



روش‌های مدلسازی در مهندسی معدن و عمران

تأليف و تدوين:

دکتر شپور ارشدنژاد



Journal of Earth Engineering
نشریه بین‌المللی مهندسی زمین



با همکاری شرکت مهندسين مشاور فرا رهساز فن

سرشناسه:	ارشدنژاد، شبیر، ۱۳۵۷.
عنوان:	روش‌های مدل‌سازی در مهندسی معدن و عمران /
نام پدیدآور:	تألیف شبیر ارشدنژاد؛ تهیه و تدوین نشریه بین‌المللی مهندسی زمین JEE؛
مشخصات نشر:	با همکاری شرکت مهندسین مشاور فرا رهساز فن
مشخصات ظاهری:	ژرف؛ تهران، نشر ژرف، ۱۳۹۸
شابک:	وزیری؛ ۲۶۰ ص؛ مصور، جدول، نمودار.
وضعیت فهرست‌نویسی:	۹۷۸-۹۶۴-۸۹۲۵-۱۶-۶
یادداشت:	فیبیا
موضوع:	واژه‌نامه
موضوع:	مهندسی عمران - محاسبات
موضوع:	Civil Engineering - Mathematical Modeling
موضوع:	الگوهای ریاضی
موضوع:	مهندسی معدن - علوم زمین
موضوع:	Mining Engineering - Geometric Science
موضوع:	نشریه مهندسی زمین
موضوع:	Journal of Earth Engineering
موضوع:	TN۱۴۵
موضوع:	۶۲۲
موضوع:	۵۸۵۸۷۱۶

روش‌های مدل‌سازی در مهندسی معدن و عمران

تألیف: دکتر شبیر ارشدنژاد

استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد واحد محلات

با همکاری شرکت مهندسین مشاور فرا رهساز فن
تهیه و تدوین:

نشریه بین‌المللی مهندسی زمین JEE

انتشار اول؛ شهریور ۱۳۹۸ / تیراز؛ ۳۰۰ نسخه

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۸۹۲۵-۱۶-۶

قیمت: ۳۱۰۰۰ تومان

حروف‌نگاری و صفحه‌پردازی: خط‌ویراست

چاپ و صحافی: کیهان

تولید و انتشار، نشر ژرف. تلفن: ۰۳۲۸۴۰۶۶۴ - jarfpublish@gmail.com

تمامی حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به مولف می‌باشد.

عنوان	شماره صفحه
۲-۳-۱-۶- رفتار حداکثر دنبال شده	۳۴
۲-۳-۱-۷- رفتار متناوب	۳۵
۲-۳-۱-۸- رفتار متناوب میرا	۳۶
۲-۳-۲- دقت و خطا	۳۷
۲-۴- روش تحلیل ابعادی	۳۸
۲-۴-۱- تبدیل واحدهای اندازه‌گیری	۴۰
۲-۴-۲- همگنی بُعدی	۴۱
۲-۴-۳- همگنی بُعدی یک حاصل جمع	۴۱
۲-۴-۴- همگنی بُعدی یک حاصل ضرب	۴۲
۲-۴-۵- قضا با کینگهام	۴۳
۲-۴-۶- روش تحلیل ابعادی در بررسی پدیده شکافت سنگ	۴۶
فصل سوم: روش‌های تجربی و آماری	
۳-۱- آشنایی	۶۱
۳-۲- رگرسیون	۶۱
۳-۲-۱- رگرسیون با تغییر مسیر	۶۳
۳-۲-۲- رگرسیون چند متغیره	۶۷
۳-۲-۱-۲- رگرسیون دو متغیره	۶۷
۳-۲-۲-۲- رگرسیون سه متغیره	۶۹
۳-۲-۲-۳- رگرسیون چهار متغیره	۶۹
۳-۳- مدل تجربی برآورد فشار چال	۷۰
۳-۴- روش حل نیوتن - رافسون	۷۳
فصل چهارم: روش‌های عددی	
۴-۱- آشنایی	۷۹
۴-۲- انواع روش‌های عددی	۸۰
۴-۲-۱- حساب تغییرات	۸۲
۴-۲-۲- روش رابلی - ریتز	۸۳
۴-۲-۳- روش جابجایی	۸۸

عنوان	شماره صفحه
۴-۲-۴- روش گلرکین	۸۸
۳-۴- روش اجزای محدود	۹۲
۱-۳-۴- اصل کار مجازی	۹۳
۲-۳-۴- اصل پتانسیل کل کمینه	۹۳
۳-۳-۴- مراحل آنالیز اجزای محدود	۹۵
۴-۴- روش اجزای مرزی	۹۹
۵-۴- روش جزای مجزا	۱۰۰
۶-۴- روش تفاضل محدود	۱۰۱
۶-۴- نکاتی از اساسی عددی در مسائل ژئومکانیکی	۱۰۵
۱-۷-۴- مانیژم ناپایداری در تونل‌ها	۱۰۵
۲-۷-۴- ترسیب هندسی و انسان‌بندی مدل	۱۰۷
۳-۷-۴- مدل رفتار، معیشت و تالاج	۱۰۹
۴-۷-۴- استخراج نیروی داخلی و طراحی سازه	۱۱۰
۱-۴-۷-۴- تحلیل و طراحی روش‌های مسلح و شاتکریت	۱۱۱
۲-۴-۷-۴- تحلیل و طراحی میل مهار	۱۱۳
۳-۴-۷-۴- تحلیل و طراحی قاب فولادی	۱۱۸
۸-۴- مطالعات موردی با کمک مدل‌سازی عددی	۱۲۰
۱-۸-۴- مدل‌سازی عددی تونلی در خاک	۱۲۰
۱-۱-۸-۴- بررسی ژئوتکنیکی	۱۲۲
۲-۱-۸-۴- مشخصات هندسی و فنی تونل	۱۲۴
۳-۱-۸-۴- مدل‌سازی عددی تونل	۱۲۶
۴-۱-۸-۴- مدل‌سازی عددی گالری	۱۲۴
۵-۱-۸-۴- مدل‌سازی عددی ترانشه سنگی	۱۲۷

فصل پنجم: مدل‌سازی فیزیکی

۱-۵- آشنایی	۱۴۷
۲-۵- مدل‌سازی با مواد متشابه	۱۴۸
۳-۵- ضریب مقیاس در مدل‌سازی فیزیکی	۱۵۱
۴-۵- مدل‌های جنبشی	۱۵۷
۵-۵- رفتار مواد مدل‌سازی	۱۶۶

عنوان	شماره صفحه
۵-۶- مدل‌سازی فیزیکی مغار نیروگاه زیرزمینی	۱۶۸
۵-۷- مدل‌سازی فیزیکی کارگاه استخراج زغالسنگ	۱۷۲
۵-۸- مدل‌سازی فیزیکی یک سد قوسی	۱۷۳
۵-۹- ساخت مدل فیزیکی یک تونل	۱۷۸

فصل ششم: آشنایی با هندسه فرکتال

۶-۱- آشنایی	۱۸۱
۶-۲- بعد فرکتال و محاسبه آن	۱۸۱
۶-۳- کاربرد فرکتال در مهندسی معدن و عمران	۱۸۹

فصل هفتم: تحلیل برگشتی

۷-۱- آشنایی	۱۹۹
۷-۲- ترانشه زنده و مرده	۲۰۰
۷-۲-۱- عوامل موثر در نابودی ترانشه‌ها	۲۰۳
۷-۲-۲- وضعیت موجود منطقه	۲۰۴
۷-۲-۳- تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ	۲۰۶
۷-۲-۴- تحلیل برگشتی ترانشه	۲۰۷
۷-۲-۵- تحلیل پایداری ترانشه	۲۱۱
۷-۳- خاکریز مرتفع در فارس	۲۱۳
۷-۳-۱- تخمین پارامترهای ژئومکانیکی	۲۱۶
۷-۳-۲- تحلیل برگشتی	۲۱۸

فصل هشتم: مدل‌های سلسله مراتبی

۸-۱- آشنایی	۲۲۳
۸-۲- اصول فرایند تحلیل سلسله مراتبی	۲۲۴
۸-۳- مدل فرایند تحلیل سلسله مراتبی	۲۲۴
۸-۳-۱- مدل‌سازی	۲۲۴
۸-۳-۲- قضاوت ترجیحی	۲۲۵
۸-۳-۳- محاسبات وزن‌های نسبی	۲۲۶
۸-۳-۴- ادغام وزن‌های نسبی	۲۲۶

شماره صفحه	عنوان
۲۲۷	۴-۸- سازگاری در قضاوت‌ها
۲۲۸	۵-۸- الگوریتم تعیین بهترین جاده معدنی
۲۲۹	۱-۵-۸- انتخاب پارامترها در طراحی جاده معدنی
۲۳۰	۲-۵-۸- ساختار سلسله مراتب
۲۳۲	۱-۲-۵-۸- بررسی ماتریس عوامل فنی
۲۳۳	۲-۲-۵-۸- بررسی ماتریس عوامل اقتصادی
۲۳۴	۱-۸-۱-۳- بررسی ماتریس عوامل محیطی
۲۳۵	۵-۸- مقایسه معیارها
۲۳۶	۴-۵-۸- الگو تعیین بهترین جاده معدنی
۲۴۰	۵-۵-۸- روش کراس
۲۴۵	منابع

پیشگفتار

بررسی پدیده‌های فیزیکی از دیدگاه مهندسی نیازمند تشخیص دقیق ماهیت پدیده و همچنین شناسایی متغیرهای موثر بر آن است. برای کسب این شناخت نیاز به مطالعه دقیق آن پدیده و به‌کارگیری شاخه‌هایی از دانش مرتبط با آن است. هدف اصلی، یافتن چگونگی ارتباط بین این پارامترها و شیوه‌ای مناسب برای بیان الگوی توصیف‌کننده رفتار آن پدیده است. توصیف کمی پدیده مورد بررسی را می‌توان مدل نامید و فرایند رسیدن به مدل را مدلسازی^۱ نامید. کرد. معادلات ریاضی متعالی‌ترین انواع مدل‌ها هستند که می‌توان از طریق تعریف معادلات دیفرانسیل آن پدیده و اعمال شرایط مرزی به آن‌ها دست یافت. این‌گونه معادلات دارای پاسخ بسته و صریح هستند و تاکنون مبنای کاربردی بسیاری از اصول علوم مهندسی بوده‌اند. حتی برای کنترل و اعتبارسنجی نتایج حاصل از انواع دیگر مدل‌ها هستند. معادلات ریاضی می‌تواند به تجربه و با بررسی آماری پدیده مورد نظر با تعداد رخداد مطلوب و تحلیل‌های مرتبط، آن نیز به‌دست آورد. اصولاً به این نوع از مدل‌ها، مدل‌های تجربی می‌گویند و از آن‌ها به‌دست آورد محدودتری برخوردار بوده و ماهیتی تقریبی دارند. برای به‌دست آوردن معادله ریاضی یک مدل تجربی از رگرسیون استفاده می‌شود که انواع متعددی دارد. میزان همبستگی بین داده‌ها، حین کننده اعتبار معادله ریاضی یک رگرسیون است.

برخی از پدیده‌ها به قدری پیچیدگی دارند که یافتن پاسخ‌های صریح برای آنها فعلاً یا ناممکن است و یا بسیار دشوار به‌نظر می‌رسد و بنابراین استفاده از مدل‌های تقریبی معقول‌ترین شیوه حل مسئله در چنین شرایطی هستند. عذر من مثال می‌توان به تحلیل تنش در اطراف حفاریات زیرزمینی با اشکال تیز گوشه اشاره کرد. بنابر یک توصیه مهندسی هوشمندانه می‌توان گفت که در اختیار داشتن یک پاسخ تقریبی بهتر از داشتن یک پاسخ صریح است. با این استدلال کاربرد روش‌های عددی در شاخه‌های مختلف مهندسی از جمله مهندسی معدن و مهندسی عمران گسترش فراوانی یافته است. یکی از اولین و البته پرکاربردترین این شیوه‌ها، روش اجزای محدود است که امروزه در بسیاری از نرم افزارهای عددی طراحی تونل، سازه و ژئوتکنیک به‌کار می‌رود.

یکی دیگر از روش‌های خلاقانه در تحلیل ریاضی یک پدیده، روش تحلیل ابعادی^۱ است. با این روش می‌توان ساختار اصلی و استخوان‌بندی معادله ریاضی مدل و ارتباط نمایی آن‌ها با یکدیگر را به‌دست آورد و سپس با کمک داده‌های واقعی حاصل از اندازه‌گیری و تجربه

نسبت به محاسبه و تعیین ضرایب ثابت مدل ریاضی مورد نظر اقدام کرد. چنین مدل‌هایی را مدل‌های نیمه تجربی می‌نامند.

شیوه ریاضی دیگری که خروجی آن به عنوان مدل در علوم مهندسی کاربرد فراوانی دارد، استفاده از نمودارها، نمودارها و جدول‌ها است که معمولاً بر مبنای اندازه‌گیری‌های تجربی به دست می‌آیند. برای به دست آوردن نمودارها از روش هندسه ترسیمی استفاده می‌شود که امروزه تدریس آن در میان دروس مهندسی دیده نمی‌شود. این شیوه در قرن نوزدهم ابداع شد و تا زمانی که ماشین حساب‌های مهندسی ابداع نشده بودند (دهه هفتاد میلادی) کاربرد وسیعی داشت.

الگوریتم تحلیل سلسله مراتبی (AHP) روشی تجربی و نیمه تحلیلی است که به منظور ارائه الگویی برای تصمیم‌گیری به کار می‌رود و می‌توان با کمک آن یک پدیده کیفی را به صورت کمی بیان کرد. هندسه فرکتال شاخه‌ی نسبتاً جدید دیگری از ریاضیات است که در دهه هفتاد میلادی ابداع شده و در تحلیل پدیده‌های نامنظم و تصادفی جایگاه و کاربرد ویژه‌ای یافته است. از هندسه فرکتال در مکانیک سنگ و توصیف ویژگی‌های هندسی و مقاومت اصلی خاک پیرسنگی‌ها استفاده موفق‌ی شده است.

در برخی موارد یافتن پاسخی با مقدار یکتا هدف از مدل‌سازی بوده و داشتن یک معادله ریاضی به عنوان یک پاسخ عمومی در اولویت بعدی قرار دارد. به این معنی که هدف، یافتن پاسخ رفتار یک سیستم پیچیده مانند رفتار دو تکیه‌گاه جانبی یک سد قوسی بزرگ تحت حالت‌های مختلف بارگذاری به هندسه و زمین‌شناسی ویژه ساختگاه سد است. برای این منظور چند روش مدل‌سازی ابداع شده که برخی از آنها دارای وسعت کاربرد فراوانی هستند. مدل‌سازی فیزیکی، یکی از این شیوه‌هاست که با ساخت نمونه‌ای کوچک شده و یا بزرگ شده از واقعیت (با مقیاسی معین) و اعمال شرایط مرزی و تحریک مدل (بارگذاری سیستم)، پاسخ آن را به صورت کیفی - بررسی مکانیزم - است و نوع و موقعیت تغییرشکل‌ها و کمی - اندازه‌گیری مقادیر تغییرشکل و تنش در نقاط مورد نظر از مدل، ثبت و بررسی می‌کنند. پس از اعمال ضریب مقیاس، نتایج به دست آمده از مدل به واقعیت تعمیم داده می‌شود. این‌گونه مدل‌سازی عموماً دشوار و پرهزینه است و امروزه تنها در موارد بسیار از آن استفاده می‌شود. روش فتوالاستیسیته نوعی دیگر از مدل‌سازی تجربی است که بسیار هوشمندانه ابداع شده است تا با کمک آن، پدیده توزیع و تمرکز تنش در هندسه‌های پیچیده مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. اما مدل‌سازی‌های کامپیوتری بر اساس روش‌های عددی^۱ (مانند روش اجزای محدود) پس از جنگ جهانی دوم ابداع شده و امروزه همگام با پیشرفت کامپیوتر روند رو به رشد سریعی دارند. می‌توان گفت که مدل‌سازی به روش عددی در رشته‌های مهندسی معدن، عمران و مکانیک بیشترین کاربرد را داشته و عملاً به یکی از اجزای علمی و مهارتی مورد نیاز یک مهندس تبدیل شده است. محقق در تمام مدت انجام

فرایند مدلسازی همواره باید توجه کند که خروجی کار، حتماً مدلی کاربردی و قابل اعتماد برای کاربران - که خود متخصصان آن رشته مهندسی هستند - باشد. تامین داده‌های ورودی مدل، پردازش و تحلیل آن‌ها و ارائه مدل نهایی برای توصیف یک پدیده مهندسی، امری دشوار و قابل احترام است. اما باید توجه داشت که کل این فرایند یک روی سکه است. بررسی رفتار مدل و ارزیابی و مقایسه آن با واقعیت، یافتن دامنه کاربرد مدل و محدودیت‌های آن و همچنین مشخص کردن دقت مدل، وجه دیگر فرایند مدلسازی است که حاصل کار را با ارزش و قابل دفاع نموده و طراحی سازه مورد نظر را بر پایه مدل ساخته شده میسر می‌کند. لرد کلونین (۱۸۲۴-۱۹۰۷) سخنی در خور تفکر درباره کاربرد ریاضی در علوم گفت: است

«اگر بتوان چیزی را که از آن صحبت می‌کنید، اندازه بگیرید و آن را به صورت اعداد بیان کنید، نگاه شما بر آن موضوع چیزهایی می‌داند.»

روشن است که بهره‌بردن و معرفی دقیق و کامل هر کدام از انواع مختلف روش‌های مدلسازی می‌تواند موضوع کتاب مستقلی باشد. اما در این کتاب سعی شده است تا با توجه به نیاز مهندسان معدن و به‌ویژه در زمینه‌های کاری و حتی تحقیقاتی، هر یک از انواع روش‌های یاد شده مدلسازی، معرفی شده و همواره جزئیات مورد لزوم برای کسب نتیجه قابل قبول ارائه شود. همچنین سعی شده تا با تشریح واقع‌گرایانه نسبت به اجرا و ساخت سازه در عمل، مثال‌های کافی برای هر یک از انواع روش‌های ذکر شده ارائه شود.

محتوای این کتاب شامل معرفی روش‌های هوناگون مدلسازی و ذکر تئوری‌های مورد استفاده در این خصوص، نظیر اصول و تعاریف اولیه مدلسازی، انواع سیستم‌ها، تئوری صف، تحلیل ابعادی، انواع مدل‌های ریاضی، آماری، رگرسیونی، مدلسازی فیزیکی، مدلسازی عددی، اصول تحلیل برگشتی در ژئوتکنیک، هندسه فرکتال و تحلیل فرایند سلسله مراتبی می‌باشد.

ش. ارشدنژاد

تیرماه ۱۳۸۱

s_arshadnejad@yahoo.com