

کشش و فشار

تأثیرات درونی نیروها

در این کتاب ما به چیزی خواهیم پرداخت که می‌توان آن را تأثیرات درونی نیروهایی که بر یک جسم عمل می‌کنند، خواند. دیگر همچون استاتیک، فرض نخواهیم کرد که اجسام کاملاً صلب هستند، به عکس، محاسبه تغییرات شکل اجسام مختلف تحت نیروهای متفاوت یکی از مشغله‌های اصلی ما در مطالعه استحکام مواد خواهد بود.

میله تحت فشار محوری

ساده‌ترین مورد برای بررسی در ابتدا یک میله ابتدائاً صاف فلزی است که دارای مقاطع عرضی یکسان می‌باشد، و در دو سر خود تحت یک جفت نیروی همراستای در جهات مخالف است که همجهت با محور طولی میله به آن وارد می‌شوند و بر مرکز هر مقطع عرضی عمل می‌کنند. برای آنکه تعادلی استاتیک برقرار باشد، اندازه نیروها باید برابر باشند. اگر نیروها در جهت دور شدن از میله باشند، گفته می‌شود که میله در کشش قرار دارد. اگر آنها در جهت خود میله باشند، یک وضعیت فشار برقرار است. این دو وضعیت در شکل ۱-۱ نشان داده شده‌اند.

تحت تأثیر این جفت نیروی عمل کننده، نیروهای مقاومت درونی درون میله به کار می‌افتند و برای مطالعه خصوصیات آنها می‌توانیم فرض کنیم که یک صفحه از میله در هر جایی به صورت عرضی گذشته و بر خط محوری طولی میله عمود است. چنین صفحه‌ای را در تصویر ۱-۲ (الف) $a-a$ می‌نامیم به دلایلی که بعداً ذکر می‌کنیم، این صفحه نباید زیاد به دو سر میله نزدیک باشد. اگر به منظور تحلیل تصور کنیم که قسمتی از میله که در طرف راست این صفحه قرار دارد برداشته شده است، چنانچه در تصویر ۱-۲ (ب) چنین است، آنگاه به جای آن باید هر گونه تأثیری که بر قسمت چپ صفحه دارد جایگزین شود. با این شگرد ایجاد یک صفحه قطع کننده، نیروهایی که در اصل درونی بوده‌اند، اکنون به نیروهایی بیرونی برای قسمت‌های باقی مانده از میله تبدیل می‌شوند. برای حفظ تعادل قسمت دست چپی، این تأثیر باید نیرویی با بزرگی P در راستای افقی باشد. اما این نیرو که به صورت عمود بر صفحه $a-a$ عمل می‌کند، در واقع نتیجه نیروهای توزیع شده هستند که بر این مقطع عرضی به صورت عمودی عمل می‌کنند.

توزیع نیروهای مقاومت

در این مرحله لازم است در مورد چگونگی تنوع این توزیعهای نیرو، فرضهایی بکنیم و از آنجا که نیروی P بر مرکز میله عمل می کند، معمولا فرض می شود که این توزیعها در طول مقطع عرضی یکنواخت هستند. چنین توزیعی احتمالا هرگز نمی تواند وجود واقعی داشته باشد، زیرا ذرات کریستالی میله در جهات اتفاقی هستند. مقدار دقیق نیرویی که بر یک عنصر بسیار کوچک از سطح مقطع عرضی وارد می شود، تابعی از طبیعت و جهت ساختار کریستالی در آن نقطه است. اما تنوع در تمامیت سطح مقطع عرضی با دقت قابل قبول مهندسی با فرض یک توزیع یکنواخت، قابل توضیح است.

تنش میانگین

به جای صحبت درباره نیروهای درونی که بر یک عنصر کوچک از سطح وارد می شوند، بهتر است به منظور مقایسه به نیروی میانگین که بر یک واحد سطح مقطع عرضی وارد می شود توجه کنیم. شدت نیروی میانگین در واحد سطح، تنش میانگین نامیده می شود و واحد آن نیرو بر مساحت است یعنی Nm^{-2} («پاسکال»). مجموع تنش عبارتی است که برای نام گذاری مجموع نیروی محوری حاصله استفاده می شود. اگر نیروهایی که بر دو سر میله وارد می شوند به نحوی باشند که میله در

کشش قرار دارد، آنگاه تنشهای کششی در میله ایجاد می‌شود. اگر میله در موقعیت فشار باشد، تنشهای فشاری خواهیم داشت. ضروری است که خط عمل نیروهایی که بر دو سر میله عمل می‌کنند از مرکز مقطع عرضی میله بگذرند.

نمونه‌های آزمایشی

وارد کردن نیروهای محوری که در شکل ۱-۲ (الف) نشان داده شده‌اند در مسائل مربوط به طراحی ساختاری و طراحی ماشین بسیار پیش می‌آیند. برای شبیه سازی این وارد کردن نیرو در آزمایشگاه، نمونه آزمایشی در یک ماشین آزمایش دنده مانند که با نیروهای الکتریکی کار می‌کند، یا یک ماشین هیدرولیک، نگه داشته می‌شود. هر دوی این ماشینها معمولاً در آزمایشگاههای تست مواد برای وارد ساختن نیروهای کششی محوری مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در یک تلاش برای استاندارد کردن روشهای تست مواد، هیئتهای ملی مختلفی خصایصی را منتشر ساخته‌اند که در کشورهای متفاوت مورد استفاده هستند. بیش از بیست نوع مختلف از نمونه‌ها از مواد فلزی و غیر فلزی مختلف برای آزمایشهای کشش محوری و فشار محوری توصیه می‌شوند. در حال حاضر فقط به د تا از اینها اشاره خواهیم کرد، یکی صفحات آهنی ضخیم‌تر از ۵ میلی متر که شکلی مانند آنچه

در شکل ۱-۳ می بینید دارند و دیگری آهنهایی با ضخامت بیش از ۳۷.۵ که شمایی را که در شکل ۱-۴ نشان داده شده دارند. ابعاد نشان داده شده توسط جامعه آمریکایی آزمایش مواد پیشنهاد شده اند، اما انتهای نمونه های آزمایش ممکن است هر شکلی را که برای گیره های ماشین آزمایش لازم باشد، داشته باشند. همانطور که در این تصویرها قابل ملاحظه است، قسمت مرکزی نمونه تا حدی کوچکتر از قسمتهای جانبی است تا قسمتهای داخل گیره نشکنند. مغزی هایی گردی که نشان داده شده اند، برای آن ارائه می شوند که هیچ تمرکز تنشی در انتقال میان دو بعد کناری صورت نگیرد. طول

استاندارد محک که تغییر طول با آن اندازه گیری می شود، در نمونه شکل ۱-۳ ۲۰۰ میلی متر و در نمونه ۱-۴ ۵۰ میلی متر است.

تغییر طولها یا با ابزارهای مکانیکی یا نوری اندازه گیری می شوند و یا با چسباندن یک ابزار اندازه گیری الکتریکی که بر سطح ماده چسبانده می شود. مقاومت این ابزار اندازه گیری از تعداد سیمهای بسیار نازک تشکیل شده که همراستای محور میله قرار دارند. با تغییر طول میله، مقاومت الکتریکی سیمها تغییر می کند و این تغییر مقاومت با یک پل ویتاستون اندازه گیری می شود و تغییر طول از آن محاسبه می شود.

تنش میانگین.

اجازه دهید فرض کنیم که یکی از این نمونه‌های تنش در یک ماشین تست تنشی - فشاری قرار داده شده و نیروهای کشسان به تدریج بر دو سر آن وارد می‌شوند. تغییر طول در اندازه محک ممکن است با روشهای فوق می‌تواند برای هر تغییر نیروی وارده مفروض اندازه گیری شود. از این مقادیر تغییر اندازه در واحد طول، که تنش میانگین نامیده می‌شوند و با حرف a مشخص می‌شود، می‌تواند با تقسیم کل تغییر طول بر طول محک به دست بیاید که مقداری بدون واحد است.

منحنی تنش-کش آمدگی

با افزایش تدریجی نیروی محوری به طور متناوب، مجموع تغییر اندازه طول محک اندازه گیری می‌شود و این کار تا جایی انجام می‌گیرد که نمونه ترک بر می‌دارد. با دانستن مساحت مقطع عرضی اولیه نمونه آزمایشی، تنش میانگین که با a نشان داده می‌شود، می‌تواند برای هر مقدار نیروی محوری با استفاده از رابطه ذیل به دست بیاید که در آن P نشان دهنده نیروی محوری بر حسب نیوتن و A نشان دهنده مساحت اولیه مقطع عرضی است. با محاسبه جفتهای بسیاری از مقادیر تنش میانگین و کش آمدگی میانگین، داده‌های آزمایش می‌توانند در یک نمودار نشان داده شوند که

مقادیر عرضی و طولی آن به ترتیب مقادیر مذکور در فوق هستند. این نمودار یا منحنی تنش-کش آمدگی ماده در این نوع از ورود نیرو نامیده می شود. نمودارهای تنش-کش آمدگی شکلهای بسیار متفاوتی برای مواد مختلف می یابند. شکل ۱-۵ نمودار تنش-کش آمدگی برای یک فلز ساختاری با کربن متوسط است و شکل ۱-۶ برای هر فولاد آلیاژی و شکل ۱-۷ برای فولادهای سخت و برخی آلیاژهای غیر آهنی دیگر است. برای آلیاژهای غیر آهنی و آهن نمودار مانند شکل ۱-۸ خواهد بود و برای لاستیک شکل ۱-۹ یک شکل معمولی است.

مواد چکش خوار و شکننده

مواد فلزی مهندسی معمولاً به دو دسته چکش خوار و شکننده تقسیم می شوند. یک ماده چکش خوار ماده ای است که تا زمان شکستن قابلیت کش آمدگی کشسانی زیادی دارند (برای مثال، فولاد یا آلومینیوم ساختاری) در حالی که ماده شکننده تا همین زمان قابلیت کش آمدن اندکی دارد. یک کش آمدگی ۰.۰۵ معمولاً به عنوان خط جدا کننده قابلیت کش آمدن این دو نوع ماده در نظر گرفته می شود. چدن و بتون نمونه هایی از مواد شکننده هستند.

قانون هوک

برای هر ماده‌ای که نمودار تنش-کش آمدگی مانند شکل ۱.۵، ۱.۶ یا ۱.۷ داشته باشد، واضح است که دابطة میان تنش و کش آمدگی برای مقادیر بسیار کوچک کش آمدگی خطی است. این رابطه خطی میان تغییر طول و نیروی محوری که موجب آن شده، (با توجه به اینکه فرق این مقادیر به ترتیب با کش آمدگی و تنش فقط یک ضریب ثابت است) نخستین بار توسط سر رابرت هوک در ۱۶۷۸ کشف شد و قانون هوک نامیده می‌شود. برای توضیح این محدوده اولیه خطی رفتار ماده می‌توانیم چنین رابطه‌ای را

بنویسیم.

که در آن E نشان دهنده شیب خط راست در op در هر یک از منحنی های شکل‌های ۱.۵، ۱.۶ و ۱.۷ است.

ضریب کشسانی

مقدار E یعنی نسبت واحد تنش بر واحد کش آمدگی، ضریب کشسانی ماده تحت تنش خوانده می‌شود یا غالباً ضریب یانگ نامیده می‌شود. از آنجا که واحد کش آمدگی یک عدد بدون واحد است (حاصل تقسیم دو طول بر هم) واضح است که E واحدی همانند واحد تنش دارد. برای بسیاری از مواد معمول در مهندسی ضریب کشسانی در

فشار بسیار نزدیک به همین ضریب در کشش است. باید با دقت به این نکته توجه کرد که رفتار موادی که تحت نیروهایی که در این کتاب مورد بحث قرار می گیرند، محدود به بخشهای خطی منحنیهای تنش-کش آمدگی هستند (مگر آنکه چیزی غیر از این تصریح شده باشد).

مقادیر E که در این متن مورد استفاده هستند، تخمینی هستند تا از محاسبات غیر لازم اجتناب شود، اگر چه مقادیر ارائه شده بیش از ۵ درصد از مقادیر واقعی فاصله ندارند. برای مواد خاص E می تواند از کتابهای راهنما یا به طور دقیقتر از کاتالوگهای تولید

کنندگان استخراج شود. در همه موقعیتهای واقعی باید برای اطمینان از دقت داده ها هر کوشش ممکن انجام گیرد.

خصوصیات مکانیکی ماده

منحنی تنش-کش آمدگی که در شکل ۱-۵ نشان داده شده است، می تواند برای مشخص اسختن بسیاری از خصوصیات ماده مورد استفاده قرار بگیرد. این خصوصیات ذیلا آمده اند:

محدوده تناسب

طول نقطه P به نام نقطه تناسب خوانده می شود. یعنی حداکثر تنش که می تواند در

یک آزمایش کشش ساده بر جسم وارد شود به طوری که تنش تابعی خطی از

کش آمدگی باشد. برای یک ماده که منحنی تنش-کش آمدگی مانند شکل ۱-۸ دارد،

محدوده تناسب وجود ندارد.

محدوده کشسانی

طول نقطه ای تقریباً مصادف با P محدوده کشسانی خوانده می شود، یعنی حد اکثر

تنش که می توان بر جسم در طول یک آزمایش کشش معمولی وارد کرد به طوری که

هیچ تغییر شکل پایدار یا ثابتی با برداشته شدن نیرو باقی نماند. برای بسیاری از مواد

مقادیر عددی محدوده کشسانی و محدوده تناسب تقریباً برابر هستند و این دو نام به

عنوان مترادف به کار می روند. در مواردی که این دو با هم تفاوت دارند، تقریباً همیشه

محدوده کشسانی از محدوده تناسب بزرگتر است.

بازه‌های کشسانی و شکل پذیری

بازه‌ای از منحنی تنش-کش آمدگی که از مبدأ مختصات تا محدوده تناسب ادامه

می‌یابد، بازه کشسانی خوانده می‌شود. بازه‌ای از منحنی تنش-کش آمدگی که از مبدأ

مختصات تا نقطه شکست ادامه می‌یابد، بازه شکل پذیری خوانده می‌شود.

نقطه قطع مقاومت

طول نقطه Y که با علامت نشان داده می‌شود، و در آن افزایش کش آمدگی بدون

افزایش تنش صورت می‌گیرد، نقطه قطع مقاومت ماده نامیده می‌شود. بعد از آنکه نیرو

به این حد رسیده، قطع مقاومت انجام می‌گیرد. برخی مواد دو نقطه بر منحنی تنش-

کش آمدگی دارند که در آنها افزایش کش آمدگی بدون افزایش تنش انجام می‌گیرد. این

نقاط، نقاط قطع مقاومت بالایی و پایینی نامیده می‌شوند.

مقاومت نهایی یا قدرت کشسانی

طول نقطه U یعنی طول حدکثر منحنی مقاومت نهایی یا قدرت کشسانی نامیده

می‌شود.

قدرت شکست

طول نقطه B قدرت شکست ماده نامیده می شود.

ضریب مقاومت

کار انجام شده بر یک واحد حجم ماده، در مدت زمانی که یک نیروی کششی به تدریج از صفر تا مقدار محدوده تناسب ماده زیاد می شود، ضریب مقاومت ماده خوانده می شود. این ضریب را می توان با اندازه گیری مساحت زیر منحنی تنش-کش آمدگی از

مبداء تا محدوده تناسب محاسبه کرد و به صورت قسمتهای هاشور خورده در شکل

۱-۵ نمایش داده شده است. واحدهای این مقدار هستند بنابراین مقاومت یک

ماده توانایی آن برای دریافت انرژی در بازه کشسانی است.

ضریب سختی

کاری انجام شده بر یک واحد حجم از ماده در مدت زمانی که یک نیروی کششی به

تدریج از صفر به مقداری می رسد که شکست اتفاق می افتد، ضریب سختی ماده

خوانده می شود. این ضریب را می توان با محاسبه مساحت زیر منحنی بیش-

کش آمدگی از مبداء تا نقطه شکست، به دست آورد. سختی یک ماده توانایی آن برای جذب انرژي در بازه شکل پذیری آن است.

درصد تقلیل در مساحت

میزان تقلیل مساحت مقطع عرضی از نقطه، مبداء تا نقطه شکست تقسیم بر مساحت اولیه و ضرب در ۱۰۰، درصد تقلیل در مساحت خوانده می شود. باید توجه داشت که وقتی نیروهایی کششی بر میله عمل می کنند، مساحت مقطع عرضی کم می شود اما

محاسبات تنش میانگین معمولی بر مبنای مساحت اولیه صورت می گیرد. این مورد در منحنی شکل ۱-۵ نشان داده شده است. با افزایش کش آمدگی مهم است که مقادیر جدید مساحت مقطع عرضی را (که در حال تقلیل هستند) مورد توجه قرار داد و اگر این کار انجام شود منحنی واقعی تنش-کش آمدگی به دست می آید. چنین منحنی شکلی همانند شکل خط نقطه چین در شکل ۱-۵ را دارد.

درصد تغییر طول

میزان افزایش طول (طول محک) بعد از شکست تقسیم بر طول اولیه و ضرب در ۱۰۰

درصد تغییر طول نامیده می شود. هم درصد تقلیل در مساحت و هم درصد تغییر طول

عواملی تعیین کننده در میزان چکش خواری ماده هستند.

تنش فعال

خصوصیات استحکامی فوق الذکر می توانند برای انتخاب چیزی که تنش فعال نامیده

می شود مورد استفاده قرار بگیرند. در این کتاب همه تنشهای فعال در بازه کشسانی

ماده قرار خواهند داشت. چنین مقادیری معمولاً با تقسیم تنش در نقطه قطع مقاومت یا

تنش نهایی بر عددی که فاکتور امنیت خوانده می شود، به دست می آید. تعیین فاکتور

امنیت بر مبنای قضاوت و آزمایش طراح صورت می گیرد. فاکتورهای امنیت خاص

گاهی در کدهای ساخت مشخص می شوند. به سؤالهای ۱.۴، ۱.۱۲ و ۱.۱۳ مراجعه

کنید

سختی کش آمدگی

اگر یک ماده چکش خوار بتواند تنش قابل ملاحظه‌ای را فراتر از نقطه قطع مقاومت

بدون شکست تحمل کند، گفته می‌شود که در کش آمدگی سخت شده است. این

مطلب در مورد بسیاری از فلزات ساختاری درست است.

استحکام قطع مقاومت

نقطه طولی در منحنی تنش-کش آمدگی که در آن ماده بعد از برداشتن نیروها به یک

تغییر شکل پایدار معین یا «مشخص» می‌رسد، استحکام قطع مقاومت ماده خوانده

می‌شود. مقدار مشخص تغییر پایدار معمولاً کش آمدگی برابر ۰.۰۰۲ یا ۰.۰۰۳۵ در نظر

گرفته می‌شود. این مقادیر مسلماً مقادیری اختیاری هستند. در شکل ۱-۸ یک مقدار

بر محور کش آمدگی مشخص شده است و خط $O'Y$ به موازات شیب اولیه منحنی

رسم شده است. طول نقطه Y استحکام قطع مقاومت ماده را نشان می‌دهد.

ضریب تانژانت

نسبت تغییر تنش در مقایسه با کش آمدگی ضریب تانژانت ماده نامیده می شود. این

ضریبی است که ضرورتاً باید در هر لحظه اندازه گرفته شود و از طریق فرمول زیر به دست می آید:

خصایص دیگری هم برای یک ماده وجود دارند که در ملاحظات طراحی مفید هستند.

آنها ذیلاً معرفی شده اند:

ضریب بسط خطی

این ضریب به صورت تغییر طول هر واحد طول یک میله مستقیم در اثر تغییر دما برابر

یک واحد کلون تعریف می شود. مقدار این ضریب از واحد طول مستقل است اما به

واحد دما بستگی دارد. معمولاً ما از واحد کالون استفاده می کنیم، که در این صورت

ضریب با علامت نشان داده می شود، برای نمونه برای فولاد برابر است. تغییرات

دمایی همانند نیروهای وارده در یک ساختار مفروض تنشهای درونی را افزایش

می دهند.

ضریب پویسان

وقتی یک میله تحت نیروهای ساده کششی قرار می‌گیرد، در طول آن افزایشی در

جهت نیروها حاصل می‌شود، اما ابعاد جانبی عمود بر نیرو تقلیل می‌یابند. نسبت

کش آمدگی در جهت جانبی به کش آمدگی در جهت محوری ضریب پویسان خوانده

می‌شود. در این کتاب این ضریب با علامت یونانی ν نمایش داده می‌شود. برای اغلب

فلزات، این ضریب بین ۰.۲۵ و ۰.۳۵ است. به سؤالات ۱.۱۶ تا ۱.۲۰ مراجعه کنید.

شکل کلی قانون هوک

شکل ساده قانون هوک برای کشش محوری وقتی که نیروها کاملاً در جهت یک خط

راست هستند، به صورت زیر است. فقط تغییر شکل در جهت نیرو مورد توجه است:

در موارد کلی‌تر یک قطعه از ماده تحت تأثیر سه تنش عمود بر هم میانگین

است، که به ترتیب کش آمدگی‌ها را به همراه دارند. با افزودن کش آمدگی‌هایی که از

تغییرات جانبی بنا به اثر پویسان ایجاد میشوند به کش آمدگی‌های مستقیم، صورت کلی

قانون هوک به دست می‌آید.

تحلیل کشسانی در برابر تحلیل شکل پذیری

تنشها و تغییر شکلها در بازه شکل پذیر یک ماده در موارد فراوانی در ساختارهایی

خاص مورد استفاده قرار می گیرند. برخی شیوه های ساخت به بعضی اجزای ساختاری

اجازه می دهند که دچار تغییر شکل در محدوده شکل پذیر بشوند و بعضی از اجزای

ساختارهای هواپیمایی و موشکی از قصد به نحوی طراحی می شوند که در بازه

شکل پذیری باشند تا در وزن صرفه جویی شود. به علاوه، در بسیاری فرایندهای ایجاد

فلز رفتار شکل پذیر فلزات مورد استفاده هستند. برای کش آمدگی های شکل پذیر در

فولاهای ساختاری کم-کربن و با کربن متوسط، منحنی تنش-کش آمدگی تصویر ۱-۵

معمولا با دو خط راست تخمین زده می شود، یکی با شیب E ، که نشان دهنده بازه

کشسانی است، و دیگری با شیب صفر که نشان دهنده بازه شکل پذیری است. این

نمودار، که در شکل ۱.۱۰ نشان داده شده است، نشان دهنده ماده ای است که کشسان-

کاملا-شکل پذیر خوانده می شود. این نمودار کش آمدگی های بزرگتر شکل پذیر را که

در محدوده سختی کش آمدگی مانند قسمت راست نمودار تنش-کش آمدگی در تصویر

۱-۵ قرار دارند، نشان نمی دهد. به سؤال ۱.۲۱ مراجعه کنید.

طبقه بندی مواد

تمام این مبحث بر این فرض است که مواد دارای دو خصوصیت هستند. بنا به این

فرض، موادی که ما داریم:

همگن هستند: موادی که خصائص کشسانی یکسانی (E, ν) در همه نقاطشان دارند.

ایزوتروپیک هستند: یعنی موادی هستند که در هر نقطه خصوصیات کشسانی یکسانی

در همه جهات دارند. هیچ ماده‌ای ایزوتروپیک نیست. اگر ماده‌ای هر گونه

خصوصیت تقارن کشسانی را نداشته باشند، آنیوتروپیک یا گاهی آنلوتروپیک خوانده

می‌شود. چنین ماده‌ای عوض آنکه مثل یک ماده ایزوتروپیک دو ثابت مستقل کشسانی

(E, ν) داشته باشد، ۲۱ ثابت کشسانی خواهد داشت. اگر ماده دارای تقارن کشسانی

در جهت سه صفحه عمود بر هم باشد، به آن اورتوتروپیک گفته می‌شود. تعداد ثابتهای

مستقل در این مورد ۹ است. این کتاب تنها به مواد ایزوتروپیک می‌پردازد.

تأثیرات پویا

در تعیین خصوصیات مکانیکی یک ماده از طریق آزمایش کشش و فشار، سرعت وارد

کردن نیرو گاهی تأثیری به سزا بر نتایج دارد. به طور کلی مواد چکش خوار بیشترین

حساسیت را نسبت به تغییرات در سرعت ورود نیرو دارند در حالی که تأثیر سرعت

آزمایش بر مواد شکننده مانند چدن قابل چشمپوشی است. در مورد فولاد نرم، که یک ماده چکش خوار است، با افزایش سرعت ورود نیروی محوری، نقطه قطع مقاومت ممکن است تا ۱۷۰ درصد افزایش یابد. اما جالب است که در این شرایط، مجموع تغییر طول با تغییر طولهای حاصله در آزمایشهای کندتر برابر است.