

مدل‌سازی شتابنگاشت‌های حرکت نیرومند زمین با توجه به نوع خاک و فاصله از گسل

محمد کاظم حفیظی* و میرکاظم جلالی**

*موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۵۵، تهران.

**دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

چکیده

در دو دهه اخیر، استفاده از روش‌های آماری و ایجاد مدل‌های تصادفی و شبیه‌سازی شتابنگاشت‌های حرکت نیرومند زمین رایج شده است. استفاده از روش آرما (ARMA) از متداول‌ترین روش‌های شبیه‌سازی است. برتری این مدل در پیش‌بینی پاسخ غیرخطی سازه و امکان نسبت دادن پارامترهای فیزیکی به ضرایب توابع مدل‌سازی، این روش را در زمره مدل‌های کارآمد قرار داده است. براساس این روش شتابنگاشت‌های حاصل از زلزله منجیل که در ۱۰ شهر ثبت شده مورد مدل‌سازی قرار گرفت. با استفاده از نتایج این مدل‌سازی، شتابنگاشت مصنوعی ایجاد شده، با سری اصلی مورد مقایسه قرار گرفته است. تطبیق پوش منحنی‌های اصلی و شبیه‌سازی و تطابق طیف فوریه آنها نشان دهنده این است که استفاده از این مدل در شبیه‌سازی شتابنگاشت روش موثری است. با داشتن فاصله از رومرکز احتمالی زلزله و نوع خاک منطقه، می‌توان شتابنگاشت مورد نیاز را شبیه‌سازی کرد و برای تحلیل دینامیکی سازه مورد نظر به کار برد.

کلیدواژه: شتابنگاشت، مدل‌سازی، حرکات نیرومند زمین، مدل آرما، تحلیل دینامیکی

۱ مقدمه

و دیگران (۱۹۸۲) برای شتابنگاشت‌ها، ایس، دواکس و کاکمک (۱۹۹۰) برای شتابنگاشت‌های زلزله‌های مکزیک و تایوان، ایس و کاکمک (۱۹۹۰) برای زلزله‌های ژاپن، فیندل، کویاگلو و کاکمک (۱۹۹۳) برای زلزله‌های ترکیه به کار برده شده و کارایی خود را نشان داده است. اگر چه یورکویکس و اولریچ (۱۹۷۸، ۱۹۷۹) مدل AR (خود بازگشتی) را برای شتابنگاشت به کار برده است ولی درگاهی-نوبری (۱۹۹۲) علت انتخاب مدل آرما را بیان داشته است.

لازم به توضیح است توابعی که به صورت زمان پیوسته به کار می‌روند در پیش‌بینی پاسخ خطی سازه مفیداند، ولی در پیش‌بینی پاسخ غیرخطی توانایی ندارند. روش‌های مدل‌سازی در

شبیه‌سازی شتابنگاشت از جمله فنونی است که در مهندسی زلزله مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مکان‌هایی که اطلاعات لرزه‌ای در دست نیست، برای بررسی رفتار لرزه‌ای سازه در برابر حرکات زمین‌لرزه، ایجاد شتاب مصنوعی و اعمال آن به مدل سازه اهمیت فراوانی دارد. در ایجاد شتابنگاشت‌های مصنوعی پارامترهای فیزیکی و شرایط خاک محل از جمله مسائلی است که باید به طور جدی در نظر گرفته شود. روش‌های آماری موثری برای ایجاد شتابنگاشت مصنوعی وجود دارد که یکی از این روش‌ها، روش آرما (ARMA) (خود بازگشتی - میانگین متحرک) است. این روش توسط پولموس و

زمانی پیوسته (مانند آنچه که در شتابنگاشت‌ها صورت می‌گیرد) ۲- از راه تجمع مقادیر یک متغیر در طول دوره‌ای از زمان. لازم است بین مدل احتمالی (فرآیند پیشا) و سری زمانی مشاهده شده تمایز قایل شد. یک سری زمانی Z_1 و Z_2 و $Z_{n \dots}$ مرکب از N مشاهده، نمونه تحقق یافته‌ای است از مجموعه نامتناهی از این قبیل سری‌ها که می‌توانست توسط این فرایند پیشا به وجود آید.

مدل‌هایی که در اینجا به کار برده می‌شود به صورتی است که سری‌های زمانی از مقادیر متوالی و وابسته به هم باشند. می‌توان به‌طور خلاصه به این صورت در نظر گرفت که از یک سری "ضربه"های مستقل ورودی به یک صافی (فیلتر) خطی ناشی شده است. این ضربه‌ها نمونه‌های پیشا از توزیعی ثابت‌اند که دارای میانگین صفر و واریانس σ_a^2 فرض می‌شوند. سری زمانی نوفه سفید a_1 و a_2 و $a_{n \dots}$ در این فرایند توسط صافی خطی به Z_t تبدیل می‌شود.

$$a_t \rightarrow \boxed{\Psi(B) \text{ فیلتر خطی}} \rightarrow Z_t$$

طبق تعریف (B) عملگر پس‌برنده و عمل آن چنین است:

$$BZ_t = Z_{t-1} \quad (1)$$

با استفاده از این عملگر می‌توان گفت که:

$$B^m Z_t = Z_{t-m} \quad (2)$$

عمل صافی خطی صرفاً عبارت است از تعیین

روش‌ها امکان تاثیر پارامترهای فیزیکی را در مدل‌سازی فراهم می‌آورند. در این مقاله شرح روش چگونگی به‌دست آوردن پارامترهای مدل با استفاده از شتابنگاشت‌های زلزله رودبار ارائه شده است. شتابنگاشت‌های مورد استفاده از بانک شبکه شتابنگاری مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن اخذ شده است.

۲ مدل ریاضی

برای توصیف رفتار پدیده‌های فیزیکی از مدل‌های ریاضی استفاده می‌شود، این مدل‌ها ممکن است ما را قادر سازد تا مقدار تقریباً دقیق کمیت تابع زمان را در هر لحظه محاسبه کنیم. اگر محاسبه دقیق امکان‌پذیر باشد، چنین مدلی کاملاً قطعی خواهد بود. اما احتمالاً هیچ پدیده قطعی را نمی‌توانیم سراغ بگیریم، زیرا همواره هر پدیده تحت تاثیر عوامل ناشناخته‌ای قرار می‌گیرد. بنابراین یافتن مدل قطعی که امکان محاسبه دقیق رفتار آینده را فراهم آورد ممکن نخواهد بود. ولی ممکن است مدلی به‌دست آورد که بتواند احتمال قرار گرفتن مقدار آینده را بین دو حد تخمین بزند. چنین مدلی را مدل پیشا می‌نامند. مدل‌های سری‌های زمانی که مثلاً برای پیش‌بینی و کنترل بهینه مورد احتیاج‌اند، در حقیقت مدل‌هایی پیشا هستند. در این تحقیق با سری زمانی گسسته سروکار داریم که در آنها مشاهدات در فاصله ثابت و معینی به دست آمده است.

سری‌های زمانی گسسته به دو روش تولید

طوری که

نهادهای θ_1 و θ_2 و $\theta_q \dots$ را به عنوان مجموعه متناهی وزن به کار می‌بریم و فرایندی را که چنین تعریف شده باشد فرایند میانگین متحرک مرتبه q می‌نامند. اگر رابطه γ را به صورت زیر بنویسیم

$$\begin{aligned} \tilde{Z}_t &= (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q) a_t \\ \Rightarrow \tilde{Z}_t &= \theta(B) a_t \end{aligned} \quad (8)$$

معلوم می‌شود که فرایند میانگین متحرک خروجی \tilde{Z}_t از یک صافی با تابع انتقال $\theta(B)$ ، در هنگامی است که a_t ورودی نوفه سفید است. در عمل برای پارامتری کردن مدل با رعایت امساک گاهی ضروری می‌نماید که هر دو نوع جملات خودبازگشتی و میانگین متحرک را در مدل بگنجانیم، بدین ترتیب فرایند

$$\tilde{Z}_t = \phi_1 \tilde{Z}_{t-1} + \dots + \phi_p \tilde{Z}_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (9)$$

$$\phi(B) \tilde{Z}_t = \theta(B) a_t \quad (10) \quad \text{یا}$$

فرایند مخلوط خود بازگشتی - میانگین متحرک مرتبه (p, q) نامیده می‌شود که آن را به آرما (p, q) مختصر می‌کنیم. فرایند مخلوط آرما را می‌توان به عنوان خروجی \tilde{Z}_t از یک صافی خطی دانست که تابع انتقال آن عبارت است از نسبت دو چند جمله ای $\theta(B)$ و $\phi(B)$ وقتی که ورودی نوفه سفید باشد، این مدل‌ها را فقط در شرایطی می‌توان به کار برد که فرایند ایستا باشد. به خاطر خصوصیت نایستایی فرایندهای مشاهده شده در شتابنگاشت‌های زلزله کاربرد

$$\begin{aligned} Z_t &= \mu + a_t + \Psi_1 a_{t-1} + \Psi_2 a_{t-2} + \dots \\ &= \mu + \Psi(B) a_t \end{aligned} \quad (3)$$

μ پارامتری است که سطح فرایند را تعیین می‌کند و $\Psi(B)$ به شکل زیر است:

$$\Psi(B) = 1 + \Psi_1 B + \Psi_2 B^2 + \Psi_3 B^3 + \dots \quad (4)$$

و آن یک عملگر خطی است که a_t را به Z_t تبدیل می‌کند. اگر سری این جمله‌ها (محدود یا نامحدود) همگرا باشد، صافی را ایستا و فرایند Z_t را نیز فرایندی ایستا می‌نامیم. در این حالت، μ میانگینی است که فرایند پیرامون آن تغییر می‌کند. اگر غیر از این باشد Z_t نایستا خواهد بود و μ نقطه‌ای مرجع برای سطح فرایند خواهد بود و معنی دیگری نخواهد داشت (Box and Jenkins, 1976)

رابطه

$$\tilde{Z}_t = \phi_1 \tilde{Z}_{t-1} + \phi_2 \tilde{Z}_{t-2} + \dots + \phi_p \tilde{Z}_{t-p} + a_t \quad (5)$$

فرایند خود بازگشتی مرتبه p یا $AR(p)$ نامیده می‌شود. می‌توان این رابطه را به صورت

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p) \tilde{Z}_t = a_t \quad (6)$$

و یا به صورت

$$\phi(B) \tilde{Z}_t = a_t \Rightarrow \tilde{Z}_t = \phi^{-1}(B) a_t$$

یعنی فرایند خود بازگشتی می‌تواند به عنوان خروجی Z_t از یک صافی خطی با تابع انتقال $\phi^{-1}(B)$ وقتی که ورودی نوفه سفید a_t باشد فرض شود. رابطه زیر را در نظر می‌گیریم.

$$\tilde{Z}_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (7)$$

پیاده می‌شود و بر اساس درجه مدل سری زمانی شبیه‌سازی شده، ایستایی ایجاد می‌شود. حال سری نهایی ساخته شده بر مبنای تبدیل معکوس روی تابع واریانس به دست می‌آید.

کازین (۱۹۷۷) پارامترهای مدل را به صورت تابعی از زمان فرض کرده و مدلی به فرم زیر پیشنهاد داده است.

$$Z_t = \phi_1(t)Z_{t-1} + \phi_2(t)Z_{t-2} + \dots + \phi_p(t)Z_{t-p} + g(t)a(t) \quad (11)$$

در این مدل P درجه فرایند AR است و پارامترها و نوفه سفید هم تابع زمان‌اند و واریانس با $[g(t)]^2$ متناسب است. این مدل، به طور مستقیم روی سری‌های زمانی ثبت شده از شتابنگاشت‌ها پیاده می‌شود، در این جا $[g(t)]$ ضریب نوفه سفید است که با زمان متناسب است.

الیس، دواکس و کاکمک (۱۹۹۰) ایستا کردن سری‌های زمانی توسط واریانس را روی مختصات کروی انجام داده‌اند. ابتدا مختصات کارتیزین به مختصات کروی تبدیل می‌شود یعنی مولفه‌های X و Y و Z به مولفه‌های ρ و θ و ϕ تبدیل می‌شوند. تابع واریانس روی مجذور مولفه ρ ایجاد می‌شود و پارامترهای آرما یکباره روی سه مولفه به دست می‌آید. در این روش تابع واریانس که برحسب زمان ساخته می‌شود از نوع تابع نمایشی است و ضرایب آن طوری است که یک بیشینه در حدود حداکثر تکان لرزه ایجاد می‌کند. بر پایه این روش می‌توان زلزله‌های مرکب را نیز شبیه‌سازی کرد (Ellis and Cakmak

در قسمت بعد به شرح چند روش ایستا کردن سری‌های زمانی به کار برده شده برای شتابنگاشت‌ها می‌پردازیم.

۳ روش‌های مختلف ایستاکردن فرایندهای شتابنگاشت

همان طوری که قبلاً ذکر شد، مدل‌سازی را فقط در شرایطی می‌توان به کار برد که فرایند ایستا باشد، به خاطر خصوصیت نایستایی سری زمانی به دست آمده از زلزله و رفع این مشکل چند روش ابداع شده است که به طور اجمال به آنها اشاره می‌کنیم.

در روش جاستهیم (۱۹۷۵) هر سری زمانی به چند قسمت کوچک تقسیم می‌شود که هر کدام از این قسمت‌ها ممکن است برای خود سری ایستایی باشند و مدل روی هر کدام از این تکه‌ها به طور مستقل پیاده شود.

کاکمک و پولموس (۱۹۸۱) سری زمانی ایستا را به طریق ایستا کردن واریانس از راه ساختن یک تابع پوش برای واریانس سری‌های زمانی که تابع واریانس را برحسب زمان توصیف کند به دست آوردند. نتیجه کار این بود که مدل‌های آرما با درجه پایین به خوبی با تکه‌های مشاهده شده تطبیق می‌کرد. این روش به طور مستقل روی دو مولفه افقی و مولفه قائم شتابنگاشت پیاده می‌شود و معمولاً درجه آن حداکثر آرما (۱، ۴) است. در این روش تابع واریانس براساس یک چندجمله‌ای بیان می‌شود و شتابنگاشت‌ها به سه مولفه تابع واریانس از راه

از زلزله‌های مرکب به نحوی ساخته می‌شود که به تعداد تکان قوی، تابع دارای بیشینه باشد.

۴ شرح روش

در این پژوهش از روش برازش پارامترهای آرما به سه مولفه شتابنگاشت بعد از ایستا کردن آنها ارائه شده است. پارامترهای تخمین زده از شتابنگاشت‌ها به پارامترهای فیزیکی مربوط به زمین ارتباط داده می‌شود. در این روش مدل‌سازی پارامترهای شتابنگاشت ده شهر آب بر، قزوین، ابهر، زنجان، لاهیجان، رودسر، تنکابن، گچسار، کهریزک و اردبیل به کار گرفته شده است. ولی برای اختصار، تنها شتابنگاشت شهر قزوین نشان داده می‌شود. پژوهش حاضر براساس روشی است که الیس و کاکمک (۱۹۹۰) و الیس و دیگران (۱۹۹۰) انجام داده‌اند. در این روش، شتابنگاشت اوله محدود و واریانس و محتوای بسامدی تثبیت می‌شود و سرانجام یک مدل آرما به سری‌های تثبیت شده برازش داده می‌شود شکل ۱ شتابنگاشت پایگاه قزوین را نشان می‌دهد که زلزله رودبار - منجیل را در سه مولفه ثبت کرده است.

از بزرگی بردار، $\rho(t)$ زاویه عمودی بر حسب رادیان و $\theta(t)$ زاویه افقی بر حسب رادیان است. سری زمانی بزرگی بردار ρ و زاویه عمودی برای ایستا کردن سری‌های زمانی آنها مورد استفاده قرار می‌گیرند و سری زمانی زاویه افقی از ابتدا ایستا است. شکل ۲ سه مولفه شتابنگاشت ثبت شده در ایستگاه قزوین را در مختصات کروی نشان می‌دهد.

با تعریف محتوی انرژی بزرگی بردار $\rho(t)$ برای حذف نوفه در ابتدا و انتهای هر مولفه به یک اندازه مساوی عملی می‌شود. محتوی انرژی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$I_0 = \sum \rho_i^2 \Delta t \quad (13)$$

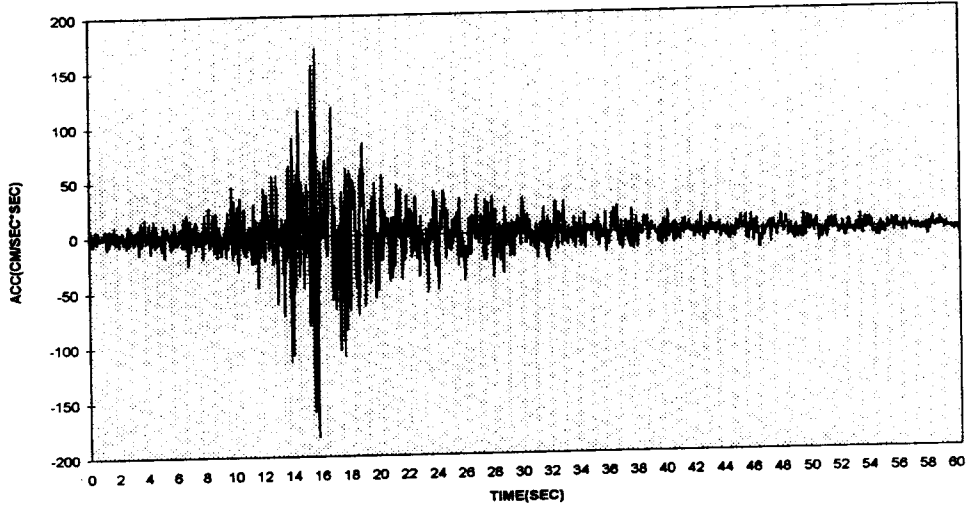
که در آن Δt بازه زمانی نمونه برداری است. در شتابنگاشت‌هایی که مورد استفاده قرار گرفته بود این مقدار ۰/۰۲ ثانیه بود. برای کاهش اثر نوفه در ابتدا و انتهای رکورد، به منظور افزایش نسبت S/N و کاهش اشغال ظرفیت رایانه، وقتی که شدت موج کم است، مولفه‌های شتاب از ابتدا و انتها حذف می‌شوند. به منظور حذف نوفه از رکورد، چون نوفه در انتها بیشتر است لذا از ابتدا وقتی که ۱٪ انرژی عبور کرد و از انتها وقتی که ۲٪ انرژی باقی مانده است، داده‌ها حذف می‌شوند. برای ایستا نمودن واریانس مولفه شتاب از دو پوش استفاده می‌شود، یکی پوش زاویه عمودی $\hat{\phi}(t)$ که از سری زمانی محدود شده زاویه عمودی برآورد می‌شود و دیگری پوش انحراف‌معیار $\hat{\sigma}_\rho(t)$ که از بردار $\rho(t)$ که

اولین قدم در ایستا کردن شتابنگاشت، انتقال مولفه‌های شتاب از مختصات کارتزین (x, y, z) به مختصات کروی (ρ, θ, ϕ) است که با استفاده روابط زیر صورت می‌گیرد.

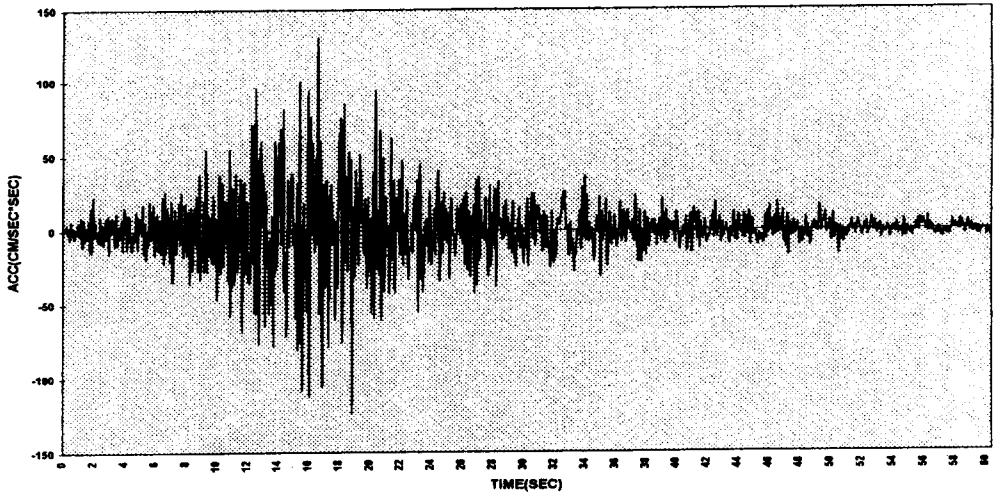
$$\begin{aligned} x(t) &= \rho(t) \cos \phi(t) \cos \theta(t) \\ y(t) &= \rho(t) \cos \phi(t) \sin \theta(t) \end{aligned} \quad (12)$$

$$z(t) = \rho(t) \sin \phi(t)$$

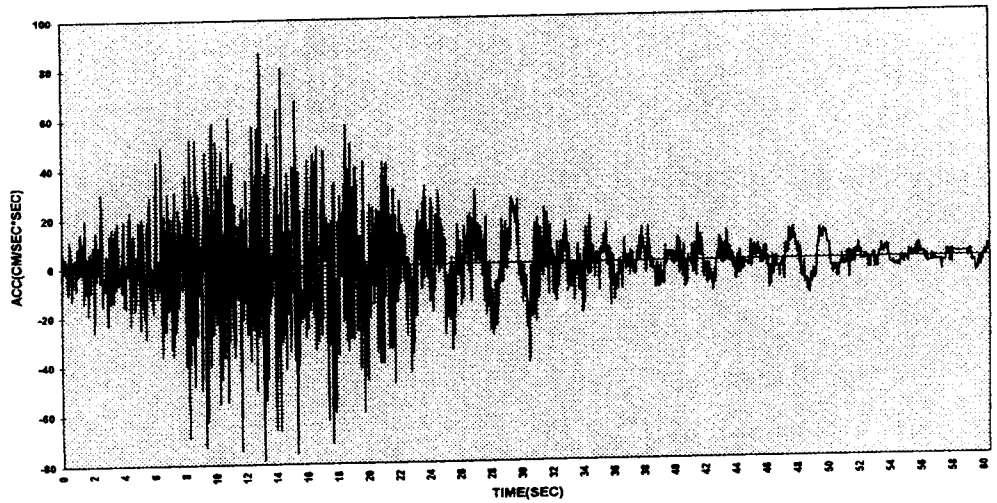
MANJIL EARTHQUAKE ACCELEROGRAMS RECORDED IN GHAZVIN STATION (V COMP)



MANJIL EARTHQUAKE ACCELEROGRAMS RECORDED IN GHAZVIN STATION (T COMP)

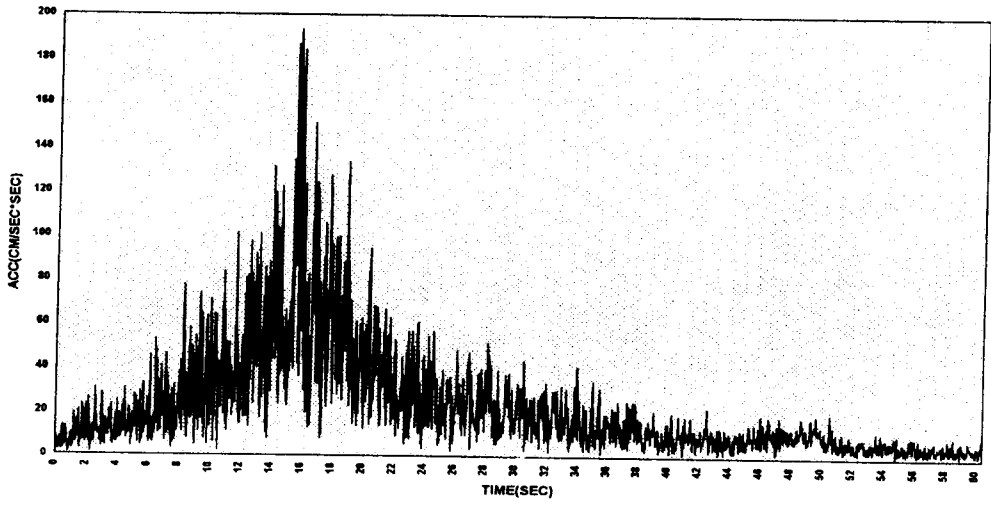


MANJIL EARTHQUAKE ACCELEROGRAMS RECORDED IN GHAZVIN STATION (V COMP)

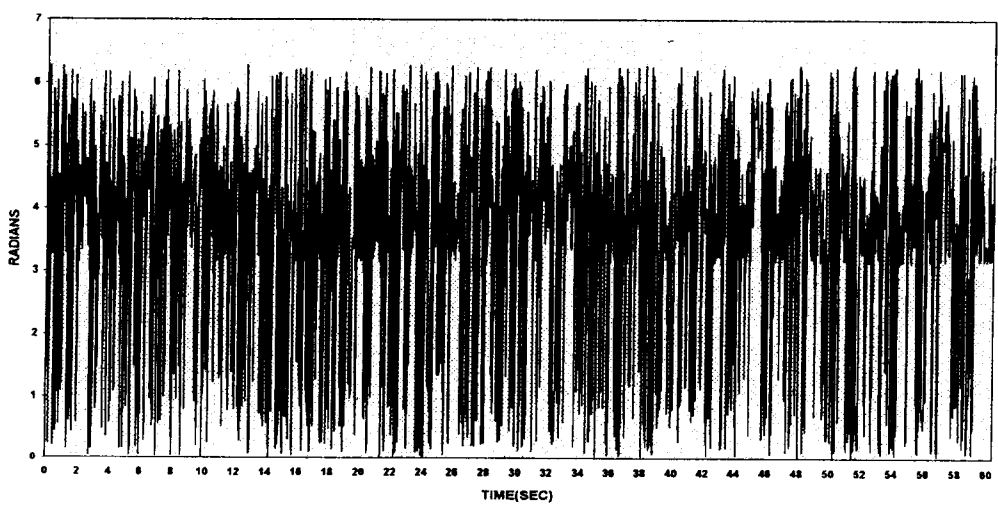


مدل سازی شتابنگاشت های حرکت نیرومند زمین ...

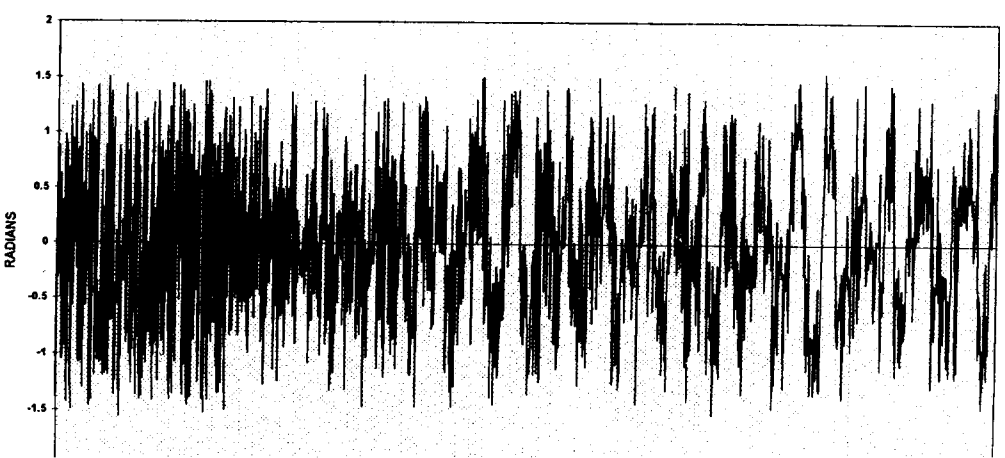
TRANSFORMED COORDINATES FROM MANJIL EARTHQUAKE (r COMP)



TRANSFORMED COORDINATES FROM MANJIL EARTHQUAKE(HORIZONTAL ANGLE COMP)



TRANSFORMED COORDINATES FROM MANJIL EARTHQUAKE(VERTICAL ANGLE COMP)



تابع را اندازه می‌گیرد. مقدار τ را می‌توان به طور قابل قبولی با زمان مابین ۲٪ و ۹۵٪ انرژی برآورد کرد و مقدار α مقدار بیشینه تابع انحراف معیار است. مقدار k_1 از میانگین تابع در ۱ درصد نهایی رکورد محاسبه می‌شود. مقدار K_1 ، t_{max} و τ با روش حداقل کردن مربعات خطا (LS) دو تابع به دست می‌آید.

$$\text{خطا} = \sum \left[\hat{\sigma}_p(t) - \bar{\sigma}_p(t) \right]^2$$

شکل ۳ مقدار $\bar{\phi}(t)$ و $\hat{\phi}(t)$ برای پایگاه قزوین را نشان می‌دهد. شکل ۴ نیز مقدار $\bar{\sigma}_p(t)$ و $\hat{\sigma}_p(t)$ برای پایگاه قزوین را به تصویر کشیده است. برای ایستا کردن هر مولفه شتابنگاشت در مختصات کارتیزین، از توابع $\hat{\gamma}(t)$ و $\hat{\sigma}_p(t)$ استفاده می‌کنیم.

$$\sigma_v(t) = \hat{\sigma}_p(t) \sin \bar{\phi}(t)$$

$$\sigma_h(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{\sigma}_p(t) \cos \bar{\phi}(t) \quad (18)$$

σ_v پوش انحراف معیار برای برآورد واریانس مولفه عمودی است و σ_h پوش انحراف معیار برای ایستا کردن مولفه‌های افقی از نظر دامنه است. مولفه‌های ایستا شده از نظر دامنه از روابط زیر به دست می‌آیند.

$$\hat{X}(t) = \frac{x(t)}{\sigma_h(t)}$$

$$\hat{Y}(t) = \frac{y(t)}{\sigma_h(t)} \quad (19)$$

$$\hat{Z}(t) = \frac{Z(t)}{\sigma_v(t)}$$

$$\bar{\phi}(t) = \frac{1}{101} \sum_{t=50}^{t+50} |\phi_i| \quad (14)$$

سپس تابع $\hat{\phi}(t)$ به $\bar{\phi}(t)$ برازش داده می‌شود که رابطه ریاضی آن به صورت زیر است.

$$\hat{\phi}(t) = (C_3 - \gamma_f) \left(1 + \frac{t}{b_3}\right) e^{-t/b_3} + \gamma_f \quad (15)$$

در این رابطه C_3 مقدار اولیه تابع است که از میانگین مقدار تابع $\bar{\phi}(t)$ در ۱۰٪ اول رکورد برآورد می‌شود. مقدار پایین حد تابع γ_f از میانگین $\bar{\phi}(t)$ در مدت ۱/۳ زمان نهایی رکورد به دست می‌آید. b_3 یا آهنگ میرایی طوری برآورد می‌شود که سطح زیر منحنی $\bar{\phi}(t)$ و $\hat{\phi}(t)$ مساوی باشد. در این رابطه، نسبت $r_3 = \frac{C_3}{\gamma_f}$ را می‌توان به پارامترهای فیزیکی نسبت داد. پوش انحراف معیار از بردار بزرگی $\rho(t)$ محاسبه می‌شود. برآورد برای واریانس سری‌ها را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد.

$$\sigma_p^2(t) = \frac{1}{101} \sum_{t=50}^{t+50} \rho_t^2 \quad (16)$$

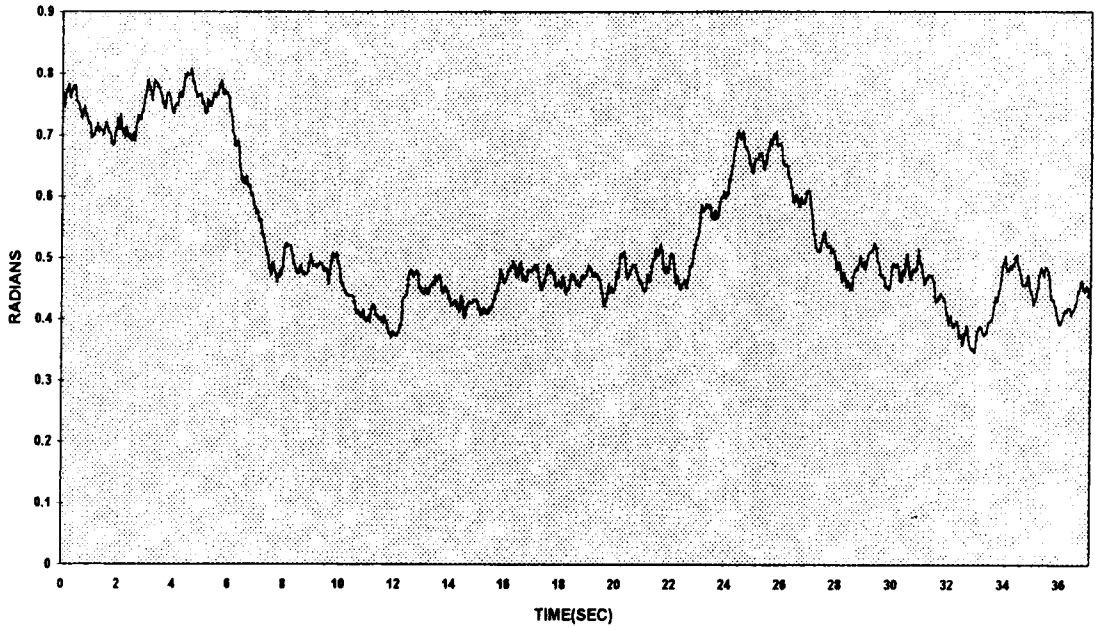
تابع انحراف معیار برآورد شده از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\hat{\sigma}_p(t) = C_1(\alpha - K_1)(t/t)^p e^{-(C_2/t)t} + k_1 \quad (17)$$

در این رابطه $C_2 = 2\sqrt{3}$ و $C_1 = \frac{(2\sqrt{3})^p e^p}{p^p}$

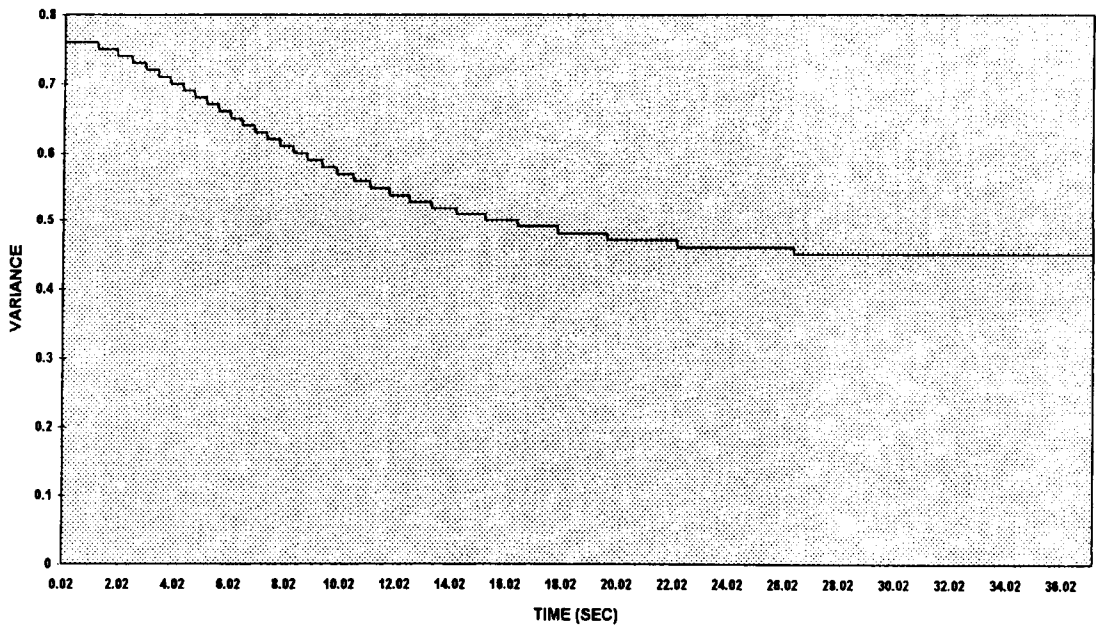
است، مقدار α حداکثر تکان ضربه است و k_1 مقدار پایین حد تابع انحراف معیار موسوم به تکان ضعیف، مدت زمان تکان قوی با τ اندازه‌گیری می‌شود. $p = \frac{C_2}{\tau} t_{max}$ است و t_{max}

VERTICAL ANGLE RUNNING AVERAGE



الف

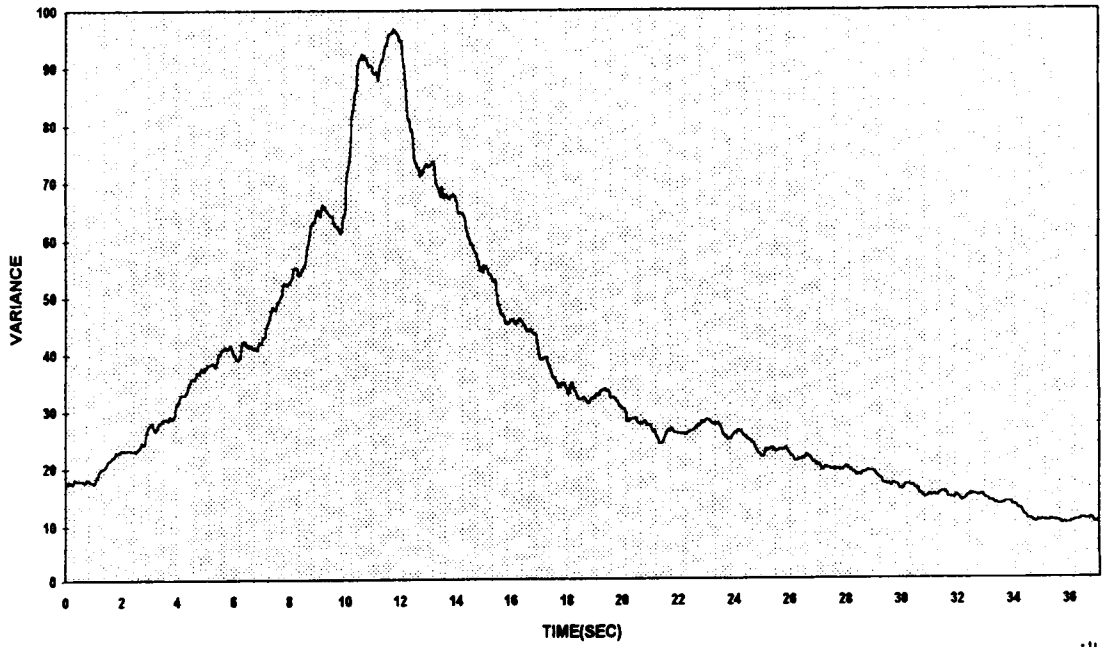
VERTICAL ANGLE ENVELOPE FUNCTION



ب

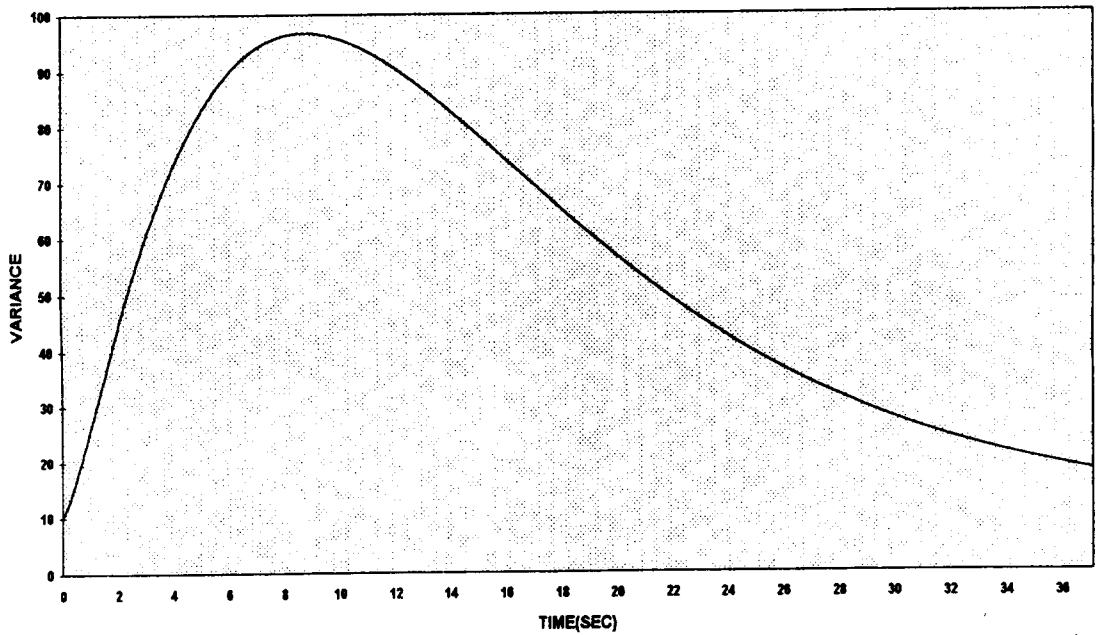
شکل ۳. پوش زاویه عمودی زلزله ۳۱ خرداد ۶۹ منجیل در پایگاه منجیل الف) تغییرات لحظه ای و ب) تابع

STANDARD DEVIATION RUNNING AVERAGE



الف

STANDARD DEVIATION ENVELOPE FUNCTION



ب

$$\Delta t' = \Delta t \times \hat{F}_c(t) \quad (22)$$

در این رابطه Δt بازه زمانی اصلی یعنی ۰/۰۲ ثانیه و $\Delta t'$ بازه زمانی جدید است. سپس رکوردها به طول زمانی یکسانی کاهش می‌یابند که این عمل طبق رابطه زیر صورت می‌گیرد.

$$\Delta t'' = \Delta t' \times \frac{\text{مدت زمان رکورد اصلی}}{\text{مدت زمان رکورد تبدیل یافته}} \quad (23)$$

مجدداً سری‌ها را در بازه زمانی ۰/۰۲ ثانیه‌ای با استفاده از درون‌یابی خطی رقمی می‌کنیم. اکنون سری‌های به دست آمده، هم از نظر دامنه و هم از نظر محتوای بسامدی، ایستا شده است و می‌توانیم مدل آرما را روی این سری‌ها پیاده کنیم. شکل ۶ سه مولفه ایستا شده پایگاه قزوین را نشان می‌دهد که از نظر دامنه و بسامد ایستا هستند. برای اینکه بفهمیم چه درجه از مدل آرما با سری‌ها بهتر تطبیق می‌کند از نرم‌افزار رایانه‌ای MATLAB استفاده شده است. در این نرم‌افزار، تابع آرما با درجات (۱، ۱)، (۱، ۲)، (۱، ۳) روی سری‌ها برازش داده شده است. مقدار آکایک برای هر کدام از مولفه‌ها در درجات مختلف به دست آمده است. آکایک به طور کلی از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$AIK = N \ln(\sigma_e^2) + 2(p+q) \quad (24)$$

در این رابطه، p درجه AR و q درجه MA و σ_e^2 واریانس باقیمانده سری‌ها و N تعداد مشاهدات است. کوچک‌ترین AIK بهترین مدل خواهد بود و لذا بر اساس محاسبات روی مولفه‌های ۱۰ شهر معلوم شد که آرما (۱، ۳)

با این کار سه مولفه از نظر دامنه ایستا می‌شوند و واریانسی حدود ۱ دارند. قدم بعدی ایستا کردن سری‌های مزبور از نظر بسامد خواهد بود. محتوای بسامدی با استفاده از پوش بسامد و با تغییر دادن مقیاس زمان رکورد ایستا می‌شود. برای به دست آوردن پوش بسامد، تعداد قطع منحنی در ثانیه، هر مولفه شتابگشت به عنوان تابعی از زمان با فرمولی ریاضی بیان می‌شود. ابتدا برای هر مولفه تعداد قطع محور زمان را در یک پنجره زمانی یک ثانیه به دست می‌آوریم، بعد مقادیر سه مولفه را با هم جمع می‌کنیم.

$$F_c(t) = \quad (20)$$

تعداد قطع محور زمان برای تمام مولفه‌ها بین ۰/۵ ثانیه $\pm t$ ثانیه
۱ ثانیه

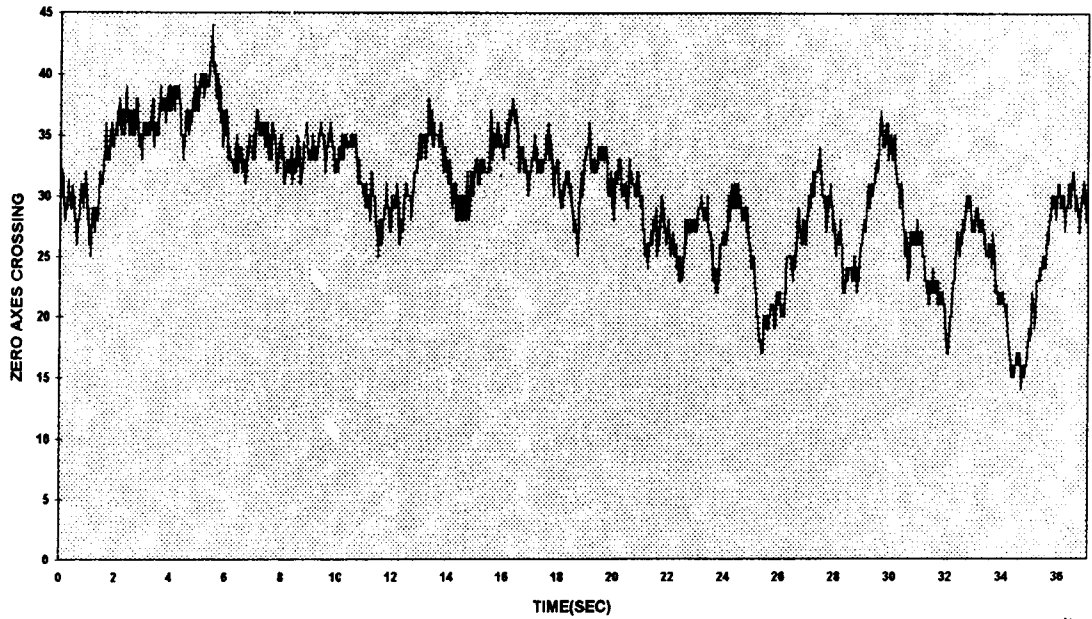
تابع پوش به نام تابع پوش بسامد برای این منحنی را به صورت تجربی به شکل زیر بیان می‌کنیم.

$$\hat{F}_c(t) = (C_2 - K_2) \left(1 + \frac{t}{b_2}\right) e^{-t/b_2} + k_2 \quad (21)$$

مقدار C_2 به عنوان میانگین $F_c(t)$ در مدت ۱۰٪ اول رکورد برآورد می‌شود و مقدار k_2 از میانگین مقدار $F_c(t)$ در ۱/۳ قسمت نهایی رکورد و مقدار b_2 با مساوی کردن سطوح زیر منحنی بین $F_c(t)$ و $\hat{F}_c(t)$ به دست می‌آید.

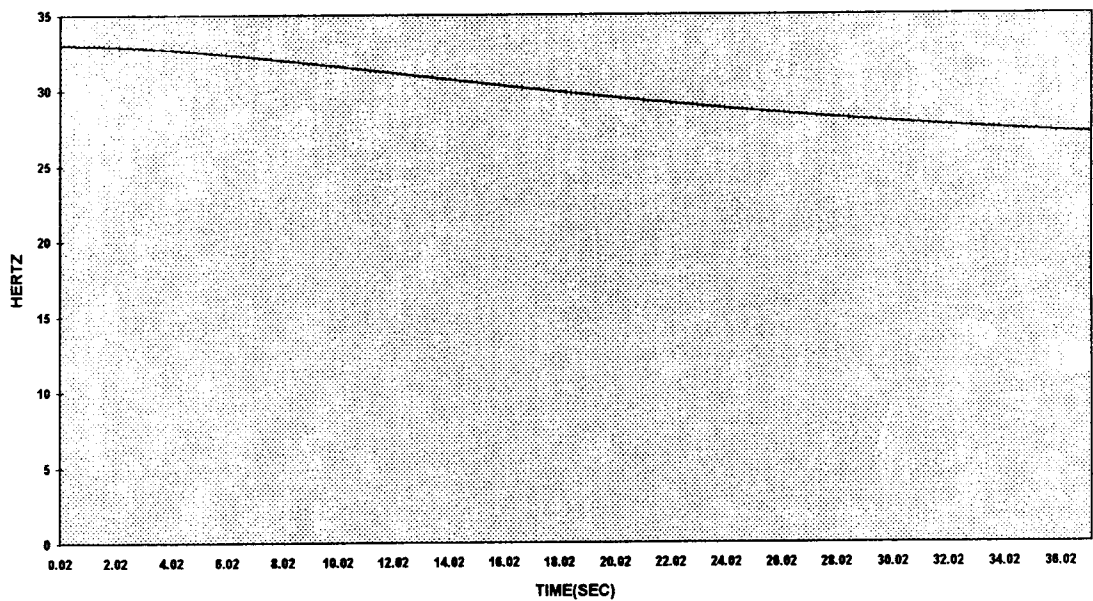
شکل ۵ مقدار $F_c(t)$ و $\hat{F}_c(t)$ را برای پایگاه قزوین نشان می‌دهد. برای اینکه مقدار بسامد در طول سری زمانی که قبلاً برای دامنه ایستا شده یکنواخت باقی بماند، مقیاس زمانی را تغییر می‌دهیم و ابتدا مقادیر مشاهده شده را طبق

ZERO AXES CROSSING RUNNING AVERAGE



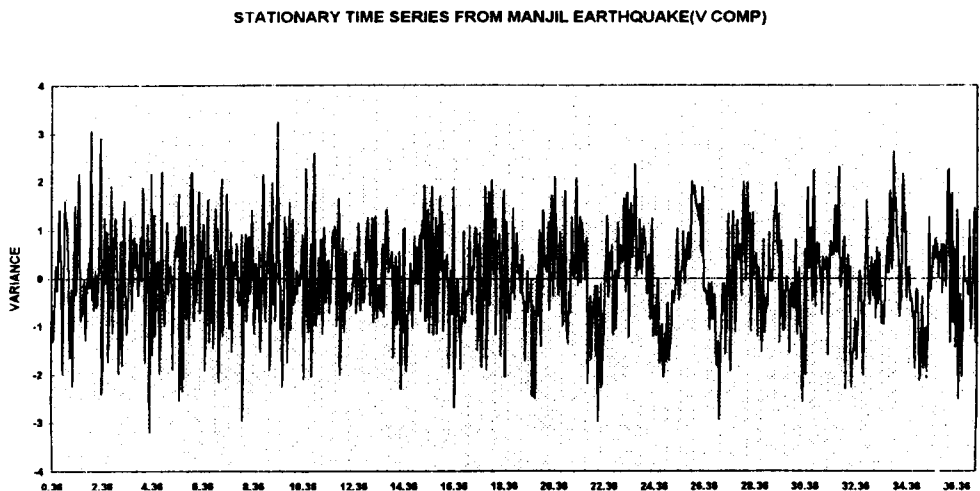
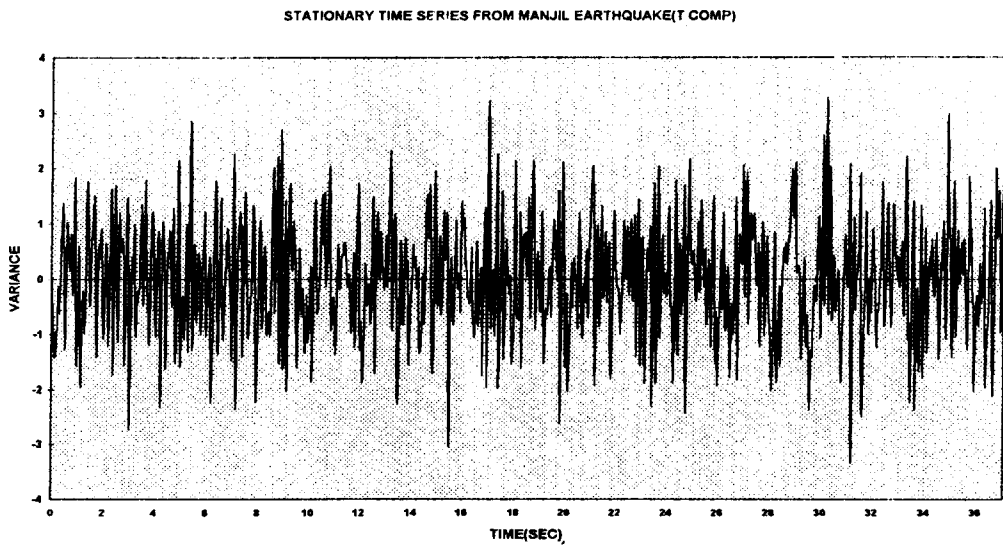
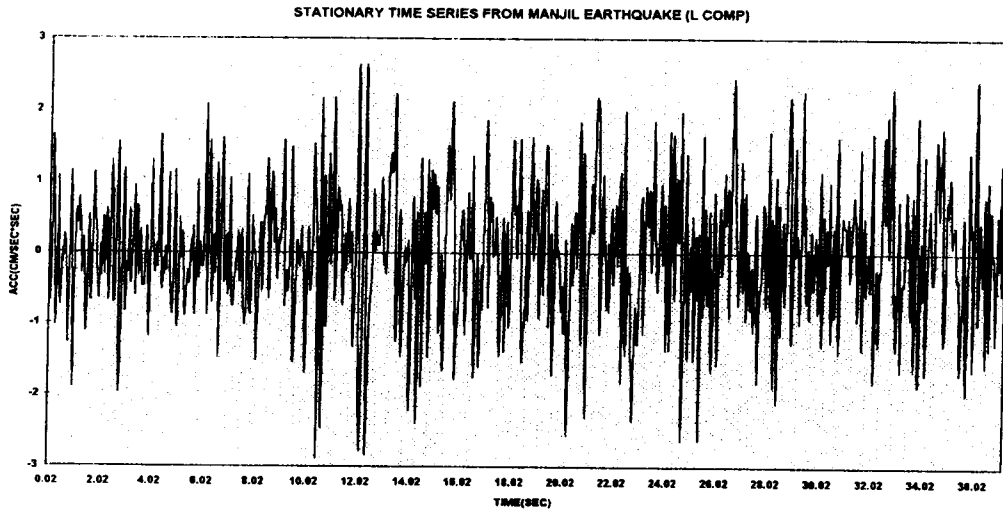
الف

FREQUENCY ENVELOPE FUNCTION



ب

شکل ۵. پوش تعداد قطع محور زلزله ۳۱ خرداد ۶۹ منجیل در پایگاه قزوین الف) تغییرات لحظه‌ای و ب) تابع برازش داده شده به آن.



شکلی دارد.

سه مولفه سپس با نمونه‌گیری ۰/۰۲ ثانیه‌ای با درون‌یابی خطی رقمی می‌شوند و بدین ترتیب سری ایستا از نظر بسامدی به حالت قبلی باز می‌گردد. در مرحله بعد باید دامنه‌ها را نیز به حالت قبلی برگردانیم، در این حالت از تابع پوش انحراف معیار $\hat{\sigma}_p(t)$ استفاده می‌کنیم.

$$\begin{aligned}\sigma_v(t) &= \hat{\sigma}_p(t) \sin \hat{\phi}(t) \\ \sigma_h(t) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{\sigma}_p(t) \cos \hat{\phi}(t)\end{aligned}\quad (28)$$

با ضرب کردن مولفه عمودی در $\sigma_v(t)$ و دو مولفه افقی در $\sigma_h(t)$ یک مجموعه شبیه‌سازی شده نایستا، هم از نظر بسامد و هم از نظر واریانس پیدا می‌شود. شکل ۷ سه مولفه شبیه‌سازی شده پایگاه قزوین را نشان می‌دهد. برای ارزیابی صحت محاسبات لازم است شتابنگاشت حاصله، هم از نظر شکل ظاهری و هم از نظر محتوای بسامدی با شتابنگاشت اصلی برابر باشد. اولین مقایسه، مقایسه پوش شتابنگاشت اصلی با پوش شتابنگاشت شبیه‌سازی شده است که در این مورد تطابق خوبی داشته‌اند. دومین مقایسه، مقایسه طیف فوریه سری‌های اصلی با طیف فوریه شبیه‌سازی شده بود. با در نظر گرفتن باند بسامدی در صافی کردن اعداد به کار برده شده که روی اعداد خام شتابنگاشت‌ها صورت گرفته است. تطابق طیف بسامد بیانگر عملکرد خوب مدل است. شکل ۸ طیف بسامد مولفه‌های پایگاه قزوین، ثبت شده از زلزله منجیل - رودبار و شبیه‌سازی شده آن را نشان می‌دهد و تشابه دو طیف نشان دهنده

$$\begin{aligned}Z_t - \phi_1 Z_{t-1} - \phi_2 Z_{t-2} - \phi_3 Z_{t-3} \\ = a_t - \theta_1 a_{t-1}\end{aligned}\quad (25)$$

در برنامه MATLAB، ضرایب محاسبه شده در یک ماتریس ذخیره می‌شود و سپس با ایجاد یک نوفه سفید (a_t) با استفاده از برنامه شبیه‌سازی، سری زمانی بر اساس الگوی خواسته شده شبیه‌سازی می‌شود. بنابراین با استفاده از این نرم‌افزار ما قادر هستیم سری ایستایی از نظر واریانس و محتوای بسامدی ایجاد کنیم.

۵ شبیه‌سازی شتابنگاشت

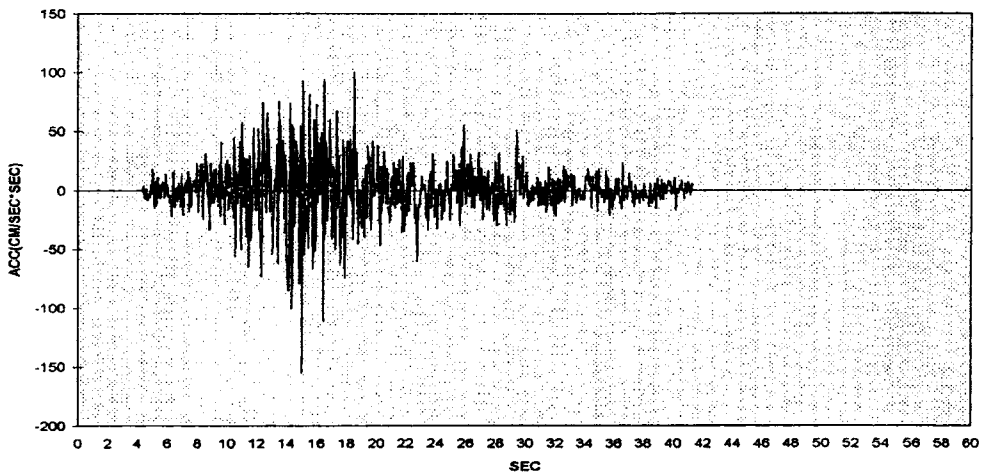
برای رسیدن به یک سری با محتوای بسامدی نایستا از معادله $\hat{F}_c(t)$ استفاده می‌کنیم، چون شکل و دامنه پوش بسامد اهمیت ندارد، در مقیاس‌بندی مجدد نسبت $r_2 = \frac{C_2}{K_2}$ و آهنگ میرایی b_2 را می‌توان به متغیرهای فیزیکی نسبت داد. بنابراین در محاسبه تابع پوش بسامد می‌توان k_2 را برابر ۱ انتخاب کرد و C_2 را با r_2 برابر نمود. محور زمان هر مولفه با رابطه زیر مقیاس‌بندی مجدد می‌شود.

$$\Delta t'_s = \frac{0.02}{\hat{F}_c(t)}\quad (26)$$

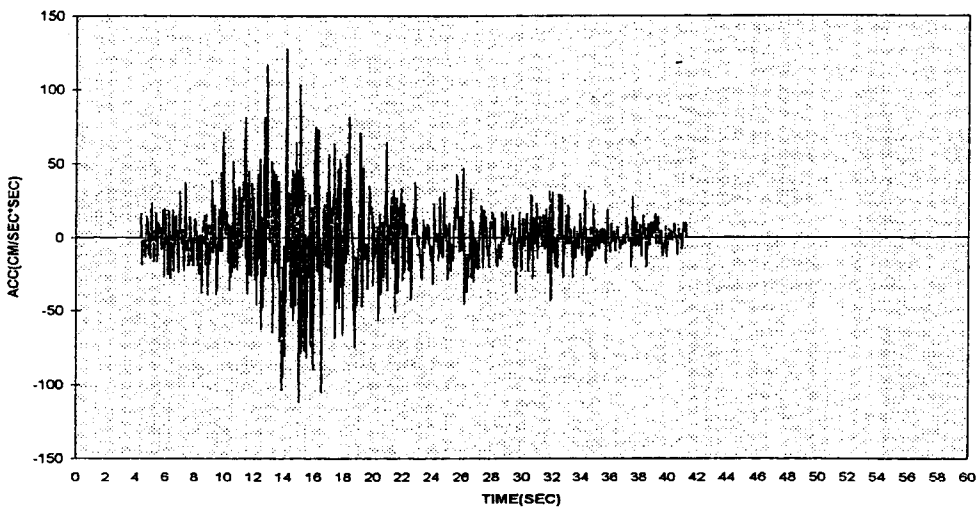
بعد از تغییر محور زمان، هر مولفه رکورد به مقدار اصلی توسط رابطه زیر کاهش می‌یابد.

$$\Delta t''_s = \Delta t'_s \frac{\text{مدت شبیه‌سازی واقعی}}{\text{مدت شبیه‌سازی تبدیل شده}}\quad (27)$$

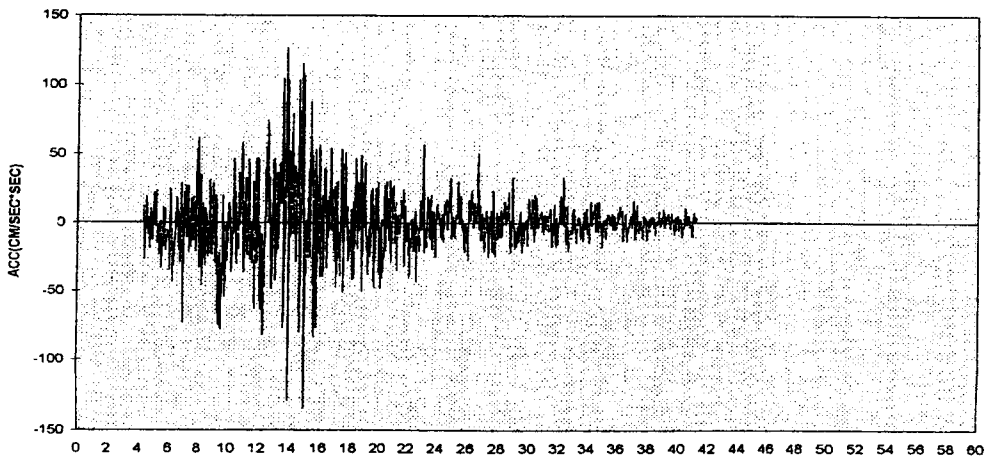
SIMULATED ACCELEROGRAMS BY:ARMA MODELS FROM MANJIL ACCELEROGRAMS(L COMP)



SIMULATED ACCELEROGRAMS BY:ARMA MODELS FROM MANJIL ACCELEROGRAMS(T COMP)

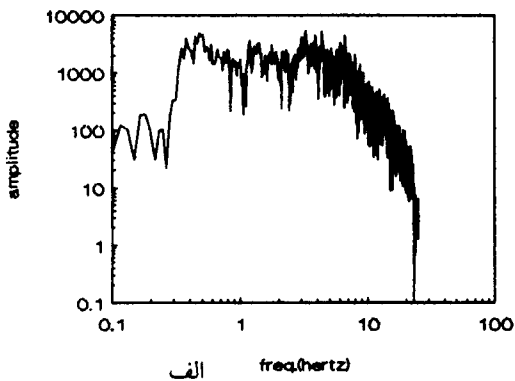


SIMULATED ACCELEROGRAMS BY:ARMA MODELS FROM MANJIL ACCELEROGRAMS(V COMP)



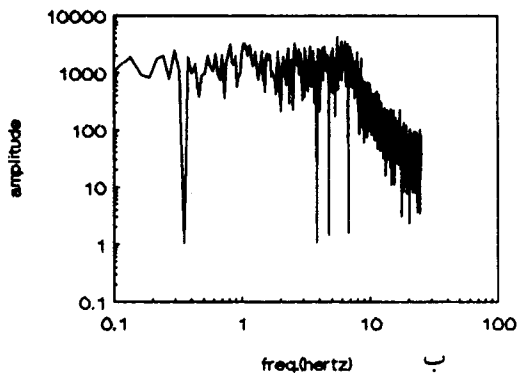
amplitude spectrum
from manjil accelerogrm

— ghazvin st.
L comp.



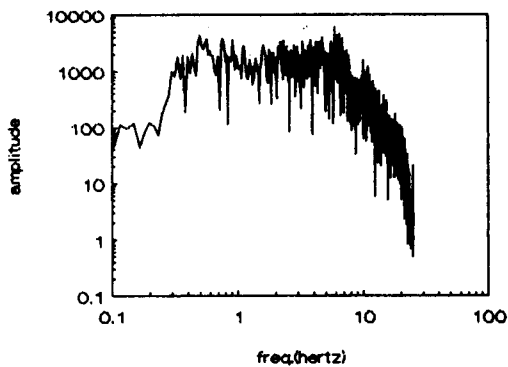
simulated accelerogrm
amplitude spectrum

— ghazvin st.
L comp.



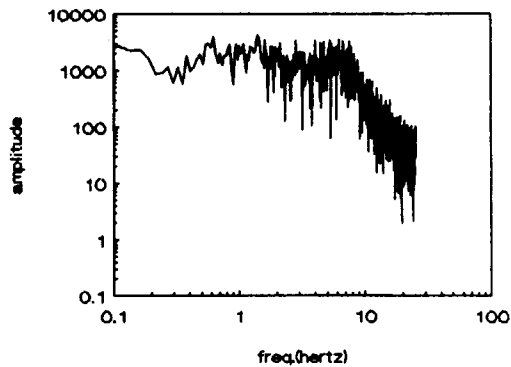
amplitude spectrum
from manjil accelerogram

— ghazvin st.
T comp.



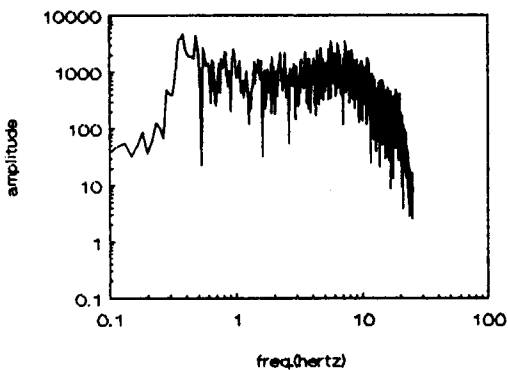
simulated accelerogram
amplitude spectrum

— ghazvin st.
T comp.



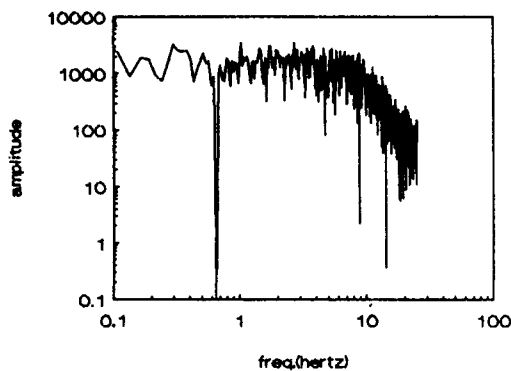
amplitude spectrum
from manjil accelerogram

— ghazvin st.
V comp.



simulated accelerogram
amplitude spectrum

— ghazvin st.
V comp.



آئین‌نامه ۲۸۰۰) مطابق جدول ۱ استفاده شده است.

مدل‌سازی مطلوب است.

۶ زلزله منجیل

جدول ۱. فاصله از رومرکز و کد مربوط به جنس خاک در ده پایگاه مورد نظر (رمضی، ح.ر.، ۱۳۷۶).

ردیف	پایگاه	فاصله تا رومرکز	کد خاک
۱	آب بر	۲۳	۱
۲	ابهر	۹۵	۳
۳	قزوین	۵۴	۲
۴	لاهیجان	۷۶	۴
۵	زنجان	۵۷	۳
۶	رودسر	۹۰	۴
۷	تنکابن	۱۳۱	۴
۸	گچسر	۱۸۵	۲
۹	اردبیل	۱۹۳	۳
۱۰	کهریزک	۲۲۲	۴

جنس خاک‌های ایران در آئین‌نامه زلزله ۲۸۰۰ به چهار گروه تقسیم‌بندی شده و هر کدام دارای کدهایی از ۱ تا ۴ هستند که می‌توان این کدها را در تعیین جنس خاک مورد استفاده قرار داد. حفیظی و جلالی، ۱۳۷۵، پارامترهای آرما حاصل از مدل‌سازی شتابنگاشت‌های زلزله منجیل - رودبار را در ده شهر مختلف به‌دست آورده‌اند. جدول‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهند که مقدار α به‌طور مشخص با فاصله از رومرکز رابطه دارد و این پارامتر را می‌توان به شکل رابطه ۲۹ نوشت. روابطی که برای ده شهر به‌دست آمده به قرار زیر است.

$$\ln \alpha = (7.210872 \pm 0.397554) - (0.70081$$

در نخستین ساعات روز ۳۱ خرداد ۱۳۶۹ زلزله‌ای با بزرگی $M_w = 7.3$ دو استان گیلان و زنجان را به لرزه درآورد و تعدادی از دستگاه‌های شتاب‌نگاری شبکه شتاب‌نگاری زلزله ایران را به‌کار انداخت. بر اساس نشریه ۱۷۹ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۷۲)، هنگام وقوع زلزله جمعا ۴۸ دستگاه شتاب‌نگار آنالوگ از نوع SMA-1 در منطقه‌ای به فاصله ۲۵۰ km از مرکز زلزله نصب شده بود. تعداد ۳۸ دستگاه بدون نقص فنی آماده به‌کار بود که از بین این‌ها ۲۲ دستگاه از جمله چند دستگاه در تهران شروع به کار نمودند و شتابنگاشت‌هایی را ترسیم کردند. استارتر شتاب‌نگارها روی مولفه‌های قائم است و موقعی که شتاب قائم زلزله به حدود ۱۰ گال (یک‌صدم شتاب ثقل زمین) می‌رسد به طور خودکار شروع بکار می‌کند. برای خوانش ارقام تصحیح نشده شتابنگاشت‌ها از دستگاه پوشگر و برای تصحیح ارقام خام، محاسبه سرعت، جابه‌جایی و شتاب، از برنامه رایانه‌ای "تحلیل داده‌های جنبش نیرومند (مجموعه‌ای از اطلاعات شبکه شتاب‌نگاری، ۱۳۷۲)" استفاده شده است. در این تحقیق از شتابنگاشت‌های تصحیح شده‌ای استفاده شده است که حرکت نیرومند زمین در آن مناطق بیشتر از 20 cm/sec^2 بوده است. در تحلیل شتابنگاشت‌های زلزله منجیل از ده شهر با فاصله‌های مختلف و نوع خاک متفاوت (براساس

جدول ۲. پارامترهای حاصل از مدل‌سازی شتابنگاشت‌های زلزله منجیل - رودبار در ده شهر مختلف

ردیف	پایگاه	r_3	b_3	c_3	γ_f	k_1	τ	α	p
۱	آب بر	۱/۵۸۵	۶/۶۳۳	۰/۶۴۲	۰/۴۰۵	۲۲/۷۸	۳۲/۳	۲۹۲/۷۸	۱/۳۴۷۵۰۳
۲	ایهر	۱/۶۶۴	۳/۵۹۶	۰/۴۰۹	۰/۲۴۶	۲۲/۸۵	۱۹/۷۲	۱۱۰/۰۴۱	۱/۶۸۳۵۰۷
۳	قزوین	۱/۷۱۲	۴/۹۳۴	۰/۷۶۴	۰/۴۴۵	۱۰/۳۴	۲۲/۴۶	۹۶/۶۷۱	۱/۳۴۸۲۰۵
۴	لاهیجان	۱/۳۴۲	۵/۵۲۲	۰/۴۵۹	۰/۳۴۲	۲۰/۸۰۴۴	۳۰/۶۴	۹۰/۴۹۴	۱/۲۹۶۸۷۲
۵	زنجان	۱/۷۵۹	۴/۲۵۹۲	۰/۶۸۹	۰/۳۹۲	۱۳/۳۳۲	۳۸/۱۲	۵۵/۶۵۵	۱/۳۲۱۶۴۳
۶	رودسر	۱/۸۲	۶/۸۵۰	۰/۵۹۸	۰/۳۲۹	۱۰/۶۵۴	۲۸/۴۶	۵۳/۴	۱/۱۹۶۵۱۹
۷	تنکابن	۱/۳۱	۲/۲۸۳	۰/۳۳۷	۰/۲۵۷	۱۷/۷۶۳۸	۲۴/۵	۷۵/۴۸۳	۱/۳۵۱۱۸
۸	گچسر	۱/۱۳۹	۵/۸۲۷۹	۰/۴۶۵	۰/۴۰۸	۱۱/۳۴۶۲	۳۲/۷۴	۵۰/۶۰۲	۱/۳۳۵۴۵۸
۹	اردبیل	۰/۳۹۰	۴/۱۶۸	۰/۲۲۹	۰/۵۸۷	۱۸/۱۴۴	۸/۸۴	۱۹/۲۰۳	۱/۸۴۳۰۴۳
۱۰	کهریزک	۱/۲۴۹	۷/۰۱۶	۰/۴۱۲	۰/۳۳	۸/۹۶۷۷	۱۲/۵۸	۲۹/۷۱۹	۱/۷۱۹۸۳۲

سرعت موج برشی مقدار γ_f افزایش می‌یابد. برای زلزله‌های تایوان که نوع خاک یکسان بودند، مقدار γ_f برای ایستگاه‌های مختلف مقدار ثابتی به دست داده است.

۷ نتیجه‌گیری

نظر به اهمیت شبیه‌سازی شتابنگاشت‌ها در تحلیل دینامیکی سازه‌ها، برای نوع خاک پی محل سازه و فاصله آن از رومرکز زلزله محتمل، مدل‌سازی آماری و ریاضی ضرورت پیدا می‌کند. مدل انتخاب شده در این پژوهش، مدل خودبازگشتی - متوسط متحرک است که امکان نسبت دادن پارامترهای فیزیکی را به ضرائب توابع مدل‌سازی برقرار می‌سازد. مرتبه این مدل برای شتابنگاشت‌های ده شهر که از زلزله منجیل تکان شدید ثبت کرده بودند، برای مدل بازگشتی از مرتبه سه و برای متوسط متحرک از مرتبه یک

$$R^2 = 0.75 \quad (29)$$

در این رابطه، d فاصله تا رومرکز بر حسب km است. مقدار τ نیز با فاصله افزایش نسبی نشان می‌دهد و این پارامتر را نیز می‌توان به فاصله رومرکز وابسته کرد که عبارتست از

$$\ln \tau = (1.917304 \pm 0.098597) + (0.048752 \pm 0.003532)d \quad (30)$$

و رابطه نوع خاک S و γ_f به صورت زیر تغییر می‌کند.

$$\gamma_f = (0.6351 \pm 0.72883) - (0.078 \pm 0.029754)S$$

$$R^2 = 0.516603 \quad (31)$$

الیس و دیگران (۱۹۹۰) با استفاده از زلزله مکزیکوسیتی نشان دادند که مدل نسبت به نوع زمین حساسیت زیادی دارد و دو ساختگاه با خاک خیلی نرم و زمین سنگی را با یکدیگر مقایسه نموده‌اند. آنها نشان دادند که مقدار γ_f با

- Holden-Day, San Francisco.
- Cakmak A.S., and Polliemus N.W., 1981, Simulation of Earthquake Ground Motions Using Auto Regressive Moving Average (ARMA) Models: Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **9**, 343-345.
- Chang, M.K., Kwiatkowski, J.W., Nau, R.F., Oliver, R.M. and Pister, K.S. 1982, ARMA models for earthquake ground motions: Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **10**, 651-662.
- Dargahi-Noubary, G.R., 1992, Models for seismic records, why uniformly modulated ARMA: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **11**, 381-385.
- Ellis, G.W., and Cakmak, A.S., 1990, Time series modeling of strong ground motion from multiple event earthquakes: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **10**(1).
- Ellis, O.W., 1987, Modeling earthquake ground motions in seismically active regions using parametric time series methods: Technical Report NCEER-87-0014 (National Center for Earthquake Engineering Research), SUNY, Buffalo, NY, USA.
- Ellis, G.W., Deveaux, R.D., and Cakmak, A.S., 1990, Multivariate time series modeling of strong motion accelerograms recorded in Mexico and Taiwan: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **9**(4).
- Findell, K. L., Köylüoğlu, H.U., Cakmak, A.S., 1993, Modeling and simulating earthquake accelerograms using strong motion data from the Istanbul, Turkey regions: Soil Dynamics and Earthquake Engineering **12**, 51-59.
- Jurkevics, A. and Ulrych, T.J., 1978, Representing and simulating strong ground motion: Bull. Seis. Soc. Am., **68**, 3, 781-801.
- Jurkevics, A. and Ulrych, T.J., 1979, Autoregressive parameters for a suite of strong-motion Accelerograms: Bull. Seis. Soc. Am., **69**, 6, 2025-2036.
- Kozin, F., 1977, Estimation and modeling of non-stationary time series: Proc. Symp. Computer Meth, in Engin., University of Southern California.
- Polhemus, N.W. and Cakmak, A.S., 1981, Simulation of Earthquake Ground Motions Using Autoregressive Moving Average (ARMA) Models: Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **9**, 343-354.
- Trostheim D. 1975. Some Autoregressive

زاویه عمودی به کار می رود، با نرم شدن لایه رسوبی کاهش نشان می دهد. حداکثر دامنه پوش انحراف معیار α با افزایش فاصله رومرکز کاهش می یابد. درحالی که مقدار عرض پوش انحراف معیار τ با افزایش فاصله رومرکز افزایش نشان می دهد. مقدار پارامتر γ_f که در تابع پوش زاویه عمودی به کار می رود، با پارامتر نوع خاک نسبت عکس دارد. لذا با داشتن فاصله از رومرکز زلزله محتمل و نوع خاک پی سازه مورد نظر، می توان پارامترهای مورد نیاز مدل را به دست آورد، شتابنگاشت مربوط را شبیه سازی کرد و برای طراحی سازه به کار گرفت.

تشکر و قدردانی

این پژوهش در چارچوب طرح پژوهشی مصوب شماره ۶۵۱/۱/۳۵۹ دانشگاه تهران تحت عنوان "مدل سازی حرکات نیرومند زمین با استفاده از روش ARMA" انجام شده است. بدین وسیله از کلیه همکاران شورای پژوهشی دانشگاه تهران قدردانی به عمل می آید. در ضمن از مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن به خاطر در اختیار گزاردن شتابنگاشت ها و از پرسنل مرکز رایانه دانشکده فنی به خاطر همکاری صمیمانه آنها، تشکر می شود.

منابع

- Aki, K., 1978, Origin of the Seismic gap: what initiates and stops a rapture propagation along a plate boundary? Proceeding of Conference VI Methodology for Identifying Seismic Gaps and Soon-to Brake gaps:

میرزایی، ح.ع. و فرزنانگان، ا.، ۱۳۷۷، مشخصات ایستگاه‌های شبکه شتابنگاری کشور: نشریه شماره ک-۲۸۰ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

مجموعه آئین‌نامه‌های ساختمانی ایران شماره استاندارد ۲۸۰۰، آئین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله، ویرایش دوم، ۱۳۷۶: نشریه شماره ۲۵۳، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

مجموعه‌ای از اطلاعات شبکه شتابنگاری، ۱۳۷۲: نشریه شماره ۱۷۹، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

باکس و جنکینز، ترجمه مشکانی، ر.، ۱۳۷۱، تحلیل سری زمانی، پیش‌بینی و کنترل: انتشارات دانشگاه شهید بهشتی.

بانک اطلاعاتی شبکه شتابنگاری مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن: وزارت مسکن و شهرسازی ایران.

حفیظی، م.ک. و جلالی، م.ک.، ۱۳۷۵، مدل‌سازی حرکات نیرومند زمین با استفاده از روش ARMA از روی اطلاعات شتابنگاشت‌های زلزله منجیل: گزارش نهایی طرح تحقیقاتی شماره ۶۵۱/۱/۲۱۲ دانشگاه تهران.

رمضی، ح.ر.، ۱۳۷۶، داده‌های پایه شتابنگاشت‌های شبکه شتاب‌نگاری کشور: نشریه شماره ۲۵۶ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.