

بررسی تأثیر پارامترهای مهم شبیه‌سازی احتمالی زمین‌لرزه بر اساس روش گسل محدود

حسن مقدم^۱، نادر فنايي^{۲*} و حسين حمزه‌لو^۳

^۱استاد دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

^۲دانشجوی دکتری زلزله، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

^۳استادیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

(دریافت: ۸۶۳۱، پذیرش نهایی: ۸۶۱۰۲۵)

چکیده

برخلاف لرزش‌های بلند دوره زمین‌ناشی از زمین‌لرزه که قابل پیش‌بینی و برآوردند لرزش‌های بسامد زیاد زمین‌ماهیتی تصادفی دارند و به‌صورت احتمالی رفتار می‌کنند. در مناطقی که ثبت‌های شتاب‌نگاری وجود ندارد می‌توان از روش احتمالی بور اقدام به شبیه‌سازی لرزش‌های بسامد زیاد زمین‌لرزه کرد. روش‌های شبیه‌سازی احتمالی بر دو نوع‌اند: در نوع اول منبع لرزه‌ای منبعی نقطه‌ای است و در نوع دوم که شبیه‌سازی بر اساس گسل محدود نام دارد، منبع لرزه‌ای یک گسل مستطیلی است که در راستای طولی و عرضی خود به‌صورت منابع نقطه‌ای یکسان المان‌بندی شده است. سه پارامتر ضریب کیفیت، کاپا و افت تنش از جمله پارامترهای مهم شبیه‌سازی بر اساس گسل محدودند که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این تحقیق مشخص شده است که اثر عمده ضریب کیفیت در بسامدهای زیاد است و تغییر این پارامتر تأثیر چندانی روی شتاب‌های طیفی در بسامدهای کم ندارد. همچنین با افزایش کاپا مقدار شتاب‌های طیفی و همچنین شتاب ماکزیموم زمین، PGA کاهش می‌یابد؛ البته مقدار کاهش شتاب‌های طیفی در بسامدهای زیاد، بیشتر است و در نهایت افزایش افت تنش مقدار شتاب‌های طیفی را افزایش می‌دهد که مقدار این افزایش در بسامدهای زیاد قابل توجه است. در این تحقیق اثر سرعت موج برشی و چگالی نیز روی شتاب‌های شبیه‌سازی شده بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، گسل محدود، شتاب طیفی، ضریب کیفیت، کاپا، افت تنش

The effect of important parameters on simulation based on stochastic finite fault modeling

Moghaddam, H¹., Fanaie, N². and Hamzehloo, H³.

¹Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

²Ph.D student, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

³Assistant Professor, International Institute of Earthquake and Seismology, Tehran, Iran

(Received: 22 May 2007, Accepted: 15 Jan 2008)

Abstract

Contrary to the long period ground motions that can be predicted and estimated, high frequency ground motions have random character and behave stochastically. Stochastic modeling methods are usually used for the modeling of high frequency ground motions where there are not strong ground motion records. Stochastic methods are of two kinds: in the first one, the seismic source is considered as a point source and in the second, modeling is based on the finite fault. Seismic source is considered as a rectangular fault plane divided by some subfaults in its longitudinal and traversal directions.

Stochastic modeling method, using the seismic point source was presented by Boore in 1983. In the Boore stochastic method, the high frequency motions of earthquakes can be presented as the Gaussian noise with limited frequency band having the mean source spectrum w^2 . In this method a shape function is applied to a time series of white noise with zero mean, bringing it out of the stationary status, then the Fourier transform is applied to the noise and the amplitude spectrum of this time series is substituted by a desired spectrum and the phase spectrum remains unchanged. Transformation back to the time domain results in a time series whose amplitude spectrum is exactly in accordance with a specified spectrum.

In the simulation based on finite fault modeling, each subfault is considered as a point source, using the source model presented by Brune with a corner frequency and a constant stress drop. The target accelerogram is obtained by summation of accelerograms generated by each subfaults and by considering their corresponding delay times. This simulation method is used broadly in the assessment of strong ground motions. The first ground motion simulation program, FINISM, was finite fault modeling, based on the Boore stochastic method. The new version of the FINISM program, which is called EXSIM, has been used in this study.

Three parameters, quality factor, kappa and stress drop which have effects on the high frequency amplitudes, are important parameters in stochastic modeling which are considered in this study. Moreover the effects of shear wave velocity and density on the simulation accelerations are studied as well. In these simulations to distinguish the effect of a specific parameter, the amount of that parameter is changed, while other parameters are kept constant. It is found that the main effect of quality factor is in the high frequencies and variation of this parameter has no significant effect on the spectral accelerations in low frequencies. With increasing quality factor, the spectral accelerations as well as peak ground acceleration (PGA) which correspond to the spectral accelerations in high frequencies, will increase. This increase is greater in high frequencies and smaller in the low ones. The spectral acceleration and PGA reduce when kappa increases but the acceleration reduction is higher in high frequencies. It has been seen that the spectral accelerations increase with the increase in stress drop. Of course, this increment is small in low frequencies, but considerable in high frequencies. Rupture velocity is usually assumed as 80% of shear wave velocity. As shear wave velocity increases, the rupture velocity increases as well and consequently the fault will fracture more rapidly. Therefore, the delay time of subfault pulses reaching the observation point will reduce. This shows that if shear wave velocity increases, the duration of simulated accelerograms reduces slightly.

Finally the density effect on the simulation results is investigated in this study and it is concluded that if the density increases by α then PGA, spectral accelerations and Fourier amplitude of simulated accelerogram will increase by $1/\alpha$.

Key words: Simulation, Finite fault, Spectral acceleration, Quality factor, Kappa, Stress drop

۱ مقدمه

جهت پذیری) را در نظر بگیرد. به خاطر این محدودیت‌ها در ۱۹۷۸ روش مدل‌سازی براساس گسل محدود از سوی هاتزل ارائه شد و در دو دهه گذشته مقبولیت زیادی یافت

روش منبع نقطه‌ای نمی‌تواند پارامترهای کلیدی لرزش زمین در یک زمین‌لرزه بزرگ، مانند مدت زمان طولانی و وابستگی دامنه‌ها به آزمون ایستگاه مشاهده (اثر

منبع نقطه‌ای است از مدل منبع ارائه شده از سوی برون با یک بسامد گوشه و یک افت تنش ثابت استفاده می‌کند. این روش شبیه‌سازی، روش مناسبی است و به‌طور گسترده‌ای در برآورد جنبش نیرومند زمین از آن استفاده می‌شود. البته در فواصل دور از گسل، یک منبع صفحه‌ای می‌تواند به‌صورت منبعی نقطه‌ای در نظر گرفته شود و از آنجا که شبیه‌سازی با منبع نقطه‌ای محاسبات کمتری نیاز دارد، مناسب‌تر است. ارزیابی نتایج منبع نقطه‌ای و منبع صفحه‌ای مشخص می‌کند که مدل منبع صفحه‌ای برآوردهای دقیق‌تری را نسبت به مدل منبع نقطه‌ای در تناوب‌های بیش از یک ثانیه می‌دهد. برای تناوب‌های کمتر از یک ثانیه هر دو مدل نتایج قابل مقایسه و خوبی را به‌دست می‌دهند.

در این مقاله روش مدل‌سازی بر اساس گسل محدود تشریح شده است و پیشرفت‌های به‌دست آمده در برنامه‌های شبیه‌سازی در این روش بیان شده است، سپس تأثیر پارامترهای مهم مورد استفاده در شبیه‌سازی بر اساس گسل محدود مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد و با تغییر پارامترهایی مانند ضریب کیفیت، کاپا و افت تنش، اثر این پارامترها روی شتاب‌نگاشت‌های شبیه‌سازی شده هدف این تحقیق، مشخص شده است. همچنین اثر سرعت موج برشی و چگالی نیز بر شبیه‌سازی بررسی شده است. با توجه به اینکه روش شبیه‌سازی گسل محدود بر مبنای روش احتمالی بور (Boore) است در ادامه روش احتمالی بور و طیف منبع لرزه‌ای مورد استفاده در این روش و همچنین سایر عوامل مؤثر در شبیه‌سازی مانند انواع میرایی‌ها و اثر ساختگاه و پدیده تشدید بررسی می‌شود.

۲ روش احتمالی بور

در روش احتمالی بور لرزش‌های بسامد زیاد زمین‌لرزه را می‌توان در نقش نوفه گوسی با باند بسامدی محدود که

(هاتزل، ۱۹۷۸). روش مدل‌سازی بر اساس گسل محدود جنبه‌های منبع صفحه‌ای را با مدل لرزش زمین بر اساس منبع نقطه‌ای ترکیب می‌کند و از آنجا که محدودیت‌های ذکر شده به‌طور طبیعی در روش مدل‌سازی بر اساس گسل محدود وجود ندارد، این روش هندسه شکست و اثر جهت‌پذیری را در نظر می‌گیرد و نتایج خوبی را به‌دست می‌دهد. برای شبیه‌سازی با استفاده از گسل محدود، از روش تأخیر زمانی و جمع شتاب‌نگاشت‌های مربوط یک شبکه دوبعدی شامل المانها استفاده می‌شود. در این مدل که چندی بعد مورد استفاده عملی ایریکورا، همچنین برسو و اتکینسون قرار گرفت برای توصیف فرایند لغزش گسل از مدل منبع سینماتیکی استفاده می‌شود (ایریکورا، ۱۹۹۲). مدل منبع سینماتیکی شامل هندسه شکست گسل (مساحت شکست‌خورده، راستای گسل و شیب گسل)، نقطه شروع شکست و سرعت شکست می‌شود. در این روش یک صفحه مستطیلی برای گسل در نظر گرفته می‌گیرند، صفحه گسل را نیز به المان‌های مستطیلی تقسیم می‌کنند و فرض می‌شود که شکست که از مرکز یکی از المان‌ها (کانون زمین‌لرزه) شروع شده است، به‌صورت شعاعی انتشار می‌یابد. سرعت انتشار شکست معمولاً ۸۰ درصد سرعت موج برشی در نظر گرفته می‌شود (برسو و اتکینسون، ۱۹۹۸). هر خردگسل وقتی که شکستگی به مرکز آن می‌رسد، به صورت یک منبع کوچک مستقل لرزه‌ای عمل می‌کند و شروع به تابش انرژی لرزه‌ای می‌کند. تاریخچه زمانی شتاب با در نظر گرفتن روابط زمانی تجربی وابسته به فاصله، میرایی هندسی و مدل‌های میرایی Q به نقطه مشاهده انتشار پیدا می‌کند. شتاب‌نگاشت‌های به‌دست آمده از هر المان که بر اساس طیف منبع برون است، با در نظر گرفتن تأخیر زمانی متناظرشان با یکدیگر جمع می‌شوند تا شتاب‌نگاشت کلی حاصل از کل صفحه گسل به‌دست آید. در روش شبیه‌سازی بر اساس گسل محدود هر المان که به منزله یک

تابع تعریف می‌شود. این طیف را می‌توان به صورت حاصل ضرب تعدادی از توابع در حوزه بسامد در نظر گرفته شود (بور، ۲۰۰۳):

$$A_x(f) = S(f) \cdot G \cdot A_n(f) \cdot P(f) \cdot V(f) \quad (1)$$

در رابطه ۱، $S(f)$ تابع منبع، G تابع میرایی هندسی، $A_n(f)$ تابع میرایی غیرکشسان سراسر مسیر، $P(f)$ تابع میرایی پوسته بالایی و $V(f)$ تابع تشدید پوسته است.

۱-۳ تابع منبع $S(f)$

طیف دامنه فوریه مدل منبع نقطه‌ای برون برای شتاب امواج برشی تولید شده در منبع به صورت زیر است (بور، ۲۰۰۳):

$$S(f) = \frac{CM_0(2\pi f)^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \quad (2)$$

در رابطه فوق C یک ضریب مقیاس، M_0 ممان لرزه‌ای، f بسامد و f_c بسامد گوشه است. ضریب مقیاس C در رابطه (۲) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C = \frac{R_{\theta\phi}(F_s)(PRTITN)}{4\pi\rho\beta^3} \quad (3)$$

که $R_{\theta\phi}$ ضریب الگوی تابش (۵۵، ۰)، F_s ضریب تشدید سطح آزاد (۲)، $PRTITN$ ضریب پخش انرژی به راستاهای افقی (۷۰۷، ۰)، ρ چگالی سنگ در عمق شکست و β سرعت موج برشی سنگ در عمق شکست است.

مدل منبع تعریف شده با معادله ۳ در حکم مدل منبع ω^2 یا منبع برون شناخته می‌شود. f_c که بر دامنه شتاب تأثیرگذار است و محتوای بسامدی زلزله تولید شده در منبع را کنترل می‌کند، متناسب با عکس زمان شکست گسل است و از رابطه زیر به دست می‌آید (بور، ۲۰۰۳).

طیف میانگین ω^2 را دارد ارائه کرد بور در ۱۹۸۳، روش شبیه‌سازی احتمالی را که از منبع لرزه‌ای نقطه‌ای استفاده می‌کند، ارائه کرد. مبنای این روش این است که در ابتدا برای یک سری زمانی مربوط به نوفه سفید با میانگین صفر، تابع شکلی اعمال می‌شود و آن را از حالت ایستا خارج می‌کند، سپس از این نوفه تبدیل فوریه گرفته می‌شود و طیف دامنه این سری زمانی با یک طیف دلخواه که در ادامه تشریح خواهد شد، جایگزین می‌شود، ولی طیف فاز بدون تغییر باقی می‌ماند. با انتقال نتایج به حوزه زمان، یک سری زمانی به دست می‌آید که طیف دامنه‌اش دقیقاً بر طیف مشخصی منطبق است. نمودار استفاده شده برای طیف دامنه می‌تواند نوسان با باند محدود در ثبت را معرفی کند (بور، ۱۹۸۳). به خاطر موفقیت این روش در برآورد شتاب ماکزیموم، یک طیف ω^2 به همراه میرایی غیرکشسان مربوط به مسیر با پارامتر افت تنش ثابت ($\Delta\sigma$) در روش شبیه‌سازی بور استفاده شده است. به نظر می‌رسد که این روش بتواند همه جنبه‌های اساسی لرزش‌های بسامد زیاد زمین را برای طیف وسیعی از زمین‌لرزه‌های با بزرگای متفاوت در نظر بگیرد. کاربرد روش بور نیاز به شکل طیفی دامنه در نقش تابعی از اندازه زمین‌لرزه دارد. در روش احتمالی بور فقط مشارکت امواج برشی در لرزش زمین در نظر گرفته شده است و می‌دانیم که تقریباً در همه حالات و به خصوص مؤلفه‌های افقی جنبش زمین، امواج برشی امواج غالب هستند. یکی از محدودیت‌های روش احتمالی بور این است که این روش فقط تب متناظر موج برشی را تولید می‌کند و قادر به شبیه‌سازی فازهای رسید امواج سطحی ریلی و لاو نیست (اتکینسون و سیلوا، ۲۰۰۰).

۳ طیف منبع لرزه‌ای

طیف دامنه تبدیل فوریه لرزش زمین که در روش شبیه‌سازی احتمالی بور استفاده می‌شود برحسب چندین

۳-۵ تابع تشدید پوسته بالایی $V(f)$

تغییر در دامنه امواج برشی لرزه‌ای که از مرز بین دو میدان عبور می‌کنند (از A به B) با توجه به اصل بقای انرژی صورت می‌گیرد. ضریب تشدید $V(f)$ را بور و جویئر در ۱۹۹۷ به صورت زیر تعریف کرده‌اند (بور و جویئر، ۱۹۹۷):

$$V(f) = \sqrt{\frac{\rho_A V_A}{\rho_B V_B}} \quad (۸)$$

که ρ_A و ρ_B ، همچنین V_A و V_B به ترتیب چگالی‌ها و سرعت‌های امواج برشی در محیط‌های A و B هستند.

۴ پیشرفت برنامه‌های شبیه‌سازی به روش گسل محدود

اولین برنامه شبیه‌سازی زمین‌لرزه با روش گسل محدود که بر اساس روش احتمالی بور نوشته شد برنامه FINSIM بود که نام آن از عبارت FINITE FAULT گرفته شده است. این برنامه را که برسنو و اتکینسون در ۱۹۹۷ نوشته‌اند، مورد استفاده بسیاری از محققان قرار گرفته است (برسنو و اتکینسون، ۱۹۹۸). نسخه جدیدتر برنامه FINSIM با نام EXSIM (EXTENDED FAULT SIMULATON) در سال ۲۰۰۲ معتضدیان و اتکینسون نوشته‌اند. تفاوت‌های عمده برنامه‌های شبیه‌سازی FINSIM و EXSIM عبارت است از (معتضدیان و اتکینسون، ۲۰۰۵):

۱. در FINSIM بسامد گوشه ثابت باقی می‌ماند و با گسترش شکست صفحه گسل تغییر نمی‌کند ولی در EXSIM بسامد گوشه تابع زمان است.
۲. EXSIM انرژی ثبت‌های شبیه‌سازی شده را با تغییر اندازه خردگسل‌ها ثابت نگه می‌دارد در صورتی که در FINSIM چنین مسئله‌ای مشاهده نمی‌شود.
۳. FINSIM برخلاف EXSIM فقط برای شبیه‌سازی

$$f_c = 4.9 \times 10^6 \beta \left(\frac{\Delta\sigma}{M_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (۴)$$

که در این رابطه، β برحسب km/s، $\Delta\sigma$ برحسب بار و M_0 برحسب دین سانتی متر است.

۳-۲ تابع میرایی هندسی

تابع، G که بیانگر میرایی هندسی است به صورت زیر بیان می‌شود (بور، ۲۰۰۳):

$$G = \left(\frac{R_0}{R} \right)^n \quad (۵)$$

که R فاصله از منبع نقطه‌ای و R_0 فاصله واحد است و توان n به فاصله R بستگی دارد. گسترش کروی این امواج باعث کاهش دامنه طیف فوریه به صورت $\frac{1}{R}$ می‌شود $n = 1$.

۳-۳ تابع میرایی غیرکشسان در کل مسیر

برای در نظر گرفتن میرایی غیرکشسان $A_n(f)$ را بور و اتکینسون در ۱۹۸۷ به صورت زیر ارائه کردند (بور و اتکینسون، ۱۹۸۷):

$$A_n(f) = e^{-\frac{\pi f R}{Q\beta}} \quad (۶)$$

که f بسامد موج، R طول مسیر طی شده، β سرعت موج برشی و Q ضریب کیفیت انتقال موج است.

۳-۴ تابع میرایی پوسته بالایی $P(f)$

برای $P(f)$ و $A_n(f)$ عبارت‌های مشابهی انتخاب شده و معادله $P(f)$ به صورت زیر درآمده است (اتکینسون و سیلوا، ۱۹۹۷):

$$P(f) = e^{-\pi k f} \quad (۷)$$

در رابطه فوق پارامتر K که کاپا نامیده می‌شود، برحسب ثانیه است.

۵ بررسی تأثیر پارامترهای مهم شبیه‌سازی با استفاده از گسل مسبب زمین‌لرزه پارک‌فیلد

برای بررسی تأثیر پارامترهای مهم شبیه‌سازی در برنامه EXSIM، علاوه بر استدلال‌های ریاضی، شبیه‌سازی‌هایی با این برنامه با استفاده از گسل مسبب زمین‌لرزه پارک‌فیلد صورت گرفته است. در این شبیه‌سازی‌ها برای تشخیص اثر یک پارامتر مشخص، بدون تغییر مقدار سایر پارامترها فقط مقدار پارامتر مورد نظر تغییر داده شده است و مجموعه نتایج کلی به‌دست آمده که در ادامه آورده شده است.

سه پارامتر ضریب کیفیت، کاپا و افت تنش بر دامنه بسامدهای زیاد اثر دارند که در ادامه اثر آنها به همراه اثرات سرعت موج برشی و چگالی بررسی شده است:

۱. اثر ضریب کیفیت (Q): ضریب کیفیت معمولاً در مقالات به صورت $Q = Q_0 f^\eta$ در نظر گرفته می‌شود و در برنامه EXSIM هم Q_0 و η از پارامترهای ورودی هستند. با توجه به روابط (۱) و (۶) دیده می‌شود که اثر عمده ضریب کیفیت در بسامدهای زیاد است و تغییر این پارامتر تأثیر چندانی بر شتاب‌های طیفی بسامدهای کم ندارد. با استفاده از گسل مسبب زمین‌لرزه پارک‌فیلد، سه ثبت با EXSIM شبیه‌سازی شده است که در این شبیه‌سازی‌ها با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها از مقادیر ۱۲۰ و ۱۸۰ و ۲۴۰ برای Q_0 استفاده شده است. با توجه به نمودار شکل ۱ و همچنین با توجه به روابط (۱) و (۶) دیده می‌شود که با افزایش Q_0 مقدار شتاب‌های طیفی و همچنین PGA (که همان شتاب طیفی نظیر بسامدهای زیاد است) افزایش می‌یابد، البته مقدار افزایش شتاب طیفی در بسامدهای زیاد بزرگ‌تر و در بسامدهای کم کوچک‌تر است. برای بررسی تأثیر η نیز سه ثبت با EXSIM شبیه‌سازی شده است که در این

زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای بیش از ۵/۰ قابل استفاده است.

۴. برنامه EXSIM از روشی ترکیبی استفاده می‌کند، بدین صورت که بسامدهای بلند را با استفاده از روش احتمالی بور تولید می‌کند و قابلیت این را هم دارد که بسامدهای کوتاه را از با استفاده از روشی تحلیلی تولید کند و از ترکیب آنها ثبت شبیه‌سازی شده را به‌دست آورد. این در صورتی است که برنامه FINSIM فقط از روش احتمالی بور استفاده می‌کند و بنابراین قادر به شبیه‌سازی تپ‌های بلند دوره نیست.

۵. در FINSIM اندازه خردگسل‌ها برای شبیه‌سازی از ضابطه مشخصی تبعیت می‌کند و پارامتری اختیاری نیست. این محدودیت برای برنامه FINSIM یک اشکال است چون قاعدتاً باید ثبت‌های شبیه‌سازی شده زمین‌لرزه مستقل از ابعاد خردگسل‌ها باشد.

۶. شبیه‌سازی براساس EXSIM ثبت‌های واقعی‌تری را نسبت به شبیه‌سازی با FINSIM تولید می‌کند. در FINSIM برای شبیه‌سازی زمین‌لرزه‌های بزرگ (مثلاً با بزرگای ۸/۰ بایستی اندازه خردگسل‌ها بزرگ باشد که این اغلب باعث می‌شود گپ‌های مصنوعی در تاریخچه زمانی رکورد شبیه‌سازی شده ایجاد شود (به خصوص در شبیه‌سازی حوزه نزدیک). این مشکل در EXSIM با انتخاب یک اندازه کوچک برای خردگسل‌ها قابل حل است.

۷. یکی از اشکالات FINSIM این است که در این برنامه هر خردگسل برای آزاد کردن انرژی باید چند بار موج لرزه‌ای منتشر کند که این مطلب معنای فیزیکی ندارد. در EXSIM این مشکل مرتفع شده است و هر خردگسل به نحوی که به واقعیت بسیار نزدیک‌تر است، فقط با یک بار انتشار موج لرزه‌ای، انرژی را آزاد می‌کند.

ثبت با مقادیر ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ $\Delta\sigma$ شبیه‌سازی شده است. با توجه به نمودار شکل ۵ دیده می‌شود که با افزایش افت تنش، مقدار شتاب‌های طیفی افزایش می‌یابد البته مقدار این افزایش در بسامدهای کم ناچیز ولی در بسامدهای زیاد، قابل توجه است. با توجه به معادلات (۲) و (۴) نتیجه می‌شود که هر دو پارامتر تکانه لرزه‌ای و افت تنش روی محتوای بسامدی امواج برشی تولید شده در منبع زمین‌لرزه تأثیر می‌گذارند. شتاب طیفی متناسب با $M_0 f_c^2$ است و در نتیجه با توجه به رابطه (۴) متناسب با $\Delta\sigma^{\frac{2}{3}} M_0^{\frac{1}{3}}$ است. از اینجا نتیجه می‌شود که شتاب طیفی اساساً وابسته به افت تنش است و به میزان کمتری به تکانه لرزه‌ای وابستگی دارد. با افزایش افت تنش، مقدار شتاب‌های طیفی افزایش و با کاهش افت تنش، مقدار شتاب‌های طیفی کاهش می‌یابد.

می‌دانیم که مقدار سرعت ماکزیموم زمین (PGV) به محتوای بسامدهای متوسط حساس است و مقدار جابه‌جایی ماکزیموم زمین (PGD) هم به محتوای بسامدهای کم حساس است. بنابراین نتیجه می‌شود که تأثیر افزایش افت تنش در افزایش شتاب ماکزیموم زمین نسبت به افزایش سرعت و جابه‌جایی ماکزیموم زمین بیشتر است. همچنین با توجه به رابطه (۴) مشخص است که افزایش افت تنش باعث افزایش بسامد گوشه ثبت شبیه‌سازی شده می‌شود. قابل ذکر است که افت تنش برحسب بار سنجیده می‌شود و از آنجا که این پارامتر مستقیماً قابل اندازه‌گیری نیست، عدم قطعیت زیادی در مورد این پارامتر وجود دارد. مثلاً شتاب ماکزیموم زمین به راحتی از روی شتاب‌نگاشت ثبت شده خوانده می‌شود ولی پارامتر افت تنش مستقیماً قابل اندازه‌گیری نیست.

۴. اثر سرعت موج برشی (β): برای بررسی اثر سرعت موج برشی سه ثبت با مقادیر $\beta = 3, 3/3, 3/6 \text{ Km/s}$

شبیه‌سازی‌ها با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها از مقادیر ۰/۲، ۰/۴۵، ۰/۷ برای η استفاده شده است. با توجه به نمودار شکل ۲ دیده می‌شود که باز تغییرات شتاب طیفی در بسامدهای کم ناچیز است ولی با افزایش مقدار η در بسامدهای زیاد مقدار شتاب‌های طیفی و همچنین PGA افزایش یافته است. برای بحث دقیق ریاضی می‌توان گفت که با توجه به رابطه $Q = Q_0 f^{\eta}$ با افزایش مقدار η شتاب‌های طیفی در بسامدهای کمتر از یک هرگز اندکی کاهش می‌یابند چون بسامدهای کمتر از یک هرگز هر چه به توان بزرگ‌تری می‌رسند کوچک‌تر می‌شوند و می‌توان گفت که با افزایش η مقدار ضریب کیفیت برای بسامدهای کمتر از یک هرگز کاهش می‌یابد. با افزایش η برای بسامدهای بزرگ‌تر از یک هرگز مقدار ضریب کیفیت افزایش می‌یابد که در نتیجه مقدار شتاب‌های طیفی در این بسامدها افزایش خواهد یافت. مشخص است که تغییر η هیچ تأثیری روی مقدار شتاب طیفی در بسامد یک هرگز نخواهد داشت، چون یک به هر توانی برسد حاصل همان یک خواهد بود. برای نمونه یک شتاب‌نگاشت شبیه‌سازی شده متناظر مقادیر ۱۸۰ و ۰/۴۵ برای Q_0 و η در شکل ۳ نشان داده شده است.

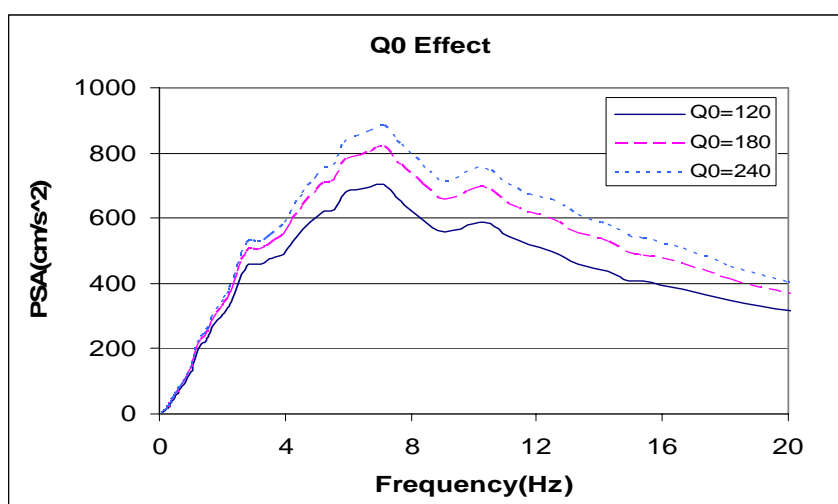
۲. اثر کاپا (k): برای بررسی اثر کاپا سه ثبت با مقادیر $k = 0.03, 0.05, 0.07$ شبیه‌سازی شده است. با توجه به نمودار شکل ۴ و همچنین با توجه به روابط (۱) و (۷) دیده می‌شود که با افزایش کاپا مقدار شتاب‌های طیفی و همچنین شتاب ماکزیموم زمین، PGA کاهش می‌یابد که البته مقدار کاهش شتاب‌های طیفی در بسامدهای زیاد، بیشتر است. بنابراین اثر تغییر این پارامتر در نمودار شتاب طیفی بیشتر به صورت چرخشی است تا به صورت جابه‌جایی.

۳. اثر افت تنش ($\Delta\sigma$): برای بررسی اثر افت تنش سه

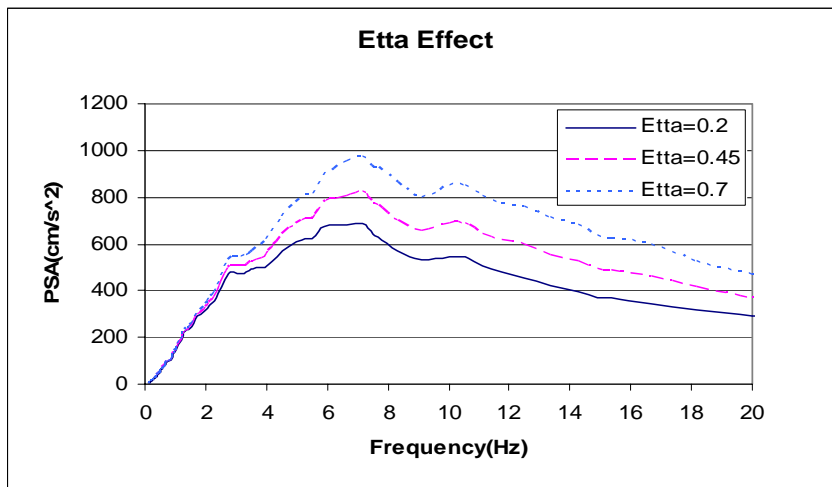
رسید امواج برشی از خردگسل‌ها به نقطه مشاهده مورد نظر کاهش می‌یابد. از همین رو مدت زمان ثبت شبیه‌سازی شده کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به رابطه (۴) واضح است که افزایش سرعت موج برشی باعث افزایش بسامد گوشه ثبت شبیه‌سازی شده می‌شود.

۵. اثر چگالی محیط (ρ): برای بررسی اثر چگالی، سه ثبت با مقادیر $\rho = 2/0, 2/5, 3/0 \text{ gr.cm}^{-3}$ شبیه‌سازی شده است. با توجه به نمودار شکل ۷ دیده می‌شود که با افزایش سرعت موج برشی، مقدار شتاب‌های طیفی و همچنین مقدار شتاب ماکزیموم زمین، PGA کاهش می‌یابد. دلیل ریاضی این موضوع آن است که با توجه به روابط (۱)، (۲) و (۳) دیده می‌شود که ثابت C با چگالی نسبت معکوس دارد. بنابراین اگر چگالی، α برابر شود مقدار شتاب ماکزیموم زمین (PGA)، شتاب‌های طیفی و همچنین طیف دامنه فوریه شتاب‌نگاشت شبیه‌سازی شده، $1/\alpha$ برابر می‌شود. قابل ذکر است که چگالی فقط در رابطه (۳) که ثابت C محاسبه می‌شود، وجود دارد و در هیچ رابطه دیگری وارد نمی‌شود.

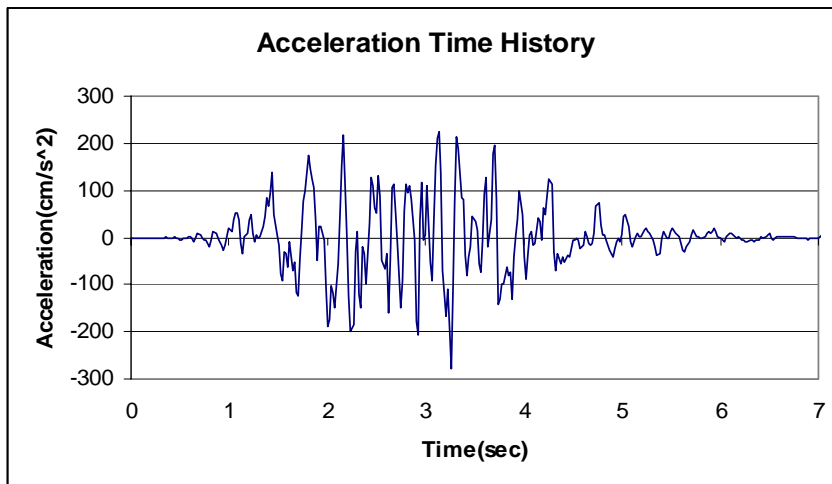
شبیه‌سازی شده است. با توجه به شکل ۶ دیده می‌شود که با افزایش سرعت موج برشی، مقدار شتاب‌های طیفی (همچنین مقدار شتاب ماکزیموم زمین، یعنی PGA) کاهش می‌یابد. دلیل ریاضی این موضوع این است که کاهش ضریب C در رابطه (۳) که در آن سرعت موج برشی با توان ۳ در مخرج کسر قرار دارد شدیدتر از افزایش $A_n(f)$ در رابطه (۶) است. در شبیه‌سازی صورت گرفته، مدت زمان تاریخچه‌های زمانی شتاب، متناظر سرعت‌های موج برشی $3/3, 3/0$ و $3/6$ کیلومتر بر ثانیه به ترتیب برابر $10/9, 10/54$ و $10/22$ ثانیه است که دیده می‌شود با افزایش سرعت موج برشی، مدت زمان شتاب‌نگاشت شبیه‌سازی شده اندکی کاهش می‌یابد که البته در ادامه این کاهش توجیه شده است. می‌دانیم که سرعت شکست معمولاً درصدی از سرعت موج برشی فرض می‌شود (بین ۷۰ تا ۸۵ درصد سرعت موج برشی) و EXSIM هم فرض می‌کند که سرعت شکست برابر ۸۰ درصد سرعت موج برشی است. با افزایش سرعت موج برشی، سرعت شکست نیز افزایش می‌یابد که در نتیجه آن گسل سریع‌تر می‌شکند و همچنین تأخیرهای زمانی



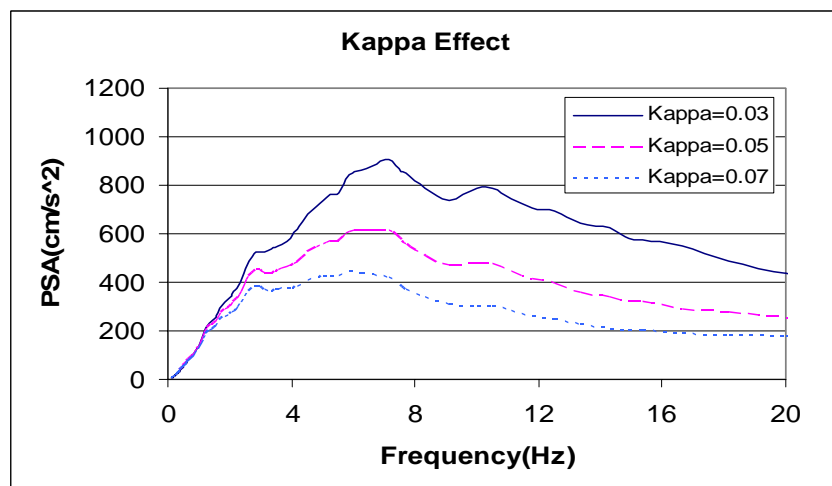
شکل ۱. شتاب‌های طیفی شبیه‌سازی شده به ازای مقادیر متفاوت Q_0 .



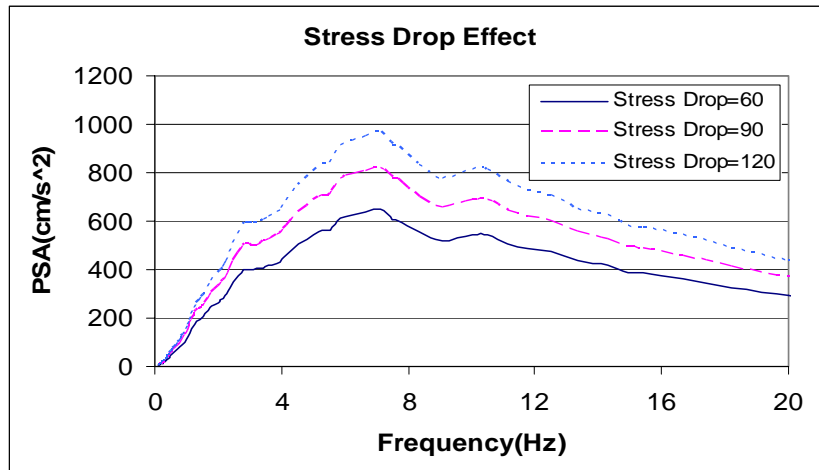
شکل ۲. شتاب‌های طیفی شبیه‌سازی شده به ازای مقادیر متفاوت η .



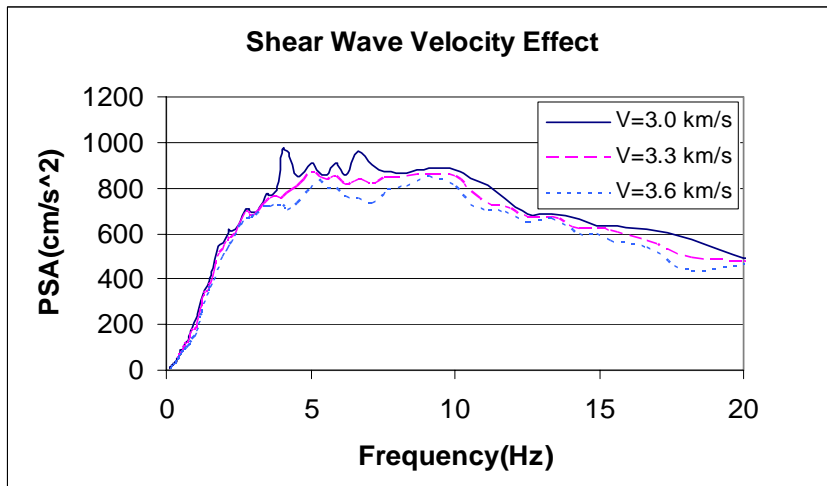
شکل ۳. نمونه تاریخچه زمانی شتاب‌نگاشت شبیه‌سازی شده.



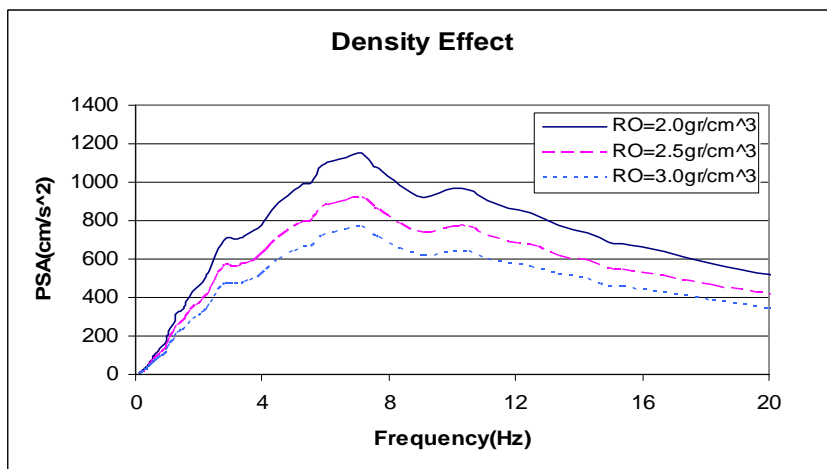
شکل ۴. شتاب‌های طیفی شبیه‌سازی شده به ازای مقادیر متفاوت κ .



شکل ۵. شتاب‌های طیفی شبیه‌سازی شده به ازای مقادیر متفاوت $\Delta\sigma$.



شکل ۶. شتاب‌های طیفی شبیه‌سازی شده به ازای مقادیر متفاوت β .



شکل ۷. شتاب‌های طیفی شبیه‌سازی شده به ازای مقادیر متفاوت ρ .

۶ نتیجه‌گیری

همچنین مدت زمان شتاب‌نگاشت شبیه‌سازی شده اندکی کاهش می‌یابد، چون گسل سریع‌تر می‌شکند و همچنین تأخیرهای زمانی رسید امواج برشی از خردگسل‌ها به نقطه مشاهده مورد نظر کاهش می‌یابد.

۵. اگر چگالی α برابر شود مقدار شتاب ماکزیموم زمین (PGA)، شتاب‌های طیفی و همچنین طیف دامنه فوریه شتاب‌نگاشت شبیه‌سازی شده، $1/\alpha$ برابر می‌شود.

تشکر و قدردانی

از مباحثه با آقایان دکتر داریوش معتمدیان و کارن آساتوریانس در مورد شبیه‌سازی زمین‌لرزه بر اساس روش گسل محدود و همچنین کار با برنامه شبیه‌سازی EXSIM استفاده فراوان شده است، در اینجا از ایشان تشکر می‌شود.

منابع

- Atkinson, G. M., and Silva, W., 1997, An empirical study of earthquake source spectra for California earthquakes, B. Seismol. Soc. Am., **87**, 97-113.
- Atkinson, G. M., and Silva, W., 2000, Stochastic modeling of California Ground Motions, B. Seismol. Soc. Am., **90**(2), 255-274.
- Beresnev, I., and Atkinson, G. M., 1998a, FINSIM-a FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults. Seism. Res. Lett., **69**, 27-32.
- Beresnev, I., and Atkinson, G., 1998b, Stochastic finite-fault modeling of ground motions from the 1994 Northridge, California earthquake. I. Validation on rock sites. B. Seismol. Soc. Am., **88**, 1392-1401.
- Boore, D. M., 1983, Stochastic simulation of high-frequency motions based on seismological model of the radiated spectra, B. Seismol. Soc. Am., **73**(6), 1865-1894.
- Boore, D. M., 2003, Simulation of ground motion using the stochastic method, Pure Appl. Geophys., **160**, 635-676.
- Boore, D. M., and Atkinson, G. M., 1987, Stochastic prediction of ground motion and spectral response parameters at hard-rock sites

با توجه به شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، نتایج کلی زیر به دست آمده است:

۱. اثر عمده ضریب کیفیت در بسامدهای زیاد است و تغییر این پارامتر تأثیر چندانی روی شتاب‌های طیفی در بسامدهای کم ندارد. با افزایش Q_0 در ضریب کیفیت $Q = Q_0 f^\eta$ مقدار شتاب‌های طیفی و همچنین PGA (که همان شتاب طیفی نظیر بسامدهای بزرگ است) افزایش می‌یابد، البته مقدار افزایش شتاب طیفی در بسامدهای زیاد، بزرگ‌تر و در بسامدهای کم، کوچک‌تر است. با افزایش مقدار η شتاب‌های طیفی در بسامدهای کوچک‌تر از یک هرتز اندکی کاهش می‌یابد چون با افزایش η مقدار ضریب کیفیت برای بسامدهای کوچک‌تر از یک هرتز کاهش می‌یابد. با افزایش η برای بسامدهای بزرگ‌تر از یک هرتز مقدار ضریب کیفیت افزایش می‌یابد که در نتیجه مقدار شتاب‌های طیفی در این بسامدها افزایش خواهد یافت. تغییر η هیچ تأثیری روی مقدار شتاب طیفی در بسامدهای کم نخواهد داشت.
۲. با افزایش کاپا مقدار شتاب‌های طیفی و همچنین شتاب ماکزیموم زمین، PGA کاهش می‌یابد که البته مقدار کاهش شتاب‌های طیفی در بسامدهای زیاد، بیشتر است.
۳. با افزایش افت تنش، مقدار شتاب‌های طیفی افزایش می‌یابد، البته مقدار این افزایش در بسامدهای کم، ناچیز ولی در بسامدهای زیاد، قابل توجه است. همچنین تأثیر افزایش افت تنش در افزایش شتاب ماکزیموم زمین نسبت به افزایش سرعت و جابه‌جایی ماکزیموم زمین بیشتر است.
۴. با افزایش سرعت موج برشی، مقدار شتاب‌های طیفی و شتاب ماکزیموم زمین، PGA کاهش می‌یابد و

- in eastern North America, B. Seismol. Soc. Am., **73**, 1865-1894.
- Boore, D. M., and Joyner, W. B., 1997, Site amplifications for generic rock sites, B. Seismol. Soc. Am., **87**(2), 327-341.
- Hartzell, S., 1978, Earthquake aftershocks as Green's functions. Geophys. Res. Lett., **5**, 1-14.
- Irikura, K., 1992, The construction of large earthquake by a superposition of small events, Earthquake Engineering. Tenth world Conference. Balkema. Rotterdam.
- Motazedian, D., and Atkinson, G. M., 2005, Stochastic Finite Fault Modeling Based on a Dynamic Corner Frequency, B. Seismol. Soc. Am., **95**, 995-1010.