



### چکیده

با توجه به گسترش روز افزون مناطق شهری و افزایش جمعیت و نیز توسعه پروژه‌های عمرانی احتمال خسارات ناشی از زلزله‌های بزرگ رو به افزایش است. در این میان، استفاده از تاریخچه‌های زمانی متناسب با منطقه مورد نظر برای طراحی یا بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها مورد نیاز است. این در حالی است که در بسیاری از مناطق وجود شتاب‌نگاشت واقعی برای انجام این اقدامات در دسترس نیست بنابراین تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی بر اساس ویژگی منبع زلزله و ساختگاه دارای اهمیت زیادی است. تحقیق حاضر به منظور ارائه روابطی مختص به فلات ایران جهت تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی بر مبنای یک روش تصادفی صورت گرفته است. بر این اساس، با استفاده از داده‌های شتاب‌نگاری شامل 258 زوج شتاب‌نگاشت از زلزله‌های رخ داده در فلات ایران با بزرگای گشتاوری بیش از 5/5 ریشتر اقدام به استخراج پارامترهای لرزه‌ای شده است و پس از آن با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی با ویژگی‌های تصادفی روابطی جهت تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی ارائه شده است. این روابط به طور جداگانه برای ساختگاه‌هایی با سرعت موج برشی ( $V_s$ ) بیشتر و کمتر از 600 متر بر ثانیه و برحسب مؤلفه‌های عمود بر گسل و موازی با گسل به دست آمده است. در نهایت، به منظور صحت‌سنجی روابط ارائه شده به تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی متناظر با زلزله‌ی سال 2002 در منطقه آوج استان قزوین با بزرگای گشتاوری 6/4 مربوط به گسل معکوس آوج پرداخته و نتایج با رکورد واقعی ثبت‌شده در این منطقه مقایسه شده است.

**کلمات کلیدی:** شتاب‌نگاشت مصنوعی، فلات ایران، مدل تصادفی، تحلیل رگرسیون، گسل معکوس، طیف پاسخ

## ارائه روابطی برای تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی در فلات ایران با رویکرد تصادفی

ایمان عشایری (نویسنده مسؤل)

استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه رازی

Email: [iashaveri@razi.ac.ir](mailto:iashaveri@razi.ac.ir)

مسعود نیک‌بختان

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه رازی

### 1- مقدمه

همانند روش‌هایی که آیین‌نامه‌ها برای مقیاس کردن تاریخچه‌های زمانی حرکات زمین پیشنهاد کرده‌اند. با توجه به اینکه، برای بسیاری از مناطق جهان و برای بسیاری از طراحی‌های مورد نظر پایگاه داده‌های مربوط به حرکات ثبت شده‌ی پراکنده یا به‌طور کلی فاقد اطلاعات می‌باشند، به‌ناچار باید حرکات ثبت شده به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای تغییر پیدا کنند. این تغییرات و اصلاحات نگرانی‌هایی در مورد تصدیق و اعتبار این راهکارها ایجاد کرده‌اند. چنانچه حرکات تغییر یافته ممکن است که حرکات زمین در طول زمین‌لرزه حقیقی را نمایان نسازد. استفاده از این روش‌ها اغلب بحث‌برانگیز است که بدون یک پردازش دقیق ممکن است

در دهه‌های اخیر پیشرفت‌های عمده‌ای در حوزه تحقیقات و رهیافت‌های مهندسی زلزله، توسعه‌ی مفاهیم و ابزارهای تحلیل و طراحی انواع سازه‌ها در مقابل زلزله صورت گرفته است، که شامل توسعه روش‌های تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها همچون تحلیل دینامیکی خطی و غیرخطی تاریخچه‌ی زمانی پاسخ سازه و نیز مفهوم مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد<sup>1</sup> می‌باشند. در راهکار فعلی مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد تاریخچه‌های زمانی جنبش زمین جهت تحلیل سازه‌ها از پایگاه داده‌های حرکات ثبت شده‌ی زمین، از زمین‌لرزه‌هایی که در گذشته رخ داده‌اند، انتخاب می‌شوند که اغلب طوری تغییر یافته‌اند که با شرایط مطلوب متناسب شوند.

تجربی گرین<sup>2</sup> شناخته می‌شوند. این تکنیک یکی از قابل اطمینان‌ترین روش‌ها در بیان مشخصه‌های حرکات زمین است. یکی از معایب عمده‌ی این روش لزوم به‌کارگیری پارامترهای متعدد جهت محاسبه توابع گرین است که کار پیش‌بینی و شبیه‌سازی جنبش زمین را دشوار می‌سازد [10-12].

در مطالعات گذشته مدل‌های ارائه‌شده عموماً به‌گونه‌ای هستند که در تولید و شبیه‌سازی حرکات زمین تغییرپذیری (به این معنی که زلزله‌هایی که در یک منبع رخ می‌دهند دارای پارامترهای لرزه‌شناسی متفاوتی از هم هستند)، ناشی از وقوع زلزله در منبع را در نظر نمی‌گیرند. مطالعه حاضر به‌طور ویژه، یک مدل تصادفی از جنبش زمین در اثر زمین‌لرزه را دنبال می‌کند که دارای ویژگی‌های مربوط به جنبش حقیقی زمین می‌باشد و تغییرپذیری ناشی از وقوع زلزله در منبع را به‌واسطه محقق‌سازی پارامترهای تصادفی در نظر می‌گیرد و نیز برحسب پارامترهایی توصیف شده است که به‌طور معمول یک سناریوی طراحی را تعریف می‌کنند. این روش در سال 2010 توسط رضاییان و کایورخیان بر اساس تعدادی از زلزله‌های رخ داده در نقاط مختلف دنیا پارامتربندی شد [1]. مطالعاتی پیرامون این روش جهت شبیه‌سازی زلزله‌های دور از گسل و نزدیک گسل صورت گرفته است که مطالعات مربوط به بخش فرکانس پایین یا همان زلزله‌های نزدیک گسل توسط دباغی و کایورخیان انجام شده است [13]. این مدل می‌تواند برای ایجاد حرکات مصنوعی زمین منطبق بر واقعیت جهت تحلیل غیر خطی تاریخچه پاسخ مورد استفاده قرار بگیرد، یا می‌تواند به‌طور مستقیم جهت تحلیل دینامیک غیر خطی تصادفی مورد استفاده قرار بگیرد.

در این مطالعه با استفاده از داده‌های شتاب‌نگاری مربوط به زلزله‌های رخ داده در فلات ایران بر گرفته از پایگاه داده‌های شبکه شتاب‌نگاری ملی ایران، با استفاده از مدل تصادفی ارائه‌شده توسط رضاییان و کایورخیان [1، 14]، اقدام به استخراج روابطی برای تولید شتاب‌نگاشت مختص فلات ایران شد. همچنین جهت صحت‌سنجی مطالعات صورت گرفته اقدام به تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی متناظر با زلزله‌ی سال 2002 در منطقه آوج استان قزوین

حرکاتی ارائه کند که دارای ویژگی‌های غیر حقیقی هستند. از سوی دیگر، از آنجایی که پاسخ غیر خطی سازه به ویژگی‌های بارگذاری لرزه‌ای حساس می‌باشد، باید به اندازه کافی در نمایش حقیقی حرکات زمین دقت نمود. جهت اجتناب از انتخاب حرکات زمین از محل‌های نامناسب، همراه با مقیاس نمودن‌های غیر منطقی و انطباق طیف، یک راهکار جایگزین استفاده از حرکات ساختگی همراه با حرکات ثبت شده یا به جای حرکات ثبت شده می‌باشد [1].

به‌طور کلی می‌توان تکنیک‌های تولید حرکات مصنوعی زمین را در سه دسته تفکیک نمود [2-3]:

الف) تکنیک‌های شبیه‌سازی تجربی با استفاده از توسعه مدل‌های تصادفی مبتنی بر ویژگی‌های آماری پارامترهای گوناگون حرکات زمین: در این زمینه، رهیافت‌های شبیه‌سازی حرکات زمین به‌صورت تجربی کالیبره شده‌اند که به جای مدل نمودن گسیختگی در گسل، انتشار امواج و وارد نمودن اثرات بزرگنمایی در ساختگاه، مستقیماً منجر به تولید حرکات زمین می‌شوند [4]. این رهیافت‌ها به‌طور محاسباتی روش‌های ساده‌ای هستند. هرچند اغلب مدل‌های تصادفی مبتنی بر اصلاح فرآیندهای نوفه سفید گاوسی هستند که دشواری‌هایی در زمینه تحقق نامانایی در حوزه زمان و فرکانس آنها وجود دارد [5-7].

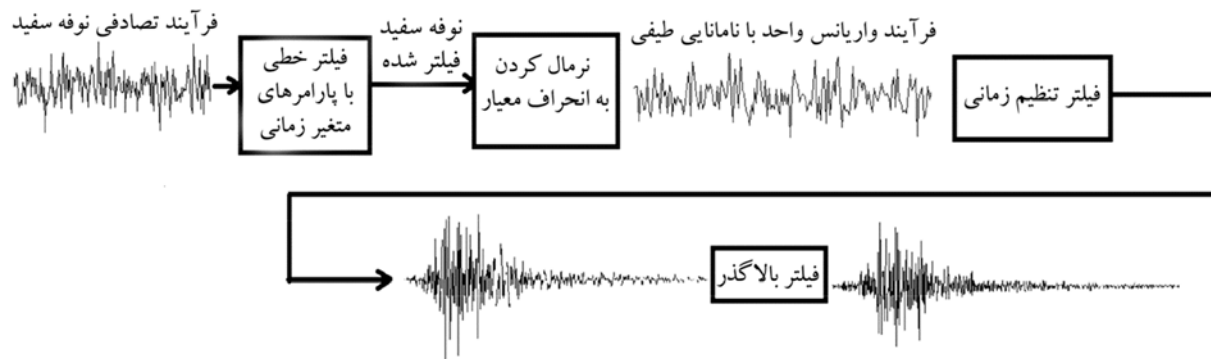
ب) تکنیک‌های شبیه‌سازی مبتنی بر مکانیسم‌های وقوع زمین‌لرزه و سازوکار در منبع و بهره‌گیری از تئوری انتشار یک‌بعدی امواج در محیط‌های الاستیک: به‌طور کلی در این تکنیک با انتخاب یک فرآیند زمانی تصادفی مناسب و گرفتن طیف دامنه فوریه این فرآیند و با ضرب نمودن یک تابع طیف در آن که وابسته به ویژگی‌های منبع و خصوصیات مسیر انتشار امواج است، می‌توان به یک فرآیند تصادفی نامانای در حوزه فرکانس دست یافت. اگر چنین فرآیندی در حوزه زمان با یک تابع پوش شتاب که متأثر از ویژگی‌های ساختگاه است ضرب شود، می‌توان به دسته‌ای از حرکات مصنوعی زمین دست یافت [8-9].

پ) تکنیک‌های ترکیبی شبیه‌سازی که تحت عنوان توابع

در حوزه فرکانس فاقد نامانایی است، بنابراین باید ترتیبی اتخاذ شود تا نامانایی در حوزه‌ی زمان و فرکانس محقق شود. برای نیل به این مهم ابتدا یک فیلتر خطی با پارامترهای متغیر زمانی تعریف می‌شود. با گذراندن فرآیند نوفه سفید گوسی از این فیلتر و نرمال کردن فرآیند به مقدار انحراف معیارش به یک فرآیند واریانس واحد نامانا در حوزه فرکانس دست خواهیم یافت. پس از این مرحله، با تعریف یک فیلتر تنظیم زمانی (تابع مدوله) و عبور دادن فرآیند از آن به یک تاریخچه‌ی زمانی از شتاب خواهیم رسید. در فرآیندی که حاصل شده ممکن است در پایان جنبش زمین مقادیر صفر در تاریخچه‌های زمانی سرعت و جابه‌جایی محقق نشوند، بنابراین، گذراندن فرآیند از یک فیلتر بالاگذر برای دستیابی به مقادیر صفر جابه‌جایی و سرعت در انتهای زمان جنبش زمین ضروری است. این فرآیند پس از پردازش، محتوای دوره طولانی‌مدت طیف پاسخ حاصل را تصحیح می‌کند. به‌طور کلی بیان ریاضی مدل مطابق رابطه (1) می‌باشد:

$$f(t) = \int_{-\infty}^t h(t-\tau, \lambda) w(\tau) d\tau \quad (1)$$

رابطه (1) نمایانگر یک فرآیند تصادفی نوفه سفید فیلتر شده می‌باشد که در آن  $w(\tau)$  بیان‌کننده یک فرآیند تصادفی نوفه سفید است و  $h(t-\tau, \lambda)$  نیز مشخص‌کننده تابع پاسخ فیلتر خطی به یک پالس<sup>3</sup> می‌باشد، که  $\lambda$  یک مجموعه از پارامترها را ارائه می‌کند و برای شکل‌دهی پاسخ فیلتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در رابطه‌ی (1) به‌واسطه‌ی تابع پاسخ نامانایی طیفی فرآیند نوفه سفید محقق می‌شود، لیکن این فرآیند برای تولید شتاب‌نگاشت کفایت نمی‌کند.



شکل (1): فرآیند تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی با روش تصادفی [1]

با بزرگای گشتاوری 6/4 مربوط به گسل معکوس (راندگی) آوج نموده و نتایج با رکورد واقعی ثبت شده در این منطقه مقایسه شده است. در نهایت، طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌های تولید شده متناسب با ناحیه آوج، با طیف طرح آیین‌نامه 2800 ویرایش چهارم مقایسه شده است.

## 2- مدل تصادفی شبیه‌سازی حرکات زمین

### 2-1- تعریف مدل

در سال 2010 فرمولاسیون جدیدی از فرآیند نوفه سفید فیلتر شده بیان شد که نامانایی موقتی و طیفی از طریق تغییر در زمان و با تغییر پارامترهای فیلتر نسبت به زمان را به دست می‌دهد. با یک ارائه‌ی گسسته زمانی از فرآیند، می‌توان دامنه فرآیند را در هرگام زمانی به‌عنوان جزئی از مجموع متغیرهای تصادفی نرمال استاندارد با ضرایب متغیر زمانی در نظر گرفت. این فرم از اهمیت ویژه‌ای برای شبیه‌سازی دیجیتال و نیز برای تحلیل ارتعاش تصادفی غیر خطی برخوردار می‌باشد. به دنبال این، تفسیر ویژگی‌های حرکات حقیقی زمین به‌عنوان ویژگی‌های آماری یک فرآیند تصادفی در نظر گرفته می‌شوند. این مدل به گونه‌ای پارامتربندی شده است که پارامترهای معدودی، ویژگی‌های آماری عمده حرکات زمین را کنترل کنند.

در روش مذکور تولید شتاب‌نگاشت همان گونه که در شکل (1) نشان داده شده است، به ترتیب مراحل زیر است [1]. ابتدا یک فرآیند تصادفی نوفه سفید گوسی دارای میانگین صفر تعریف می‌شود. با توجه به اینکه فرآیند مذکور هم در حوزه زمان و هم

$$\hat{x}(t) = q(t, \alpha) \left[ \frac{\sqrt{2\pi sDt}}{\hat{\sigma}_f(t)} \sum_{i=1}^k h[t-t_i, \lambda(t_i)] u_i \right] \quad (5)$$

با گسسته‌سازی فرآیند در حوزه‌ی زمان این امکان فراهم می‌شود که مدت حرکات زمین به یک توالی از نقاط زمانی دارای فضای برابر گسسته شوند که  $t_i = i \times Dt$  برای  $i = 0, 1, \dots, n$  می‌باشد، در حالی که  $Dt$  یک گام زمانی کوتاه می‌باشد [1, 14].

## 2-2- پارامترهای تابع مدوله و فیلتر خطی

### 2-2-1- تابع مدوله

در این مطالعه از تابع مدوله گاما استفاده شد که با شکل طبیعی شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده متناسب است. تابع مدوله گاما توسط رابطه (6) تعریف می‌شود.

$$q(t, \alpha) = \alpha_1 (t - T_0)^{\alpha_2 - 1} \exp[-\alpha_3 (t - T_0)]; \quad T_0 \leq t \quad (6)$$

این تابع به دلیل تناسب با تابع چگالی احتمال گاما نام گذاری شده است. این مدل دارای 4 پارامتر  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, T_0)$  می‌باشد، که  $\alpha_1, \alpha_3 > 0$  و  $\alpha_2 > 1$  می‌باشند.  $T_0$  مشخص کننده آغاز فرآیند است که معمولاً برای اهداف شبیه‌سازی برابر صفر در نظر گرفته می‌شود [1]. از سه پارامتر دیگر،  $\alpha_1$  شدت فرآیند،  $\alpha_2$  شکل تابع تغییر و  $\alpha_3$  دوام حرکت را کنترل می‌کنند. از آنجایی که می‌خواهیم پارامترهای تابع مدوله را به ویژگی‌های زمین‌لرزه و مکان حرکات ثبت شده مرتبط سازیم، بهتر است که این پارامترها بر حسب ویژگی‌های حرکات زمین تعریف شوند که دارای معنا و مفهوم فیزیکی می‌باشند. به همین دلیل،  $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$  به سه متغیر مبتنی بر ویژگی‌های فیزیکی  $(\bar{I}_a, D_{5-95}, t_{mid})$  مرتبط می‌شوند. متغیر نخست  $\bar{I}_a$  نشان‌دهنده‌ی شدت آریاس فرآیند شتاب  $x(t)$  می‌باشد،  $D_{5-95}$  نشان‌دهنده‌ی مدت زمان مؤثر حرکت در نظر گرفته شده است [15]، به‌عنوان بازه‌ی زمانی لحظه‌هایی تعریف شده که 5% و 95% از شدت مورد انتظار آریاس محقق می‌شود.  $t_{mid}$  را به‌عنوان زمانی که در آن 45% سطح شدت آریاس مورد انتظار حاصل می‌شود انتخاب شد.

از این رو می‌باید این فرآیند در حوزه زمان نیز نامانا شود. نامانایی در حوزه‌ی زمان به‌واسطه‌ی ورود یک تابع مدوله به رابطه (1) به شکل رابطه‌ی (2) محقق می‌شود [14].

$$x(t) = q(t, \alpha) \left[ \frac{1}{\sigma_f} \int_{-\infty}^t h(t-\tau, \lambda) w(\tau) d\tau \right] \quad (2)$$

که  $q(t, \alpha)$  یک تابع مدوله جبری نامنفی، و  $\alpha$  یک مجموعه از پارامترهای مورد استفاده برای کنترل شکل دهی و شدت تابع می‌باشد ( $\alpha$  نشانگر یک مجموعه از این پارامترها است). به دلیل نرمال‌سازی با استفاده از  $\sigma_f$  (انحراف معیار فرآیند نوفه سفید)، فرآیند داخل قلاب در رابطه (2) دارای واریانس واحد می‌باشد. در نتیجه تابع  $q(t, \alpha)$ ، انحراف معیار فرآیند  $x(t)$  را تعریف می‌کند، رابطه (3).

$$\sigma_x(t) = q(t, \alpha) \quad (3)$$

بنابراین تابع  $q(t, \alpha)$  به‌طور کامل نامانایی موقتی فرآیند را تضمین می‌کند. تابع مدوله (تعدیل)،  $q(t, \alpha)$  که در مدل‌سازی حرکات زمینی استفاده شده است از یک مقدار صفر شروع می‌شود و به تدریج نسبت به زمان افزایش می‌یابد. به علاوه مقدار میرایی فیلتر که برای مدل‌سازی حرکات زمین استفاده شده است به‌طور معمول بزرگ می‌باشد، بنابراین  $IRF(h[t-\tau, \lambda(\tau)])$  به سرعت با افزایش  $t - \tau$  کاهش می‌یابد. تحت این شرایط کران پایین انتگرال در روابط (1) و (2)، که  $-\infty$  است می‌تواند با صفر (یا یک مقدار محدود منفی) بدون هیچ‌گونه نقصان در دقت و صحت مسئله جایگزین شود. این جایگزینی تا حدودی این امکان را فراهم می‌سازد که نقاط زمانی گسسته از صفر آغاز شوند. با گسسته‌سازی فرآیند در حوزه‌ی زمان می‌توان رابطه (2) را به شکل رابطه‌ی (4) بازنویسی کرد [1, 14].

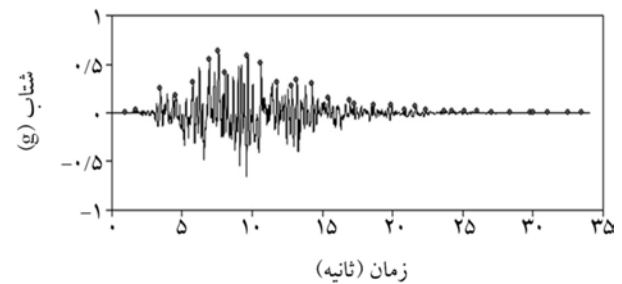
$$\hat{x}(t) = q(t, \alpha) \times \left[ \frac{1}{\hat{\sigma}_f(t)} \sum_{i=1}^k h[t-t_i, \lambda(t_i)] \int_{t_{i-1}}^{t_i} w(\tau) d\tau \right]; \quad (4)$$

$$t_k \leq t < t_{k+1} \hat{x}(t)$$

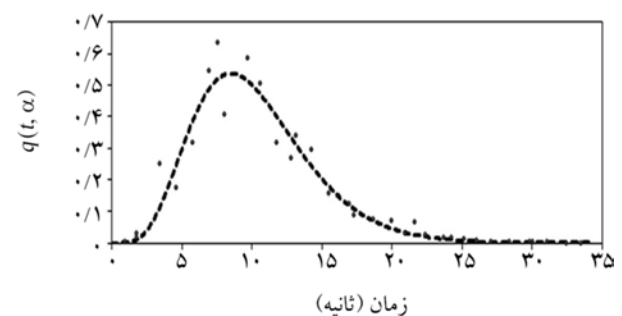
با جایگزین نمودن حاصل انتگرال رابطه‌ی (4) با پارامتر  $w_i$  و معرفی پارامتر  $u_i$  به شکل  $u_i = w_i / \sqrt{2\pi sDt}$  به رابطه (4) به صورت رابطه‌ی (5) خلاصه می‌شود:

## 2-2-2- داده‌های شتاب‌نگاری

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه مشتمل بر 359 رکورد می‌باشند که از شبکه‌ی شتاب‌نگاری ملی ایران دریافت شده‌اند، این اطلاعات مربوط به زلزله‌های رخ داده در فلات ایران با بزرگای گشتاوری برابر یا بیش از 5/5 ریشتر از ابتدای سال 1997 تا اواخر سال 2014 هستند [16]. از میان آنها 258 زوج شتاب‌نگاشت شامل دو مؤلفه افقی عمود بر هم برحسب فاصله رو مرکزی بین 10 تا 100 کیلومتر انتخاب شدند. با بررسی شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده از زلزله‌های رخ داده در فلات ایران و تناسب آنها با تابع توزیع گاما مطابق شکل (2)، روابط (7) و (8) برای تعیین پارامترهای  $(\alpha_1, \alpha_2)$  به دست آمدند.



(الف) شناسایی نقاط حداکثر در بازه‌های زمانی یک ثانیه در شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده



(ب) تناسب نقاط حداکثر با تابع توزیع احتمال گاما

شکل (2): تناسب شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده با تابع توزیع احتمال گاما.

$$\alpha_3 = 2.712 \exp(-0.164 D_{5-95}) + 0.14; \quad (7)$$

$$R^2 = 0.83$$

$$2 \left( \frac{\alpha_2 - 1}{\alpha_3} \right) = 1.698 t_{mid} + 2.43; \quad (8)$$

$$R^2 = 0.915$$

پارامتر  $(\alpha_1)$  نیز با رابطه (9) ارائه می‌شود [1]:

$$\bar{I}_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_n} \alpha_1^2 (t)^{(2\alpha_2-1)-1} e^{2\alpha_3 t} dt; \quad (9)$$

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{2g}{\pi} \bar{I}_a \frac{(2\alpha_3)^{2\alpha_2-1}}{G(2\alpha_2-1)}}$$

## 2-2-3- فیلتر خطی

در حوزه فرکانس، ویژگی‌های فرآیند مدل با انتخاب فیلتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد، یعنی شکل  $h[t-\tau, \lambda(\tau)]$  و  $IRF$  پارامترهای متغیر زمانی آن  $\lambda(\tau)$  برای شکل‌دهی پاسخ فیلتر مورد استفاده قرار گرفته است. به ویژه برای یک فیلتر مرتبه دوم (به کار گرفته شده در این مطالعه)، محتوای فرکانس متغیر زمانی فرآیند می‌تواند ناشی از فرکانس طبیعی و میرایی فیلتر نسبت به زمان تحت کنترل قرار بگیرد. در این مطالعه رابطه‌ی (10) انتخاب شد:

$$h[t-\tau, \lambda(\tau)] = \frac{\omega_f(\tau)}{\sqrt{1-\zeta_f^2(\tau)}} \exp[-\zeta_f(\tau)\omega_f(\tau)(t-\tau)] \times \sin[\omega_f(\tau)\sqrt{1-\zeta_f^2(\tau)}(t-\tau)]; \tau \leq t \quad (10)$$

که نمایانگر پاسخ شبه شتاب یک نوسانگر خطی تک درجه آزادی در معرض یک ضربه‌ی واحد می‌باشد، که در آن  $\tau$  زمان پالس و  $\lambda(\tau) = [\zeta_f(\tau), \omega_f(\tau)]$  مجموعه پارامترهای فیلتر می‌باشند، به علاوه این که  $\omega_f(\tau)$  مشخص کننده‌ی فرکانس طبیعی و  $\zeta_f(\tau)$  مشخص کننده‌ی نسبت میرایی می‌باشد که هر دو به زمان دوام پالس وابسته هستند. انتظار می‌رود که  $\omega_f(\tau)$ ، فرکانس غالب فرآیند حرکات زمین را تحت تأثیر قرار دهد، در حالی که  $\zeta_f(\tau)$ ، پهنای باندش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با استفاده از یک مدل ساده و بر مبنای تحلیل شمار زیادی از شتاب‌نگاشت‌ها، یک شکل خطی برای فرکانس فیلتر در نظر گرفته می‌شود، رابطه (11) [1].

$$\omega_f(\tau) = \omega_{mid} + \omega'(t - t_{mid}) \quad (11)$$

که در آن  $\omega_f(\tau)$  فرکانس فیلتر است و  $\omega_{mid}$  نشان‌دهنده‌ی نرخ تغییر فرکانس فیلتر در  $t_{mid}$  و  $\omega'$  نشان‌دهنده‌ی نرخ تغییر فرکانس فیلتر با زمان می‌باشد. به عنوان یک معیار فرکانس غالب

3-1- داده‌های با سرعت موج برشی کمتر از 600 متر بر ثانیه  
تعداد 136 زوج شتاب‌نگاشت در ایستگاه‌های دارای بستر با  
سرعت موج برشی کمتر از 600 متر بر ثانیه به ثبت رسیده بودند،  
که ویژگی‌های آماری پارامترهای استخراج شده به شرح جداول  
(1) و (2) می‌باشد. در این جداول مقادیر حداقل، حداکثر،  
میانگین نمونه، انحراف از معیار و توابع توزیع احتمال پارامترهای  
شناسایی شده نمایش داده شده‌اند.

3-2- داده‌های با سرعت موج برشی بیشتر از 600 متر بر ثانیه  
تعداد 122 زوج شتاب‌نگاشت در ایستگاه‌های دارای بستر  
با سرعت موج برشی بیشتر از 600 متر بر ثانیه به ثبت رسیده  
بودند، که ویژگی‌های آماری پارامترهای استخراج شده  
به شرح جداول (3) و (4) می‌باشد. در این جداول نیز مقادیر  
حداقل، حداکثر، میانگین نمونه، انحراف از معیار و  
توابع توزیعات احتمال پارامترهای شناسایی شده نمایش  
داده شده‌اند.

حرکات ثبت شده، نرخ تقاطع سطح صفر (هنگامی که علامت  
سیگنال از منفی به مثبت تغییر می‌کند) در نظر گرفته می‌شود.  
به منظور شناسایی دو پارامتر  $\omega_{mid}$  و  $\omega'$  برای یک حرکت  
ثبت‌شده‌ی معین، یک چند جمله‌ای مرتبه دوم با شمارش  
(تعداد) تجمعی نقاط تقاطع سطح صفر شتاب‌نگاشت مورد نظر  
متناسب شد.

### 3- تعیین ویژگی‌های آماری و انجام تحلیل رگرسیون

پس از تعریف پارامترهای  $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \omega_{mid}, \omega, \zeta_f(\tau))$   
اقدام به شناسایی و استخراج آنها از روی داده‌های شتاب‌نگاری  
شد. با توجه به تفاوت نگاشت‌های ثبت‌شده بر روی سنگ بستر و  
نهشته‌های نرم، داده‌ها در دو دسته بر حسب سرعت موج برشی  
ایستگاه تقسیم‌بندی شدند. علاوه بر این در هر دسته،  
شتاب‌نگاشت‌ها با استفاده از روش پیشنهادی پنزین و واتب [17]،  
بر حسب مؤلفه‌های اصلی تفکیک شدند (مؤلفه‌ی عمود بر گسل  
و مؤلفه‌ی موازی با گسل).

جدول (1): ویژگی‌های آماری پارامترهای شناسایی شده مدل برای داده‌های با سرعت موج برشی کمتر از 600 متر بر ثانیه عمود بر گسل

پارامتر	مقادیر حداقل	مقادیر حداکثر	میانگین نمونه	انحراف معیار	توزیعات آماری
$I_a (s.g)$	0/0469	8/34	0/212	0/7708	Pearson
$D_{5-95} (S)$	2/58	63/67	20/21	11/36	Gamma
$t_{mid} (S)$	2/33	41/42	13/2	6/53	Log Logistic
$\omega_{mid} / 2\pi (Hz)$	1/497	33/07	5/117	3/6017	Dagum
$\omega' / 2\pi (Hz)$	-0/0022	0/00068	-0/00041	0/00042	Gumbel Min
$\zeta_f (Ratio)$	0/006	0/975	0/3956	0/2	Johnson SB

جدول (2): ویژگی‌های آماری پارامترهای شناسایی شده مدل برای داده‌های با سرعت موج برشی کمتر از 600 متر بر ثانیه موازی با گسل

پارامتر	مقادیر حداقل	مقادیر حداکثر	میانگین نمونه	انحراف معیار	توزیعات آماری
$I_a (s.g)$	0/0269	5/11	0/149	0/496	Burr
$D_{5-95} (S)$	2/595	56/165	21/81	10/956	Weibull
$t_{mid} (S)$	2/715	37/68	13/58	6/39	Dagum
$\omega_{mid} / 2\pi (Hz)$	1/7045	10	4/69	1/8	Log Logistic
$\omega' / 2\pi (Hz)$	-0/00616	0/001	-0/00042	0/000646	Cauchy
$\zeta_f (Ratio)$	0/005	0/829	0/416	0/1864	Gumbe Min



جدول (3): ویژگی‌های آماری پارامترهای شناسایی شده مدل برای داده‌های با سرعت موج برشی بیشتر از 600 متر بر ثانیه عمود بر گسل

پارامتر	مقادیر حداقل	مقادیر حداکثر	میانگین نمونه	انحراف معیار	توزیعات آماری
$I_a (s.g)$	0/00334	2/542	0/158	0/382	Frechet
$D_{5-95} (S)$	2/135	61/225	14/57	8/813	Weibull
$t_{mid} (S)$	2/435	32/605	10/151	4/8	Weibull
$\omega_{mid} / 2\pi (Hz)$	1/685	17/198	6/091	2/559	Generalized Gamma
$\omega' / 2\pi (Hz)$	-0/00354	0/00123	-0/0006	0/000652	Gumbel Min
$\zeta_f (Ratio)$	0/001	0/972	0/36122	0/2316	Johnson SB

جدول (4): ویژگی‌های آماری پارامترهای شناسایی شده مدل برای داده‌های با سرعت موج برشی بیشتر از 600 متر بر ثانیه موازی با گسل

پارامتر	مقادیر حداقل	مقادیر حداکثر	میانگین نمونه	انحراف معیار	توزیعات آماری
$I_a (s.g)$	0/0277	1/648	0/1294	0/3017	Burr
$D_{5-95} (S)$	2/75	61/225	15/55	8/82	Generalized Extreme value
$t_{mid} (S)$	2/515	32/605	10/37	4/864	Rayleigh
$\omega_{mid} / 2\pi (Hz)$	2/138	30/45	6/67	3/988	Log Logistic
$\omega' / 2\pi (Hz)$	-0/0037	0/003	-0/00057	0/000742	Burr
$\zeta_f (Ratio)$	0/01	0/865	0/388	0/22	Generalized Extreme Value

### 3-3- تحلیل رگرسیون

جهت انجام این تحلیل می‌بایست تأثیر تصادفی داده‌ها را در نظر گرفت، از طرفی به دلیل اینکه از هر زلزله رخ داده تعداد متفاوتی شتاب‌نگاشت وجود دارد، می‌باید تأثیرات این خوشه‌بندی نابرابر در نظر گرفته شود. علاوه بر این جهت انجام رگرسیون می‌بایست داده‌ها دارای توزیع نرمال باشند. از این رو با استفاده از رابطه (12) داده‌ها به فضای نرمال تبدیل می‌شوند.

$$v_i = F^{-1}[F_{\theta_i}(\theta_i)] \quad i = 1, 2, \dots, n_p \quad (12)$$

که  $F_{\theta_i}(\theta_i)$  همان تابع توزیع تجمعی (CDF) هر پارامتر با تابع توزیع احتمال (PDF) اولیه است. نهایتاً با استفاده از انجام تحلیل رگرسیون خطی به روابط (13) و (14) دست خواهیم یافت.

$$v_i = \beta_{i0} + \beta_{i1}F + \beta_{i2}\left(\frac{M}{6}\right) + \beta_{i3}\left(\frac{R}{25}\right) + \beta_{i4}\left(\frac{V}{435}\right) + \eta_i + \varepsilon_i \quad (13)$$

$$v_i = \beta_{i0} + \beta_{i1}F + \beta_{i2}\left(\frac{M}{6}\right) + \beta_{i3}\left(\frac{R}{25}\right) + \beta_{i4}\left(\frac{V}{880}\right) + \eta_i + \varepsilon_i \quad (14)$$

در روابط (13) و (14)،  $i=1$  نشان‌دهنده‌ی  $I_a$ ،  $i=2$  نشان‌دهنده‌ی  $D_{5-95}$ ،  $i=3$  نشان‌دهنده‌ی  $t_{mid}$ ،  $i=4$  نشان‌دهنده‌ی  $\omega_{mid}$ ،  $i=5$  نشان‌دهنده‌ی  $\omega'$ ،  $i=6$  و نشان‌دهنده‌ی  $\zeta_f$  می‌باشد. رابطه‌ی (13) مربوط به داده‌های با سرعت موج برشی کمتر از 600 متر بر ثانیه و رابطه‌ی (14) مربوط به داده‌های با سرعت موج برشی بیشتر از 600 متر بر ثانیه می‌باشد. نتایج تحلیل رگرسیون شامل ضرایب بردار رگرسیون، مقادیر باقیمانده و مؤلفه‌های واریانس در جداول (5) تا (8) نشان داده شده‌اند. سه عبارت نخست در روابط (13) و (14) تأثیر منبع را منعکس می‌کند که امواج زمین‌لرزه را ایجاد می‌کنند و برای گسل از نوع امتداد لغز  $F=0$ ، این تأثیر با استفاده از  $\beta_{i0}$  و  $\beta_{i2}$  کنترل می‌شود، در حالی که برای گسل از نوع معکوس،  $F=1$  با

$\eta_i$  به ترتیب نشان‌دهنده‌ی باقی‌مانده‌ی درون خوشه‌ای و باقی‌مانده‌ی کل هستند. پارامترهای  $\sigma^2$ ،  $\tau^2$  نیز مؤلفه‌های واریانس هستند [18]، که در تکمیل فرآیند تولید شتاب‌نگاشت به آنها نیاز خواهیم داشت. پارامترهای برآورد شده در جداول فوق، برخی اطلاعات جالب توجه فراهم می‌کنند. به‌عنوان مثال، چنانچه مورد انتظار است، مشاهده می‌شود که شدت آریاس با بزرگی افزایش و با فاصله و سختی ساختگاه کاهش می‌یابد. زمان دوام مؤثر و نیز  $t_{mid}$  با بزرگی و فاصله افزایش نشان دادند (مکان‌های

استفاده از  $\beta_{i0}$ ،  $\beta_{i1}$  و  $\beta_{i2}$  کنترل می‌شود. عبارت چهارم، تأثیر مسیر عبور را بر روی امواج منعکس می‌کند (از جمله اثرات کاهندگی هندسی، کاهندگی غیر الاستیک و سایر عوامل مربوط به کاهندگی). عبارت پنجم، تأثیرات شرایط ساختگاه را بر روی امواج منعکس می‌کند (همانند اثرات بزرگنمایی). دو عبارت آخر، خطاهای تصادفی هستند که تغییرپذیری طبیعی پارامترهای  $(\zeta_f, \omega', \omega_{mid}, t_{mid}, D_{5-95}, I_a)$  را برای مجموعه‌ی خاصی از ویژگی‌های زمین‌لرزه و ساختگاه نمایان می‌سازند. پارامترهای  $\varepsilon_i$ ،

جدول (5): ضرایب رگرسیون و مؤلفه‌های واریانس و خطای استاندارد برآورد شده با روش حداکثر احتمال برای داده‌های با سرعت موج برشی کمتر از 600 متر بر ثانیه مؤلفه‌ی عمود بر گسل

$\sigma_i^2$	$\tau_i^2$	$\varepsilon_i$	$\eta_i$	$\beta_{i4}$	$\beta_{i3}$	$\beta_{i2}$	$\beta_{i1}$	$\beta_{i0}$	$i$
0/7405	0/55467	-0/0165	0/0821	6/072	-0/496	-0/489	0/233	-4/652	1
0/6862	0/521	0/008	-0/006	3/382	-0/174	0/33	-0/06	-4/027	2
0/70936	0/38797	0/0093	0/0258	3/143	-0/102	0/531	0/022	-4/399	3
0/555	0/7013	-0/0085	0/067	1/02	0/615	-0/142	-0/355	-1/048	4
0/613	0/965	0/002322	0/0183	2/039	-0/238	-0/007	-0/144	-1/705	5
0/6571	0/5567	0/00216	0/0129	0/601	0/231	0/005	0/077	-0/788	6

جدول (6): ضرایب رگرسیون و مؤلفه‌های واریانس و خطای استاندارد برآورد شده با روش حداکثر احتمال برای داده‌های با سرعت موج برشی کمتر از 600 متر بر ثانیه مؤلفه‌ی موازی با گسل

$\sigma_i^2$	$\tau_i^2$	$\varepsilon_i$	$\eta_i$	$\beta_{i4}$	$\beta_{i3}$	$\beta_{i2}$	$\beta_{i1}$	$\beta_{i0}$	$i$
0/7212	0/4757	-0/0116	0/07155	6/28	-0/492	-0/49	0/198	-4/837	1
0/6756	0/4017	0/00863	0/0252	4/146	-0/222	0/318	-0/022	-4/716	2
0/737	0/4011	-0/0193	0/0327	3/313	-0/216	0/525	-0/019	-4/405	3
0/5031	0/693	-0/0079	0/127	0/134	0/767	-0/145	-0/504	-0/159	4
0/5461	0/3952	0/00528	0/03797	1/978	-0/243	0/064	0/071	-2/144	5
0/815	0/6097	0/0076	0/0347	2/11	0/308	-0/027	0/015	-2/499	6

جدول (7): ضرایب رگرسیون و مؤلفه‌های واریانس و خطای استاندارد برآورد شده با روش حداکثر احتمال برای داده‌های با سرعت موج برشی بیشتر از 600 متر بر ثانیه مؤلفه‌ی عمود بر گسل

$\sigma_i^2$	$\tau_i^2$	$\varepsilon_i$	$\eta_i$	$\beta_{i4}$	$\beta_{i3}$	$\beta_{i2}$	$\beta_{i1}$	$\beta_{i0}$	$i$
0/6527	0/3756	0/0127	0/0226	6/573	-0/174	-0/576	0/26	-5/44	1
0/7946	0/5206	1/79E-18	0/011	4/69	-0/226	0/388	0/278	-5/396	2
0/6146	0/6366	-3/85E-18	0/0109	5/24	-0/24	0/573	0/337	-6/358	3
0/621	0/5489	-1/39E-17	0/0099	1/679	0/332	-0/229	-0/496	-1/14	4
0/3805	0/640	-4/63E-18	0/1788	0/497	-0/892	0/288	-0/983	0/647	5
0/6087	0/474	-1/0E-17	0/1434	2/64	0/475	-0/119	0/078	-2/933	6



جدول (8): ضرایب رگرسیون و مؤلفه‌های واریانس و خطای استاندارد برآورد شده با روش حداکثر احتمال برای داده‌های با سرعت موج برشی بیشتر از 600 متر بر ثانیه مؤلفه‌ی موازی با گسل

$\sigma_i^2$	$\tau_i^2$	$\varepsilon_i$	$\eta_i$	$\beta_{i4}$	$\beta_{i3}$	$\beta_{i2}$	$\beta_{i1}$	$\beta_{i0}$	$i$
0/6142	0/4341	1/54E-18	0/00838	6/508	-0/142	-0/561	0/29	-5/473	1
0/52342	0/4783	0/00285	0/00743	3/256	-0/362	0/406	0/185	-3/842	2
0/59047	0/5832	-0/003	0/0194	4/953	-0/24	0/56	0/326	-6/097	3
0/6557	0/5072	-1/0E-17	0/0224	0/937	0/049	-0/253	-0/40	-0/152	4
0/6096	0/572	-0/0232	0/1964	1/002	-0/928	0/34	-0/475	-0/393	5
0/4353	0/634	-5/4E-18	0/1171	0/719	-0/415	-0/071	0/566	-0/639	6

محقق‌سازی  $X$  با استفاده از تغییر خطی مطابق رابطه (16) به دست می‌آید:

$$M_X = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\sum_{XX} = \begin{bmatrix} \text{Var}[X_1] & & & & & \\ \text{Cov}[X_2, X_1] & \text{Var}[X_1] & & & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \\ \text{Cov}[X_n, X_1] & \text{Cov}[X_n, X_2] & \cdot & \cdot & \cdot & \text{Var}[X_n] \end{bmatrix} \text{sym}$$

$$X = M_X + L_{XX}^T Y \quad (16)$$

در عبارت بالا، اندیس  $x$  برای مشخص کردن محقق‌سازی بردار متغیرهای تصادفی  $X$  مورد استفاده قرار گرفت، که  $Y$  بردار متغیرهای تصادفی نرمال استاندارد غیر هم‌بسته می‌باشد،  $L_{XX}^T$  ماتریس مثلثی بدست آمده از تجزیه چولسکی ماتریس کوواریانس است که  $\sum_{XX} = L_{XX}^T L_{XX}$  می‌باشد. تجزیه‌ی چولسکی امکان‌پذیر شده است، زیرا ماتریس کوواریانس  $\sum_{XX} =$  از نوع معین مثبت می‌باشد [1]. پس از محاسبه بردار  $X$  با استفاده از معکوس رابطه (12) و نیز روابط (7) تا (9) می‌توان یک شتاب‌نگاشت مصنوعی را تولید نمود.

دور، حرکتی را با دوام طولانی‌تری شاهد هستند) و با سختی ساختگاه کاهش نشان می‌دهند. این نتایج هم‌چنین بیان‌کننده‌ی این موضوع هستند که دوام مؤثر و  $t_{mid}$  برای گسل معکوس در مقایسه با گسل امتداد لغز کوتاه‌تر می‌باشند. به‌علاوه، نتایج نشان می‌دهند که فرکانس غالب در میانه‌ی تکان شدید با افزایش بزرگا و فاصله منبع تا مکان کاهش نشان می‌دهد، درحالی‌که نرخ تغییر فرکانس غالب (که دارای میانگین منفی می‌باشد) افزایش می‌یابد، یعنی یک تغییر کندتر با افزایش بزرگا و فاصله. در نهایت، میرایی فیلتر، که معیاری از پهنای باند حرکات زمین می‌باشد با بزرگای گشتاوری و سختی مکان در افزایش و با فاصله منبع تا مکان کاهش یافت که این نتایج به‌طور کلی با انتظاراتمان سازگار می‌باشند.

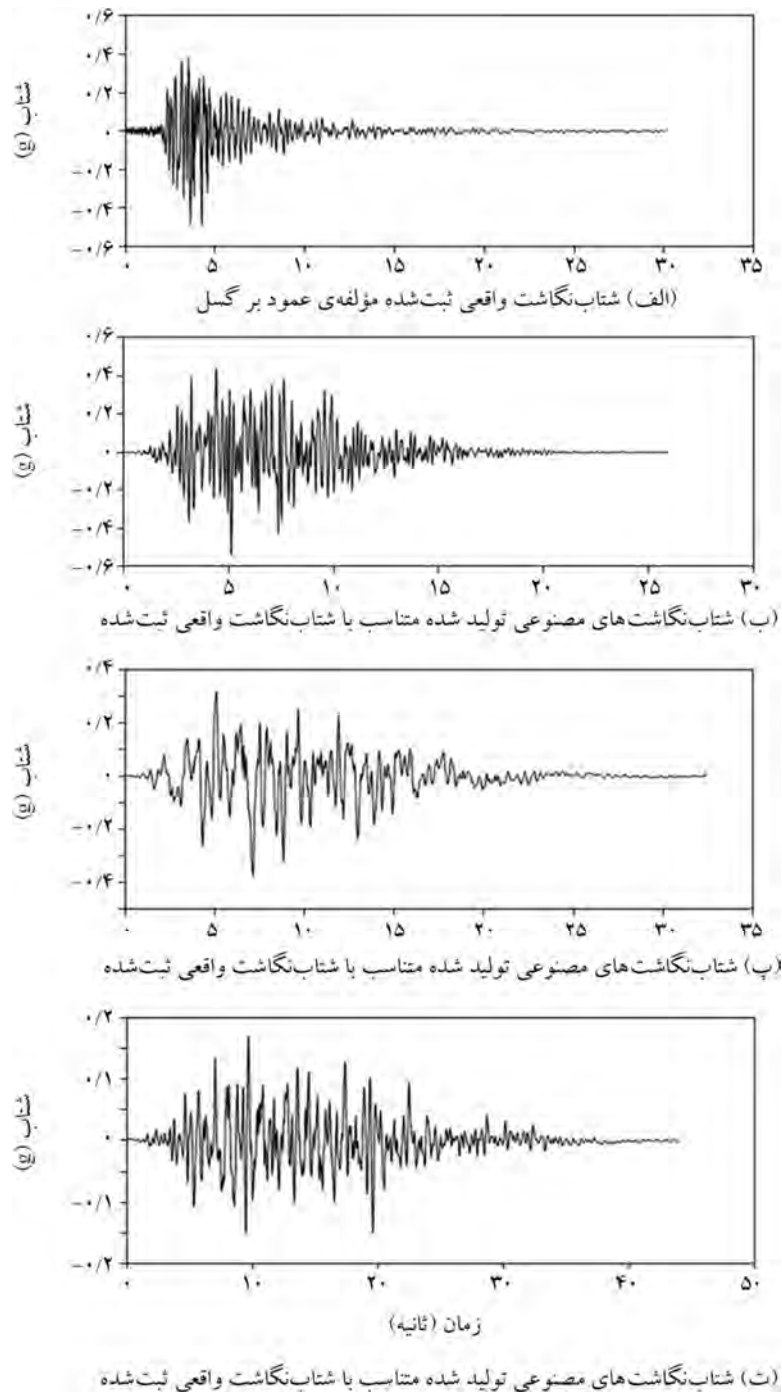
پس از برآورد ضرایب رگرسیون جهت تولید شتاب‌نگاشت نیاز است که این ضرایب را به فضای (توزیع) آماری واقعیشان تبدیل نماییم (توزیعی که هر یک از داده‌ها مطابق جداول (1) تا (4) داشتند). برای رسیدن به این مهم می‌بایست از یک محقق‌سازی به‌صورت رابطه (15) استفاده شود. برای محقق‌سازی<sup>4</sup> متغیرهای نرمال تصادفی، بایستی ضرایب همبستگی بین متغیرهای تصادفی محاسبه شود در این مطالعه جهت محقق‌سازی متغیرهای نرمال تصادفی روابط (15) و (16) به کار گرفته شدند.

در رابطه (15)  $v_i$  میانگین  $X_i$  و  $\text{Var}[X_i]$  مشخص‌کننده‌ی واریانس  $X_i$  و برابر با مجموع مؤلفه‌های واریانس و  $\text{Cov}[X_i, X_j]$  مشخص‌کننده‌ی کوواریانس  $X_i, X_j$  می‌باشند.

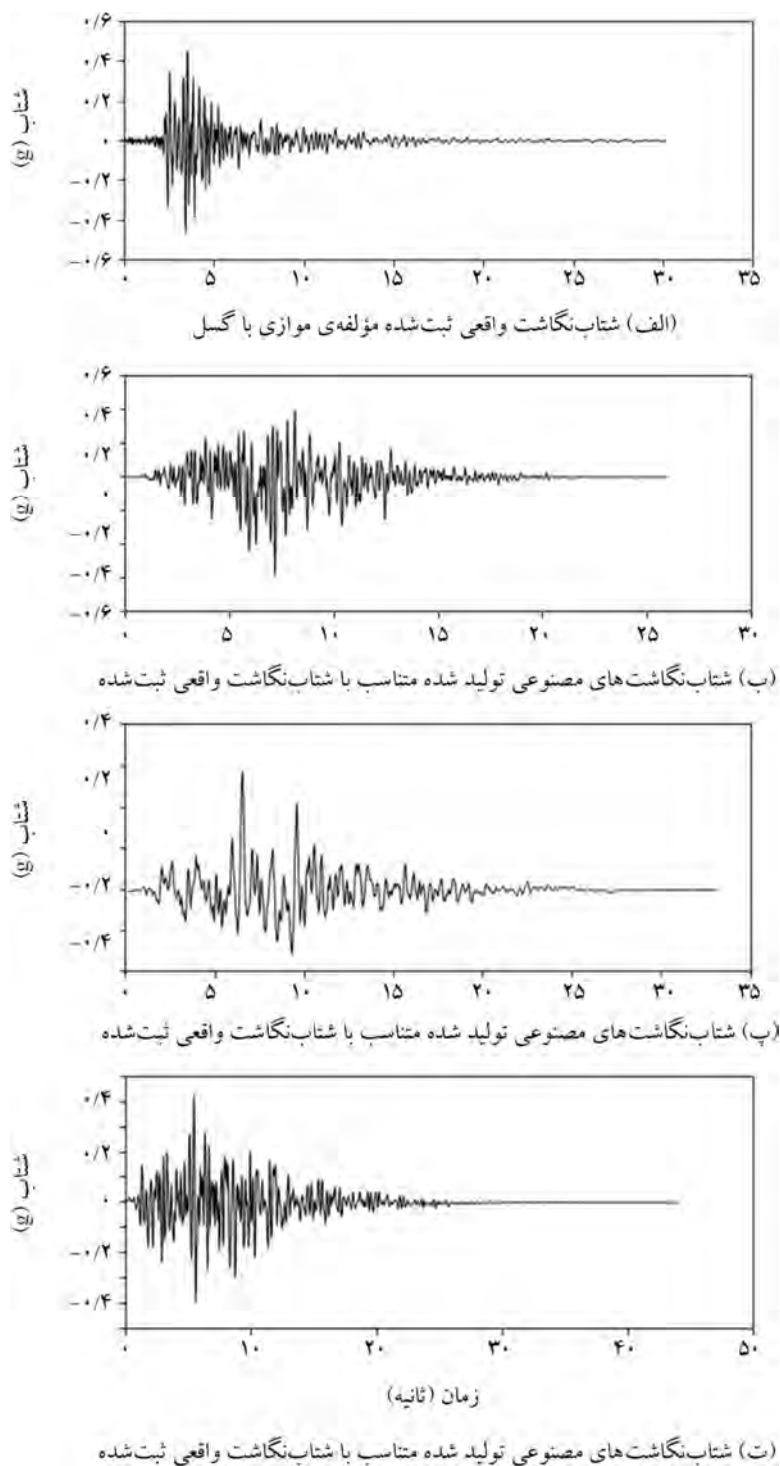
## 4- تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی

می‌باشد. ابتدا گمان می‌رفت که گسل مسبب این زلزله همان گسل ایپیک باشد که باعث بروز زلزله‌ی بوئین زهرا 1962 شد. اما مطالعات بعدی نشان داد که ناهنجاری‌هایی در امتداد گسل آوج که دارای مکانیسم معکوس می‌باشد، به سمت غرب موجود است [19]. پس از شبیه‌سازی نتایج به گونه‌ای که در شکل‌های (3) و (4) قابل مشاهده است، حاصل شد.

برای صحت‌سنجی نتایج اقدام به تولید شتاب‌نگاشت برای یک ناحیه با مشخصات معلوم ( $R = 20KM$ ,  $M = 6.4MW$ )، شد: لازم به توضیح است که مشخصات فوق مربوط به ایستگاه آوج استان قزوین می‌باشد که نگاشت ثبت‌شده به شماره رکورد 2749 در زلزله‌ی 2002/06/22 را دارا



شکل (3): مقایسه شتاب‌نگاشت ثبت‌شده و شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی تولید شده

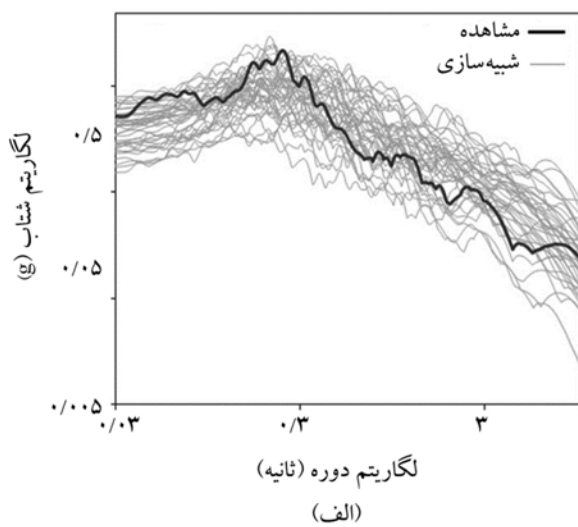


شکل (4): مقایسه شتاب‌نگاشت ثبت شده و شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی تولید شده

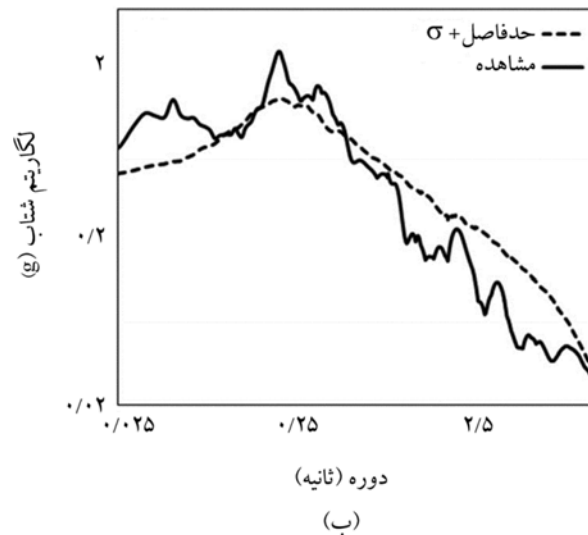
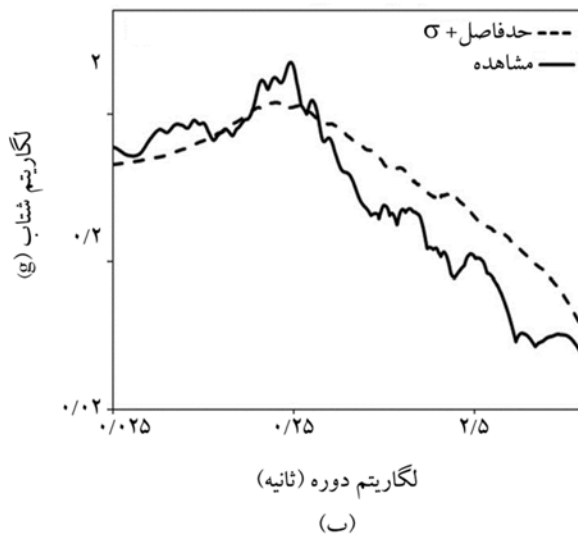
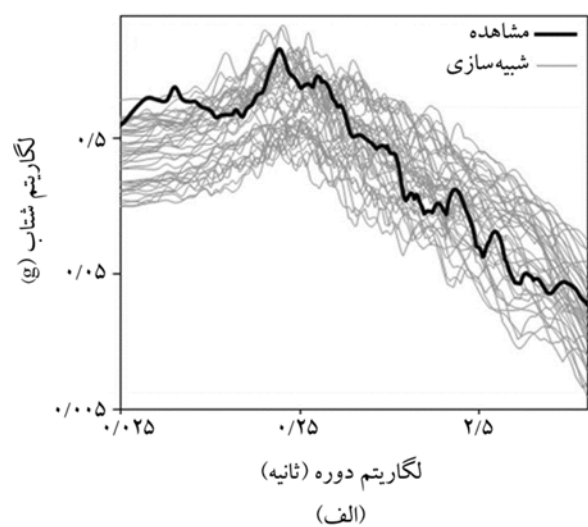
مواردی چون میزان حداکثر شتاب زمین، میزان زمان شتاب‌نگاشت‌ها، فرکانس غالب و میزان شدت آریاس. این امر بسیار منطقی به نظر می‌رسد به دلیل اینکه زلزله‌های رخ داده در یک منبع متفاوت از زلزله‌هایی هستند که قبلاً در همان منبع رخ داده‌اند. جهت نمایان

با توجه به شکل‌های (3) و (4) می‌توان دریافت که در شتاب‌نگاشت‌های شبیه‌سازی شده تغییرپذیری ناشی از زلزله در شتاب‌نگاشت‌ها به خوبی قابل مشاهده است به گونه‌ای که هر کدام از آنها دارای پارامترهای لرزه‌ای متفاوتی از هم دیگر هستند،

زلزله‌هایی هستند که ممکن است در آینده در منبع مورد مطالعه رخ دهند. در شکل (7) نیز تطبیق بسیار مناسبی معین فر (1381) سمینار درس‌هایی از زلزله چنگوره-آوج، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن بین طیف‌های پاسخ شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی تولید شده در دو مؤلفه‌ی افقی عمود بر هم وجود دارد. در ادامه مقایسه‌ای بین طیف پاسخی ناشی از میانگین به‌علاوه‌ی انحراف معیار مربوط به دو مؤلفه‌ی افقی موازی و عمود بر امتداد گسل باطیف طرح آیین‌نامه 2800 ویرایش چهارم صورت گرفته است.

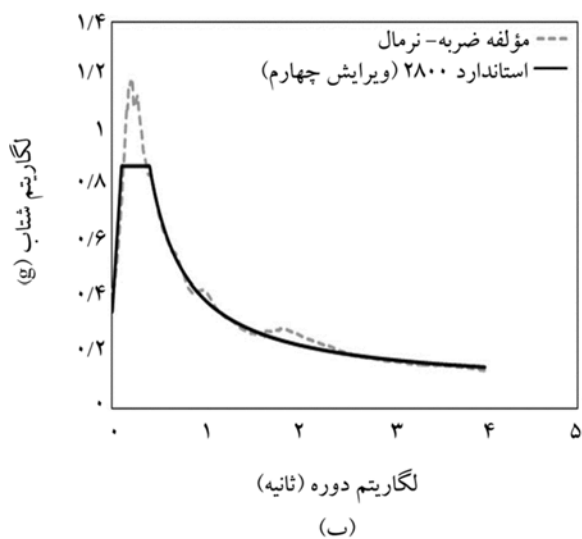
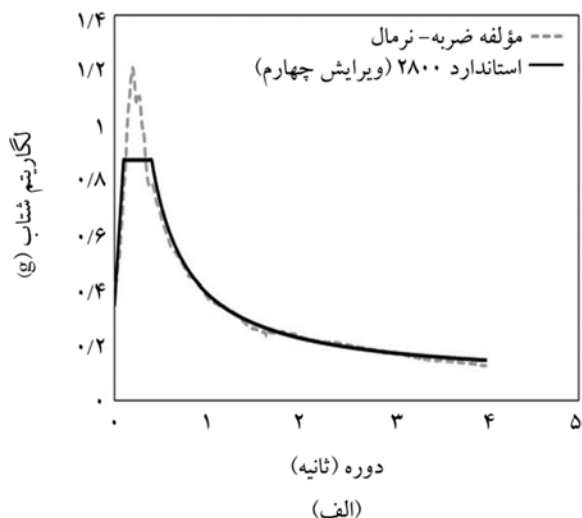


شدن دیگر ویژگی‌های لرزه‌ای در ادامه‌ی بحث مطابق شکل‌های (5) تا (7) مقایسه‌ای بین طیف پاسخی شتاب‌نگاشت‌های واقعی ثبت شده و شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی تولید شده انجام گرفته است. همان‌گونه که در شکل‌های (5) و (6) قابل مشاهده است، طیف‌های پاسخی به‌دست آمده از زلزله‌ی واقعی با طیف‌های پاسخی حاصل از شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی تولید شده تطبیق قابل قبولی دارند. به‌گونه‌ای که طیف‌های پاسخی حاصل از شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی به خوبی در برگیرنده طیف پاسخی



شکل (6): مقایسه طیف‌های پاسخی هموار شده با میزان میرایی 5٪ (الف) مقایسه‌ی طیف پاسخی مؤلفه‌ی موازی با گسل با طیف پاسخی 50 شتاب‌نگاشت مصنوعی تولید شده‌ی متناسب با آن. (ب) مقایسه‌ی طیف پاسخی مؤلفه موازی با گسل با مقدار میانگین به‌علاوه انحراف معیار طیف‌های پاسخی 50 شتاب‌نگاشت مصنوعی تولید شده.

شکل (5): مقایسه طیف‌های پاسخی هموار شده با میزان میرایی 5٪ (الف) مقایسه طیف پاسخی مؤلفه عمود بر گسل با طیف پاسخی پنجاه شتاب‌نگاشت مصنوعی تولید شده متناسب با آن. (ب) مقایسه طیف پاسخی مؤلفه عمود بر گسل با مقدار میانگین به‌علاوه انحراف معیار طیف‌های پاسخی پنجاه شتاب‌نگاشت مصنوعی تولید شده.



شکل (8): (الف) مقایسه میانگین به علاوه انحراف معیار طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی تولید شده برای مؤلفه‌ی عمود بر گسل با طیف طرح آیین‌نامه 2800 ویرایش چهارم، (ب) مقایسه میانگین به علاوه انحراف معیار طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی تولید شده برای مؤلفه‌ی موازی با گسل با طیف طرح آیین‌نامه 2800 ویرایش چهارم.

شکل (7): (الف) مقایسه‌ی طیف پاسخ مؤلفه‌ی عمود بر گسل با طیف پاسخ مؤلفه‌ی موازی با گسل، (ب) مقایسه میانگین به علاوه انحراف معیار طیف‌های پاسخ شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی تولید شده برای مؤلفه‌ی عمود بر گسل، با مقدار میانگین به علاوه انحراف معیار طیف‌های پاسخ شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی تولید شده برای مؤلفه‌ی موازی با گسل.

### 5- بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه با بکارگیری یک روش تصادفی مبتنی بر ویژگی‌های منبع و ساختگاه و با استفاده از داده‌های شتاب‌نگاری بر اساس پارامترهای مهم در مهندسی زلزله و با کمک گرفتن از روش‌های آماری از جمله انجام تحلیل رگرسیون با لحاظ نمودن ویژگی‌های تصادفی اقدام به استخراج روابطی جهت تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی شد. پس از ارائه‌ی روابط مذکور جهت صحت‌سنجی آنها، شتاب‌نگاشت‌هایی متناسب با یک زلزله‌ی

همانطور که در شکل (8) قابل مشاهده است تطبیق بسیار مناسبی بین طیف پاسخ ناشی از میانگین به علاوه انحراف معیار مربوط به این دو مؤلفه‌ی افقی و طیف طرح آیین‌نامه وجود دارد. این تطبیق به طور ویژه در دوره تناوب‌های در محدوده  $T_S \leq T$  و  $T \leq T_0$  قابل ملاحظه است و می‌تواند بیانگر این موضوع باشد که تمامی روابط استخراج شده منجر به تولید تاریخچه‌های زمانی شتابی می‌شوند که طیف حاصل از میانگین به علاوه انحراف از معیار آنها سازگاری مطلوبی با طیف طرح آیین‌نامه دارند.



- of high frequency ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **71**, 2071-2095.
7. Boore, D.M. (2003) Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method. *Pure and Applied Geophysics*, **160**, 635-676.
  8. Khattri, K.N., Zeng, Y., Anderson, J.G., and Brune, J. (1994) Inversion of strong motion waveforms for source slip function of 1991 Uttarkashi earthquake, Himalaya. *J. Himalayan Geol.*, **5**, 163-191.
  9. Joshi, A., Kumar, B., Sinval, A., and Sinval, H. (1999) Generation of Synthetic accelerograms by modeling of rupture plane. *ISET Journal of earthquake Technology*, **36**(1), 43-60.
  10. Hartzell, S.H. (1982) Simulation of ground accelerations for May 1980 Mammoth Lakes, California earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **72**, 2381-2387.
  11. Irikura, K. (1983) Semi empirical estimation of strong ground motion during large earthquakes. *Bull. Dis. Prevent Res. Inst.* **33**, 63-104.
  12. Kanamori, H. (1979) A semi empirical approach to prediction of long period ground motions from great earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **69**, 1645-1670.
  13. Dabaghi, M. and Der Kiureghian, A. (2011) *Stochastic Model and Simulation of Near Fault Ground Motions for Specified Earthquake Source and Site Characteristics*. Report to California Department of Transportation.
  14. Rezaeian, S. and Kiureghian, A.D. (2008) A stochastic ground motion model with separable temporal and spectral nonstationarities. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **37**, 1565-1584.
  15. Trifunac, M.D. and Brady, A.G. (1975) A study on the duration of strong earthquake ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **65**, 581-626.
  16. شبکه شتابنگاری ملی ایران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، [www.smd.bhrc.ac.ir](http://www.smd.bhrc.ac.ir)
  17. Penzien, J. and Watabe, M. (1975) Characteristics of 3-dimensional earthquake ground motions.
- ثبت شده تولید شدند و طیف‌های پاسخ آنها با طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده از زلزله واقعی مقایسه شدند که منجر به ارائه‌ی نتایج مناسب و در خور توجهی شدند. نتایج نشان دادند که این روش می‌تواند تغییرپذیری ناشی از منبع را به خوبی در تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی لحاظ کند و نیز با میانگین‌گیری از طیف‌های پاسخ حاصل از این روش می‌توان به بهینه‌ترین طیف که ممکن است در خلال وقوع یک زلزله داشته باشیم دست یافت. می‌توان از نتایج این روش در تحلیل تاریخچه زمانی خطی و غیر خطی سازه‌های حساس و پر اهمیت و نیز تحلیل طیفی سازه‌ها استفاده نمود. علاوه بر موارد مذکور، می‌توان با انجام عملیات تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی با روش حاضر برای تمام پهنه فلات ایران اقدام به ارائه طیف‌های طرح جهت استفاده در آیین‌نامه‌های طراحی نمود.

#### مراجع

1. Rezaeian, S. and Kiureghian, A.D. (2010) Simulation of synthetic ground motions for specified earthquake and site characteristics. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **39**, 1155-1180.
2. Agraval, S.Kr. (2004) Generation of Synthetic accelerograms using engineering earthquake source model. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, **4**, 497-514.
3. Joshi, A., Kumari, P., Sharma, M.L., Ghoshm, A.K., Agarwal, M.K., and Ravikiran, A. (2012) A Strong Motion Model of the 2004 Great Sumatra Earthquake: Simulation using a Modified Semi Empirical Method. *Journal of Earthquake and Tsunami*, **6**(4), 1250023.
4. Yamamoto, Y. and Baker, J.W. (2013) Stochastic model for earthquake ground motion using wavelet packets. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **103**(6), 3044-3056
5. Boore, D.M. (1983) Stochastic simulation of high frequency ground motion based on seismological models of radiated spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **73**, 1865-1894.
6. Hanks, T.C. and McGuire, R.K. (1981) The character



*Earthquake Engineering and Structural Dynamics*,  
3, 365-373.

18. Montgomery, D.C. and G.C. Runger (2003)  
*Applied Statistics and Probability for Engineers*.  
3<sup>rd</sup> edition, John Wiley & Sons, New York.

### اصطلاحات فنی

Performance Based Earthquake Engineering	1- مفهوم مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد
Empirical Green's Function	2- توابع تجربی گرین
Impulse Response Function	3- تابع پاسخ فیلتر خطی
Realization	4- محقق سازی