

## تحلیل روابط تجربی $B-\Delta$ در جنوب و جنوب غرب زاگرس و امکان سنجی کاربرد آن در سامانه های هشدار سریع زمین لرزه

مهدخت کشاورزبان<sup>۱</sup>، افسانه نصرآبادی<sup>۲</sup>، محمدرضا سپهوند<sup>۳\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه علوم زمین، دانشکده علوم و فناوریهای نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.

۲- دانشیار، گروه علوم زمین، دانشکده علوم و فناوریهای نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.

۳- استادیار، گروه علوم زمین، دانشکده علوم و فناوریهای نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۰۲؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸

\* نویسنده مسئول مکاتبات: [sepah55@gmail.com](mailto:sepah55@gmail.com)

### واژگان کلیدی

### چکیده

در این پژوهش، کارایی روش تک ایستگاه  $B-\Delta$  در سامانه های هشدار سریع زمین لرزه (Earthquake Early Warning Systems) برای مناطق جنوب و جنوب غرب زاگرس (استانهای لرستان، خوزستان و بوشهر) مورد بررسی قرار گرفته است. هدف این روش، تخمین سریع پارامترهای بزرگی و فاصله رومرکزی زمین لرزه تنها با استفاده از چند ثانیه ابتدایی موج  $P$ ، در یک شتابنگاشت می باشد. به این منظور، ۷۲ شتابنگاشت حاصل از ۱۶ زمین لرزه با  $M_w \geq 4$  پردازش شد. در این روش، با برازش یک تابع نمایی به بخش ابتدایی موج  $P$ ، دو پارامتر اصلی محاسبه می شوند: پارامتر  $A$  که نشان دهنده ضریب تضعیف دامنه موج در طول زمان است و پارامتر  $B$  که شیب افزایش اولیه دامنه موج  $P$  را مشخص می کند. این پارامترها با استفاده از روش کمترین مربعات تعیین می شوند. تحلیل نمودارهای بدست آمده نشان داد که رابطه ای خطی و معکوس میان  $\log B$  و  $\log \Delta$  وجود دارد که امکان تخمین فاصله رومرکزی زمین لرزه ( $\Delta$ ) را فراهم می کند. برای برآورد بزرگی زمین لرزه نیز از بیشینه دامنه موج  $P$  استفاده شده است. بر اساس داده های مورد مطالعه، روابط فاصله رومرکزی  $M_{est} = 0.337 \log P_{max} - 0.804 \log B + 5.659 \pm$  و بزرگی  $\log \Delta = -0.1142 \log B + 1.55 \pm 0.46$  برای منطقه مورد مطالعه به دست آمد. مقایسه این روابط با مقادیر واقعی نشان داد که عملکرد آنها رضایت بخش است و می توانند برای برآورد سریع پارامترهای کلیدی زمین لرزه در سامانه های هشدار سریع منطقه زاگرس مورد استفاده قرار گیرند. این نتایج بیانگر قابلیت روش  $B-\Delta$  در ارائه تخمین های اولیه دقیق و سریع برای مدیریت خطر زمین لرزه در مناطق مطالعه شده است.

سامانه هشدار سریع زمین لرزه  
روش  $B-\Delta$   
روابط تجربی لرزه ای  
برآورد سریع بزرگی و فاصله  
جنوب و جنوب غرب زاگرس

## ۱- مقدمه

مدیریت بحران ناشی از زمین‌لرزه‌ها یک چالش جدی است. به‌ویژه در مناطقی که تراکم جمعیتی بالا و یا زیرساخت‌های حیاتی مانند نیروگاه‌ها، پالایشگاه‌ها و بیمارستان‌ها وجود دارند، نیاز به راهکارهایی برای کاهش خسارات جانی و مالی به شدت احساس می‌شود. به این منظور، سامانه‌های هشدار سریع زمین‌لرزه طراحی شده‌اند تا پیش از رسیدن امواج ویرانگر، امکان واکنش سریع فراهم شود. این سامانه‌ها با شناسایی علائم اولیه زمین‌لرزه‌های ویرانگر و صدور هشدارهای سریع، می‌توانند میزان آسیب‌های جانی و مالی را کاهش دهند و به سازمان‌های امدادی و مردم هشدارهای لازم را ارائه دهند (Okada et al., 2003).

یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در سامانه‌های هشدار سریع، تخمین سریع پارامترهای چشمه زمین‌لرزه مانند بزرگی و فاصله رومرکزی زمین‌لرزه در ثانیه‌های اولیه دریافت موج P (معمولاً ۳ ثانیه) می‌باشد، بزرگی زمین‌لرزه معیاری برای میزان انرژی آزادشده در فرآیند گسیختگی گسل است و با مساحت گسیختگی و میزان لغزش روی گسل ارتباط مستقیم دارد. فاصله رومرکزی نیز فاصله افقی بین محل ثبت رکورد و رومرکز زمین‌لرزه را نشان می‌دهد و عامل تعیین‌کننده‌ای در شدت ارتعاشات و میزان خسارت احتمالی است (Kanamori, and Anderson, 1975; Berberian et al. 2012; Lay and Wallace, 1995). یکی از کارآمدترین روش‌های موثر و سریع برای تخمین این پارامترها، روش تک ایستگاه یا B-Δ است. این روش با استفاده از اطلاعات تک ایستگاه و در بازه زمانی بسیار کوتاه، قادر به تخمین بزرگی و فاصله رومرکزی زمین‌لرزه می‌باشد و به همین دلیل در سامانه‌های هشدار سریع زمین‌لرزه به‌ویژه در ژاپن (برای مثال در سامانه قطار سریع‌السیر شینکانسن) و همچنین در کشورهای دیگری مانند آمریکا، تایوان، ترکیه و مکزیک به کار گرفته شده است. دامنه امواج ابتدایی فاز P در قیاس با فازهای بعدی که دریافت می‌شود (امواج لرزه‌ای k و امواج سطحی) بسیار کوچک است. این دامنه‌های کوچک که برای صدور هشدار مورد استفاده قرار می‌گیرند، اطلاعات بسیار مهمی از موج‌های نیرومند بعدی با خود به همراه دارند.

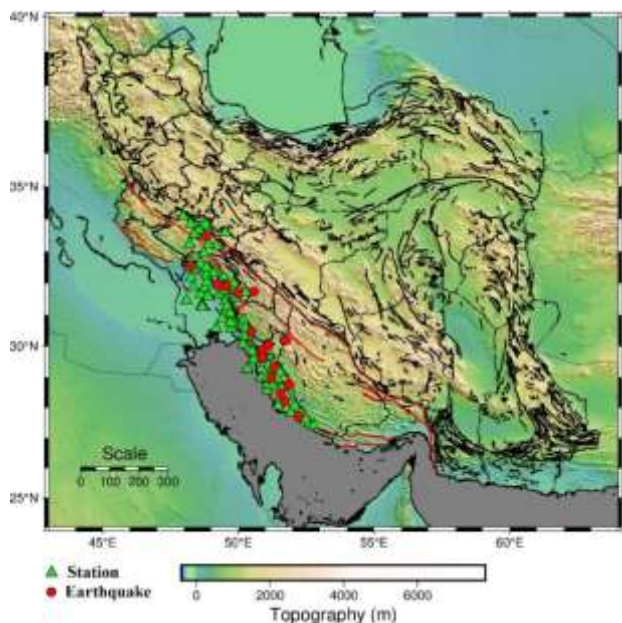
جهت تعیین بزرگی و فاصله رومرکزی در مناطق مختلف لازم است روابط تجربی میان پارامترهای لرزه‌ای متناسب با ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی همان منطقه استخراج شود. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در ایران برای استفاده از روش‌های مبتنی بر موج P در تخمین سریع بزرگی و فاصله رومرکزی انجام شده است (Heidari, 2016) در مطالعه‌ای بر سامانه هشدار سریع زمین‌لرزه تهران، روش B-Δ را برای برآورد این پارامترها به کار گرفت. همچنین (Mahood, 2016) با استفاده از همین روش، روابط بزرگی و فاصله رومرکزی را برای زمین‌لرزه‌های اهر-رورقان در شمال غرب کشور استخراج کرد. در ادامه، (Nazeri and Shomali, 2019) در بررسی داده‌های تهران، روابط فاصله رومرکزی را به کمک دو روش B-Δ و C-Δ ارائه دادند. علاوه بر این، رستمی و همکاران (۱۴۰۰) کارایی این رویکرد را در استان کرمان و نواحی شرقی آن تحلیل کرده و روابط بزرگی و فاصله رومرکزی را تعیین نمودند. همچنین در مطالعه‌ای دیگر، (Mahood, 2018) با بهره‌گیری از

داده‌های زمین‌لرزه سرپل‌ذهاب نشان داد که روش B-Δ می‌تواند با استفاده از چند ثانیه ابتدایی موج P، برآوردی سریع و نسبتاً دقیق از بزرگی و فاصله رومرکزی ارائه دهد؛ یافته‌ای که اهمیت این رویکرد را در سامانه‌های هشدار سریع زلزله برجسته می‌سازد.

در این تحقیق، با توجه به لرزه‌خیزی بالا و تکتونیک فعال در نواحی جنوب و جنوب غرب زاگرس، به‌ویژه در استان‌های لرستان، خوزستان و بوشهر، و همچنین به دلیل وجود گسل‌های فراوان و تراکم جمعیت بالا در این مناطق، این بخش از زاگرس برای بررسی انتخاب شد. بر اساس شتابنگاشت‌های زمین‌لرزه‌های رخ داده در این نواحی، کارآمدی روش تک ایستگاهی مورد بررسی قرار گرفت و روابط تجربی بزرگا و فاصله رومرکزی جهت استفاده در سامانه‌های هشدار سریع این منطقه به دست آمد.

## ۲- داده‌ها

در این پژوهش از شتاب‌نگاشت‌های زمین‌لرزه‌های با بزرگی  $M_w \geq 4$ ، که طی سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۸ در استان‌های لرستان، خوزستان و بوشهر (جنوب و جنوب شرق زاگرس) رخ داده و توسط ایستگاه‌های شبکه شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی ثبت شده‌اند، استفاده شده است. بدلیل وجود نوفه در بعضی از داده‌ها و همچنین وجود اختلاف زمانی رسید موج P و S کمتر از ۳ ثانیه در تعدادی دیگر از داده‌ها، از تعداد ۱۳۷ شتاب‌نگاشت ثبت شده از ۱۶ زمین‌لرزه، تنها ۷۲ شتاب‌نگاشت مورد پردازش قرار گرفت. برای استخراج روابط تجربی بین بزرگی و فاصله رومرکزی، شتاب‌نگاشت‌های ایستگاه‌های نزدیک به رومرکز استفاده شد، زیرا در این ایستگاه‌ها امواج P با دامنه کافی ثبت می‌شوند و اثرات تضعیف و ناهمگنی‌های محلی کمتر است. بنابراین تنها داده‌های استان‌های لرستان، خوزستان و بوشهر که این شرایط را داشتند، وارد تحلیل شدند. شکل ۱، ایستگاه‌های شتاب‌نگاری به‌کاررفته در منطقه‌ی مورد مطالعه را نمایش می‌دهد.



شکل ۱، ایستگاه‌های شتاب‌نگاری و زمین‌لرزه‌های مورد استفاده در منطقه‌ی مورد مطالعه.

توجهی در دامنه مشاهده می‌شود (Odaka et al., 2003). در این چارچوب، پارامتر  $B$  به‌عنوان شیب اولیه و پارامتر  $A$  به‌عنوان میزان کاهش دامنه تعریف می‌شوند. زمانی که  $A$  مثبت باشد، نسبت  $B/Ae$  که در آن  $e$  پایه لگاریتم طبیعی است، به‌عنوان نمایه‌ای از بیشینه دامنه تلقی می‌شود که معمولاً در زمینلرزه‌های کوچک مشاهده می‌گردد. در مقابل، مقدار  $A$  منفی نشان‌دهنده افزایش نمایی دامنه در طول زمان است که در زمینلرزه‌های بزرگ‌تر رایج‌تر است. اگرچه این مدل ریاضی به‌ظاهر ساده به نظر می‌رسد، اما ضرایب  $A$  و  $B$  به‌دست‌آمده از آن، اطلاعات ارزشمندی در مورد منبع زمینلرزه و ویژگی‌های لرزه‌زایی آن ارائه می‌دهند. بهره‌گیری دقیق از این پارامترها می‌تواند به بهبود توانایی سیستم‌های هشدار سریع در تخمین سریع بزرگی و موقعیت رومرکزی زمینلرزه کمک کند و در کاهش خسارات ناشی از رخداد‌های بزرگ زمینلرزه نقش مؤثری داشته باشد.

شکل پوش لرزه‌نگاشت‌ها تحت تأثیر عواملی همچون بزرگی زمینلرزه، عمق کانونی و فاصله رومرکزی قرار دارد. در مراحل ابتدایی، دامنه سیگنال معمولاً پایین است که بازتابی از نوفه محیطی پیش از رسیدن موج  $P$  محسوب می‌شود. با ورود موج  $P$ ، دامنه سیگنال به‌طور محسوس افزایش می‌یابد. هرچه فاصله رومرکزی بیشتر باشد، نرخ این افزایش کمتر شده و در نتیجه شیب پوش دامنه ملایم‌تر می‌شود. این رفتار نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی معکوس میان پارامتر  $B$  و فاصله رومرکزی است (Odaka et al., 1995; Anderson & Chen, 2003). بر اساس نتایج Odaka و همکاران (۲۰۰۳)، در نمودار لگاریتمی  $B-\Delta$  یک رابطه‌ی خطی میان  $\log B$  و  $\log \Delta$  برقرار است که مستقل از بزرگی زلزله بوده و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\log \Delta = a \log B + b \quad (2)$$

که در آن،  $a$  و  $b$  ضرایب تجربی هستند و بر اساس ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی هر منطقه با روش رگرسیون خطی و حداقل مربعات محاسبه می‌شوند. اهمیت این رابطه در آن است که با دانستن مقدار  $B$  از چند ثانیه ابتدایی موج  $P$ ، می‌توان فاصله رومرکزی را تنها از داده‌های یک ایستگاه تخمین زد. در این پژوهش برای بررسی اعتبار این رابطه در جنوب و جنوب‌غرب زاگرس، شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های مختلف تحلیل شد.

### ۳- روش تک ایستگاهی $B-\Delta$

یکی از اهداف کلیدی در سامانه‌های هشدار سریع زمینلرزه، تخمین سریع دو پارامتر اصلی زمینلرزه یعنی بزرگی و فاصله رومرکزی در بازه زمانی بسیار کوتاه پس از وقوع رخداد است. در این راستا، (Okada et al., 2003) روشی موسوم به روش تک ایستگاه  $(B-\Delta)$  را معرفی کردند که با استفاده از چند ثانیه ابتدایی موج  $P$ ، تخمینی سریع از این پارامترها ارائه می‌دهد. موج  $P$  به‌عنوان نخستین موج لرزه‌ای که به ایستگاه‌های شتاب‌نگاری می‌رسد، اطلاعات کلیدی درباره زمینلرزه، از جمله بزرگی و فاصله رومرکزی را در خود دارد. تحلیل ویژگی‌های موج  $P$  امکان برآورد سریع شدت احتمالی امواج قوی‌تر بعدی (موج  $S$  و امواج سطحی) را فراهم می‌کند و به همین دلیل پایه اصلی سامانه‌های هشدار سریع زلزله محسوب می‌شود.

روش  $B-\Delta$  نخستین بار در ژاپن برای استفاده در سیستم‌های هشدار سریع زمینلرزه توسعه یافت و پس از آن در کشورهای مختلفی همچون آمریکا، تایوان، ترکیه و مکزیک نیز مورد استفاده و گسترش قرار گرفت. در این روش، برای تخمین فاصله رومرکزی زمینلرزه از پوش لرزه‌ای مؤلفه قائم شتاب‌نگاشت‌ها در یک بازه زمانی مشخص، معمولاً ۳ ثانیه پس از ورود موج  $P$  استفاده می‌شود. انتخاب ۳ ثانیه به این دلیل است که در این بازه زمانی، اطلاعات کافی از موج  $P$  جمع‌آوری می‌شود تا تخمین دقیقی از فاصله رومرکزی به دست آید، در حالی که این زمان به اندازه کافی کوتاه است که بتوان قبل از رسیدن امواج مخرب‌تر، هشدار به موقع صادر کرد. انتخاب این بازه زمانی بر اساس مطالعات تجربی و شبیه‌سازی‌های انجام شده در ژاپن به دست آمده است. در این زمان، اطلاعات کافی از موج  $P$  جمع‌آوری می‌شود تا تخمین دقیقی از فاصله رومرکزی به دست آید، در حالی که این زمان به اندازه کافی کوتاه است که بتوان قبل از رسیدن امواج مخرب‌تر، هشدار به موقع صادر کرد.

پارامترهای  $A$  و  $B$  از برازش تابع زیر بر پوش لرزه‌ای استخراج می‌شوند:

$$y(t) = (Bt) \exp(-At) \quad (1)$$

در این تابع، پارامتر  $B$  بیانگر شیب افزایش اولیه دامنه، پارامتر  $A$  ضریب تضعیف دامنه در طول زمان، و  $t$  زمان پس از ورود موج  $P$  است. برازش این تابع بر پوش لگاریتمی شتاب‌نگاشت و در بازه زمانی ۳ ثانیه‌ای انجام می‌گیرد و ضرایب آن با روش کمترین مربعات به‌دست می‌آیند. این تابع به‌واسطه خاصیت هموارسازی خود، نقش یک فیلتر پایین‌گذر را ایفا می‌کند و نوفه‌های با فرکانس بالا را حذف می‌کند (Odaka et al., 2003; Noda et al., 2012). نمونه‌ای از این برازش در شکل ۲ برای زمینلرزه سال ۲۰۰۶ سیلاخور با بزرگی  $M_W=5/9$  و فاصله رومرکزی ۴۱ کیلومتر ثبت شده در ایستگاه ایستگاه چغلوندی (CLV) نشان شده است.

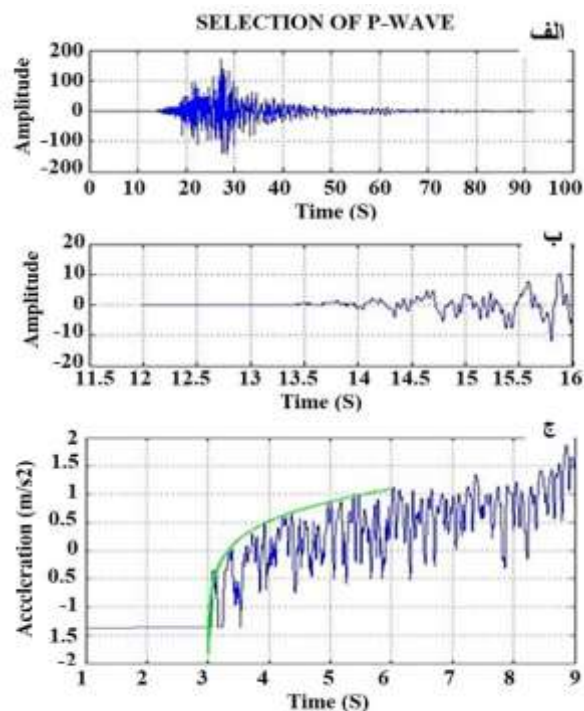
مطالعات تجربی نشان داده‌اند که در زمینلرزه‌های بزرگ، افزایش دامنه لرزه‌ای به‌تدریج و پیوسته صورت می‌گیرد، درحالی که در زمینلرزه‌های کوچک، این افزایش سریع بوده و به‌دنبال آن کاهش قابل

برای پردازش نهایی بودند. معیار انتخاب، آن دسته از شتاب‌نگاشت‌هایی بود که اختلاف زمانی بین رسید موج  $P$  و موج  $S$  در آن‌ها بیش از ۳ ثانیه باشد، تا امکان تحلیل دقیق سه ثانیه ابتدایی موج  $P$  فراهم شود. در این مجموعه، دورترین ایستگاه نسبت به کانون زمین‌لرزه در فاصله ۱۱۹ کیلومتری قرار داشت.

الگوریتمی برای تحلیل شتاب‌نگاشت‌های زمین‌لرزه در محیط نرم‌افزار MATLAB طراحی و پیاده‌سازی شد. ورودی این الگوریتم، داده‌های شتاب‌نگاشتی ثبت‌شده توسط شبکه شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی بوده است. در گام نخست، مؤلفه قائم هر شتاب‌نگاشت استخراج و سیگنال‌ها به صورت ماتریس‌های زمان-دامنه برای تحلیل آماده‌سازی شدند. در مرحله بعد، با هدف تمرکز بر موج  $P$ ، بازه‌های معادل ۳ ثانیه پس از زمان ورود این موج انتخاب شد. با توجه به نبود مدل دقیق سرعت در بسیاری از مناطق ایران، زمان رسید موج  $P$  به صورت دستی و بر اساس بازبینی سیگنال‌ها تعیین گردید. این انتخاب از حساسیت بالایی برخوردار است، چرا که تخمین نادرست زمان ورود موج  $P$  منجر به خطای قابل توجه در محاسبه ضرایب  $A$  و  $B$  خواهد شد.

برای محاسبه پوش لرزه‌ای، ابتدا دامنه سیگنال در پنجره ۳ ثانیه‌ای محاسبه و قدر مطلق آن گرفته شد. سپس پوش سیگنال به دست آمده و در قالب لگاریتمی نمایش داده شد. به منظور جلوگیری از بروز خطا در هنگام محاسبه لگاریتم، به مقادیر بسیار کوچک دامنه که نزدیک صفر بودند، نوفه‌ای جزئی افزوده شد. در ادامه، یک تابع نمایی به فرم رابطه ۱ به پوش لگاریتمی برازش داده شد و با استفاده از روش کمترین مربعات، پارامترهای  $A$  و  $B$  به دست آمدند. پس از محاسبه این ضرایب، با استفاده از مختصات ایستگاه ثبت‌کننده و کانون زمین‌لرزه، فاصله رومرکزی  $\Delta$  برای هر رویداد تعیین گردید. این فرآیند برای تمامی داده‌های مناسب و فاقد نوفه تکرار شد و در نهایت، برای هر زمین‌لرزه پارامترهای ضریب تضعیف  $A$ ، شیب اولیه موج  $B$ ، فاصله رومرکزی  $\Delta$  و حداکثر دامنه موج  $P$  یعنی  $P_{max}$  استخراج شدند. شکل ۳، نمونه‌ای از خروجی گام‌به‌گام این الگوریتم را برای مؤلفه قائم شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه کاکي در سال ۲۰۱۸ با بزرگی  $M_w=7/5$  نمایش می‌دهد. در این تصویر، مراحل انتخاب بازه زمانی، محاسبه پوش، برازش تابع نمایی و استخراج ضرایب به ترتیب نشان داده شده‌اند.

در مرحله نهایی، این الگوریتم برای تمام داده‌های قابل پردازش اعمال گردید و مجموعه‌ای از پارامترهای کلیدی زمین‌لرزه‌ها برای تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی نهایی در اختیار قرار گرفت.



شکل ۲: الف) مؤلفه قائم شتاب‌نگاشت ثبت شده از زمین‌لرزه سیلاخور در سال ۲۰۰۶ با بزرگی  $M_w=5/9$ ، و با فاصله رومرکزی ۴۱ کیلومتر، ثبت شده در ایستگاه چغلوندی (CLV) (ب) نمایش پنجره زمانی ۳ ثانیه (ج) منحنی لگاریتم قدر مطلق دامنه پنجره زمانی ۳ ثانیه و برازش آن.

در سامانه‌های هشدار سریع زمین‌لرزه، تخمین فوری بزرگی نیز اهمیت بالایی دارد. Odaka et al., 2003 نشان دادند که بین لگاریتم بیشینه دامنه موج  $P$  ( $P_{max}$ ) در سه ثانیه ابتدایی و لگاریتم پارامتر  $B$  رابطه‌ای خطی و پایدار برقرار است. تحلیل‌ها نشان داد که با کاهش  $B$ ، مقدار  $P_{max}$  نیز به شکل تقریبی و خطی کاهش می‌یابد و این روند برای رخداد‌های مختلف تقریباً موازی است. این الگو بیانگر آن است که بیشینه دامنه موج  $P$  در ثانیه‌های آغازین رفتاری مشابه با بیشینه کل رکورد دارد و با افزایش فاصله رومرکزی کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان از این رابطه برای تخمین بزرگی بهره گرفت. بر اساس این نتایج، Odaka و همکاران (۲۰۰۳) فرمولی تجربی برای برآورد بزرگی ارائه کردند که بر پایه دو پارامتر  $B$  و  $P_{max}$  در چند ثانیه ابتدایی پس از ورود موج  $P$  تعریف می‌شود:

$$M_{est} = \alpha \log P_{max} + \beta \log B + \gamma \quad (2)$$

که در آن،  $P_{max}$  بیشینه دامنه موج  $P$  است و ضرایب  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  با استفاده از تحلیل داده‌های محلی و روش حداقل مربعات محاسبه می‌شوند. این رابطه امکان برآورد سریع بزرگی را تنها چند ثانیه پس از وقوع زلزله فراهم می‌سازد و سامانه‌های هشدار سریع می‌توانند پیش از رسیدن امواج شدید، هشدار مؤثر صادر کنند.

#### ۴- بحث

در این مطالعه، ۹۳ شتاب‌نگاشت از ۱۶ زمین‌لرزه رخ داده در مناطق جنوبی و جنوب‌غربی زاگرس در طی سالهای ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار گرفت که از این میان، ۷۲ شتاب‌نگاشت واجد شرایط لازم

منطقه مورد مطالعه میزان اختلاف بین فاصله رومرکزی ثبت شده در سایت مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و فاصله رومرکزی تخمین زده شده با رابطه حاصل،  $(|\Delta_{Obs} - \Delta_{Est}|)$ ، بدست آمد. شکل ۴ نمودار و رابطه  $B-\Delta$ ، را برای زمینلرزه‌های بزرگتر از  $M_W=4$  و  $M_W=5$  نشان میدهد. نتایج اولیه نشان داد که این اختلاف برای زمینلرزه‌های با  $M_W \geq 4$  برابر با  $74/64$  کیلومتر و برای زمینلرزه‌های  $M_W \geq 5$  معادل  $67/45$  کیلومتر است.

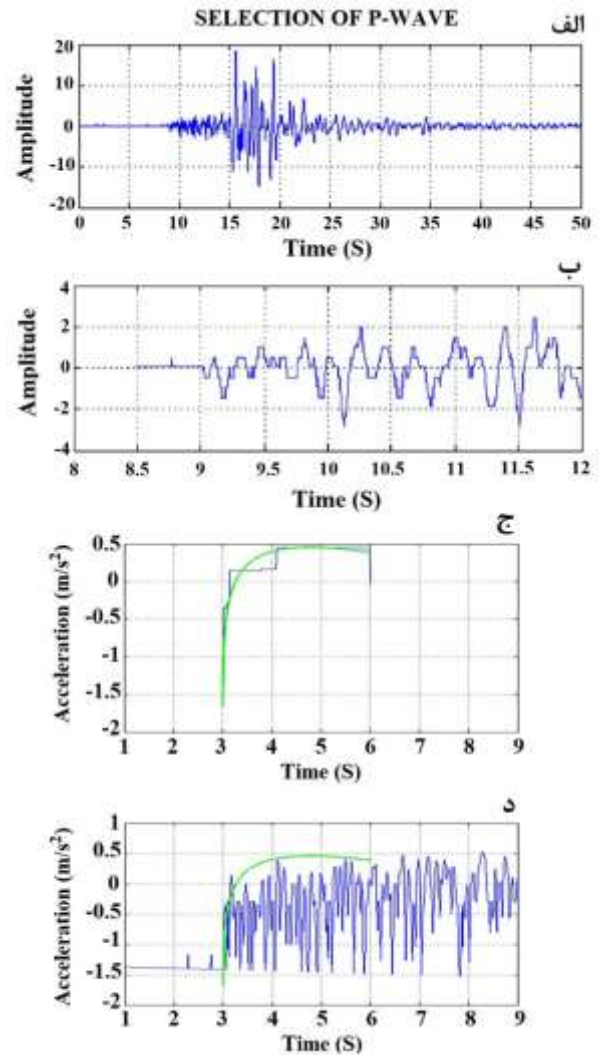
این میزان خطا، با توجه به نیاز سامانه‌های هشدار سریع به دقت بالا در تخمین فاصله، نسبتاً زیاد ارزیابی شد. بنابراین، به‌منظور بهبود دقت مدل و افزایش کارایی آن در سامانه‌های هشدار سریع، تصمیم بر آن شد که روابط  $B-\Delta$  به‌صورت تفکیکی برای ایستگاه‌هایی با فواصل مختلف از رومرکز زمین‌لرزه (شامل ۱۰۰، ۹۰، ۸۰، ۷۰، ۶۰ و ۵۰ کیلومتر) و به‌صورت جداگانه برای زمینلرزه‌های  $M_W \geq 4$  و  $M_W \geq 5$  استخراج و بررسی شود.

این دسته‌بندی فاصله‌ای امکان ارزیابی دقیق‌تر عملکرد مدل در محدوده‌های مختلف بزرگی و فواصل مختلف از رومرکز زمین‌لرزه را فراهم می‌سازد و می‌تواند مبنایی برای کاربرد عملی در سامانه‌های هشدار سریع باشد. شکل ۵ نمودار، رابطه  $B-\Delta$  و مقادیر باقیمانده  $(|\Delta_{Obs} - \Delta_{Est}|)$  را برای دو بازه بزرگی  $M_W \geq 4$  و  $M_W \geq 5$  و فواصل مختلف از رومرکز زمین‌لرزه (شامل ۱۰۰، ۹۰، ۸۰، ۷۰، ۶۰ و ۵۰ کیلومتر) نشان میدهد. نتایج این تحلیل‌ها حاکی از آن است که با کاهش فاصله ایستگاه تا کانون زمینلرزه، میزان خطای تخمین فاصله رومرکزی نیز کاهش می‌یابد. به‌ویژه در ایستگاه‌هایی که در فاصله ۵۰ تا ۶۰ کیلومتری از رومرکز قرار دارند، کمترین میزان اختلاف بین مقدار تخمینی و مقدار واقعی فاصله رومرکزی مشاهده شد. این موضوع نشان می‌دهد که روابط  $B-\Delta$  استخراج‌شده برای این فواصل، از دقت بالاتری برخوردار هستند. بنابراین، در راستای به‌کارگیری این روش در سامانه‌های هشدار سریع زمینلرزه در مناطق جنوب و جنوب‌غربی زاگرس، توصیه می‌شود که برای تخمین فاصله رومرکزی بر اساس داده یک ایستگاه، از روابط  $B-\Delta$  مختص ایستگاه‌هایی که در فاصله حدود ۵۰ کیلومتری از رومرکز قرار دارند (روابط ۴ و ۵) استفاده گردد. این انتخاب می‌تواند به افزایش دقت و قابلیت اطمینان سامانه‌های هشدار در این منطقه کمک شایانی نماید.

$$\log \Delta = -0.1142 \log B + 1.55 \pm 0.46 \quad M_W \geq 4 \quad (4)$$

$$\log \Delta = -0.0583 \log B + 1.55 \pm 0.43 \quad M_W \geq 5 \quad (5)$$

به‌منظور تعیین رابطه بزرگی زمین‌لرزه و ارزیابی رابطه خطی میان لگاریتم بیشینه دامنه موج  $P(P_{max})$  و لگاریتم پارامتر  $B$  در چند ثانیه ابتدایی پس از ورود موج، کلیه شتاب‌نگاشت‌های مربوط به زمین‌لرزه‌های با بزرگی  $M_W \geq 4$  و  $M_W \geq 5$  مورد بررسی قرار گرفتند. این تحلیل به‌صورت تفکیکی برای ایستگاه‌هایی انجام شد که در فواصل ۱۰۰، ۹۰، ۸۰، ۷۰، ۶۰ و ۵۰ کیلومتری از رومرکز زمین‌لرزه قرار دارند. برای استخراج رابطه تجربی تخمین بزرگی، از یک الگوریتم تحلیل داده



شکل ۳: الف: مؤلفه قائم شتاب‌نگاشت مربوط به زمین‌لرزه کاکي در سال ۲۰۱۸ با بزرگی  $M_W = 5/7$  و فاصله رومرکزی ۳۳ کیلومتر؛ ب: انتخاب بازه زمانی سه ثانیه‌ای پس از ورود موج  $P$ ؛ ج: رسم پوش لگاریتمی قدرمطلق دامنه؛ د: نرمال‌سازی داده‌ها و برازش منحنی لگاریتمی تابع نمایی بر پوش سیگنال.

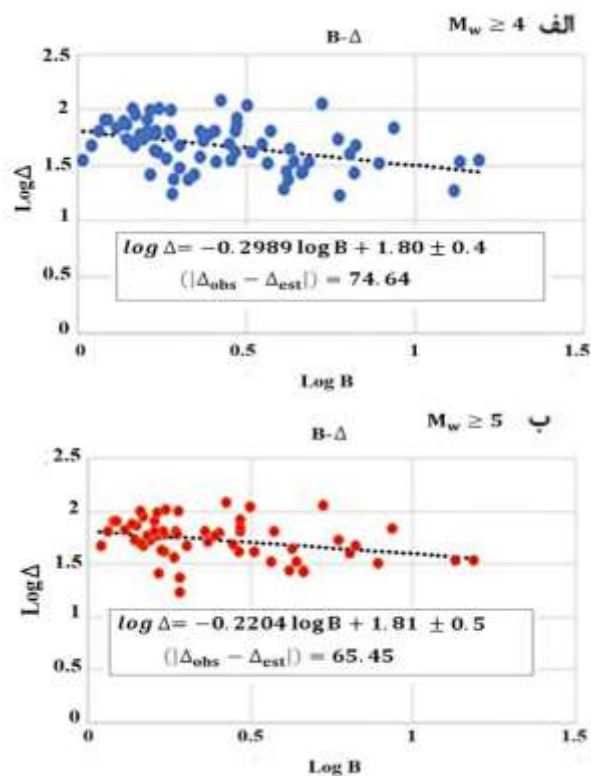
#### ۴-۱- تحلیل روابط تجربی میان پارامتر $B$ ، فاصله رومرکزی و بزرگی زمین‌لرزه

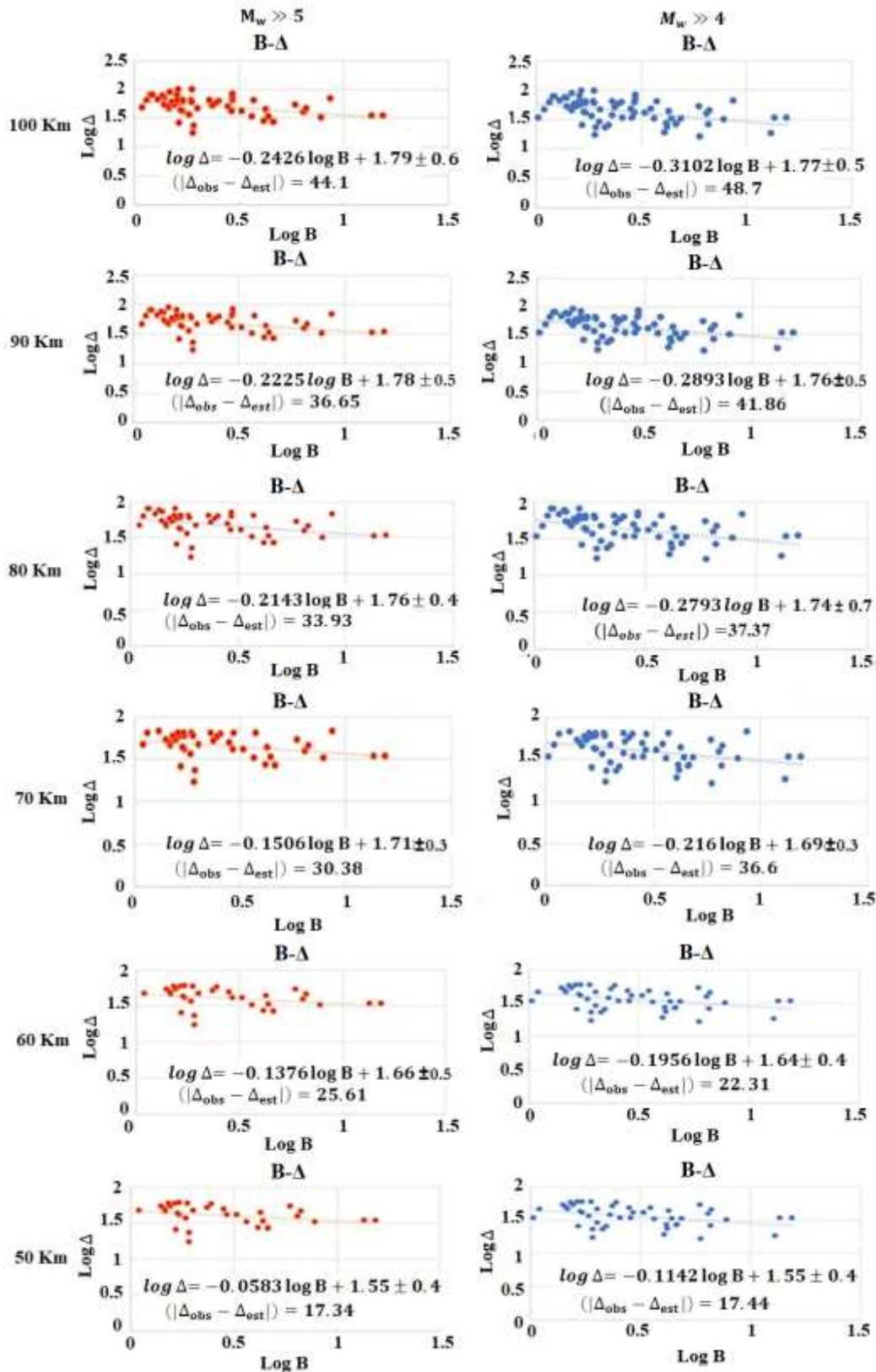
در مرحله بعد، داده‌های به‌دست‌آمده از اجرای الگوریتم، شامل پارامترهای  $A$ ،  $B$ ،  $\Delta$  (فاصله رومرکزی) و  $P_{max}$  برای کلیه زمین‌لرزه‌های پردازش‌شده، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. تمرکز نخست بر بررسی رابطه تجربی میان  $\log \Delta$  و  $\log B$  بود. بر اساس داده‌های استخراج‌شده، روابط تجربی فاصله رومرکزی ( $\Delta$ ) به‌صورت جداگانه برای شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در تمام ایستگاه‌هایی که در فاصله کمتر از ۱۲۰ کیلومتر قرار دارند و جداگانه هم برای بزرگی‌های  $M_W=4$  به بالا و هم برای بزرگی‌های  $M_W=5$  به بالا استخراج گردید. میان این دو پارامتر رابطه‌ای خطی و معکوس مشاهده شد که با یافته‌های مطالعات پیشین از جمله Odaka et al., (2003) همخوانی دارد. پس از آن جهت تحلیل و بررسی اعتبار آن برای

شکل ۴: نمودار  $B-\Delta$  مربوط به جنوب و جنوب غربی زاگرس برای ایستگاه‌هایی که تا فاصله ۱۱۹ کیلومتری کانون زمین‌لرزه قرار دارند. (الف) برای زمین‌لرزه‌های  $M_w \geq 4$ ، (ب) برای زمین‌لرزه‌های  $M_w \geq 5$ .

همچنین برای ارزیابی دقت این مدل، مقادیر باقیمانده  $(|M_{obs} - M_{est}|)$  محاسبه گردید. این اختلاف، معیار مناسبی برای سنجش عملکرد مدل در تخمین سریع بزرگی زمین‌لرزه محسوب می‌شود.

استفاده شد که با بهره‌گیری از روش حداقل مربعات، ضرایب  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  را در معادله ۳ تعیین کند. شکل ۶، رابطه خطی میان شیب بخش ابتدایی پوش موج  $(\log B)$  و بیشینه دامنه موج  $(P_{max})$  را برای زمین‌لرزه‌های با بزرگی  $M_w \geq 5$  در منطقه جنوب و جنوب غرب زاگرس نشان می‌دهد. در این تحلیل، تنها شتاب‌نگاشت‌هایی مورد استفاده قرار گرفتند که توسط ایستگاه‌هایی با فاصله حداکثر ۹۰ کیلومتر از رومرکز ثبت شده بودند.





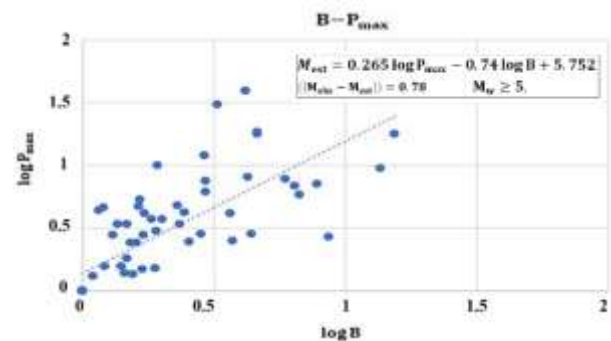
شکل ۵: نمودار و رابطه  $B-\Delta$  مربوط به جنوب و جنوب غربی زاگرس برای شتابنگاشتهای ثبت شده در ایستگاه‌هایی که در فاصله ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰، ۱۰۰، ۱۰۰ کیلومتری کانون زمین‌لرزه قرار دارند، برای زمین‌لرزه‌های بزرگتر از  $M_w \geq 4$  و  $\geq 5$

غرب ایران (شماره ۱) بالاترین مقدار  $\log \Delta$  را در همه سطوح  $\log B$  دارد. یعنی برای یک مقدار مشخص  $B$ ، فاصله رومرکزی بیشتری پیش‌بینی می‌شود. منحنی مطالعه حاضر (شماره ۵، قرمز) در پایین‌ترین موقعیت قرار دارد. یعنی برای همان مقدار  $B$ ، فاصله رومرکزی کمتری نسبت به سایر مناطق تخمین زده می‌شود. منحنی‌های شماره ۳، ۴ و ۵ (کرمان، مطالعه حاضر) بسیار به هم نزدیک‌اند. ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی یا خصوصیات موج  $P$  در این مناطق مشابه هستند. روابط  $B-\Delta$  منطقه‌محور هستند و تحت تأثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی، ساختار سرعتی و شرایط ایستگاه قرار دارند. رابطه استخراج‌شده در این مطالعه (منطقه جنوب و جنوب غرب زاگرس) بیشترین دقت را برای این منطقه دارد. پایین‌تر بودن منحنی مطالعه حاضر نشان می‌دهد که امواج  $P$  در این منطقه سریع‌تر تضعیف می‌شوند یا نرخ افت انرژی در آغاز بیشتر است که به شیب‌های تندتر  $B$  و فواصل کوچکتر منجر می‌شود. موقعیت پایین‌تر منحنی این مطالعه نسبت به سایر مناطق، بیانگر ویژگی‌های خاص لرزه‌ای منطقه زاگرس جنوبی است و بر لزوم استفاده از روابط منطقه‌ای تأکید دارد.

#### ۴-۲- تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر در روش $B-\Delta$

به منظور ارزیابی پایداری و دقت روابط به دست آمده در روش  $B-\Delta$ ، یک تحلیل حساسیت روی برخی از پارامترهای کلیدی انجام شد. هدف این تحلیل بررسی میزان تأثیر تغییرات جزئی در پارامترهای ورودی بر نتایج نهایی تخمین فاصله رومرکزی و بزرگی زمین‌لرزه است. از جمله پارامترهای مورد بررسی می‌توان به طول پنجره زمانی پس از رسیدن موج  $P$ ، زمان بندی دقیق شروع موج  $P$ ، و فاصله ایستگاه تا کانون زمینلرزه اشاره کرد. نتایج نشان دادند که:

- تغییر در زمان آغاز موج  $P$  حتی به اندازه ۰/۲ تا ۰/۵ ثانیه، می‌تواند موجب تغییر محسوسی در شیب اولیه پوش موج و در نتیجه پارامتر  $B$  شود. این موضوع تأکید می‌کند که استفاده از الگوریتم‌های دقیق تعیین فاز موج  $P$  در سامانه‌های هشدار سریع ضروری است.
- کاهش طول پنجره زمانی از ۳ ثانیه به ۲ ثانیه، در زمین‌لرزه‌های با بزرگای پایین ( $M_W \approx 4$ ) باعث افزایش پراکندگی در مقادیر  $B$  شد، در حالی که در زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر ( $M_W \approx 5$ ) تأثیر آن کمتر بود. این نشان می‌دهد که طول پنجره باید متناسب با بزرگی رویداد انتخاب شود. با این حال، در زمینلرزه‌های بزرگ (بزرگی ۷/۵ و بالاتر) به دلیل زمان گسیختگی طولانی‌تر، پنجره‌های ۲ یا ۳ ثانیه‌ای ممکن است برای تخمین دقیق کافی نباشند. در این موارد، می‌توان از پنجره‌های زمانی متغیر برای بهبود تخمین استفاده کرد (Noda et al., 2012).
- فاصله ایستگاه از کانون زمینلرزه نیز نقش کلیدی دارد؛ داده‌ها نشان دادند که دقت روابط تخمینی در فاصله‌های بین ۵۰ تا ۶۰ کیلومتر از کانون زمینلرزه، به مراتب بالاتر از فواصل دورتر (مثلاً بالای ۹۰ کیلومتر) است.



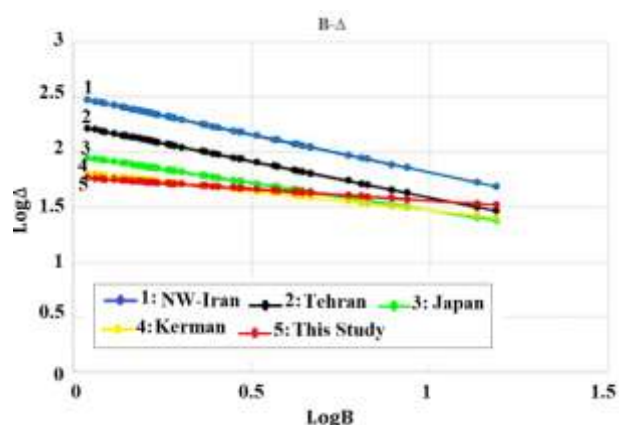
شکل ۶: نمایش رابطه خطی میان لگاریتم شیب بخش ابتدایی پوش موج  $P$  و بیشینه دامنه این موج ( $P_{max}$ ) برای زمین‌لرزه‌های با بزرگای  $M_W \geq 5$  در منطقه جنوب و جنوب غرب زاگرس، با در نظر گرفتن ایستگاه‌هایی که در فاصله‌ای حداکثر ۹۰ کیلومتر از رومرکز زمین‌لرزه قرار دارند.

مطلوب‌ترین رابطه برای تخمین بزرگی، مربوط به ایستگاه‌هایی با فاصله ۶۰ کیلومتری از رومرکز و زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای  $M_W \geq 5$  است، چراکه در این حالت، اختلاف بین بزرگی تخمین زده شده و بزرگی ثبت شده به حداقل مقدار ممکن رسیده و دقت مدل به طور قابل توجهی افزایش یافته است:

$$M_{est} = 0.337 \log P_{max} - 0.804 \log B + 5.659 \pm 0.34 \quad (6)$$

$$(|M_{obs} - M_{est}|) = 0.72$$

در پایان به مقایسه روابط رومرکزی بدست آمده در این مطالعه، منطقه اهر-ورزقان در شمال غرب ایران (Mahood, 2016)؛ تهران (Heidari, 2016)؛ استان کرمان (رستمی و همکاران، ۱۴۰۰) و ژاپن (Odaka et al. 2003) پرداخته شد (شکل ۷).



شکل ۷: مقایسه رابطه رومرکزی حاصل از این مطالعه با روابط به دست آمده در سایر مناطق، شامل زمینلرزه اهر-ورزقان در شمال غرب ایران ((Mahood, 2016)، تهران (Heidari, 2016)، استان کرمان (رستمی و همکاران، ۱۴۰۰) و کشور ژاپن (Odaka et al., 2003).

همه منحنی‌ها روند کاهشی دارند که تأیید می‌کند بین  $\log B$  و  $\log \Delta$  یک رابطه خطی معکوس برقرار است. این رفتار با نظریه پایه روش  $B-\Delta$  (Odaka et al., 2003) سازگار است. منحنی مربوط به شمال

- Berberian, M., Jackson, J., Priestley, K. and Wallace, T., 2012. Active faulting and tectonics of Iran, *Tectonophysics*, 555-556, pp.1-36.
- Heidari, R., 2016, Quick Estimation of the Magnitude and Epicentral Distance Using P Wave for Earthquakes in Iran, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 106.
- Kanamori, H. and Anderson, D.L., 1975. Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(5), pp.1073-1095.
- Lay, T. and Wallace, T.C., 1995. *Modern Global Seismology*, Academic Press, San Diego.
- Mahood, M., Mokhtari, M., and Zafarani, H., 2016. Prediction of magnitude and epicentral distance from a single seismic record: a case study of the Ahar-Varzaghan earthquake. *IJGE*, 2(4), 208-213.
- Mahood, M., 2018. Rapid Estimating Epicentral Distance and Magnitude from a Single Seismic Record of Sarpol-e Zahab Earthquake, *JSEE*, 20 (2), 29-36.
- Nazeri, S. and Z.H. Shomali, Rapid estimation of the epicentral distance in the earthquake early warning system around the Tehran region, Iran. *Seismological Research Letters*, 2019. 90(5): p. 1916-1922.
- 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  $\Delta$  from B- $\Delta$  method for Mohammadabad earthquake, 8<sup>th</sup> International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, 11 to 13 November 2019.

در مجموع، نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که دقت تخمین پارامترهای لرزه‌ای در روش  $B-\Delta$ ، وابستگی زیادی به انتخاب صحیح پنجره زمانی و تشخیص دقیق شروع موج  $P$  دارد. برای استفاده عملی از این روش در سامانه‌های هشدار سریع، باید این عوامل در طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم‌ها لحاظ گردد.

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، کارایی روش  $B-\Delta$  برای تخمین سریع فاصله رومرکزی و بزرگی زمین‌لرزه در مناطق لرزه‌خیز جنوب و جنوب‌غرب ایران مورد بررسی قرار گرفت. با پردازش ۷۲ شتاب‌نگاشت از ۱۶ زمین‌لرزه، روابط تجربی میان پارامترهای  $B$ ،  $P_{max}$ ، فاصله رومرکزی و بزرگی زمین‌لرزه استخراج گردید. نتایج نشان دادند که:

- بین  $\log B$  و  $\log \Delta$  رابطه‌ای خطی و معکوس برقرار است، که می‌توان از آن برای تخمین سریع فاصله رومرکزی تنها با استفاده از داده یک ایستگاه استفاده کرد.
  - بین  $\log P_{max}$  و  $\log B$  نیز رابطه‌ای خطی وجود دارد که مبنای رابطه تجربی تخمین بزرگی قرار گرفت.
  - با کاهش فاصله ایستگاه تا کانون زمین‌لرزه، دقت تخمین فاصله رومرکزی و بزرگی به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که بهترین عملکرد مدل برای ایستگاه‌هایی با فاصله حدود ۵۰ تا ۶۰ کیلومتر از رومرکز ثبت شده است.
  - مقایسه منحنی‌های  $B-\Delta$  این مطالعه با مناطق دیگر ایران و ژاپن نشان داد که روابط منطقه‌محور هستند و استفاده از مدل‌های محلی، دقت تخمین‌ها را افزایش می‌دهد.
- بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که روش  $B-\Delta$ ، در صورت کالیبراسیون مناسب برای هر منطقه، ابزاری سریع و قابل‌اعتماد برای استفاده در سامانه‌های هشدار سریع زمین‌لرزه محسوب می‌شود. استفاده از این روش در نواحی جنوب و جنوب‌غرب زاگرس، با توجه به لرزه‌خیزی بالای منطقه، می‌تواند نقش مهمی در کاهش تلفات و خسارات ناشی از زمین‌لرزه ایفا کند.

## ۶- منابع

- رستمی، ش.، سپهوند، م.، معهود، م. و نصرآبادی، ن.، ۱۴۰۰. تخمین سریع بزرگی و فاصله رومرکزی زمین‌لرزه به روش تک ایستگاه ( $B-\Delta$ ) برای شرق استان کرمان، پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، ۷(۱)، ۹۱-۱۰۲.

Anderson, J.G. and Q. Chen, Beginnings of earthquakes in the Mexican subduction zone on strong-motion accelerograms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1995. 85(4): p. 1107-1115.