

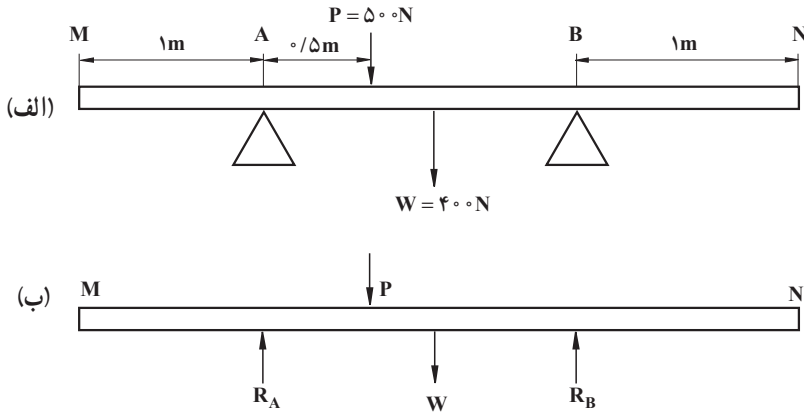
### مقاومت مصالح

در ساختمان‌ها و قطعاتی که با محاسبات مهندسی ساخته شده است، اندازه‌های فیزیکی تمام اجزای تحت بار باید معین و تعریف شوند. این اجزا باید طوری محاسبه شوند که بتوانند در مقابل نیروهای واقعی یا احتمالی که ممکن است بر آن‌ها تأثیر نمایند، مقاومت کنند. به عنوان مثال سقف یک ساختمان باید به قدر کافی مستحکم باشد تا بتواند در مقابل نیروهای وارده مقاومت کند و محور یک ماشین باید ابعاد مناسب برای انتقال گشتاور پیچشی مؤثر را داشته باشد. همچنین قسمت‌های مختلف یک سازه مهندسی باید به قدر کافی محکم باشد تا تحت تأثیر بارهای وارده تغییر شکل بیش از حد مجاز از خود نشان ندهد، مثلاً ممکن است سقف یک ساختمان در برابر بارهای وارده مقاومت کافی داشته باشد ولی تحت تأثیر این بارها چنان انحنایی (خیز) ایجاد شود که باعث صدمه و آسیب به نازک‌کاری‌های زیر خود شده یا از لحاظ روانی موجب پریشانی استفاده‌کنندگان گردد. با توجه به مثال‌های فوق، مقاومت مصالح را می‌توان علم محاسبات عملی برای تعیین جنس و ابعاد قطعات ماشین یا ساختمان با توجه به بارهایی که باید تحمل نمایند دانست.

#### ۱-۵- نیروهای وارد بر اجسام

مسئله اصلی در مقاومت مصالح بررسی مقاومت داخلی و تغییر شکل اجسام، تحت اثر بارهای خارجی است. این امر مستلزم مطالعه ماهیت نیروهایی است که در داخل جسم به وجود می‌آیند تا همراه نیروهای خارجی مؤثر بر جسم، تعادل آن را تضمین کنند. در انجام مطالعه فوق، اولین گام تهیه یک ترسیمه آزاد از قطعه یا جسم مورد نظر است که در آن کلیه نیروها در نقاط اثرشان روی ترسیمه نشان داده شده‌اند. چنین ترسیمه‌ای، ترسیمه جسم آزاد نامیده می‌شود. کلیه نیروهای مؤثر بر جسم به انضمام نیروهای واکنش تکیه‌گاهی و وزن جسم، نیروهای خارجی می‌باشند. تخته الواری به طول ۴ متر و وزن  $400\text{ N}$  در نظر بگیرید که مانند شکل ۱-۵ الف روی تکیه‌گاه A و B قرار گرفته و بار  $500$  نیوتنی در نقطه نشان داده شده در شکل بر آن وارد می‌شود. ترسیمه آزاد الوار فوق در شکل ۱-۵ ب نشان

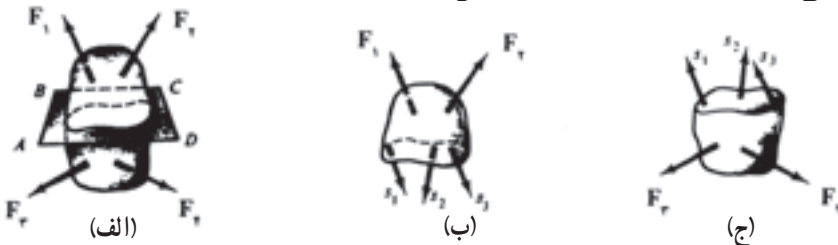
داده شده است.



شکل ۱-۵ - الف - الواروی تکیه‌گاه، ب - ترسیمه آزاد الوار

نیروی وزن معمولاً در اجسام نشان داده می‌شود. این نیرو به همراه نیروهای عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها ( $R_A$  و  $R_B$ ) و نیروی  $P$  به عنوان نیروهای خارجی محسوب می‌شوند. جسم نشان داده شده در شکل ۲-۵ - الف را در نظر بگیرید که تحت اثر نیروهای  $F_1$  و  $F_2$  و  $F_3$  و  $F_4$  می‌باشد.

اگر این جسم به صورت پایدار و در حالت سکون و تعادل باشد برای بررسی نیروهای داخلی ناشی از اعمال نیروهای خارجی بر جسم، صفحه‌ای فرضی دلخواه از جسم عبور داده می‌شود، به طوری که جسم کاملاً به دو قسمت مجزا تقسیم شود. نتیجه این عمل در شکل‌های ۲-۵ - ب و ۲-۵ - ج دیده می‌شود. این عمل روش مقطع نامیده می‌شود.



شکل ۲-۵ - روش مقطع زدن یک جسم

اگر جسمی کاملاً در حال تعادل باشد هر جزء آن نیز باید در حال تعادل باشد، پس برای تعادل هر قسمت باید نیروهایی در سطح قطع شده فرضی، وجود داشته باشد. از این رو می‌توان نتیجه

گرفت: نیروهای خارجی مؤثر در یک طرف هر مقطع دلخواه، با نیروهای به وجود آمده در سطح قطع شده (که نیروهای مقاوم داخلی خوانده می شوند) در حال تعادل هستند. به عبارت دیگر نیروهای مقاوم داخلی با نیروهای خارجی در حال تعادل هستند.

## ۲-۵- تنش چیست؟

هرگاه جسمی تحت اثر بار (نیروی) خارجی که بخواهد باعث تغییر شکل آن شود قرار گیرد، در این حالت نیروهای داخلی وارد عمل شده (برای جلوگیری از تغییر شکل) و در مقابله با بار خارجی قرار می گیرند. هنگامی که این نیروهای مقاوم وارد عمل می شوند، گفته می شود که جسم تحت تنش قرار گرفته است. هرچه نیروهای خارجی وارد بر جسم افزایش پیدا کند تنش وارد بر جسم نیز زیادتر می شود. تنش را می توان مقدار نیروی وارد بر واحد سطح جسم نامید. تنش از تقسیم بار یا نیروی خارجی اعمال شده بر سطح مقطعی که در مقابل بار یا نیرو مقاومت نشان می دهد به دست می آید، بنابراین اگر:

$$F = \text{شدت نیروی مقاوم داخلی (تنش)} (N/m^2)$$

$$F = \text{نیرو یا بار وارد شده } (N)$$

$$A = \text{سطح مقطع جسم } (m^2)$$

آن گاه داریم:

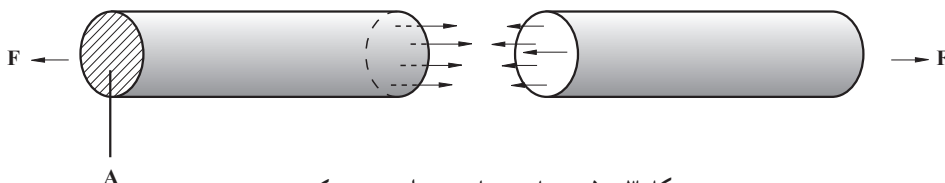
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1-5)$$

واحد تنش در سیستم متریک (SI)، نیوتن بر متر مربع ( $N/m^2$ ) است. این واحد درست همان واحدی است که برای فشار مورد استفاده قرار می گیرد. بعضی اوقات مناسب تر است که تنش بر حسب کیلو نیوتن بر متر مربع ( $kN/m^2$ ) بیان شود. به واحد نیوتن بر متر مربع، پاسکال (Pa) نیز گفته می شود ( $1 N/m^2 = 1 Pa$ ).

به طور کلی، می توان تنش را به دو دسته، تنش قائم و تنش برشی تقسیم کرد. تنش قائم یا به صورت کششی است یا فشاری. علامت تنش کششی مثبت و علامت تنش فشاری منفی می باشد. در ادامه هریک از تنش های فوق توضیح داده شده اند.

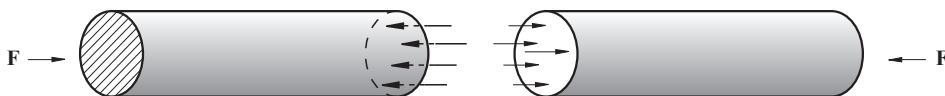
۲-۵- تنش کششی: تنش کششی موقعی به وجود می آید که به جسم بار یا نیروی کششی وارد شود. شکل ۳-۵ میله ای را نشان می دهد که تحت اثر نیروی کششی قرار گرفته و در آن تنش کششی حاصل شده است. معمولاً بار یا نیروی کششی وارد شده بر جسم تمایل دارد که طول

جسم را در امتداد نیرو زیاد کند. اگر تنش کششی وارد بر جسم بیش از حد تحمل جسم باشد، جسم در نقطه‌ای از طول خود گسیخته (پاره) می‌شود.



شکل ۳-۵ - نمایش میله تحت اثر نیروی کششی

۲-۲-۵ - تنش فشاری: تنش فشاری موقعی به وجود می‌آید که بر جسم بار یا نیروی فشاری وارد شود. معمولاً بار یا نیروی فشاری وارد شده به جسم تمایل دارد که طول جسم را در امتداد بار یا نیرو کم کند. شکل ۴-۵ میله‌ای را نشان می‌دهد که تحت اثر نیروی فشاری قرار گرفته و در آن تنش فشاری حاصل شده است که تمایل به کاهش طول میله در امتداد نیرو را دارد.



شکل ۴-۵ - نمایش میله تحت اثر نیروی فشاری

اگر تنش فشاری وارد بر جسم از حد تحمل آن بیشتر باشد تنش وارده باعث خم شدن جسم در امتداد نیرو و یا خرد شدن جسم می‌شود.

همان‌گونه که اشاره شد تنش‌های کششی و فشاری جزء تنش‌های عمودی یا قائم محسوب می‌شوند زیرا سطح مقطعی که برای محاسبه تنش مورد استفاده قرار می‌گیرد، سطح مقطعی است که عمود بر امتداد خط اثر نیرو یا بار تحمیل شده می‌باشد.

مثال: چنانچه قطر میله نشان داده شده در شکل ۳-۵ برابر با ۱۶mm و نیروی کششی اعمال شده بر آن ۴/۴kN باشد تنش کششی وارد شده به میله را حساب کنید. هم‌چنین اگر نیروی اعمال شده مطابق شکل ۴-۵ به صورت فشاری اعمال شود تنش وارده را محاسبه کنید.

حل:

از رابطه ۱-۵ داریم:

$$F = 4 / 4 \text{ kN} = 4400 \text{ N}$$

$$D = 16 \text{ mm} = 0.016 \text{ m}$$

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

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \Rightarrow A \approx 0.0002 \text{ m}^2$$

اندازه تنش کششی برابر خواهد بود با :

$$= + \frac{4400}{0.0002} = +22000000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = +22000 \text{ kPa}$$

و به همین ترتیب اندازه تنش فشاری برابر است با :

$$= - 22000 \text{ kPa}$$

### ۳-۵- تغییر طول نسبی در کشش و فشار (کرنش)

وقتی جسمی در معرض تنش قرار می‌گیرد، در آن تغییر شکل به وجود می‌آید، به عبارت دیگر در شکل و اندازه جسم تحت اثر تنش، تغییر حاصل می‌شود. این تغییر شکل که در اثر تنش به وجود می‌آید کرنش یا تغییر طول نسبی نام دارد. تنش کششی در یک جسم باعث تغییر طول کششی شده و طول آن را زیاد می‌کند (شکل ۵-۵ الف). به همین ترتیب تنش فشاری در یک جسم باعث تغییر طول فشاری شده و طول آن را کم می‌کند (شکل ۵-۵ ب). منظور از تغییر طول نسبی ایجاد شده در یک جسم، نسبت تغییر طول به وجود آمده بر طول اولیه آن می‌باشد که کرنش نامیده می‌شود و با  $\epsilon$  نشان داده می‌شود :

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (5-2)$$

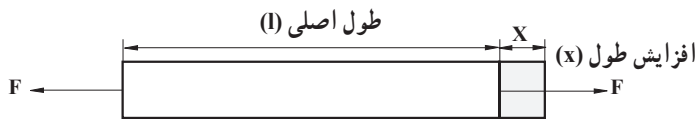
که در آن :

$\Delta L$  = تغییر طول نسبی کششی یا فشاری

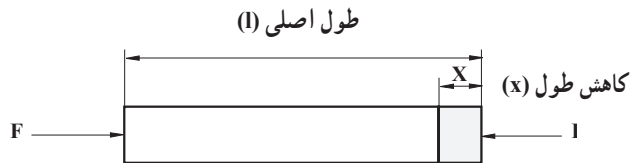
$L$  = افزایش یا کاهش طول (m)

همان گونه که دیده می‌شود چون  $\Delta L$  از تقسیم دو کمیت همانند به دست آمده است بنابراین فاقد واحد است.

$$L = \text{طول اولیه (m)}$$



(الف) تغییر طول کششی



(ب) تغییر طول فشاری

شکل ۵-۵ - تغییر طول نسبی در کشش و فشار

#### ۴-۵- رابطه بین تنش و تغییر طول نسبی

در مقاومت مصالح مفهوم قابلیت ارتجاعی اهمیت خاصی دارد. یک قطعه کش را در نظر بگیرید که از دو طرف قدری آن را می کشیم. در این حالت طول قطعه کش زیاد می شود. چنانچه یک طرف آن را رها سازیم کش به حالت اولیه خود برمی گردد. این خاصیت در اجسام مختلف به مقدار متفاوتی وجود دارد که به آن قابلیت ارتجاعی (یا خاصیت الاستیسیته) می گویند. قابلیت ارتجاعی (الاستیک) عبارت است از خاصیتی در جسم که وقتی نیروهای وارده به آن برداشته شدند، جسم به وضع و اندازه اولیه خود برمی گردد. هرگاه جسم پس از این که تمام نیروهای وارده به آن برداشته شدند، به وضع اولیه خود برگشت نکند، می گویند که در جسم تغییر طول دائمی (پلاستیک) ایجاد شده است. این وضع در یک جسم ارتجاعی نیز ممکن است پدید آید به شرط آن که نیروی وارده به جسم از حد ارتجاعی آن زیادتر شود.



#### مطالعه آزاد

رابطه بسیار مهمی که تنش و تغییر طول نسبی یک جسم را تا زمانی که در حد ارتجاعی خود قرار دارند به هم مرتبط می کند به نام قانون هوک معروف بوده و به صورت زیر بیان می شود :

«هرگاه جسم در حالت ارتجاعی باشد تغییر طول نسبی ایجاد شده (کرنش) در جسم متناسب با تنش وارد شده به آن است.» از قانون هوک می توان دریافت که :

مقدار ثابت  $\times$  تغییر طول نسبی = تنش

یعنی هر اندازه تنش وارد شده بر جسم زیادتر شود، تغییر طول نسبی بیشتری در جسم رخ می‌دهد. در نتیجه:

$$\frac{\text{تنش}}{\text{تغییر طول نسبی}} = \text{ثابت}$$

این مقدار ثابت به نام ضریب الاستیسیته طولی یا مدول یانگ معروف بوده و با حرف E نشان داده می‌شود و بستگی به جنس فلزی دارد که تحت کشش یا فشار قرار می‌گیرد. رابطه ریاضی زیر گویای قانون هوک می‌باشد.

$$= E \times \quad (۳-۵)$$

که در آن:

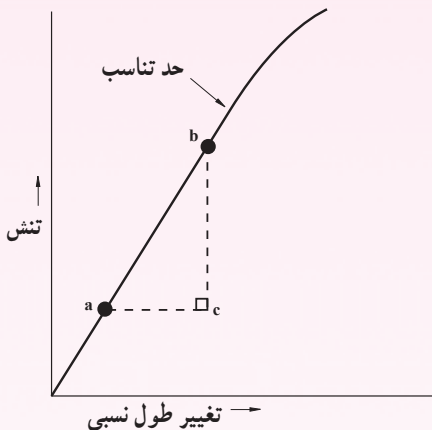
$E$  = ضریب الاستیسیته (ضریب ارتجاعی) بر حسب نیوتن بر مترمربع ( $N/m^2$ )

! = تنش بر حسب نیوتن بر مترمربع ( $N/m^2$ )

. = تغییر طول نسبی (بدون واحد)

باید توجه داشت که چون تغییر طول نسبی (.) فاقد واحد است، بنابراین واحد ضریب الاستیسیته همان واحد تنش می‌باشد.

اگر مقادیر تنش و تغییر طول نسبی مربوط به آن را در چندین نقطه در حد تناسب پیدا نموده و آن‌ها را روی محور مختصات منتقل کنیم از اتصال این نقاط به هم در حد تناسب، خطی مستقیم به دست می‌آید که از مرکز مختصات می‌گذرد (شکل ۶-۵).



شکل ۶-۵ - رابطه بین تنش و تغییر طول نسبی

شیب نمودار در این ناحیه مدول یانگ E را نشان می‌دهد. مقادیر تقریبی E برای برخی فلزات در جدول ۱-۵ داده شده است.

جدول ۱-۵- مقادیر تقریبی جدول یانگ برای چند فلز مختلف

نام فلز	مدول یانگ $E(\text{GN/m}^2)$
فولاد نرم	۲۰۰
چدن	۱۱۰
مس	۱۰۰
برنز فسفردار	۹۵
برنج	۸۵
آلومینیوم	۷۰

## ۵-۵- استحکام کششی

استحکام کششی ( $\sigma_u$ !) یک فلز عبارت است از بیشترین تنش که فلز قبل از پاره شدن (گسیختگی) می‌تواند تحمل کند و مقدار آن از تقسیم بیشترین بار وارد شده در حین آزمایش کشش بر سطح مقطع اصلی قطعه یا نمونه تحت آزمایش به دست می‌آید. از این رو می‌توان نوشت:

$$(\sigma_u) = \frac{F_u \text{ (بیشترین بار وارده)}}{A \text{ (سطح مقطع اصلی یا اولیه)}} \quad (5-4)$$

امروزه در بسیاری مواقع از استحکام کششی استفاده می‌شود، استحکام کششی یک فلز در طراحی قطعات مختلف اهمیت اساسی و حیاتی دارد.

## ۵-۶- تنش مجاز و ضریب اطمینان

قطعات ماشین‌ها و وسایل مختلف نباید تحت تنشی بیش از تنش مجاز ( $\sigma_{al}$ !) در کار قرار گیرند و این مقدار باید کمتر از تنش حد ارتجاعی باشد. برای به دست آوردن تنش مجاز در کار باید استحکام کشش را به عدد مناسبی که به آن ضریب اطمینان می‌گویند، تقسیم نمایند یعنی:

$$(\sigma_{al}) = \frac{(\sigma_u) \text{ (استحکام کششی)}}{S.F. \text{ (ضریب اطمینان)}} \quad (5-5)$$



اگر نیروهای وارد بر ساختمان یا ماشین ثابت (استاتیک) باشند، ضریب  $n = 2$  اندازه قابل قبولی در تعیین تنش مجاز می‌باشد ولی در حالتی که نیروها به‌طور ناگهانی وارد می‌شود یا اندازه آن تغییر می‌کند، مانند وضعیت اغلب ماشین‌های کشاورزی، باید برای  $n$ ، عدد به مراتب بزرگ‌تری را مدنظر گرفت.

اندازه ضریب اطمینان به دقتی که در تعیین نیروهای خارجی وارد بر ماشین به کار می‌رود و دقت محاسبه تنش‌ها در قسمت‌های مختلف ماشین و یکنواختی مواد و مصالح مصرف شده بستگی دارد. همچنین باید توجه داشت در یک ماشین، قطعاتی که خراب شدن آن‌ها موجب خراب شدن قسمت‌های دیگری از دستگاه می‌شود، باید با ضریب اطمینان بیش‌تری محاسبه شوند.

مثال: میله فولادی با استحکام کششی  $420 \text{ MN/m}^2$  و سطح مقطع  $300 \text{ mm}^2$  موجود است. اگر حداکثر بار کششی مجاز  $30 \text{ kN}$  باشد ضریب اطمینانی را که میله فولادی با آن کار می‌کند، حساب کنید.

$$\sigma_u = 420 \text{ MPa} = 420 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$A = 300 \text{ mm}^2 = 300 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$F_{al} = 30 \text{ kN} = 30 \times 10^3 \text{ N}$$

$$S.F.(n) = ?$$

$$\sigma_{al} = \frac{F_{al}}{A}$$

$$\sigma_{al} = \frac{30 \times 10^3}{300 \times 10^{-6}} = 100 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$S.F. = \frac{\sigma_u}{\sigma_{al}} = \frac{420 \times 10^6}{100 \times 10^6} = 4/2 \quad \text{بدون بعد}$$

در جدول ۲-۵ مقادیر تنش مجاز در حالات مختلف بارگذاری برای چندفلز مختلف نشان

داده شده است :

---


$$\text{N/mm}^2 = \text{MN/m}^2 = \text{MPa} *$$

جدول ۲-۵ - مقادیر تنش مجاز در حالت استحکام کششی برای فلزات مختلف بر حسب  $(MPa)/N/mm^2$

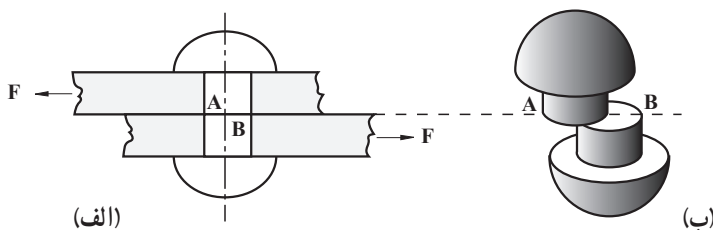
فلز حالت کار	فولاد آلیاژی نرم	فولاد آلیاژی سخت	فولاد نرم	فولاد سخت	چدن
بار آرام	۴۵-۷۰	۶۵-۹۵	۲۰-۳۰	۴۰-۵۰	۲۵-۵۰
بار متغیر	۶۵-۹۵	۹۰-۱۳۴	۴۰-۶۰	۸۰-۱۰۰	۵۰-۶۷
بار متناوب	۱۰۰-۱۵۰	۱۴۰-۲۱۰	۶۰-۹۰	۱۲۰-۱۵۰	۶۵-۸۵

در وضعیت بار آرام ۶ n. ۲۰ و در وضعیت بار متغیر ۱۲ n. ۶۰ و در حالت بار متناوب و بیشتر ۲۰ n. ۱۲۰

## ۷-۵ - تنش برشی

تنش دیگری که ممکن است جسم تحت اثر آن قرار گیرد، تنش برشی نام دارد. تنش برشی به صورت مماس (موازی با سطح مقطع جسم) اثر می‌کند. قطعه‌ای که به آن تنش برشی اثر می‌کند تمایل دارد در مقطعی که دو قسمت بر روی هم می‌لغزند، پاره شود.

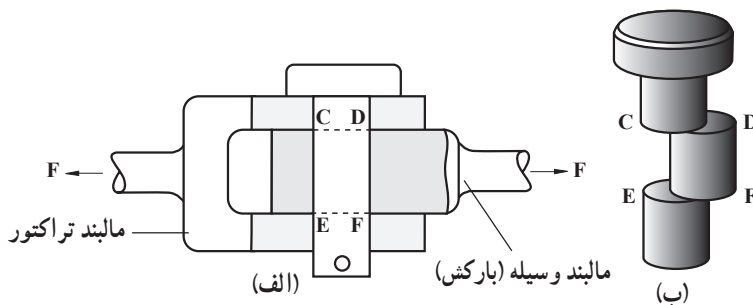
پرچ را مطابق شکل ۷-۵ - الف در نظر بگیرید که دو صفحه را به هم وصل نموده و دو نیروی مساوی و مخالف F مطابق شکل به صفحات وارد شده است. این دو نیرو می‌خواهند پرچ را در مقطع AB که در شکل به صورت نقطه چین نشان داده شد، پاره کنند. به عبارت دیگر نیمه بالایی پرچ تمایل دارد که نسبت به نیمه پایینی آن مطابق شکل ۷-۵ - ب به سمت چپ بلغزد. از آنجایی که تنها ممکن است برش پرچ در امتداد یکی از مقاطع آن صورت گیرد، بنابراین به آن برش منفرد یا ساده می‌گویند.



شکل ۷-۵ - نمای یک پرچ واحد که دو صفحه تحت فشار F را به هم وصل نموده است.

حال اگر پین مالبند ثابت تراکتوری را مطابق شکل ۸-۵ - الف در نظر بگیرید که پی‌نورد (بارکش) را به تراکتور وصل نموده و تحت اثر دو نیروی مساوی و مختلف‌الجهت F قرار گرفته باشد،

ممکن است تحت اثر این دو نیرو بین در دو مقطع CD و EF که در شکل به صورت نقطه چین نشان داده شده، پاره شود. در این حالت میله سمت راست قسمت مرکزی بین را همراه با خود مطابق شکل ۸-۵ به طرف راست حرکت می دهد. در چنین وضعیتی سطح مقطع مقاوم نیروی برشی مساوی دو برابر سطح مقطع بین می باشد (برش مرکب).



شکل ۸-۵ نحوه اثر نیرو بر بین مالبند

تنش برشی از تقسیم نیروی برشی بر سطح مقطعی که در مقابل برش مقاومت نشان می دهد، به دست می آید.

$$= \cdot \frac{f}{A} \quad (۵-۶)$$

. = تنش برشی ( $N / m^2$ )

$f$  = نیرو یا بار برشی (N)

$A$  = سطح مقطع مقاوم برشی ( $m^2$ )

مثال: اگر نیروی برشی وارد شده بر بین شکل ۸-۵ برابر  $453/60$  نیوتن باشد و تنش برشی مجاز به وسیله بین  $420 kN / m^2$  باشد قطر بین را حساب کنید.

حل: همان طور که قبلاً هم اشاره شد بین مالبند فوق ممکن است در دو مقطع پاره شود لذا در رابطه ۶-۵ مقدار  $A$  شامل هر دو سطح مقطع CD و EF خواهد بود.

$$A = A_{CD} + A_{EF} = \frac{\pi d^2}{4} + \frac{\pi d^2}{4} = \frac{2\pi d^2}{4} = \frac{\pi d^2}{2}$$

$d$  = قطر بین

$$= \cdot \frac{F}{A} \Rightarrow A = \frac{F}{\cdot} \Rightarrow \frac{\pi d^2}{2} = \frac{453/60}{420000}$$

قطر بین

$$\Rightarrow d = 0.0262 \text{ m یا } d = 2.62 \text{ cm}$$

## ۸-۵- استحکام برشی

استحکام برشی یک فلز یا جسم عبارت است از بیشترین تنش برشی که جسم قبل از برش می‌تواند تحمل کند. استحکام برشی یک جسم را به‌صورت زیر تعریف می‌کنند:

$$\sigma_u (\text{استحکام برشی}) = \frac{F_u (\text{بیشترین بار})}{A (\text{سطح مقطع کلی که در مقابل برش مقاوم است})} \quad (5-7)$$

تنش برشی مجاز در کار به‌صورتی که برای تنش‌های کششی و فشاری گفته شد، حساب می‌شود. بنابراین داریم:

$$\sigma_{al} (\text{تنش برشی مجاز در کار}) = \frac{\sigma_u (\text{استحکام برشی})}{S.F. (\text{ضریب اطمینان})} \quad (5-8)$$

جدول زیر مقادیر تقریبی استحکام برشی را برای بعضی از فلزات رایج نشان می‌دهد.

جدول ۳-۵- استحکام برشی چند فلز مختلف

فلز	استحکام برشی $\text{MN/m}^2$
فولاد نرم	۳۲۰ تا ۳۹۰
آهن چکش خوار	۳۰۰
چدن	۹۰ تا ۲۰۰
برنج	۱۵۰

مثال: حساب کنید میانگین تنش برشی در یک انگشتی پیستون (گزن پین) توپر به قطر ۲۵mm در صورتی که بار وارد شده بر آن ۴۰kN باشد.

حل: سطح مقطع عرضی انگشتی  $A = 2x$ ، سطح مقطع کل که در مقابل برش مقاومت نشان می‌دهد.

$$A = \frac{2 \times \pi \times 25^2}{4} = 982 \text{ mm}^2$$

$$F = 40 \text{ kN} = 40000 \text{ N}, \text{ نیروی برشی یا بار برشی}$$

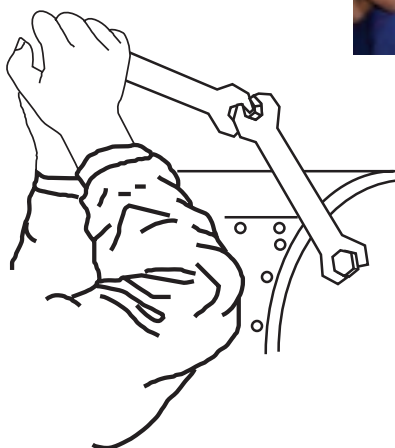
$$\text{تنش برشی در انگشتی بیستون} = \frac{F}{A} = \frac{40000 \# \text{ N}}{982 \text{ mm}^2} \&$$

$$= . 40 / 74 \text{ N / mm}^2 = 40 / 74 \text{ MN / m}^2$$

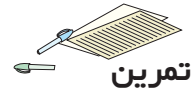
از مطالب گفته شده در مباحث تنش برشی و ضریب اطمینان و هم چنین در مبحث استحکام برشی می توان این گونه نتیجه گرفت که در هنگام استفاده از آچارهای مختلف به این نکته توجه شود که طول دسته آچارها متناسب با نیروی دست انسان ساخته شده اند و استحکام برشی و نیز ضریب اطمینان تنش مجاز نیز براساس طول در نظر گرفته شده و نیروی دست انسان می باشد. هنگامی که طول دسته ی آچار با لوله یا وسیله دیگری افزایش می یابد و یا با وارد کردن ضربه باعث افزایش نیروی وارد به آچار می شود افزایش نیروی حاصله در ضریب اطمینان ساخت آچار محاسبه نشده است بنابراین سبب شکستگی آچار می گردد.



شکل ۹-۵



شکل ۱۰-۵



## تمرین

- ۱- تنش را تعریف کنید.
- ۲- اختلاف تنش کششی با تنش فشاری در چیست؟
- ۳- کرنش یا تغییر طول نسبی را تعریف کنید.
- ۴- ضریب اطمینان چیست و اندازه آن به چه چیزهایی بستگی دارد؟
- \* ۵- افزایش طول کل یک میله فولادی به طول ۲۱ سانتی متر را تعیین کنید. تنش کششی مساوی  $150 \times 10^6$  نیوتن بر مترمربع می باشد.
- \* ۶- در لحظه معینی از مرحله قدرت در یک موتور تک سیلندر به قطر سیلندر  $76/5 \text{ mm}$ ، فشار بالای پیستون  $2 \text{ MN/m}^2$  است تنش حاصل در هریک از ۴ عدد پیچ سرسیلندر را حساب کنید. کمترین قطر هریک از پیچ ها  $9 \text{ mm}$  است.
- ۷- اگر نیروی فشاری وارد بر ساق وسط اتصال سه نقطه تراکتوری در یک لحظه  $30 \text{ kN}$  باشد در صورتی که ضریب اطمینان ۴ و استحکام برشی فلز بین رابط ساق وسط تراکتور  $360 \text{ MN/m}^2$  باشد، قطر مناسب بین را حساب کنید.

## توان در موتور و تراکتور

### توان

توان یا قدرت، سرعت انجام کار را نشان داده و عبارت از کار انجام شده در واحد زمان است. اگر  $W$  مقدار کار انجام شده در زمان  $t$  باشد، در نتیجه توان مصرف شده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$P = \frac{W}{t} \Rightarrow P = \frac{\text{کار انجام شده}}{\text{زمان انجام کار}} \quad (6-1)$$

رابطه زیر شکل دیگر محاسبه توان می باشد.

$$P = F \times v \quad (6-2)$$

$P$  = توان متوسط دستگاه بر حسب وات

$W$  = کار انجام شده بر حسب ژول

$F$  = نیروی وارد بر جسم بر حسب نیوتن

$t$  = زمان انجام کار بر حسب ثانیه

$v$  = سرعت بر حسب متر بر ثانیه

واحد توان در سیستم بین المللی وات ( $W$ ) می باشد. یک وات عبارت است از توانی که برای جابه جایی جسمی به وزن یک نیوتن به فاصله یک متر در مدت زمان یک ثانیه مورد نیاز است. یک نیوتون ( $N$ ) نیرویی است که اگر به یک جسم با جرم یک کیلوگرم اعمال شود آن جسم شتابی معادل ۱ متر بر مجذور ثانیه حرکت می کند.

$$1 \text{ نیوتون } (N) = 1 \times 1 \left( \frac{m}{s^2} \right) \times (kg)$$

$$1 \text{ وات } (W) = \frac{1 \times (m) \times (N)}{(s)}$$

برای سنجش توان از واحدهای دیگری مثل اسب بخار ( $hp$ ) یا کیلووات ( $kW$ ) نیز استفاده

می شود. برای تبدیل کیلووات به اسب بخار و برعکس، از ضرایب تبدیل زیر استفاده می شود:

$$1\text{ kW} = 1/36\text{ hp}$$

$$1\text{ hp} = 0/736\text{ kW} = 736\text{ W}$$

مثال: سیستم هیدرولیک تراکتوری جسمی را به وزن  $2400\text{ kg}$  که به اتصال سه نقطه آن وصل بود در مدت ۳ ثانیه به ارتفاع  $60\text{ cm}$  بالا می‌برد. توان مصرفی را برحسب کیلووات حساب کنید.  
حل:

$$F = 2400\text{ kgf} = 2400 \times 9/8 = 23520\text{ N}$$

$$W = F \times d = 23520 \times 0/6\text{ m} = 14112\text{ J}$$

$$P = \frac{W}{t} = \frac{14112}{3} = 4704\text{ W} = 4/704\text{ kW}$$

توان مکانیکی به دو نوع بروز می‌کند. توان خطی زمانی است که اعمال نیرو سبب تولید سرعت خطی می‌گردد و توان دورانی در اجسام در حال چرخش بروز می‌کند. به هر حال هر دو شکل این توان از رابطه زیر پیروی می‌کنند.

$$\text{توان} = \frac{\text{فاصله} \times \text{نیرو}}{\text{زمان}}$$

مثال: نیروی  $100\text{ N}$  با سرعت  $4\text{ m/s}$  اعمال می‌گردد. توان مورد نیاز را محاسبه نمایید.

$$100(\text{N}) \times 4) \frac{\text{m}}{\text{s}} = 400\text{ W}$$

برای محاسبه توان دورانی نیز از رابطه (۶-۱) استفاده می‌گردد.

نیروی وارد بر انتهای آزاد بازوی دوران، در یک دور چرخش به اندازه محیط دایره دوران را طی می‌کند این محیط برابر است با  $2\pi r$  که  $r$  شعاع بازوی دوران است حال وقتی گفته می‌شود متحرکی فرضاً  $100$  دور در دقیقه می‌گردد یعنی در یک دقیقه  $100$  بار به اندازه محیط دایره دوران طی می‌شود. با ضرب کردن سرعت دورانی در نیروی وارده فرمول اصلی توان دورانی به دست می‌آید.

$$\text{سرعت دورانی} \times \text{محیط دوران} \times \text{نیرو} = \text{توان دورانی}$$

$$P = F \cdot \pi \cdot d \cdot n \quad (6-3)$$

که در آن :

$$P = \text{توان بر حسب وات}$$

$$F = \text{نیرو بر حسب نیوتن}$$



$d = \text{قطر دایره دوران بر حسب متر}$

$n = \text{سرعت دورانی (دور در ثانیه)}$

مثال: اگر تسمه‌ای، نیروی مماس  $F$  برابر  $N 100$  روی چرخ تسمه‌ای به شعاع  $R$  به مقدار  $254/0$  با سرعت  $150$  دور در دقیقه وارد نماید، توان دورانی چرخ تسمه را در سیستم SI به دست آورید.  
حل: تبدیل دور بر دقیقه به دور بر ثانیه

$$\frac{150}{60} = \frac{2.5}{s} \quad \text{سرعت دورانی} \times \text{محیط دوران} \times \text{نیرو} = \text{توان دورانی}$$
$$= 100 \times 2\pi \times 0.254 \times 2.5 \approx 400 \text{ W}$$

توان خطی مثال فوق با توجه به این که نیروی وارد شده توسط تسمه بیانگر یک نیروی کششی در تسمه است که به صورت خطی بین دو چرخ تسمه حرکت می‌کند و توان را منتقل می‌کند. بنابراین سرعت خطی تسمه یعنی مسافت طی شده در واحد زمان برابر  $\frac{2\pi \times d}{s} \times 2.5$  یا  $4 \text{ m/s}$  است. با کاربرد دستور توان خطی

$$\text{توان} = \frac{\text{فاصله} \times \text{نیرو}}{\text{زمان}} = \frac{100 \times 4}{1} = 400 \text{ W}$$

## ۶-۱- توان موتور

نیروی دورانی میل‌لنگ که از انرژی گاز محترق شده بر روی پیستون و انتقال آن به دسته پیستون و میل‌لنگ حاصل می‌شود، تابع مقدار گازی است که به داخل سیلندر هدایت می‌شود و لذا دور میل‌لنگ متناسب با آن تغییر می‌کند. بنابراین در دورهای مختلف میل‌لنگ، توان موتور نیز تغییر خواهد کرد و به همین دلیل در یک دور ثابت از موتور می‌توان توان را محاسبه نمود.

۶-۱-۱- توان داخلی موتور: توان داخلی موتور عبارت است از آن مقدار انرژی حاصل از سوخت حجم معینی از گاز که در واحد زمان به پیستون‌های یک موتور در دور ثابت وارد می‌شود.

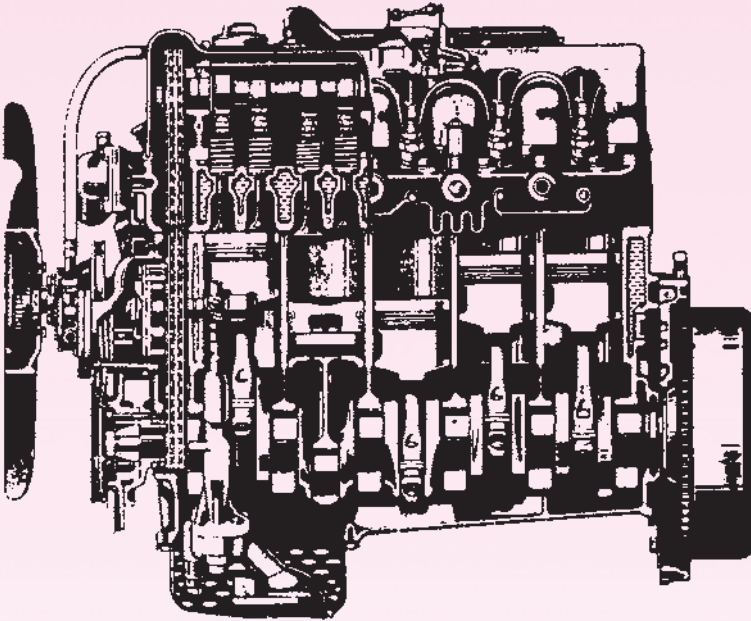
۶-۱-۲- توان مفید: توان مفید عبارت از آن مقدار توانی است که در دور مشخص از میل‌لنگ یا چرخ‌لنگر می‌توان گرفت.

۶-۱-۳- توان مصرفی موتور: توان مصرفی موتور عبارت است از مقدار توانی که برای غلبه بر اصطکاک یاتاقان‌ها، فشار فن‌های سوپاپ‌ها و تغییر جهت حرکت پیستون‌ها و غیره در دور ثابت میل‌لنگ مصرف می‌شود.



۴-۱-۶- سطح دهانه سیلندر (سطح پیستون): سطح دهانه سیلندر موتورها معمولاً دایره‌ای شکل بوده و از فرمول زیر می‌توان حساب نمود:

$$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \quad (۴-۶)$$



شکل ۱-۶

که در آن

$d$  = قطر دهانه سیلندر برحسب سانتی متر

$A$  = سطح دهانه سیلندر برحسب سانتی متر مربع می‌باشد.

۵-۱-۶- حجم جابه‌جایی یا حجم مفید سیلندر: فضای داخل سیلندر در

محدوده حرکت پیستون (بین نقطه مرگ بالا و نقطه مرگ پایین) را حجم جابه‌جایی یا حجم مفید سیلندر گویند.

$$V_h = A \cdot S \quad (۵-۶)$$

$S$  = کورس پیستون برحسب سانتی متر

$V_h$  = حجم مفید یک سیلندر برحسب سانتی متر مکعب است.

۶-۱-۶- حجم مفید سیلندره‌های یک موتور: عبارت است از مجموع حجم

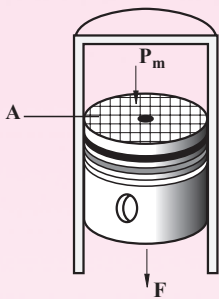
مفید سیلندره‌های یک موتور که مقدار آن برحسب سانتی متر مکعب سنجیده می‌شود.

$$V_H = V_h \cdot k \quad (۶-۶)$$

$V_H$  حجم مفید سیلندره‌های یک موتور برحسب سانتی متر مکعب یا لیتر و  $k$  تعداد

سیلندرها می‌باشد.

۶-۱-۷- فشار متوسط احتراق روی پیستون: فشار متوسط احتراق عبارت



شکل ۶-۲

است از معدل فشارهای اندازه‌گیری شده در طول کورس از شروع تا خاتمه احتراق. فشار متوسط احتراق همان نیرویی را به میل‌لنگ در تمام کورس پیستون خواهد داد که فشار متغیر احتراق می‌دهد. یعنی لحظه‌ای که احتراق صورت می‌گیرد فشار گاز روی پیستون زیاد است و هرچه پیستون پایین‌تر رود در اثر ازدیاد حجم از فشار احتراق کاسته می‌گردد تا وقتی که سوپاپ دود باز شود که در این لحظه فشار احتراق پایین می‌آید و نیروی وارد بر پیستون از طرف گاز کاهش یافته، توان قابل ملاحظه‌ای ایجاد نمی‌کند.

بنابراین به‌جای فشار متغیر از فشار متوسط احتراق در محاسبات استفاده می‌کنند فشار متوسط با  $P_m$  نشان داده شده و معمولاً برحسب نیوتن بر سانتی متر مربع سنجیده می‌شود.

۶-۱-۸- نیروی مؤثر احتراق روی پیستون (نیروی متوسط احتراق):

نیروی متوسط یا نیروی مؤثر احتراق روی پیستون عبارت است از حاصل ضرب مساحت دهانه سیلندر در فشار متوسط احتراق.

$$F = A \cdot P_m \quad (۶-۷)$$

طبق رابطه ۶-۷،  $F$  نیروی مؤثر احتراق تابع فشار متوسط احتراق می‌باشد. لذا مقدار آن در طول کورس، ثابت در نظر گرفته می‌شود.

۶-۱-۹- کار یک پیستون: کار یک پیستون عبارت است از حاصل ضرب

نیروی متوسط احتراق در کورس پیستون.

$$W = F \cdot S \quad (۶-۸)$$

W کار پیستون بر حسب نیوتن متر و S کورس پیستون بر حسب متر می باشد.  
 ۱۰-۱-۶- سرعت محیطی میل لنگ: سرعت محیطی میل لنگ در دور ثابت عبارت خواهد بود از مسافتی که یاتاقان متحرک در واحد زمان طی می کند. محیط یک دور گردش یاتاقان متحرک از رابطه زیر به دست می آید.

$$U = D \cdot \pi \quad (۹-۶)$$

لذا سرعت محیطی میل لنگ نسبت به واحد زمان طبق رابطه زیر خواهد بود.

$$V_{(m/s)} = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{۶۰} \quad (۱۰-۶)$$

V سرعت محیطی میل لنگ بر حسب متر بر ثانیه، n تعداد دور ثابت میل لنگ در دقیقه و D قطر میل لنگ بر حسب متر می باشد (قطر میل لنگ برابر کورس پیستون و دو برابر شعاع میل لنگ است  $D = S = 2R$ ).

۱۱-۱-۶- سرعت متوسط پیستون: متوسط سرعت پیستون در نقاط مختلف سیلندر در دور ثابت میل لنگ را سرعت متوسط پیستون نامند. برای تعیین سرعت متوسط پیستون، میل لنگ موتور را با دور ثابت در نظر می گیریم. می دانیم پیستون توسط دسته پیستون به میل لنگ متصل شده است. در این حال سرعت پیستون متغیر خواهد بود. یعنی پیستون از بالاترین نقطه در سیلندر شروع به حرکت می کند و تقریباً در وسط کورس به ماکزیمم می رسد و بعد از آن سرعت سیر نزولی داشته و در پایین ترین نقطه مسیر حرکت، در سیلندر به صفر می رسد.

چنانچه دور میل لنگ ثابت (n دور در دقیقه) باشد، سرعت متوسط پیستون از رابطه زیر به دست می آید:

$$V_{m(m/s)} = \frac{2S \cdot n}{۶۰} = \frac{S \cdot n}{۳۰} \quad (۱۱-۶)$$

$$V_m = \text{سرعت متوسط پیستون بر حسب متر بر ثانیه}$$

$$n = \text{تعداد دور میل لنگ در دقیقه}$$

$$S = \text{کورس پیستون بر حسب متر}$$

۱۲-۱-۶- محاسبه توان داخلی موتور: برای محاسبه توان داخلی موتور چهارزمانه یک سیلندر که تنها از چهار حالت، یک حالت کار مفید می‌باشد از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$P_i (\text{Nm} / \text{s}) = \frac{F \cdot V_m}{4} \quad (6-12)$$

در این رابطه  $V_m$  سرعت متوسط پیستون برحسب متر بر ثانیه،  $F$  نیروی مؤثر احتراق برحسب نیوتن و  $P_i$  توان داخلی موتور برحسب نیوتن متر بر ثانیه یا وات ( $W$ ) می‌باشد.

$$P_i (\text{Nm} / \text{s}) = \frac{F \cdot V_m \cdot k}{4} \quad (6-13)$$

که در آن،  $k$  تعداد سیلندر موتور می‌باشد.

با جاگذاری روابط ۶-۷ و ۶-۱۱ در رابطه فوق، توان داخلی موتور برای موتورهای چهارزمانه خواهد شد:

$$P_i = \frac{P_m (\text{N} / \text{cm}^2) \times S(\text{m}) \times A(\text{cm}^2) \times n(\text{rpm}) \times K}{30 \times 4} \quad (6-14)$$

با توجه به  $1 \text{ N} / \text{cm}^2 = 1 \text{ bar}$

$1 \text{ cm}^3 = 1000 \text{ lit}$

و

$$A(\text{cm}^2) \times S(\text{cm}) \times k = V_H(\text{cm}^3)$$

خواهیم داشت:

$$P_i (\text{kW}) = \frac{P_m (\text{bar}) \times V_H(\text{cm}^3) \times n_{\text{RPM}}}{12000 \times 100} = \frac{P_m (\text{bar}) \times V_H(\text{lit}) \times n_{\text{rpm}}}{1200}$$

۱۳-۱-۶- تبدیل توان به واحدهای مختلف: در زیر نحوه تبدیل واحدهای مختلف توان به یکدیگر آمده است.

$$(W) \text{ وات } 1000 = 1 \text{ کیلووات (kW)}$$

$$1 \text{ hp} = 746 \text{ W (اسب بخار انگلیسی)}$$

$$1 \text{ Ps} = 736 \text{ W (اسب بخار متریک)}$$

۱- بار یک واحد متداول فشار است.

۲- واحد توان (آلمان)  $\text{Pferde Stärke}$  برابر با ۷۳۵/۴۹۸۷۵ وات

مثال: توان موتوری ۲۵kW می‌باشد توان این موتور را به وات، اسب بخار انگلیسی و اسب بخار متریک تبدیل نمایید.

$$۲۵ \frac{kW}{۱} \times \frac{۱۰۰۰W}{kW} = ۲۵۰۰۰W$$

$$۲۵ \frac{kW}{۱} \times \frac{۱۰۰۰W}{kW} \times \frac{hp}{۷۴۶W} = ۳۳/۵hp$$

$$۲۵ \frac{kW}{۱} \times \frac{۱۰۰۰W}{kW} = \frac{Ps}{۷۳۶W} ۳۴Ps$$

۱۴-۱-۶- راندمان مکانیکی: راندمان مکانیکی موتور عبارت است از نسبت توان مفید به توان داخلی که معمولاً در موتورهای بنزینی بین ۸۰٪ تا ۹۲٪ و در موتورهای دیزلی بین ۷۵٪ تا ۸۶٪ می‌باشد.

$$\eta_m = \frac{P_w}{P_i} \quad (۶-۱۵)$$

که در آن  $P_w$  توان مفید و  $P_i$  توان داخلی موتور و  $\eta_m$  راندمان مکانیکی موتور می‌باشد.  
۱۵-۱-۶- توان لیتری یا قدرت حجمی موتور: توان حجمی موتور عبارت است از نسبت توان مفید به حجم مفید سیلندرها یک موتور

$$P_H = \frac{P_w}{V_H} \quad (۶-۱۶)$$

که در آن  $P_w$  توان مفید موتور برحسب کیلووات،  $V_H$  حجم مفید سیلندرها یک موتور برحسب لیتر و  $P_H$  توان حجمی برحسب کیلووات بر لیتر است.

۱۶-۱-۶- توان وزنی موتور: توان وزنی عبارت است از نسبت توان مفید موتور به وزن خالص آن (بدون آب و روغن)

$$P_G = \frac{P_w}{G} \quad (۶-۱۷)$$

که در آن  $G$  وزن خالص موتور برحسب کیلوگرم و  $P_G$  توان وزنی برحسب کیلووات بر کیلوگرم می‌باشد.

۱- در برخی از منابع  $P_e$  نیز ذکر شده است.

۱۷-۱-۶- محاسبه گشتاور موتور: گشتاور موتور عبارت است از نیروی محیطی میل لنگ ضرب در شعاع لنگ که به صورت زیر می توان حساب کرد.

$$M = F \times R \quad (۶-۱۸)$$

از طرفی قدرت مفیدی که از میل لنگ به دست می آید برابر است با:

$$P_w = F \times V \quad (۶-۱۹)$$

و یا

$$P_w = \frac{F \times V}{۱۰۰۰} \quad (۶-۲۰)$$

که در آن  $V$  سرعت محیطی لنگ و  $F$  نیروی محیطی لنگ است چون  $V = \frac{2R\pi n}{۶۰}$  پس خواهیم داشت:

$$P_w(kW) = \frac{F(N) \times \frac{2R(m)\pi n(rpm)}{۶۰}}{۱۰۰۰} = \frac{M \times n(rpm) \times 2\pi}{۶۰۰۰۰} \approx \frac{Mn(rpm)}{۹۵۵۰} \quad (۶-۲۱)$$

و یا

$$M = \frac{P_w(kW) \times ۹۵۵۰}{n(rpm)} \quad (۶-۲۲)$$

۱۸-۱-۶- توان وزنی و حجمی: از فرمول هایی که ذکر شد مشخص می شود هرچه این قدرت ها بیشتر باشد نشان دهنده طرح خوب موتور با مشخصات عالی می باشد. مقادیر زیر حدود این قدرت ها را برای برخی از موتورهای دیزلی و بنزینی نشان می دهد.

نوع موتور	$P_H$ kW / Lit	$P_G$ kw / kg.
موتورهای بنزینی سواری	۲۵ تا ۵۰	۳ تا ۴
موتورهای دیزل سواری	۱۸ تا ۲۵	۵ تا ۶/۵
موتورهای دیزل باری	۱۸ تا ۲۸	۵/۵ تا ۹/۵

۱۹-۱-۶- تعیین نسبت تراکم موتور: نسبت تراکم موتور عبارت است از نسبت حجم جابه جایی پیستون و فضای تراکم به فضای احتراق موتور.