

بسمه تعالی

درس سازه های ایستای مکانیکی

دانشگاه فنی و حرفه ای

مرکز آموزش عالی فنی انقلاب اسلامی

مدرس: محمد رضا قاسمی بوسجین

منابع درس:

استاتیک - نویسنده : مریام

مقاومت مصالح - نویسنده : جانسون

طراحی اجزای ماشین - نویسنده : شیگلی

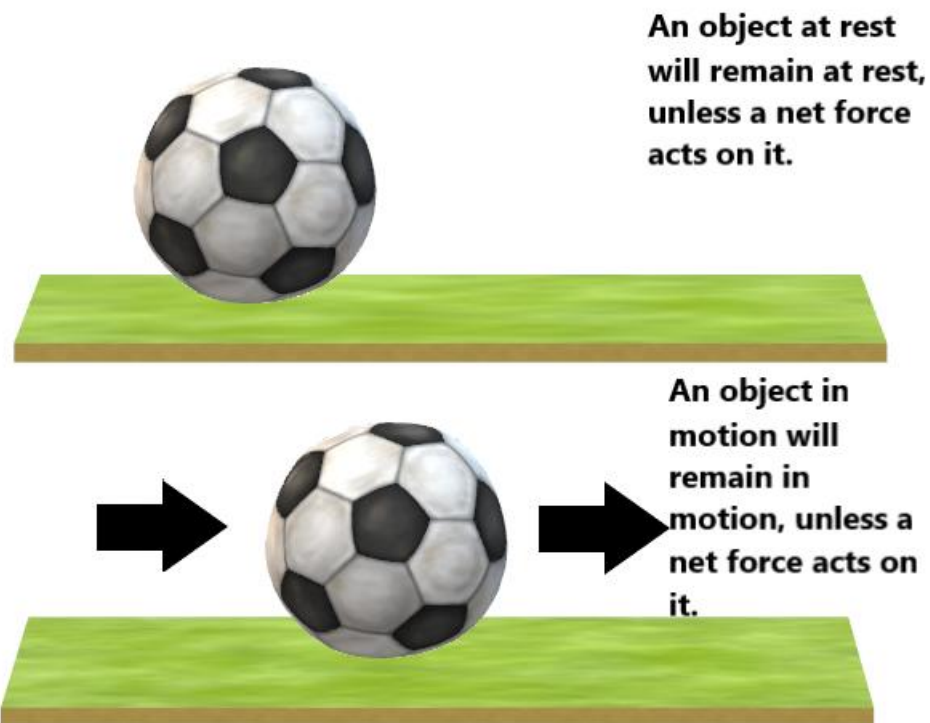
# جدول زمان بندی و نمره

مبحث	تعداد جلسات تدریس
نیرو و گشتاور و دیاگرام آزاد	۳ جلسه
تعادل و پایداری	۱ جلسه
سازه های استاتیک معین و نامعین، قاب و ماشین	۳ جلسه
کابل و قرقره	۱ جلسه
ممان سطح	۱ جلسه
تنش و کرنش در بار محوری، خمشی و پیچشی	۳ جلسه
تئوری های شکست و تسلیم	۱ جلسه
ضریب اطمینان و تمرکز تنش	۲ جلسه
المان محدود در انسیس	

مورد	سقف تقریبی نمره
امتحان پایانی	حدود ۱۴ نمره
حضور و فعالیت کلاسی	حدود ۲ نمره
حل تمرین و پروژه	حدود ۴ نمره

**قانون اول نیوتن:** در یک دستگاه مرجع، جسمی که زیر اثر نیرویی نباشد، یا ساکن است، یا با سرعت ثابت در حرکت است، تا ابد این شرایط تغییر نخواهد کرد.

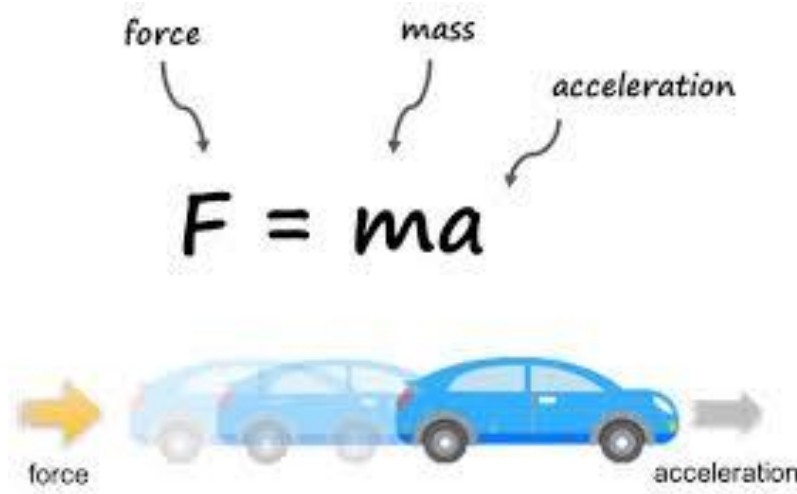
### FIRST LAW OF MOTION



## قوانین نیوتن

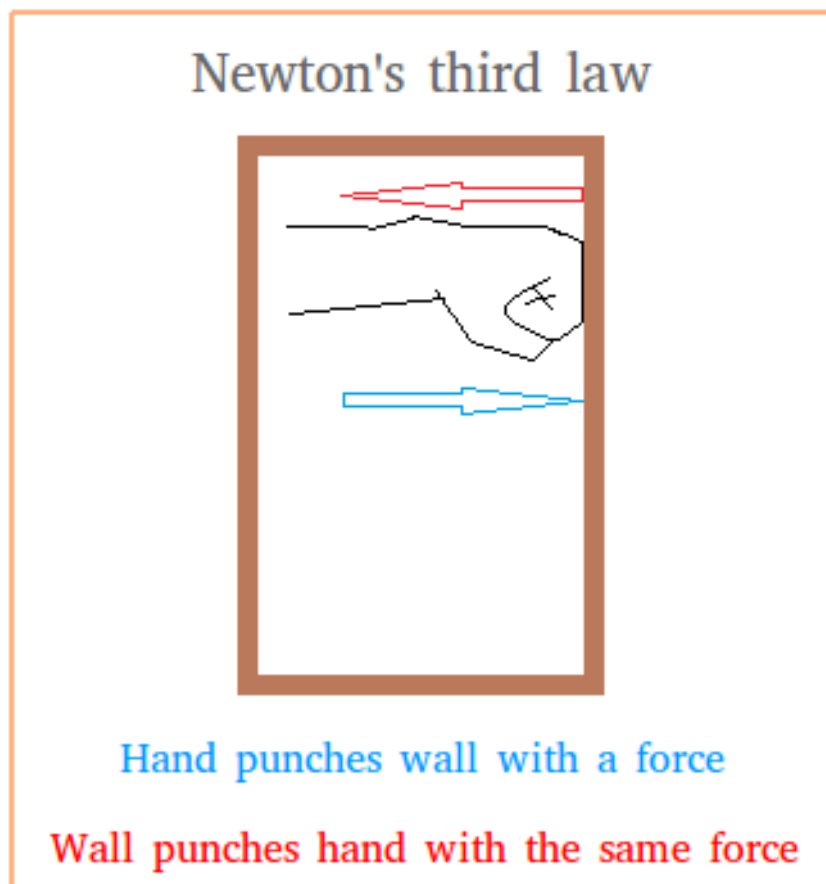
**قانون دوم نیوتن:** شتاب یک جسم برابر است با مجموع نیروهای واردشده بر جسم تقسیم بر جرم آن. فرمولی که از این قانون برمی آید، به معادله بنیادین مکانیک کلاسیک، معروف است.

$$F = m \cdot a$$



## قوانین نیوتن

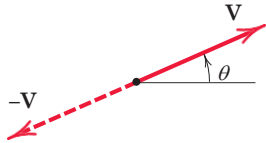
**قانون سوم نیوتن:** هر گاه جسمی به جسم دیگر نیرو وارد کند، جسم دوم نیرویی به همان اندازه و در جهت مخالف به جسم اول وارد می‌کند.



## نیرو

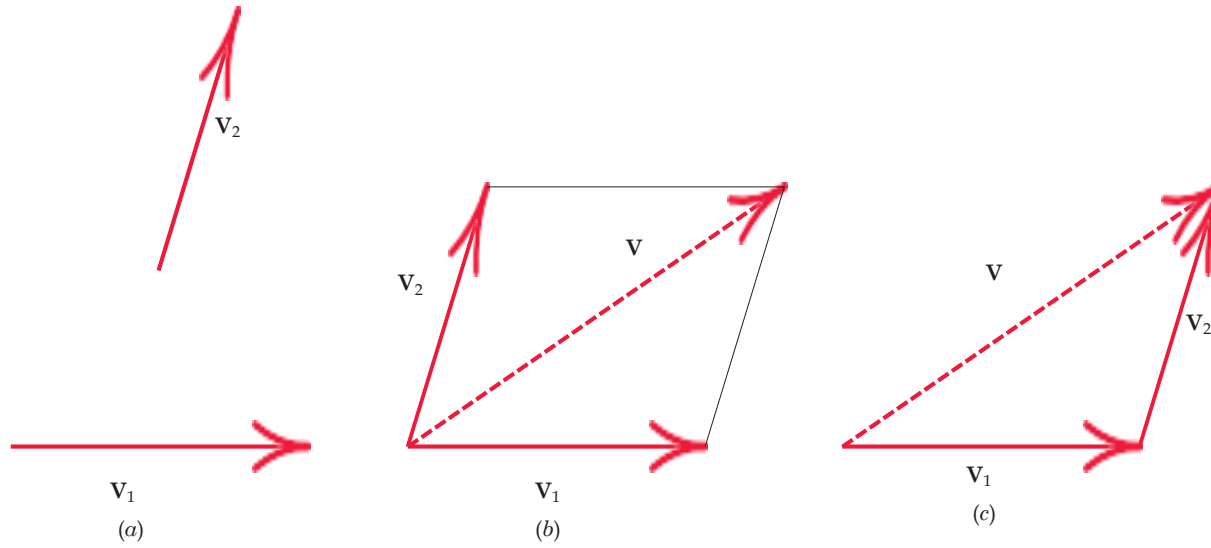
یک نیرو روی یک جسم می تواند از بر آیند چندین نیرو بوجود آمده باشد. که جمع اثر هر یک از آن نیروها، برابر با اثر برآیند نیروها است. روابط بین نیروهای متفاوت عمل کننده روی یک جسم و وضعیت تعادل آنها، تعیین کننده وضعیت نیروهای اعمال شده روی جسم می باشد.

نیرو بوسیله مقدار و جهت آن مشخص می شود. نیروی وارده به یک جسم معمولا با نمایش برداری در نقطه اثر نیرو ترسیم می گردد.



برآیند نیروهای برداری با قانون متوازی الاضلاع و یا روش مثلثی انجام می شود.

## جمع برادری نیروها

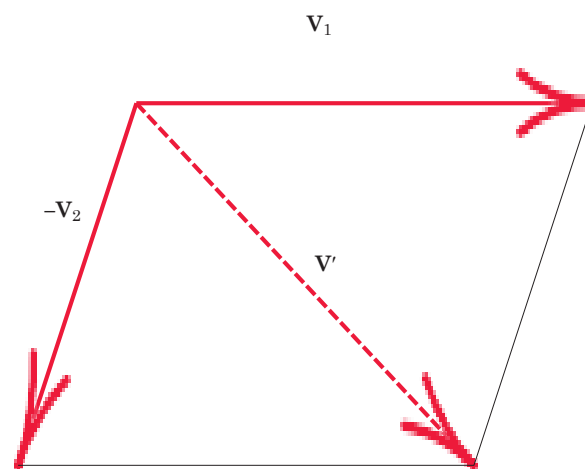
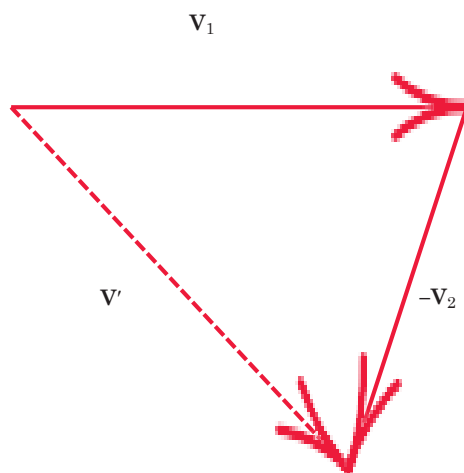


- (a) دو نیرو در جهات مختلف  
(b) جمع نیروها به روش متوازی الاضلاع  
(c) جمع نیروها به روش مثلث

$$V_1 + V_2$$

## تفاضل برادری نیروها

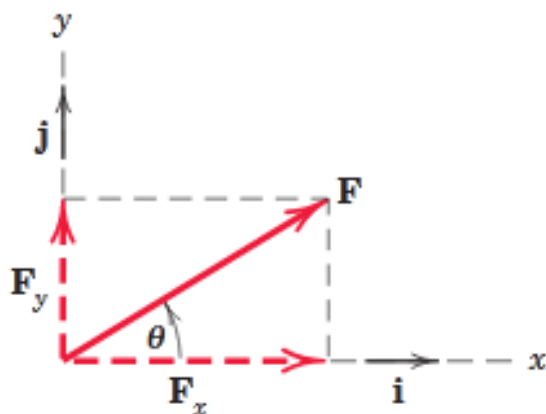
---



$V_1 - V_2$



## تجزیه نیرو در راستای محورهای مختصات عمود برهم



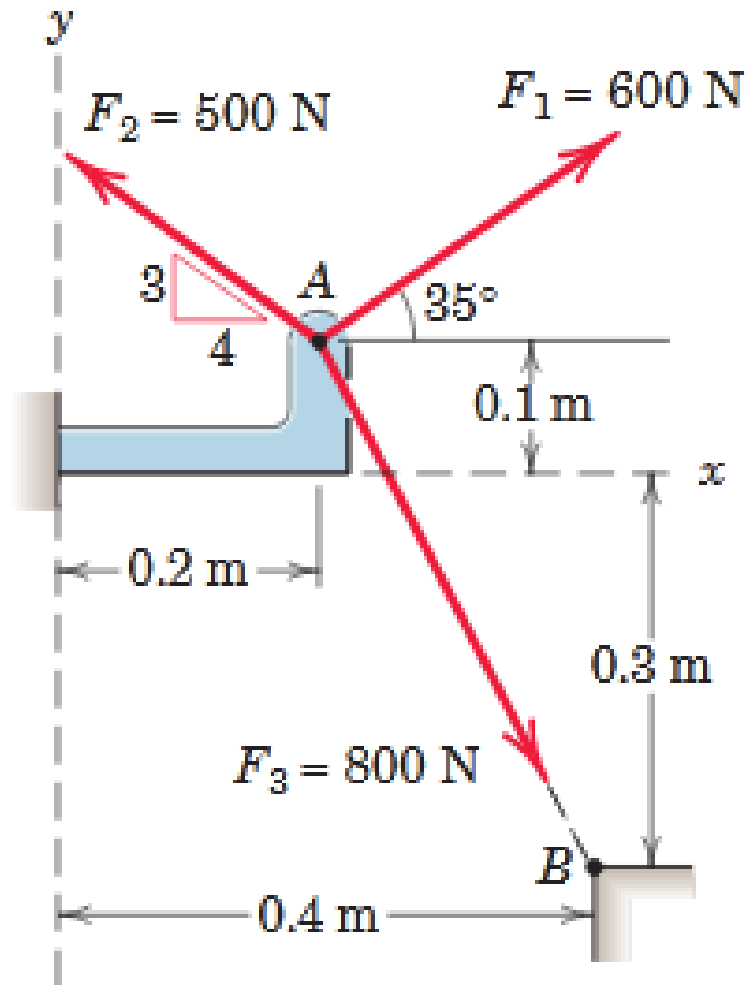
$$\mathbf{F} = F_x \mathbf{i} + F_y \mathbf{j}$$

$$F_x = F \cos \theta \quad F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

$$F_y = F \sin \theta \quad \theta = \tan^{-1} \frac{F_y}{F_x}$$

### مثال ۱: تجزیه نیروها در راستای محورها مختصات

سه نیرو در یک نقطه مطابق شکل بر یک نقطه از براکتی وارد می شود مولفه های هر سه نیرو را در راستای محورها مختصات در صفحه تعیین نمایید.



## حل مثال ١

$$F_{1x} = 600 \cos 35^\circ = 491 \text{ N}$$

$$F_{1y} = 600 \sin 35^\circ = 344 \text{ N}$$

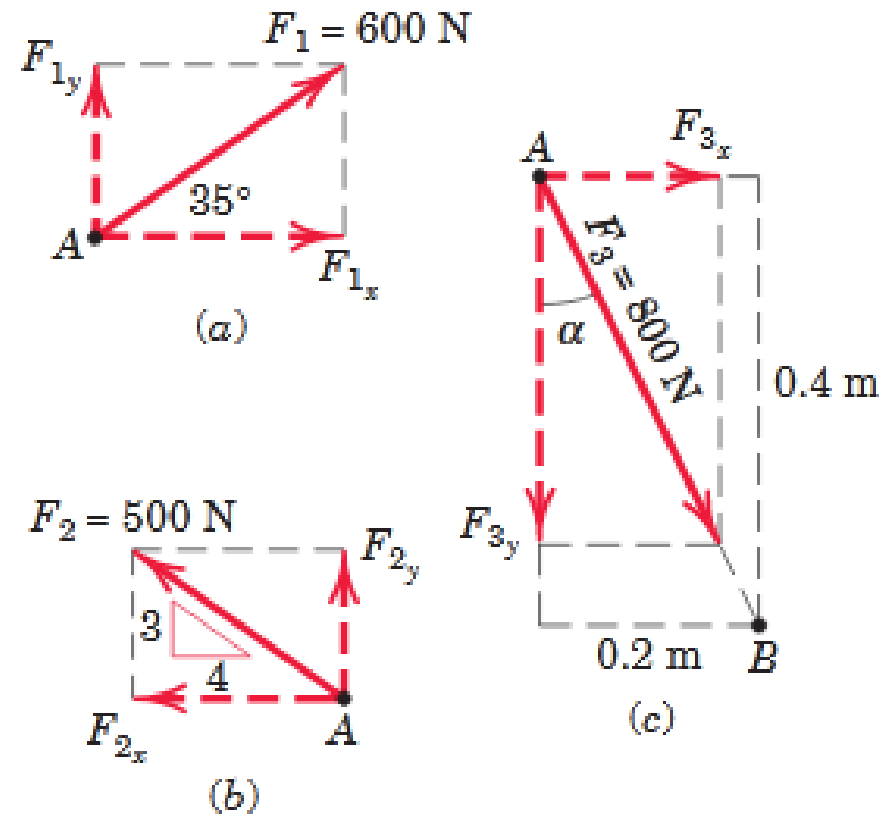
$$F_{2x} = -500\left(\frac{4}{5}\right) = -400 \text{ N}$$

$$F_{2y} = 500\left(\frac{3}{5}\right) = 300 \text{ N}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[ \frac{0.2}{0.4} \right] = 26.6^\circ$$

$$F_{3x} = F_3 \sin \alpha = 800 \sin 26.6^\circ = 358 \text{ N}$$

$$F_{3y} = -F_3 \cos \alpha = -800 \cos 26.6^\circ = -716 \text{ N}$$



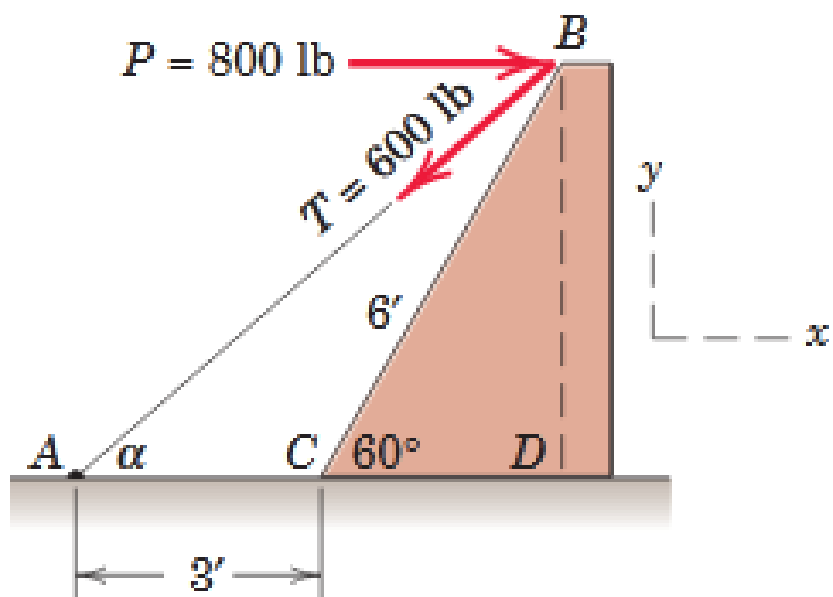
## تمرین ۱

---

برآیند نیروهای موجود در مثال ۱ را بصورت یک بردار به دست آورید.

## تمرین ۲

برآیند دو نیروی وارده در نقطه B را به یکی از روش های ترسیمی، هندسی و یا تجزیه نیروها بدست آورید.

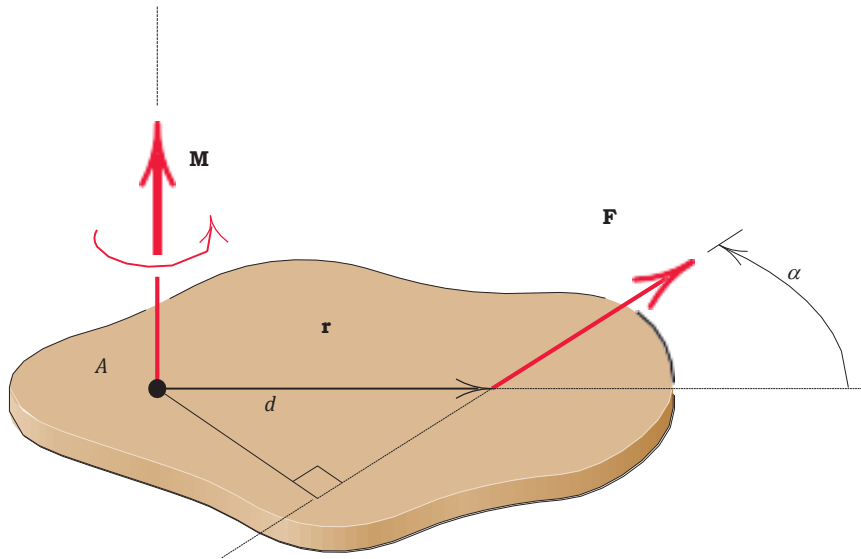


## گشتاور

گشتاور نیرو یا نیروی چرخشی، عاملی است که باعث دوران یا چرخش جسم می شود، همان گونه که نیرو باعث حرکت جسم می شود. گشتاور از رابطه زیر بدست می آید:  
و جهت آن را می توان با قانون دست راست مشخص نمود.

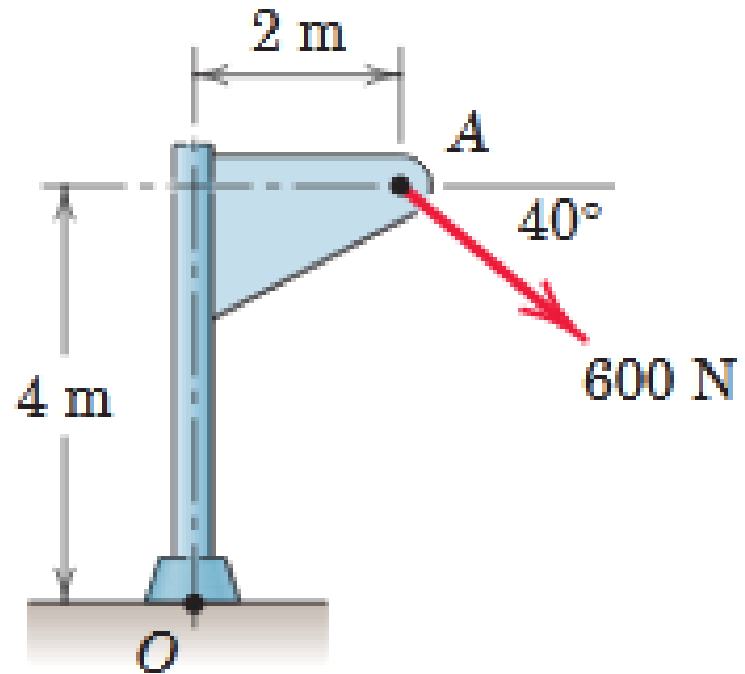
$$M = r * F$$

گشتاور، کمیت برداری است. یکای آن در سامانه استاندارد بین المللی یکاها، نیوتن.متر است. گشتاور حاصل از جمع نیروهای مختلف با جمع گشتاورهای آن نیروها برابر است.



## مثال ۱: محاسبه گشتاور

گشتاور نیروی در شکل را حول نقطه  $O$  محاسبه کنید. (به روش های مختلف)



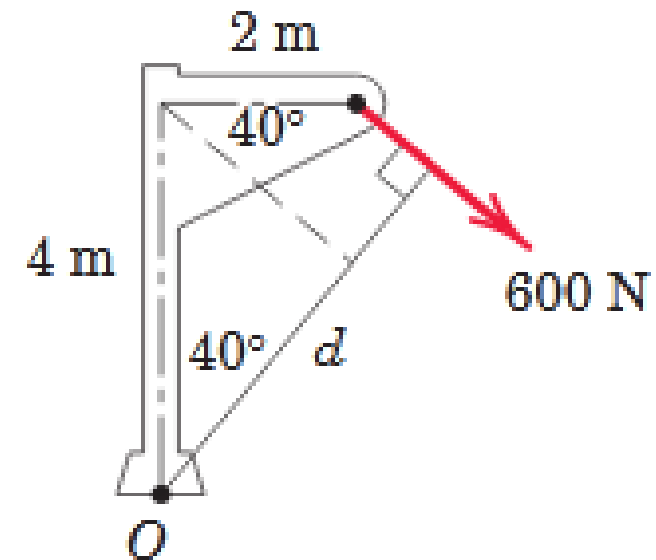
## حل مثال ۱

روش اول : بازوی گشتاور نیروی ۶۰۰ نیوتنی برابر است با:

$$d = 4 \cos 40^\circ + 2 \sin 40^\circ = 4.35 \text{ m}$$

گشتاور ساعتگرد عبارت است از :

$$M_O = 600(4.35) = 2610 \text{ N}\cdot\text{m} \quad \text{Ans.}$$





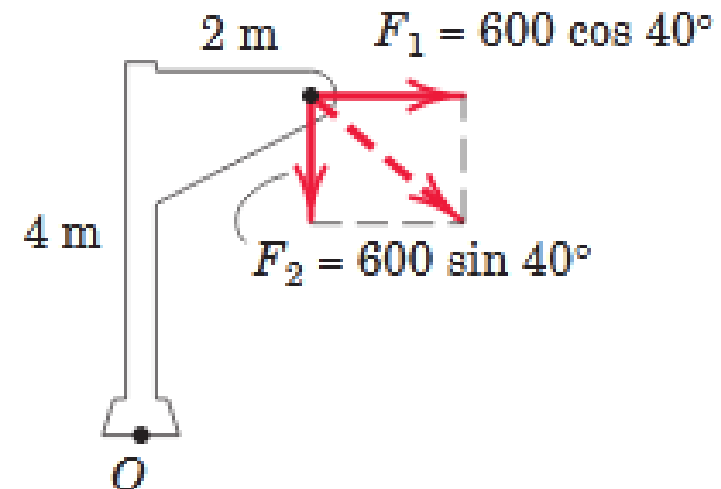
روش دوم : با استفاده از تجزیه بردار نیرو داریم:

$$F_1 = 600 \cos 40^\circ = 460 \text{ N}, \quad F_2 = 600 \sin 40^\circ = 386 \text{ N}$$

با توجه به جمع پذیری اثر گشتاورها خواهیم داشت:

$$M_O = 460(4) + 386(2) = 2610 \text{ N}\cdot\text{m}$$

*Ans.*

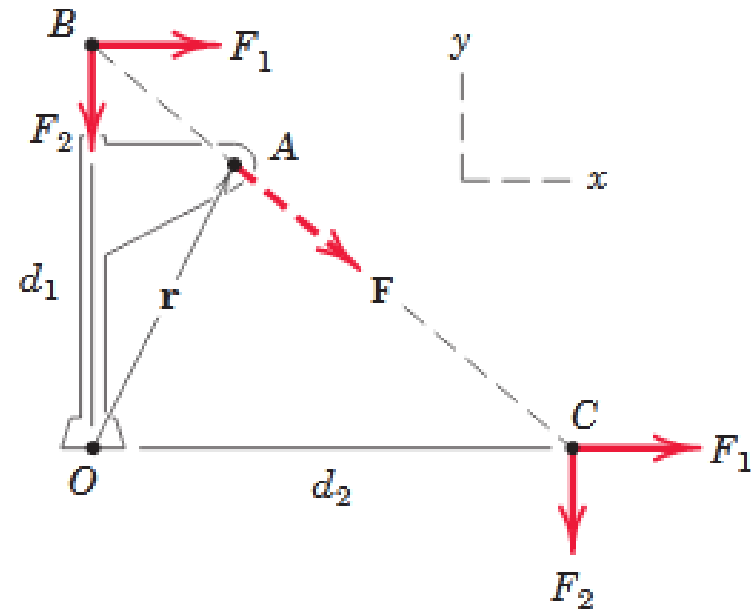


روش سوم : با توجه به اینکه مجاز به حرکت نقطه اثر نیرو در راستای خط اثر آن هستیم، نیروی وارده را به نقطه B مطابق شکل منتقل می نماییم که باعث حذف اثر گشتاور نیروی F2 می شود:  
حال برای نیروی F1 بازوی گشتاور و مقدار گشتاور وارده عبارتند از:

$$d_1 = 4 + 2 \tan 40^\circ = 5.68 \text{ m}$$

$$M_O = 460(5.68) = 2610 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Ans.



## تمرین ۱ :

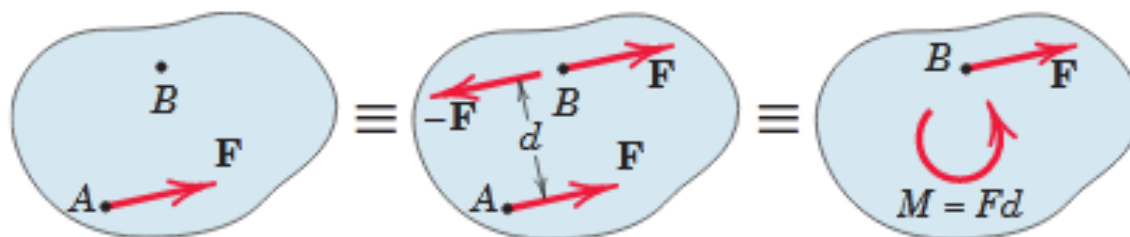
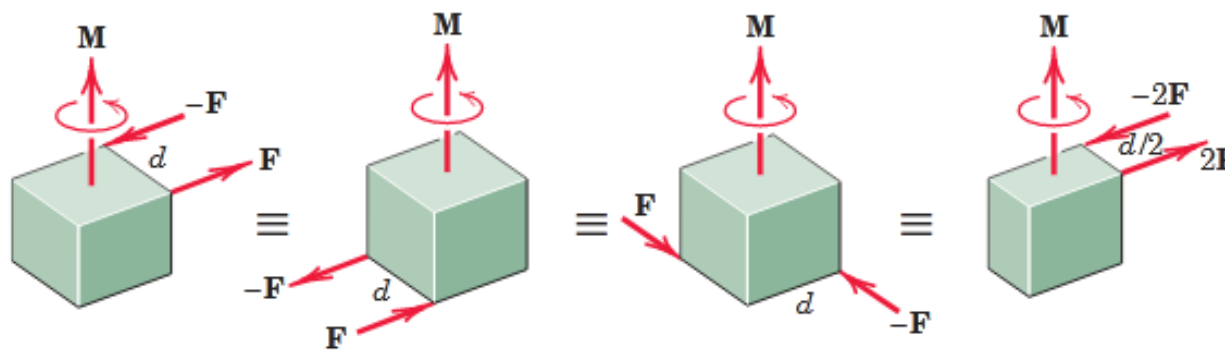
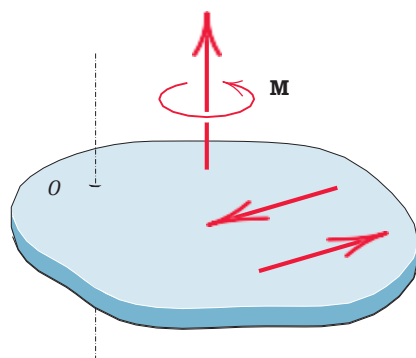
---

الف) روش سوم برای مثال ۱ را با انتقال نیرو به نقطه C حل نمایید.  
ب) با استفاده از رابطه ضرب برداری زیر، مثال ۱ را حل نمایید.

$$\mathbf{M}_O = \mathbf{r} \times \mathbf{F} :$$

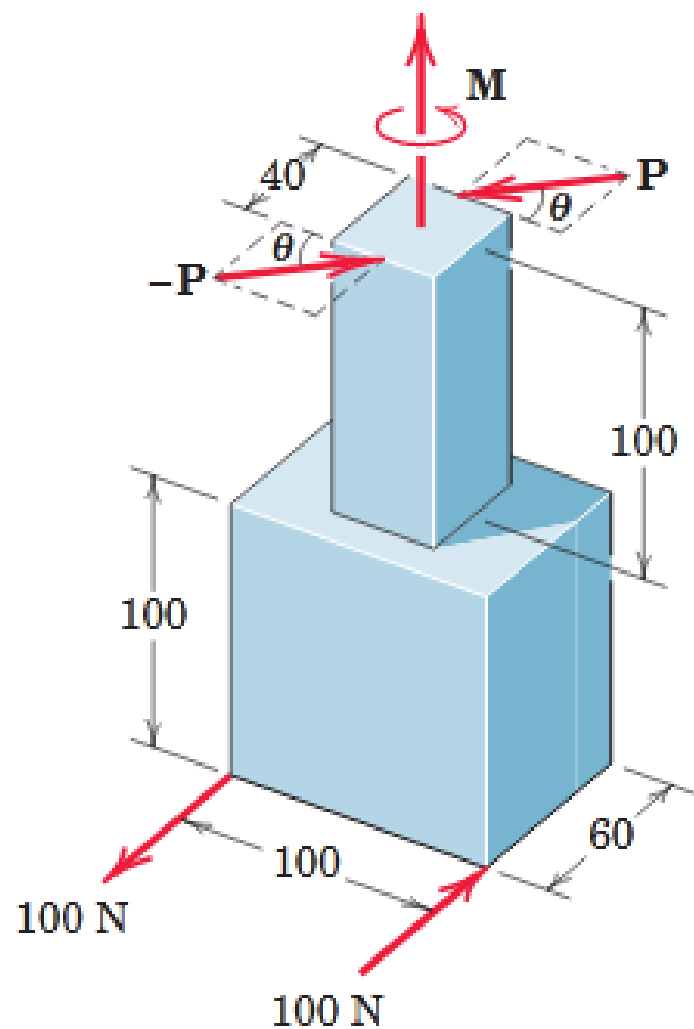
## کوپل نیرو

کوپل یا زوج نیرو دو نیروی هم‌اندازه را گویند که موازی ولی خلاف جهت باشند. اثر آن ایجاد چرخش بدون ایجاد انتقال است. در مکانیک اجسام صلب، کوپل‌ها بردارهایی آزاد در نظر گرفته می‌شوند؛ بدین معنا که اثر آن‌ها بر جسم مستقل از نقطه اعمال آن‌هاست.



## مثال ۲: کوپل (زوج نیرو)

کوپل نیروی ۱۰۰ نیوتنی بر پایه جسم نشان داده شده وارد می شود. این کوپل را با کوپل نیروی ۴۰۰ نیوتنی  $p$  جایگزین نمایید. زاویه این کوپل نیرو را بیابید.

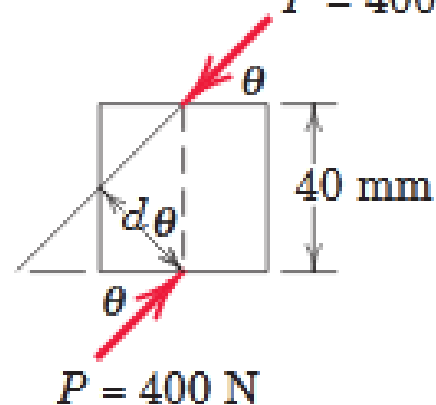


Dimensions in millimeters

## حل مثال ۲

با نگاه از بالا کوپل وارده پادساعتگرد و عبارت است از:

$$P = 400 \text{ N}$$



نیروهای  $p$  و  $-p$  کوپل پادساعتگردی تولید می نمایند که عبارتند از:

با مساوی قرار دادن این دو کوپل (برای حفظ تعادل) داریم:

$$[M = Fd]$$

$$M = 100(0.1) = 10 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M = 400(0.040) \cos \theta$$

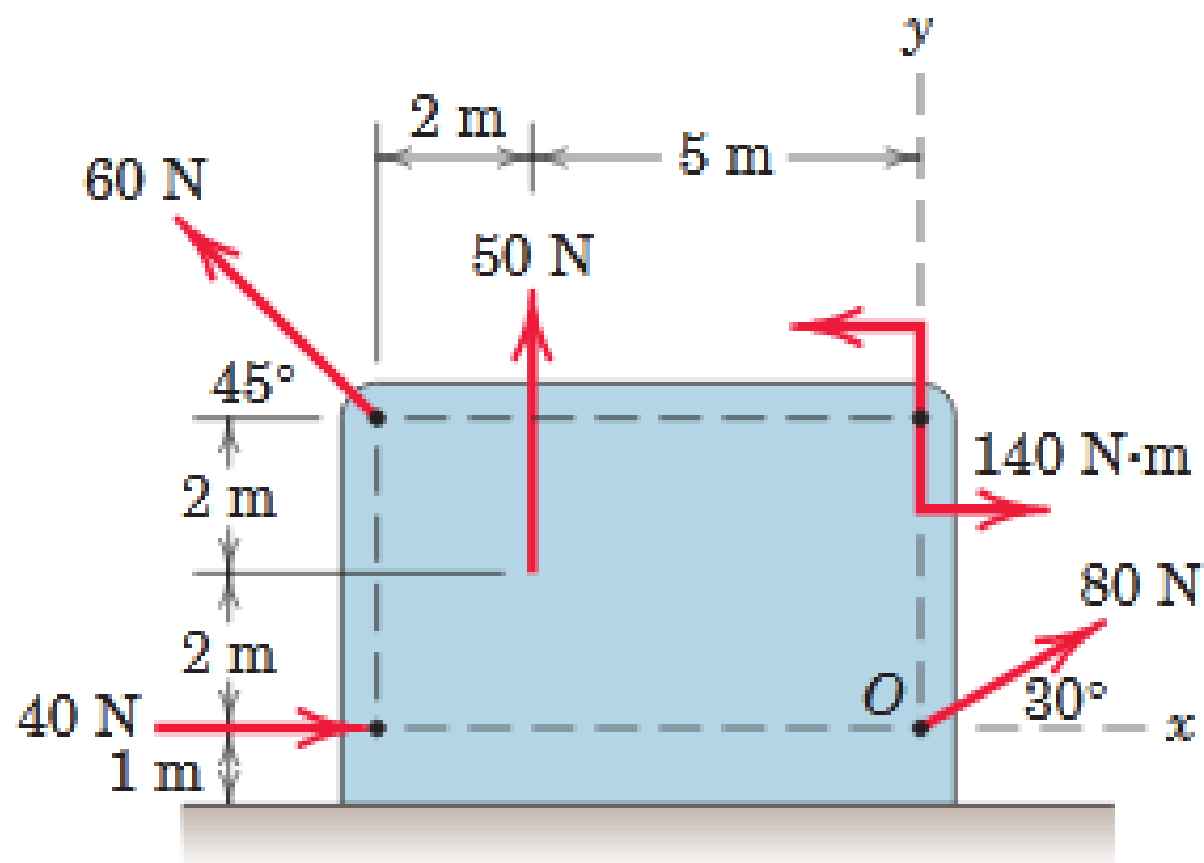
$$10 = (400)(0.040) \cos \theta$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{10}{16} = 51.3^\circ$$

Ans.

## تمرین ۲:

معادل چهار نیرو و کوپل وارد شده بر جسم را بصورت یک نیروی واحد نمایش دهید.



اغلب اجسام در نظر گرفته شده در این درس براساس فرض صلب بودن مورد مطالعه قرار می گیرند. تعریف یک جسم صلب آن است که تغییر شکل در آن حاصل نمی شود، قطعات واقعی در ماشین آلات بطور مطلق هرگز صلب نمی باشند و معمولاً در اثر نیرو تغییر شکل در آنها حاصل می شود اما این تغییر شکل به حدی کوچک است که هیچ اثری در شرایط تعادل مورد نیاز برای مسئله استاتیک ندارد .

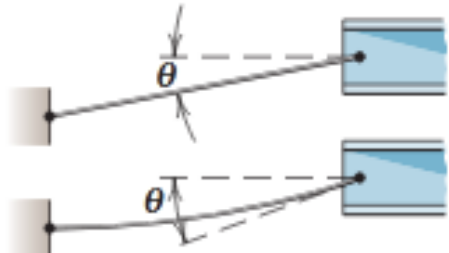
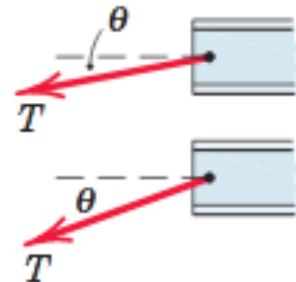

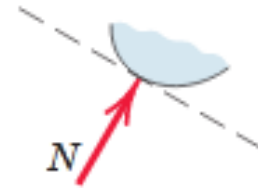

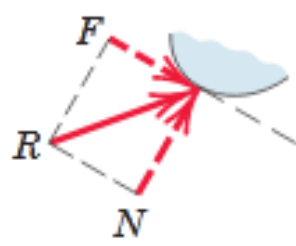
برای تحلیل یک مساله ایستایی، باید مجموعه ای را که در نظر داریم تحلیل کنیم (بعنوان جسم) از مابقی موارد (محیط اطراف) جدا کنیم.

در این صورت، محیط اطراف در تحلیل مساله حذف شده و فقط اثرات آنها بصورت نیروهای خارجی بر جسم اعمال می شوند. تکیه گاهها که اکثراً ارتباط بین جسم و محیط اطراف را برقرار می کنند، دارای اهمیت در این تحلیل ها می باشند.

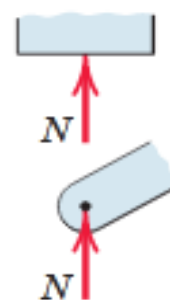
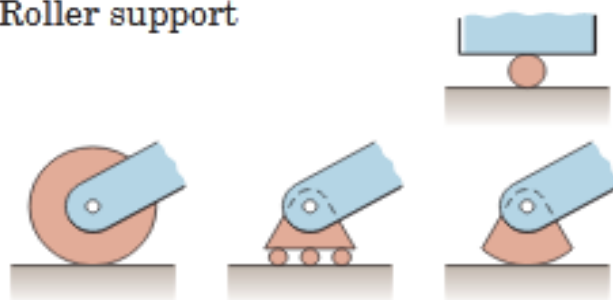
اولین گام برای حل مسائل در رابطه با تعادل یک جسم این است که کلیه نیروهای خارجی عمل کننده در جسم را در نظر بگیریم. بنابراین به عنوان اولین قدم در راه حل، دیاگرام آزاد نیروها رسم می گردد .



## نیروی عکس العمل در تکیه گاه

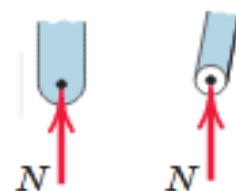
تحلیل نیرویی در دو بعد	
نوع تکیه گاه	نیروی اعمالی به جسم مجزا شده
<p>1. Flexible cable, belt, chain, or rope</p> <p>Weight of cable negligible</p> <p>Weight of cable not negligible</p> 	<p>نیروی کابل کششی به روی جسم و در امتداد کابل است</p> 
<p>2. Smooth surfaces</p> 	<p>نیروی سطح صاف فشاری و عمود بر سطح است</p> 
<p>3. Rough surfaces</p> 	<p>نیروی سطح زیر در دو راستای مماسی و عمود بر سطح می باشد</p> 

#### 4. Roller support



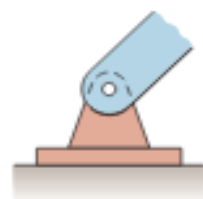
تکیه گاه غلتکی نیروی  
فشاری به جسم وارد می کند

#### 5. Freely sliding guide

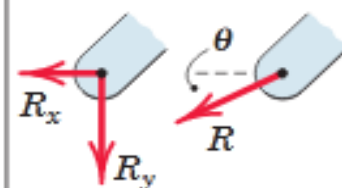


حرکت لغزنده در امتداد  
راهنما بوده و نیروی عمود  
بر راهنما را تحمل می کند

#### 6. Pin connection

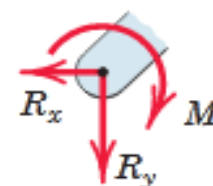


##### Pin free to turn



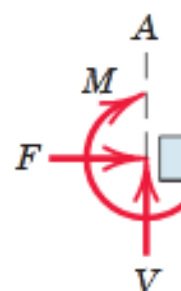
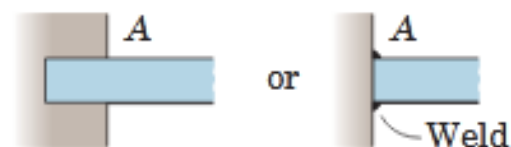
پین آزاد تحمل نیروها در  
هر جهت در صفحه را دارد

##### Pin not free to turn



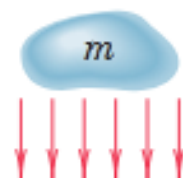
همچنین پینی که نمی تواند  
بچرخد تحمل گشتاور وارده  
را نیز دارد

### 7. Built-in or fixed support



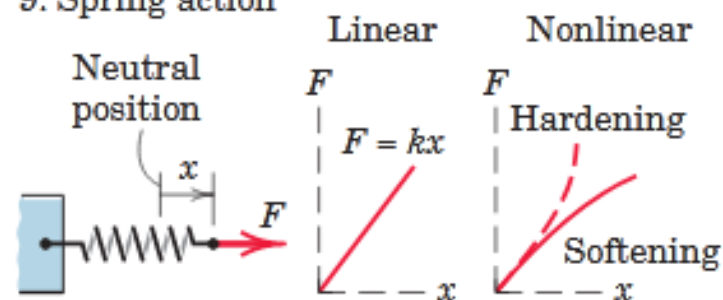
تکیه گاه ثابت نیروهای محوری  
و برشی و گشتاور خمشی را  
تحمل میکند

### 8. Gravitational attraction



نتیجه نیروی گرانش به جرم  
بصورت نیروی وزن و به سمت  
مرکز زمین است

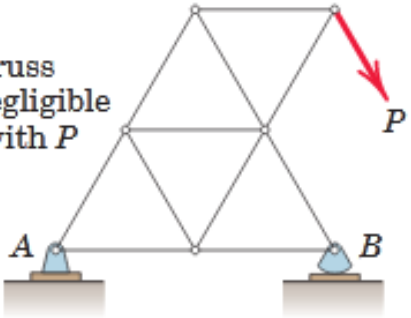
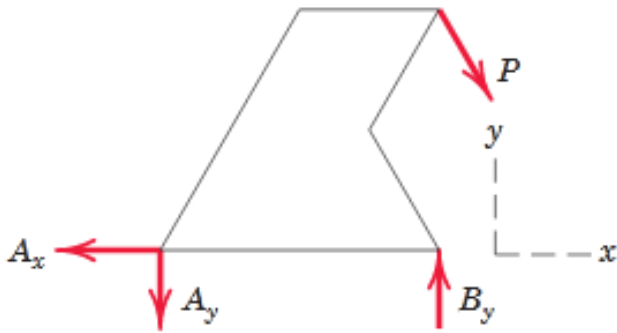
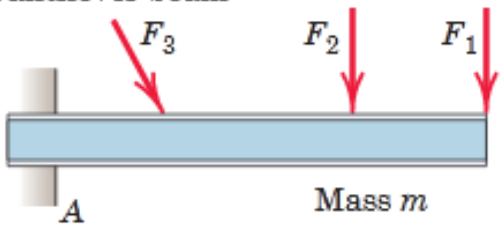
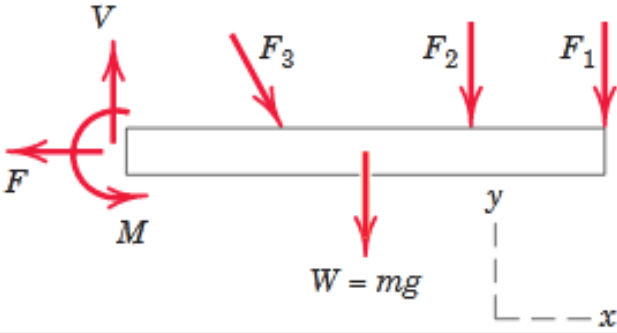
### 9. Spring action



جهت نیروی فنر بر اساس  
کشش یا فشار آن می باشد

# Free Body Diagram دیاگرام آزاد

یک دیاگرام جسم آزاد، همه انواع نیروهای وارده بر این جسم را نمایش می‌دهد. رسم چنین نموداری، موجب ساده شدن حل نیروهای ناشناخته یا معادلات حرکت یک جسم می‌شود.

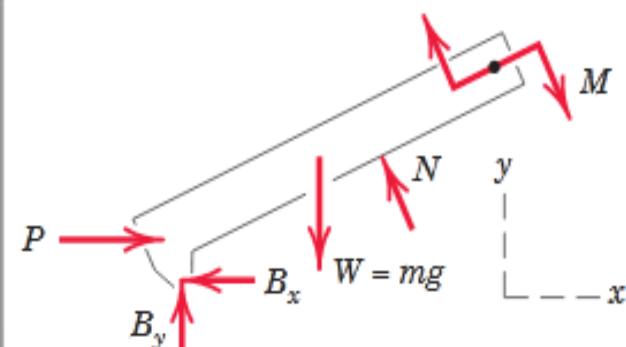
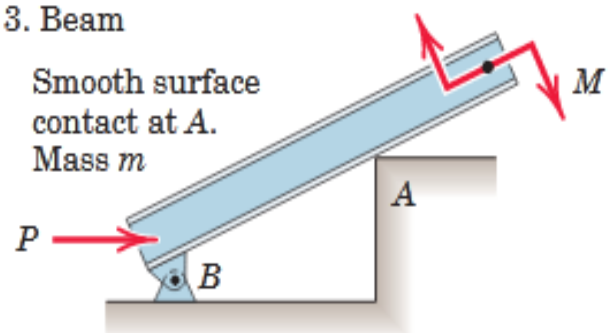
دیاگرام آزاد ساده	
سیستم مکانیکی	دیاگرام آزاد جسم مجزا شده از مابقی سیستم
<p>1. Plane truss</p> <p>Weight of truss assumed negligible compared with <math>P</math></p> 	
<p>2. Cantilever beam</p>  <p>Mass <math>m</math></p>	 <p><math>W = mg</math></p>

معمولا در خرپا از وزن میله ها صرف نظر می شود.

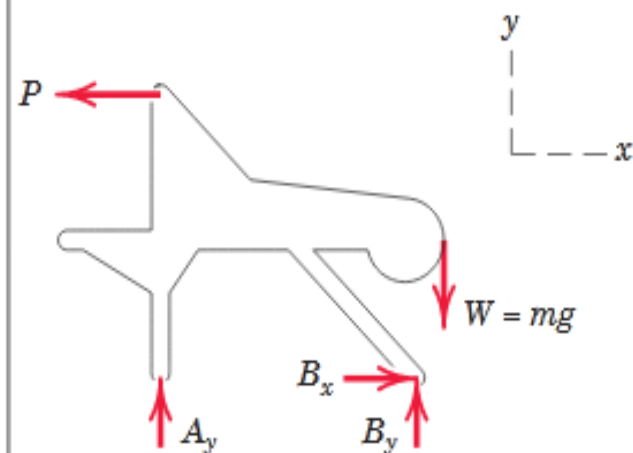
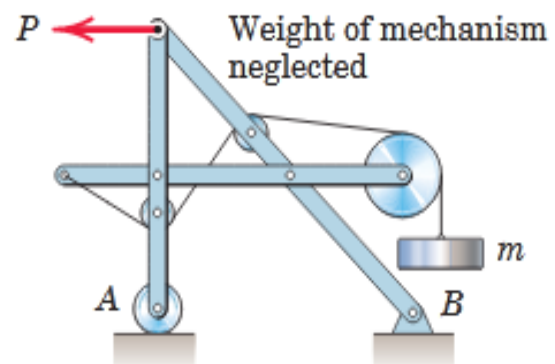
ولی در تیرها وزن آنها لحاظ می گردد.

3. Beam

Smooth surface  
contact at A.  
Mass  $m$

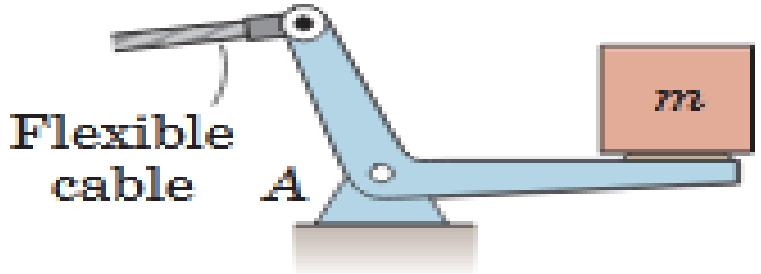
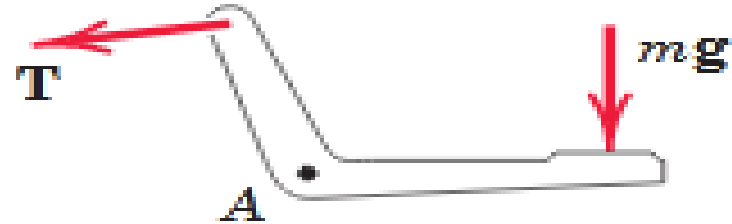
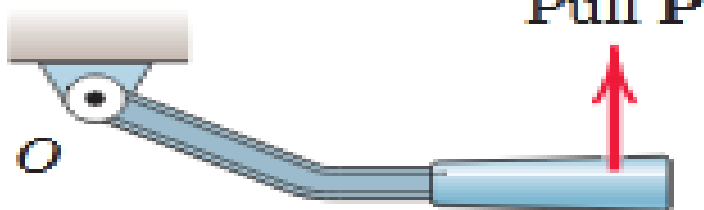
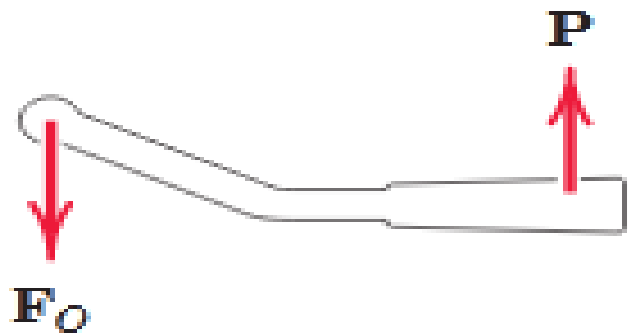


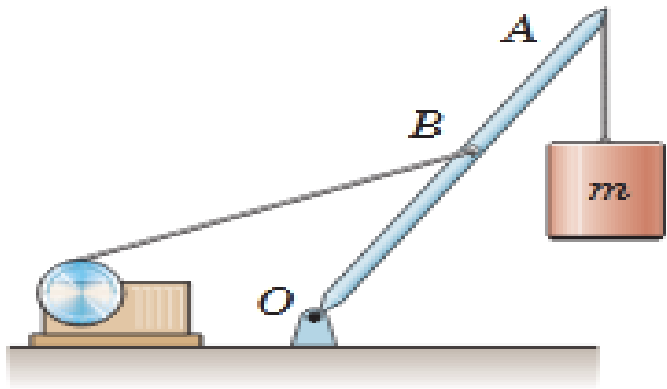
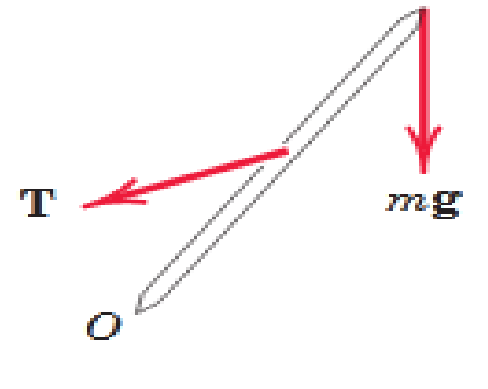
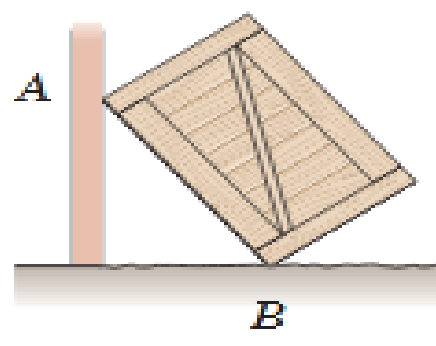
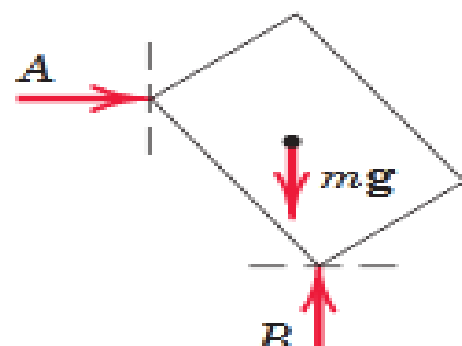
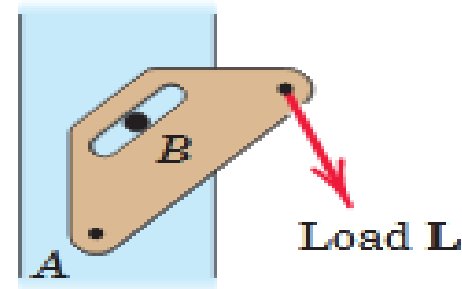
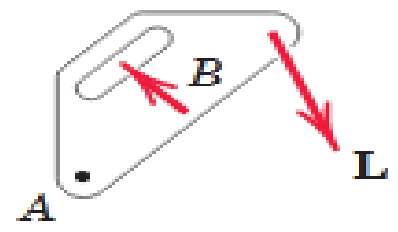
4. Rigid system of interconnected bodies  
analyzed as a single unit



تمرین در کلاس :

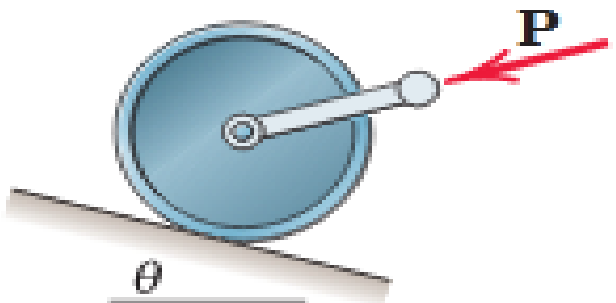
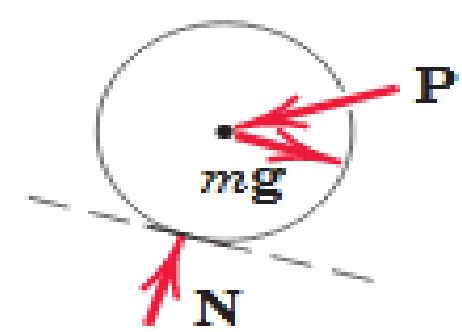
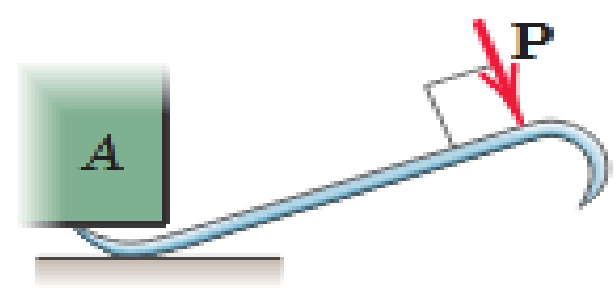
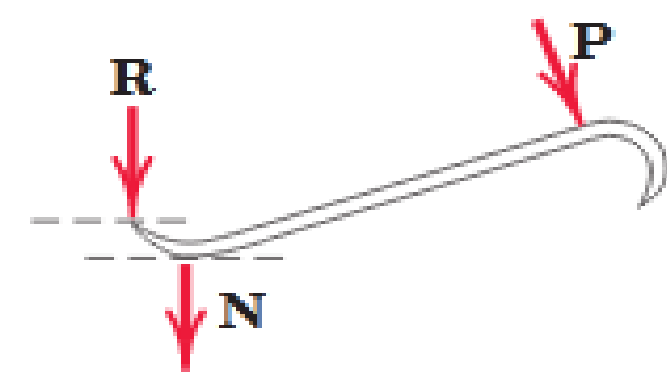
دیاگرام آزاد ناقص شکل ها را کامل کنید.

Body	Incomplete FBD
 <p>A blue L-shaped body is pivoted at point A. A flexible cable is attached to the top end of the vertical arm. A brown rectangular mass labeled <math>m</math> is placed on the horizontal arm.</p>	 <p>The FBD shows the L-shaped body with a red arrow labeled <math>T</math> pointing left from the top end and a red arrow labeled <math>mg</math> pointing down from the center of the horizontal arm. The pivot point A is marked.</p>
 <p>A blue L-shaped body is pivoted at point O. A red arrow labeled <math>P</math> points upwards from the end of the horizontal arm.</p>	 <p>The FBD shows the L-shaped body with a red arrow labeled <math>F_O</math> pointing down from the pivot point O and a red arrow labeled <math>P</math> pointing up from the end of the horizontal arm.</p>

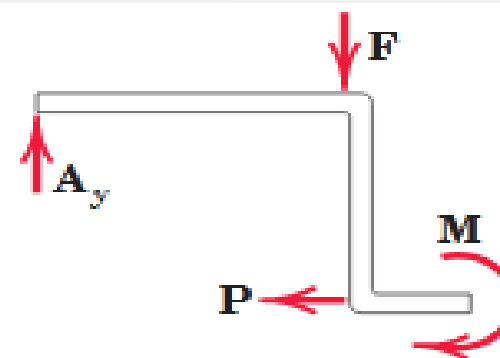
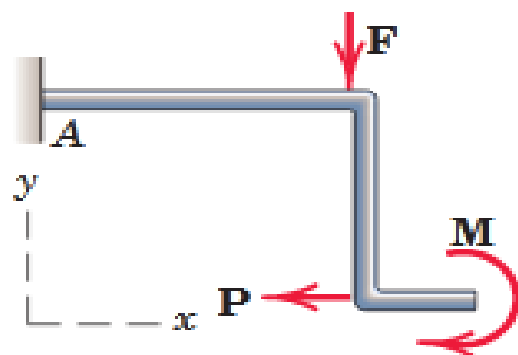
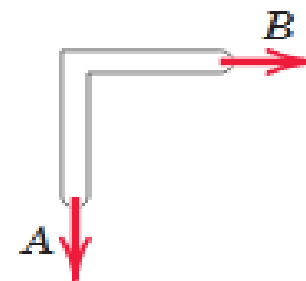
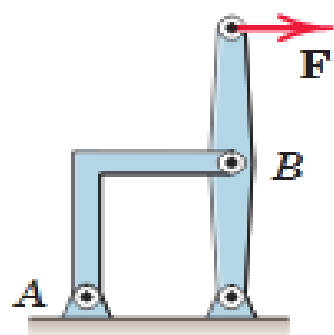
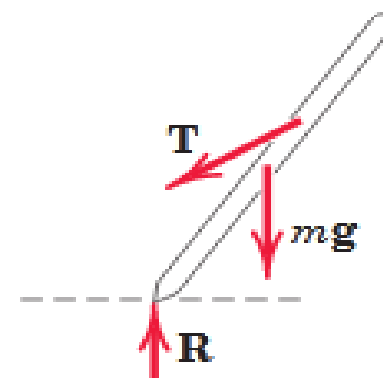
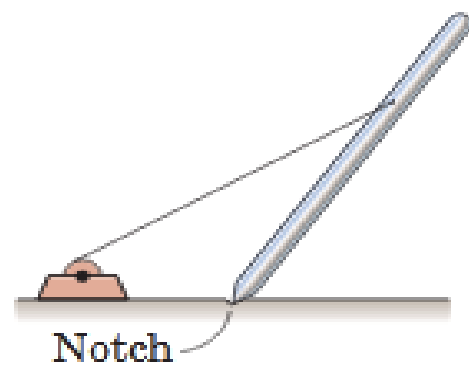
	
	
	

## تمرین:

دیاگرام آزاد شکل های مقابل ناقص بوده و یا ایراد دارد.  
موارد را رفع ایراد نموده و کامل کنید.

Body	Wrong or Incomplete FBD
	
	





## شرایط تعادل در صفحه

وقتی برآیند کلیه نیروها و گشتاورهای عمل کننده روی یک جسم صفر باشد جسم در حال تعادل است.

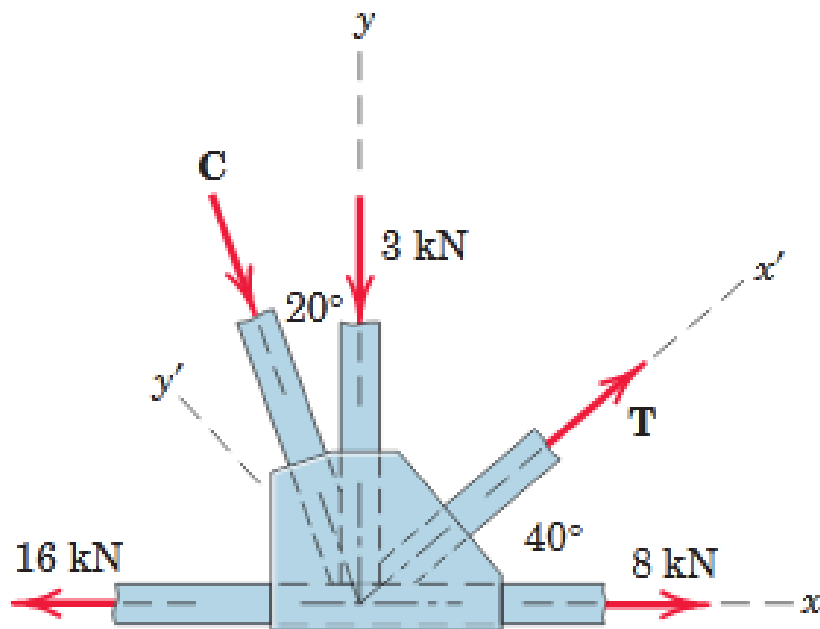
شرط لازم و کافی برای تعادل یک سیستم این است که مجموع نیروها و گشتاورهای وارده برابر صفر باشد.  
بنابراین برای تعادل در فضای دو بعدی داریم:

$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0 & \sum F_y &= 0 \\ \sum M_z &= 0\end{aligned}$$

این معادلات فوق ، برای بدست آوردن نیروهای معمول و عکس العملهای در تکیه گاهها می باشد.  
همچنین معادلات فوق نشان دهنده این است که هیچگونه انتقال و چرخشی در سیستم در نظر گرفته نشده و در حال تعادل استاتیکی می باشد.

## مثال ۱:

نیروهای  $T$  و  $C$  را به گونه ای بیابید که اتصال روبرو در تعادل باشد.



$$[\Sigma F_x = 0]$$

$$8 + T \cos 40^\circ + C \sin 20^\circ - 16 = 0$$

$$0.766T + 0.342C = 8$$

$$[\Sigma F_y = 0]$$

$$T \sin 40^\circ - C \cos 20^\circ - 3 = 0$$

$$0.643T - 0.940C = 3$$

ادامه حل مثال ۱ :

$$0.766 T + 0.342 C = 8$$

$$0.643 T - 0.94 C = 3$$

$$0.94 * (0.766 T + 0.342 C = 8)$$

$$0.342 * (0.643 T - 0.94 C = 3)$$



$$0.72 T + 0.32 C = 7.5$$

$$0.22 T - 0.32 C = 1$$



$$0.94 T = 8.5$$



$$T = 9 \text{ KN}$$



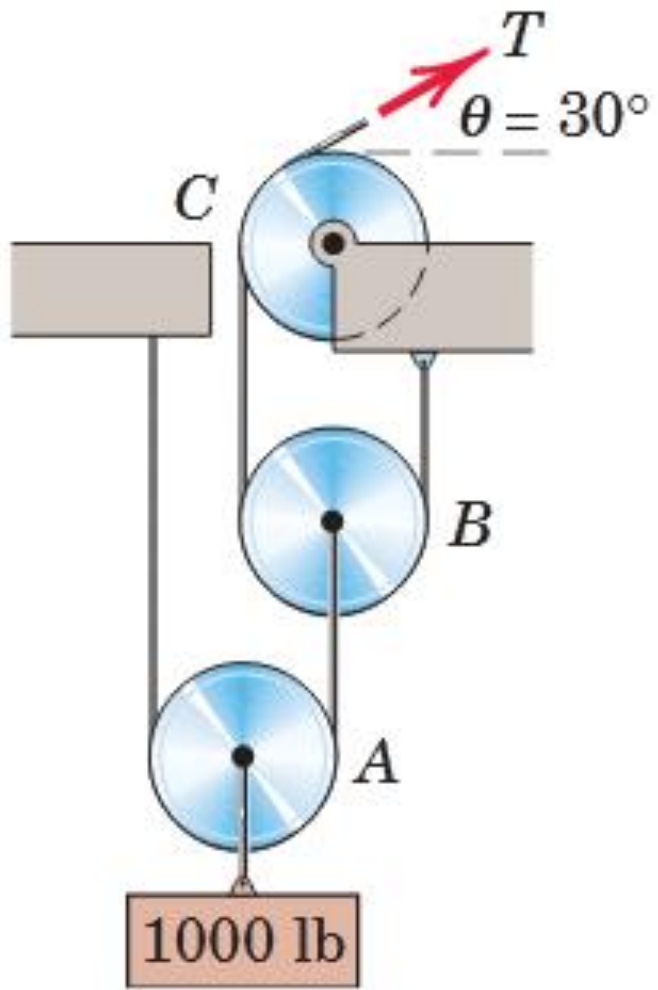
$$C = 3 \text{ KN}$$

## تمرین ۱:

---

در مثال ۱ بجای محورهاى اصلی،  $x'$  ,  $y'$  را به عنوان محور مختصاتی در نظر گرفته و مسئله را حل کنید.

## مثال ۲: نیروهای موجود در سیستم قرقره



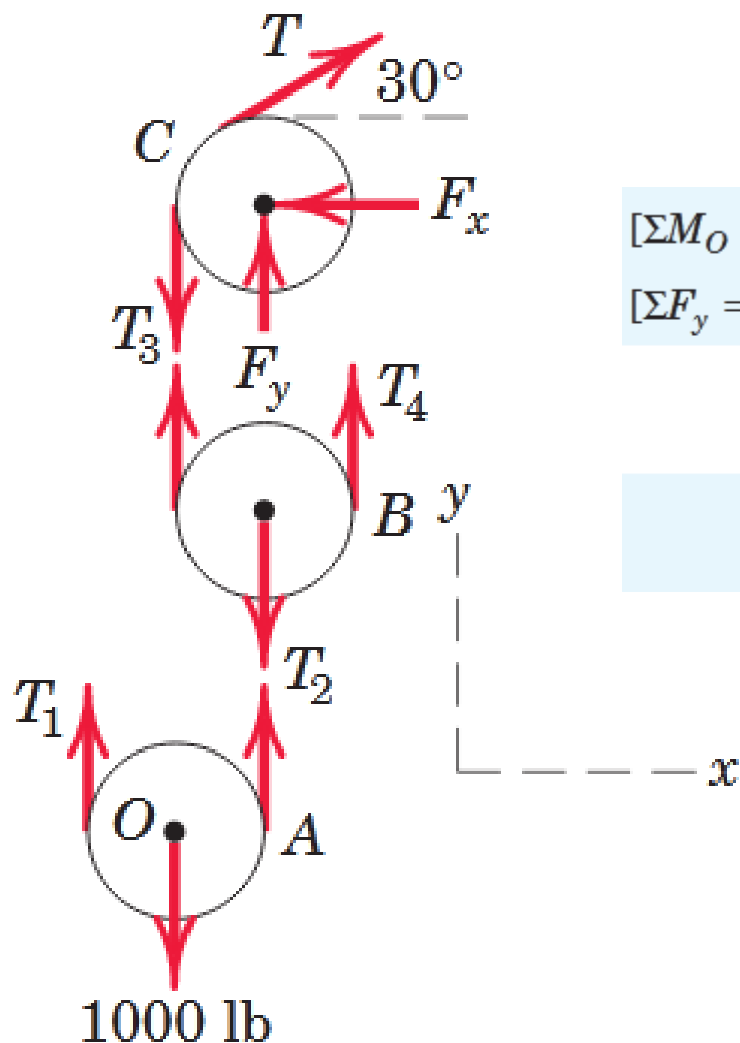
کشش کابل  $T$  را طوری محاسبه کنید که سیستم قرقره ای نمایش داده شده در تعادل باشد.

همچنین نیروهای وارد بر بلبرینگ قرقره C را محاسبه کنید.

وزن تمامی اجزا در مقایسه با وزنه موجود در سیستم قابل صرف نظر می باشد.

مثال ۲: حل مسئله با ترسیم دیاگرام آزاد سیستم قرقره ای

حل را از قرقره A شروع می کنیم:



$$[\Sigma M_O = 0]$$

$$T_1 r - T_2 r = 0$$

$$T_1 = T_2$$

$$[\Sigma F_y = 0]$$

$$T_1 + T_2 - 1000 = 0$$

$$2T_1 = 1000$$

$$T_1 = T_2 = 500 \text{ lb}$$

و سپس قرقره B ،

$$T_3 = T_4 = T_2 / 2 = 250 \text{ lb}$$

و سرانجام با تعادل گشتاور در قرقره C داریم:  
(بازوی گشتاور هر دو نیروی زیر برابر r است.)

$$T \cdot r - T_3 \cdot r = 0$$

$$T = T_3 \quad \text{or} \quad T = 250 \text{ lb}$$

## مثال ۲: ادامه حل مسئله - نیروهای وارد بر بلبرینگ C

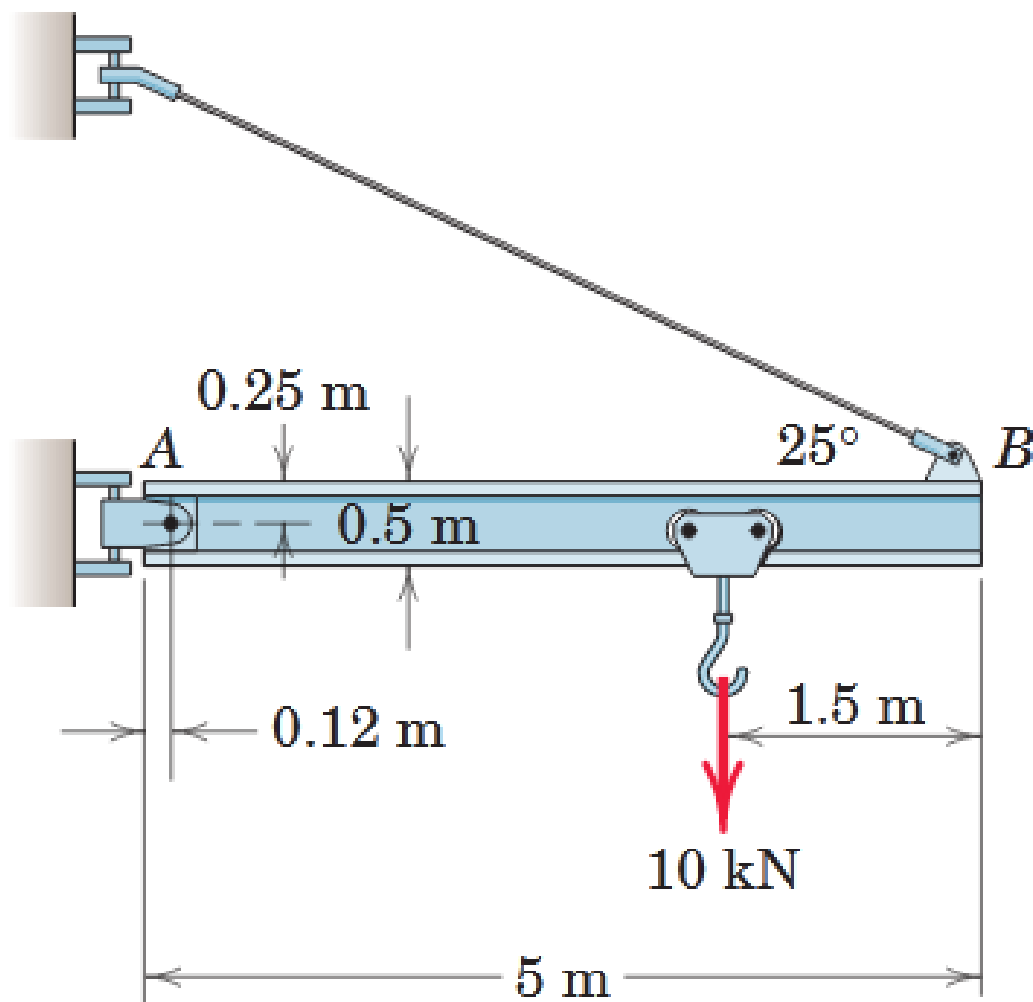
و سرانجام با تعادل نیرو در قرقه C داریم:

$[\Sigma F_x = 0]$	$250 \cos 30^\circ - F_x = 0$	$F_x = 217 \text{ lb}$
$[\Sigma F_y = 0]$	$F_y + 250 \sin 30^\circ - 250 = 0$	$F_y = 125 \text{ lb}$
$[F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}]$	$F = \sqrt{(217)^2 + (125)^2} = 250 \text{ lb}$	

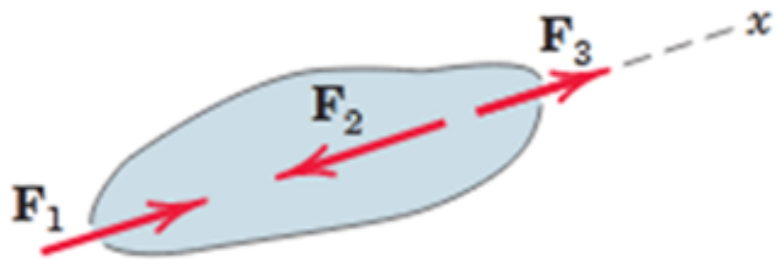
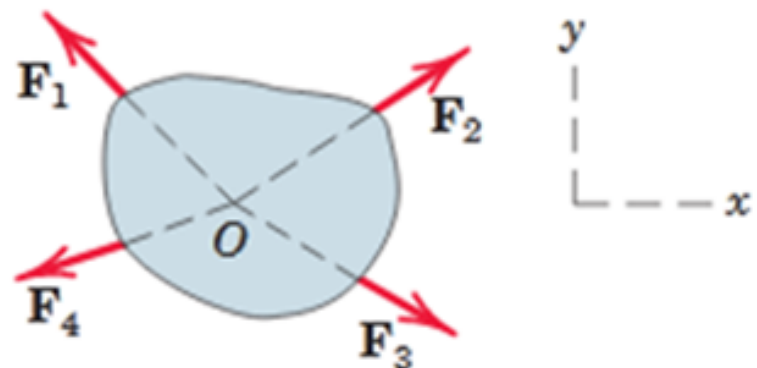


## تمرین ۲ :

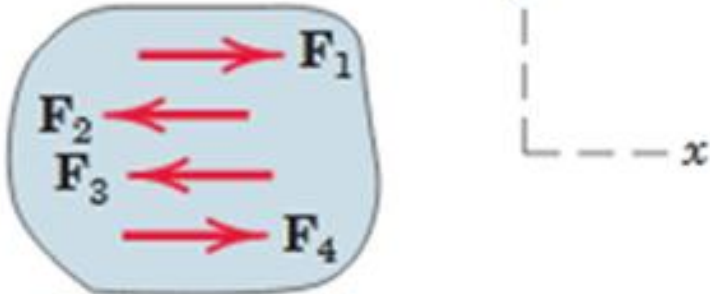
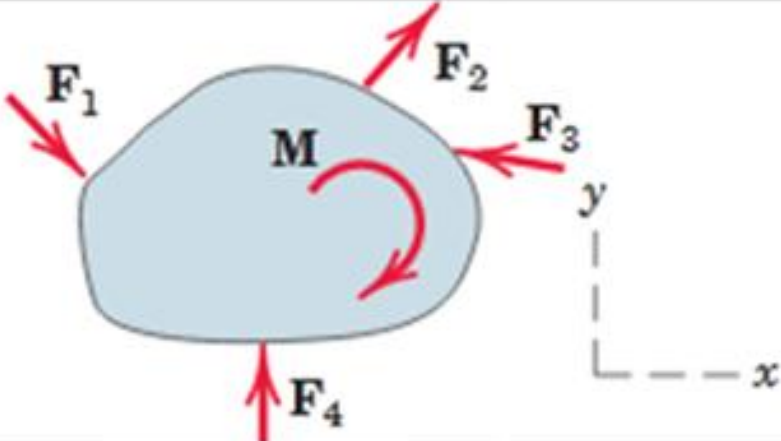
کشش کابل  $T$  در طناب و نیروی وارد بر پین  $A$  را محاسبه نمایید.  
جرم تیر معادل ۹۵ کیلوگرم به ازای هر متر طول آن می باشد.  
(نیروی وزن کل تیر را در وسط آن اعمال نمایید.)



## حالات خاص در تعادل در دو بعد

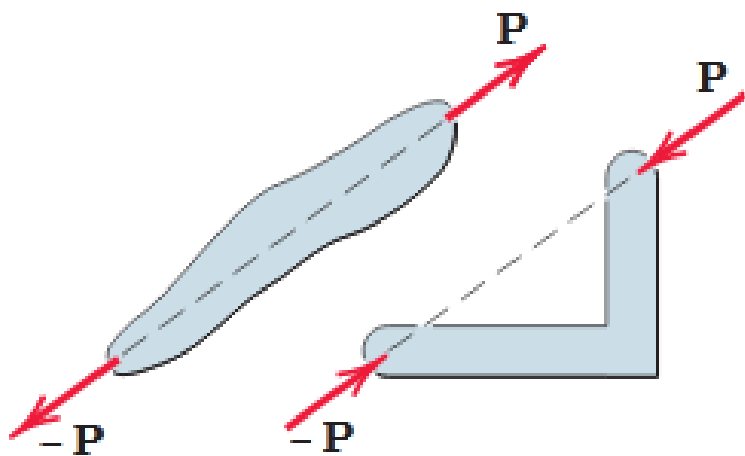
طبقه بندی تعادل در دو بعد		
سیستم نیرویی	دیاگرام آزاد	معادلات تعادل
۱. نیروهای هم راستا		$\Sigma F_x = 0$
۲. نیروهای متقاطع		$\Sigma F_x = 0$ $\Sigma F_y = 0$

در حالت ۲: وقتی امتداد چند نیرو از یک نقطه می گذرد، نیروها حول آن نقطه گشتاور ندارند.

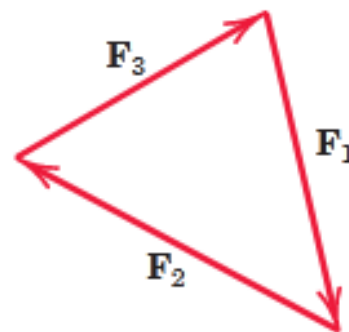
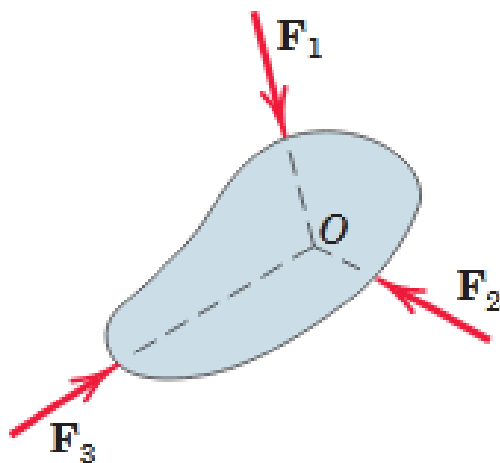
<p>۳. نیروهای موازی</p>		$\Sigma F_x = 0 \quad \Sigma M_z = 0$
<p>۴. حالت کلی</p>		$\Sigma F_x = 0 \quad \Sigma M_z = 0$ $\Sigma F_y = 0$

## عضو دونیرویی و سه نیرویی

در عضو دونیرویی فقط نیروها در یک راستا و به دو سر عضو وارد می شود (بیشتر در اعضای خرپا بکار می رود). که یا تمایل به کشش جسم دارد و یا تمایل به فشار بر جسم.



عضو سه نیرویی و تعادل نیرویی در آن



---

نکته: بصورت پیش فرض در حل مسایل، وزن تیرها باید لحاظ شود ولی وزن اعضای دیگر مانند قاب و عضو دو نیرویی (در خرپا و...) و کابل و طناب قابل صرفنظر می باشد.

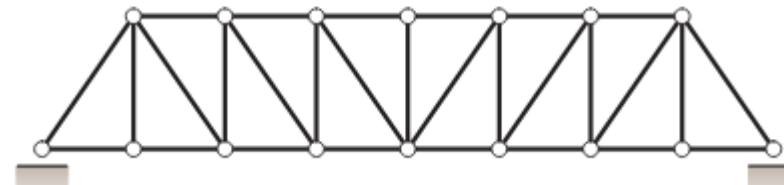
موارد بالا صادق می باشد، مگر اینکه در صورت مسایل خلاف این توضیحات ذکر گردد.

## سازه های استاتیک - خرپا

وقتی چند قطعه به هم متصل باشند یک سازه فلزی یا ساختمانی را تشکیل می شود.

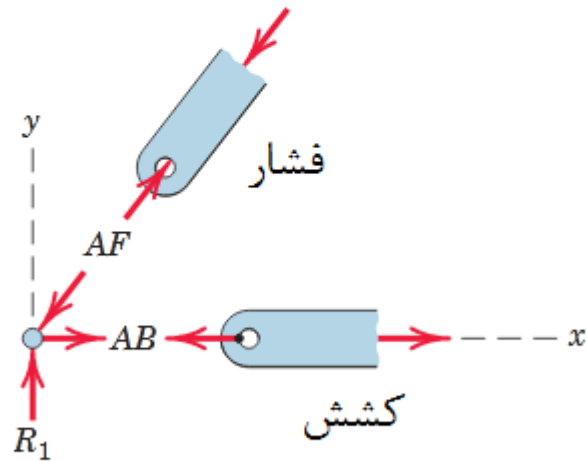
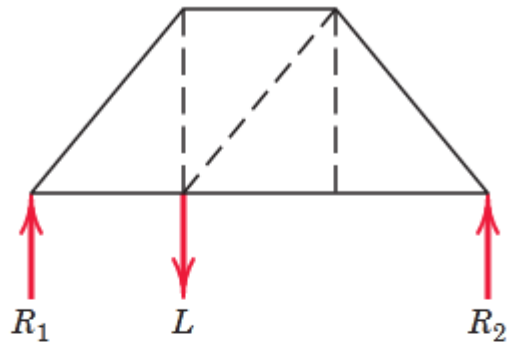
بنا به تعریف تراس ها (خرپا ها) یکی از مهمترین سازه های مهندسی هستند و در طراحی پلها و ساختمانهای فلزی از تراس ها استفاده می شود. یک تراس شامل قطعات مختلف به هم متصل شده می باشد. هر یک از اجزای خرپا باری را تحمل می نماید.

در شکل زیر نمونه ای خرپای صفحه ای مشاهده می شود.

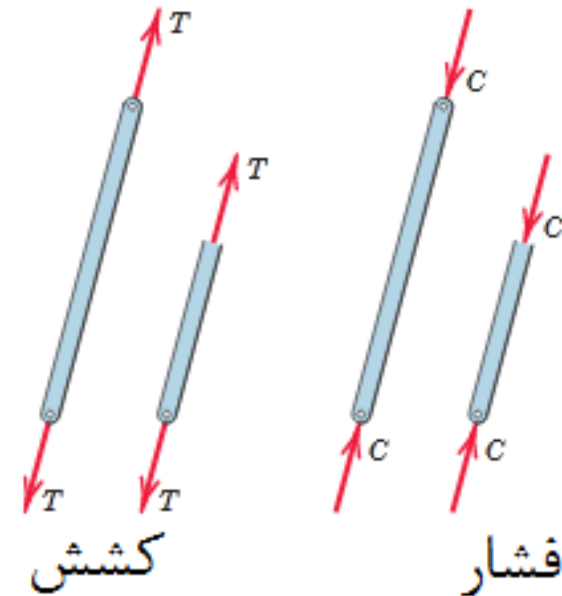


## نیرو در عضو دو نیرویی و اتصالات

نیروهای دو عضوی که غالباً در خرپاها بکار می روند دو نوع نیروی فشاری و یا کششی را تحمل می کنند.  
تحلیل نیرو در اتصالات نیز با همین مبنا انجام می گیرد.

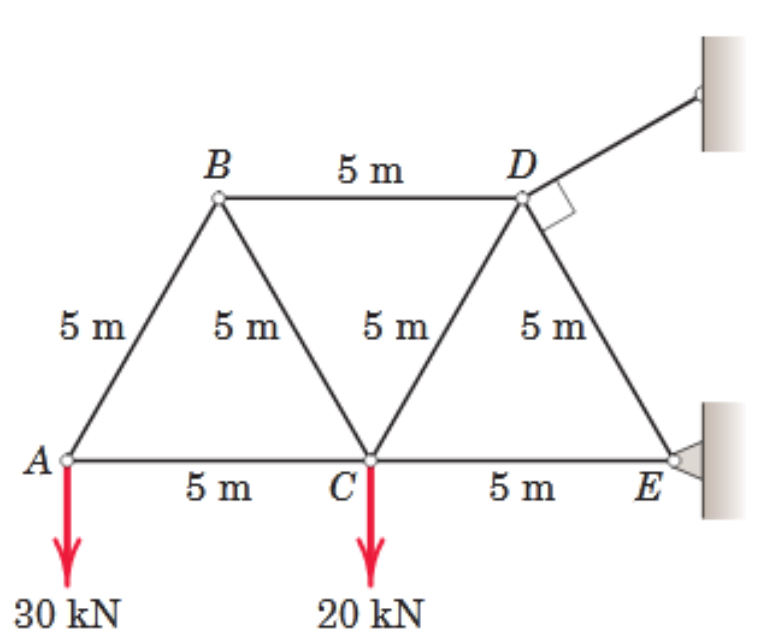


T نماد کشش  
C نماد فشار



## مثال ۱: خرپا

نیروی موجود در هر یک از اعضای دو نیروی خرپای صفحه ای را محاسبه نمایید.

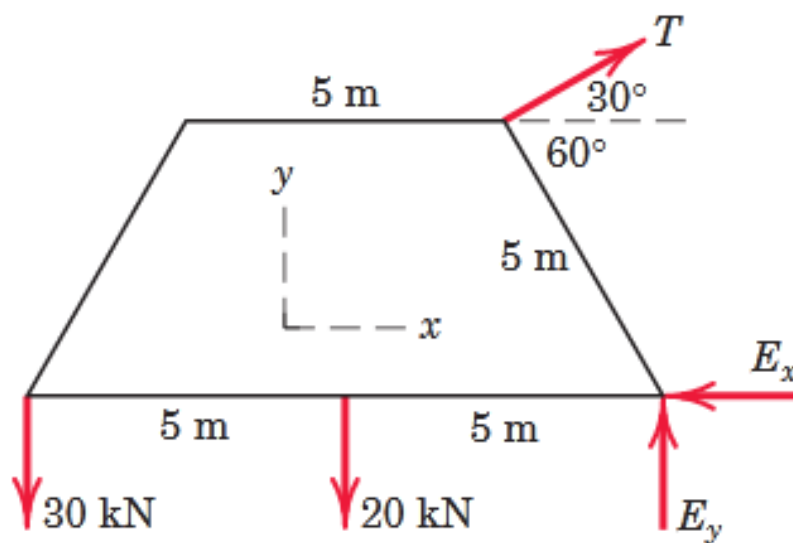




## حل مثال ۱

معادلات تعادل برای کل این خرپا عبارت خواهند بود از:

$[\Sigma M_E = 0]$	$5T - 20(5) - 30(10) = 0$	$T = 80 \text{ kN}$
$[\Sigma F_x = 0]$	$80 \cos 30^\circ - E_x = 0$	$E_x = 69.3 \text{ kN}$
$[\Sigma F_y = 0]$	$80 \sin 30^\circ + E_y - 20 - 30 = 0$	$E_y = 10 \text{ kN}$



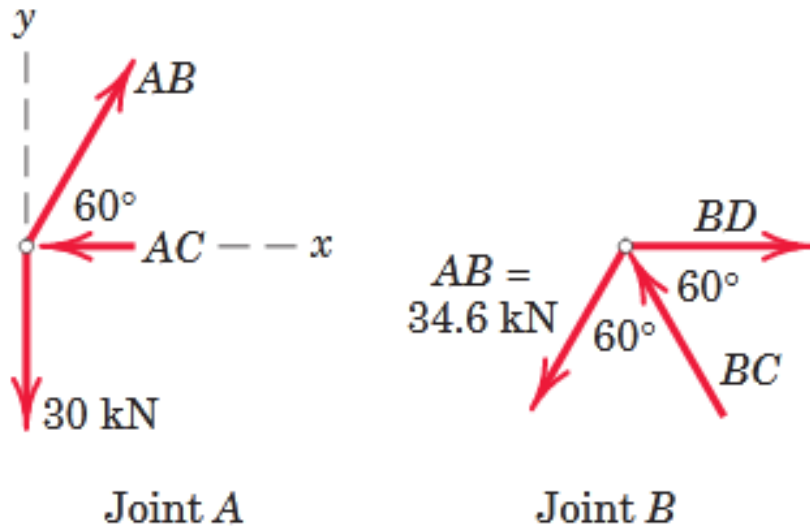
دیاگرام آزاد این خرپا به این ترتیب می باشد:

$$\begin{aligned}
 [\Sigma F_y = 0] \quad & 0.866AB - 30 = 0 \quad AB = 34.6 \text{ kN } T \\
 [\Sigma F_x = 0] \quad & AC - 0.5(34.6) = 0 \quad AC = 17.32 \text{ kN } C
 \end{aligned}$$

با نوشتن معادلات تعادل نیرو حول مفصل A داریم:

$$\begin{aligned}
 [\Sigma F_y = 0] \quad & 0.866BC - 0.866(34.6) = 0 \quad BC = 34.6 \text{ kN } C \\
 [\Sigma F_x = 0] \quad & BD - 2(0.5)(34.6) = 0 \quad BD = 34.6 \text{ kN } T
 \end{aligned}$$

سپس با توجه به وجود سه مجهول برای مفصل C، با نوشتن معادلات تعادل نیرو حول مفصل B داریم:

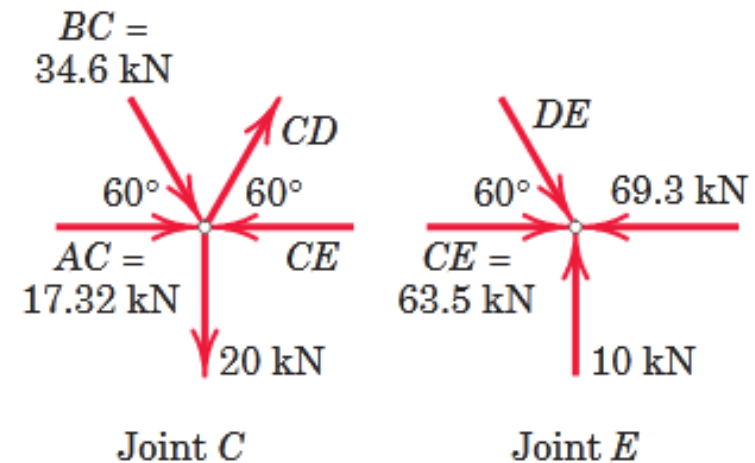


$$\begin{aligned}
 [\Sigma F_y = 0] \quad & 0.866CD - 0.866(34.6) - 20 = 0 \\
 & CD = 57.7 \text{ kN } T \\
 [\Sigma F_x = 0] \quad & CE - 17.32 - 0.5(34.6) - 0.5(57.7) = 0 \\
 & CE = 63.5 \text{ kN } C
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [\Sigma F_y = 0] \quad & 0.866DE = 10 \quad DE = 11.55 \text{ kN } C \\
 & \text{and the equation } \Sigma F_x = 0 \text{ checks.}
 \end{aligned}$$

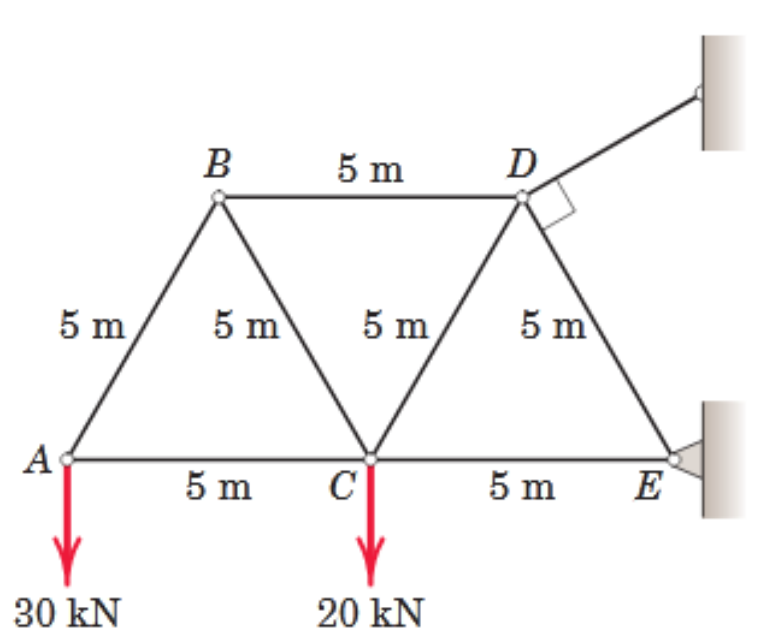
حال با نوشتن معادلات تعادل نیرو حول مفصل C داریم:

همچنین با نوشتن معادلات تعادل نیرو حول مفصل E داریم:



## تمرین ۱:

برای ۷ عضو (با طول ۵ متر) در مثال ۱ تعیین نمایید که کدامیک از آنها تحت فشار و کدامیک تحت کشش قرار دارند.



---

نکته ۱: جهت نیروها (کششی یا فشاری بودن) تا حد امکان باید درست قرار داده شود. البته در صورتیکه بلعکس لحاظ گردد پس از حل معادلات، مقدار نیرو با علامت منفی به دست خواهد آمد.

نکته ۲: نیروهای بدست آمده در حل مثال، نمایانگر نیروهایی است که اعضای دو نیرویی به مفاصل وارد می کنند. و در حقیقت نیرویی که مفاصل به این اعضا وارد می کنند هم اندازه و از نظر جهت عکس این نیروها خواهد بود. از این طریق، کششی و یا فشاری بودن نیرو در عضو مشخص می گردد.

نکته ۳: در تحلیل نیروهای داخلی اعضای خرپا، از مفصلی که نیروی مجهول کمتری (۲ و یا ۱ نیروی مجهول) به آن وارد می شود حل را شروع می کنیم. با نوشتن دو معادله نیرویی در دو راستای اصلی، دو مجهول بدست می آید. با توجه به اینکه در نوشتن معادلات تعادل در مفاصل خرپا، راستای همه نیروهای دوعضوی از آن مفصل می گذرد، نوشتن معادله گشتاور حول مفصل مذکور بی اثر است. بنابراین از هر معادله تعادل حول یک مفصل، فقط دو نیروی مجهول می تواند محاسبه گردد.

تصویری از یک سازه خrpایی موجود تهیه کرده و با تعیین بارهای خارجی آن، پس از ترسیم دیاگرام آزاد سازه، نیروهای فشاری یا کششی در هر عضو سازه و مقدار آنرا تعیین نمایید.

سازه های استاتیک - خرپا

در تحلیل مسایل خرپا

۱- عموماً عکس العمل های خارجی (تکیه گاه ها) از طریق به کار بردن معادلات تعادل برای کل سازه (رسم دیاگرام آزاد) به دست می آید.

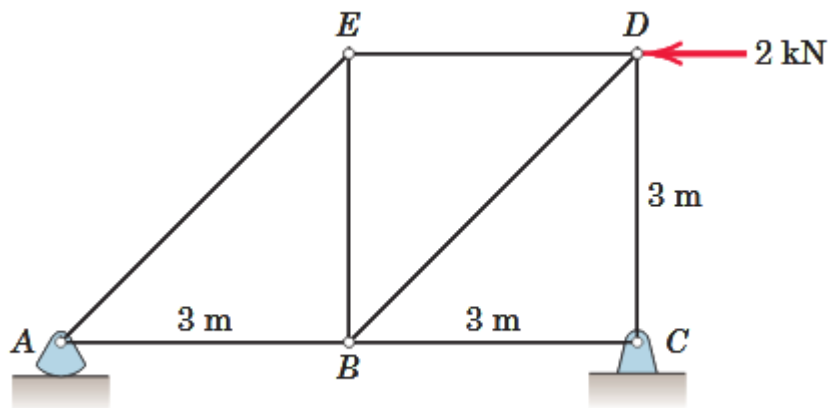
۲) سپس نیروها در بقیه اجزا از دو روش به دست می آید:

الف) روش تعادل مفصل ها

ب) روش تعادل مقاطع

## تمرین ۱

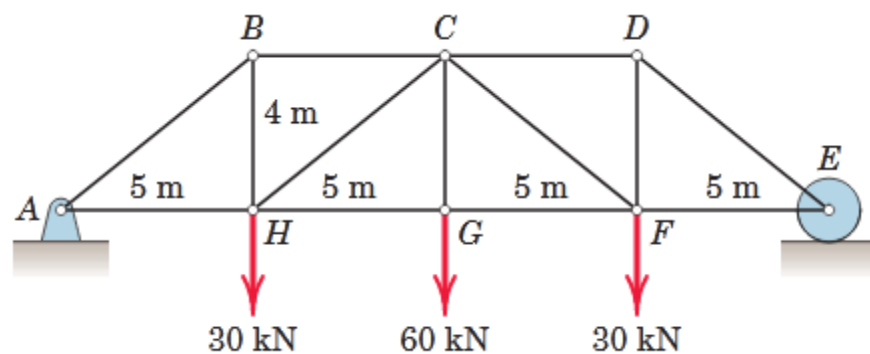
نیروهای موجود در هر یک از اعضای سازه را بدست آورید. (روش تعادل مفاصل)





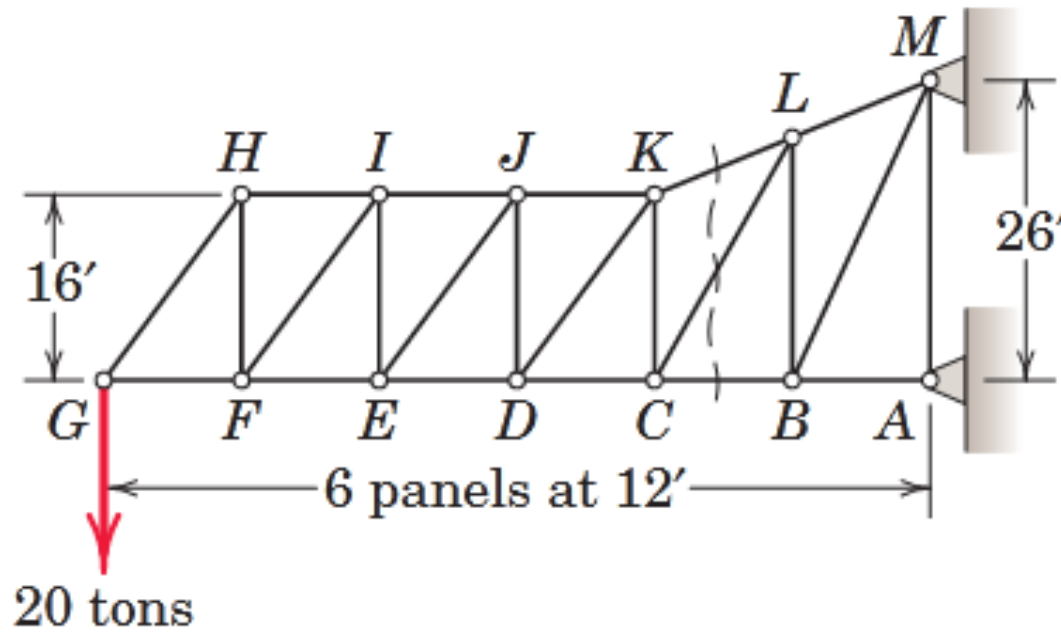
## تمرین ۲

نیروهای موجود در هر یک از اعضای سازه را بدست آورید.  
(روش تعادل مفاصل)



## مثال ۱: خرپا (حل با روش مقاطع)

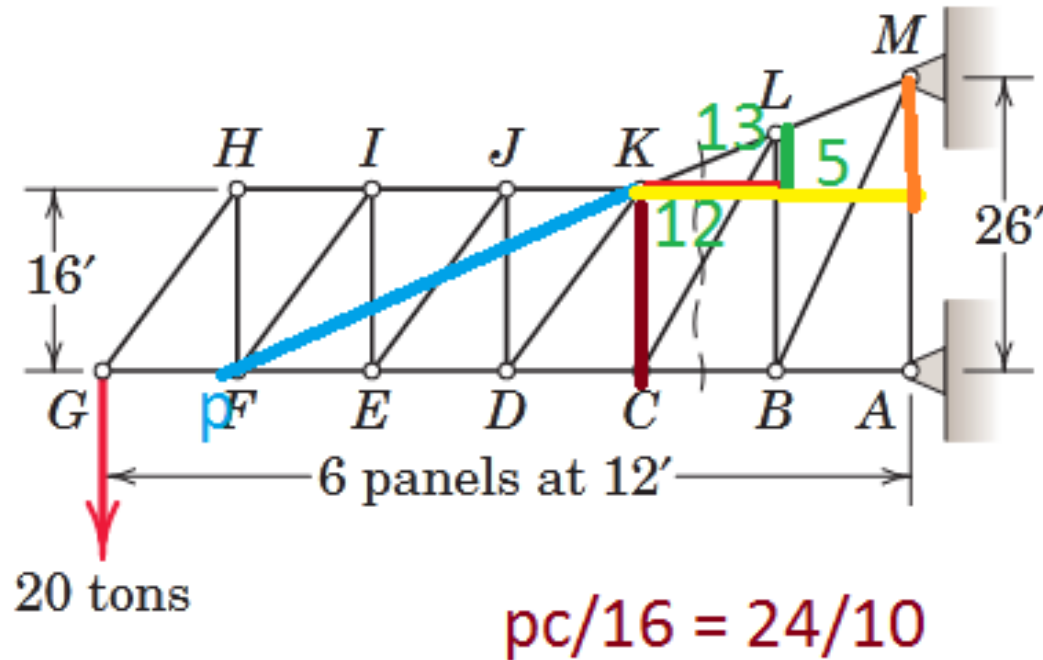
نیروهای موجود در هر یک از اعضای KL، CL و CB را بدست آورید.



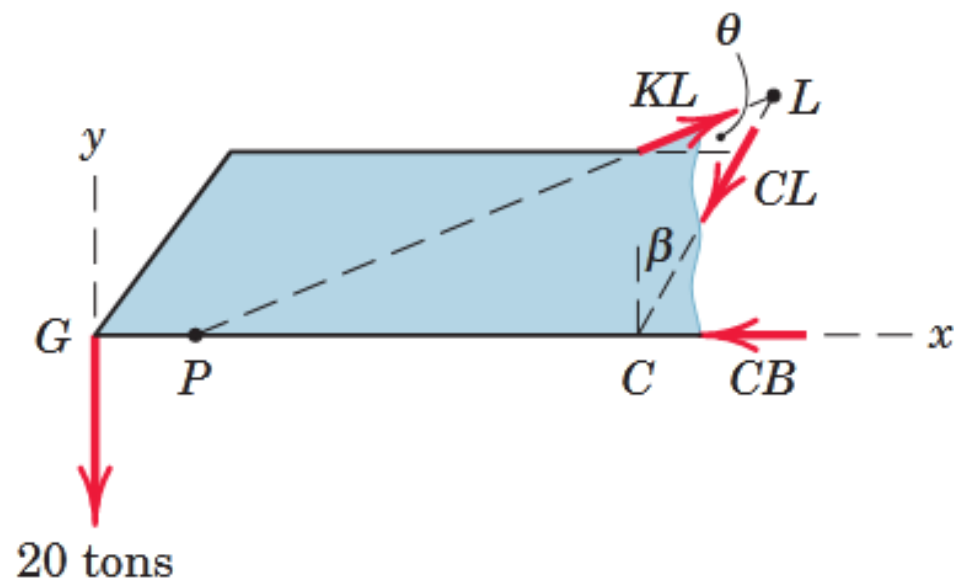
با توجه به تعداد زیاد اعضای این خرپا، با استفاده از روش مقاطع، فقط نیروهای موجود در اعضای مورد نیاز محاسبه می گردند.

## حل مثال ۱:

قبل از حل اصلی مسئله، محاسبه اندازه چند بازو با استفاده روابط هندسی انجام می گیرد.



حل مثال ۱: محاسبه یک نیرو با گشتاور گیری حول اولین نقطه



در دیاگرام آزاد مقطع برش خورده، سه نیروی مجهول وجود دارد که با احتساب سه معادله تعادل در صفحه، بدست می آیند.

$$[\Sigma M_L = 0] \quad 20(5)(12) - CB(21) = 0 \quad CB = 57.1 \text{ tons } C$$

حل مثال ۱: محاسبه یک نیروی دیگر با گشتاور گیری حول دومین نقطه

---

$$\theta = \tan^{-1}(5/12) \text{ so that } \cos \theta = 12/13.$$

$$[\Sigma M_C = 0] \quad 20(4)(12) - \frac{12}{13}KL(16) = 0 \quad KL = 65 \text{ tons } T$$

حل مثال ۱: محاسبه آخرین نیروی با گشتاور گیری حول سومین نقطه

---

$$\beta = \tan^{-1}(\overline{CB}/\overline{BL}) = \tan^{-1}(12/21) = 29.7^\circ \text{ and } \cos \beta = 0.868.$$

$$\begin{aligned} [\Sigma M_p = 0] \quad & 20(48 - 38.4) - CL(0.868)(38.4) = 0 \\ & CL = 5.76 \text{ tons } C \end{aligned}$$

در صورتیکه در یک خرپای ساده، تعداد تکیه گاه های موجود بیشتر از حداقل لازم برای تعادل پایدار دستگاه باشد، مجموعه از نظر نیروهای خارجی نامعین است، و تکیه گاه اضافی تشکیل یک قید زاید خارجی را می دهد. و اگر اعضا داخلی بیشتر از مورد نیاز باشد خرپا دارای قید زاید داخلی است و خرپا از نظر داخلی نامعین است.

برای خرپاهایی (صفحه ای) که از نظر داخلی و خارجی معین هستند، رابطه زیر بین تعداد اعضا و مفاصل خرپا برقرار است.

$$m + 3 = 2j$$

$j$  : تعداد مفاصل

$m$  : تعداد عضوهای دو سر مفصل

(با تعداد حداکثر سه عضو تکیه گاهی مجهول، که از نظر خارجی قابل حل باشند.)

شرط ذکر شده برای پایداری خرپا لازم می باشد ولی شرط کافی نیست.

اگر معادله زیر برقرار باشد:

$$m + 3 > 2j$$

تعداد اعضا بیشتر از تعداد معادلات مستقل است و خرپا از نظر داخلی نامعین است و دارای اعضای زاید می باشد.

اگر معادله زیر برقرار باشد:

$$m + 3 < 2j$$

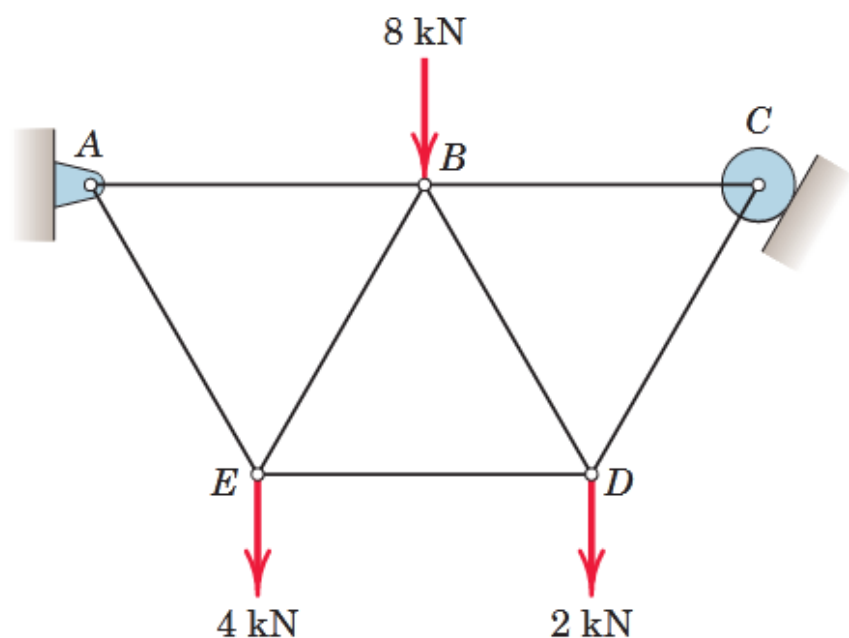
در تعداد اعضا داخلی خرپا کمبود وجود دارد و خرپا ناپایدار بوده و تحت اثر بار فرو می ریزد.

(در خرپاهای فضایی شرط معین بودن به این صورت خواهد بود.  $m + 6 = 3j$  )



## تمرین ۱:

نیروهای اعمالی در هر یک از اعضای سازه نمایش داده شده را تعیین کنید.  
مثلت های متوازی الاضلاع برابر می باشند.

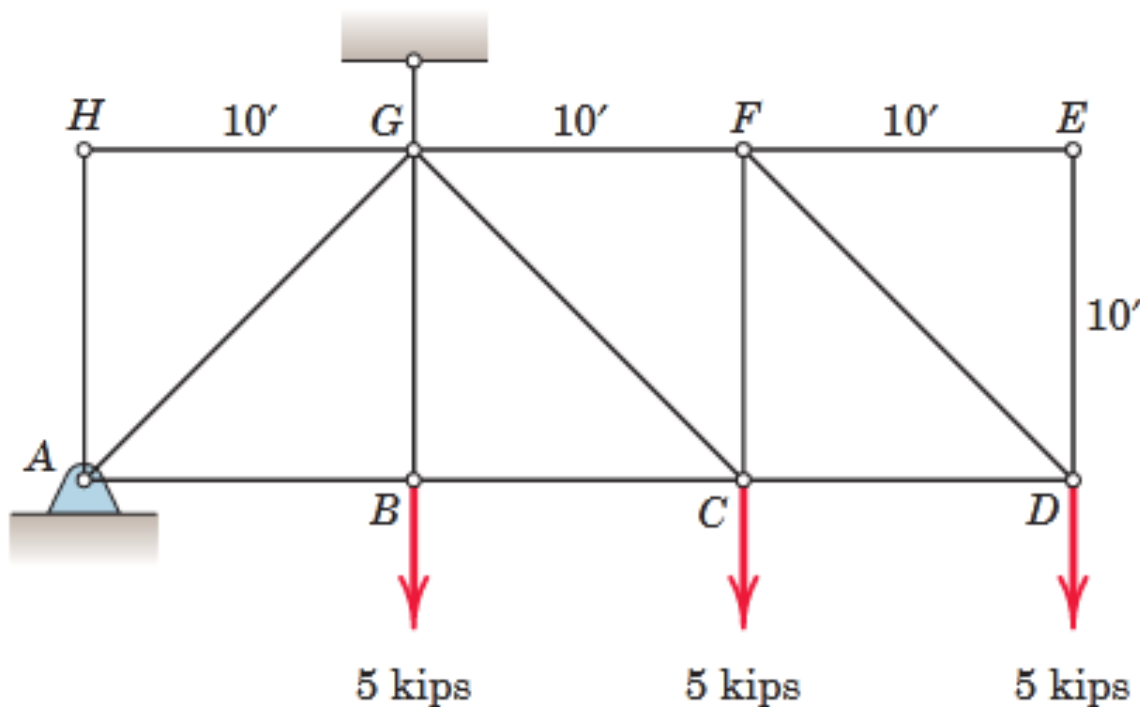


تمرین در کلاس:

الف) سازه چند نیروی تکیه گاهی دارد. آیا قایل حل (از لحاظ خارجی معین) است؟  
ب) معین و یا نامعین بودن سازه را از لحاظ داخلی بررسی نمایید.

## تمرین ۲:

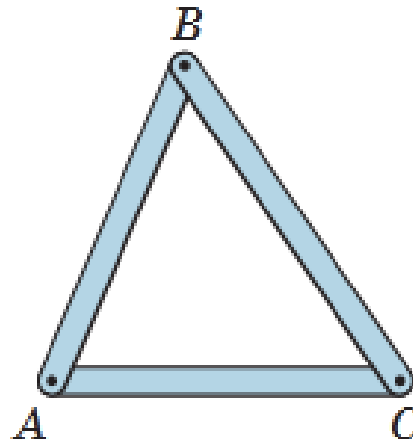
نیروی موجود در عضو CG در سازه مقابل را محاسبه نمایید.  
تمرین در کلاس: اعضای زاید (اعضایی که نیرویی تحمل نمی کنند.) احتمالی را تعیین نمایید.  
راهنمایی: در نقطه G بجای عضو متصل شده به دیوار نیروی آن را که در راستای عضو مذکور است قرار دهید که با رسم دیاگرام آزاد و نوشتن معادلات تعادل مقدار آن نیرو به دست خواهد آمد.



## بخش های تشکیل دهنده خرپا

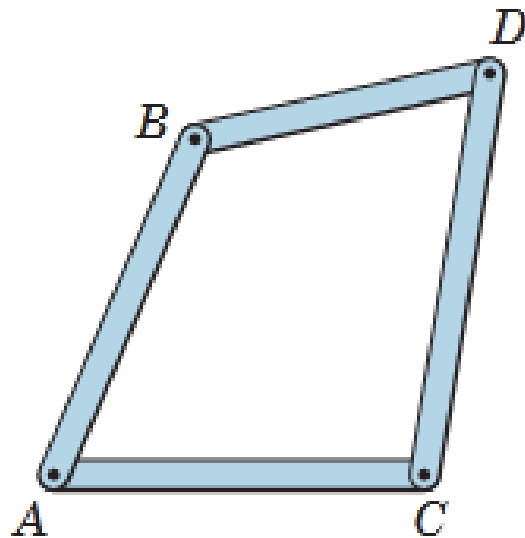
---

خرپای مسطح (صفحه ای) دارای زیر مجموعه های بنیادی به شکل مثلث می باشند.  
سه میله که توسط مفصل در انتهایشان به یکدیگر متصل شده اند تشکیل یک قاب صلب را می دهند.  
(سازه صلب تغییر شکل ندارد و یا تغییر شکل آن قابل اغماض است).



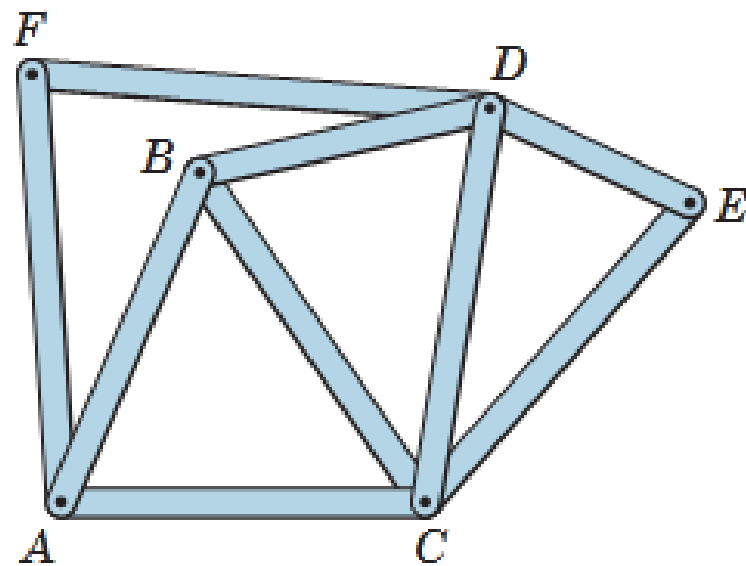
---

قاب تشکیل دهنده از چهار عضو یا تعداد بیشتر عضو که پشت سر هم مفصل شده باشند، تشکیل یک چند ضلعی را می دهند که قاب صلب نمی باشد و به آن مکانیسم گویند.



---

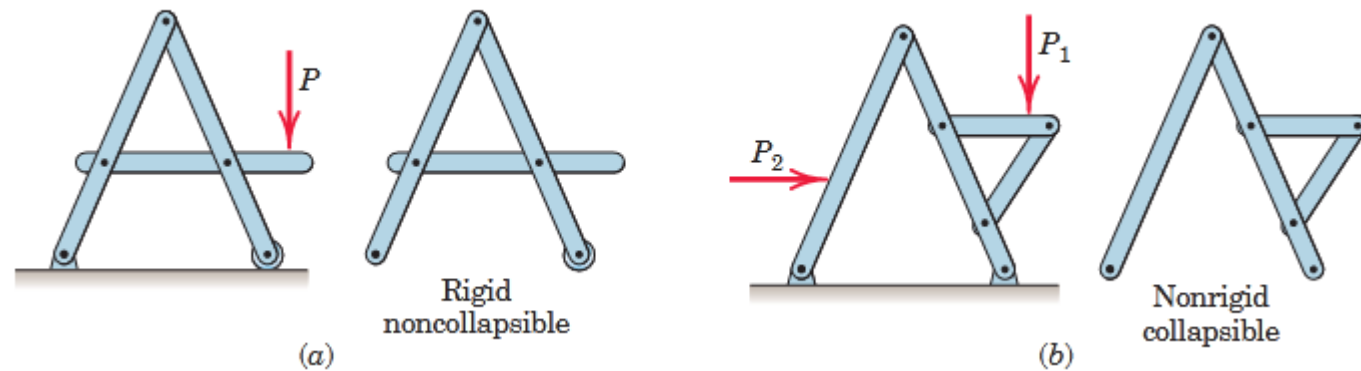
قاب غیر صلب یا مکانیسم را می توان از طریق افزودن یک عضو قطری پایدار و صلب نمود.





قاب و ماشین:

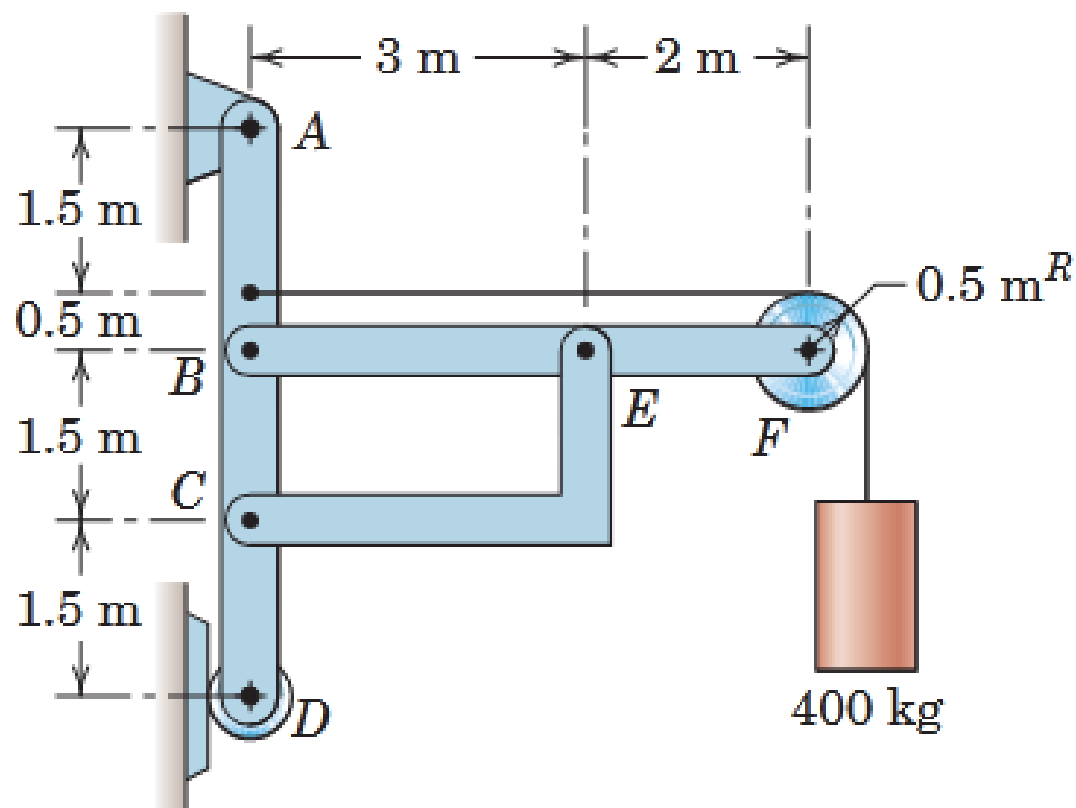
اگر حداقل یکی از اعضای سازه چند نیرویی باشد سازه قاب یا ماشین نامیده می شود. در مباحث قبلی نیروها فقط در نقاط مفاصل اعمال می شد ولی در این مبحث نیرو می تواند بر وسط عضو اعمال گردد.



وزنه ۴۰۰ کیلوگرمی مطابق شکل بر قاب نشان داده شده اعمال می شود.

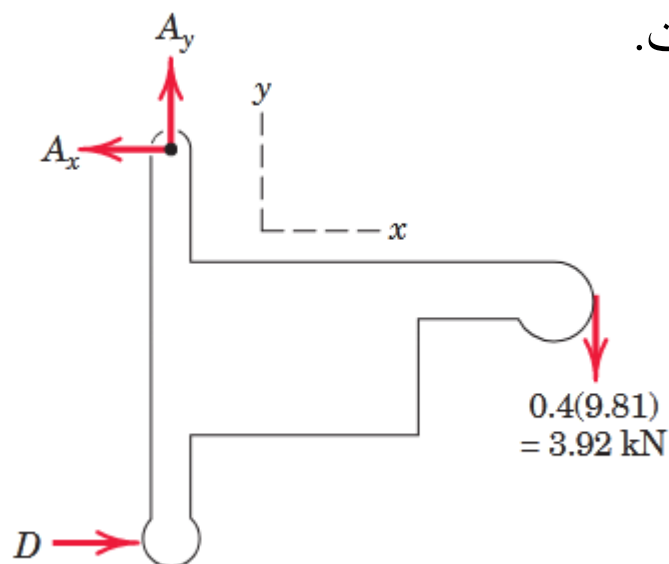
از وزن اعضای قاب صرف نظر نمایید.

نیروهای مختلف در اعضای قاب را محاسبه نمایید.



ابتدا دیاگرام آزاد برای نیروهای خارجی مجموعه صلب یکپارچه رسم می گردد. مشاهده می شود که از نظر نیروهای خارجی قاب از نظر ایستایی معین است.

با نوشتن معادلات تعادل برای نیروهای خارجی داریم:



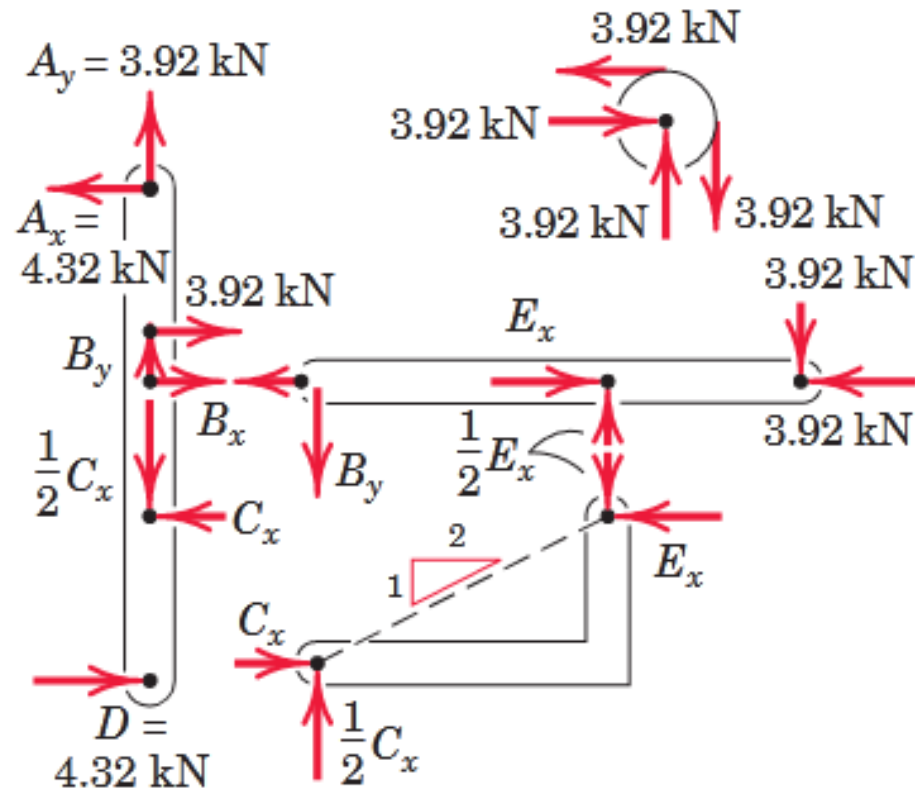
$$[\Sigma M_A = 0] \quad 5.5(0.4)(9.81) - 5D = 0 \quad D = 4.32 \text{ kN}$$

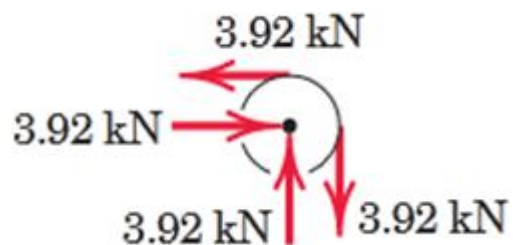
$$[\Sigma F_x = 0] \quad A_x - 4.32 = 0 \quad A_x = 4.32 \text{ kN}$$

$$[\Sigma F_y = 0] \quad A_y - 3.92 = 0 \quad A_y = 3.92 \text{ kN}$$



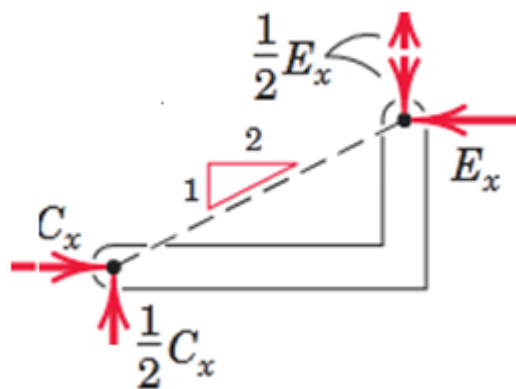
سپس اعضای دستگاه از یکدیگر منفصل شده و ترسیمه آزاد نیروهای هر عضو به تنهایی کشیده می شود.





در مورد قرقره با مرکز  $F$  می توان معادلات تعادل را نوشت. ولی با مشاهده نیز موارد روبرو قابل حصول می باشد:

عضو  $CE$  دو نیرویی است و نیروهای آن عکس نیروهای اعمالی به  $BF$  در نقطه  $E$  و همچنین به  $AD$  در نقطه  $C$  است.



هندسۀ مسئله نشان می دهد که در عضو دو نیرویی  $CE$  روابط زیر برقرار است:

$$E_y = \frac{1}{2} E_x$$

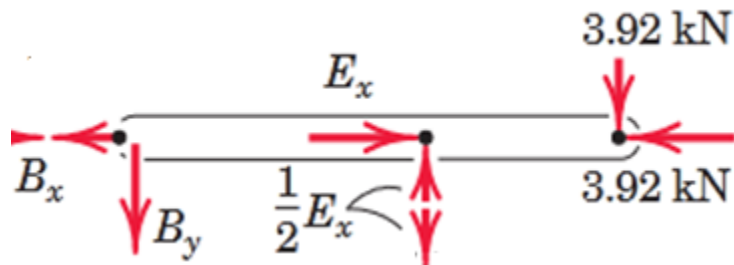
$$C_y = \frac{1}{2} C_x$$

با کمک هندسه مسئله در عضو BF داریم:

$$[\Sigma M_B = 0] \quad 3.92(5) - \frac{1}{2}E_x(3) = 0 \quad E_x = 13.08 \text{ kN}$$

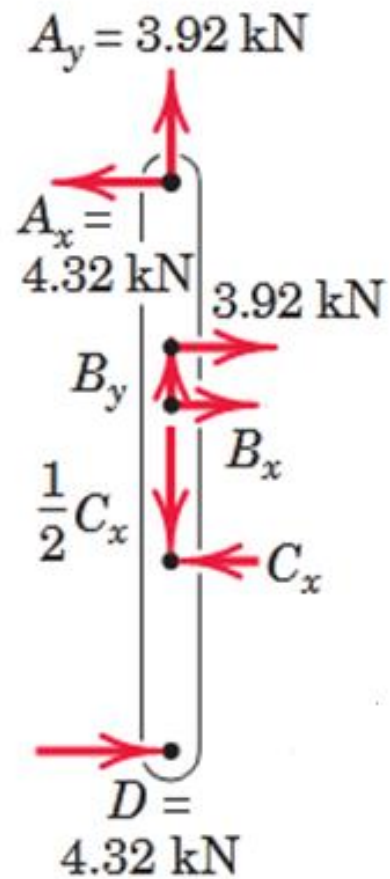
$$[\Sigma F_y = 0] \quad B_y + 3.92 - 13.08/2 = 0 \quad B_y = 2.62 \text{ kN}$$

$$[\Sigma F_x = 0] \quad B_x + 3.92 - 13.08 = 0 \quad B_x = 9.15 \text{ kN}$$



$$C_x = E_x = 13.08 \text{ kN}$$
$$C_y = E_y = 13.08/2 \text{ kN}$$

در نهایت، برای کنترل مسئله می توان برای عضو AD داشت:



$$[\Sigma M_C = 0] \quad 4.32(3.5) + 4.32(1.5) - 3.92(2) - 9.15(1.5) = 0$$

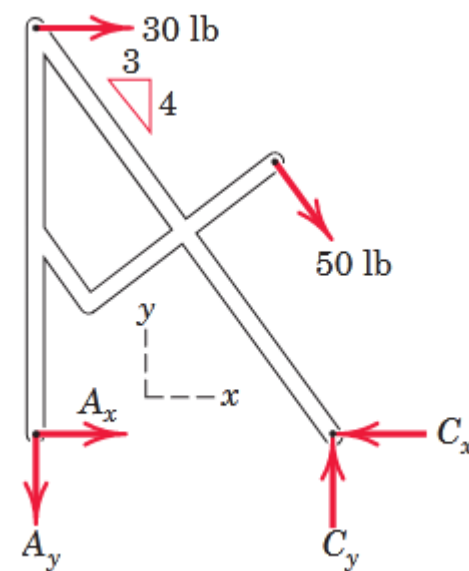
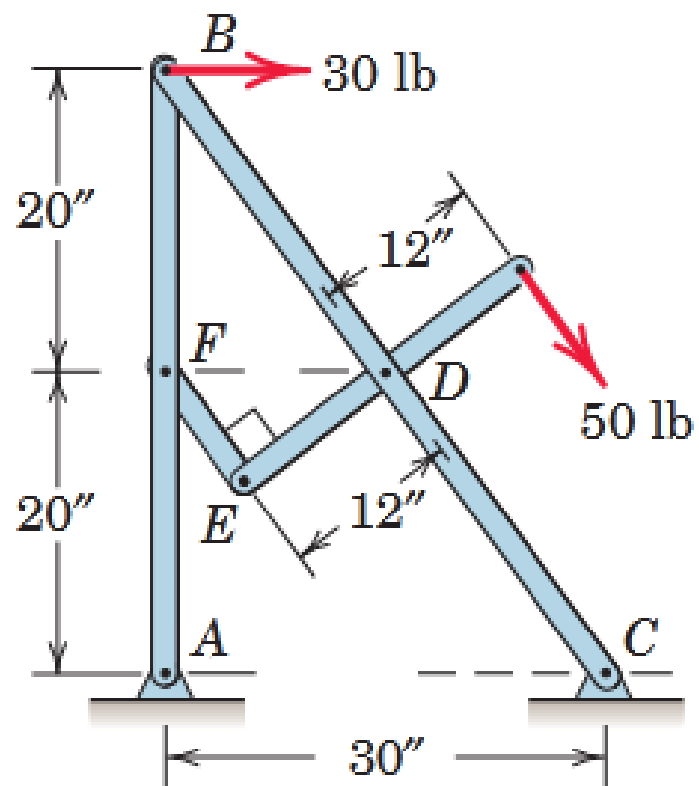
$$[\Sigma F_x = 0] \quad 4.32 - 13.08 + 9.15 + 3.92 + 4.32 = 0$$

$$[\Sigma F_y = 0] \quad -13.08/2 + 2.62 + 3.92 = 0$$

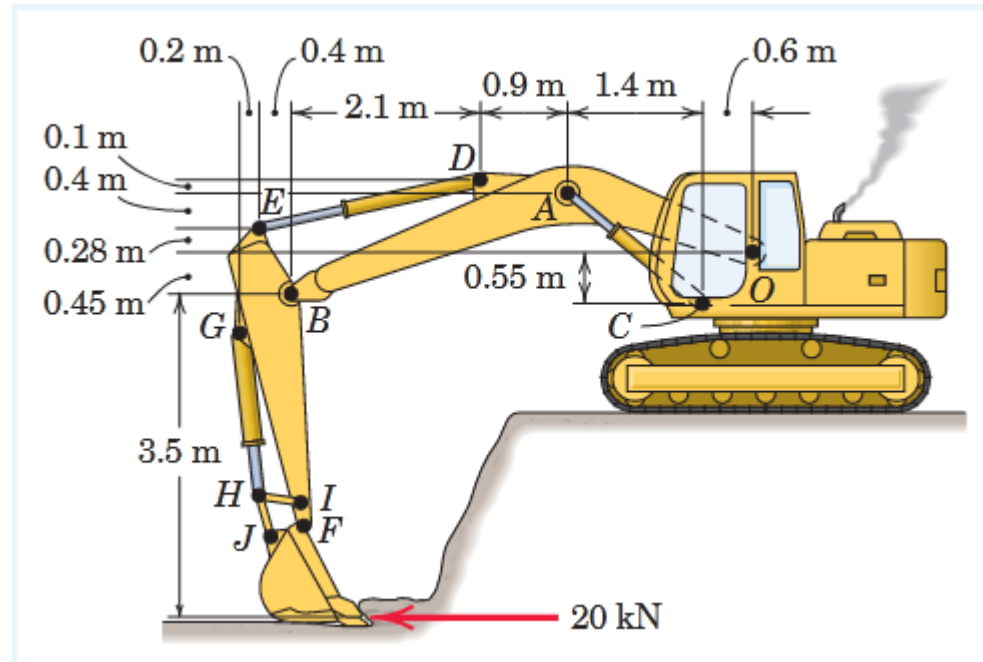
برقراری این معادلات صحت حل را نمایش می دهد.

تمرین ۱:

نیروهای مختلف در اعضای قاب را محاسبه نمایید.  
برای کمک به حل مسئله، ترسیمه آزاد قاب داده شده است.

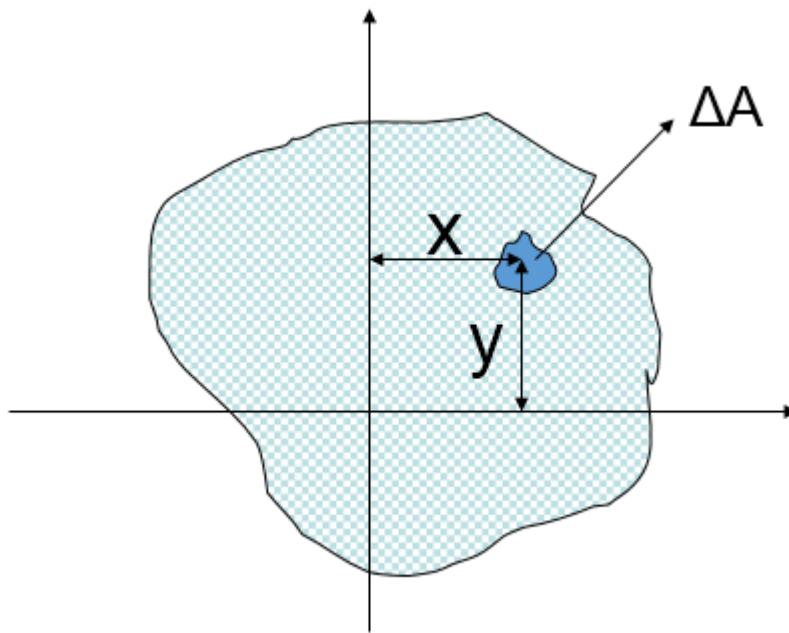


نیروهای موجود در سیلندرهای هیدرولیک دستگاه بیل مکانیکی زیر را تحلیل نمایید.  
فرض کنید راد سیلندرهای هیدرولیکی با قطر ۴ سانتی متر باشد.



## ممان سطح

انتگرال  $\int x dA$  به ممان اولیه سطح  $A$  نسبت به محور  $y$  معروف است و با  $Q_y$  نشان داده می شود.



$$Q_y = \int x dA$$

در سطوح ساده تر داریم:

$$Q_y = \bar{x}A$$

---

به همان طریق برای محور X خواهیم داشت:

$$Q_x = \int y dA$$

در سطوح ساده تر داریم:

$$Q_x = \bar{y}A$$

بنابراین ، می توان نتیجه گرفت که مختصات مرکز سطح را می توان از فرمول های زیر بدست آورد.

$$\bar{x} = \frac{Q_y}{A}$$

$$\bar{y} = \frac{Q_x}{A}$$



ممان ثانویه یا ممان اینرسی یک سطح:

در ممان اولیه، وزن یک جزء  $\Delta W$  با سطح آن متناسب بود و ممان اولیه به سطح بستگی داشت. ممان ثانویه نه تنها به سطح بستگی دارد، بلکه به فاصله از سطح تا محور داده شده نیز بستگی دارد.

$$Q_x = \int y dA \quad \text{ممان اولیه سطح}$$
$$I_x = \int y^2 dA \quad \text{ممان ثانویه (ممان اینرسی)}$$

# مرکز سطح و ممان اینرسی در شکل های دوبعدی

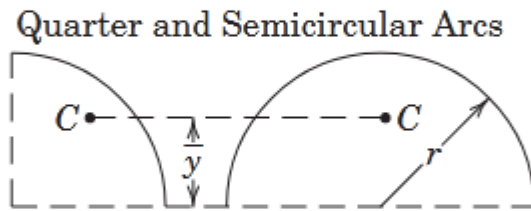
قطعاعی از کمان



$$\bar{r} = \frac{r \sin \alpha}{\alpha}$$

—

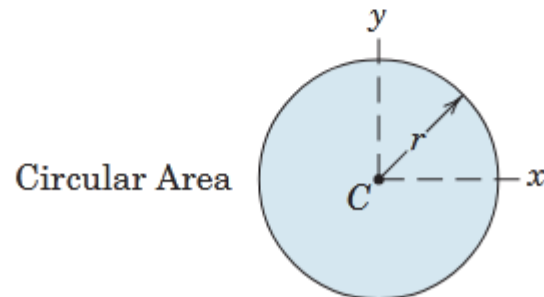
نیم و ربع کمان



$$\bar{y} = \frac{2r}{\pi}$$

—

سطح دایره ای

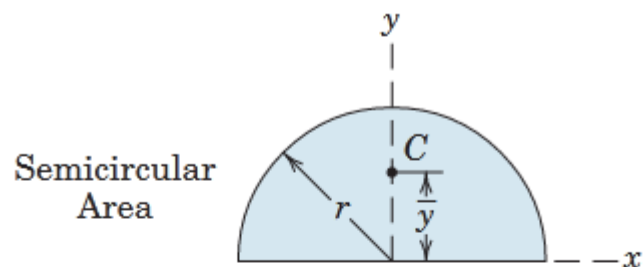


—

$$I_x = I_y = \frac{\pi r^4}{4}$$

$$I_z = \frac{\pi r^4}{2}$$

سطح نیم دایره ای



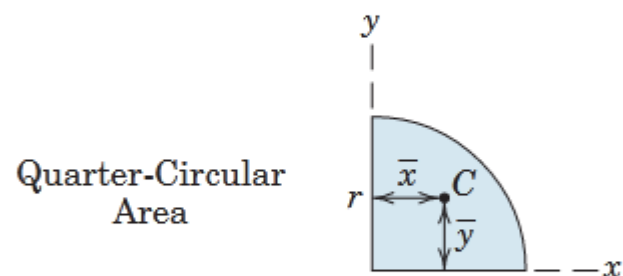
$$\bar{y} = \frac{4r}{3\pi}$$

$$I_x = I_y = \frac{\pi r^4}{8}$$

$$\bar{I}_x = \left( \frac{\pi}{8} - \frac{8}{9\pi} \right) r^4$$

$$I_z = \frac{\pi r^4}{4}$$

سطح ربع دایره ای



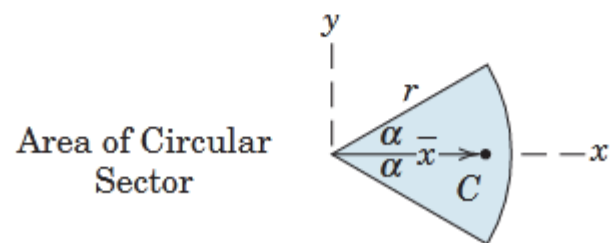
$$\bar{x} = \bar{y} = \frac{4r}{3\pi}$$

$$I_x = I_y = \frac{\pi r^4}{16}$$

$$\bar{I}_x = \bar{I}_y = \left( \frac{\pi}{16} - \frac{4}{9\pi} \right) r^4$$

$$I_z = \frac{\pi r^4}{8}$$

سطح بخشی از دایره



$$\bar{x} = \frac{2}{3} \frac{r \sin \alpha}{\alpha}$$

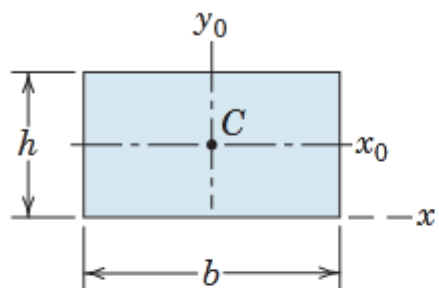
$$I_x = \frac{r^4}{4} \left( \alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right)$$

$$I_y = \frac{r^4}{4} \left( \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right)$$

$$I_z = \frac{1}{2} r^4 \alpha$$

سطح مستطیلی

Rectangular Area



—

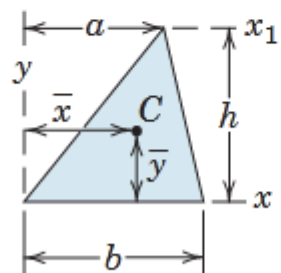
$$I_x = \frac{bh^3}{3}$$

$$\bar{I}_x = \frac{bh^3}{12}$$

$$\bar{I}_z = \frac{bh}{12}(b^2 + h^2)$$

سطح مثلثی

Triangular Area



$$\bar{x} = \frac{a+b}{3}$$

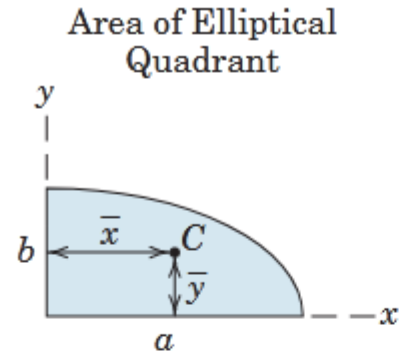
$$\bar{y} = \frac{h}{3}$$

$$I_x = \frac{bh^3}{12}$$

$$\bar{I}_x = \frac{bh^3}{36}$$

$$I_{x_1} = \frac{bh^3}{4}$$

سطح ربع بیضی



$$\bar{x} = \frac{4a}{3\pi}$$

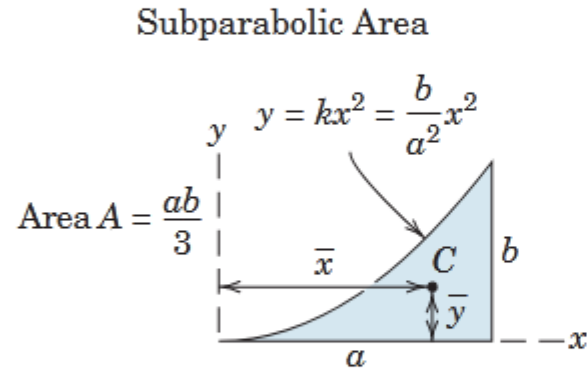
$$\bar{y} = \frac{4b}{3\pi}$$

$$I_x = \frac{\pi ab^3}{16}, \quad \bar{I}_x = \left( \frac{\pi}{16} - \frac{4}{9\pi} \right) ab^3$$

$$I_y = \frac{\pi a^3 b}{16}, \quad \bar{I}_y = \left( \frac{\pi}{16} - \frac{4}{9\pi} \right) a^3 b$$

$$I_z = \frac{\pi ab}{16} (a^2 + b^2)$$

سطح زیر سهمی



$$\bar{x} = \frac{3a}{4}$$

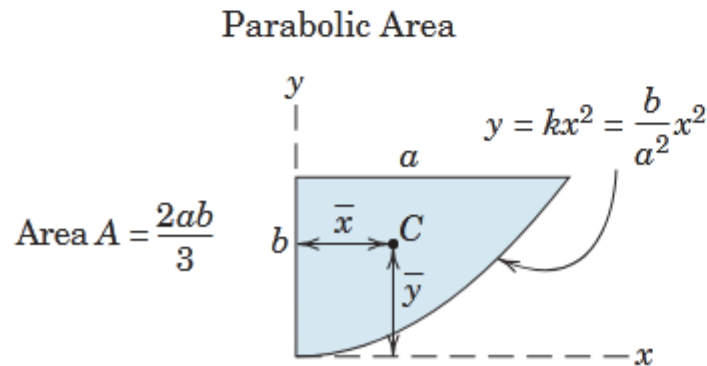
$$\bar{y} = \frac{3b}{10}$$

$$I_x = \frac{ab^3}{21}$$

$$I_y = \frac{a^3 b}{5}$$

$$I_z = ab \left( \frac{a^3}{5} + \frac{b^2}{21} \right)$$

سطح سهمی



$$\bar{x} = \frac{3a}{8}$$

$$\bar{y} = \frac{3b}{5}$$

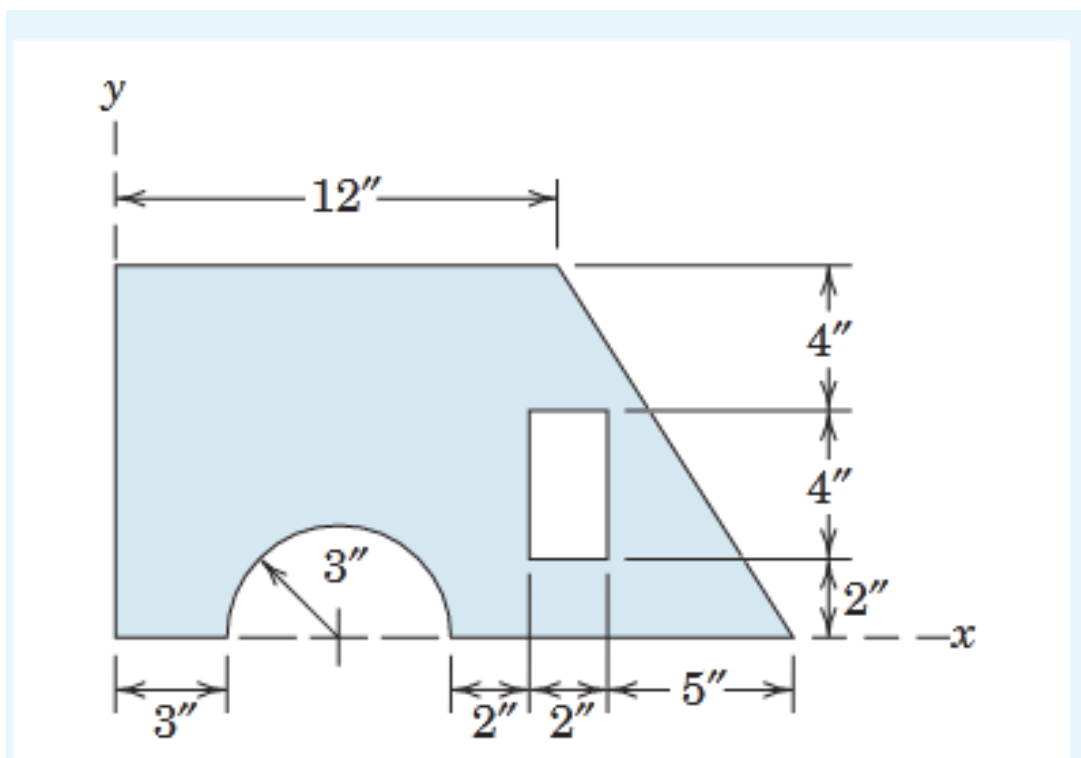
$$I_x = \frac{2ab^3}{7}$$

$$I_y = \frac{2a^3 b}{15}$$

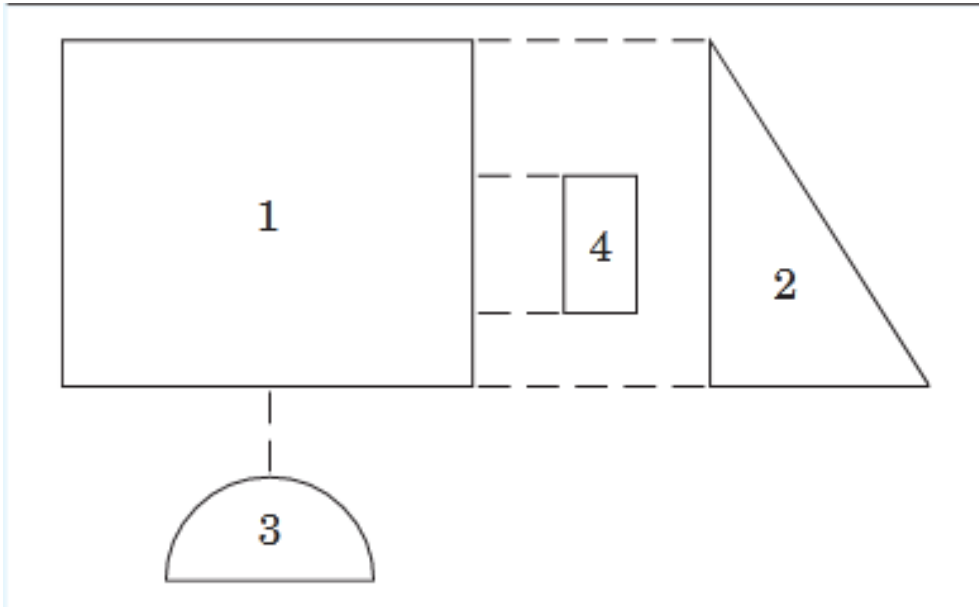
$$I_z = 2ab \left( \frac{a^2}{15} + \frac{b^2}{7} \right)$$

## مثال ۱:

مرکز سطح هاشور خورده را در شکل مقابل بیابید.



شکل را بصورت اجزای مقابل تفکیک نموده و قطعات ۳ و ۴ را بصورت سطوح منفی لحاظ می نماییم.



با استفاده از مقادیر موجود برای مراکز سطح در جداول خواهیم داشت.

PART	$A$ in. <sup>2</sup>	$\bar{x}$ in.	$\bar{y}$ in.	$\bar{x}A$ in. <sup>3</sup>	$\bar{y}A$ in. <sup>3</sup>
1	120	6	5	720	600
2	30	14	10/3	420	100
3	-14.14	6	1.273	-84.8	-18
4	-8	12	4	-96	-32
TOTALS	127.9			959	650

در نتیجه مختصات مرکز جرم عبارت است از:

$$\left[ \bar{X} = \frac{\Sigma A \bar{x}}{\Sigma A} \right] \quad \bar{X} = \frac{959}{127.9} = 7.50 \text{ in.}$$

$$\left[ \bar{Y} = \frac{\Sigma A \bar{y}}{\Sigma A} \right] \quad \bar{Y} = \frac{650}{127.9} = 5.08 \text{ in.}$$



انتقال ممان اینرسی به محورهاى موازى محورهاى اصلی:

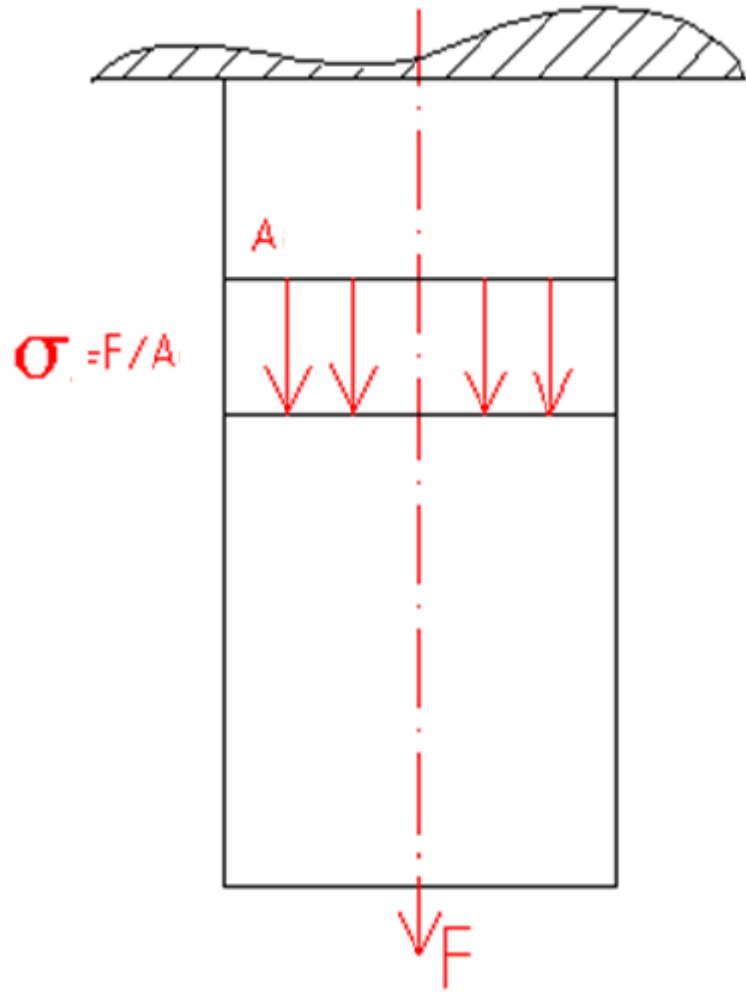
---

$$I_x = \Sigma \bar{I}_x + \Sigma A d_x^2$$

$$I_y = \Sigma \bar{I}_y + \Sigma A d_y^2$$

## تنش (محوری):

چنانچه نیروی  $F$  بر یک سطح  $A$  اثر کند، نسبت نیرو به واحد سطح را تنش  $\sigma$  گویند.

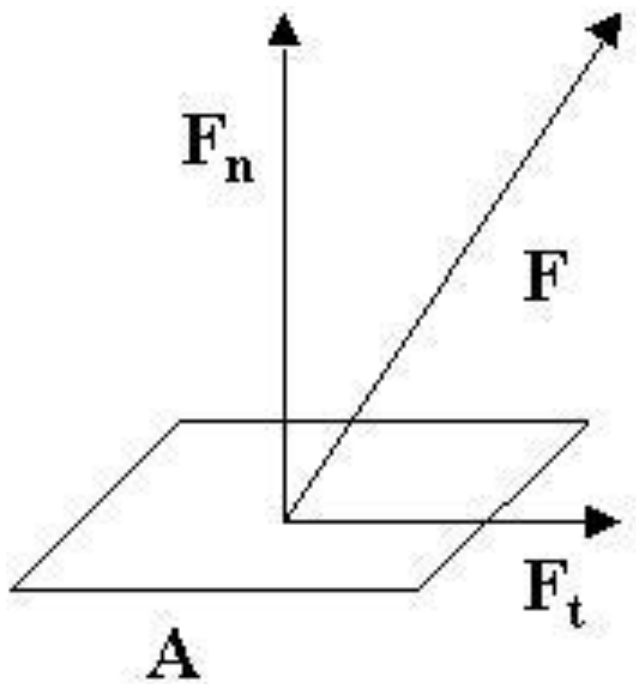


با توجه به اینکه در بار کششی / فشاری شکل روبرو، نیرو عمود بر سطح اثر می کند، باعث ایجاد یک تنش محوری می شود.

تنش های کششی را مثبت و تنش های فشاری را منفی می گیریم.

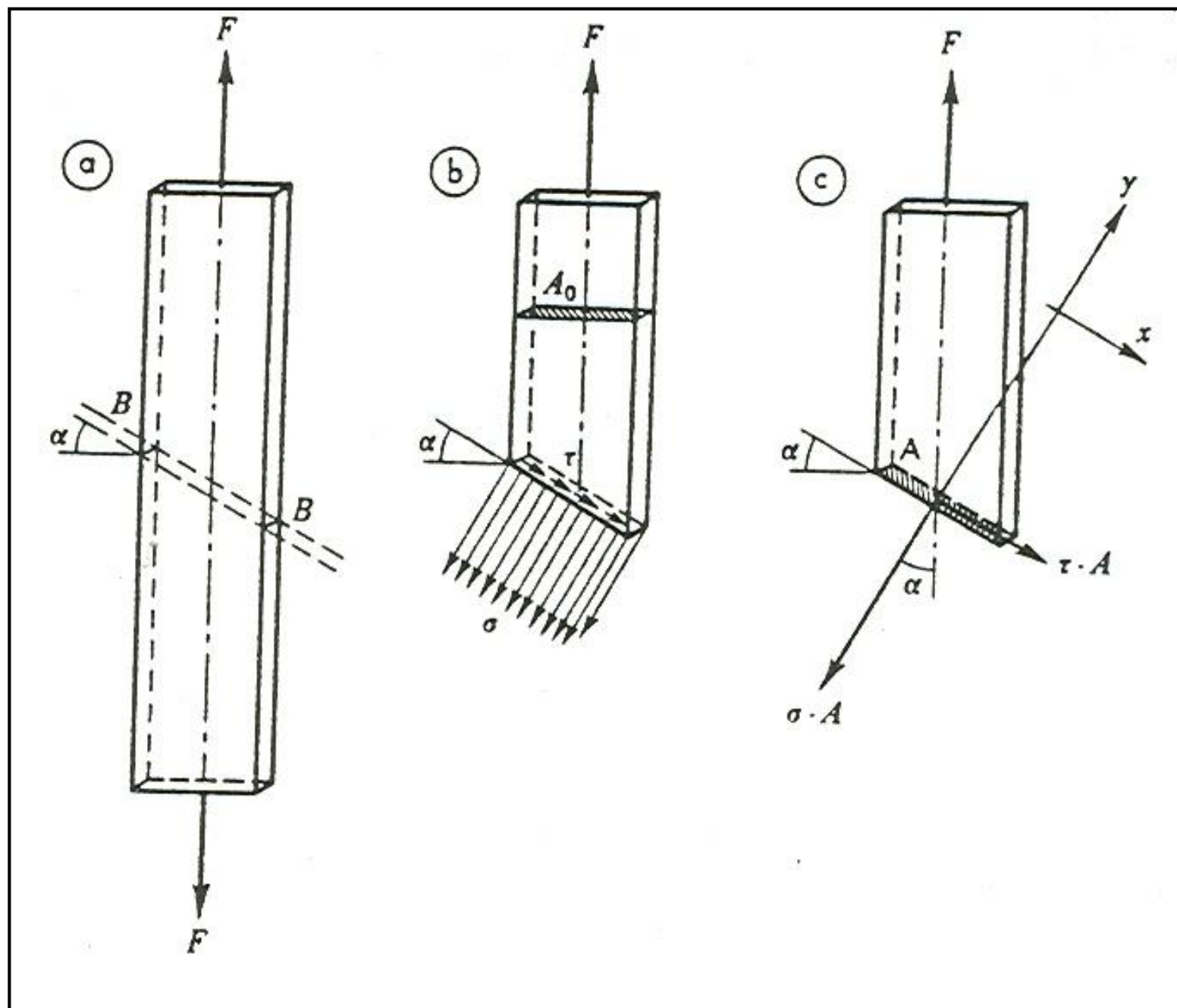
## تجزیه نیروی $F$ در دو راستای محور $x$ و $y$ :

اگر نیرو عمود بر سطح نباشد، آن را به مولفه هایش تجزیه می نماییم.  
هریک از نیروهای تجزیه شده گویای نیروی محوری  $F_n$  و نیروی عرضی  $F_t$  می باشند.

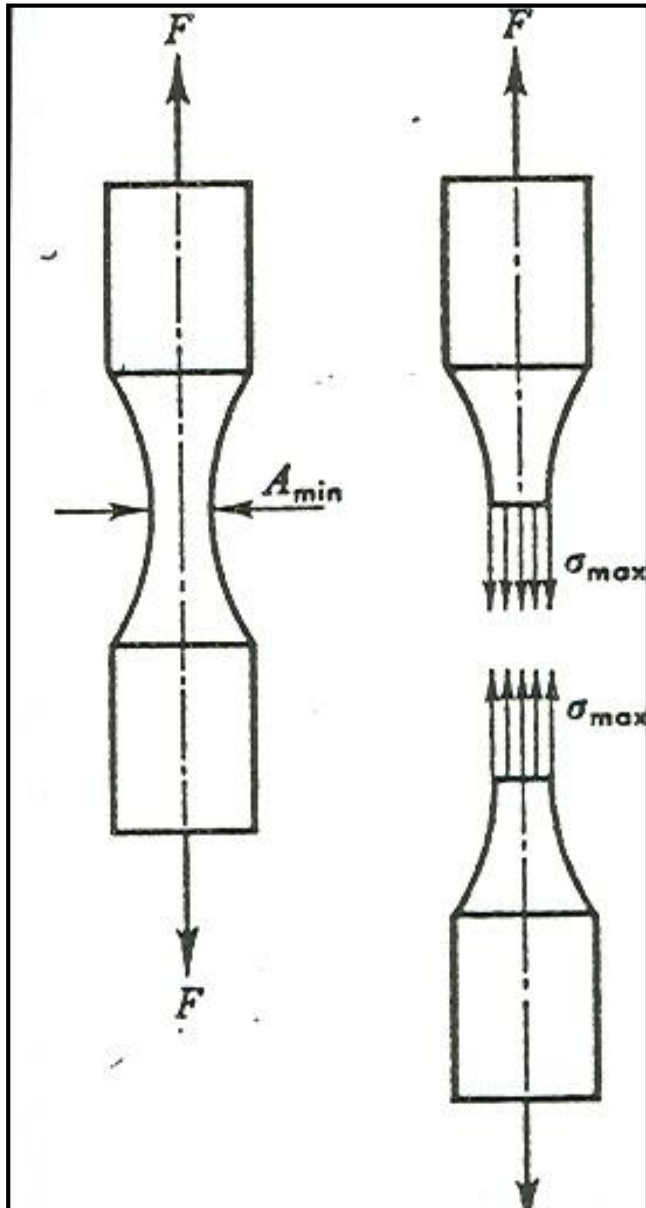


$F_n$  نیروی محوری و عمود بر سطح مقطع جسم، تنش محوری  $\sigma$  را می دهد.

$F_t$  نیروی موجود در سطح مقطع جسم که باعث تنش برشی (سایشی)  $\tau$  می گردد.



آثار تنش محوری (گلویی شدن قطعه) :



$$\sigma_{max} = \frac{F}{A_{min}}$$

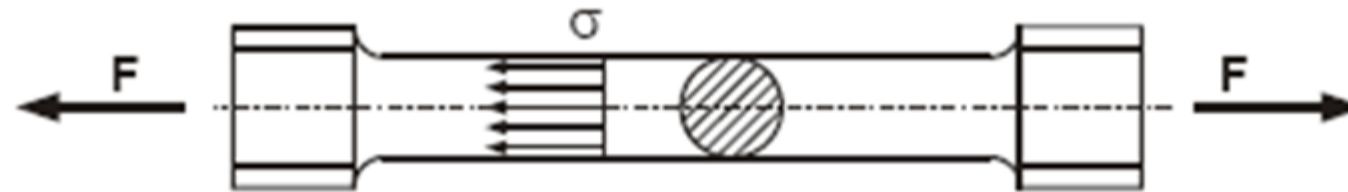
$$\left[ \frac{N}{mm^2} \text{ or } \frac{N}{cm^2} \right]$$

## کرنش عمودی

کرنش عمودی در یک میله تحت بارگذاری محوری، با تغییر شکل در طول واحد آن میله تعریف می شود. (بدون بعد می باشد).

L طول نهایی قطعه

L<sub>0</sub> طول اولیه قطعه



$$\Delta L = L - L_0 \text{ / mm}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \text{ / \%}$$

$$\sigma = E * \epsilon$$

E ضریب تناسب است که به ضریب ارتجاعی نیز معروف است که بستگی به جنس مواد دارد.

این نسبت برای تغییرات در راستای نیرو می باشد.

## تغییرات در راستای عمود بر نیروی محوری (ضریب پواسون):

---

$$\Delta l = l - l_0 \quad [\text{mm}]$$

ازدیاد طول میله کششی:

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0} \quad [\%]$$

انبساط طولی:

$$\varepsilon_q = \frac{\Delta d}{d_0} \quad [\%]$$

انبساط عرضی:

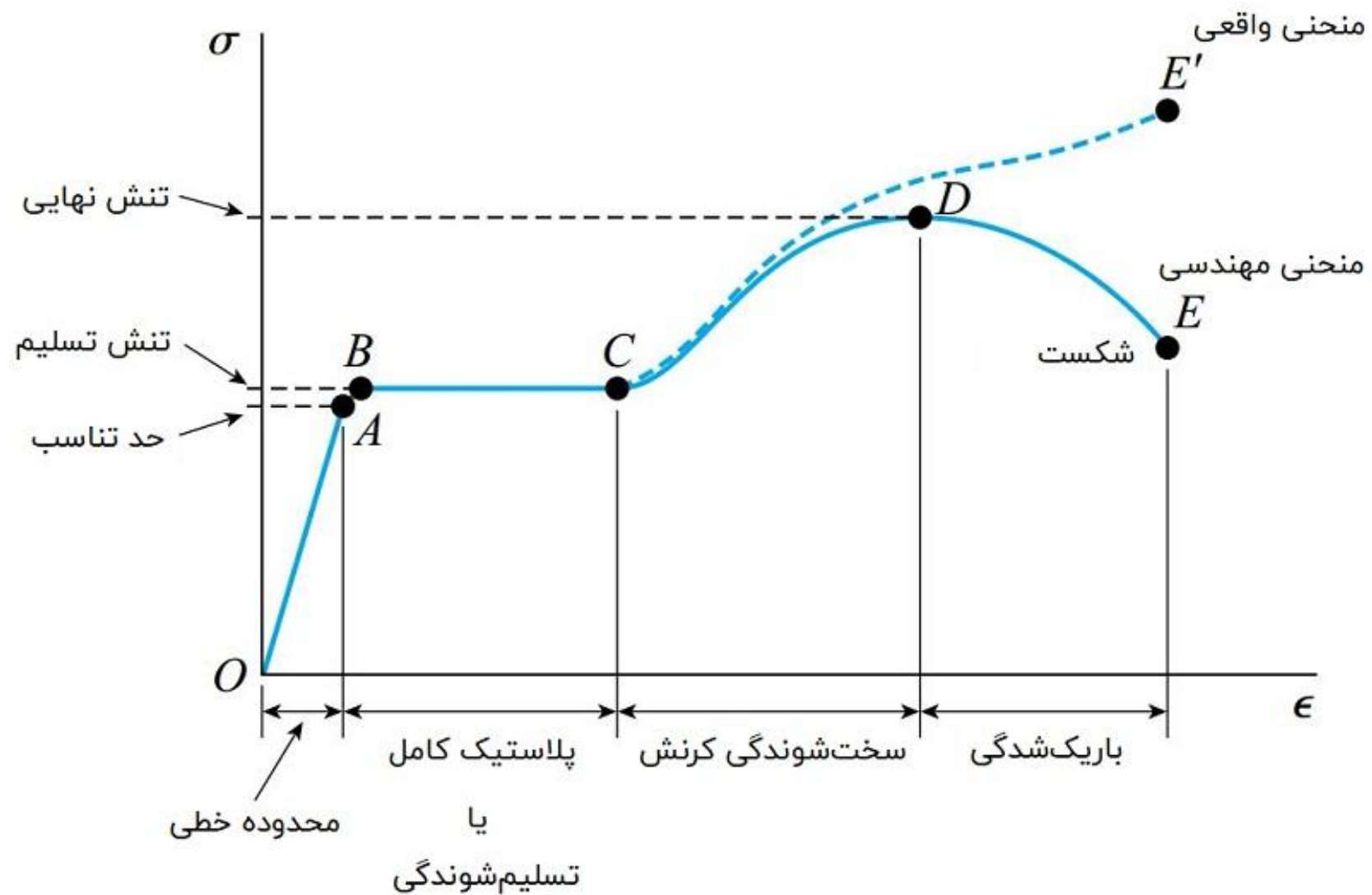
$$\nu = \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l}$$

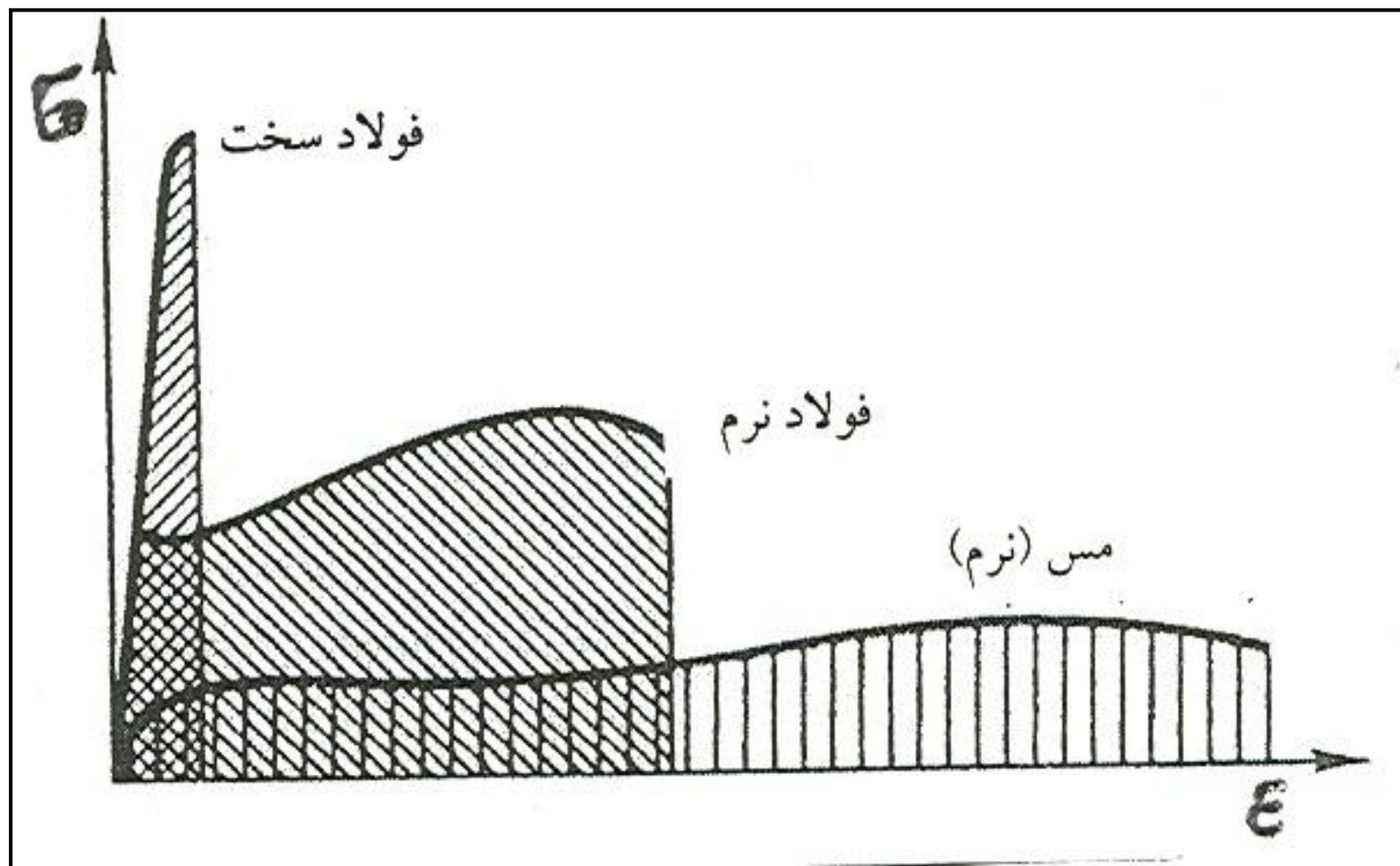
ضریب انبساط عرضی (پواسون):

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma$$

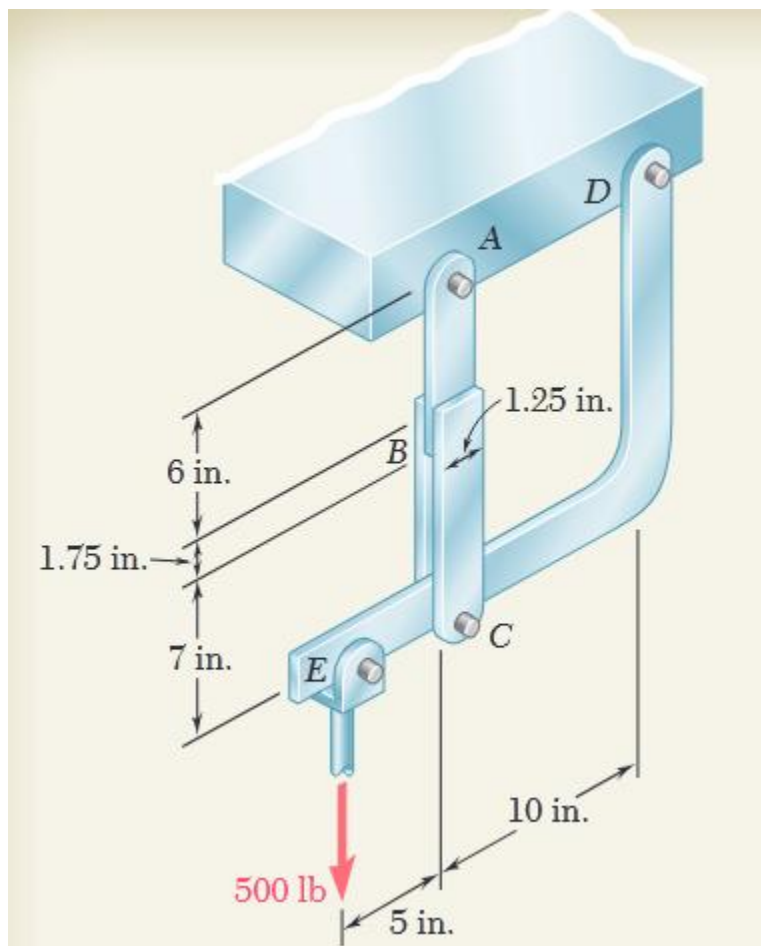
$$\varepsilon_q = -\frac{\nu}{E} \sigma$$







## مثال ۱:



در شکل روبرو ضخامت قطعه بالایی بازوی ABC برابر  $\frac{3}{8}$  اینچ و ضخامت مابقی قسمت ها  $\frac{1}{4}$  اینچ است.

قطعات در B به هم چسبانده شده اند.

قطر پین A برابر  $\frac{3}{8}$  اینچ است و قطر پین C برابر  $\frac{1}{4}$  اینچ است.

موارد زیر را تعیین نمایید:

الف) تنش برشی در پین A

ب) تنش برشی در پین C

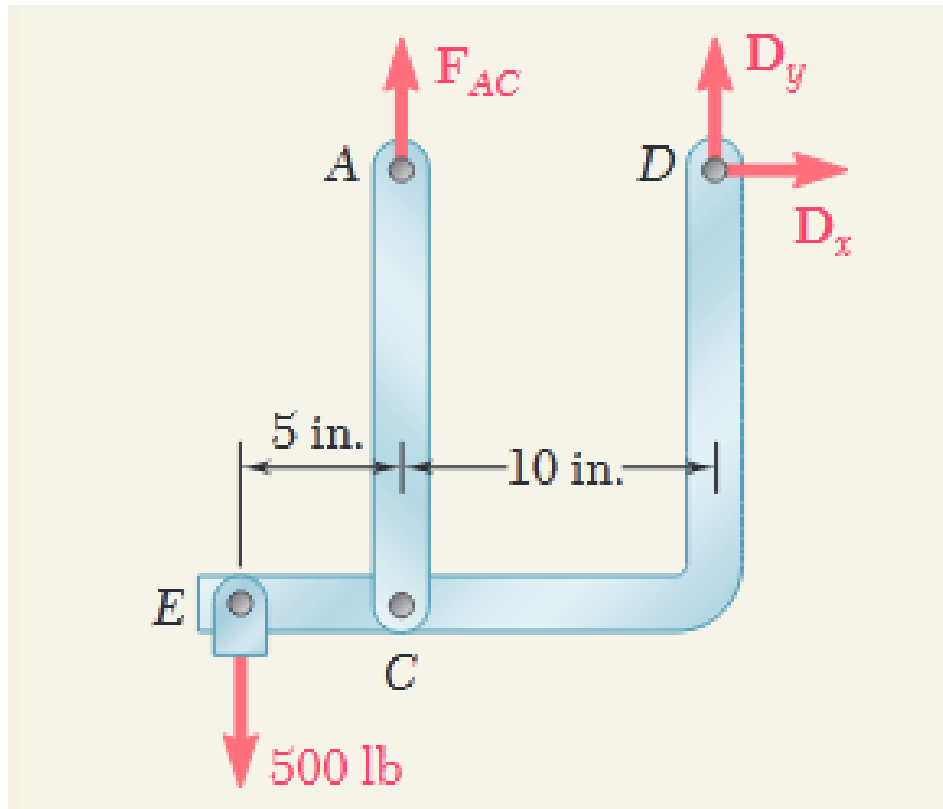
ج) بزرگترین تنش محوری در اتصال ABC

د) تنش برشی میانگین در سطح B

ه) تنش در بازو در نقطه C

## حل مثال ۱:

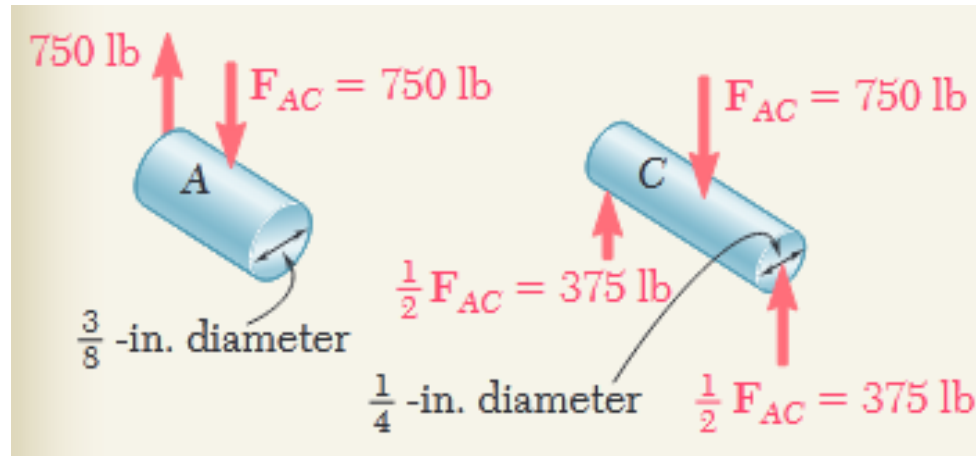
دیاگرام آزاد بصورت روبرو می باشد:  
چون عضو ABC دو نیرویی است واکنش در A به صورت عمودی است.



$$+\circlearrowleft \sum M_D = 0: \quad (500 \text{ lb})(15 \text{ in.}) - F_{AC}(10 \text{ in.}) = 0$$
$$F_{AC} = +750 \text{ lb} \quad F_{AC} = 750 \text{ lb} \quad \text{tension}$$

الف) تنش برشی در پین A

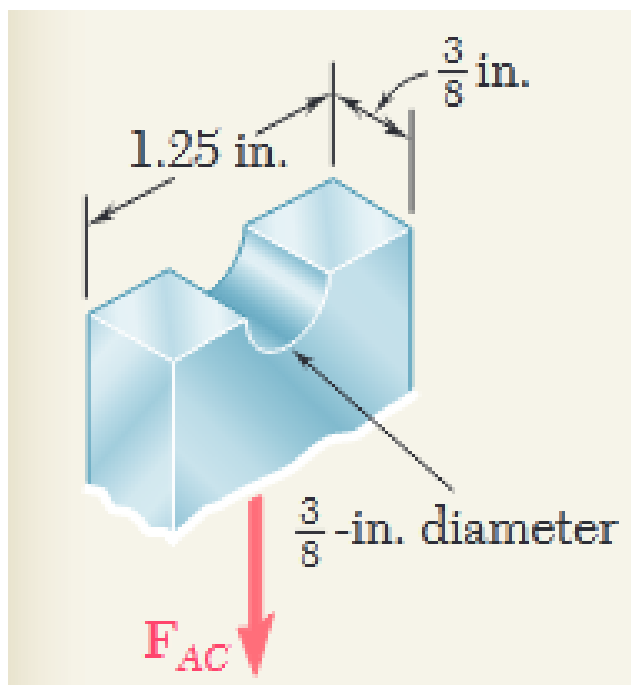
$$\tau_A = \frac{F_{AC}}{A} = \frac{750 \text{ lb}}{\frac{1}{4}\pi(0.375 \text{ in.})^2} \quad \tau_A = 6790 \text{ psi}$$



ب) تنش برشی در پین C  
با توجه به اینکه اتصال دوبر می باشد.

$$\tau_C = \frac{\frac{1}{2}F_{AC}}{A} = \frac{375 \text{ lb}}{\frac{1}{4}\pi(0.25 \text{ in.})^2} \quad \tau_C = 7640 \text{ psi}$$

ج) بزرگترین تنش محوری در اتصال ABC  
بزرگترین تنش در کمترین سطح مقطع اتفاق می افتد. که این سطح مقطع در نقطه A است که سوراخی با قطر  $\frac{3}{8}$  اینچ وجود دارد.



$$\sigma_A = \frac{F_{AC}}{A_{\text{net}}} = \frac{750 \text{ lb}}{(\frac{3}{8} \text{ in.})(1.25 \text{ in.} - 0.375 \text{ in.})} = \frac{750 \text{ lb}}{0.328 \text{ in}^2} \quad \sigma_A = 2290 \text{ psi} \quad \blacktriangleleft$$

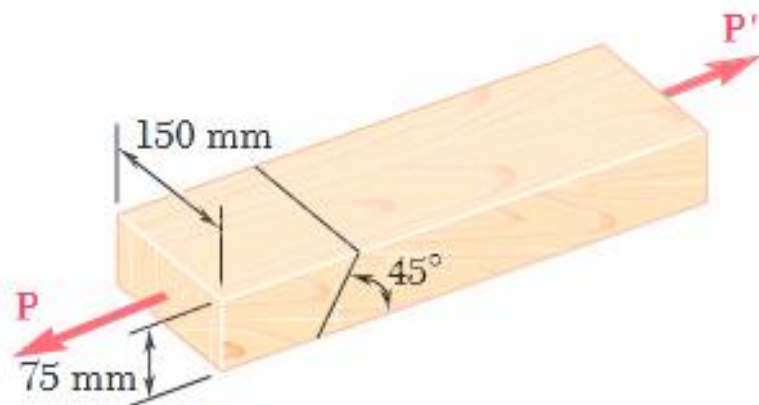
## تمرین ۱:

---

قسمت د) و ه) مثال ۱ را بصورت تمرین حل نمایید.

## تمرین ۲:

دو قطعه چوبی از محل نشان داده شده با زاویه ۴۵ درجه به هم چسبانده شده اند، و تحت بار محوری ۱۲ کیلونیوتن قرار دارند. تنش محوری و برشی را در این مقطع محاسبه نمایید.





## آزمایش: ترسیم نمودار تنش – کرنش یا نمودار قانون هوک $\sigma - \epsilon$

هدف:

تعیین رفتار مواد تحت بار محوری کششی و بدست آوردن شاخص های مواد که به راحتی برای سایر انواع بار ها قابل انتقال هستند.  
روند آزمایش:

۱ – آماده سازی نمونه (پراب)

بخاطر تاثیر شکل نمونه بر نتایج آزمایشات فرم و ابعاد آن استاندارد می باشد:

-فرم (گرد و یا تخت)

- نسبت طول به قطر آن برای نمونه های کوتاه ۵ و برای نمونه های بلند ۱۰ می باشد.

- کَلگی سیلندر ها (صاف یا رزوه ای)

- سطح روئین نمونه

۲ – نمونه را بطور آهسته و بدون برگشت تا مرحله شکست کشیده و روند نیرو و ازدیاد طول ثبت و رسم می گردد.

