

مقاومت مصالح پیشرفته

(ویرایش دوم)

پدیدآورنده

محمد مهدی سعادت پور

استاد دانشکده مهندسی عمران

دانشگاه صنعتی اصفهان



دانشگاه صنعتی اصفهان
مرکز نشر

گروه فنی و مهندسی ۲۶

شماره کتاب ۴۰

مقاومت مصالح پیشرفته (ویرایش دوم)

پدیدآورنده	محمد مهدی سعادت پور
صفحه آر	مرضیه خردمند
طراح جلد	مرضیه خردمند
لینوگرافی چاپ و صحافی	چاپخانه دانشگاه صنعتی اصفهان
ناشر	مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان
چاپ اول	پاییز ۱۳۹۶
شمارگان	۵۰۰ جلد
شابک	۹۷۸-۶۰۰-۸۲۵۷-۱۸-۹
قیمت	۲۲۰۰۰۰ ریال

سرشناسه	سعادت پور، محمد مهدی، ۱۳۱۰ -
عنوان و نام پدیدآور	مقاومت مصالح پیشرفته / تألیف محمد مهدی سعادت پور.
وضعیت ویراست	ویراست ۲.
مشخصات نشر	اصفهان : دانشگاه صنعتی اصفهان، مرکز نشر، ۱۳۹۶.
مشخصات ظاهری	شانزده، ۶۰۱ ص. : جدول، نمودار.
فروست	دانشگاه صنعتی اصفهان، مرکز نشر؛ گروه فنی و مهندسی؛ ۲۶.
شابک	978-600-8257-18-9 :
وضعیت فهرست نویسی	فیا
یادداشت	ص.ع. به انگلیسی: M. M. Saad-rou. Advanced strength of materials
یادداشت	ویراست قبلی: دانشگاه صنعتی اصفهان، مرکز نشر، ۱۳۱۰.
موضوع	مقاومت مصالح
موضوع	Strength of materials :
شناسه افزوده	دانشگاه صنعتی اصفهان. مرکز نشر
رده بندی کنگره	۱۳۹۶ م ۷ص/ ۴۰۵ TA
رده بندی دیویی	۶۲۰/۱۱۲ :
شماره کتابشناسی ملی	۴۹۱۸۸۷۸ :

حق چاپ برای مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان محفوظ است.

اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان - مرکز نشر - کدپستی ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶، تلفن: ۰۳۱-۳۳۹۱۲۵۰۹-۱۰، دورنگار: ۳۳۹۱۲۵۵۲ (۰۳۱)
برای خرید اینترنتی کلیه کتاب‌های منتشره مرکز نشر می‌توانید به وبگاه <http://publication.iut.ac.ir> مراجعه و یا مستقیماً
از کتابفروشی مرکز نشر واقع در کتابخانه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان (تلفن ۳۳۹۱۳۹۵۲) خریداری فرمائید.

فہرست مطالب

۱- تیرها

۱-۱ تیرهای مستقیم املع یکنواخت

۱-۱-۱ لیات

۲-۱-۱ معادلات تیرهای مستقیم

۳-۱-۱ انرژی کرنشی تیرهای مستقیم

۲-۱ خمش دوبعدی

۳-۱ خمش مقاطع نامتقارن

۱-۳-۱ مقدمه

۲-۳-۱ تنش تیرهای مستقیم نامتقارن

۴-۱ جریان برش در مقاطع نامتقارن نازک غیربسته

۵-۱ تغییر مکان تیرهای مستقیم نامتقارن

۶-۱ مرکز برش

۱-۶-۱ معرفی مرکز برش

۲-۶-۱ تعیین مرکز برش مقاطع ساده

۳-۶-۱ تعیین مرکز برش در حالت کلی

۷-۱ تیرهای خمیده

۱-۷-۱ مقدمه

۲-۷-۱ رفتار تیرهای خمیده

۳-۷-۱ تنش محیطی (عمودی) در تیرهای خمیده

۴-۷-۱ تنش شعاعی در تیرهای خمیده

۵-۷-۱ انرژی کرنشی تیرهای خمیده

مسائل

۷۳	۲: تیر بر بستر ارتجاعی
۷۳	۱-۲ مقدمه
۷۴	۲-۲ فرمول بندی تیر نامحدود بر بستر ارتجاعی
۷۶	۱-۲-۲ تیر نامحدود تحت نیروی متمرکز در مرکز
۹۰	۲-۲-۲ تیر نامحدود تحت لنگر خمشی متمرکز در مرکز
۹۱	۳-۲ تیر نیمه محدود بر بستر ارتجاعی
۹۷	۴-۲ تیر با طول محدود بر بستر ارتجاعی
۹۷	۱-۴-۱ توضیح مسأله
۹۸	۲-۴-۲ روش جمع اثرات برای حل تیر محدود
۱۰۳	۳-۴-۲ حالت تیر با طول محدود بر بستر ارتجاعی به کمک توابع کرایلو
۱۰۶	۵-۲ تیر منحنی بر پایه گاه منفرد ارتجاعی
۱۱۰	۶-۲ انرژی کرنشی بستر تیر بر بستر ارتجاعی
۱۱۲	مسائل
۱۱۵	۳: آنالیز پلاستیک سازه های تیر و قاب دوبعدی
۱۱۵	۱-۳ مقدمه
۱۱۸	۲-۳ پدیده تسلیم اعضاء خمشی
۱۱۸	۱-۲-۳ لنگر تسلیم و لنگر پلاستیک
۱۲۲	۲-۲-۳ لنگر پلاستیک تیر نامتقارن عرضی
۱۲۵	۳-۲-۳ اثر بار محوری در کاهش لنگر پلاستیک
۱۲۸	۳-۳ آنالیز پلاستیک تیرها
۱۲۸	۱-۳-۳ لولای پلاستیک
۱۳۱	۲-۳-۳ مقاومت نهایی تیرها
۱۳۸	۴-۳ اصل کار مجازی برای تعیین بار نهایی
۱۴۵	۵-۳ قضایای حدی
۱۴۶	۶-۳ آنالیز پلاستیک قاب های دوبعدی
۱۵۱	۷-۳ جابه جایی پلاستیک سازه های خمشی
۱۵۱	۱-۷-۳ شعاع انحناء
۱۵۵	۲-۷-۳ تغییر مکان پلاستیک تیرها
۱۶۱	مسائل

۴: ناپایداری تعادل، کمانش ۱۶۵

۱-۴	مقدمه.....	۱۶۵
۲-۴	بررسی وضعیت ناپایداری ستون‌های صلب.....	۱۶۷
۱-۲-۴	تعادل پایدار.....	۱۶۷
۲-۲-۴	مدل ساده مطالعه مسأله ناپایداری.....	۱۶۸
۳-۲-۴	بار بحرانی.....	۱۶۹
۲-۲-۴	اثر انحراف اولیه در مقدار بار بحرانی.....	۱۷۰
۳-۴	بررسی وضعیت ناپایداری ستون‌های نرم.....	۱۷۳
۱-۳-۴	کمانش.....	۱۷۳
۲-۳-۴	ناپایداری بار بحرانی اعضاء فشاری.....	۱۷۵
۴-۴	طول معادل ستون‌ها.....	۱۸۲
۵-۴	محدودیت فرمول ایسلر.....	۱۸۳
۶-۴	تنش در ستون‌ها.....	۱۸۶
۱-۶-۴	توضیح.....	۱۸۶
۲-۶-۴	ستون با انحراف اولیه.....	۱۸۶
۳-۶-۴	ستون با بار برون‌محور.....	۱۸۹
۷-۴	اثر بار محوری در کاهش سختی خمشی.....	۱۹۱
۸-۴	اثر توأم خمش و نیروی محوری.....	۱۹۸
۱-۸-۴	معادله دیفرانسیل تغییر مکان.....	۱۹۸
۲-۸-۴	حل معادله تغییر مکان و تعیین بار بحرانی.....	۱۹۹
۹-۴	روش انرژی در حل مسائل پایداری.....	۲۰۴
۱۰-۴	کمانش ستون‌ها با شرایط مرزی کلی و فاقد حرکت جانبی.....	۲۱۳
۱۱-۴	ناپایداری قاب‌های فاقد حرکت جانبی.....	۲۱۷
۱۲-۴	ناپایداری جانبی تیرها.....	۲۲۴
مسائل		۲۳۰

۵: تحلیل وضعیت دوبعدی تنش و کرنش ۲۳۳

۱-۵	مقدمه.....	۲۳۳
۲-۵	مسائل تنش مستوی و کرنش مستوی.....	۲۳۵
۳-۵	تحلیل تنش در حالت دوبعدی.....	۲۳۷

۲۳۷	۱-۳-۵ مؤلفه‌های تنش و علامت‌گذاری آن‌ها
۲۳۸	۲-۳-۵ تنش در روی یک سطح اختیاری
۲۴۳	۳-۳-۵ تنش‌های اصلی
۲۴۷	۴-۳-۵ روش ترسیمی مور برای حل مسائل دوبعدی تنش
۲۵۶	۵-۳-۵ معادلات تعادل
۲۵۹	۴-۵ تحلیل کرنش در مسائل دوبعدی
۲۵۹	۱-۴-۵ مقدمه
۲۶۰	۲-۴-۱ جابه‌جایی، جسم صلب و تغییر شکل
۲۶۳	۳-۴-۱ کرنش در حالت دوبعدی
۲۶۵	۴-۴-۵ معادلات مؤلفه‌های کرنش
۲۶۷	۲-۴-۵ معادله همسازي
۲۶۹	۶-۴-۵ تبدیل مؤلفه‌های کرنش
۲۷۱	۷-۴-۵ دایره مور برای کرنش
۲۷۳	۵-۵ دستگاه مختصات استوانه‌ای
۲۷۳	۱-۵-۵ مقدمه
۲۷۴	۲-۵-۵ معادلات تعادل
۲۷۶	۳-۵-۵ معادلات کرنش
۲۸۲	۶-۵ وضعیت تنش و کرنش سه‌بعدی
۲۸۴	مسائل
۲۸۹	۶-۵ حل مسائل دوبعدی و معرفی معیارهای تسلیم
۲۸۹	۱-۶ کلیاتی در مورد فرمول‌سازی مسائل دوبعدی
۲۹۴	۲-۶ دسته‌بندی مسائل دوبعدی
۲۹۴	۱-۲-۶ مسأله کرنش مستوی
۲۹۶	۲-۲-۶ حل مسأله کرنش مستوی
۲۹۸	۳-۲-۶ مسأله تنش مستوی
۲۹۹	۴-۲-۶ حل مسأله تنش مستوی
۳۰۱	۳-۶ حل مسائل دوبعدی به کمک تابع تنش
۳۰۷	۴-۶ مسائل دوبعدی در دستگاه استوانه‌ای
۳۱۵	۵-۶ استوانه‌های جدا از هم

۳۱۸	۶-۶	بررسی انرژی و تفکیک آن
۳۱۸	۱-۶-۶	انرژی کرنشی
۳۲۱	۲-۶-۶	تفکیک انرژی کرنشی
۳۲۶	۷-۶	معیارهای تسلیم (شکست)
۳۲۶	۱-۷-۶	مقدمه
۳۲۷	۲-۷-۶	تسلیم در وضعیت تنش چندبعدی
۳۲۸	۳-۷-۶	معیار حداکثر تنش عمودی
۳۳۰	۴-۷-۶	معیار حداکثر تنش برشی
۳۳۱	۵-۷-۶	معیار ۱-۱ اکثر کرنش عمودی
۳۳۲	۶-۷-۶	معیار ۲-۲ حداکثر انرژی کرنشی
۳۳۳	۷-۷-۶	تئوری حداکثر انرژی کرنشی انحرافی
۳۳۴	۸-۶	مقایسه معیارهای تسلیم
۳۳۹		مسائل

۳۴۳	۷-۷	پیمایش
۳۴۳	۱-۷	مقدمه
۳۴۵	۲-۷	تابیدگی اعضاء غیرمدور پیچشی
۳۴۷	۳-۷	پیچش مقاطع غیرمدور
۳۴۷	۱-۳-۷	تحلیل مسأله
۳۵۰	۲-۳-۷	استفاده از تابع تنش برای حل مسأله پیچش
۳۵۳	۴-۷	مثالهای نمونه
۳۵۳	۱-۴-۷	پیچش مقطع بیضی شکل
۳۵۹	۲-۴-۷	پیچش مقطع مستطیلی شکل
۳۶۱	۵-۷	انرژی کرنشی پیچشی
۳۶۴	۶-۷	روش تشابهی غشایی پرانتل
۳۶۷	۷-۷	پیچش مقطع مستطیلی باریک
۳۷۳	۸-۷	پیچش مقاطع جدارنازک بسته
۳۷۳	۱-۸-۷	مقدمه
۳۷۴	۲-۸-۷	محاسبه تنش پیچشی
۳۷۶	۳-۸-۷	محاسبه زاویه پیچش

۳۸۱	۷-۹ پیچش مقاطع جدارنازک چندسلوله.....
۳۸۶	۷-۱۰ پیچش تیرهای مقید در مقابل تابیدگی.....
۳۸۶	۷-۱۰-۱ مقدمه.....
۳۸۷	۷-۱۰-۲ پیچش مقید مقاطع باز.....
۳۸۹	۷-۱۰-۳ حل معادله دیفرانسیل پیچش مقید.....
۳۹۵	مسائل.....

۳۹۹	۸: ورق
۳۹۹	۸-۱ مقدمه.....
۴۰۱	۸-۲ مؤلفه‌های تنش و منته‌جه آن‌ها.....
۴۰۳	۸-۳ ورق بای مستطیل.....
۴۰۳	۸-۳-۱ محاسبه تنش و تغییر شکل.....
۴۰۵	۸-۳-۲ تغییر شکل ورق و مؤلفه‌های کرنش.....
۴۰۹	۸-۳-۳ روابط منته‌جه تنش - ازخاء.....
۴۱۰	۸-۳-۴ معادله تعادل ورق.....
۴۱۱	۸-۳-۵ شرایط مرزی.....
۴۱۶	۸-۳-۶ روش‌های حل معادله ورق.....
۴۲۷	۸-۳-۷ انرژی کرنشی ورق‌های مستطیل.....
۴۲۹	۸-۴ ورق تحت اثر توأم نیروهای عرضی و نیروهای سطح.....
۴۲۹	۸-۴-۱ تعیین بارعرضی معادل.....
۴۳۳	۸-۴-۲ کماتش ورق.....
۴۳۶	۸-۴-۳ انرژی پتانسیل و کارنیروهای واقع در سطح.....
۴۳۹	۸-۵ ورق‌های دایره‌ای.....
۴۳۹	۸-۵-۱ مقدمه.....
۴۴۰	۸-۵-۲ معادله ورق در دستگاه استوانه‌ای.....
۴۴۳	۸-۵-۳ حل ورق‌های متقارن مرکزی.....
۴۴۹	۸-۵-۴ انرژی کرنشی ورق‌های مدور.....
۴۵۲	مسائل.....

۴۵۵	۹: پوسته‌های نازک.....
۴۵۵	۹-۱ مقدمه.....

۵۱۶	۱-۴-۱۰ کار مجازی
۵۱۸	۲-۴-۱۰ انرژی کرنشی مجازی
۵۱۹	۳-۴-۱۰ اصل کار مجازی
۵۲۶	۵-۱۰ مفاهیم کارمکمل مجازی، انرژی کرنشی مکمل مجازی و...
۵۲۶	۱-۵-۱۰ کارمکمل مجازی
۵۲۷	۲-۵-۱۰ انرژی کرنشی مکمل مجازی
۵۲۸	۳-۵-۱۰ اصل کارمکمل مجازی
۵۳۴	۶-۱۰ اصل بتی
۵۳۷	۷-۱۰ اصل حداقل انرژی پتانسیل کل
۵۴۴	۸-۱۰ اصل حداقل انرژی پتانسیل کل مکمل
۵۵۱	۹-۱۰ قضایای کاستیگلیانو
۵۵۱	۱-۹-۱۰ قضیه اول کاستیگلیانو
۵۵۵	۲-۹-۱۰ قضیه دوم کاستیگلیانو
۵۵۸	۳-۹-۱۰ قضیه کار حداقل
۵۶۴	۱۰-۱۰ روش ریلی - ریتز
۵۷۷	۱-۱۰-۱۰ روش ریلی - ریتز برای مسائل پایداری
۵۷۹	۱۱-۱۰ روش اجزاء محدود
۵۹۷	مراجع
۵۹۹	نمایه موضوعی

به نام خداوند جان و خرد

پیش گفتار

درس مقاومت مصالح، و به تعبیر دیگر مکانیک اجسام جامد (غیر صلب)، از دروس اصلی دانشجویان رشته های مهندسی مکانیک کاربردی، مهندسی سازه، مهندسی مواد و گرایش های دیگری در مهندسی است که دانشجویان در طی دوره کارشناسی با اصول آن آشنا شده و تا حدود برآورده ساختن حداقل نیازهای این دوره به فراگیری آن می پردازند.

در دوره های کارشناسی ارشد رشته های مهندسی ماکور مبحث تئوری الاستیسیته تدریس می شود که در این مبحث اصول و روابط حاکم بر رفتار اجسام الاستیک تحت هرگونه اثری که منجر به پیدایش نیرو و تغییر شکل در جسم شود، مورد بررسی قرار می گیرد. اگرچه مبحث تئوری الاستیسیته به نحوی در تداوم موضوع مقاومت مصالح در یک سطح عالی قرار می گیرد، لیکن نوع نگرش به مسأله و تحلیل آن به گونه فراگیر و گسترده است که سطح مطالب ناچاراً در ترازوی بالاتر از سطح مطالب مقاومت مصالح قرار می گیرد و لذا تا حدودی درک مسأله برای دانشجویانی که در دوره کارشناسی خود فقط به گذراندن درس مقاومت مصالح بسنده کرده باشند، مشکل است.

در مبحث مقاومت مصالح پیشرفته، مسائلی مورد بررسی و مطالعه قرار می گیرد که برای تحلیل تنش و کرنش آنها نیاز به معلوماتی فراتر از آنچه است که در درس کلاسیک مقاومت مصالح آموخته می شود. اگرچه نگرش به هر مسأله در این مبحث یک نگرش ساده و نسبتاً کلاسیک است، اما با توجه به نتایج حاصله که تا حدودی پیشرفته است دانشجویان را آماده می سازد تا برای فراگیری موضوع تئوری الاستیسیته آمادگی کافی داشته باشد. بنابراین درس مقاومت مصالح پیشرفته را می توان به عنوان درسی که به عنوان پلی بین دروس مقاومت مصالح و تئوری الاستیسیته عمل می نماید، تلقی نمود. کتاب حاضر که محتوای بخشی از چنین درسی را در بر می گیرد، پس از چندین دوره تدریس مقاومت مصالح پیشرفته در دوره کارشناسی دانشکده عمران دانشگاه صنعتی اصفهان تدوین گردیده و مشتمل بر ده فصل است.

فصل اول که تحت عنوان **تیرها** مطرح می‌شود، رفتار خمشی اعضای یک بعدی یکنواخت را مورد بررسی قرار می‌دهد. در این فصل آموزش مطالب بر اساس معلومات اولیه خواننده از رفتار خمشی یک عضو تنظیم شده است. علاوه بر این، مسائلی از جمله خمش دو بعدی، خمش نامتقارن، خمش تیرهای خمیده، برش و مرکز پیچش مورد بحث قرار گرفته است.

در **فصل دوم** مسأله **تیر بر بستر ارتجاعی** مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این مسأله که عموماً در طراحی پی‌های نواری و استوانه‌های جدار نازک تحت بار متقارن مرکزی مورد استفاده است، حل تیرهای نامحدود، نیمه نامحدود و محدود را شامل می‌شود.

آنالیز الاستیک سازه‌های تیر و قاب دو بعدی در **فصل سوم** مورد توجه قرار می‌گیرد. در این فصل پایداری تسلیم اعضای خمشی، لنگر پلاستیک مقاطع متقارن و نامتقارن، لولای پلاستیک و جابه‌جایی پلاستیک تیر و قاب‌های ساده به شیوه نسبتاً ساده و لکن کاملی پیگیری می‌شود.

فصل چهارم به موضوع **ناپایداری تعادل** در اعضای یک بعدی تحت نیروی محوری می‌پردازد. در این فصل مفاهیمی از قبیل پایداری، ناپایداری و تعادل بی‌تفاوت تعریف می‌شود و سپس فرمول‌بندی مسأله برای تعیین کرنش یا نیروی ناپایداری پیگیری می‌شود و آنگاه با استناد به این فرمول‌بندی مسائل متنوعی حل گردیده و جواب‌های بار بحرانی استخراج می‌شود. در پایان فصل روش انرژی در مسائل ناپایداری به شیوه‌ای بسیار ساده توضیح داده شده و بر مبنای آن مسائلی که حل آنها قبلاً به روش دقیق به دست آمده است مجدداً حل می‌شود. ناپایداری قاب‌ها نیز مختصراً مورد اشاره قرار می‌گیرد.

در **فصل پنجم تحلیل وضعیت دوبعدی تنش و کرنش** مورد مطالعه قرار می‌گیرد. مسائل تنش مستوی و مسائل کرنش مستوی مورد بحث در این بخش است. ابتدا به تعریف مفاهیم تانسور تنش و تانسور کرنش پرداخته شده و سپس معادلات تعادل و معادلات همسازی توسعه داده می‌شوند. در قسمت پایانی فصل مختصات استوانه‌ای و رصع‌ات تنش و کرنش در این مختصات معرفی می‌شود و بالاخره مختصراً وضعیت تنش و کرنش سه‌بعدی مورد شناخت قرار می‌گیرد.

فصل ششم که به **حل مسائل دوبعدی تنش - کرنش و معرفی معیارهای تسلیم** می‌پردازد در حقیقت تداوم فصل پنجم است. در این فصل حل مسائلی که در فصل قبلی فرمول‌بندی شده است مورد توجه قرار می‌گیرد. برای این منظور ابتدا مفهوم تابع تنش معرفی می‌گردد و به کمک آن روش حل معرفی می‌شود. بررسی انرژی اجسام دو بعدی و تفکیک آن از جمله مسائل مورد بحث در این فصل هستند و بالاخره در پایان فصل معیارهای تسلیم مواد از جنبه تاریخی و به صورت بسیار مختصر مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

فصل هفتم به بررسی مسأله **پیچش** اختصاص یافته است. در این فصل ابتدا مفهوم تابیدگی

تعریف گردیده و سپس پیچش مقاطع غیر مدور فرمول‌بندی می‌شود. حل مسأله پیچش در گرو تعریف تابع تنش است که این تابع برای چندین مقطع از جمله بیضی و مستطیل معرفی می‌گردد. همچنین روش تشابهی پراوتل برای حل مسائل پیچش ارائه می‌گردد و به کمک آن پیچش مقطع مستطیل باریک مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در قسمت دوم این فصل پیچش مقاطع جدار نازک بسته، پیچش مقاطع جدار نازک چند سلوله و پیچش تیرهای مقید در مقابل تابیدگی فرموله گردیده و مسائل متعددی حل می‌شود.

ورق‌ها از جمله اجزاء سازه‌ای با کاربرد گسترده هستند که در فصل هشتم به مطالعه آنها پرداخته می‌شود. فرمول‌بندی مسأله ورق‌ها به طور نسبتاً ساده اما تا حدودی کامل ارائه می‌گردد. سپس حل ورق‌ها معرفی می‌گردد و در قسمت دیگر این فصل ورق‌ها تحت اثر توأم نیروی عرضی و نرمی مسطحه مورد بحث قرار می‌گیرند. در قسمت پایانی فصل ورق‌ها دایره‌ای و معادله وین در دستگاه استوانه‌ای ارائه می‌شود و سپس حل ورق‌ها با بار متقارن مرکزی پیگیری می‌شود و بالاخره به مسأله انرژی ورق‌ها مدور پرداخته می‌شود.

پوسته‌های نازک از جمله اجزاء سازه‌ای دیگری نظیر ورق‌ها با کاربرد متنوع هستند که مبحث مربوط به آنها در فصل نهم ارائه می‌شود. در این فصل ابتدا به تحلیل غشایی پوسته‌های خاص پرداخته می‌شود و سپس تحلیل غشایی پوسته‌های متقارن مرکزی تحت بار متقارن به طور مختصر و مفید دنبال می‌گردد. پوسته‌های ارائه‌ای با شکل مقطع کلی مسأله دیگری است که به آن پرداخته می‌شود. در قسمت دیگر این فصل تحلیل خمشی پوسته‌ها مورد مطالعه قرار گرفته و پوسته استوانه‌ای تحت بار متقارن مرکزی به طور مبسوط فرموله می‌گردد. در پایان روابط انرژی ارتجاعی پوسته‌ها استخراج می‌شود.

فصل دهم کلاً به مسائل انرژی و قضایای مربوطه می‌پردازد. مفاهیم کار، انرژی کرنشی یا ارتجاعی و انرژی پتانسیل کل و نیز مفاهیم کار مکمل، انرژی ارتجاعی مکمل و انرژی پتانسیل کل مکمل در بخش اولیه فصل تعریف می‌گردند. سپس در بخش دیگر مفاهیم کار مجازی، انرژی ارتجاعی مجازی و اصل کار مجازی، همچنین مفاهیم کار مجازی مکمل، انرژی ارتجاعی مجازی مکمل و اصل کار مجازی، مکمل مورد بحث قرار می‌گیرند. قضیه بتی، اصل مینیمم انرژی پتانسیل کل و اصل مینیمم انرژی پتانسیل کل مکمل و نیز قضایای کاستیگلیانو به طور مشروح مورد مطالعه قرار می‌گیرند و بالاخره در پایان فصل روش ریلی - ریتز و روش اجزاء محدود به طور مختصر و بیان ساده توضیح داده می‌شوند.

با امکانات پشتیبانی محدودی که برای نشر کتاب وجود دارد، تهیه این کتاب جز با تلاش و کار متعهدانه و خستگی‌ناپذیر اشخاص متعدد مسیر نبود. سرکار خانم اعظم سرمندیا قبول زحمت تایپ کتاب را به عهده داشتند که زحمات فراوان ایشان خصوصاً در تایپ فرمول‌های

کتاب، با ظرافت بالا، قابل تقدیر است. آقای مهندس سید حامد موسوی دانشجوی دکترای عمران دانشگاه صنعتی اصفهان مسئولیت ترسیم شکل‌ها را تقبل نمودند که با مهارت بالایی ایشان این کار در سطح بالایی انجام شد، به خاطر زحمت بسیار درخور ستایش از ایشان قدردانی می‌شود. بر خود لازم می‌بینم از حوصله، همراهی و مساعدت سرکار خانم مرضیه خردمند در صفحه‌آرایی و مراحل مختلف آماده‌سازی کتاب و نیز طراحی روی جلد تشکر ویژه نمایم. سپاس فراوان از دفتر نشر دانشگاه و نیز کارکنان چاپخانه دانشگاه خصوصاً پیگیری مجدانه آقای محسن حسه‌زاده سرپرست محترم چاپخانه. امور طراحی کتاب، برگردان اعداد شکل‌ها و جداول اقتباسی و نیز غلط‌گیری و ویرایش به عهده مؤلف بوده است.

در این بااعتراف به این نکته که هیچ تلاش انتشاراتی بدون اشکال نخواهد بود از خوانندگان محترم به خاطر اشکالات احتمالی که از نظر دور مانده است، عذرخواهی می‌شود. امید است خوانندگان محترم مؤلف را از رهنمون خود و لغزش‌های احتمالی محروم نسازند.

محمد مهدی سعادتپور

تأبستان ۱۳۹۶، دانشگاه صنعتی اصفهان