

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مبانی زلزله‌شناسی مهندسی

و تحلیل خطر زلزله

(چاپ دوم)

نگارنده:

دکتر ناصر خاجی

استاد دانشگاه تربیت مدرس

1396



سرشناسه: خاجی، ناصر، 1350 -

عنوان و نام پدیدآور: مبانی زلزله‌شناسی مهندسی و تحلیل خطر زلزله/ نگارنده ناصر خاجی.

مشخصات نشر: تهران: دانشگاه تربیت مدرس، انتشارات، 1392.

مشخصات ظاهری: و، 314ص. مصور، جدول.

شابک: 978-600-5394-82-5

وضعیت فهرست نویسی: فیپا

یادداشت: واژه‌نامه.

یادداشت: کتابنامه. یادداشت: نمایه.

موضوع: زلزله - مهندسی موضوع: زلزله‌شناسی

موضوع: زلزله‌شناسی -- ایران

شناسه افزوده: دانشگاه تربیت مدرس، انتشارات

رده‌بندی کنگره: 1392 م 2/خ/6/TA654

رده‌بندی دیویی: 624/1762

شماره کتابشناسی ملی: 3301022

مبانی زلزله‌شناسی مهندسی و تحلیل خطر زلزله

نگارنده: دکتر ناصر خاجی

طراح جلد: دکتر سید نجم الدین امیر شاه کرمی

ویراستار ادبی و فنی: لیلا نجفی‌زمان

حروفچین: هادی حشمتی

شماره انتشار: 165/20

شماره پیاپی: 260

تاریخ انتشار: 1396

شمارگان: 1000

شابک: 978-600-5394-82-5 ISBN:978-600-5394-82-5

ناشر: انتشارات دانشگاه تربیت مدرس

نوبت چاپ: دوم

کارشناس اجرایی: لیلا نجفی‌زمان

ناظر چاپ: مصطفی جانجانی

لیتوگرافی: ایران گرافیک

چاپ و صحافی: قشقایی

مرکز پخش: تقاطع بزرگراه‌های آل‌احمد و دکتر چمران،

دانشگاه تربیت مدرس، مرکز نشر آثار علمی، صندوق پستی: ۳۱۸-۱۴۱۱۵

تلفن: ۸۲۸۸۳۰۹۶ دورنگار: ۸۲۸۸۳۰۳۲

بها: ۲۲۰۰۰۰ ریال

صحت مطالب کتاب بر عهده نگارنده است.

تقدیم به

همسر عزیزم و فرزند دلبندم،

به پاس حمایت و تشویق بی دریغ ایشان در تمام طول نگرش این

کتاب و در تمام مراحل زندگی ام.

پیشگفتار ناشر

حکایت خواندن و نوشتن، نشان از هویت دینی و ملی ایرانیان است که حضرت حق فرمان را بر خواندن نهاد و این گونه رسالت خاتم خود را آغاز کرد.

دانشگاه تربیت مدرس نیز همگام با رسالت خطیر خود، در راستای اجرای بند 7 آیین نامه پذیرش «کتاب های تألیف و ترجمه ای دانشگاه تربیت مدرس» و با هدف ارائه و نشر نتایج پژوهش های نخبگان جامعه علمی کشور در طی تدریس، تحقیق، راهنمایی و مشاوره پایان نامه های کارشناسی ارشد و رساله های دکتری دانش پژوهان و بهره مندی از آخرین پژوهش ها و یافته های محققان ایران و جهان به منظور تأمین منابع علمی دانشگاه های کشور، منطقه و جهان، با سفارش تألیف در این عرصه گام نهاده است.

در این راستا بیستمین کتاب سفارش تألیف، با عنوان «مبانی زلزله شناسی مهندسی و تحلیل خطر زلزله» تألیف جناب آقای دکتر ناصر خاجی دانشیار دانشگاه تربیت مدرس را پیش روی خوانندگان گرامی قرار داده است.

امید است نخبگان و صاحب نظران، ضمن یاری رساندن به دانشگاه، پیشنهادهای ارزنده خود را نیز به منظور اجرای موفق و مناسب این طرح، ارائه فرمایند.

با آرزوی توفیق الهی

دکتر یعقوب فتح الهی

معاون پژوهشی و فناوری دانشگاه

فهرست مطالب

ز	پیشگفتار چاپ دوم
ط	پیشگفتار چاپ اول
1	فصل اول: زلزله‌شناسی
1-1	1-1 مقدمه
2-1	2-1 زلزله و انواع آن
3-1	3-1 امواج لرزه‌ای
3-1-1	3-1-1 امواج حجمی
2-3-1	2-3-1 امواج سطحی
4-1	4-1 خطر و ریسک
5-1	5-1 لرزه‌خیزی
6-1	6-1 بزرگای زلزله
1-6-1	1-6-1 بزرگای محلی زلزله
2-6-1	2-6-1 بزرگای امواج سطحی
3-6-1	3-6-1 بزرگای امواج حجمی
4-6-1	4-6-1 بزرگای آژانس هواشناسی ژاپن
5-6-1	5-6-1 بزرگای گشتاوری
7-1	7-1 انرژی زلزله‌ها
8-1	8-1 مقیاس شدت زلزله

مبانی زلزله‌شناسی مهندسی و تحلیل خطر زلزله

19	فصل دوم: چشمه‌های لرزه‌زمین ساخت
19	1-2 مقدمه
20	2-2 روش تعینی در تحلیل خطر زلزله
20	3-2 گام‌های اصلی در تحلیل خطر زلزله به روش تعینی
23	4-2 چشمه‌های لرزه‌زمین ساخت کدامند؟
24	5-2 گسل و گسلش
28	6-2 شناسایی چشمه‌های لرزه‌ای
30	7-2 ساختارهای موضعی
31	8-2 استان‌های لرزه‌زمین ساخت
32	9-2 جمع‌بندی
35	فصل سوم: زلزله‌های بیشینه
35	1-3 مقدمه
36	2-3 انواع زلزله‌های بیشینه
36	3-3 مبانی فیزیکی زلزله‌های بیشینه
37	4-3 زلزله بیشینه گسل‌ها
38	1-4-3 طول گسیختگی گسل
39	2-4-3 مساحت گسیختگی گسل
39	3-4-3 جابه‌جایی گسیختگی گسل
40	4-4-3 روابط ولز و کاپراسمیت
41	5-4-3 نرخ لغزش گسل
41	6-4-3 جمع‌بندی
42	5-3 زلزله بیشینه ساختارهای موضعی
43	6-3 زلزله بیشینه استان‌های لرزه‌زمین ساخت
45	فصل چهارم: جنبش لرزه‌ای زمین
45	1-4 مقدمه
46	2-4 اندازه‌گیری جنبش لرزه‌ای زمین
51	3-4 چشمه زلزله

فهرست مطالب

54	4-4 الگوی انتشار امواج، نوع گسل و جهت پذیری
56	5-4 آثار مسیر عبور امواج
58	6-4 روش های برآورد جنبش لرزه ای زمین
59	7-4 روش های همبستگی
61	فصل پنجم: تحلیل خطر لرزه ای احتمالاتی
61	1-5 مقدمه
62	2-5 گام های اصلی در تحلیل خطر لرزه ای به روش احتمالاتی
65	3-5 چشمه های لرزه ای
67	4-5 پارامترهای لرزه خیزی
67	1-4-5 رابطه بازگشتی
69	2-4-5 دوره بازگشت
71	3-4-5 رابطه بازگشتی گوتنبرگ - ریشتر
72	4-4-5 رابطه گوتنبرگ - ریشتر کران دار (دو کرانه ای)
76	5-4-5 زلزله مشخصه
76	6-4-5 ملاحظات کلی
78	5-5 عدم قطعیت زمانی
78	1-5-5 مدل پواسون
80	6-5 منحنی های کاهندگی
83	7-5 محاسبات احتمالاتی تحلیل خطر
84	1-7-5 روش انجام تحلیل خطر احتمالاتی
89	2-7-5 مسئله حل شده اول
98	3-7-5 مسئله حل شده دوم
108	4-7-5 زلزله های طراحی
109	8-5 درخت منطقی
113	فصل ششم: شرایط محلی ساختگاه
113	1-6 مقدمه
114	2-6 ملاحظات کلی

مبانی زلزله‌شناسی مهندسی و تحلیل خطر زلزله

116.....	3-6 تبدیل فوریه
116.....	4-6 انتشار موج برشی
119.....	5-6 انعکاس و عبور موج در مرز یک لایه
120.....	6-6 توابع بزرگ‌نمایی
121.....	1-6-6 لایه خاک یکنواخت روی سنگ‌بستر صلب
134.....	2-6-6 لایه خاک یکنواخت روی سنگ‌بستر ارتجاعی
139.....	7-6 ملاحظات مهندسی در جنبش لرزه‌ای زمین
140.....	8-6 روان‌گرایی خاک
143.....	فصل هفتم: نظریه زمین‌ساخت صفحه‌ای
143.....	1-7 مقدمه
143.....	2-7 ساختار درونی کره‌ی زمین
144.....	1-2-7 پوسته
144.....	2-2-7 گوشته
145.....	3-2-7 هسته
145.....	3-7 نظریه‌ی زمین‌ساخت صفحه‌ای
146.....	1-3-7 انواع مرزهای بین صفحات
147.....	2-3-7 توزیع جغرافیایی زلزله‌های دنیا
149.....	4-7 نیروهای مؤثر در حرکت صفحات
150.....	5-7 زلزله‌های بین صفحه‌ای
151.....	6-7 زلزله‌های میان صفحه‌ای
152.....	7-7 عمق زلزله‌ها
152.....	8-7 مروری بر لرزه‌زمین‌ساخت ایران
154.....	9-7 مدل‌سازی عددی تغییر شکل‌های صفحات زمین‌ساختی زمین
156.....	10-7 یک مدل عددی پیشنهادی برای صفحه ایران
156.....	1-10-7 مدل‌های عددی موجود برای صفحه ایران
157.....	2-10-7 نقد و بررسی مدل‌های عددی موجود برای صفحه ایران
158.....	3-10-7 مدل عددی پیشنهادی
161.....	4-10-7 تحلیل مدل عددی پیشنهادی

فهرست مطالب

166.....	11-7 یک مدل عددی پیشنهادی برای صفحات زمین‌ساختی ژاپن مرکزی
166.....	1-11-7 ویژگی‌های کلی نواحی فرورانش
167.....	2-11-7 مدل‌های عددی موجود برای ژاپن مرکزی
168.....	3-11-7 روش لغزش معکوس
170.....	4-11-7 مدل عددی پیشنهادی
175.....	فصل هشتم: مسائل معکوس در زلزله‌شناسی
175.....	1-8 مقدمه
176.....	2-8 انواع مسائل معکوس
177.....	3-8 تعیین سازوکار کانونی زلزله
184.....	4-8 روش‌های حل مسائل معکوس
185.....	5-8 روش تفکیک مقادیر تکین
187.....	6-8 روش تفکیک مقادیر تکین برش‌خورده
190.....	7-8 بررسی شرایط مرزی مدل عددی پیشنهادی برای صفحه ایران
192.....	1-7-8 ماتریس عملگرهای تابع گرین
193.....	2-7-8 اصل جمع آثار قوا
196.....	3-7-8 نظریه منحنی L-شکل
198.....	4-7-8 ماتریس دقت
199.....	8-8 بررسی میدان لغزش مرز میان‌رویه صفحات زمین‌ساختی ژاپن مرکزی
201.....	1-8-8 ماتریس عملگرهای تابع گرین منطقه توکای
208.....	2-8-8 تحلیل معکوس منطقه توکای
209.....	3-8-8 ناحیه قفل‌شده زلزله توکای
210.....	4-8-8 الگوی لرزه‌خیزی منطقه توکای
213.....	فصل نهم: شبیه‌سازی جنبش لرزه‌ای زمین
213.....	1-9 مقدمه
213.....	2-9 روش‌های ترکیبی
214.....	3-9 مدلی پیشنهادی برای زلزله‌های شمال ایران
215.....	1-3-9 بانک داده‌ها

مبانی زلزله‌شناسی مهندسی و تحلیل خطر زلزله

215	2-3-9 مدل موانع ویژه
219	3-3-9 آثار شرایط محلی ساختگاه
223	4-3-9 آثار مسیر عبور امواج
223	5-3-9 نتایج مدل پیشنهادی برای زلزله‌های شمال ایران
223	4-9 مدل‌های نظری جنبش زمین
225	5-9 نمونه‌ای از مدل‌سازی سینماتیکی
229	فصل دهم: آثار توپوگرافی سطحی بر امواج زلزله
229	1-10 مقدمه
229	2-10 ملاحظات کلی
231	3-10 مروری بر روش معادلات مجزا
234	1-3-10 انتشار امواج درون‌صفحه‌ای
237	2-3-10 انتشار امواج خارج‌صفحه‌ای
239	4-10 ماتریس‌های مشخصه قطری
240	5-10 نتایج عددی
241	1-5-10 مسئله لمب
247	2-5-10 مسئله گاروین
251	3-5-10 دره نیم‌دایروی در نیم‌فضای دوبعدی
254	4-5-10 تپه نیم‌سینوسی در نیم‌فضای دوبعدی
257	پیوست (الف)
259	مراجع
269	واژه‌نامه فارسی به انگلیسی
277	واژه‌نامه انگلیسی به فارسی
283	نمایه

پیشگفتار چاپ دوم

پس از چاپ اول کتاب در سال 1392 و تدریس چندین باره آن طی سه سال اخیر، نگارنده کتاب بر آن شد که مطالب دیگری را بر کتاب بیافزاید تا برخی از جنبه‌های کاربردی‌تر آن دارای غنای بیش‌ازپیش گردد. در اثنای آماده‌سازی ویرایش جدید کتاب بود که چاپ اول کتاب با درخواست‌های فراوان خوانندگان ارجمند کمیاب گردید، بنابراین تجدید چاپ کتاب اجتناب‌ناپذیر شد. برای اجابت اقبال خوب خوانندگان گرانقدر، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس بر آن شد که چاپ دوم کتاب را به زیور طبع بیاراید. از این‌رو در چاپ دوم برخی اشتباهات تایپی، که در چاپ اول از نظر دور مانده بود، اصلاح شده است.

نگارنده کتاب بر خود لازم می‌داند که از مدیریت محترم و کارشناسان ارجمند انتشارات گرانسنگ دانشگاه تربیت مدرس، برای همکاری مناسب در تجدید چاپ کتاب حاضر، سپاسگزاری نماید.

پیشگفتار چاپ اول

کشور عزیز ما، ایران، در یکی از مناطق لرزه‌خیز جهان قرار گرفته است که در همه نقاط آن، احتمال وقوع زلزله‌های مخرب وجود دارد. به بیان دقیق‌تر، ایران روی کمربند بزرگ لرزه‌خیزی جهان (موسوم به آلیا) قرار دارد که یکی از دو کمربند بزرگ لرزه‌خیزی جهان است، و هر از گاهی زلزله‌های بزرگی در آن به وقوع می‌پیوندد. این زلزله‌های بزرگ و ویران‌کننده، مناطق مختلف کشور را با خسارات و تلفات سنگینی روبه‌رو کرده است. با توجه به این حقیقت، شناخت عمیق‌تر پدیده زلزله اهمیت انکارناپذیری دارد. به‌کمک تحلیل خطر زلزله¹ تلاش می‌شود که تصویر واقعی‌تری از پدیده زلزله ارائه گردد تا به‌عنوان یک بارگذاری مهم و تأثیرگذار در طراحی سازه‌ها و زیرساخت‌های عمرانی استفاده شود. تحلیل خطر زلزله از مجموعه متنوعی از شاخه‌های علوم مختلف همچون آمار و احتمالات، حساب دیفرانسیل و انتگرال، زلزله‌شناسی مهندسی²، نظریه انتشار امواج³، زمین‌شناسی مهندسی⁴، مستندات تاریخی، ژئوتکنیک، ژئوفیزیک، ژئودزی، ریاضیات کاربردی، و روش‌های عددی⁵ بهره می‌گیرد. شاید به‌جرات بتوان گفت تعداد کتاب‌های موجود در این زمینه، که با مروری بر شاخه‌های علوم مختلف مورد اشاره، به جزئیات نظریه‌های موجود پرداخته و به‌کمک روش‌شناسی تطبیقی و نقد روش‌های موجود، پیشنهادهای جدیدتری را ارائه نموده باشد، کم‌تر از تعداد انگشتان دو

-
1. Seismic hazard analysis
 2. Engineering seismology
 3. Wave propagation theory
 4. Engineering geology
 5. Numerical methods

مبانی زلزله‌شناسی مهندسی و تحلیل خطر زلزله

دست است. بنابراین هدف از نگارش کتاب حاضر، رسیدن به چنین درونمایی است. می‌توان پشتوانه‌ی نگارش چنین کتابی را علاقه‌ی فراوان نگارنده‌ی آن به مباحث زلزله‌شناسی مهندسی و مهندسی زلزله، تجربه‌ی پانزده ساله‌ی وی در این مباحث، و نیز توسعه‌ی نظری و عملی (به صورت برنامه‌های رایانه‌ای) این مباحث به وسیله ایشان، دانشجویان و همکاران وی دانست. برخی از نتایج پژوهش‌های مستمر مزبور در بخش مراجع انتهایی کتاب منعکس شده است. کتاب حاضر به منظور بهره‌برداری مهندسان و دانشجویان کارشناسی‌ارشد و دکترای رشته‌های مختلف علوم پایه و مهندسی، به‌ویژه رشته‌های مهندسی زلزله، زلزله‌شناسی مهندسی، مهندسی معدن و زمین‌شناسی مهندسی نگارش شده است. همچنین بخش‌های مقدماتی آن، شامل فصل‌های اول تا چهارم، برای دانشجویان سال آخر کارشناسی رشته‌های مزبور می‌تواند قابل استفاده باشد.

نگارنده بر خود لازم می‌داند که از تمامی همکاران گرانقدر خود در دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس، به‌ویژه همکاران گروه‌های مهندسی زلزله و مهندسی سازه، که طی سال‌های اخیر وی را مورد حمایت و تشویق قرار داده‌اند، سپاسگزاری نماید. همچنین، دانشجویان کارشناسی‌ارشد و دکترای نگارنده سهم قابل‌توجهی در انجام پژوهش‌هایی داشته‌اند که نتایج برخی از آن‌ها در بخش‌های مختلف این کتاب انعکاس یافته است، و بنابراین از زحمات مستمر یک دهه اخیر ایشان نیز قدردانی می‌شود. از میان ایشان، تلاش‌های آقای دکتر محمدایمان خداکرمی در آماده‌سازی متن اولیه کتاب و آقای مهندس محسن میرزاجانی ننه‌کران در تهیه تعدادی از شکل‌های کتاب، قابل تقدیر فراوان است. هم‌چنین نگارنده از تلاش‌های خالصانه مدیریت محترم و کارشناسان گرامی مرکز نشر آثار علمی دانشگاه تربیت مدرس سپاسگزاری می‌نماید.

در پایان، نگارنده اذعان می‌دارد که کلمات و جملات قادر به بیان مراتب سپاس خالصانه وی از خانواده وی نیستند که در تمام طول نگارش این کتاب و در تمام مراحل زندگی، وی را همواره مورد حمایت و تشویق بی‌دریغ قرار داده‌اند.