به نام آن که جان را فکرت آموخت

تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها

تی. کی. داتا

ترجمه

حسن محمدی

ویراستار

محمدرضا تابش‌پور

(عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی شریف)

بنای دانش

سرشناسه : محمدی، حسن
عنوان و نام پدیدآور : تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها/ مترجم حسن محمدی
مشخصات نشر : تهران : بنای دانش،۱۳۹۶.
مشخصات ظاهری : ج.
شابک : ۰- ۹-۹۴۷۲۳- ۶۰۰- ۹۷۸ : ۴۲۰۰۰۰ریال
وضعیت فهرست نویسی : فیپا
موضوع : ساختمان‌ها -- اثر زلزله
موضوع : پایداری سازه‌ها
موضوع : ساختمان‌سازی -- صنعت و تجارت -- استانداردها
رده‌بندی کنگره : ۱۳۹۶ ۲س۲ت/TH۱۰۹۵
رده‌بندی دیویی : ۶۹۳ /۸۵۲
شماره کتابشناسی ملی : ۴۸۳۸۲۴۳

بنای دانش

تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها

ترجمه : حسن محمدی
ویراستار : محمدرضا تابش‌پور
صفحه‌آرایی : علی رئوفی‌فر، مونا سروری، رحیم شوقی
نوبت چاپ : اول - ۱۳۹۶
تیراژ : ۵۰۰
قیمت : ۴۲۰۰۰۰ ریال
شابک : ۰- ۹- ۹۴۷۲۳- ۶۰۰- ۹۷۸

دفتر انتشارات : تهران - خیابان انقلاب - خیابان اردیبهشت - بین‌لبافی‌نژاد و جمهوری - ساختمان ۱۰
تلفن: ۶۶۴۸۱۰۹۶ – ۶۶۴۸۲۲۲۱
فروشگاه یزد: میدان آزادی (باغ ملی) - ابتدای خیابان فرخی - جنب مجتمع ستاره
تلفن: ۳۶۲۲۷۴۷۵-۳۶۲۲۶۷۷۱- ۳۶۲۲۶۷۷۲ - ۰۳۵

ایمیل و وب‌سایت: www.fadakbook.ir - fadakbook@yahoo.com

کلیهٔ حقوق و حق چاپ متن و عنوان کتاب که به ثبت رسیده است؛ مطابق با قانون حقوق مولفان و مصنفان مصوب ۱۳۴۸ محفوظ و متعلق به انتشارات بنای دانش می‌باشد. هرگونه برداشت،تکثیر،کپی‌برداری به هرشکل (چاپ، فتوکپی، انتشار الکترونیکی) بدون اجازه کتبی از انتشارات بنای دانش ممنوع بوده و متخلفین تحت پیگرد قانونی قرار خواهند گرفت.

معاونت حقوقی
انتشارات بنای دانش

تقدیم به :

خوانندگان گرامی

محمد رضا تابش پور

سخن نخست

تنوع و گستردگی مباحث مرتبط با مهندسی زلزله به‌نحوی است که با تعداد محدودی کتاب نمی-توان یک مجموعه منسجم از دانش این حوزه را تدوین کرد.یکی از کتاب‌های منحصربه‌فرد در این حوزه، تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها تألیف داتتا می باشد که ترجمه آن اکنون در اختیار شماست. این کتاب را آقای حسن محمدی در بازه زمانی ۸۸ تا ۹۰ ترجمه کرده است و بنده نیز از آن زمان تا پایان فروردین۹۶ در سه مرحله ویرایش ادبی و فنی را انجام دادم. مترجم عزیز بسیار دلسوزانه و صادقانه در خدمت ترجمه کتاب بود و آنچه از دستش بر می‌آمد را انجام داد. اگر اکنون در کتاب، نقص و اشکالی هست به خاطر کوتاهی احتمالی بنده در بررسی کامل کتاب است که شاید در حد کمال نبوده است ولی در چاپ‌های بعدی، شناسایی و رفع خواهد شد.

آقای مهندس پیمان رجائیان پیش‌چاپ کل کتاب را با دقت بسیار بالایی در بازه زمانی پاییز ۹۵ تا فروردین ۹۶ نمونه‌خوانی کرده و کمک شایانی در تکمیل ویرایش ادبی و علمی انجام دادند. از تلاش صادقانه ایشان که در تسریع چاپ کتاب بسیار تأثیر داشت، صمیمانه تشکر می‌کنم.

سرکار خانم آزاده نوری‌فرد نیز در نمونه‌خوانی و انجام اصلاحات ادبی و علمی فصل اول همکاری ارزنده‌ای داشتند و بخشهایی از اصلاحات لازم در فصل پنجم را نیز با دقت انجام دادند. از زحمات ایشان، مجدانه تقدیر می‌شود.

آقایان مهندس علی رئوفی‌فر و رحیم شوقی در استایل‌بندی و صفحه‌آرایی کتاب همکاری ارزشمندی کردند. حروف‌چینی بخش‌های عمده‌ای از کتاب را سرکار خانم مونا سروری و سبا سروری با دقت انجام دادند؛ از ایشان تقدیر می‌شود.

هرچند بنده در سه مرحله ویرایش ادبی و علمی این کتاب، حتی بخش‌هایی را بازنویسی اساسی و کامل کرده‌ام، ولی باز هم اشکالات و ابهاماتی در کتاب وجود دارد که فقط شما خوانندگان گرامی می‌توانید با دقت، آنها را شناسایی کرده و اطلاع دهید تا در چاپ بعدی مورد نظر قرار گیرد. پیشاپیش از این همکاری شما تشکر می‌شود.

اطلاعات مفیدی در سایت dastnameh.irموجود است.

محمدرضا تابش‌پور

tabeshpour@yahoo.com

فهرست مطالب

فصل اول: لرزه‌شناسی ۱

۱.۱ مقدمه ۲

۱.۱.۱ زمین و قسمت‌های داخلی آن ۳

۲.۱.۱ زمین ساخت صفحه‌ای ۴

۳.۱.۱ علل زلزله ۷

۲.۱ امواج لرزه‌ای ۹

۳.۱ پارامترهای اندازه‌گیری زلزله ۱۴

۱.۳.۱ بزرگای محلی (M_L) ۱۷

۲.۳.۱ بزرگای موج حجمی (M_b) ۱۸

۳.۳.۱ بزرگای موج سطحی (M_s) ۱۸

۴.۳.۱ بزرگی ممان لرزه‌ای (M_w) ۱۹

۵.۳.۱ آزاد شدن انرژی ۲۱

۶.۳.۱ شدت زلزله ۲۲

۴.۱ اندازه‌گیری یک زلزله ۲۳

۵.۱ اصلاح زلزله‌ها به‌خاطر ماهیت خاک ۲۷

۶.۱ تحلیل خطر لرزه‌ای ۲۹

۱.۶.۱ تحلیل خطر لرزه‌ای تعینی (قطعی) ۲۹

۲.۶.۱ تحلیل خطر به‌روش احتمالاتی ۳۱

۳.۶.۱ خطرپذیری لرزه‌ای در یک ساختگاه ۳۹

۴.۶.۱ مفهوم ریزپهنه‌بندی براساس تحلیل خطر ۴۲

فصل دوم: ورودی‌های لرزه‌ای سازه‌ها ۵۰

۱.۲ مقدمه ۵۱

۲.۲ رکوردهای تاریخچه‌ی زمانی ۵۱

۳.۲ محتوای فرکانسی حرکت زمین ۵۴

۴.۲ تابع چگالی طیفی توان حرکت زمین ۶۱
۵.۲ طیف پاسخ زلزله ۶۶
۱.۵.۲ طیف‌های جابه‌جایی، سرعت و شتاب ۶۷
۲.۵.۲ طیف انرژی و طیف فوریه ۶۹
۳.۵.۲ طیف ترکیبی $D-V-A$ (جابه‌جایی- سرعت- شتاب) ۷۱
۴.۵.۲ طیف پاسخ طرح و ساختار آن ۷۵
۵.۵.۲ زلزله‌های طرح ۸۰
۶.۵.۲ طیف‌های پاسخ احتمالاتی ۸۲
۷.۵.۲ طیف‌های مخصوص ساختگاه و طیف‌های خطی یکنواخت ۸۲
۶.۲ ایجاد شتاب نگاشت‌های مصنوعی ۹۲
۱.۶.۲ شتاب نگاشت سازگار طیف پاسخ ۹۳
۲.۶.۲ شتاب نگاشت سازگار با تابع چگالی طیفی توان ۹۴
۷.۲ پیش‌بینی پارامترهای ورودی لرزه‌ای ۹۵
۱.۷.۲ روابط پیش‌یابی PGA، PHV و PHA ۹۶
۲.۷.۲ رابطه‌ی پیش‌یابی برای مدت زمان ۱۰۱
۳.۷.۲ روابط پیش‌یابی برای مقدار rms شتاب زمین (A_{rms}) ۱۰۲
۴.۷.۲ روابط پیش‌یابی طبق فوریه و طیف پاسخ ۱۰۲
۵.۷.۲ روابط پیش‌یابی $PSDF$ حرکت زمین ۱۰۶
۶.۷.۲ روابط پیش‌یابی تابع مدوله ۱۰۹
۷.۷.۲ روابط پیش‌یابی برای تابع همبستگی ۱۱۲

فصل سوم: تحلیل پاسخ برای حرکات مشخص زمین ۱۲۱

۱.۳ مقدمه ۱۲۲
۲.۳ معادله‌ی حرکت برای سیستم یک درجه آزادی ($SDOF$) ۱۲۲
۱.۲.۳ معادله‌ی حرکت برحسب حرکات نسبی جرم ۱۲۳
۲.۲.۳ معادله‌ی حرکت برحسب حرکت مطلق جرم ۱۲۳
۳.۲.۳ معادله‌ی حرکت در فضای حالت ۱۲۴
۳.۳ معادلات حرکت سیستم چند درجه آزادی ($MDOF$) ۱۲۵
۱.۳.۳ معادلات حرکت برای تحریک یک پایه ۱۲۵

۲.۳.۳ معادلات حرکت برای تحریک چندتکیه‌گاهی ۱۳۴
۳.۳.۳ معادلات حرکت در فضای حالت ۱۴۲
۴.۳ تحلیل پاسخ سیستم یک درجه‌ی آزادی ($SDoF$) ۱۴۴
۱.۴.۳ تحلیل حوزه‌ی زمانی با استفاده از انتگرال دوهامل ۱۴۴
۲.۴.۳ تحلیل حوزه‌ی زمانی با استفاده از روش β نیومارک ۱۴۹
۳.۴.۳ تحلیل حوزه‌ی زمانی در فضای حالت ۱۵۱
۴.۴.۳ تحلیل حوزه‌ی فرکانس با استفاده از تبدیل فوریه ۱۵۲
۵.۳ تحلیل پاسخ سیستم‌های چند درجه آزادی ($MDoF$) ۱۵۷
۱.۵.۳ تحلیل مستقیم ۱۵۹
۲.۵.۳ تحلیل مودی ۱۷۱
۳.۵.۳ کاهش اندازه ۱۷۵
۴.۵.۳ محاسبه‌ی نیروهای داخلی ۱۷۸
۵.۵.۳ تحلیل مودی درحوزه‌ی زمانی برای معادله‌ی فضای حالت ۱۷۹
۶.۵.۳ تحلیل مودی در حوزه‌ی فرکانس برای معادله‌ی فضای حالت ۱۸۰
۷.۵.۳ مراحل محاسباتی برنامه‌نویسی $MATLAB$ ۱۸۳

فصل چهارم: تحلیل طیفی حوزه فرکانس ۲۱۱

۱.۴ مقدمه ۲۱۲
۲.۴ فرآیند تصادفی مانا ۲۱۲
۳.۴ سری فوریه و انتگرال فوریه ۲۱۵
۴.۴ توابع همبستگی و همبستگی متقابل ۲۱۸
۵.۴ تابع چگالی طیفی توان (S_{xx}) و تابع چگالی طیفی توان متقابل (S_{xy}) ۲۱۹
۶.۴ ماتریس تابع چگالی طیفی توان ($PSDF$) ۲۲۲
۷.۴ $PSDF$ ها و $PSDF$ های متقابل مشتقات فرآیند ۲۲۶
۸.۴ سیستم یک خروجی یک ورودی ($SISO$) ۲۲۷
۹.۴ سیستم ($MDoF$) با تحریک یک نقطه‌ای و چند نقطه‌ای ۲۲۶
۱.۹.۴ تحریک یک نقطه‌ای ۲۳۲
۲.۹.۴ تحریک چند نقطه‌ای ۲۳۴
۳.۹.۴ تعیین $PSDF$ جابه‌جایی مطلق ۲۳۷
۱۰.۴ ماتریس $PSDF$ نیروهای انتهایی عضو ۲۴۱

۱۱.۴ تحلیل طیفی مودی ۲۴۵
۱۲.۴ تحلیل طیفی با استفاده از فرمول‌بندی فضای حالت ۲۴۷
۱۳.۴ مراحل ایجاد یک برنامه برای تحلیل طیفی در *MATLAB* برای تحریک چندتکیه‌گاهی ۲۵۱

فصل پنجم: روش طیف پاسخ ۲۵۷

۱.۵ مقدمه ۲۵۸
۲.۵ مفهوم نیروی جانبی معادل و روش طیف پاسخ تحلیل ۲۵۹
۳.۵ تحلیل طیف پاسخ برای تحریک یک نقطه‌ای ۲۵۹
۱.۳.۵ توسعه‌ی این روش ۲۵۹
۲.۳.۵ قوانین ترکیب مودها ۲۶۱
۳.۳.۵ استفاده از قاب‌های ساختمانی دوبعدی، دودکش‌ها ۲۶۶
۴.۳.۵ اعمال این روش در ساختمان‌های مرتفع سه بعدی ۲۶۸
۴.۵ تحلیل طیف پاسخ برای تحریکات چند پایه ۲۷۰
۱.۴.۵ معرفی این روش ۲۷۰
۲.۴.۵ مراحل ارایه‌ی برنامه در *MATLAB* ۲۷۴
۵.۵ تحلیل سیستم‌های ثانویه با روش طیف پاسخ ۲۷۹
۶.۵ روش تحلیل طیف پاسخ مودی تقریبی ۲۸۱
۷.۵ روش ضریب زلزله ۲۸۲
۱.۷.۵ شرح روش ضریب زلزله ۲۸۲
۲.۷.۵ توزیع نیروهای جانبی ۲۸۳
۳.۷.۵ محاسبه‌ی پریود اصلی ۲۸۴
۴.۷.۵ محاسبه‌ی برش پایه ۲۸۴
۸.۵ مقایسه‌ی ضوابط مذکور در چندین آئین‌نامه‌ی مختلف ۲۸۵
۱.۸.۵ آئین‌نامه‌ی بین‌المللی ساختمان (۲۰۰۰) ۲۸۶
۲.۸.۵ آئین‌نامه‌ی ملی ساختمان کانادا (۱۹۹۵) ۲۸۹
۳.۸.۵ آئین‌نامه‌ی اروپا (یوروکد) (۱۹۹۵) ۲۹۰
۴.۸.۵ آئین‌نامه‌ی نیوزلند (*NZ* ۴۲۰۳:۱۹۹۲) ۲۹۲
۵.۸.۵ آئین‌نامه‌ی هند (*IS* ۱۸۹۳ – ۲۰۰۲) ۲۹۳

فصل ششم: پاسخ لرزه‌ای غیرالاستیک سازه‌ها ۳۰۱

۱.۶ مقدمه ۳۰۲

۲.۶ تحلیل غیرخطی سازه‌ها برای نیروهای زلزله ۳۰۳

۱.۲.۶ معادلات حرکت ۳۰۴

۲.۲.۶ حل معادلات حرکت برای سیستم $SDOF$ ۳۰۵

۳.۲.۶ حل معادلات حرکت برای سیستم $MDOF$ بدون اندرکش دو جهتی ۳۱۰

۴.۲.۶ حل معادلات حرکت برای سیستم $MDOF$ با اندرکنش دو جهتی ۳۱۶

۳.۶ تحلیل غیرالاستیک قاب های ساختمانی چند طبقه ۳۲۵

۴.۶ تحلیل پوش اور ۳۳۵

۵.۶ مفاهیم شکل‌پذیری و طیف پاسخ غیرالاستیک ۳۴۱

۱.۵.۶ شکل‌پذیری ۳۴۱

۲.۵.۶ طیف پاسخ غیرالاستیک ۳۴۴

۶.۶ شکل‌پذیری در یک سازه چند طبقه ۳۴۸

فصل هفتم: اندرکنش لرزه‌ای خاک- سازه ۳۵۴

۱.۷ مقدمه ۳۵۵

۲.۷ انتشار موج در خاک ۳۵۵

۳.۷ انتشار موج یک‌بعدی و تحلیل پاسخ زمین ۳۵۹

۱.۳.۷ تحلیل پاسخ زمین با استفاده از FFT ۳۶۳

۲.۳.۷ تحلیل پاسخ زمین (خطی و غیرخطی) در حوزه‌ی زمانی ۳۶۴

۴.۷ تحلیل پاسخ $2D$ یا $3D$ در حوزه‌ی زمان ۳۶۷

۵.۷ اندرکنش دینامیکی خاک و سازه ۳۷۵

۱.۵.۷ مسایل کران‌دار و ایده‌آل‌سازی مسایل واقعی ۳۷۸

۲.۵.۷ روش مستقیم ۳۸۲

۳.۵.۷ روش تحلیل زیرسازه ۳۸۵

۴.۵.۷ تحلیل مودی با استفاده از تکنیک زیرسازه ۳۹۶

۵.۵.۷ تحلیل فنر- میراگر معادل ۳۹۹

۶.۵.۷ تحلیل تقریبی با استفاده از میرایی مودی معادل ۴۰۴

۶.۷ اندرکنش سازه شمع- خاک ۴۰۹

۱.۶.۷ تحلیل مستقیم ۴۱۱
۲.۶.۷ تکنیک زیرسازه ۴۱۱
۳.۶.۷ تحلیل فنر- میراگر معادل ۴۱۳
۷.۷ تحلیل لرزه‌ای سازه‌های مدفون ۴۱۷
۱.۷.۷ تحلیل کرنش مسطح ۴۱۸
۲.۷.۷ تحلیل در جهت طولی ۴۲۰

فصل هشتم: تحلیل قابلیت اطمینان لرزه‌ای سازه‌ها ۴۳۲

۱.۸ مقدمه ۴۳۳
۲.۸ عدم قطعیت‌ها ۴۳۴
۳.۸ فرمول‌بندی مساله قابلیت اعتماد ۴۳۵
۴.۸ روش‌های یافتن احتمال شکست ۴۳۷
۱.۴.۸ روش ممان دوم درجه اول ($FOSM$) ۴۳۷
۲.۴.۸ روش هاسوفر- لیند ($Hasofer-Lind$) ۴۳۹
۳.۴.۸ روش قابلیت اعتماد درجه دوم ۴۴۳
۴.۴.۸ روش قابلیت اعتماد مبتنی بر شبیه سازی ۴۴۳
۵.۸ تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای ۴۴۴
۱.۵.۸ تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها با توجه به عدم قطعیت ورودی زمین ۴۴۷
۲.۵.۸ تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌های با استفاده از پارامترهای خطرپذیری لرزه‌ای ساختگاه ۴۴۸
۳.۵.۸ تحلیل قابلیت اعتماد آستانه سازه‌ها برای حرکت تعینی زمین ۴۵۳
۴.۵.۸ تحلیل قابلیت اعتماد اولین گذر سازه‌ها برای حرکت تصادفی زمین ۴۵۷
۵.۵.۸ تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها با استفاده از یک ماتریس احتمال آسیب ۴۶۲
۶.۵.۸ تحلیل خطرپذیری احتمالاتی ساده شده سازه‌ها ۴۶۵

فصل نهم: کنترل لرزه‌ای سازه‌ها ۴۷۵

۱.۹ مقدمه ۴۷۶
۲.۹ جداسازی لرزه‌ای ۴۷۷
۱.۲.۹ تکیه‌گاه لاستیکی چند لایه (LRB) ۴۷۷
۲.۲.۹ سیستم تکیه‌گاه نیوزلند ۴۷۹

۳.۲.۹ جداساز اصطکاکی فنری ($R-FBI$) ۴۸۱
۴.۲.۹ سیستم جداساز اصطکاکی خالص ۴۸۲
۵.۲.۹ تکیه‌گاه لغزشی الاستیک ۴۸۲
۶.۲.۹ سیستم پاندولی اصطکاکی (FPS) ۴۸۴
۳.۹ جداسازی‌های تکیه‌گاهی و مشخصات آن‌ها ۴۸۵
۱.۳.۹ طرح هندسی ۴۸۹
۴.۹ تحلیل ساختمان‌های دارای جداساز ۴۹۱
۱.۴.۹ تحلیل ساختمان‌های دارای جداساز با پی‌های جدا شده ۴۹۲
۲.۴.۹ روش حل ۴۹۵
۳.۴.۹ تحلیل ساختمان دارای جداساز با دال پایه ۴۹۹
۵.۹ طراحی ساختمان‌های دارای جداساز پایه ۵۰۷
۱.۵.۹ طراحی مقدماتی (طراحی جداساز و اندازه‌بندی اولیه سازه جداسازی شده) ۵۰۸
۲.۵.۹ تحلیل پاسخ سازه دارای جداساز ۵۱۱
۳.۵.۹ تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی ۵۱۲
۶.۹ میراگر جرمی تنظیم شده ۵۱۷
۱.۶.۹ تحلیل مودی کوپله ۵۲۴
۲.۶.۹ تحلیل مستقیم ۵۲۵
۳.۶.۹ تحلیل فضای حالت ۵۲۵
۷.۹ میراگرهای ویسکوالاستیک ۵۲۹
۱.۷.۹ مدل سازی میراگرهای ویسکوالاستیک ۵۲۹
۲.۷.۹ سیستم $MDOF$ با میراگر ویسکوالاستیک ۵۳۳
۳.۷.۹ روش شبه نیروی تکراری ($P-F$) ۵۳۶
۴.۷.۹ روش انرژی کرنشی مودی ۵۳۷
۵.۷.۹ حل فضای حالت ۵۳۹
۶.۷.۹ روش تحلیل طیف پاسخ ۵۴۳
۸.۹ کنترل سازه‌ای فعال ۵۴۴
۱.۸.۹ پایداری ۵۴۷
۲.۸.۹ کنترل‌پذیری و مشاهده پذیری ۵۴۸
۳.۸.۹ شاهد حالت یا ناظر وضعیت ۵۵۰
۹.۹ الگوریتم‌های کنترل فعال ۵۵۴

۱.۹.۹ تکنیک جانمایی قطب ۵۵۴
۲.۹.۹ کنترل بهینه خطی کلاسیک ۵۵۹
۳.۹.۹ کنترل بهینه لحظه‌ای ۵۶۵
۴.۹.۹ محدودیت‌های عملی ۵۶۷
۱۰.۹ کنترل نیمه‌فعال ۵۶۹
۱.۱۰.۹ وسایل کنترل نیمه‌فعال ۵۶۹
۲.۱۰.۹ الگوریتم‌های کنترل ۵۷۱

لرزه‌شناسی

فصل ۱

۱.۱ مقدمه ۲
۱.۱.۱ زمین و قسمت‌های داخلی آن ۳
۲.۱.۱ زمین ساخت صفحه‌ای ۴
۳.۱.۱ علل زلزله ۷
۲.۱ امواج لرزه‌ای ۹
۳.۱ پارامترهای اندازه‌گیری زلزله ۱۴
۱.۳.۱ بزرگای محلی (M_L) ۱۷
۲.۳.۱ بزرگای موج حجمی (M_b) ۱۸
۳.۳.۱ بزرگای موج سطحی (M_s) ۱۸
۴.۳.۱ بزرگی ممان لرزه‌ای (M_w) ۱۹
۵.۳.۱ آزاد شدن انرژی ۲۱
۶.۳.۱ شدت زلزله ۲۲
۴.۱ اندازه‌گیری یک زلزله ۲۳
۵.۱ اصلاح زلزله‌ها به‌خاطر ماهیت خاک ۲۷
۶.۱ تحلیل خطر لرزه‌ای ۲۹
۱.۶.۱ تحلیل خطر لرزه‌ای تعینی (قطعی) ۲۹
۲.۶.۱ تحلیل خطر به‌روش احتمالاتی ۳۱
۳.۶.۱ خطرپذیری لرزه‌ای در یک ساختگاه ۳۹
۴.۶.۱ مفهوم ریزپهنه‌بندی براساس تحلیل خطر ۴۲

۱.۱ مقدمه

زلزله حرکت ناگهانی و گذاری سطح زمین است و مطالعات زمین‌شناسی حاکی از ان است که این پدیده صدها میلیون سال است که در زمین اتفاق می‌افتد و حتی قبل از حیات روی می‌داده است. به خاطر ماهیت تصادفی این پدیده، نبودن علت یا علت های مشخص و واضح و نیز قدرت تخریب اسفناک آن، تمدن‌های باستان براین باور بودند که زلزله پدیده‌ای ماوراء طبیعی است که ناشی از قهر خداست. در اواسط قرن هفدهم بر اساس مقیاس زمانی زمین‌شناسی، مشخص شد که زلزله پدیده‌ای طبیعی است که فرآیندهایی در دل سیاره‌ی زمین در وقوع آن دخالت دارند. بنابراین کارهای بعدی در این زمینه و بویژه در قرن ۱۹ منجر به پیشرفت‌های چشمگیری در ساخت ابزار دقیق اندازه‌گیری داده‌های زمین‌لرزه شد. از آن پس ، اطلاعات لرزه‌شناسی به‌دست‌آمده از زلزله‌های مختلف جمع‌آوری و تحلیل شد تا کار پهنه‌بندی و شناخت پدیده‌ی زلزله به سرانجام برسد. حتی در مواردی از این داده‌ها برای بررسی و تجزیه و تحلیل ساختار داخلی زمین نیز استفاده شد که به‌نوبه‌ی خود منجر به ارائه تئوری‌هایی برای توصیف علل زلزله گردید. مجموعه اطلاعات به‌دست آمده از داده های لرزه‌شناسی جمع‌آوری شده، به طراحی منطقی سازه‌ها جهت مقابله با زلزله کمک کرد و در عین حال سبب مشخص‌تر شدن ماهیت غیرقطعی زلزله‌های آینده نیز شد که این سازه‌ها می‌بایست برای مقابله با آن‌ها طراحی می‌شدند. بنابراین، مفاهیم احتمالاتی در مواجه با زلزله‌ها و طرح‌های مقاوم لرزه‌ای نیز ظهور کردند.

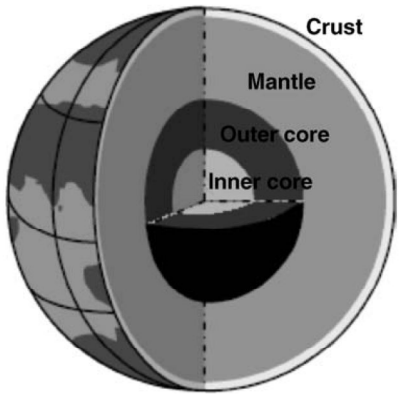
هم لرزه‌شناسان و هم مهندسان زلزله از داده‌های لرزه‌شناسی برای شناخت زلزله و اثرات آن استفاده می‌کنند اما هر گروه هدف خاص خود را از این کار دنبال می‌کنند. لرزه‌شناسان عمدتاً به موضوعات کلی زلزله‌ها و جنبه‌های زمین‌شناختی آن توجه نشان می‌دهند که پیش‌بینی زلزله نیز از جمله این موضوعات است. از طرف دیگر، مهندسان زلزله، بیشتر به اثرات موضعی زلزله‌ها توجه دارند که قادرند آسیب‌های قابل‌توجهی را به ساختمان‌ها وارد کنند. آن‌ها داده‌های لرزه‌شناسی را به شکلی در می‌آورند که برای پیش‌بینی خرابی وارد به سازه‌ها مناسب است و در نتیجه طراحی ایمن سازه‌ها را انجام می‌دهند. اما موضوعات متعددی در لرزه‌شناسی وجود دارند که تا حدی مورد توجه مهندسان قرار می‌گیرند و در این میان می‌توان به‌ویژه به شناخت هرچه بهتر داده‌های لرزه‌شناسی و کاربرد آن‌ها در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها اشاره نمود. در ادامه، این موضوعات به‌صورت خلاصه مورد بحث قرار می‌گیرند.

۱.۱.۱ زمین و قسمت‌های داخلی آن

در هنگام تشکیل زمین، گرمای زیادی در اثر گداخت اجرام تولید شد. با سرد شدن زمین، این اجرام متراکم و سنگین‌تر شدند به گونه‌ای که به سمت مرکز حرکت کردند و توده‌های سبک‌تر به سمت بالا آمدند. این امر سبب چند لایه شدن زمین شد. پژوهش‌های زمین‌شناسی انجام شده به کمک داده‌های لرزه‌شناسی نشان می‌دهند که زمین در اصل از چهار لایه مجزا تشکیل شده است که عبارتند از: هسته داخلی، هسته بیرونی، گوشته و پوسته که در شکل ۱.۱ نمایش داده‌شده‌اند. بیرونی‌ترین لایه‌ی زمین که پوسته نامیده می‌شود ضخامت متغیری دارد که از ۵ تا ۴۰ کیلومتر است. این ناپیوستگی میان پوسته و لایه‌ی بعدی (گوشته) ابتدا توسط موهورووپیچیک (Mohorovicic) کشف شد. موهورووپیچیک با مشاهده دقیق تغییرات در سرعت امواج لرزه‌ای عبوری از گوشته به پوسته به این کشف نایل آمد. ازاین‌رو، این ناپیوستگی، موهورووپیچیک و یا به‌اختصار، ناپیوستگی M نامیده شد. سرعت متوسط امواج لرزه‌ای (موج P) در پوسته از ۴ تا $8\,km/s$ متغیر است. پوسته اقیانوسی نسبتاً باریک (5–$15\,km$) است؛ در حالی‌که پوسته‌ی زیر کوه‌ها، نسبتاً ضخیم است. این پدیده اصل ایزوستازی (principle of isostasy) را نیز نشان می‌دهد که بر اساس آن پوسته روی گوشته شناور است. بر اساس این اصل، گوشته متشکل از یک لایه بالایی است که کاملاً صلب است (همانطورکه پوسته صلب است). این لایه بالایی همراه با پوسته به ضخامت تقریبی $120\,km$ لیتوسفر نامیده می‌شود. زیر این لایه منطقه‌ای وجود دارد که استنوسفر نامیده می‌شود و تا $200\,km$ ادامه دارد. این منطقه احتمالاً از جنس سنگ مذاب است و ماهیتی خمیری یا پلاستیک دارد. استنوسفر تنها بخشی کوچکی از کل ضخامت گوشته ($\sim 2900\,km$) را به خود اختصاص می‌دهد اما به خاطر ماهیت پلاستیک آن، لیتوسفر، روی آن شناور است. در زیر گوشته ($1000-2900\,km$) ، تغییرات سرعت موج لرزه‌ای بسیار کم‌تر است و این نشان می‌دهد که جرم آن تقریباً همگن است. لیتوسفر شناور همانند یک واحد یکپارچه حرکت نمی‌کند بلکه متشکل از گروهی از صفحات با اندازه‌های مختلف است. اندازه و جهت حرکت در صفحات ، متفاوت است و این تفاوت، اساس تئوری زمین ساخت صفحه‌ای است. در زیر گوشته، هسته میانی قرار دارد. ویچرت اولین کسی بود که وجود هسته میانی را کشف کرد [۱]. بعد از اوالدهام، آن را با شواهد زلزله‌شناسی تأیید کرد [۲]. سپس مشخص شد که تنها امواج P از هسته میانی می‌گذرند؛ در حالی‌که امواج P و S هر دو از گوشته عبور می‌کنند. هسته داخلی بسیار متراکم بوده و از فلزاتی نظیر نیکل و آهن (به ضخامت $1290\,km$) تشکیل شده است. در اطراف این هسته لایه‌ای با همین چگالی (به ضخامت حدود $2200\,km$) وجود دارد که به نظر می رسد مایع است زیرا امواج S از آن نمی‌گذرند. در این هسته، دما حدود $2500^{\circ}c$، فشار حدود ۴ میلیون اتمسفر و چگالی $14\,g/cm^{-3}$ است. در نزدیکی سطح، این مقادیر به ترتیب $25^{\circ}c$، ۱ اتمسفر و $1.5\,g/cm^{-3}$ هستند.

۲.۱.۱ زمین‌ساخت صفحه‌ای

مفهوم اصلی زمین ساخت صفحه‌ای تکامل‌یافته ایده مربوط به جابجایی قاره‌ها است. وجود پشته‌های اقیانوسی،کوه‌های داخل اقیانوس‌ها، جزایر، گسل‌های انتقالی یا ترادیسی (transform faults) و مناطق کوه‌زا شواهدی هستند که جابجایی قاره‌ها را تأیید می‌کنند. در پشته‌های وسط اقیانوس‌ها، دو توده بزرگ خشکی (قاره‌ها) در ابتدا به‌هم متصل بودند. سپس به علت فوران جریان گوشته‌ی داغ به سمت سطح زمین در پشته‌ها در اثر جریان همرفت گوشته، از هم جدا شدند (شکل ۲.۱). انرژی این جریان همرفت از رادیواکتیویته درون زمین نشأت می‌گیرد. با رسیدن مواد به سطح زمین و سرد شدن آن‌ها، یک پوسته‌ی اضافی روی لیتوسفر شکل می‌گیرد که روی استنوسفر شناور است. در واقع، پوسته‌ی جدید به سمت بیرون پخش می‌شود زیرا سنگ‌های مذاب به‌صورت مداوم به سمت بالا جریان می‌یابند.

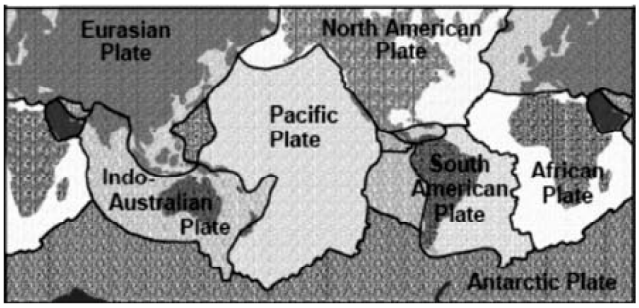


شکل ۱.۱ قسمت‌های درونی زمین (http://nicee.org/EQTips.php)

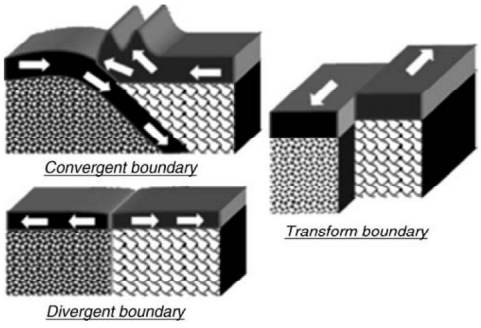
شکل ۲.۱ جریانات همرفت موضعی در گوشته

پوسته‌ی جدید بعد از سرد شدن به قعر اقیانوس می‌رود و جریان رو به بالای سنگ‌های مذاب ادامه می‌یابد. این پدیده سبب ظهور مفهوم گسترش کف دریاها (sea-floor spreading) شد (فرضیه مطرح شده توسط هنری هس در دهه ۱۹۶۰ که طبق آن پوسته اقیانوسی جدید در محل پشته‌های میان اقیانوسی یعنی محل واگرایی صفحات، ساخته می‌شود.)

این گسترش ادامه می‌یابد تا وقتی که لیتوسفر به یک ترانشه در عمق دریا می‌رسد و در آن‌جا به سمت پایین واستنوسفر فرو می‌رود (فرورانش). جابجایی‌های قاره‌ای الگوهای گردش مختلفی دارند. درنتیجه، به‌صورت یک واحد اتفاق نمی‌افتد؛ بلکه لغزش چند قسمت لیتوسفر است که صفحات زمین‌ساخت نامیده می‌شوند. هفت صفحه زمین‌ساخت اصلی به‌همراه چندین صفحه کوچک‌تر در شکل ۳.۱ نمایش داده‌شده‌اند. این صفحات در جهات مختلف و با سرعت متفاوت حرکت می‌کنند و در گسل انتقالی از همدیگر عبور می‌کنند و در مناطق کوه‌زا مجدداً در گوشته جذب می‌شوند. به‌طورکلی، سه نوع اندرکنش میان–صفحه‌ای در این موارد وجود دارد که سه مرز به‌وجود می‌آورند: واگرا، هم‌گرا و مرزهای انتقالی. مرزهای هم‌گرا در مناطق کوه زا وجود دارند و مرزهای واگرا در جایی واقع هستند که در آن بریدگی میان صفحات وجود دارد (شکل ۴.۱).



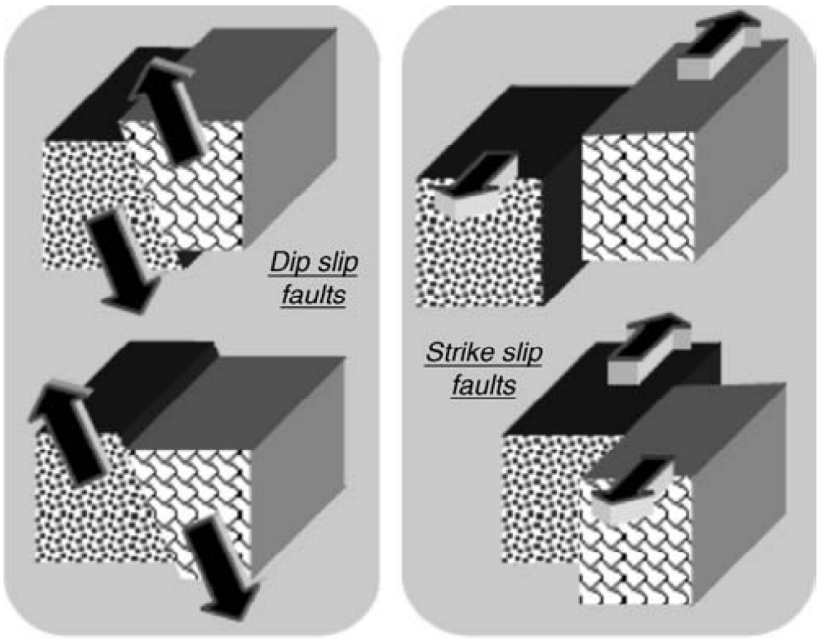
شکل ۳.۱ صفحات زمین‌ساخت اصلی



شکل ۴.۱ انواع مرزهای میان صفحه‌ای

گسل‌های واقع در مرز صفحات از جمله محتمل‌ترین نواحی برای رخداد زلزله هستند و زلزله‌های حاصل، زلزله‌های میان صفحه‌ای نامیده می‌شوند. تعدادی از زلزله‌ها نیز در صفحات دور از این گسل‌ها روی می‌دهند که به آن‌ها زلزله‌های فرا صفحه‌ای می‌گویند که در آن‌ها به علت لغزش دو طرفه سنگ بسترها، رهایی ناگهانی انرژی اتفاق می‌افتد. این لغزش ،گسل‌های جدیدی ایجاد می‌کند که گسل‌های زلزله نامیده می‌شوند. اما باید توجه داشت که گسل‌ها خود، علت زلزله هستند و نمی‌توان آنها را حاصل زلزله دانست.

دو نوع لغزش در این گسل‌ها (جدید یا قدیم) مشاهده می‌شود: راستالغز (به سمت ساعت‌گرد و پادساعتگرد) و (شیب لغز) معمولی و معکوس. لغزش معمولی و معکوس، در جهت قائم است درحالی‌که راستالغز در جهت افقی اتفاق می‌افتد، (شکل ۵.۱). در گسل‌های معمولی یا نرمال، سنگ بالایی به سمت پایین حرکت می‌کند و در گسل‌های معکوس عکس این حالت رخ می‌دهد (شکل ۵.۱).



شکل ۵.۱ انواع گسل

به‌همین‌ترتیب، گسل‌های حاصل از راستا لغزی را با توجه به جهت لغزش نسبی، گسل‌های راست‌گرد یا چپ‌گرد نیز می‌نامند. در گسل‌ها، ترکیب این چهار نوع لغزش روی می‌دهند؛ نمونه‌هایی از گسل‌های زلزله‌ای عبارت‌اند از:

الف- راستالغز به طول $۳۰۰km$ با لغزش $۶/۴m$ در گسل سن اندریاس.

ب- راستالغز راست‌گرد به طول ۶۰ km در *Imperial Valley* با بیشینه لغزش ۵m.
ج- گسل به‌طول ۸۰ km با لغزش عمودی ۶m و لغزش افقی بین ۲ تا ۴ متر در زلزله نوبی ژاپن.
د- گسل جانبی چپ‌گرد به طول ۲۰۰ km در زلزله کانسوی چین.

۳.۱.۱ علل زلزله

حرکت صفحات زمین‌ساخت نسبت به همدیگر منجر به تجمع کرنش در مرز و داخل صفحات می‌شود. این انرژی کرنشی، انرژی الاستیک است که به خاطر جابجایی سنگ‌ها ذخیره می‌شود (مثل مواد الاستیک). وقتی کرنش در امتداد یک منطقه ضعیف و یا در گسل موجود یا مرز صفحات به مقدار حدی خود رسید، حرکت ناگهانی یا لغزش روی می‌دهد و انرژی کرنشی جمع شده آزاد می‌شود. این کار سبب تولید امواج الاستیک در توده‌های سنگی می‌شود که از طریق یک محیط الاستیک انتشار می‌یابند و در نهایت به سطح زمین می‌رسند. اغلب زلزله ها در اثر لغزش در گسل‌ها و یا مرز صفحات روی می‌دهند اما موارد متعددی دیده‌شده است که در آن گسل‌های جدید به خاطر زلزله به‌وجود آمده‌اند و زلزله‌هایی که در امتداد مرز صفحات زمین‌ساخت روی می‌دهند (زلزله‌های میان صفحه‌ای)، معمولاً زلزله‌های بزرگ‌تری هستند. زلزله‌های فرا صفحه‌ای که در نقاط دور از این مرزها روی می‌دهند می‌توانند گسل‌های جدیدی پدیدآورند. این لغزش یا حرکات در گسل‌ها در راستای عمودی و افقی به شکل لغزش معمولی یا معکوس و یا راستالغز هستند . طول گسلی که لغزش در روی آن اتفاق می‌افتد، چند صد کیلومتر است. در زلزله‌های شدید، یک واکنش زنجیره‌ای در طول لغزش روی می‌دهد.نباید فراموش کرد که در هر لحظه منشأ زلزله همان یک نقطه است و این نقطه در امتداد گسل حرکت می‌کند.

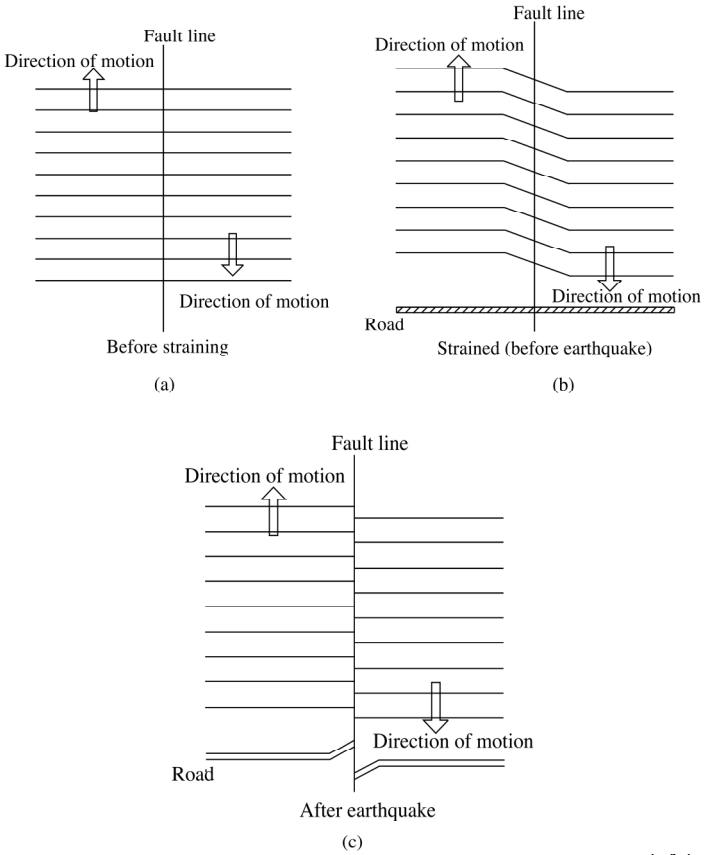
تئوری بازگشت ارتجاعی، وقوع زلزله در اثر لغزش در امتداد خط گسل‌ها را شرح می‌دهد. رید (Reid) اولین بار بر تئوری بازگشت ارتجاعی، متمرکز شد و گسیختگی در امتداد گسل سن‌اندریاس در زلزله سان‌فرانسیسکو را مطالعه کرد. جابجایی‌های برشی بزرگ در طول گسل، او را به این نتیجه رساند که آزاد شدن انرژی در زمان زلزله، حاصل گسیختگی برشی ناگهانی است. زلزله حاصل از یک گسل معمولاً مراحل زیرا را طی می‌کند:

الف) به علت فرآیندهای کند متعددی که در فعالیت‌های زمین‌ساخت داخل زمین و پوسته وجود دارد، کرنش مدت‌ها در گسل تجمع می‌کند و میدان کرنش بزرگی در یک زمان معین به مقدار حدی می‌رسد.
ب) لغزش در اثر خرد شدن سنگ‌ها درگسل اتفاق می‌افتد. این کرنش آزاد شده و لایه‌های خردشده‌ی سنگ‌ها به وضعیت بدون کرنش برمی‌گردند (شکل ۶.۱).

ج) این لغزش می‌تواند از هر نوعی باشد (راستالغز یا معمولی). در اغلب موارد یک لغزش مرکب داریم که نیروهای فشاری و کششی را در گسل پدید می‌آورد (شکل ۷.۱). این وضعیت معادل دو جفت نیروی کوپل است که ناگهان وارد می‌شوند.

د) این عمل سبب حرکت توده‌های نامنظم سنگ و انتشار سریع موج در تمام جهات می‌شود.

ه) موج در حال انتشار پیچیده است و علت جابجایی و شتاب در ذرات سنگ و خاک زمین است. ممان هر کوپل همان ممان لرزه‌ای است و به صورت سختی سنگ ضرب در سطح گسلش ضرب در میزان لغزش تعریف می‌شود. اخیراً از این مقدار به‌عنوان معیاری برای اندازه‌گیری زلزله استفاده‌شده است. سرعت لغزش متوسط در هر گسل فعال هرسال $۱۰-۱۰۰mm$ تغییر می‌کند.



شکل ۶.۱ تئوری بازگشت ارتجاعی