

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

جمهوری اسلامی ایران
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری



دانشگاه اراک

دانشکده فنی و مهندسی

کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه

شبیه سازی رکوردهای زمین لرزه با در نظر گرفتن مقادیر

همبستگی طیف پاسخ شتاب

پژوهشگر:

مهدی صادقی

استاد راهنما:

دکتر علیرضا آذربخت

استاد مشاور:

دکتر مهدی سلیمانی

تابستان ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

شبهه سازی رکوردهای زمین لرزه با در نظر گرفتن مقادیر

همبستگی طیف پاسخ شتاب

توسط:

مهدي صادقي

پایان نامه

ارائه شده به مدیریت تحصیلات تکمیلی به عنوان بخشی از فعالیت‌های تحصیلی لازم

برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - سازه

از دانشگاه اراک

اراک - ایران

ارزیابی و تصویب شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: ۷۷

دکتر علیرضا آذربخت (استاد راهنما) استادیار دانشگاه اراک

دکتر مهدی سلیمانی (استاد مشاور) استادیار دانشگاه اراک

دکتر مهدی موسوی (داور داخلی) استادیار دانشگاه اراک

پاییز ۱۳۹۰

تقدیم به:

شهیدان سربلند

پدر و مادر مهربان و برادر عزیزم

که سراسر وجودشان عشق و آرامش است...

پاسکزاری:

قدر دان محبت های استاد فرزانه، جناب آقای دکتر آذرنخت بوده و از خداوند منان برای ایشان توفیق روز افزون مسلت دارم. همچنین از دوست بردار و ارجمندم جناب آقای مهندس محمدرضا شهری که مایه دلگرمی من بوده اند شکر و قدردانی می کنم. همچنین پاسکزار را به نانی های جناب آقای دکتر موسوی، هتم و در پایان دست همه اساتیدم را که خالصانه برایم زحمت کشیده اند می بوسم.

چکیده:

اغلب در مناطقی که جنبش‌های زمین به ندرت اتفاق می‌افتند، پایگاه اطلاعاتی مناسبی از شتاب نگاشت‌های زلزله در دسترس نمی‌باشد. در این مناطق دوره بازگشت زلزله زیاد و پتانسیل وقوع زمین لرزه پایین می‌باشد به همین دلیل می‌توان از رکوردهای شبیه سازی شده استفاده کرد. در طول دهه‌های اخیر روش‌های مختلفی برای شبیه سازی رکوردهای زمین لرزه ارائه شده است که ساده‌ترین و قدرتمندترین روش شبیه سازی زمین لرزه که بر پایه تئوری ارتعاشات پیشا استوار است توسط (D. M. BOORE) ارائه شده است. مهمترین مشخصه این روش گنجاندن پارامترهای کلیدی زمین لرزه (منبع، مسیر و ساختگاه) در قالب توابعی ساده می‌باشد. در این روش ارتعاش تولید شده بر مبنای مدت زمان فرایند زلزله، بزرگا، فرکانس و فاصله از منبع زمین لرزه توزیع شده است. در مطالعه حاضر شبیه سازی رکوردهای زمین لرزه بر اساس چارچوب بور و با استفاده از نرم افزار شبیه سازی (EXSIM) مورد باز تولید قرار گرفته است. با استفاده از الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار بهینه سازی و بهینه کردن ۸ پارامتر لرزه‌شناسی کلیدی برنامه (EXSIM)، رکوردهای شبیه سازی شده بر مبنای این ۸ پارامتر تولید شده و مقادیر همبستگی طیف پاسخ شتاب این رکوردها در سه زمان تناوب در مقایسه با رکوردهای واقعی زمین لرزه قرار گرفته است. رکوردهای شبیه سازی شده بهینه به عنوان ورودی برای تحلیل سازه یک درجه آزاد بتنی در نظر گرفته شده است و احتمال خرابی سازه و نرخ فروریزش سالانه سازه بدست آمده تحت تحریک این رکوردها در مقایسه با رکوردهای واقعی زمین لرزه قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: روش‌های تصادفی، شبیه‌سازی زمین لرزه، ارتعاشات پیشا، بزرگنمایی ساختگاه شبیه سازی زمین لرزه‌های قوی

فهرست مطالب

۱- فصل اول: مروری بر تحقیقات گذشته.....	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- شبیه سازی زمین لرزه‌های مصنوعی.....	۲
۱-۲-۱- روش‌های تعیینی	۳
۲-۲-۱- روش‌های تصادفی	۳
۳-۲-۱- روش‌های ترکیبی	۴
۳-۱- چارچوب فرآیند شبیه سازی بور و فرمول بندی مدل‌های تصادفی	۴
۱-۳-۱- اثر منبع	۵
۲-۳-۱- اثر مسیر، ساختگاه، کاهندگی فرکانس بالا و محاسبه مؤلفه‌های حرکتی زمین لرزه	۱۰
۱-۲-۳-۱- اثر مسیر	۱۰
۲-۲-۳-۱- اثر ساختگاه	۱۴
۳-۲-۳-۱- کاهندگی فرکانس بالا	۱۶
۴-۲-۳-۱- محاسبه نوع مؤلفه‌های حرکتی	۱۸
۴-۱- ترتیب الگوریتم شبیه سازی زمین لرزه بر اساس چارچوب بور	۱۹
۵-۱- رویکرد کلی مطالعه جاری	۲۲
۲- فصل دوم: تولید رکوردهای شبیه سازی شده	۲۳
۱-۲- مقدمه	۲۴
۲-۲- پیشرفت برنامه‌های شبیه سازی زمین لرزه در سال‌های اخیر	۲۵
۱-۲-۲- تفاوت‌های کلی برنامه‌های SMSIM و EXSIM	۲۵
۲-۲-۲- تفاوت‌های کلی برنامه‌های EXSIM و FINSIM	۲۷
۳-۲- ورودی برنامه EXSIM	۲۹
۱-۳-۲- بزرگا، افت تنش و پارامتر میرایی (کاپا).....	۳۰
۲-۳-۲- مختصات طولی و عرضی گسل	۳۰
۳-۳-۲- نوع گسل، عمق گسل و مشخصات فیزیکی گسل	۳۰
۴-۳-۲- طول و عرض ریز گسل‌ها	۳۲
۵-۳-۲- نسبت سرعت گسیختگی گسل به سرعت موج برشی	۳۳
۶-۳-۲- سرعت موج برشی و چگالی موج برشی	۳۳

- ۳۳-۷-۳-۲ پارامترهای منتسب به مدل کاهندگی خطی هندسی
- ۳۴-۸-۳-۲ پارامترهای منتسب به مدل کاهندگی غیر الاستیک
- ۳۵-۹-۳-۲ مقادیر مدت زمان فرآیند زلزله وابسته به مسیر
- ۳۶-۱۰-۳-۲ تابع شکل
- ۳۸-۱۱-۳-۲ درصد میرایی برای محاسبه طیف پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی
- ۳۹-۱۲-۳-۲ محدوده مقادیر فرکانس برای محاسبه طیف پاسخ شتاب
- ۳۹-۱۳-۳-۲ درصد پالس منتشره از ریز گسل‌های منتسب به گسل اصلی
- ۴۳-۴-۲ خروجی برنامه EXSIM
- ۴۳-۱-۴-۲ سری زمانی شتاب
- ۴۳-۲-۴-۲ میانگین طیف پاسخ مؤلفه‌های زمین لرزه و طیف دامنه فوریه
- ۴۴-۵-۲ تولید رکوردهای شبیه سازی شده
- ۴۸-۶-۲ الگوریتم ژنتیک
- ۴۹-۱-۶-۲ پارامترهای کلیدی ژنتیک الگوریتم در فرآیند بهینه سازی
- ۳- فصل سوم: تحلیل سیستم یک درجه آزاد و برآورد میانگین سالانه فروریزش سازه** ۵۷
- ۵۸-۱-۳ مقدمه
- ۵۸-۲-۳ انتخاب سیستم یک درجه آزادی
- ۵۹-۳-۳ تحلیل خطر لرزه‌ای
- ۵۹-۱-۳-۳ روش‌های احتمالاتی در برابر روش‌های تعینی
- ۶۱-۲-۳-۳ مدل‌های کاهندگی (مدل‌های پیش بینی جنبش زمین)
- ۶۲-۱-۲-۳-۳ مدل بور و آتکینسون
- ۶۳-۲-۲-۳-۳ مدل کمپل و بزرگنیا
- ۶۶-۴-۳ برآورد شکنندگی فروریزش و میانگین فروریزش سالانه سازه
- ۶۹-۵-۳ مقایسه منحنی‌های فروریزش سازه یک درجه آزاد
- ۷۰-۶-۳ مقایسه نرخ متوسط فروریزش سالانه سازه
- ۷۱-۷-۳ محاسبه MAF فروریزش سازه با استفاده از تولید ۵۰۰۰۰ رکورد شبیه سازی شده
- ۴- فصل چهارم: بحث و نتیجه گیری**
- ۷۴-۲-۴ بکارگیری نظریه گسل محدود در تولید برنامه‌های شبیه سازی زمین لرزه
- ۷۵-۳-۴ مزیت بکارگیری برنامه‌های شبیه سازی گسل محدود

- ۴-۴- استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت محاسبه پارامترهای بهینه..... ۷۶
- ۴-۵- استفاده از رکوردهای شبیه سازی شده بهینه به عنوان مدلی برای تحلیل های مهندسی..... ۷۶
- پیشنهادات برای مطالعات آینده: ۷۸
- پیوستها:..... ۷۹
- پیوست (۱). بررسی مدل (ω -square , ω^2) طیف منبع زمین لرزه بر اساس مطالعات اکی (۱۹۶۷)..... ۸۰
- پیوست (۲). لیست رکوردهای مورد استفاده در مطالعه جاری..... ۹۰
- منابع و مراجع: ۱۰۰

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱). طیف منبع زمین لرزه با استفاده از مدل ω^2 و مقیاس کردن طیف منبع زمین لرزه..... ۹
- شکل (۲-۱). طیف منبع زمین لرزه در ($R=1 \text{ km}$) برای مدل های بیان شده در جدول (۱-۱)..... ۹
- شکل (۳-۱). فرم سه خطی کاهندگی هندسی پیشنهادی اتکینسون و بور برای شمال شرق آمریکا..... ۱۱
- شکل (۴-۱). فرم معکوس Q بدست آمده توسط اکی (۱۹۸۰) برای مناطق مختلف..... ۱۲
- شکل (۵-۱). تخمینی کلی از مقادیر مشاهده شده در شکل (۴-۱) در قالب فرم سه خطی..... ۱۲
- شکل (۶-۱). کاهندگی وابسته به مسیر در شمال شرقی آمریکا برای یک رنج محدود بزرگا..... ۱۳
- شکل (۷-۱). رابطه سه خطی اتکینسون و بور برای مدت زمان وابسته به فاصله..... ۱۴
- شکل (۸-۱). سرعت موج برشی در برابر عمق خاک..... ۱۵
- شکل (۹-۱). توابع بزرگنمایی بور و جویئر (۱۹۹۷) برای دسته سنگ مرسوم..... ۱۶
- شکل (۱۰-۱). ترکیب اثر بزرگنمایی ساخنگاه و پارامتر تقلیل (K_0) وابسته به مسیر..... ۱۸
- شکل (۱۱-۱). تابع شکل نمائی و پارامترهای کنترل کننده شکل..... ۲۰
- شکل (۱۲-۱). فرآیند شبیه سازی زمین لرزه با اساس چارچوب بور..... ۲۱
- شکل (۱-۲). مقایسه مقادیر همبستگی طیف پاسخ شتاب در ($T^*=0.9 \text{ sec}$)..... ۲۴
- شکل (۲-۲). مقایسه طیف پاسخ شبه شتاب رکوردهای تولید شده توسط (EXSIM) و (SMSIM)..... ۲۶
- شکل (۳-۲). مقایسه رکوردهای شبیه سازی شده با (EXSIM) و (SMSIM)..... ۲۷
- شکل (۴-۲). شکل شماتیک مکانیزم های مختلف شکست گسل..... ۳۱
- شکل (۵-۲). نحوه محاسبه فاصله صفحه گسلش از ساخنگاه..... ۳۱
- شکل (۶-۲). مشخصات فیزیکی گسل..... ۳۲
- شکل (۷-۲). مدل سه خطی کاهندگی هندسی مورد استفاده در برنامه (EXSIM) بور و اتکینسون..... ۳۳
- شکل (۸-۲). فرم سه خطی معکوس Q (ضریب کیفیت) برای محاسبه کاهندگی غیر الاستیک..... ۳۴
- شکل (۹-۲). مدل مدت زمان فرآیند زلزله وابسته به مسیر بور و اتکینسون..... ۳۵
- شکل (۱۰-۲). مفهوم مخروطی شدن در تابع شکل مخروطی..... ۳۷
- شکل (۱۱-۲). توابع شکل جعبه مخروطی مختلف برای شبیه سازی زمین لرزه..... ۳۸

- شکل (۲-۱۲). افزایش درصد ξ و کاهش مقادیر طیف پاسخ شتاب ۳۹
- شکل (۲-۱۳). نمای شماتیک از روش گسل محدود در فرآیند شبیه سازی زمین لرزه ۴۰
- شکل (۲-۱۴). نحوه محاسبه پارامتر (pulsing percentage) ۴۰
- شکل (۲-۱۵). بخشی از فایل پارامترهای ورودی برنامه EXSIM ۴۱
- شکل (۲-۱۶). نمونه فایل خروجی سری زمانی شتاب برنامه (EXSIM) ۴۳
- شکل (۲-۱۷). نمونه فایل خروجی برنامه (EXSIM) ۴۴
- شکل (۲-۱۸). نمونه زمین لرزه‌های شبیه سازی شده توسط برنامه (EXSIM) ۴۵
- شکل (۲-۱۹). مقادیر همبستگی طیف پاسخ شتاب رکوردهای طبیعی و شبیه سازی شده ۴۶
- شکل (۲-۲۰). مقایسه طیف میانگین پاسخ شتاب رکوردهای طبیعی و رکوردهای شبیه سازی شده ۴۷
- شکل (۲-۲۱). محاسبه مقادیر همبستگی طیف پاسخ شتاب رکوردهای زمین لرزه ۵۲
- شکل (۲-۲۲). نمونه‌ای از رکوردهای شبیه سازی شده با پارامترهای بهینه در ($T^*=1 \text{ sec}$) ۵۴
- شکل (۲-۲۳). طیف متناظر با رکوردهای شبیه سازی شده بهینه در شکل (۲-۲۲) در ($T^*=1 \text{ sec}$) ۵۴
- شکل (۲-۲۴). مقایسه مقادیر همبستگی طیف پاسخ شتاب سه دسته رکورد ۵۵
- شکل (۲-۲۵). مقایسه طیف میانگین پاسخ شتاب برای سه دسته رکورد در زمان تناوب ($T^*=1 \text{ sec}$) ۵۵
- شکل (۲-۲۶). مقایسه طیف میانگین پاسخ شتاب برای سه دسته رکورد در ($T^*=1, 1.71 \text{ sec}$) ۵۶
- شکل (۳-۱). منحنی نیرو- شکل پذیری با شش پارامتر کنترل کننده شکل ۵۸
- شکل (۳-۲): (a) نقشه محل ساختگاه در برگرفته دو منبع تولید زمین لرزه (b) طیف مدل کاهندگی برای دو منبع تولید زمین لرزه ۶۰
- شکل (۳-۳). مقایسه مدل کاهندگی کمپل و بور ۲۰۰۸ با فرض ($M=7.2$ و $R=11 \text{ km}$) ۶۴
- شکل (۳-۴). منحنی خطر بدست آمده از مدل کاهندگی کمپل و بزرگنیا ۶۵
- شکل (۳-۵). منحنی خطر برای ساختگاه فرضی و دوره تناوب‌های ($T^*=0.5, 1, 1.5$) ۶۶
- شکل (۳-۶). طیف با خطر یکسان برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال (۲٪ در ۵۰ سال) ۶۶
- شکل (۳-۷). منحنی IDA برای چند شتاب نگاشت به همراه نقاط متناظر ظرفیت فروریزش ۶۸
- شکل (۳-۸). انطباق توزیع نرمال داده‌ها با مقادیر تجربی ۶۹
- شکل (۳-۹). منحنی شکنندگی فروریزش سازه در سطح خطر ۲۰۰ سال برای سه دسته رکورد ۷۰
- شکل (۳-۱۰). مقایسه منحنی‌های MAF فروریزش برای سه دسته رکورد ۷۱
- شکل (۴-۱). نمای شماتیک از مدل منبع نقطه‌ای زمین لرزه ۷۵
- شکل (۴-۲). نمای شماتیک از مدل منبع صفحه‌ای زمین لرزه ۷۵
- شکل (۱-پ). دیاگرام شماتیک تابع نابجایی گسل و مشتقات زمانی آن ۸۵
- شکل (۲-پ). دیاگرام شماتیک تابع خودهمبستگی نابجایی سرعت و شتاب گسل ۸۶
- شکل (۳-پ). نمونه‌ای از شتاب نگاشت رکوردهای طبیعی زمین لرزه مورد استفاده در این مطالعه ۹۲
- شکل (۴-پ). طیف میانگین پاسخ شتاب رکوردهای طبیعی زمین لرزه مورد استفاد در این مطالعه ۹۲

فهرست جداول

- جدول (۱-۱). مدل‌های مختلف طیف منبع زمین لرزه ۷
- جدول (۲-۱). رابطه لگاریتم فرکانس گوشه با بزرگای ممان ۸
- جدول (۱-۲). مقادیر پیش فرض پارامترهای ورودی برنامه EXSIM ۴۲
- جدول (۲-۲). پارامترهای مورد استفاده در فرآیند بهینه سازی و محدوده مقادیر پارامترها ۴۸
- جدول (۳-۲). مقادیر بهینه پارامترها در زمان تناوب ($T^* = 0.85 \text{ sec}$) ۵۲
- جدول (۴-۲). مقادیر بهینه پارامترها در زمان ($T^* = 1 \text{ sec}$) ۵۳
- جدول (۵-۲). مقادیر بهینه پارامترها در زمان ($T^* = 1.71 \text{ sec}$) ۵۳
- جدول (۱-۳). مقادیر پارامترهای مورد استفاده در ساز یک درجه آزاد ۵۹
- جدول (۲-۳). مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل کاهندگی ۶۴
- جدول (۳-۳). مقایسه مقادیر MAF فروریزش سازه برای سه دسته رکورد در سه زمان تناوب ۷۰
- جدول (۴-۳). مقایسه مقادیر MAF فروریزش سازه برای سه دسته رکورد در زمان ($T^* = 1 \text{ sec}$) ۷۲
- جدول (۱-پ). لیست رخدادهای انتخابی (زمین لرزه‌های برگزیده) ۹۰
- جدول (۲-پ). داده‌های مورد استناد در این مطالعه ۹۳

۱- فصل اول:

مقدمه و مروری بر تحقیقات گذشته

۱-۱- مقدمه

زلزله یکی از مهمترین ترین وقایع طبیعی است که علاوه بر تلفات انسانی، زیانهای اقتصادی قابل توجهی را به بشر تحمیل می‌کند. به همین دلیل موضوع زلزله و فرآیندهای ناشی از آن به طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. در مناطقی با لرزه خیزی بالا نظیر ایران و ... این موضوع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سالانه خسارت‌های جانی و مالی جبران ناپذیری گریبان گیر جوامع بشری می‌شود که تلاش برای به حداقل رساندن این خسارات از مهمترین اهداف دولت‌ها و جوامع علمی مهندسی می‌باشد. پیامدهای اقتصادی و اجتماعی زلزله را می‌توان با ارزیابی جامعی از خطر و خطر پذیری زلزله و به تبع آن افزایش سطح آگاهی‌های عمومی و پیاده کردن این یافته‌ها در برنامه‌ریزی شهری و تدوین به روز آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها کاهش داد.

برآورد لرزش‌های مورد انتظار زمین در فاصله‌ای مشخص از منبع زلزله در یک بزرگای مشخص بخشی اساسی در ارزیابی خطر زلزله است. تعیین ضوابط طرح لرزه‌ای سازه‌ها بستگی به برآورد صحیح از لرزش‌های مورد انتظار در طول عمر سازه دارد. این برآوردها اغلب تحت عنوان روابط کاهندگی شناخته می‌شوند. روابط کاهندگی مبین لرزش‌های زمین به صورت تابعی از بزرگای فاصله می‌باشند.

برای مناطقی که داده‌های زمین لرزه‌های قوی فراوان باشد (مانند کالیفرنیا)، استخراج صرفاً تجربی روابط بر مبنای داده‌های موجود به صورت گسترده‌ای صورت پذیرفته و به صورت رضایت بخشی در تحلیل‌های خطر لرزه‌ای مورد استفاده قرار گرفته اند. اما در سوی مقابل در مناطقی با داده‌های اندک و داشتن پتانسیل کم در وقوع زمین لرزه استفاده از مدل سازی برای توصیف فرآیند تولید و انتشار زمین لرزه امر مهمی به شمار می‌رود. این مدل‌ها اغلب در چارچوب روش‌های تصادفی قرار می‌گیرند. در مرور ادبیات فنی از این روش‌ها اغلب به عنوان (Stochastic method) نام برده می‌شود.

در این فصل سعی شده است تا مروری کلی بر مطالعات انجام شده بر روی فرآیند مدل سازی رکوردهای شبیه سازی شده که توسط محققین در دهه‌های اخیر صورت گرفته است و تشریح فرآیند پیشنهادی بور برای شبیه سازی رکوردهای مصنوعی و همچنین برنامه‌های گسترش یافته در زمینه تولید رکوردهای شبیه سازی شده در سال‌های اخیر انجام شود.

۱-۲- شبیه سازی زمین لرزه‌های مصنوعی

در مناطقی با لرزه خیزی کم و عدم وجود داده‌های کافی و متمرکز، و فقدان رخداد زمین لرزه های قوی، استفاده از مدل‌های فیزیکی برای توصیف مکانیسم تولید و انتشار جنبش‌های زمین ضروری به نظر می‌رسد. مشاهدات حاکی از آن است که با وجود فراوانی داده‌ها در برخی مناطق، تاکید بر توسعه مدل سازی‌های فیزیکی، معقول به نظر می‌رسد، به خصوص در

شرایطی که میزان در دسترس بودن داده‌ها محدودیت جدی در تخمین پارامترهای مدل پدید می‌آورد. مدل‌های این چنینی عموماً در چارچوب مدل سازی تصادفی و تئوری ارتعاشات تصادفی در مرور ادبیات فنی مورد اشاره قرار می‌گیرند.

یکی دیگر از مزایای این مدل سازی‌ها قابلیت استخراج پارامترهای منتسب به منبع، کاهندگی مسیر و اثرات ساختگاه است که منجر به فهم فیزیکی فرآیندهای اساسی تولید و کاهندگی جنبش‌های زمین می‌گردد. چنانچه مدل‌های فیزیکی در محدوده مشخصی از بزرگا و فاصله اعتباردهی شوند، آنگاه می‌توان با اطمینان بالایی در پیش بینی جنبش‌ها در همان محدوده بزرگا و فاصله از این مدل‌ها استفاده کرد. این برآوردها غالباً تحت عنوان روابط کاهندگی شناخته می‌شوند، که البته در برخی موارد پارامترهایی نظیر نوع گسلش و شرایط خاک محل را نیز در بر می‌گیرند.

روش‌های مختلفی برای شبیه سازی زمین لرزه (رکوردهای شبیه سازی شده) وجود دارد که به سه گروه عمده تقسیم می‌شوند:

۱. روش‌های تعینی (Deterministic methods)
۲. روش‌های تصادفی (Stochastic methods)
۳. روش‌های ترکیبی (Hybrid stochastic methods)

در زیر هر یک از این روش‌ها به اختصار توضیح داده شده است.

۱-۲-۱- روش‌های تعینی

در روش‌های تعینی، زمین لرزه بر اساس انتشار امواج لرزه‌ای در محیط‌های ناهمگن با استفاده از حل عددی روابط سه بعدی لرزش و روابط ساختاری ما بین تنش و کرنش حوزه موج بیان می‌شود، به طوریکه فرآیند لرزش در قالب سرعت که در بردارنده محاسبات طولانی است بیان می‌گردد. در مسائل کاربردی مهندسی سازه و تحلیل‌های غیر خطی از شتاب نگاشت‌های شبیه سازی شده با محتوای انرژی طیفی مابین ۰/۵ تا ۳۰ هرتز استفاده می‌شود. روش‌های تعینی معمولاً به علت صرف زمان زیاد برای تحلیل داده‌ها نا کارآمد هستند. روش تعینی، تنها روشی است که می‌تواند در یک فرآیند واقعی، زمین لرزه تولید کند.

۱-۲-۲- روش‌های تصادفی

روش‌های تصادفی زیادی بر اساس دیدگاه و فرایند بور پیشنهاد شده است. این روش‌ها زمان محاسباتی کمی دارند و می‌توان با هر محتوای فرکانسی دلخواه زمین لرزه تولید کرد. در این فرآیند، سری‌های زمانی از طیف نوفه سفید و انجام فرآیندهای ریاضی بر روی این طیف حاصل می‌شود. رویکرد مدل سازی تصادفی در تعامل مستقیم با تئوری ارتعاشات تصادفی قرار دارد.

زمین لرزه‌های با بسامد زیاد بر خلاف زمین لرزه‌های با لرزش‌های بلند دوره زمین (بسامد کم) ماهیتی تصادفی دارند و به صورت احتمالاتی رفتار می‌کنند. به همین دلیل روش‌های تصادفی برای شبیه سازی این گونه زمین لرزه‌ها مناسب می‌باشد.

۱-۲-۳- روش‌های ترکیبی

روش‌های ترکیبی نتیجه ترکیب روش‌های تعینی و روش‌های تصادفی ذکر شده در بالا می‌باشد. مدل سازی روش ترکیبی بر پایه ترکیب روش تصادفی گسل محدود با استفاده از فرکانس گوشه پویا و ^۲ روش‌های تحلیلی می‌باشد. اگر چه روش تصادفی گسل محدود قادر به تولید سری زمانی شتاب زمین لرزه با دامنه نسبی بلند و فرکانس بالا می‌باشد، داخل کردن یک مدل تحلیلی با ^۳ ضربه دوره بلند، اساساً توان شبیه سازی موجی شکل سری زمانی با ^۴ باند پهن را بر روی محدوده وسیعی از فرکانس‌ها افزایش می‌دهد. مدل ترکیبی گسل محدود شامل دو بخش اساسی می‌باشد.

۱. تولید سری زمانی شتاب بر پایه مدل تصادفی ترکیبی گسل محدود.

۲. نیاز به مدلی تحلیلی برای مدل سازی و بررسی رکوردهای حوزه نزدیک.

۱-۳- چارچوب فرآیند شبیه سازی بور و فرمول بندی مدل‌های تصادفی

در این مطالعه، چارچوب مدل سازی تصادفی بور [۱]، در تعامل مستقیم با تئوری ارتعاشات تصادفی برای پیش بینی ^۵ طیف پاسخ شبه شتاب، در ^۶ میرایی ۵ درصد مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس مطالعات بور طیف دامنه فوریه مؤلفه‌های حرکتی (یعنی جابجایی، سرعت و شتاب) با تابع $Y(M_0, R, f)$ نمایش داده می‌شود. این تابع مبین هر یک از پارامترهای فوق الذکر در فاصله R از منبع زلزله‌ای با بزرگای M_0 می‌باشد:

$$Y(M_0, R, f) = E(M_0, f) \cdot P(R, f) \cdot G(f) \cdot I(f) \quad (1)$$

در رابطه (۱) f فرکانس مؤلفه حرکتی می‌باشد. جمله‌های واقع در سمت راست رابطه فوق در بردارنده اثر منبع $E(M_0, f)$ ، اثر مسیر $P(R, f)$ ، اثر ساختگاه $G(f)$ و مشخصه مؤلفه حرکتی مد نظر $I(f)$ ، می‌باشد. مشخصه مؤلفه حرکتی عبارتست از: جابجایی، سرعت و شتاب حرکت زمین بر اثر وقوع زمین لرزه.

¹ Dynamic corner frequency

² Analytical method

³ Long-period pulse

⁴ Band-width

⁵ Pseudo-absolute response spectral acceleration

⁶ Damping

۱-۳-۱- اثر منبع

در روش‌های شبیه‌سازی تصادفی، اثر منبع به دو صورت در نظر گرفته می‌شود: در نوع اول منبع زمین لرزه،^۲ منبعی نقطه‌ای است و در نوع دوم که شبیه‌سازی بر اساس گسل محدود (گسل صفحه‌ای) نام دارد، منبع لرزه‌ای یک گسل مستطیلی است که در راستای طولی و عرضی خود به صورت منابع نقطه‌ای یکسان المان بندی شده است.

همانطور که از نام منبع نقطه‌ای پیداست، انرژی آزاد شده از یک گسل در عمقی از سطح زمین به صورت نقطه‌ای بر روی سطح گسل نشان داده می‌شود. در این نظریه در واقع انرژی زلزله به صورت متمرکز از نقطه‌ای واقع بر روی گسل به سمت سطح زمین منتشر می‌گردد. مدل منبع نقطه‌ای توسط برون [۲]، بیان شد. مدل منبع نقطه‌ای بر پایه طیف ω^2 و فرکانس گوشه استوار می‌باشد [۳]. فرکانس گوشه به بزرگای زلزله بستگی دارد. طیف دامنه منبع حاصل از مدل منبع نقطه‌ای برای فرکانس‌های (۰/۱ تا ۲ هرتز) و بزرگای بیشتر از ۴ پیش بینی شده است. روش منبع نقطه‌ای نمی‌تواند پارامترهای کلیدی لرزش زمین را در یک زمین لرزه بزرگ، مانند مدت زمان طولانی و وابستگی دامنه‌ها به آزمون ایستگاه مشاهده (اثر جهت پذیری) را در نظر بگیرد. به خاطر این محدودیت‌ها در سال (۱۹۷۸) روش مدل سازی بر اساس گسل محدود از سوی هاتزل ارائه شد و در دو دهه گذشته مقبولیت زیادی یافت [۴].

روش مدل سازی بر اساس گسل محدود جنبه‌های مدل منبع صفحه‌ای را با مدل لرزش زمین بر اساس منبع نقطه‌ای ترکیب می‌کند و از آنجا که محدودیت‌های ذکر شده به طور طبیعی در روش مدل سازی بر اساس گسل محدود وجود ندارد، این روش هندسه شکست گسل و اثر جهت پذیری امواج منتشر شده ناشی از شکست گسل را در نظر می‌گیرد و نتایج خوبی را بدست می‌دهد. برای شبیه‌سازی با استفاده از نظریه گسل محدود، از روش تاخیر زمانی و جمع شتاب نگاشت‌های مربوط به یک شبکه دو بعدی شامل المان بندی گسل استفاده می‌شود. در این مدل چند بعدی که مورد استفاده عملی کامایی و ایریکورا [۵]، و همچنین برسنف و اتکینسون [۶]، قرار گرفت، برای توصیف فرآیند لغزش گسل از مدل منبع سینماتیکی استفاده می‌شود.

مدل منبع سینماتیکی شامل هندسه شکست گسل (مساحت شکست خورده، راستای گسل و شیب گسل)، نقطه شروع شکست و سرعت شکست می‌شود. در این روش یک صفحه مستطیلی برای گسل در نظر گرفته می‌شود، صفحه گسل را نیز به المان‌های مستطیلی تقسیم می‌کنند و

¹ Source effect

² Point-source

³ Finite fault-source

⁴ ω -square model

⁵ Corner frequency

فرض می‌شود که شکست که از مرکز یکی از المان‌ها (^۱کانون زمین لرزه) شروع شده است، به صورت شعاعی انتشار می‌یابد.

سرعت انتشار شکست گسل معمولاً ۸۰ درصد سرعت موج برشی در نظر گرفته می‌شود. هر ریز گسل وقتی که شکستگی به مرکز آن می‌رسد، به صورت یک منبع کوچک مستقل لرزه‌ای عمل می‌کند و شروع به انتشار امواج لرزه‌ای می‌کند. شتاب نگاشت‌های به دست آمده از هر المان که بر اساس طیف منبع نقطه‌ای است، با در نظر گرفتن تأخیر زمانی متناظرشان با یکدیگر جمع می‌شوند تا شتاب نگاشت کلی، حاصل از آزاد شدن انرژی کل ریز گسل‌های صفحه گسل به دست آید. در روش شبیه سازی بر اساس گسل محدود هر المان که به منزله یک منبع نقطه‌ای است از مدل برون با یک بسامد گوشه و یک افت تنش ثابت استفاده می‌کند.

این روش شبیه سازی، روش مناسبی است و به طور گسترده‌ای در برآورد جنبش‌های نیرومند زمین از آن استفاده می‌شود. البته در فواصل دور از گسل، یک منبع صفحه‌ای می‌تواند به صورت منبعی نقطه‌ای در نظر گرفته شود و از آنجا که شبیه سازی با منبع نقطه‌ای محاسبات کمتری نیاز دارد مناسب تر است. ارزیابی نتایج منبع نقطه‌ای و منبع صفحه‌ای مشخص می‌کند که مدل منبع صفحه‌ای برآوردهای دقیق تری را نسبت به مدل منبع نقطه‌ای ارائه می‌دهد. رابطه طیف منبع بر اساس مدل برون (ω -square model) به صورت رابطه زیر نوشته می‌شود:

$$E(M_0, f) = C.M_0.S(M_0, f) \rightarrow E(M_0, f) = C.M_0 \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_a}\right)^2} \quad (2)$$

در رابطه (۲) C یک فاکتور مستقل از فرکانس و برابر $C = \langle R_{0\phi} \rangle VF / (4\pi\rho_s\beta_s^3 R_0)$ می‌باشد. $R_{0\phi}$ ، الگوی انتشار میانگین امواج را نشان می‌دهد و برای امواج برشی برابر ۰.۵۵. در نظر گرفته می‌شود. F ، بزرگ نمایی سطح آزاد می‌باشد و برابر با ۲ در نظر گرفته می‌شود. V ، نیز برای لحاظ کردن اثر تقسیم شدن حرکت به دو مؤلفه افقی بوده و (برابر ۲^{۱/۲}) می‌باشد. ρ و β به ترتیب چگالی و سرعت موج برشی در اطراف منبع می‌باشد. در مرور ادبیات فنی مقادیر ρ و β برای مناطق فراصفحه‌ای برابر 2.8 kg/cm^3 و 3.7 km/sec پیشنهاد شده است. R_0 نیز فاصله مرجع نام دارد و معمولاً برابر ۱ km در نظر گرفته می‌شود. در رابطه (۲)، f فرکانس و f_a فرکانس گوشه بر حسب (Hz) می‌باشد.

¹ Earthquake focus

فرکانس گوشه بر دامنه شتاب تأثیر گذار است و محتوای بسامدی زلزله تولید شده در منبع را کنترل می کند و متناسب با عکس زمان شکست گسل می باشد. این فرکانس از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$f_0 = 4.9 \times 10^6 \beta_s \left(\frac{\Delta\sigma}{M_0} \right)^{1/3} \quad (3)$$

که در این رابطه، β سرعت موج برشی بر حسب km/sec، $\Delta\sigma$ افت تنش بر حسب bar و M_0 ممان لرزه ای بر حسب dyne-cm می باشد. اگر چه مدل (ω -square) به طور گسترده ای برای بررسی طیف منبع زمین لرزه مورد استفاده قرار می گیرد، اما مدل های زیادی برای شبیه سازی طیف منبع زمین لرزه بر پایه روش های احتمالاتی وجود دارد که مورد استفاده قرار می گیرند. جدول (۱-۱) برخی از این مدل ها را نشان می دهد که در دهه های اخیر مورد استفاده محققین قرار گرفته اند. این مدل ها اغلب برای پیش بینی زمین لرزه های شمال غرب امریکا مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول (۱-۱). مدل های مختلف طیف منبع زمین لرزه [۱]

Model [†]	S_a	S_b
BC92	$f < f_a : 1$ $f \geq f_a : f_a/f$	$\frac{1}{(1+(f/f_b)^2)^{1/2}}$
AB95	$\frac{1-\epsilon}{1+(f/f_a)^2} + \frac{\epsilon}{1+(f/f_b)^2}$	1
Fea96*	$\frac{1}{1+(f/f_a)^2}$	1
H96	$\frac{1}{(1+(f/f_a)^8)^{1/8}}$	$\frac{1}{(1+(f/f_b)^8)^{1/8}}$
J97	$\frac{1}{(1+(f/f_a)^2)^{3/4}}$	$\frac{1}{(1+(f/f_b)^2)^{1/4}}$
AS00	$\frac{1-\epsilon}{1+(f/f_a)^2} + \frac{\epsilon}{1+(f/f_b)^2}$	1

[†] The references to the models are as follows: BC92 = BOATWRIGHT and CHOY (1992); AB95 = ATKINSON and BOORE (1995); Fea96 = FRANKEL *et al.* (1996); H96 = HADDON (1996); J97 = JOYNER (1997), as modified in a written communication to D. Boore; AS00 = ATKINSON and SILVA (2000) for California.

* This is the ω -square model.

در رابطه (۲)، جمله $S(M_0, f)$ طیف جابجایی منبع نام دارد و از رابطه زیر به دست می آید:

$$S(M_0, f) = S_a(M_0, f) * S_b(M_0, f) \quad (4)$$

طیف منبع زمین لرزه در مدل (ω -square) همانطور که در جدول (۱-۱) با علامت ستاره نشان داده شده است برابر $CM_0/1+(f/f_a)^2$ می باشد. مقادیر f_a و f_b در جدول (۱-۱) فرکانس گوشه می باشند. عمومی ترین مدل مورد استفاده برای طیف منبع زمین لرزه مدل (ω -square) می باشد.

توضیحات بیشتر درباره مدل (ω -square) در پیوست (۱) آمده است. همانطور که گفته شد فرکانس گوشه با بزرگای زلزله در ارتباط است. در جدول (۲-۱) وابستگی مقادیر فرکانس گوشه با بزرگا نشان داده شده است.

جدول (۲-۱). رابطه لگاریتم فرکانس گوشه با بزرگای ممان [۱]

Model	$\log f_a$	$\log f_b$	$\log \epsilon$
BC92	$M \geq 5.3: \dagger 3.409 - 0.681M$	$1.495 - 0.319M$	-
	$M < 5.3: 2.452 - 0.5M$	$2.452 - 0.5M$	-
AB95	$M \geq 4.0: \ddagger 2.41 - 0.533M$	$1.43 - 0.188M$	$2.52 - 0.637M$
	$M < 4.0: 2.678 - 0.5M$	$2.678 - 0.5M$	0.0
Fea96*	$2.623 - 0.5M$	-	-
H96	$2.3 - 0.5M$	$3.4 - 0.5M$	-
J97	$2.312 - 0.5M$	$3.609 - 0.5M$	-
AS00	$M \geq 2.4: \dagger 2.181 - 0.496M$	$2.41 - 0.408M$	$0.605 - 0.255M$
	$M < 2.4:$ $1.431 - 0.5(M - 2.4)$	$1.431 - 0.5(M - 2.4)$	0.0

† The specified magnitude corresponds to the point at which $f_a = f_b$.

‡ The specified magnitude corresponds to the point at which $\epsilon = 1.0$.

* This is the ω -square model, for which $\log f_0 = 1.341 + \log(\beta(\Delta\sigma)^{1/3}) - 0.5M$, with $\beta = 3.6$ km/s and $\Delta\sigma = 150$ bars.

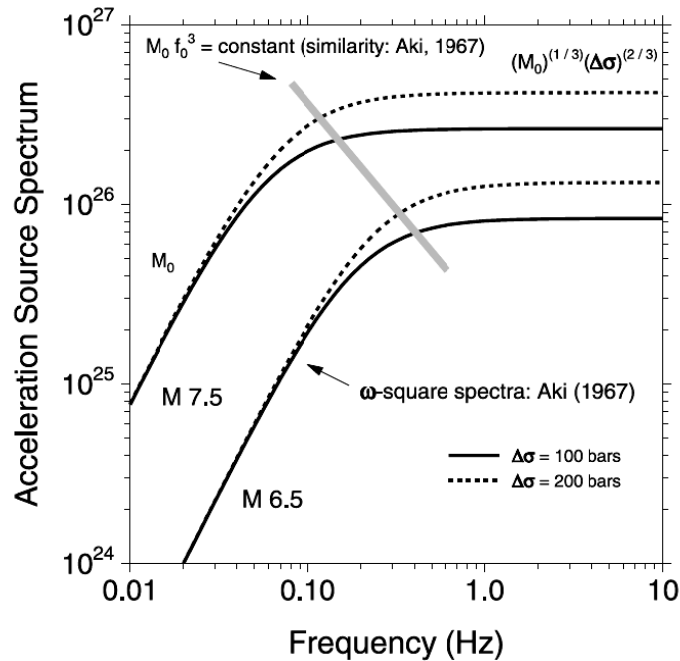
همانطور که در جدول (۲-۱) مشاهده می‌کنید، در مدل (ω -square)، فرکانس گوشه بر طبق رابطه زیر با بزرگا در ارتباط است:

$$\log f_0 = 1.341 + \log\left(\beta(\Delta\sigma)^{1/3}\right) - 0.5M \quad (5)$$

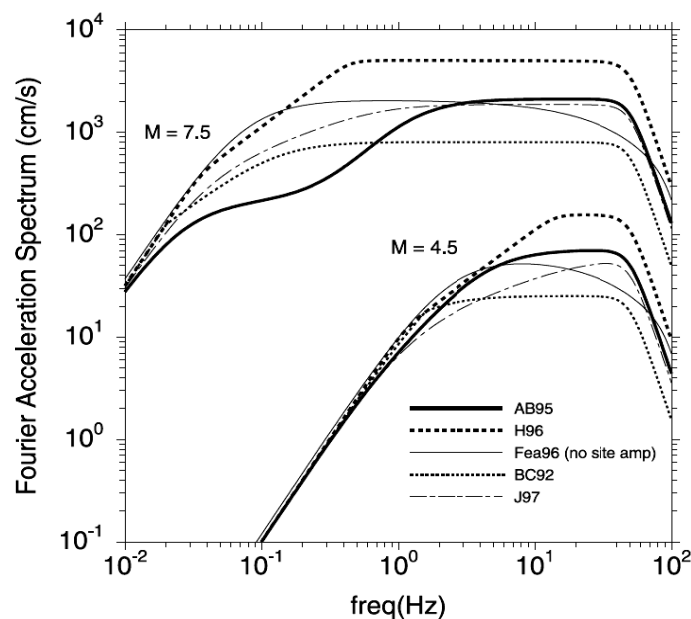
شکل و دامنه طیف منبع زمین لرزه تابعی از بزرگای زلزله می‌باشد. این موضوع یکی از مهم ترین قسمت‌های کاربرد روش‌های احتمالاتی شبیه سازی زمین لرزه می‌باشد. شکل (۱-۱) طیف مدل (ω -square) را برای دو بزرگای $6/5$ و $7/5$ نشان داده است. مقیاس کردن طیف منبع زمین لرزه از یک بزرگا به بزرگای دیگر با استفاده از حاصلضرب فرکانس گوشه در بزرگای ممان لرزه‌ای بدست می‌آید. این مقدار ثابت که توسط اکی (۱۹۶۷) بیان شد برابر است با:

$$M_0 f_0^3 = const \quad (6)$$

فرکانس گوشه علاوه بر اینکه محتوای فرکانسی طیف را کنترل می‌کند، مقادیر ماکزیمم طیف را نیز کنترل می‌کند. همچنین بر اساس رابطه (۵) فرکانس گوشه با دو پارامتر بسیار مهم زلزله یعنی افت تنش و سرعت موج برشی در ارتباط است. به همین دلیل فرکانس گوشه بر روی شکل طیف بسیار تأثیر گذار است.



شکل (۱-۱). طیف منبع زمین لرزه با استفاده از مدل ω^2 و مقیاس کردن طیف از یک بزرگای به بزرگای دیگر [۱]



شکل (۲-۱). طیف منبع زمین لرزه در ($R=1$ km) برای مدل‌های بیان شده در جدول (۱-۱). [۱]

همانطور که گفته شد، مدل‌های مختلفی برای شبیه سازی طیف منبع زمین لرزه توسط محققین ارائه شده است. در شکل (۲-۱) طیف منبع زمین لرزه برای مدل‌های بیان شده در جدول (۱-۱) نشان داده شده است. شکل (۲-۱) برای دو بزرگای $4/5$ و $7/5$ بدست آمده است که مقایسه‌ای مناسب برای مدل‌های مختلف طیف منبع زمین لرزه ارائه می‌کند.