

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

زلزله‌شناسی مهندسی و شبیه‌سازی زمین‌لرزه

مؤلفان

حمید زعفرانی

هیأت علمی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

اسدالله نورزاد

هیأت علمی دانشکده عمران دانشکده فنی

توجه

این کتاب مشمول قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان است. تکثیر کتاب به هر روش اعم از فتوکپی، ریسوگرافی، تهیه فایل‌های pdf، لوح فشرده، بازنویسی در وبلاگ‌ها، سایت‌ها، مجله‌ها و کتاب، بدون اجازه کتبی ناشر مجاز نیست و موجب پیگرد قانونی می‌شود.



انتشارات دانشگاه تهران

شماره ۳۳۶۰

شماره مسلسل ۷۵۲۲

سرشناسه	زعفرانی، حمید، ۱۳۵۵ -
نویسنده و نام پدیدآور	زلزله‌شناسی مهندسی و شبیه‌سازی زمین لرزه / مؤلفان حمید زعفرانی، اسدالله نورزاد.
ملاحظات نشر	تهران : دانشگاه تهران، ۱۳۹۱.
ملاحظات ظاهری	ز، ۲۶۶ ص. : جدول.
موضوعات	دانشگاه تهران: ۳۳۶۰.
شابک	978-964-03-6392-8
وضعیت فهرست‌نویسی	ف.ب.ا.
یادداشت	واژه‌نامه.
یادداشت	ف.ب.ا.
موضوع	زلزله - مهندسی
موضوع	زلزله‌شناسی.
شناسه افزوده	تهران : انتشارات، ۱۳۹۱-۱۳۳۶
رده‌بندی کنگره	TA ۶۵۱/۶/۶
رده‌بندی دیویی	۵۵۱/۱۷۳
شماره کتابشناسی ملی	۱۳۹۱

ISBN::978-964-03-6392-8



9 789640 363928

عنوان: زلزله‌شناسی مهندسی و شبیه‌سازی زمین‌لرزه

تألیف: دکتر حمید زعفرانی - دکتر اسدالله نورزاد

ویراستار: فرشاد رضوان

نوبت چاپ: اول

تاریخ انتشار: ۱۳۹۳

شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

چاپ و صحافی: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

«مسئولیت صحت مطالب کتاب با مؤلفان است»

«کلیه حقوق برای ناشر محفوظ است»

بها : ۱۳۰۰۰۰ ریال

خیابان کارگر شمالی - خیابان شهید فرش می‌قدم - مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

پست الکترونیک: press@ut.ac.ir - تارنما: <http://press.ut.ac.ir>

بخش و فروش: تلفکس ۸۸۰۱۲۰۷۸

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول - مبانی زلزله‌شناسی مهندسی
۱-۱	۱-۱-۱ مقدمه
۲	۱-۱-۲ بزرگای زلزله
۵	۱-۱-۳ اشباع شدگی بزرگا
۶	۱-۱-۴-۱-۲ انرژی زمین لرزه‌های
۱۱	۱-۱-۴-۳-۱-۱ شدت زلزله
۱۲	۱-۲-۱-۲ متغیرهای مهندسی و حرکت قوی زلزله
۱۴	۱-۲-۱-۳-۱-۲ آشنایی با روابط کاهشی و بره‌های مهندسی زلزله
۱۵	۱-۲-۱-۴-۱-۲ تعریف فاصله
۱۷	۱-۲-۲-۲ رفتار رابطه کاهندگی
۱۸	۱-۲-۳-۲-۱ خطای درون رخدادی و بین رخدادی روابط کاهندگی
۲۳	۱-۳-۱-۳ منشأ زلزله‌ها
۲۳	۱-۳-۱-۴ نظریه زمین‌ساخت صفحه‌ای
۲۶	۱-۳-۲-۱-۲ گسل‌ها به‌عنوان عامل زلزله
۲۸	۱-۳-۳-۱-۳ مکانیک شکست و زلزله‌شناسی
۳۱	۱-۴-۱-۴ مفاهیم پایه مکانیک محیط‌های پیوسته
۳۱	۱-۴-۱-۵ تنش و بردار تنش
۳۳	۱-۴-۲-۲ معادله حرکت
۳۵	۱-۴-۳-۲-۱ قانون هوک و حالت اولیه
۳۷	۱-۵-۱-۵ انتشار امواج در محیط‌های جامد
۳۷	۱-۵-۱-۶ معادله تعادل یا حرکت در یک میله (انتشار موج در یک میله)
۳۹	۱-۵-۲-۲ معادله تعادل در محیط سه بعدی
۴۲	۱-۵-۳-۲-۱ امواج صفحه‌ای مسطح یا تخت
۴۸	۱-۵-۴-۲-۱ امواج برشی و فشاری
۵۰	۱-۵-۴-۳-۱ بازتاب امواج تخت از یک سطح آزاد
۵۲	۱-۵-۵-۲-۱ امواج سطحی
۵۳	۱-۵-۵-۳-۱ موج راپله
۵۶	۱-۶-۱ تغییرات انرژی پتانسیل کرنشی محیط ناشی از وقوع زلزله‌ها

۵۹	۷-۱- تعادل انرژی طی رشد ترک و نظریه گریفیث.....
۵۹	۷-۱-۱- مثال اول.....
۶۱	۷-۱-۲- مثال دوم.....
۶۲	۷-۱-۳- حالت عمومی تعادل انرژی و نظریه گریفیث.....
۶۴	۷-۱-۴- تکینگی تنش در نوک ترک.....
۶۴	۷-۱-۵- ترک پاد-صفحه (مود سوم).....
۶۹	۷-۱-۶- ترک داخل صفحه (مود دوم).....
۷۰	۷-۱-۷- ترک در نوک ترک در حال گسترش.....
۷۴	۷-۱-۸- سنجش انرژی در اثر وقوع زلزله.....
۸۹	فصل دوم- مبانی روش‌های شبیه‌سازی زلزله.....
۸۹	۲-۱- لزوم رویکردهای شبیه‌سازی.....
۹۶	۲-۲- فرضیه ریاضی مدل‌های حرکت زمین.....
۹۸	۲-۳- تعاریف و اصطلاحات مربوط به یک چشمه لرزه زا.....
۹۸	۲-۳-۱- سرعت گسیختگی.....
۹۸	۲-۳-۲- سرعت لغزش.....
۹۸	۲-۳-۳- زمان تداوم گسیختگی.....
۹۸	۲-۳-۴- زمان خیزش یا زمان تداوم لغزش.....
۹۸	۲-۳-۵- تابع سرعت لغزش بر حسب زمان.....
۹۹	۲-۴- قضیه معرف در زلزله‌شناسی.....
۹۹	۲-۴-۱- قضیه تقابل بتی- ماکسول.....
۱۰۱	۲-۴-۱-۱- شکل انتگرال زمانی قضیه بتی- ماکسول.....
۱۰۲	۲-۴-۲- تابع گرین.....
۱۰۲	۲-۴-۳- قضیه معرف.....
۱۰۹	۲-۴-۴-۱- چند حالت خاص.....
۱۱۱	۲-۴-۴-۲- حل صفحه گسل.....
۱۱۲	۲-۴-۴-۳- تابع گرین محیط همگن الاستیک و ایزوتروپ نامحدود.....
۱۱۳	۲-۴-۴-۴- تغییر مکان محیط بر اثر باری در جهت یک محور مختصات.....
۱۱۴	۲-۴-۴-۵- تغییر مکان محیط نامحدود بر اثر یک بار کلی.....
۱۱۴	۲-۴-۴-۶- تغییر مکان محیط همگن نامحدود بر اثر زوج کوپل‌های کلی.....
۱۱۶	۴-۴-۴-۲- تقریب حوزه دور.....
۱۱۹	۴-۴-۴-۵- تقریب فرانیهوفر.....

فصل سوم - روش های شبیه سازی حرکت های قوی زمین.....	۱۲۳
۱-۳-۱- روش های تعینی.....	۱۲۳
۱-۳-۱-۱- مدل هسکل.....	۱۲۶
۱-۳-۲- جهت پذیری.....	۱۲۹
۱-۳-۳- رابطه لنگر لرزه ای و تاریخچه زمانی حرکت مشاهده شده در یک ایستگاه.....	۱۳۲
۱-۳-۴- نصف چشمه.....	۱۳۳
۱-۳-۵- اثرات سه گانه مسیر، ساختگاه و چشمه.....	۱۳۶
۱-۳-۶- اثر مسافت ساختگاه.....	۱۳۸
۱-۳-۷- میرایی جسی و تفرقی.....	۱۳۸
۱-۳-۸- پخش جسی.....	۱۳۹
۱-۳-۹- مدل اثرات مسیر در روش های شبیه سازی.....	۱۴۰
۱-۳-۱۰- میرایی نزدیک سطح.....	۱۴۲
۱-۳-۱۱- اثرات ساختگاهی.....	۱۴۴
۱-۳-۱۲- اثر چشمه لرزه ای، $f(M_0)$	۱۴۷
۱-۳-۱۳- تنش.....	۱۵۳
۱-۳-۱۴- زمان خیزش.....	۱۵۵
۱-۳-۱۵- روش های تصادفی.....	۱۵۵
۱-۴-۱- مراحل تولید شتاب نگاشت در روش بور (۲۰۰۳، ۱۹۸۳).....	۱۵۸
۱-۴-۲- روش های ترکیبی.....	۱۶۲
۱-۴-۳- قانون های مقیاس.....	۱۶۲
۱-۴-۴- اساس روش جمع توابع گرین تجربی.....	۱۶۴
۱-۴-۵- دسته بندی گونه های مختلف روش تابع گرین تجربی.....	۱۶۵
۱-۴-۶- تعداد زیررویدها در صورت پذیرفتن مدل مجذور امگا.....	۱۶۷
۱-۴-۷- زمان رسید تصادفی و تاثیر آن روی سطح طیف.....	۱۶۹
۱-۴-۸- روش تابع گرین تجربی پیشنهادی ایریکورا (۱۹۸۳، ۱۹۹۷).....	۱۷۲
۱-۴-۹- روش تابع گرین تجربی پیشنهادی فرانکل (۱۹۹۵).....	۱۸۱
۱-۴-۱۰- روش های جمع تصادفی یک حادثه.....	۱۸۴
۱-۴-۱۱- روش های سینماتیک.....	۱۸۶
۱-۴-۱۲- روش های ترکیبی تصادفی.....	۱۸۷
۱-۴-۱۳- روش تصادفی گسل های محدود.....	۱۸۹
۱-۴-۱۴- متغیر ضریب شدت تشعشع.....	۱۹۱

- ۱۹۴..... ۳-۷-۳- مدل گسل محدود با فرکانس گوشه دینامیکی
- ۱۹۶..... ۳-۷-۳-۱- ضریب مقیاس مدل
- ۱۹۷..... ۳-۷-۳-۲- زیر گسل‌های فعال یا مولد ضربان
- ۱۹۹..... ۳-۷-۴- روش ترکیبی برای وارد کردن اثرات جهت‌پذیری
- ۲۰۳..... ۳-۷-۴-۱- گام‌های روش نیمه‌تجربی برای ترکیب پالس پریود بلند
- ۲۰۶..... ۳-۷-۵- روش حایل‌های ویژه
- ۲۰۷..... ۳-۷-۶- اثر چشمه: مدل حایل‌های ویژه
- ۲۰۹..... ۳-۷-۷- مطالعه زلزله‌های مهم ایران در قالب مدل حایل‌های ویژه
- ۲۱۲..... ۳-۷-۸- روش‌های ترکیبی نوین
- ۲۱۵..... ۳-۷-۹- روش‌های ترکیبی توصیف طیف لغزش
- ۲۱۷..... ۳-۷-۱۰- روش مبتنی بر هم‌رسیدها
- ۲۲۵..... فصل چهارم- مدل‌سازی انتشار امواج لرزه‌ای و کاربردهای آن در زلزله‌شناسی مهندسی
- ۲۲۵..... ۴-۱- مقدمه
- ۲۲۷..... ۴-۲- روش انتگرال مرزی طیف
- ۲۳۰..... ۴-۳- الگوریتم بازگشتی پیشنهادی زعفرانی و همکاران (۲۰۰۸)
- ۲۳۱..... ۴-۴- مثال عددی انتشار ترک مود سه
- ۲۳۵..... ۴-۵- معادلات انتگرال مرزی انتشار ترک بدون تنش
- ۲۲۷..... فهرست مراجع

یاد استاد

هر چند هنوز در بهت و حیرت از دست دادن ناگهانی استاد گرانقدر و معلم عزیزم جناب آقای دکتر اسدالله نورزاد به سر می‌برم؛ اما با توجه به اشتیاق آن عزیز سفر کرده برای به انجام رساندن این کتاب؛ بر خود لازم دیدم که در اینکار تعجیل کنم. داستان تالیف این کتاب به اواخر سال ۱۳۸۶ و اوایل سال ۱۳۸۷ باز می‌گردد؛ زمانی که تازه از دوره دکتری فارغ التحصیل شده بودم و آن مرحوم که نقش استادی پایان‌نامه را به عهده داشت با تشویق و تمهید مکرر خود مرا ترغیب کرد که کتابی در زمینه شبیه‌سازی زلزله بنویسم. ورود این شاخه از مهندسی زلزله (یا به عبارتی مهندسی) نیز مانند برخی دیگر از شاخه‌ها نظیر اندرکنش خاک و سازه، اجزای مرزی، مکانیک محفظه‌های متخلخل با همت و توان او میسر شد. او بود که برای اولین بار مرا که دانشجوی مهندسی زلزله و بیگانه با این مباحث بودم به این وادی کشاند. در دوران تحصیل از مقطع کارشناسی ارشد در همه کلاسهای او (چه در تئوری و چه در آزمایشگاه) حاضر می‌شدم و از کثرت معلوماتش انگشت تحیر به لب می‌بردم. چگونه یک شخص می‌تواند به همه این مباحث عمیق و گسترده تبحر داشته باشد؛ ریاضیات عالی دکتری (آنالیز تابعی)، مکانیک محفظه‌های متخلخل، اجزای مرزی، تئوری انتشار امواج، تئوری الاستودینامیک، روشهای عددی در مهندسی زلزله، اندرکنش خاک و سازه و... غرض از ذکر اینها در مقطع دکتری به آسانی تدریس می‌کرد. اما همه اینها در کنار اخلاق والای او و منش متواضعانه‌اش هیچ بود. این مقدمه کوتاه جای وصف او نیست؛ و باید در فرصتی مناسب و مکانی شایسته حق مطلب ادا کرد؛ این همان نگارنده تا وقت دگر. به هر حال با دلگرمی او شروع بکار کردم. سختی کار تالیف این کتاب آن بود که من کلاهی که می‌تواند مرجع ما قرار گیرد وجود نداشت و من مجبور بودم که مطالب پراکنده در قالب مقالات یا کتابهای دیگر هم قرار دهم و بعد از نوشتن با قلم خود، آن عزیز با حوصله‌ای درخور همه را مطالعه و نظرات اصلاحی خود را به من منعکس می‌کرد. این کار حدود چهار سال منقطع از من و او زمان برد که حاصل آن در شکل فیهام منعکس شده است. متأسفانه غلی‌رغم آنکه تمام تلاش خود را کردم که این اثر در زمان حیات استاد فرزانه به زیور طبع آید، اما تقدیر و تعجیل استاد در وصال محبوب این امکان را گرفت و حسرتی بر دل ماند. روحش شاد و یادش گرامی باد.

دیدم را روستایی از خاک درت حاصل بود
بر زبان بود مگر اینست و در دل بود
چه توان کرد که سعی در دل باطل بود

حمید زعفرانی، اردیبهشت ماه ۱۳۹۳، تهران

یاد باد آنکه سر کوی توام منزل بود
راست چون سوسن و گل از اثر صحبت پاک
در دلم بود که بی دوست نیاشم هرگز

حمید زعفرانی، اردیبهشت ماه ۱۳۹۳، تهران

مقدمه

ایران کشور زلزله‌خیزی است که به‌تقریب در تمامی نقاط آن، به استثنای مناطق کوچکی، احتمال وقوع زلزله وجود دارد. از طرف دیگر، بسیاری از شهرها و مناطق با جمعیت زیاد و همچنین صنایع و زیرساخت‌های ملی در مناطق با احتمال بالای وقوع زلزله قرار دارند. وجود بافت‌های فرسوده، فرهنگ سنتی ساختمان‌سازی، عدم توجه کافی و درست به مقوله طراحی در برابر زلزله یا شناخت میزان خطر زلزله و بسیاری از عوامل دیگر دست به دست هم داده‌اند تا کشور ایران منطقه‌ای با پتانسیل خطرپذیری بالای زلزله قلمداد شود. گواه این ادعا را می‌توان در میانمار، هائیتی، بحرین و سایر کشورهای آسیای میانه و خاور میانه دید. وقوع پیوسته در زلزله‌های گذشته جست‌وجو کرد. از منظر عمومی و مقایسه با کشورهای پیشرفته زلزله‌خیز، فرهنگ زندگی با زلزله در جامعه ما و در میان مردم، مسئولان و مدیران بسیار کنگ است. بسیاری از مردم اطلاعاتی در مورد اقدامات اولیه مقابله با این خطر طبیعی ندارند. حتی در سطح ساخت و ساز اموال عمومی نیز در بسیاری از موارد شاهد عدم پابندی به مقررات و برخورد سهل‌انگارانه با این خطر طبیعی هستیم. یکی از دلایل این امر را می‌توان به طولانی بودن دوره بازگشت زلزله‌های مخرب نسبت داد که به فراموشی حادثه پس از گذشت زمان طولانی می‌شود. طولانی بودن زمان بین تجربه زلزله‌های مخرب در سده‌های اخیر، آموزش‌اندک افکار عمومی جامعه شده است؛ بنابراین دولت باید به‌عنوان سیاستگذار اصلی با توجه به سند چشم‌انداز توسعه به این رسالت بپردازد و بستر لازم برای ساخت جامعه‌ای ایمن را فراهم کرده و به مردم از راه آموزش عمومی، اصول زندگی با زلزله را بیاموزد.

از منظر تخصصی نیز سطح دانش زلزله در کشور در حد قابل قبول و درخور سطح خطر موجود نیست. این واقعیت به‌ویژه در حیطه اطلاعات مربوط به لرزه‌شناسی لرزه‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک لرزه‌ای بسیار چشمگیر است. به‌عبارت دیگر، گرچه با اقبال رو به افزون جامعه مهندسی کشور به فراگیری و رعایت اصول مهندسی در طراحی مقاوم سازه‌ها در برابر زلزله، شاهد گسترش و پخش شاخه‌ای از مهندسی در کشور هستیم، اما در زمینه شناخت پدیده زلزله به‌عنوان عامل اصلی ایجاد خطر شناخت کافی نیستی‌های بسیاری هم در سطح مدیریتی و کارشناسی و هم در سطح دانشگاهی می‌باشیم. از منظر مدیریتی نیز، عدم وجود دانش عمومی و تخصصی مناسب در زمینه زلزله، نتیجه‌ای جز ضعف مدیریت پیشگیری، آمادگی و تابایی زلزله نداشته است. با توجه به آنکه دانش لرزه‌شناسی مهندسی از دانش‌های پیشرفته و نو در دنیا محسوب می‌شود که در حال تکامل سریع هم هست، در کشورهای توسعه یافته اهمیت ویژه‌ای به آن داده می‌شود. در کشور ما متأسفانه کار اصلی تهیه طیف طرح و تحلیل خطر به‌صورت یک روش رایج و تکراری بدون توجه به حدود اطمینان و دقت آن به‌وسیله متخصصان رشته‌های مختلف نظیر ژئوفیزیک، عمران، معدن و زمین‌شناسی انجام می‌شود. این در حالی است که هر یک از این افراد در آموزش دانشگاهی خود دارای نواقصی هستند که انجام این کار به‌وسیله آنها کم و بیش شبیه حرکت در تاریکی است. برای مثال دانش‌آموخته رشته عمران با گذراندن واحدی با عنوان تحلیل

خطر، به پیش‌بینی خطر لرزهای اقدام می‌کند. این در حالی است که مسئله زلزله به‌ویژه در حوزه نزدیک از چنان پیچیدگی برخوردار است که بدون آشنایی با سازوکارهای شکل‌گیری آن نظیر نحوه گسترش ترک یا گسل و انتشار امواج در محیط و تحلیل پاسخ ساختگاه نمی‌توان درک درستی از آن پیدا کرد.

از سوی دیگر دانش‌آموختگان ژئوفیزیک (که بیشتر کارشناس‌های زمین‌شناسی، فیزیک یا ریاضی هستند) با وجود آشنایی نسبی بیشتر، از مباحث لرزه‌شناسی در حوزه جنبش‌های قوی زمین که حیطه زلزله‌شناسی مهندسی است (و به آشنایی با روش‌های عددی، مکانیک شکست، نظریه انتشار امواج و ارتعاش‌های تصادفی نیاز است) اطلاع چندانی ندارند. علاوه بر این ضعف بزرگ‌گروید مذکور، عدم آشنایی با مباحث طراحی و نداشتن تصویر روشن از میزان نیروهای وارد به سازه و تاثیر آن در نوع طرح سازه‌ای است. این کتاب مدعی شروع راهی در جهت پرکردن خلأ موجود میان این دو گروه است.

با وجود ابهامات و رکودهای ثبت شده به‌وسیله شبکه‌های شتابنگاری کشور ایران، تعداد تاریخچه‌زمانی‌های^۱ قابل اطمینان و با کیفیت (از لحاظ میزان نوفه^۲ موجود در آن، شناخت دقیق بزرگای زلزله^۳، مسبب، فاصله کانونی، نوع ساختگاه و...) محدود است. زلزله^۴ چندان زیاد نیست. علاوه بر این تعداد تاریخچه‌زمانی‌های حوزه نزدیک و رکورد مناسب در برابر بزرگای (۶-۸) نیز سرانگ است. در نتیجه‌ای مانند زاگرس نیز تاریخچه‌زمانی حاصل از زلزله‌های (۵-۷) اندک است. این امر سبب می‌شود که توسعه روابط کاهندگی تجربی با دشواری روبه‌رو شود. برای غلبه بر این مشکل، استفاده از شبیه‌سازی زلزله و تولید شتابنگاشت‌های مصنوعی با استفاده از روش‌های فیزیکی^۵ از برترین راه‌هاست. مدل‌های فیزیکی در قیاس با روابط کاهندگی تجربی برآورد حداکثر شتاب زمین و یا طیف پاسخ، بر مبنای مقیاس شدن^۶ به تعداد کمتری رکورد ثبت شده، نیاز دارند. این روش‌ها، وسیله‌ای قوی برای برآورد حرکات^۷ مورد انتظار^۸ محتمل زلزله است که بهترین تصویر از خطر در یک ساختگاه خاص را ارائه می‌کند و هندسه گسل و نحوه قرار گرفتن نسبت به ساختگاه و سایر خصوصیات فیزیکی زلزله (نظیر توزیع لغزش، افت تنش^۹ و سرعت لغزش روی گسل) به نظر قرار دهد. این روش‌ها از دهه هشتاد میلادی وارد ادبیات فنی شده و برای تولید حرکات قوی زمین استفاده شده است. در این کتاب با رویکرد به این روش‌ها که متأسفانه تاکنون در کشور ما کمتر به آنها توجه شده است، سعی شده است تا حد امکان این مفاهیم در عرصه مهندسی زلزله کشور وارد شود.

1- Time-history

2- Noise

3- Earthquake magnitude

۴- روش‌های رایج برآورد خطر زلزله در یک ساختگاه به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود. روشی را که مبتنی بر توصیف فیزیک پدیده است روش فیزیکی می‌نامند. منظور از مبتنی بر فیزیک بودن یک روش، سازگار بودن مبنای آن با فیزیک و فرایند وقوع یک زلزله بر مبنای قانون‌های مکانیک است. در مقابل روش استخراج روابط کاهندگی از داده‌های لرزه‌ای به کمک رگرسیون آماری را روش تجربی می‌نامند.

5- Calibration

۶- در زلزله‌شناسی تفاوت تنش اولیه روی سطح گسل (قبل از شروع زلزله) و تنش نهایی بعد از زلزله را افت تنش استاتیکی می‌نامند.

$\Delta\tau_0 = \tau_0 - \tau_1$

که در اینجا τ_0 تنش اولیه و τ_1 تنش نهایی بعد از وقوع زلزله روی گسل است.

پیشگفتار

اللهم ارني الاشياء كما هي

خداوند، پدیده‌ها را همانگونه که هستند به من بنما! (حدیث شریف نبوی)

"مرا حکایت کردند که بدین شهر [تبریز] زلزله افتاد، شب پنج شنبه هفدهم ربیع الاول سنهٔ اربع و ثلاثین و اربعمائه (۴۳۴) ... پس از نماز خفتن. بعضی از شهر خراب شده بود و بعضی دیگر را آسیبی نرسیده بود. و گفتند که چهل هزار آدمی هلاک شده بودند."
سفرنامهٔ حکیم ناصر خسرو

لرزه‌شناسی مهندسی، علمی است که به شناخت خصوصیات فیزیکی زلزله و چگونگی و فرآیند ایجاد آن و تاثیر آن بر روی پیکر بنا و رزونانس تحت شده از حرکات قوی زمین می‌پردازد. منظور از حرکات قوی زمین، حرکاتی است که بر روی سازه‌های ساختمانی بشیر تاثیر محسوس داشته باشد. به عبارت دیگر، لرزه‌شناسی مهندسی ارتباط خصوصیات فیزیکی زلزله و مشخصات مهندسی نظیر طیف پاسخ یا تاریخچهٔ زمانی حرکت آن، بررسی می‌کند. از سوی دیگر این دانش تغذیه می‌دهد به مهندسی زلزله به عنوان ابزار تحلیل و طراحی سازه‌های مقاوم در برابر این حرکات می‌باشد. یعنی مهندسی زلزله با استفاده از طیف پاسخ یا تاریخچهٔ زمانی حرکت که به وسیلهٔ زلزله‌شناسی مهندسی^۱ تهیه شده است، به تعیین نیروهای وارد به سازه، نحوهٔ توزیع آن بین اعضای باربر و در نهایت طراحی سازه می‌پردازد.

با توجه به زلزله‌خیزی بالای کشور ایران و گسترش اغلب شهرهای بزرگ کشور نظیر تهران، مشهد و تبریز در محدودهٔ مرز کوه و دشت (به دلیل وجود منابع آب در این نواحی) که اغلب محل عبور گسل‌های زلزله است، می‌توان گفت که این شهرها در حوزهٔ نزدیک گسل واقع شده است. از دیگر سو، اطلاعات کافی از خصوصیات حرکات زلزله‌های گذشته در نزدیک این گسل‌ها در دست نیست. بنابراین روش‌های رایج تحلیل خطر احتمالاتی زلزله که متکی به آمار و رکوردهای زلزله‌های قبلی ثبت شده است، در این مورد چندان کارایی ندارد. برای مثال در شهر تهران پس از زلزلهٔ بزرگ سال ۱۱۷۸ شمسی دماوند- شمیرانات، $I_0 = IX, M = 7.5$ که خسارت‌های وسیعی به این منطقه وارد کرد^۲، هیچ زلزله‌ای روی گسل‌های اطراف شهر نظیر گسل مشا، گسل شمال تهران و گسل ری اتفاق نیفتاده است. طبیعی است که به دلیل نبود دستگاه ثبت در آن زمان، رکوردی از شتاب یا سرعت زمین در این زلزله‌های بزرگ نیز ثبت نشده است. بنابراین پرسش و چالش اساسی آن است که با توجه به قرارگیری شهر در فاصلهٔ اندک از گسل و در مناطقی حتی روی گسل و در شرایطی که رکورد ثبت

شده‌ای از زلزله‌های قبلی در شهر موجود نیست، چگونه می‌توان نوع، شدت و دامنه حرکت ناشی از زلزله آتی در این شهر را پیش‌بینی کرد؟ روش رایج در سطح جهان برای غلبه بر این مشکلات، استفاده از زلزله‌شناسی مهندسی و شناخت رفتار فیزیکی گسل‌ها و نحوه ایجاد حرکات زلزله و سپس تعمیم قانون فیزیکی استنتاج شده به پیش‌بینی حرکات آینده است. در زلزله‌شناسی مهندسی اغلب حرکات زلزله را به صورت ترکیبی از سه اثر چشمه لرزه‌زا (بیشتر همان گسل‌ها)، اثرات مسیر انتقال امواج درون پوسته زمین از چشمه تا ساختمان و در نهایت اثرات ساختمانی در نظر می‌گیرند.

این کتاب در حیطه زلزله‌شناسی مهندسی و با انگیزه پرکردن خلأ موجود بین دو شاخه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله تدوین شده است. متأسفانه کتاب کلاسیکی که بتوان به عنوان یک مرجع فایده‌انگاز آن در زمینه لرزه‌شناسی مهندسی یاد جست، حتی در سطح جهانی نیز وجود ندارد. بنابراین نگارندگان بر آن شدند که خود کتاب مناسبی برای دانش‌جویان و مهندسان کتاب تالیف کنند. در این مسیر کاری طاقت‌فرسا در جهت رجوع به مراجع دست اول و کتاب‌های کلاسیک زلزله‌شناسی و تلفیق آنها با مباحث زلزله‌شناسی مهندسی صورت گرفته است.

پس از آشنایی با مفاهیم اساسی زلزله‌شناسی در فصل اول این کتاب، مبانی نظری روش‌های شبیه‌سازی در فصل دوم ارائه شده و سپس در فصل سوم به بررسی روش‌های مختلف شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین پرداخته می‌شود. مباحث متنوعی در مورد اثرات مبدی ساختمان‌ها بر چشمه لرزه‌زا در این کتاب ارائه شده است. نمونه‌های متعددی از کاربرد روش‌های شبیه‌سازی در کشور و نتایج کارهای وسیله نگارندگان در قالب پروژه‌های تحقیقاتی یا حرفه‌ای انجام شده نیز، ارائه شده‌اند. فصل آخر کتاب به بررسی روش‌های پراکنده‌تر بررسی انتشار ترک در محیط اختصاص یافته است که کاربرد زیادی در مدلسازی دینامیکی انتشار امواج زلزله دارد. این فصل می‌تواند در قالب قسمتی از درس روش‌های عددی در مهندسی زلزله نیز ارائه شود. مطالب این فصل مقدمه‌ای بر جلد دوم این کتاب است که به مباحث روش‌های عددی در زلزله‌شناسی مهندسی اختصاص خواهد داشت.

می‌توان ادعا کرد که چنین مجموعه‌ای با توجه به نحوه نگارگری و ترتیب ارائه مطالب، سهولت دنبال کردن و تنوع، گستردگی و به‌روز بودن روش‌های ارائه شده، حتی در سطح جهانی نیز کمتر وجود دارد. این مطالب اغلب در مقالات مختلف به صورت فشرده و مختصر پراکنده است که در اینجا با یک کافی نقاط تاریک و ابهامات برای استفاده خوانندگان ارجمند ارائه شده‌اند. نمونه‌هایی از توضیحات راهگشای مطالب را می‌توان در مبحث انرژی زلزله یا مبحث هم‌رسیدها ملاحظه کرد. ذکر مطالب در پاورقی به معنای کم‌اهمیت بودن آن نیست؛ بلکه این کار برای حفظ انسجام متن اصلی صورت گرفته است. بنابراین لازم است خوانندگان در چندین مورد این مطالب نیز همانند متن اصلی دقت لازم را مبذول دارند. امید است که این خدمت ناچیز در راه بالایی و رشد علمی دانش‌پژوهان جوان کشور عزیزمان مفید واقع شود.

با توجه به تجربه نگارندگان در تدریس درس زلزله‌شناسی مهندسی در مقطع کارشناسی ارشد و دکتری دانشکده فنی دانشگاه تهران (دانشکده عمران) و هدایت و راهنمایی چندین پایان‌نامه ارشد و دکتری، برنامه تدریس پیشنهادی این درس به صورت زیر است: بخش‌هایی از لزوم رویکرد به روش‌های شبیه‌سازی، مباحثی در مورد مکانیک شکست و مفهوم انرژی در آن و رابطه آن با انرژی زلزله، آشنایی با اصطلاحات مربوط به چشمه لرزه‌زا، انواع گسل‌ها و تعاریف آن، روش‌های اندازه‌گیری بزرگا و شدت زلزله، آشنایی با روابط کاهندگی و خطاهای آن، مروری بر انتشار امواج کشسان در محیط، قضیه معرف در زلزله‌شناسی و کاربرد آن برای تبیین

مفهوم لنگر لرزه‌ای و مفاهیم حوزه نزدیک و دور، نظریه فیلترهای خطی به‌عنوان مبنای ریاضی روش‌های شبیه‌سازی، شبیه‌سازی تعینی و محدودیت‌های آن، روش‌های مختلف شبیه‌سازی زلزله نظیر روش تابع گرین تجربی، روش تصادفی بور، روش گسل‌های محدود و روش جمع تصادفی حوادث در زمان. در صورت لزوم با توجه به تعداد واحد درس (دو یا سه واحدی) و مقطع ارائه آن (ارشد یا دکتری) می‌توان تغییراتی در این سرفصل‌ها ایجاد کرد. در یک دوره کامل‌تر می‌توان مباحثی نظیر انرژی زلزله و نیز روش‌های مبتنی بر هم‌رسیدها را نیز به‌صورت کامل‌تر بیان کرد. برای گذراندن این درس آشنایی با پاره‌ای از مفاهیم ارتعاش‌های تصادفی و مکانیک محیط‌های پیوسته لازم است. بنابراین توصیه می‌شود که درس لرزه‌شناسی مهندسی بعد از گذراندن دو درس مذکور به دانشجویان کارشناسی ارشد یا دکتری ارائه شود. با وجود این پاره‌ای از مفاهیم ضروری و نرم در فشرده‌ترین شکل ممکن، در قالب پیوستی در انتهای کتاب آمده‌اند. در درس تحلیل خطر زلزله نیز می‌توان بعد از ذکر مقدمات آمار و احتمالات و تحلیل خطر احتمالی و تعینی، سه تا چهار جلسه را به تدریس مقدماتی روش شبیه‌سازی زمین‌لرزه اختصاص داد.

اکنون که کار تفهیم کتاب به سرانجام رسیده، لازم است که از زحمات کارکنان محترم انتشارات دانشگاه تهران سپاسگذاری شود. در کرتفهم کتاب از همکاری و در طی دوره‌ی تحقیقات از مساعدت دوستان و همکاران گرمی، آقایان دکتر خسرو برگی، دکتر محمد امین جوان قربانی‌تپه، دکتر مهدی موسوی، مهندس بهزاد حسنی و محمدرضا سقراط بهره برده‌ایم که در اینجا تشکر می‌کنیم. بسیاری از مطالب حاصل گفت‌وگوهای دو یا چندجانبه با دوست و همکار عزیزمان جناب آقای دکتر انوشیروان انصاری است که باید در اینجا به‌طور ویژه از ایشان قدردانی کرد. از همه دانشجویان عزیز دانش‌ساز و دانشکده عمران پردیس دانشکده‌های فنی که در پایان‌نامه‌های مرتبط با مولفان همکاری داشته‌اند تشکر می‌کنیم. لرزه‌شناسی مهندسی نکات سودمندی را یادآور شده‌اند، تشکر و قدردانی می‌کنیم. آقای بهزاد کریمیان کار تهری برخی از اذکال کتاب، سرکار خانم مژگان خسروی کار تنظیم متن و خانم فاطمه نادرمحمد نیز کار طراحی جلد را به بهترین وجه به‌عهده داشته‌اند. از زحمات ایشان نیز سپاسگذاری می‌شود. آقایان امیرناظمی و سیدعمران عظیمی بخشی از کار نگارش کتاب را انجام داده‌اند، که بدین وسیله از آنان تقدیر می‌شود. امید است که این کتاب بتواند در مقاطع کارشناسی ارشد دکتری رشته عمران گرایش مهندسی زلزله (برای مطالعه چگونگی خصوصیات حرکت زلزله به‌عنوان ورودی تحلیل لرزه‌های محلی) و گرایش زلزله‌شناسی مهندسی (به‌منظور آشنایی با کاربرد مفاهیم زلزله‌شناسی در مهندسی زلزله) مفید واقع شود. تا سال‌های خدایند متعال با گذشت چند سال، شاهد تربیت نسلی از متخصصان زنده در این حوزه بسیار حیاتی (که مورد نیاز کشور عزیزمان است) باشیم. بدیهی است که این نوشتار نیز همانند همه آثار بشری خالی از ایراد نیست و تذکر این امر به سبب اصلاح آن و موجب کمال امتنان خواهد بود.

زما هر ذره خاک افتاده جایی
که عالم را نمی‌بینم بقایی
کند در حق درویشان دعایی
اسدالله نورزاد - حمید زعفرانی

بماند سال‌ها این نظم و ترتیب
غرض نقشی است کز ما بازماند
مگر صاحب‌دلی روزی ز رحمت