بسم الله الرحمن الرحیم

محاسبات فنی تخصصی

رشتهٔ صنایع فلزی

زمینهٔ صنعت

شاخهٔ آموزش فنی و حرفه‌ای

شمارهٔ درس ۱۱۷۱

۶۲۰ کرمانشاه، محمدرضا، ۱۳۵۶

۰۰۴۲/ محاسبات فنی تخصصی/ مؤلف : محمدرضا کرمانشاه. ــ تهران : شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۹۴.

م ۸۴۲ ک/

۱۳۹۴ ۱۵۱ص. : مصور. ــ (آموزش فنی وحرفه‌ای؛ شمارهٔ درس۱۱۷۱)

متون درسی رشتهٔ صنایع فلزی، زمینهٔ صنعت.

برنامه‌ریزی و نظارت، بررسی و تصویب محتوا : کمیسیون برنامه‌ریزی و تألیف کتاب‌های درسی رشتهٔ صنایع فلزی دفتر تألیف کتاب‌های درسی فنی وحرفه‌ای و کاردانش، وزارت آموزش و پرورش.

۱. محاسبات فنی تخصصی. الف. کرمانشاه، محمدرضا. ب.ایران. وزارت آموزش و پرورش.کمیسیون برنامه‌ریزی و تألیف کتاب‌های درسی رشتهٔ صنایع فلزی. ج. عنوان. د. فروست.

۱۳۹۴

همکاران محترم و دانش‌آموزان عزیز :

پیشنهادات و نظرات خود را دربارهٔ محتوای این کتاب به نشانی تهران ـ صندوق پستی شمارهٔ ۴۸۷۴/۱۵ دفتر تألیف کتاب‌های درسی فنی و حرفه‌ای و کاردانش، ارسال فرمایید.

پیام‌نگار (ایمیل) **tvoccd@medu.ir**

وب‌گاه (وب‌سایت) **www.tvoccd.medu.ir**

محتوای این کتاب در اسفند ماه ۱۳۸۹ به استناد نظرات هنرآموزان و صاحب‌نظران رشته توسط کمیسیون تخصصی رشتهٔ صنایع فلزی مورد بازبینی و اصلاح قرار گرفت.

وزارت آموزش و پرورش

سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

برنامه‌ریزی محتوا و نظارت بر تألیف : **دفتر تألیف کتاب‌های درسی فنی و حرفه‌ای و کاردانش**

نام کتاب : **محاسبات فنی تخصصی ـ ۴۸۸/۵**

مؤلف : **محمدرضا کرمانشاه**

اعضای کمیسیون تخصصی : **نصرالله بنی‌مصطفی‌عرب، علی شاهدی، آرش حبیبی، حسن ضیغمی، بهرام زارعی، محمدرضا کرمانشاه و امید گل محله**

ویراستار فنی : **مهدی اسمعیلی، امید گل محله و منوچهر عبدالحسین توفیقی**

ویراستار ادبی : **علیرضا حبیبی**

آماده‌سازی و نظارت بر چاپ و توزیع : **ادارهٔ کلّ نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی**

تهران : خیابان ایرانشهر شمالی ـ ساختمان شمارهٔ ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)،

تلفن : ۹ـ۸۸۸۳۱۱۶۱ ، دورنگار : ۸۸۳۰۹۲۶۶، کدپستی : ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹

وب سایت : www.chap.sch.ir

مدیر امور فنی و چاپ : **لیدا نیک روش**

رسام : **کیوان افشین جو، ساغر رادنژاد**

طراح جلد : **محمدرضا کرمانشاه**

صفحه‌آرا : **راحله زادفتح‌اله**

حروفچین : **فاطمه باقری مهر**

مصحح : **معصومه صابری، پری ایلخانی‌زاده**

امور آماده‌سازی خبر : **زینت بهشتی شیرازی**

امور فنی رایانه‌ای : **حمید ثابت کلاچاهی، سیده شیوا شیخ‌الاسلامی**

ناشر : **شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران : تهران ـ کیلومتر ۱۷ جادّهٔ مخصوص کرج ـ خیابان ۶۱ (داروپخش)**

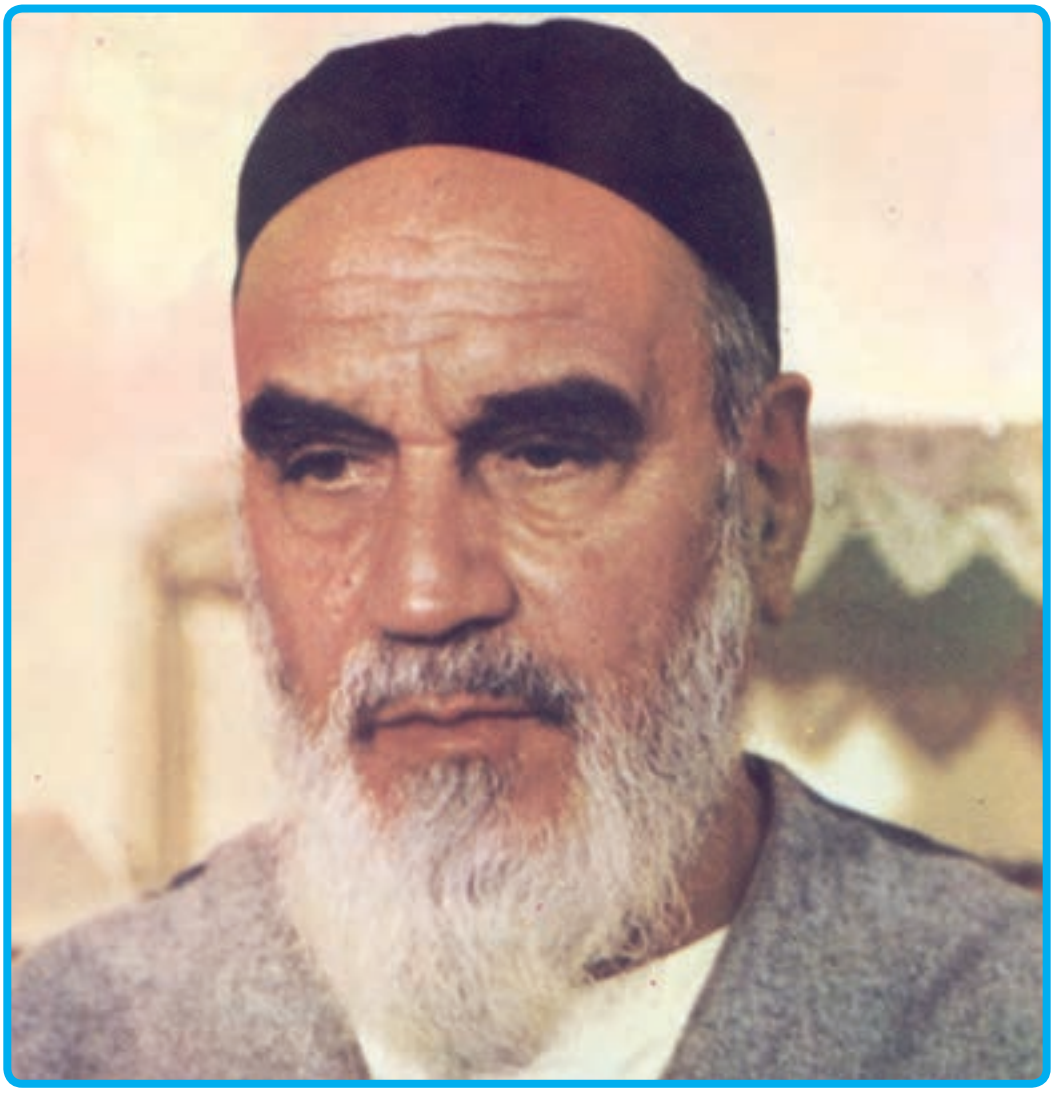
تلفن : ۵ـ۴۴۹۸۵۱۶۱، دورنگار : ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی : ۱۳۹ـ۳۷۵۱۵

چاپخانه : **شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»**

سال انتشار و نوبت چاپ : **چاپ ششم ۱۳۹۴**

حقّ چاپ محفوظ است.

شابک ۳-۱۸۷۴-۰۵-۹۶۴ ISBN 964-05-1874-3



شـــما عزیزان کوشـــش کنید که از این وابســـتگی بیرون آیید و احتیاجات کشـــور خودتان را برآورده سازید. از نیروی انسانی و ایمانی خودتان غافل نباشید و از اتّکای به اجانب بپرهیزید.

امام خمینی «قدّس سرّه الشّریف»

هدف کلی

کسب توانایی‌های انجام محاسبات مقدماتی اتصال‌ها در سازه‌های فلزی و استفاده از جدول‌های راهنما

فهرست

فصل اوّل **ایستایی** **۱**

۱ـ۱ـ مفاهیم پایه ۴
۲ـ۱ـ ویژگی‌های نیرو ۶
۱ـ۲ـ۱ـ اصل انتقال‌پذیری نیرو ۷
۳ـ۱ـ مؤلفه‌های نیرو ۸
۴ـ۱ـ برآیند نیروها ۱۱
۵ـ۱ـ گشتاور نیرو ۱۵
۶ـ۱ـ تعادل اجسام صلب ۱۷
۷ـ۱ـ نمودار جسم آزاد ۱۷
۸ـ۱ـ واکنش تکیه‌گاه‌ها ۱۹
۹ـ۱ـ انواع سازه‌ها ۲۶

فصل دوم **مکانیک مواد** **۳۵**

۱ـ۲ـ تنش‌های ساده ۴۰
۱ـ۱ـ۲ـ تنش قائم ۴۰
۲ـ۱ـ۲ـ تنش برشی ۴۲
۲ـ۲ـ استفاده از خواص مواد در طراحی ۴۶
۱ـ۲ـ۲ـ آزمایش کشش ۴۶
۲ـ۲ـ۲ـ تنش و کرنش ۴۷
۳ـ۲ـ ضریب کشسانی و قانون هوک ۵۰
۴ـ۲ـ تنش‌های مجاز ۵۲
۵ـ۲ـ ضریب اطمینان ۵۴

۶ـ۲ـ کمانش در ستون‌ها ۵۶
۷ـ۲ـ خمش در تیرها ۵۸

فصل سوم **اتصال در سازه‌های فلزی ـ اتصال‌های جوشی** **۶۳**

۱ـ۳ـ انواع اتصال ۶۶
۲ـ۳ـ اتصال جوشی ۶۸
۱ـ۲ـ۳ـ انواع جوش ۶۹
۲ـ۲ـ۳ـ اندازه جوش ۷۰
۳ـ۲ـ۳ـ تنش دراتصالات جوشی ۷۲
۴ـ۲ـ۳ـ تنش‌های مجاز جوش ۷۵
۵ـ۲ـ۳ـ روابط و جدول‌های کاربردی ۷۶
۶ـ۲ـ۳ـ آیین‌نامه‌های جوش‌کاری ۷۸

فصل چهارم **اتصال در سازه‌های فلزی ـ اتصال پیچی و اتصال پرچی** **۸۵**

۱ـ۴ـ انواع اتصالات پیچی ۹۰
۲ـ۴ـ درجه استحکام پیچ‌ها ۹۱
۳ـ۴ـ گسیختگی در اتصال پیچی ۹۲
۴ـ۴ ـ تنش در اتصال پیچی ۹۳
۱ـ۴ـ۴ـ تنش برشی در ساق پیچ ۹۳
۲ـ۴ـ۴ـ تنش کششی در ورق اتصال ۹۴
۳ـ۴ـ۴ـ تنش لهیدگی در ورق اتصال ۹۵
۵ـ۴ـ اتصال پرچی ۹۷

فصل پنجم **برش‌کاری** **۱۰۳**

۱ـ۵ـ نیروهای برشی ۱۰۷
۱ـ۱ـ۵ـ برش‌کاری با لبه‌های برشی تخت ۱۰۹
۲ـ۱ـ۵ـ برش کاری به وسیله لبه برش شیب‌دار ۱۱۰

فصل ششم **مخزن‌های جدار نازک** **۱۱۳**

۱ـ۶ـ تنش در جداره‌های مخزن ۱۱۶
۱ـ۱ـ۶ـ تنش در مقطع طولی ۱۱۷
۲ـ۱ـ۶ـ تنش در مقطع عرضی ۱۱۷
۲ـ۶ـ طراحی مخزن استوانه‌ای با کمک نمودار ۱۱۸

پاسخ تمرین‌ها **۱۲۳**

پیوست‌ها **۱۲۹**

فهرست منابع **۱۵۱**

مقدمه

شالوده و اساس علوم مهندسی، محاسبات است. این درس ابزار و زبان مشترک متخصصین رشته‌های فنی و مهندسی در حوزه‌های کاری مختلف می‌باشد. بنابراین هنرجویان عزیز باید بدانند برای موفقیت در هر رشته فنی و هر رشته شغلی، لازم است اصول و مبانی دریافت اطلاعات فنی، پردازش آنها و نیز گزارش آن را فرا بگیرند. از این‌رو توجه ویژه به مطالب کتاب که در برگیرنده اصول و مفاهیم علم مکانیک، متناسب با رشته تخصصی صنایع فلزی می‌باشد، می‌تواند زمینه را برای موفقیت بیشتر ایشان در تحصیل و کار فراهم نماید.

کتاب حاضر در امتداد مطالبی که در درس‌های محاسبات فنی (۱) و فیزیک (۲) تدریس شده است، شامل شش فصل است. در فصل اوّل، اصول و مبانی ایستایی ارائه می‌گردد و در فصل دوم خواص مکانیکی مواد که در طراحی سازه‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، بیان می‌شود.

درفصل‌های سوم و چهارم هنرجو به ترتیب با مفاهیم طراحی اتصال جوشی، پیچی و پرچی در سازه‌های فلزی آشنا می‌شود. فصل پنجم به محاسبه نیروی برش اختصاص یافته و در فصل ششم هنرجو براساس آنچه در بخش‌های قبلی فرا گرفته است با مبانی طراحی مخزن‌های جدار نازک به عنوان یکی از سازه‌های پرکاربرد درصنایع فلزی آشنا می‌شود.

در تألیف کتاب جدید سعی شده است مطالب به زبان ساده، با تأکید بر درک مفاهیم اساسی به منظور افزایش اطلاعات علمی و فنی، متناسب بارشته صنایع فلزی ارائه گردد. بنابراین انتظار می‌رود هنرآموزان گرانقدر در تدریس و ارزشیابی مطالب سعی نمایند با طرح مسائل صنعتی و ارائه مثال‌های کاربردی، زمینه بهره‌برداری عملی از مباحث مطروحه در کتاب را فراهم نمایند و از پرداختن به جنبه‌های حفظی مطالب پرهیز شود.

به منظور نزدیک شدن به این مقصود درابتدای هرفصل هدف‌های رفتاری و حد مورد انتظار جهت تغییر رفتار فراگیران گرامی آورده شده است و درانتهای فصل چند سوال با هدف ارزیابی تغییر رفتاری ایشان ارائه شده است. ذکر این نکته ضروری است که مطالب مطرح شده در حاشیه کتاب در جهت دانش‌افزایی هنرجویان و جلب توجه ایشان به کاربردهای واقعی محاسبات است و توصیه می‌شود در امتحانات مورد ارزشیابی مستقیم قرار نگیرند.

در ضمن بهتر است هنرآموزان محترم در پایان تدریس مفاهیم و روابط هر مبحث، مسائل و مثال‌هایی متناسب را طرح و حل کنند و مطالعه تمرین‌های نمونه حل شده در کتاب را به هنرجویان واگذار نمایند.

انتظار می‌رود هنرآموزان ارجمند با انجام و اجرای برنامه‌ریزی دقیق درخصوص جلسات آموزش، تمرین و ارزشیابی و نیز تشویق هنرجویان به تحقیق در قالب فعالیت‌های فردی و گروهیِ درون و برون کلاس و ارائه دستاورد آن در کلاس، محتوای کتاب را هرچه پربارتر و اثربخشی آن را افزون‌تر نمایند.

امید است که با تلاش پیگیر هنرآموزان و هنرجویان عزیز، این درس باعث ایجاد بینش جدیدی به مسائل در حوزه‌های فنی شده و پشتوانه‌ای مناسب برای تجزیه و تحلیل مسائل و پروژه‌هایی باشد که در صنعت با آن روبه‌رو خواهند شد.

فصل ۱

ایستایی

هدف‌های رفتاری فصل اول :

آیا می‌توانید نیروهای وارد شده به یک جسم را تجزیه و تحلیل کنید؟
آیا انواع تکیه‌گاه‌ها را می‌شناسید و عکس‌العمل آنها را می‌دانید؟
آیا می‌توانید نیروهایی که برای حفظ حالت تعادل به تکیه‌گاه‌های جسم وارد می‌شوند را محاسبه کنید؟

پس از پایان این درس از هنرجو انتظار می‌رود که :

- مفاهیم اولیه فیزیک و مکانیک را بیان کند.
- نیرو و قوانین مربوطه در سازه را توضیح دهد.
- مؤلفهٔ نیرو و برآیند نیروها را محاسبه کند.
- گشتاور نیرو را محاسبه کند.
- قوانین تعادل ایستایی را شرح دهد.
- نیروی عکس العمل تکیه‌گاه‌ها را شرح دهد.
- نمودار جسمِ آزاد را ترسیم کند.
- معادلات تعادل استاتیکی را بر اساس نمودار جسمِ آزاد بیان کند.
- مجهول‌ها و عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی را محاسبه نماید.
- انواع سازه‌های فلزی را تمیز داده و کاربرد آن را شرح دهد.

مدت زمان آموزش :

- ۱۴ ساعت

مقدمه

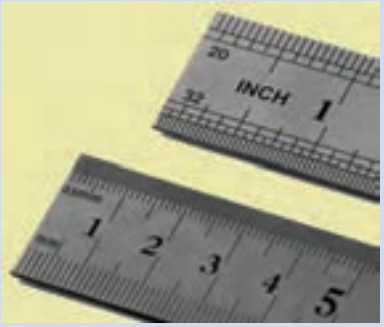
مکانیک بخشی از دانش فیزیک است. سرآغاز این رشته در تاریخ با شروع مهندسی هم‌زمان است و هم‌چنان هیچ رشته‌ای از علوم به اندازه مکانیک در محاسبات مهندسی نقش ندارد. مکانیک را علمی تعریف کرده‌اند که شرایط سکون یا حرکت اجسامِ تحت تأثیر نیروها را پیش‌بینی و توصیف می‌کند. علم مکانیک به دو بخش ایستایی و پویایی قابل تقسیم است. ایستایی به بررسی اجسام در حالت تعادل می‌پردازد و پویایی به بررسی اجسام در حرکت شتاب دار مربوط است. مباحث این کتاب در مورد «ایستایی» است.

۱ــ ایستایی

به پیرامون خود نگاه کنید درختان، ساختمان‌ها، تجهیزات وحتی قاب عکس روی دیوار همه درحالتی پایدار قرار دارند و تا وقتی که تعادل خود را حفظ کنند پایدار باقی می‌مانند. ساختمانی که در مجاورتش خاکبرداری غیراصولی انجام شده باشد ممکن است تعادل خود را از دست بدهد و فرو بریزد. ایستایی به بررسی شرایط تعادل و نیروها در اجسام می‌پردازد.

۱ــ۱ــ مفاهیم پایه

پیش از این با بسیاری از مفاهیم علم مکانیک در درس‌های علوم، فیزیک و محاسبات فنی آشنا شده‌اید. از آنجا که این مفاهیم به طور مرتب، در این کتاب استفاده خواهند شد، درک درستی از آنها لازم است. در اینجا برای یاد آوری به تعریف چند مفهوم پایه اشاره می‌شود :



● **طول :** طول اندازه یک خط در راستای مستقیم یا منحنی است. برای نمونه قطرِ یک دایره طولِ خط مستقیمی است که دایره را به دو قسمت مساوی تقسیم می‌کند یا محیطِ دایره طولِ پیرامون آن است. یکای اندازه‌گیری طول در دستگاه بین‌المللی یکاها متر(m) است. البته برای اندازه‌گیری طول از یکاهای دیگری مانند میلی‌متر (mm)، سانتی‌متر (cm) واینچ (in) نیز استفاده می‌شود.

● **سطح :** سطح اندازه دو بعدی یک شکل هندسی یا رویه یک جسم است. شکل هندسی ممکن است تخت یا خمیده باشد. یکای اندازه‌گیری سطح در SI متر مربع (m^2) است. برای اندازه‌گیری سطوح بزرگتر از یکایی مانند کیلومتر مربع (Km^2) استفاده می‌شود و در سطوح کوچکتر از یکایی مانند سانتی‌متر مربع (cm^2) استفاده می‌شود.

● **حجم :** اندازه سه بعدی یا فضایی که توسط یک ماده اشغال شده است حجم نامیده می‌شود. برای نمونه مقدار آبی که در یک مخزن ذخیره وجود دارد. یکای اندازه‌گیری حجم در دستگاه SI متر مکعب (m^3) است. برای اندازه‌گیری حجم از یکاهای دیگری مانند (cm^3) و (mm^3) استفاده می‌شود.

● **نیرو :** به هرگونه عملی که بر روی جسمی انجام شود و در آن تمایل به جابه‌جایی یا تغییر سرعت حرکت یا تغییر شکل و اندازه را سبب شود، نیرو می‌گویند. به نیرویی که از اثر گرانش زمین بر جرم مواد ایجاد می‌شود وزن می‌گویند. وزن اجسام را با حرف W نشان می‌دهند. نیرو معمولاً به صورت کششی یا فشاری است مانند فشار دادن یک جسم با دست یا کشیدن آن با طناب. پرکاربردترین یکاهای اندازه‌گیری نیرو در SI نیوتن (N) و کیلوگرم نیرو (kgf) هستند.

● **فشار :** نیروی خارجی وارد شده بر واحد سطح، فشار نامیده می‌شود، مانند فشار آب که به دیواره سدها وارد می‌شود. یکای اندازه گیری فشار در دستگاه SI پاسکال (Pa) است.

● **جرم :** به مقدار مادهٔ موجود در یک جسم، جرم می‌گویند. یکای اندازه‌گیری جرم در دستگاه SI کیلوگرم (kg) است.

● **چگالی :** چگالی جرم واحد حجم ماده است. برای نمونه یک سانتی‌متر مکعب آهن ۷/۸ گرم وزن دارد. می‌گوییم چگالی آهن $۷/۸\frac{g}{cm^3}$ است. یکای اندازه‌گیری چگالی در دستگاه SI، کیلوگرم بر متر مکعب $\frac{kg}{m^3}$ است.

● **جسم صلب :** وقتی در مقابل اعمال نیرو، اندازه و شکل جسم تغییر نکند، می‌گوییم جسم صلب است.

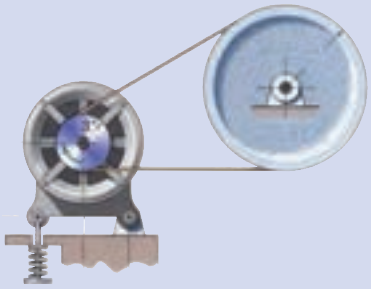
بررسی کنید

ارتباط مفاهیم مطرح شده در این بخش با تصویر بالا را در گروه خود بررسی کنید.

وزن برفی که بر روی یک ساختمان نشسته، باری است که به سقف اعمال می‌شود.

جسم صلب در مقابل اعمال نیرو، تغییر شکل و اندازه نمی‌دهد.

● **گشتاور :** به اثر چرخشی نیرو، حول یک نقطه معین گشتاور می‌گویند. عمل یک تسمه بر روی پولی که باعث چرخیدن آن می‌شود گشتاور است. همچنین اگر یک گچ تحریر را از دو انتها بگیرید و دستانتان را در دو جهت مخالف بپیچانید، گشتاوری به وجود می‌آید که باعث چرخیدن و احتمالاً شکستن گچ می‌شود. یکای گشتاور در دستگاه SI، نیوتن متر(N.m) می‌باشد.



به اثر چرخشی نیرو، حول یک نقطه معین گشتاور می‌گویند.

● **کار :** اگر نیرویی بر جسمی وارد شود و آن را به حرکت درآورد، کار انجام شده است. وقتی کار انجام می‌شود، انرژی از نوعی به نوع دیگر تبدیل می‌شود.

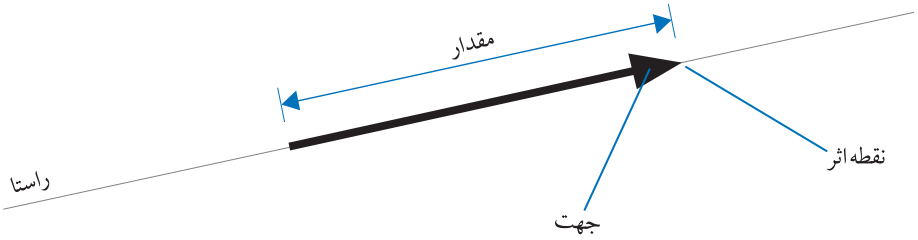
اگر نیرویی بر جسمی وارد شود و آن را به حرکت درآورد می‌گوییم کار انجام شده است.

● **توان :** انرژی تبدیل شده یا کار انجام شده در واحد زمان، توان نامیده می‌شود. یکای اندازه‌گیری توان، وات (W) می‌باشد. برای نمونه مقدار مشخصی انرژی برای بالابردن یک آسانسور لازم است. یک الکتروموتور با توان ۵kW می‌تواند این کار را انجام دهد اما یک الکتروموتور ۲۰kW این کار را چهار بار سریع‌تر انجام می‌دهد.

۲ــ۱ــ ویژگی‌های نیرو

می‌دانیم که نیرو یک کمیت برداری است. کمیت‌های برداری دارای سه ویژگی مقدار، راستا و جهت هستند. برای معرفی کامل یک نیرو، علاوه بر سه مورد فوق، نقطه اثر نیرو نیز باید مشخص شود.

راستا، خط راست و نامحدودی است که نیرو در امتداد آن وارد می‌شود.



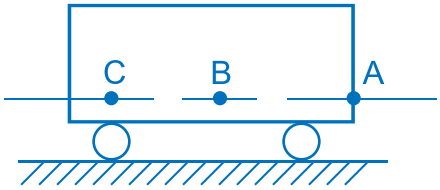
شکل ۱ــ۱

در شکل ۲ــ۱ــ الف فردی نمایش داده شده که تلاش می‌کند با ریسمان، جعبه‌ای را روی زمین بکشد. در شکل ۲ــ۱ــ ب راستای نیرو با خط AB، جهت آن با پیکان، مقدار نیرو با طول بردار AB (متناسب با اندازه نیرو) مشخص شده‌اند.

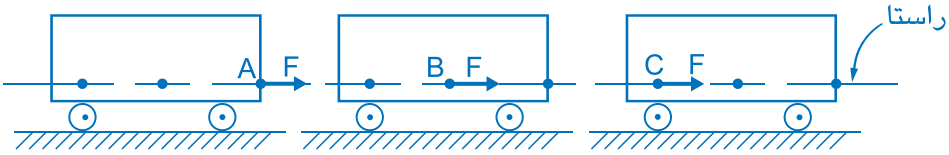
(الف) (ب)

شکل ۲ــ۱

۱ــ۲ــ۱ــ اصل انتقال‌پذیری نیرو : بنابراصل انتقال پذیری نیرو، می‌توان نیروی وارد بر نقطه معلومی از یک جسم صلب را به وسیله نیروی دیگری که با نیروی اول از لحاظ مقدار، جهت و راستا برابر بوده ولی نقطه اثر آن متفاوت است جایگزین کرد. جسم نشان داده شده درشکل ۳ــ۱ را در نظر بگیرید. این جسم با نیروی افقی F کشیده می‌شود. نیرو به هر یک از نقاط A، B و C که وارد شود تأثیر یکسانی دارد. بنابراین ملاحظه می‌شود که جابجایی نیرو با حفظ راستا و جهت نیرو تأثیری در وضعیت تعادل یا حرکت جسم بوجود نمی‌آورد، به شکل ۴ــ۱ توجه کنید.



شکل ۳ــ۱ــ نیرو می‌تواند از سه نقطه به ارابه اعمال شود.



شکل ۴ــ۱ــ انتقال پذیری نیروبا حفظ راستا وجهت

کمیت‌های برداری و عددی

کمیت‌هایی که فقط با مقدار مشخص می‌شوند، عددی (نرده‌ای) هستند. برای مثال ۱۰۰ ریال، ۵ متر، ۱۸ درجه سلیوس و ۶۰ وات کمیت‌های عددی هستند.

کمیت‌های برداری علاوه بر داشتن مقدار، راستا و جهت نیز دارند.

برای مثال : سرعت (مقدار ۹۵km/h؛ راستا : اتوبان شیراز ــ اصفهان، جهت از شیراز به طرف اصفهان)

نیرو نیز یک کمیت برداری می‌باشد.

یک کمیت برداری با خطی که یک پیکان جهت آن را مشخص می کند نمایش داده می‌شود. طول خط (که با مقیاس مشخص ترسیم شده است) مقدار کمیت را مشخص می‌کند. خط و پیکان روی آن راستای کمیت را مشخص می کنند.

اهمیت یکاها

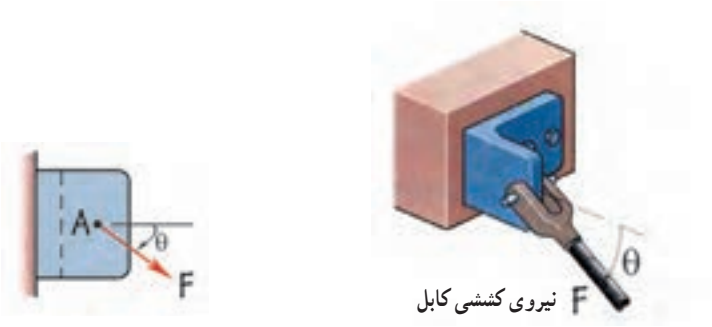
در بررسی کمیت‌ها، علاوه بر دقت در مورد مقدار آنها باید به یکای کمیت نیز توجه شود. برای مثال اگر طول راهی با عدد ۳۰ بیان شود، بی‌معنی است! آیا منظور ۳۰ سانتی‌متر، ۳۰ متر و یا ۳۰ کیلومتر بوده است؟ بنابراین اندازه یک کمیت باید شامل مقدار و یکا باشد.

۳ــ۱ــ مؤلفه‌های نیرو

هر نیرو را می‌توان به دو مؤلفه تجزیه نمود به نحوی که تأثیر همزمان این مؤلفه‌ها، اثر خود نیرو را داشته باشد. به طور معمول، نیرو را در دو راستای عمود بر هم x و y تجزیه می‌کنند، مؤلفه افقی را با اندیس x و مؤلفه عمودی را با اندیس y نمایش می‌دهند.

برای به دست آوردن مؤلفه‌های نیرو دو روش ترسیمی و محاسباتی بیان می‌شود.

در شکل ۵ــ۱ــ الف کابل با نیروی F کشیده می‌شود. برای تعیین مؤلفه های نیروی F در نمای نشان داده شده در شکل ۵ــ۱ــ ب به هر دو روش به این ترتیب عمل می‌شود.

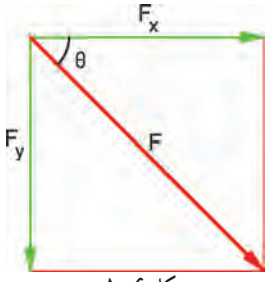


(ب) (الف)

شکل ۵ــ۱

الف) راه‌حل ترسیمی : در این روش با انتخاب مقیاس مناسب، نیروی F را در راستای اصلی ترسیم نموده و با استفاده از خطوط عمود بر محورها، مؤلفه‌های افقی و عمودی نیرو را ترسیم می‌نماییم. با اندازه‌گیری طول آنها و با در نظر گرفتن مقیاس به کار رفته در ترسیم، اندازهٔ مؤلفه‌های نیرو به دست می‌آید. در حل ترسیمی تمرین نمونه ۱ــ۱ مراحل محاسبه مؤلفه‌های نیرو با روش ترسیمی نشان داده شده است.

ب) راه‌حل محاسباتی : همانگونه که در گذشته آموخته‌اید اندازهٔ مؤلفه‌های عمودی نیروی F که با محور x زاویه θ را می‌سازد به کمک روابط زیر محاسبه می‌شود.



شکل ۶ــ۱

رابطه ۱ــ۱ $F_x = F \times \cos\theta$

رابطه ۱ــ۲ $F_y = F \times \sin\theta$

توجه داشته باشید که در روابط فوق زاویه نیرو با محور xها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

دراین کتاب از دستگاه بین‌المللی یکاها (SI) استفاده شده است. دراین دستگاه یکاها عبارتند از :

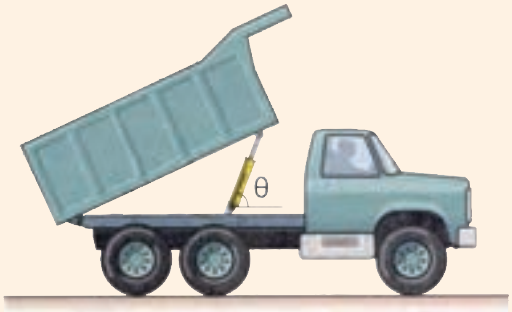
کمیت	یکا	نشان
طول	متر	m
جرم	کیلوگرم	kg
زمان	ثانیه	s
نیرو	نیوتن	N

پیشوندها در سیستم SI عبارتند از:

ضریب	پیشوند	نشان
10^{9}	گیگا	G
10^{6}	مگا	M
10^{3}	کیلو	k
10^{-3}	میلی	m
10^{-6}	میکرو	μ
10^{-9}	نانو	n

نشان یکاها همواره با حروف کوچک انگلیسی نشان داده می‌شوند، مگر آنکه یکا از نام دانشمندی گرفته شده باشد مانند : N (نیوتن) و Pa (پاسکال) و یا پیش از آن حروف کوچک، برای یکای دیگری استفاده شده باشد. برای نمونه g نشانه گرم است پس گیگا را با G نشان می‌دهند.

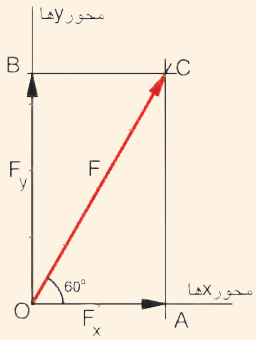
تمرین نمونه ۱ــ۱ : در یک کامیون حمل بار، جک هیدرولیکی مطابق شکل زیر نیرویی برابر ۴۰kN در امتداد خود به باری که بلند می‌کند اعمال می‌نماید. مؤلفه‌های افقی F_x و عمودی F_y این نیرو را زمانی که زاویه $\theta = ۶۰^\circ$ است، محاسبه کنید.



شکل ۷ــ۱

راه‌حل روش ترسیمی : در این روش ابتدا مقیاس مناسب را انتخاب می‌کنیم. با توجه به بزرگی نیرو مقیاس ۱mm : ۱kN، مناسب به نظر می‌رسد. بنابراین ۴۰mm : ۴۰kN می‌باشد. حال راستای ۶۰° را ترسیم نموده و سپس بر روی آن نیروی F را به اندازه ۴۰mm جدا می‌کنیم. در محل تقاطع خطوط عمود اخراج شده از انتهای نیرو و محورهای مختصات x و y، انتهای مؤلفه‌های Fx و Fy به دست می‌آیند. با اندازه‌گیری مقدار آنها و با در نظر گرفتن مقیاس فرض شده، بزرگی نیروها به دست می‌آید :

مقیاس ترسیم 10kN / 10mm



شکل ۸ــ۱

$$\overline{OA} = ۲۰mm \xrightarrow{۱kN:۱mm} \boxed{F_x = ۲۰kN}$$

$$\overline{OB} = ۳۴/۵mm \xrightarrow{۱kN:۱mm} \boxed{F_y = ۳۴/۵kN}$$

راه‌حل روش محاسباتی : می‌دانیم زمانی که θ زاویه بین نیرو و راستای افق باشد؛ برای محاسبه مؤلفه‌های عمودی و افقی نیرو داریم :

$$F_y = F \times \sin\theta \qquad F_x = F \times \cos\theta$$

داریم $\theta = ۶۰^\circ$ پس :

$$F_y = F \times \sin ۶۰^\circ \qquad F_x = F \times \cos ۶۰^\circ$$

$$F_y = ۴۰ \times \frac{\sqrt{۳}}{۲} \qquad F_x = ۴۰ \times \frac{۱}{۲}$$

$$\boxed{F_y = ۳۴/۶kN} \qquad \boxed{F_x = ۲۰kN}$$

با مقایسه پاسخ‌های دو راه‌حل فوق مشاهده می‌شود که از یک سو راه‌حل محاسباتی دقیق‌تر است و از سوی دیگر میزان دقت راه‌حل ترسیمی، به اندازه دقت ترسیم و مقیاس استفاده شده است.

نکات محاسباتی

دقت عددی

داده‌هایی که در محاسبات فنی استفاده می‌شوند از نظر دقت بسیار متفاوت هستند، لذا در حل مسائل فنی باید دقت مورد نیاز برای حل مسائل تعیین شود. امروزه با استفاده هرچه بیشتر از ماشین حساب برای انجام محاسبات ریاضی، بسیار اتفاق می‌افتد که بعد از مجموعه‌ای از ضرب و تقسیم‌ها، پاسخ مسأله بسیار دقیق‌تر از اطلاعات اولیه ارائه شده برای حل مسأله است.

برای نمونه اگر هدف تقسیم یک لوله ۱۴متری به سه قسمت باشد، ماشین حساب عدد ۴/۶۶۶۶۶۷ را نشان می‌دهد. جواب مسأله درحالی با **دقت میکرومتر** بیان شده است که اندازه اولیه لوله با **دقت متر** ارائه شده است. از سوی دیگر توجه داشته باشید که «اعشار» به تنهایی نشان دهنده دقت عدد نیست. به عنوان مثال تمام اعداد زیر با تغییر یکا اندازه‌گیری بیان‌گر یک اندازه هستند : ۳۰۷۵ ، ۳۰۷/۵ ، ۰/۳۰۷۵ ، ۰/۰۰۳۰۷۵ ، $۳/۷۰۵ \times ۱۰^{۶}$

یکی از راه‌های پرهیز از بیان پاسخ‌ها با دقت بیش از نیاز، بهره‌گیری از **ارقام معنی‌دار** است. در مثال فوق چهار رقم ۳، ۰ ، ۷ و۵ معنی‌دار هستند و صفرهای پیش از اولین رقم و بعد از اولین رقم، با تغییر یکا، ثابت نیستند. بنابراین دقت عدد فوق در تمامی پنج صورت گفته شده تا چهار رقم معنی‌دار است. در مثال تقسیم لوله اطلاع اولیه مسأله (عدد۱۴)، دو رقم معنی‌دار دارد، بنابراین پاسخ ۴/۷ از دقت کافی برخوردار است. در اغلب مسائل فنی به دقتی بیشتر از **سه رقم معنی‌دار** نیاز نیست.

گردکردن عددها

برای تبدیل عددی با دقت صدم (تا دو رقم اعشار) به عددی با دقت دهم (تا یک رقم اعشار) چه باید کرد؟ در اینجا روش گردکردن اعداد یادآوری می‌شود :

الف) اگر رقمی که باید حذف شود، برابر ۵ یا بزرگ‌تر از آن باشد، یک واحد به رقمِ پیش از آن اضافه می‌شود. برای نمونه ۳۶/۴۸ می‌شود ۳۶/۵

ب) اگر رقمی که باید حذف شود، کوچکتر از ۵ باشد، بدون تغییری در رقمِ پیش از آن، حذف می‌شود. برای نمونه ۳۶/۴۲ می‌شود ۳۶/۴

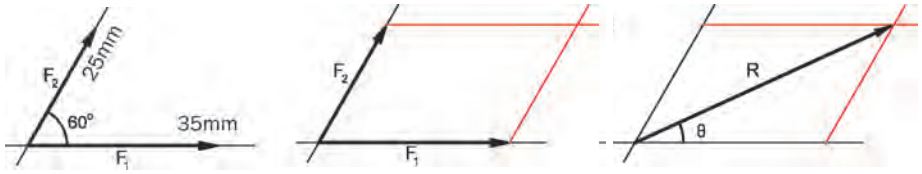
۴ــ۱ــ برآیند نیروها

گفتیم که نیروی وارد بر یک جسم، تمایل به حرکت در راستای نیرو را به وجود می‌آورد. حال اگر به جسمی در جهت‌های مختلف نیرو وارد شود، جسم در کدام جهت تمایل به حرکت خواهد داشت؟

شکل ۹ــ۱

برای به دست آوردن مجموع تأثیر نیروهای مختلف بر یک جسم، برآیند نیروها را محاسبه می‌کنند. برآیند نیروها را با R یا ΣF نمایش می‌دهند.

الف) روش ترسیمی (متوازی الاضلاع) : برای محاسبه برآیند دو نیرو می‌توان از روش متوازی الاضلاع استفاده کرد. در این روش ترسیمی، ابتدا بردارهای نیرو متناسب با بزرگی آنها و در راستای معین رسم می‌شوند، سپس با استفاده از دو خط کمکی، متوازی الاضلاعی بر روی دو نیرو ساخته می‌شود. قطری در متوازی‌الاضلاع که از محل تلاقی دو نیرو می‌گذرد، بزرگی و جهت برآیند دو بردار را مشخص می‌کند. در شکل ۱۰ــ۱ مراحل مختلف ترسیم برآیند (R) دو بردار $F_1 = ۳۵N, F_2 = ۲۵N$ با زاویه ۶۰° نشان داده شده است.

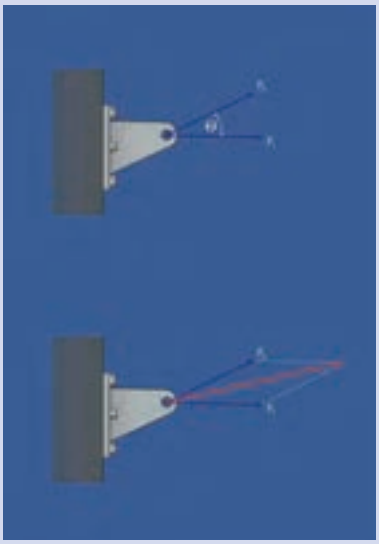


۱) ترسیم نیروها در راستای صحیح و با مقیاس مناسب ۳۵mm

۲) ترسیم متوازی الاضلاع با استفاده ازخطوط کمکی

۳) به دست آوردن راستا، جهت و مقدار نیروی برآیند با ترسیم قطر گذرنده از محل تقاطع دو نیرو

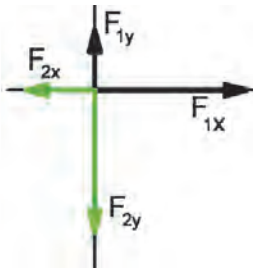
شکل ۱۰ــ۱



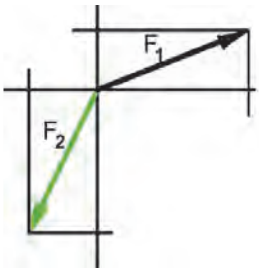
برآیند نیروهای وارد به قلاب به روش ترسیمی به‌دست آمده است.

ب) روش تجزیه : روش متوازی الاضلاع برای محاسبه برآیند دو نیرو مناسب است، اما زمانی که سه یا چند نیرو به جسمی وارد می‌شوند استفاده از روش تجزیه توصیه می‌شود.

در این روش ابتدا نیروها از مبدأ مختصات رسم شده و مؤلفه‌های هر یک از آنها بر روی محورهای مختصات محاسبه می‌شود. سپس روی هر یک از دو محور x و y برآیند مؤلفه‌های افقی و عمودی همه نیروها محاسبه می‌شود. پس از آن با استفاده از قانون فیثاغورث برآیند کلی نیروها محاسبه می‌شود. در شکل ۱۱ــ۱ مراحل مختلف این روش نشان داده شده است.

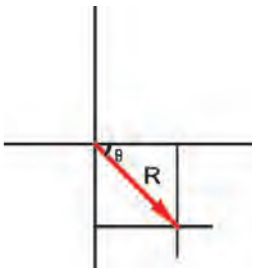


۳)ترسیم مؤلفه‌های افقی و عمودی نیروها

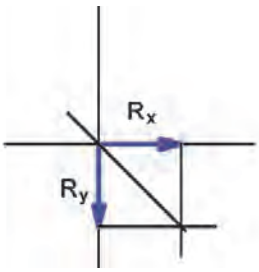


۲) ترسیم خطوط کمکی برای به‌دست آوردن مؤلفه نیروها

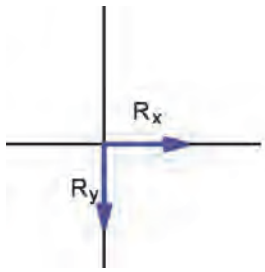
۱)ترسیم نیروها در راستای درست و مشخص کردن جهت و بزرگی آنها با مقیاس مناسب



۶) ترسیم راستای بردار برآیند و مشخص کردن بزرگی و جهت آن



۵) ترسیم خطوط کمکی برای به‌دست آوردن بردار برآیند



۴) ترسیم برآیند مؤلفه‌های افقی بر روی محورxها و برآیند مؤلفه‌های عمودی بر روی محور yها

شکل ۱۱ــ۱

برای ترسیم اندازه دقیق بردار بر روی راستای آن می‌توانید از پرگار استفاده کنید. در روش متوازی‌الاضلاع نیز می‌توانید از این ابزار برای ترسیم دقیق متوازی‌الاضلاع بهره بگیرید.

در این روش بزرگی نیروی برآیند براساس قانون فیثاغورث از رابطه زیر به دست می‌آید :

رابطه ۳ــ۱

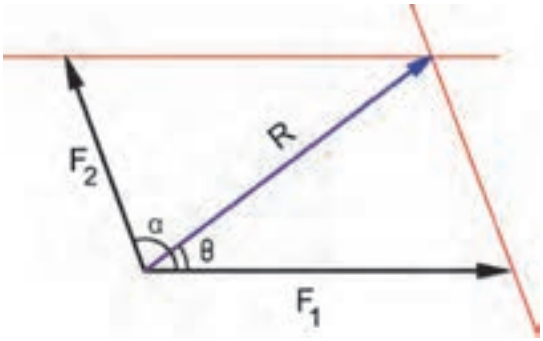
$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$$

رابطه ۴ــ ۱

$$\tan\theta = \frac{R_y}{R_x}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{R_y}{R_x}\right)$$

ج) روش محاسباتی : روش محاسبات یکی دیگر از روش‌های به دست آوردن برآیند نیروها است. برای به دست آوردن برآیند دو نیروی F_1 و F_2 که با یکدیگر زاویه α می‌سازند از رابطه زیر استفاده می‌شود.



شکل ۱۲ــ۱

رابطه ۵ــ۱

$$R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\alpha}$$

برای تعیین زاویه بردار نیروی برآیند با یکی از دو نیروی اولیه (مثلاً F_1) از رابطه ۶ــ۱ استفاده می‌شود.

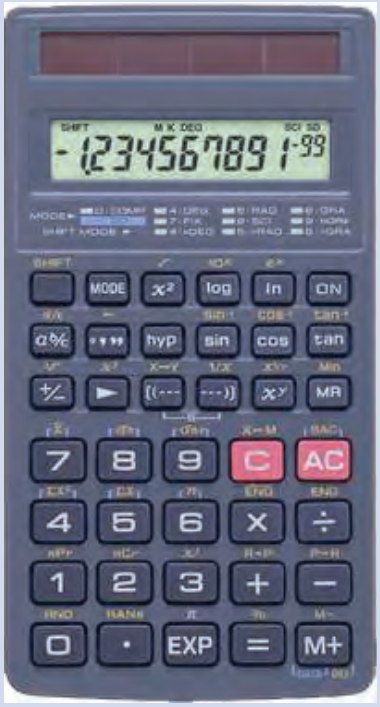
رابطه ۶ــ۱

$$\sin\theta = \frac{F_2 \times \sin\alpha}{R}$$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{F_2 \times \sin\alpha}{R}\right)$$

برای محاسبات توابع مثلثاتی می‌توانید از ماشین حساب استفاده کنید یا به پیوست (الف ــ۲) مراجعه نمایید.

به راستای بردار برآیند و زنجیر عمودی دقت کنید.

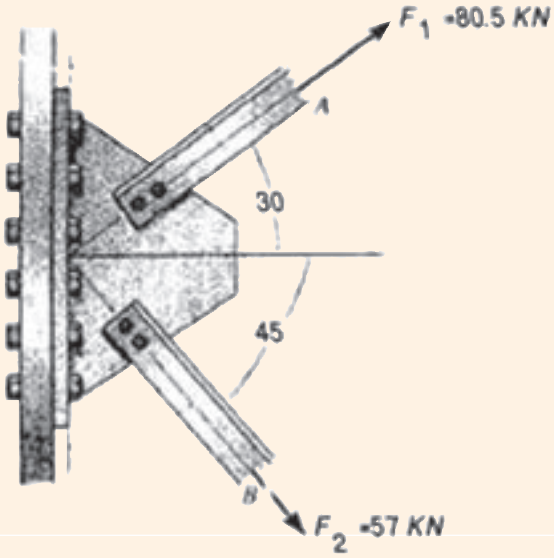


با استفاده از ماشین حساب مهندسی به راحتی می‌توان تانژانت هر زاویه دلخواه ($\tan\alpha$) را به‌دست آورد. از سوی دیگر با داشتن مقدار tan یک زاویه مجهول می‌توان مقدار آن زاویه را تعیین نمود.

تمرین نمونه ۲ــ۱ : برآیند نیروهای وارد بر نبشی‌های پایه یک دکل نفتی در خلیج فارس را با هر دو روش ترسیمی و محاسباتی به‌دست آورید.

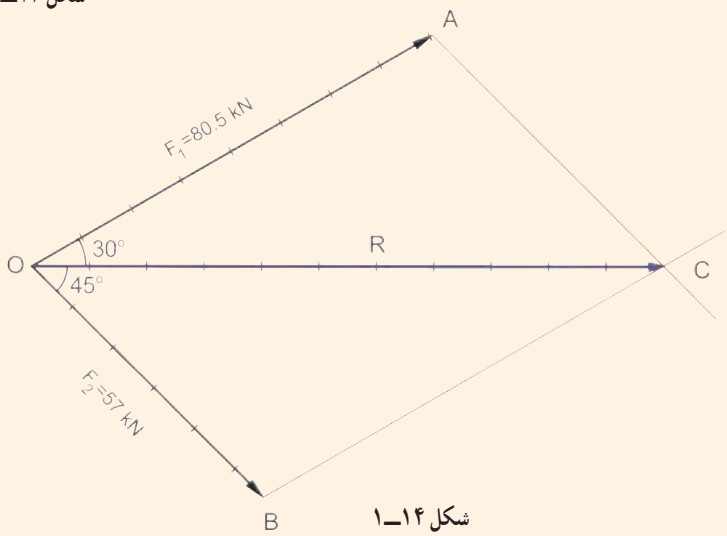
راه‌حل روش ترسیمی : با توجه به بزرگی نیروها مقیاس ۱mm : ۱kN مناسب است. با این مقیاس و راستای نشان داده شده برای آنها، بردارهای نیرو را ترسیم می‌نماییم. با استفاده از روش متوازی‌الاضلاع از انتهای هریک از بردارها خطی موازی نیروی دیگر رسم می‌نماییم. از برخورد این خطها متوازی الاضلاعی تشکیل می‌شود که قطر گذرنده از محل برخورد دو نیرو، اندازه و راستای بردار برآیند را نشان می‌دهد.

$$\overline{OC} = ۱۱۰\text{mm} \xrightarrow{۱\text{kN}:۱\text{mm}} \boxed{\overline{R} = ۱۱۰\text{kN}}$$



شکل ۱۳ــ۱

مقیاس ترسیم : 10kN / 10mm



شکل ۱۴ــ۱

راه‌حل روش محاسباتی : ابتدا زاویه بین دو نیرو را محاسبه می‌نماییم ($\alpha = ۳۰^\circ + ۴۵^\circ = ۷۵^\circ$) سپس با استفاده از رابطه ۵ــ۱ داریم :

$$R = \sqrt{(F_۱)^۲ + (F_۲)^۲ + ۲F_۱F_۲\cos\alpha}$$

$$R = \sqrt{۸۰/۵^۲ + ۵۷^۲ + ۲\times ۸۰/۵\times ۵۷\times \cos ۷۵^\circ} = \sqrt{۱۲۱۱۵}$$

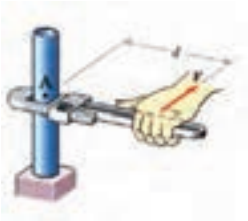
$$\boxed{R = ۱۱۰\text{kN}}$$

ــ پاسخ‌های دو راه‌حل را با یکدیگر مقایسه نمایید.

۵ــ۱ــ گشتاور نیرو

برای بررسی کامل اثر نیروهایی که بر یک جسم وارد می‌شوند لازم است تا تمایل به چرخیدنی که در جسم به وجود می‌آید نیز بررسی شود. همان‌گونه که می‌دانید گشتاور معیاری برای اثر چرخشی نیرو حول یک نقطه معین است و به صورت زیر تعریف می‌شود :

رابطه ۷ــ۱ $M = F \times d$



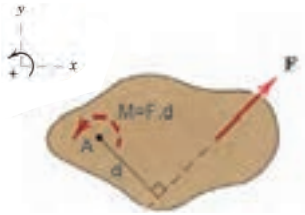
شکل ۱۵ــ۱

که در آن :

M : گشتاور نیرو با یکاهای N.m, N.cm و . . . .

F : نیرو با یکاهای، N و . . . . .

D : بازوی گشتاور با یکاهای m، cm و . . . . .

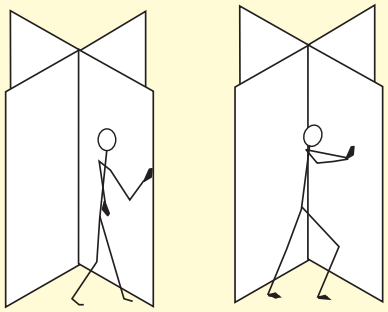


شکل ۱۶ــ۱

گشتاور اعمال شده به یک جسم ممکن است جسم را در جهت ساعت‌گرد یا پادساعت‌گرد بچرخاند. در این کتاب گشتاور ساعت‌گرد با علامت منفی و گشتاور پادساعت‌گرد با علامت مثبت نشان داده شده است.

تجربه کنید

در رابطه ۷ــ۱ ملاحظه می‌شود که گشتاور نیرو علاوه بر مقدار نیرو، ارتباط مستقیمی با طولِ بازویِ گشتاور دارد که با انجام یک آزمایش ساده می‌توان آن را تجربه کرد. در مقابل یک در لولایی بزرگ بایستید و با یک انگشت در نزدیکی دستگیره در، در جهت بازکردن یا بستن آن نیرو وارد کنید. در دفعات بعد به تدریج فاصله محل وارد کردن نیرو با لولای در را کم کنید. در انتها سعی کنید که با هل دادن در، در محل لولا آن را باز کنید. آیا می‌توانید اثر تغییرِ طولِ بازویِ گشتاور در مقدار نیروی مورد نیاز برای بازکردنِ در را بیان کنید؟



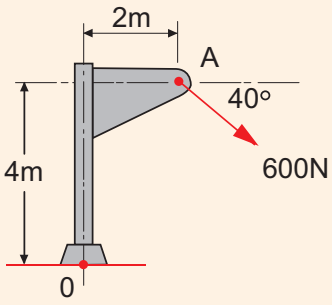
شکل ۱۷ــ۱

بازوی گشتاور

براساس یکی از قدیمی‌ترین قضایای هندسی، کوتاه‌ترین فاصله یک نقطه از یک خط، فاصله عمودی است. این قضیه به قضیه حمار یا الاغ معروف است.

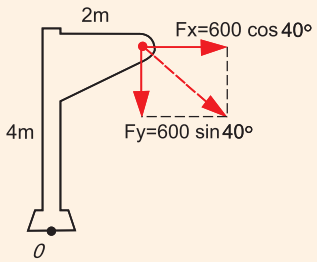
علت این نام‌گذاری آن است که اگر حیوان تشنه‌ای را در فاصله‌ای از یک رود رها کنند، برای رسیدن به رودخانه همیشه کوتاه‌ترین مسیر را که خط عمود است، انتخاب می‌کند. برای محاسبهٔ طول بازوی گشتاور، از این قضیه استفاده می‌شود. بازوی گشتاور کوتاه‌ترین فاصله بین مرکز گشتاورگیری و راستای نیرو است.

تمرین نمونه ۳ــ۱ : در سازه زیر گشتاور ناشی از نیروی N ۶۰۰ را حول نقطه O برحسب N.m محاسبه نمایید.



شکل ۱۸ــ۱

راه حل اوّل : از رابطه‌های ۱ــ۱ و ۲ــ۱ استفاده نموده و نیروی F را با مؤلفه‌های آن جایگزین می‌کنیم.



شکل ۱۹ــ۱

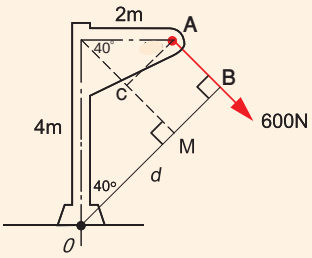
$$F_X = ۶۰۰ \times \cos ۴۰^\circ = ۴۶۰N \ , F_y = ۶۰۰ \times \sin ۴۰^\circ = ۳۸۶N$$

با محاسبهٔ مجموعِ گشتاور این مؤلفه‌ها حول نقطه O، گشتاورِ نیروی F حول این نقطه به دست می‌آید.

ساعتگرد $M_O = (۴۶۰N)\,(۴m) + (۳۸۶N)(۲m) = ۲۶۱۰N.m$

توجه داشته باشیدکه هر دو گشتاور مؤلفه‌ها، ساعت‌گرد بوده و به این جهت با یکدیگر جمع می‌شوند.

راه حل دوم : برای محاسبه مقدار گشتاور به اندازه بازوی گشتاور نیاز است. بازوی گشتاور که فاصله عمودی بین مرکز گشتاورگیری تا راستای نیرو است درشکل روبرو با d نشان داده شده است. با استفاده از قوانین مثلثاتی اندازه d را که از دو خط MB و OM تشکیل شده است محاسبه می‌کنیم.



شکل ۲۰ــ۱

با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که $MB = CA = ۲\sin ۴۰^\circ$ است.

پس :

$$d = OM + MB = ۴\cos ۴۰^\circ + ۲\sin ۴۰^\circ = ۴/۳۵m$$

با استفاده از رابطه ۷ــ۱ داریم :

ساعتگرد $M_O = F.d = ۶۰۰ \times ۴/۳۵ = ۲۶۱۰\ N.m$

۶ــ۱ــ تعادل اجسام صلب

در بخش‌های گذشته از روش‌های تعیین برآیند چند نیروی وارد بر یک جسم و محاسبه گشتاورها صحبت شد. وقتی برآیند تمام نیروها و گشتاورهای وارد بر جسمی صفر باشد می‌گویند جسم در حال تعادل است.

در این بخش تعادل سازه‌های دو بعدی را بررسی می‌کنیم که تحت تأثیر نیروهای واقع در صفحه خودشان قرار دارند. شرایط تعادل برای یک سازه دو بعدی با سه معادله بیان می‌شود.

رابطه ۸ــ۱	$\Sigma F_x = 0$
رابطه ۹ــ۱	$\Sigma F_y = 0$
رابطه ۱۰ــ۱	$\Sigma M = 0$

این معادله‌ها را می‌توان برای تعیین نیروهای مجهول وارد بر جسم، یا عکس‌العمل‌هایی که تکیه‌گاه‌ها به آن اعمال می‌کنند به کار بست.

روابط ۸ ــ۱ و ۹ــ۱ بیان می‌کنند که برآیند مؤلفه‌های افقی و عمودی نیروهای خارجی وارد بر جسم صفر هستند یا به عبارت دیگر مؤلفه‌های نیروهای خارجی همدیگر را خنثی می‌کنند. معادله ۱۰ــ۱ هم بیان می‌کند که حاصل جمع جبری گشتاور نیروهای وارد بر جسم حول هر نقطه دلخواه در صفحه سازه صفر است، یا به‌عبارتی گشتاورهای نیروهای خارجی حول هر نقطه دلخواه متوازن هستند.

بنابراین در حالت تعادل، نیروهای خارجی نمی‌توانند جسم را انتقال دهند یا بچرخانند. یعنی جسم صلب درحالت تعادل، نه حرکت انتقالی دارد و نه حرکت دورانی. برای نوشتن معادله‌های تعادل در مورد یک جسم صلب، ابتدا باید همه نیروهای وارد بر جسم را مشخص نموده و بعد نمودار جسمِ آزاد رسم شود.

علاوه بر نیروهای وارد بر سازه، عکس‌العمل‌هایی را هم که تکیه‌گاه‌های سازه به آن وارد می‌کنند باید در نظر گرفت. در ادامهٔ این بخش با ترسیم نمودارِ جسمِ آزاد و عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها آشنا خواهید شد.

۷ــ۱ــ نمودار جسمِ آزاد

در حل مسائل ایستایی مربوط به تعادل جسم صلب، باید تمامی نیروهایی را که به جسم وارد می‌شوند، در نظر گرفت و نیروهایی را که به طور مستقیم بر جسم اثر نمی‌کنند، کنار گذاشت. حذف یک نیرو یا افزودن یک نیروی نامربوط تعادل را از بین می‌برد. برای حل مسأله ابتدا باید

چرا این صخره سقوط نمی‌کند؟

بسیاری از طرح‌ها از طبیعت الگو گرفته‌اند.

قانون سوم نیوتن

برای هر کنشی، واکنشی مساوی و در جهت مخالف وجود دارد.

برای ترسیم نمودار جسمِ آزاد از ابزار استفاده کنید. دقت در ترسیم نمودار به درک بهتر از صورت مسأله و حل آن کمک می‌کند.

برای جسم موردنظر یک نمودار جسم آزاد رسم کرد. این نمودار، جسم یا عضو موردنظر را به صورت جداگانه از همهٔ اجسامی که در اتصال یا تماس با آن هستند به همراه همهٔ نیروهای خارجی و عکس‌العمل وارد بر آن نشان می‌دهد. در این‌جا مراحل مختلف رسم نمودار آزاد تشریح می‌شود :

الف) نخست جسم آزاد به طور مشخص، تعیین می‌شود. سپس این جسم از زمین و از تمام اجسام دیگر جدا شده و بعد طرح کلی این جسم مجزا شده، رسم می‌شود.

ب) همه نیروهای خارجی روی نمودار جسم آزاد نشان داده می‌شود. این نیروها نماینده کنش‌های ناشی از زمین و دیگر اجسامی هستند که از آن جدا شده‌اند. آنها را باید به همان نقاط تماس جسم با زمین یا به نقطه اتصال آن به اجسام دیگر وارد کرد. وزن جسم آزاد را هم باید در میان نیروهای خارجی گنجانید، چون نشان دهنده نیروی جاذبه زمین بر روی ذره‌های تشکیل‌دهنده جسم آزاد است. نیروی وزن را باید در **گرانیگاه** جسم ترسیم کرد.

پ) بزرگی و راستای نیروهای خارجی معلوم را باید به وضوح بر روی نمودار جسم آزاد نشان داد. باید دقت کرد که جهت نیروهای وارد بر جسم آزاد نشان داده شود، نه جهت نیروهایی که جسم آزاد وارد می‌کند.

ت) نیروهای خارجی مجهول به طور معمول عکس‌العمل‌هایی هستند، که زمین و اجسام دیگر برای مخالفت با حرکت جسم آزاد از خود نشان می‌دهند و بنابراین جسم را به باقی ماندن در همان مکان مقید می‌کنند. عکس‌العمل‌ها در نقاطی وارد می‌شوند که جسم آزاد توسط اجسام دیگر نگه داشته می‌شود یا به آنها متصل است.

ج) در نمودار جسم آزاد باید زاویه‌ها و ابعاد را هم وارد کرد، برای محاسبه مؤلفه‌های نیرو و گشتاور نیروها به آنها نیاز است، البته بقیه جزییات را باید حذف کرد.

مثال : شکل ۲۱ــ۱ــ الف نردبانی را نشان می‌دهد که فردی بر روی آن ایستاده و فرد دیگری که بر روی یک صندلی نشسته است با پای خود از لغزیدن نردبان بر روی سطح صاف جلوگیری می‌کند. برای تحلیل این مجموعه نردبان **جسم آزاد** فرض می‌شود. برای ترسیم نمودار جسم آزاد نردبان به صورت خطی با طول و راستای مشخص ترسیم می‌شود. بردارهای نیرو بر روی نقاطی از نردبان که نیروهای اجسام دیگر مانند دیوار، افراد و زمین وارد می‌شوند ترسیم شده و شکل ۲۱ــ۱ــ ب به دست می‌آید.

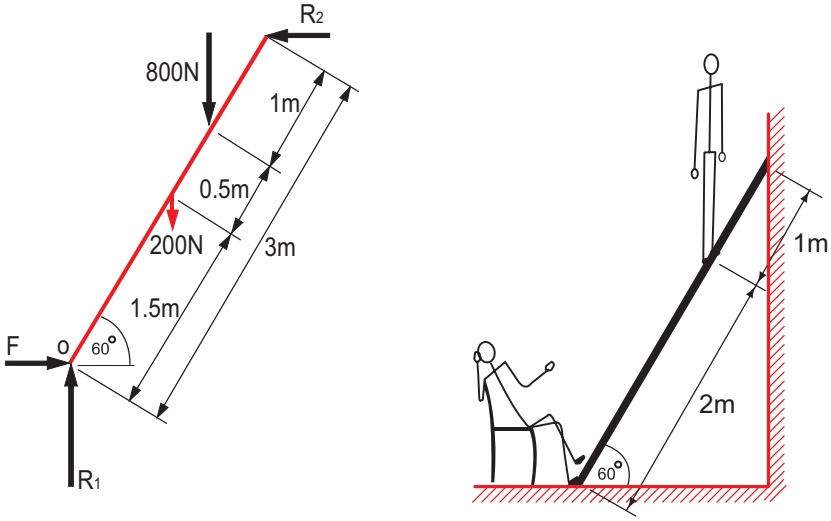
در این نمودار وزن فرد و نردبان به سمت پایین ترسیم شده و R_1 و R_2 به ترتیب نیروهای واکنشی زمین و دیوار هستند. F نیرویی است که از طرف پای نفر دوم وارد می‌شود. اندازه فاصله‌ها و زاویه نردبان با زمین نیز نمایش داده شده‌اند. با کمک این نمودار تحلیل تعادل نردبان به راحتی انجام‌پذیر است.

گرانیگاه یا مرکز گرانش جسم را با علامت بالا یا با حرف G (مخفف Gravity) نمایش می‌دهند.

نیوتن

(سده ۱۷ میلادی ــ ۱۱و۱۲ هجری)

فیزیکدان و ریاضیدان بزرگی که در سال درگذشت گالیله به دنیا آمد. او به دلیل هوش سرشار خود در هفده سالگی به طور رایگان وارد دانشگاه کمبریج شد و به سرعت از استادان خود پیشی گرفت. در سال ۱۶۶۳ به دلیل همه گیر شدن بیماری طاعون، مجبور به ترک دانشگاه شد و در مدت ۱۸ ماه که بیشتر مراکز علمی اروپا بسته بود، به خودسازی علمی خویش پرداخت. او در این مدت نظریه ذره‌ای نور، قانون جاذبه عمومی و بسیاری از نظریات خود را پایه‌گذاری کرد. نیوتن حاصل پژوهش‌های خود را در کتابی به نام اصول ریاضی فلسفه طبیعی نوشت. این کتاب مشتمل بر قانون‌های نیوتن درباره حرکت است.



ب) نمودار جسمِ آزاد نردبان

الف) فردی بر روی نردبان ایستاده

شکل ۲۱ــ۱

۸ ــ۱ــ واکنش تکیه‌گاه‌ها

بسته به نوع تکیه‌گاه‌ها یا اتصال‌های نگه‌دارنده یک سازه، عکس‌العمل‌های وارد بر سازه یا جسم را به سه دسته تقسیم می‌کنند :

الف) عکس‌العمل‌های معادل با یک نیروی با راستای معلوم (تکیه‌گاه ساده غلتکی) :

تکیه‌گاه‌ها و اتصال‌هایی که این نوع عکس‌العمل را ایجاد می‌کنند عبارتند از : غلتک‌ها، گهواره‌ای‌ها و سطوح بدون اصطکاک.

هر یک از این تکیه‌گاه‌ها می‌توانند جلوی حرکت را فقط در یک جهت بگیرند. این تکیه‌گاه‌ها و عکس‌العمل آنها در ردیف ۱و۲ جدول ۱ــ۱ نشان داده شده است. این دسته از عکس‌العمل‌ها فقط شامل **یک مجهول** هستند که آن هم بزرگی نیروی عکس‌العمل است. خط اثر این عکس‌العمل‌ها معلوم است و در نمودار جسمِ آزاد ترسیم می‌شود.

جهت این عکس‌العمل را در مورد سطوح بدون اصطکاک به طرف جسمِ آزاد نمایش می‌دهیم. از آنجا که مفروض است تکیه‌گاه‌های غلتکی و گهواره‌ای نیروها را در دو جهت تحمل کنند عکس‌العمل آنها را می‌توان به طرف جسمِ آزاد یا به خارج از جسمِ آزاد نمایش داد.

ب) عکس‌العمل‌های معادل با دو نیرو یا یک نیرو با راستا و بزرگی مجهول (تکیه‌گاه ساده مفصلی) : تکیه‌گاه‌ها و اتصال‌هایی که این نوع عکس العمل را ایجاد می‌کنند عبارتند از لولاها، پین‌های بدون اصطکاک در سوراخ‌های کیپ و سطوح ناصاف. این تکیه‌گاه‌ها می‌توانند مانع حرکت جسم در تمام امتدادها شوند، اما نمی‌توانند از دوران آنها حول محل اتصال جلوگیری کنند. این دسته از عکس‌العمل‌ها **دو مجهول** دارند و معمولاً آنها را با مؤلفه‌هایشان در امتداد x و y نشان می‌دهند. در مورد سطوح ناصاف، مؤلفه عمود بر سطح را باید به طرف جسمِ

بررسی کنید

در اتفاقی نادر، جرثقیل‌هایی که برای بیرون آوردن وسیله نقلیه سقوط کرده، مشغول به کار بودند، یکی پس از دیگری واژگون شدند. با اعضای گروه خود دلیل علمی این اتفاق را بررسی کنید. چگونه می‌توان از بروز چنین حوادثی پیشگیری کرد؟

آزاد نشان داد. ردیف‌های ۳ و ۴ جدول ۱ــ۱، این نوع تکیه‌گاه‌ها و عکس‌العمل‌هایشان را نشان می‌دهد.

پ) عکس‌العمل‌های معادل با یک نیرو و یک گشتاور (تکیه‌گاه ثابت و گیردار) :

این عکس‌العمل‌ها توسط تکیه‌گاه‌های ثابت ایجاد می‌شوند که با هر نوع حرکت جسمِ آزاد مخالفت می‌کنند و آن را کاملاً مقید نگه می‌دارند.

تکیه‌گاه‌های ثابت نیروهایی بر تمام سطح تماس ایجاد می‌کنند. با این همه این نیروها را می‌شود به یک نیرو با راستا و بزرگی مجهول و یک گشتاور خلاصه کرد. این دسته از عکس‌العمل‌ها **سه‌مجهول** دارند که معمولاً از دو مؤلفه نیرو و گشتاور تشکیل می‌شوند. ردیف ۵ جدول ۱ــ۱ تکیه‌گاه ثابت و عکس‌العمل آن را نشان می‌دهد.

جدول ۱ــ۱ــ انواع تکیه‌گاه‌ها و عکس العمل آنها

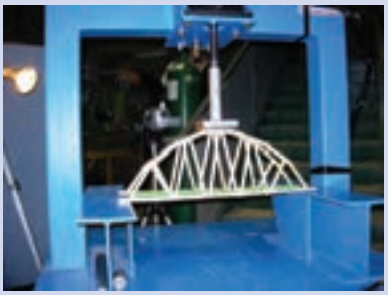
	نوع تکیه‌گاه	عکس‌العمل تکیه‌گاه	توضیح
۱	سطح بدون اصطکاک (تکیه‌گاه یک مجهولی)	N	نیروی عکس‌العمل فشاری و عمود بر سطح تماس است.
۲	غلتک‌ها و گهواره‌ای (تکیه‌گاه یک مجهولی)	N N	تکیه‌گاه‌های غلتکی نیروی عکس‌العمل فشاری، عمود بر سطح اتکا بوجود می‌آورند.
۳	سطح ناصاف (تکیه‌گاه دو مجهولی)	F R N	سطح ناصاف علاوه بر عکس‌العمل عمود بر سطح، یک نیروی عکس‌العمل مماس بر راستای سطح (اصطکاک) به وجود می‌آورد.
۴	لولا و پین بدون اصطکاک (تکیه‌گاه دو مجهولی)	R_x R_y	تکیه‌گاه لولایی هر نیرویی در صفحه را تحمل می کند. این نیروها معمولا با دو مؤلفه R_x و R_y نمایش داده می‌شوند.
۵	ثابت (تکیه‌گاه سه مجهولی)	M F V	تکیه‌گاه ثابت علاوه بر نیروی محوری F و نیروی برشی V، گشتاور خمشی M را نیز تحمل می‌کند.

بسازید و تجربه کنید

هرساله مسابقه‌هایی مانند ساختن پل با ماکارونی یا چوب بستنی در ایران و جهان در سطوح مختلف دانشجویی و دانش‌آموزی برگزار می‌شود. در این مسابقات گروه‌های شرکت کننده تلاش می کنند تا با استفاده از قوانین مکانیک بیش‌ترین نیروها را به سازه‌هایی که با ساده‌ترین مصالح ساخته شده‌اند اعمال کنند.

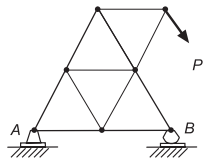
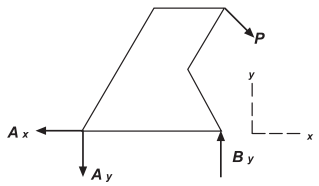
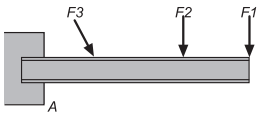
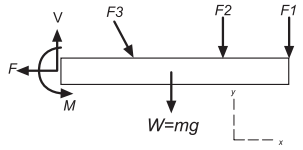
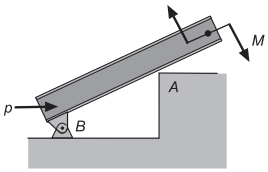
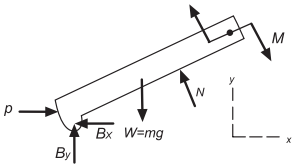
طراحی و ساخت پل خرپایی تنها با استفاده از ۷۵۰ گرم ماکارونی (معادل یک بسته ماکارونی) انجام می‌شود. طول دهانه پل یک متر و حداکثر ارتفاع پل نیم متر می‌باشد. پل روی دو تکیه‌گاه که از یک‌دیگر یک متر فاصله دارند قرار می‌گیرد و تکیه‌گاه‌ها فقط قادر به وارد کردن عکس‌العمل عمودی می‌باشند و هیچ عکس‌العمل افقی در تکیه‌گاه‌ها بر پل وارد نمی‌شود.

رکورد کسب شده در این رشته معادل ۱۷۶ کیلوگرم است، که این رکورد تقریبا ۲۳۵ برابر وزن خود سازه می‌باشد.



در جدول ۲ــ۱ مثال‌هایی از ترسیم جسمِ آزاد برای سیستم‌های مکانیکی با تکیه‌گاه‌های مختلف نشان داده شده است. در این مثال‌ها برایَ سادگی کار، اندازه‌ها نمایش داده نشده‌اند.

جدول ۲ــ۱ــ نمونه‌هایی از ترسیم جسمِ آزاد برای سیستم‌های مکانیکی

عنوان و توضیح	سیستم مکانیکی	نمودار جسمِ آزاد
۱. خرپای صفحه ای : از وزن خرپا در مقابل نیروی P صرف‌نظر شده است.		
۲. تیر یک سر آزاد (یا طره‌ای) : جرم تیر m در نظر گرفته شده است.		
۳. تیر : جرم تیر، m فرض شده و تیر در نقطه A تکیه‌گاه بدون اصطکاک دارد.		

نکته

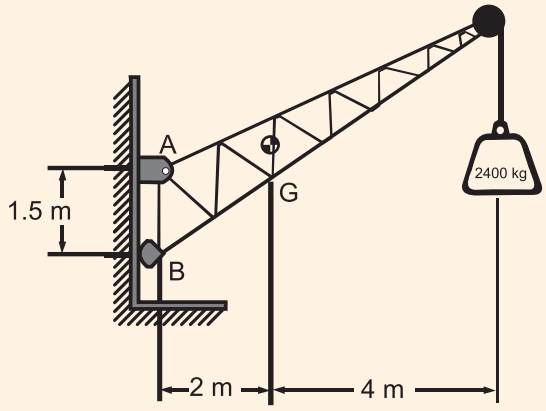
در حل مسائل وقتی جهت نیروی عکس‌العمل یا گشتاور مجهول آشکار نیست، لزومی ندارد که برای تعیین آن زحمت کشید.

جهت نیرو یا گشتاور را می‌توان به صورت دلخواه فرض نمود پس از حل مسأله علامت جواب نشان می‌دهد که فرض اولیه صحیح بوده است یا خیر.

برای اطلاعات، بیشتر حل مسأله نمونه ۱ــ۴ را ملاحظه فرمایید.

مثال‌های زیادی برای تکیه‌گاه لولایی در صنعت وجود دارد، اما ساده‌ترین نمونه لولای ساده است. این تکیه‌گاه هر نیرویی در صفحه را تحمل می‌کند، اما گشتاور را تحمل نمی‌کند و می‌چرخد.

تمرین نمونه ۴ــ۱ : جرثقیل ثابتی به جرم ۱۰۰۰ kg برای بالا بردن صندوقی به جرم ۲۴۰۰ kg استفاده می‌شود. جرثقیل را یک پین در A و یک تکیه‌گاه گهواره‌ای در نقطه B نگه داشته‌اند. گرانیگاه جرثقیل در نقطه G واقع شده است. مؤلفه‌های عکس‌العمل‌ها در A و B را محاسبه کنید.



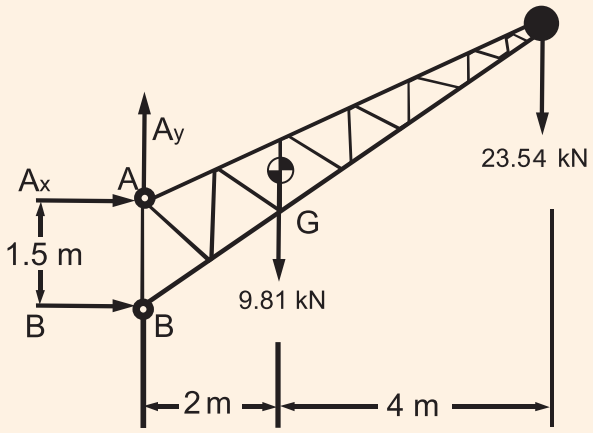
شکل ۲۲ــ۱

راه حل :

نمودار جسمِ آزاد : نمودار جسمِ آزاد جرثقیل را رسم می‌کنیم. با ضرب‌کردن جرم‌های جرثقیل و صندوق در $g = ۹/۸۱ \frac{m}{s^۲}$ وزن آنها را محاسبه می‌کنیم. با مراجعه به جدول ۱ــ۱ تکیه‌گاه‌ها را شناسایی نموده و عکس‌العمل تکیه‌گاه A را با دو مؤلفه A_x، A_y و B نشان می‌دهیم. عکس‌العمل در تکیه‌گاه B به سطح تماس عمود است، پس افقی است. فرض می‌کنیم که راستاهای A_x، A_y و B مطابق نمودار جسمِ آزاد باشند. این سه نیروی عکس‌العمل مجهولات مسأله هستند.

معادله‌های تعادل :

تعیین B : برای محاسبه نیروی عکس العمل B از سومین معادله تعادل(رابطه ۱ــ۱۰) استفاده می‌کنیم. جمع گشتاورهای همه نیروهای خارجی حول نقطهA صفر است. معادله‌ای که به دست می‌آید شامل A_x، A_y نیست، چون به دلیل عبور راستاهای این دو نیرو ازنقطه A گشتاورهای A_x و A_y حول نقطه A برابر با صفر هستند.



شکل ۲۳ــ۱

با ضرب بزرگی هر نیرو در فاصله عمودی اش از A (بازوی گشتاور) می‌نویسیم :

$$\circlearrowleft + \quad \Sigma M_A = ۰ : +B(۱/۵m) - (۹/۸۱kN)(۲m) - (۲۳/۵۴kN)(۶m) = ۰$$

$$B = +۱۰۷/۲۴kN$$

چون نتیجه مثبت است، عکس‌العمل در همان جهتی است که فرض کرده‌ایم.

$$B = ۱۰۷/۲۴kN \rightarrow$$

تعیین A_x : در اینجا از نخستین معادله تعادل (رابطه ۸ــ ۱) استفاده می‌نماییم. جمع مؤلفه‌های افقی تمام نیروهای خارجی صفر است، پس بزرگی A_x به این طریق به دست می‌آید :

$$\xrightarrow{+} \quad \Sigma F_x = ۰ : A_x + B = ۰$$

$$A_x + ۱۰۷/۲۴\ kN = ۰$$

$$A_x = -۱۰۷/۲۴\ kN$$

چون نتیجه منفی است، پس جهت A_x مخالف جهتی است که در ابتدا فرض کرده‌ایم.

$$A_x = ۱۰۷/۲۴\ kN$$

تعیین A_y : با توجه به دومین معادله تعادل (رابطه ۹ــ۱) می‌دانیم جمع مؤلفه‌های عمودی هم باید صفر باشد.

$$+\uparrow \quad \Sigma F_y = ۰ : A_y - ۹/۸۱kN - ۲۳/۵۴kN = ۰$$

$$A_y = +۳۳/۳۵kN$$

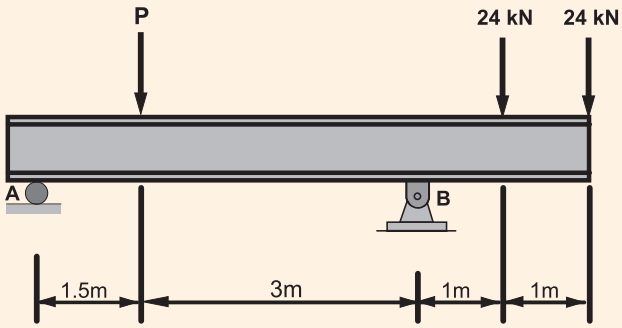
$$A_y = ۳۳/۳۵kN \uparrow$$

برای یافتن نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه A، برآیند مؤلفه‌های A_x و A_y را با کمک روابط ۵ــ۱ و ۶ ــ۱ محاسبه می‌کنیم.

$$A = \sqrt{(۱۰۷/۲۴kN)^۲ + (۳۳/۳۵kN)^۲} = ۱۱۲/۳kN$$

$$\alpha = \tan^{-۱}\left(\frac{۳۳/۳}{۱۰۷}\right) = ۱۷/۲۷^\circ$$

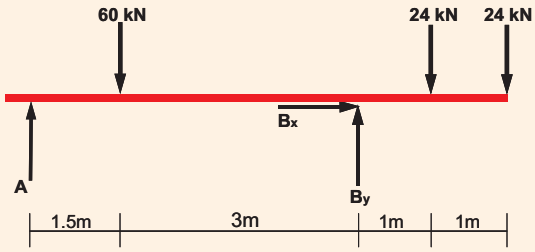
تمرین نمونه ۵ ــ۱ : به تیری مطابق شکل زیر سه بار وارد شده است. تیر به غلتکی در A و پینی در B تکیه دارد. اگر $P = ۶۰kN$ باشد، عکس‌العمل‌های A و B را محاسبه کنید. از وزن تیر صرف نظر شود.



شکل ۲۴ــ۱

راه حل :

نمودار جسمِ آزاد : نمودار جسم آزاد تیر را رسم می‌کنیم. عکس‌العمل در تکیه‌گاه A عمودی است و آن را با A نشان می‌دهیم. عکس‌العمل در B را با دو مؤلفه B_x و B_y نشان می‌دهیم. فرض می‌کنیم مؤلفه‌ها در راستاهای نشان داده شده وارد می‌شوند.



شکل ۲۵ــ۱

معادله‌های تعادل : سه معادله تعادل را می‌نویسیم تا سه مجهول مسأله که عکس‌العمل‌های تکیه‌گاه‌ها هستند را به دست آوریم :

$\xrightarrow{+} \Sigma F_x = ۰ \quad : \quad B_x = ۰$

$\circlearrowleft + \ \Sigma M_A = ۰ \quad : \quad -(۶۰kN)(۱/۵m) + B_y(۴/۵m) - (۲۴kN)(۵/۵m) - (۲۴kN)(۶/۵m) = ۰$

$B_y = +۸۴kN$

$B_y = ۸۴kN \uparrow$

$+\uparrow \ \Sigma F_y = ۰ \quad : \quad +A - ۶۰kN + ۸۴kN - ۲۴kN - ۲۴kN = ۰$

$A = +۲۴kN$

$A = ۲۴kN \uparrow$

درستی جواب‌ها را با نوشتن معادله گشتاور حول نقطه B بررسی می‌کنیم :

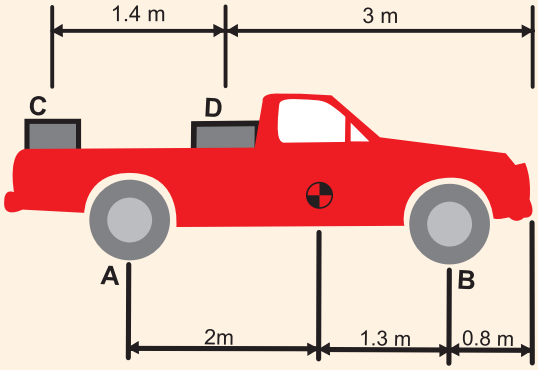
$\circlearrowleft + \ \Sigma M_B = -(۲۴kN)(۴/۵m) + (۶۰kN)(۳m) - (۲۴kN)(۱m) - (۲۴kN)(۲m) = ۰$

تذکر : در این مسأله عکس‌العمل‌های A و B هر دو عمودی هستند. در A تیرتوسط یک تکیه‌گاه غلتکی نگه‌داشته شده است، بنابراین عکس‌العمل نمی‌تواند مؤلفه افقی داشته باشد. با یک نگاه می‌توان تشخیص داد که مؤلفه افقی تکیه گاه B هم صفر است، زیرا هیچ یک از نیروهای وارد بر تیر، مؤلفه افقی ندارند. اما همان‌گونه که ملاحظه شد در حل مسائل، ترجیحاً معادلات تعادل را می‌نویسیم و سپس صفر بودن مؤلفه‌ها را نتیجه می‌گیریم. این امر، به پرهیز از بروز اشتباه کمک می‌کند.

تمرین نمونه ۶ــ۱ : دو صندوق به وزن ۱kN مطابق شکل بر کف خودرو وانتِ متوقفی به وزن ۱۲kN قرار دارد. مطلوب است محاسبهٔ :

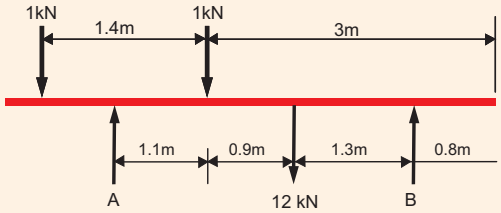
الف) عکس‌العمل در هریک از دو چرخ عقب، در نقطه A

ب) عکس‌العمل در هر یک از دو چرخ جلو، در نقطه B



شکل ۲۶ــ۱

راه حل :



شکل ۲۷ــ۱

نمودار جسمِ آزاد : نمودار جسمِ آزاد خودرو را رسم می‌کنیم. چرخ‌ها از نوع تکیه‌گاه دو مجهولیِ سطح ناصاف هستند. از آنجا که هیچ نیروی افقی به جسمِ آزاد وارد نمی‌شود، مؤلفه‌های افقی عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها صفر هستند و عکس‌العمل‌های عمودی آنها را با نیروهای A و B نشان می‌دهیم. نیروی ۱۲kN وزن خودرو در محل گرانیگاه وارد می‌شود و دو بارِ ۱kN در فاصله‌های معین شده وارد می‌شوند. با کمک اندازه‌های نشان داده شده در شکل فاصله بین راستاهای نیرو را نیز محاسبه نموده و در نمودار جسمِ آزاد نمایش می‌دهیم.

معادله‌های تعادل : از آنجا که مسأله دو مجهول دارد با نوشتن دو معادله تعادل خواهیم توانست نیروهای A و B را محاسبه نماییم. ابتدا معادله گشتاور حول تکیه‌گاه B را می‌نویسیم که یکی از مجهولات از محاسبه حذف شود.

$$\circlearrowleft + \ \Sigma M_B = ۰ \quad :$$

$$+ (۱kN)(۱/۴m + ۰/۹m + ۱/۳m) - A(۱/۱m + ۰/۹m + ۱/۳m) + (۱kN)(۰/۹m + ۱/۳m) + (۱۲kN)(۱/۳m) = ۰$$

$$A = ۶/۴۸kN$$

پس عکس العمل در هر یک از چرخ‌های عقب، نصف این مقدار یعنی ۳/۲۴kN است. حالا برای به دست آوردن نیروی عکس‌العمل B یک معادله تعادل دیگر می‌نویسیم.

$$+\uparrow \ \Sigma F_y = ۰ \quad :$$

$$۱kN - ۶/۴۸kN + ۱kN + ۱۲kN - B = ۰$$

$$B = ۷/۵۲kN$$

عکس‌العمل در هر یک از چرخ‌های جلو نیز ۳/۷۶kN می‌باشد.

بررسی درستی حل مسأله : درستی جواب‌ها را با نوشتن معادله گشتاور حول نقطه A بررسی می‌کنیم.

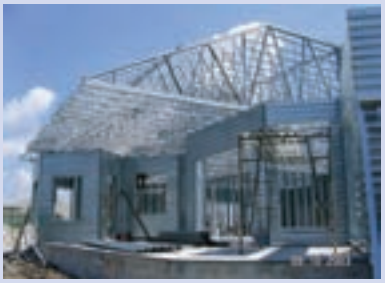
$$\circlearrowleft + \ + \Sigma M_A = (۱kN)(۱/۴m - ۱/۱m) - (۱kN)(۱/۱m) - (۱۲kN)(۲m) + (۷/۵۲kN)(۳/۳m) = ۰$$

کار در کلاس : این مسأله را با این فرض که صندوق C بر روی صندوق D قرار گیرد، حل کنید.

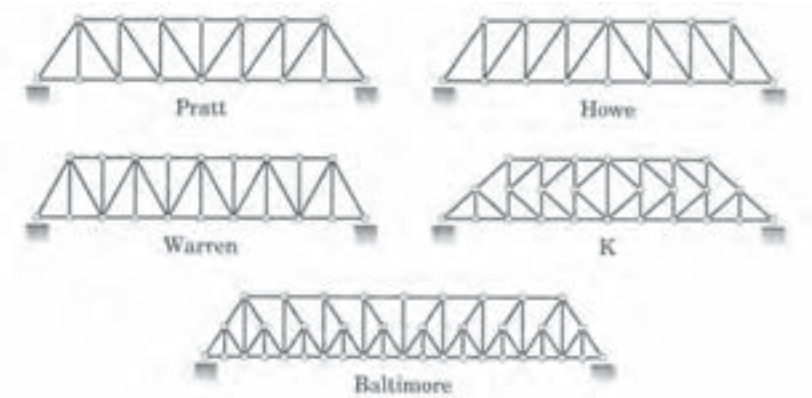
۹ــ۱ــ انواع سازه‌ها

در این بخش سه گروه مهم سازهٔ مهندسی و کاربرد آنها معرفی خواهند شد.

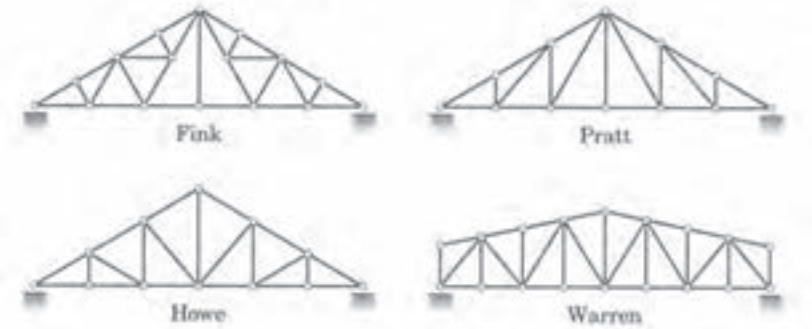
خرپا : خرپا یکی از سازه‌های اصلی مهندسی است. هر خرپا شامل عضوهای مستقیمی است که در مفصل‌ها به یکدیگر متصل‌اند. اعضای خرپا معمولاً به شکل مثلث به‌هم متصل می‌شوند. فرم مثلثی به دلیل پایداری در مقابل تغییر شکل و نیروهای خارجی قابل توجه است. هر خرپا برای تحمل بارهایی که در صفحه آن اثر می‌کند، طراحی می‌شود و بنابراین می‌توان آن را یک سازه دوبعدی در نظر گرفت. تعدادی از خرپاهای معمول برای ساخت پل‌ها و سقف‌ها در شکل ۲۸ــ۱ نشان داده شده‌اند. بیشتر سازه‌های واقعی از اتصال چندین خرپا به یکدیگر ساخته می‌شوند و در مجموع یک قاب فضایی را تشکیل می‌دهند (شکل ۲۹ــ۱). از این سازه در ساخت ساختمان‌ها، پل‌ها، سالن‌های با عرض دهانه بزرگ و . . . استفاده می‌شود.



سازه‌های خرپا، بسیار سبک و مستحکم هستند.

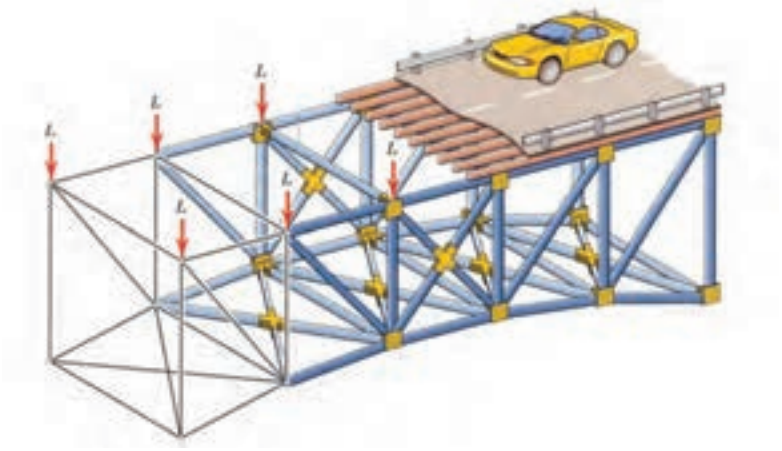


الف) خرپاهای متداول برای ساخت پل



ب) خرپاهای متداول برای ساخت سقف

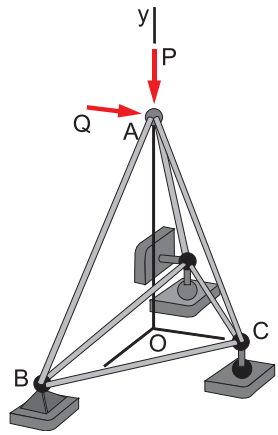
شکل ۲۸ــ۱



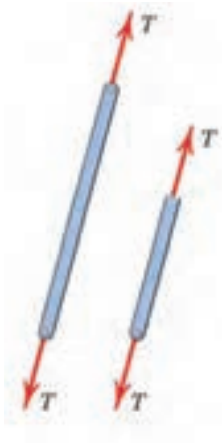
شکل ۲۹ــ۱

سازه فضایی : وقتی سرهای چند عضو مستقیم طوری به‌هم متصل شوند که یک پیکربندی سه بعدی تشکیل دهند، یک سازه فضایی به دست آمده است. سازه فضایی را خرپای فضایی هم می‌نامند.

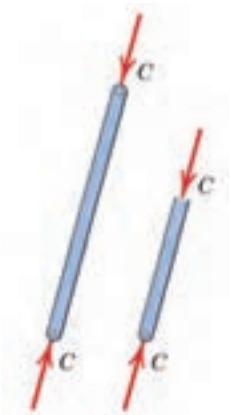
در شکل ۳۰ــ۱ ساده‌ترین سازه فضایی نمایش داده شده است. ویژگی مشترک خرپاهای دوبعدی و سازه‌های فضایی استحکام زیاد و سبکی سازه می‌باشد. از دیگر مزایای این سازه‌ها سرعت نصب بالاست. البته باید در نظر داشت که این سازه‌ها حجم زیادی را اشغال می‌کنند.



شکل ۳۰ــ۱



شکل ۳۱ــ۱ــ کشش



شکل ۳۲ــ۱ــ فشار

طراحی خرپاها و سازه‌های فضایی با استفاده از عضوهای دونیرویی می‌باشد. خاصیت این عضوها به شکلی است که فقط نیروی محوری در طول عضو را به شکل کششی (T) و یا فشاری (C) تحمل می‌کنند.

هنگامی که طول خرپا، چه خرپای پل و چه خرپای سقف زیاد باشد،در یک انتهای خر پا تکیه‌گاه غلتکی به کار برده می‌شود. این نوع تکیه‌گاه به خر پا اجازه می‌دهد که در اثر تغییرات، یا اعمال و حذف بارها آزادانه منبسط یا منقبض شود.

نمونه‌ای از محل اتصال اعضاء (گره) در یک سازه فضایی

قاب‌ها : قاب‌ها نیز سازه‌هایی هستند که برای تحمل بار طراحی می‌شوند. اما در قاب، ممکن است به هر عضو بیش از دو نیرو وارد شود. اسکلت فلزی ساختمان‌های فولادی و سازه فلزی سوله‌های صنعتی نمونه‌هایی از این سازه‌های قابی هستند.

قاب‌ها در ساخت ماشین‌آلات و دستگاه‌های صنعتی نیز بسیار پر کاربردند.

سازه فلزی یک سکوی حفاری که به محل پروژه حمل می‌شود.

شکل ۳۳ــ۱ــ اسکلت‌های فلزی از نمونه‌های کاربرد قاب ها در صنعت هستند.

شکل ۳۴ــ۱ــ قاب فولادی به کار رفته در ساخت این پرس، نیروهای ناشی از عملکرد آن را تحمل می کند.

فعالیت گروهی : فهرست ۲۰ سازه فلزی در محیط هنرستان و اطراف آن را تهیه و نوع سازه‌ها را تعیین کنید. آیا نوع سازه‌ها، با توجه به کاربرد آنها درست انتخاب شده‌اند؟

چگونه مسأله حل کنیم؟

مسائل هر چقدر هم که طولانی و پیچیده به نظر برسند با بهره‌گیری از روش درست برخورد با مسأله قابل حل خواهند بود. برای حل مسائل این فصل پیشنهاد می‌شود تا مراحل زیر را به ترتیب انجام دهید :

۱ــ صورت مسأله و شکل آن را به دقت مطالعه و بررسی کنید و «معلوم‌ها» و «مجهول‌ها» را شناسایی کنید.

۲ــ نمودار جسمِ آزاد را به دقت و در حد امکان بزرگ ترسیم نمایید و روی آن تمام نیروهای خارجی اعم از معلوم و مجهول را نشان دهید. در این مرحله در صورت نیاز، نیروها را تجزیه کنید و مؤلفه‌های آنها را در نمودار وارد کنید. برای یک جسم صلب دوبعدی عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها می‌توانند بسته به نوع تکیه‌گاه یک، دو یا سه مجهولی باشند. هرگز تا وقتی که از حضور همه بارها، همه عکس‌العمل‌ها و وزن جسم (در صورت لزوم) در نمودار جسمِ آزاد مطمئن نشده‌اید، مبادرت به حل مسأله نکنید.

وقتی نمودار جسمِ آزاد را رسم کردید، لازم است که جهت‌های عکس‌العمل‌های مجهول را مشخص کنید. در صورتی‌که پس از حل مسأله علامت جواب‌ها مثبت بود، جهت، درست فرض شده و در صورتی‌که علامت جواب منفی بود، جهتِ واقعی نیرو، عکس فرض اولیه است.

۳ــ می‌توانید تا سه معادله تعادل بنویسید و با کمک آنها سه مجهول را در مسأله محاسبه نمایید. همان‌گونه که می‌دانید معادلات تعادل عبارتند از : $\Sigma F_x = 0$, $\Sigma F_y = 0$, $\Sigma M = 0$. توصیه می‌شود معادلات تعادل را به صورت یکسان مانند مسائل نمونه به کار برید. یعنی، مقدارهای معلوم و مجهول را در سمت چپ معادله و جمع آنها را مساوی صفر قرار دهید. برای ساده کردن حل مسائلی که سه مجهول دارند، استفاده از یکی از روش‌های زیر ممکن است به شما کمک کند :

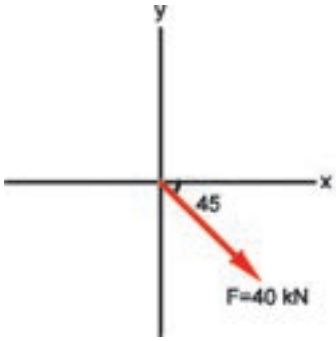
الف) با جمع بستن گشتاورها حولِ محلِ تلاقیِ خط اثرهایِ دو نیروی مجهول، معادله‌ای به دست خواهید آورد که یک مجهولی است.

ب) با نوشتن معادله تعادل در راستایی عمود بر راستای دو نیروی مجهول، معادله‌ای به دست می‌آید که یک مجهولی است.

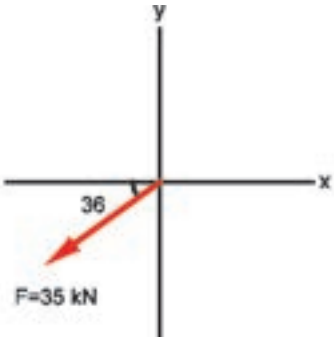
۴ــ یکاها را کنترل کنید و مطمئن شوید که همه مجهولات مسأله به دست آمده‌اند. در این مرحله با تحقیق در مورد پاسخ‌ها می‌توانید از درستی محاسبات انجام شده اطمینان پیدا کنید.

تمرین‌های فصل اول

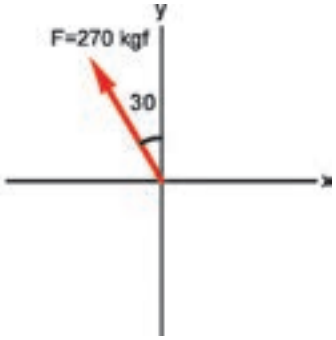
۱ــ۱ــ مؤلفه‌های عمودی و افقی نیروی F در شکل های زیر را به دو روش ترسیمی و محاسباتی به‌دست آورید.



شکل ۳۵ــ۱



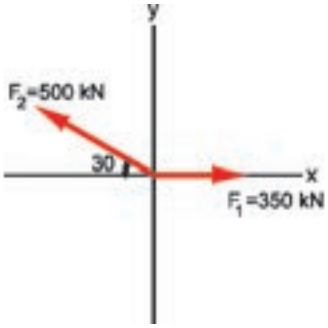
شکل ۳۶ــ۱



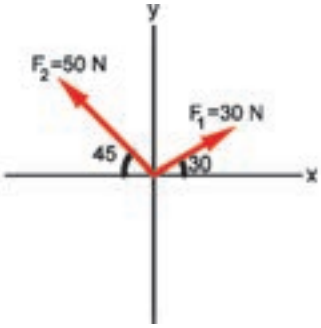
شکل ۳۷ــ۱

۲ــ۱ــ مؤلفه‌های عمودی و افقی نیروی ۶۰N را که با افق زاویه ۳۰ درجه می‌سازد، به دو روش ترسیمی و محاسباتی تعیین کنید.

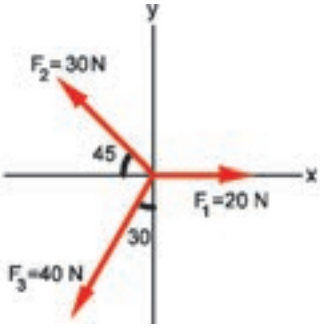
۳ــ۱ــ برآیند نیروها در شکل های زیر را به دو روش ترسیمی و محاسباتی تعیین کنید.



شکل ۳۸ــ۱



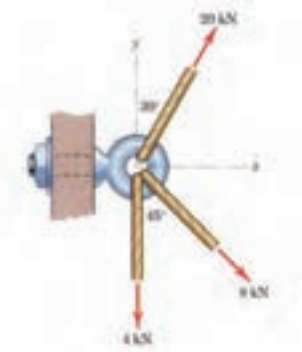
شکل ۳۹ــ۱



شکل ۴۰ــ۱

۴ــ۱ــ جسمی تحت تأثیر یک نیروی ۱۲N عمودی رو به بالا و یک نیروی افقی ۲۰N به سمت راست قرار دارد. اندازه و زاویه نیروی برآیند را به دو روش ترسیمی و محاسباتی محاسبه کنید.

۵ــ۱ــ اندازه و زاویه نیروی برآیند وارد بر پیچ شکل ۴۱ــ۱ را محاسبه کنید.



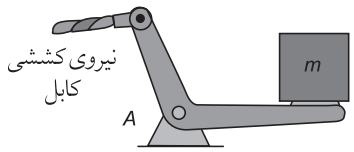
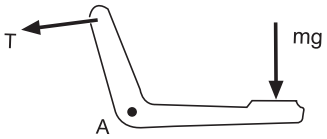
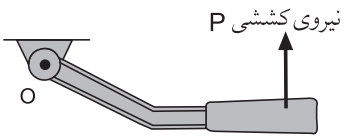
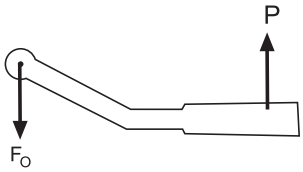
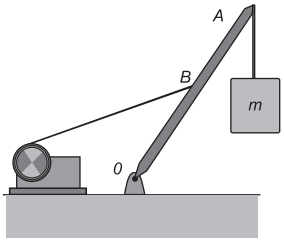
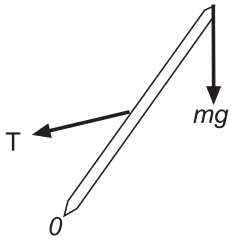
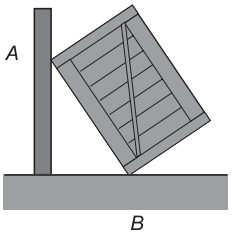
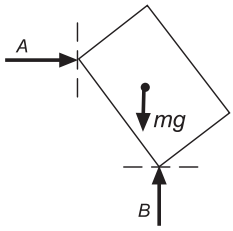
شکل ۴۱ــ۱

۶ــ۱ــ سه نیروی ۴۰N، ۵۰N و ۷۵N به ترتیب زاویه‌های °۱۰، °۳۰ و °۱۲۰ با محور xها می‌سازند. اندازه و زاویه بردار برآیند را به دو روش ترسیمی و محاسباتی تعیین کنید.

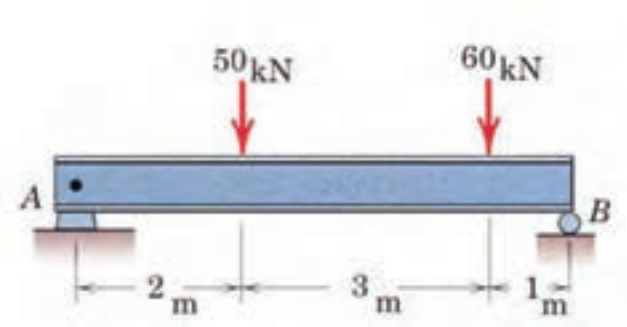
۷ــ۱ــ جسمی با دو کابل از سقف آویزان است به صورتی که هر یک از کابل‌ها با راستای عمود بر جسم زاویه °۵۰ می‌سازند. اگر نیروی کشش در آنها ۶۵N باشد، جرم جسم چقدر است؟

۸ــ۱ــ در ستون وسط جدول زیر سیستم‌های مکانیکی مختلفی نمایش داده شده و در ستون چپ، نمودار جسمِ آزاد ترسیم شده است. نمودارهای جسمِ آزاد را با اضافه کردن نیروهای لازم کامل کنید. از جرم اجسام صرف‌نظر کنید. برای سادگی کار اندازه‌ها و زوایا نمایش داده نشده‌اند.

جدول ۳ــ۱

توضیح	جسم	نمودار جسمِ آزاد نا تمام
اهرم که در نقطه A پین شده است توسط نیروی کششی کابل، وزنه m را نگه داشته است.		
اهرم کنترل که با نیروی P کشیده می‌شود درنقطه O لولا شده است.		
بازوی OA در نقطه O پین شده و توسط کابل در نقطه B نگه داشته شده‌است.		
جعبه به جرم m بر روی سطح زبری قرار دارد و در نقطه A به دیوار بدون اصطکاک تکیه داده شده است.		

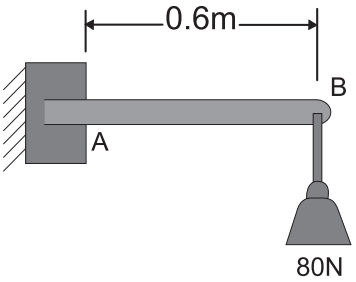
۹ــ۱ــ به تیری مطابق شکل نیروی F وارد شده است. تکیه‌گاه تیر در نقطه B غلتکی و در نقطه A لولایی است. عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها را محاسبه کنید. از وزن تیر صرف‌نظر نمایید.



شکل ۴۲ــ۱

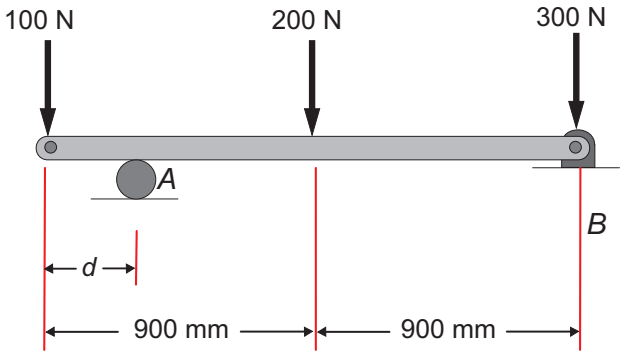
۱۰ــ۱ــ اگر در مسأله فوق تیر از نوع IPB450 باشد، وزن تیر را از جدول پیوست (ب ــ ۳) محاسبه نموده و سپس عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها را محاسبه نمایید.

۱۱ــ۱ــ وزنهٔ ۸۰N مطابق شکل رو به رو، از تیری که در نقطه A تکیه‌گاه ثابت دارد، آویزان شده است. عکس‌العمل‌های تکیه‌گاه A را محاسبه نمایید.



شکل ۴۳ــ۱

۱۲ــ۱ــ حداکثر مقدار مجاز عکس‌العمل تکیه‌گاه A، ۳۶۰N است. با چشم پوشی از وزن تیر، مقدار فاصله d چقدر می‌تواند باشد تا نیروی وارد شده بر تکیه گاه A از مقدار مجاز تجاوز نکند.

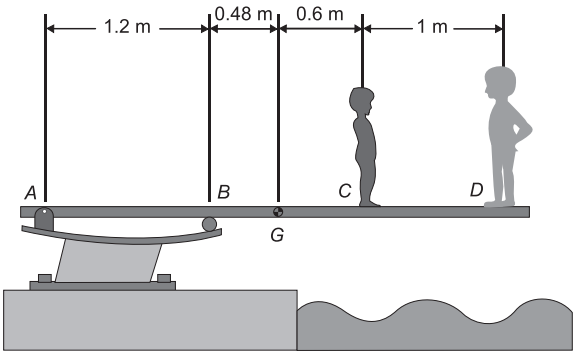


شکل ۴۴ــ۱

۱۳ــ۱ــ دو پسر بچه روی یک تخته شیرجه به جرم ۶۵kg ایستاده‌اند. اگر جرم بچه‌ها در نقاط C و D به ترتیب ۲۵kg و ۴۰kg باشد، مطلوب است :

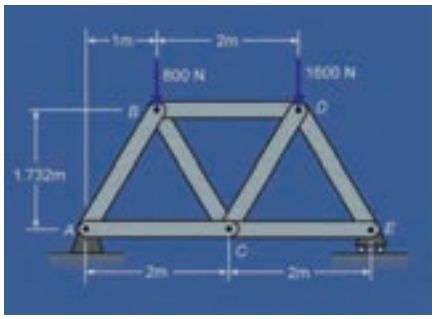
الف) نیروی عکس‌العمل در تکیه‌گاه A

ب) نیروی عکس‌العمل در تکیه‌گاه B



شکل ۴۵ــ۱

۱۴ــ۱ــ در خرپای نشان داده شده عکس‌العمل تکیه‌گاه‌های A و E را محاسبه کنید.

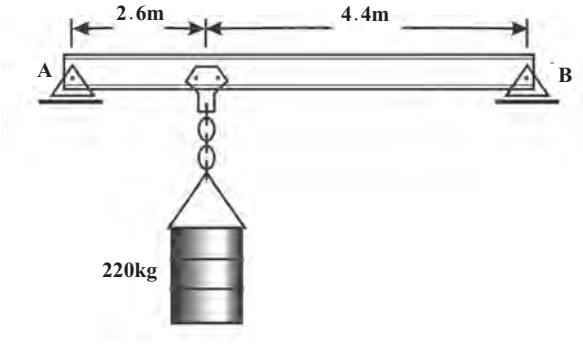


شکل ۴۶ــ۱

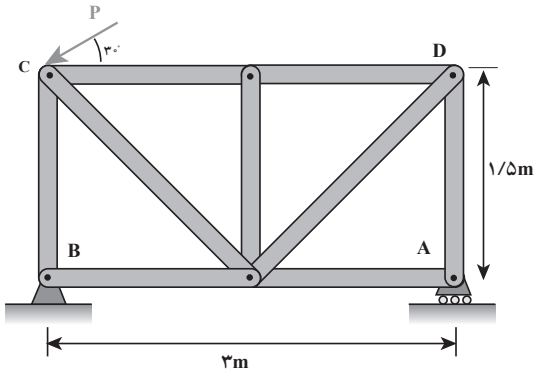
۱۵ــ۱ــ بشکه‌ای به جرم ۲۲۰kg به وسیله جرثقیل حمل می‌شود. اگر از وزن جرثقیل صرف‌نظر شود مطلوب است :

الف) نیروی عکس‌العمل در تکیه‌گاه A

ب) نیروی عکس‌العمل در تکیه‌گاه B



شکل ۴۷ــ۱



شکل ۴۸ــ۱

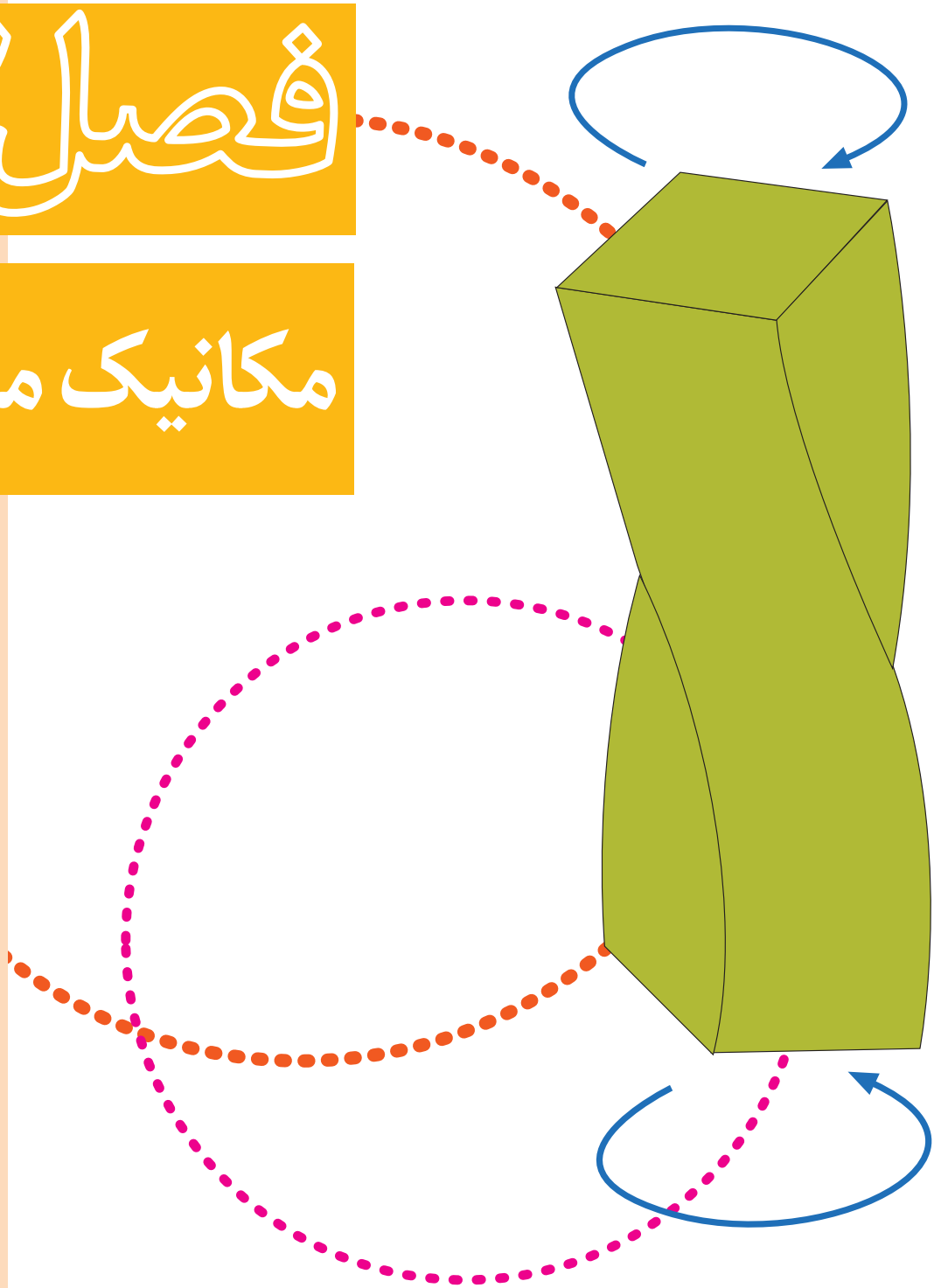
۱۶ــ ۱ــ نیروی P = ۱۲۰kN در خرپای روبه‌رو به نقطه C وارد شده است. عکس‌العمل تکیه‌گاه‌های A و B را محاسبه کنید.

خلاصهٔ فصل اول

- با مرور مطالبی که در این فصل آموخته‌اید، مباحث مطرح شده و روش‌های حل مسأله را خلاصه نویسی کنید.

فصل ۲

مکانیک مواد



هدف‌های رفتاری فصل دوم :

به قطعه‌ای از یک سازه چقدر نیرو می‌توان وارد کرد؟
آیا می‌توانید ابعاد قطعه را به نحوی محاسبه کنید که بتواند در مقابل بارگذاری‌های کششی، فشاری و برشی مقاومت کند؟

پس از پایان این درس از هنرجو انتظار می‌رود که :

- تنش و تغییر شکل را توضیح دهد.
- انواع تنش را شرح دهد.
- تنش کششی، فشاری و برشی را محاسبه کند.
- استحکام نهایی و استحکام تسلیم در فلزات را با استفاده از نمودار شرح دهد.
- مفهوم کرنش و قانون هوک را توضیح دهد.
- تنش‌های مجاز را براساس روابط و جدول‌ها استخراج کند.
- مفهوم ضریب اطمینان را توضیح دهد و محاسبات آن را انجام دهد.
- خمش، کمانش و روش پیشگیری از آن‌ها را بیان کند.

مدت زمان آموزش :

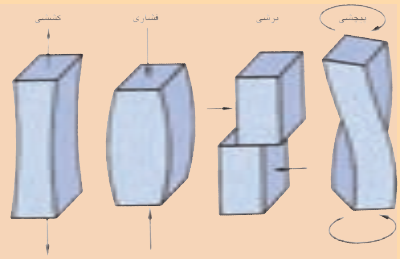
- ۱۴ ساعت

مقدمه

در فصل اول کتاب، با محاسبه و تجزیه و تحلیل نیروهای وارد بر یک جسم و تکیه‌گاه‌های آن آشنا شدید.

در حل مسائل واقعی در صنعت، پس از آن‌که طراحی‌های اولیه انجام شده و تحلیل نیروهای وارد بر قطعات مختلف یک دستگاه یا سازه صورت گرفت، این سئوال مطرح می‌شود که آیا قطعات و اتصالات توانایی تحمل نیروهایی که به آن‌ها وارد می‌شود را دارند؟ پاسخ به این پرسش در علم «مکانیک مواد» نهفته است.

در این فصل با مفاهیم اصلی علم مکانیک مواد آشنا شده و محاسبات مقاومت مواد را خواهید آموخت. یادگیری این مطلب به انتخاب ماده مناسب و تعیین ابعاد مناسب قطعات کمک می‌کند. پس از آن و در فصل‌های سوّم و چهارم، محاسبه استحکام اتصالات را نیز مورد بررسی قرار خواهیم داد.



چند نوع بارگذاری یک قطعه در شکل بالا نشان داده شده است.

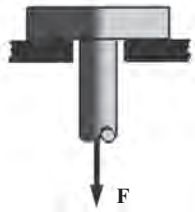
۲ــ تنش‌ها

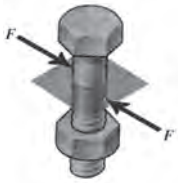
وقتی نیروهای خارجی به یک جسم وارد می‌شوند، تمایل دارند تا شکل جسم را تغییر دهند. این در حالی است که مواد تشکیل دهنده جسم در مقابل تغییر شکل مقاومت می‌کنند.

تنش نشان دهنده نیروی وارد شده بر واحد سطح است و آن را با واحدهایی مانند نیوتون بر میلی‌متر مربع (مگاپاسکال) یا کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع می‌سنجند.

بسته به نوع بارگذاری، تنش‌های مختلفی در جسم به وجود می‌آید. جدول ۱ــ۲ انواع تنش، در اجسام را نشان می‌دهد.

جدول ۱ــ۲ــ انواع تنش

تنش نرمال (قائم)σ		
بارگذاری	نوع تنش	شکل
نیروی کششی	در اثر نیروی کشش وارد شده (F) در میله، تنش کششی به وجود آمده است.	
نیروی فشاری	در اثر نیروی فشاری (F) در تیرآهن و صفحه زیر آن تنش فشاری به وجود آمده است.	
گشتاور خمشی	در اثر نیروی وزن بشکه تنش نرمال (کششی و فشاری) ناشی از گشتاور خمشی به‌وجود آمده است.	

تنش برشی T		
بارگذاری	نوع تنش	شکل
نیروی برشی	در اثر نیروی برشی (F) در ساق پیچ تنش برشی به وجود آمده است.	
گشتاور خمشی	در اثر گشتاور وارد شده توسط توربین به شفت ژنراتور، تنش برشی ناشی از پیچش به وجود آمده است.	

در این فصل انواع تنش معرفی شده و با محاسبه تنش‌های ساده آشنا خواهید شد.

بررسی کنید

در شکل نخست، شروع شکست و در دو شکل بعدی گسیختگی قطعه در یک ابزار ورزشی را مشاهده می‌کنید. در مورد علت به‌وجود آمدن ترک، رشد آن، نیروها و تنش به‌وجود آمده در قطعه، با اعضای گروه خود بحث کنید و جمع‌بندی گروه را به کلاس گزارش دهید.

۱ــ۲ــ تنش‌های ساده

در این فصل به بررسی تنش‌های ناشی از نیرو بر قطعات پرداخته شده است و تحلیل تنش‌های ناشی از گشتاورها مورد بررسی قرار نمی‌گیرد. شکل‌های ۱ــ۲، ۳ــ۲ و ۵ــ۲ نمونه‌هایی از تنش‌های ساده می‌باشند.

زمانی که هر یک از تنش‌های ساده رخ می‌دهند مقدار آن‌ها به وسیله رابطه زیر محاسبه می‌شود :

رابطه ۱ــ۲

$$\text{تنش} = \frac{\text{نیرو}}{\text{سطح مقطع}}$$

یا

$$\text{تنش} = \frac{F}{A}$$

که در آن :

تنش : مقدار تنش ساده است که با یکاهای نیوتون بر میلی‌متر مربع(N/mm^2)، کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع(kgf/cm^2) یا ... سنجیده می‌شود.

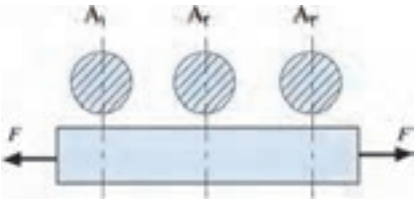
F : مقدار نیروی وارد شده به جسم که باعث به وجود آمدن تنش در قطعه شده است و با یکاهای نیوتون(N)، کیلوگرم نیرو(kgf) یا ... سنجیده می‌شود.

A : سطح مقطعی از جسم که تنش در آن به وجود آمده است و با یکاهای میلی‌مترمربع(mm^2)، سانتی‌متر مربع(cm^2) یا ... سنجیده می‌شود.

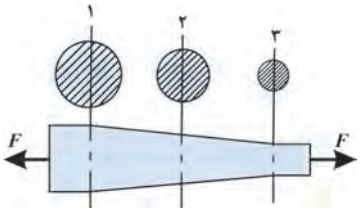
۱ــ۱ــ۲ــ تنش قائم : تنش‌های کششی و فشاری زمانی به‌وجود می‌آیند که جسم تحت تأثیر نیرو در راستای محور جسم قرار می‌گیرد (شکل‌های ۱ــ۲ و ۲ــ۲).

اگر مطابق شکل ۱ــ۲ جسمی تحت تأثیر نیروی کششی F قرار گیرد، تا زمانی که سطح مقاطع A۱ ، A۲ و A۳ برابرند تنش کششی به‌وجود آمده در همه جای جسم برابر است. اما در جسمی مانند شکل ۲ــ۲ که سطح مقاطع تغییر می‌کنند تنش‌ها نیز مساوی نیستند.

یکای N/mm^2 با مگاپاسکال (MPa) برابر است. مقدار تنش در فلزات بیشتر با این یکا بیان می‌شود.



شکل ۱ــ۲ــ جسم استوانه‌ای تحت نیروی کششی (سطح مقطع ثابت است).



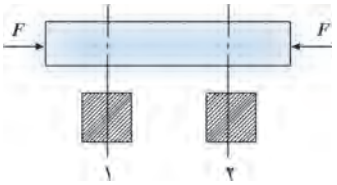
شکل ۲ــ۲ــ جسم مخروطی تحت نیروی کششی (سطح مقطع متغیر است).

در شرایطی که نیروهای وارد بر سطوح برابر باشند آنگاه :

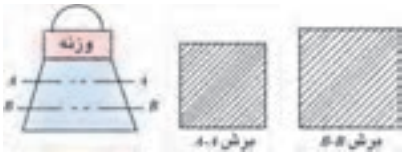
بزرگ‌ترین تنش در جایی رخ می‌دهد که کوچک‌ترین سطح مقطع وجود دارد. در شکل ۲ــ۲ بزرگ‌ترین تنش در سطح مقطع ۳ وجود دارد، زیرا :

$$(\text{تنش در مقطع ۱} = \frac{F}{A_1}) < (\text{تنش در مقطع ۲} = \frac{F}{A_2}) < (\text{تنش در مقطع ۳} = \frac{F}{A_3})$$

کار گروهی : تحلیل مشابهی را می‌توان در مورد جسمی که تحت تأثیر نیروی فشاری قرار دارد ارائه داد. شکل‌های ۳ــ۲ و ۴ــ۲ را ببینید و اندازه تنش در مقاطع مختلف آن‌ها را مقایسه کنید.



شکل ۳ــ۲ــ جسم تحت نیروی فشاری با سطح مقطع ثابت



شکل ۴ــ۲ــ جسم تحت نیروی فشاری با سطح مقطع متغیر

باید در نظر داشت که در **تنش کششی** ساده و **تنش فشاری** ساده، سطحی که تحت تأثیر بار (نیرو) قرار می‌گیرد **عمود بر راستای** نیروی وارد شده است. برای تنش کششی و تنش فشاری رابطه (۱ــ۲) را به صورت زیر نمایش می‌دهند :

رابطه ۲ــ۲ $$\sigma = \frac{F}{A}$$

که در آن :

σ (زیگما) : مقدار تنش کششی یا فشاری است. (یکاهای MPa، kgf/cm^2، ...)

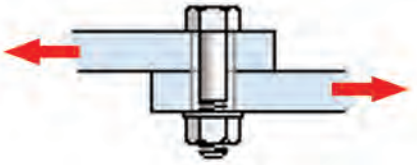
F : مقدار نیروی کششی یا فشاری وارد شده به جسم که باعث به‌وجود آمدن تنش در قطعه شده است. (یکاهای N، kgf، ...)

A : سطح مقطعی ازجسم که تنش در آن به‌وجود آمده است. (یکاهای mm^2، cm^2، ...)

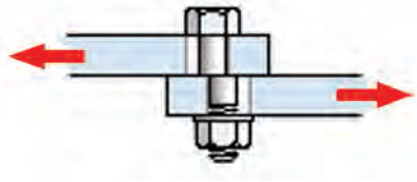
بیش‌ترین تنش کششی در کجای سپری ایجاد شده است؟

معمولاً علامت مثبت را برای نشان‌دادن تنش کششی (عضو در حالت کشش) و علامت منفی را برای نشان‌دادن تنش فشاری (عضو در حالت فشار) به کار می‌برند.

۲ــ۱ــ۲ــ تنش برشی : تنش برشی ساده زمانی در جسم به وجود می‌آید که سطحی که در مقابل بار مقاومت می‌کند **موازی راستای** نیروهای وارده باشد. چنین شرایطی در شکل ۵ــ۲ نشان داده شده است.



الف) پیچ در مقابل نیروی برشی مقاومت می‌کند.



ب) پیچ در اثر نیروی برشی بریده شده است.

شکل ۵ــ۲

یک اتصال پیچی که دو ورق را به یکدیگر متصل کرده است تحت تأثیر نیروی برشی F قرار گرفته و در نتیجه در مقطع ساق پیچ، تنش برشی به‌وجود آمده است. اگر جنس پیچ به اندازه کافی استحکام نداشته باشد تا بتواند تنش برشی لازم را تحمل کند، اتصال مانند آنچه که در شکل ۵ــ۲ــب نشان داده شده است دچار شکست می‌شود. مشابه این اتفاق در اتصالات پرچی نیز ممکن است به وجود آید. در فصل چهارم با محاسبات اتصالات پیچی و پرچی آشنا خواهید شد.

برای تنش برشی رابطه ۱ــ۲ را به صورت زیر نمایش می‌دهند :

رابطه ۳ــ۲

$$\tau = \frac{F}{A}$$

که در آن :

τ(تاو) : مقدار تنش برشی است. (یکاهای MPa ، kgf/cm^2 و ...)

F : مقدار نیروی برشی وارد شده به جسم که باعث به وجود آمدن تنش برشی در قطعه شده است. (یکاهای N، kgf و ...)

A : سطح مقطعی از جسم که تنش برشی در آن به وجود آمده است. (یکاهای mm^2، cm^2 و ...)

تیغه‌های قیچی با وارد کردن نیروهای مساوی و موازی در دو جهت مختلف و تقریباً در یک راستا، باعث ایجاد تنش برشی و نهایتاً برش در ورق می‌شوند.

مسأله نمونه ۱ــ۲ : یک میله فولادی به قطر ۱۰ میلی‌متر، تحت تأثیر نیروی کششی ۲۰۰۰۰ نیوتون قرار گرفته است، تنش به وجود آمده در آن از چه نوعی است و مقدار آن چقدر است؟

راه حل :

$$F = ۲۰۰۰۰ N$$

$$A = \frac{\pi d^۲}{۴} = \frac{۳/۱۴ \times (۱۰ mm)^۲}{۴} = ۷۸/۵ \ mm^۲$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{۲۰۰۰۰ N}{۷۸/۵ mm^۲} = ۲۵۵ \ N/mm^۲$$

تنش ایجاد شده در قطعه از نوع کششی است.

مسأله نمونه ۲ــ۲ : یک قطعه فلزی به ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر در ۱۰۰ میلی‌متر به ارتفاع ۵۰ میلی‌متر تحت تأثیر نیروی فشاری ۴۵ کیلونیوتون قرار دارد، مقدار تنش چند مگاپاسکال است؟

راه حل :

$$F = ۴۵ \ kN = ۴۵ \times ۱۰^۳ N$$

$$A = (۱۰۰ mm)(۱۰۰ mm) = ۱۰^۴ mm^۲$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{۴۵ \times ۱۰^۳ N}{۱۰^۴ mm^۲} = ۴/۵ \ N/mm^۲ = ۴/۵ MPa$$

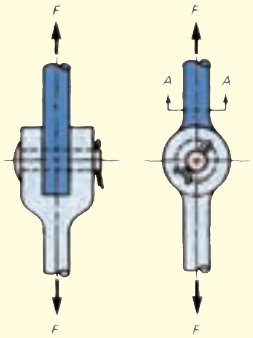
مسأله نمونه ۳ــ۲ : در شکل ۶ــ۲ مقدار تنش برشی در سطح ABCD چقدر است؟ با فرض این که F=۱۰kN، AB=۱۰cm، BC=۵cm می‌باشند.

راه حل : نیروی F به صورت برشی به سطح ABCD وارد می‌شود.

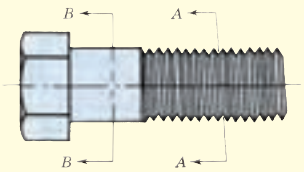
$$F = ۱۰ \ kN = ۱۰^۴ N$$

$$A = (۵۰ mm)(۱۰۰ mm) = ۵ \times ۱۰^۳ mm^۲$$

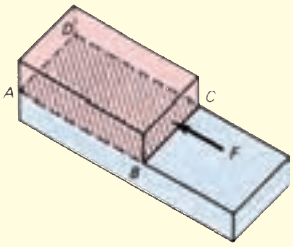
$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{۱۰^۴ N}{۵ \times ۱۰^۳ mm^۲} = ۲ \ N/mm^۲$$



شکل ۸ــ۲



شکل ۷ــ۲



شکل ۶ــ۲

مسأله نمونه ۴ــ۲ : شکل ۷ــ۲ یک پیچ M10×1.5 را نشان می‌دهد. در اثر بستن و سفت کردن مهره، به پیچ نیروی کششی ۲۰ kN وارد می‌شود. اگر قطر در ساق پیچ (مقطع BB) ۱۰ میلی‌متر و در مقطع AA، ۸/۶ میلی‌متر باشد، تنش کششی به وجود آمده در ساق پیچ و در ناحیه دنده‌ها را محاسبه کنید.

راه حل : $F = ۲۰\ kN = ۲ \times ۱۰^{۴}\ N$

در مقطع AA

$$A = \frac{۳/۱۴(۸/۶)^{۲}}{۴} = ۵۸\ mm^{۲}$$

◀ $$\sigma = \frac{۲\times ۱۰^{۴}\ N}{۵۸} = ۳۴۵\ \frac{N}{mm^{۲}}$$

در مقطع BB

$$A = \frac{۳/۱۴(۱۰mm)^{۲}}{۴} = ۷۸/۵\ mm^{۲}$$

◀ $$\sigma = \frac{۲\times ۱۰^{۴}\ N}{۷۸/۵\ mm^{۲}} = ۲۵۵\ \frac{N}{mm^{۲}}$$

ملاحظه می‌شود که بیش‌ترین مقدار تنش کششی در محل دنده‌ها (مقطع AA)، به وجود می‌آید زیرا مقطع پیچ در این ناحیه از ساق پیچ (مقطع BB) کوچک‌تر است.

مسأله نمونه ۵ــ۲ : اتصال نشان داده شده در شکل ۸ــ۲ تحت نیروی کششی ۲۹ kN قرار دارد. اگر قطر پین ۱۲mm و قطر میله در مقطع AA، ۲۲ mm باشد، مقدار تنش برشی در پین و تنش کششی در ساقه میله در مقطع AA را حساب کنید.

راه حل : برش در این پین دوگانه است. یعنی پین در دو مقطع در برابر نیروهای برشی مقاومت می‌کند. مساحت کل ناحیه‌ای که در معرض نیروهای برشی قرار دارد را محاسبه می‌کنیم :

$$A = ۲\times\frac{\pi d^{۲}}{۴} = ۲\times\frac{۳/۱۴(۱۲mm)^{۲}}{۴} = ۲۲۶mm^{۲}$$

◀ تنش برشی در پین

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{۲۹\times ۱۰^{۳}\ N}{۲۲۶mm^{۲}} = ۱۲۸/۳\ MPa$$

در مقطع AA که برابر کشش مقاومت می‌کند، داریم :

$$A = \frac{۳/۱۴\times(۲۲mm)^{۲}}{۴} = ۳۸۰mm^{۲}$$

◀ تنش کششی در ساق میله

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{۲۹\times ۱۰^{۳}\ N}{۳۸۰} = ۷۶/۳\ MPa$$

مسأله نمونه ۶ــ۲ : یک میله آلومینیومی نیروی کششی ۴۵kN را تحمل می‌کند. قطر میله را به نحوی تعیین کنید که تنش وارد شده به میله از ۵۶/۶ MPa بزرگ‌تر نشود.

راه حل :

$$\sigma = \frac{F}{A} \rightarrow A = \frac{F}{\sigma}$$

سطح مقطع موردنیاز برای تحمل نیرو

$$A = \frac{۴۵ \times ۱۰^{۳} N}{۵۲/۵ MPa} = ۷۹۵ mm^{۲}$$

$$A = \frac{\pi d^{۲}}{۴} \rightarrow d = \sqrt{\frac{۴A}{\pi}}$$

◀ حداقل قطر میله برای تحمل نیروی ۴۵kN

$$d = \sqrt{\frac{۴ \times ۷۹۵}{۳/۱۴}} = ۳۱/۸۲ mm$$

با درنظر گرفتن عدم تولید میله به قطر ۳۱/۸۲ mm، میله‌ای به قطر ۳۲ mm انتخاب می‌کنیم.

مسأله نمونه ۷ــ۲ : اگر قطر میله‌ای را که در مسأله قبل محاسبه کردیم ۲ برابر شود، مقدار نیروی قابل اعمال به میله چقدر افزایش پیدا می‌کند؟

راه حل :

$$\sigma = \frac{F}{A} \rightarrow F = A \times \sigma$$

$$A = \frac{\pi d^{۲}}{۴} = \frac{۳/۱۴(۶۴ mm)^{۲}}{۴} = ۳۲۱۵/۳۶ mm^{۲}$$

$$F = ۳۲۱۵/۳۶ mm^{۲} \times ۵۶/۶ MPa = ۱۸۱۹۸۹ \simeq ۱۸۲ kN$$

ملاحظه می‌شود که با دو برابر شدن قطر میله، نیروی قابل اعمال به میله چهار برابر افزایش پیدا می‌کند.

آیا می‌توانید دلیلی برای ۲ kN نیروی اضافی پیدا کنید؟

حالا می‌توانید تمرین‌های آخر فصل را شروع کنید، پیش از آن مطلبِ «**چگونه مسأله حل کنیم؟**» را بخوانید.

۲ــ۲ــ استفاده از خواص مواد در طراحی

طراحان ماشین‌آلات و سازه‌ها باید علاوه‌بر شناسایی و بررسی نیروهای وارد شده به هر قطعه، میزان مقاومت و استحکام اعضای مختلف را نیز بشناسند. اعضای سازه‌ها باید از استحکام کافی برخوردار باشند، اما استحکام بیش از اندازهٔ موردنیاز نیز به معنی اتلاف مواد، انرژی و افزایش هزینه است.

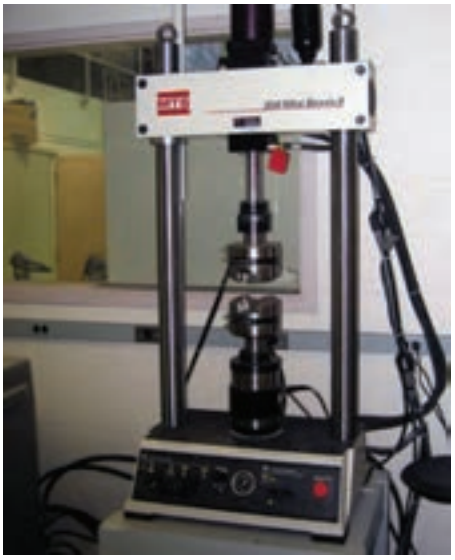
بنابراین مطلع بودن طراحان از خواص مکانیکی و فیزیکی مواد تشکیل دهنده سازه‌ها و ماشین‌آلات مانند انواع فلزات آهنی (فولاد، چدن)، فلزات غیرآهنی (آلومینیوم)، مواد طبیعی (چوب)، مواد مصنوعی (پلاستیک‌ها) و... از اهمیت بسیاری برخوردار است.

در این کتاب نیز برای حل مسائل و تحلیل کاربردهای صنعتی محاسبات فنی، دانستن قوانین ایستایی و محاسبات تنش کافی نیست و اطلاع از خواص مختلف مواد لازم است.

تحقیقات آزمایشگاهی زیادی برای شناسایی خواص مختلف مواد انجام می‌شود. یکی از مهم‌ترین این آزمایش‌ها که خواص مکانیکی مواد را برای طراحان تعیین می‌کند، آزمایش کشش است.

۱ــ۲ــ۲ــ آزمایش کشش : آزمایش کشش برای محاسبه خواص کششی فلزات طراحی شده است. روش انجام این آزمایش در استانداردهای مختلفی تعیین شده است. در این‌جا یکی از این آزمایش‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در این آزمایش رفتار یک قطعه نمونه از فلز مورد آزمایش، در مقابل اعمال نیروی کششی بررسی می‌شود. شکل ۹ــ۲ قطعه نمونه آزمایشی‌ای از فلز را نشان می‌دهد.

شکل ۹ــ۲ــ قطعه نمونه برای آزمایش کشش



شکل ۱۰ــ۲ــ دستگاه آزمایش کشش

بیش‌تر بدانید

واژه‌های زیر در مورد خواص مکانیکی مواد مورد استفاده قرار می‌گیرند که در این‌جا با تعاریفی از آن‌ها آشنا می‌شویم :

سختی :

توانایی مواد برای مقاومت در مقابل سایش یا نفوذ سایر مواد است. استحکام فلزات با سختی آن‌ها متناسب است.

کشسانی یا الاستیسیته :

ویژگی‌ای از مواد است که باعث می‌شود قطعه پس از حذف بار، به اندازه اولیه خود بازگردد. مقدارِ بزرگ‌تر از حد الاستیک یک ماده نشان دهنده الاستیسیتهٔ خوب است.

پلاستیسیته :

ویژگی‌ای از مواد است که نشان دهنده تغییر شکل بی‌بازگشت قطعه است بدون آن‌که شکست رخ دهد.

نمونه آزمایشی از دو انتها در دستگاه آزمایش (شکل ۱۰ــ۲) قرار گرفته و نیروی کششی محوری به آن وارد می‌شود. با افزایش مقدار نیرو، طول نمونه آزمایشی نیز افزایش می‌یابد. مقدار نیروی وارد شده و افزایش طول قطعه توسط دستگاه، اندازه‌گیری و نمایش داده می‌شود. نتایج به دست آمده از آزمایش در جدولی ثبت می‌شود. اعمال نیروی کششی و ثبت نتایج آزمایش تا شکستن قطعه ادامه پیدا می‌کند. برای درک بهتر آزمایش لازم است تا مفهوم کرنش معرفی شود.

۲ــ۲ــ۲ــ تنش و کرنش : برای بررسی نتایج آزمایش، تنش و نسبت تغییر طول نمونه آزمایشی به طول اولیه آن را محاسبه می‌کنند. میزان تغییرات طول بر طول اولیه **کرنش** نامیده می‌شود. رابطه کرنش به صورت زیر بیان می‌شود :

رابطه ۴ــ۲

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

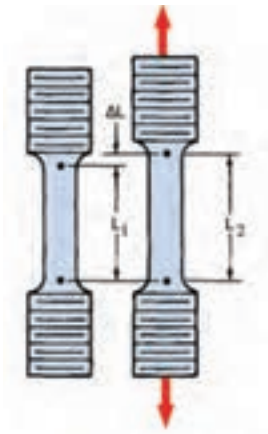
که در آن :

ε (اپسیلون) : مقدار کرنش به وجود آمده در قطعه است. (بدون یکا)

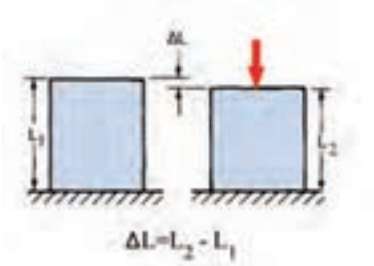
ΔL : تغییرات اندازه‌ای که در اثر اعمال نیرو در قطعه به وجود آمده است. (یکاهای mm ,....)

L : طول اولیه قطعه پیش از اعمال نیرو است. (یکاهای mm ,...)

در شکل ۱۱ــ۲ــ الف تغییر طول قطعه نمونه آزمایش، بعد از اعمال نیروی کششی نشان داده شده است. شکل ۱۱ــ۲ــ ب نیز تغییر طول در برابر نیروی فشاری را نشان می‌دهد. توجه داشته باشید که در هر دو مورد ΔL در راستای نیروی اعمال شده اندازه‌گیری می‌شود.



الف) نمونه آزمایش کشش قبل و بعد از اعمال نیروی کششی F



ب) قطعه تحت فشار قبل و بعد از اعمال نیروی فشاری F (L_1 طول اولیه و L_2 طول ثانویه)

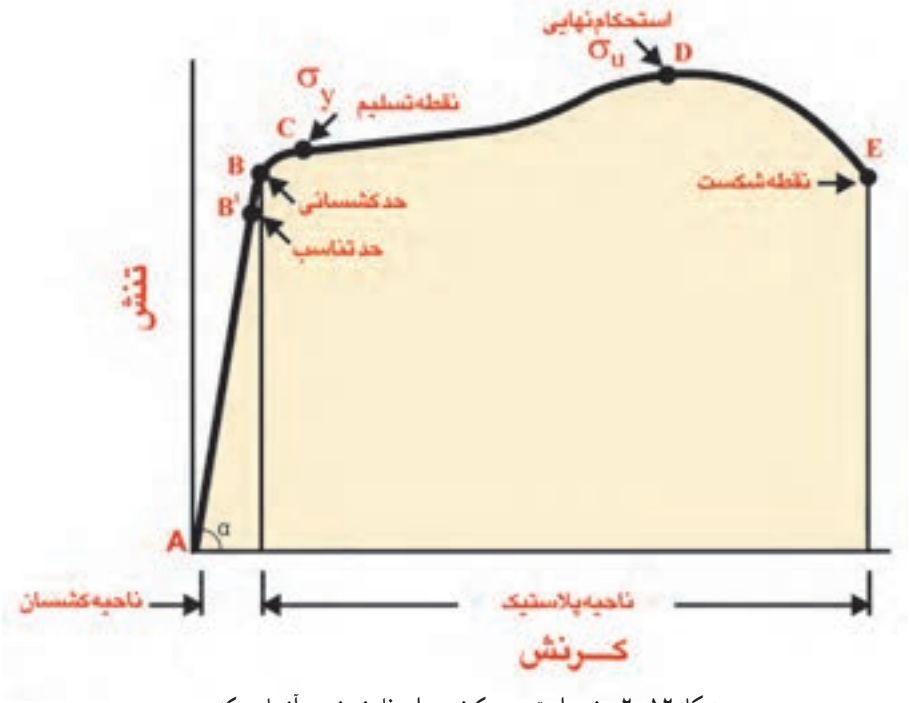
شکل ۱۱ــ۲

درختان نمادی از استقامت در شرایط سخت محیطی مانند باد و طوفان و زلزله هستند. مواردی که نام برده شد، انواع نیروها را به درختان وارد می‌کنند که باعث ایجاد تنش‌های مختلفی در آن می‌شود، اما چگونه درختان مقاومت می‌کنند؟

راز این مقاومت علاوه بر سلول‌های بلند تشکیل دهنده تنه درختان و انعطاف‌پذیری چوب، در مقطع درخت نهفته است. مقطع دایره‌ای برای تحمل انواع بارها مقطع مناسبی است.

با استفاده از روابط (۲ــ۲) و (۴ــ۲)، مقدار تنش و کرنش را برای نتایج به دست آمده از آزمایش کشش محاسبه نموده و سپس مقدار تنش را بر حسب کرنش در نموداری ترسیم می‌نمایند، نمودار شکل ۱۲ــ۲ از نتایج یک آزمایش کشش ترسیم شده است.

بخشی از منحنی که به صورت خط راست و بین دو نقطه A، 'B است، تناسب خطی بین تنش و کرنش را نشان می‌دهد. در نقطه 'B خط راست تمام می‌شود، به همین دلیل نقطه 'B را **حد تناسب** می‌نامند. در هر تنشی تا قبل از نقطه B هرگاه بار از روی نمونه آزمایشی برداشته شود نمونه آزمایشی به طول اولیه خود باز می‌گردد. در تنش‌های بعد از نقطه B در صورت حذف بار، نمونه آزمایشی به طول اولیه خود باز نمی‌گردد و قدری افزایش طول به صورت دائمی در آن باقی می‌ماند. نقطه B مرز بین ناحیه کشسانی و تغییر شکل دائمی در قطعه است. از این رو نقطه B را **حد کشسانی** می‌نامند. در مواد چکش خوار حد کشسانی (نقطه B) و حد تناسب (نقطه 'B) بسیار به هم نزدیک‌اند.



شکل ۱۲ــ۲ــ نمودار تنش ــ کرنش برای فلز نمونه در آزمایش کشش

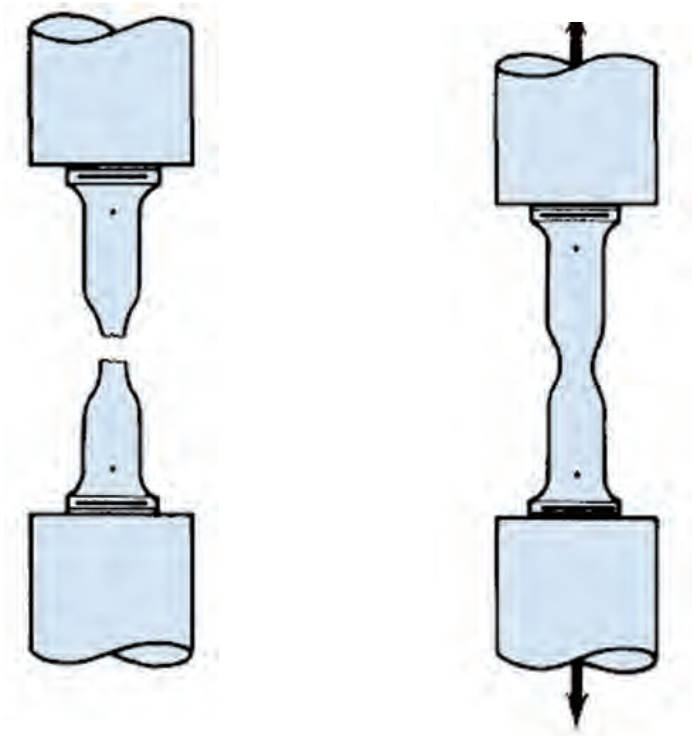
رابطه میان تنش و کرنش چیست؟

وقتی ماده‌ای در محدوده کشسان خود تحت تأثیر نیرو قرار می‌گیرد، تنش و کرنش متناسب هستند. آن‌ها به طور مستقیم با یک عدد که ضریب کشسانی نامیده می‌شود با یکدیگر رابطه دارند.

کرنش × ضریب کشسانی = تنش

در ادامه آزمایش کشش به نقطه‌ای می‌رسیم که در آن بدون افزایش قابل توجهی در نیرو، شاهد افزایش طول در نمونه آزمایش هستیم. این نقطه که بر روی نمودار تنش ــ کرنش با حرف C نشان داده شده است نقطه تسلیم نامیده می‌شود. مقدار تنش در این نقطه را «**استحکام در نقطه تسلیم**» یا به اختصار «**تنش تسلیم**» می‌نامند و با σ_y یا $\sigma_{تسلیم}$ نمایش داده می‌شود.

تنش در نقطه D، **حد نهایی استحکام** نامیده می‌شود. این بیش‌ترین مقدار تنشی است که نمونه آزمایشی می‌تواند تحمل نماید. استحکام نهایی را با σ_u یا $\sigma_{نهایی}$ نمایش می‌دهیم. پس از این نقطه، در قطعه گلویی بوجود آمده و پس از کاهش سطح مقطع قطعه در نقطه E دچار شکست می‌شود.



الف) نمونه آزمایشی در زمان ایجاد شدن گلویی

ب) نمونه آزمایشی پس از شکست

شکل ۱۳ــ۲

فکر کنید

چون ساختمان‌ها و بناهای تاریخی ایران براساس محاسبات دقیق بنا شده است، درگذر زمان همچنان ثابت و استوار باقی مانده‌اند. اما برای حفظ این آثار ارزشمند نیاز به مراقبت و نگهداری می‌باشد. در شکل‌های فوق محراب مسجد جامع یزد از آثار قرن ۶ نشان داده شده است.

مرمت‌گران، با یک ابزار اندازه‌گیری بسیار ساده که از گچ و شیشه ساخته شده است، کرنش‌ها و رشد ترک‌ها را در ساختمان محراب نظارت و اندازه‌گیری می‌کنند. می‌توانید روش کار این ابزار را توضیح دهید؟

۳ــ۲ــ ضریب کشسانی و قانون هوک

ناحیه بین A و B در نمودار تنش ــ کرنش ناحیه کشسان نامیده می‌شود. شیب خط AB بیان کننده میزان کشسان بودن ماده است.

مقدار شیب این خط که نسبت بین تنش و کرنش در ماده است مقدار ثابتی است، که ضریب کشسانی (مدول الاستیسیته) نامیده شده و با حرف E نمایش داده می‌شود.

رابطه ۵ــ۲

$$\tan\alpha = E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

یا

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

این رابطه به **قانون هوک** معروف است.

با جایگزین کردن روابط تنش و کرنش در رابطهٔ فوق می‌توان رابطه ۶ــ۲ را برای محاسبه تغییر طول به‌دست آورد.

پس داریم :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L}$$

رابطه ۶ــ۲

$$\Delta L = \frac{F \times L}{A \times E}$$

که در روابط فوق :

E : ضریب کشسانی ماده (یکای MPa و . . .)

ε : مقدار کرنش به وجود آمده در قطعه (بدون یکا)

ΔL : تغییرات اندازه‌ای است که در اثر اعمال نیرو در قطعه به وجود آمده است. (یکای mm، ...)

F : مقدار نیروی وارد شده به جسم که باعث به وجود آمدن تنش در قطعه شده است. (یکای N، ...)

A : سطح مقطعی از جسم که تنش در آن به وجود آمده است. (یکای mm^2، ...)

L : طول اولیه قطعه پیش از بارگذاری است. (یکای mm، ...)

ضریب کشسانی در هر ماده مقدار ثابتی است و جزء ویژگی‌های مکانیکی ماده محسوب می‌شود. این ضریب برای فلزات در کشش و فشار یکسان است. در جدول ویژگی‌های مواد (پیوست ۲ ــ ب) ضریب کشسانی مواد مختلف نمایش داده شده است.

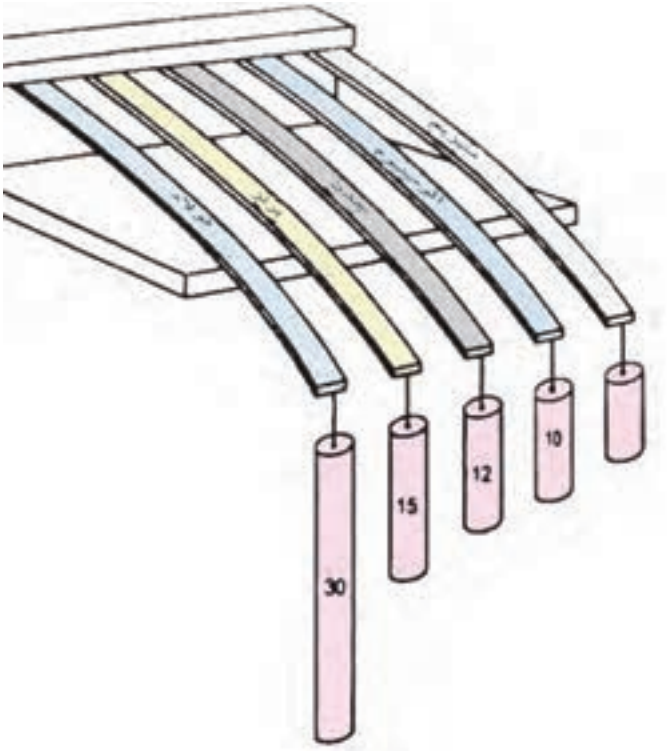
رابرت هوک

(قرن ۱۷ میلادی ــ ۱۱و۱۲ هجری)

هوک فیزیکدانی بود که گرچه در سراسر عمر از بیماری رنج می‌برد، لیکن یک لحظه از کار و کوشش باز نه ایستاد. هوک در تلسکوپ‌ها و دیگر ابزارهای نجومی و ساعت‌های آن عصر، اصلاحات بسیاری به عمل آورد. او می‌دانست که حرکت سیارات به دور خورشید را باید یک مسأله مکانیکی در نظر گرفت و برای نیروی گرانشی قانون عکس مجذور فاصله را پیشنهاد کرد.

آنچه بیش‌تر دلیل معروف شدن هوک است استخراج رابطه تجربی F=KX است. وی نخستین فردی بود که درباره کشسانی مطالعه کرد. او به رفتار کشسان یا الاستیک فنرها علاقه داشت و همین علاقه، وی را به کشف قانون هوک هدایت کرد. این قانون بیان می‌دارد که مقدار کشیده شدن یک جسم کشسان، با نیروی وارد شده بر آن، نسبت مستقیم دارد.

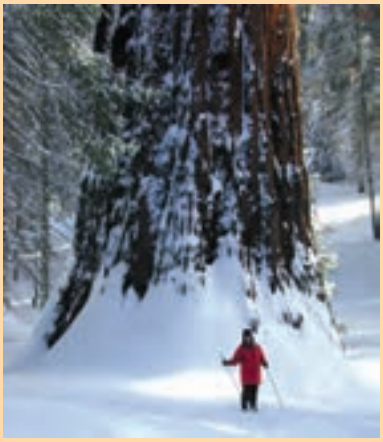
فکر کنید : شکل ۱۴ــ۲ تسمه‌هایی از جنس‌های مختلف را نشان می‌دهد، که دارای ابعاد یکسانی هستند. همان‌گونه که ملاحظه می‌کنید، نیروی وزن مورد نیاز برای خمش یکسان تسمه‌ها متفاوت است. چرا؟

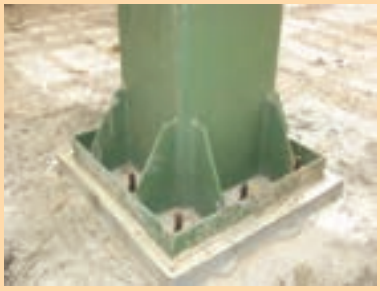


شکل ۱۴ــ۲

فلزات شکننده : اجزائی که با فلزات شکننده مانند چدن ساخته می‌شوند، پیش از شکستن دچار تغییر شکل قابل توجهی نمی‌شوند. بنابراین نقطه تسلیم مانند آنچه که پیش از این در مورد فلزات چکش‌خوار مشاهده شد در نمودار تنش ــ کرنش این مواد وجود ندارد. شکل ۱۵ــ۲ نموداری از نتایج آزمایش کشش برای فلزات شکننده را نمایش می‌دهد.

مقایسه کنید

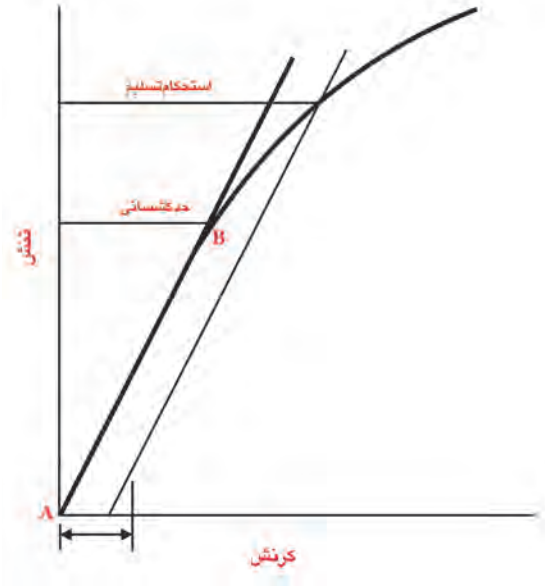




پیش از این مطالبی در مورد مقاومت درختان در مقابل نیروهای مختلف بیان شد. تصویر نخست تنه یکی از کهن‌سال‌ترین درختان جهان را در بخش نزدیک زمین نشان می‌دهد. چه شباهتی بین این تصویر و تصویر دوم که طرح اتصال ستون به کف ستون را نشان می‌دهد، می‌بینید؟

(الف) (ب)

نمونهٔ آزمایشگاهی الف) برای ماده نرم و ب) برای شکننده می‌باشد.



الف) شکست در قطعه نمونه از فلزات شکننده

ب) نمودار تنش ـ کرنش در آزمایش کشش برای مواد شکننده

شکل ۱۵ــ۲

۴ــ۲ــ تنش‌های مجاز

استحکام که از ویژگی‌های مواد است با آزمایش‌های مکانیکی مانند آزمایش کشش، اندازه‌گیری می‌شود. در عمل نمی‌توان قطعات را به گونه‌ای طراحی کرد که تا «**استحکام نهایی**» ماده بارگذاری شوند. در بسیاری از مسائل محاسباتی، به‌هنگام طراحی و یا تحلیل قطعات صنعتی و اتصالات، هدف نه تنها پیش‌گیری از شکست قطعات، بلکه جلوگیری از تغییر شکل دائمی در آن‌هاست، بنابراین بیش‌ترین مقدار تنش قابل قبول ایجاد شده در قطعه باید در ناحیه کشسان باشد.

با توجه به این‌که بارگذاری واقعی برروی قطعات ممکن است با آنچه که در هنگام طراحی پیش‌بینی شده متفاوت باشد و یا اینکه کیفیت و روش تولید مواد اولیه بسیار گوناگون است و همواره مواد دقیقاً مطابق طراحی تولید نمی‌شوند. لذا برای اطمینان از یک طراحی قابل اعتماد، مقدار تنش قابل قبول باید به اندازه کافی کوچک شود، تا تمام عدم قطعیت‌های فوق را پوشش دهد. در روش طراحی بر اساس تنش مجاز قطعه را به گونه‌ای طراحی می‌کنند که تنش محاسبه شده در آن در بعدی (مثلاً ۶۰٪) از استحکام در نقطه تسلیم بالاتر نرود. مقدار این تنش که «**تنش مجاز**» نامیده می‌شود بسته به کاربردهای مختلف توسط نهادهای تخصصی تعیین و پیشنهاد می‌شود.

فلزات هم خسته می‌شوند!

هنگامی که سازه‌ای تحت بارگذاری متناوب قرار می‌گیرد، حتی اگر بارگذاری باعث بوجود آمدن تنشی کمتر از تنش تسلیم شود، جسم دچار شکست می‌شود که این پدیده به نام «خستگی» شناخته شده و **بارگذاری متناوب** تولید کننده آن «بارگذاری خستگی» نامیده می‌شود.

به‌عنوان نمونه محورهای دورانی توربین‌ها، برخی از مخازن تحت فشار، پل‌های فلزیِ عبور و مرور خودرو و قطار تحت بارگذاری خستگی قرار دارند.

در این کتاب از پیشنهاد AISC[1] برای مقادیر تنش مجاز در فولادها استفاده خواهیم کرد.

رابطه ۷ـ۲ $\sigma_{\text{مجاز}} \leq ۰/۶ \times \sigma_{\text{تسلیم}}$

رابطه ۸ـ۲ $\tau_{\text{مجاز}} = ۰/۴ \times \sigma_{\text{تسلیم}}$

که در روابط فوق :

$\sigma_{\text{مجاز}}$: تنش کششی مجاز

$\tau_{\text{مجاز}}$: تنش برشی مجاز

$\sigma_{\text{تسلیم}}$: استحکام در نقطه تسلیم

مقدار **استحکام** در نقطه تسلیم برای مواد صنعتی پرکاربرد در پیوست ۲ ــ ب آمده است. از آنجا که فولاد ساختمانی در صنعت بسیار پرکاربرد است در این‌جا مقدار تنش‌های مجاز برای فولاد St37 را محاسبه می‌کنیم.

با مراجعه به جدول (پیوست ۲ ــ ب) برای فولاد ساختمانی St37 داریم :

$$\sigma_{\text{تسلیم}} = ۲۳۴ \frac{N}{mm^۲}$$

$$\sigma_{\text{مجاز}} \leq ۰/۶ \times ۲۳۴$$

◀ تنش کششی مجاز $\sigma_{\text{مجاز}} \leq ۱۴۰ \frac{N}{mm^۲}$

◀ تنش برشی مجاز $\tau_{\text{مجاز}} = ۰/۴ \times ۲۳۴$

$$\tau_{\text{مجاز}} = ۹۴ \frac{N}{mm^۲}$$

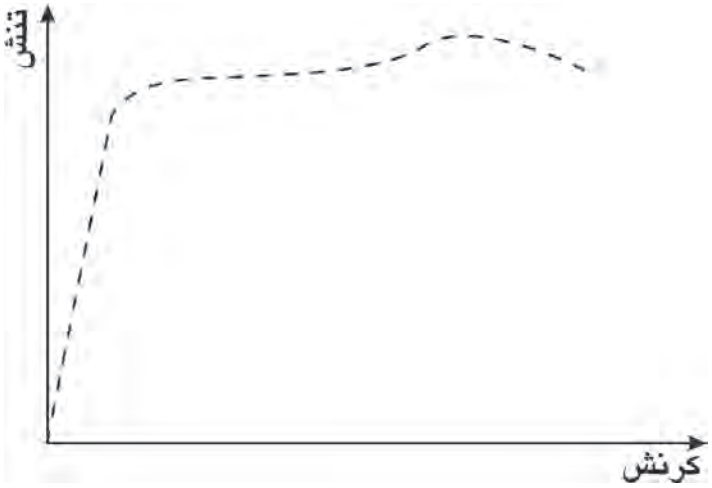
۱ــ American Instituate of Steel Construction

امروزه با کمک نرم‌افزارهای مهندسی، طراحی قطعات و اجزاء ماشین‌ها آسان‌تر شده است. با ترسیم مدل سه‌بعدی قطعه، اعمال نیروها در محیط مجازی و معرفی جنس قطعه، نرم‌افزار با روش‌های محاسباتی تنش‌های مختلف را محاسبه کرده و نقاطی را که تنش در آن‌ها بیش از حد مجاز است مشخص می‌کند.

تصویر بالا نتایج یکی از این تحلیل‌های کامپیوتری را برای شاتون در موتور خودرو نشان می‌دهد. در بارگذاری انجام شده تنش در ناحیه‌هایی که با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند، بیش‌تر است و در نواحی آبی تنش کمتر است.

مقدار تنش کششی مجاز و تنش برشی مجاز فولاد ساختمانی St37 را به خاطر بسپارید. علاوه بر اینکه از مقادیر به‌دست‌آمده، در حل مسائل فصل‌های آینده استفاده خواهیم کرد، این اعداد در صنعت نیز بسیار پرکاربرد هستند.

تمرین در کلاس : در شکل زیر نمودار تنش ـ کرنش برای یک نوع فولاد با خط چین نمایش داده شده است. با توجه به مطالب گفته شده حد استحکام نهایی (σ_u) و حد تسلیم (σ_y) را بر روی نمودار مشخص کنید و ناحیه تنش مجاز براساس توصیه AISC را پر رنگ نمائید.



شکل ۱۶ــ۲

۵ــ۲ــ ضریب اطمینان

روشی که برای تعیین تنش مجاز در بخش پیش نشان دادیم، در برخی از زمینه‌های تخصصی دیگر طراحی نیز به‌کار می‌رود، با این وجود یک روش عمومی نیست. زیرا برای مواد و بارگذاری‌های معینی مناسب است.

روش عمومی ارتباط بین تنش و استحکام، روش «ضریب اطمینان» است. ضریب اطمینان که آن را با F.S. نشان می‌دهیم، طبق رابطه زیر تعریف می‌شود :

رابطه ۹ــ۲

$$\text{ضریب اطمینان (F.S.)} = \frac{\text{استحکام}}{\text{تنش}} > ۱$$

در این رابطه، به طور معمول استحکام در نقطه تسلیم یا استحکام نهایی را در صورت و تنش ایجاد شده در قطعه را در مخرج قرار می‌دهند. توجه داشته باشید که تنش و مقاومت به کار رفته باید از نظر نوع و یکا با یکدیگر هماهنگی داشته باشند. یعنی چنان‌چه استحکام برشی با یکای $\frac{N}{mm^۲}$ در صورت قرار گیرد، تنش نیز باید تنش برشی و با یکای $\frac{N}{mm^۲}$ باشد.

ضریب اطمینان را به صورت ساده می‌توان چنین تعریف کرد که برای اطمینان بیشتر در طراحی، قطعه را چند برابر قوی‌تر از آن‌چه که واقعاً لازم است، می‌سازند. البته باید توجه داشت

توماس یانگ

(قرن ۱۸و ۱۹میلادی ــ ۱۳ هجری)

یانگ اعجوبه‌ای بود. در دو سالگی خواندن می‌دانست و در هشت سالگی به‌تنهایی به آموختن ریاضی پرداخت و در نه سالگی شروع به یادگیری زبان‌های فرانسوی، ایتالیایی، عبری، عربی و فارسی کرد به طوری که در ۱۴ سالگی این زبان‌ها را می‌دانست.

یانگ تحصیلات دانشگاهی خود را در رشته پزشکی گذراند. مطالعات خود را بر روی ساختمان چشم و ماهیت نور متمرکز کرد.

از کارهای دیگر یانگ مطالعه بر نیروی کشش سطحی مایعات و نیز خاصیت کشسانی در جامدات است و به دلیل کارهای علمی او در این زمینه، ضریب کشسانی موسوم به "مدول یانگ" را به نام او انتخاب کرده‌اند.

ضریب اطمینان یا Factor of Safety را به صورت مخفف با F.S. نمایش می‌دهند.

که انتخاب بی‌دلیل ضرایب اطمینان بالا از یک سو طرح را از نظر اقتصادی غیرقابل دفاع می‌کنند و از سوی دیگر طراحی سایر قطعات سازه یا ماشین را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

جدول ۲ــ۲ نمونه‌ای از ضرایب اطمینان پیشنهادی برای قطعات فولادی را معرفی می‌کند.

جدول ۲ــ۲ــ ضریب اطمینان (F.S.) پیشنهادی

ردیف	شرایط بارگذاری	ضریب اطمینان
۱	ایستایی	۲
۲	بار متغیر	۳
۳	بار ضربه‌ای	۵

توجه داشته باشید که طراح بسته به کاربرد طرح، می‌تواند ضرایب اطمینان بزرگ‌تر یا کوچک‌تری را انتخاب کند.

در زمینه‌های تخصصی، تنش‌های مجاز و ضرایب اطمینان توسط نهادهای مرتبط تعیین و اعلام می‌شود، که از جمله می‌توان به توصیه‌ها و استانداردهای صنایع هوایی، صنعت ساختمان و یا صنعت نفت اشاره کرد.

ضریب اطمینان را به‌صورت ساده می‌توان به این صورت تعریف کرد که برای اطمینان بیش‌تر در طراحی، قطعه را چند برابر قوی‌تر از آن‌چه که ظاهراً لازم است می‌سازند.

بیش‌تر بدانیم

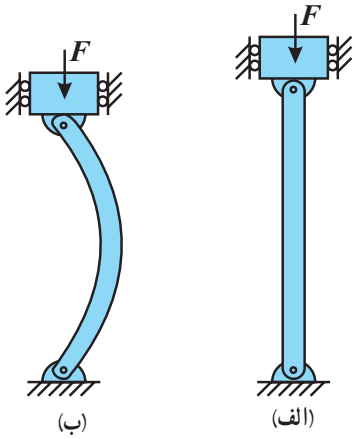
در طراحی، هنگام مشخص کردن اندازه قطعات، تقریباً در همه موارد مجبوریم از اندازهٔ مواد موجود در انبار یا بازار استفاده کنیم. به‌عنوان مثال، در صورتی‌که در پاسخ مسأله‌ای برای تعیین قطر یک میله عدد ۱۹/۴mm به‌دست آمده باشد، نزدیک‌ترین اندازه موجود را به عنوان پاسخ اعلام خواهیم کرد که در مورد این مثال، پاسخ میله به قطر ۲۰mm خواهد بود.

توجه داشته باشید که در انتخاب اندازه‌هایی که از نتیجه محاسبه کوچک‌تر هستند باید ضریب اطمینان موردنظر را دوباره کنترل کرد.

۶ــ۲ــ کمانش در ستون‌ها

فرض کنید می‌خواهیم ستونی به طول L را برای نگه‌داری بار مفروض F طراحی کنیم (شکل ۱۷ــ۲ــ الف). ستون در دو انتهایش اتصال پینی دارد. F باری محوری است و از مرکز ستون می‌گذرد. اگر A مساحت سطح مقطع ستون، طوری انتخاب شود که مقدار تنش ($\sigma = \frac{F}{A}$) روی مقطع عرضی کوچک‌تر از تنش مجاز (σ_{all}) ماده مورد استفاده باشد، ظاهراً می‌توان نتیجه گرفت که ستون به درستی طراحی شده است.

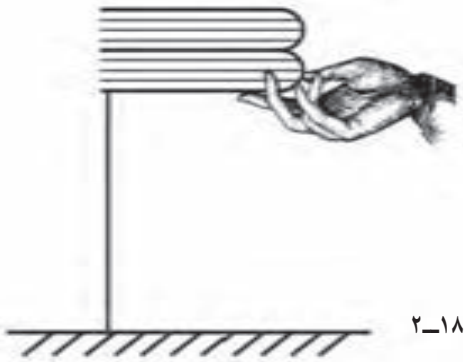
اما ممکن است وقتی که بار اعمال می‌شود، ستون به‌جای آن‌که مستقیم باقی بماند، دچار **کمانش** شود. یعنی به‌طور ناگهانی انحنای شدید پیدا کند (شکل ۱۷ــ۲ــ ب). روشن است ستونی که تحت بار مشخص شده، کمانش کند، به‌درستی طراحی نشده است. با یک آزمایش این موضوع را بررسی می‌کنیم.



شکل ۱۷ــ۲ــ کمانش در ستون‌ها

آزمایش کنید : مقوایی به ابعاد ۳۰۰mm×۲۰۰mm و به ضخامت تقریبی ۳mm تهیه کنید، (می‌توانید از مقوای جعبه شیرینی استفاده کنید). می‌خواهیم مطابق شکل از این مقوا برای تحمل بخشی از نیروی وزن کتاب استفاده کنیم. پیش از شروع آزمایش پیش‌بینی کنید که به این مقوا، بار چند کتاب را می‌توان اعمال کرد؟ پیش‌بینی خود را یادداشت کنید.

مطابق دستورالعمل جدول بعد، آزمایش را ادامه دهید و تعداد کتاب‌ها یا وزن آن‌ها را در جدول وارد کنید.



شکل ۱۸ــ۲

تقویت تیرها و ستون‌ها

تنش‌های ایجاد شده در اثر اعمال بار به تیرها و ستون‌ها، در تمام نقاط آنها یکسان نیست. در اجرای سازه‌های فولادی و اسکلت فلزی ساختمان‌ها نقاطی را که بیش‌ترین تنش در آن‌ها رخ می‌دهد، به‌وسیله اضافه کردن ورق و جوش‌کاری تقویت می‌کنند.

این ورق‌های تقویتی از اهمیت بسیار زیادی برخوردارند و استحکام سازه فلزی را تضمین می‌کنند.

جدول ۳ــ۲ــ ثبت نتایج آزمایش

ردیف	شرح آزمایش	تعداد کتاب‌ها	وزن کتاب‌ها
۱	مقوا از طول بلند (۳۰۰mm) زیر کتاب‌ها قرار گرفته است.		
۲	مقوا از طول کوتاه (۲۰۰mm) زیر بار قرار گرفته است.		
۳	مقوا را به دو نیمه ۱۵۰mm×۲۰۰mm تقسیم کرده و یکی از آن‌ها از طول ۱۵۰mm زیر بار قرار گرفته است.		
۴	نیمه دیگر به یک استوانه به ارتفاع ۱۵۰mm تبدیل شده و پس از چسباندن درز آن زیر بار قرار گرفته است.		

با بررسی نتایج آزمایش در گروه خود به این سئوال پاسخ دهید که :

- مقدار بار قابل اعمال به ورق مقوایی به **چه عواملی** بستگی دارد؟
- با هم فکری در گروه، روشی بیابید که بیش‌ترین تعداد کتاب را بتوان به این مقوا اعمال کرد.

با توجه به مثال فوق و آزمایش انجام شده، ملاحظه می‌شود که برای عضوهایی که تحت فشار قرار دارند باید به پایداری آن‌ها نیز توجه شود. روش‌های مختلفی برای پیش‌گیری از کمانش در ستون‌ها وجود دارد که اصلاح شکل سطح مقطع ستون، تغییر نوع تکیه‌گاه در دو سر ستون و کاهش اندازه طول آزاد ستون از آن جمله است.

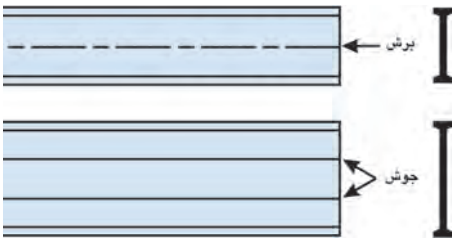
پرسش : با توجه به مطالب گفته شده، در صورتی‌که سطح مقطع‌های یک نیم‌رخ ناودانی، یک تیرآهن I شکل و یک لوله، همه از جنس فولاد ساختمانی، یکسان باشند، کدام‌یک را برای ساخت ستون انتخاب خواهید کرد؟ چرا؟

یکی از متداول‌ترین روش‌های ساخت ستون در صنعت، اتصال دو تیرآهن I شکل به یکدیگر است. تیرها را به‌وسیله ورق‌های واسطه به هم متصل نموده و جوش‌کاری می‌کنند.

شکل فوق ساخت اشتباه این نوع ستون و تخریب آن را در زلزله نشان می‌دهد. کدام پدیده باعث خم شدن ستون شده است؟

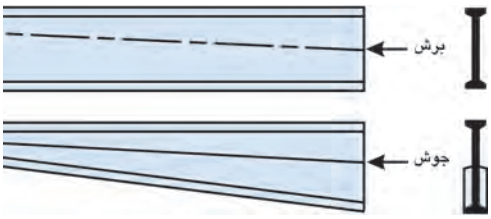
۷ــ۲ــ خمش در تیرها

با اعمال بار، بر روی تیرهای افقی ساده در سازه‌های فلزی، خمش در تیرها رخ می‌دهد. برای پیش‌گیری از این پدیده، تیرها را تقویت می‌کنند. این نوع تیرها به تیرهای بارگسترده معروفند. تیرهایی که برای تحمل بارگسترده هستند از طریق برش تیغه (جان) یک تیرآهن از وسط و اضافه نمودن یک ورق دیگر به جان و جوش‌کاری همه آن‌ها به یکدیگر ساخته می‌شوند. شکل ۱۹ــ۲ روش ساختن این نوع تیر را نشان می‌دهد. این عمل باعث افزایش ارتفاع تیر و افزایش توانایی تحمل بار آن می‌شود.



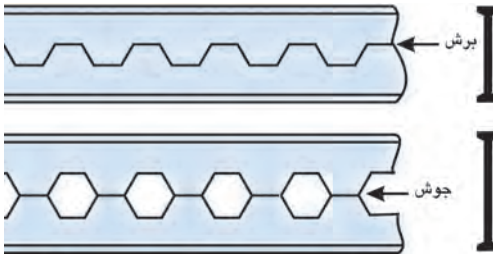
شکل ۱۹ــ۲

اگر تیر، از طریق برش زاویه‌دار تیغه یک تیرآهن، گسترده شود، نتیجه کار تیری مخروطی می‌باشد. این تیر دارای بیش‌ترین استحکام خمشی در مرکز گستردگی است. چنین طرحی باعث کمتر شدن وزن فولاد موردنیاز برای سازه فلزی نیز می‌شود.



شکل ۲۰ــ۲

از دیگر روش‌های متداول ساخت تیرهای گسترده، می‌توان به روش لانه زنبوری اشاره کرد. روش تولید این تیرها نیز در شکل ۲۱ــ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲۱ــ۲

تحقیق کنید

تفاوت بین خمش در تیرها و کمانش در ستون‌ها را تحقیق کنید و نتایج را در کلاس بررسی نمایید.

برش تیرآهن برای تولید تیر لانه زنبوری

چگونه مسأله حل کنیم؟

یکی از کلیدی‌ترین بخش‌های حل مسائل تنش، شناخت درست سطحی است که در مقابل نیروهای وارد شده به جسم، مقاومت می‌کند. بنابراین ابتدا با تحلیل درستی از بارگذاری انجام شده بر روی قطعه، انواع تنش بوجود آمده را شناسایی نموده و سپس سطوحی را که در اثر اعمال نیرو در آن‌ها تنش بوجود آمده است، محاسبه نمایید.

بی‌توجهی به یکای کمیت‌ها از جمله اشتباه‌های رایج در حل مسائل است. همان‌گونه که گفتیم تنش در فلزات معمولاً با یکای MPa بیان می‌شود که مقدار آن معادل $1N/mm^2$ است. بنابراین در مسائل تنش ابتدا یکای طول‌ها را به mm و یکای نیروها را به N تبدیل نمایید. در این صورت پس از محاسبه تنش یکای آن MPa خواهد بود.

در صورتی که در حل مسائل واقعی در صنعت، با یکاهایی غیر از آنچه که در این فصل مطرح شد روبه‌رو شدید، می‌توانید از جدول تبدیل یکاها در پیوست ت ــ ۱ استفاده نمایید.

«تیر ــ ورق» از برش‌کاری و جوش‌کاری ورق‌های فولادی تولید می‌شود. نمونه رایجی از کاربرد آن‌ها، در ساخت سوله‌های صنعتی است.

تمرین‌های فصل دوم

۱ــ۲ــ یک قطعه فولادی با سطح مقطع مستطیلی به ابعاد ۲۰mm×۳۰mm و طول 400mm با نیروی 90kN کشیده می‌شود. تنش کششی در این قطعه چند $\frac{N}{mm^2}$ است؟

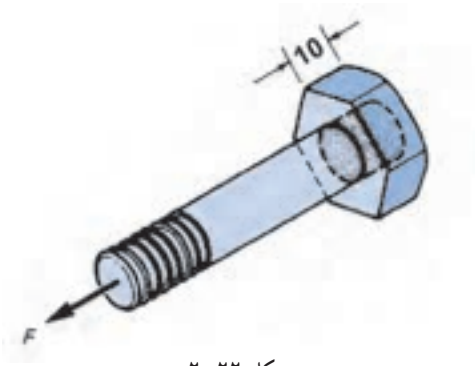
۲ــ۲ــ میله فولادی به قطر ۵۰mm نیروی فشاری ۹kN را تحمل می‌کند. تنش فشاری در میله چند MPa است؟

۳ــ۲ــ نیروی کششی که بر پیچ M20×2.5 وارد شده است، تنش کششی ۶۰MPa را در ساق پیچ به وجود آورده است. مقدار نیروی F چند کیلو نیوتن است؟

۴ــ۲ــ یک سازه فلزی به جرم ۱۸۰ تن بر روی ۲۴ پایه استوانه‌ای کوتاه که قطر هر یک ۱۵۰mm است قرار دارد. میانگین تنش فشاری به وجود آمده در پایه‌ها چقدر است؟

۵ــ۲ــ اگر در مسأله قبل، مقدار تنش مجاز قابل اعمال به ستون‌ها ۷/۵MPa باشد، لازم است ستون‌ها چه قطری داشته باشند؟

۶ــ۲ــ یک پیچ استاندارد M16×2 مطابق شکل ۲۲ــ۲ تحت تأثیر نیروی کششی ۴۵kN قرار دارد. ارتفاع سر پیچ (گل پیچ) ۱۰mm است، مقدار تنش کششی در ساق پیچ و تنش برشی در گل پیچ را محاسبه کنید.



شکل ۲۲ــ۲

۷ــ۲ــ در مسأله قبل، ارتفاع لازم برای سر پیچ را محاسبه کنید، به طوری که تنش کششی به وجود آمده در ساق پیچ دو برابر تنش برشی ایجاد شده در سر پیچ باشد.

۸ــ۲ــ در مسأله ۱ــ۲ میزان افزایش طول قطعه فولادی و کرنش آن را محاسبه کنید (مقدار مدول الاستیسیته را از جدول استخراج کنید).

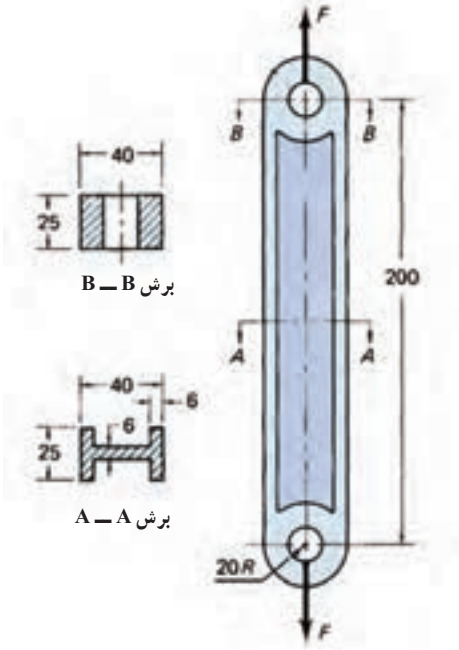
۹ــ۲ــ برای پانچ کردن سوراخی به قطر ۵۰mm بر روی یک ورق از جنس آلومینیومِ آلیاژی به ضخامت ۱۶mm چه نیرویی لازم است؟ تنش برشی ۲۶۵MPa می‌تواند باعث بریده شدن این ماده شود.

۱۰ــ۲ــ یک میله استوانه‌ای فولادی به قطر ۳۰mm و ارتفاع ۱۸m به صورت عمودی از سقف آویزان است. با توجه به این‌که میله، باید بتواند وزن خودش را تحمل کند، تنش کششی در فاصله ۹ متری از نقطه آویز را حساب کنید. بیشترین تنشی که در این میله ایجاد می‌شود در کجاست و مقدار آن چقدر است؟ چگالی فولاد را از جداول راهنما استخراج کنید.

۱۱ــ۲ــ در یک آزمایش کشش بر روی نمونه‌ی مس سخت‌کشیده به طول ۱۰۰mm و قطر ۸mm دستگاه در یک لحظه خاص تغییر طولی معادل ۰/۲ را نشان داده است. میزان تنش و نیروی اعمالی بر نمونه را محاسبه کنید (مدول یانگ را از جدول استخراج کنید).

۱۲ــ۲ــ مقادیر تنش مجاز با دستورالعمل AISC برای فولادهای St44ــ2 و St52ــ3 را محاسبه کنید.

۱۳ــ۲ــ در شکل ۲۳ــ۲ بازوی یک ماشین نشان داده شده که نیروهای کششی را تحمل می‌کند. اگر ماده تشکیل دهنده آن حداکثر ۷۵MPa تنش کششی را تحمل کند و ضریب اطمینان را ۲ درنظر بگیریم. بیش‌ترین نیرویی که می‌توان به این عضو اعمال کرد، چقدر است؟



شکل ۲۳ــ۲

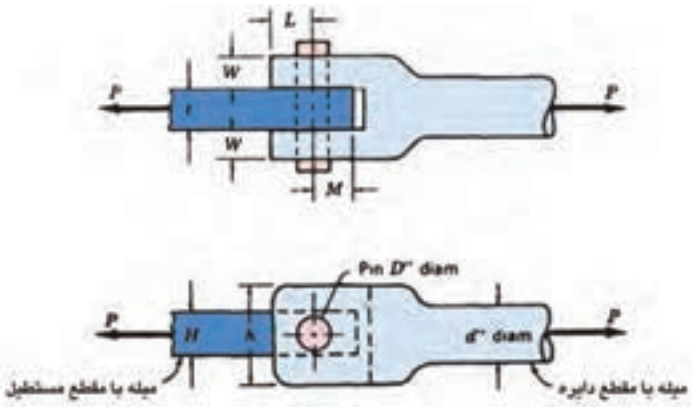
مسأله برای تمرین بیشتر

۱۴ــ۲ــ یک استوانه توخالی کوتاه فلزی، تکیه‌گاهی است که نیروی فشاری ۱۸۰kN را در راستای طولی خود تحمل می‌کند. شرایط به‌گونه‌ای است که تنش فشاری بیش‌تر از ۹۵MPa قابل تحمل نیست.

الف) اگر قطر خارجی ۱/۵ برابر قطر داخلی باشد. اندازه قطر داخلی و خارجی را محاسبه کنید.

ب) اگر ضخامت جداره ۶ میلی‌متر باشد، قطر داخلی و خارجی را محاسبه کنید.

۱۵ــ۲ــ اجزای ماشین نشان داده شده در شکل زیر را بررسی کنید. روش‌های از بین رفتن هر یک از این اجزا را در اثر وارد شدن نیروی کششی P بیان کنید. در هر مورد نوع تنش‌هایی که منجر به خرابی اجزا می‌شود را مشخص کرده و سپس با استفاده از نمادهای حروفی که اندازه‌ها را مشخص می‌کنند (حل پارامتری) سطوحی را که در مقابل تنش‌ها مقاومت می‌کنند محاسبه کنید.



شکل ۲۴ــ۲

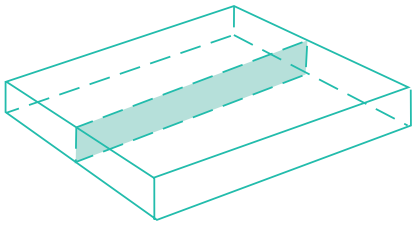
۱۶ــ۲ــ قلاب جرثقیلی که برای بلند کردن خودروها در گورستان خودروها استفاده می‌شود، به وسیله کابل فولادی به دکل جرثقیل متصل است.

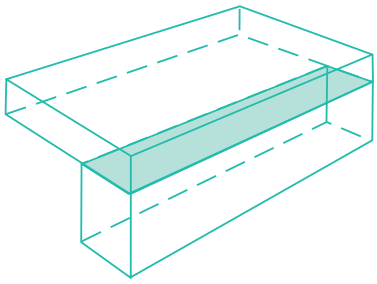
در یک آزمایش فرضی می‌خواهیم جرثقیل را به‌وسیلهٔ یک میله از جنس‌های مختلف به کابل متصل کنیم. نیروی وزن خودروها، به این میله، نیروی کششی وارد می‌کند. قطر میله را برای جنس‌های مختلف (فولاد، مس، آلومینیوم، پلاستیک و...) حساب کنید و پاسخ‌ها را با هم مقایسه کنید. جرم هر خودرو در حدود ۱۰۰۰ کیلوگرم است.

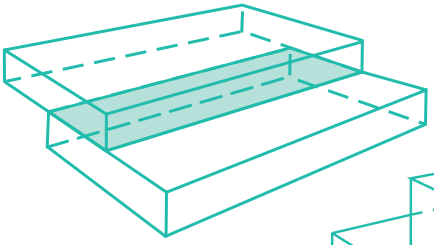
شکل ۲۵ــ۲

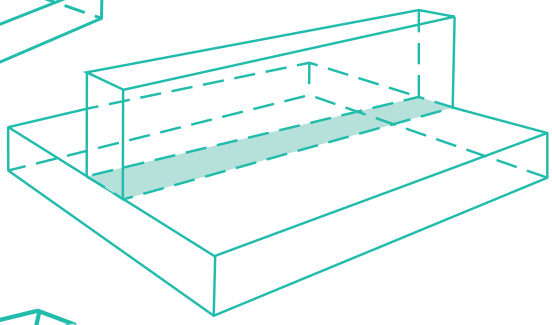
فصل ۳

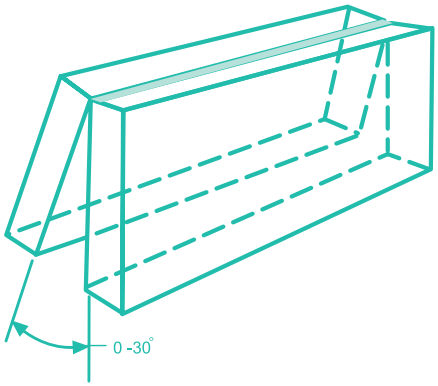
اتصال در سازه های فلزی
اتصال های جوشی











هدف‌های رفتاری فصل سوم :

آیا می‌توانید اندازه‌های جوش را در یک اتصال محاسبه کنید؟
یا نیروهایی را که یک اتصال جوشی تحمل می‌کند، محاسبه نمایید؟

پس از پایان این درس از هنرجو انتظار می‌رود که :

- انواع اتصال در سازه‌های فلزی را بیان کند.
- اندازه‌های انواع جوش را بیان کند.
- انواع تنش در اتصالات جوشی را بیان کند.
- استحکام جوش شیاری را محاسبه کند.
- استحکام جوش گوشه را محاسبه کند.
- تنش‌های مجاز جوش را از جدول استخراج کند.
- محاسبات اتصال جوش‌کاری با بارگذاری‌های محوری و برشی را انجام دهد.

مدت زمان آموزش :

- **۱۰ ساعت**

۳ـ اتصال در سازه‌های فلزی

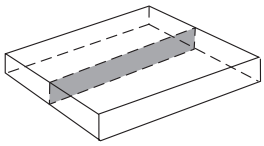
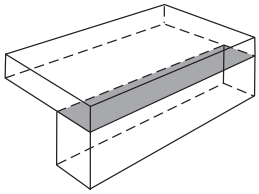
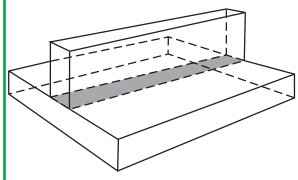
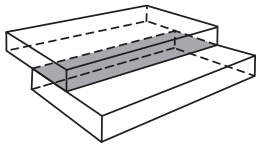
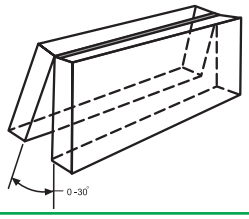
در احداث یک ساختمان یا پل فولادی یا در ساخت یک دیگ بخار، اجزای فلزی سازه به صورت مطمئنی به هم متصل می‌شوند تا بتوانند نیروها و گشتاورهای ناشی از بارگذاری بر روی سازه را تحمل کنند. به محلی که اعضای سازه به یکدیگر پیوند دارند اتصال گفته می‌شود. عمل اتصال می‌تواند با روش‌های مختلف جوش‌کاری، لحیم‌کاری، پیچ و مهره، پرچ‌کاری یا چسب انجام گیرد.

در فصل‌های قبل با محاسبات مربوط به بارگذاری سازه‌ها، نیروهای وارد بر تکیه‌گاه‌ها و هم‌چنین خواص مکانیکی فلزات، محاسبه تنش در آن‌ها و مقدار تنش مجاز آشنا شده‌اید. در این فصل اتصال‌های جوش‌کاری شده و در فصل بعد اتصال‌های پیچی و پرچی مورد بررسی قرار می‌گیرند و با کاربرد مطالبی که آموخته‌اید با روش محاسبه و تعیین میزان استحکام اتصال آشنا خواهید شد.

۱ــ۳ــ انواع اتصال

بر اساس استاندارد AWS D1.1 اتصال‌ها در سازه به پنج نوع اصلی دسته‌بندی می‌شوند (جدول ۱ــ۳).

جدول ۱ــ۳ــ انواع اتصال

نام اتصال	طرح اتصال	توضیح
سربه‌سر Butt joint		اتصال بین دو عضو در امتداد هم که به‌طور تقریبی در یک سطح قرار گرفته‌اند.
گونیا Corner joint		اتصال بین دو عضو که به‌طور تقریبی نسبت به یکدیگر با زاویه ۹۰ درجه قرار گرفته‌اند و شکل L را درست می‌کنند.
سه پری T joint		اتصال بین دو عضو که به‌طور تقریبی نسبت به یکدیگر با زاویه ۹۰ درجه قرار گرفته‌اند و شکل T را درست می‌کنند.
لبه روی هم Lap joint		اتصال بین دو عضو که به‌صورت تقریباً موازی روی هم قرار گرفته‌اند.
لبه‌ای Edge joint		اتصال بین لبه‌های موازی دو یا چند عضو با یکدیگر که زاویه کمتر از ۳۰ درجه را می‌سازند.

تجربه نشان داده است که در حوادث طبیعی مانند زلزله، معمولاً اتصالات هستند که به دلیل طراحی یا اجرای نادرست از بین رفته‌اند و موجب خسارت‌های جانی و مالی فراوانی می‌شوند.

تصاویر فوق مربوط به زلزله شدیدی است که در سال ۱۳۸۲ شهر بم را لرزاند و تقریباً ۹۰ درصد ساختمان‌های شهر را ویران کرد.

بررسی کنید

در شکل‌های زیر نمونه‌هایی از سازه‌های فولادی را مشاهده می‌کنید. در گروه‌های خود هر یک از شکل‌ها را مورد بررسی قرار داده و نوع اتصالات به کار رفته در آن‌ها را تعیین کنید (از جدول ۱ـ۳ کمک بگیرید).

شکل ۱ـ۳ـ ساخت مخزن ذخیره سوخت با ورق‌های فولادی

شکل ۲ـ۳ـ اتصال جوشی در سازه فلزی ساختمان

شکل ۳ـ۳ـ ساخت مخزن تحت فشار

شکل ۴ـ۳ـ اتصال پیچی در سازه فلزی ساختمان

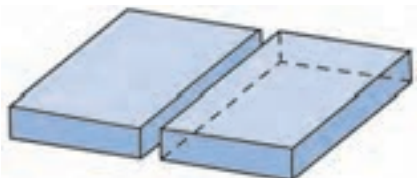
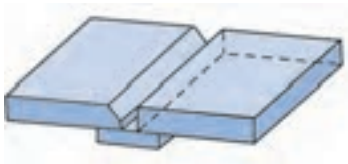
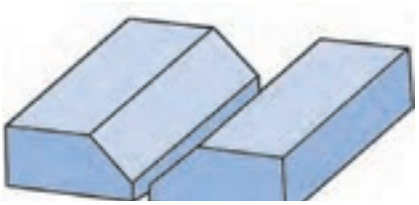
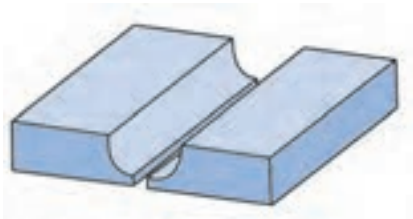
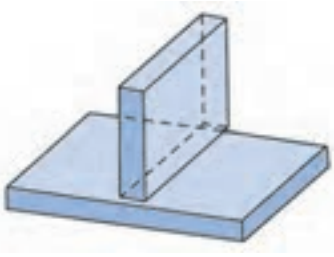
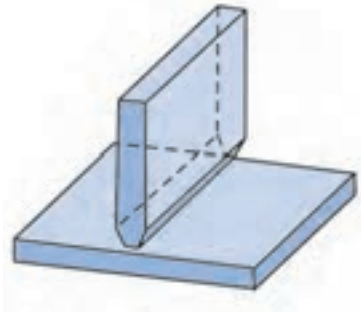
۲ــ۳ــ اتصال جوشی

اتصال جوشی یکی از انواع اتصال‌های دائمی است. جوش‌کاری تقریباً بر روی همه فلزات قابل انجام است، اگرچه ممکن است تکنیک‌های ویژه‌ای برای برخی از آن‌ها به‌کار رود. اغلب فلزات صنعتی پرکاربرد مانند فولاد ساختمانی، فولاد آلیاژی، آلومینیوم، برنج و مس قابلیت جوش‌کاری دارند.

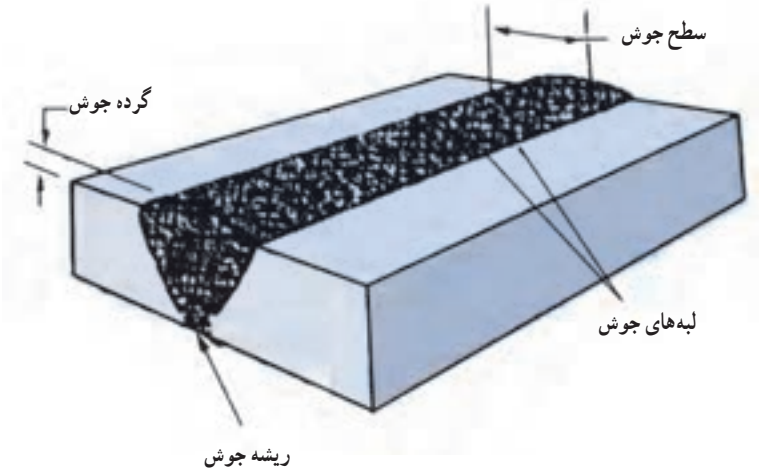
طراحی اتصالات جوش‌کاری مبحث مفصلی است که از تعیین نوع مقاطع و جنس مواد به‌کار رفته تا تعیین دقیق ابعاد و اندازه‌ها را شامل می‌شود. بارگذاری‌های انجام شده نیز از دیگر عوامل مؤثر در طراحی جوش هستند.

ممکن است برای اجرای یک جوش مطلوب، آماده سازی‌های لبه اتصال موردنیاز باشد. جدول ۲ــ۳ طرح برخی از اتصال‌های جوش‌کاری را نمایش می‌دهد. در این مبحث پس از معرفی انواع جوش‌ها و اندازه جوش، تنش‌های به وجود آمده در این اتصالات را مورد بررسی قرار داده و براساس آن محاسبه ظرفیت اتصال‌های جوش‌کاری شده امکان‌پذیر خواهد شد.

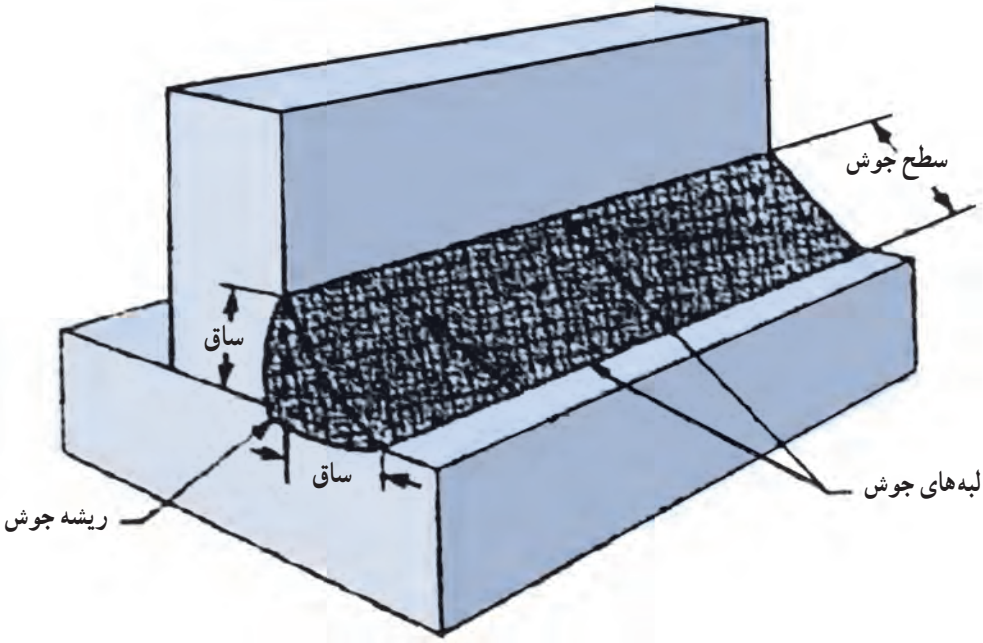
جدول ۲ــ۳ــ طرح برخی از اتصال‌های جوش‌کاری

 ۱ــ اتصال سربه سر ساده عموماً برای ورق‌های تا ضخامت ۶mm	 ۲ــ اتصال سربه سر نیم جناغی با پشت‌بند عموماً برای ورق‌های تا ضخامت ۱۶mm	 ۳ــ اتصال سربه‌سر جناغی یک طرفه عموماً برای ورق‌های با ضخامت بیش‌تر از ۱۲mm
 ۴ــ اتصال سربه سر لاله‌ای عموماً برای ورق‌های با ضخامت بیش‌تر از ۲۰mm	 ۵ــ اتصال سه پری عموماً برای ورق‌های تا ضخامت ۱۰mm	 ۶ــ اتصال سه پری با پخ دو طرفه عموماً برای ورق‌های با ضخامت بیش‌تر از ۱۲mm

۱ـ۲ـ۳ـ انواع جوش : بسته به نوع اتصال انواع مختلفی از جوش قابل استفاده هستند. در میان انواع جوش‌ها دو نوع جوش شیاری و جوش گوشه بسیار پرکاربرد هستند. جوش شیاری (شکل ۵ـ۳)؛ در شیار بین دو عضو اتصال ایجاد می‌شود. جوش گوشه (شکل ۶ـ۳)؛ دارای مقطعی به صورت مثلث یا سه گوشه است که دو سطح با زاویه تقریبی ۹۰ درجه در اتصالات سه‌پری، لبه روی هم و گونیا را به هم متصل می‌کند. هم‌چنین جوش‌های گوشه همراه با جوش‌های شیاری جهت تقویت در اتصالات سه‌پری و گونیا نیز به‌کار می‌روند.



شکل ۵ـ۳ـ جوش شیاری (جناغی)



شکل ۶ـ۳ـ جوش گوشه (ماهیچه‌ای)

واژه های تخصصی

جوش شیاری : Groove weld

این نوع جوش در زبان فارسی با نام جوش جناغی نیز شناخته می‌شود.

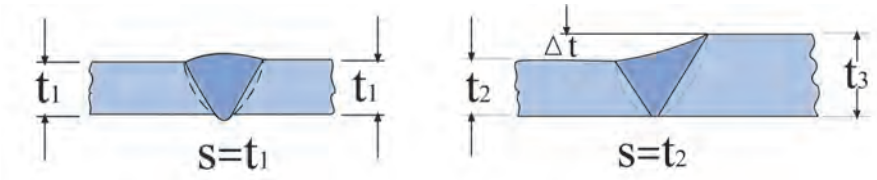
جوش گوشه : Fillet weld

این نوع جوش به جوش ماهیچه‌ای نیز معروف است.

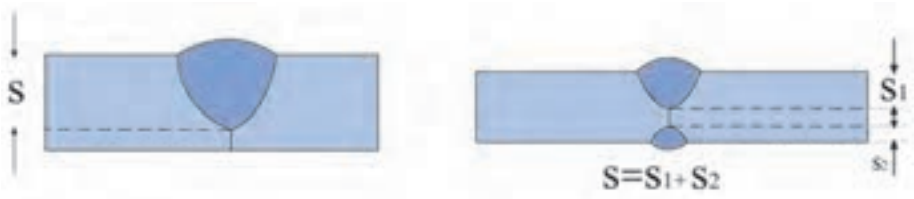
در شکل فوق انواع اتصال و جوش را شناسایی کنید.

۲ــ۲ــ۳ــ اندازه جوش

اندازه مؤثر در جوش شیاری: در جوش شیاری با نفوذکامل، اندازه مؤثر برابر با ضخامت قطعه نازک‌تر در اتصال است. شرایطی وجود دارد که در اتصال سربه‌سر ضرورتی ندارد که جوش در کل سطح مقطع نفوذ کند، در این شرایط از جوش با نفوذ جزئی استفاده می‌شود. در جوش‌های شیاری با نفوذ جزئی، اندازه مؤثر جوش برابر با جمع نفوذهای اتصال می‌باشد. اندازه مؤثر جوش در اتصال سربه‌سر با حرف s نمایش داده می‌شود.



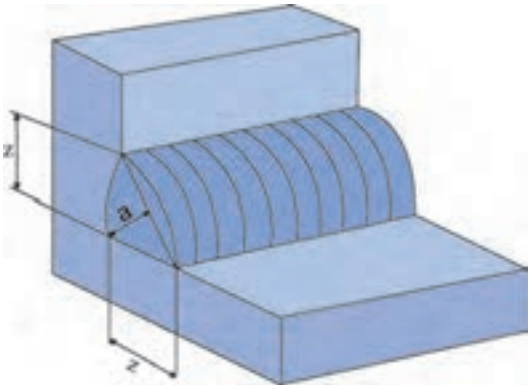
شکل ۷ــ۳ــ اندازه مؤثر در جوش شیاری با نفوذ کامل



شکل ۸ــ۳ــ اندازه مؤثر در جوش شیاری با نفوذ جزئی

اندازه مؤثر گلویی در جوش گوشه: اندازه جوش گوشه با دو روش مشخص می‌شود؛ (شکل ۹ــ۳) اندازه ساق جوش گوشه با حرف z نمایش داده می‌شود. اما استحکام جوش بر پایه اندازه مؤثر گلویی که کوتاه‌ترین فاصله سطح جوش بدون در نظر گرفتن تحدب تا ریشه آن است محاسبه می‌شود. این اندازه با حرف a مشخص و با رابطه زیر محاسبه می‌شود.

رابطه ۱ــ۳ $a = ۰/۷۰۷ \times z$ یا $a = \cos ۴۵^\circ \times z$

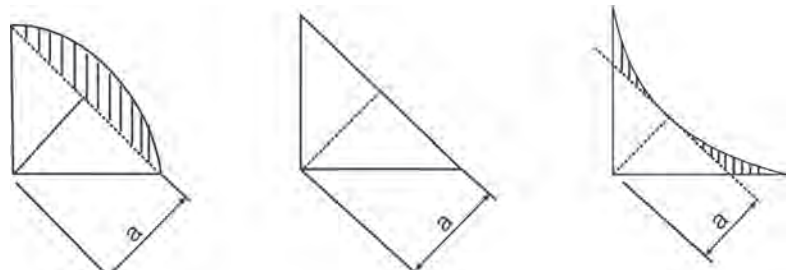


شکل ۹ــ۳ــ اندازه مؤثر گلویی

فکر کنید

در کدام یک از دو نمونه شکل بالا مصرف الکترود کمتر است؟

شکل ۱۰ـ۳ اندازه مؤثر گلویی در جوش‌های گوشه با سطوح مختلف را نشان می‌دهد.



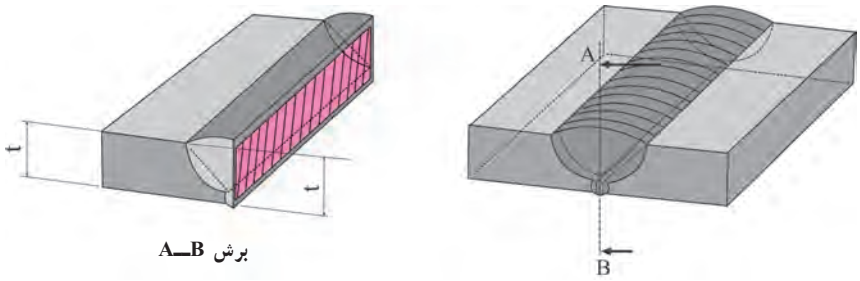
جوش گوشه با سطح مقعر　　جوش گوشه با سطح تخت　　جوش گوشه با سطح محدب

شکل ۱۰ـ۳ـ اندازه مؤثر گلویی جوش

سطح مؤثر جوش: اگر اندازه طول جوش را با حرف l (ال) نمایش دهیم. سطح مؤثر جوش که مبنای محاسبه تنش در جوش‌ها محسوب می‌شود از ضرب اندازه مؤثر در طول جوش به‌دست می‌آید. بنابراین :

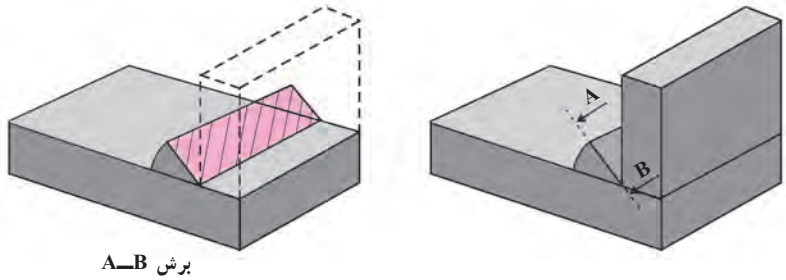
رابطه ۲ـ۳　سطح مؤثر در جوش شیاری　$A_w = s \times l$

سطح مؤثر در جوش گوشه　$A_w = a \times l = ۰/۷۰۷ \times z \times l$



برش A_B

شکل ۱۱ـ۳ـ سطح مؤثر در جوش‌شیاری



برش A_B

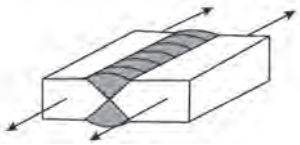
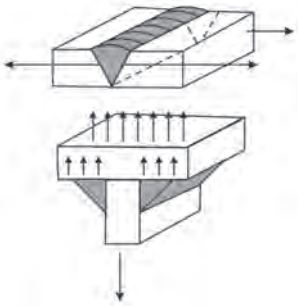
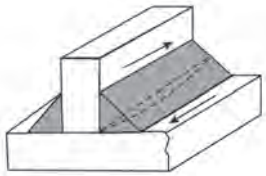
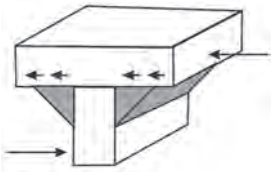
شکل ۱۲ـ۳ـ سطح مؤثر در جوش گوشه

پسران شاکر خراسانی

شاید بتوان احمد بن موسی بن شاکر خراسانی را اولین مهندس مکانیک ایران معرفی نمود. سه برادر بنوموسی؛ محمد، احمد و حسن از شخصیت‌های مهم علمی و سیاسی سده سوم هجری (نهم میلادی) بوده‌اند که در بغداد زندگی می‌کردند و بدون شک درگشایش دروازه‌های علم و صنعت در آن زمان ایفاگر نقشی مهم و کارساز بوده‌اند. از این سه برادر بیست کتاب و رساله که به‌صورت انفرادی و یا مشترکاً به رشته تحریر درآمده به جای مانده است که از مهم‌ترین آن‌ها کتاب "اَلحیَل" و یا ابتکارات خارق‌العاده مکانیکی نوشته احمدبن موسی‌بن شاکر خراسانی است.

۳ـ۲ـ۳ـ تنش در اتصالات جوشی : جدول ۳ـ۳، طبقه‌بندی انواع مختلف تنش در اتصالات جوشی را بسته به راستای اعمال نیرو و نوع جوش نشان می‌دهد.

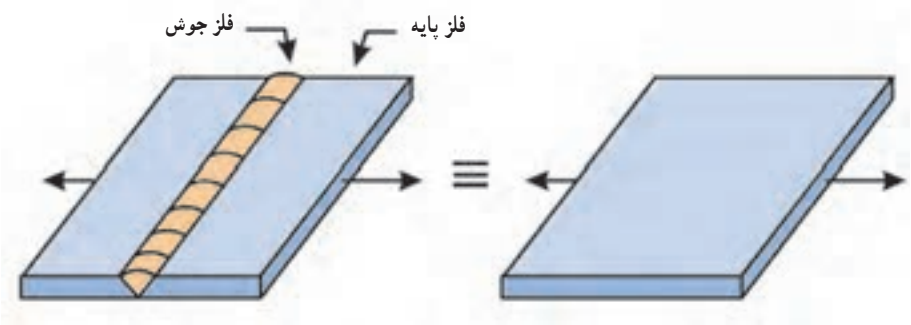
جدول ۳ـ۳ـ تنش در اتصالات جوشی

	نوع تنش	طرح اتصال	توضیح
۱	$\sigma_{\parallel}$ تنش محوری در اثر بارگذاری موازی با راستای خط جوش		σ_{II} در اتصالات، تنش کم اهمیتی است که در سازه‌های با بارگذاری دائمی از آن صرف‌نظر می‌شود.
۲ ۳	$\sigma_{\perp}$ تنش محوری در اثر بارگذاری عمود بر راستای خط جوش		این تنش در محاسبات اتصالات سربه سر **پراهمیت** است.
۴	$\tau_{\parallel}$ تنش برشی در اثر بارگذاری موازی با راستای خط جوش		**مهم‌ترین** تنش در محاسبات اتصالات جوش گوشه است که در اثر نیروی برشی در راستای جوش به‌وجود می‌آید.
۵	$\tau_{\perp}$ تنش برشی در اثر بارگذاری عمود بر راستای خط جوش		این نوع تنش در سازه‌های فولادی به ندرت رخ می‌دهد.

از میان تنش‌های مختلف نشان داده شده در جدول فوق محاسبه تنش در جوش شیاری با بارگذاری عمود بر راستای جوش (ردیف ۲) و محاسبه تنش در جوش گوشه با بارگذاری موازی با راستای جوش (ردیف ۴) از اهمیت زیادی برخوردار هستند. در این‌جا روش محاسبه این دو تنش بیان می‌شود.

محاسبه تنش در جوش شیاری: مقاومت جوش شیاری با نفوذ کامل برابر با استحکام سطح مقطع مواد اتصال است. در جوش‌کاری فولادهای ساختمانی، استحکام جوش معمولاً بیش‌تر از استحکام فلز پایه انتخاب می‌شود، بنابراین در محاسبه استحکام اتصال برای بارگذاری استاتیکی، اساس طراحی بر مبنای فلز پایه است.

در چنین حالتی اگر مقررات و استانداردهای جوش‌کاری رعایت شده باشد و جوش ایده‌آل فرض شود، نیازی به محاسبه استحکام جوش نیست و سطح مقطع نازک‌ترین قطعه اتصال، بیش‌ترین بار قابل اعمال به اتصال را تعیین می‌کند.

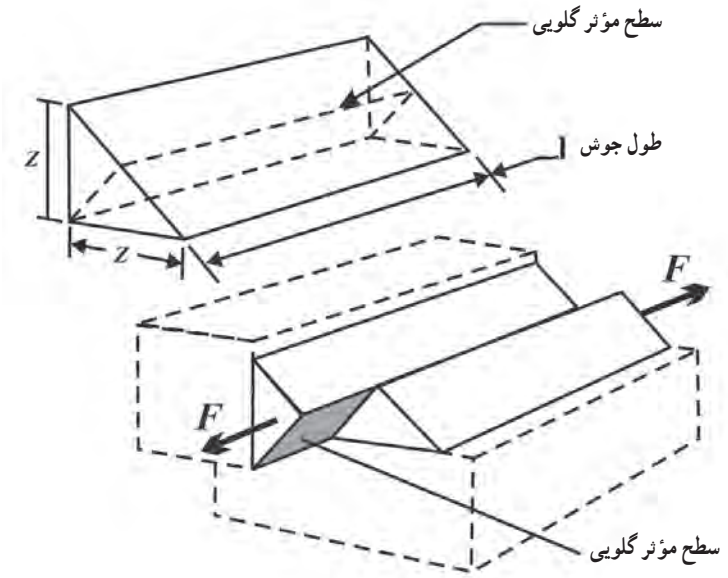


شکل ۱۳ــ۳ــ در محاسبات، اتصال دو ورق با جوش شیاری ایده‌آل را می‌توان معادل یک ورق یک‌پارچه در نظر گرفت.

نشان استاندارد اندازه‌های جوش

a	Fillet weld throat thickness اندازه گلویی جوش‌گوشه
b	Width of weld reinforcement پهنای تقویت کننده (گرده) جوش
l	Length of weld طول‌جوش
s	Butt weld thickness اندازه جوش‌سربه‌سر
t	Wall or plate thickness ضخامت دیواره یا ورق
z	Leg length of fillet weld اندازه ساق جوش گوشه

محاسبه تنش در جوش گوشه : بزرگ‌ترین تنشی که در اثر بارگذاری موازی با راستای جوش در جوش گوشه ایجاد می‌شود. تنش برشی در سطح گلویی جوش است. محاسبه تنش در این حالت از تقسیم نیروی برشی بر سطح گلویی جوش به‌دست می‌آید.



شکل ۱۴ــ۳ــ تنش برشی در سطح مؤثر گلویی جوش گوشه

رابطه ۳ــ۳

$$\tau = \frac{F}{A_w}$$

$$\tau = \frac{F}{a \times l}$$

$$\tau = \frac{F}{0/707 \times z \times l}$$

که در رابطه‌های فوق :

F : نیروی وارد بر جوش با یکای N

A_w : سطح مقطع مؤثر جوش با یکای mm^2

a : اندازه گلویی مؤثر جوش با یکای mm

z : اندازه ساق جوش با یکای mm

l : طول جوش با یکای mm

τ : تنش در جوش گوشه بر حسب N/mm^2 یا MPa

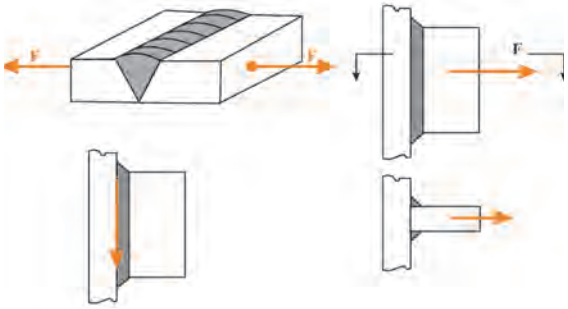
ابوریحان بیرونی

(سده‌های چهارم و پنجم هجری)

وی در خوارزم زاده شد. دارای تألیفات بسیار معتبری در فیزیک، جغرافیا، ریاضیات، نجوم، کانی شناسی و ... است. این دانشمند محقق، مؤلف و مورخی بسیار دقیق بود و متجاوز از شش قرن زودتر از فرانسیس‌بیکن انگلیسی روش علمی را به‌کار بست و آن را معرفی کرد. ولی متأسفانه آثار او بسیار دیر به لاتین ترجمه شد و از این رو تا همین اواخر برای مردم مغرب زمین ناشناخته باقی ماند. هر چند که فعالیت‌های علمی وی در میان هموطنان خود نیز چندان ادامه پیدا نکرد.

دربارهٔ او گفته‌اند : «در مسائل طبیعی به هیچ وجه به تقلید کورکورانه رو نمی‌آورد و تا چیزی به‌وسیله تجربه و آزمایش بر خود او کشف نمی‌شد آن را باور نمی‌داشت.»

جدول ۴ــ۳ــ روابط محاسبه تنش در جوش‌کاری

سطح مؤثر در جوش شیاری و گوشه $A_w = s \times l$ (mm^2) $A_w = a \times l$ (mm^2)	
تنش در جوش با بارگذاری موازی و عمودی $\sigma_{\perp} = \frac{F}{A_w}$ $(\frac{N}{mm^2})$ $\tau_{\parallel} = \frac{F}{A_w} = \frac{F}{a \times l}$ $(\frac{N}{mm^2})$	

۴ــ۲ــ۳ــ تنش‌های مجاز جوش : از آن‌جا که کیفیت یک جوش به عوامل متعددی مانند شرایط انجام کار، نوع جوش، و روش بازرسی از جوش‌کاری‌های انجام شده و... بستگی دارد، نمی‌توان مستقیماً از تنش تسلیم مواد جوش در محاسبات استفاده نمود. انجمن و نهادهای بین‌المللی بسته به شرایط فوق تنش‌های مجاز جوش را محاسبه و اعلام کرده‌اند.

جدول ۵ــ۳ تنش‌های مجاز برشی دو گروه الکترود پرکاربرد E60XX و E70XX را با فرض اجرای جوش در محل و بازرسی چشمی نشان می‌دهد.

جدول ۵ــ۳ــ تنش‌های مجاز جوش

نوع الکترود	استحکام نهایی کشش	تنش برشی مجاز (τ_{allow})	موارد کاربرد
E60XX	۴۲۰ N/mm²	۹۵ N/mm²	فولادهای St33,St37,St44
E70XX	۴۹۰ N/mm²	۱۱۰ N/mm²	فولادهای St37,St44,St50,St52

الکترودهای دو گروه E60XX و E70XX براساس استاندارد AWS نام‌گذاری شده‌اند. عدد ۶۰ و ۷۰ به معنی استحکام نهایی کششی فلز جوش الکترود به میزان ۶۰۰۰۰ psi و ۷۰۰۰۰ psi می‌باشد. دو رقم بعدی که با xx نشان داده شده است به معنی نوع الکترود و وضعیت‌های قابل جوش‌کاری با الکترود مورد نظر می باشد.

از مقدار تنش‌های مجاز این جدول در حل مسائل این فصل، استفاده خواهیم کرد. این اعداد در صنعت نیز بسیار پرکاربردند.

۵ــ۲ــ۳ــ روابط و جدول‌های کاربردی : در صنعت برای ساده‌سازی محاسبات روابط کاربردی تهیه می‌کنند. یکی از روابط کاربردی در جوش‌کاری و طراحی سازه‌های فولادی محاسبه مقدار نیروی مجاز قابل اعمال به یک میلی‌متر جوش با اندازه ساق z می‌باشد.

به عنوان مثال برای جوش گوشه با الکترود E60xx که تنش برشی مجازآن $۹۵N/mm^۲$ است می‌توانیم رابطه ۳ــ۳ را به صورت زیر بنویسیم :

$$\tau = \frac{F}{۰/۷۰۷ \times z \times l}$$

$$F = ۰/۷۰۷ \times \tau \times l \times z$$

$$F' = ۰/۷۰۷ \times ۹۵ \times ۱ \times z$$

رابطه ۴ــ۳ $\boxed{F' = ۶۷ \times z}$

که در این رابطه :

F´ : مقاومت جوش گوشه به طول یک میلی‌متر با یکای N/mm

z : اندازه ساق جوش با یکای mm

مقدار F´ را برای الکترود E70XX محاسبه کنید.

مقدار F´ با استفاده از رابطه ۳ــ۳ برای دو گروه الکترود پرکاربرد E60XX و E70XX برای اندازه‌های مختلف ساق جوش در جدول ۶ــ۳ ارائه شده است.

با ضرب نمودن مقدار F´ در طول جوش نیروی مجاز قابل اعمال به درز جوش محاسبه می‌شود.

رابطه ۵ــ۳ $F = F' \times l$

که در آن :

F : نیروی مجاز قابل اعمال به درز جوش، یکای N

F´ : مقاومت جوش گوشه به طول یک میلی‌متر با یکای N/mm

l : طول درز جوش با یکای mm

مبحث دهم مقررات ملی ساختمان : طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی

مقررات ملی ساختمان، مجموعه‌ای از ضوابط فنی، اجرایی و حقوقی لازم الرعایه در طراحی، نظارت و اجرای عملیات ساختمانی است که توسط دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان منتشر شده است.

جدول ۶ــ۳ــ مقاومت جوش گوشه به طول یک میلی‌متر (F′)

اندازه ساق جوش (mm)	بار مجاز (N) برای یک میلی‌متر از طول جوش گوشه	
	برای الکترود گروه E60xx	برای الکترود گروه E70xx
۵	۳۳۵	۳۹۰
۶	۴۰۰	۴۷۰
۷	۴۷۰	۵۴۵
۸	۵۴۰	۶۲۵
۹	۶۰۰	۷۰۰
۱۰	۶۷۰	۷۸۰
۱۲	۸۰۰	۹۴۰
۱۴	۹۴۰	۱۰۹۰
۱۶	۱۰۸۰	۱۲۴۵
۱۸	۱۲۰۰	۱۴۰۰
۲۰	۱۳۴۰	۱۵۶۰

نکته : تعیین ظرفیت اتصال

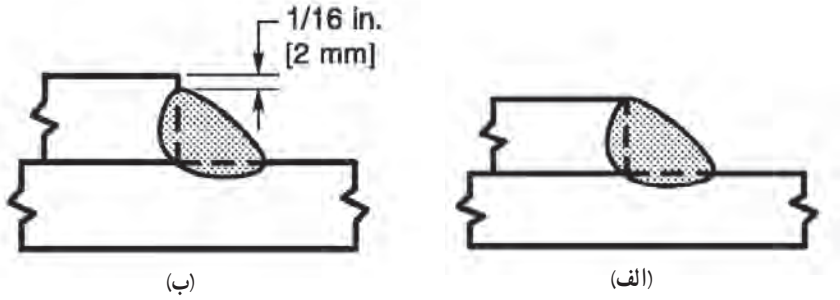
یک زنجیر از تعدادی حلقه‌های محکم تشکیل شده است. اما میزان استحکام کششی هر زنجیری را ضعیف‌ترین حلقه آن تعیین می‌کند. مشابه این وضعیت را در اتصالات سازه‌ها می‌توان مشاهده کرد. برای تعیین ظرفیت بار هر اتصال، ابتدا ظرفیت هر جزء را محاسبه کرده و پس از معین شدنِ ضعیف‌ترین جزء، ظرفیت آن به عنوان ظرفیت اتصال اعلام می‌شود.

۶ــ۲ــ۳ــ آیین‌نامه‌های جوش‌کاری : آیین‌نامه‌های جوش‌کاری مجموعه مقررات برای طراحی، اجرا و کنترل کیفیت جوش هستند. در این‌جا به برخی از مقررات آیین‌نامه‌ها اشاره می‌شود.

● حداکثر اندازه ساق جوش گوشه در لبه قطعه به شرح زیر است :

الف) مساوی ضخامت قطعه، وقتی که ضخامت قطعه مساوی و یا کوچک‌تر از ۷ میلی‌متر است (شکل ۱۵ــ۳ــ الف).

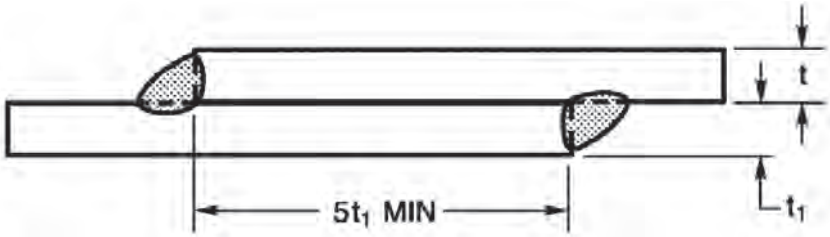
ب) ۲ میلی‌متر کوچک‌تر از ضخامت قطعه، وقتی که ضخامت قطعه بزرگ‌تر از ۷ میلی‌متر باشد (شکل ۱۵ــ۳ــ ب) مگر این‌که در نقشه قید شده باشد.



شکل ۱۵ــ۳

● طول مؤثر قطعات جوش نباید از ۴ برابر اندازه ساق جوش و از ۴۰ میلی‌متر کم‌تر شود.

● در اتصال لبه روی هم، حداقل طول پوشش دو ورق، مساوی ۵ برابر ضخامت ورق نازک‌تر است که نباید از ۲۵ میلی‌متر کمتر باشد (شکل ۱۶ــ۳).



شکل ۱۶ــ۳

استانداردها و آیین‌نامه‌های بین‌المللی

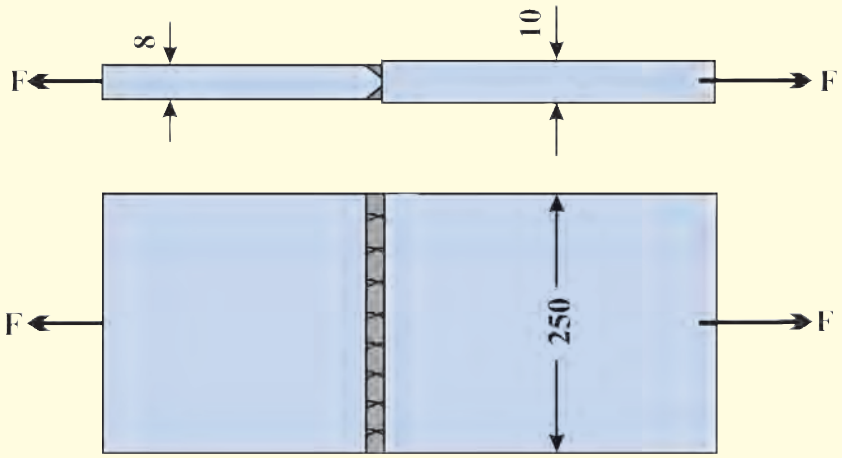
از استانداردهای معتبری که در صنایع ایران مورد استفاده و استناد قرار می‌گیرد می‌توان به AWS D1.1 یا استاندارد پل‌ها، ساختمان‌ها و سازه‌های فلزی که توسط انجمن جوش‌کاری آمریکا تدوین شده است اشاره کرد.

برای ساخت مخزن تحت‌فشار بخش۸ آیین‌نامه انجمن مهندسان مکانیک آمریکا (ASME) و برای ساخت مخزن ذخیره‌ای و خطوط لوله از دستورالعمل‌های انستیتو نفت آمریکا (API) استفاده می‌شود.

آیین‌نامه جوش‌کاری ساختمان ایران

این آیین‌نامه که توسط معاونت امور فنی معاونت مدیریت و برنامه‌ریزی ریاست جمهوری تهیه و تدوین شده است، مقررات جوش‌کاری سازه‌های فولادی را در برمی‌گیرد. کاربرد این آیین‌نامه در محدوده مهندسی عمران (شامل ساختمان، پل و ...) است و نمی‌تواند در طراحی مخزن‌ها و لوله‌های تحت فشار مورد استفاده قرار گیرد.

تمرین نمونه ۱ــ۳ : در اتصال نشان داده شده جنس ورق‌ها از St37 و الکترود مصرف شده از نوع E7018 بوده است. ظرفیت اتصال را تعیین کنید.



شکل ۱۷ــ۳

راه حل : اتصال از نوع سربه‌سر، جوش شیاری و نفوذ کامل است. بنابراین ورق ضعیف‌تر به ضخامت ۸ میلی‌متر ظرفیت اتصال را تعیین می‌کند.

با مراجعه به جدول پیوست ب ــ ۲ برای فولاد St37 می‌دانیم :

$\sigma_{\text{تسلیم}} = ۲۳۴ \text{ MPa}$

با استفاده از رابطه ۷ــ۲ تنش کششی مجاز آن را محاسبه می‌کنیم :

$\sigma_{\text{مجاز}} = ۰/۶ \times ۲۳۴ = ۱۴۰ \text{ MPa}$

برای سطح مقطع ضعیف‌ترین ورق اتصال داریم :

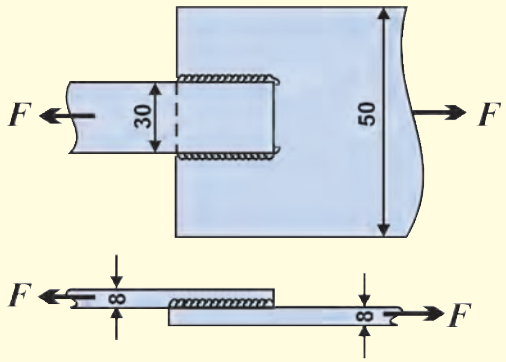
$A = ۲۵۰ \times ۸ = ۲۰۰۰ \text{ mm}^۲$

بنابراین با استفاده از رابطه تنش $\sigma = \frac{F}{A}$ نیرو را محاسبه می‌کنیم :

$F = \sigma \times A = ۱۴۰ \times ۲۰۰۰ = ۲۸۰۰۰۰ \text{ N} = ۲۸۰ \text{ kN}$

$F = ۲۸۰ \text{kN}$

تمرین نمونه ۲ــ۳ : شکل زیر یک اتصال لبه روی هم را نشان می‌دهد. در صورتی‌که جنس ورق‌ها از فولاد ساختمانیSt37 و نوع الکترود E6013 باشد، با استفاده از مقررات آیین‌نامه، اندازه ساق و طول جوش را به‌نحوی تعیین کنید که استحکام جوش برابر با استحکام ضعیف‌ترین ورق اتصال باشد.



شکل ۱۸ــ۳

راه حل : با بررسی نوع اتصال و با توجه به جدول ۳ــ۳ مشخص می‌شود که تنش در جوش از نوع برشی در راستای خط جوش می‌باشد. ابتدا ضعیف‌ترین ورق اتصال را جهت تعیین بار قابل اعمال به اتصال شناسایی می‌کنیم. از آن‌جا که جنس هر دو ورق و ضخامت آن‌ها یکسان است، پس ورق به عرض ۳۰mm ضعیف‌ترین جزء اتصال است.

با مراجعه به مبحث تنش مجاز در فصل دوم و جدول ب ــ۲ تنش کششی مجاز فولاد St37 را به دست می‌آوریم.

$$\sigma_{\text{مجاز}} = ۱۴۰\frac{N}{mm^۲}$$

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

با استفاده از رابطه ۲ــ۲ داریم :

$$F = \sigma \times A = (۱۴۰\frac{N}{mm^۲})(۳۰mm)(۸mm) = ۳۳۶۰۰N$$ ◀

برای یافتن حداکثر اندازه ساق جوش به مقررات آیین‌نامه مراجعه می‌نماییم (بند ب بخش ۳ــ۲ــ۶). برای ورق به ضخامت ۸mm اندازه ساق جوش ۶mm توصیه شده است.

حال با استفاده از جدول ۶ــ۳ برای الکترود گروه E60XX و اندازه ساق جوش ۶mm مقاومت جوش را می‌یابیم.

$$F' = ۴۰۰\frac{N}{mm}$$

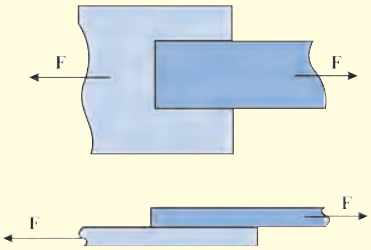
$$F = F' \times l \rightarrow l = \frac{F}{F'} = \frac{۳۳۶۰۰}{۴۰۰} = ۸۴mm$$

برای محاسبه طول جوش در هر طرف ورق داریم؛

◀ طول جوش در هر طرف ورق $l_۱ = \frac{۸۴}{۲} = ۴۲mm$

پرسش : شرایط مسأله فوق را با سایر مقررات ذکر شده آیین‌نامه مقایسه کنید. آیا تمام شرایط در این مسأله رعایت شده است؟

تمرین نمونه ۳ـ۳ : یک اتصال لبه روی هم با فولاد St37 برای تحمل بار ۲۲۵kN طراحی شده است. ضخامت ورق‌ها ۱۰mm است و جوش‌کاری گوشه با اندازه ساق ۸mm اجرا خواهد شد. اگر از الکترودهای گروه E60xx استفاده شود، طول خط جوش مورد نیاز برای تحمل این بار را محاسبه کنید.



شکل ۱۹ـ۳

راه حل : اندازه ساق جوش ۸mm برای ورق به ضخامت۱۰mm مطابق با مقررات آئین‌نامه است. برای محاسبه طول خط جوش موردنیاز از دو راه حل مختلف استفاده می‌کنیم.

حل اول : جوش‌کاری از نوع گوشه است، پس با کمک رابطه ۳ـ۳ می‌توانیم طول جوش را محاسبه کنیم. در جدول ۵ـ۳ تنش برشی مجاز برای گروه الکترود E60XX، ۹۵ N/mm^2 می‌باشد، پس داریم :

◀ طول خط جوش

$$\tau=\frac{F}{0/707\times z\times l}\rightarrow l=\frac{F}{0/707\times z\times \tau}=\frac{225000N}{0/707(8mm)(95\frac{N}{mm^2})}=419mm\simeq 420mm$$

حل دوم : از آنجا که نوع الکترود E60XX است. با استفاده از رابطه ۵ـ۳ و جدول ۶ـ۳ می‌توانیم مقاومت جوش گوشه را محاسبه کنیم. جدول فوق مقاومت جوش گوشه با اندازه ساق ۸mm را $540\frac{N}{mm}$ اعلام می‌کند، پس داریم :

$$F=F'\times l\rightarrow l=\frac{F}{F'}=\frac{225000N}{540\frac{N}{mm}}=417mm\simeq 420mm$$ ◀

توجه داشته باشید که خط جوش‌ها باید نسبت به قطعه و نیروی وارده به‌صورت متقارن قرار گیرند.

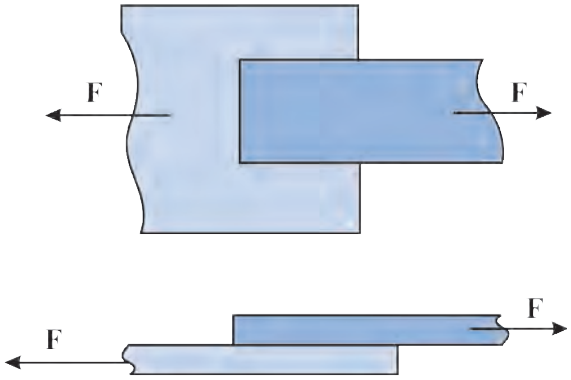
پرسش : پاسخ‌های دقیق دو راه حل، چند درصد با یکدیگر اختلاف دارند؟ آیا این اختلاف قابل چشم‌پوشی است؟

تمرین های فصل سوم

۱ــ۳ــ در شکل روبه‌رو به ورق باریک‌تر به ابعاد ۱۵۰mm×۱۲mm نیروی ۷۲kN وارد می‌شود. جنس ورق St44 و الکترودها از سری E60XX هستند. اندازه ساق جوش نیز ۱۰mm است.

الف) طول جوش در هر طرف پلیت چقدر باشد تا اتصال نیروی F را تحمل کند؟

ب) آیا یک خط جوش در انتهای ورق می‌تواند به تنهایی نیروی وارده را تحمل کند؟



شکل ۲۰ــ۳

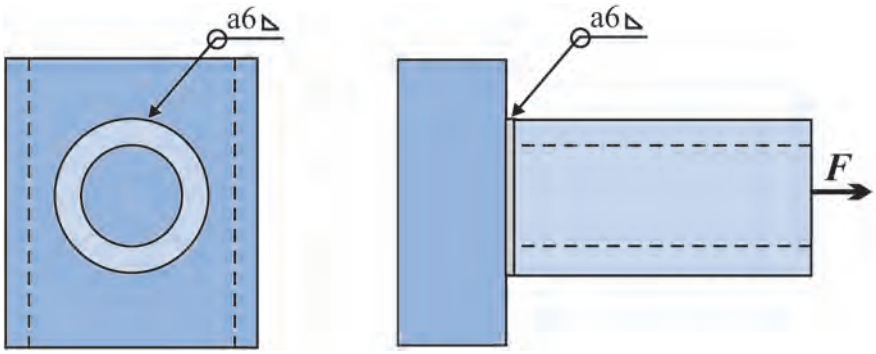
۲ــ۳ــ در یک اتصال لبه روی هم به ورق باریک‌تر به ابعاد ۱۵۰mm×۱۲mm نیروی ۲۷۰kN وارد می‌شود. اگر اندازه ساق جوش ۱۰mm باشد و ۱۰۰ mm از انتهای ورق هم جوش‌کاری شده باشد طول هر یک از جوش‌های طرفین چقدر است؟ جنس پلیت از St52 و الکترودها از کلاس E70XX هستند.

۳ــ۳ــ دو ورق به عرض ۱۳۰mm و ضخامت ۶mm در یک اتصال لبه روی هم از زیر و رو به‌وسیله دو خط جوش گوشه به عرض ورق متصل شده‌اند. اگر اندازه ساق جوش ۴/۵mm باشد و الکترود مصرفی E60XX باشد :

الف) بیش‌ترین نیروی کششی قابل اعمال به اتصال چقدر است؟ اگر جنس پلیت‌ها از St37 باشد، مقاومت کششی ورق را نیز بررسی نمایید.

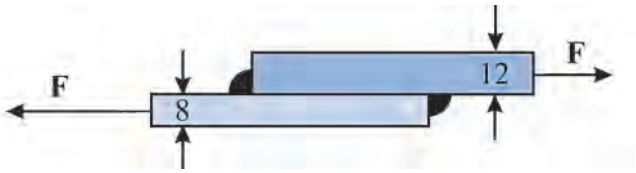
ب) اگر اتصال به صورت سربه سر اجرا شود، ظرفیت اتصال را محاسبه کنید؟

۴ــ۳ــ در شکل زیر لوله‌ای به یک ناودانی جوش‌کاری شده است. اگر اندازه ساق جوش ۶mm و قطر خارجی لوله ۱۰۰mm و تنش برشی مجاز در فلز جوش $۱۱۰\frac{N}{mm^۲}$ باشد، حداکثر مقدار نیروی کششی (F) قابل اعمال به اتصال چقدر است؟



شکل ۲۱ــ۳

۵ــ۳ــ دو ورق به عرض ۱۲۰ mm و به ضخامت ۸ و ۱۲ از جنس St37 با دو خط جوش عرضی با ساق‌های ۶ و ۱۰ و با استفاده از الکترود E60XX به هم جوش شده‌اند. حداکثر ظرفیت اتصال را محاسبه کنید.

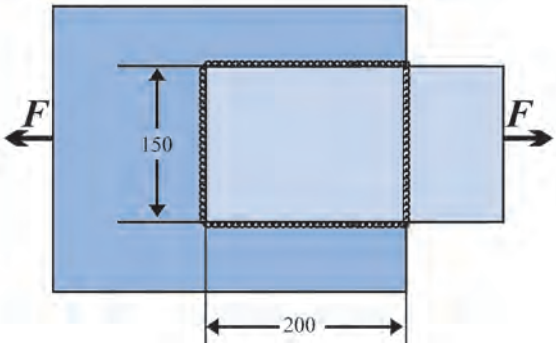


شکل ۲۲ــ۳

۶ــ۳ــ در شکل زیر ورق‌ها از جنس St37 و به ضخامت ۱۵mm می‌باشند. از جوشی به ساق ۱۰mm و الکترود E60XX برای اتصال استفاده شده است.

الف) بیش‌ترین مقدار نیروی F را محاسبه کنید.

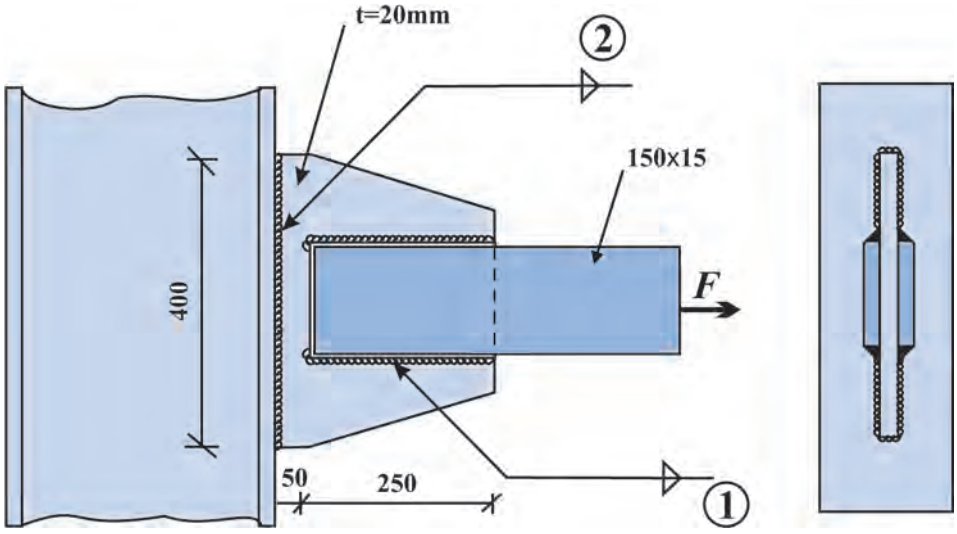
ب) با توجه به قسمت الف حداقل طول پوشش دو ورق را محاسبه کنید.



شکل ۲۳ــ۳

مسأله برای تمرین بیشتر

۷ــ۳ــ جنس قطعات در اتصال شکل زیر فولاد St37 است و برای جوش‌کاری از الکترود گروه E70XX استفاده شده‌است. اندازه ساق خط جوش‌های ۱ و ۲ را برای تحمل نیروی F=۵۰۰kN حساب کنید.



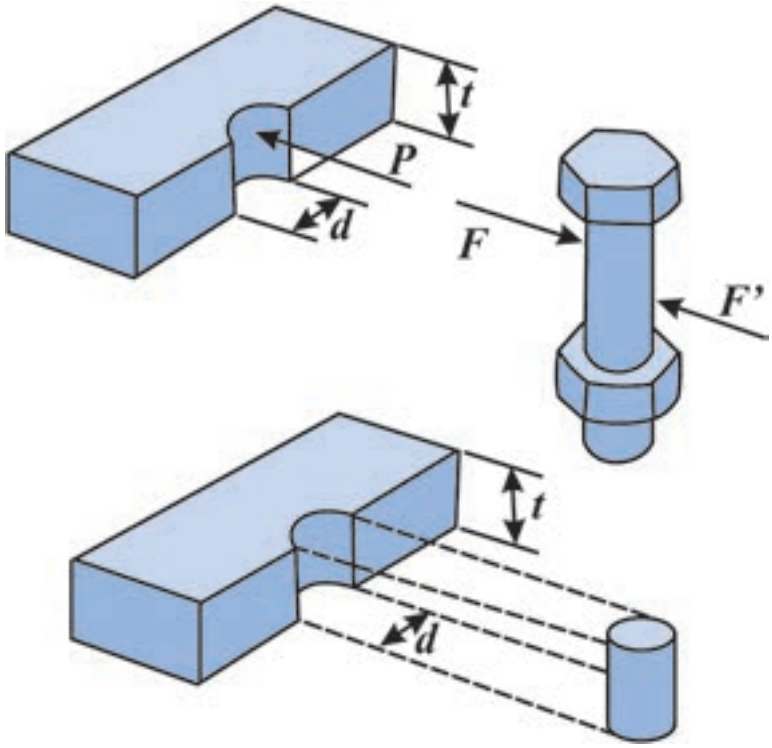
شکل ۲۴ــ۳

خلاصهٔ فصل سوم

- با مرور مطالبی که در این فصل آموخته‌اید، مباحث مطرح شده و روش‌های حل مسأله را خلاصه نویسی کنید.

فصل ۴

اتصال در سازه های فلزی
اتصال پیچی و اتصال پرچی



هدف‌های رفتاری فصل چهارم :

آیا می‌توانید نیروهایی که یک اتصال پیچی تحمل می‌کند را محاسبه نمایید؟
چه شباهتی میان محاسبات اتصال پیچی و اتصال پرچی وجود دارد؟

پس از پایان این درس از هنرجو انتظار می‌رود که :

- انواع اتصال پیچی را بشناسد.
- درجه استحکام پیچ را از جداول استخراج کند.
- گشتاور بستن پیچ را از جداول استخراج کند.
- تنش برشی، تنش کششی و تنش لهیدگی در اتصال پیچی اتکایی را محاسبه کند.
- محاسبات اتصال پیچی اتکایی را انجام دهد.
- محاسبات اتصال پرچی را انجام دهد.

مدت زمان آموزش :

- ۱۰ ساعت

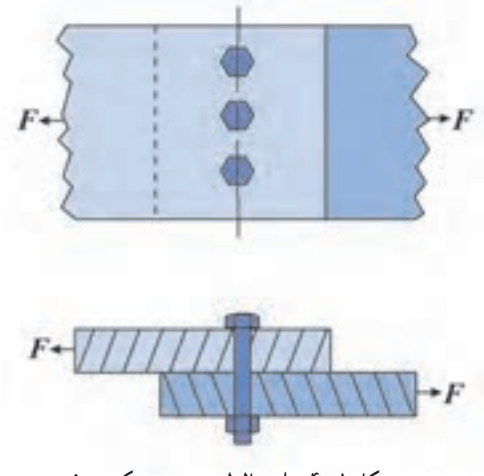
مقدمه

اتصال

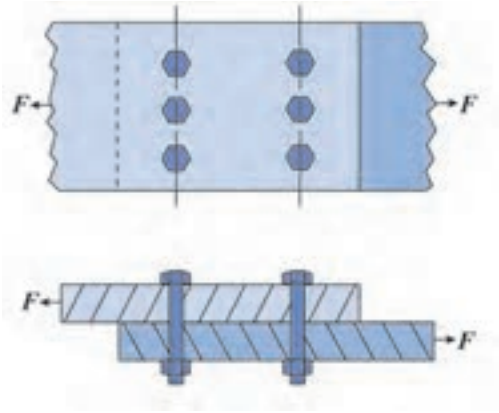
پیچ و مهره‌ای از
متداول‌ترین روش‌های
اتصال در صنعت است. این اتصال
بعد از جنگ جهانی دوم و با تولید پیچ‌های با
استحکام بالا رفته رفته جایگزین اتصال‌های پرچی شد.
اتصال پرچی پیش از آن و در نبود روش‌های جاری جوش‌کاری،
اصلی‌ترین روش اتصال سازه‌های فلزی بود. پرچ‌کاری روشی زمان‌بر و
پرخطاست، اما در مقابل، اتصال پیچی علاوه بر سهولت اجرا از دقت خوبی برخوردار
است و استحکام قابل اطمینانی دارد. در این فصل محاسبه تنش در اتصال پیچی و پرچی بررسی
شده است.

۴ــ اتصالات پیچی

در فصل قبل با انواع اتصال در سازه‌های فلزی آشنا شده‌اید. اتصالات پیچ و مهره‌ای معمولاً به دو صورت لبه روی هم، یا سربه‌سر طراحی می‌شوند. در شکل ۱ــ۴ اتصال لبه روی هم با یک ردیف پیچ و در شکل ۲ــ۴ اتصال لبه روی هم با دو ردیف پیچ، نشان داده شده است.



شکل ۱ــ۴ــ اتصال لبه روی هم یک ردیفه

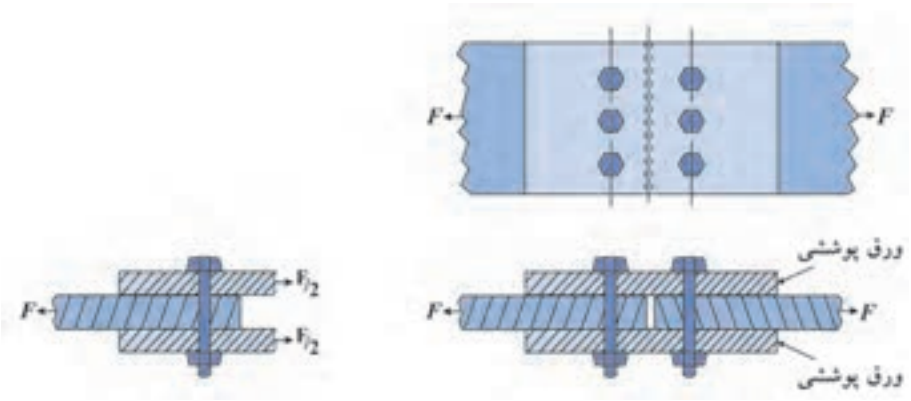


شکل ۲ــ۴ــ اتصال لبه روی هم دو ردیفه

اجرای اتصال بادبندها از نوع پیچی

فرض بر این است که در اتصال، هر پیچ به تناسب، بخشی از نیروی وارد شده به اتصال را تحمل می‌کند. برای نمونه در اتصال لبه روی هم (شکل ۴ــ۲) که با شش پیچ به هم متصل شده

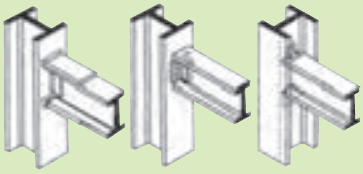
است، فرض می‌شود که هر پیچ یک ششم باری که به اتصال اعمال می‌شود را از یک ورق به ورق دیگر انتقال می‌دهد.



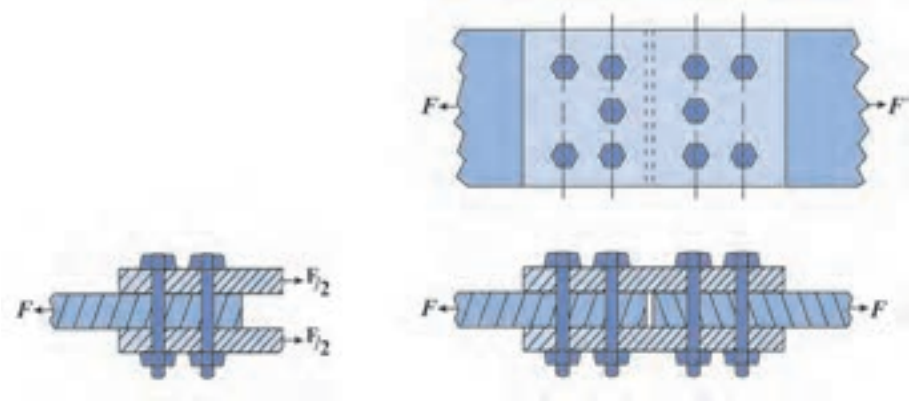
شکل ۳ـ۴ـ اتصال سربه‌سر یک ردیفه

همان‌گونه که در شکل‌ها ملاحظه می‌شود، معمولاً ردیف پیچ‌ها عمود بر راستای نیروی اعمال شده به اتصال است.

شکل‌های ۳ـ۴ و ۴ـ۴ اتصال سربه‌سر با یک و دو ردیف پیچ را نشان می‌دهد. اتصال پیچی سربه‌سر با یک یا دو ورق پوششی (واسطه) ایجاد می‌شود.



نمونه طرح اتصال تیر به ستون



شکل ۴ـ۴ـ اتصال سربه‌سر دو ردیفه

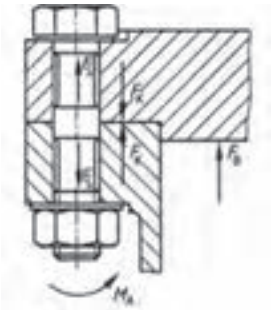
هر اتصال سربه‌سر به دو نیمه مشابه، قابل تقسیم است و هر نیمه، کل بار را تحمل می‌کند. بنابراین در حل مسائل اتصال سربه‌سر، یک نیمه آن را در نظر می‌گیریم. برای نمونه در شکل ۳ـ۴ هر پیچ یک سوم باری که از ورق اصلیِ اتصال به ورق‌های پوششی منتقل می‌شود و در شکل ۴ـ۴ هر پیچ یک پنجم بار را تحمل می‌کند.

۱ــ۴ــ انواع اتصالات پیچی

اتصال‌های پیچی از نظر طراحی به دو گروه تقسیم می‌شوند :

الف) اتصال اصطکاکی : در این نوع اتصال با اعمال گشتاور متناسب برای سفت کردن پیچ و مهره، پیچ‌ها کشیده می‌شوند. در نتیجه نیروی فشاری به ورق‌های اتصال وارد شده و باعث ایجاد نیروی اصطکاک بین ورق‌ها می‌شود. از این رو این اتصال را اصطکاکی می‌نامند. تنش‌های به وجود آمده در این پیچ‌ها نسبتاً پیچیده هستند و در این کتاب محاسبه نخواهند شد.

در جدول ۱ــ۴ بیش‌ترین گشتاور مجاز بستن پیچ‌ها در اتصال پیچی اصطکاکی و سطح مقطع تنش پیچ‌ها ارائه شده است.

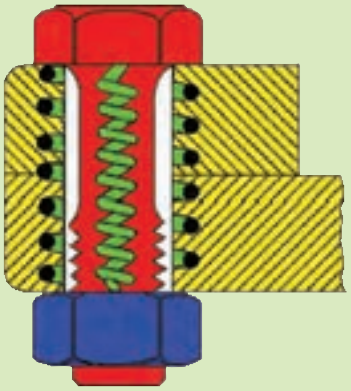


شکل ۵ــ۴

جدول ۱ــ۴ــ محاسبه اتصالات پیچی ـ اصطکاکی

مشخصه رزوه	سطح مقطع تنش A_s mm^2	حداکثر گشتاور بستن پیچ با یکای N.m								
		درجه استحکام								
		8.8			10.9			12.9		
		ضریب اصطکاک μ								
		۰,۱۰	۰,۱۵	۰,۲۰	۰,۱۰	۰,۱۵	۰,۲۰	۰,۱۰	۰,۱۵	۰,۲۰
M8	۳۶,۶	۲۰	۲۵	۳۰	۳۰	۳۷	۴۴	۳۵	۴۳	۵۲
M10	۵۸,۰	۴۰	۵۰	۶۰	۵۹	۷۳	۸۷	۶۹	۸۴	۱۰۰
M12	۸۴,۳	۶۹	۸۷	۱۰۵	۱۰۰	۱۲۵	۱۵۱	۱۲۰	۱۴۸	۱۷۷
M16	۱۵۷	۱۷۰	۲۲۰	۲۶۰	۲۵۰	۳۱۵	۳۸۰	۲۹۰	۳۷۰	۴۴۵
M20	۲۴۰	۳۴۰	۴۳۰	۵۲۰	۴۹۰	۶۱۵	۷۴۰	۵۷۰	۷۰۰	۸۴۰
M24	۳۵۳	۵۹۰	۷۴۰	۸۹۰	۸۴۰	۱۰۵۰	۱۲۵۰	۹۸۰	۱۲۵۰	۱۵۰۰
M8×1	۳۹,۲	۲۲	۲۸	۳۳	۳۲	۴۰	۴۸	۳۷	۴۶	۵۶
M10×1.25	۶۱,۲	۴۲	۵۳	۶۴	۶۲	۷۷	۹۳	۷۲	۹۰	۱۱۰
M12×1.5	۸۸,۱	۷۲	۹۲	۱۱۰	۱۰۵	۱۳۲	۱۶۰	۱۲۵	۱۵۵	۱۸۵
M16×1.5	۱۶۷	۱۸۰	۲۳۰	۲۸۰	۲۶۵	۳۴۰	۴۱۰	۳۱۰	۳۹۰	۴۸۰
M20×1.5	۲۷۲	۳۷۵	۴۸۰	۵۹۰	۵۳۰	۶۸۰	۸۴۰	۶۲۰	۸۰۰	۹۸۰
M24×2	۳۸۴	۶۳۰	۸۱۰	۹۹۰	۹۰۰	۱۱۵۰	۱۴۰۰	۱۰۵۰	۱۳۵۰	۱۶۵۰

فکر کنید



پیچ در اتصال اصطکاکی آنقدر کشیده می‌شود تا مانند فنر عمل کند و ورق‌های اتصال را به هم بفشارد.

ب) اتصال اتکایی : این اتصال جایگزین اتصال پرچی شده است. در این اتصال پیچ تنها نیروی بین اعضای اتصال را منتقل می‌کند. محاسبات تنش در این نوع اتصال را در ادامهٔ این فصل بررسی خواهیم کرد.

۲ـ۴ـ درجه استحکام پیچ‌ها

استانداردهای مختلفی برای مشخص کردن استحکام پیچ‌ها تدوین شده است. در جدول ۲ـ۴ درجه استحکام پیچ‌ها در استاندارد ISO ارائه شده است. درجه استحکام بر روی سرپیچ‌ها حک می‌شود.

جدول ۲ـ۴ـ درجه استحکام پیچ‌ها

درجه استحکام	3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9
استحکام نهایی N/mm^2	۳۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۶۰۰	۸۰۰	۹۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰
استحکام نقطه تسلیم N/mm^2	۱۸۰	۲۴۰	۳۲۰	۳۰۰	۴۰۰	۴۸۰	۶۴۰	۷۲۰	۹۰۰	۱۰۸۰

مثال : در یک اتصال پیچی اصطکاکی از پیچ M10×1.25 از نوع 10.9 استفاده شده است. اگرضریب اصطکاک ۲۰٪ باشد، بیشترین گشتاور مجاز برای بستن این پیچ‌ها چقدر است؟

پاسخ : با مراجعه به جدول ۱ـ۴ ملاحظه می شود که حداکثر گشتاور بستن این پیچ‌ها ۹۳ N.m است.

نکته : با استفاده از اعداد به کار رفته در درجه استحکام پیچ‌ها می‌توان مستقیماً و بدون مراجعه به جدول فوق، مقدار مقاومت نهایی و مقاومت در نقطه تسلیم را محاسبه کرد.

مقاومت نهایی (N/mm^2) = رقم سمت چپ × ۱۰۰

مقاومت تسلیم (N/mm^2) = رقم سمت چپ × رقم سمت راست × ۱۰

مثال : محاسبه مقاومت نهایی پیچ با درجه استحکام 10.9

مقاومت نهایی = ۱۰×۱۰۰= ۱۰۰۰N/mm^2

مقاومت تسلیم = ۱۰×۹×۱۰=۹۰۰N/mm^2

غیاث‌الدین جمشید کاشانی

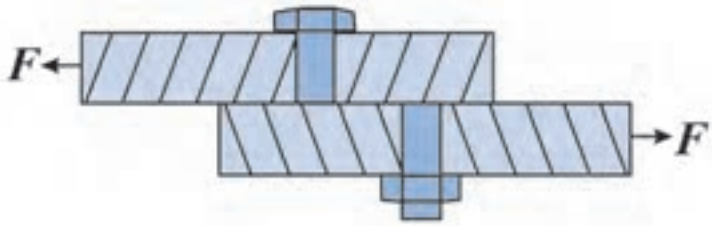
(حدود ۷۹۰ـ۸۳۲ هجری)

جمشید بن مسعود طبیب کاشانی ملقب به غیاث‌الدین که در غرب به الکاشی(al-kashi) مشهور است.

ریاضی‌دانی برجسته و ستاره‌شناس و محاسبی ماهر و زبردست بود. آلات رصدی دقیقی اختراع کرد و در دوران فعالیت علمی‌اش به تألیف کتاب‌های متعددی در زمینه ریاضیات و نجوم پرداخت. وی محاسبه سینوس(جیب) زاویه یک درجه را با روش ابتکاری تا هفده رقم اعشاری به دست آورده که با مقداری که امروزه محاسبه می‌شود هم‌خوانی دارد.

۳ــ۴ــ گسیختگی در اتصال پیچی

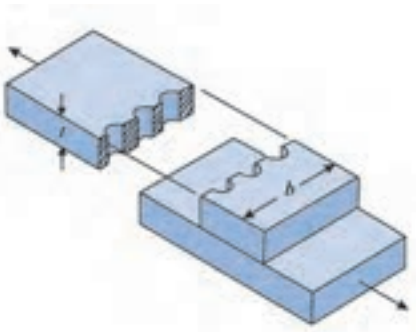
برای تشخیص دلایل اصلی گسیخته شدن اتصالات پیچی، اتصال شکل ۱ــ۴ را در نظر بگیرید. اتصال ممکن است مانند آن‌چه که در شکل ۶ ــ۴ نمایش داده شده است در اثر **بریدن پیچ‌ها** از بین برود.



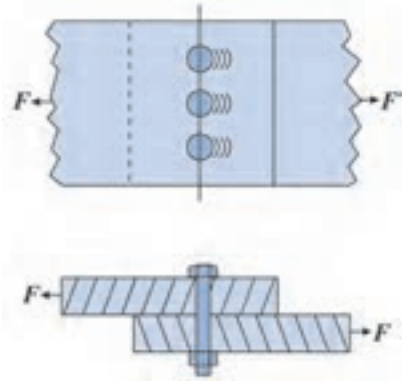
شکل ۶ ــ۴ــ برش در پیچ باعث گسیختگی اتصال شده است.

برش در پیچ‌ها، باعث گسیختگی اتصال در زمان زلزله شده است.

احتمال دیگری که وجود دارد **پاره شدن ورق** از ضعیف‌ترین مقطع است. همان‌گونه که می‌**دانید** به دلیل سوراخ‌کاری‌های انجام شده در ردیف پیچ‌های اتصال، سطح مقطع کاهش یافته و در مقابل نیروی وارد شده کم‌تر مقاومت خواهد کرد. این نوع گسیختگی اتصال در شکل ۷ــ۴ نشان داده شده است.



شکل ۷ــ۴ــ کشش در سطح مقطع تضعیف شده ورق باعث گسیختگی اتصال شده است.



شکل ۸ــ۴ــ لهیدگی ورق‌ها باعث گسیختگی اتصال شده است.

در صورتی‌که فاصله سوراخ‌های ابتدا و انتها تا لبه ورق به اندازه کافی پیش‌بینی نشده باشد، احتمال پارگی بین پیچ تا لبه ورق نیز وجود دارد.

سومین دلیل از بین رفتن اتصال پیچی **له شدن ورق‌ها** در اثر نیروی وارد شده توسط پیچ به آن‌هاست. شکل ۸ ــ۴ لهیدگی ورق اتصال را نشان می‌دهد.

در این فصل هر یک از این دلایل را بررسی کرده و محاسبات مربوط به آن را انجام خواهیم داد.

گسیختگی در اتصالات پیچی

- بریده شدن پیچ‌ها
- پاره شدن ورق‌ها
- له شدن ورق‌ها

۴ـ۴ـ تنش در اتصال پیچی

تنش‌های واقعی به وجود آمده در اتصالات پیچی، ساده نیستند اما در محاسبات، تنش‌های به وجود آمده در پیچ‌های اتکایی را به صورت تنش‌های سادهٔ کششی، فشاری و برشی در نظر می‌گیرند.

در محاسبات تنش در اتصال‌های پیچی نیز از رابطه تنش (رابطه ۱ـ۲) استفاده می‌کنیم :

$$\text{تنش} = \frac{F}{A}$$

در اتصال پیچی اتکایی سه تنش را مورد بررسی قرار می‌دهند : تنش برشی در ساق پیچ و تنش کششی و تنش لهیدگی در ورق اتصال.

۱ـ۴ـ ۴ـ تنش برشی در ساق پیچ : برای محاسبه تنش برشی در ساق پیچ رابطه فوق را به این صورت می نویسیم :

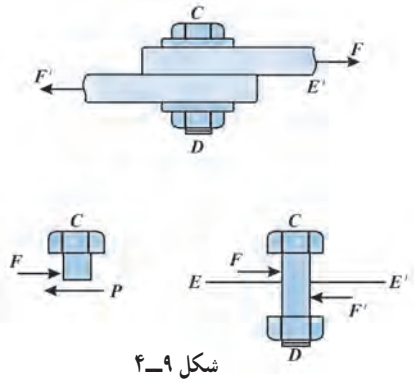
$$\tau = \frac{F}{A_s}$$

که در آن :

τ : تنش برش در ساق پیچ

F : نیروی اعمال شده به اتصال

A_s : کل سطح مقطعی است که نیروی برش به آن اعمال می‌شود.



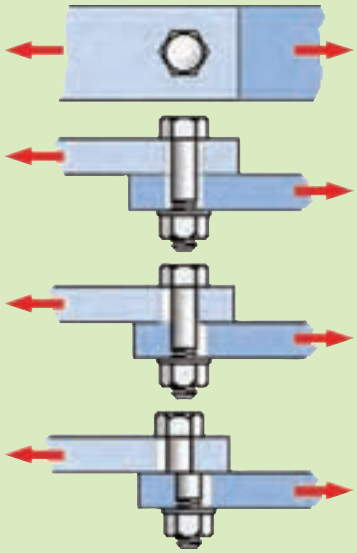
شکل ۹ـ۴

اگر قطر پیچ‌ها را با d و تعداد سطوحی که در برابر نیروی برش مقاومت می‌کنند را با n نمایش دهیم، رابطه بالا به این صورت نوشته می‌شود :

$$\tau = \frac{F}{n.A_s} = \frac{F}{n\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)}$$ رابطه ۱ـ۴

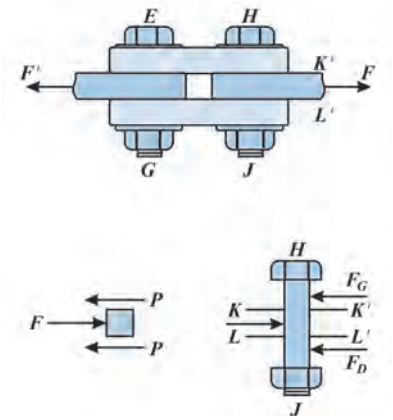
در یک اتصال لبه روی هم مانند آنچه که در شکل ۲ـ۴ نشان داده شده است، هر پیچ تنها در یک مقطع تحت تأثیر نیروی برشی قرار دارد. بنابراین در چنین نمونه‌ای، سطح شش پیچ در برابر نیروی برشی F مقاومت می‌کند. در این صورت در رابطه (۱ـ۴) مقدار n را ۶ قرار می‌دهیم

فکر کنید



چرا در اتصالات اتکایی A_s بر اساس قطر نامی پیچ محاسبه می‌شود، امّا در اتصالات اصطکاکی کمی کمتر از آن و مطابق جدول ۱ـ۴ انتخاب می‌شود.

امّا در اتصال سربه‌سر نشان داده شده در شکل ۱۰ــ۴ هر پیچ در یک نیمه اتصال، در دو سطح در برابر نیروی برشی مقاومت می‌کند. یعنی اگر همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، اتصال در اثر نیروی برشی گسیخته شود، هر پیچ از دو سطح دچار برش خواهد شد (برش دوگانه). برای نمونه در اتصال نشان داده شده در شکل ۴ــ۴ مقدار n برابر ۱۰= ۲×۵ خواهد بود.



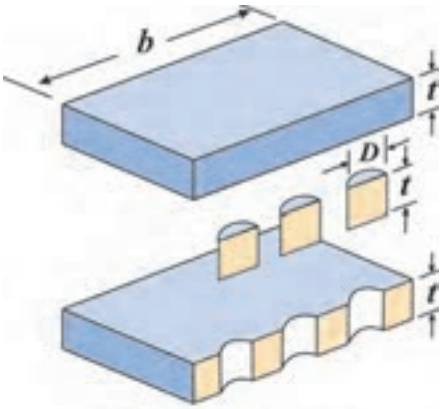
شکل ۱۰ــ۴ــ برش دوگانه

۲ــ۴ــ۴ــ تنش کششی در ورق اتصال : همان‌گونه که گفته شد ممکن است یک اتصال پیچی مانند آنچه که در شکل ۷ــ۴ نشان داده شده است در اثر تنش کششی در سطح مقطع ضعیف شده ورق، گسیخته شود. برای محاسبه تنش کششی در ورق به سطح مقطع مؤثری از اتصال که در برابر نیروی کششی مقاومت می‌کند نیاز می‌باشد. در اتصالات پیچی سطح مقطع مؤثر ورق در خط ردیف پیچ‌ها است که در اثر سوراخ‌کاری‌های انجام شده، کاهش یافته است. برای محاسبه سطح مؤثر ورق از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$A_t = bt - nDt = (b - nD)t$$

که در آن :

A_t : سطح مقطع مؤثر ورق (mm^2)



شکل ۱۱ــ۴ــ مراحل محاسبه سطح مؤثر ورق

فکر کنید

از اتصال‌های پیچی و جوشی در ساخت اسکلت‌های فلزی استفاده می‌شود.

محاسن و مشکلات هر کدام از این روش‌ها را بررسی نمایید.

b : عرض ورق (mm)

t : ضخامت ورق (mm)

n : تعداد سوراخ پیچ‌ها در یک ردیف

D : قطر سوراخ پیچ‌ها (mm)

همان‌گونه که در شکل ملاحظه می‌کنید bt سطح مقطع ورق قبل از سوراخ‌کاری است. Dt مساحت مقطع موادی است که در اثر هر سوراخ از سطح مقطع ورق کم شده است و b−nD عرض مؤثر ورق باقی‌مانده پس از n سوراخ‌کاری **در یک ردیف بر روی ورق** است. با استفاده از مساحت مؤثر به دست آمده به شیوهٔ فوق، رابطه تنش کششی در ورق به صورت زیر نوشته می‌شود :

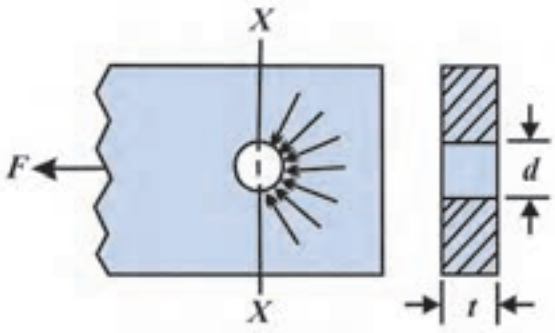
رابطه ۲ـ۴

$$\sigma_t = \frac{F}{A_t} \rightarrow \sigma_t = \frac{F}{(b - nD)t}$$

توجه : برای آسان‌تر شدن عملیات مونتاژ در اتصالات پیچی و پرچی و از آن‌جا که در عمل تطابق سوراخ‌ها به صورت کامل ممکن نیست، قطر سوراخ‌ها را بزرگ‌تر از ساق پیچ یا پرچ انتخاب می‌کنند. مقدار توصیه شدهٔ اندازه سوراخ‌ها در استانداردهای مختلف متفاوت است. در این کتاب قطر سوراخ را ده درصد بزرگ‌تر از ساق پیچ یا پرچ در نظر گرفته می‌شود و با حرف D نمایش داده می‌شود.

بنابراین : $D = ۱/۱ \times d$

۳ـ۴ـ۴ـ تنش لهیدگی در ورق اتصال : همان‌گونه که درشکل ۱۲ـ۴ نشان داده شده است، زمانی که نیروی F به ورق وارد می‌شود، ورق بر روی سطح استوانه‌ای پیچ نیرو وارد می‌کند و عکس‌العمل این نیرو نیز از طرف پیچ به ورق وارد می‌شود. بنابراین یک نیروی فشاری تولید می‌شود که مقدار آن در نقاط مختلف پیرامون پیچ متفاوت است.



شکل ۱۲ـ۴ـ در شکل نیروهای واکنشی نمایش داده شده اند که منجر به لهیدگی در ورق اتصال می‌شود.

خیام

عمر بن ابراهیم خیام در سال ۴۳۹ هجری (۱۰۴۸ میلادی) در شهر نیشابور به دنیا آمد.

بسیار جوان بود که در فلسفه و ریاضیات تبحر یافت. استعداد شگرف خیام سبب شد که وی در زمینه‌های دیگری از دانش بشری نیز دستاوردهایی داشته باشد.

از وی رساله‌های کوتاهی در زمینه‌هایی چون مکانیک، هیدرواستاتیک، هواشناسی، نظریه موسیقی و غیره نیز بر جای مانده است.

خیام پس از عمری پربار سرانجام در سال ۵۱۷ هجری در موطن خویش نیشابور درگذشت و با مرگ او یکی از درخشان‌ترین صفحات تاریخ اندیشه در ایران بسته شد.

تنش ایجاد شده در اثر این نیروی فشاری در ورق را **تنش لهیدگی** می‌نامند.

سطح تماسی که برای محاسبه تنش لهیدگی استفاده می‌شود، سطح تختی است عمود بر راستای نیرو که از مرکز پیچ می‌گذرد. این سطح مستطیلی است به [ابعاد] ضخامت ورق (t) و [به عرض] قطر پیچ (d). در این‌صورت سطح لهیدگی برای هر پیچ td خواهد بود.

$$A_C = n \times t \times d$$

رابطه ۳ـ۴

$$\sigma_C = \frac{F}{A_C} \quad \rightarrow \quad \sigma_C = \frac{F}{ntd}$$

که در آن :

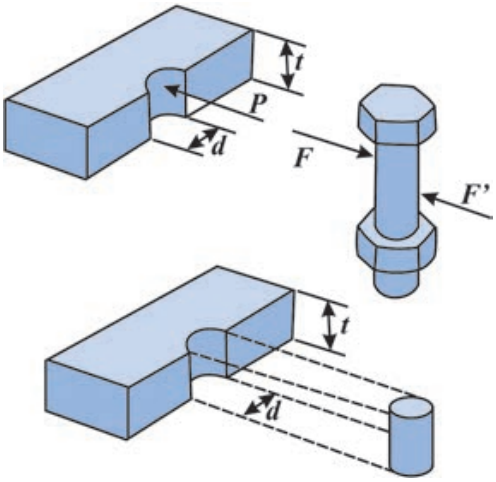
F : نیروی خارجی وارد شده به اتصال (N)

σ_C : تنش لهیدگی در ورق ($\frac{N}{mm^2}$ یا Mpa)

t : ضخامت ورق (mm)

d : قطر پیچ (mm)

n : تعداد سطوح لهیدگی



شکل ۱۳ـ۴ـ نیروی عکس العمل P منجر به تنش لهیدگی در ورق می‌شود.

نکته : تنش لهیدگی مجاز را از رابطه ۴ـ۴ محاسبه می‌کنند. به عنوان مثال برای فولاد ساختمانی St37 که تنش کششی نهایی ۳۵۵ Mpa است. تنش لهیدگی مجاز ۳۱۱MPa می‌باشد.

رابطه ۴ـ۴

$$\delta_c = ۱.۳۳\sigma_y$$

استفاده از اتصال پرچی در گذشته بسیار رایج بوده است که امروزه اتصال‌های جوش‌کاری و پیچی جایگزین آن شده‌اند.

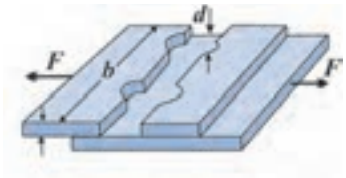
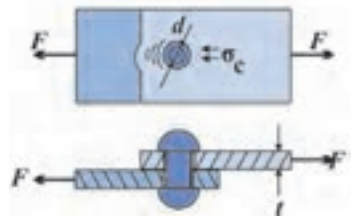
اتصال پرچی در ساخت بزرگترین پل فلزی جهان به کار رفته است.

۵ــ۴ــ اتصال پرچی

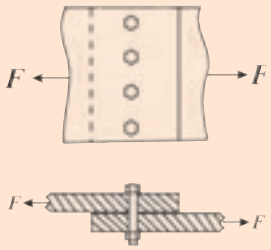
پرچ‌کاری از قدیمی‌ترین روش‌های اتصال است. اتصال‌های پرچ‌کاری را می‌توان از پل‌های فلزی و سازه‌های فلزی صنعت هوا فضا تا اتصال در محصولات چرمی مشاهده کرد. اگرچه امروزه پرچ‌کاری در سازه‌های فلزی جای خود را به انواع دیگر اتصالات می‌دهد اما هم‌چنان کاربردهایی از آن خصوصاً در بازسازی سازه‌های قدیمی مشاهده می‌شود. با انواع پرچ‌ها و روش‌های پرچ‌کاری در سایر دروس تخصصی خود آشنا خواهید شد.

محاسبه تنش در اتصال‌های پرچی، مشابه محاسبات تنش در اتصال‌های پیچی اتکایی است و از روابط ۱ــ۴، ۲ــ۴ و ۳ــ۴ در مورد این نوع اتصال‌ها نیز می‌توان استفاده کرد. جدول ۳ــ۴ خلاصه‌ای از گسیختگی در اتصال‌های پیچی و پرچی و روابط تنش آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۳ــ۴ــ گسیختگی در اتصال‌های پیچی و پرچی و روابط تنش آنها

شرح	طرح اتصال	رابطه محاسبه تنش
۱ــ برش در ساق پیچ یا پرچ		$t = \frac{4F}{\pi d^2}$
		$\tau = \frac{2F}{\pi d^2}$
۲ــ کشش در مقطع تضعیف شده در ورق		$\sigma_t = \frac{F}{(b - nD)t}$
۳ــ لهیدگی در ورق		$\sigma_c = \frac{F}{n.t.d}$

تمرین نمونه ۱ــ۴ : یک اتصال لبه روی هم پیچی یک ردیفه با چهار عدد پیچ M20 با درجه استحکام 8.8 درشکل ۱۴ــ۴ نشان داده شده است. ابعاد ورق ۳۰۰mm×۱۰mm و جنس آن از فولاد ساختمانی St37 است. با مراجعه به جداول استانداردهای معرفی شده بیش‌ترین بار قابل اعمال به اتصال را محاسبه کنید؟



شکل ۱۴ــ۴

راه‌حل : برای تعیین بیش‌ترین بار قابل اعمال به اتصال، می‌بایست ضعیف‌ترین جز اتصال را شناسایی نموده و حداکثر بار قابل اعمال به ضعیف‌ترین جزء اتصال را به عنوان ظرفیت اتصال اعلام نمود. بنابراین لازم است تا هر سه نوع تنش را مورد بررسی قرار دهیم.

الف) تنش برشی در ساق پیچ : درجه استحکام پیچ‌ها 8.8 اعلام شده است. با مراجعه به جدول ۲ــ۴ استحکام تسلیم آن استخراج می‌شود. سپس با استفاده از رابطه ۸ــ۲ تنش برشی مجاز محاسبه می‌شود.

$$\tau_{\text{مجاز}} = ۰/۴ \times \sigma_{\text{تسلیم}} = ۰/۴(۶۴۰\text{MPa}) = ۲۵۶\text{MPa}$$

$$A_S = \pi d^۲ / ۴ = \frac{\pi \times ۲۰^۲}{۴} = ۳۱۴\text{mm}^۲$$

$$\tau = \frac{F}{n.A} \rightarrow$$

حال با استفاده از رابطه ۱ــ۴ داریم :

$$F = \tau.n.A = (۲۵۶\text{MPa})(۴)(۳۱۴\text{mm}^۲) = ۳۲۱۵۳۶\text{N} = ۳۲۱/۵\text{kN}$$ ◀

ب) تنش کششی در ورق : جنس ورق St37 است پس با استفاده از رابطه ۷ــ۲ و جدول ب ــ۲، $\sigma_{\text{مجاز}} = ۱۴۰\text{MPa}$ است. قطر ساق پیچ‌هایM20، بیست میلی‌متر می‌باشد. پس قطر سوراخ محاسبه می‌شود.

$$D = ۱/۱ \times d = ۱/۱ \times ۲۰ = ۲۲\text{mm}$$

با کمک رابطه ۲ــ۴ نیروی قابل اعمال به سطح مقطع مؤثر ورق محاسبه می‌شود.

$$\sigma_t = \frac{F}{(b - nD)t} \rightarrow F = \sigma_t (b - nD)t$$

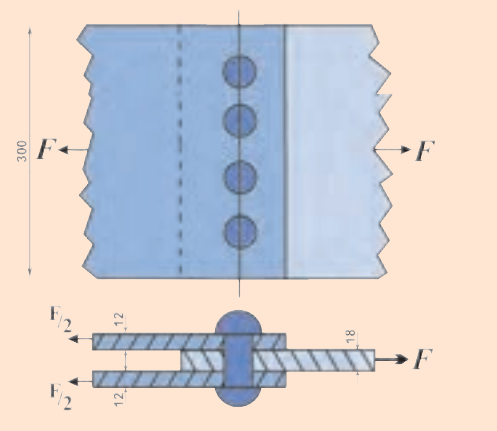
$$= (۱۴۰\text{MPa})(۳۰۰\text{mm} - ۴ \times ۲۲\text{mm})(۱۰\text{mm})$$
$$= ۲۹۶۸۰۰\text{N} \simeq ۳۰۰\text{kN}$$ ◀

ج) تنش لهیدگی در ورق : تنش لهیدگی مجاز فولاد St37، ۳۱۱ MPa است. پس با استفاده از رابطهٔ ۳ــ۴ داریم :

$$\sigma_C = \frac{F}{ntd} \rightarrow F = \sigma_C ntd = (۳۱۱\text{MPa})(۴)(۱۰\text{mm})(۲۰\text{mm}) = ۲۴۸۸۰۰ = ۲۴۸/۸\text{KN}$$ ◀

با مقایسه پاسخ‌های به دست آمده، ملاحظه می‌شود که اگر مقدار نیروی F از ۳۱۱kN تجاوز کند، در ورق لهیدگی رخ خواهد داد. پس علی‌رغم آن‌که پیچ‌ها نیروی ۳۲۱/۵kN و ورق نیروی ۲۴۸/۸kN را تحمل می‌کند، ظرفیت این اتصال را تنش لهیدگی در ورق تعیین می‌کند. پس بیش‌ترین بار قابل اعمال به اتصال ۲۴۸/۸kN می‌باشد.

تمرین نمونه ۲ــ۴ : در اتصال نشان داده شده در شکل ۱۵ــ۴ از چهار عدد پرچ دوگانه به قطر ۲۵mm استفاده شده است. جنس پرچ‌ها و صفحات از فولاد ساختمانی St37 است. نیروی قابل اعمال به اتصال را محاسبه کنید.



شکل ۱۵ــ۴

راه حل : برای شناسایی ضعیف‌ترین جزء اتصال، نیروی قابل اعمال به هر جزء به نحوی محاسبه می‌شود که تنش در قطعه از مقدار مجاز تجاوز نکند.

الف) برش در ساق پرچ : جنس پرچ از فولاد St37 است. پس براساس رابطه ۸ ــ ۲ و جدول ب ــ ۲ داریم :

$$\tau_{\text{مجاز}} = ۰/۴ \times \sigma_{\text{تسلیم}} = ۰/۴(۲۳۵\text{MPa}) = ۹۴\text{MPa}$$

$$\tau = \frac{F}{n(\frac{\pi d^۲}{۴})} \rightarrow$$

با استفاده از رابطه ۱ــ۴ :

$$F = \tau.n(\frac{\pi d^۲}{۴}) = (۹۴\text{MPa})(۲\times۴)\left(\frac{۳/۱۴\times(۲۵\text{mm})^۲}{۴}\right) = ۳۶۹۰۰۰\text{N}$$ ◀

ب) کشش در ورق : قطر سوراخ‌ها ده درصد بزرگ‌تر از قطر پرچ در نظر گرفته می‌شود :

$$D=۱/۱d=۱/۱\times(۲۵\text{mm})= ۲۷/۵\text{mm}$$

از آن‌جا که در صنعت، سوراخ‌کاری سازه‌های فلزی با قطر ۲۷/۵mm نامتعارف است. قطر سوراخ به نزدیک‌ترین اندازه متعارف گرد می‌شود. پس : $D=۲۸\text{mm}$

توجه داشته باشید که ادامه محاسبات را بر روی ضعیف‌ترین ورق اتصال انجام می‌دهیم. ضعیف‌ترین ورق در اتصال فوق ورق به ضخامت ۱۸ mm است. (چرا؟)

با استفاده از رابطه ۲ــ۴ داریم :

$$F=(b-nD)t\sigma_t=(۳۰۰\text{mm}-۴\times۲۸\text{mm})(۱۸\text{mm})(۱۴۱\text{MPa})=۴۷۷\text{kN}$$ ◀

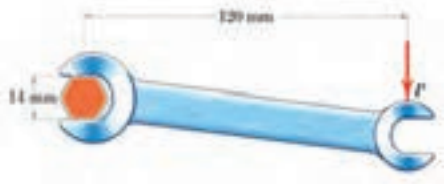
ج) لهیدگی در ورق : تنش لهیدگی مجاز در فولاد ساختمانی St73، ۳۱۱MPa است. با استفاده از رابطه ۳ــ۴ داریم :

$$F=ntd\sigma_C=۴(۱۸\text{mm})(۲۵\text{mm})(۳۱۱\text{MPa})=۵۵۹/۸\text{kN}$$ ◀

مقایسه پاسخ‌ها نشان می‌دهد که نیروی قابل اعمال به اتصال ۳۶۹kN است.

تمرین‌های فصل چهارم

۱ــ۴ــ شکل ۱۶ــ۴ بستن یک پیچ M10 با کلاس ۸ ــ ۸ به وسیله آچار دو سر را در یک اتصال پیچی اصطکاکی با ضریب اصطکاک ۰/۲ نشان می‌دهد. الف) حداکثر گشتاور بستن این پیچ را تعیین کنید. ب) نیروی P لازم برای بستن پیچ را محاسبه کنید.



شکل ۱۶ــ۴

۲ــ۴ــ تنش برشی مجاز در یک پیچ با درجه استحکام 5.6 را محاسبه نمائید.

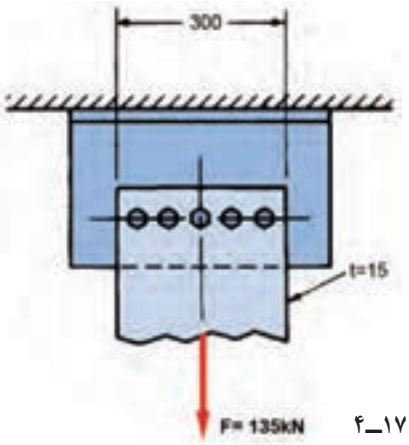
۳ــ۴ــ به یک اتصال لبه روی هم یک ردیفه که با چهار پیچ M12×1.25 ایجاد شده است، نیروی کششی ۳۰kN وارد می‌شود. تنش برشی در پیچ ها چقدر است؟

۴ــ۴ــ برای ایجاد یک اتصال لبه روی هم پیچی، چهار سوراخ به قطر ۲۵ میلی‌متر روی ورق به عرض ۴۰۰ میلی‌متر ایجاد شده است. ورق‌ها از جنس St37 با حداکثر تنش کششی مجاز ۱۴۰ می‌باشند. ضخامت ورق را به نحوی تعیین کنید که اتصال نیروی کششی ۱۴۵kN را تحمل کند.

۵ــ۴ــ اگر در اتصال مسأله ۴ــ۴ از پیچ‌های M22 استفاده شده باشد، تنش لهیدگی ایجاد شده در ورق چقدر است؟

۶ــ۴ــ در شکل صفحه بعد پیچ‌ها از نوع M20 هستند و با فاصله‌های ۶۰mm از یکدیگر به صورت یگانه اجرا شده‌اند. مقدار تنش برشی در پیچ‌ها و حداکثر تنش کششی در ورق اتصال را محاسبه نمایید.

۷ــ۴ــ اگر در مسأله قبل ورق‌ها از نوع St37 باشند، ابتدا ضریب اطمینان در ورق را محاسبه نموده و متناسب با آن درجه استحکام پیچ مناسب را برای اتصال پیشنهاد کنید.



شکل ۱۷ــ۴

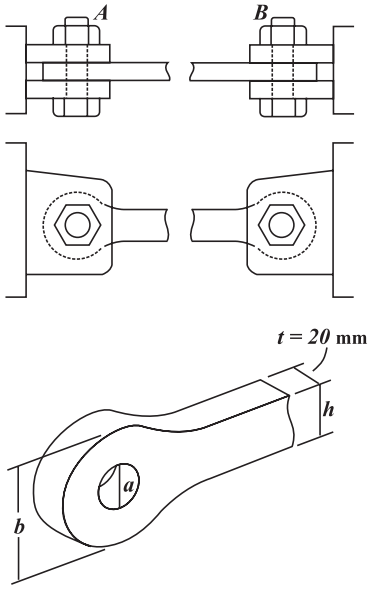
مسأله برای تمرین بیشتر

۸ــ۴ــ میله فولادی نشان داده شده در شکل ۱۸ــ۴ برای تحمل نیروی کششی ۱۲۶ kN طراحی شده است. این میله بین قلاب‌های دوگانه A و B پیچ و مهره شده است. میله از ورقی به ضخامت ۲۰mm ساخته شده است. برای فولاد به کار رفته حداکثر تنش‌های مجاز چنین است : $\sigma_{\text{مجاز}}$=۱۷۵MPa، و $\sigma_{\text{لهیدگی مجاز}}$=۳۵۰ MPa. برای طراحی میله، مقادیر زیر را محاسبه کنید :

الف) قطر سوراخ و پیچ مورد نیاز.

ب) اندازه h در میله.

ج) اندازه b در هر انتهای میله.



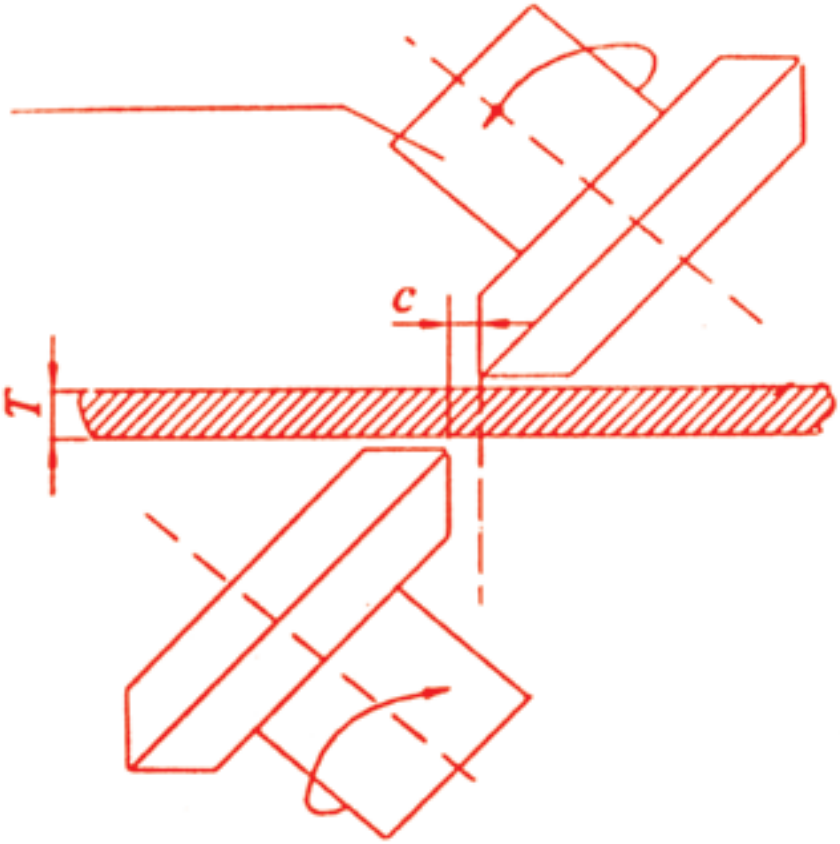
شکل ۱۸ــ۴

خلاصهٔ فصل چهارم

- با مرور مطالبی که در این فصل آموخته‌اید، مباحث مطرح شده و روش‌های حل مسأله را خلاصه نویسی کنید.

فصل ۵

برش کاری



هدف‌های رفتاری فصل پنجم :

آیا می‌توانید نیروی لازم برای برش‌کاری را محاسبه کنید؟

پس از پایان این درس از هنرجو انتظار می‌رود که :

- محاسبات مقدماتی برش در ورق‌ها را انجام دهد.
- نیروی برش در ورق‌های فلزی را محاسبه کند.
- نیروی برش‌کاری با پرس مکانیکی و گیوتین را محاسبه نماید.

مدت زمان آموزش :

- **۴ ساعت**

مقدمه

فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی در صنعت بسیار پرکاربردند. محصولات ورق کاری دارای خصوصیات قابل توجه زیادی هستند که می‌توان به دقت ابعادی خوب، استحکام کافی و وزن کم آن‌ها اشاره کرد. به همین دلیل، کاربرد این قطعات دامنه وسیعی از قطعات بسیار کوچک در صنایع الکترونیک تا قطعات بسیار بزرگ به کار رفته در سازه‌های صنعت نفت و هوافضا را شامل می‌شود.

فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی را می‌توان به دو گروه فرآیندهای برش، شامل برش‌کاری، پولک‌زنی، سوراخ‌زنی، شکاف‌زنی و ... و فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شامل خم‌کاری، کشش عمیق و ... طبقه‌بندی کرد.

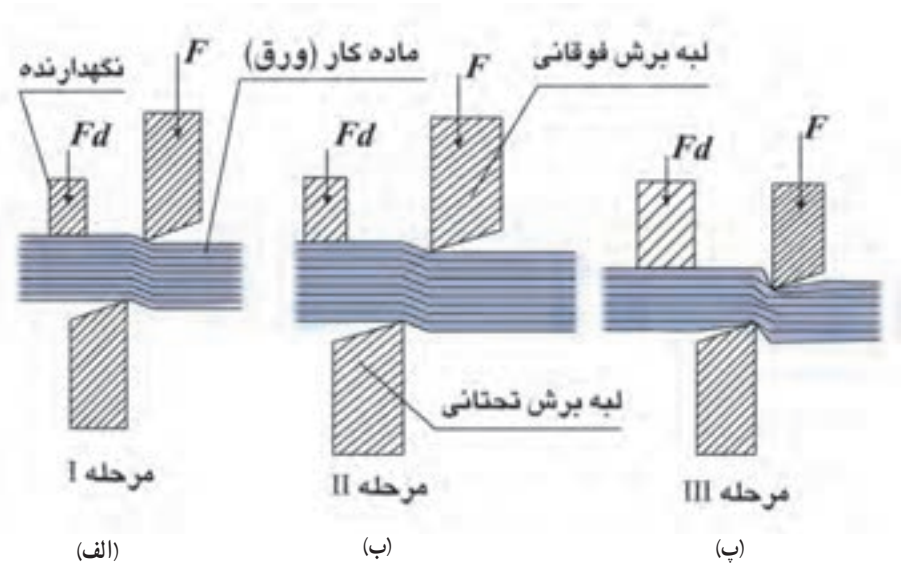
در این فصل با کاربرد مطالب فصل‌های اول و دوم در محاسبات برش‌کاری آشنا خواهید شد.

ماتریس و سنبه

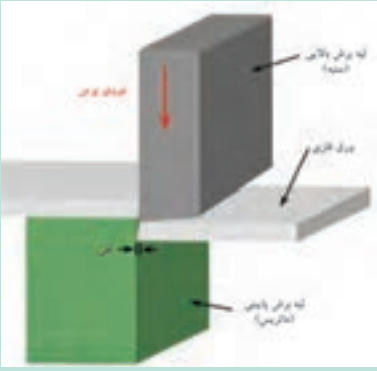
۵ــ مکانیک برش

فرآیند برش‌کاری در ورق‌های فلزی، شامل برش موادی تخت هم‌چون ورق‌ها و صفحات می‌باشد. فرآیند برش ممکن است توسط انواع مختلف تیغه‌ها و لبه‌های برش صورت گیرد. این ابزارهای برشی توسط ماشین‌هایی با محرک‌های مکانیکی، هیدرولیکی یا الکتریکی به حرکت درمی‌آیند. به‌طور کلی در فرآیندهای برش با قرار گرفتن قطعه میان لبه‌های برشی سنبه و ماتریس یا تیغه‌های قیچی و در اثر اعمال نیروهایی که منجر به تنش برشی در ماده می‌شود، عمل برش صورت می‌گیرد.

شکل ۱ــ۵ طرحی شماتیک از فرآیند برش‌کاری را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود ماده اولیه توسط دستگاه برش محکم گرفته شده، تا بر اثر نیروی تیغه بالایی و حرکت رو به پایین آن و گذشتن از محل تیغه پایینی عمل برش صورت گیرد. به‌منظور جلوگیری از جابه‌جا شدن ماده حین فرآیند برش از ورق‌گیر استفاده می‌شود که در این‌جا نیروی ورق‌گیر با F_d نشان داده شده است.



شکل ۱ــ۵ــ طرحی شماتیک از فرآیند برش



قیچی رو میزی

در بررسی فرآیند برش‌کاری، سه مرحله مورد توجه قرار می‌گیرد. در مرحله نخست شکل ۱ــ۵ــ الف نیروی برش اعمال شده به حدی است که تنش پدید آمده در ماده کمتر از حد تنش تسلیم است ($\tau < \tau_y$). تا این مرحله تغییرِ شکلِ کشسان (الاستیک) در قطعه رخ می‌دهد.

در مرحله دوم شکل ۱ــ۵ــ ب تنش پدید آمده در جسم، از مقدار تنشِ تسلیم بیشتر و از حد استحکام نهایی فلز کمتر است، یعنی $\tau_y < \tau < \tau_u$. در این مرحله تغییر شکل پلاستیک در ماده رخ داده است.

در مرحله سوّم شکل ۱ــ۵ــ پ تنش پدید آمده در ماده برابر تنش برش نهایی یا استحکام برش ماده است ($\tau = \tau_u$). در این شرایط لبه‌های برنده در ماده نفوذ کرده و در انتها نیز با رشد ترک‌هایی که در مجاورت لبه‌های برش بالایی و پایینی بوجود آمده‌اند، شکست رخ می‌دهد.

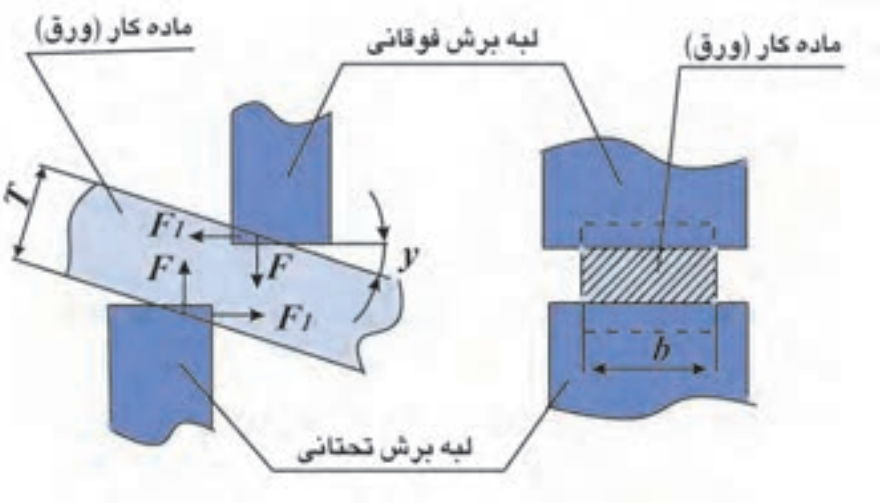
با مشاهده دقیق لبه برش خورده قطعه ملاحظه می‌شود در قسمتی که تیغه برش نفوذ کرده، سطح نسبتاً صاف و براق است. اما در ناحیه‌ای که بر اثر پدید آمدن ترک، پارگی ایجاد شده، لبه برش خورده سطحی کدر و خشن دارد.

۱ــ۵ــ نیروهای برشی

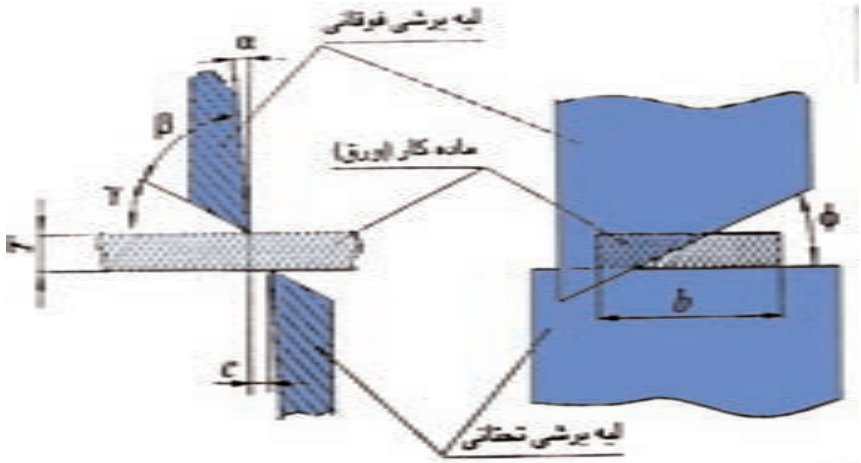
نیروهای اعمال شده در برش‌کاری براساس انواع لبه‌های برشی به کار رفته با روش‌های مختلفی محاسبه می‌شوند. در فرآیندهای برش‌کاری سه نوع لبه برشی وجود دارد :

- **لبه برشی تخت** : مانند لبه‌های برش در دستگاه پرس مکانیکی لنگ (شکل ۲ــ۵).
- **لبه برشی شیب‌دار** : مانند لبه تیغ برش در دستگاه گیوتین یا قیچی دستی (شکل ۳ــ۵).
- **لبه برشی چرخان** : مانند تیغه ماشین برش‌کاری چرخان (شکل ۴ــ۵).

در این فصل با محاسبه نیروی برش در لبه‌های برشی تخت و لبه‌های برشی شیب‌دار آشنا خواهید شد.



شکل ۲ــ۵ــ طرح شماتیک برش‌کاری با لبه تخت

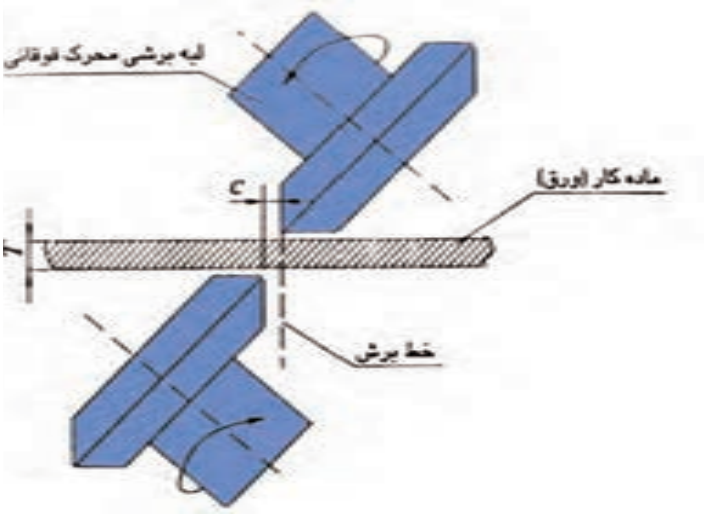


شکل ۳ــ۵ــ طرح شماتیک برش‌کاری با لبه شیب‌دار

خواجه نصیر طوسی

ابو جعفر محمد طوسی (۵۸۰ ــ ۶۵۳ هجری خورشیدی) فیلسوف، متکلم، ریاضیدان و سیاست‌مدار ایرانی سده هفتم است. او در مراغه رصدخانه‌ای ساخت و کتابخانه‌ای بوجود آورد که حدود چهل هزار جلد کتاب در آن بوده‌است. وی یکی از توسعه دهندگان علم مثلثات است، در سده ۱۶ میلادی کتاب‌های مثلثات او به زبان فرانسه ترجمه گردید.

زادروز وی، پنجم اسفند به یاد این دانشمند بزرگ ایران و اسلام به نام روز مهندسی نام‌گذاری شده است.



شکل ۴ــ۵ــ طرح شماتیک برش‌کاری با لبه چرخان

۱ــ۱ــ۵ــ برش‌کاری با لبه‌های برشی تخت : نیروی برشی اعمال شده با لبه‌های برشی تخت به صورت تقریبی از رابطه زیر قابل محاسبه است :

رابطه ۱ــ۵ $F = \tau_{نهایی} \times A$

که در آن :

F : نیروی برش با یکای N،....

$\tau_{نهایی}$: حداکثر استحکام برشی با یکای N/mm^2

A : سطح مقطع برشی با یکای mm^2،....

مقدار حداکثر استحکام برشی در فولادها به کمک رابطه زیر از حداکثر استحکام کششی محاسبه می‌شود.

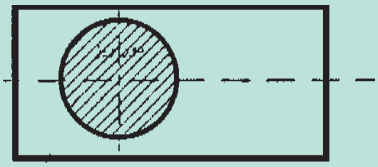
رابطه ۲ــ۵ $\tau_{نهایی} \simeq (0/7 \sim 0/8) \times \sigma_{نهایی}$

در عمل ممکن است به نیروی برشی بزرگ‌تری از نیروی برش محاسبه شده نیاز باشد. علت این افزایش می‌تواند لقی بیش از حد میان لبه‌های برشی، تغییرات ضخامت ماده و دیگر پارامترهای پیش‌بینی نشده باشد.

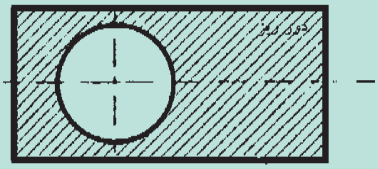
سوراخ‌زنی و بلانک‌زنی

فرآیندهای سوراخ‌زنی و بلانک‌زنی برای برش مواد فلزی در اندازه‌های دقیق به کمک قالب به کار می‌روند. ابزارهای اصلی این فرآیندها را سنبه و ماتریس تشکیل می‌دهند.

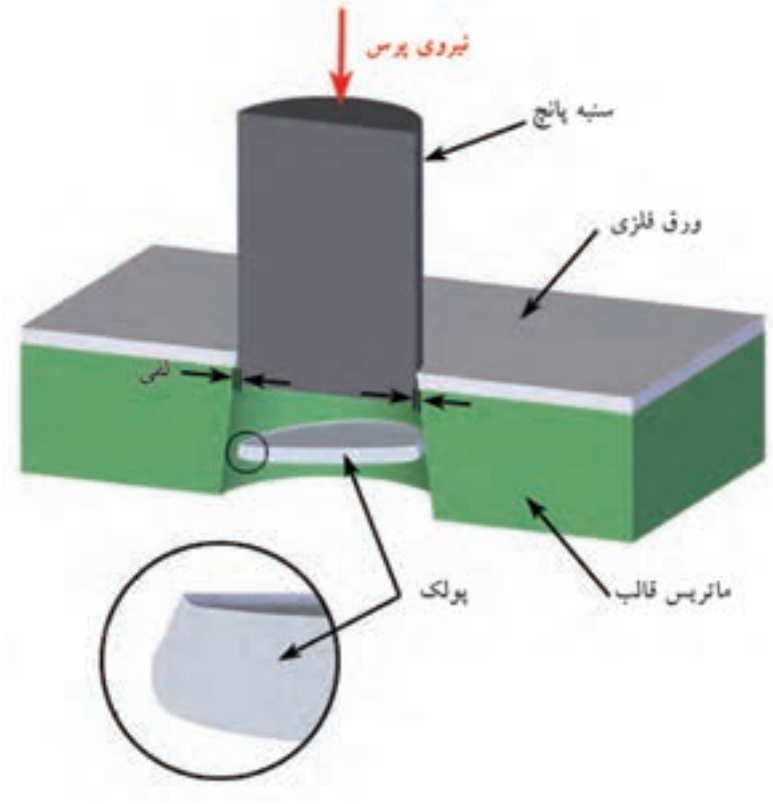
در بلانک‌زنی تکه میانی برش خورده مورد استفاده قرار گرفته و باقی‌مانده ورق در اطراف سنبه به عنوان دور ریز محسوب می‌شود. در سوراخ‌زنی، به عکس، قطعه میانی دور ریخته شده و آنچه که در اطراف سنبه می‌ماند به عنوان محصول شناخته می‌شود.



سوراخ زنی



بلانک زنی



شکل ۵ــ۵

برای محاسبه نیروی سنبه در فرآیند سوراخ‌زنی و بلانک‌زنی با دستگاه‌های پرس مکانیکی لنگ از رابطه (۱ــ۵) استفاده می‌شود به شرط آن‌که لبه‌های برشی سنبه و ماتریس تخت باشند. البته پارامترهایی نظیر ضخامت غیریکنواخت ورق، اصطکاک سنگین سنبه و قطعه کار و نیز وجود لبه‌های برشی که به اندازه کافی تیز نیستند، می‌تواند نیروی موردنیاز را تا ۳۰٪ افزایش دهد. بنابراین هنگام انتخاب ظرفیت (تناژ) پرس مورد نیاز پارامترهای فوق می‌بایست مورد توجه قرار گیرند.

در این دستگاه‌ها، تناژ مورد نیاز پرس از رابطه زیر به دست می‌آید :

رابطه ۳ــ۵

$$F_P = ۱/۳ \times F$$

که در آن :

F : نیروی برش با یکای N

F_p : ظرفیت (تناژ) پرس با یکای N

۲ــ۱ــ۵ــ برش‌کاری به وسیله لبه برش شیب‌دار : این روش برش‌کاری در مواردی کاربرد دارد که طول برش در مقابل ضخامت برش به صورت نسبی بزرگ باشد. با استفاده از لبه‌های برش شیب‌دار، نفوذ تیغه بالایی در ماده به صورت تدریجی بوده و در نتیجه به میزان نیروی

دستگاه پرس مکانیکی لنگ

برشی کمتری نیاز است. در گیوتین‌ها از این روش برش‌کاری استفاده می‌شود. نیروی برشی در این روش به صورت تقریبی با رابطه زیر محاسبه می‌شود :

رابطه ۴ــ۵ :

$$F = ۰/۸ \times k \times \tau_{\text{نهایی}} \times \frac{t^{۲}}{\tan \varnothing}$$

که در آن :

F : نیروی برش

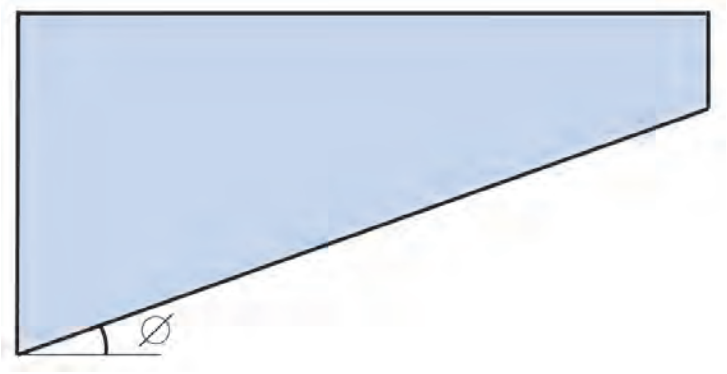
k : ضریب نفوذ نسبی لبه برشی

$\tau_{\text{نهایی}}$: حداکثر استحکام برشی ماده

t : ضخامت ورق

$\varnothing$: زاویه شیب لبه برشی بالایی

مقدار ضریب نفوذ نسبی لبه برشی (k) از جدول ۱ــ۵ به‌دست می‌آید.



شکل ۶ــ۵

جدول ۱ــ۵ــ ضریب نفوذ نسبی لبه برشی

جنس ورق	t < ۱mm	۱ < t < ۲	۲ < t < ۴	۴mm < t
فولاد کربنی ساختمانی	۰/۷۰ — ۰/۷۵	۰/۶۵ — ۰/۷۰	۰/۵۵ — ۰/۶۵	۰/۴۰ — ۰/۵۰
فولاد با استحکام متوسط	۰/۶۰ — ۰/۶۵	۰/۵۵ — ۰/۶۰	۰/۴۸ — ۰/۵۵	۰/۲۵ — ۰/۴۵
فولاد با استحکام بالا	۰/۴۷ — ۰/۵۰	۰/۴۵ — ۰/۴۷	۰/۳۸ — ۰/۴۴	۰/۲۵ — ۰/۳۵
مس و آلومینیوم	۰/۷۵ — ۰/۸۰	۰/۷۰ — ۰/۷۵	۰/۶۰ — ۰/۷۰	۰/۵۰ — ۰/۶۵

دستگاه برش‌کاری ورق (گیوتین)

دستگاه پرس هیدرولیک

تمرین نمونه ۵ــ۱ : نیروی برشی لازم و ظرفیت پرس مورد نیاز برای سوراخ‌زنی به قطر ۱۲mm با لبه‌های برشی تخت، روی ورق فولادی به ضخامت۱۰mm را حساب کنید. تنش برشی نهایی ورق فولادی ۳۸۰MPa است.

راه حل : ابتدا سطح مقطع برش را که مساحت جانبی پولک بریده شده است، محاسبه می‌کنیم.

$$A = \pi . d . t = ۳/۱۴ \times ۱۲ \times ۱۰ = ۳۷۷\ mm^۲$$

سپس با استفاده از رابطه ۱ــ۵ نیروی برش را محاسبه می‌کنیم.

$$F = \tau_{\text{نهایی}} \times A = (۳۸۰\ N/mm^۲)(۳۷۷\ mm^۲) = ۱۴۳۰۰۰\ N$$

برای محاسبه ظرفیت دستگاه پرس موردنیاز نیز از رابطه ۳ــ۵ استفاده می‌نماییم.

$$F_p = ۱/۳ \times F = ۱/۳ \times ۱۴۳۰۰۰ = ۱۸۵۹۰۰\ N$$

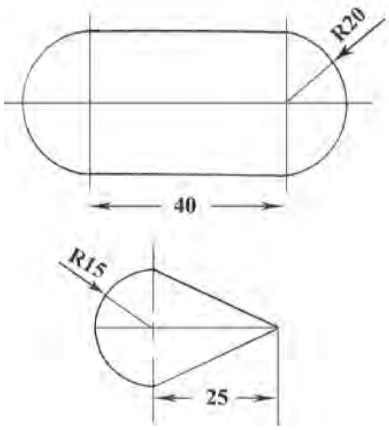
از آنجا که ظرفیت دستگاه‌های پرس با واحد تن (۱Ton=۱۰۰۰kgf) شناخته می‌شود. یکای پاسخ را به Ton تغییر می‌دهیم.

$$F_p = ۱۸۵۹۰۰ N = ۱۸۹۵۰ kgf = ۱۸/۹۵ Ton \simeq ۱۹ Ton$$

برای این سوراخ زنی پرسی با ظرفیت ۲۰ تن موردنیاز است.

تمرین های فصل پنجم

۱ــ۵ــ ظرفیت پرسی را که بتواند اشکال زیر را از یک ورق فولادی ضدزنگ به ضخامت ۵mm با لبه های برشی تخت، برش بزند را تعیین کنید. تنش برش نهایی فلز را $۴۵۰\ N/mm^۲$ در نظر بگیرید.



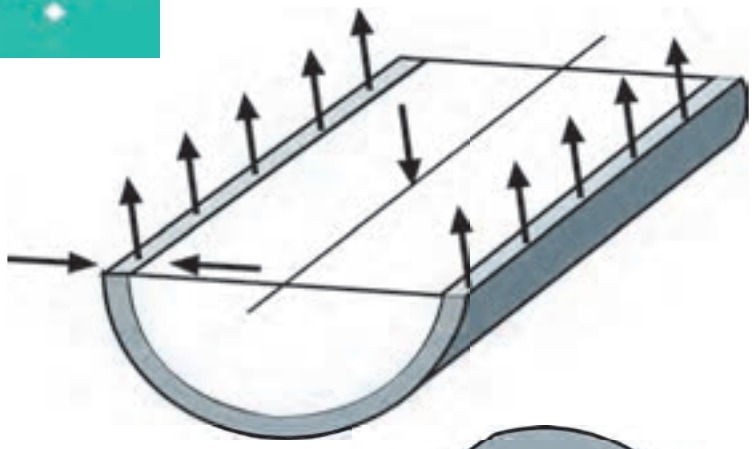
شکل ۷ــ۵

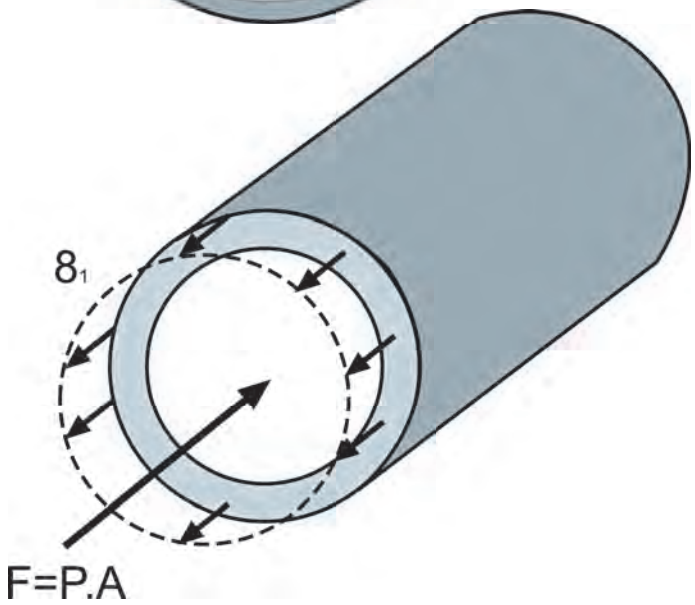
۲ــ۵ــ نیروی برش لازم، برای برش‌کاری ورق‌های فولاد کربنی ساختمانی با ضخامت ۱۰mm و تنش برش نهایی ۲۹۰MPa به وسیله تیغه برشی با شیب°۱۲ درجه را تعیین کنید.

۳ــ۵ــ نموداری برای نیروی برش ورق‌های فولاد کربنی با تنش برش نهایی ۲۶۰MPa از ضخامت ۱ تا ۵ میلی‌متر را برای دو تیغه برشی با شیب‌های ۱۲ و ۱۵ درجه رسم کنید.

فصل ۶

مخزن های جدار نازک





هدف‌های رفتاری فصل ششم :

آیا می‌توانید ابعاد یک مخزن جدار نازک را محاسبه و تعیین نمایید؟

پس از پایان این درس از هنرجو انتظار می رود که :

- مخزن جدار نازک را بشناسد.
- تنش در مخزن جدار نازک را بشناسد.
- با محاسبه یا با کمک نمودار، مخزن جدار نازک طراحی نماید.

مدت زمان آموزش :

- **۴ ساعت**

۶ــ مخزن های جدار نازک

برای نگه داری، ذخیره سازی و حمل سیالات (مایعات و گازها) از مخزن استفاده می‌شود. در شکل ۱ــ۶ که نمایی از یک کارخانه پتروشیمی را نمایش می‌دهد انواع مختلفی از مخزن‌ها مشاهده می‌شوند. مخزن‌ها از نظر کاربرد به دو دسته مخزن‌های ذخیره و مخزن‌های تحت فشار، تقسیم می‌شوند.

شکل ۱ــ۶ــ کارخانه پتروشیمی

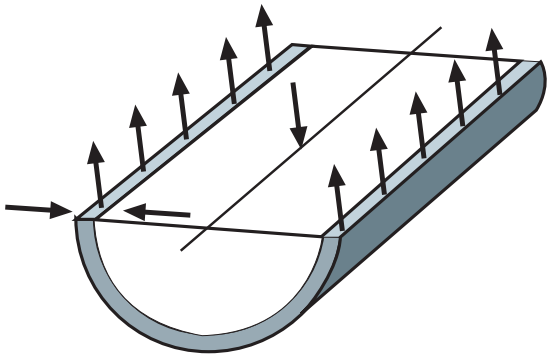
محاسبات مربوط به طراحی و استحکام مخزن‌ها در صنعت نفت، گاز و پتروشیمی و هم‌چنین صنعت تأسیسات از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از پرکاربردترین مخزن‌ها، مخزن جدار نازک است. به مخزنی جدار نازک گفته می‌شود که قطر آن بیش از بیست برابر ضخامت

جداره (گوشت دیواره) باشد. این مخزن‌ها معمولاً استوانه‌ای شکل هستند و با ورق‌های فلزی ساخته می‌شوند.

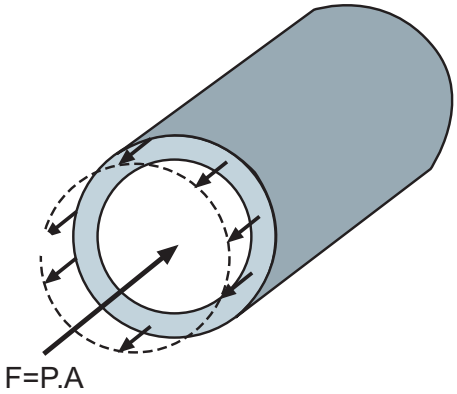
۱ــ۶ــ تنش در جداره‌های مخزن

در اثر فشار وارد شده از سیال در یک مخزن جدار نازک مانند مخزن نگهداری سوخت یا بخار آب، نیروهایی به سطح مخزن وارد می‌شود. این نیروها باعث به وجود آمدن تنش در جداره فلزی مخزن می‌شوند. بدیهی است که تنش‌های به وجود آمده نباید از تنش مجاز فلز جداره مخزن بیش‌تر باشند. این تنش‌ها در دو جهت اصلی طولی و عرضی به وجود می‌آیند.

شکل ۲ــ۶ــ الف مقطع طولی و شکل ۲ــ۶ــ ب مقطع عرضی در یک مخزن استوانه‌ای یا لوله را نشان می‌دهند.



الف) تنش در مقطع طولی



ب) تنش در مقطع عرضی

شکل ۲ــ۶

در این فصل با روش محاسبه این تنش‌ها آشنا شده و کاربرد آن‌ها در طراحی یک مخزن جدید بیان خواهد شد.

فشار هیدرواستاتیکی

در درس فیزیک با فشار مایعات آشنا شده‌اید. در مخزن‌های ذخیره مایعات با سطح آزاد، اگر چگالی مایع و عمق نقطه‌ای از آن را بدانیم، می‌توانیم فشار موجود در آن نقطه را به‌دست آوریم. رابطه فشار مایعات به‌صورت زیر بیان می شود :

$$P=\rho gh$$

که در آن ρ چگالی مایع، g شتاب جاذبه زمین و h عمق نقطه‌ای است که فشار آن را محاسبه می‌کنیم.

بیشترین فشار در مخزن ذخیره مایعاتِ با سطحِ آزاد در عمیق‌ترین نقطه آن است.

۱ـ۱ـ۶ـ تنش در مقطع طولی : شکل ۲ـ۶ـ الف نمودار جسمِ آزاد مقطع طولی یک مخزن استوانه‌ای را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نیروهای داخلی در جداره مخزن در مقابل نیروی ناشی از فشار سیال در مخزن مقاومت می‌کنند. مقدار تنش به وجود آمده در مقطع طولی در مخزن با رابطه زیر محاسبه می‌شود :

$$\sigma_{\text{طولی}} = \frac{PDi}{۲t}$$ رابطه ۱ـ۶

که در آن :

$\sigma_{\text{طولی}}$: تنش کششی در مقطع طولی مخزن، با یکای MPa و ...

P : فشار سیال، با یکای MPa و ...

D_i : قطر داخلی مخزن، با یکای mm و ...

t : ضخامت جداره مخزن، با یکای mm و ...

این تنش در **لوله‌ها** و در **بخش استوانه‌ای** مخزن‌ها به‌وجود می‌آید.

۲ـ۱ـ۶ـ تنش در مقطع عرضی : شکل ۲ـ۶ـ ب نمودار جسمِ آزاد مقطع عرضی در مخزن را نشان می‌دهد. مقدار این تنش با رابطه زیر محاسبه می‌شود :

$$\sigma_{\text{عرضی}} = \frac{PDi}{۴t}$$ رابطه ۲ـ۶

که در آن :

$\sigma_{\text{عرضی}}$: تنش کششی در مقطع عرضی مخزن، با یکای MPa و ...

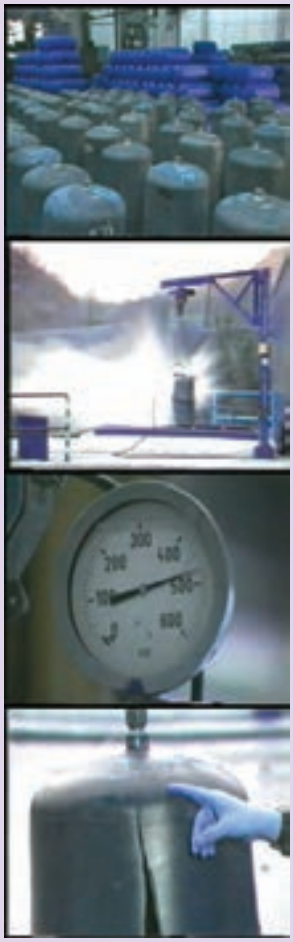
P : فشار سیال، با یکای MPa و ...

D_i : قطر داخلی مخزن، با یکای mm و ...

t : ضخامت جداره مخزن، با یکای mm و ...

این رابطه برای محاسبه تنش در **محل اتصال عدسی‌ها** در دو سر مخزن استوانه‌ای و هم‌چنین در **مخزن‌های کروی** استفاده می‌شود.

نکته : با مقایسه دو رابطه ۱ـ۶ و ۲ـ۶ ملاحظه می‌شود که در یک مخزن استوانه‌ای مقدار تنش در مقطع طولی دو برابر تنش در مقطع عرضی است. در شرایطی که در مخزن کروی تنش در هر دو مقطع با هم برابر و از رابطه ۲ـ۶ به‌دست می‌آید.



به‌دلیل اهمیت کیفیت ساخت مخزن‌های CNG این مخزن‌ها تحت تست مخرب فشار قرار می‌گیرند به شکل و جهت گسیختگی در مخزن دقت کنید.

به‌مخزن‌های کروی کمترین تنش وارد می‌شود. چرا؟

۲ــ۶ــ طراحی مخزن استوانه‌ای با کمک نمودار

در صنعت برای افزایش سرعت در طراحی‌های صنعتی، جداول و نمودارهایی تهیه شده و در کتاب‌هایی که "Hand Book" نام دارند، منتشر می‌شوند. این نمودارها در واقع نتایج محاسبات انجام شده، برای مقادیر اولیهٔ متفاوت هستند و استفاده کننده را از انجام محاسبه بی‌نیاز می‌کنند. امروزه با پیشرفت رایانه‌ها، رفته‌رفته نرم‌افزارهای محاسباتی جایگزین جداول و نمودارها می‌شوند. اما جداول و نمودارها به دلیل در دسترس بودن و سهولت در استفاده هم چنان جایگاه خود را حفظ کرده‌اند.

نمودار ۱ــ۶ برای طراحی مخزن استوانه‌ای جدار نازک فولادی (با تنش مجاز $\sigma_{\text{مجاز}} = ۱۴۰\ \text{MPa}$)، براساس رابطه ۱ــ۶ تهیه شده است. با استفاده از این نمودار می‌توان ضخامت ورق جداره (t) را با دانستن فشار سیال (P) و قطر مخزن موردنظر (D_i) به دست آورد.

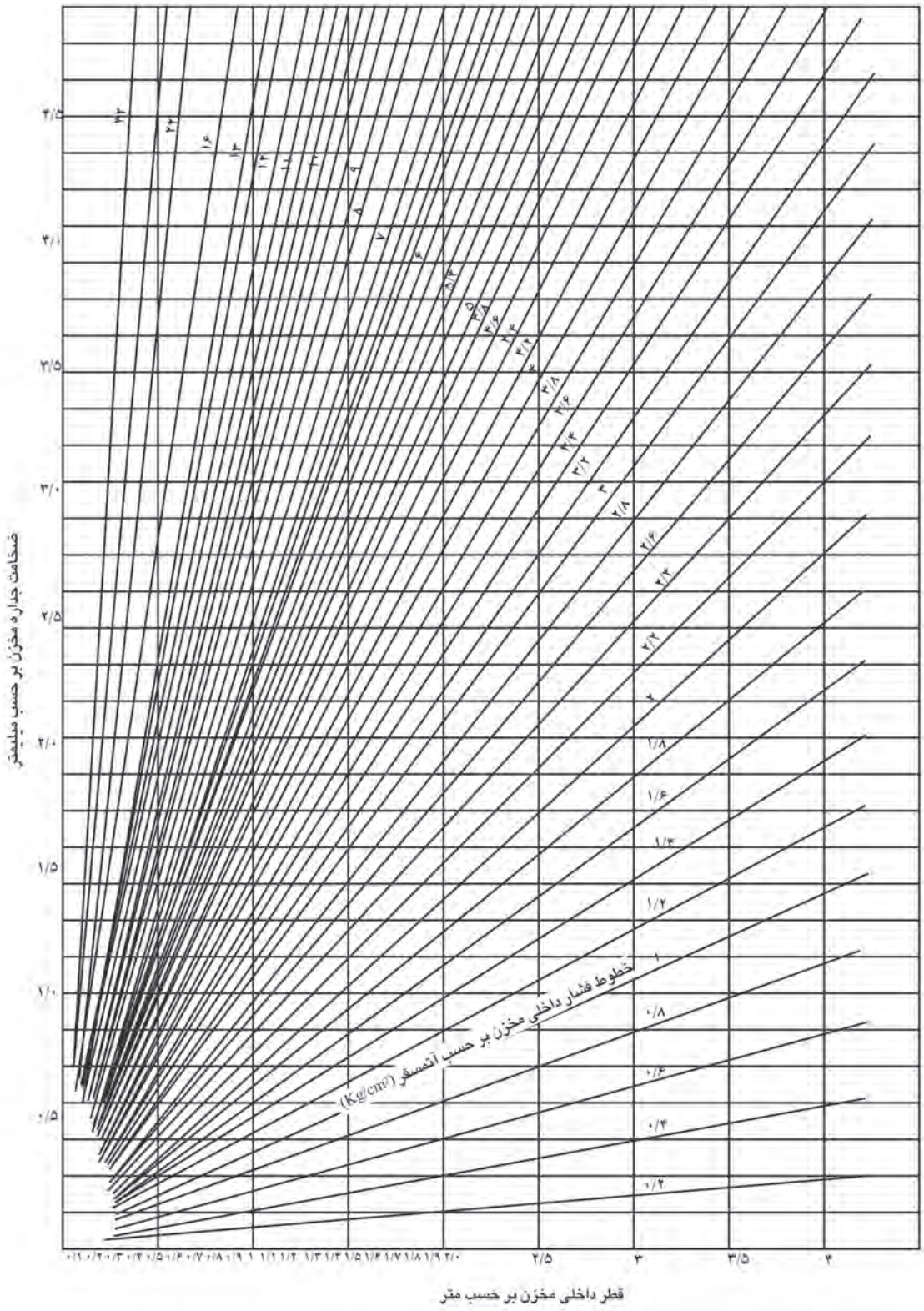
محور افقی در این نمودار قطر داخلی مخزن را با یکای متر نشان می‌دهد و محور عمودی ضخامت جداره را با یکای mm مشخص می‌کند. خط‌های شعاعی ترسیم شده نشان دهنده فشار داخلی مخزن با یکای اتمسفر (atm) هستند. با استفاده از رابطه ۳ــ۶ یکای فشار را تبدیل می‌کنند.

رابطه ۳ــ۶ $\quad ۱\text{MPa} = ۹.۸۷\ \text{atm}$

محمّد خوارزمی

محمّد بن موسی خوارزمی (سده‌های دوم و سوم هجری) بزرگ‌ترین عالم عصر خود در ریاضی، جغرافی، نجوم و تاریخ بوده است. یکی از مهمترین پیشرفت‌ها در ریاضیات با کارهای خوارزمی شروع شد. این پیشرفت، شروع جبر نام دارد. مهمترین کتاب خوارزمی کتاب حساب "الجبر و المقابله" است. کلمه‌ی Algebra از نام این کتاب گرفته شده است.

یک اتمسفر (atm) یا یک کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع ($\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^۲}$) معادل فشار ده متر ارتفاع آب است.


ضخامت جداره مخزن بر حسب میلیمتر
قطر داخلی مخزن بر حسب متر
خطوط فشار داخلی مخزن بر حسب آتمسفر (Kg/cm²)

نمودار ۱ــ۶

تمرین نمونه ۱ــ۶ : بیشترین فشار سیال در یک مخزن استوانه‌ای فولادی به قطر یک متر و ضخامت جداره ۴mm چقدر می‌تواند باشد تنش مجاز این فولاد را ۲۰۰MPa در نظر بگیرید.

راه حل : می‌دانیم که تنش در مقطع طولی مخزن‌های استوانه‌ای که می‌تواند منجر به خرابی آنها شود، با کمک رابطه ۱ــ۶ محاسبه می‌شود. پس داریم :

$$\sigma_{\text{طولی}} = \frac{PD}{۲t} \rightarrow (۲۰۰MPa) = \frac{P(۱۰۰۰mm)}{۲(۴mm)} \rightarrow P = ۱/۶MPa$$

بیشترین فشار مجاز سیال در این مخزن ۱/۶ MPa یا ۱۶ اتمسفر می باشد.

تمرین نمونه ۲ــ۶ : یک مخزن کروی به قطر ۳/۵ متر از جنس آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ برای نگه‌داری گاز نیتروژن تحت فشار ۶MPa استفاده می‌شود. ضخامت جداره ۲۰ میلی‌متر است. آیا مخزن از استحکام کافی برخوردار است؟ ضریب اطمینان را محاسبه کنید.

راه حل : می‌دانیم که در مخزن‌های کروی بیشترین تنش در جداره از رابطه ۲ــ۶ محاسبه می‌شود.

$$\sigma_{\text{عرضی}} = \frac{PD}{۴t} = \frac{(۶MPa)(۳۵۰۰mm)}{۴(۲۰mm)} = ۲۶۳MPa$$

با مراجعه به جدول مشخصات مواد (پیوست ب ــ۲) تنش تسلیم برای آلیاژ فوق را استخراج می‌کنیم :

$\sigma_y = ۳۲۵$ MPa

استحکام تسلیم : ۳۲۵ MPa $>$ تنش در جداره مخزن : ۲۶۳ MPa

ملاحظه می‌شود که تنش ایجاد شده در مخزن، کوچکتر از استحکام تسلیم فلز است. اکنون ضریب اطمینان را با رابطه ۹ــ۲ محاسبه می‌کنیم :

$$F.S. = \frac{\text{استحکام تسلیم}}{\text{تنش}} = \frac{۳۲۵}{۲۶۳} = ۱/۲۴$$

سؤال : ملاحظه می‌شود که ضریب اطمینان کوچک است. با چه تغییری در ضخامت جداره مخزن می‌توانیم ضریب اطمینان را حداقل تا مقدار ۲ افزایش دهیم؟

تمرین نمونه ۳ــ۶ : برای ساخت مخزن فولادی آب گرم کن به قطر ۵۰ سانتی‌متر با فشار ۱۰ اتمسفر از ورق فولادی با چه ضخامتی استفاده کنیم؟ برای حل از نمودار کمک بگیرید.

راه حل : با مراجعه به نمودار ۱ــ۶ بر روی محور افقی قطر ۰/۵ متر را انتخاب کرده و خط مربوط به آن را ادامه می‌دهیم تا خط فشار ۱۰ اتمسفر را قطع کند. از محل تلاقی، به صورت افقی حرکت کرده و ملاحظه می‌شود که مقدار ۱/۸ میلی‌متر برای ضخامت ورق به دست می‌آید.

تمرین : ضخامت ورق مخزن فوق را با استفاده از رابطه ۱ــ۶ محاسبه و پاسخ ها را با هم مقایسه کنید.

شکل ۳ــ۶ــ مخزن ۲۰۰ هزار لیتری مواد شیمیایی، پس از ساخت به محل نصب حمل می‌شود.

طراحی کنید

امروزه نرم‌افزارها با دقت زیاد و سرعت در محاسبه، جایگزین جدول‌ها و نمودارهای محاسباتی می‌شوند.

شما نیز می‌توانید یک برنامه ساده نرم‌افزاری محاسباتی بسازید.

با استفاده از یک فایل صفحه گسترده (درنرم‌افزار Excel) برنامه‌ای بسازید که با دریافت فشار سیال و قطر داخلی مخزن و انتخاب جنس مخزن، ضخامت جداره را محاسبه و اعلام کند.

تمرین‌های فصل ششم

۱ــ۶ــ فشار در یک مخزن استوانه‌ای ۵۰۰kPa است. قطر مخزن ۲/۵m و ضخامت جداره ۱۰mm است.

الف) بیشترین تنش ایجاد شده در مخزن چه قدر است؟

ب) چه ماده‌ای برای ساخت این مخزن قابل توصیه است؟

۲ــ۶ــ برای ساخت لوله‌های انتقال بخار به قطر ۴۵۰mm با فشار ۵۵۰kPa از ورق با چه ضخامتی استفاده شود. تنش در جداره لوله نباید از ۶۲MPa تجاوز کند.

۳ــ۶ــ در لوله‌ای فولادی با قطر داخلی ۲۵۰mm و ضخامت جداره ۱۰mm اگر تنش مجاز ۱۲۰MPa باشد، حداکثر فشار کاری را محاسبه کنید.

۴ــ۶ــ گاز نیتروژن در یک مخزن کروی با قطر ۴/۵m فشار ۸۶۰kPa دارد. اگر جنس مخزن را از آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ انتخاب کنیم چه ضخامت ورقی مناسب است؟

۵ــ۶ــ یک مخزن کروی به قطر ۱/۵ متر برای نگه داری گاز هلیوم با فشار ۷۰۰kPa موردنیاز است. اگر اتصالات جوشی در ساخت مخزن ۸۰٪ مقاومت ورق به کار رفته را داشته باشند، ضخامت ورق فولادی St37 مورد نیاز را تعیین کنید.

۶ــ۶ــ در لوله‌ای فولادی با تنش مجاز ۱۴۰MPa و قطر داخلی یک متر فشار معادل ۱۰/۵ اتمسفر اعمال شده است. ضخامت ورق مخزن را با هر دو روش محاسباتی و نمودار به‌دست آورید.

۷ــ۶ــ کپسول اکسیژن به قطر ۲۲۰mm و ضخامت ۸/۷۵ mm که در جوشکاری اکسی استیلن استفاده می‌شود در فشار ۲۶۰ bar معادل ۲۶ MPa مورد تست قرار گرفته است. مقادیر تنش‌های طولی و عرضی را در کپسول محاسبه کنید.

پاسخ تمرین‌ها

فصل اول

۱ـ۱

شکل ۱ـ۳۷

$F_x = \overleftarrow{۱۳۵}$ kgf

$F_y = \uparrow ۲۳۳/۸$ kgf

شکل ۱ـ۳۶

$F_x = \overleftarrow{۲۸/۳}$ kN

$F_y = \downarrow ۲۰/۵۷$ kN

شکل ۱ـ۳۵

$F_x = \overrightarrow{۲۸/۲۸}$ kN

$F_y = \downarrow ۲۸/۲۸$ kN

۱ـ۲

$F_x = \overrightarrow{۵۱/۹}$ N

$F_y = \uparrow ۳۰$ N

۱ـ۳

شکل ۱ـ۴۰

R = ۲۵/۱ N

θ = ۳۲/۳۴°

شکل ۱ـ۳۹

R = ۵۱/۲ N

θ = ۷۹/۴۵°

شکل ۱ـ۳۸

R = ۲۶۳/۴ kN

θ = ۷۱/۶۳°

۱ـ۴

R = ۲۳/۳ N

θ = ۳۰/۹°

۱ـ۵

R = ۱۷/۴۳ kN

θ = ۲۶°

۱ـ۶

R = ۱۰۶/۹ N

θ = ۶۵

۱ـ۷

m = ۸/۵ kg

۱ـ۹

$A_y = ۴۳/۳۳\ kN$ $B = ۶۶/۶۶\ kN$ $A_x = ۰$

۱ـ۱۰

$A_y = ۴۸/۳۵\ kN$ $B = ۷۱/۷\ kN$ $A_x = ۰$

۱ـ۱۱

$A_x = ۰$ $A_y = ۸۰\ kN$ $M_A = ۴۸\ N.m$

۱ـ۱۲

$d = ۸۰۰\ mm$

۱ـ۱۳

$B_x = ۰$ $B_y = ۲۴۲/۸\ N$ $A = ۱۱۵۴/۷\ N$

۱ـ۱۴

$F_{xA} = ۰$ $F_{yA} = ۱۰۰۰\ N$ $F_E = ۱۴۰۰\ N$

۱ـ۱۵

الف) $F_x = ۰$ $F_y = ۸۰۱/۶۱\ N$

ب) $F_B = ۱۳۵۶/۵۸\ N$

۱ـ۱۶

$F_A = \downarrow ۵۱/۹۶\ kN$

$F_{xB} = ۱۰۳/۹۲$

$F_{yB} = ۱۱۱/۹۶\ kN$

فصل دوم

۲ـ۱

$\sigma = ۱۵۰\ MPa$

۲ـ۲

$\sigma = ۴/۵۸\ MPa$

۲ـ۳

$F = ۱۸/۸۴\ kN$

۲ـ۴

$\sigma = ۴/۱۶\ MPa$

۲ـ۵

$d = ۱۱۱/۷۳ \simeq ۱۱۲ mm$

۲ـ۶

$\sigma = ۲۲۳/۹\ MPa$

$\tau = ۸۹/۵۷\ MPa$

۲ـ۷

$h = ۸\ mm$

۲ـ۸

$\Delta L = ۰/۳\ mm$

$\varepsilon = ۷/۵ \times ۱۰^{-۴}$

۲ـ۹

$F = ۶۶۵/۶۸\ kN$

۲ـ۱۰

$\sigma_۱ = ۰/۶۹۳\ MPa$ ، $\sigma_۲ = ۱/۳۸\ MPa$

۲ـ۱۱

$\sigma = ۲۴۰\ MPa$ $F = ۱۲\ kN$

۲ـ۱۲

St 52

$\sigma_{مجاز}$ = ۲۱۳ MPa

$\tau_{مجاز}$ = ۱۴۲ MPa

St 44

$\sigma_{مجاز}$ = ۱۶۵ MPa

$\tau_{مجاز}$ = ۱۱۰ MPa

۲ـ۱۳

۱۷/۵۵ kN

۲ـ۱۴

الف)

قطر خارجی = ۶۵/۹۱ mm

قطر داخلی = ۴۳/۹۴ mm

ب)

قطر خارجی = ۱۰۶/۵۶ mm

قطر داخلی = ۹۴/۵۶ mm

فصل سوم

۳ـ۱

الف) L = ۵۳/۵۹ mm

ب) F_W = ۱۰۰/۷kN

۳ـ۲

L = ۱۲۳/۵۸mm

۳ـ۳

الف) F = ۷۸/۵۸kN

ب) F = ۱۰۹/۵kN

۳ـ۴

F = ۱۴۶/۵۱kN

۳ـ۵

F = ۱۲۸/۹ kN

۳ـ۶

الف) ۳۱۵kN

ب) L = ۸۴/۴ ≃ ۸۴/۵mm

۳ـ۷

$W_۱ = ۱۲/۸ \simeq ۱۳mm$ $W_۲ = ۷/۶۵ \simeq ۸mm$

فصل چهارم

۴ـ۱

الف) $M = ۶۰\ N.m$

ب) $P = ۵۰۰N$

۴ـ۲

$\tau_{مجاز} = ۱۲۰\ MPa$

۴ـ۳

$\tau = ۶۶/۳۴MPa$

۴ـ۴

$t = ۳/۴۵mm$

۴ـ۵

$\sigma_C = ۴۷۷/۶MPa$

۴ـ۶

$\sigma = ۴۷/۳۶MPa$ ، $\tau = ۸۵/۹۸MPa$

۴ـ۷

$F.s = ۲/۹۷ \simeq ۳$ ۹ـ۸

۴ـ۸

الف) قطر پیچ = ۱۸mm ب) $h = ۳۶mm$ ج) $b = ۵۵/۸mm$

قطر سوراخ = ۱۹/۸mm

فصل پنجم

۵ـ۱

الف) F_p = ۶۱۳۶۵/۳ kgf

ب) F_p = ۳۱۴۵۶/۷kgf

۵ـ۲

۴۳۶۵۹N

۵ـ۳

رسم نمودار

فصل ششم

۶ـ۱

الف) $\sigma_{\text{طولی}}$ = ۶۲/۵ MPa

۶ـ۲

t = ۲mm

۶ـ۳

P = ۹/۶MPa

۶ـ۴

t = ۲ / ۹۷ ≃ ۳mm

۶ـ۵

t = ۱/۴mm

۶ـ۶

محاسباتی ۳/۷mm ، نمودار ۳/۶ ≃ ۳/۵

۶ـ۷

$\sigma_{\text{طولی}}$ = ۳۲۶/۸ MPa ، $\sigma_{\text{عرضی}}$ = ۱۶۳/۴ MPa

پیوست ها

فهرست پیوست‌ها :

پیوست الف

جدول الف ــ ۱ــ روابط ریاضی

جدول الف ــ ۲ــ توابع مثلثاتی

جدول الف ــ۳ــ محاسبه مساحت و حجم

پیوست ب

جدول ب ــ۱ــ مقادیر مهم مواد

جدول ب ــ۲ــ خواص مکانیکی مواد

جدول ب ــ۳ــ مشخصات نیم رخ‌ها (پروفیل‌ها)

پیوست پ

جدول پ ــ۱ــ ضریب تبدیل یکاها

جدول پ ــ۲ــ نشان‌های استفاده شده در کتاب

جدول الف ــ ۱ــ روابط ریاضی

روابط ریاضی		
محاسبات		
مثال جبری	مثال عددی	اصول
$\frac{5}{a}-\frac{3}{a}+\frac{7}{a}=\frac{5-3+7}{a}$ $=\frac{9}{a}$	$\frac{5}{8}+\frac{2}{8}-\frac{1}{8}=\frac{5+2-1}{8}$ $=\frac{6}{8}=\frac{3}{4}$	برای جمع و تفریق کسرهای هم مخرج صورت کسر را با هم جمع و یا از هم تفریق کرده و مخرج را بدون تغییر می نویسند.
$\frac{a}{b}+\frac{c}{d}=$ مخرج مشترک $=b\cdot d$ $=\frac{a\cdot d}{b\cdot d}+\frac{c\cdot b}{b\cdot d}$ $=\frac{a\cdot d+c\cdot b}{b\cdot d}$	$\frac{1}{2}+\frac{2}{3}-\frac{3}{4}=$ مخرج مشترک $=12$ $=\frac{1\cdot 6}{2\cdot 6}+\frac{2\cdot 4}{3\cdot 4}-\frac{3\cdot 3}{4\cdot 3}$ $=\frac{6}{12}+\frac{8}{12}-\frac{9}{12}=\frac{5}{12}$	برای جمع و تفریق کسرهای غیر هم مخرج باید ابتدا کوچکترین مخرج مشترک را تعیین کرد. کوچکترین مخرج مشترک عددی است که بر تمام مخرج کسرها قابل تقسیم باشد. صورت و مخرج هر کسر را در خارج قسمت مخرج مشترک بر مخرج کسر مربوطه باید ضرب کرد. سپس عمل جمع و تفریق کسر را انجام داد.
$\frac{a}{b}\cdot\frac{c}{d}=\frac{a\cdot c}{b\cdot d}$	$\frac{3}{5}\cdot\frac{2}{7}=\frac{3\cdot 2}{5\cdot 7}=\frac{6}{35}$	برای ضرب یک کسر در کسر دیگر باید صورتها را در هم و مخرجها را در هم ضرب کرد.
$\frac{a}{b}:\frac{c}{d}=\frac{\frac{a}{b}}{\frac{c}{d}}=\frac{a\cdot d}{b\cdot c}$	$\frac{3}{4}:\frac{3}{5}=\frac{\frac{3}{4}}{\frac{3}{5}}=\frac{3\cdot 5}{4\cdot 3}$ $=\frac{5}{4}=1\frac{1}{4}$	برای تقسیم یک کسر به کسر دیگر باید کسر اول را در معکوس کسر دوم ضرب کرد.
اصول علائم		
$a\cdot x=ax$ $(-a)\cdot(-x)=ax$	$2\cdot 5=10$ $(-2)\cdot(-5)=10$	هرگاه دو فاکتور علائم یکسان داشته باشند حاصل ضرب آنها مثبت است.
$a\cdot(-x)=-ax$ $(-a)\cdot x=-ax$	$3\cdot(-8)=-24$ $(-3)\cdot 8=-24$	هرگاه دو فاکتور علائم مخالف داشته باشند حاصل ضرب آنها منفی است.
$\frac{a}{b}=\frac{a}{b}$ $\frac{-a}{-b}=\frac{a}{b}$	$\frac{15}{3}=15:3=5$ $\frac{-15}{-3}=(-15):(-3)=5$	هرگاه مخرج و صورت یا مقسوم و مقسوم علیه علائم یکسان داشته باشند حاصل قسمت علامت مثبت دارد.
$\frac{a}{-b}=-\frac{a}{b}$ $\frac{-a}{b}=-\frac{a}{b}$	$\frac{15}{-3}=15:(-3)=-5$ $\frac{-15}{3}=(-15):3=-5$	هرگاه مخرج و صورت یا مقسوم و مقسوم علیه علامت مخالف داشته باشند حاصل قسمت علامت منفی دارد.
$4a\cdot b-c\cdot 3d$ $=4ab-3cd$	$8\cdot 4-18\cdot 3=32-54$ $=-22$ $\frac{16}{4}+\frac{20}{5}-\frac{18}{3}=4+4-6$ $=2$	عمل ضرب (. و :) باید قبل از عمل جمع (+ و −) انجام گیرد.
محاسبه پرانتز		
$a+(b-c)$ $=a+b-c$	$16+(9-5)$ $=16+9-5$ $=20$	پرانتزهایی را که قبل از آنها علامت جمع قرار دارد می توان حذف کرد. علائم اعداد بدون تغییر باقی می مانند.
$a-(b-c)$ $=a-b+c$	$16-(9-5)$ $=16-9+5$ $=12$	پرانتزهایی که قبل از آنها علامت منفی قرار دارد فقط وقتی می‌توان حذف کرد که علائم همه اعداد داخل پرانتز را تغییر داد.

جدول الف ـ ۱ـ روابط ریاضی ــ (ادامه)

روابط ریاضی		
محاسبه پرانتز		
مثال جبری	مثال عددی	اصول
$a \cdot (b + c)$ $= ab + ac$	$7 \cdot (4 + 5)$ $= 7 \cdot 4 + 7 \cdot 5 = 63$	عبارت پرانتز در یک فاکتور ضرب می شود، در این حالت هر عامل در فاکتورضرب می شود.
$(a+b) \cdot (c - d)$ $= ac - ad + bc - bd$	$(3 + 5) \cdot (10 - 7)$ $= 3 \cdot 10 + 3 \cdot (-7) + 5 \cdot 10 + 5 \cdot (-7)$ $= 30 - 21 + 50 - 35 = 24$	عبارت پرانتز در یک عبارت پرانتز دیگر ضرب می‌شود، در این حالت هر عامل یک پرانتز در عوامل پرانتز دیگر ضرب می شود.
$(a + b) : c = a : c + b : c$ $\frac{a - b}{b} = \frac{a}{b} - 1$	$(16 - 4) : 4$ $= 16 : 4 - 4 : 4$ $= 4 - 1 = 3$	عبارت پرانتز بر یک مقدار (عدد ، حروف ، عبارت پرانتز) تقسیم می شود در این حالت هرعامل پرانتز بر مقدار فوق تقسیم می گردد.
$\frac{a + b}{2} \cdot h = (a + b) \cdot \frac{h}{2}$	$\frac{3 + 4}{2} = (3 + 4) : 2$	خط تقسیم به صورت پرانتز عبارت صورت و مخرج را در بر می گیرد.
$a \cdot (3x - 5x) - b \cdot (12y - 2y)$ $= a \cdot (-2x) - b \cdot 10y$ $= -2ax - 10by$	$8 \cdot (3 - 2) + 4 \cdot (16 - 5)$ $= 8 \cdot 1 + 4 \cdot 11$ $= 8 + 44 = 52$	در محاسبات ضرب و جمع باید ابتدا محاسبات پرانتز انجام و سپس عمل جمع اجرا شود.
به توان رساندن		
$x^4 \cdot x^2 = x \cdot x \cdot x \cdot x \cdot x \cdot x$ $= x^6$ $x^4 \cdot x^2 = x^{(4+2)} = x^6$	$3^2 \cdot 3^3 = 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3$ $= 3^5$ $3^2 \cdot 3^3 = 3^{(2+3)} = 3^5$	توانهایی که با پایه یکسان در هم ضرب می شود، باید نماها را باهم جمع و پایه را ثابت نگه داشت .
$\frac{m^2}{m^3} = \frac{m \cdot m}{m \cdot m \cdot m} = \frac{1}{m} = m^{-1}$ $m^2 : m^3 = m^{(2-3)} = m^{-1}$	$\frac{4^3}{4^2} = \frac{4 \cdot 4 \cdot 4}{4 \cdot 4} = 4$ $4^3 : 4^2 = 4^{(3-2)} = 4^1 = 4$	توانهایی که با پایه یکسان بر هم تقسیم می شود باید نماها را از هم کسر کرده و پایه را ثابت نگه داشت.
$a \cdot 10^2 = a \cdot 100 = 100a$ $b \cdot 10^{-1} = b \cdot \frac{1}{10} = 0{,}1b$	$6 \cdot 10^3 = 6 \cdot 1000$ $= 6000$ $7 \cdot 10^{-2} = 7 \cdot \frac{1}{100} = 0{,}07$	اگر فاکتور در یک توان ضرب می شود باید ابتدا توان محاسبه شود. محاسبه توان قبل از عمل ضرب صورت می گیرد.
$(m + n)^0 = 1$	$\frac{10^4}{10^4} = 10^{(4-4)} = 10^0 = 1$	هر توان با نمای صفر برابر یک است .
تبدیلات ریشه گرفتن		
$\sqrt[3]{a \cdot b} = \sqrt[3]{a} \cdot \sqrt[3]{b}$	$\sqrt{9 \cdot 16} = \sqrt{144} = 12$ $\sqrt{9 \cdot 16} = \sqrt{9} \cdot \sqrt{16} = 3 \cdot 4 = 12$	هر گاه زیر ریشه یک حاصلضرب باشد می توان ریشه را از حاصل ضرب اعداد و یا ضرب حاصل ریشه ها به دست آورد.
$\sqrt[3]{a - b} = \sqrt[3]{(a - b)}$	$\sqrt{9 + 16} = \sqrt{25} = 5$ $\sqrt{5^2 - 4^2} = \sqrt{25 - 16} = \sqrt{9} = 3$	هرگاه زیر ریشه حاصل جمع و یا حاصل تفریق باشد باید فقط از حاصل آنها ریشه گرفت .
$\sqrt{a} = a^{\frac{1}{2}}$	$\sqrt[3]{27} = 27^{\frac{1}{3}} = 3^{3 \cdot \frac{1}{3}} = 3$	ریشه گرفتن را به صورت توان هم می توان نوشت.

جدول الف ــ ۱ــ روابط ریاضی ــ (ادامه)

روابط ریاضی

تغییر شکل معادله‌ها

مثال جبری	مثال عددی	اصول
$y-c=d$ $y-c+c=d+c$ $y=d+c$	$y-5=9$ $y-5+5=9+5$ $y=9+5=14$	با افزودن عدد یکسان به دو طرف معادله عدد مجهول درسمت راست ظاهر می شود.
$x+a=b$ $x+a-a=b-a$ $x=b-a$	$x+7=18$ $x+7-7=18-7$ $x=11$	باتفریق عدد یکسان ازدوطرف معادله عدد مجهول درسمت راست ظاهر می شود.
$a\cdot x=b$ $\frac{a\cdot x}{a}=\frac{b}{a}$ $x=\frac{b}{a}$	$6\cdot x=23$ $\frac{6\cdot x}{6}=\frac{23}{6}$ $x=\frac{23}{6}=3\frac{5}{6}$	با تقسیم دوطرف معادله بر عدد یکسان عدد مجهول معادله به دست می آید .
$\frac{y}{c}=d$ $\frac{y\cdot c}{c}=d\cdot c$ $y=d\cdot c$	$\frac{y}{3}=7$ $\frac{y\cdot 3}{3}=7\cdot 3$ $y=21$	با ضرب کردن دو طرف معادله در عدد یکسان عدد مجهول معادله به دست می آید.
$\sqrt{x}=a+b$ $(\sqrt{x})^2=(a+b)^2$ $x=a^2+2ab+b^2$	$\sqrt{x}=4$ $(\sqrt{x})^2=4^2$ $x=16$	با به توان رساندن دو طرف معادله عدد مجهول معادله به دست می آید.
$x^2=a+b$ $\sqrt{(x)^2}=\sqrt{a+b}$ $x=\pm\sqrt{a+b}$	$x^2=36$ $\sqrt{x^2}=\sqrt{36}$ $x=\pm 6$	باریشه گرفتن دو طرف معادله عدد مجهول معادله به دست می آید.

توانهای ده

مقادیر بزرگتر ازعدد یک با توان مثبت نشان داده می شود.

مقادیر کوچکتر از عدد یک، با توان منفی نشان داده می شود.

مقدار	0,001	0,01	0,1	1	10	100	1000	10 000	100 000	1000 000
توان ده	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^{0}	10^{1}	10^{2}	10^{3}	10^{4}	10^{5}	10^{6}

مثال : تبدیل اعداد به حاصل ضرب توان ده . $14638 = 1,4638 \cdot 10\,000 = 1,4638 \cdot 10^4$; $4300 = 4,3 \cdot 1000 = 4,3 \cdot 10^3$

$0,07 = \frac{7}{100} = 7 \cdot 10^{-2}$

محاسبه درصد

حاصل درصد

$$P_w = \frac{G_w \cdot P_s}{100\,\%}$$

مقدار درصد بیان می کند که چند درصد باید محاسبه شود (مقدار درصد P_s).

مقدار اصلی مقداری است که باید در صد آن محاسبه شود (مقدار اصلی G_W).

حاصل درصد مقداری است که از درصد مقدار اصلی به دست می آید (حاصل درصد P_W).

مثال : اتلاف به ?kg = (حاصل درصد) ; ماده خام 250 kg (مقدار اصلی)، اتلاف سوخت 2% (مقدار درصد)

$$P_w = \frac{G_w \cdot P_s}{100\,\%} = \frac{250\ \text{kg} \cdot 2\,\%}{100\,\%} = 5\ \text{kg}$$

محاسبه بهره

حاصل بهره

$$z = \frac{k \cdot p \cdot t}{100\%}$$

1 (1 a) سال بهره ≙ 12 (360 d) روز ≙ 360

1 ماه بهره ≙ 30

z حاصل بهره — k سرمایه

p مقدار بهره در سال — t زمان به سال

مثال : ? = حاصل درصد ; $6\frac{\%}{a}$ = مقدار بهره ; 2800,– DM = سرمایه ، ½ a = زمان

$$z = \frac{k \cdot p \cdot t}{100\%} = \frac{2800,-\ \text{DM} \cdot 6\frac{\%}{a} \cdot 0,5a}{100\%} = 84,-\ \text{DM}$$

جدول الف ــ۲ــ توابع مثلثاتی

جدول مثلثاتی

سینوس 0°...45° — درجه ⇓ — دقیقه ⇒

درجه	0′	10′	20′	30′	40′	50′	60′	
0	0,0000	0,0029	0,0058	0,0087	0,0116	0,0145	0,0175	89
1	0,0175	0,0204	0,0233	0,0262	0,0291	0,0320	0,0349	88
2	0,0349	0,0378	0,0407	0,0436	0,0465	0,0494	0,0523	87
3	0,0523	0,0552	0,0581	0,0610	0,0640	0,0669	0,0698	86
4	0,0698	0,0727	0,0756	0,0785	0,0814	0,0843	0,0872	85
5	0,0872	0,0901	0,0929	0,0958	0,0987	0,1016	0,1045	84
6	0,1045	0,1074	0,1103	0,1132	0,1161	0,1190	0,1219	83
7	0,1219	0,1248	0,1276	0,1305	0,1334	0,1363	0,1392	82
8	0,1392	0,1421	0,1449	0,1478	0,1507	0,1536	0,1564	81
9	0,1564	0,1593	0,1622	0,1650	0,1679	0,1708	0,1736	80
10	0,1736	0,1765	0,1794	0,1822	0,1851	0,1880	0,1908	79
11	0,1908	0,1937	0,1965	0,1994	0,2022	0,2051	0,2079	78
12	0,2079	0,2108	0,2136	0,2164	0,2193	0,2221	0,2250	77
13	0,2250	0,2278	0,2306	0,2334	0,2363	0,2391	0,2419	76
14	0,2419	0,2447	0,2476	0,2504	0,2532	0,2560	0,2588	75
15	0,2588	0,2616	0,2644	0,2672	0,2700	0,2728	0,2756	74
16	0,2756	0,2784	0,2812	0,2840	0,2868	0,2896	0,2924	73
17	0,2924	0,2952	0,2979	0,3007	0,3035	0,3062	0,3090	72
18	0,3090	0,3118	0,3145	0,3173	0,3201	0,3228	0,3256	71
19	0,3256	0,3283	0,3311	0,3338	0,3365	0,3393	0,3420	70
20	0,3420	0,3448	0,3475	0,3502	0,3529	0,3557	0,3584	69
21	0,3584	0,3611	0,3638	0,3665	0,3692	0,3719	0,3746	68
22	0,3746	0,3773	0,3800	0,3827	0,3854	0,3881	0,3907	67
23	0,3907	0,3934	0,3961	0,3987	0,4014	0,4041	0,4067	66
24	0,4067	0,4094	0,4120	0,4147	0,4173	0,4200	0,4226	65
25	0,4226	0,4253	0,4279	0,4305	0,4331	0,4358	0,4384	64
26	0,4384	0,4410	0,4436	0,4462	0,4488	0,4514	0,4540	63
27	0,4540	0,4566	0,4592	0,4617	0,4643	0,4669	0,4695	62
28	0,4695	0,4720	0,4746	0,4772	0,4797	0,4823	0,4848	61
29	0,4848	0,4874	0,4899	0,4924	0,4950	0,4975	0,5000	60
30	0,5000	0,5025	0,5050	0,5075	0,5100	0,5125	0,5150	59
31	0,5150	0,5175	0,5200	0,5225	0,5250	0,5275	0,5299	58
32	0,5299	0,5324	0,5348	0,5373	0,5398	0,5422	0,5446	57
33	0,5446	0,5471	0,5495	0,5519	0,5544	0,5568	0,5592	56
34	0,5592	0,5616	0,5640	0,5664	0,5688	0,5712	0,5736	55
35	0,5736	0,5760	0,5783	0,5807	0,5831	0,5854	0,5878	54
36	0,5878	0,5901	0,5925	0,5948	0,5972	0,5995	0,6018	53
37	0,6018	0,6041	0,6065	0,6088	0,6111	0,6134	0,6157	52
38	0,6157	0,6180	0,6202	0,6225	0,6248	0,6271	0,6293	51
39	0,6293	0,6316	0,6338	0,6361	0,6383	0,6406	0,6428	50
40	0,6428	0,6450	0,6472	0,6494	0,6517	0,6539	0,6561	49
41	0,6561	0,6583	0,6604	0,6626	0,6648	0,6670	0,6691	48
42	0,6691	0,6713	0,6734	0,6756	0,6777	0,6799	0,6820	47
43	0,6820	0,6841	0,6862	0,6884	0,6905	0,6926	0,6947	46
44	0,6947	0,6967	0,6988	0,7009	0,7030	0,7050	0,7071	45
	60′	50′	40′	30′	20′	10′	0′	

دقیقه ⇐ — درجه ⇑ — کسینوس 45°...90°

جدول الف ــ۲ــ توابع مثلثاتی ــ (ادامه)

جدول مثلثاتی

سینوس 45°...90°

درجه	0′	10′	20′	30′	40′	50′	60′	
45	0,707 1	0,709 2	0,711 2	0,713 3	0,715 3	0,717 3	0,719 3	44
46	0,719 3	0,721 4	0,723 4	0,725 4	0,727 4	0,729 4	0,731 4	43
47	0,731 4	0,733 3	0,735 3	0,737 3	0,739 2	0,741 2	0,743 1	42
48	0,743 1	0,745 1	0,747 0	0,749 0	0,750 9	0,752 8	0,754 7	41
49	0,754 7	0,756 6	0,758 5	0,760 4	0,762 3	0,764 2	0,766 0	40
50	0,766 0	0,767 9	0,769 8	0,771 6	0,773 5	0,775 3	0,777 1	39
51	0,777 1	0,779 0	0,780 8	0,782 6	0,784 4	0,786 2	0,788 0	38
52	0,788 0	0,789 8	0,791 6	0,793 4	0,795 1	0,796 9	0,798 6	37
53	0,798 6	0,800 4	0,802 1	0,803 9	0,805 6	0,807 3	0,809 0	36
54	0,809 0	0,810 7	0,812 4	0,814 1	0,815 8	0,817 5	0,819 2	35
55	0,819 2	0,820 8	0,822 5	0,824 1	0,825 8	0,827 4	0,829 0	34
56	0,829 0	0,830 7	0,832 3	0,833 9	0,835 5	0,837 1	0,838 7	33
57	0,838 7	0,840 3	0,841 8	0,843 4	0,845 0	0,846 5	0,848 0	32
58	0,848 0	0,849 6	0,851 1	0,852 6	0,854 2	0,855 7	0,857 2	31
59	0,857 2	0,858 7	0,860 1	0,861 6	0,863 1	0,864 6	0,866 0	30
60	0,866 0	0,867 5	0,868 9	0,870 4	0,871 8	0,873 2	0,874 6	29
61	0,874 6	0,876 0	0,877 4	0,878 8	0,880 2	0,881 6	0,882 9	28
62	0,882 9	0,884 3	0,885 7	0,887 0	0,888 4	0,889 7	0,891 0	27
63	0,891 0	0,892 3	0,893 6	0,894 9	0,896 2	0,897 5	0,898 8	26
64	0,898 8	0,900 1	0,901 3	0,902 6	0,903 8	0,905 1	0,906 3	25
65	0,906 3	0,907 5	0,908 8	0,910 0	0,911 2	0,912 4	0,913 5	24
66	0,913 5	0,914 7	0,915 9	0,917 1	0,918 2	0,919 4	0,920 5	23
67	0,920 5	0,921 6	0,922 8	0,923 9	0,925 0	0,926 1	0,927 2	22
68	0,927 2	0,928 3	0,929 3	0,930 4	0,931 5	0,932 5	0,933 6	21
69	0,933 6	0,934 6	0,935 6	0,936 7	0,937 7	0,938 7	0,939 7	20
70	0,939 7	0,940 7	0,941 7	0,942 6	0,943 6	0,944 6	0,945 5	19
71	0,945 5	0,946 5	0,947 4	0,948 3	0,949 2	0,950 2	0,951 1	18
72	0,951 1	0,952 0	0,952 8	0,953 7	0,954 6	0,955 5	0,956 3	17
73	0,956 3	0,957 2	0,958 0	0,958 8	0,959 6	0,960 5	0,961 3	16
74	0,961 3	0,962 1	0,962 8	0,963 6	0,964 4	0,965 2	0,965 9	15
75	0,965 9	0,966 7	0,967 4	0,968 1	0,968 9	0,969 6	0,970 3	14
76	0,970 3	0,971 0	0,971 7	0,972 4	0,973 0	0,973 7	0,974 4	13
77	0,974 4	0,975 0	0,975 7	0,976 3	0,976 9	0,977 5	0,978 1	12
78	0,978 1	0,978 7	0,979 3	0,979 9	0,980 5	0,981 1	0,981 6	11
79	0,981 6	0,982 2	0,982 7	0,983 3	0,983 8	0,984 3	0,984 8	10
80	0,984 8	0,985 3	0,985 8	0,986 3	0,986 8	0,987 2	0,987 7	9
81	0,987 7	0,988 1	0,988 6	0,989 0	0,989 4	0,989 9	0,990 3	8
82	0,990 3	0,990 7	0,991 1	0,991 4	0,991 8	0,992 2	0,992 5	7
83	0,992 5	0,992 9	0,993 2	0,993 6	0,993 9	0,994 2	0,994 5	6
84	0,994 5	0,994 8	0,995 1	0,995 4	0,995 7	0,995 9	0,996 2	5
85	0,996 2	0,996 4	0,996 7	0,996 9	0,997 1	0,997 4	0,997 6	4
86	0,997 6	0,997 8	0,998 0	0,998 1	0,998 3	0,998 5	0,998 6	3
87	0,998 6	0,998 8	0,998 9	0,999 0	0,999 2	0,999 3	0,999 4	2
88	0,999 4	0,999 5	0,999 6	0,999 7	0,999 7	0,999 8	0,999 85	1
89	0,999 85	0,999 89	0,999 93	0,999 96	0,999 98	0,999 99	1,000 0	0
	60′	50′	40′	30′	20′	10′	0′	درجه

کسینوس 0°...45°

جدول الف ــ۲ــ توابع مثلثاتی ــ (ادامه)

جدول مثلثاتی

کانوانت 0°...45°

درجه	0′	10′	20′	30′	40′	50′	60′	
0	0,000 0	0,002 9	0,005 8	0,008 7	0,011 6	0,014 5	0,017 5	89
1	0,017 5	0,020 4	0,023 3	0,026 2	0,029 1	0,032 0	0,034 9	88
2	0,034 9	0,037 8	0,040 7	0,043 7	0,046 6	0,049 5	0,052 4	87
3	0,052 4	0,055 3	0,058 2	0,061 2	0,064 1	0,067 0	0,069 9	86
4	0,069 9	0,072 9	0,075 8	0,078 7	0,081 6	0,084 6	0,087 5	85
5	0,087 5	0,090 4	0,093 4	0,096 3	0,099 2	0,102 2	0,105 1	84
6	0,105 1	0,108 0	0,111 0	0,113 9	0,116 9	0,119 8	0,122 8	83
7	0,122 8	0,125 7	0,128 7	0,131 7	0,134 6	0,137 6	0,140 5	82
8	0,140 5	0,143 5	0,146 5	0,149 5	0,152 4	0,155 4	0,158 4	81
9	0,158 4	0,161 4	0,164 4	0,167 3	0,170 3	0,173 3	0,176 3	80
10	0,176 3	0,179 3	0,182 3	0,185 3	0,188 3	0,191 4	0,194 4	79
11	0,194 4	0,197 4	0,200 4	0,203 5	0,206 5	0,209 5	0,212 6	78
12	0,212 6	0,215 6	0,218 6	0,221 7	0,224 7	0,227 8	0,230 9	77
13	0,230 9	0,233 9	0,237 0	0,240 1	0,243 2	0,246 2	0,249 3	76
14	0,249 3	0,252 4	0,255 5	0,258 6	0,261 7	0,264 8	0,267 9	57
15	0,267 9	0,271 1	0,274 2	0,277 3	0,280 5	0,283 6	0,286 7	74
16	0,286 7	0,289 9	0,293 1	0,296 2	0,299 4	0,302 6	0,305 7	73
17	0,305 7	0,308 9	0,312 1	0,315 3	0,318 5	0,321 7	0,324 9	72
18	0,324 9	0,328 1	0,331 4	0,334 6	0,337 8	0,341 1	0,344 3	71
19	0,344 3	0,347 6	0,350 8	0,354 1	0,357 4	0,360 7	0,364 0	70
20	0,364 0	0,367 3	0,370 6	0,373 9	0,377 2	0,380 5	0,383 9	69
21	0,383 9	0,387 2	0,390 6	0,393 9	0,397 3	0,400 6	0,404 0	68
22	0,404 0	0,407 4	0,410 8	0,414 2	0,417 6	0,421 0	0,424 5	67
23	0,424 5	0,427 9	0,431 4	0,434 8	0,438 3	0,441 7	0,445 2	66
24	0,445 2	0,448 7	0,452 2	0,455 7	0,459 2	0,462 8	0,466 3	65
25	0,466 3	0,469 9	0,473 4	0,477 0	0,480 6	0,484 1	0,487 7	64
26	0,487 7	0,491 3	0,495 0	0,498 6	0,502 2	0,505 9	0,509 5	63
27	0,509 5	0,513 2	0,516 9	0,520 6	0,524 3	0,528 0	0,531 7	62
28	0,531 7	0,535 4	0,539 2	0,543 0	0,546 7	0,550 5	0,554 3	61
29	0,554 3	0,558 1	0,561 9	0,565 8	0,569 6	0,573 5	0,577 4	60
30	0,577 4	0,581 2	0,585 1	0,589 0	0,593 0	0,596 9	0,600 9	59
31	0,600 9	0,604 8	0,608 8	0,612 8	0,616 8	0,620 8	0,624 9	58
32	0,624 9	0,628 9	0,633 0	0,637 1	0,641 2	0,645 3	0,649 4	57
33	0,649 4	0,653 6	0,657 7	0,661 9	0,666 1	0,670 3	0,674 5	56
34	0,674.5	0,678 7	0,683 0	0,687 3	0,691 6	0,695 9	0,700 2	55
35	0,700 2	0,704 6	0,708 9	0,713 3	0,717 7	0,722 1	0,726 5	54
36	0,726 5	0,731 0	0,735 5	0,740 0	0,744 5	0,749 0	0,753 6	53
37	0,753 6	0,758 1	0,762 7	0,767 3	0,772 0	0,776 6	0,781 3	52
38	0,781 3	0,786 0	0,790 7	0,795 4	0,800 2	0,805 0	0,809 8	51
39	0,809 8	0,814 6	0,819 5	0,824 3	0,829 2	0,834 2	0,839 1	50
40	0,839 1	0,844 1	0,849 1	0,854 1	0,859 1	0,864 2	0,869 3	49
41	0,869 3	0,874 4	0,879 6	0,884 7	0,889 9	0,895 2	0,900 4	48
42	0,900 4	0,905 7	0,911 0	0,916 3	0,921 7	0,927 1	0,932 5	47
43	0,932 5	0,938 0	0,943 5	0,949 0	0,954 5	0,960 1	0,965 7	46
44	0,965 7	0,971 3	0,977 0	0,982 7	0,988 4	0,994 2	1,000 0	45
	60′	50′	40′	30′	20′	10′	0′	درجه

کانوانت 45°...90°

جدول الف ــ۲ــ توابع مثلثاتی ــ (ادامه)

جدول مثلثاتی

تانژانت 45°...90°

درجه	دقیقه 0′	10′	20′	30′	40′	50′	60′	
45	1,000 0	1,005 8	1,011 7	1,017 6	1,0235	1,0295	1,035 5	44
46	1,035 5	1,041 6	1,047 7	1,053 8	1,059 9	1,066 1	1,072 4	43
47	1,072 4	1,078 6	1,085 0	1,091 3	1,097 7	1,104 1	1,110 6	42
48	1,110 6	1,117 1	1,123 7	1,130 3	1,136 9	1,143 6	1,150 4	41
49	1,150 4	1,157 1	1,164 0	1,170 8	1,177 8	1,184 7	1,191 8	40
50	1,191 8	1,198 8	1,205 9	1,213 1	1,220 3	1,227 6	1,234 9	39
51	1,234 9	1,242 3	1,249 7	1,257 2	1,264 7	1,272 3	1,279 9	38
52	1,279 9	1,287 6	1,295 4	1,303 2	1,311 1	1,319 0	1,327 0	37
53	1,327 0	1,335 1	1,343 2	1,351 4	1,359 7	1,368 0	1,376 4	36
54	1,376 4	1,384 8	1,393 4	1,401 9	1,410 6	1,419 3	1,428 1	35
55	1,428 1	1,437 0	1,446 0	1,455 0	1,464 1	1,473 3	1,482 6	34
56	1,482 6	1,491 9	1,501 3	1,510 8	1,520 4	1,530 1	1,539 9	33
57	1,539 9	1,549 7	1,559 7	1,569 7	1,579 8	1,590 0	1,600 3	32
58	1,600 3	1,610 7	1,621 3	1,631 8	1,642 6	1,653 4	1,664 3	31
59	1,664 3	1,675 3	1,686 4	1,697 7	1,709 0	1,720 5	1,732 1	30
60	1,732 1	1,743 8	1,755 6	1,767 5	1,779 6	1,791 7	1,804 1	29
61	1,804 1	1,816 5	1,829 1	1,841 8	1,854 6	1,867 6	1,880 7	28
62	1,880 7	1,894 0	1,907 4	1,921 0	1,934 7	1,948 6	1,962 6	27
63	1,962 6	1,976 8	1,991 2	2,005 7	2,020 4	2,035 3	2,050 3	26
64	2,050 3	2,065 5	2,080 9	2,096 5	2,112 3	2,128 3	2,144 5	25
65	2,144 5	2,160 9	2,177 5	2,194 3	2,211 3	2,228 6	2,246 0	24
66	2,246 0	2,263 7	2,281 7	2,299 8	2,318 3	2,336 9	2,355 9	23
67	2,355 9	2,375 0	2,394 5	2,414 2	2,434 2	2,454 5	2,475 1	22
68	2,475 1	2,496 0	2,517 2	2,538 7	2,560 5	2,582 6	2,605 1	21
69	2,605 1	2,627 9	2,651 1	2,674 6	2,698 5	2,722 8	2,747 5	20
70	2,747 5	2,772 5	2,798 0	2,823 9	2,850 2	2,877 0	2,904 2	19
71	2,904 2	2,931 9	2,960 0	2,988 7	3,017 8	3,047 5	3,077 7	18
72	3,077 7	3,108 4	3,139 7	3,171 6	3,204 1	3,237 1	3,270 9	17
73	3,270 9	3,305 2	3,340 2	3,375 9	3,412 4	3,449 5	3,487 4	16
74	3,487 4	3,526 1	3,565 6	3,605 9	3,647 0	3,689 1	3,732 1	15
75	3,732 1	3,776 0	3,820 8	3,866 7	3,913 6	3,961 7	4,010 8	14
76	4,010 8	4,061 1	4,112 6	4,165 3	4,219 3	4,274 7	4,331 5	13
77	4,331 5	4,389 7	4,449 4	4,510 7	4,573 6	4,638 3	4,704 6	12
78	4,704 6	4,772 9	4,843 0	4,915 2	4,989 4	5,065 8	5,144 6	11
79	5,144 6	5,225 7	5,309 3	5,395 5	5,484 5	5,576 4	5,671 3	10
80	5,671 3	5,769 4	5,870 8	5,875 8	6,084 4	6,197 0	6,313 8	9
81	6,313 8	6,434 8	6,560 5	6,691 2	6,826 9	6,968 2	7,115 4	8
82	7,115 4	7,268 7	7,428 7	7,595 8	7,770 4	7,953 0	8,144 4	7
83	8,144 4	8,345 0	8,555 6	8,776 9	9,009 8	9,255 3	9,514 4	6
84	9,514 4	9,788 2	10,078 0	10,385 4	10,711 9	11,059 4	11,430 1	5
85	11,430 1	11,826 2	12,250 5	12,706 2	13,196 9	13,726 7	14,300 7	4
86	14,300 7	14,924 4	15,604 8	16,349 9	17,169 3	18,075 0	19,081 1	3
87	19,081 1	20,205 6	21,470 4	22,903 8	24,541 8	26,431 6	28,636 3	2
88	28,636 3	31,241 6	34,367 8	38,188 5	42,964 1	49,103 9	57,290 0	1
89	57,290 0	68,750 1	85,939 8	114,588 7	171,885 4	343,773 7	∞	0
	60′	50′	40′	30′	20′	10′	0′	درجه

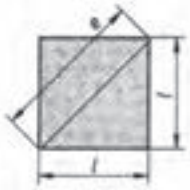
دقیقه

کتانژانت 0°...45°

جدول الف ــ۳ــ محاسبه مساحت و حجم

مساحت

مربع



A مساحت — l محیط — e قطر

$e = \sqrt{2} \cdot l$

$A = l^2$

مثال: $l = 14\ mm;\ A = ?;\ e = ?$

حل: $A = l^2 = (14\ mm)^2 = 196\ mm^2$

$e = \sqrt{2} \cdot l = \sqrt{2} \cdot 14\ mm = 19{,}8\ mm$

لوزی

A مساحت — l طول ضلع — b ارتفاع — U محیط

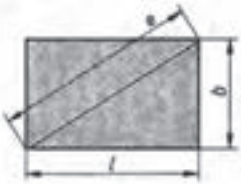
$A = l \cdot b$

مثال: $l = 9\ mm;\ b = 8{,}5\ mm;\ A = ?;\ U = ?$

حل: $A = l \cdot b = 9\ mm \cdot 8{,}5\ mm = 76{,}5\ mm$

$U = 4 \cdot l = 4 \cdot 9\ mm = 36\ mm$

مستطیل



A مساحت — l طول — b عرض — e قطر — U محیط

$e = \sqrt{l^2 + b^2}$

$A = l \cdot b$

مثال: $l = 12\ mm;\ b = 11\ mm;\ A = ?;\ e = ?$

حل: $A = l \cdot b = 12\ mm \cdot 11\ mm = 132\ mm^2$

$e = \sqrt{l^2 + b^2} = \sqrt{(12\ mm)^2 + (11\ mm)^2} =$

$= \sqrt{265\ mm^2} = 16{,}28\ mm$

متوازی الاضلاع

A مساحت — l_1 طول ضلع بزرگ — b ارتفاع — l_2 طول ضلع کوچک — U محیط

$A = l \cdot b$

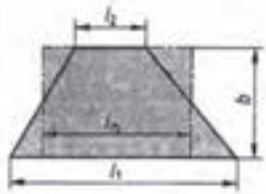
مثال: $l_1 = 36\ mm;\ b = 15\ mm;\ l_2 = 18\ mm;\ A = ?;$

$U = ?$

حل: $A = l_1 \cdot b = 36\ mm \cdot 15\ mm = 540\ mm^2$

$U = 2 \cdot (l_1 + l_2) = 2\ (36\ mm + 15\ mm) = 102\ mm$

ذوزنقه



A مساحت — l_1 طول قاعده بزرگ — l_2 طول قاعده کوچک — l_m طول متوسط — b ارتفاع

$l_m = \frac{l_1 + l_2}{2}$

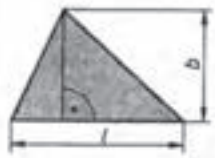
$A = \frac{l_1 + l_2}{2} \cdot b$

مثال: $l_1 = 23\ mm;\ l_2 = 20\ mm;\ b = 17\ mm;\ A = ?$

حل: $A = \frac{l_1 + l_2}{2} \cdot b = \frac{23\ mm + 20\ mm}{2} \cdot 17\ mm$

$= 365{,}5\ mm^2$

مثلث



A مساحت — l قاعده — b ارتفاع

$A = \frac{l \cdot b}{2}$

مثال: $l = 62\ mm;\ b = 29\ mm;\ A = ?$

حل: $A = \frac{l \cdot b}{2} = \frac{62\ mm \cdot 29\ mm}{2} = 899\ mm^2$

جدول الف ــ۳ــ محاسبه مساحت و حجم ــ (ادامه)

مساحت

دایره

A مساحت — U محیط

d قطر

$U = \pi \cdot d$

$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$

مثال : $d = 60\ mm;\ A = ?;\ U = ?$

$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (60\ mm)^2}{4} = 2\,827\ mm^2$

$U = \pi \cdot d = \pi \cdot 60\ mm = 188{,}5\ mm$

قطاع دایره

A مساحت — l طول وتر

d قطر — r شعاع

l_B طول قوس — α زاویه مرکزی

$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\alpha}{360^\circ}$

$A = \frac{l_B \cdot r}{2}$

$l = 2 \cdot r \cdot \sin\frac{\alpha}{2}$

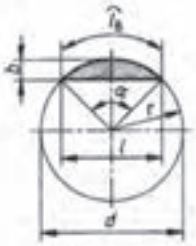
$l_B = \frac{\pi \cdot r \cdot \alpha}{180^\circ}$

مثال : $d = 48\ mm; \alpha = 110^\circ; l_B = ?; A = ?$

$l_B = \frac{\pi \cdot r \cdot \alpha}{180} = \frac{\pi \cdot 24\ mm \cdot 110^\circ}{180^\circ} = 46{,}1\ mm$

$A = \frac{l_B \cdot r}{2} = \frac{46{,}1\ mm \cdot 24\ mm}{2} = 553\ mm^2$

برش دایره



A مساحت — b عرض

d قطر — r شعاع

l_B طول قوس — α زاویه مرکزی

l طول وتر

$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\alpha}{360^\circ} \cdot \frac{l \cdot (r - b)}{2}$

$A = \frac{l_B \cdot r - l \cdot (r - b)}{2}$

مثال: $b = 15{,}1mm;\ l = 52\ mm$

$l = 62{,}83\ mm;\ d = 60\ mm;\ A = ?$

$l = 2 \cdot r \cdot \sin\frac{\alpha}{2}$;

$l = 2 \cdot \sqrt{b \cdot (2 \cdot r - b)}$

$b = \frac{l}{2} \cdot \tan\frac{\alpha}{4}$; $b = r - \sqrt{r^2 - \frac{l^2}{4}}$

$l_B = \frac{\pi \cdot r \cdot \alpha}{180^\circ}$; $r = \frac{b}{l} + \frac{l^2}{8b}$

$A = \frac{l_B \cdot r - l \cdot (r - b)}{2}$

$= \frac{(62{,}83 \cdot 30)\ mm^2 - 52 \cdot (30 - 15{,}1)\ mm^2}{2} = 555{,}1\ mm^2$

حلقه دایروی

A مساحت — d_m قطر متوسط

D قطر — b عرض

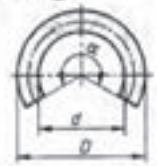
$A = \pi \cdot d_m \cdot b$

$A = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2)$

مثال : $A = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2)$

$= \frac{\pi}{4} \cdot (160^2\ mm^2 - 125^2\ mm^2) = 7834\ mm^2$

قطاع حلقوی

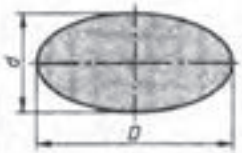


A مساحت — α زاویه مرکزی

D قطر

$A = \frac{\pi \cdot \alpha}{4 \cdot 360^\circ} \cdot (D^2 - d^2)$

بیضی



A مساحت — d محور کوچک

D محور بزرگ — U محیط

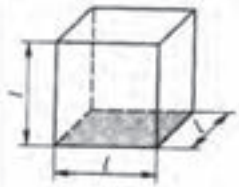
$U = \frac{\pi}{2} \cdot (D + d)$

$A = \frac{\pi \cdot D \cdot d}{4}$

جدول الف ــ۳ــ محاسبه مساحت و حجم ــ (ادامه)

حجم

مکعب مربع



V حجم — A_o مساحت — l ضلع مکعب مربع

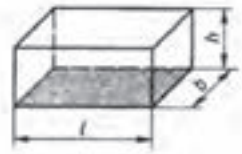
$A_o = 6 \cdot l^2$

$V = l^3$

مثال: $l = 20\ mm\ ;\ V = ?$

حل: $V = l^3 = (20\ mm)^3 = 8\,000\ mm^3$

مکعب مستطیل



V حجم — A_o مساحت — l طول قاعده — h ارتفاع — b عرض قاعده

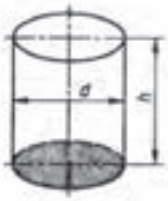
$A_o = 2 \cdot (l \cdot b + l \cdot h + b \cdot h)$

$V = l \cdot b \cdot h$

مثال: $l = 6\ cm\ ;\ b = 3\ cm\ ;\ h = 2\ cm\ ;\ V = ?$

حل: $V = l \cdot b \cdot h = 6\ cm \cdot 3\ cm \cdot 2\ cm = 36\ cm^3$

استوانه



V حجم — A_o مساحت — A_M مساحت جانبی — d قطر — h ارتفاع

$A_o = \pi \cdot d \cdot h + 2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}$

$A_M = \pi \cdot d \cdot h$

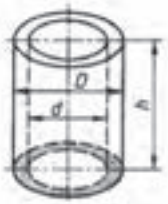
$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h$

مثال: $d = 14\ mm;\ h = 25\ mm;\ V = ?$

حل: $V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h = \frac{\pi \cdot (14\ mm)^2}{4} \cdot 25\ mm$

$= 3\,848\ mm^3$

استوانه خالی



V حجم — A_o مساحت — D, d قطر — h ارتفاع

$A_o = \pi \cdot (D + d) \cdot \left[\frac{1}{2}(D - d) + h\right]$

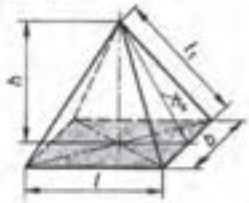
$V = \frac{\pi \cdot h}{4} \cdot (D^2 - d^2)$

مثال: $D = 42\ mm;\ d = 20\ mm;\ h = 80\ mm;\ V = ?$

حل: $V = \frac{\pi \cdot h}{4} \cdot (D^2 - d^2)$

$= \frac{\pi \cdot 80\ mm}{4} \cdot (42^2 mm^2 - 20^2 mm^2) = 85\,703\ mm^3$

هرم منتظم



V حجم — h ارتفاع — h_s ارتفاع وجه — l طول قاعده — l_1 طول پال — b عرض قاعده

$l_1 = \sqrt{h_s^2 + \frac{b^2}{4}}\ ;\ h_s = \sqrt{h^2 + \frac{l^2}{4}}$

$V = \frac{l \cdot b \cdot h}{3}$

مثال: $l = 16mm;\ b = 21\ mm;\ h = 45\ mm;\ V = ?$

حل: $V = \frac{l \cdot b \cdot h}{3} = \frac{16\ mm \cdot 21\ mm \cdot 45\ mm}{3}$

$= 5040\ mm^3$

مخروط

V حجم — A_M مساحت جانبی — h قطر — h ارتفاع — h_s طول پال

$A_M = \frac{\pi \cdot d \cdot h_s}{2}\ ;\ h_s = \sqrt{\frac{d^2}{4} + h^2}$

$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{h}{3}$

مثال: $d = 52\ mm;\ h = 110\ mm;\ V = ?$

حل: $V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{h}{3}$

$= \frac{\pi \cdot (52\ mm)^2}{4} \cdot \frac{110\ mm}{3} = 77870\ mm^3$

جدول ب ــ ۱ــ مقادیر مهم مواد

مقادیر مهم مواد								
جامد (ادامه)								
مواد	جرم مخصوص ρ kg / dm³	دمای ذوب در 1,013 bar ϑ °C	دمای جوش در 1,013 bar ϑ °C	گرمای ویژه ذوب در 1,013 bar q kJ / kg	رسانایی ویژه گرما در 20°C λ W/m · K	ظرفیت گرمای ویژه میانگین 0...100°C c kJ / kg · K	مقاومت مخصوص در 20°C ρ_{20} Ω · mm² /m	ضریب انبساط طولی درین 0...100 °C α_l 1/°C 1/K
آلیاژ CuZn	8,4...8,7	900...1000	2300	167	105	0,39	0,05...0,07	0,000 0185
یخ	0,92	0	100	332	2,3	2,09	–	0,000 051
آهن ، خالص (Fe)	7,87	1536	3070	276	81	0,47	0,13	0,000 012
اکسید آهن (زنگ)	5,1	1570	–	–	0,58 (پودر)	0,67	–	–
گریس	0,92...0,94	30...175	≈ 300	–	0,21	–	–	–
گچ	2,3	1200	–	–	0,45	1,09	–	–
شیشه (شیشه کوارتز)	2,4...2,7	≈ 700	–	–	0,81	0,83	10^{18}	0,000 000 5
طلا (Au)	19,3	1064	2707	67	310	0,13	0,022	0,000 014 2
گرافیت (C)	2,24	≈ 3800	≈ 4200	–	168	0,71	–	0,000 007 8
چدن	7,25	1150...1200	2500	125	58	0,50	0,6...1,6	0,000 010 5
فلزات سخت (K20)	14,8	> 2000	≈ 4000	–	81,4	0,80	–	0,000 06
چوب (در هوا خشک شده)	0,20...0,72	–	–	–	0,06...0,17	2,1...2,9	–	0,000 04 (2
ایریدیم (Ir)	22,4	2443	> 4350	135	59	0,13	0,053	0,000 006 5
ید (I)	5,0	113,6	183	62	0,44	0,23	–	–
کربن (C)	3,5	3800	–	–	–	0,52	–	0,000 001 18
کک	1,6...1,9	–	–	–	0,18	0,83	–	–
کنستانتان (آلیاژ مس نیکل)	8,89	1260	≈ 2400	–	23	0,41	0,49	0,000 0152
چوب پنبه	0,1...0,3	–	–	–	0,04...0,06	1,7...2,1	–	–
کوروندم (Al_2O_3)	3,9...4,0	2050	2700	–	12...23	0,96	–	0,000 006 5
مس (Cu)	8,96	1083	≈ 2595	213	384	0,39	0,0179	0,000 017
منیزیم (Mg)	1,74	650	1120	195	172	1,04	0,044	0,000 026
آلیاژ - منیزیم	≈ 1,8	≈ 630	1500	–	46...139	–	–	0,000 024 5
منگنز (Mn)	7,43	1244	2095	251	21	0,48	0,39	0,000 023
مولیبدن (Mo)	10,22	2620	4800	287	145	0,26	0,054	0,000 005 2
سدیم (Na)	0,97	97,8	890	113	126	1,3	0,04	0,000 071
نیکل (Ni)	8,91	1455	2730	306	59	0,45	0,095	0,000 13
نیوبیم (Nb)	8,55	2468	≈ 4800	288	53	0,273	0,217	0,000 007 1
فسفر ، زرد (P)	1,82	44	280	21	–	0,80	–	–
پلاتین (Pt)	21,5	1769	4300	113	70	0,13	0,098	0,000 009
پلی استیرول	1,05	–	–	–	0,17	1,3	10^{10}	0,000 07
سنگ چینی	2,3 ... 2,5	≈ 1600	–	–	1,6 (1	1,2 (1	10^{12}	0,000 004
کوارتز (SiO_2)	2,1 ... 2,5	1480	2230	–	9,9	0,8	–	0,000 008
سنگ چخماق	0,06...0,25	–	–	–	0,04...0,06	–	–	–
گوگرد (S)	2,07	113	344,6	49	0,2	0,70	–	–
سلنیم ، قرمز (Se)	4,4	220	688	83	0,2	0,33	–	–
نقره (Ag)	10,5	961,5	2180	105	407	0,23	0,015	0,000 019 7
سیلیسیم (Si)	2,33	1423	2355	1658	83	0,75	$2,3 \cdot 10^{9}$	0,000 004 2
کاربیدسیلیسیم (SiC)	2,4	تجزیه می شود)	در 3000 °C	(C و Si	9 ⊙	1,05 ⊙	–	–
فولاد ، غیر آلیاژی	7,85	1460	2500	205	48...58	0,49	0,14...0,18	0,000 011 5
X 12 CrNi 18 8	7,9	1450	–	–	14	0,51	0,7	0,000 016
ذغال سنگ	1,35	–	–	–	0,24	1,02	–	–
تانتالیم (Ta)	16,6	2996	5400	172	54	0,14	0,124	0,000 006 5
تیتانیم (Ti)	4,5	1670	3280	88	15,5	0,47	0,08	00,000 008 2
اورانیم (U)	19,1	1133	≈ 3800	356	28	0,12	–	–
وانادیوم (V)	6,12	1890	≈ 3380	343	31,4	0,50	0,2	–
تنگستن (W)	19,27	3390	5500	54	130	0,13	0,055	0,000 004 5
روی (Zn)	7,13	419,5	907	101	113	0,4	0,06	0,000 029
قلع (Sn)	7,29	231,9	2687	59	65,7	0,24	0,114	0,000 023

⊙ در دمای 800 °C ⊙ عمود بر الیاف ⊙ بالای 1000 °C

جدول ب ــ۲ــ خواص مکانیکی مواد ــ فلزات[1]

مواد	چگالی kg/m³	استحکام نهایی			استحکام تسلیم		مدول کشسانی GPa	مدول صلابت GPa	ضریب انبساط گرمایی $10^{-6}/^{o}C$	شکل پذیری درصد ازدیاد طول در mm ۵۰
		کشش MPa	فشار[2] MPa	برش MPa	کشش MPa	برش MPa				
فولاد										
ساختمانی St37	۷۸۶۰	۳۵۵			۲۳۴	۱۳۵	۲۰۰	۷۷/۲	۱۱/۷	۲۱
آلیاژ St44	۷۸۶۰	۴۷۵			۲۷۵		۲۰۰	۷۷/۲	۱۱/۷	۲۱
آلیاژ St50	۷۸۶۰	۵۴۰			۲۹۵		۲۰۰	۷۷/۲	۱۱/۷	۱۷
آلیاژ St52	۷۸۶۰	۵۶۰			۳۵۵		۲۰۰	۷۷/۲	۱۱/۷	۲۱
آلیاژ St60	۷۸۶۰	۶۴۰			۳۲۵		۲۰۰	۷۷/۲	۱۱/۷	۲۱
آلیاژ St70	۷۸۶۰	۷۵۰			۳۶۵		۲۰۰	۷۷/۲	۱۱/۷	۱۸
فولاد زنگ نزن :										
نورد ــ سرد	۷۹۲۰	۸۶۰			۵۲۰		۱۹۰	۷۵	۱۷/۳	۱۲
نرم شده	۷۹۲۰	۶۵۵			۲۶۰		۱۹۰	۷۵	۱۷/۳	۵۰
فولاد تقویت شده :										
استحکام متوسط	۷۸۶۰	۴۸۰			۲۷۵		۲۰۰	۷۷	۱۱/۷	
استحکام بالا	۷۸۶۰	۶۲۰			۴۱۵		۲۰۰	۷۷	۱۱/۷	
چدن :										
چدن خاکستری	۷۲۰۰	۱۷۰	۶۵۵	۲۴۰			۶۹	۲۸	۱۲/۱	۰/۵
چدن چکش خوار	۷۳۰۰	۳۴۵	۶۲۰	۳۳۰	۲۳۰		۱۶۵	۶۵	۱۲/۱	۱۰
آلومینیوم :										
آلیاژ 1100–H14										
(99٪ ۹۹ Al)	۲۷۱۰	۱۱۰		۷۰	۹۵	۵۵	۷۰	۲۶	۲۳/۶	۹
آلیاژ 2014–T6	۲۸۰۰	۴۵۵		۲۷۵	۴۰۰	۲۳۰	۷۵	۲۷	۲۳/۰	۱۳
آلیاژ 2024–T4	۲۸۰۰	۴۷۰		۲۸۰	۳۲۵		۷۳		۲۳/۲	۱۹
آلیاژ 5456–H116	۲۶۳۰	۳۱۵		۱۸۵	۲۳۰	۱۳۰	۷۲		۲۳/۹	۱۶
آلیاژ 6061–T6	۲۷۱۰	۲۶۰		۱۶۵	۲۴۰	۱۴۰	۷۰	۲۶	۲۳/۶	۱۷
آلیاژ 7075–T6	۲۸۰۰	۵۷۰		۳۳۰	۵۰۰		۷۲	۲۸	۲۳/۶	۱۱
مس :										
مس (Cu 99/9٪)										
نرم شده	۸۹۱۰	۲۲۰		۱۵۰	۷۰		۱۲۰	۴۴	۱۶/۹	۴۵
سخت کشیده	۸۹۱۰	۳۹۰		۲۰۰	۲۶۵		۱۲۰	۴۴	۱۶/۹	۴
برنج زرد (Zn۳۵٪,Cu ۶۵٪)										
نورد ــ سرد	۸۴۷۰	۵۱۰		۳۰۰	۴۱۰	۲۵۰	۱۰۵	۳۹	۲۰/۹	۸
نرم شده	۸۴۷۰	۳۲۰		۲۲۰	۱۰۰	۶۰	۱۰۵	۳۹	۲۰/۹	۶۵
برنج قرمز (Zn۱۵٪,Cu ۸۵٪)										
نورد سرد	۸۷۴۰	۵۸۵		۳۲۰	۴۳۵		۱۲۰	۴۴	۱۸/۷	۳
نرم شده	۸۷۴۰	۲۷۰		۲۱۰	۷۰		۱۲۰	۴۴	۱۸/۷	۴۸
تیتانیوم	۴۷۳۰	۹۰۰			۸۳۰		۱۱۵		۹/۵	۱۰

جدول ب ــ۲ــ خواص مکانیکی مواد (ادامه) ــ غیر فلزات

مواد	چگالی kg/m³	استحکام نهایی			استحکام تسلیم [۳]		مدول کشسانی GPa	مدول صلابت GPa	ضریب انبساط گرمایی 10^{-6} °C	درصد ازدیاد طول در ۵۰ mm
		کشش MPa	فشار[۲] MPa	برش MPa	کشش MPa	برش MPa				
الوار[۳] چوبی، خشک شده										
صنوبر	۴۱۵	۶۰	۳۹	۷/۶			۱۰	۰/۵	۳/۰تا۴/۵	
گردو	۷۲۰		۶۳	۱۶/۵			۱۵			
کاج	۴۱۵	۵۵	۳۶	۷/۶			۹			
بتون										
استحکام متوسط	۲۳۲۰		۲۸				۲۵		۹/۹	
پلاستیک										
نایلن،نوع۶/۶	۱۱۴۰	۷۵	۹۵		۴۵		۲/۸		۱۴۴	۵۰
پلی استر PBT (پلاستیک نرم)	۱۳۴۰	۵۵	۷۵		۵۵		۲/۴		۱۳۵	۱۵۰
وینیل ، PVC سخت	۱۴۴۰	۴۰	۷۰		۴۵		۳/۱		۱۳۵	۴۰
لاستیک	۹۱۰	۱۵							۱۶۲	۶۰۰
گرانیت(مقادیر متوسط)	۲۷۷۰	۲۰	۲۴۰	۳۵			۷۰	۴	۷/۲	
شیشه،۹۸٪ سیلیکا	۲۱۹۰		۵۰				۶۵	۴/۱	۸۰	

۱. خواص فلزها در نتیجه تغییرات فشار،عملیات گرمایی و مکانیکی بسیار تغییر می کند.

۲. در فلزهای شکل پذیر استحکام در فشار وکشش برابر فرض می شود.

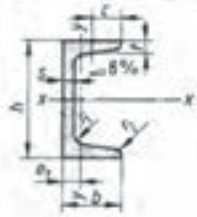
۳. خواص الوارهای چوبی با توجه به بارگذاری به موازات رگه های چوب در نظر گرفته شده است.

جدول ب ــ۳ــ مشخصات نیم رخ‌ها (پروفیل‌ها)

تیرها

ناودانی - (U - شکل) — مقایسه با DIN 1026 (10.63)

اندازه‌ها طبق DIN 997 (10.70)



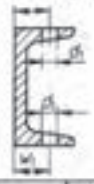
$r_1 = t$

$r_2 = \frac{1}{2}$

S سطح مقطع تیر
I ممان سطحی محوری درجه 2
W مدول سطحی محوری
m′ وزن طولی

مشخصه تیر ناودانی به ارتفاع 100mm از St 37 - 2 طبق DIN 17 100 :

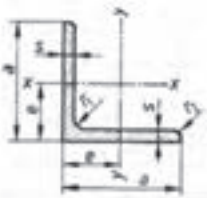
پروفیل U- DIN 1026 - St 37 - 2 - U 100



علامت کوتاه U	اندازه‌ها به mm h	b	s	t	e	سطح مقطع S cm²	وزن طولی m′ kg/m	فاصله از محور y e_y cm	برای محورهای خم x - x: I_x cm⁴	W_x cm³	y - y: I_y cm⁴	W_y cm³	اندازه‌ها به mm w_1	d_1 max.
30×15	30	15	4	4,5	7,5	2,21	1,74	0,52	2,53	1,69	0,38	0,39	10	6,4
30	30	33	5	7	16,5	5,44	4,27	1,31	6,39	4,26	5,33	2,68	18	8,4
40×20	40	20	5	5,5	10	3,66	2,87	0,67	7,58	3,97	1,14	0,86	11	6,4
40	40	35	5	7	17,5	6,21	4,87	1,33	14,1	7,05	6,68	3,08	18	11
50×25	50	25	5	6	12,5	4,92	3,86	0,81	16,8	6,73	2,49	1,48	16	8,4
50	50	38	5	7	19	7,12	5,59	1,31	26,4	10,6	9,12	3,75	20	11
60	60	30	6	6	15	6,46	5,07	0,91	31,6	10,5	4,51	2,16	18	8,4
65	65	42	5,5	7,5	21	9,03	7,09	1,42	57,5	17,7	14,1	5,07	25	11
80	80	45	6	8	22,5	11,0	8,64	1,45	106	26,5	19,4	6,36	25	13
100	100	50	6	8,5	25	13,5	10,6	1,55	206	41,2	29,3	8,49	30	15
120	120	55	7	9	27,5	17,0	13,4	1,60	364	60,7	43,2	11,1	30	17
140	140	60	7	10	30	20,4	16,0	1,75	605	86,4	62,7	14,8	35	17
160	160	65	7,5	10,5	32,5	24,0	18,8	1,84	925	116	85,3	18,3	35	21
200	200	75	8,5	11,5	37,5	32,2	25,3	2,01	1910	191	148	27,0	40	23
240	240	85	9,5	13	42,5	42,3	33,2	2,23	3600	300	248	39,6	45	25
280	280	95	10	15	47,5	53,3	41,8	2,53	6280	448	399	57,2	50	25
300	300	100	10	16	50	58,8	46,2	2,70	8030	535	495	67,8	55	25

نبشی دو طرف مساوی — مقایسه با DIN 1028 (10.76)

اندازه‌ها طبق DIN 997 (10.70)



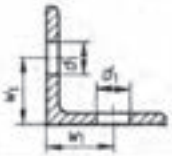
$r_1 = s$

$r_2 = \frac{s}{2}$

S سطح مقطع تیر
I ممان سطحی محوری درجه 2
W مدول سطحی محوری
m′ وزن طولی

مشخصه نبشی با عرض بازوی 45 mm و ضخامت بال 5 mm از USt37 - 2 طبق DIN 17 100 :

پروفیل L- DIN 1028 - USt37 - 2 - L 45 × 5



علامت کوتاه L	اندازه‌ها به mm a	s	سطح مقطع S cm²	وزن طولی m′ kg/m	فاصله محورها e cm	برای محورهای خم x - x, y - y: $I_x=I_y$ cm⁴	$W_x=W_y$ cm³	اندازه‌ها به mm w_1	d_1 max.
20×3	20	3	1,12	0,88	0,60	0,39	0,28	12	4,3
25×3	25	3	1,42	1,12	0,73	0,79	0,45	15	6,4
25×4	25	4	1,85	1,45	0,76	1,01	0,58		
30×3	30	3	1,74	1,36	0,84	1,41	0,65	17	8,4
30×4	30	4	2,27	1,78	0,89	1,81	0,86		
35×4	35	4	2,67	2,10	1,00	2,96	1,18	18	11
35×5	35	5	3,28	2,57	1,04	3,56	1,45		
40×4	40	4	3,08	2,42	1,12	4,38	1,56	22	11
40×5	40	5	3,79	2,97	1,16	5,43	1,91		
45×4	45	4	3,49	2,74	1,23	6,43	1,97	25	13
45×5	45	5	4,3	3,38	1,28	7,83	2,43		
50×5	50	5	4,8	3,77	1,40	11,0	3,05	30	
50×6	50	6	5,69	4,47	1,45	12,8	3,61	30	13
50×7	50	7	6,56	5,15	1,49	14,6	4,15	35	17
60×5	60	5	5,82	4,57	1,64	19,4	4,45		

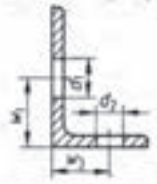
علامت کوتاه L	اندازه‌ها به mm a	s	سطح مقطع S cm²	وزن طولی m′ kg/m	فاصله محورها e cm	برای محورهای خم x - x, y - y: $I_x=I_y$ cm⁴	$W_x=W_y$ cm³	اندازه‌ها به mm w_1	d_1 max.
60× 6	60	6	6,91	5,42	1,69	22,8	5,29	35	17
60× 8	60	8	9,03	7,09	1,77	29,1	6,88		
65× 7	65	7	8,7	6,83	1,85	33,4	7,18		21
70× 7	70	7	9,4	7,38	1,97	42,4	8,43	40	21
70× 9	70	9	11,9	9,34	2,05	52,6	10,6		
75× 7	75	7	10,1	7,94	2,09	52,4	9,67		23
75× 8	75	8	11,5	9,03	2,13	58,9	11,0	40	23
80× 6	80	6	9,35	7,34	2,17	55,8	9,57	45	
80× 8	80	8	12,3	9,60	2,26	72,3	12,6		
80×10	80	10	15,1	11,9	2,34	87,5	15,5	45	23
90× 7	90	7	12,2	9,61	2,45	92,6	14,1	50	25
90× 9	90	9	15,5	12,2	2,54	116	18,0		
100× 8	100	8	15,5	12,2	2,74	145	19,9	55	25
100×10	100	10	19,2	15,1	2,82	177	24,7		
100×12	100	12	22,7	17,8	2,90	207	29,2		

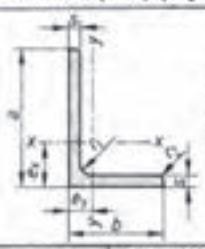
جدول ب ــ۳ــ مشخصات نیم رخ‌ها (پروفیل‌ها) ــ (ادامه)

تیرها

نبشی دو طرف نامساوی — مطابقه با DIN 1029 (7.78)

اندازه‌ها طبق DIN 997 (10.70)





$r_1 = s$

$r_2 = \frac{s}{2}$

S سطح مقطع تیر

I ممان سطحی محوری درجه 2

W مدول سطحی محوری

m′ وزن طولی

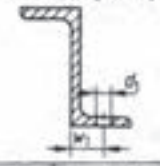
مشخصه نبشی دو طرف نامساوی با عرض بالهای 65 mm و 50 mm از USt 37 - 2 طبق DIN 17100 :

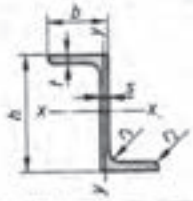
L - پروفیل DIN 1029 – USt 37 - 2 – L 65×50×5

علامت کوتاه L	اندازه‌ها به mm a	b	s	سطح مقطع S cm²	وزن طولی m′ kg/m	فاصله محورها e_x cm	e_y cm	برای محورهای خم x – x I_x cm⁴	W_x cm³	y – y I_y cm⁴	W_y cm³	اندازه‌ها به mm w_1	w_2	d_1 max.	d_2 max.
30×20× 3	30	20	3	1,42	1,11	0,99	0,50	1,25	0,62	0,44	0,29	17	12	8,4	4,3
30×20× 4	30	20	4	1,85	1,45	1,03	0,54	1,59	0,81	0,55	0,38				
40×20× 3	40	20	3	1,72	1,35	1,43	0,44	2,79	1,08	0,47	0,30	22		11	
40×20× 4	50	20	4	2,25	1,77	1,47	0,48	3,59	1,42	0,60	0,39	22	12	11	4,3
45×30× 4	45	30	4	2,87	2,25	1,48	0,74	5,78	1,91	2,05	0,91	25	17	13	8,4
45×30× 5	45	30	5	3,53	2,77	1,52	0,78	6,99	2,35	2,47	1,11				
50×30× 4	50	30	4	3,07	2,41	1,68	0,70	7,71	2,33	2,09	0,91	30	17	13	8,4
50×30× 5	50	30	5	3,78	2,96	1,73	0,74	9,41	2,88	2,54	1,12				
50×40× 5	50	40	5	4,27	3,35	1,56	1,07	10,04	3,02	5,89	2,01		22		11
60×30× 5	60	30	5	4,29	3,37	2,15	0,68	15,6	4,04	2,60	1,12	35	17	17	8,4
60×40× 5	60	40	5	4,79	3,76	1,96	0,97	17,2	4,25	6,11	2,02		22		11
60×40× 6	60	40	6	5,68	4,46	2,00	1,01	20,1	5,03	7,12	2,38				
65×50× 5	65	50	5	5,54	4,35	1,99	1,25	23,1	5,11	11,9	3,18	35	30	21	13
70×50× 6	70	50	6	6,88	5,40	2,24	1,25	33,5	7,04	14,3	3,81				
75×50× 7	75	50	7	8,3	6,51	2,48	1,25	46,4	9,24	16,5	4,39	40		23	
75×55× 5	75	55	5	6,3	4,95	2,31	1,33	35,5	6,84	16,2	3,89	40	30		17
75×55× 7	75	55	7	8,66	6,80	2,40	1,41	47,9	9,39	21,8	5,52				
80×40× 6	80	40	6	6,89	5,41	2,85	0,88	44,9	8,73	7,59	2,44	45	22		11
80×40× 8	80	40	8	9,01	7,07	2,94	0,95	57,6	11,4	9,68	3,18	45	22	23	11
80×60× 7	80	60	7	9,38	7,36	2,51	1,52	59,0	10,7	28,4	6,34				21
90×60× 6	90	60	6	8,69	6,82	2,89	1,41	71,7	11,7	25,8	5,61	50		25	17
90×60× 8	90	60	8	11,4	8,96	2,97	1,49	92,5	15,4	33,0	7,31	50	35	25	17
100×50× 6	100	50	6	8,73	6,85	3,49	1,04	89,7	13,8	15,3	3,86	55	30		13
100×50× 8	100	50	8	11,5	8,99	3,59	1,13	116	18,0	19,5	5,04				
100×50×10	100	50	10	14,1	11,1	3,67	1,20	141	22,2	23,4	6,17				

دونبشی (تیر Z) — مطابقه با DIN 1027 (10.63)

اندازه‌ها طبق DIN 997 (10.70)





$r_1 = t$

$r_2 = \frac{t}{1}$

S اندازه سطح مقطع تیر

I ممان سطحی محوری درجه 2

W مدول سطحی محوری

m′ وزن طولی

مشخصه تیر دو نبشی با ارتفاع 80 mm از USt 37 - 2 طبق DIN 17100 :

⊥ - پروفیل DIN 1027 – USt37 - 2 – ⊥80

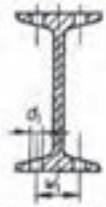
علامت کوتاه ⊥	اندازه‌ها به mm h	b	s	t	سطح مقطع S cm²	وزن طولی m′ kg/m	برای محورهای خم x - x I_x cm⁴	W_x cm³	y - y I_y cm⁴	W_y cm³	اندازه‌ها به mm w_1	d_1 max.
30	30	38	4	4,5	4,32	3,39	5,96	3,97	13,7	3,80	20	11
40	40	40	4,5	5	5,43	4,26	13,5	6,75	17,6	4,66	22	11
50	50	43	5	5,5	6,77	5,31	26,3	10,5	23,8	5,88	25	11
60	60	45	5	6	7,91	6,21	4,7	14,9	30,1	7,09	25	13
80	90	50	6	7	11,1	8,71	109	27,3	47,4	10,1	30	13
100	100	55	6,5	8	14,5	11,4	222	44,4	72,5	14,0	30	17
120	120	60	7	9	18,2	14,3	402	67,0	106	18,8	35	17
140	140	65	8	10	22,9	18,0	676	96,6	148	23,3	35	17
160	160	70	8,5	11	27,5	21,6	1060	132	204	31,0	35	21

جدول ب ــ۳ــ مشخصات نیم رخ‌ها (پروفیل‌ها) ــ (ادامه)

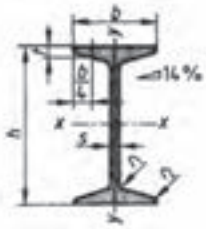
تیرها

تیر I - شکل باریک — مقایسه با DIN 1025 T1 (10.63)

اندازه‌ها طبق DIN 997 (10.70)



S اندازه سطح مقطع
I ممان سطحی محوری درجه 2
W مدول سطحی محوری
m′ وزن طولی



$r_1 = s$
$r_2 = 0,6 \cdot s$
14 %

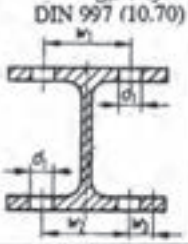
مشخصه تیر I - شکل باریک معمولی - I با ارتفاع 180 mm از U St44-2 طبق DIN 17 100 :

I - پروفیل DIN 1025 - U St44 - 2 - I 180

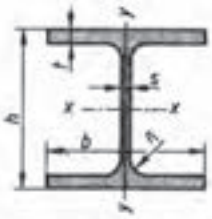
علامت کوتاه I	اندازه‌ها به mm h	b	s	t	سطح مقطع S cm²	وزن طولی m′ kg/m	برای محورهای خم x - x I_x cm⁴	W_x cm³	y - y I_y cm⁴	W_y cm³	اندازه‌ها به mm w_1	d_1 max.
80	80	42	3,9	5,9	7,57	5,94	77,8	19,5	6,29	3,00	22	6,4
100	100	50	4,5	6,8	10,6	8,34	171	34,2	12,2	4,88	28	6,4
120	120	58	5,1	7,7	14,2	11,1	328	54,7	21,5	7,41	32	8,4
140	140	66	5,7	8,6	18,2	14,3	573	81,9	35,2	10,7	34	11
160	160	74	6,3	9,5	22,8	17,9	935	117	54,7	14,8	40	11
180	180	82	6,9	10,4	27,9	21,9	1450	161	81,3	19,8	44	13
200	200	90	7,5	11,3	33,4	26,2	2140	214	117	26,0	48	13
220	220	98	8,1	12,2	39,5	31,1	3060	278	162	33,1	52	13
240	240	106	8,7	13,1	46,1	36,2	4250	354	221	41,7	56	17
260	260	113	9,4	14,1	53,3	41,9	5740	442	288	51,0	60	17
280	280	119	10,1	15,2	61,0	47,9	7590	542	364	61,2	60	17
300	300	125	10,8	16,2	69,0	54,2	9800	653	451	72,2	64	21
320	320	131	11,5	17,3	77,7	61,0	12510	782	555	84,7	70	21
360	360	143	13,0	19,5	97,0	76,1	19610	1090	818	114	76	23
400	400	155	14,4	21,6	118	92,4	29210	1460	1160	149	88	23

تیر I - شکل پهن (تیر بال پهن) — مقایسه با DIN 1025 T2 (10.63)

اندازه‌ها طبق DIN 997 (10.70)



S اندازه سطح مقطع
I ممان سطحی محوری درجه 2
W مدول سطحی محوری
m′ وزن طولی



$r_1 = 2 \cdot s$

مشخصه تیر I - شکل پهن با سری - IPB با ارتفاع 240 mm از St 52 - 3 طبق DIN 17 100 :

IPB - پروفیل DIN 1025 - St 52 - 3 - IPB 240

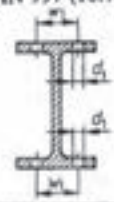
علامت کوتاه IPB	اندازه‌ها به mm h	b	s	t	سطح مقطع S cm²	وزن طولی m′ kg/m	برای محورهای خم x - x I_x cm⁴	W_x cm³	y - y I_y cm⁴	W_y cm³	اندازه‌ها به mm یک ردیفه w_1	دو ردیفه w_2	w_3	d_1 max.
100	100	100	6	10	26,0	20,4	450	89,9	167	33,5	56			13
120	120	120	6,5	11	34,0	26,7	860	144	318	52,9	66	–	–	17
140	140	140	7	12	43,0	33,7	1510	216	550	78,5	76			21
160	160	160	8	13	54,3	42,6	2490	311	889	111	86			23
180	180	180	8,5	14	65,3	51,2	3830	426	1360	151	100	–	–	25
200	200	200	9	15	78,1	61,3	5700	570	2000	200	110			25
220	220	220	9,5	16	91,0	71,5	8090	736	2840	258	120	–	–	
240	240	240	10	17	106	83,2	11260	938	3920	327	–	96	35	25
260	260	260	10	17,5	118	93,0	14920	1150	5130	395	–	106	40	
280	280	280	10,5	18	131	103	19270	1380	6590	471		110		25
300	300	300	11	19	149	117	25170	1680	8560	571	–	120	45	28
320	320	300	11,5	20,5	161	127	30820	1930	9240	616		120		28
360	360	300	12,5	22,5	181	142	43190	2400	10140	676				
400	400	300	13,5	24	198	155	57680	1880	10820	721	–	120	45	28
450	450	300	14	26	218	171	78890	3550	11720	781				
500	500	300	14,5	28	239	187	107200	4290	12620	842	–	120	45	28
550	550	300	15	29	254	199	136700	4970	13080	872				

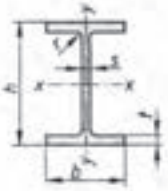
جدول ب ــ۳ــ مشخصات نیم رخ‌ها (پروفیل‌ها) ــ (ادامه)

تیرها

تیر I - شکل متوسط — مقایسه با DIN 1025 T5 (3.65)

اندازه‌ها طبق DIN 997 (10.70)





S اندازه سطح مقطع
I ممان سطحی محوری درجه 2
W مدول سطحی محوری
m′ وزن طولی

مشخصه تیر I - شکل عرض متوسط سری - IPE با ارتفاع 300 mm از St44 -2 طبق DIN 17100:

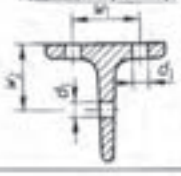
IPE- پروفیل DIN 1025 - St 44 - 2 - IPE 300

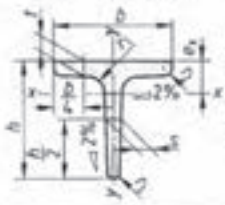
طول ساخت: 4 تا 15 متر

علامت کوتاه IPE	اندازه‌ها به mm h	b	s	t	r	سطح مقطع S cm²	وزن طولی m′ kg/m	برای محورهای خم x - x I_x cm⁴	W_x cm³	y - y I_y cm⁴	W_y cm³	اندازه‌ها به mm w_1	d_1 max.
80	80	46	3,8	5,2	5	7,64	6,0	80,1	20,0	8,49	3,69	26	6,4
100	100	55	4,1	5,7	7	10,3	8,1	171	34,2	15,9	5,79	30	8,4
120	120	64	4,4	6,3	7	13,2	10,4	318	53,0	27,7	8,65	36	8,4
160	160	82	5,0	7,4	9	20,1	15,8	869	109	68,3	16,7	44	13
200	200	100	5,6	8,5	12	28,5	22,4	1940	194	142	28,5	56	13
240	240	120	6,2	9,8	15	39,1	30,7	3890	324	284	47,3	68	17
300	300	150	7,1	10,7	15	53,8	42,2	8360	557	604	80,5	80	23
360	360	170	8,0	12,7	18	72,7	57,1	16270	904	1040	123	90	25
400	400	180	8,6	13,5	21	84,5	66,3	23130	1160	1320	146	96	28

سه پری - لبه بلند و- کف پهن (T - شکل) — مقایسه با DIN 1024 (3.82)

اندازه‌ها طبق DIN 997 (10.70)





$r_1 = s$
$r_2 = \frac{s}{2}$
$r_3 = \frac{s}{4}$

S اندازه سطح مقطع
I ممان سطحی محوری درجه 2
W مدول سطحی محوری
m′ وزن طولی

مشخصه سه پری لبه بلند با ارتفاع 50 mm از جنس St37 - 2 طبق DIN 17 100

T - پروفیل DIN 1024 - St37 - 2 - T50

علامت کوتاه T	اندازه‌ها به mm b = h	s = t	سطح مقطع S cm²	وزن طولی m′ kg/m	فاصله از محور x e_x cm	برای محورهای خم x - x I_x cm⁴	W_x cm³	y - y I_y cm⁴	W_y cm³	اندازه‌ها به mm w_1	w_2	d_1 max.
20	20	3	1,12	0,88	0,58	0,38	0,27	0,20	0,20	–	–	3,2
25	25	3,5	1,64	1,29	0,73	0,87	0,49	0,43	0,34	15	14	3,2
30	30	4	2,26	1,77	0,85	1,72	0,80	0,87	0,58	17	17	4,3
40	40	5	3,77	2,96	1,12	5,28	1,84	2,58	1,29	21	22	6,4
50	50	6	5,66	4,44	1,39	12,1	3,36	6,06	2,42	30	30	6,4
60	60	7	7,94	6,23	1,66	23,8	5,48	12,2	4,07	34	35	8,4
80	80	9	13,6	10,7	2,22	73,7	12,8	37,0	9,25	45	45	11
100	100	11	20,9	16,4	2,74	179	24,6	88,3	17,7	60	60	13
120	120	13	29,6	23,2	3,28	366	42,0	178	29,7	70	70	17
140	140	15	39,3	31,3	3,80	660	64,7	330	47,2	80	75	21

سه پری کف پهن

علامت کوتاه TB	اندازه‌ها به mm h	b	s = t	سطح مقطع S cm²	وزن طولی m′ kg/m	فاصله از محور x e_x cm	برای محورهای خم x - x I_x cm⁴	W_x cm³	y - y I_y cm⁴	W_y cm⁴	اندازه‌ها به mm w_1	d_1 max.
30	30	60	5,5	4,64	3,64	0,67	2,58	1,11	8,62	2,87	34	8,4
35	35	70	6	5,94	4,66	0,77	4,49	1,65	15,1	4,31	37	11
40	40	80	7	7,91	6,21	0,88	7,81	2,50	28,5	7,13	45	11
50	50	100	8,5	12,0	9,42	1,09	18,7	4,78	67,7	13,5	55	13
60	60	120	10	17,0	13,4	1,30	38,0	8,09	137	22,8	65	17

مشخصه سه پری کف پهن با ارتفاع 60 mm از St44 - 2 طبق DIN 17 100 : DIN 1024 - St44 - 2 - TB 60 پروفیل - TB

جدول ب ــ۳ــ مشخصات نیم رخ‌ها (پروفیل‌ها) ــ (ادامه)

ورقها

ورق فولادی

مقایسه با DIN 1541 (8,75), DIN 1543 (11,81)

ضخامت ورق mm	وزن سطحی m² kg/m²	ضخامت ورق mm	وزن سطحی m² kg/m²	ضخامت ورق mm	وزن سطحی m² kg/m²	ضخامت ورق mm	وزن سطحی m² kg/m²	ضخامت ورق mm	وزن سطحی m² kg/m²	ضخامت ورق mm	وزن سطحی m² kg/m²
0,35	2,75	0,70	5,50	1,2	9,42	3,0	23,55	4,75	37,3	10,0	78,5
0,40	3,14	0,80	6,28	1,5	11,80	3,5	27,4	5,0	38,25	12,0	94,2
0,50	3,92	0,90	7,07	2,0	15,70	4,0	31,4	6,0	47,1	14,0	109,9
0,60	4,71	1,0	7,85	2,5	19,60	4,5	35,4	8,0	62,8	15,0	117,75

نوع تحویل : به صورت ورق یا تسمه طبق DIN 1541 ضخامت 0,35 تا 3 mm ، طبق DIN 1545 ضخامت از 3 تا 150 mm

جنس : فولاد آلیاژی و غیر آلیاژی . مشخصه ورق نورد گرم از فولاد RSt 37 - 2 با ضخامت 4,5 mm: DIN 1543 - RSt 37 - 2 - 4,5 ورق

تسمه‌های براق فولادی

مقایسه با DIN 174(6.69)

عرض b mm	وزن طولی m به kg/m — ضخامت به mm: 2	2,5	3	4	5	6	8	10	12	16	20	25	32	40
5	0,079	0,098	0,118	–	–	–	–							
6	0,094	0,118	0,141	0,188	–	–	–							
8	0,126	0,157	0,188	0,251	0,314	0,377	–							
10	0,157	0,196	0,236	0,314	0,393	0,471	–							
12	0,188	0,236	0,283	0,377	0,471	0,565	0,754	–	–	–	–	–	–	–
16	0,251	0,314	0,377	0,502	0,628	0,754	1,00	1,26	–	–	–	–	–	–
20	0,314	0,393	0,471	0,628	0,785	0,942	1,26	1,57	1,88	2,51	–	–	–	–
22	0,345	–	0,518	0,691	0,864	1,04	1,38	1,73	2,07	–	–	–	–	–
25	0,393	0,491	0,589	0,785	0,981	1,18	1,57	1,96	2,36	3,14	3,93	–	–	–
28	0,440	–	0,659	0,879	1,10	1,32	1,76	2,20	2,64	3,52	4,40	–	–	–
32	0,502	0,628	0,754	1,00	1,26	1,51	2,01	2,51	(3,01)	4,02	5,02	6,28	–	–
36	0,565	0,707	0,848	1,13	1,41	1,70	(2,26)	2,83	3,39	(4,52)	5,65	–	–	–
40	0,628	–	0,942	1,26	1,57	1,88	2,51	3,14	3,77	5,02	6,28	7,85	10,0	–
45	0,707	–	1,06	1,41	1,77	2,12	2,83	3,53	(4,24)	5,65	7,07	8,83	11,3	–
50	0,785	–	1,18	1,57	1,96	2,36	3,14	3,93	4,71	6,28	7,85	9,81	12,6	–
56	–	–	1,32	1,76	2,20	–	3,52	4,40	5,28	7,03	8,79	11,0	14,1	–
63	–	–	1,48	1,98	2,47	2,97	3,96	4,95	5,93	7,91	9,89	12,4	15,8	19,8
70	–	–	–	2,20	2,75	3,30	(4,40)	5,50	6,59	8,79	11,0	13,7	–	22,0
80	–	–	–	–	3,14	3,77	(5,02)	6,28	7,54	10,0	12,6	15,7	–	(25,1)
90	–	–	–	–	3,53	4,24	(5,65)	7,07	8,48	11,3	14,1	17,7	–	–

جنس: نوع فولاد طبق DIN 17100
مثال: St 37-2,USt 37-2, St 33 و غیره

محدودهٔ تلرانس: برای ضخامت تا 30mm و عرض تا 100 mm h11 و برای ضخامت بیش از 30 mm h12 است.

برای عرض بیش از 100mm انحراف اندازه خاصی صادق است.

لوله بدون درز دقیق

مقایسه با DIN 2391 T 1 ,T 2 (7.81)

Ø خارجی mm	وزن طولی m به kg/m — ضخامت دیواره به mm: 0,5	1	1,5	2,0	2,5	3	4	5	5,5	6	8	9	10	12,5	16	18
5	0,056	0,099														
6	0,068	0,123	0,166	0,197												
8	0,092	0,173	0,240	0,296	0,339											
10	0,117	0,222	0,314	0,395	0,462	0,52										
12	0,142	0,271	0,396	0,493	0,586	0,66	0,79									
16	0,191	0,370	0,536	0,691	0,832	0,96	1,18	1,36	1,42	1,48						
20	0,240	0,469	0,684	0,888	1,08	1,26	1,58	1,85	1,97	2,07						
25	0,302	0,592	0,869	1,13	1,39	1,63	2,07	2,47	2,64	2,81	3,35					
32	0,388	0,765	1,13	1,48	1,82	2,15	2,76	3,33	3,59	3,85	4,74	5,10	5,43			
38	0,462	0,912	1,35	1,78	2,19	2,59	3,35	4,07	4,41	4,74	5,92	6,44	6,91			
40	0,487	0,962	1,42	1,87	2,31	2,74	3,55	4,32	4,68	5,03	6,31	6,88	7,40			
50		1,21	1,79	2,37	2,93	3,48	4,54	5,55	6,04	6,51	8,29	9,10	9,86			
60		1,46	2,16	2,86	3,55	4,22	5,52	6,78	7,39	7,99	10,3	11,3	12,3	14,6		
70		1,70	2,53	3,35	4,16	4,96	6,51	8,01	8,75	9,47	12,2	13,5	14,8	17,7	21,3	
80		1,95	2,90	3,85	4,78	5,70	7,50	9,25	10,1	10,9	14,2	15,8	17,3	20,8	25,3	
100				4,83	6,01	7,18	9,47	11,7	12,8	13,9	18,2	20,2	22,2	27,0	33,1	36,4
120				5,82	7,24	8,66	11,4	14,2	15,5	16,9	22,1	24,6	27,1	33,1	41,0	45,3
160						11,6	15,4	19,1	21,0	22,8	30,0	33,5	37,0	45,5	56,8	63,0
200							19,3	24,0	26,4	28,7	37,9	42,4	46,9	57,8	72,6	80,8

جنس : مثلاً
St 30 Si, St 30 Al
St 35, St 45, St

جدول پ ــ۱ــ ضریب تبدیل یکاها

از یکای قدیمی	به یکای SI	تبدیل تقریبی	تبدیل دقیق تر
طول			
اینچ(in)	میلیمتر(mm)	÷۴→×۱۰۰	×۲۵/۴
فوت (ft)	متر(m)	÷۳	×۰/۳۰
یارد (yd)	متر(m)	×۱	÷۱۲→×۱۳
جرم			
پوند (lb)	کیلوگرم (kg)	÷۲	×۰/۴۵
پوند (lb)	گرم (g)	× ۱۰۰۰→÷۲	×۴۵۴
اونس (oz)	گرم (g)	×۳۰	×۲۸/۴
نیرو			
پوند نیرو (lbf)	نیوتون(N)	×۴	×۹→÷۲
کیلو پوند(kp)	نیوتون (N)	×۱۰	×۹/۸
کیلوگرم نیرو (kgf)	نیوتون (N)	×۱۰	×۹/۸
گشتاور			
پوند نیرو فوت (lbf.ft)	نیوتون متر(N.m)	× ۳→÷۲	×۱/۳۶
فشار – تنش			
psi (lbf/in^{۲})	N/m^{۲}	×۷۰۰۰	×۶۸۹۵
psi (lbf/in^{۲})	کیلو پاسکال(kPa)	×۷	×۶/۹
psi (lbf/in^{۲})	مگا پاسکال(MPa)یا (N/mm۲)	× ۷→÷۱۰۰۰	× ۶/۹→÷۱۰۰۰
اتمسفر (kgf/cm^{۲})	مگا پاسکال(MPa)یا (N/mm۲)	÷۱۰	×۰/۰۹۸
توان			
اسب بخار (hp)	کیلو وات(kW)	×۳→÷۴	×۰/۷۴۶
انرژی			
kgf.m	ژول(J)	×۱۰	×۹/۸۰۷
ft.lbf	ژول(J)	× ۹→÷۷	×۱/۳۵

جدول پ ــ۲ــ نشان های استفاده شده در کتاب

کمیت	نشان
مساحت	A
اندازه گلویی مؤثر جوش گوشه	a
عرض	b
قطر میله و بازوی‌گشتاور	d
قطر سوراخ	D
ضریب کشسانی (مدول الاستیسیته)	E
بار متمرکز(مانند نیرو)	F
ضریب اطمینان	F.S.
ارتفاع	h
طول	L یا l
جرم	m
فشار	P
توان	P
شعاع سوراخ	R
شعاع میله	r
اندازه جوش شیاری	s
ضخامت	t
گشتاور	T
حجم	V
وزن	W
اندازه ساق جوش گوشه	z
تنش عمودی	σ
تنش برشی	τ یا $\top$
کرنش	ε
تغییر طول	ΔL یا δ
استحکام نهایی	S_u یا σ_{ult}
استحکام در نقطه تسلیم	S_y یا σ_y
حداکثرتنش مجاز	$\sigma_{مجاز}$ یا σ_{all}

فهرست منابع

- اصول طراحی و محاسبه در جوش، مرکز پژوهش و مهندسی جوش ایران
- جداول و استانداردهای طراحی و ماشین سازی، فیشر، ولی نژاد، نشر طراح، ۱۳۸۸
- حساب فنی، سال چهارم هنرستان، ناصر بهرام زادگان، ۱۳۷۴
- Vector Mechanics for Engineers, Statics, P. Beer, E. Johnson, 7th Edition, 2004
- Mechanics of material, P. Beer, E. Johnson, 4th Edition, 2006
- Engineering mechanics, Statics, J. Meriam, 4th Edition, 1977
- Statics and Strength of Material, G. Bassin, 3rd Edition, 1979
- Structural Welding Code–Steel, AWS D1.1, 2002
- Weld Joint Design, J. Hicks, 2nd Edition, 1987