# فصل پنجم

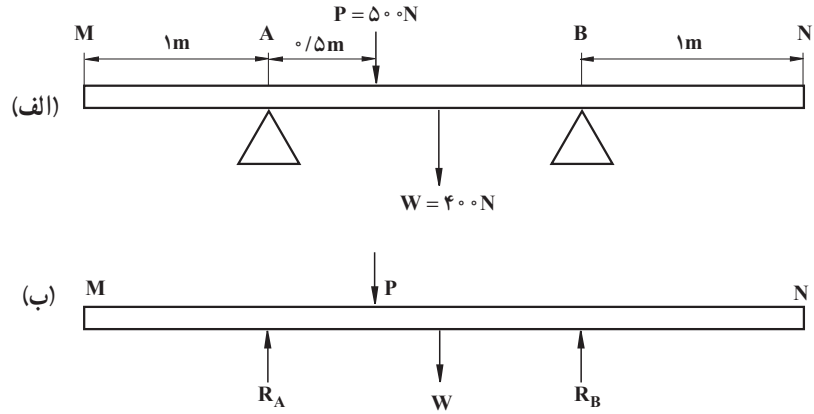
# مقاومت مصالح

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. به‌عنوان مثال سقف یک ساختمان باید به‌قدرکافی 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 به‌قدر 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.

## ۱ــ۵ــ نیروهای وارد بر اجسام

مسئله اصلی در مقاومت مصالح بررسی مقاومت داخلی و تغییر شکل اجسام، تحت‌اثر بارهای خارجی است. این امر مستلزم مطالعه ماهیت نیروهایی است که در داخل جسم به‌وجود 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 موردنظر 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 ۴۰۰N درنظر بگیرید که مانند شکل ۱ــ۵ــ الف روی تکیه‌گاه A و B قرار گرفته و بار ۵۰۰ نیوتنی در نقطه نشان داده شده در شکل بر آن وارد می‌شود. ترسیمه آزاد الوار فوق در شکل ۱ــ۵ــ ب نشان

داده شده است.

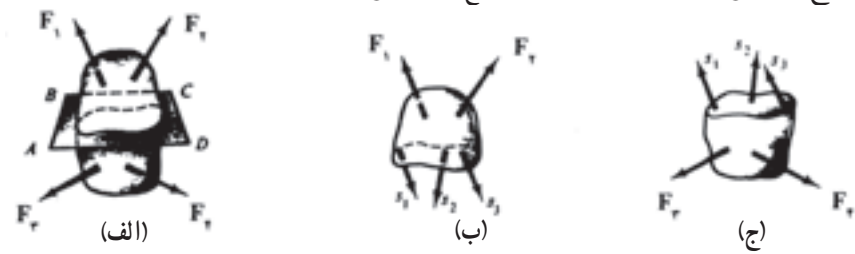



**شکل ۱ــ ۵ ــ الف ــ الواروی تکیه‌گاه، ب ــ ترسیمه آزاد الوار**

نیروی وزن معمولاً در اجسام نشان داده می‌شود. این نیرو به همراه نیروهای عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها ($R_A$ و $R_B$) و نیروی P به‌عنوان نیروهای خارجی محسوب می‌شوند.

جسم نشان داده شده در شکل ۲ــ۵ــ الف را درنظر بگیرید که تحت اثر نیروهای $F_1$ و $F_2$ و $F_3$ و $F_4$ می‌باشد.

اگر این جسم به‌صورت 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، به‌طوری که جسم کاملاً به دو قسمت مجزا تقسیم شود. نتیجه این عمل در شکل‌های ۲ــ۵ــ ب و ۲ــ۵ــ ج دیده می‌شود. این عمل روش مقطع نامیده می‌شود.




**شکل ۲ــ ۵ ــ 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 این‌رو می‌توان نتیجه

گرفت : نیروهای خارجی مؤثر در یک طرف هر مقطع دلخواه، با نیروهای به‌وجود آمده در سطح قطع شده (که نیروهای مقاوم داخلی خوانده می‌شوند) درحال تعادل هستند. به‌عبارت دیگر نیروهای مقاوم داخلی با نیروهای خارجی در حال تعادل هستند.

## ۲ــ۵ــ 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 می‌گیرند. هنگامی که این نیروهای مقاوم وارد عمل می‌شوند، گفته می‌شود که جسم تحت تنش قرار گرفته است. هرچه نیروهای خارجی وارد بر جسم افزایش پیدا کند تنش وارد بر جسم نیز زیادتر می‌شود. تنش را می‌توان 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 می‌دهد به‌دست می‌آید، بنابراین اگر :

! = شدت نیروی مقاوم داخلی (تنش) $(N / m^2)$

F= نیرو یا بار وارد شده (N)

A= سطح مقطع جسم $(m^2)$

آن‌گاه داریم :

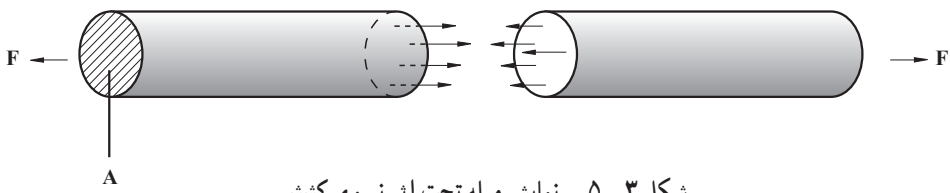
$$= . \frac{F}{A} \qquad (۵ــ۱)$$

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 می‌گیرد. بعضی اوقات مناسب‌تر است که تنش برحسب کیلونیوتن بر متر مربع $(kN / m^2)$ بیان شود. به واحد نیوتن بر متر مربع، پاسکال (Pa) نیز گفته می‌شود $(۱N / m^2 = ۱Pa)$ .

به‌طور کلی، می‌توان تنش را به دو دسته، تنش قائم و تنش برشی تقسیم کرد. تنش قائم یا به‌صورت کششی است یا فشاری. علامت تنش کششی مثبت و علامت تنش فشاری منفی می‌باشد. در ادامه هریک از تنش‌های فوق توضیح داده شده‌اند.

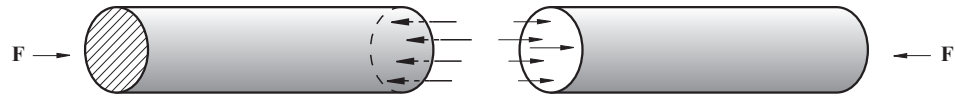
**۱ــ۲ــ ۵ ــ تنش کششی:** تنش کششی موقعی به‌وجود می‌آید که به جسم بار یا نیروی کششی وارد شود. شکل ۳ــ ۵ میله‌ای را نشان می‌دهد که تحت اثر نیروی کششی قرارگرفته و در آن تنش کششی حاصل شده است. معمولاً بار یا نیروی کششی وارد شده بر جسم تمایل دارد که طول

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 ۳ــ ۵ ــ نمایش میله تحت اثر نیروی کششی**

**۲ــ۲ــ ۵ ــ تنش فشاری:** تنش فشاری موقعی به‌وجود 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 ۴ــ 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 ۴ــ ۵ ــ 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 ۳ــ ۵ برابر با ۱۶mm و نیروی کششی اعمال شده بر آن ۴/۴kN باشد تنش کششی وارد شده به میله راحساب کنید. هم‌چنین اگر نیروی اعمال‌شده مطابق شکل ۴ــ ۵ به‌صورت فشاری اعمال شود تنش وارده را محاسبه کنید.

**حل:**

از رابطه ۱ــ ۵ داریم :

$$F = ۴/۴kN = ۴۴۰۰N$$

$D = ۱۶mm = ۰/۰۱۶m$

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

$A = \frac{\pi d^۲}{۴} \Rightarrow A \approx ۰/۰۰۰۲m^۲$

اندازه تنش کششی برابر خواهد بود با :

$= .+ \ \frac{۴۴۰۰}{۰/۰۰۰۲} = +۲۲۰۰۰۰۰۰\frac{N}{m^۲} = +۲۲۰۰۰kPa$

و به همین ترتیب اندازه تنش فشاری برابر است با : $= .- \ ۲۲۰۰۰kPa$

## ۳ــ۵ــ تغییر طول نسبی در کشش و فشار (کرنش)

وقتی جسمی در معرض تنش قرار می‌گیرد، در آن تغییر شکل به‌وجود می‌آید، به‌عبارت دیگر در شکل و اندازه جسم تحت اثر تنش، تغییر حاصل می‌شود. این تغییر شکل که دراثر تنش به‌وجود 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 ــ ۵ ــ الف). به همین ترتیب تنش فشاری در یک جسم باعث تغییر طول فشاری شده و طول آن را کم می‌کند (شکل ۵ ــ ۵ ــ ب). منظور از تغییر طول نسبی ایجاد شده در یک جسم، نسبت تغییر طول به‌وجود آمده بر طول اولیه آن می‌باشد که کرنش نامیده می‌شود و با . نشان داده می‌شود :

$= . \ \frac{x}{l}$ (۵ ــ۲)

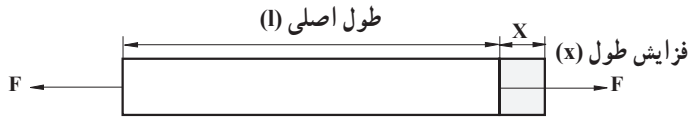
که در آن :

. = تغییر طول نسبی کششی یا فشاری

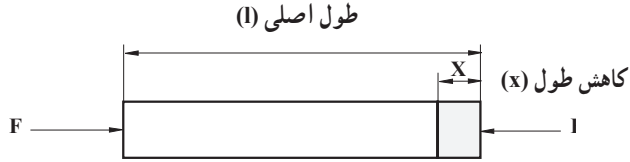
x = افزایش یا کاهش طول (m)

همان‌گونه که دیده می‌شود چون . از تقسیم دو کمیت همانند به‌دست آمده است بنابراین فاقد واحد است.

l = طول اولیه (m)




(الف) تغییر طول کششی




(ب) تغییر طول فشاری

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

## ۴ــ۵ــ رابطه بین تنش و تغییر طول نسبی

در مقاومت مصالح مفهوم قابلیت ارتجاعی اهمیت خاصی دارد. یک قطعه کش را درنظر بگیرید که از دو طرف قدری آن را می‌کشیم. در این حالت طول قطعه کش زیاد می‌شود. چنانچه یک طرف آن را رها سازیم کش به حالت اولیه خود برمی‌گردد. این خاصیت در اجسام مختلف به مقدار متفاوتی وجود دارد که به آن قابلیت ارتجاعی (یا خاصیت الاستیسیته) می‌گویند. قابلیت ارتجاعی (الاستیک) عبارت است از خاصیتی در جسم که وقتی نیروهای وارده به آن برداشته شدند، جسم به وضع و اندازه اولیه خود برمی‌گردد. هرگاه جسم پس از این که تمام نیروهای وارده به آن برداشته شدند، به وضع اولیه خود برگشت نکند، می‌گویند که در جسم تغییر طول دائمی (پلاستیک) ایجاد شده است. این وضع در یک جسم ارتجاعی نیز ممکن است پدید آید به شرط آن‌که نیروی وارد 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 می‌کند به نام قانون هوک معروف بوده و به‌صورت زیر بیان می‌شود :

«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 می‌توان دریافت که :

مقدار ثابت × تغییر طول نسبی = تنش

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

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

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.

$$= . \ E \times . \qquad (۵ _ ۳)$$

که در آن :

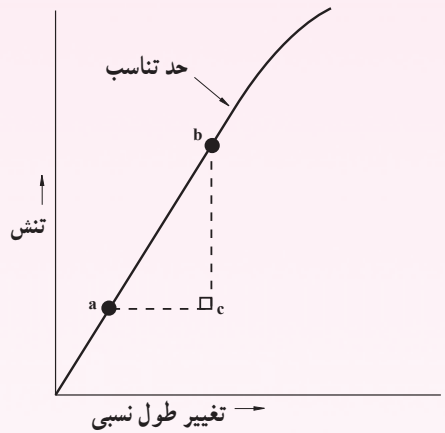
E= ضریب الاستیسیته (ضریب ارتجاعی) برحسب نیوتن بر مترمربع $(N / m^2)$

! = تنش برحسب 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 به‌دست می‌آید که از مرکز مختصات می‌گذرد (شکل ۶ ــ ۵).




شکل ۶ ــ ۵ ــ 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 ۱ــ ۵ داده شده است.

**جدول ۱ــ۵ــ مقادیر تقریبی جدول یانگ برای چند فلز مختلف**

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

## ۵ ــ ۵ ــ استحکام کششی

استحکام کششی ($\sigma_u$!) یک فلز عبارت است از بیشترین تنشی که فلز قبل از پاره‌شدن (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 به‌دست می‌آید. از این رو می‌توان نوشت :

$$\sigma_u \text{ (استحکام کششی)} = \frac{F_u \text{ (بیشترین بار وارده)}}{A \text{ (سطح مقطع اصلی یا اولیه)}} \qquad (۵ ــ ۴)$$

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

## ۶ ــ ۵ ــ 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 به‌دست آوردن تنش مجاز در کار باید استحکام کشش را به عدد مناسبی که به آن ضریب اطمینان می‌گویند، تقسیم نمایند یعنی :

$$\sigma_{al} \text{ (تنش مجاز در کار)} = \frac{\sigma_u \text{ (استحکام کششی)}}{\text{S.F. (ضریب اطمینان)}} \qquad (۵ــ۵)$$

اگر نیروهای وارد بر ساختمان یا ماشین ثابت (استاتیک) باشند، ضریب $n = ۲$ 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 به‌کار 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* $۴۲۰MN/m^۲$ و سطح مقطع $۳۰۰mm^۲$ موجود است. اگر حداکثر بار کششی مجاز $۳۰kN$ باشد ضریب اطمینانی را که میله فولادی با آن کار می‌کند، حساب کنید.

$$!_u = ۴۲۰MPa = ۴۲۰\times۱۰^۶ \frac{N}{m^۲}$$

$$A = ۳۰۰mm^۲ = ۳۰۰\times۱۰^{-۶} m^۲$$

$$F_{al} = ۳۰kN = ۳۰\times۱۰^۳ N$$

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

$$!_{al} = \frac{F_{al}}{A}$$

$$!_{al} = \frac{۳۰\times۱۰^۳}{۳۰۰\times۱۰^{-۶}} = ۱۰۰\times۱۰^۶ \frac{N}{m^۲}$$

$$S.F. = \frac{!_u}{!_{al}} = \frac{۴۲۰\times۱۰^۶}{۱۰۰\times۱۰^۶} = ۴/۲$$ بدون بعد

در جدول ۲ــ ۵ مقادیر تنش مجاز در حالات مختلف بارگذاری برای چندفلز مختلف نشان داده شده است :

---

* $N/mm^۲ = MN/m^۲ = MPa$

**جدول ۲ــ۵ ــ مقادیر تنش مجاز در حالت استحکام کششی برای فلزات مختلف برحسب $N/mm^2$ (MPa)**

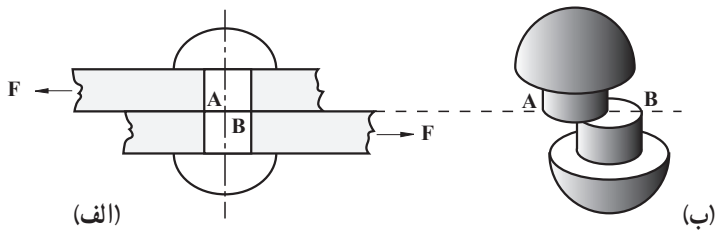
| فلز / حالت کار | فولاد آلیاژی نرم | فولاد آلیاژی سخت | فولاد نرم | فولاد سخت | چدن |
|---|---|---|---|---|---|
| بار آرام | ۴۵ ــ ۷۰ | ۶۵ ــ ۹۵ | ۲۰ــ۳۰ | ۴۰ــ ۵۰ | ۲۵ ــ ۵۰ |
| بار متغیر | ۶۵ ــ ۹۵ | ۹۰ــ۱۳۴ | ۴۰ــ ۶۰ | ۸۰ــ۱۰۰ | ۵۰ــ ۶۷ |
| بار متناوب | ۱۰۰ــ۱۵۰ | ۱۴۰ــ۲۱۰ | ۶۰ــ۹۰ | ۱۲۰ــ۱۵۰ | ۶۵ ــ 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 . ۱۲

## ۷ ــ ۵ ــ تنش برشی

تنش دیگری که ممکن است جسم تحت اثر آن قرار گیرد، تنش برشی نام دارد. تنش برشی به‌صورت 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.

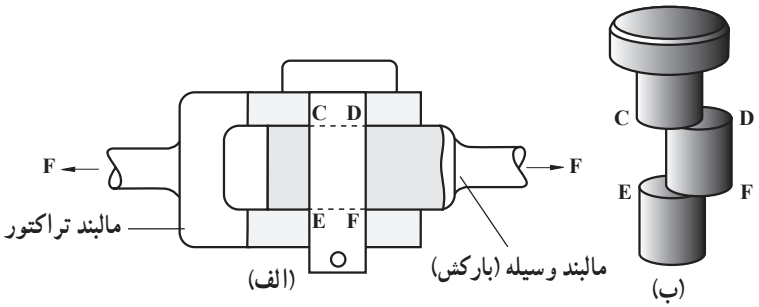
پرچی را مطابق شکل ۷ــ ۵ ــ الف درنظر بگیرید که دو صفحه را به هم وصل نموده و دو نیروی مساوی و مخالف F مطابق شکل به صفحات وارد شده است. این دو نیرو می‌خواهند پرچ را در مقطع AB که در شکل به‌صورت نقطه‌چین نشان داده شد، پاره کنند. به‌عبارت دیگر نیمه بالایی پرچ تمایل دارد که نسبت به نیمه پایینی آن مطابق شکل ۷ــ ۵ ــ 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 ۷ــ ۵ ــ 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 ــ ۵ ــ الف درنظر 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 پین در دو مقطع CD و EF که در شکل به‌صورت نقطه‌چین نشان داده شده، پاره شود. در این حالت میله سمت راست قسمت مرکزی پین را همراه با خود مطابق شکل ۸ ــ ۵ ــ ب به طرف راست حرکت می‌دهد. در چنین وضعیتی سطح مقطع مقاوم نیروی برشی مساوی دو برابر سطح مقطع پین می‌باشد (برش مرکب).




شکل ۸ ــ ۵ ــ نحوه اثر نیرو بر پین مالبند

تنش برشی از تقسیم نیروی برشی برسطح مقطعی که در مقابل برش مقاومت نشان می‌دهد، به‌دست می‌آید.

$$= . \frac{f}{A} \qquad (۵ــ۶)$$

. = تنش برشی $(N / m^۲)$

f= نیرو یا بار برشی (N)

A= سطح مقطع مقاوم برشی $(m^۲)$

**مثال:** اگر نیروی برشی وارد شده بر پین شکل ۸ ــ ۵ برابر ۴۵۳/۶۰ نیوتن باشد و تنش برشی مجاز به‌وسیله پین $۴۲۰kN / m^۲$ باشد قطر پین را حساب کنید.

**حل:** همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد پین مالبند فوق ممکن است در دو مقطع پاره شود لذا در رابطه ۶ــ ۵ مقدار A شامل هر دو سطح مقطع CD و EF خواهد بود.

$$A = A_{CD} + A_{EF} = \frac{\pi d^۲}{۴} + \frac{\pi d^۲}{۴} = \frac{۲\pi d^۲}{۴} = \frac{\pi d^۲}{۲}$$

d= قطر پین

$$= . \frac{F}{A} \Rightarrow A = \frac{F}{.} \Rightarrow \frac{\pi d^۲}{۲} = \frac{۴۵۳/۶۰}{۴۲۰۰۰۰}$$

قطر پین $\Rightarrow d = ۰/۰۲۶۲m$ یا $d = ۲/۶۲cm$

## ۸ ــ ۵ ــ 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 :

$$\text{(استحکام برشی)}_{u} = \frac{F_U \text{ (بیشترین بار)}}{A \text{ (سطح مقطع کلی که در مقابل برش مقاوم است)}} \qquad (۵ــ۷)$$

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

$$\text{(تنش برشی مجاز در کار)}_{al} = \frac{\text{(استحکام برشی)}_{u}}{\text{S.F (ضریب اطمینان)}} \qquad (۵ــ۸)$$

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

**جدول ۳ــ۵ــ استحکام برشی چند فلز مختلف**

| فلز | استحکام برشی $MN/m^2$ |
|---|---|
| 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 (گژن پین) توپر به قطر ۲۵mm درصورتی که بار وارد شده بر آن ۴۰kN باشد.

**حل:** سطح مقطع عرضی انگشتی $A = ۲x$ ، سطح مقطع کل که در مقابل برش مقاومت نشان می‌دهد.

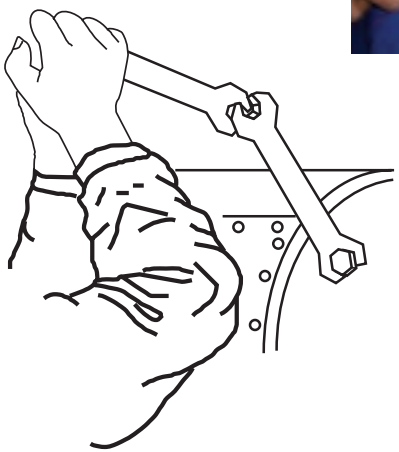
$$A = \frac{۲ \times \pi \times ۲۵^۲}{۴} = ۹۸۲mm^۲$$

$F = ۴۰kN = ۴۰۰۰۰N$ ، نیروی برشی یا بار برشی

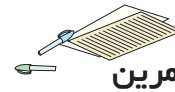
تنش برشی در انگشتی پیستون $= \frac{F}{A} = \frac{۴۰۰۰۰}{۹۸۲} = ۴۰/۷۴ N/mm^۲ = ۴۰/۷۴ MN/m^۲$

از مطالب گفته شده در مباحث تنش برشی و ضریب اطمینان و هم‌چنین در مبحث استحکام برشی می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که در هنگام استفاده از آچارهای مختلف به این نکته توجه شود که طول دسته آچارها متناسب با نیروی دست انسان ساخته شده‌اند و استحکام برشی و نیز ضریب اطمینان تنش مجاز نیز براساس طول در نظر گرفته شده و نیروی دست انسان می‌باشد. هنگامی که طول دسته‌ی آچار با لوله یا وسیله دیگری افزایش می‌یابد و یا با واردکردن ضربه باعث افزایش نیروی وارد به آچار می‌شود افزایش نیروی حاصله در ضریب اطمینان ساخت آچار محاسبه نشده است بنابراین سبب شکستگی آچار می‌گردد.

شکل ۹ــ ۵



شکل ۱۰ــ ۵



## تمرین

۱ــ تنش را تعریف کنید.

۲ــ اختلاف تنش کششی با تنش فشاری در چیست؟

۳ــ کرنش یا تغییر طول نسبی را تعریف کنید.

۴ــ ضریب اطمینان چیست و اندازه آن به چه چیزهایی بستگی دارد؟

* ۵ ــ افزایش طول کل یک میله فولادی به طول ۲۱سانتی‌متر را تعیین کنید. تنش کششی مساوی $۱۵\times۱۰^{۶}$ نیوتن بر مترمربع می‌باشد.

* ۶ ــ در لحظه معینی از مرحله قدرت در یک موتور تک سیلندر به قطر سیلندر ۷۶/۵mm، فشار بالای پیستون $۲MN/m^{۲}$ است تنش حاصل در هریک از ۴ عدد پیچ سرسیلندر را حساب کنید. کمترین قطر هریک از پیچ‌ها ۹mm است.

۷ــ اگر نیروی فشاری وارد بر ساق وسط اتصال سه نقطه تراکتوری در یک لحظه ۳۰kN باشد در صورتی که ضریب اطمینان ۴ و استحکام برشی فلز پین رابط ساق وسط تراکتور $۳۶۰MN/m^{۲}$ باشد، قطر مناسب پین را حساب کنید.

# فصل ششم

## 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 می‌شود :

$$\text{توان} = \frac{\text{کار انجام شده}}{\text{زمان انجام کار}} \Rightarrow P = \frac{W}{t} \qquad (۶_۱)$$

رابطه زیر شکل دیگر محاسبه توان می‌باشد.

$$P = F \times v \qquad (۶_۲)$$

P = توان متوسط دستگاه برحسب وات
W = کار انجام شده برحسب ژول
F = نیروی وارد بر جسم برحسب نیوتن
t = زمان انجام کار برحسب ثانیه
v = سرعت برحسب متر بر ثانیه

واحد توان در سیستم بین‌المللی وات (W) می‌باشد. یک وات عبارت است از توانی که برای جابه‌جایی جسمی به وزن یک نیوتن به فاصله یک متر در مدت زمان یک ثانیه موردنیاز 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 می‌کند.

$$\text{نیوتون (N)} = (\text{kg})۱ \times ۱ \left(\frac{m}{s^۲}\right).$$

$$\text{وات (W)} = \frac{(N)۱ \times (m)۱}{(s)۱}$$

برای سنجش توان از واحدهای دیگری مثل اسب بخار (hp) یا کیلووات (kW) نیز استفاده می‌شود. برای تبدیل کیلووات به اسب بخار و برعکس، از ضرایب تبدیل زیر استفاده می‌شود :

$$1kW = 1/36hp$$

$$1hp = 0/736kW = 736W$$

**مثال:** سیستم هیدرولیک تراکتوری جسمی را به وزن ۲۴۰۰ kg۴ که به اتصال سه نقطه آن وصل بود در مدت ۳ ثانیه به ارتفاع ۶۰ cm بالا می‌برد. توان مصرفی را برحسب کیلووات حساب کنید.

**حل:**

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

$$W = F \times d = 23520 \times 0/6m = 14112j$$

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

توان مکانیکی به‌دو 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. به‌هرحال هر دو شکل این توان از رابطه زیر پیروی می‌کنند.

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

**مثال:** نیروی ۱۰۰N با سرعت ۴m/s اعمال می‌گردد. توان موردنیاز را محاسبه نمایید.

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

برای محاسبه توان دورانی نیز از رابطه (۱ـ۶) 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 ۱۰۰ دور در دقیقه می‌گردد یعنی دریک دقیقه ۱۰۰ بار به‌اندازه محیط دایره دوران طی می‌شود. با ضرب کردن سرعت دورانی در نیروی وارده فرمول اصلی توان دورانی به‌دست می‌آید.

سرعت دورانی × محیط دوران × نیرو = توان دورانی

$$P = F.\pi.d.n \quad (6\text{ـ}3)$$

که در آن :

P = توان بر حسب وات

F = نیرو برحسب نیوتن

d = قطر دایره دوران برحسب متر

n = سرعت دورانی (دور در ثانیه)

**مثال:** اگر تسمه‌ای، نیروی مماس F برابر ۱۰۰N روی چرخ تسمه‌ای به شعاع R به‌مقدار ۰/۲۵۴ با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه وارد نماید، توان دورانی چرخ تسمه را در سیستم SI به‌دست آورید.

**حل:** تبدیل دور بر دقیقه به دور بر ثانیه

$$\frac{۱۵۰}{۶۰} = ۲/۵ \frac{\text{دور}}{\text{s}}$$

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

$$= ۱۰۰ \times ۲\pi \times ۰/۲۵۴ \times ۲/۵ \approx ۴۰۰ \text{W}$$

توان خطی مثال فوق با توجه به این که نیروی وارد شده توسط تسمه بیانگر یک نیروی کششی در تسمه است که به‌صورت خطی بین دو چرخ تسمه حرکت می‌کند و توان را منتقل می‌کند. بنابراین سرعت خطی تسمه یعنی مسافت طی شده در واحد زمان برابر $\pi \times d \times ۲/۵ \frac{\text{دور}}{\text{s}}$ یا $۴ \text{m/s}$ است. با کاربرد دستور توان خطی

$$\text{توان} = \frac{\text{نیرو} \times \text{فاصله}}{\text{زمان}} = \frac{۱۰۰ \times ۴}{۱} = ۴۰۰ \text{ W}$$

## ۱ــ۶ ــ 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.

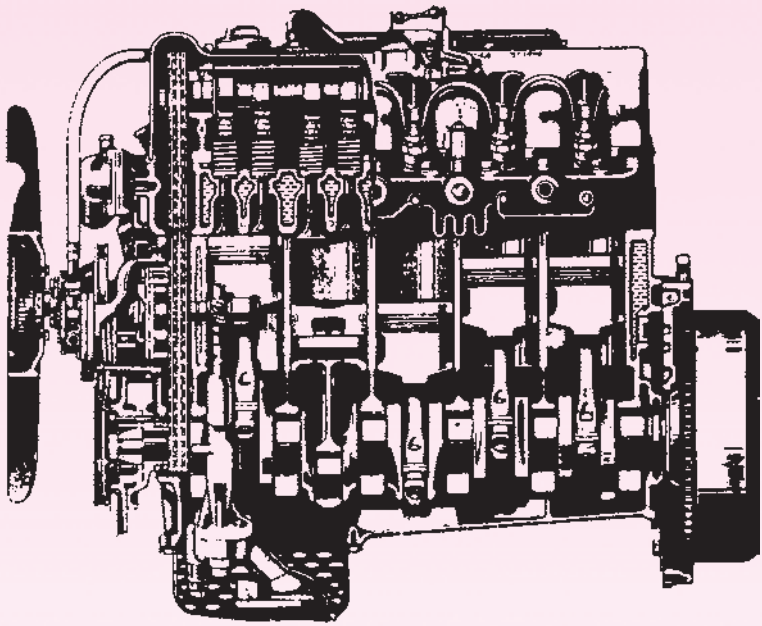
**۱ــ۱ــ۶ ــ توان داخلی موتور:** توان داخلی موتور عبارت است از آن مقدار انرژی حاصل از سوخت حجم معینی از گاز که در واحد زمان به پیستون‌های یک موتور در دور ثابت وارد می‌شود.

**۲ــ۱ــ۶ــ توان مفید:** توان مفید عبارت از آن مقدار توانی است که در دور مشخص از میل‌لنگ یا چرخ لنگر می‌توان گرفت.

**۳ــ۱ــ۶ــ توان مصرفی موتور:** توان مصرفی موتور عبارت است از مقدار توانی که برای غلبه بر اصطکاک یاتاقان‌ها، فشار فنرهای سوپاپ‌ها و تغییر جهت حرکت پیستون‌ها و غیره در دور ثابت میل‌لنگ مصرف می‌شود.

**۴ــ۱ــ۶ــ سطح دهانه سیلندر(سطح پیستون):** سطح دهانه سیلندر موتورها معمولاً دایره‌ای شکل بوده و از فرمول زیر می‌توان حساب نمود :

$$A = \frac{d^{۲}.\pi}{۴} \qquad (۶ــ۴)$$



شکل ۱ــ۶

که در آن

d = قطر دهانه سیلندر برحسب سانتی‌متر

A = سطح دهانه سیلندر برحسب سانتی‌متر مربع می‌باشد.

**۵ــ۱ــ۶ــ 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.

$$V_h = A.S \qquad (۶ــ۵)$$

S = کورس پیستون برحسب سانتی‌متر

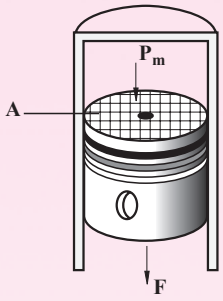
$V_h$ = حجم مفید یک سیلندر برحسب سانتی‌مترمکعب است.

**۶ــ۱ــ۶ــ حجم مفید سیلندرهای یک‌موتور:** عبارت است از مجموع حجم مفید سیلندرهای یک موتور که مقدار آن برحسب سانتی‌متر مکعب سنجیده می‌شود.

$$V_H = V_h . k \qquad (۶ــ۶)$$

$V_H$ حجم مفید سیلندرهای یک موتور برحسب سانتی‌متر مکعب یا لیتر و k تعداد سیلندرها می‌باشد.

**۷ــ۱ــ۶ــ فشار متوسط احتراق روی پیستون:** فشار متوسط احتراق عبارت 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 وقتی‌که 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.



شکل ۲ــ۶

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

**۸ــ۱ــ۶ــ نیروی مؤثر احتراق روی پیستون (نیروی متوسط احتراق):** نیروی متوسط یا نیروی مؤثر احتراق روی پیستون عبارت است از حاصل‌ضرب مساحت دهانه سیلندر در فشار متوسط احتراق.

$$F = A . P_m \qquad (۶ــ۷)$$

طبق رابطه ۶ــ۷، F نیروی مؤثر احتراق تابع فشار متوسط احتراق می‌باشد. لذا مقدار آن در طول کورس، ثابت درنظر گرفته می‌شود.

**۹ــ۱ــ۶ــ کار یک پیستون:** کار یک پیستون عبارت است از حاصل‌ضرب نیروی متوسط احتراق در کورس پیستون.

$$W = F . S \qquad (۶ــ۸)$$

W کار پیستون برحسب نیوتن متر و S کورس پیستون برحسب متر می‌باشد.

**۱۰ــ۱ــ۶ــ سرعت محیطی میل‌لنگ:** سرعت محیطی میل‌لنگ در دور ثابت عبارت خواهد بود از مسافتی که یاتاقان متحرک در واحد زمان طی می‌کند. محیط یک دور گردش یاتاقان متحرک از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$U = D.\pi \qquad (۶ــ۹)$$

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

$$V_{(m/s)} = \frac{D.\pi.n}{۶۰} \qquad (۶ــ۱۰)$$

V سرعت محیطی میل‌لنگ برحسب متر برثانیه، n تعداد دور ثابت میل‌لنگ در دقیقه و D قطر میل‌لنگ برحسب متر می‌باشد (قطر میل‌لنگ برابر کورس پیستون و دو برابر شعاع میل‌لنگ است $D = S = ۲R$).

**۱۱ــ۱ــ۶ــ سرعت متوسط پیستون:** متوسط سرعت پیستون در نقاط مختلف سیلندر در دور ثابت میل‌لنگ را سرعت متوسط پیستون نامند. برای تعیین سرعت متوسط پیستون، میل‌لنگ موتوری را با دور ثابت درنظر می‌گیریم. می‌دانیم پیستون توسط دسته‌پیستون به میل‌لنگ متصل شده است. در این حال سرعت پیستون متغیر خواهد بود. یعنی پیستون از بالاترین نقطه در سیلندر شروع به حرکت می‌کند و تقریباً در وسط کورس به ماکزیمم می‌رسد و بعد از آن سرعت سیر نزولی داشته و در پایین‌ترین نقطه مسیر حرکت، در سیلندر به صفر می‌رسد.

چنانچه دور میل‌لنگ ثابت (n دور در دقیقه) باشد، سرعت متوسط پیستون از رابطه زیر به‌دست می‌آید :

$$V_{m(m/s)} = \frac{۲S.n}{۶۰} = \frac{S.n}{۳۰} \qquad (۶ــ ۱۱)$$

$V_m$ = سرعت متوسط پیستون برحسب متر بر ثانیه

n = تعداد دور میل‌لنگ در دقیقه

S= کورس پیستون برحسب متر

**۱۲ــ۱ــ۶ــ محاسبه توان داخلی موتور:** برای محاسبه توان داخلی موتور چهارزمانه یک‌سیلندر که تنها از چهار حالت، یک حالت کار مفید می‌باشد از رابطه زیر استفاده می‌شود :

$$P_i(Nm/s) = \frac{F.V_m}{۴} \qquad (۶ــ۱۲)$$

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.

$$P_i(Nm/s) = \frac{F.V_m.k}{۴} \qquad (۶ــ۱۳)$$

که در آن، k تعداد سیلندر موتور می‌باشد.

با جاگذاری روابط ۶ــ۷ و ۶ــ۱۱ در رابطه فوق، توان داخلی موتور برای موتورهای چهارزمانه خواهد شد :

$$P_i = \frac{P_m(N/cm^۲)\times S(m)\times A(cm^۲)\times n(rpm)\times K}{۳۰\times ۴} \qquad (۶ــ۱۴)$$

با توجه به $۱N/cm^۲ \simeq ۱۰$ بار (bar)[۱]

$۱ \text{ لیتر (lit)} = ۱۰۰۰cm^۳$

و

$$A(cm^۲)\times S(cm)\times k = V_H(cm^۳)$$

خواهیم داشت :

$$P_i(kW) = \frac{P_m(bar)\times V_H(cm^۳)\times n_{RPM}}{۱۲۰۰۰\times ۱۰۰} = \frac{P_m(bar)\times V_H(lit)\times n_{rpm}}{۱۲۰۰}$$

**۱۳ــ۱ــ۶ــ تبدیل توان به واحدهای مختلف:** در زیر نحوه تبدیل واحدهای مختلف توان به یکدیگر آمده است.

$۱ \text{ کیلووات (kW)} = ۱۰۰۰ \text{ وات (W)}$

$۱hp = ۷۴۶ \text{ W}$ (اسب بخار انگلیسی)

$۱Ps = ۷۳۶ \text{ W}$ (اسب بخار متریک)[۲]

---

۱ــ بار یک واحد متداول فشار است.

۲ــ واحد توان (آلمان) 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.

تبدیل به وات $۲۵\frac{\cancel{kW}}{۱}\times\frac{۱۰۰۰W}{\cancel{kW}}=۲۵۰۰۰W$

تبدیل به اسب بخار انگلیسی $۲۵\frac{\cancel{kW}}{۱}\times\frac{۱۰۰۰W}{\cancel{kW}}\times\frac{hp}{۷۴۶\cancel{W}}=۳۳/۵hp$

تبدیل به اسب بخار متریک $۲۵\frac{\cancel{kW}}{۱}\times\frac{۱۰۰۰\cancel{W}}{\cancel{kW}}=\frac{Ps}{۷۳۶\cancel{W}}۳۴Ps$

**۱۴ــ۱ــ۶ــ 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.

$$\eta_m=\frac{P_w}{P_i}[1] \qquad (۶ــ۱۵)$$

که در آن $P_w$ توان مفید و $P_i$ توان داخلی موتور و $\eta_m$ راندمان مکانیکی موتور می‌باشد.

**۱۵ــ۱ــ۶ــ توان لیتری یا قدرت حجمی موتور:** توان حجمی موتور عبارت است از نسبت توان مفید به حجم مفید سیلندرهای یک موتور

$$P_H=\frac{P_w}{V_H} \qquad (۶ــ۱۶)$$

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

**۱۶ــ۱ــ۶ــ توان وزنی موتور:** توان وزنی عبارت است از نسبت توان مفید موتور به وزن خالص آن (بدون آب و روغن)

$$P_G=\frac{P_w}{G} \qquad (۶ــ۱۷)$$

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

---

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

**۱۷ــ۱ــ۶ــ محاسبه گشتاور موتور:** گشتاور موتور عبارت است از نیروی محیطی میل‌لنگ ضرب در شعاع لنگ که به‌صورت زیر می‌توان حساب کرد.

$$M = F \times R \qquad (۶\text{ــ}۱۸)$$

از طرفی قدرت مفیدی که از میل‌لنگ به‌دست می‌آید برابر است با :

$$P_w = F \times V \qquad (۶\text{ــ}۱۹)$$

و یا

$$P_w = \frac{F \times V}{۱۰۰۰} \qquad (۶\text{ــ}۲۰)$$

که در آن V سرعت محیطی لنگ و F نیروی محیطی لنگ است چون $V = \frac{۲R\pi n}{۶۰}$ پس خواهیم داشت :

$$P_w(kW) = \frac{F(N) \times \frac{۲R(m)\pi n_{(rpm)}}{۶۰}}{۱۰۰۰} = \frac{M \times n_{(rpm)} \times ۲\pi}{۶۰۰۰۰} \simeq \frac{Mn_{(rpm)}}{۹۵۵۰} \qquad (۶\text{ــ}۲۱)$$

و یا

$$M = \frac{P_w(kW) \times ۹۵۵۰}{n_{(rpm)}} \qquad (۶\text{ــ}۲۲)$$

**۱۸ــ۱ــ۶ــ توان وزنی و حجمی:** از فرمول‌هایی که ذکر شد مشخص می‌شود هرچه این قدرت‌ها بیشتر باشد نشان دهنده طرح خوب موتور با مشخصات عالی می‌باشد. مقادیر زیر حدود این قدرت‌ها را برای برخی از موتورهای دیزلی و بنزینی نشان می‌دهد.

| 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 |

**۱۹ــ۱ــ۶ــ تعیین نسبت تراکم موتور:** نسبت تراکم موتور عبارت است از نسبت حجم جابه‌جایی پیستون و فضای تراکم به فضای احتراق موتور.