روش‌های پیشرفته
تحلیل و طراحی خمیری (پلاستیک) سازه‌ها

نگارنده

دکتر حمید محرمی

۱۴۰۴

سرشناسه : محرمی، حمید، ۱۳۳۵ -

عنوان و نام پدیدآور: روش‌های پیشرفته تحلیل و طراحی خمیری (پلاستیک) سازه‌ها / نگارنده حمید محرمی؛ ویراستار ادبی و فنی فاطمه کلانتری.

مشخصات نشر: تهران: دانشگاه تربیت مدرس، مرکز نشر آثار علمی، ۱۴۰۴.

مشخصات ظاهری: ز، ۳۱۹ ص.: جدول، نمودار.

فروست: دانشگاه تربیت مدرس، مرکز نشر آثار علمی؛ ۳۱۷.

شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۳۹۶-۰۴۰-۶

وضعیت فهرست نویسی: فیپا

یادداشت: واژه‌نامه.

یادداشت: کتابنامه: ص. ۳۱۱-۳۱۴.

یادداشت: نمایه.

موضوع: تحلیل خمیری ،Plastic analysis (Engineering)؛ طراحی سازه Structural design؛ تحلیل سازه Structural analysis (Engineering) ؛ ساختمان‌سازی Building ؛ قاب‌های ساختمانی Structural frames

شناسه افزوده: دانشگاه تربیت مدرس. مرکز نشر آثار علمی

شناسه افزوده: Tarbiat Modares University. TMU Press

رده بندی کنگره: ۶۵۲TA

رده بندی دیویی: ۱۷۷۳/۶۲۴

شماره کتابشناسی ملی: ۹۷۸۶۸۲۹

اطلاعات رکورد کتابشناسی: فیپا

روش‌های پیشرفته تحلیل و طراحی خمیری (پلاستیک) سازه‌ها

نگارنده: دکتر حمید محرمی

ویراستار ادبی و فنی: فاطمه کلانتری

طراح جلد: ترنج

صفحه‌آرایی: سمیه زهانی

شماره انتشار: ۳۱۷

شماره پیاپی: ۵۱۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴

شابک چاپی: ۹۷۸-۶۲۲-۳۹۶-۰۴۰-۶

شابک الکترونیکی: ۹۷۸-۶۲۲-۳۹۶-۰۴۱-۳

ناشر: مرکز نشر آثار علمی دانشگاه تربیت مدرس

نوبت چاپ: اول

کارشناس اجرایی: مرسده برنجی

ناظر چاپ: مصطفی جانجانی

لیتوگرافی: قشقایی

چاپ و صحافی: قشقایی

مرکز پخش: تقاطع بزرگراه‌های جلال آل‌احمد و دکتر چمران، مرکز نشر آثار علمی دانشگاه تربیت مدرس، صندوق پستی: ۳۱۸-۱۴۱۱۵

تلفن: ۸۲۸۸۳۰۹۶

دورنگار: ۸۲۸۸۳۰۳۲

نشانی اینترنتی فروش: pub.modares.ac.ir

مسئولیت صحت مطالب کتاب برعهدهٔ نگارنده است.

تمام حقوق این اثر برای مرکز نشر آثار علمی دانشگاه تربیت مدرس محفوظ است و تکثیر کتاب به هر روشی بدون اجازه کتبی ناشر پیگرد قانونی دارد.

تقدیم به:

همسرم که برای نگارش این کتاب صبوری نمود

و

دانش پژوهان،

که برای کشف ناشناخته‌ها، شجاعت در نوردیدن راه‌های نو را دارند.

فهرست مطالب

پیشگفتار ۵

۱- مفاهیم رفتار خمیری **۱**

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ فرضیه‌های رفتاری مواد سازه‌ای ۱

۱-۳ مبانی طراحی ارتجاعی و غیرارتجاعی ٤

۱-۳-۱ ظرفیت ارتجاعی خرپا ۵

۱-۳-۲ ظرفیت غیرارتجاعی خرپا ٦

۱-٤ مفصل خمیری ۱۳

۱-۵ ضریب شکل ۱۸

۱-٦ طول مفصل خمیری- مفصل متمرکز ۲۰

۱-۷ روش تحلیل صلب خمیری ۲۳

تمرین‌های فصل ۱ ..... ۳۱

۲- نظریه‌های اساسی تحلیل صلب- خمیری قاب‌ها **۳۳**

۲-۱ مقدمه ۳۳

۲-۲ مفاهیم پایه در تحلیل صلب- خمیری ۳٤

۲-۳ قضایای اصلی تحلیل صلب- خمیری ۳٦

۲-۳-۱ قضیه استاتیکی یا کرانه پایین ۳۷

۲-۳-۲ قضیه کینماتیکی یا کرانه بالا ٤٤

۲-۳-۳ قضیهٔ یکتایی ۵۱

تمرین‌های سری اول ۵۲

۲-٤ روش‌های تعیین بار خرابی سازه‌ها ۵۲
۲-٤ الف - روش‌های مبتنی بر قضیهٔ کرانهٔ پایین ۵۳
۲-٤ ب- روش‌های مبتنی بر قضیهٔ کرانه بالا ۵۳
۲-٤ ج- روش‌های مبتنی بر قضیهٔ یکتایی ۵٤
۲-۵ روش‌های مبتنی بر قضیهٔ کرانهٔ پایین ۵٤
۲-۵-۱ روش آزادسازی لنگر ۵٤
۲-۵-۲ روش توزیع لنگر ۵۹
تمرین‌های سری دوم ٦۸
۲-۵-۳ روش برنامه‌ریزی خطی کرانه پایین ٦۹
تمرین‌های سری سوم ۸۲
۲-٦ روش‌های مبتنی بر قضیه کرانه بالا ۸۲
۲-٦-۱ روش فهرست مکانیزم‌ها ۸۲
۲-٦-۲ روش ترکیب مکانیزم‌ها ۹۰
۲-٦-۳ نکته‌هایی درباره مکانیزم‌ها ۹۷
تمرین‌های سری چهارم ۱۰٤
۲-٦-٤ روش برنامه‌ریزی خطی - کرانه بالا ۱۰٤
تمرین‌های سری پنجم ۱۱۵
۲-۷ روش‌های تحلیل خمیری برپایه قضیه یکتایی ۱۱٦
۲-۷-۱ روش نامساوی‌ها ۱۱٦
۲-۷-۲ روش کرانه بالا و پایین ۱۲۱
۲-۷-۳ کاربرد روش کرانه بالا و پایین برای بار گسترده ۱۲۵
۲-۷-٤ روش برنامه‌ریزی خطی ۱۲۹
تمرین‌های سری ششم ۱۳٤

۳- تحلیل عمومی صلب خمیری سازه‌ها ۱۳۷
۳-۱ مفهوم صلب خمیری ۱۳۷
۳-۲ تحلیل صلب خمیری خرپاها ۱۳۸
۳-۲- الف- قوانین ساختاری ۱۳۸
۳-۲- ب- شرایط تحلیل ۱۴۲
۳-۳ تحلیل خمیری ۱۴۸
۳-۴ حل مسائل به روش کرانه پایین ۱۴۹
۳-۵ تأملی در فرمول‌بندی کرانه پایین ۱۵۳
۳-۶ حل مسائل به روش کرانه بالا ۱۵۵
تمرین‌های سری اول ۱۵۸
۳-۷ تعمیم فرمول‌بندی تحلیل صلب- خمیری خرپاها به قاب‌های خمشی ۱۵۹
۳-۸ فرمول‌بندی تحلیل سازه‌های خمشی به روش کرانه پایین ۱۶۴
۳-۹ فرمول‌بندی تحلیل سازه‌های خمشی به روش کرانه بالا ۱۶۷
تمرین‌های سری دوم ۱۷۲
۴- تحلیل صلب خمیری سازه‌ها با چند مؤلفه تنش ۱۷۵
۴-۱ مقدمه ۱۷۵
۴-۲ اندرکنش نیروی محوری و لنگرخمشی ۱۷۶
۴-۳ مفاصل نیمه‌خمیری با چند مؤلفه تنش ۱۸۳
۴-۴ اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی در مقاطع نامتقارن ۱۸۵
۴-۵ اندرکنش نیروی برشی و لنگرخمشی ۱۸۷
تمرین‌های سری اول ۱۹۳
۴-۶ قانون جریان خمیری ۱۹۳
۴-۷ نظریه دراکر ۱۹۷
۴-۸ قانون جریان وابسته ۲۰۰
۴-۹ خطی‌سازی سطوح تسلیم ۲۰۴
۴-۱۰ روابط ساختاری سطوح تسلیم خطی‌شده ۲۱۱

٤-١١ تحلیل خمیری قاب‌ها (خمش + نیروی محوری) با برنامه‌ریزی خطی ٢١٥
تمرین‌های سری دوم ٢٣٣
٥- طراحی خمیری ٢٣٥
٥-١ مقدمه ٢٣٥
٥-٢ فرایند طراحی خمیری ٢٣٧
٥-٣ روش‌های طراحی خمیری ٢٣٧
٥-٤ روش آزمون و خطای J.F. Baker ٢٣٨
٥-٥ روش ترکیب مکانیزم‌ها ٢٤٢
٥-٦ طراحی بهینه ٢٤٦
٥-٧ قاعدهٔ مکانیزم سازگار با وزن ٢٥٢
تمرین‌های سری اول ٢٦٠
٥-٨ طراحی بهینه به کمک برنامه‌ریزی خطی ٢٦١
٥-٩ طراحی خمیری به روش استاتیکی با برنامه‌ریزی خطی ٢٦٥
٥-١٠ طراحی خمیری به روش کینماتیکی با برنامه‌ریزی خطی ٢٦٩
٥-١١ صورت مسئله برنامه‌ریزی خطی برای طراحی ٢٧١
٥-١٢ تعمیم برنامه‌ریزی خطی به سازه‌های خمشی ٢٧٥
٥-١٣ رابطه ظرفیت خمشی و وزن ٢٧٥
٥-١٤ طراحی قاب‌های خمشی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی ٢٧٦
٥-١٥ طراحی قاب‌های خمشی با برنامه‌ریزی خطی (روش استاتیکی) ٢٧٦
٥-١٦ طراحی قاب‌های خمشی با برنامه‌ریزی خطی (روش کینماتیکی) ٢٨٨
تمرین‌های سری دوم ٢٩٣
٥-١٧ طراحی قاب‌های خمشی با اندرکنش نیروی محوری ٢٩٥
تمرین‌های سری سوم ٣٠٩
منابع ٣١١
واژه‌نامه ٣١٥
نمایه ٣١٧

پیشگفتار

آنچه در مورد تحلیل سازه به دانشجویان مهندسی دوره کارشناسی تدریس می‌شود، بیشتر مربوط به تحلیل رفتار سازه در بخش برگشت‌پذیر رابطه تنش- کرنش مواد سازه است و تحلیل ارتجاعی یا کشسان نامیده می‌شود. درواقع فرض می‌شود تحت بارگذاری‌های معمول، سازه‌ها وارد مرحله غیرارتجاعی نمی‌شوند و با برداشتن بار، سازه به وضعیت اول خود بر می‌گردد. گرچه این فرض اغلب صحیح است، اما از آنجا که رفتار اغلب مواد سازه‌ای شامل رفتار غیرارتجاعی نیز می‌شود، آشنایی با رفتار غیرارتجاعی مواد سازه‌ای و یادگیری تحلیل غیرارتجاعی سازه‌ها برای برآورد مقاومت نهایی سازه‌ها امری ضروری است و مکمل دانش مهندسان سازه در مورد رفتار سازه‌ها محسوب می‌شود. تحلیل غیرارتجاعی در تعریف کلی، تحلیل جامعی است که هم بخش ارتجاعی مواد را پوشش می‌دهد و هم به بخش غیرارتجاعی می‌پردازد. آموزش تحلیل غیرارتجاعی، یک آموزش دوره کارشناسی ارشد یا دکتری به حساب می‌آید.

هریک از روش‌های تحلیل سازه متکی بر فرضیه‌هایی است که آن را از دیگری متمایز می‌کند. ازاین‌رو تحلیل با روش‌های مختلف، به نتایج متفاوت منتهی می‌شود و آشنایی با روش‌های مختلف تحلیل سازه کمک می‌کند که رفتار سازه در وضعیت‌های مختلف تنش و کرنش بیشتر درک شود. روش ارتجاعی- خمیری کامل (کشسان- مومسان) ازجمله روش‌های تحلیل غیرارتجاعی است که بخش غیرارتجاعی آن به تحلیل سازه در وضعیت خمیری کامل مواد در سازه می‌پردازد. در تحلیل ارتجاعی خمیری کامل فرض می‌شود که رفتار تنش- کرنش دوخطی است. شیب خط اول نمایشگر مقیاس کشسانی (مدول الاستیسیته) است و خط دوم شیب ندارد. وقتی در سازه مقیاس کشسانی مواد در وضعیت ارتجاعی به مقادیر بزرگ میل کند، رفتار سازه به سمت رفتار صلب متمایل می‌شود. چنانچه مقیاس کشسانی به بی‌نهایت نزدیک شود، گفته می‌شود جسم صلب است. رفتار

صلب خمیری به نوعی از رفتار مصالح گفته می‌شود که مقیاس کشسانی بخش ارتجاعی آن بی‌نهایت بزرگ است.

در این کتاب به رفتار سازه با مواد صلب خمیری توجه شده است و روش‌های تحلیل غیرارتجاعی با مواد صلب خمیری مورد بحث قرار می‌گیرد. این کتاب حاصل سال‌ها تدریس درس تحلیل غیرارتجاعی سازه‌ها در دانشگاه تربیت مدرس است و بخشی از مطالب آن که مربوط به مفاهیم تحلیل حدی و قضایای مربوط به آن است، از کتاب‌های مختلف مانند کتاب جیراسک[1] و بازانت[2] (۲۰۲۲) و نیز از یادداشت‌های کلاسی پروفسور گریرسون[3] (۱۹۹۰) در دانشگاه واترلو کانادا اقتباس شده است. بخش دیگر که مربوط به بسط، توسعه، ترکیب و کاربردی‌کردن مفاهیم است، در طول سالیان متمادی تدریس توسط نگارنده تدوین شده است. یکی از انگیزه‌های چاپ این کتاب تقاضای مکرر دانشجویان درس برای داشتن مطالب کلاس به‌صورت مجتمع در یک کتاب است تا ایشان را از مراجعه به کتاب‌های مرجع مختلف که با ادبیات علمی متفاوتی نگارش شده‌اند و مطالب آنها از نظر نحوه بیان همگون نیستند، بی‌نیاز کند. اما انگیزه اصلی نگارش این کتاب از منظر نویسنده ارائه مرجعی برای مهندسی جدید است که همه مفاهیم را در قالب‌های روزآمد و قابل کار با الگوریتم‌ها و ابزارهای محاسباتی پیشرفته امروز می‌خواهد. به‌طور خلاصه این کتاب به خواننده نشان می‌دهد که چگونه همان مفاهیم اساسی که در گذشته برای تحلیل سازه‌های کوچک (به‌صورت دستی) به کار می‌رفت را می‌توان با استفاده از الگوریتم‌ها و ابزارهای محاسباتی پیشرفته امروز برای تحلیل سازه‌های بزرگ و پیچیده به کار برد. رمز این کار ارائه فرمول‌بندی واحد برای همه انواع اجزای سازه‌ای و آموزش نحوه بسط، توسعه، ترکیب مفاهیم و نیز نشان‌دادن نحوه کاربردی‌کردن آن مفاهیم با فرمول‌بندی جدید است. در کمال تواضع به جرأت می‌توان گفت که بخش توسعه‌ای و ترکیبی مفاهیم مندرج در این کتاب نادر و منحصربه‌فرد است. مثال‌های کاربردی که در کتاب آمده است، بستر رایانه‌ای‌کردن تحلیل‌های حدی را از راه ترکیب مفاهیم اساسی گذشته با ابزارهای پیشرفته محاسباتی جدید فراهم می‌کند.

مطالب کتاب در پنج فصل تنظیم شده است. فصل اول به تشریح رفتار مصالح شکل‌پذیر، مفهوم خمیری‌شدن و چگونگی تشکیل آن در سازه‌های خمشی، عواقب خمیری‌شدن بخشی از سازه و

---

1. Milan Jirasek
2. Zdeněk Pavel Bažant
3. Donald E. Grierson

تفاوت تحلیل خمیری و ارتجاعی سازه‌ها می‌پردازد. فصل دوم به بیان اصول تحلیل خمیری و روش‌هایی که در گذشته برای تحلیل سازه‌های خمشی مطرح بوده‌اند، اختصاص دارد. روش‌هایی که در این فصل ارائه می‌شوند، مربوط به روش‌های تحلیل دستی هستند و از آن جهت که به فهم اصول تحلیل خمیری و قضایای سه‌گانه تحلیل خمیری کمک می‌کنند، اهمیت ویژه دارند. در فصل سوم فرمول‌بندی کلی تحلیل خمیری سازه‌ها با هدف ایجاد قابلیت تحلیل سازه‌های بزرگ مقیاس ارائه می‌شود. در این فصل نخست فرمول‌بندی تحلیل خمیری خرپاها با تکیه بر قضایای ارائه‌شده در فصل دوم استخراج می‌شود و سپس همان فرمول‌بندی به سازه‌های خمشی تعمیم داده می‌شود. در فصل چهارم نحوهٔ خمیری‌شدن عناصر سازه‌ای تحت ترکیب تنش‌ها بحث می‌شود و فرمول‌بندی ارائه‌شده در فصل سوم به تحلیل خمیری سازه‌هایی که اعضای آنها تحت تنش‌های مرکب هستند، تعمیم داده می‌شود. فصل پنجم به طراحی سازه‌ها اختصاص دارد. در این فصل فرمول‌بندی طراحی بهینه سازه‌ها تحت بارهای ضریب‌دار اعم از سازه‌های خرپایی، سازه‌های خمشی و سازه‌های تحت تنش ترکیبی ارائه می‌شود.

مطالب هر بخش از کتاب با تمرین‌هایی پایان پیدا می‌کند. سعی شده است تا تمرین‌ها پیام‌های متفاوت یادگیری داشته باشند. ازاین‌رو برخی از آنها بسیار ساده و برخی قدری پیچیده هستند. برای فراگیری تمام مفاهیم تحلیل خمیری، حل تمام تمرین‌ها به خواننده توصیه می‌شود. در همین حال، نویسنده مطالب ارائه‌شده را به‌دور از کاستی نمی‌داند و از خوانندگان گرامی و همکاران فرهیخته دانشگاهی که نواقص کتاب را گوشزد می‌کنند، پیشاپیش سپاسگزاری می‌کند.

در پایان لازم است از زحمت زیادی که سرکار خانم مرسده برنجی برای ویرایش کتاب کشیدند و خواندن آن را برای مخاطبان آسان کردند، تشکر ویژه نمایم. همچنین از خانم لیلی ملکزاده که ویرایش شکل‌های اتوکد را انجام دادند و به پیکربندی شکل‌ها کمک کردند، صمیمانه تشکر می‌نمایم.

۱۴۰۴

دانشگاه تربیت مدرس

حمید محرمی