

## شبیه‌سازی زلزله‌های تاریخی ۱۱ دی سال ۳۳۶ (ش.ه)، Mw ۶/۳ و ۱۲ فروردین سال ۵۲۹ (ش.ه)، Mw ۶/۱ کرمانشاه با استفاده از پس‌لرزه‌های زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ از گله کرمانشاه به روش تابع تجربی گرین

علی سنقری<sup>۱\*</sup>، احمد سدیدخوی<sup>۲</sup> و مهرداد پاکزاد<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۴)

### چکیده

دو زمین‌لرزه بزرگ به تاریخ ۱۱ دی سال ۳۳۶ (ش.ه)، Mw=۶/۳ و ۱۲ فروردین سال ۵۲۹ (ش.ه)، Mw=۶/۱ در زاگرس به وقوع پیوسته است که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است. وجود اطلاعات ارزشمندی از زمین‌لرزه‌های پیشین که گیرنده‌ای برای ثبت لرزه‌نگاشت آن‌ها وجود نداشته است، به منظور شناسایی خطر زمین‌لرزه، تکمیل کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها، شناخت هرچه بیشتر پهنه زاگرس و آمادگی هرچه بهتر در برابر این پدیده طبیعی حائز اهمیت است. در تاریخ ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶ زمین‌لرزه‌ای با بزرگای گشتاوری ۷/۳ در شهرستان سرپل‌ذهاب در استان کرمانشاه به وقوع پیوست که محل وقوع آن (ازگله کرمانشاه)، از لحاظ مکانی به زمین‌لرزه‌های تاریخی مذکور در بالا نزدیک است. روش تابع تجربی گرین یکی از معمول‌ترین و ساده‌ترین روش‌ها برای شبیه‌سازی قطعیتی جنبش نیرومند زمین با اعمال اثرات ناهمگنی‌های زمین‌شناختی است. این روش از پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه‌های بزرگ برای مدل‌سازی استفاده می‌کند. در این پژوهش با استفاده از روش مذکور و به وسیله نگاشت پس‌لرزه‌های کوچک در منطقه ازگله، برخی از پارامترهای جنبش نیرومند زمین از قبیل تاریخچه زمانی نگاشت‌ها، محتوای فرکانسی، زمان رسید موج P و S و همچنین طیف پاسخ زمین به همراه بیشینه شتاب زمین، برای یکی از پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه اصلی ۷/۳ سرپل‌ذهاب بدست آمد. نتایج بدست‌آمده نشان می‌دهند که شباهت خوبی بین شکل موج، طیف دامنه و طیف پاسخ شبیه‌سازی و مشاهده‌شده در ایستگاه‌های موجود وجود دارد و خطا نیز مقدار قابل‌قبولی را نشان می‌دهد. سپس با استفاده از نتایج به دست آمده از زمین‌لرزه مرجع برای شبیه‌سازی؛ شکل موج، طیف دامنه فوریه و طیف پاسخ برای زمین‌لرزه‌های تاریخی گفته شده بدست آمد و همچنین، پارامترهای جنبش نیرومند زمین مانند میزان شتاب در پرپود اولیه، طیف دامنه فوریه، برای زمین‌لرزه‌های قابل انتظار در منطقه در ساختگاه‌های مورد بررسی بدست آمد. با توجه به زمین‌لرزه‌های رخ داده در منطقه، نتایج بدست‌آمده منطقی و معقول به نظر می‌رسند.

**واژه‌های کلیدی:** جنبش نیرومند زمین، شبیه‌سازی زمین‌لرزه، تابع تجربی گرین، کرمانشاه، زلزله تاریخی، طیف پاسخ

## ۱ مقدمه

سرزمین ایران به علت قرار داشتن در کمربند کوهزایی آلپ- هیمالیا از جمله مناطق لرزه خیز جهان محسوب می شود که به دفعات متحمل زمین لرزه های مخرب شده است. کمربند رانده چین خورده زاگرس به عنوان قسمتی از کمربند کوهزایی آلپ- هیمالیا، یکی از جوان ترین و فعال ترین پهنه های برخوردی زمین است. این پهنه فعال، مرز شمال شرقی صفحه عربستان را تشکیل می دهد. زاگرس از نظر لرزه خیزی بسیار فعال و زلزله خیزترین منطقه ایران است. منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر در استان کرمانشاه قرار دارد. این منطقه، سابقه لرزه خیزی با بزرگای بالای ۷ را نیز داراست. با استفاده از روش های شبیه سازی، اطلاعاتی همچون توانایی لرزه خیزی منطقه، میزان خسارت ناشی از وقوع زمین لرزه، خطر لرزه ای و در نهایت روش های افزایش ضریب ایمنی سازه ها و جلوگیری از ساخت و ساز در حریم گسل مسبب زلزله و غیره را می توان به دست آورد و بررسی کرد. شبیه سازی نقش مهمی را در برآورد پارامترهای جنبش نیرومند زمین ایفا می کند. از جمله این پارامترها، می توان از طول و عرض گسل، راستا و شیب آن، ابعاد المان ها در گسسته سازی سطح گسل، سرعت امواج برشی، سرعت گسیختگی و نقطه شروع گسیختگی نام برد که برای شبیه سازی مورد نیاز می باشند. هدف از مطالعه حاضر، تعیین پارامترهای جنبش زمین و شبیه سازی شکل موج زمین لرزه های تاریخی ۱۱ دی سال ۳۳۶ (ه.ش)،  $M_w=6/3$  و ۱۲ فروردین سال ۵۲۹ (ه.ش)،  $M_w=6/1$  کرمانشاه با استفاده از داده های پس لرزه های زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ از گله کرمانشاه به روش تابع تجربی گرین است.

میزان توانایی در شبیه سازی جنبش زمین یکی از معیارهای سنجش و بررسی پیشرفت در زلزله شناسی می باشد. نگاشت های زمین لرزه های گذشته منابع اطلاعاتی مفیدی در طراحی سازه های مقاوم در برابر زمین لرزه هستند؛

اما در بسیاری از مناطق جهان، این نگاشت ها یا وجود ندارند و یا تعداد آن ها بسیار کم است؛ بنابراین، به روش هایی برای شبیه سازی جنبش زمین نیاز خواهیم داشت. یکی از این روش ها، روش توابع تجربی گرین (Empirical Green's Function) است. در این مطالعه، زمین لرزه های بزرگ با استفاده از نگاشت های زلزله های کوچک که به عنوان توابع تجربی گرین شناخته می شوند، شبیه سازی می گردند. این روش برای اولین بار توسط هارتزل در سال ۱۹۷۸ معرفی گردید که می تواند هم به صورت مستقیم و هم به صورت معکوس در مطالعات مورد استفاده واقع شود (هارتزل، ۱۹۷۸؛ هاتچینگز، ۱۹۹۱). برای اولین بار، آکی (۱۹۶۸) در مقاله ای تحت عنوان «جابجایی های لرزه ای در نزدیکی گسل» به شبیه سازی نگاشت زمین لرزه ۱۹۶۶ پارک فیلد گسل سن آندریاس، پرداخت. مبنای روش بکار گرفته شده به این صورت است که زلزله های کوچک تمامی اطلاعات در مورد ویژگی های محیط انتشار میان چشمه و ساختگاه مورد نظر را با خود به همراه دارند و می توان از آن ها برای شبیه سازی شوک اصلی استفاده نمود (هارتزل، ۱۹۷۸).

هاتچینگز و وو (۱۹۹۰) در پژوهشی تحت عنوان «تابع تجربی گرین حاصل از زمین لرزه های کوچک: بررسی شکل موج پس لرزه های ثبت شده از زمین لرزه ۱۹۷۱ سن فرناندو» با استفاده از نگاشت های ۵۲ پس لرزه ثبت شده در ۲۵ ایستگاه توزیع شده در دره سن فرناندو؛ به تعیین تابع تجربی گرین و مشخصات شکل موج آن ها بر پایه گشتاور لرزه ای، سازوکار کانونی، فاصله ایستگاه تا چشمه، زمین شناسی ساختگاه و باند فرکانسی، پرداختند. هاتچینگز (۱۹۹۱) در پژوهشی تحت عنوان «پیش بینی جنبش نیرومند زمین برای زمین لرزه ۱۹۸۹ لوما پریتا با استفاده از تابع تجربی گرین» به بررسی روش شبیه سازی با استفاده از «زمین لرزه های کوچک به عنوان تابع تجربی گرین» پرداخت و از آن ها برای تحلیل خطر زمین لرزه و پیش بینی

۱۹۹۵). همچنین نگاشت‌های ثبت شده در نزدیکی رومرکز زمین‌لرزه، هنگام عبور از داخل زمین، کمتر دچار تغییر می‌شوند که از این رو جهت مطالعه علمی چشمه‌های زمین‌لرزه، داده‌های مناسبی به حساب می‌آیند (هارتزل، ۱۹۸۷؛ ایریکورا، ۱۹۸۳).

در این مطالعه، پارامترهای گسل مسبب زمین‌لرزه سرپل ذهاب با شبه‌سازی جنبش زمین به روش تابع تجربی گرین به دست آمده است. شبه‌سازی جنبش زمین به وسیله نرم‌افزار EMPYSYN (Earthquake Simulation Program) که توسط هاتچینگز و وو (۱۹۹۰) ارائه شده است، انجام گردید. پارامترهای ورودی این نرم‌افزار شامل فایل ورودی اطلاعات گسل، چشمه، منطقه از قبیل ساختار سرعتی و فایل توابع تجربی گرین است (هاتچینگز و وو، ۱۹۹۰). ویژگی جنبش نیرومند زمین برای طراحی، مقاوم‌سازی و بهسازی سازه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. ناهمگن بودن ساختار داخل زمین، لایه‌ای بودن پوسته، وجود گسل‌ها، چین‌ها، امواج انعکاسی، شکست مرزی، امواج تبدیل یافته و پدیده پیچیده کاهیدگی از عوامل تأثیرگذار بر روی تخمین ویژگی‌های جنبش زمین هستند.

برای تعیین پارامترهای جنبش زمین و شبه‌سازی شکل موج دو زمین‌لرزه گفته شده به روش تابع تجربی گرین، از داده‌های پس‌لرزه‌های زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶،  $M_w=7/4$  سرپل ذهاب کرمانشاه، ثبت شده در شبکه موقت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله استفاده شد. از دلایل انتخاب پس‌لرزه‌های این زمین‌لرزه برای شبه‌سازی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: ۱- نزدیکی طول و عرض جغرافیایی و بزرگای زمین‌لرزه‌های تاریخی با زمین‌لرزه ۲۱ آبان ۱۳۹۶، ۲- داشتن گسل مسبب یکسان که بر حسب اطلاعات تاریخی و نقشه‌های لرزه‌زمین‌ساختی، گسل پیشانی اصلی زاگرس (Main Front Fault Zagros) (شکل ۱)، ۳- شبه بودن پارامترهای جنبش نیرومند زمین

جنبش نیرومند زمین‌لرزه ۱۸ اکتبر ۱۹۸۹ لوما پریتا، استفاده نمود. در پژوهشی دیگر، هاتچینگز و همکاران (۲۰۰۶) با عنوان «یک روش فیزیکی پیش‌بینی جنبش نیرومند: به کار برده شده در تحلیل خطر احتمالاتی زمین‌لرزه ۱۹۹۹ آتن ( $M_w=6/0$ )» به ارائه یک روش پیش‌بینی جنبش نیرومند زمین و ترکیب این روش با تحلیل خطر احتمالاتی با استفاده از تابع گرین پرداخت. در این مقاله از به منظور شبه‌سازی از زمین‌لرزه ۷ سپتامبر ۱۹۹۹ آتن استفاده شد، لذا برای این منظور و شبه‌سازی از باند فرکانسی ۱ تا ۲۰ هرتز طیف زلزله مور اشاره بهره گرفته شد. همچنین، به منظور برآورد پیشینه شتاب (PGA) از جنبش‌های نیرومند شبه‌سازی شده بجای روابط تضعیف قدیمی برای تحلیل خطر احتمالاتی استفاده شد.

## ۲ روش انجام پژوهش

بزرگی زمین‌لرزه، طول و عرض گسل، راستا و شیب آن، سرعت امواج برشی، سرعت گسیختگی و نقطه شروع گسیختگی، پارامترهای مورد نیاز شبه‌سازی هستند (هارتزل، ۱۹۷۸). در این روش از تانسور ممان لرزه‌ای و تابع لغزش (Slip Function) گسل برای تعیین مشخصات چشمه زمین‌لرزه و از تئوری امواج برای مدل کردن عبور امواج برشی، در نیم‌فضای همگن از چشمه تا ساختگاه، استفاده می‌شود. روش تابع تجربی گرین یکی از متداول‌ترین روش‌های شبه‌سازی قطعی می‌باشد. تابع گرین پاسخ زمین به یک چشمه نقطه‌ای لرزه‌ای است و تابعی از ساختار سرعت زمین و موقعیت چشمه و گیرنده می‌باشد (ایریکورا، ۱۹۸۳). روش تابع تجربی گرین بر این اساس بنا شده است که جنبش نیرومند زمین در یک ساخت‌گاه مشخص، حاصل جمع حرکت‌های ناشی از شکست‌های منفرد قطعات کوچک روی صفحه گسل، با تأخیر زمانی مشخص است. فرض مهم موجود در این روش نقطه‌ای بودن چشمه در رویدادهای کوچک می‌باشد (مک‌کالن و هاتچینگز،

کانونی می‌توان به درستی انتخاب پس‌لرزه مورد بررسی برای شبیه‌سازی شکل موج زمین‌لرزه‌های تاریخی پی برد. رابطه (۱) توصیف ریاضی الاستودینامیک جنبش زمین است (آکی و ریچاردز، ۲۰۰۲؛ هاتچینگز و ویه‌گاس، ۲۰۱۲):

$$u_n(X, t) = \int_A m_{pq}(X', t') * G_{np,q}(X', t'; X, t) dA \quad (1)$$

در این رابطه،  $u_n$  جابجایی جنبش در راستای  $\hat{x}_n$  در مکان  $X$  و زمان  $t$  است. انتگرال همایخت تابع چشمه  $m_{pq}(X', t')$  با مشتق مکانی تابع گرین  $G_{np,q}(X', t'; X, t)$  مربوط به راستای  $\hat{x}_q$  در مکان  $X'$  و زمان  $t'$  روی کل سطح گسل گرفته می‌شود. \* نماد عملگر همایخت است و  $A$  نشان دهنده سطح گسل است، تابع گرین، توزیع جابجایی در امتداد  $\hat{x}_n$  برای ضربه واحد یک جهته در راستای  $\hat{x}_p$  است. تابع چشمه به صورت تانسور گشتاور لرزه‌ای  $m_{pq}$  بیان می‌شود:

$$m_{pq}(X', t') = [s_i(X', t')] \hat{n}_j(X') c_{ijpq} \quad (2)$$

که دارای بعد ممان بر واحد سطح است.  $\hat{n}$  بردار نرمال واحد برای گسل در مختصات چشمه و  $s_i(X', t')$  تابع زمانی چشمه است، که مشخصاً برای توزیع لغزش در مکان و زمان در طول گسل در راستای  $\hat{x}_i$  می‌باشد.  $c_{ijpq}$  تانسور کشسان مرتبه چهار است که تنش را به کرنش ارتباط می‌دهد. رابطه برای یک سطح گسلی در محیط همسانگرد، کشسان خطی و میدان دور می‌باشد.

روش شبیه‌سازی در این مطالعه بر پایه روش ارائه شده توسط هاتچینگز (۱۹۹۰، ۱۹۹۱، ۱۹۹۴) است که در آن از یک مدل گسیختگی چشمه برای توصیف چشمه و توابع گرین تجربی برای از بین بردن اثر کاهندگی مسیر و اثر ساختگاه بهره گرفته شد؛ همچنین در این مطالعه از تابع لغزش کاستروف (۱۹۶۴) برای محاسبه لغزش در یک نقطه استفاده گردید که تقریباً شبیه به یک رمپ است. سرعت گسیختگی ۰/۸ سرعت موج  $S$  (کیلومتر بر ثانیه) و سرعت التیام برابر ۰/۹۵ سرعت گسیختگی انتخاب شدند. مکان

(اثر چشمه، اثر مسیر حرکت پرتو، اثر ساختگاه و غیره)، ۴- تعدد و نزدیکی ایستگاه‌های لرزه‌نگاری موقت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله به محل وقوع زمین‌لرزه‌ها. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله بعد از رخداد زمین‌لرزه ۲۱ آبان ۱۳۹۶، اقدام به نصب و راه اندازی یک شبکه موقت در منطقه نمود، با توجه به عدم ثبت زمین‌لرزه اصلی، به همین سبب از بزرگ‌ترین پس‌لرزه ثبت شده در ایستگاه‌های شبکه موقت که در تاریخ ۱۵ آذر ماه ۱۳۹۶ با بزرگای گشتاوری ۴/۷ ثبت شده بود، به عنوان مرجع استفاده گردید. پارامترها و اطلاعات زمین‌لرزه ۲۱ آبان ۱۳۹۶ به همراه پس‌لرزه ۱۵ آذر ۱۳۹۶، برگرفته شده از مرکز لرزه‌نگاری کشوری وابسته به موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران در جدول ۱ آمده است.

در شکل ۱ نقشه محدوده مورد مطالعه، رومرکز زمین‌لرزه ۲۱ آبان ۱۳۹۶ از گله با ستاره بنفش، رومرکز زمین‌لرزه‌های تاریخی سال ۳۳۶ و ۵۲۹ (ه.ش) با پنج ضلعی زرد رنگ و رومرکز و سازوکار کانونی محاسبه شده پس‌لرزه ۱۵ آذر ۱۳۹۶، مورد استفاده برای شبیه‌سازی با ستاره قرمز رنگ مشخص شده است. همچنین گسل‌های منطقه برگرفته از کار حسامی و همکاران (۲۰۰۳) و محل برخی از ایستگاه‌های شبکه موقت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله که رویداد پس‌لرزه در آن‌ها ثبت شده‌اند، آورده شده است.

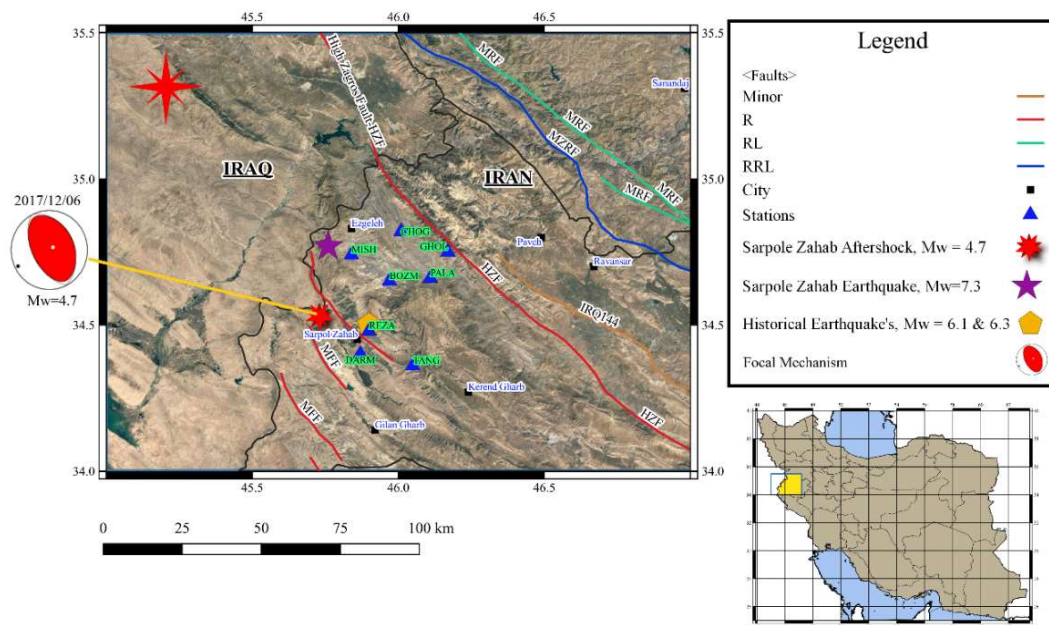
مراکز مختلف زلزله‌شناسی سازوکار کانونی زمین‌لرزه سال ۱۳۹۶ سرپل‌ذهاب را به صورت راندگی با مؤلفه امتدادلغز تعیین کرده‌اند، در اینجا سازوکار کانونی پس‌لرزه ۴/۷ با استفاده از روش شبیه‌سازی شکل موج با استفاده از نرم‌افزار ایزولا (سوکوس و زاهرادنیک، ۲۰۰۸)، معکوس با مؤلفه‌ای امتدادلغز به دست آمد که تقریباً مشابه با سازوکار کانونی زمین‌لرزه ۷/۴ می‌باشد. از شباهت دو سازوکار

همامیخت کرده و شکل موج نهایی شبیه‌سازی شده ساخته شد، آنگاه با مشخص شدن پارامترهای نهایی، نگاشت‌های شبیه‌سازی شده با نگاشت‌های مشاهده شده، مورد مقایسه قرار گرفت. در نهایت با شبیه‌سازی پس‌لرزه ۱۵ آذر سال ۱۳۹۶،  $M_w=4/7$  و با استفاده از پارامترهای ورودی این زمین‌لرزه، شکل موج و طیف فرکانسی زمین‌لرزه‌های تاریخی ۱۱ دی سال ۳۳۶ (ش.ه)،  $M_w=6/3$  و ۱۲ فروردین سال ۵۲۹ (ش.ه)،  $M_w=6/1$  شبیه‌سازی شدند. به علت نزدیک بودن محل وقوع زمین‌لرزه‌ها و یکسان بودن گسل، مسبب دو زمین‌لرزه، لرزه‌زمین‌ساخت، رژیم ژئودینامیکی، توپوگرافی و سایر پارامترها (ستقری و همکاران، ۲۰۱۹) نتایج معقولی بدست آمد. این روند برای همه ایستگاه‌های موجود که داده پس‌لرزه ۱۵ آذر سال ۱۳۹۶،  $M_w=4/7$  را ثبت کرده‌اند، اجرا شد.

رومرکز زمین‌لرزه شبیه‌سازی شده به همراه صفحه گسل، به وسیله فواصل از لبه‌های گسل تعیین می‌شود (هنکس و کاناموری، ۱۹۷۹؛ هاتچینگز، ۱۹۹۱ و ۱۹۹۴؛ کاستروف، ۱۹۶۴؛ مرت و همکاران، ۲۰۱۲).

در جدول ۲ نام اختصاری و فاصله رومرکزی ایستگاه‌های شبکه موقت لرزه‌نگاری پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله از زمین‌لرزه مرجع و زمین‌لرزه‌های تاریخی آمده است. در جدول ۳ کاتالوگ پس‌لرزه‌های کوچک که از آن‌ها به عنوان تابع تجربی گرین در این پژوهش استفاده گردیده، آورده شده است.

به منظور شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین، ابتدا پارامترهای اولیه برای شبیه‌سازی به روش تابع تجربی گرین مد نظر قرار گرفت. سپس، نگاشت‌های دستگاهی پس‌لرزه‌ها را تصحیح نموده و پس از اعمال فیلتر در محدوده فرکانسی مناسب، توابع گرین را با یکدیگر



شکل ۱. نقشه محدوده مورد مطالعه، رومرکز زمین‌لرزه ۲۱ آبان ۱۳۹۶ از گله با ستاره بنفش، رومرکز زمین‌لرزه‌های تاریخی سال ۳۳۶ و ۵۲۹ (ش.ه) با پنج ضلعی زرد رنگ و سازوکار کانونی محاسبه شده پس‌لرزه ۱۵ آذر ۱۳۹۶، مورد استفاده برای شبیه‌سازی با ستاره قرمز رنگ مشخص شده است، همچنین گسل‌های منطقه برگرفته از کار حسامی و همکاران (۲۰۰۳) و محل برخی از ایستگاه‌های شبکه موقت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله که رویداد پس‌لرزه در آن‌ها ثبت شده‌اند، آورده شده است.

جدول ۱. پارامترها و اطلاعات زمین‌لرزه ۲۱ آبان و پس‌لرزه ۱۵ آذر ۱۳۹۶، برگرفته شده از مرکز لرزه‌نگاری کشوری (با تصحیح نگارنده).

Mw	عمق (کیلومتر)	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	تاریخ و زمان وقوع (UTC)	زلزله اصلی
۷/۳	۱۸/۱	۴۵/۷۶	۳۴/۷۷	۱۲-۱۱-۲۰۱۷ ۱۸:۱۸:۱۷,۲	زلزله اصلی
۴/۷	۱۴/۱	۴۵/۶۶۱	۳۴/۵۰۲	۰۶-۱۲-۲۰۱۷ ۰۷:۵۷:۴۱,۱	پس‌لرزه

جدول ۲. نام اختصاری و فاصله رومرکزی ایستگاه‌های شبکه موقت لرزه‌نگاری پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله از زمین‌لرزه مرجع و

زمین‌لرزه‌های تاریخی، مورد استفاده در این پژوهش.

نام ایستگاه	R <sub>epi</sub> فاصله رومرکزی از زمین‌لرزه‌های تاریخی (کیلومتر)	R <sub>epi</sub> فاصله رومرکزی از زمین‌لرزه مرجع با بزرگای گشتاوری ۴/۷ (کیلومتر)
TANG	۲۱	۳۹
REZA	۲	۲۲
PALA	۲۶	۴۵
BOZM	۱۸	۳۳
CHOG	۳۷	۴۸
DARM	۱۱	۲۲
GHOL	۳۷	۵۴
MISH	۲۷	۳۱

جدول ۳. کاتالوگ برخی از زمین‌لرزه‌های کوچک به عنوان تابع تجربی گرین حاصل از ثبت در ایستگاه‌های موقت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی

زلزله.

بزرگا M <sub>w</sub>	عمق (کیلومتر)	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	تاریخ و زمان وقوع (UTC)	شماره
۲/۱	۱۰	۴۵/۷۷۴	۳۴/۷۶۱	۱۸-۱۱-۲۰۱۷ ۱۴:۵۷:۳۴	۱
۲/۲	۱۰	۴۵/۷۸۱	۳۴/۷۶۸	۲۱-۱۱-۲۰۱۷ ۲۱:۲۸:۳۶	۲
۱/۹	۱۲/۳	۴۵/۴۹۳	۳۴/۷۹۱	۲۴-۱۱-۲۰۱۷ ۲۳:۱۷:۲۵	۳
۲/۳	۹	۴۵/۸۱۰	۳۴/۷۷۱	۲۸-۱۱-۲۰۱۷ ۰۹:۰۵:۳۵	۴
۱/۹	۱۰	۴۵/۷۳۶	۳۴/۷۷۱	۰۵-۱۲-۲۰۱۷ ۰۰:۰۳:۰۸	۵
۲/۲	۸	۴۵/۷۵۱	۳۴/۸۰۸	۰۹-۱۲-۲۰۱۷ ۱۵:۵۳:۴۸	۶
۲/۳	۹/۳	۴۵/۷۶۳	۳۴/۷۸۱	۱۰-۱۲-۲۰۱۷ ۰۸:۲۴:۲۱	۷
۲/۱	۱۰	۴۵/۷۲۹	۳۴/۷۵۹	۲۸-۱۲-۲۰۱۷ ۰۶:۳۰:۵۸	۸
۲/۱	۱۰	۴۵/۷۸۳	۳۴/۷۸۲	۲۸-۱۲-۲۰۱۷ ۰۱:۰۴:۴۷	۹

### ۳ زمین‌لرزه‌های تاریخی مورد مطالعه

در سال ۳۳۶ (ه.ش) مصادف با سال ۹۵۸ میلادی، زمین‌لرزه‌ای حلوان (سرپل ذهاب کنونی) را ویران کرد و تعداد بسیاری را در منطقه جبال کشت. زمین‌لرزه به قدری بزرگ بود که لرزش آن در بغداد حس شد، پس‌لرزه‌های این زمین‌لرزه به تناوب در سرتاسر ماه‌های نخست سال ادامه داشت و بر منابع آب زیرزمینی در زاگرس اثر گذاشت. نزدیک به ۲۰۰ سال بعد در بامداد اول مارس سال ۱۱۵۰ میلادی، زمین‌لرزه دیگری در همان منطقه

سرپل ذهاب روی داد و سبب دگرریختی زمین در کوه‌ها گردید. باز هم زمین‌لرزه به میزانی بزرگ بود که شهرهای اطراف ویران شده و شمار فراوانی از کوچ‌نشینان منطقه کشته شدند. لرزش حاصل از این زلزله به شدت در بغداد حس شد و باعث ترک خوردن برخی از دیوارها در آن شهر گردید (آمیرسبیز و ملویل، ۱۹۸۲). در جدول ۴ اطلاعات و پارامترهای زمین‌لرزه‌های تاریخی مذکور آورده شده است.

جدول ۴. اطلاعات و پارامترهای زمین‌لرزه‌های تاریخی مستخرج از کاتالوگ موسوی و ماهانی (۲۰۲۰).

بزرگا $M_w$	عمق (کیلومتر)	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	تاریخ و زمان وقوع (UTC)
۶/۳	۵	۴۵/۹	۳۴/۵	۰۹۵۸-۰۱-۰۱ / ۰۰:۰۱:۰۱
۶/۱	۵	۴۵/۹	۳۴/۵	۱۱۵۰-۰۴-۰۱ / ۱۲:۰۱:۰۱

#### ۴ بحث و نتایج

در جدول ۵ برخی از پارامترهای مورد نیاز برای شبه‌سازی شکل موج و طیف فرکانسی پس‌لرزه ۱۵ آذر سال ۱۳۹۶،  $M_w=4/7$ ، سرپل ذهاب آورده شده است.

جدول ۵ پارامترهای مورد نیاز برای شبه‌سازی به روش تابع تجربی گرین.

Q	150
$M_w$ to $M_0$	$10^{1.5M_w+16.02}$
$V_p$	$0.206z+3.8$
Domain for computation	Spectral
Strike, dip, slip vector	152, 55, 88
Rupture time function model	Kostrov- ramp
Area of elemental source ( $km^2$ )	0.05
$M_0$ for 2017 After Shock	$1.04 \times 10^{23}$ Dyn/cm
Rupture velocity	0.80 percentage of S-wave velocity
Rupture healing	0.95 percentage of rupture velocity

با توجه به مقادیر جدول ۵، ضریب کیفیت برابر با ۱۵۰ در نظر گرفته شده است، گشتاور لرزه‌ای نیز از رابطه  $10^{1.5M_w+10.02}$  برای همه زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه محاسبه شد، از طرفی چون رابطه اصلی یک رابطه تجربی است و دارای عدم قطعیت است، شبه‌سازی چندین بار برای به دست آوردن گشتاور مناسب انجام گرفت. با توجه به ساختار سرعتی منطقه کرمانشاه، و با استفاده از ساختار سرعتی پنج لایه مرکز لرزه‌نگاری کشوری، تابع سرعت موج P بر حسب عمق به صورت  $0.206z+3.8$  به دست آمد، که در آن Z نماد عمق است. برای رسیدن به زمان رسید دقیق شکل موج، این بار نیز چندین مرتبه آزمون و خطا صورت گرفت. در حوزه فرکانس، تصحیح طیف دامنه چشمه برای فواصل متفاوت المان‌ها تا چشمه به وسیله یک

منطقه کرمانشاه یکی از مناطق زلزله‌خیز ایران به ویژه در سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ بوده است. در این منطقه زلزله‌های مهیب و ویرانگری با بزرگمایی که می‌توانستند باعث تخریب بافت شهری و روستایی مناطق مختلف این شهرستان بشوند اتفاق افتاد که فرصت شناسایی پارامترهای مؤثر جنبش نیرومند زمین را ایجاد نموده است. در ساعت ۲۱ و ۴۸ دقیقه (به وقت محلی) روز ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶ هجری شمسی، مطابق با ساعت ۱۸ و ۱۸ دقیقه (به وقت جهانی) روز ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ میلادی زمین‌لرزه‌ای با بزرگای گشتاوری ۷/۴ در فاصله ۱۰ کیلومتری از گله و حدود ۳۷ کیلومتری شمال غرب شهرستان سرپل ذهاب از استان کرمانشاه، واقع در مرز ایران و عراق به وقوع پیوست (گزارش مرکز لرزه‌نگاری کشوری، ۱۳۹۷).

از دلایل و اهمیت‌های مهم انتخاب دو زمین‌لرزه تاریخی گفته شده برای شبه‌سازی می‌توان به موارد متعددی از قبیل: ۱- نبود لرزه‌نگاشت‌های این زمین‌لرزه‌ها و فقدان اطلاعات تاریخی از تاریخچه زمانی و طیف‌های فرکانسی؛ ۲- تکمیل کاتالوگ لرزه‌خیزی؛ ۳- مطالعه دقیق‌تر پارامترهای دخیل در میزان خسارات وارده به مناطق زلزله‌خیز کرمانشاه؛ ۴- از بین بردن پراکندگی داده‌ها و بهبود خطای کاتالوگ زمین‌لرزه‌های تاریخی با ساخت داده‌های مناسب زلزله‌های پیشین؛ ۵- استفاده از داده‌های طیفی زمین‌لرزه‌های بزرگ پیشین جهت ساخت و مقاوم‌سازی هرچه بهتر سازه‌ها و در نتیجه کاهش تلفات؛ ۶- مطالعه هرچه بهتر پارامترهای گسیختگی و بررسی صحت آن‌ها؛ و در نهایت به ۷- استفاده از نتایج این پژوهش برای برآورد زلزله‌ای احتمالی در ساختگاه مورد مطالعه اشاره کرد.

هرتز تا ۲۰ هرتز در نظر گرفته شد. سرعت گسیختگی سطح گسل تقریباً از ۲/۶ تا ۳/۵ کیلومتر بر ثانیه معادل ۰/۸ تا ۰/۹ سرعت موج S و سرعت التیام برابر ۰/۹۵ سرعت گسیختگی، تعیین شدند. افزایش و یا کاهش سرعت گسیختگی می‌تواند باعث تغییر دامنه نگاشت شبیه‌سازی شده و همین‌طور باعث شیفت زمانی نسبت به زمان اصلی شکل موج‌ها گردد. همچنین، سرعت گسیختگی، تابعی از عمق است که در سطح زمین کمترین میزان و در عمق تا به کانون سرعت آن افزایش می‌یابد. این پدیده با پارامتری به نام التیام گسیختگی نشان داده می‌شود، در این مطالعه، اندازه آن  $RH = 0.95$  در نظر گرفته شد (امیری فرد و همکاران، ۲۰۱۹؛ حسینی و همکاران، ۲۰۱۹؛ هاتچینگز، ۱۹۹۲). در جدول ۶ سازوکار کانونی و بزرگای نسبت داده شده به زمین‌لرزه مرجع سال ۱۳۹۶ (ه.ش) سرپل‌ذهاب به دست آمده در این پژوهش به روش شبیه‌سازی شکل موج آورده شده است.

جدول ۶. سازوکار کانونی و بزرگای نسبت داده شده به زمین‌لرزه مرجع سال ۱۳۹۶ (ه.ش) سرپل‌ذهاب بدست آمده در این پژوهش.

پارامترهای چشمه			بزرگا	
امتداد °	شیب °	ریک °	M <sub>w</sub>	Mo*10 <sup>23</sup> (Dyn/cm)
۱۵۲	۵۵	۸۸	۴/۷	۱/۰۴
۳۳۵	۳۵	۹۳		

#### ۴-۱ نتایج شکل موج‌ها و طیف‌های فرکانس

نگاشت‌ها و طیف‌های دامنه فوریه برای زمین‌لرزه مرجع سال ۱۳۹۶ (ه.ش) سرپل‌ذهاب با بزرگای ۴/۷ به روش تابع تجربی گرین با استفاده از نرم‌افزار EMPYSYN شبیه‌سازی شدند و سپس با کدهای نوشته شده به زبان پایتون رسم گردیدند و با نگاشت‌های مشاهده‌ای در ایستگاه‌های مورد بررسی مورد مقایسه قرار گرفتند. در ادامه

گسترش هندسی و ضریب تضعیف انجام می‌شود. برای زمین‌لرزه مرجع سال ۱۳۹۶ (ه.ش) با بزرگای ۴/۷، سطح گسل دایره‌ای به مرکزیت ۳۴/۷۷۲ درجه عرض شمالی و ۴۵/۶۶۱ درجه طول شرقی و به شعاع ۱/۴ کیلومتر، با مساحت تقریبی ۶/۱۵۷ کیلومترمربع در نظر گرفته شد. زمین‌لرزه تاریخی سال ۳۳۶ (ه.ش) با بزرگای ۶/۳، به صورت سطح گسلی دایره‌ای به مرکزیت ۳۴/۵ درجه عرض شمالی و ۴۵/۹ درجه طول شرقی و به شعاع ۷/۴۶۳ کیلومتر و مساحت حدود ۱۷۴/۹۷۵ کیلومترمربع و زمین‌لرزه تاریخی سال ۵۲۹ (ه.ش) با بزرگای ۶/۱، سطح گسل را نیز دایره‌ای به مرکزیت ۳۴/۵ درجه عرض شمالی و ۴۵/۹ درجه طول شرقی و به شعاع ۶/۰۵ کیلومتر با مساحت تقریبی ۱۱۴/۹۹ کیلومترمربع تعیین شد. مقادیر شعاع و مساحت گسل‌ها با استفاده از روابط ولز و کوپراسمیت (۱۹۹۴) به دست آمد. در شبیه‌سازی برای المان‌بندی از المان‌های ۰/۰۵ کیلومترمربعی بهره برده شد؛ در این مدل تنشگاه‌ها مد نظر قرار نگرفت، ولی زبری برای سطح گسیختگی منظور گردید. سازوکار کانونی زمین‌لرزه مرجع شبیه‌سازی سال ۱۳۹۶ (ه.ش) در این پژوهش با استفاده از روش شبیه‌سازی شکل موج با استفاده از نرم‌افزار ایزولا با سازوکار معکوس و مؤلفه امتدادلغز به دست آمد که تقریباً مشابه با سازوکار کانونی زمین‌لرزه ۷/۴ می‌باشد. از شباهت دو سازوکار کانونی می‌توان به درستی انتخاب پس‌لرزه مورد بررسی برای شبیه‌سازی شکل موج زمین‌لرزه‌های تاریخی پی برد. برای زمین‌لرزه‌های تاریخی نیز به دلیل نزدیکی رومرکز زمین‌لرزه‌های اصلی و پس‌لرزه‌های یکسان به عنوان تابع گرین؛ و شباهت اثرات چشمه دو زمین‌لرزه؛ از همین مقادیر و همچنین از مدل تابع زمان گسیختگی مدل کاستروف-ریمپ استفاده گردید (کاستروف، ۱۹۶۴؛ زاهرادنیکی و سوکوس، ۲۰۱۸). نگاشت‌های استفاده شده در این مطالعه از جنس شتاب می‌باشند. همچنین، محدوده فرکانس برای شبیه‌سازی بین ۱



نگاشت‌های مشاهده‌ای و شبه‌سازی شده و طیف‌های دامنه فوریه نظیر آن‌ها آورده شده است.

#### ۴-۱-۱ نتایج شبه‌سازی شکل موج و محتوای فرکانسی زمین‌لرزه مرجع سال ۱۳۹۶ (ش.ه) سرپل‌ذهاب با بزرگای ۴/۷

نتایج شبه‌سازی زمین‌لرزه مرجع سال ۱۳۹۶ (ش.ه) سرپل‌ذهاب در شکل ۲ برای ایستگاه PALA از شبکه موقت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله آورده شده است، در هر شکل ستون چپ، ستون شتاب‌نگاشت‌ها و ستون راست ستون مرتبط با محتوای فرکانسی نگاشت‌ها است که به ترتیب از ردیف بالا به پایین مؤلفه‌های شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و قائم می‌باشند. در شکل موج‌ها زمان رسید نگاشت شبه‌سازی شده با دقت خوبی هم‌زمان با نگاشت مشاهده‌ای رسیده‌اند که نشان از صحیح بودن روش کار و استفاده درست از ساختار سرعتی می‌باشد و همین‌طور، بیشینه شتاب زمین با خطای اندکی به دست آمده که قابل قبول است. مجموعاً در تمامی محدوده فرکانسی نیز هم‌پوشانی بسیار مناسبی وجود دارد.

در حوزه زمان، برای شبه‌سازی در مرحله‌ی اول، زمان‌رسید موج P و زمان‌رسید بیشینه دامنه موج S از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش با توجه به مقایسه‌های انجام گرفته بین ساختار سرعتی ۳ و ۵ لایه مرکز لرزه‌نگاری کشوری، با استفاده از شبه‌سازی، بهترین برازش زمانی برای این منطقه به دست آمد، که همان مدل سرعتی ۵ لایه است. در نتیجه میان شکل موج شبه‌سازی و شکل موج مشاهده‌ای از لحاظ زمان رسید موج P و موج S تطابق خوبی مشاهده شد. یکی دیگر از نکات مهم برای شبه‌سازی موفق تطابق دوام مؤثر مابین شکل موج شبه‌سازی شده و مشاهده‌ای است که در این مطالعه تطابق بالایی مشاهده گردید. از دیگر معیارهای صحت شبه‌سازی

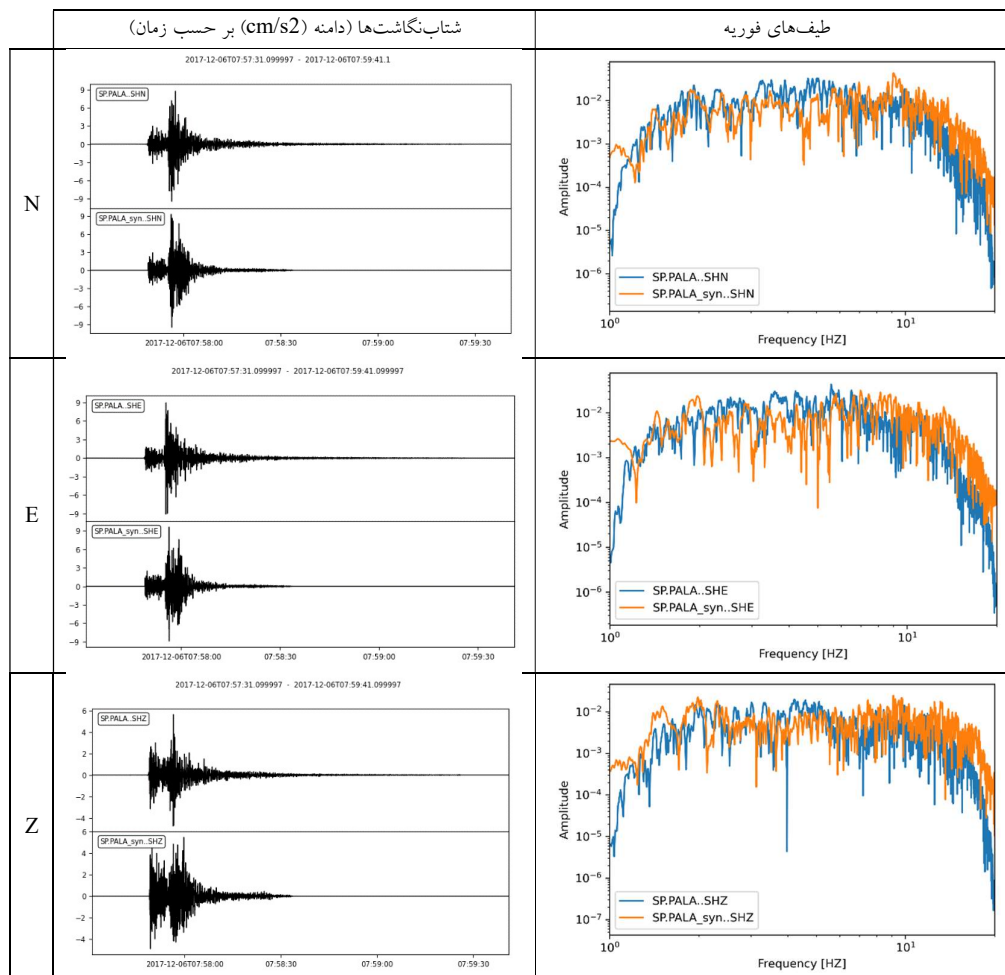
در حوزه زمان، تطابق بیشینه دامنه موج S بین شکل موج مشاهده‌ای و شبه‌سازی شده است که مقادیر بسیار نزدیکی به دست آمد.

یکی دیگر از معیارها، تطابق حداکثری طیف‌های دامنه در بازه‌ی مورد بررسی ۱-۲۰ هرتز است، که در ایستگاه‌های مورد استفاده در محتوای فرکانسی نسبتاً کاملی از بازه ذکر شده، تطابق خوبی به دست آمد. این موضوع نشان دهنده موفقیت آمیز بودن شبه‌سازی در بازه‌ی فرکانسی موردنظر است.

#### ۴-۱-۲ نتایج شبه‌سازی شکل موج و محتوای فرکانسی زمین‌لرزه‌های تاریخی سال ۵۲۹ (ش.ه)، Mw=۶/۱ و سال ۳۳۶ (ش.ه)، Mw=۶/۳ سرپل‌ذهاب

یکی از اهداف شبه‌سازی به روش تابع تجربی گرین، به دست آوردن شکل موج و طیف‌های دامنه فوریه برای زمین‌لرزه‌های تاریخی است که حسگر لرزه‌نگاری برای ثبت کردن آن‌ها وجود نداشته است. حال که در امر شبه‌سازی زمین‌لرزه مرجع هم در حوزه زمان و هم در حوزه فرکانس نتایج مناسبی به دست آمد، نوبت به شبه‌سازی شکل موج و محتوای فرکانسی زمین‌لرزه‌هایی است که در منطقه مورد نظر در گذر تاریخ رخ داده‌اند.

در شکل ۳ ستون چپ ستون شتاب‌نگاشت‌ها و ستون راست ستون مرتبط با محتوای فرکانسی نگاشت‌هاست که به ترتیب ردیف بالا برای زمین‌لرزه‌های تاریخی سال ۵۲۹ (ش.ه)، Mw=۶/۱ و ردیف پایین برای زمین‌لرزه‌های تاریخی سال ۳۳۶ (ش.ه)، Mw=۶/۳ سرپل‌ذهاب، می‌باشند. در شکل محتوای فرکانسی، همه مؤلفه‌های شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و قائم با یکدیگر ترسیم شده‌اند.

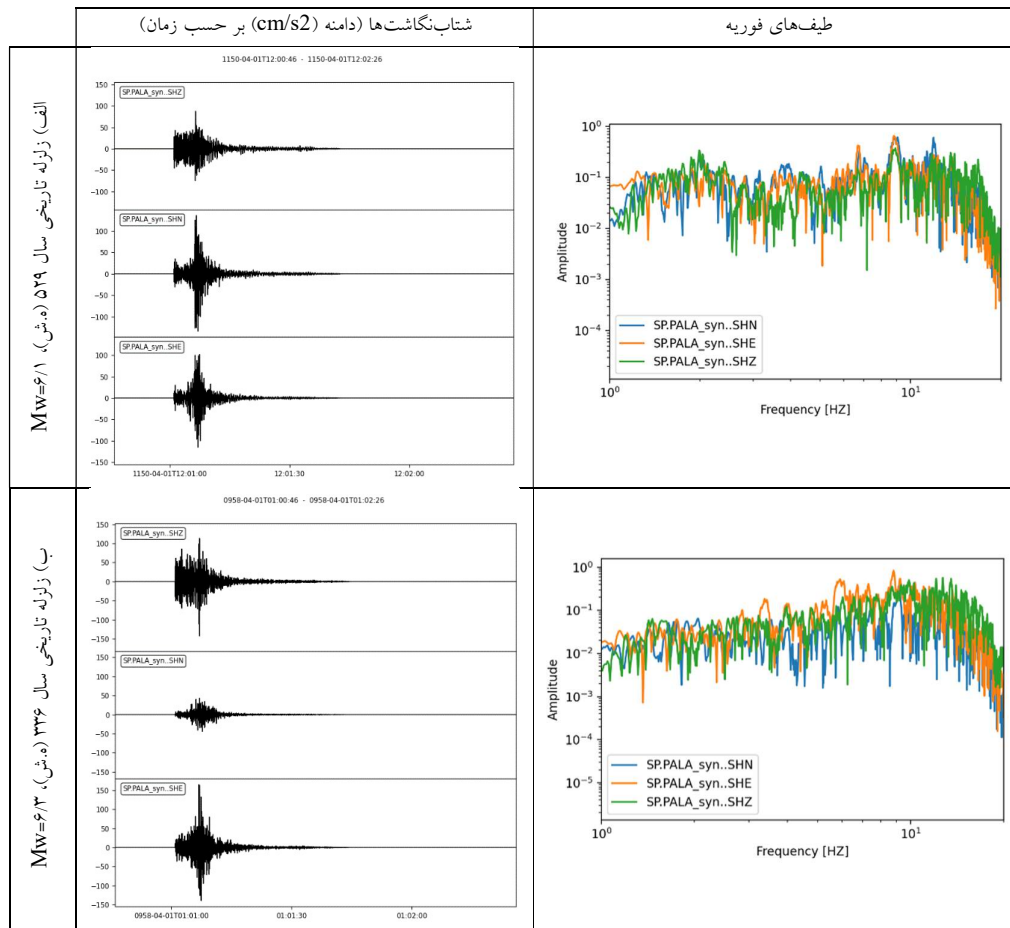


شکل ۲. مقایسه شتاب‌نگاشت مؤلفه شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و قائم مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در ستون چپ و مقایسه طیف دامنه فوریه، مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در ستون راست برای زمین‌لرزه مرجع سال ۱۳۹۶ (ه.ش) سرپل‌ذهاب با بزرگای ۴/۷ در ایستگاه PALA.

#### ۲-۴ طیف‌های پاسخ

تحت یک شتاب‌نگاشت زلزله را طیف طرح پاسخ شتاب می‌گویند. نگاشت‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده به روش تابع تجربی گرین در نهایت با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون برای دست آوردن طیف‌های پاسخ شتاب استفاده شد. این طیف‌ها با ۵٪ میرایی و یک درجه آزادی محاسبه شدند که با مقایسه با طیف پاسخ شتاب برگرفته از گزارش‌های ماهانه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی زمین‌لرزه‌های ازگله ۱۳۹۶، اهر و ورزقان ۱۳۹۱، بم ۱۳۸۲ و غیره منطقی به نظر می‌رسد و پاسخ‌ها و نتایج به دست آمده در این پژوهش را تصدیق می‌کنند.

برای تحلیل و طراحی سازه‌ها در برابر تکان‌های زلزله می‌بایست با نحوه پاسخ سازه‌ها به حرکات زلزله آشنایی داشت. یکی از مهم‌ترین مفاهیم مورد نیاز یک مهندسین سازه طراحی سازه‌ها، مفهوم طیف پاسخ زلزله می‌باشد. این نمودار در واقع نشان‌دهنده حداکثر شتاب‌های ایجاد شده در یک سیستم یک درجه آزادی با پیوندهای مختلف تحت یک شتاب‌نگاشت زلزله می‌باشد که به آن طیف پاسخ شتاب گفته می‌شود. بنابراین حداکثر شتاب‌های ایجاد شده در یک سیستم یک درجه آزادی با پیوندهای مختلف



شکل ۳ شتاب‌نگاشت مؤلفه قائم، شمالی- جنوبی و شرقی- غربی شبیه‌سازی شده در ستون چپ و مقایسه طیف دامنه فوری، شبیه‌سازی شده مؤلفه‌ها در ستون راست به ترتیب برای الف) زلزله تاریخی سال ۵۲۹ (ه.ش)،  $M_w=6.1$  و ب) زلزله تاریخی سال ۳۳۶ (ه.ش)،  $M_w=6.3$  در ایستگاه PALA.

میزان شتاب بیشینه زمین در ایستگاه PALA، ۹ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه و برای ایستگاه REZA به بیشتر از ۳۰ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه نیز می‌رسد. در هر سه مؤلفه ایستگاه PALA و REZA شتاب طیفی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای برآزش تقریباً قابل قبولی را در شتاب دارند که نشان از به دست آوردن صحیح شتاب طیفی است. تنها در پیوندها کمی تفاوت وجود دارد که می‌توان آن را به نوفه‌های محیطی یا خطاهای موجود در محاسبه توابع گرین مورد استفاده برای شبیه‌سازی نسبت داد. در نهایت، در شکل ۷ برای زمین‌لرزه‌های تاریخی سال ۵۲۹ (ه.ش)،  $M_w=6.1$  و ردیف پایین برای زمین‌لرزه‌های تاریخی سال

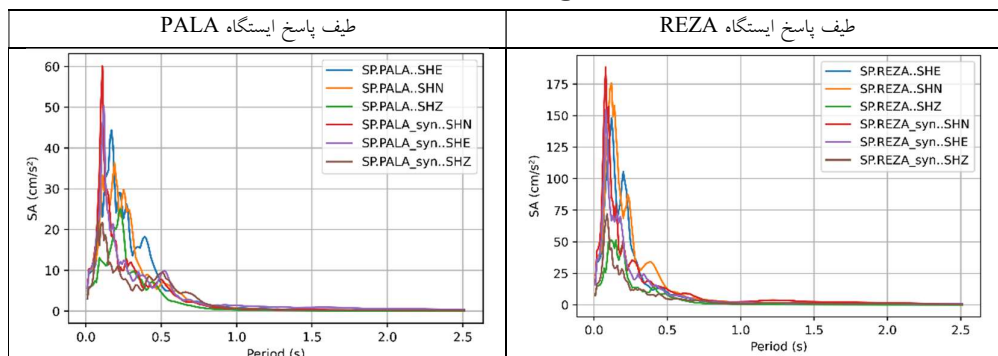
۱-۲-۴ نتایج طیف پاسخ زمین‌لرزه مرجع سال ۱۳۹۶ (ه.ش) سرپل‌ذهاب با بزرگای ۴/۷ در شکل ۴ طیف‌های پاسخ نگاشت‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای ایستگاه PALA و REZA مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، برای ایستگاه‌های PALA و REZA، برای نگاشت‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده، طیف پاسخ با ۵٪ میرایی و یک درجه آزادی محاسبه شد، که برای طیف پاسخ شبیه‌سازی شده، برای بیشینه شتاب زمین و شتاب طیفی نسبت به طیف پاسخ مشاهده‌ای، برآورد خوبی وجود دارد.

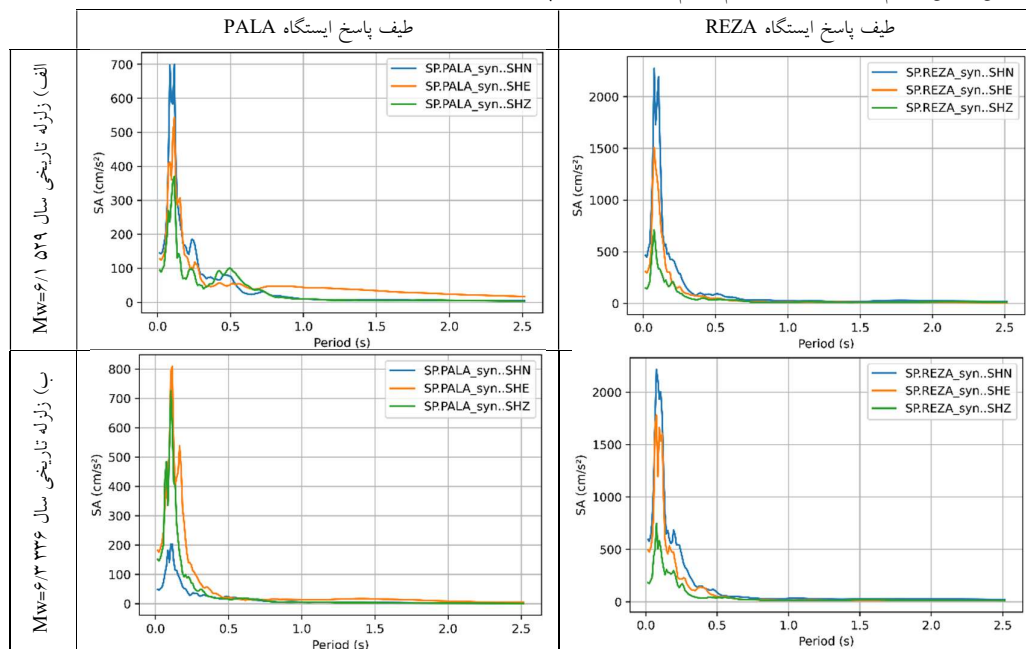
با ۵٪ میرایی و یک درجه آزادی محاسبه شد. میزان شتاب بیشینه زمین برای زمین‌لرزه‌های تاریخی سال ۵۲۹ (ه.ش)،  $M_w=6/1$  و زمین‌لرزه‌های تاریخی سال ۳۳۶ (ه.ش)،  $M_w=6/3$  سرپل‌ذهاب، در ایستگاه PALA به ترتیب ۱۰۰ تا ۱۵۰ و ۱۵۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه و برای ایستگاه REZA به ترتیب ۲۰۰ تا ۵۰۰ و ۵۰۰ تا ۶۰۰ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه نیز می‌رسد.

۳۳۶ (ه.ش)،  $M_w=6/3$  سرپل‌ذهاب طیف‌های پاسخ نگاشت‌های شبیه‌سازی شده بر مبنای زمین‌لرزه مرجع ایستگاه‌های PALA و REZA آورده شده است، که به‌منظور مقایسه، همه مؤلفه‌های شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و قائم با هم ترسیم شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، برای ایستگاه‌های PALA و REZA، بر مبنای زمین‌لرزه مرجع برای نگاشت‌های شبیه‌سازی شده، طیف پاسخ



شکل ۴. مقایسه طیف پاسخ مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده زمین‌لرزه مرجع سال ۱۳۹۶ (ه.ش) با بزرگای ۴/۷ سرپل‌ذهاب که تمام مؤلفه‌های شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و قائم برای مقایسه بهتر با هم ترسیم شده‌اند. ستون چپ مربوط به ایستگاه PALA و ستون راست مربوط به ایستگاه REZA است.



شکل ۵. طیف پاسخ‌های شبیه‌سازی شده به دست آمده برای مؤلفه قائم، شمالی-جنوبی و شرقی-غربی ایستگاه PALA در ستون چپ و طیف پاسخ‌های شبیه‌سازی شده به دست آمده برای مؤلفه قائم، شمالی-جنوبی و شرقی-غربی ایستگاه REZA در ستون راست به ترتیب برای الف) زلزله تاریخی سال ۵۲۹ (ه.ش)،  $M_w=6/1$  و ب) زلزله تاریخی سال ۳۳۶ (ه.ش)،  $M_w=6/3$ .

## ۵ نتیجه‌گیری

۱- هدف اصلی این پژوهش این بود که آیا می‌توان با استفاده از داده‌های زمین‌لرزه‌های حال حاضر و اطلاعات زمین‌شناسی و لرزه‌زمین‌ساختی منطقه، شکل موج و محتوای فرکانسی زمین‌لرزه‌هایی که در طول تاریخ در منطقه کرمانشاه رخ داده‌اند را شبه‌سازی کرد یا خیر؟ همان‌طور که می‌دانیم وجود چنین اطلاعات ارزشمندی از زمین‌لرزه‌های پیشین که گیرنده‌ای برای ثبت آن‌ها وجود نداشته، برای شناسایی خطر زمین‌لرزه و آمادگی هرچه بهتر در برابر این پدیده طبیعی حائز اهمیت است؛ در این پژوهش برخی از پارامترهای جنبش نیرومند زمین از قبیل تاریخچه زمانی و محتوای فرکانسی نگاهت‌ها، مدت دوام مؤثر زمین‌لرزه‌های مورد بررسی، زمان رسید موج P و موج S و همچنین طیف پاسخ زمین به همراه بیشینه شتاب زمین به هنگام رخداد زلزله شبه‌سازی شد. با اینکه وجود خطا در کار اتفاقی غیر قابل جلوگیری است، می‌توان گفت که نتایج بدست آمده در این پژوهش مناسب است.

۲- تمامی نگاهت‌های شبه‌سازی شده با نگاهت‌های مشاهده‌ای از هم‌پوشانی بسیار خوبی برخوردار بوده و بیشینه دامنه موج S و مدت دوام مناسبی برای زمین‌لرزه مرجع سرپل‌ذهاب سال ۱۳۹۶ (ه.ش) با بزرگای ۴/۷ بدست آمد، که مطابق آن برای زمین‌لرزه‌های تاریخی سرپل‌ذهاب نیز شکل موج و طیف دامنه فوریه حاصل شد.

۳- برای تمامی ایستگاه‌ها، طیف پاسخ شتاب با ضریب میرایی ۵ درصد و یک درجه آزادی محاسبه شد که برای طیف پاسخ شتاب شبه‌سازی شده، میزان تخمین خوبی در بیشینه شتاب زمین و شتاب طیفی نسبت به طیف پاسخ شتاب مشاهده‌ای وجود دارد و میزان شتاب بیشینه به نزدیکی ۶۵۰ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه نیز می‌رسد.

۴- با توجه به پارامترهای شبه‌سازی شده، بیشینه شتاب در ایستگاه‌ها به روش تابع تجربی گرین برآورد و با بیشینه شتاب مشاهده شده مقایسه گردید. دیده می‌شود که بیشینه

شتاب شبه‌سازی شده دارای روند یکسانی با افزایش فاصله از چشمه زمین‌لرزه در مقایسه با بیشینه شتاب مشاهده شده می‌باشد که نشان دهنده انتخاب مناسب پارامترها به عنوان پارامترهای ورودی برای شبه‌سازی می‌باشد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان با توجه به اینکه این مقاله در قالب طرح پژوهشی تحت عنوان: «شبه‌سازی زلزله‌های تاریخی ۱۲ فروردین سال ۳۳۷ (ه.ش)، Mw ۶/۳ و ۱۲ فروردین سال ۵۲۹ (ه.ش)، Mw ۶/۱ کرمانشاه با استفاده از داده پس‌لرزه‌های زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ از گله کرمانشاه به روش تابع تجربی گرین» به شماره پرونده ۶۲۰۱۰۱۳/۱۰۲ انجام شده است، لذا از شورای پژوهشی تحصیلات تکمیلی موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و همچنین شورای گروه زلزله‌شناسی آن موسسه تشکر و قدردانی می‌شود.

## منابع

- Aki, K., & Richards. P., (2002)., Quantitative seismology. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2002quse.book...A>
- Aki, K. (1968). Seismic displacements near a fault. *Journal of Geophysical Research*, 73(16), 5359–5376. <https://doi.org/10.1029/JB073i016p05359>.
- Ambraseys. N., Melville. C. P., & Falcon. N. L., (1982). A History of Persian Earthquakes. In *The Geographical Journal*. 149(3). <https://doi.org/10.2307/634025>
- Amiri Fard. R., Javan Doloei. G., Rahimi. H., & Farrokhi. M., (2019). Attenuation of P and S waves in Western part of Iran. *Geophysical Journal International*. 218(2). 1143–1156. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz209>.
- Hanks, T. C., & Kanamori, H. (1979). A Moment Magnitude Scale. 84(9), 2348–2350.
- Hartzell. S. H. (1978). Earthquake aftershocks as Green's functions. *Geophysical Research Letters*. 5(1). 1–4. <https://doi.org/10.1029/GL005i001p00001>.
- Hessami. K. Pantosti, D. Tabassi. H. Shabanian. E. Abbassi. M. R., Fegghi. K., & Solaymani. S. (2003). Paleoeearthquakes and slip rates of the

- North Tabriz Fault, NW Iran: Preliminary results. *Annals of Geophysics*. 46(5). 903–916. <https://doi.org/10.4401/ag-3461>.
- Hosseini. H., Pakzad. M., & Naserieh. S., (2019). Iranian regional centroid moment tensor catalog: Solutions for 2012–2017. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 286. 29–41. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2018.11.001>.
- Hutchings. L., (1991). “Prediction” of strong ground motion for the 1989 Loma Prieta earthquake using empirical Green’s functions. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 81(5). 1813–1837. <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article-abstract/81/5/1813/119565>.
- Hutchings. L., (1992). Modeling earthquake ground motion with an earthquake simulation program (EMPSYN) that utilizes empirical Green’s functions. <https://www.osti.gov/biblio/5616334>.
- Hutchings. L. (1994). Kinematic Earthquake Models and Synthesized Ground Motion using Empirical Green’s Functions Earthquake source studies View project Ground motion hazards from induced seismicity View project. <https://www.researchgate.net/publication/266854483>.
- Hutchings. L., & Viegas. G., (2012). Application of Empirical Green’s Functions in Earthquake Source. *Wave Propagation and Strong Ground Motion Studies*. 87–140. [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)
- Hutchings. L., & Wu. F. (1990). Empirical Green’s functions from small earthquakes: a waveform study of locally recorded aftershocks of the 1971 San Fernando earthquake. *Journal of Geophysical Research*. 95(B2) 1187–1214. <https://doi.org/10.1029/JB095iB02p01187>.
- Hutchings. L., Voulgaris. N., Kalogeras. I., Foxall. W., Stavrakakis. G., Ioannidou. E., Scognamiglio. L., & Savy. J., (2006). A physically based strong ground-motion prediction methodology; application to PSHA and the 1999 Athens earthquake. *Geophysical Journal International*. 168(2). 659–680. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2006.03178.x>
- International Institute of Earthquake Engineering and Seismology. <http://www.iiees.ac.ir/en/>.
- Iranian Seismological Center. [http://irsc.ut.ac.ir/newsview\\_fa.php?eventid=125729&network=earth\\_ismc\\_\\_](http://irsc.ut.ac.ir/newsview_fa.php?eventid=125729&network=earth_ismc__).
- Irikura. K., (1983). Prediction of strong acceleration motion using empirical Green’s function. 151–156.
- Kostrov. B. V., (1964). Selfsimilar problems of propagation of shear cracks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 28(5). 1077–1087. [https://doi.org/10.1016/0021-8928\(64\)90010-3](https://doi.org/10.1016/0021-8928(64)90010-3)
- McCallen. D., & Hutchings. L., (1995). Ground motion estimation and nonlinear seismic analysis. <https://www.osti.gov/biblio/123596>
- Mert. A., Hutchings. L., & Pinar. A., (2012). EGF Simulation of High Frequency Ground Motion. A Case Study for Mw=5.0 Central Marmara Fault Earthquake. 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE). July 2014. <https://doi.org/10.13140/2.1.2023.5203>
- Mousavi-Bafrouei. S., & Mahani. A., (2020). A comprehensive earthquake catalogue for the Iranian Plateau (400 BC to December 31. 2018). *Journal of Seismology*. 24. 709–724. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10950-020-09923-6>
- Sokos. E., & Zahradnik. J., (2008). ISOLA a Fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data. *Geosciences*. GSI. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300408000277>
- Songhori. A., Sadidkhouy. A., Pakzad. M., & Eshaghi. A., (2019). Simulation of Kermanshah, Ezgeleh earthquake on 12 Nov. 2017 with Mw=7.3 using empirical Green’s function method. The second conference on civil engineering, architecture, and urban planning in the countries of the Islamic world. [https://www.researchgate.net/publication/368894827\\_Simulation\\_of\\_Kermanshah\\_Ezgeleh\\_Earthquake\\_on\\_12\\_Nov\\_2017\\_With\\_Mw73\\_Using\\_Empirical\\_Green's\\_Function\\_Method](https://www.researchgate.net/publication/368894827_Simulation_of_Kermanshah_Ezgeleh_Earthquake_on_12_Nov_2017_With_Mw73_Using_Empirical_Green's_Function_Method).
- Wells. D. L., & Coppersmith. K. J., (1994). Empirical relationships among magnitude. rupture length. rupture width. rupture area and surface displacements. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 84(4). 974–1002.
- Zahradnik. J., & Sokos. E., (2018): ISOLA code for multiple-point source modeling –review. in *Moment Tensor Solutions - A Useful Tool for Seismotectonics*. Springer Natural Hazards. 1–28. doi:10.1007/978-3-319-77359-9.

## Simulation of historical earthquakes on 1st January 958 A.D., Mw = 6.3 and 1st Apr. 1150 A.D., Mw = 6.1 using the aftershocks data of 27 Nov. 2017 with Mw=7.3 by Empirical Green's Function Method

Ali Songhori<sup>1\*</sup>, Ahmad Sadidkhouy<sup>2</sup> and Mehrdad Pakzad<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 11 March 2023, Accepted: 25 June 2023)

### Summary

Zagros is very active in terms of seismicity and is the most seismic region of Iran. In the book on the history of earthquakes in Iran, two major earthquakes have been reported on 1st January 958 Mw 6.3, and 1st April 1150 Mw 6.1 (Ambraseys & Melville, 1982). It is well-known that the historical earthquakes consist of valuable information for identifying the hazard of earthquakes, completing the earthquake catalogs, better understanding the Zagros area, and better preparing for this natural phenomenon; on 12th November 2017, an earthquake with a magnitude of 7.3 occurred at a distance of 10 km from the Ezgleh and about 37 km northwest of Sarpolzahab city in Kermanshah province, located at the Iran-Iraq border. The earthquake location was close to historical earthquakes. In this regard, we used the empirical Green's function method to simulate the historical earthquake. Empirical Green's function evaluates parameters of strong ground motion such as time history, frequency content, effective duration, P and S wave arrival time, the Earth response spectrum, and the maximum acceleration of the earth that occurred during the earthquake. Empirical Green's function method is one of the most common and simple simulation methods for generating strong ground motion with geological heterogeneity effects, which is used to model ground motions using foreshocks and aftershocks. In this study, the simulation of one of the Sarpolzahab earthquake aftershocks was conducted by small aftershocks recorded in the Ezgeleh region, using the empirical function method. The temporary network data of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering was used for this study. The simulation results show that there is a good similarity between the waveforms, the Fourier amplitude spectra, and the simulated response spectra observed at the existing stations and that the errors are acceptable. The parameters of the acquired model consist of rupture velocity of 2.6 to 3.5 km/sec equivalent to 0.8 to 0.9 times the S-wave speed and healing velocity equal to 0.95 times the rupture velocity. The dimensions of the fault grids were 0.05x0.05 and the scalar seismic moment of the aftershock was  $1.04 \times 10^{23}$  Nm. In the simulation, asperities were not considered. The source time function was Kostrov-ramp and fault roughness was taken into account. Furthermore, the waveforms, Fourier amplitude spectra, and response spectra for the mentioned historical earthquakes were constructed with the results obtained from the reference earthquake for simulation. The results are reasonable; however, some errors are unavoidable.

**Keywords:** Strong ground motion, earthquake simulation, empirical Green's function, Kermanshah, historical earthquake, response spectrum