.، معهود، م. و نصرآبادی، ا.، ۱۳۹۸، تخمین سریع بزرگی و فاصله رومرکزی زلزله به روش تک ایستگاه B-Δ برای سیچ استان کرمان، اولین همایش ملی پردازش سیگنال و تصویر در ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۲۰ آذر ۱۳۹۸.

رستمی، ش.، معهود، م.، سپهوند، م. و نصرآبادی، ا.، ۱۳۹۸b، تخمین سریع بزرگی و فاصله رومرکزی زلزله به روش تک ایستگاه B-Δ برای هجدک استان کرمان، ششمین کنفرانس ملی نوآوری‌های اخیر در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی تهران، ۷ تا ۸ آذرماه ۱۳۹۸.

معهود، م.، ۱۳۹۵، تخمین بزرگی و فاصله رومرکزی به روش تک ایستگاه B-Δ، هفدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، دانشگاه تهران، اردیبهشت ماه ۱۳۹۵.

هادی نجف آبادی، آ.، معهود، م. و زارع، م.، ۱۳۹۷، تخمین سریع بزرگی و فاصله ی رومرکزی زلزله به روش تک ایستگاه B-Δ برای شمال غرب ایران، هجدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، دانشگاه تهران، اردیبهشت ۱۳۹۷، ۱۲۱۸-۱۲۲۱.

Anderson, J. G. and Chen, Q., 1995, Beginnings of earthquakes in the Mexican subduction zone on strong-motion accelerograms, Bull. Seism. Soc. Am. 85, 1107-1115.

Heidari, R., 2016, Quick Estimation of the Magnitude and Epicentral Distance Using P Wave for Earthquakes in Iran, Bull. Seismol. Soc. Am, 106.

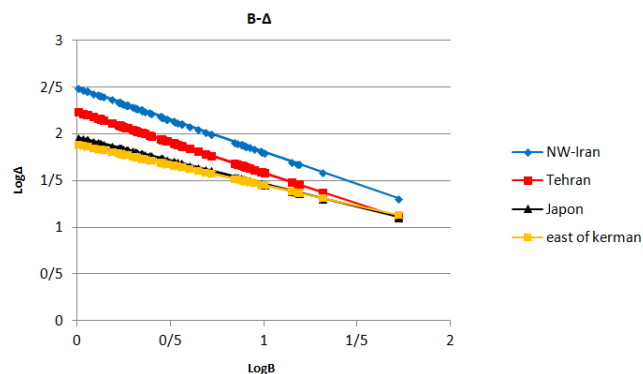
Nakamura, Y., 1988, 2-9 August. On the urgent earthquake detection and alarm system (UrEDAS), Proc. of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, Vol. VII, 673-678.

Noda, S., Yamamoto, S. and Sato, S., 2012. New method for estimation earthquake parameters for earthquake early warning system, Q. Rep. Railway Tech. Res. Inst, 53, no. 2.

Odaka, T., Ashiya, K., Tsukada, S., Sato, S., Ohtake, K. and Nozaka, D., 2003. A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record, Bull. Seismol. Soc. Am, 93, 526-532.

Rostami, SH., Sepahvand, M.R., Mahood, M. and Nasrabadi, A., 2019a, Rapid estimation of magnitude and Δ from B-Δ method for Mohammad abad earthquake, 8th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, 11 to 13 November 2019.

Wu, Y.-M., and Kanamori, H., 2005a, Experiment on an onsite early warning method for the Taiwan early warning



شکل ۹: مقایسه روابط فاصله رومرکزی این مطالعه، اهر-ورزقان در شمال غرب ایران (معهود، ۱۳۹۵)، تهران (حیدری، ۱۳۹۵) و ژاپن (Odaka et al., 2003).

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه برای برآورد تقریبی بزرگی زلزله و فاصله رومرکزی در قسمت شرقی استان کرمان، روش B-Δ استفاده شده است. برای سامانه‌های هشدار سریع تعیین این دو پارامتر حائز اهمیت می‌باشد. برازش تابع ساده $y = Bt \cdot \exp(-At)$ به ۳ ثانیه ابتدایی پوش نگاشت مؤلفه عمودی موج P فاصله رومرکزی تخمین زده شد. که در این رابطه ضریب B شیب پوش قسمت ابتدایی موج P است که مستقل از بزرگیست و نسبت به فاصله رومرکزی متغیر می‌باشد. سپس با استفاده از بیشترین دامنه موج P در بخش ابتدایی، (P_{max}) رابطه‌ای برای بزرگی حاصل شد. پس از تخمین فاصله رومرکزی برای ایستگاه‌هایی که تا فاصله ۱۴۵ کیلومتری، ۱۰۰ کیلومتری و ۹۰ کیلومتری قرار داشتند بیشترین مقدار اختلاف بین فاصله رومرکزی مشاهده شده و فاصله رومرکزی تخمینی مورد بررسی قرار گرفت؛ که در هرکدام برای زلزله‌های بزرگتر از ۴ $M_w = 4.5/5.7, 8.1/5.6$ و $3.6/1.3$ کیلومتر و برای زلزله‌های بزرگتر از ۵ $M_w = 4.3/1.1, 7.9/2.6$ کیلومتر می‌باشد؛ که در این حالت مطلوب‌ترین تخمین، برای ایستگاه‌هایی است که نهایتاً تا فاصله ۹۰ کیلومتری قرار دارند. پس از تخمین رابطه بزرگی برای زلزله‌های بزرگتر از ۴ $M_w = 4$ و بزرگتر از ۵ $M_w = 5$ در فاصله‌های رومرکزی ۱۴۵ کیلومتر، ۱۰۰ کیلومتر و ۹۰ کیلومتر، بیشترین مقدار اختلاف بزرگی مشاهده شده با بزرگی تخمینی نیز مورد بررسی قرار گرفت؛ که این مقدار برای زلزله‌های بزرگتر از ۴ $M_w = 4$ به ترتیب فاصله‌های ذکر شده برابرند با ۱/۳۹، ۱/۴۱ و ۱/۳۹، همچنین برای زلزله‌های بزرگتر از ۵ $M_w = 5$ بیشترین مقدار اختلاف بزرگی مشاهده شده با بزرگی تخمینی، به ترتیب فاصله‌های ذکر شده برابر با ۰/۹۵، ۰/۹ و ۰/۸۹ می‌باشد؛ که در این حالت مطلوب‌ترین رابطه برای تخمین بزرگی، رابطه‌ای است که در بدست آوردن آن از زلزله‌های بزرگتر از ۵ $M_w = 5$ استفاده می‌شود (روابط ۷ و ۱۷). برای بدست آوردن این دو رابطه از ۹۲ شتاب‌نگاشت مورد پردازش، تنها ۶۵ شتاب نگاشت مورد استفاده قرار گرفت. برای مناطق مختلف با توجه به فعالیت لرزه‌خیزی و خصوصیات تکتونیکی‌شان، روابط تجربی مختلفی بدست

رستمی و همکاران، تخمین سریع بزرگی و فاصله رومرکزی زلزله به روش تک ایستگاه (B-Δ) برای شرق استان کرمان، صفحات ۹۱-۱۰۲.

damage potential of earthquakes in Taiwan from the beginning of P waves, Bulletin Seismological Society of America, 95, 1181-1185.

system, Bulletin Seismological Society of America, 95, 347-353.

Wu, Y.-M., and Kanamori, H., 2005b, Rapid assessment of



Quick estimation of the magnitude and epicentral distance of the earthquake in eastern half of Kerman Province by single station (B- Δ) method

Shila Rostami¹, MohammadReza Sepahvand^{2*}, Majid Mahood³ and Afsaneh Nasrabadi²

1- MSc Student, Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

2- Assistant Professor, Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

3- Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran.

Received: 26 June 2020; Accepted: 8 November 2020

Corresponding author: mrsepahvand@yahoo.com

Keywords

Quick earthquake warning systems
Epicentral distance
The magnitude of the earthquake
Single station method
B- Δ method

Extended Abstract

Summary

Designing and launching rapid warning systems to reduce financial and human losses is one of the requirements of seismic areas. The main goal of these systems is to estimate the magnitude of the earthquake and the epicentral distance in a very short time and to announce a warning. A new method, called B- Δ , is used in these systems. It is based on information from a station and

estimates the magnitude and epicentral distance of an earthquake using the initial seconds of the P wave. In this study, these two parameters have been estimated in east of Kerman Province after examining and processing of the vertical component of the accelerograms of the earthquakes in this area.

Introduction

The location and magnitude of an earthquake are the most important parameters of the tectonic activity, because these parameters indicate the characteristics of possible earthquakes in the future. An approximate estimation of the magnitudes and locations of future earthquakes is effective in reducing the damage caused by these earthquakes. Odaka et al. (2003) introduced the B-D method, which uses single station information and shortly after receiving the P wave, estimates two parameters comprising of the epicentral distance and magnitude of the earthquake, and if the estimated magnitude is larger than the specified limit, rapid alert systems in the area will be activated. In this study, 175 earthquake accelerograms in east of Kerman Province were examined, of which only 92 accelerograms were processed for epicentral distances of 145, 100 and 90 km and earthquakes with magnitudes larger than $M_w=4$ and $M_w=5$. These two parameters were estimated separately, and as a result, the most desirable estimation were for epicentral distances of 90 km and earthquakes with magnitudes larger than $M_w=5$.

Methodology and Approaches

The single-station (B- Δ) method estimates the epicentral distance and magnitude of the earthquake based on the initial seconds of the P wave (usually 3 seconds), using the information of a station. In this method, by fitting a simple function to the initial part of envelope seismic waveform, using the least squares method, the coefficients A and B are obtained that can be used to estimate the epicentral distance. MATLAB software package has been used for this estimation. Based on the diagram obtained from this fitting, we can see the linear and inverse relationships of LogB and Log Δ , in which Δ indicates the epicentral distance. The method uses the maximum observed amplitude in a short time after receiving the P wave (P_{max}) for estimation of the earthquake magnitude. Data analysis and regression operation have been performed to calculate the magnitude of the earthquake.

Results and Conclusions

Among the accelerograms of the vertical component of earthquakes, installed in east of Kerman Province, only 92 accelerograms were processed, some of which were removed from the computational circle due to the negative slope and very low epicentral distance. In this study, the relationship between epicentral distance and magnitude for epicentral distances of 145, 100 and 90 km and magnitudes of earthquakes greater than $M_w=4$ and $M_w=5$ were obtained separately. Using the information of stations that have lower epicentral distance, the difference between the estimated epicentral distance and the observed epicentral distance was reduced. Due to the lack of accelerograms data with magnitudes

$M_{w=4}$ to $M_{w=5}$, the difference between the estimated magnitude and the observed magnitude at some stations was more than one unit, and by removing earthquakes with magnitudes less than $M_{w=5}$, this difference was reduced to below one unit. In this study, estimation of the epicentral distance and the desired magnitude for the epicentral distance of 90 km and magnitudes greater than $M_{w=5}$ was made. In the proposed method, in order to achieve an acceptable answer, the amount of accelerograms data must be high, and due to problems such as the age of some devices and their poor performances as well as the noise in some data, we have no access to such a large number of required data that is sufficient for this method.
