به نام خالق بی‌همتا

جزوه‌ی درس

مکانیک کاربردی

فهرست مطالب

۱- بخش اول «استاتیک» ۳

۱-۱- بردار ۳

۱-۲- تعادل ذره ۶

۱-۳- اجسام صُلب ۷

۱-۴- تعادل اجسام صُلب ۱۰

۱-۵- مرکز جرم (مرکز سطح) ۱۴

۲- بخش دوم «مقاومت مصالح» ۱۶

۲-۱- تنش محوری و تنش برشی ۱۶

۲-۲- پیچش ۲۵

۳- بخش سوم «اجزای ماشین» ۳۱

۳-۱- اجزای ماشین ۳۱

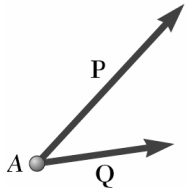
۳-۲- خواص مواد ۴۰

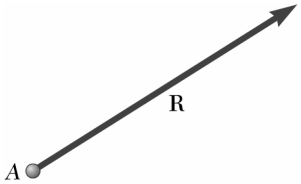
۱– بخش اول «استاتیک»

در این بخش به اصول ایستایی اجسام می‌پردازیم.

۱–۱– بردار

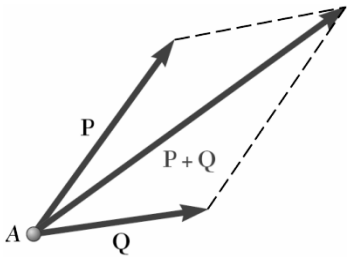
نیرو با اندازه و جهت تعیین می شود. اگر چند نیرو بر یک جسم یا یک نقطه وارد شود، می توان آن ها را با یک نیروی معادل (که آن را نیروی برآیند می گویند) جایگزین کرد. شکل زیر دو نیروی P و Q را نشان می دهد که بر نقطه A وارد شده است. برآیند نیروهای P و Q، نیروی R می باشد. یعنی می توانیم نیروهای P و Q را حذف کنیم و فرض کنیم فقط نیروی R بر جسم وارد می شود.





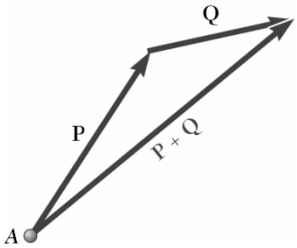
جمع بردارها به روش ترسیمی (روش متوازی الاضلاع):

دو بردار P و Q مطابق شکل زیر داریم. متوازی الاضلاعی تشکیل می دهیم که بردارهای P و Q، دو ضلع مجاور آن باشند. قطر متوازی‌الاضلاع جدید که از نقطه A می گذرد همان جمع دو بردار P و Q است. مطابق شکل زیر:



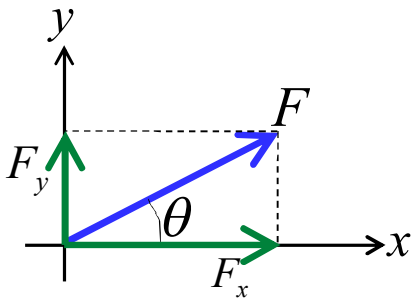
جمع بردارها به روش ترسیمی (روش مثلث):

دو بردار P و Q مطابق شکل زیر داریم. یکی از بردارها را از انتهای بردار دیگر رسم می کنیم. حال برداری را رسم می کنیم که ابتدای آن، ابتدای بردار اول و انتهای آن انتهای بردار دوم است. این بردار، جمع دو بردار اولیه خواهد بود (مطابق شکل زیر).



تجزیه نیرو به مؤلفه های عمود:

هر بردار را می توان به دو مؤلفه در راستای افقی و عمودی تجزیه نمود. در نظر گرفتن بردارها به صورت مؤلفه های افقی و عمودی در بسیاری از مسائل کار را ساده می کند. معمولاً جهت افقی را با x و جهت عمودی را با y نشان می دهند. شکل زیر نحوه تجزیه یک بردار به مؤلفه های افقی و عمودی را نشان می دهد.

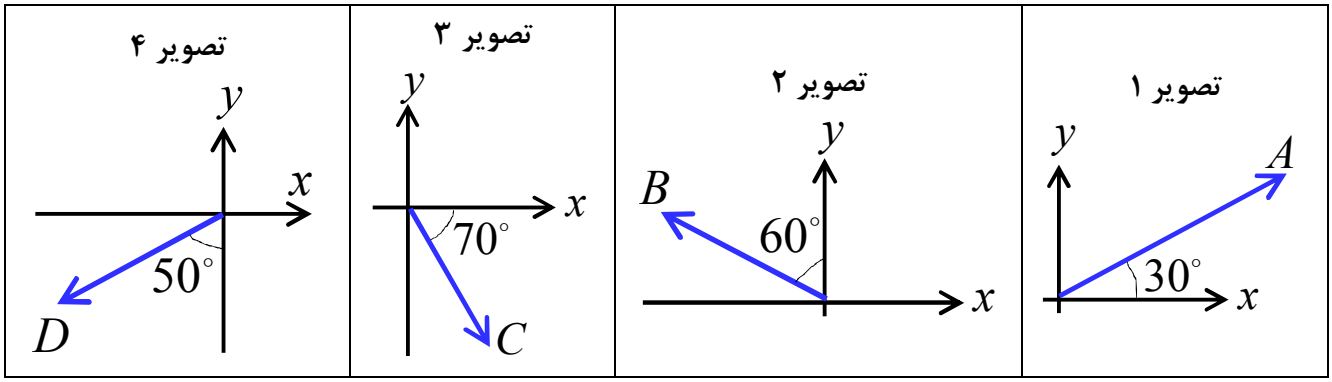


$$\begin{aligned} F_x &= F\cos\theta \\ F_y &= F\sin\theta \end{aligned}$$

θ زاویه نیروی F با محور x است. در دو رابطه بالا منظور از F، اندازه نیروی F است.

محاسبه‌ی θ:

اگر در خلاف جهت عقربه های ساعت (پادساعتگرد) حرکت کنیم، علامت θ مثبت است. اگر در جهت عقربه های ساعت (ساعتگرد) حرکت کنیم، علامت θ منفی است. مثلاً در تصویر ۱ از جدول زیر، اگر از محور x به اندازه ۳۰ درجه در جهت خلاف جهت عقربه های ساعت حرکت کنیم به بردار A می رسیم پس داریم: $\theta_A = +30^\circ$. هم‌چنین در تصویر ۲ از جدول زیر، اگر از محور x به اندازه ۹۰ درجه در جهت پادساعتگرد حرکت کنیم به محور y می رسیم و سپس اگر ۶۰ درجه دیگر نیز در همان جهتِ پادساعتگرد حرکت کنیم به بردار B می رسیم پس داریم: $\theta_B = +150^\circ$.

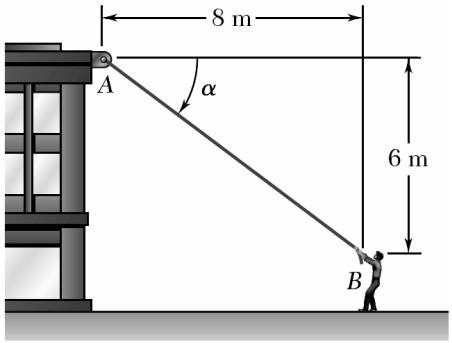


در تصویر ۳ از جدول بالا، اگر از محور x به اندازه ۷۰ درجه در جهت عقربه های ساعت (ساعتگرد) حرکت کنیم به بردار C می‌رسیم پس داریم: $\theta_C = -70^\circ$. دقت کنید که چون در جهت عقربه‌های ساعت حرکت کرده‌ایم، علامت θ منفی شده است.

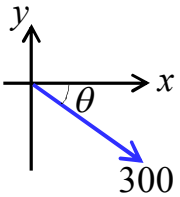
در تصویر ۴ از جدول بالا، اگر از محور x به اندازه ۹۰ درجه در جهت عقربه های ساعت (ساعتگرد) حرکت کنیم به محور y می‌رسیم و سپس اگر ۵۰ درجه دیگر نیز در همان جهتِ ساعتگرد حرکت کنیم به بردار D می رسیم پس داریم: $\theta_D = -140^\circ$. در تصویر ۴، اگر از محور x به اندازه ۲۲۰ درجه در جهت خلاف عقربه های ساعت حرکت کنیم باز هم به بردار D می رسیم و می توان گفت $\theta_D = +220^\circ$. پس برای زاویه‌ی بردار D، هم 140- درجه درست است و هم 220+ درجه.

مثال (تجزیه نیرو به مؤلفه های عمود):

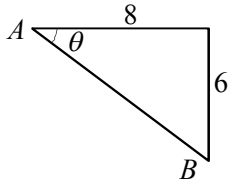
شخصی مطابق شکل روبرو، طناب را با نیروی 300N می کشد. مؤلفه های افقی و عمودی نیرویی که طناب به نقطه A وارد می‌کند بیابید.



پاسخ: اندازه نیرویی که فرد وارد می کند برابر با ۳۰۰ نیوتن است لذا مؤلفه های افقی و عمودی نیرو به صورت زیر هستند:



$F_x = 300\cos\theta$ $\qquad$ $F_y = 300\sin\theta$



برای یافتن زاویه‌ی θ، مثلثی که وتر آن همان طناب AB است را رسم می کنیم (شکل روبرو).

در این مثلث داریم: (تانژانت برابر است با ضلع مقابل تقسیم بر ضلع مجاور) $\tan\theta = \frac{6}{8} \longrightarrow \theta = 36.87^\circ$

باید علامت زاویه‌ی θ را نیز در نظر بگیریم. اگر از محور x به اندازه 36.87 درجه در جهت پادساعتگرد (خلاف عقربه های ساعت) حرکت کنیم به بردار ۳۰۰ می رسیم. پس داریم: $\theta = -36.87^\circ$.

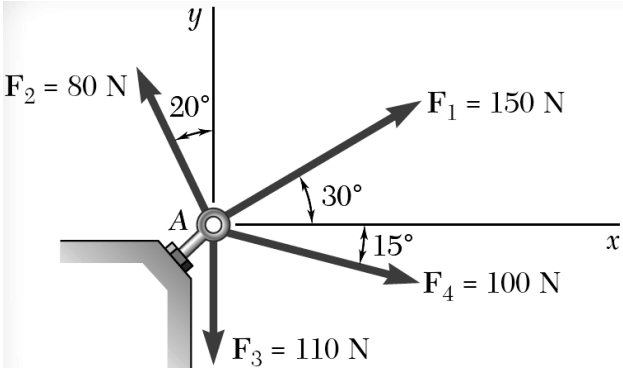
$$F_x = 300\cos\theta = 300\cos(-36.87^\circ) = +240N$$
$$F_y = 300\sin\theta = 300\sin(-36.87^\circ) = -180N$$

برآیند و جمع نیروها به صورت ریاضی:

حال که تجزیه یک بردار به مؤلفه های افقی و عمودی را آموختیم، به راحتی و با دقت بسیار بالاتر، می توانیم برآیند چند بردار و چند نیرو را محاسبه کنیم. اگر چند نیرو بر یک نقطه وارد شوند و برآیند آن ها را به روش ریاضی بخواهیم، ابتدا هر یک از نیروها را به مؤلفه های افقی و عمودی تجزیه می کنیم. در مرحله بعد تمام مؤلفه های افقی را با هم جمع و تمام مؤلفه های عمودی را با هم جمع می کنیم تا بردار برآیند نیروها به دست آید.

مثال (برآیند و جمع نیروها به صورت ریاضی):

برآیند نیروهایی که مطابق شکل بر پیچ وارد می شوند را بیابید.



پاسخ: مؤلفه x و y هر کدام از نیروها را از روابط زیر که قبلاً ارائه شد، به دست می آوریم:

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

برای نیروی F_1، زاویه‌ی نیرو با محور x برابر با ۳۰ درجه و اندازه نیرو 150N است. لذا داریم: $F_1 = 150N \qquad \theta_1 = 30^\circ$

پس خواهیم داشت: $(F_1)_x = F_1\cos\theta_1 = 150\cos 30 = +129.9N$ و $(F_1)_y = F_1\sin\theta_1 = 150\sin 30 = +75N$

مؤلفه x نیروی F_1 در جهت مثبت محور x است به همین دلیل، علامت آن مثبت به دست آمده است و مؤلفه y نیروی F_1 در جهت مثبت محور y است به همین دلیل، علامت آن مثبت به دست آمده است.

برای نیروی F_2، زاویه‌ی نیرو با محور x برابر با ۹۰+۲۰ یعنی برابر با ۱۱۰ درجه و اندازه نیرو 80N است. لذا داریم:

$$F_2 = 80N \qquad \theta_2 = 110^\circ$$

پس خواهیم داشت: $(F_2)_x = F_2\cos\theta_2 = 80\cos 110 = -27.36N$ و $(F_2)_y = F_2\sin\theta_2 = 80\sin 110 = +75.18N$

مؤلفه‌ی x نیروی F_2 در جهت منفی محور x است به همین دلیل، علامت آن منفی به دست آمده است و مؤلفه‌ی y نیروی F_2 در جهت مثبت محور y است به همین دلیل، علامت آن مثبت به دست آمده است.

برای نیروی F_3، زاویه نیرو با محور x برابر با ۲۷۰ درجه و اندازه نیرو 110N است. لذا داریم: $F_3 = 110N \qquad \theta_1 = 270^\circ$

پس خواهیم داشت: $(F_3)_x = F_3\cos\theta_3 = 110\cos 270 = 0$ و $(F_3)_y = F_3\sin\theta_3 = 110\sin 270 = -110N$

برای نیروی F_4، زاویه نیرو با محور x برابر با 15- درجه و اندازه نیرو 100N است. لذا داریم: $F_4 = 100N \quad \theta_4 = -15^\circ$

پس خواهیم داشت:

$$(F_4)_x = F_4 \cos\theta_4 = 100\cos(-15) = 96.59N$$
$$(F_4)_y = F_4 \sin\theta_4 = 100\sin(-15) = -25.88N$$

مؤلفه x نیروی برآیند از جمع مؤلفه های x نیروهای اولیه به دست می آید و مؤلفه y نیروی برآیند از جمع مؤلفه های y نیروهای اولیه به دست می آید. لذا داریم:

$$R_x = (F_1)_x + (F_2)_x + (F_3)_x + (F_4)_x = +129.9 - 27.36 + 0 + 96.59 = +199.13\text{N}$$
$$R_y = (F_1)_y + (F_2)_y + (F_3)_y + (F_4)_y = +75 + 75.18 - 110 - 25.88 = +14.3\text{N}$$

اندازه ی نیروی برآیند می شود: $R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = \sqrt{(199.13)^2 + (14.3)^2} = 199.64N$

زاویه نیروی برآیند با محور x می شود: $\tan\alpha = \frac{R_y}{R_x} = \frac{14.3}{199.13} \quad \rightarrow \quad \alpha = 4.11^\circ$

تصویر مؤلفه‌ی x و y نیروی برآیند در شکل روبرو آمده است»

۱–۲– تعادل ذره

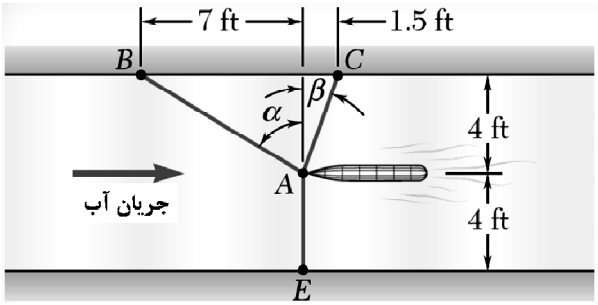
اگر یک ذره ساکن باشد، برآیند نیروهای وارد بر آن صفر خواهد بود. لذا اگر بر یک ذره، چند نیرو وارد شود و آن ذره ساکن باشد، می توان گفت برآیند نیروهای وارد بر آن ذره صفر است. در این حالت می توان گفت هم مؤلفه x و هم مؤلفه y نیروی برآیند صفر است. لذا اگر چند نیرو بر ذره ساکنی اعمال شود، مجموع مؤلفه های x آن نیروها برابر با صفر و مجموع مؤلفه های y آن نیروها نیز برابر با صفر خواهد بود.

$$\sum F_x = 0 \qquad \sum F_y = 0$$

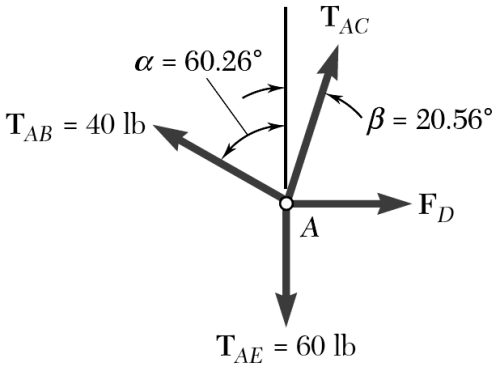
تعداد زیادی از مسائلی که در صنعت اتفاق می افتد را می توان به صورت تعادل یک ذره ارزیابی نمود. در این موارد باید نموداری رسم کنیم که جسم مورد نظر را به صورت یک ذره نمایش دهیم و تمام نیروهای وارد بر جسم را نیز رسم می کنیم. نمودار فوق را «دیاگرام آزاد» یا «نمودار جسم آزاد» می نامند. نمودار فوق بسیار مفید بوده و تحلیل مسئله را راحت می نماید.

مثال (نمودار جسم آزاد):

در شکل زیر، یک قایق توسط سه طناب مهار شده است. اگر نیروی کشش طناب های AE و AB به ترتیب 60lb و 40lb باشد، نیروی کشش طناب AC و نیرویی که آب به قایق وارد می کند را بیابید.



پاسخ: در این مسئله، قایق مانند یک ذره عمل می کند که سه نیرو به آن اعمال می شود. لذا می توان نمودار آزاد را برای قایق رسم نمود و نیروهای وارد بر آن را نشان داد تا مجهول به دست آید. نمودار آزاد قایق به صورت شکلی است که در ادامه رسم شده است.



چون قایق ساکن است برآیند نیروهای وارد بر آن صفر هستند. لذا:

$$\tan\alpha = \frac{7}{4} = 1.75 \quad \rightarrow \quad \alpha = 60.26^\circ \qquad \tan\beta = \frac{1.5}{4} = 0.375 \quad \rightarrow \quad \beta = 20.56^\circ$$

نیرویی که آب به قایق وارد می کند را با F_D نشان داده ایم. مؤلفه x و y نیروها را محاسبه می کنیم:

$$\theta_F = 0^\circ \qquad (F_D)_x = F_D\cos\theta_F = F_D\cos 0 = F_D \qquad (F_D)_y = F_D\sin\theta_F = F_D\sin 0 = 0$$

برای نیروی T_{AE} داریم:

$$\theta_{AE} = -90^\circ \qquad (T_{AE})_x = T_{AE}\cos\theta_{AE} = 60\cos(-90) = 0 \qquad (T_{AE})_y = T_{AE}\sin\theta_{AE} = 60\sin(-90) = -60$$

برای نیروی T_{AC} داریم:

$$\theta_{AC} = (90 - 20.56)^\circ = 69.44^\circ \qquad (T_{AC})_x = T_{AC}\cos\theta_{AC} = T_{AC}\cos(69.44) = 0.351T_{AC}$$
$$(T_{AC})_y = T_{AC}\sin\theta_{AC} = T_{AC}\sin(69.44) = 0.936T_{AC}$$

برای نیروی T_{AB} داریم:

$$\theta_{AB} = 90 + 60.26 = 150.26^\circ \qquad (T_{AB})_x = T_{AB}\cos\theta_{AB} = 40\cos(150.26) = -34.73$$
$$(T_{AB})_y = T_{AB}\sin\theta_{AB} = 40\sin(150.26) = +19.84$$

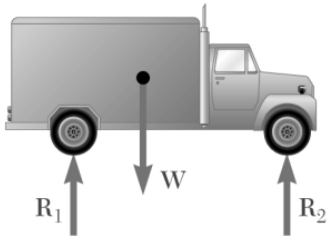
چون قایق در حال تعادل است، مجموع مؤلفه‌ی x نیروهای وارد بر آن برابر با صفر و مجموع مؤلفه‌ی y نیروهای وارد بر آن، نیز برابر با صفر خواهد بود. لذا داریم:

$$\sum F_x = 0 \quad \rightarrow \quad (F_D)_x + (T_{AE})_x + (T_{AC})_x + (T_{AB})_x = 0 \quad \rightarrow \quad F_D + 0 + 0.351T_{AC} - 34.73 = 0$$
$$\sum F_y = 0 \rightarrow (F_D)_y + (T_{AE})_y + (T_{AC})_y + (T_{AB})_y = 0 \rightarrow \quad 0 - 60 + 0.936T_{AC} + 19.84 = 0 \rightarrow T_{AC} = 42.91N$$

با جایگذاری T_{AC} در رابطه به دست آمده از $\sum F_x = 0$ داریم: $F_D = 19.67N$

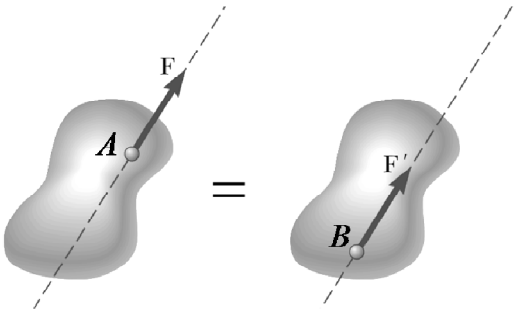
۱–۳– اجسام صُلب

در مباحث قبلی، نیروی وارد بر یک ذره را بررسی نمودیم. در بسیاری از موارد، جسم مورد نظر ما بزرگ است و نیروهای متعددی به نقاط مختلف آن وارد می شود. در این موارد نمی توان جسم را به صورت یک نقطه در نظر گرفت. جسم صُلب، جسمی است که اگر نیرویی بر آن وارد کنیم، تغییر شکل نمی دهد. در کامیون شکل زیر، دو نیرو از طرف جاده بر چرخ های جلو و عقب وارد می شود. همچنین نیروی وزن بر مرکز جرم ماشین اعمال می شود.



اصل انتقال پذیری (نیروهای معادل):

نیروی F را که در نقطه A بر یک جسم صلب وارد می شود، می توان در راستای خط اثر نیرو جابجا کرد (اصل انتقال پذیری). مثلاً در شکلی که در ادامه رشم شده است، نیروی F (در راستای نشان داده شده) بر نقطه A از جسم صلب نشان داده شده، وارد شده است. می توان اینطور در نظر گرفت که نیروی F بر نقطه B وارد می شود و این دو سیستم معادل هستند. در هنگام جابجایی نیرو، نباید اندازه و جهت نیرو را تغییر داد.



گشتاور نیرو حول یک نقطه:

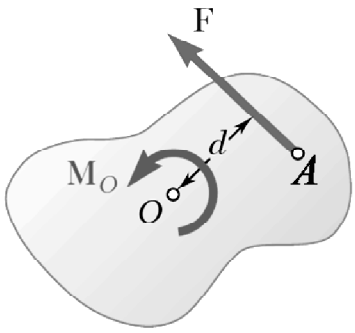
تمایل یک نیرو به چرخاندن یک جسم را گشتاور می گویند. واحد گشتاور «نیوتن متر N.m» می باشد.

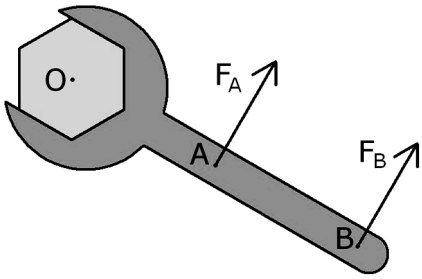
گشتاور نیروی دلخواه F حول نقطه دلخواه O از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$M_O = Fd$$

F اندازه نیرو (نیوتن) d فاصله راستای نیرو با نقطه O (متر)

نکته: فاصله نقطه ای که نیرو بر آن وارد می شود (یعنی نقطه A) تا نقطه O، با مقدار d متفاوت است. لذا دقت کنید که به اشتباه، فاصله OA را به جای d قرار ندهید.





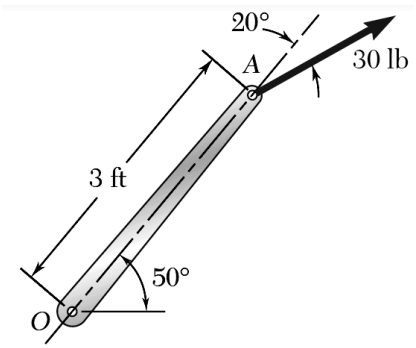
جهت گشتاور نیرو حول یک نقطه:

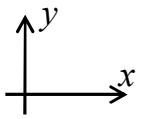
گشتاور یک نیرو حول یک نقطه می تواند ساعتگرد (یعنی در جهت حرکت عقربه‌های ساعت) یا پادساعتگرد (یعنی در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت) باشد. اگر جسم را حول نقطه O لولا کنیم و نیروی F تمایل داشته باشد جسم را در جهت حرکت عقربه های ساعت بچرخاند، می گوییم گشتاور نیروی F حول نقطه O ساعتگرد است. اگر جسم را حول نقطه O لولا کنیم و نیروی F تمایل داشته باشد جسم را در خلاف جهت حرکت عقربه های ساعت بچرخاند، می گوییم گشتاور نیروی F حول نقطه O پادساعتگرد است. در دو تصویر قبل (تصویر آچار و تصویر سمت چپ آن)، گشتاور نیروی F حول نقطه O پادساعتگرد است.

نکته مهم: گشتاورهای ساعتگرد را با علامت منفی و گشتاورهای پادساعتگرد را باعلامت مثبت نشان می دهیم. مثلاً اگر اندازه گشتاور یک نیرو حول یک نقطه برابر با 200N.m و جهت گشتاور، ساعتگرد باشد، می نویسیم M=-200N.m یا اگر اندازه گشتاور یک نیرو حول یک نقطه برابر با 120N.m و جهت گشتاور، پادساعتگرد باشد، می نویسیم M=120N.m

مثال (گشتاور):

اندازه و جهت گشتاور نیروی ۳۰ پوندی حول نقطه O را بیابید.





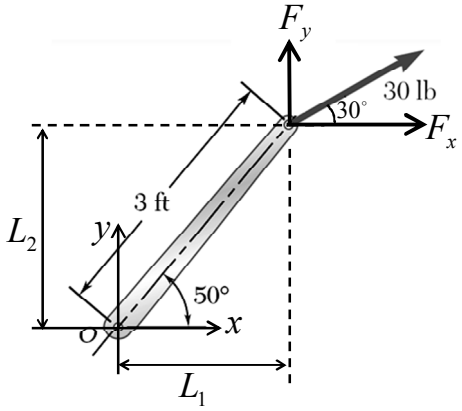
پاسخ: محورهای x و y را به صورت روبرو می گیریم و فرض می کنیم که مبدأ مختصات در نقطه O است.

اکنون نیروی ۳۰ پوندی را به مؤلفه های عمودی آن تجزیه می کنیم. نیروی ۳۰ پوندی را با F و مؤلفه ی افقی آن (یعنی مؤلفه در راستای محور x) را با F_x و مؤلفه عمودی آن (یعنی مؤلفه در راستای محور y) را با F_y نشان می‌دهیم. حال باید مقادیر F_x و F_y را بیابیم. زاویه نیروی F با راستای افقی (محور x) برابر با ۳۰ درجه است. لذا داریم:

$$F_x = F\cos\theta = 30\cos 30^\circ = 25.98lb \qquad F_y = F\sin\theta = 30\sin 30^\circ = 15lb$$

فاصله راستای نیروی F_x با نقطه O برابر با L_2 است. فاصله راستای نیروی F_y با نقطه O برابر با L_1 است و داریم:

$$L_1 = 3\cos 50^\circ = 1.928ft \qquad L_2 = 3\sin 50^\circ = 2.298ft$$



اکنون به راحتی می توان گشتاور نیروها را یافت.

گشتاور نیروی F_x حول نقطه O می شود: $M_x = F_x \times L_2 = 25.98 \times 2.298 = 59.706lb.ft$

جهت گشتاور نیروی F_x ساعتگرد است چون این نیرو تمایل دارد جسم را حول نقطه O در جهت عقربه های ساعت بچرخاند.

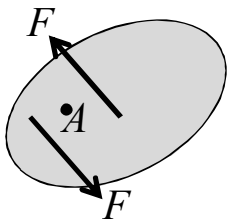
گشتاور نیروی F_y حول نقطه O می شود: $M_y = F_y \times L_1 = 15 \times 1.928 = 28.92lb.ft$

جهت گشتاور نیروی F_y پادساعتگرد است چون این نیرو تمایل دارد جسم را حول نقطه O در خلاف جهت عقربه‌های ساعت بچرخاند. گشتاور نیروی اولیه (یعنی نیروی ۳۰ پوندی) حول نقطه O، از جمع گشتاور مؤلفه های افقی و عمودی آن به دست می آید. پس گشتاور نیروی ۳۰ پوندی می شود: $M = M_x + M_y = -59.706 + 28.92 = -30.786lb.ft$

علامت منفی در رابطه بالا نشان دهنده ی ساعتگرد بودن جهت گشتاور است.

کوپل (زوج نیرو):

دو نیروی مساوی (هم اندازه) و موازی و مختلف الجهت را کوپل می گویند. مجموعه هر دو نیرو را یک کوپل می گویند (و اینطور نیست که به هر کدام از این دو نیروی موازی یک کوپل گفته شود). کوپل نمی تواند جسمی را انتقال دهد زیرا دو نیروی کوپل هم را خنثی می‌کنند. کوپل صرفاً می تواند جسمی را بچرخاند و گشتاور بر آن وارد کند. تصویر زیر، یک آچار را نشان می‌دهد که با ایجاد یک کوپل، پیچ ها را باز و بسته می کند.

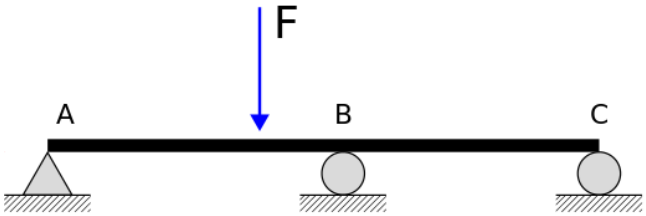


۱-۴- تعادل اجسام صُلب

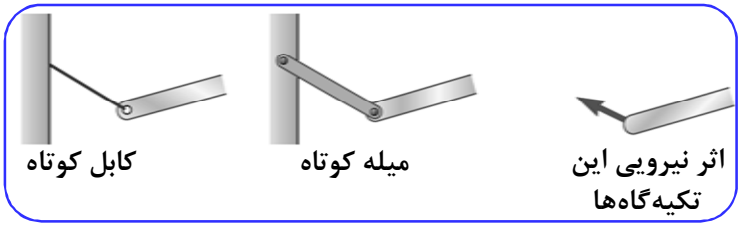
در این بخش به بررسی تعادل اجسام صلب می‌پردازیم.

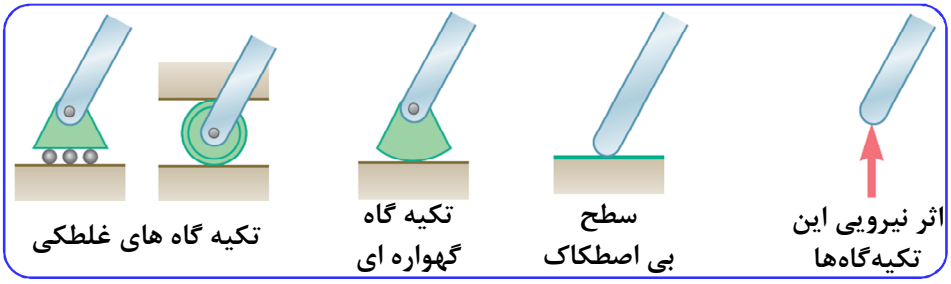
عکس العمل های تکیه گاه ها در حالت دو بعدی:

هر جسمی از طریق چند قطعه به زمین یا به دیوارها متصل می شود که این قطعات را تکیه گاه می گویند. در شکل زیر یک تیر نشان داده شده است که نیروی F بر آن وارد شده است و سه تکیه گاه در این تیر وجود دارد که تیر بر روی آن ها قرار گرفته است. تکیه گاه بسته به اینکه از چه نوعی باشد، نیرویی به جسم وارد می کند. در این قسمت می خواهیم انواع تکیه‌گاه ها را معرفی کنیم و نیرویی که هر کدام بر جسم وارد می کنند را نشان دهیم.



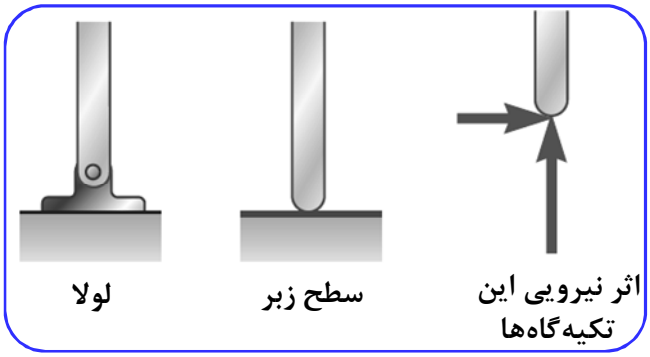
تکیه گاه هایی که در تصاویر زیر نشان داده شده است، فقط یک نیرو (در جهتی که نشان داده شده) بر جسم وارد می کنند.



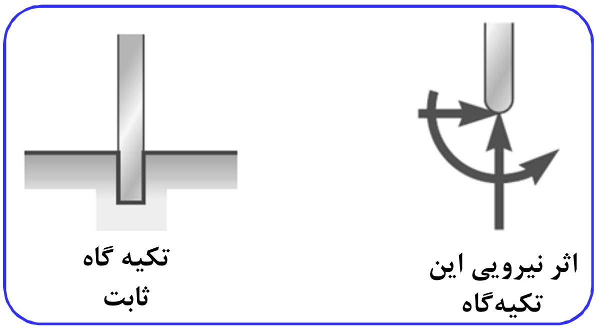


تکیه گاه هایی که در تصویر زیر نشان داده شده است، فقط یک نیرو (در جهتی که نشان داده شده) بر جسم وارد می کنند.

تکیه‌گاه‌هایی که در تصویر زیر نشان داده شده است، یک نیروی افقی (در جهت x) و یک نیروی عمودی (در جهت y) بر جسم وارد می کنند.



تکیه گاه نشان داده شده در شکل زیر، یک نیرو در جهت x و یک نیرو در جهت y و یک گشتاور بر جسم وارد می کند.



تعادل جسم صُلب در دو بُعد:

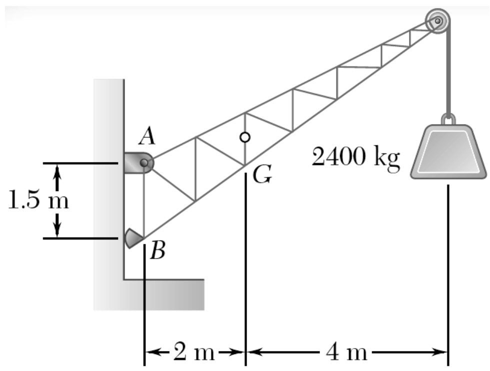
اگر یک جسم دو بعدی در حال تعادل باشد (یعنی ساکن باشد)، معادلات تعادل به صورت زیر ساده می شود:

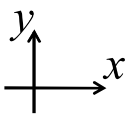
$$\sum F_x = 0 \qquad \sum F_y = 0 \qquad \sum M_A = 0$$

که A نقطه دلخواهی است که گشتاور تمام نیروها (از جمله نیروهای تکیه گاهی) حول آن محاسبه می شود. یعنی مجموع گشتاور نیروهای وارد بر سیستم حول هر نقطه دلخواهی برابر با صفر می شود. با حل سه معادله بالا می توان موارد خواسته شده در سؤال را به دست آورد.

مثال (جرثقیل):

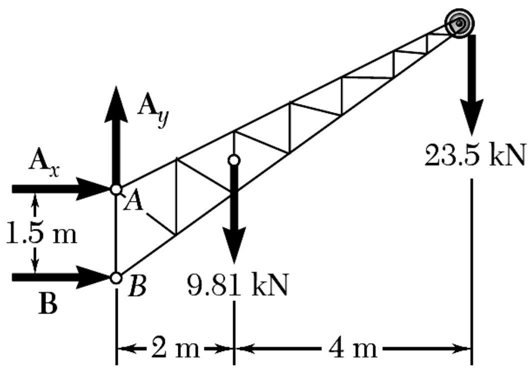
جرثقیلی به جرم 1000kg مطابق شکل صندوقی به جرم 2400kg را در حال تعادل (به صورت ساکن)، نگه داشته است. این جرثقیل یک تکیه گاه مفصلی در A و یک تکیه گاه گهواره ای در B دارد. مرکز جرم جرثقیل در نقطه G است. نیروهای تکیه‌گاهی A و B را بیابید.





پاسخ: محورهای مختصات را به صورت روبرو انتخاب می کنیم » » » » » » » » » » » » »

نمودار آزاد جسم به صورت زیر می شود:



تکیه گاه گهواره ای همیشه عمود بر سطح، نیرو وارد می کند. پس در این مسئله، نیروی تکیه گاه گهواره ای در جهت x است. چون جهت دقیق نیروهای تکیه گاهی مشخص نیست (مثلاً نمی دانیم نیروی B به سمت x+ است یا x-)، لذا به صورت دلخواه،

آن را به یک جهت رسم می کنیم. اگر در نهایت مقدار نیرو منفی به دست آمد یعنی جهت انتخاب شده اشتباه بوده است (البته نیاز به تکرار محاسبات نیست). وزن صندوق می شود: $W = mg = 2400 \times 9.81 = 23500N$

وزن جرثقیل می شود: $W = mg = 1000 \times 9.81 = 9810N$

مجموع گشتاورها حول نقطه A را برابر با صفر قرار می دهیم $\sum M_A = 0$. نیروهای A_x و A_y چون از نقطه A عبور می‌کنند پس حول A گشتاور ندارند.

$$\sum M_A = 0 \quad \rightarrow \quad (B \times 1.5) - (9810 \times 2) - (23500 \times 6) = 0 \quad \rightarrow \quad B = +107100N$$

چون علامت نیروی B مثبت به دست آمد، یعنی جهتی که در ابتدا برای B انتخاب کرده بودیم درست بوده است.

$$\sum F_y = 0 \rightarrow A_y - 9810 - 23500 = 0 \rightarrow A_y = +33310N$$

چون علامت نیروی A_y مثبت به دست آمد، یعنی جهتی که در ابتدا برای آن انتخاب کرده بودیم درست بوده است.

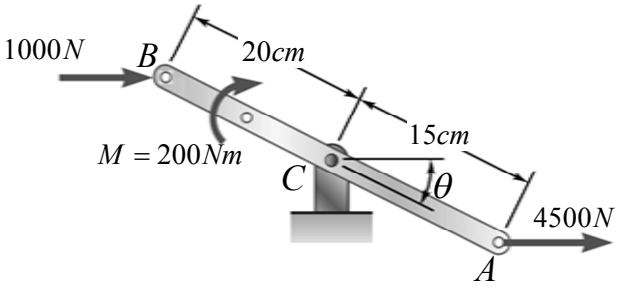
$$\sum F_x = 0 \rightarrow B + A_x = 0 \rightarrow 107100 + A_x = 0 \rightarrow A_x = -107100N$$

چون علامت نیروی A_x منفی به دست آمد، یعنی جهتی که در ابتدا برای آن انتخاب کرده بودیم غلط بوده است.

نکته مهم: البته مقداری که برای A_x به دست آمده، درست است و نیاز نیست دوباره با جهت صحیح آن، محاسبات را تکرار کنیم. پس جهت صحیح A_x به سمت x– یعنی خلاف جهت محور x است.

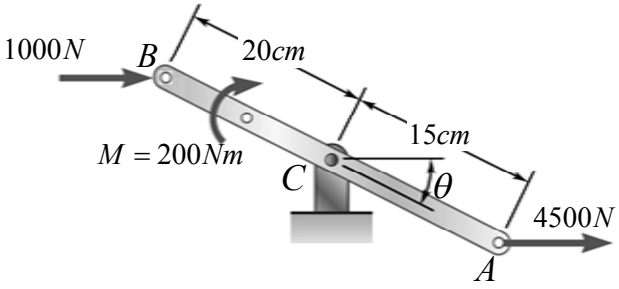
گشتاور خارجی وارد بر جسم:

ممکن است در برخی مسائل، یک گشتاور خارجی بر سیستم اعمال شود. یعنی همانطور که نیروهای خارجی متعددی بر سیستم اعمال می شود، گشتاور خارجی هم بر سیستم اعمال می شود. مثلاً در شکل زیر، دو نیروی خارجی ۱۰۰۰ نیوتن و ۴۵۰۰ نیوتن بر سیستم اعمال شده و همچنین یک گشتاور خارجی 200Nm اعمال شده است. در این موارد باید در معادله‌ی تعادلِ $\sum M = 0$ مقدار گشتاور خارجی را نیز به همراه علامت آن در نظر بگیریم.

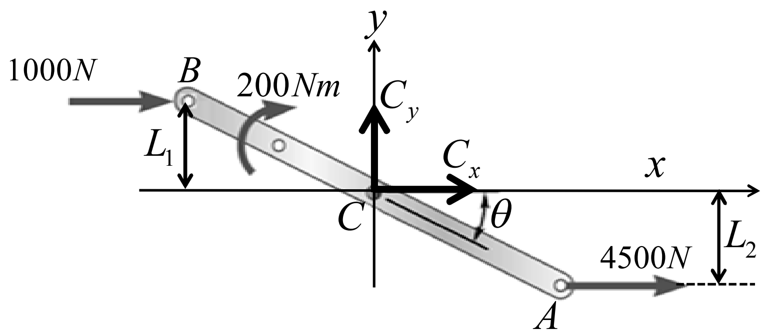


مثال (گشتاور خارجی وارد بر جسم):

در شکل زیر، اگر جسم در حال تعادل باشد، مقدار θ و عکس العمل تکیه گاه C را بیابید.



پاسخ: ابتدا نمودار آزاد جسم را رسم می کنیم. تکیه گاه C لولا است پس یک نیروی افقی (C_x) و یک نیروی عمودی (C_y) وارد می‌کند. مبدأ مختصات را در نقطه C در نظر می‌گیریم. نمودار آزاد جسم به صورت شکلی است که در ادامه رسم شده است.



$L_1 = BC\sin\theta = 0.2\sin\theta$ $\qquad\qquad$ $L_2 = AC\sin\theta = 0.15\sin\theta$

$$\sum M_C = 0 \quad \longrightarrow \quad -(1000\times L_1) - 200 + (C_x \times 0) + (C_y \times 0) + (4500\times L_2) = 0$$

$$-200\sin\theta - 200 + 675\sin\theta = 0 \rightarrow \sin\theta = 0.421 \rightarrow \theta = 24.9^\circ$$

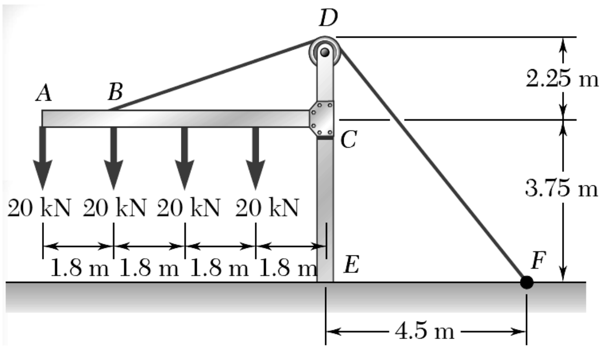
$$\sum F_x = 0 \;\rightarrow\; 1000 + C_x + 4500 = 0 \;\rightarrow\; C_x = -5500N$$

علامت C_x منفی به دست آمد یعنی جهت آن به سمت چپ (خلاف جهت محور x) می باشد.

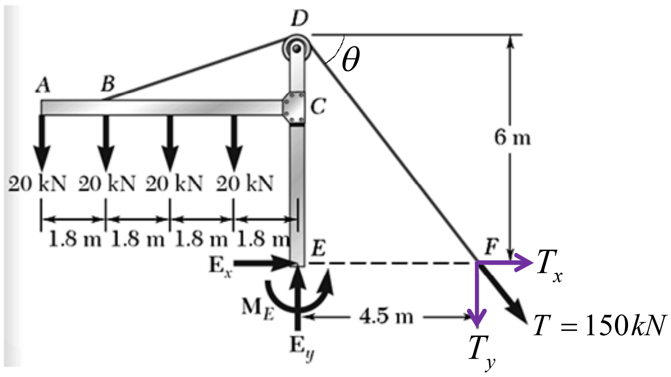
درر استای y هیچ نیرویی به جز C_y نداریم، بنابراین » » » » » » » » » » » » » » » » » » » $\sum F_y = 0 \;\rightarrow\; C_y = 0$

مثال (تیر همراه با کابل):

در سازه شکل روبرو که وزن آن ناچیز است، نیروی کشش کابل 150kN است. عکس العمل های تکیه گاه ثابت E را بیابید.



پاسخ: کابل و قسمت های فلزی سازه را به عنوان کل جسم در نظر می گیریم. تکیه گاه E از نوع «تکیه گاه ثابت» است لذا یک نیروی افقی و یک نیروی عمودی و یک گشتاور دارد. لذا نمودار آزاد سازه به صورتی که در ادامه می آید، رسم می شود.



همه ی نیروها در جهت افقی یا عمودی هستند به جز نیروی 150kN، لذا باید مؤلفه افقی و عمودی این نیرو را بیابیم. این نیرو را با نماد T نشان می دهیم. ابتدا باید زاویه این نیرو با محور x را بیابیم (علامت زاویه نیز مهم است).

$$\tan\theta = \frac{6}{4.5} \quad \longrightarrow \quad \theta = 53.1^\circ$$

اگر از محور x به اندازه 53.1 درجه در جهت ساعتگرد حرکت کنیم به نیروی 150kN می رسیم، پس علامت زاویه این نیرو منفی است. لذا داریم: $\theta = -53.1^\circ$

$$T_x = T\cos\theta = (150\times10^3)\cos(-53.13^\circ) = 90000N$$

$$T_y = T\sin\theta = (150\times10^3)\sin(-53.13^\circ) = -120000N$$

علامت منفی نشان می دهد مؤلفه ی y نیروی 150kN به سمت y– یعنی به سمت پایین است.

$$\sum F_x = 0 \rightarrow E_x + T_x = 0 \rightarrow E_x + 90000 = 0 \rightarrow E_x = -90000N$$

علامت منفی نشان می دهد جهت انتخاب شده برای E_x درست نبوده و جهت صحیح به سمت x- یعنی به سمت چپ است.

$$\sum F_y = 0 \rightarrow -20000 - 20000 - 20000 - 20000 + E_y + T_y = 0$$

$$-20000 - 20000 - 20000 - 20000 + E_y - 120000 = 0 \rightarrow E_y = 200000N$$

علامت مثبت نشان می دهد جهت انتخاب شده برای E_y درست بوده است.

$$\sum M_E = 0 \rightarrow +(20000\times 7.2) + (20000\times 5.4) + (20000\times 3.6) + (20000\times 1.8) + M_E + (T_x \times 0) - (T_y \times 4.5) = 0$$

در محاسبه علامت گشتاور در رابطه بالا، جهت T_y را اثر داده ایم یعنی آن را به پایین در نظر گرفتیم و علامت گشتاورِ T_y منفی به دست آمد. پس در رابطه‌ی گشتاور، در هنگام محاسبه‌ی گشتاور نیروی T_y، نباید علامت منفی را در نظر بگیریم. بنابراین، رابطه‌ی بالا به صورت زیر می‌شود:

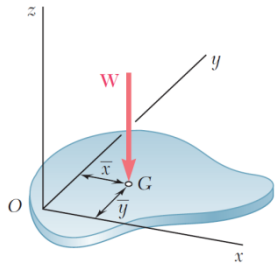
$$\rightarrow +(20000\times 7.2) + (20000\times 5.4) + (20000\times 3.6) + (20000\times 1.8) + M_E + (T_x \times 0) - (120000\times 4.5) = 0$$

$$M_E = +180000Nm$$

علامت مثبت نشان می دهد جهت انتخاب شده برای M_E درست بوده است.

۱–۵– مرکز جرم (مرکز سطح)

یک صفحه دو بعدی را در نظر بگیرید. این صفحه نقطه ای به نام مرکز سطح دارد که اگر انگشت دست خود را روی آن نقطه قرار دهیم، صفحه در حالت تعادل باقی می ماند. مثلاً اگر یک صفحه مربعی داشته باشیم، و انگشت خود را در مرکز مربع قرار دهیم، می توانیم مربع را نگه داریم. این یعنی مرکز سطح مربع، در مرکز آن است. دایره نیز همانند مربع بوده و مرکز سطح آن در مرکز آن است. یک صفحه در حالت کلی در نظر بگیرید (مانند شکل زیر). مرکز سطح این صفحه به صورت زیر محاسبه می‌شود:



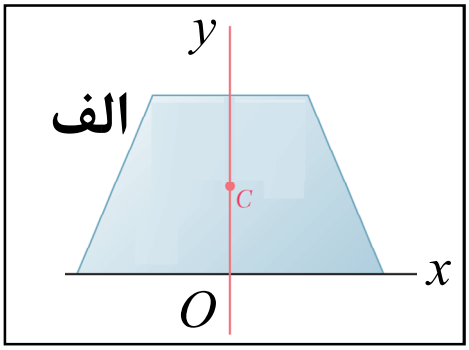
$$\bar{x} = \frac{\int x\,dA}{A} \qquad \bar{y} = \frac{\int y\,dA}{A}$$

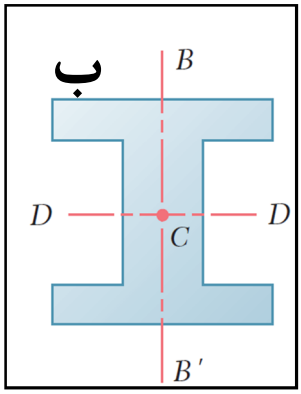
عبارت $\int x\,dA$ را گشتاور اول سطح حول محور y می گویند.

عبارت $\int y\,dA$ را گشتاور اول سطح حول محور x می گویند.

البته در این درس از دو رابطه بالا استفاده نمی گردد و این روابط فقط برای این است که یک آشنایی کلی با آن ها ایجاد گردد.

اگر یک صفحه، دارای محور تقارن باشد، حتماً مرکز سطح آن صفحه روی آن محور تقارن قرار دارد. به عنوان مثال در تصویر «الف» از شکل زیر، محور y محور تقارن جسم است پس مرکز سطح، حتماً بر روی محور y قرار دارد و لذا داریم: $\bar{x} = 0$

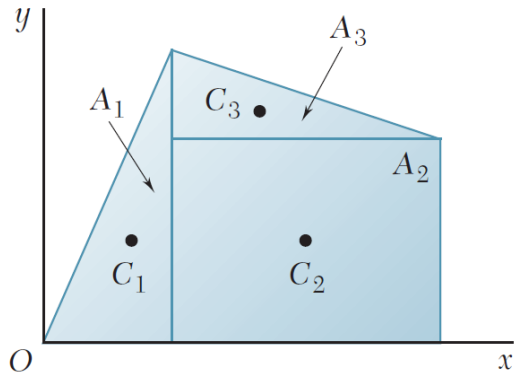




اگر صفحه ای، دارای دو محور تقارن باشد، مرکز سطح آن صفحه، در محل تقاطع دو محور تقارن خواهد بود. به عنوان مثال در تصویر «ب» از شکل بالا، دو محور تقارن DD و BB دارد. پس مرکز سطح روی محل تقاطع دو محور تقارن یعنی روی نقطه C خواهد بود.

مرکز سطح برای سطوح مرکب:

اگر یک صفحه متشکل از صفحات ۱ و ۲ و ۳ و . . . باشد، مرکز سطح صفحه کلی به صورت زیر از روی مرکز سطح صفحات ۱ و ۲ و ۳ و.... به دست می آید:



$$\bar{x} = \frac{\bar{x}_1 A_1 + \bar{x}_2 A_2 + \bar{x}_3 A_3 + \ldots.}{A}$$

$$\bar{y} = \frac{\bar{y}_1 A_1 + \bar{y}_2 A_2 + \bar{y}_3 A_3 + \ldots.}{A}$$

$\bar{x}$ مؤلفه x مرکز سطح صفحه کلی — $\bar{y}$ مؤلفه y مرکز سطح صفحه کلی — A مساحت صفحه کلی

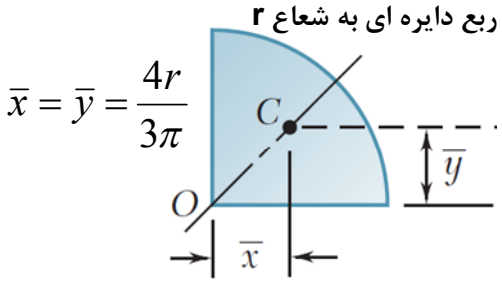
$\bar{x}_1$ مؤلفه x مرکز سطح صفحه ۱ — $\bar{y}_1$ مؤلفه y مرکز سطح صفحه ۱ — A_1 مساحت صفحه ۱

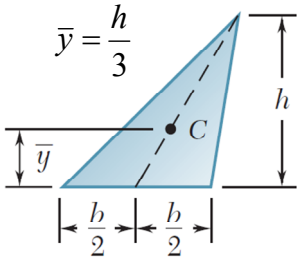
$\bar{x}_2$ مؤلفه x مرکز سطح صفحه ۲ — $\bar{y}_2$ مؤلفه y مرکز سطح صفحه ۲ — A_2 مساحت صفحه ۲

در روابط بالا، علامت تمام کمیت ها را باید لحاظ نمود (به جز مساحت که علامت ندارد). مثلاً اگر مرکز سطح صفحه ۱ در سمت چپِ محور y باشد، باید $\bar{x}_1$ را منفی قرار دهیم.

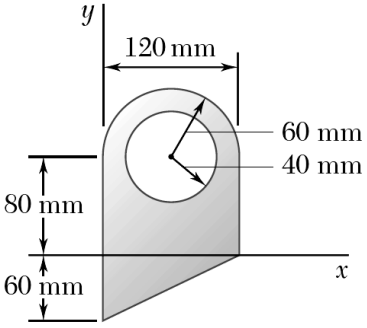
مرکز سطح شکل های رایج:

مرکز سطح، صفحه های رایج در جداولی در کتاب های استاتیک و مقاومت مصالح آمده است. به عنوان مثال مرکز سطح، مثلث، ربع دایره، نیم دایره و . . . . به عنوان نمونه داریم:

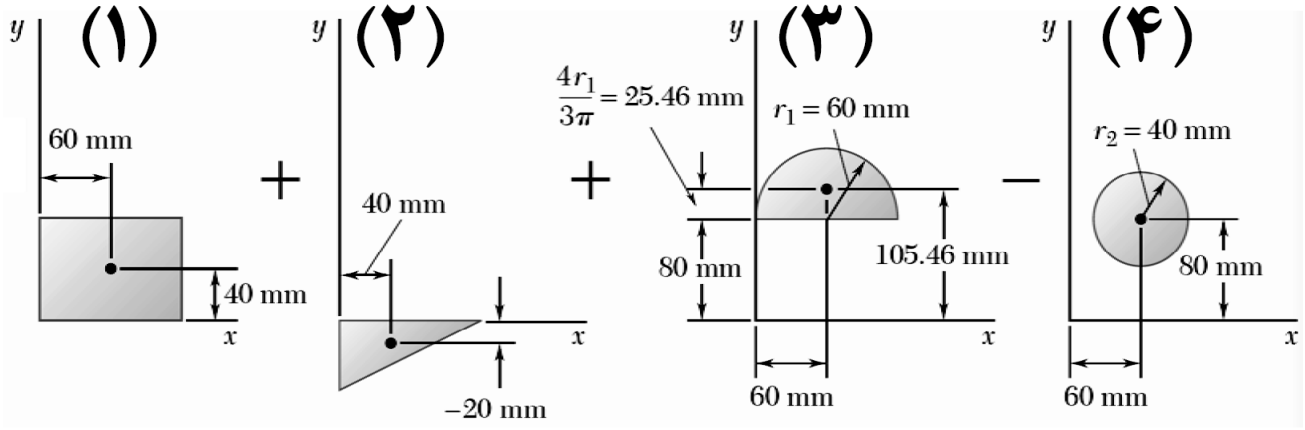




مثال (مرکز سطح): مرکز سطح شکل زیر را بیابید.



پاسخ: شکل بالا ترکیب شکل های ساده ی زیر است. باید مرکز سطح هر کدام از شکل های زیر را بیابیم.



مرکز سطح مستطیل (تصویر ۱ از شکل بالا) در وسط آن است لذا داریم:

$\bar{x}_1 = 60mm \qquad \bar{y}_1 = 40mm \qquad A_1 = 80\times120mm^2 = 9.6\times10^3 mm^2$

مرکز سطح مثلث (تصویر ۲ از شکل بالا) طبق جداول به این صورت است:

$\bar{x}_2 = 40mm \qquad \bar{y}_2 = -20mm \qquad A_2 = \frac{60\times120}{2}mm^2 = 3.6\times10^3 mm^2$

مرکز سطح نیم دایره (تصویر ۳ از شکل بالا) طبق جداول، به صورت زیر است:

$\bar{x}_3 = 60mm \qquad \bar{y}_3 = 105.46mm \qquad A_3 = \frac{\pi r_3^2}{2} = \frac{\pi\times60^2}{2} = 5.655\times10^3 mm^2$

مرکز سطح دایره (تصویر ۴ از شکل بالا) در مرکز آن است لذا داریم:

$\bar{x}_4 = 60mm \qquad \bar{y}_4 = 80mm \qquad A_4 = \pi r_4^2 = \pi\times40^2 = 5.027\times10^3 mm^2$

مساحت کل سطح می‌شود:

$A = A_1 + A_2 + A_3 - A_4 = 9.6\times10^3 + 3.6\times10^3 + 5.655\times10^3 - 5.027\times10^3 \quad \rightarrow \quad A = 13.828\times10^3 mm^2$

$\bar{x} = \frac{\bar{x}_1A_1 + \bar{x}_2A_2 + \bar{x}_3A_3 - \bar{x}_4A_4}{A} \qquad \bar{y} = \frac{\bar{y}_1A_1 + \bar{y}_2A_2 + \bar{y}_3A_3 - \bar{y}_4A_4}{A}$

با جایگذاری مقادیر به دست آمده در دو رابطه بالا، محل مرکز سطح کل شکل به دست می‌آید: $\bar{x} = 54.8mm \qquad \bar{y} = 36.6mm$

* * * * **پیامبر گرامی اسلام (ص)** * * * *

بیشترین چیزی که مردم را وارد بهشت می کند، تقوای خدا و اخلاق خوش است.

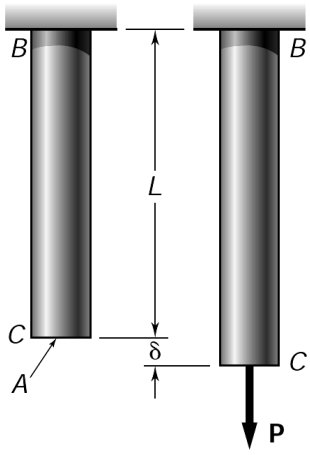
(اصول کافی، ج ۲، ص ۱۰۰، ح ۶، به نقل از mizan.hadith.net)

۲– بخش دوم «مقاومت مصالح»

در این بخش به بررسی تغییر شکل اجسام تحت اثر نیروهای مختلف می‌پردازیم.

۲–۱– تنش محوری و تنش برشی

اگر میله ای را با نیروی P در راستای محور میله بکشیم، طول آن به اندازه‌ی δ زیاد می شود (نمادِ δ، دلتا تلفظ می شود). در اثر ورود نیرو به میله، تنش قائم و کُرنش ایجاد شده در میله برابر می شود با:



$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \qquad \sigma = \frac{P}{A}$$

σ تنش قائم وارد بر میله (نیوتن بر متر مربع) P نیرو (نیوتن) A سطح مقطع میله (متر مربع)

ε کُرنش ایجاد شده در میله δ تغییر طول میله (متر) L طول اولیه میله (متر)

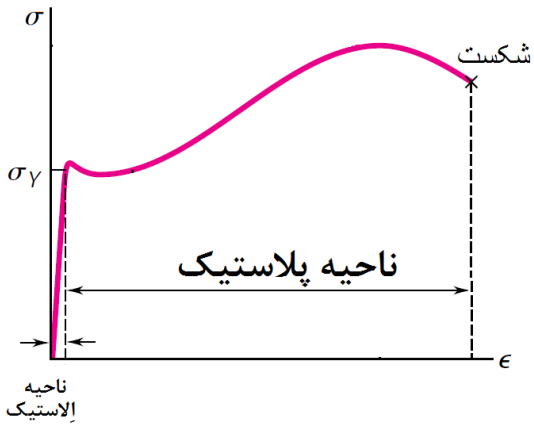
نماد σ، سیگما تلفظ می شود.

اگر طول میله زیاد شود، علامت تنش و کرنش، مثبت است و اگر طول میله کم شود، علامت تنش و کرنش، منفی است.

آزمایش کشش میله:

در آزمایش کشش، میله ای به صورت شکل زیر آماده می کنند. دو نقطه به فاصله L روی میله مشخص می کنند. میله را در دستگاه کشش قرار می دهند. دستگاه کشش، دستگاهی است که میله را از دو طرف گرفته و می‌کِشد. دستگاه در ابتدا نیروی کمی بر میله وارد می‌کند و به مرور زمان نیرو را افزایش می دهد. با افزایش نیرو و گذشت زمان، طول میله نیز پیوسته زیاد می شود.

هرچه تنش وارد بر جسم افزایش یابد، کرنش آن نیز بیش تر می شود. نمودار تنش ایجاد شده در میله بر حسب کرنش به صورت زیر است:



این شکل نشان می دهد که هنگامی که تنش کمتر از σ_y است، تنش به صورت خطی بر حسب کرنش تغییر می کند. اگر تنش ایجاد شده در میله کم‌تر از σ_y باشد، به محض قطع کردن نیرو، میله به همان طول اولیه خود بر می‌گردد. این ناحیه را ناحیه اِلاستیک یا کِشسان می‌گویند. یعنی اگر مواد، تنشی کمتر از σ_y داشته باشند، در ناحیه اِلاستیک قرار داشته و رفتار فنری دارند. تنش σ_y را «تنش تسلیم» می‌گویند و برای هر ماده مقدار مشخصی دارد و مقدار آن در کتاب های مقاومت مصالح موجود است.

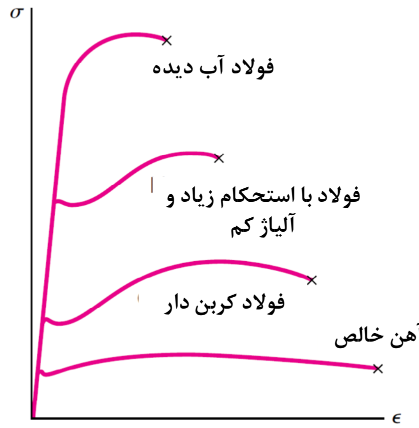
اگر بر یک ماده، به اندازه ای نیرو وارد کنیم که تنش ایجاد شده در آن، بیشتر از تنش تسلیم شود، ماده وارد حالت پلاستیک می شود یعنی اگر نیرو را حذف کنیم، دیگر میله به طول اولیه خود بر نمی گردد و دچار تغییر شکل دائم می شود. تغییر شکل ماده در ناحیه الاستیک بسیار کم است ولی اگر ماده وارد ناحیه پلاستیک شود، تغییر شکل آن بسیار زیاد می شود و در نهایت دچار شکست می شود.

قانون هوک:

در اکثر کاربردهای صنعتی، تغییر شکل ها در ناحیه‌ی خطی (الاستیک) هستند. در این ناحیه، رابطه‌ی تنش بر حسب کرنش به صورت زیر است » » » » » » » » » » » » $\boxed{\sigma = E\varepsilon}$

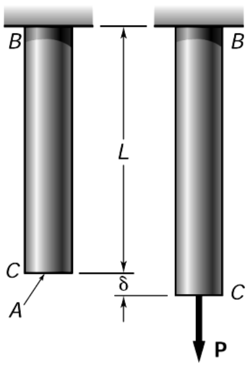
رابطه‌ی بالا را قانون هوک می‌گویند که کاربرد بسیار زیادی در مقاومت مصالح دارد.

مقدار E در رابطه بالا، ضریب (یا مُدول) الاستیسیته یا ضریب یانگ یا ضریب ارتجاعی نامیده می شود. هر ماده تا تنش تسلیم (σ_y) از قانون هوک تبعیت می کند. مقدار E در واقع همان شیب نمودار تنش-کرنش در ناحیه‌ی خطی است. شکل زیر، نمودار تنش-کرنش چند نوع فولاد را نشان می دهد. در شکل زیر، تنش تسلیم فولادها با یکدیگر متفاوت ولی تمام آن ها یک ضریب الاستیسیته دارند.



تغییر طول میله در بارگذاری محوری:

گفتیم که وقتی نیروی محوری به میله ای وارد می شود داریم:



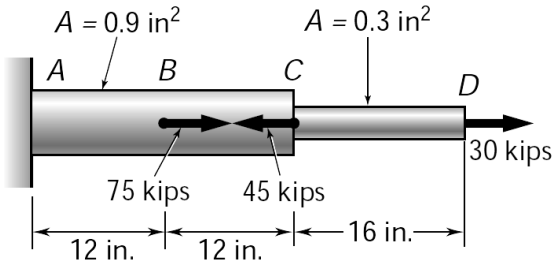
$$\sigma = E\varepsilon \;\rightarrow\; \frac{P}{A} = E\varepsilon \;\rightarrow\; \frac{P}{A} = E\frac{\delta}{L} \;\rightarrow\; \boxed{\delta = \frac{PL}{AE}}$$

δ تغییر طول میله (متر)   P نیروی وارد بر میله (نیوتن)   L طول اولیه میله (متر)

A سطح مقطع میله (متر مربع)   E ضریب ارتجاعی (نیوتن بر متر مربع)

معادله بالا را برای میله ای که سطح مقطع ثابت دارد و نیرو در دو انتهای آن وارد می شود، می توان نوشت.

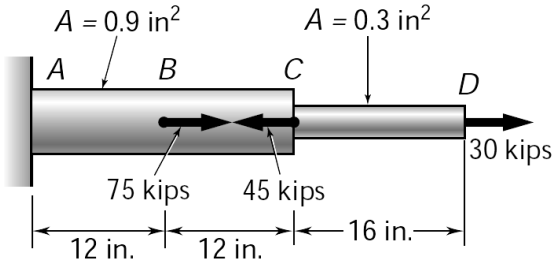
اگر میله ای دارای چند قسمت با سطح مقطع های مختلف باشد یا نیرو به قسمت های مختلف میله وارد شود، باید برای هر قسمت از میله که سطح مقطع ثابت و نیرو در دو انتها دارد، رابطه بالا ($\delta = PL/AE$) را نوشت. مثلاً میله‌ی شکل زیر، دارای سه ناحیه‌ی AB، BC و CD است که هر یک از این سه قسمت، سطح مقطع ثابت و نیرو در دو انتها دارند.



مثلاً نمی‌توان قسمت AC را به عنوان یک میله در نظر گرفت و رابطه تغییر طول را برایش نوشت زیرا یک نیرو به وسط میله AC (یعنی در نقطه B) وارد شده است. یا مثلاً نمی توان قسمت BD را به عنوان یک میله در نظر گرفت و رابطه تغییر طول را برایش نوشت زیرا میله BD سطح مقطع ثابتی ندارد. علاوه بر این در وسط میله نیز یک نیرو وارد شده است. لذا باید رابطه تغییر طول را برای هر یک از قسمت‌های AB، BC و CD به طور جداگانه نوشت.

مثال (تغییر طول میله در بارگذاری محوری):

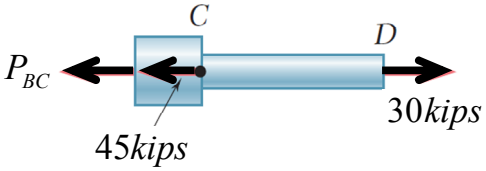
تغییر طول میله شکل زیر را بیابید (1kips=1000lb). $E = 29\times10^6\, lb/in^2$



پاسخ: این میله دارای سه قسمت AB و BC و CD می باشد. هر قسمت، سطح مقطع ثابتی دارد و در وسط هر قسمت، نیرویی اعمال نشده است. پس تغییر طول هر قسمت را حساب می کنیم. ابتدا باید نیروی داخلی هر سه قسمت را بیابیم. برای یافتن نیروی داخلیِ هر قسمت، باید آن قسمت را برش داد، لذا قسمت CD را برش می‌دهیم. برای برش قسمت CD، از وسطِ قسمتِ CD یک برش ایجاد می‌کنیم و نیمه‌ی سمت راستِ قسمت CD را در نظر می‌گیریم. بنابراین در سمت راست قسمت برش خورده‌ی میله‌ی CD (شکل زیر) نیروی خارجی 30kips وجود دارد. در محل ایجاد برش نیز، یک نیروی داخلی قرار می‌دهیم که در شکل زیر با P_{CD} نام‌گذاری شده است.

$$\sum F_x = 0 \;\rightarrow\; -P_{CD} + 30kips = 0 \;\rightarrow\; P_{CD} = 30kips = 30000lb$$

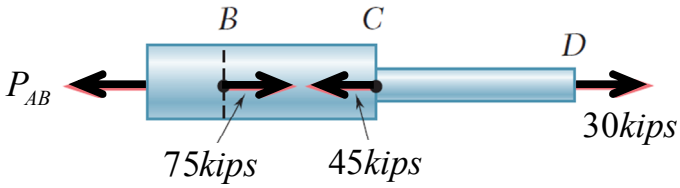
مقدار نیروی CD مثبت به دست آمد یعنی جهتی که برای نیروی CD انتخاب کرده بودیم (یعنی به سمت چپ) درست بوده است. پس نیروی داخلی عضو CD (که به سمت چپ است) تمایل دارد طول قسمت CD را زیاد کند. پس قسمت CD کششی است و طول آن زیاد می شود. حال قسمت BC را در نظر گرفته و برش می دهیم تا نیروی داخلی آن را بیابیم: برای برش قسمت BC، از وسطِ قسمتِ BC یک برش ایجاد می‌کنیم و نیمه‌ی سمت راستِ کل جسم را در نظر می‌گیریم. بنابراین در سمت راست قسمت برش خورده‌ی میله‌ی BC (شکل زیر) نیروهای خارجی 30kips و 45kips وجود دارد. در محل ایجاد برش نیز، یک نیروی داخلی قرار می‌دهیم که در شکل زیر با P_{BC} نام‌گذاری شده است.



$$\sum F_x = 0 \;\rightarrow\; -P_{BC} - 45 + 30 = 0 \;\rightarrow\; P_{BC} = -15kips = -15000lb$$

مقدار نیروی BC منفی به دست آمد یعنی جهتی که برای نیروی BC انتخاب کرده بودیم (یعنی به سمت چپ) درست بوده است. پس نیروی داخلی عضو BC به سمت راست است و تمایل دارد طول قسمت BC را کم کند. پس قسمت BC فشاری است و طول آن کم می‌شود. حال قسمت AB را برش می دهیم تا نیروی داخلی آن را بیابیم: برای برش قسمت AB، از وسطِ

قسمتِ AB یک برش ایجاد می‌کنیم و نیمه‌ی سمت راستِ کل جسم را در نظر می‌گیریم. بنابراین در سمت راستِ قسمت برش خورده‌ی میله‌ی AB (شکل زیر) نیروهای خارجی 30kips و 45kips و 75kips وجود دارد. در محل ایجاد برش نیز، یک نیروی داخلی قرار می‌دهیم که در شکل زیر با P_{AB} نام‌گذاری شده است.



$$\sum F_x = 0 \;\rightarrow\; -P_{AB} + 75 - 45 + 30 = 0 \;\rightarrow\; P_{AB} = 60kips = 60000lb$$

مقدار نیروی AB مثبت به دست آمد یعنی جهتی که برای نیروی AB انتخاب کرده بودیم (یعنی به سمت چپ) درست بوده است. پس نیروی داخلی عضو AB به سمت چپ است و تمایل دارد طول قسمت AB را زیاد کند. پس قسمت AB کششی است و طول آن زیاد می شود. حال تغییر طول هر یک از قسمت ها را محاسبه می کنیم.

$$\delta_{AB} = \frac{P_{AB}L_{AB}}{A_{AB}E_{AB}} = \frac{60000\times 12}{0.9\times(29\times10^6)} = 0.028in$$

$$\delta_{BC} = -\frac{P_{BC}L_{BC}}{A_{BC}E_{BC}} = -\frac{15000\times 12}{0.9\times(29\times10^6)} = -0.007in$$

تغییر طول میله BC را به این دلیل منفی در نظر گرفتیم که قبلاً به دست آوردیم که این میله فشاری است و طول آن کم می شود.

$$\delta_{CD} = \frac{P_{CD}L_{CD}}{A_{CD}E_{CD}} = \frac{30000\times 16}{0.3\times(29\times10^6)} = 0.055in$$

تغییر طول کل میله می شود: $\delta = \delta_{AB} + \delta_{BC} + \delta_{CD} = (0.028) + (-0.007) + (0.055) = +0.076in$

اثرات تغییر دما:

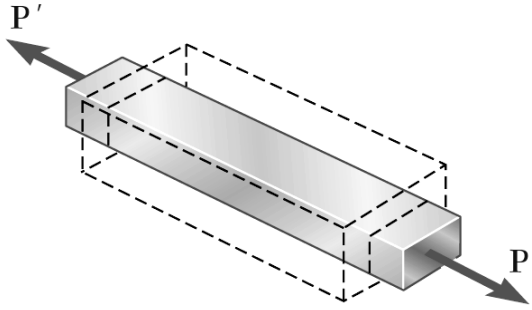
اگر میله‌ای به طول L را به اندازه‌ی ΔT افزایش دما دهیم، دچار تغییر طول به اندازه مقدار روبرو می‌شود: $\boxed{\delta_T = L\alpha\Delta T}$

α را ضریب انبساط حرارتی گویند. واحد ضریب انبساط حرارتی $\frac{1}{^\circ C}$ است. مقدار ضریب انبساط حرارتی برای هر ماده، مشخص بوده و در جداولی در کتابهای مقاومت مصالح موجود است.

قبلاً گفتیم که کرنش برابر است با تغییر طول تقسیم بر طول اولیه. لذا مقدار کرنش ایجاد شده در اثر تغییر دمای جسم برابر با $\varepsilon_T = \alpha\Delta T$ است که ε_T را کرنش حرارتی گویند. حرارت دادن به سازه ها باعث ایجاد تنش در آن ها می شود.

نسبت پُواسون:

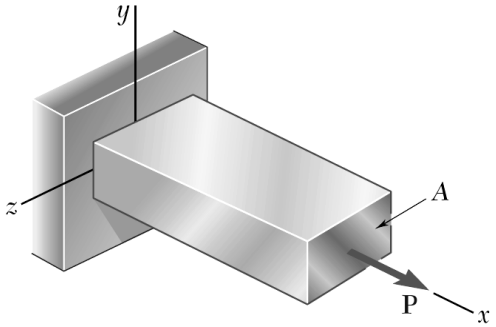
وقتی یک میله را در جهت محوری می کِشیم، در سایر جهات نیز دچار تغییر اندازه (کرنش) می شود. در شکل زیر میله ای تحت نیروی محوری P قرار گرفته است. شکل اولیه ی میله با خط چین های سیاه رنگ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، بعد از اعمال نیروی P، علاوه بر اینکه طول میله زیاد شده است، سطح مقطع آن نیز کم شده است.



نکته: حجم میله قبل و بعد از اعمال نیرو برابر نیست زیرا اعمال نیرو باعث تغییر در ساختار میله شده و چگالی جسم تغییر می کند.

اگر نیرویی در جهت x بر میله وارد کنیم (مطابق شکل زیر)، کرنش ε_x در راستای x ایجاد خواهد شد. در این صورت کرنش ایجاد شده در جهات y و z می شود « « $\boxed{\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\nu\varepsilon_x}$

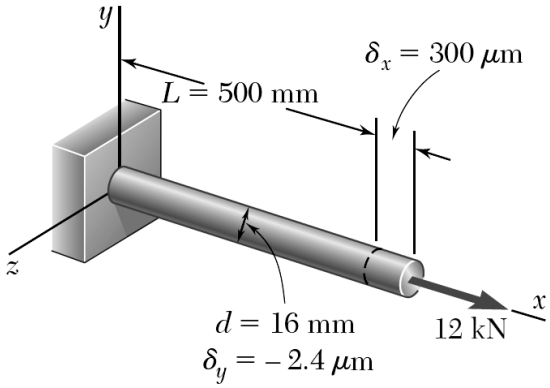
نماد ν، «نو» تلفظ می شود. ν را ضریب پواسون گویند که برای هر ماده ای مقدار مشخص و ثابتی دارد.



علامت منفی در رابطه بالا به این دلیل است که اگر در جهت x، طول جسم زیاد شود (کرنش مثبت)، در جهت های y و z طول جسم کم می شود (کرنش منفی). پس علامت کرنش در جهت x با علامت کرنش در جهات y و z باید مختلف باشد.

مثال (نسبت پُواسون):

میله روبرو تحت بارگذاری نشان داده شده، دچار تغییر طول ۳۰۰میکرومتر ($300\mu m$) و کاهش قطر $2.4\mu m$ می شود. ضریب ارتجاعی (E) و نسبت پواسون (ν) این میله را بیابید.



پاسخ: مساحت سطح مقطع میله می شود: $A = \pi r^2 = \pi\left(8\times10^{-3}\right)^2 = 201\times10^{-6}m^2$

تنش و کرنش در راستای x می شود:

$$\sigma_x = \frac{P}{A} = \frac{12\times10^3}{201\times10^{-6}} = 59.7\times10^6\,Pa = 59.7MPa \qquad \varepsilon_x = \frac{\delta}{L} = \frac{300\times10^{-6}}{500\times10^{-3}} = 600\times10^{-6}$$

طبق قانون هوک داریم: $\sigma_x = E\varepsilon_x \quad \rightarrow \quad E = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} = \frac{59.7\times10^6}{600\times10^{-6}} = 99.5\times10^9\,Pa = 99.5GPa$

کرنش در راستای y می شود: $\varepsilon_y = \frac{\delta_y}{d} = \frac{-2.4\times10^{-6}}{16\times10^{-3}} = -150\times10^{-6}$

از رابطه پواسون داریم: $\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\nu\varepsilon_x \quad \longrightarrow \quad \nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{-150\times10^{-6}}{600\times10^{-6}} = 0.25$

ضریب ایمنی:

تنش نهایی، مقدار تنشی است که اگر به جسمی وارد شود، شکسته می شود. همیشه باید طوری سازه ها را طراحی نمود که در حین عملکرد دچار شکست نشوند. مثلاً یک پل که بر روی یک رودخانه است باید طوری طراحی شود که در بدترین حالت (که

کامیون های زیاد و با سرعت بالا از روی آن عبور کنند) دچار شکست نشود. همیشه سازه ها را طوری طراحی می کنند که تنش در آن ها به تنش نهایی نزدیک نشود.

مهندسان طراح، یک تنش به عنوان تنش مجاز در نظر می گیرند که تنش ایجاد شده در آن سازه نباید از آن تنش مجاز بیش تر شود. تنش مجاز کمتر از تنش نهایی جسم است. مثلاً اگر تنش نهایی که اسکلت فلزی یک پل می تواند تحمل کند 200GPa باشد، مهندسان طوری طراحی پل را انجام می دهند که تنش در پل، کمتر از 160GPa باشد. در این مثال، تنش نهایی 200GPa و تنش مجاز 160GPa است.

ضریب اطمینان برابر است با تنش نهایی تقسیم بر تنش مجاز. پس در مثال بالا، ضریب اطمینان 1.25 است. انتخاب ضریب اطمینان با مهندس طراح یک سازه است. اگر ضریب اطمینان کم انتخاب شود، احتمال شکست سازه در حین کار وجود دارد. اگر ضریب اطمینان خیلی زیاد انتخاب شود، هزینه ساخت سازه بیش از حد بالا می رود. دلایل استفاده از ضریب اطمینان به صورت زیر است:

۱- تغییرات اجزای سازه: برخی از اجزای سازه ممکن است در حین فرآیند تولید یا نصب دچار آسیب های جزیی شده و عملکرد و مقاومت ان ها کم شود.

۲- بارگذاری های متعدد: وقتی بارگذاری های متعددی بر یک سازه اعمال می شود، احتمال شکست سازه در طولانی مدت افزایش می یابد. این پدیده را خستگی می گویند. مثلاً یک پل که روزانه به دفعات زیاد تحت بارگذاری قرار می گیرد (در اثر عبور ماشین ها)، در معرض خستگی است.

۳- نوع بارگذاری: نوع بارگذاری بر مقاومت سازه اثر دارد. مثلاً بارگذاری های خیلی سریع، باعث کاهش مقاومت سازه می شود.

۴- جنس مواد: اگر سازه ما از جنس مواد ترد باشد باید ضریب اطمینان بیشتری برای ان در نظر بگیریم زیرا مواد ترد بدون هیچ علامتی و به طور ناگهانی دچار شکست می شوند ولی مواد نرم (چکش خوار) ابتدا دچار تغییر طول های زیاد شده سپس می شکنند لذا می توان نزدیک بودن شکست ان ها را تشخیص داده و جلوگیری نمود.

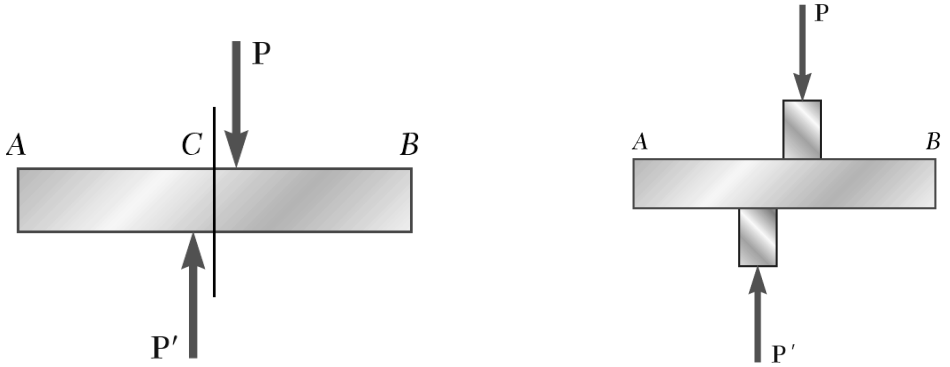
۵- خطای روش های تحلیلی: تقریباً تمامی روش های تحلیلی اندکی خطا دارند. لذا باید از ضریب اطمینان استفاده نمود.

۶- عوامل پیش بینی نشده: همیشه برای یک سازه باید عوامل پیش بینی نشده در نظر گرفت که ممکن است باعث شکست سازه شوند. به همین دلیل باید از ضریب اطمینان استفاده نمود.

۷- حساسیت کاربرد سازه: مثلاً ضریب اطمینان در یک هواپیمای مسافربری بیش تر از ضریب اطمینان در یک هواپیمای بدون سرنشین در نظر گرفته می شود.

تنش برشی:

در شکل زیر، صفحه تحت اثر نیروهای P قرار داشته و می خواهد توسط این نیروها برش داده شود.



نیروی وارد شده به مقطع C یک نیروی برشی است. لذا تنش برشی متوسط در مقطع C به این صورت تعریف می شود:

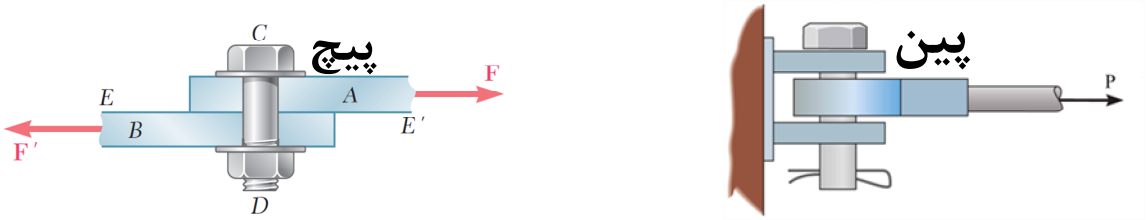
$$\tau = \frac{P}{A}$$

τ تنش برشی (نیوتن بر متر مربع) P نیروی وارد بر مقطع (نیوتن) A مساحت قسمت برش خورده (متر مربع)

نماد τ به صورت «تاو» تلفظ می شود.

فرض کنید در اثر نیروی برشی وارد شده، جسم بُریده شود. در این صورت سطح مقطع قسمت برش خورده، همان A در رابطه بالا است.

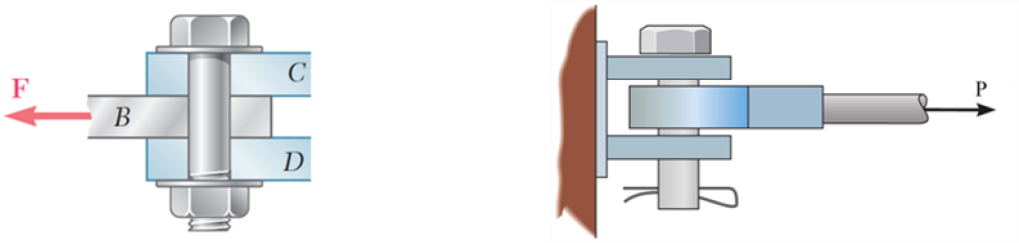
تنش برشی معمولاً در پین ها، پرچ ها و پیچ و مهره ها به وجود می آید. در تصویر سمت راست از شکل زیر، یک پین تحت بارگذاری برشی نشان داده شده است و در تصویر سمت چپ از شکل زیر یک پیچ تحت بارگذاری برشی نشان داده شده است.



تنش برشی دوگانه:

اگر قطعه ای که تحت نیروی برشی قرار دارد (پیچ، پین یا . . .) به دو صفحه متصل باشد، آن قطعه تحت تنش برشی ساده قرار دارد و تنش برشی در قطعه از رابطه ای که پیش تر ارائه شد ($\tau = P / A$) به دست می آید، مانند تصویر پیچ در شکل بالا.

اگر قطعه ای که تحت نیروی برشی قرار دارد (پیچ، پین یا . . .) به سه صفحه متصل باشد، آن قطعه تحت تنش برشی دوگانه قرار دارد. مثلاً در تصویر چپ شکل زیر، پیچ به سه صفحه‌ی B، C و D متصل است. همچنین در تصویر سمت راست نیز، پین به سه صفحه متصل شده است، پس تنش برشی دوگانه در پیچ و پین وجود دارد.



در قطعاتی که تنش برشی دوگانه دارند، در یک سمت قطعه، دو صفحه و در سمت دیگر قطعه، یک صفحه وجود دارد. مثلاً در تصویر سمت چپ شکل بالا، صفحه‌ی B به صورت تکی و در سمت چپِ پیچ، و صفحات C و D در سمت راست پیچ قرار دارند.

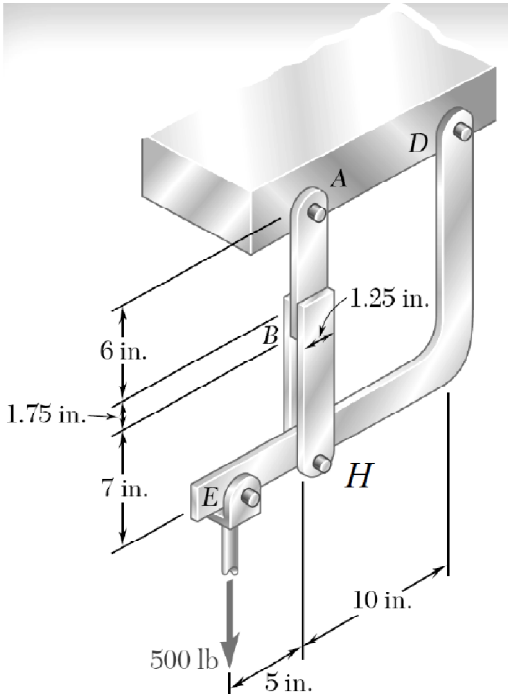
تنش برشی دوگانه در یک پیچ یا پین از رابطه زیر به دست می آید:

$$\tau = \frac{P}{2A}$$

τ تنش برشی (پاسکال) P نیروی وارد بر صفحه‌ی تکی (نیوتن) A مساحت قسمت برش خورده (مترمربع)

نکته مهم: در پیچ ها و پین هایی که به سه صفحه متصل هستند، نیروی دو صفحه ای که در یک سمت پیچ قرار دارند با هم برابر بوده و به اندازه‌ی نصف نیروی صفحه‌ی تکی می باشد.

مثال (تنش برشی):



در شکل مقابل، میله ABH از دو قسمت تشکیل شده است. میله AB به ضخامت 0.375in و میله های BH که ضخامت هر کدام 0.25in است. میله‌های AB و BH با چسب به هم متصل شده اند. قطر پین های A و H به ترتیب 0.375in و 0.25in است. این موارد را بیابید:

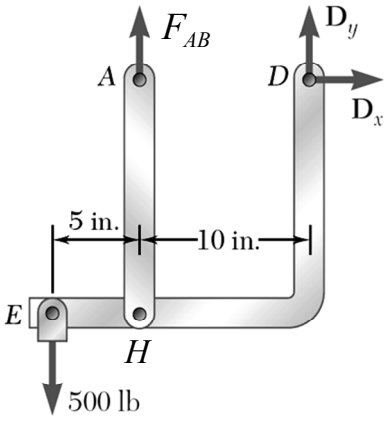
** تنش برشی در پین A و پین H

** اگر تنش برشی قابل تحمل توسط فلزی که پین ها از آن ساخته شده اند، ۷۰۰۰ پوند بر اینچ مربع باشد، آیا پین های A و H شکسته خواهد شد؟

پاسخ: ابتدا نمودار آزاد کل جسم را رسم می کنیم (شکل زیر) تا نیروی تکیه‌گاه A را بیابیم.

$$\sum M_D = 0 \;\rightarrow\; 500\times 15 - F_{AB}\times 10 = 0 \;\rightarrow\; F_{AB} = 750lb$$

پین A به دو صفحه متصل است (یک صفحه همان قطعه‌ی AB و صفحه‌ی دیگر، همان دیوار است که پین به آن متصل است).



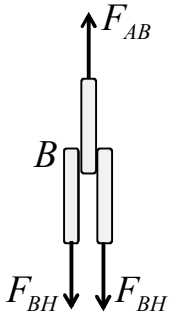
پس پین A تنش ساده دارد. لذا خواهیم داشت » » » » » » » » » » » » » »

$$\tau_A = \frac{F_{AB}}{A} = \frac{750}{\frac{1}{4}\pi(0.375)^2} = 6790\frac{lb}{in^2}$$

پس پین A دچار شکست نمی شود چون تنش آن کمتر از ۷۰۰۰ است. اگر پین A برش بخورد، قسمت برش خورده به صورت دایره‌ای به قطر 0.375in (یعنی همان قطر پین) خواهد بود لذا A (در رابطه تنش برشی که در بالا نوشته شده است) برابر با مساحت دایره ای به قطر 0.375in است.

پین H به سه صفحه متصل است (دو صفحه در یک سمت پین که مربوط به قطعه BH است و یک صفحه در سمت دیگر پین که مربوط به قطعه BHD است). پس پین H تنش دوگانه دارد. برای محاسبه ی تنش برشی در پین H، باید نیروی دو صفحه ای که در یک سمت پین H هستند را بیابیم. دو صفحه ای که در یک سمت پین H هستند، همان دو صفحه ی تشکیل دهنده ی قطعه BH هستند. پس نیروی دو صفحه ی تشکیل دهنده ی قطعه BH را محاسبه می نماییم.

در شکلِ صورت مسئله، قسمتی که با نام B مشخص شده است را در نظر بگیرید (این قسمت را اتصال B می‌نامیم). در واقع، اتصال B، قطعه AB را به دو صفحه ی BH جوش داده است. نمودار آزاد این قسمت به صورت شکل زیر است.



به دلیل تقارن، نیروی دو صفحه ی تشکیل دهنده ی قطعه BH با هم برابر است به همین دلیل در نمودار آزاد، دو نیروی به سمت پایین، با اندازه های یکسان در نظر گرفته شد.

$$\sum F_y = 0 \;\rightarrow\; F_{AB} - F_{BH} - F_{BH} = 0 \quad \rightarrow\; F_{BH} = \frac{F_{AB}}{2} = \frac{750}{2} = 375lb$$

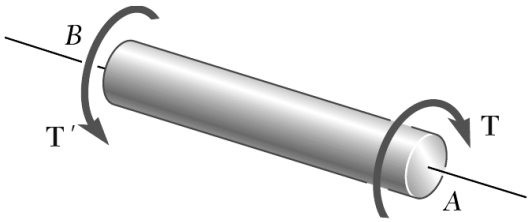
پس نیروی هر یک از صفحات تشکیل دهنده ی قطعه BH برابر با ۳۷۵ پوند است. لذا نیروی هر یک از دو صفحه ای که در یک سمت پین H هستند نیز ۳۷۵ پوند است. بنابراین طبق نکته ای که قبلاً در متن درس گفته شد، نیروی صفحه ی تکی که در یک سمت پین H است برابر با دو برابر نیروی دو صفحه دیگر است. لذا نیروی صفحه تکی برابر با ۷۵۰ پوند است. از طرفی، اگر پین H برش بخورد، قسمت برش خورده به صورت دایره ای به قطر 0.25in (یعنی همان قطر پین) خواهد بود لذا A (در رابطه تنش برشی) برابر با مساحت دایره ای به قطر 0.25in است.

پس تنش برشی در پین H می شود: $\tau_H = \dfrac{F}{2A} = \dfrac{750}{2\times\left(\frac{1}{4}\pi(0.25)^2\right)} = 7640\dfrac{lb}{in^2}$

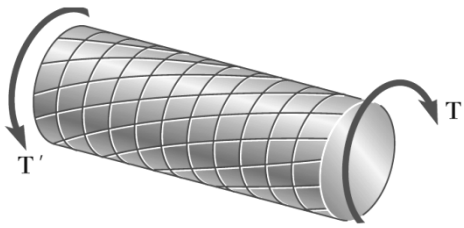
لذا پین H دچار شکست می شود چون تنش آن بیش تر از ۷۰۰۰ است (باید قطر پین H را بیش تر نمود تا از شکست آن جلوگیری شود).

۲-۲- پیچش

در کاربردهای زیادی در مهندسی، به قطعاتی برخورد می کنیم که دچار پیچش می شوند. به عنوان مثال میل گردان های انتقال که برای انتقال قدرت از نقطه ای به نقطه دیگر استفاده می شوند. در شکل زیر، میله ای با مقطع دایره ای نشان داده شده که به دو طرف آن، دو کوپل پیچشی وارد شده و باعث پیچش جسم شده است.

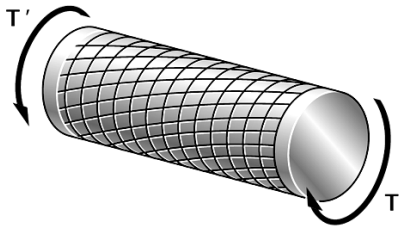


وقتی به یک میله با مقطع دایره ای، کوپل پیچشی وارد کنیم، هر کدام از سطح مقطع های میله، صاف و صفحه ای باقی می ماند و دچار تابیدگی نمی شود. در شکل زیر مشاهده می شود که بعد از اعمال کوپل پیچشی به جسم، تمام سطح مقطع های میله، شکل دایره ای خود را حفظ کرده و تغییر حالت نداده اند. میله های با مقاطع غیر دایره ای چنین خاصیتی ندارند و تحت پیچش، سطح مقطع آن ها دچار تابیدگی می شود.



برای اینکه تمام سطح مقطع های میله، به صورت صفحه ای و دایره ای باقی بمانند و تابیدگی پیدا نکنند، دو انتهای میله نیز باید در حین بارگذاری دچار تابیدگی نشوند. نحوه اعمال نادرست کوپل پیچشی به دو انتهای میله باعث ایجاد تابیدگی در دو

صفحه انتهایی میله می‌شود و لذا تابیدگی در سایر سطح مقطع ها نیز ایجاد می شود. برای این کار، کوپل های پیچشی را بر دو صفحه دایره ای صُلب اعمال می کنند که به طور محکم، به دو انتهای میله نصب شده است. صفحات صُلب یعنی صفحاتی که تغییر شکل نمی دهد.



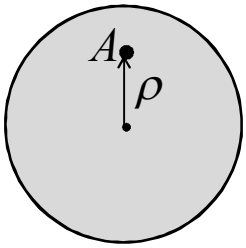
تنش ایجاد شده در میله تحت پیچش:

تنش برشی ایجاد شده در اثر گشتاور T که به یک میله با مقطع دایره ای وارد می شود به صورت زیر است:

$$\tau = \frac{T\rho}{J}$$

T گشتاور وارد شده به میله (نیوتن متر)

τ تنش ایجاد شده در شعاع ρ از میله (تنش بر حسب پاسکال و شعاع بر حسب متر است)



مثلاً در شکل روبرو، نقطه A در شعاع ρ از مرکز میله قرار دارد.

J ممان اینرسی قطبی مقطع میله (بر حسب m^4) است که از روابط زیر به دست می آید:

برای میله با مقطع دایره ای، داریم:

$$J = \frac{1}{2}\pi c^4$$

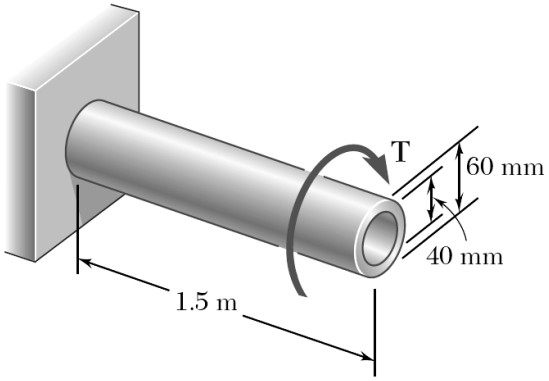
برای میله با مقطع به شکل دایره توخالی داریم:

$$J = \frac{1}{2}\pi\left(c_2^4 - c_1^4\right)$$

که c_1 شعاع داخلی و c_2 شعاع خارجی است.

مثال (تنش ایجاد شده در میله تحت پیچش):

تنش برشی مجاز میله با مقطع دایره ای توخالی شکل زیر، 120MPa است. قطر داخلی میله 40mm و قطر خارجی آن 60mm است. بیشترین گشتاوری که می توان به آن اعمال نمود چقدر است؟ در حالتی که بیشترین گشتاور ممکن بر میله اعمال شود، کمترین تنش ایجاد شده چقدر و در کجا خواهد بود؟



پاسخ: داریم: $\tau = \frac{T\rho}{J}$. بیشترین تنش برشی در بیشترین شعاع اتفاق می افتد پس $\rho = 30mm$

ممان اینرسی قطبی میله می شود: $J = \frac{1}{2}\pi\,(c_2^4 - c_1^4) = \frac{1}{2}\pi(0.03^4 - 0.02^4) = 1.021 \times 10^{-6}\ \mathrm{m}^4$

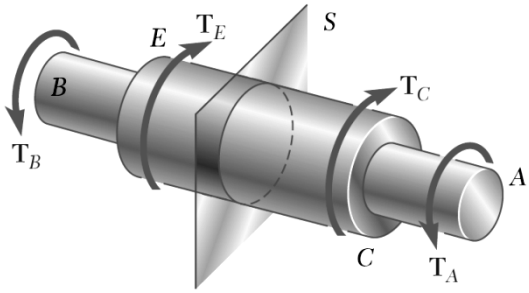
$$\tau = \frac{T\rho}{J} \quad \rightarrow \quad 120\times10^{6} = \frac{T\times(30\times10^{-3})}{1.021\times10^{-6}} \quad \rightarrow \quad T = 4.08\times10^{3}\,N.m$$

کمترین تنش برشی در کمترین شعاع اتفاق می افتد یعنی در شعاع داخلی میله. پس داریم:

$$\tau_{\min} = \frac{T\rho_{\min}}{J} = \frac{(4.08\times10^{3})\times(20\times10^{-3})}{1.021\times10^{-6}} = 80\times10^{6}\,Pa = 80MPa$$

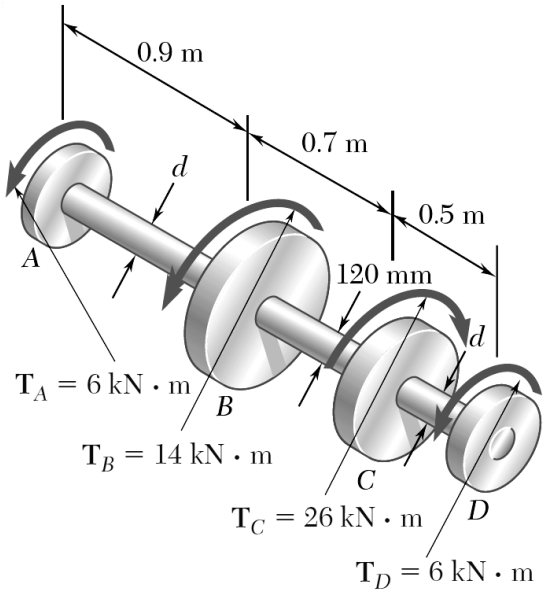
تنش ایجاد شده در میله تحت پیچش:

رابطه روبرو را برای میله ای که سطح مقطع آن ثابت باشد و در وسط میله، گشتاور خارجی دیگری اعمال نشده باشد می توان نوشت. اگر میله ای با سطح مقطع متغیر و با گشتاورهای متعدد در نقاط مختلف موجود باشد، برای هر قسمت از میله که سطح مقطع ثابت و گشتاور خارجی نیز در وسط آن موجود نباشد، می توان رابطه بالا را نوشت. در این صورت، T در رابطه بالا گشتاور داخلی هر قسمت است که نحوه محاسبه آن در مثال بعد خواهد آمد. مثلاً در میله‌ی شکل زیر، نمی توان رابطه بالا را برای قسمت های BS، AE و AB نوشت ولی می‌توان برای قسمت های AC، CE و BE نوشت.



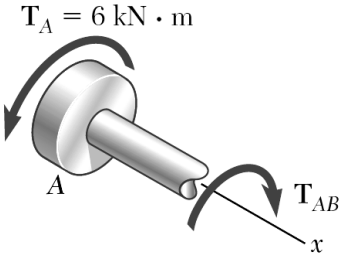
مثال (تنش ایجاد شده در میله تحت پیچش):

قطر داخلی و خارجی میله توخالی BC به ترتیب 90mm و 120mm است. قطر میله های توپر AB و CD برابر با d است. تنش برشی مجاز تمام میله ها 130MPa است. بیشترین و کمترین تنش برشی در میله BC و بیشترین مقدار ممکن برای d را بیابید.



پاسخ: میله از سه قسمت AB، BC و CD تشکیل شده است که هر قسمت سطح مقطع ثابت داشته و در وسط هر قسمت نیز، گشتاور خارجی وجود ندارد. برای هر یک از سه قسمت بالا، باید با رسم نمودار آزاد، مقدار گشتاور داخلی را محاسبه نمود. ابتدا می خواهیم گشتاور داخلی قسمت AB را بیابیم.

باید قسمت AB را از وسط برش بزنیم (شکل زیر).

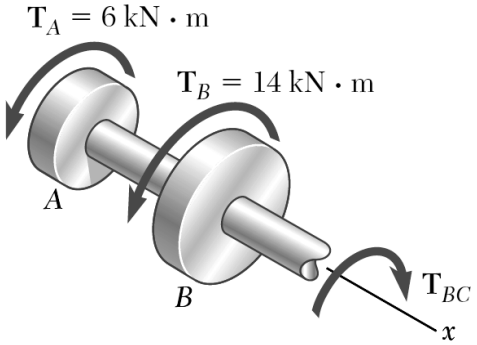


در قسمتی که برش خورده (یعنی وسط میله AB) یک گشتاور به نام T_{AB} قرار می دهیم که این همان گشتاور داخلی قسمت AB است که باید آن را بیابیم. چون جهت این گشتاور را نمی دانیم، به سمت دلخواهی آن را رسم می کنیم. یک گشتاور خارجی 6kN.m هم در نقطه A وارد می شود که آن را در نمودار آزاد، رسم نموده ایم. حال معادله‌ی تعادل گشتاور را می نویسیم، تا T_{AB} به دست آید. جهت مثبت و منفی را به صورت دلخواه انتخاب می کنیم. مثلاً ما در این مثال، گشتاورهایی که در جهت گشتاور T_A باشد را مثبت در نظر می‌گیریم و گشتاورهایی که خلاف آن باشد را منفی در نظر می گیریم. حال معادله تعادل گشتاورها به صورت زیر می شود:

$$\sum M = 0 \longrightarrow +6000 - T_{AB} = 0 \longrightarrow T_{AB} = 6000N.m$$

علامت T_{AB} مثبت به دست آمد یعنی جهتی که انتخاب کردیم درست بوده است.

نمودار آزاد قسمت BC را دقیقاً با همان روند نمودار آزاد قسمت AB رسم می کنیم (شکل زیر):



معادله‌ی تعادل گشتاورها به صورت روبرو می‌شود: $\sum M = 0 \rightarrow +6000+14000-T_{BC}=0 \rightarrow T_{BC} = 20000N.m$

اگر نمودار آزاد قسمت CD را به همان روش قبلی رسم کنیم، معادله تعادل گشتاورها به صورت زیر می شود (نمودار آزاد این قسمت رسم نشده است و فقط معادله تعادل گشتاورها را می نویسیم):

$$\sum M = 0 \rightarrow +6000+14000-26000-T_{CD}=0 \rightarrow T_{CD} = 6000N.m$$

برای میله توخالی BC، شعاع خارجی 60mm و شعاع داخلی 45mm است، لذا داریم:

$$J_{BC} = \frac{1}{2}\pi\left(c_2^4 - c_1^4\right) = \frac{1}{2}\pi\left(0.06^4 - 0.045^4\right) = 13.92\times10^{-6}m^4$$

بیشترین تنش میله BC در شعاع خارجی آن اتفاق می افتد، لذا داریم:

$$\left(\tau_{BC}\right)_{\max} = \frac{T_{BC}c_2}{J_{BC}} = \frac{20000\times(60\times10^{-3})}{13.92\times10^{-6}} = 86.2\times10^6 Pa = 86.2MPa$$

کمترین تنش برشی در میله BC در شعاع داخلی اتفاق می افتد، لذا داریم:

$$\left(\tau_{BC}\right)_{\min} = \frac{T_{BC}c_1}{J_{BC}} = \frac{20000\times(45\times10^{-3})}{13.92\times10^{-6}} = 64.7\times10^6 Pa = 64.7MPa$$

برای میله های AB و CD که توپُر و با قطر d هستند داریم:

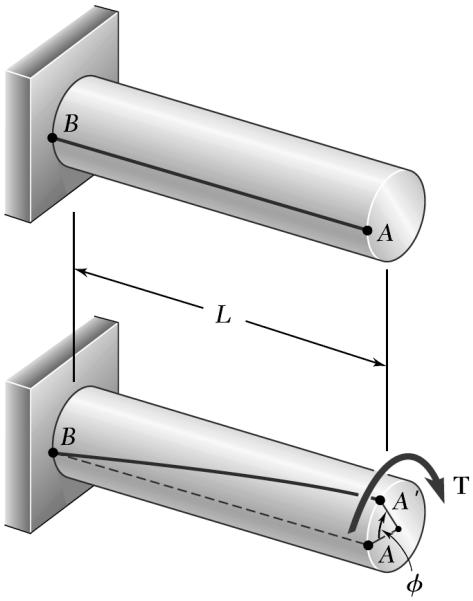
$$J_{AB} = J_{CD} = \frac{1}{2}\pi c^4 = \frac{1}{2}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^4 = \frac{\pi d^4}{32}$$

در صورت سؤال گفته شد که تنش برشی مجاز در تمام میله ها 130MPa است. از طرفی می دانیم، هر چه قطر میله بیش تر باشد، میله مقاوم تر می شود و لذا تنش وارد بر آن کمتر است. پس باید ببینیم اگر تنش وارد بر میله 130MPa باشد (که بیش ترین تنش مجاز است)، قطر میله چقدر خواهد بود.

$$(\tau_{AB})_{\max}=\frac{T_{AB}\rho_{AB}}{J_{AB}}=\frac{6000\times\left(\frac{d}{2}\right)}{\left(\frac{\pi d^4}{32}\right)}=\frac{6000\times 32}{2\times\pi\times d^3}=\frac{30558.7}{d^3}\xrightarrow{(\tau_{AB})_{\max}=130MPa}130\times10^6=\frac{30558.7}{d^3}\rightarrow d=6.17cm$$

تغییر شکل میله تحت پیچش:

میله ای با مقطع دایره ای را در نظر بگیرید که از یک طرف به دیوار متصل شده و از طرف دیگر تحت کوپل پیچشی T قرار گرفته است. انتهای آزاد میله که تحت اثر کوچل T است به اندازه زاویه ϕ می‌پیچد. ϕ را زاویه پیچش می گویند. می‌خواهیم رابطه بین زاویه پیچش و کوپل پیچشی را بیابیم.



زاویه پیچش میله ای که گشتاور T به آن وارد می شود از رابطه زیر به دست می آید » » »

$$\boxed{\phi=\frac{TL}{JG}}$$

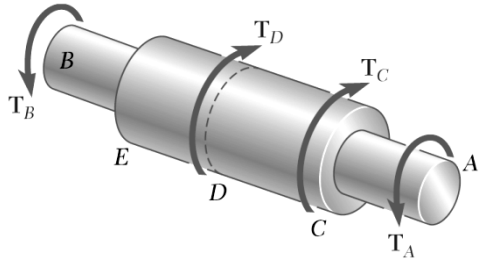
ϕ زاویه پیچش (رادیان) T گشتاور وارد شده به میله (N.m) L طول میله (متر)

J ممان اینرسی قطبی مقطع میله (m^4) که روابط آن قبلاً گفته شد

G ضریب ارتجاعی برشی (بر حسب نیوتن بر متر مربع که همان Pa است)

زاویه پیچش در میله های چند تکه:

اگر یک میله شامل چند قسمت باشد، زاویه پیچش کلی، از جمع زوایای پیچش هر قسمت به دست می آید. مثلاً برای میله EC در شکل زیر، نمی توان رابطه $\phi=TL/JG$ را نوشت زیرا در وسط میله EC یک گشتاور اعمال شده است. همچنین برای میله BD نمی توان رابطه فوق را نوشت چون سطح مقطع میله در وسط آن عوض شده و J عوض می شود. لذا رابطه بالا را فقط برای قسمت های AC، CD، DE و BE می توان نوشت.



هر کدام از چهار قسمت میله، یک زاویه پیچش به صورت زیر دارند:

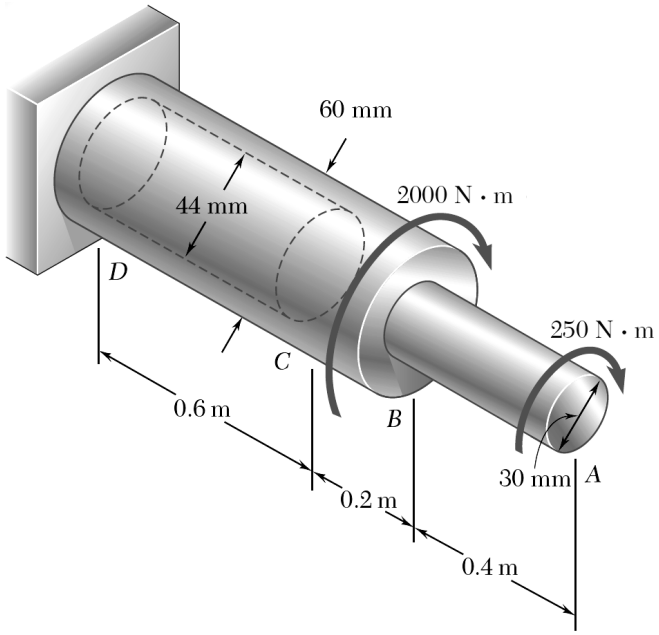
$$\phi_{AC}=\frac{T_{AC}L_{AC}}{J_{AC}G_{AC}}\qquad\phi_{CD}=\frac{T_{CD}L_{CD}}{J_{CD}G_{CD}}\qquad\phi_{DE}=\frac{T_{DE}L_{DE}}{J_{DE}G_{DE}}\qquad\phi_{BE}=\frac{T_{BE}L_{BE}}{J_{BE}G_{BE}}$$

زاویه پیچش کلی در کل میله (یعنی در میله AB) می شود:

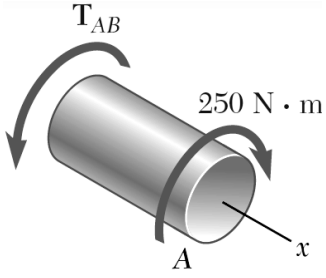
$$\phi_{AB} = \phi_{AC} + \phi_{CD} + \phi_{DE} + \phi_{BE} = \frac{T_{AC}L_{AC}}{J_{AC}G_{AC}} + \frac{T_{CD}L_{CD}}{J_{CD}G_{CD}} + \frac{T_{DE}L_{DE}}{J_{DE}G_{DE}} + \frac{T_{BE}L_{BE}}{J_{BE}G_{BE}}$$

مثال (زاویه پیچش در میله های چند تکه):

میله فولادی روبرو به تکیه گاه ثابتی متصل است. قسمت CD میله، توخالی بوده و قطر داخلی آن 44mm است. زاویه پیچش انتهای A را بیابید. برای فولاد G=77GPa

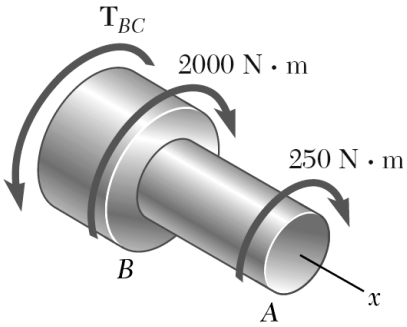


پاسخ: این میله شامل سه قسمت AB و BC و CD است که هر قسمت باید جداگانه تحلیل شود. ابتدا گشتاور داخلی هر یک از قسمت‌ها را می‌یابیم. به همان شیوه ای که در مثال های قبل گفته شد، نمودار آزاد هر قسمت را رسم نموده و سپس گشتاور داخلی هر قسمت را می‌یابیم. قسمت AB را برش می‌دهیم و نمودار آزاد آن را رسم می‌کنیم که به صورت شکل زیر خواهد شد:



$$\sum M = 0 \;\rightarrow\; T_{AB} - 250 = 0 \;\rightarrow\; T_{AB} = 250N.m$$

علامت T_{AB} مثبت به دست آمد، یعنی جهتی که برای آن انتخاب کرده بودیم درست بوده است. حال قسمت BC را برش می‌دهیم و نمودار آزاد آن را رسم می کنیم که به صورت شکل زیر خواهد شد:



$$\sum M = 0 \;\rightarrow\; T_{BC} - 2000 - 250 = 0 \;\rightarrow\; T_{BC} = 2250N.m$$

علامت T_{BC} مثبت به دست آمد، یعنی جهتی که برای آن انتخاب کرده بودیم درست بوده است.

اگر مقطع CD را نیز برش بزنیم، به طریق مشابه خواهیم داشت: $T_{CD} = 2250N.m$

T_{CD} نیز مثبت به دست می آید یعنی جهت T_{CD} نیز در همان جهت های T_{AB} و T_{BC} خواهد بود. پس اکنون هر سه گشتاور داخلیِ قسمت‌های AB، BC و CD در خلاف جهت گشتاور 2000N.m هستند. جهت گشتاور داخلی در هر قسمت، نشان‌دهنده‌ی جهتی است که آن قسمت از میله پیچیده می شود. لذا در این مثال، چون گشتاور داخلی هر سه قسمت، در یک جهت هستند پس هر سه قسمت میله در یک جهت می پیچند (جهت پیچش هر سه قسمت یکسان است).

حال ممان اینرسی قطبی قسمت های مختلف میله را می یابیم:

$$J_{AB}=\frac{1}{2}\pi c_{AB}^4=\frac{1}{2}\pi\times\left(15\times10^{-3}\right)^4=0.0795\times10^{-6}m^4$$

$$J_{BC}=\frac{1}{2}\pi c_{BC}^4=\frac{1}{2}\pi\times\left(30\times10^{-3}\right)^4=1.272\times10^{-6}m^4$$

$$J_{CD}=\frac{1}{2}\pi\left(c_2^4-c_1^4\right)=\frac{1}{2}\pi\times\left[\left(30\times10^{-3}\right)^4-\left(22\times10^{-3}\right)^4\right]=0.904\times10^{-6}m^4$$

اکنون مقدار پیچش در هر سه قسمت را محاسبه نموده و با هم جمع می کنیم تا مقدار پیچش در کل میله یعنی پیچش مقطع A به دست آید (جهت پیچش در سه قسمت میله را در نظر بگیرید):

$$\phi_{AB}=\frac{T_{AB}L_{AB}}{J_{AB}G_{AB}}=\frac{250\times0.4}{(0.0795\times10^{-6})\times(77\times10^9)}=0.01634$$

$$\phi_{BC}=\frac{T_{BC}L_{BC}}{J_{BC}G_{BC}}=\frac{2250\times0.2}{(1.272\times10^{-6})\times(77\times10^9)}=0.00459$$

$$\phi_{CD}=\frac{T_{CD}L_{CD}}{J_{CD}G_{CD}}=\frac{2250\times0.6}{(0.904\times10^{-6})\times(77\times10^9)}=0.01939$$

پیچش کلی میله می شود: $\phi_A=\phi_{AB}+\phi_{BC}+\phi_{CD}=0.01634+0.00459+0.01939=0.0403\,rad$

$$\phi_A=0.0403rad\times\frac{180\deg}{3.14rad}=0.0403\times\frac{180}{3.14}\deg=2.309\deg$$

*** * * * پیامبر گرامی اسلام (ص) * * * ***

هر که می‌خواهد دعایش مستجاب شود و غمش از بین برود، باید گره از کار گرفتاری باز کند.

(نهج الفصاحه، صفحه ۷۵۹، حدیث ۲۹۶۱)

۳– بخش سوم «اجزای ماشین»

در این بخش به بررسی اجزای ماشین و خواص مواد می‌پردازیم.

۳–۱– اجزای ماشین

به سیستم های صنعتی که انرژی را به انرژی دیگر تبدیل می کند ماشین می گویند. به عنوان مثال موتور الکتریکی، ماشینی است که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می کند. ژنراتور الکتریکی، انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می کند. مثلاً در یک ماشین تراش، تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی، باعث دوران سه نظام می شود و عمل تراشکاری انجام می شود.

ماشین ها برای بر طرف ساختن نیاز انسان ها طراحی و ساخته می شوند. هر ماشین، خود از اجزای مختلفی تشکیل می شود. اجزای یک ماشین، به تنهایی نمی توانند کار خاصی انجام دهند و وقتی در کنار هم قرار می گیرند یک ماشین کامل را تشکیل می دهند که یک کار خاص را انجام می دهد. به عنوان مثال بالابر (آسانسور) یک ماشین است که وظیفه آن جابجایی بار است و برخی از اجزای آن عبارتند از: ** اتاقک بار ** کابل ** چرخدنده ** موتور الکتریکی و . . . .

ماشین های بسیار زیادی در زندگی روزمره ما وجود دارد، از قبیل: ** ماشین چمن زنی ** بالابر (آسانسور) ** سشوار ** اتومبیل ** چرخ گوشت ** ماشین لباسشویی و . . . .

ماشین ها هر اندازه که از نظر عملکردی با هم تفاوت داشته باشند، از نظر ساختمان، نقاط مشترک زیادی دارند. اجزاء ماشین می‌تواند قطعات بسیار ساده ای مثل پیچ، فنر، چرخدنده، کابل، یاتاقان، کلاچ و غیره باشد. برخی از اجزای رایج در ماشین ها عبارتند از: چرخدنده، فنر، یاتاقان، صفحه کلاچ، پیچ، تسمه و . . .

اتصالات:

اجزای مختلف یک ماشین به وسیله قطعات اتصالی به یکدیگر متصل می شوند. اتصالات به دو دسته زیر تقسیم می شوند:

۱- اتصالات دائم ۲- اتصالات موقت

اتصال دائم به اتصالی گفته می شود که برای جداسازی آن، وسیله‌ی اتصال و قسمتی از قطعات متصل شده یا تمامی آن ها آسیب ببینند. به همین دلیل به اتصالات دائم، اتصالات جدانشدنی هم می گویند. معمولاً قطعاتی که عمرشان بسیار زیاد است و نیازی به تعمیر پیدا نمی‌کنند با استفاده از اتصال دائم به یکدیگر متصل می گردند. برخی از اتصالات دائم عبارتند از: * جوش * لحیم * پرچ * چسب

در روش جوش دادن، دو قطعه به یکدیگر نزدیک شده و به هم جوش داده می‌شوند.

در اتصالات موقت، دو قطعه توسط یک اتصال به یکدیگر وصل می شوند و در صورت نیاز می توان آن ها را جدا نمود. برخی از انواع اتصالات موقت عبارتند از: * پیچ و مهره * خار * پین * گُوِه

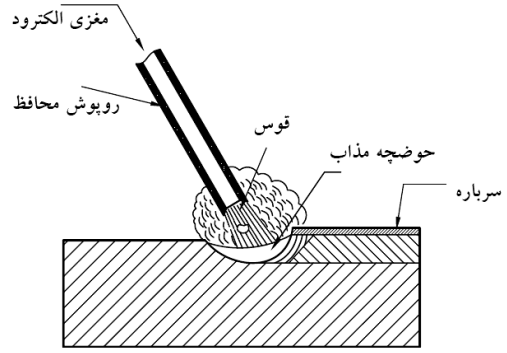
اتصال با جوش:

اتصال جوش از نظر فناوری به دو دسته ذوبی و مقاومتی تقسیم می شود. جوشکاری ذوبی به دو دسته تقسیم می شود:

۱- جوش قوس الکتریک ۲- جوش اُکسی اَستِیلن در ادامه، انواع روش های جوشکاری بررسی می شود.

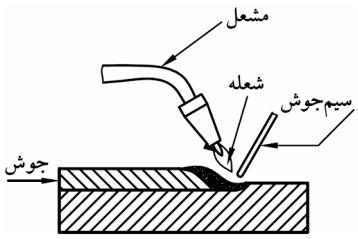
جوش قوس الکتریک (جوش برق):

در جوشکاری قوس الکتریکی، حرارت ناشی از برقراری قوس الکتریکی (جرقه) در محل اتصال، موجب ذوب شدن لبه دو قطعه و الکترود شده و درز بین دو قطعه به وسیله مذاب الکترود پر می شود. بدین ترتیب دو قطعه بعد از سرد شدن با یکدیگر اتصال پیدا می کنند. این روش را جوش برق نیز می نامند که اغلب برای قطعات ضخیم به کار می رود. در این روش حرارت به حدود $4200^{\circ}C$ می‌رسد. شکل زیر، این روش جوشکاری را نشان می دهد.



جوش اُکسی اَستِیلن (جوش گاز):

در این روش، از سوختن گاز استیلن با اکسیژن، شعله ای پدید می آید که تا $3200^{\circ}C$ حرارت تولید می کند. حرارت ایجاد شده، باعث ذوب شدن دو قطع می شود. همچنین یک سیم جوش از جنس همان دو قطعه در محل ایجاد حرارت استفاده می شود تا با ذوب سیم جوش، ماده مذاب کافی برای اتصال دو قطعه فراهم شود. این روش جوشکاری برای ورق های نسبتاً نازک کاربرد دارد و به آن جوش گاز نیز می گویند.



جوش مقاومتی:

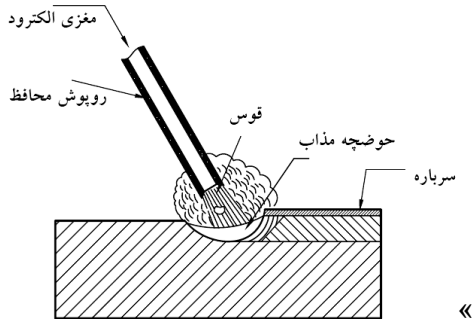
در این روش، دو قطعه به هم نزدیک می شوند و جریان برق با شدت بسیار بالا از محلی که قرار است دو قطعه به هم متصل شوند عبور داده می شود. عبور جریان با آمپر بالا، باعث بالا رفتن دمای قطعه و خمیری و ذوب شدن دو قطعه (در محلی که قرار است به هم متصل شوند) می شود. همزمان با ذوب شدن، دو قطعه به یکدیگر فشار داده می شوند تا اتصال آن ها به خوبی برقرار گردد. در این روش، جریان برقی با ۱۰۰ تا ۱۰۰ هزار آمپر از قطعه عبور داده می شود تا دما به حدود $1200^{\circ}C$ برسد. این روش جوشکاری برای اتصال ورق ها یا قطعات نازک استفاده می شود.

الکترود:

برخی از وظایف الکترودها به صورت زیر است:

- ✓ جریان برق را به محل جوشکاری می رسانند.
- ✓ عمل اشتعال را آسان می کنند.
- ✓ درز جوش را با ذوب شدن پر کرده و اتصال را بین قطعات ایجاد می کنند.
- ✓ از ورود گازهای مضر موجود در هوا به محل مذاب جلوگیری می کنند.

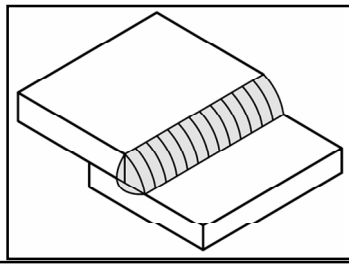
معمولاً برای افزایش استحکام، جنس الکترود از جنس قطعات اتصال انتخاب می شود.



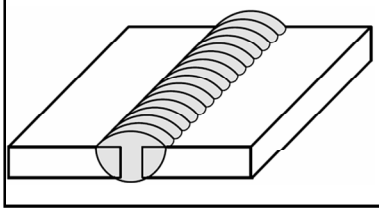
در شکل روبرو، الکترود نشان داده شده است » » »

نحوه قرارگیری قطعات در هنگام جوش:

در شکل زیر دو روش قرارگیری قطعات در هنگام جوش نشان داده شده است:



جوش گلویی: در این روش دو قطعه روی یکدیگر قرار می‌گیرند»»»



جوش پیشانی: در این روش دو قطعه به یکدیگر نزدیک شده و ماده جوش، فضای بین آن دو را پر می‌کند»»

کیفیت جوش:

برای داشتن جوش با کیفیت باید نکاتی را رعایت نمود:

** باید دو قطعه هم جنس را جوشکاری نمود. یعنی فولاد با فولاد، چدن با چدن و غیره.

** قبل از جوشکاری، آماده سازی ابتدایی روی قطعات انجام بگیرد.

** نسبت به قطعات اتصال و ضخامت قطعات، روش مناسب جوشکاری انتخاب شود.

** با توجه به جنس قطعات اتصال، نوع الکترود تعیین شود.

** پس از پایان جوشکاری باید کنترل آن به روش های جدید مثل عکسبرداری با اشعه X و یا امواج فراصوت انجام پذیرد.

لحیم:

در لحیم کاری، به کمک حرارت، دو قطعه را به هم اتصال می دهند. درجه حرارت ایجاد شده در لحیم کاری کمتر از جوشکاری است. در لحیم کاری، دو قطعه ای که قرار است به هم متصل شوند ذوب نمی شوند و فقط ماده لحیم ذوب شده و فاصله بین دو قطعه را پر می کند و اتصال را انجام می دهد. لحیم کاری در صنایع الکتریکی و الکترونیکی کاربرد زیادی دارد. نقطه ذوب لحیم از نقطه ذوب دو قطعه ای که قرار است به هم متصل شوند بسیار پایین تر است.

انواع لحیم کاری از نظر درجه حرارت:

انواع لحیم کاری با توجه به نقطه ذوب آن ها به دو دسته تقسیم می شود:

۱- لحیم کاری نرم که نقطه ذوب آن پایین تر از $450^{\circ}C$ است.

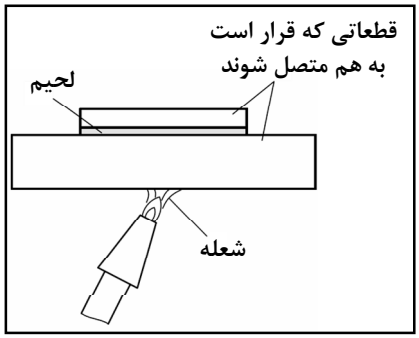
۲- لحیم کاری سخت که نقطه ذوب آن، تا $800^{\circ}C$ می رسد.

سطوحی که قرار است لحیم شود باید صاف و کاملاً تمیز باشد. انتخاب آلیاژ لحیم، جزو موضوعات مهم لحیم کاری است.

انواع روش های لحیم کاری:

لحیم کاری با هُویه: هُویه مانند یک چکش است که سرِ چکشی آن با گرم شدن توسط یک چراغ مثلاً (پریموس)، لحیم را ذوب و دو قطعه را متصل می کند (شکل زیر). این روش برای لحیم کاری نرم مناسب است. در این روش به جای چراغ از منبع انرژی الکتریکی نیز می توان استفاده کرد (هویه برقی).

لحیم کاری با شعله: در این روش، لحیم را بر روی مرز بین دو قطعه قرار می دهند. سپس با یک شعله، ناحیه مرز دو قطعه را گرم می‌کنند (شکل زیر). لحیم، ذوب شده و قطعات به هم متصل می شوند. این روش در لحیم کاری نرم و سخت کاربرد دارد.



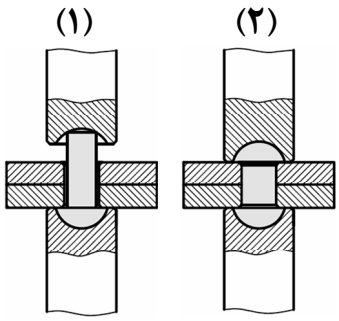
لحیم کاری کوره ای: در این روش، دو قطعه را در کنار هم قرار داده و لحیم را بین آن ها می گذارند. سپس این مجموعه (شامل قطعات و لحیم) را داخل کوره ای با دمای مناسب قرار می دهند. با گرم شدن کوره و ذوب شدن لحیم، دو قطعه متصل می شوند. این روش در لحیم کاری نرم و سخت کاربرد دارد.

پَرچ:

پرچ کاری یک روش اتصال دائم است، زیرا اگر بخواهیم قطعات اتصال را از هم جدا کنیم، تخریب پرچ ها لازم است و دو قطعه ای که به هم متصل شده اند نیز تخریب خواهد شد. قطعات اتصال می تواند از یک جنس یا جنس های متفاوتی باشد. با توجه به پیشرفت سریع روش های جوشکاری، امروزه در قطعاتی که امکان جوشکاری یا چسب کاری نباشد از روش اتصال پرچ کاری استفاده می شود.

برای پرچ کاری ابتدا دو قطعه را در کنار هم قرار داده و یک سوراخ در داخل آن ها ایجاد می کنند. سوراخ کردن می تواند به وسیله‌ی سُنبه (یعنی ضربه زدن با یک میله‌ی سرتیز) یا به وسیله مته کاری انجام شود. سپس پرچ را از داخل سوراخ ایجاد شده عبور می‌دهند (مطابق تصویر ۱ از شکل زیر). همانطور که ملاحظه می نمایید، شکل اولیه پرچ به صورت یک میله استوانه ای است که یک طرف آن، شکل نیم کره دارد.

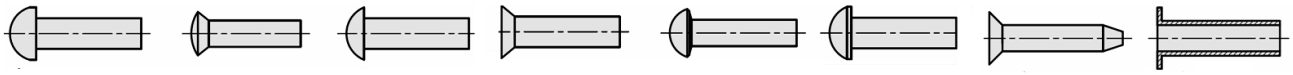
در تصویر ۱ از شکل زیر مشاهده می نمایید که قطعه ای به شکل روبرو در بالای پرچ وجود دارد . نیمه‌ی پایین این قطعه، به شکلِ یک نیم کره‌ی توخالی است. وقتی پرچ را در سوراخ ایجاد شده قرار می دهند، این قطعه توسط چکشِ ماشینِ پرچ‌کاری، به سمت پایین کوبیده می شود. در نتیجه، قسمت بالای پرچ نیز به شکل نیم کره در می آید (تصویر ۲ از شکل زیر) و دو قطعه به هم متصل و محکم می شوند و عمل پرچ کاری پایان می یابد.



پرچ کاری سرد: اگر قطر پرچ کم‌تر از 10mm باشد، پرچ کاری به طور معمول (و بدون دادن حرارت) انجام می شود که به آن پرچکاری سرد می گویند.

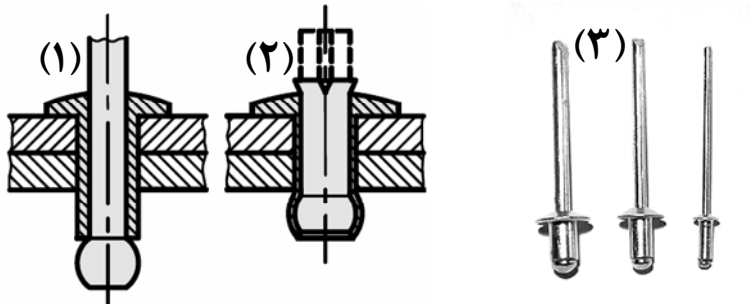
پرچ کاری گرم: اگر قطر پرچ بیش‌تر از 10mm باشد، قبل از مرحله‌ی کوبش پرچ، به آن حرارت می دهند تا حالت خمیری پیدا کند و عمل کوبش به راحتی انجام شود.

پرچ ها دارای یک سر و یک بدنه استوانه ای هستند و برخی از انواع آن ها در تصاویر زیر مشاهده می شود.



پرچ های توخالی یا کور:

در برخی کاربردها، فقط به یک طرف از دو قطعه دسترسی داریم. مثلاً در شکل زیر، فقط به سمت بالای دو صفحه ای که قرار است به هم متصل شوند دسترسی داریم (در اتصال درب و پنجره های آلومینیومی چنین حالت هایی ایجاد می شود). در این موارد از پرچ های توخالی یا کور استفاده می شود (تصویر ۳ از شکل زیر).

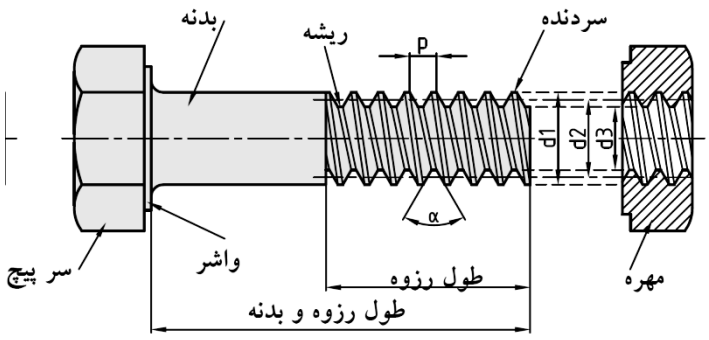


پرچ کور یا توخالی، یک استوانه توخالی است که از داخل آن یک میخ عبور می کند و در انتهای میخ نیز یک کره ی کوچک قرار دارد (تصویر ۱ از شکل بالا). روش کار به این صورت است که ابتدا سوراخ را در دو قطعه ایجاد می کنند. سپس پرچ را در

داخل سوراخ قرار می‌دهند. در ادامه، میخ را توسط دستگاه مخصوصی (که به این شکل است:)، به بالا می‌کشند. با بالا رفتن میخ، کره‌ی انتهای میخ، به استوانه ی توخالی پرچ نیرو وارد کرده و آن را تغییر شکل می دهد (تصویر ۲ از شکل بالا). اکنون دو قطعه، توسط پرچ محکم شده است. در نهایت نیز قسمت های اضافی میخ را برش می دهند.

پیچ:

پیچ و مهره ها بیشترین کاربرد را در صنعت دارند و جزو اتصالات موقت به حساب می آیند. قسمت های مختلف پیچ در شکلی که در ادامه آمده، نشان داده شده است. فاصله بین دو دنده متوالی به موازات محور پیچ را گام پیچ می نامند.

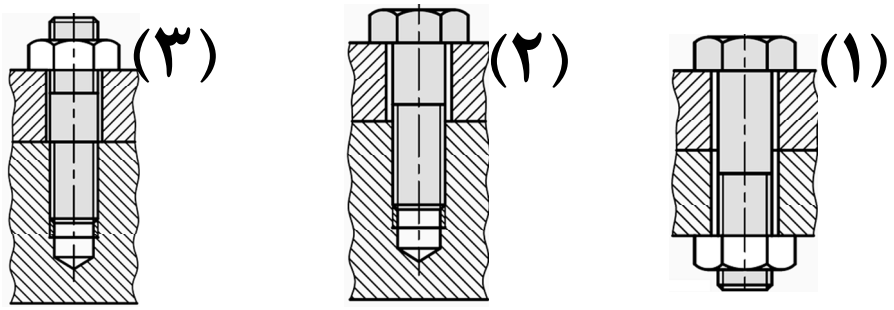


روش های مختلف اتصال توسط پیچ ها:

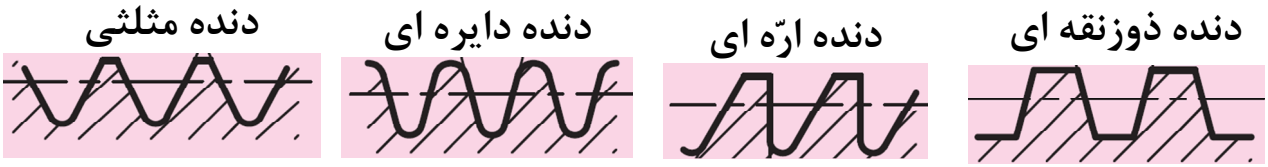
۱- دو قطعه اتصال روی هم قرار می گیرند و پیچ از درون سوراخ قطعات عبور داده شده و توسط مهره بسته می شود (تصویر ۱ شکل زیر).

۲- سوراخ یکی از قطعات اتصال، رزوه می شود و پیچ از سوراخ عبور می کند و قطعه اتصال اول را به دومی می بندد. در این روش به مهره نیازی نیست (تصویر ۲ از شکل زیر).

۳- از پیچ دو سر رزوه استفاده می شود که یک طرف آن به یکی از قطعات اتصال بسته می شود و طرف دیگرش توسط یک مهره محکم می شود (تصویر ۳ از شکل زیر).



انواع پیچ ها از نظر شکل دنده:



انواع پیچ ها از نظر جهت زاویه مارپیچ:

** پیچ های راست‌گرد: این پیچ ها با چرخاندن در جهت عقربه های ساعت، بسته می شود.

** پیچ های چپ‌گرد: این پیچ ها با چرخاندن در خلاف جهت عقربه های ساعت، بسته می شود.

پیچ های چپگرد در کاربردهایی که امنیت بالا مورد نیاز است، استفاده می شوند، مانند شیرهای انتقال گاز و اتصال سیم بُکسل. اکثر قریب به اتفاق پیچ های موجود در صنعت، راستگرد هستند. لذا در کاربردهای حساس از پیچ چپگرد استفاده می کنند که اگر فردی بدون اطلاع از حساسیت دستگاه، اقدام به باز نمودن پیچ نماید، پیچ باز نشود و بلکه محکم‌تر نیز شود. زیرا فردِ بی اطلاع، گمان می کند که پیچ (همانند سایر پیچ ها) راستگرد است و آن را در خلاف جهت عقربه های ساعت می چرخاند تا باز شود؛ در حالی که پیچ، چپگرد است و با این حرکت، محکمتر می شود.

انواع پیچ ها از نظر تعداد راه:

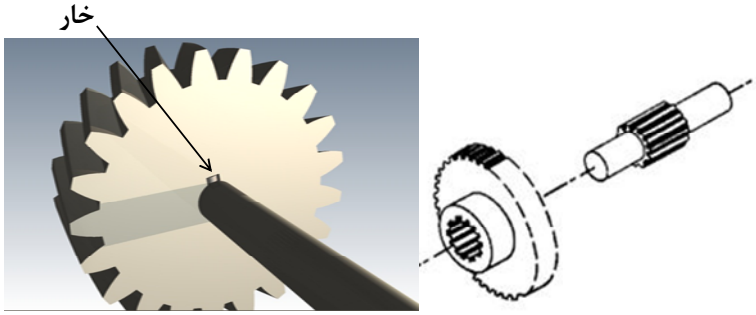
از نظر تعداد راه، پیچ ها به صورت یک راهه یا چند راهه (دو، سه، چهار و بیشتر) ساخته می شوند. دلیل استفاده از پیچ های چند راهه، افزایش سرعت باز و بست است.

واشِر:

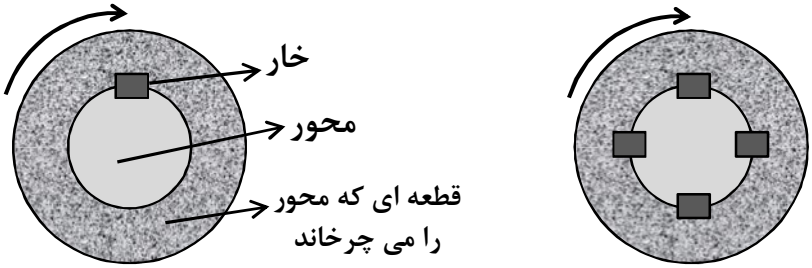
برای این که پیچ به خود به خود باز نشود، زیر سرپیچ یا مهره، یک واشر قرار می دهند. بر اثر خاصیت ارتجاعی واشر (واشر از فلزات نرم انتخاب می شود)، هنگام سفت شدنِ پیچ بین دنده های مهره و پیچ، نیروی فشاری ایجاد شده و از شل شدن پیچ و مهره جلوگیری می‌کند. همچنین، در فرآیند ساخت پیچ و مهره، ممکن است سطح پیچ و مهره ناصاف تولید شود. در این صورت نیز، از واشر استفاده می‌شود تا اتصال به طور محکم تری بسته شود.

خار:

فرض کنید یک محور داشته باشیم که قرار است توسط یک چرخدنده بچرخد. طبیعتاً محور را به وسط چرخدنده متصل می نمایند (مطابق شکل های زیر). اگر بین محور و چرخدنده، کاملا صاف باشد، چرخدنده روی محور سُر می خورد و نمی تواند آن را بچرخاند.

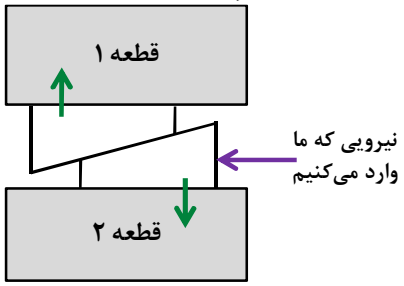


در شکل زیر یک خار نشان داده شده است که برای اتصال محور به قطعه مُحرک (یعنی قطعه ای که قرار است محور را بچرخاند) استفاده می شود. برخی اوقات از چند خار استفاده می شود (مثلاً تصویر سمت راست چهار خار دارد).



گُوِه:

گُوِه یک سطح شیب دار است که بین دو قطعه قرار می دهند. اگر ما یک نیرو در جهت افقی بر گُوِه وارد کنیم، گُوِه نیرویی در جهت عمودی بر حجسم مورد نظر ما وارد می کند. این خاصیت کاربردهایی در صنعت دارد (مانند محکم کردن محورها و غیره). علاوه بر این، مثلاً در شکلی که در ادامه آمده است، گُوِه می تواند قطعه ۱ را از زمین بلند نماید.



محور:

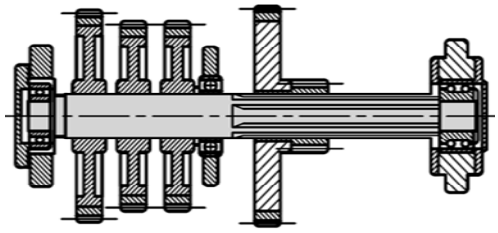
برخی از وظایف محورها به صورت زیر است:

- ✓ انتقال حرکت دورانی: مثلاً در اتومبیل هایی که نیروی محرکه آن ها در چرخ های جلو است، یک محور، دو چرخ جلو را به هم متصل می نماید. این محور، حرکت دورانی را از موتور دریافت نموده و می چرخد و چرخ ها را نیز می چرخاند.
- ✓ تحمل بار (بدون دوران): مثلاً در اتومبیل هایی که نیروی محرکه آن ها در چرخ های جلو است، یک محور، دو چرخ عقب را به هم متصل می نماید. این محور دورانی ندارد و فقط دو چرخ را در جای خود نگه می دارد. چرخ های عقب روی این محور قرار دارند و دوران می کنند ولی محور ثابت است.

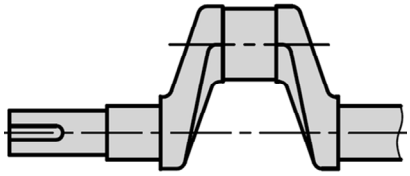
انواع محورها:

معمولاً به محور، «شافت» یا «اَکسِل» نیز می گویند. محورها از نظر نحوه ساخت به دو دسته تقسیم می شوند: ۱- محورهای توخالی. ۲-محورهای توپُر. محورها از نظر شکل ظاهری دو دسته هستند که در شکل زیر نشان داده شده است:

محورهای مستقیم

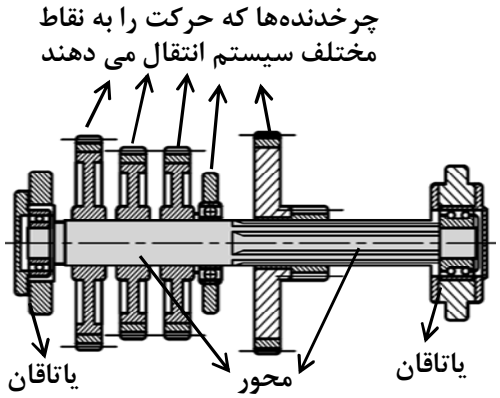


محورهای خمیده (میل لنگ)



یاتاقان:

در شکل زیر، یک محور نشان داده شده، که چند چرخدنده به آن متصل است. یکی از این چرخدنده ها، محور را می چرخاند و با چرخیدن محور، سایر چرخدنده ها می چرخند. چرخش سایر چرخدنده ها، حرکت دورانی را به سایر قسمت های سیستم انتقال می دهد. مجموع چرخدنده ها و محور، دارای یک وزن خاص و نسبتاً بالا هستند. دو یاتاقان در ابتدا و انتهای محور قرار می دهند که محور داخل آن قرار می‌گیرد و وزن مجموعه توسط یاتاقان ها تحمل می شود. یاتاقان ها روی زمین قرار می گیرد و وزن مجموعه را به زمین منتقل می کند.

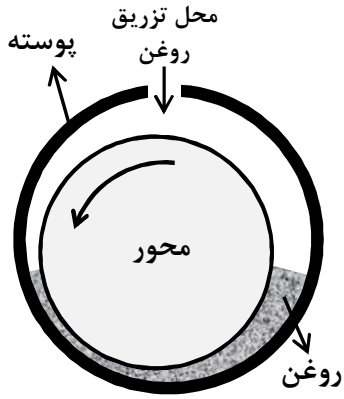


به یاتاقان، «بُلبرینگ» و به بعضی از یاتاقان های خاص، «رولبرینگ» نیز گفته می شود که در ادامه توضیح خواهیم داد. شکل کلی یاتاقان به صورتی است که در ادامه می‌آید.

محور در داخل یاتاقان قرار می گیرد و بدنه یاتاقان نیز بر روی زمین قرار می گیرد. محور به راحتی می تواند درون یاتاقان بچرخد. یاتاقان‌ها پیوسته باید روغن کاری شوند. یاتاقان ها به دو دسته «غلتشی» و «لغزشی» تقسیم می شوند.

یاتاقان لغزشی:

در شکل زیر، یک یاتاقان لغزشی مشاهده می‌شود.



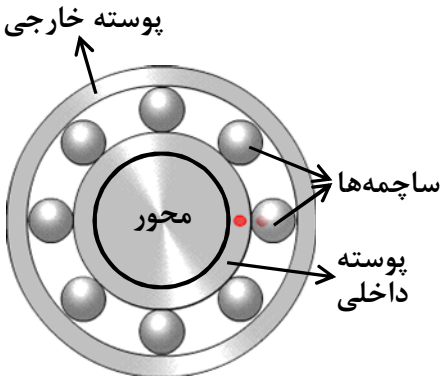
** پوسته‌ی یاتاقان لغزشی، ساکن است. ** محور که در داخل یاتاقان قرار می گیرد، دارای حرکت دورانی است. ** در داخل پوسته‌ی یاتاقان، روغن می ریزند و روغن، فضای بین محور و پوسته را پر می کند. ** از بالای پوسته، به طور پیوسته، روغن تزریق می شود.

در یاتاقان های لغزشی، بین محور و پوسته تماس برقرار است و به علت دوران، اصطکاک به وجود می آید و باعث ایجاد حرارت می شود. بنابراین لازم است در بین این دو سطح، روغن تزریق کنیم تا لایه ای از روغن بین محور و پوسته تشکیل شود. این ضخامت روغن سبب می شود تماس فلز با فلز، از بین برود و اصطکاک کاهش یابد. همچنین صدای یاتاقان کمتر می شود زیرا نرم‌تر کار می کند.

در یاتاقان های لغزشی، اگر محور تحت بار زیادی باشد (به عبارت دیگر اگر وزن محور و اجزای روی آن خیلی زیاد باشد) باید روغن را با فشار به درون یاتاقان تزریق نماییم. اگر این کار انجام نشود، به دلیل وزن بالای محور، بدنه محور با پوسته تماس پیدا می کند و اصطکاک و دمای بالا و لذا سایش و خرابی در محور و یاتاقان، ایجاد می شود. لذا در این موارد توسط یک پمپ، روغن با فشار بالا را به درون یاتاقان تزریق می کنند.

یاتاقان غلتشی:

در شکل زیر، یک یاتاقان غلتشی مشاهده می‌شود.



** پوسته خارجی یاتاقان غلتشی، ساکن است. ** محور که در داخل، پوسته داخلی یاتاقان قرار می گیرد، دارای حرکت دورانی است. ** پوسته داخلی یاتاقان غلتشی چسبیده به محور است و همراه با آن می چرخد. ** ساچمه ها بین پوسته داخلی و خارجی قرار دارند و در حال غلتش هستند.

در یاتاقان های غلتشی، ساچمه ها توسط یک جداکننده از هم جدا می شوند تا با هم تماس پیدا نکنند، زیرا تماس ساچمه ها با یکدیگر، اصطکاک را زیاد نموده و باعث خرابی یاتاقان می شود. نمونه هایی از جداکننده در یاتاقان های غلتشی در تصاویر زیر دیده می‌شود. یاتاقان های غلتشی کمتر از یاتاقان های لغزشی نیاز به روغن کاری دارند.

معمولاً یاتاقان های غلتشی که ساچمه های کروی دارند را «بُلبرینگ» می نامند. اگر ساچمه ها، غیرکروی باشند، «رولبرینگ» نامگذاری می شوند. غلتک های رولبرینگ ها به شکل های استوانه ای، مخروطی، بشکه ای و سوزنی هستند. شکل زیر یک رولبرینگ را نشان می‌دهد. عمر یاتاقان های لغزشی بیشتر از یاتاقان های غلتشی است. یاتاقان های لغزشی کمتر از یاتاقان های غلتشی استفاده می شود زیرا پمپ روغن که در یاتاقان لغزشی نیاز است، قیمت بالایی دارد.

۳-۲- خواص مواد

انتقال انرژی برق از محل تولید (یعنی نیروگاه ها) به محل مصرف (منازل و ...) هزینه ای در حدود دو برابر هزینه تولید برق (در نیروگاه ها) دارد. انتقال انرژی برق نیز از طریق سیم ها انجام می شود. پس شناخت ویژگی های مرتبط با مواد مورد استفاده در صنعت برق (برای کابل ها و عایق ها و غیره) بسیار مهم است. در ادامه به معرفی برخی ویژگی های مواد رایج در صنعت برق می پردازیم.

مقایسه مقاومت الکتریکی مواد مختلف:

مقاومت الکتریکی مواد مختلف در صنعت، با یک عدد گزارش می شود. هر چه مقاومت الکتریکی بیش تر باشد، رسانایی الکتریکی آن ماده کمتر می شود. جدول روبرو، مقاومت الکتریکی برخی مواد رایج در صنعت را نشان می دهد. طبق جدول روبرو، کربن بیشترین رسانایی و فولاد کمترین رسانایی را دارد. رسانایی بالا در برخی صنایع مانند صنایع الکترونیک مورد نیاز است. به همین دلیل از فلز نقره در صنایع الکترونیک، بسیار زیاد استفاده می شود.

نام ماده	مقاومت الکتریکی
کربن	0.1×10^{-7}
نقره	0.159×10^{-7}
مس	0.168×10^{-7}
آلومینیوم	0.282×10^{7}
آهن	1×10^{-7}
فولاد	1.43×10^{-7}

...

مقایسه هدایت حرارتی مواد مختلف:

ضریب هدایت حرارتی (k)، یکی از ویژگی های مواد است. هر چه ضریب هدایت حرارتی بیش تر باشد، آن عنصر زودتر می تواند حرارت را انتقال دهد. این موضوع در صنایع الکترونیک (در خنک سازی اجزای مدارها) و در صنایع انتقال برق (برای خنک سازی تجهیزات) کاربرد دارد. در جدول روبرو ضریب هدایت حرارتی برخی از مواد رایج در صنعت آورده شده است.

نام ماده	ضریب هدایت حرارتی
کربن	**5000**
نقره	**429**
مس	**390**
آلومینیوم	**237**
آهن	**80**
فولاد	**16.3**

مقایسه ضریب انبساط حرارتی مواد مختلف:

در اکثر موارد، هرگاه جسمی را حرارت بدهیم، حجم آن زیاد می شود. لذا کمیتی به نام «ضریب انبساط حرارتی» تعریف می شود که نشان دهنده میزان افزایش طول جسم در برابر افزایش دما است. هر چه ضریب انبساط حرارتی بیش تر باشد، آن جسم تحت اثر افزایش دما، تغییر طول بیش تری خواهد داشت. این موضوع در صنایع انتقال برق مهم است زیرا مثلاً کابل های انتقال برق در تابستان نباید دچار افزایش طول خیلی زیاد شوند چون در آن صورت، کابل به سطح زمین نزدیک می شود.

نام ماده	ضریب انبساط حرارتی
کربن	7.1×10^{-6}
آهن	11.8×10^{-6}
فولاد	13×10^{-6}
مس	16.5×10^{-6}
نقره	18.9×10^{-6}
آلومینیوم	23.1×10^{-6}

...

مقایسه چگالی مواد مختلف:

چگالی نسبت جرم به حجم ماده و از ویژگی های کاربردی و مهم مواد است. این موضوع در صنایع الکترونیک (تولید مدارهای کم وزن) و در صنایع انتقال قدرت (به عنوان مثال تولید کابل های سبک) کاربرد دارد. در جدول روبرو چگالی برخی از مواد رایج در صنعت آورده شده است.

نام ماده	چگالی (kg/m^3)
کربن	2267
آلومینیوم	2700
فولاد	7850
آهن	7860
مس	8960
نقره	10490

عایق‌ها:

در ادامه، به انواع عایق‌های در صنعت برق و برخی از خواص آن‌ها اشاره می‌نماییم.

عایق PVC: از معروفترین مواد عایق پلاستیکی برای کابل ها، ماده pvc (پلی وینیل کلرید) می باشد که در کابل های فشار قوی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ماده مواد شیمیایی را از خود عبور نمی دهد لذا حفاظ بسیار خوبی برای جلوگیری در برابر زنگ زدگی سیم می باشد. این عایق غیر قابل اشتعال است و آب و اسیدهای رقیق و بازها روی آن اثر ندارند. در مقابل اشعه فرابنفش و نور آفتاب حساس نیست. با زیاد شدن دما کیفیت این عایق کم می شود و لذا نباید دما در این عایق از ۷۰ درجه سانتیگراد بالاتر رود. در دمای کمتر از ۳ درجه، عایق PVC در برابر ضربه حساس است و تغییر شکل ناگهانی مثل ضربه و تکان خوردن باعث ترکییدن عایق و روپوش سیم می شود و لذا باید با ملایمت عمل کرد.

عایق پلی اتیلن (PET): این ماده قابل اشتعال است. استقامت شیمیائی آن در برابر اسیدها و بازها از عایق pvc بهتر است. این ماده مواد شیمیایی را از خود عبور نمی دهد لذا حفاظ بسیار خوبی برای جلوگیری در برابر زنگ زدگی سیم می باشد. کابل های ساخته شده با این عایق وزن کمی دارند. به علت قابلیت اشتعال این عایق، معمولاً به ندرت از آن استفاده می شود و بیش تر از عایق PVC استفاده می شود.

عایق پُلی اِستایرول: این ماده عایق، مانند شیشه شفاف و سخت است. به سادگی شکل داده می شود. در برابر رطوبت و اسیدها و الکل و روغن مقاوم است و ترکیبش تغییر نمی کند. نوعی از این عایق که دارای بوتادین است در مقابل ضربه مقاومت زیاد دارد و در برابر سرما و نور، شکننده می باشد.

عایق سیلیکن: این ماده خواص بسیار خوب الکتریکی دارد. در مقابل محلول های آب مقاوم است. در برابر اسیدهای قوی و بخار داغ غیر مقاوم است. در برابر تغییر دما مقاومت خوبی دارد و ترکیبش، تغییر زیادی نمی کند. قابلیت خم شدن دارد.

آلیاژها:

فلزی که از ترکیب چند فلز دیگر تولید شده باشد را آلیاژ می گویند. معمولاً با ترکیب دو یا چند فلز می توان آلیاژی تهیه نمود که خواص آن از فلزات اولیه اش بهتر است. به همین دلیل امروزه آلیاژها بسیار بیش تر از فلزات ساده کاربرد دارند. در این قسمت به برخی از آلیاژهای آهنی و غیرآهنی اشاره می نماییم.

آلیاژهای آهنی یعنی فلزاتی که فلز پایه آن ها آهن بوده و فلزات دیگری را با آن ترکیب کرده اند. آلیاژهای غیر آهنی یعنی موادی که فلز پایه آن ها ماده ای غیر از آهن (مانند مس یا آلومینیوم) بوده و با فلزات دیگری ترکیب شده.

- ✓ مِفرَغ (برنز): آلیاژی است از مس و قلع و سخت تر از مس و قلع است.
- ✓ برنج: آلیاژی از مس و فلز روی که سخت تر از مس و روی می باشد.
- ✓ چدن: از ترکیب آهن و کربن و سیلیسیم به دست می آید. درصد کربن در چدن بین ۲ تا ۶ درصد است. درصد سیلیسیم در چدن بین ۱ تا ۳ درصد است.
- ✓ فولاد: فولاد از ترکیب آهن و کربن به دست می آید. درصد کربن در فولاد کمتر از ۲ درصد است. بسته به درصد کربن و فرآیند ساخت، فولادهای با خواص متنوعی به دست می آید. همچنین افزودن عناصر دیگری غیر از کربن، هرکدام خواص متفاوتی به فولاد می‌دهد. منگنز سبب سختی فولاد می شود. نیکل باعث جلوگیری از خوردگی فولاد می شود. تنگستن باعث محکم تر شدن فولاد می شود. وجود کروم و نیکل سبب ضدزنگ شدن فولاد می‌شود. معمولاً با افزایش درصد کربن موجود در فولاد، استحکام آن زیاد می‌شود.

مواد نیمه هادی (نیمه رسانا):

نیمه هادی ها گروهی از مواد هستند که از نظر توانایی هدایت الکتریکی بین مواد رسانا و عایق ها قرار دارند. این عناصر انرژی الکتریکی را به راحتی از خود عبور نمی دهند. انتقال انرژی الکتریکی در این مواد به عواملی مانند تحریک نوری، افزایش دما و . . . بستگی دارد. از نیمه رساناها برای ساخت قطعاتی مانند دیود، ترانزیستور، آی سی و... استفاده می‌شود. ظهور نیمه رساناها، انقلاب عظیمی را در علم الکترونیک ایجاد کرده که اختراع رایانه یکی از دستاوردهای این انقلاب است. از عناصر نیمه‌رسانا می‌توان به سیلیسیوم و ژرمانیوم که پایه‌ی الکترونیک هستند اشاره کرد. ویژگی های نیمه‌هادی‌های سیلیسیم و ژرمانیم به صورت زیر است:

نام ماده	چگالی (kg/m^3)	ضریب انبساط حرارتی	ضریب هدایت حرارتی	مقاومت الکتریکی
سیلیسیم	**2329**	2.6×10^{-6}	**149**	**640**
ژرمانیم	**5323**	6×10^{-6}	**60.2**	**0.46**

❊ ❊ ❊ ❊ **پیامبر گرامی اسلام (ص)** ❊ ❊ ❊ ❊

هر که دوست دارد عمرش طولانی و روزیش زیاد شود، به پدر و مادرش نیکی کند و صله ی رحم به جا آورد.

(کنزالعمّال، جلد ۱۶، صفحه ۴۷۵)