

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

press.um.ac.ir



مقاومت مصالح

چاپ ششم

آ. سی. اوگرال؛ اس. کی. فنستر

ترجمه:

دکتر انوشیروان فرشیدیان فر

استاد دانشگاه فردوسی مشهد

Ugural, A.C

یوگورال، آ. سی.
مقاومت مصالح/ تألیف آ. سی. اوگورال و اس. کی. فنستر؛ ترجمه انوشیروان فرشیدیان فر.
مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۷۵.
ده، ۴۵۴ ص: جدول، مصور.
انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد؛ ۲۰۴.

ISBN: 978-964-386-052-3

Advanced strength and applied elasticity

Fenster, Saul

سرشناسه:
عنوان و نام پدیدآور:
مشخصات نشر:
مشخصات ظاهری:
فروست:
شایک:
وضعیت فهرست نویسی:
یادداشت:
یادداشت:
موضوع:
موضوع:
شناسه افزوده:
شناسه افزوده:
شناسه افزوده:
رده بندی کنگره:
رده بندی دیویی:
شماره کتابشناسی ملی:

فیبا.
عنوان اصلی:
چاپ سوم: بهار ۱۳۸۸.
مقاومت مصالح
ارتجاع (فیزیک)
فنستر، سل، ۱۹۳۳- م.
فرشیدیان فر، انوشیروان، ۱۳۴۵ - مترجم.
دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات.
۱۳۷۵ ۷م/ی/۴۰۵ TA
۶۲۰/۱۱۲۳
۷۶-۱۱۲۳ م

مقاومت مصالح

پدیدآورندگان: آ. سی. اوگورال؛ اس. کی. فنستر
ترجمه: دکتر انوشیروان فرشیدیان فر
مشخصات: وزیری، ۳۰۰ نسخه، چاپ ششم، بهار ۱۴۰۰ (اول، ۱۳۷۵)
چاپ و صحافی: چاپخانه دقت
بها: ۷۰۰/۰۰۰ ریال
حق چاپ برای انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد محفوظ است.

مراکز پخش:

فروشگاه و نمایشگاه کتاب پردیس: مشهد، میدان آزادی، دانشگاه فردوسی مشهد، جنب سلف یاس
تلفن: ۳۸۸۰۲۶۶۶ - ۳۸۸۳۳۷۲۷ (۰۵۱)
مؤسسه کتابیران: تهران، خیابان کارگر جنوبی، خیابان لبافی نژاد، بین خیابان فروردین و اردیبهشت،
شماره ۲۳۸، تلفن: ۶۶۴۹۴۴۰۹ - ۶۶۴۸۴۷۱۵ (۰۲۱)
مؤسسه دانشیران: تهران، خیابان انقلاب، خیابان منیری جاوید (اردیبهشت) نبش خیابان نظری، شماره ۱۴۲
تلفکس: ۶۶۴۰۰۲۲۰ - ۶۶۴۰۰۱۴۴ (۰۲۱)

<http://press.um.ac.ir>

Email: press@um.ac.ir



فهرست مطالب

۱	پیشگفتار
۵	فصل اوّل - تحلیل تنش (Analysis of Stress)
۵	۱-۱- مقدمه
۸	۲-۱- تعریف تنش
۱۰	۳-۱- تانسور تنش
۱۲	۴-۱- تغییرات تنش در داخل یک جسم
۱۵	۵-۱- نقش دو بُعدی در یک نقطه
۱۷	۶-۱- تنشهای اصلی در حالت دو بُعدی
۱۸	۷-۱- دایره مور برای حالت تنش دو بُعدی
۲۴	۸-۱- تنش سه بُعدی در یک نقطه
۲۷	۹-۱- تنشهای اصلی در حالت سه بُعدی
۳۱	۱۰-۱- تنشهای عمودی و برشی بر روی یک صفحه مایل
۳۳	۱۱-۱- دایره مور برای تنش سه بُعدی
۳۶	۱۲-۱- تغییرات تنش در مرز یک جسم
۳۷	۱۳-۱- تنشهای برشی ماکزیمم
۳۹	مسائل فصل اوّل
۵۱	فصل دوم - کرنش و روابط تنش - کرنش
۵۱	۱-۲- مقدمه

۵۲	۲-۲- تعریف کرنش
۵۶	۲-۳- معادلات سازگاری
۵۸	۲-۴- وضعیت تنش در یک نقطه
۶۴	۲-۵- مواد مهندسی (Engineering Materials)
۶۸	۲-۶- قانون عمومی هوک
۷۴	۲-۷- اندازه گیری کرنش، کرنش سنجها
۷۸	۲-۸- انرژی کرنشی
۸۱	۲-۹- مؤلفه های انرژی کرنشی
۸۴	۲-۱۰- اثر تنش و کرنش موضعی - اصل سنت و نانت
۸۵	۲-۱۱- حل مسائل الاستیسیته در حالت سه بُعدی
۸۹	مسائل فصل دوم

۹۹	فصل سوم - مسائل دو بُعدی در الاستیسیته
۹۹	۳-۱- مقدمه
۱۰۰	۳-۲- مسائل کرنش صفحه ای
۱۰۴	۳-۳- مسائل تنش صفحه ای
۱۰۷	۳-۴- تابع تنش
۱۰۹	۳-۵- روشهای حل مسائل دو بُعدی
۱۱۶	۳-۶- روابط اساسی در مختصات قطبی
۱۲۴	۳-۷- تمرکز تنش
۱۲۹	نمودار نیوبر
۱۳۲	۳-۸- تنشهای تماسی
۱۳۸	۳-۹- تنشهای حرارتی
۱۴۲	۳-۱۰- مسائل صفحه ای با تقارن محوری
۱۴۴	۳-۱۱- تحلیل تیرهای خمیده به روش نیمه معکوس
۱۴۷	مسائل فصل سوم

فصل چهارم - رفتار مکانیکی مواد

۱۵۵	۱-۴ - مقدمه
۱۵۷	۲-۴ - ساقط شدن توسط تسلیم و شکست
۱۶۳	۳-۴ - تئوریهای تسلیم ساقط شدن
۱۶۵	۴-۴ - فرضیه تنش اصلی ماکزیمم
۱۶۶	۵-۴ - فرضیه تنش برشی ماکزیمم
۱۶۹	۶-۴ - فرضیه انرژی کرنشی ماکزیمم
۱۷۰	۷-۴ - فرضیه انرژی واپیچش (تغییر شکل خالص) ماکزیمم
۱۷۱	۸-۴ - فرضیه تنش برشی هشت وجهی
۱۷۵	۹-۴ - فرضیه مور
۱۷۷	۱۰-۴ - فرضیه کولمب - مور
۱۷۹	۱۱-۴ - مقایسه فرضیه های تسلیم
۱۸۰	۱۲-۴ - فرضیه های شکست (مربوط به مواد تُرد)
۱۸۱	۱۲-۱ - فرضیه اصلاح شده مور
۱۸۶	۱۳-۴ - معیارهای ساقط شدن برای خستگی فلزات
۱۹۰	۱۴-۴ - عمر خستگی در حالت بارگذاری ترکیبی
۱۹۳	۱۵-۴ - بارهای ضربه ای یا دینامیکی
۱۹۸	۱۶-۴ - اثرات دینامیکی و حرارتی
۲۰۰	مسائل فصل چهارم

فصل پنجم - خمش تیرها

۲۰۷	۱-۵ - مقدمه
۲۰۸	بخش اول - تحلیل دقیق
۲۰۸	۲-۵ - خمش خالص تیرها با مقطع متقارن
۲۱۲	۳-۵ - خمش خالص تیرهایی با مقطع نامتقارن
۲۱۸	۴-۵ - خمش یک تیر طره با مقطع باریک
۲۲۱	۵-۵ - خمش یک تیر باریک با تکیه گاه ساده

- بخش دوم - تحلیل تقریبی
- ۲۲۴ ۵-۶- فرضیه‌های مقدماتی خمش
- ۲۲۴ ۵-۷- تنشهای خمشی و برشی
- ۲۲۷ ۵-۸- اثر تنش عمودی جانبی
- ۲۳۱ ۵-۹- تیرهای مرکب
- ۲۳۳ ۵-۱۰- مرکز برش
- ۲۴۰ ۵-۱۱- سیستمهای نامعین استاتیکی (Statically Indeterminate Systems)
- ۲۴۶ ۵-۱۲- انرژی کرنشی در تیرها . قضیه کستگلیانو
- ۲۴۷
- بخش سوم - تیرهای خمیده
- ۲۵۰ ۵-۱۳- تحلیل دقیق
- ۲۵۰ ۵-۱۴- فرضیه وینکلر
- ۲۵۴ ۵-۱۵- تنشهای شعاعی در تیرهای خمیده (Radial Stresses in Curved Beams)
- ۲۶۳ ۵-۱۶- تنشهای مماسی و شعاعی در تیرهای خمیده به صورتی دیگر
- ۲۶۵ ۵-۱۷- انرژی کرنشی در تیرهای خمیده و قضیه کستگلیانو
- ۲۷۴ ۵-۱۸- لوله‌های خمیده (Curved Tubes)
- ۲۷۸
- ۲۸۲ مسائل فصل پنجم
- فصل ششم - پیچش میله‌های منشوری
- ۲۹۳ ۶-۱- مقدمه
- ۲۹۳ ۶-۲- حل عمومی مسأله پیچش
- ۲۹۴ ۶-۳- روش تشبیهی غشایی پراوتل
- ۳۰۴ ۶-۴- پیچش اعضای جدار نازک با مقطع باز
- ۳۰۹ ۶-۵- پیچش مقاطع جدار نازک همبند مرکب
- ۳۱۲ ۶-۶- روش تشبیهی جریان سیال و تمرکز تنش
- ۳۱۸ ۶-۷- پیچش اعضا مقید جدار نازک با مقطع باز
- ۳۲۰ ۶-۸- میله‌های مدور خمیده
- ۳۲۶ ۶-۹- حل مسائل پیچش به کمک روش جابه‌جایی [یا تغییر مکان]
- ۳۲۹

۳۳۴	۶-۱۰- روشی برای حل مسائل پیچش به کمک توابع تحلیلی
۳۴۲	مسائل فصل ششم
۳۴۷	فصل هفتم - روشهای عددی
۳۴۷	۷-۱- مقدمه
	۷-۲- روشی غیر معمول برای تحلیل عددی
۳۴۸	An Informal Approach to Numerical Analysis
۳۵۲	۷-۳- روش تفاضل محدود (Finite Differences)
۳۵۶	۷-۴- معادلات تفاضل محدود (Finite Difference Equations)
۳۵۹	۷-۵- روش واهلش (The Relaxation Method)
۳۶۱	۷-۶- مرزهای منحنی شکل (Curved Boundaries)
۳۶۴	۷-۷- شرایط مرزی (Boundary Conditions)
۳۶۷	۷-۸- روش توزیع گشتاور (The Moment Distribution Method)
	۷-۹- روش اجزای محدود - مقدمات
۳۷۲	The Finite Element Method-Preliminaries
	۷-۱۰- فرمولاسیون روش اجزای محدود
۳۷۷	(Formulation of the Finite Element Method)
۳۸۱	۷-۱۱- المان محدود مثلثی (The Triangular Finite Element)
۳۹۸	۷-۱۲- استفاده از کامپیوترهای عددی
۳۹۹	مسائل فصل هفتم
۴۰۵	ضمیمه الف - نمادگذاری اندیسی (تانسوری)
۴۰۵	الف - ۱- مقدمه
۴۰۶	الف - ۲- بردارها و تانسورها
۴۲۱	الف - ۳- روابط الاستیسیته در نماد تانسوری
۴۲۳	مسائل ضمیمه الف

ضمیمه پ - حل معادله درجه سوم تنش

۴۲۷

پ - ۱ - تنشهای اصلی

۴۲۷

پ - ۲ - کسینوسهای هادی

۴۲۸

ضمیمه پ - گشتاورهای سطوح مرکب

۴۳۳

پ - ۱ - مرکز هندسی

۴۳۳

پ - ۲ - گشتاورهای اینرسی

۴۳۷

پ - ۳ - قضیه محورهاى موازى

۴۳۸

پ - ۴ - گشتاورهای اینرسی اصلی

۴۴۲

پیشگفتار

مقاومت مصالح و یا به قولی مکانیک مواد، از دروس بنیادی دانشکده های مهندسی، مخصوصاً رشته های مکانیک، عمران و سازه است. اساس تمام دروس طراحی و کاربردی که در سالهای آخر رشته های نامبرده تدریس می شود، درس مقاومت مصالح است. بنابراین اگر سعی شود که این درس به دانشجوی خوب تفهیم شود و دانشجوی نیز سعی لازم در فراگیری آن را از خود نشان دهد، بازده وی در جذب مفاهیم دروس طراحی بسیار بالا خواهد بود.

کتاب حاضر گام کوچکی در تحقق خواسته فوق می باشد و امید است مورد توجه صاحب نظران و دانشجویان رشته های مهندسی قرار گیرد. با توجه به این که در زمینه مقاومت مصالح مقدماتی کتابهای فارسی زیادی منتشر شده است ولی در زمینه مقاومت مصالح عالی و پیشرفته بندرت کتاب فارسی پیدا می شود، سعی شده است که در این کتاب بیشتر به جنبه های مقاومت مصالح عالی و الاستیسیته کاربردی پرداخته شود.

چاپ خوب و شالوده اصلی این کتاب، کتاب مشهور

مقاومت مصالح پیشرفته و الاستیسیته کاربردی نوشته اوگرال و فنستر

A. C. Ugural, S. K. Fenster, Advanced strength and Applied Elasticity; Second SI Edition, Elsevier, 1987.

می باشد، اما به خاطر ضعفهایی که در بعضی بخشهای کتاب از لحاظ انتقال مفاهیم به دانشجوی کامل نبودن مطلب وجود داشت، از کتابهای دیگر در این زمینه - مخصوصاً کتاب مشهور

تئوری الاستیسیته نوشته تیموشنکو و گودیر

S. P. Timoshenko, J. N. Goodier, **Theory of Elasticity**; Third Edition, McGraw-Hill, 1987.

استفاده شده است. ذکر این نکته ضروری است که تمامی هفت فصل اول کتاب «مقاومت مصالح پیشرفته و الاستیسیته کاربردی» نوشته اوگرال بدون هیچ گونه تغییری در این کتاب آمده است و سعی شده است که مطالب تکمیلی حتی الامکان در انتهای فصول آورده شود تا تغییری در ترتیب کتاب صورت نگیرد. بنابراین شماره روابط ارائه شده و مسائل کتاب دقیقاً با کتاب اوگرال منطبق است.

جلد اول این کتاب برای استفاده دانشجویان دوره کارشناسی رشته مکانیک در درس مقاومت مصالح ۳ نوشته شده است که علاوه بر آن دانشجویان دوره های کارشناسی ارشد رشته های مکانیک و عمران نیز جهت درس الاستیسیته خود می توانند از آن استفاده کنند.

مطالب کتاب از دو بخش تشکیل شده است؛ در بخش اول که شامل فصلهای اول، دوم و سوم می باشد، تئوری الاستیسیته مورد بحث واقع شده، بدین ترتیب که پس از تحلیل تنش و کرنش به بیان روابط تنش - کرنش و معادلات اساسی الاستیسیته در حالت کلی و نحوه حل مسائل تنش و کرنش صفحه ای پرداخته شده است.

تئوری الاستیسیته در این کتاب سه نقش اصلی به عهده دارد: اولاً هنگامی که شکل بارگذاری و شرایط مرزی نسبتاً ساده باشد، پاسخهای دقیق را به ما ارائه می دهد. ثانیاً به کمک آن می توان محدودیتهای روش مقاومت مصالح را آزمود و ثالثاً تئوری الاستیسیته به عنوان اساس حللهای تقریبی در تحلیلهای عددی به کار می رود.

در بخش دوم کتاب - شامل فصلهای چهارم تا هفتم - به مسائل کاربردی مقاومت مصالح و همچنین روشهای عددی اشاره شده است. در فصل چهارم تا هفتم ضمن بررسی خواص مکانیکی مواد و بیان کلیه تئوریهای ساقط شدن برای مواد نرم و ترد به بارگذاریهای دینامیکی و پدیده خستگی نیز اشاره شده است. در فصل پنجم مسأله خمش تیرها بر اساس دو روش دقیق و تقریبی مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت به بیان تئوری دقیق و تقریبی تیرها و لوله های خمیده پرداخته ایم. در فصل ششم به پیچش مقاطع غیرمدور و میله های منشوری اشاره شده و در این مبحث روشهای مختلف بطور کامل مورد بررسی قرار گرفته است.

شاید بتوان گفت که مهمترین وجه تمایز این کتاب با دیگر کتابهای مقاومت مصالح،

پرداختن به بیان روشهای عددی به منظور حل مسائل مقاومت مصالح می باشد که در کمتر کتابی به آن پرداخته شده است . بدین علت فصل هفتم کتاب تماماً به مبحث روشهای عددی همچون روش تفاضل محدود و روشهای اجزای محدود اختصاص دارد که در آن با بیان مثالهای زیاد در مورد چنین روشهایی سعی شده است که خواننده بطور کامل با مراحل حل و نقاط ضعف و قوت هر کدام از این روشها آشنا شود .

در انتهای کتاب نیز سه ضمیمه آورده شده است که در ضمیمه A بطور کامل به نمادگذاری تانسوری و اندیسی اشاره شده که در روابط الاستیسیته و برنامه های کامپیوتری کاربرد فراوان دارد . در ضمیمه B به نحوه محاسبه گشتاور اینرسی سطوح مرکب عنایت شده است . پایان هر فصل چند مسأله جهت تمرین دانشجویان آورده شد که پاسخ بعضی از آنها در انتهای کتاب آمده است .

از کلیه صاحب نظران و خوانندگان گرامی تقاضا دارم، غلط هایی را که علی رغم کوشش فراوان باز هم ممکن است در کتاب یافت شوند به اینجانب اطلاع دهند تا انشاء الله در چاپهای بعدی تصحیح شود .

بجاست که از همه دست اندرکاران تهیه این کتاب در خود کتاب تشکر نمود، لذا از انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد که کار چاپ و نشر را دلسوزانه به عهده داشت، از آقای دکتر علی سینائی که با دقت فراوان ویرایش علمی متن دستنویس را انجام دادند و از همسر خانم مریم عربی که صبورانه در تصحیح و بازبینی متن تایپ شده اینجانب را یاری نمودند، صمیمانه تشکر می کنم .

در پایان کتاب را به پیشگاه همه بزرگوارانی که کلامی به من آموختند تقدیم می کنم : پدرم، مادرم، برادرانم و کلیه سرورانی که به عنوان دانشجو، افتخار حضور در کلاس درسشان را داشته ام .

انوشیروان فرشیدیان فر

گروه مکانیک . دانشکده مهندسی

دانشگاه فردوسی مشهد

تابستان ۱۳۷۵

press.um.ac.ir

فصل اول

تحلیل تنش (Analysis of Stress)

۱-۱ - مقدمه

ساختمان اصلی مواد از ذرات مختلف غیر یکنواخت و ناپیوسته ای نظیر مولکولها، اتمها و ذرات ریز دیگری تشکیل شده است. در این کتاب به ساختار ذره ای مواد نمی پردازیم و برای سهولت، سیستم واقعی ذرات را با یک توزیع پیوسته ماده جایگزین می کنیم. این کار بدان علت است که هر حجم کوچکی را که با آن سر و کار داریم می توان به قدر کافی بزرگ و شامل ذرات بسیار ریزی دانست. بنابراین تغییرات اتفاقی در خواص مواد پیش بینی پذیر نیست. در این جا تمرکز بر روی حالت جامد مواد است که می توانند شکل خود را بدون نیاز به ظرف، نگه داشته و در مقابل برش و کشش پیوسته مقاومت کنند.

استاتیک و دینامیک اجسام صلب به بررسی رفتار خارجی اجسام می پردازد (یعنی تعادل و حرکت اجسام بدون توجه به تغییر شکلهای کوچک مربوط به اعمال بار)؛ اما مکانیک جامدات بررسی روابط اثر خارجی (نیروها و گشتاورها) با تنشها و کرنشهای داخلی است.

نیروهای داخلی که بر یک جسم عمل می کنند به دو دسته نیروهای سطحی و نیروهای جسمی تقسیم می شوند. هر نیروی سطحی (surface force) در صورتی که بر یک نقطه اثر کند از نوع متمرکز (concentrated) می باشد. همچنین یک نیروی سطحی می تواند به صورت یکنواخت یا غیر یکنواخت بر روی یک سطح محدود توزیع شود. نیروهای جسمی (body forces)

بر روی المانهای حجمی اثر می کنند که مربوط به میدانهای نظیر جاذبه و مغناطیس می باشند . در واقع نیروهای داخلی ، نیروهایی هستند که ذرات شکل دهنده جسم را به یکدیگر می چسبانند . اصول کلی ای را که در مکانیک جامدات مطرح است می توان به صورت زیر جمع بندی نمود :

الف - تحلیل تنشها و تغییر شکلهای در داخل یک جسم که تحت سیستم نیرویی مشخص قرار گرفته است : این عمل با حل معادلات حاکم بر میدانهای تنش و کرنش انجام می پذیرد ، (تحلیل تئوری تنش) . در جاهایی که شکل سازه یا شرایط بارگذاری به گونه ای است که نمی توان از راه حلهای تئوری استفاده کرد و یا نیاز به تأیید و تصدیق حلهای تئوری باشد ، اغلب مفید به نظر می رسد که از تکنیکهای آزمایشگاهی تحلیل تجربی تنش استفاده کنیم .

ب - محاسبه مقادیر حدی باری که یک المان سازه ای می تواند بدون تحمل خطر و ساقط شدن تحمل کند با استفاده از تحلیل تئوری یا تجربی .

پ - محاسبه شکل جسم و انتخاب موادی که می توانند در مقابل سیستم نیرویی معین تحت شرایط عملی مشخص مثل درجه حرارت ، رطوبت ، ارتعاشات و فشار محدود ، مقاومت کنند . که به این عمل طراحی (design) و یا به بیان بهتر ، طراحی بهینه (optimum design) گفته می شود . با توجه به معیارهایی مثل وزن یا حجم حداقل ، هزینه حداقل یا هر معیاری که مهم و معتبر فرض شود ، می توان بازده را محاسبه کرد .

عمل طراحی ، یا قسمت پ ، بوضوح متکی بر اجرای تحلیلهای تئوری است که در قسمتهای الف و ب بیان گردید و در این کتاب مورد بررسی قرار می گیرد . نحوه تحلیل در طراحی را می توان مراحل زیر خلاصه کرد که شامل طراحی سامان یافته عضو بارگذاری شده است :

۱- انتخاب نزدیکترین مورد ساقط شدن تحت شرایط پیش بینی شده کار

۲- محاسبه روابط بین اثرات خارجی مثل نیرو و ثقل با اثراتی مثل تنش ، کرنش و تغییر شکل : اغلب اعضا تحت معادلات و شرایط بارگذاری می باشند که متداول بوده و یا متمایل به حلهایی هستند که موضوع تحلیلهای قبلی بوده اند . در چنین شرایطی کتابهای مرجع ، و مقالات و مجله ها منابع مفید اطلاعات محسوب می شوند . اما در موقعیتهای منحصر به فرد نیاز به تحلیلهای ریاضی خاصی خواهیم داشت .

۳- محاسبه مقادیر ماکزیمم یا حدی برای مقادیر مهمی مثل تنش ، کرنش یا انرژی