

# استاتیک

## فهرست

فصل 1	مقدمه.....	1
فصل 2	استاتیک نقاط مادی.....	4
فصل 3	اجسام صلب سیستم نیروهای معادل.....	17
فصل 4	تعادل اجسام صلب.....	44
فصل 5	نیروهای گسترده (مرکز سطح یا مرکز خط یا منحنی).....	59
فصل 6	تحلیل سازه‌ها.....	89
فصل 7	کابل‌ها و تیرها.....	114
فصل 8	اصطکاک.....	148
فصل 9	نیروهای گسترده: (گشتاور لختی).....	162
فصل 10	کار مجازی.....	181

مطالعه مکانیک مقدماتی بر شش اصل بنیادین است که همه مبنای تجربی دارند:

- **قانون متوازی الاضلاع برای جمع بستن نیروها:** به جای دو نیرو که به ذره اثر میکنند یک تک نیرو به نام برابند قرار داد که از رسم قطر متوازی الاضلاعی بدست می آید که دو ضلع مجاورش همان دو نیروی معلومند.
- **اصل انتقال پذیری:** اگر نیروی وارد بر نقطه ای از یک جسم صلب را بوسیله نیروی دیگری که با نیروی اول از نظر مقدار و جهت برابر، ولی نقطه اثر آن متفاوت است جایگزین کنند، وضعیت تعادل یا حرکت جسم تغییر نخواهد کرد، به شرط آنکه دو نیرو یک خط اثر داشته باشند.

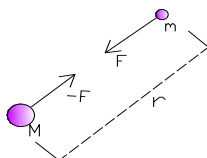
سه قانون بنیادین نیوتن:

- **قانون اول:** اگر برابند نیروهایی که به ذره وارد می شود صفر باشد، ذره در حالت سکون می ماند و اگر در حرکت باشد به حرکت یکنواختش بر روی خط راست ادامه میدهد.

- **قانون دوم:** اگر برابند نیروهایی که به ذره وارد می شود صفر نباشد، ذره در امتداد این برابند و متناسب با بزرگی آن شتاب می گیرد.  $F=ma$   
که  $a, m, F$  به ترتیب نماینده برابند نیروهای وارد بر ذره، جرم ذره و شتاب ذره اند که با یکاهای سیستم سازگار بیان میشوند.

- **قانون سوم:** نیروهای عمل و عکس العمل میان دو جسم که باهم تماس دارند هم اندازه اند، در یک امتدادند و در خلاف جهت هم اثر می کنند.

- **قانون گرانش نیوتن:** دو ذره به جرم های  $m, M$  یکدیگر را با نیروی مساوی و مختلف جهت  $(F, -F)$  جذب میکنند



$r$  فاصله دو ذره،  $G$  ثابت گرانش

یک مورد خاص و بسیار مهم این قانون، نیروی جاذبه زمین بر روی یک ذره واقع بر سطح آن است. در این مورد نیروی  $F$  را که زمین به ذره وارد میکند، به عنوان وزن آن ( $W$ ) تعریف میکنند. اگر  $m$  را جرم زمین  $m$  را جرم ذره و  $r$  را مساوی شعاع زمین ( $R$ ) بگیریم، و ثابت  $g = \frac{GM}{R^2}$  را وارد کنیم مقدار  $W$  وزن یک ذره به جرم  $m$  را می شود به این صورت بیان کرد:

$$W = mg \quad \text{یا} \quad g = 9.81 \text{ m/s}^2 \quad \text{یا} \quad 32.2 \text{ ft/s}^2$$

## سیستم یکا ها

یکای اصلی طول، جرم، زمان است که آنها را به ترتیب متر ( $m$ )، کیلوگرم ( $kg$ )، و ثانیه ( $s$ ) مینامند.

جدول ۲.۱ یکاهای اصلی SI که در مکانیک به کار می روند			
کمیت	یکای	نماد	فرمول
شتاب	متر بر مجذور ثانیه	...	$m/s^2$
زاویه	رادیان	rad	*
شتاب زاویه ای	رادیان بر مجذور ثانیه	...	$rad/s^2$
سرعت زاویه ای	رادیان بر ثانیه	...	$rad/s$
سطح	مترمربع	...	$m^2$
چگالی	کیلوگرم بر مترمکعب	...	$kg/m^3$
انرژی	ژول	J	$N.m$
نیرو	نیوتون	N	$kg.m/s^2$
بسامد	هرتز	Hz	$s^{-1}$
ضربه	نیوتون - ثانیه	...	$kg.m/s$
طول	متر	m	**
جرم	کیلوگرم	kg	**
گشتاور نیرو	نیوتون - متر	...	$N.m$
توان	وات	W	$J/s$
فشار	پاسکال	Pa	$N/m^2$
تنش	پاسکال	Pa	$N/m^2$
زمان	ثانیه	s	**
سرعت	متر بر ثانیه	...	$m/s$
حجم			
جامدات	مترمکعب	...	$m^3$
مایعات	لیتر	L	$10^{-3} m^3$
کار	ژول	J	$N.m$

## تبدیل یکاها

جدول ۳.۱ یکاهای معمول U.S. و معادل آنها در SI

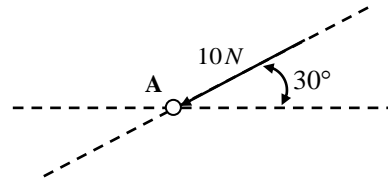
مقدار	یکای معمول در U.S.	معادل در SI
شتاب	ft/s <sup>2</sup>	۰٫۳۰۴۸ m/s <sup>2</sup>
	in./s <sup>2</sup>	۰٫۰۲۵۴ m/s <sup>2</sup>
مساحت	ft <sup>2</sup>	۰٫۰۹۲۹ m <sup>2</sup>
	in <sup>2</sup>	۶۴۵٫۲ mm <sup>2</sup>
انرژی	ft.lb	۱٫۳۵۶ J
نیرو	kip	۴٫۴۴۸ kN
	lb	۴٫۴۴۸ N
	oz	۰٫۲۷۸۰ N
ضربه	lb.s	۴٫۴۴۸ N.s
طول	ft	۰٫۳۰۴۸ m
	in	۲۵٫۴۰ mm
	mi	۱٫۶۰۹ km
جرم	oz mass	۲۸٫۳۵ g
	lb mass	۰٫۴۵۳۶ kg
	slug	۱۴٫۵۹ kg
	ton	۹۰۷٫۲ kg
گشتاور یک نیرو	lb.ft	۱٫۳۵۶ N.m
	lb.in	۰٫۱۱۳۰ N.m
گشتاور لختی		
یک سطح	in <sup>4</sup>	۰٫۴۱۶۲×۱۰ <sup>-۶</sup> mm <sup>4</sup>
یک جرم	lb.ft.s <sup>2</sup>	۱٫۳۵۶ kg.m <sup>2</sup>
مقدار اندازه حرکت	lb.s	۴٫۴۴۸ kg.m/s
توان	ft.lb/s	۱٫۳۵۶ W
	hp	۷۴۵٫۷ W
فشار یا تنش	lb/ft <sup>2</sup>	۴۷٫۸۸ Pa
	lb/in <sup>2</sup> (psi)	۶٫۸۹۵ kPa
سرعت	ft/s	۰٫۳۰۴۸ m/s
	in/s	۰٫۰۲۵۴ m/s
	mi/h (mph)	۰٫۴۴۷۰ m/s
	mi/h (mph)	۱٫۶۰۹ km/h
حجم	ft <sup>3</sup>	۰٫۰۲۸۳۲ m <sup>3</sup>
	in <sup>3</sup>	۱۶٫۳۹ cm <sup>3</sup>
مایعات	gal	۳٫۷۸۵ L
	qt	۰٫۹۴۶۴ L
کار	ft.lb	۱٫۳۵۶ J

فصل دوم :

# استاتیک نقاط مادی

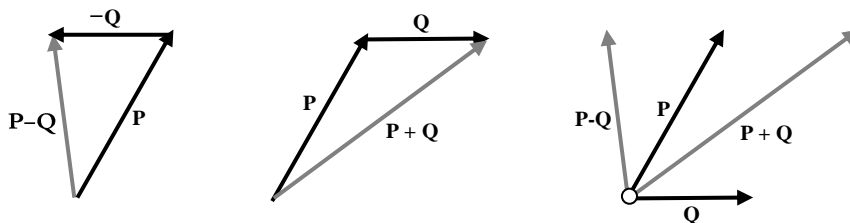
## استاتیک نقاط مادی (ذرات):

عملکرد یک جسم را روی جسم دیگر نیرو می نامند که توسط نقطه وارده ، مقدار و جهت آن مشخص می شود. نیرو را توسط یک بردار نشان می دهند . یک بردار دارای مقدار ، خط اثر و جهتی مشخص است که آن را با یک پیکان نشان می دهند .

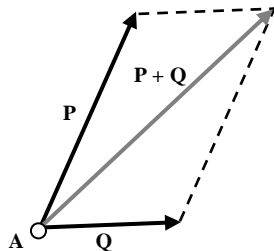


برای تجزیه و تحلیل یک جسم اهمیتی ندارد که نیرو به کدام نقطه ی آن وارد می شود تنها باید در امتداد خط اثر باشد. البته این موضوع تنها در مورد تجزیه و تحلیل نیروهای خارجی صدق می کند و برای نیروهای داخلی نقطه اثر نیرو باید دقیقاً مشخص شده باشد.

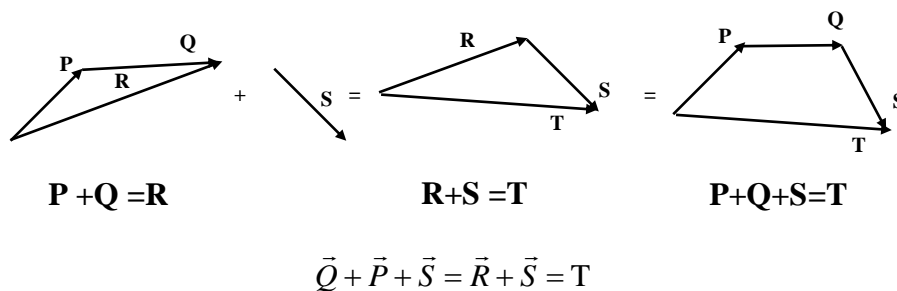
### جمع بردارها به روش مثلث :



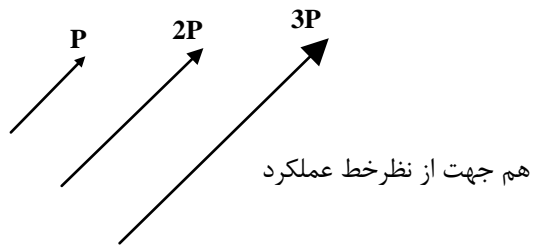
### جمع بردارها به روش متوازی الاضلاع :



برای جمع سه بردار  $Q$  و  $P$  و  $S$  داریم :

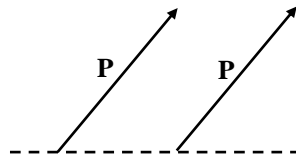


ضرب یک بردار در یک عدد :

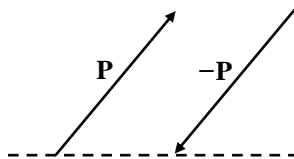


اگر  $P \parallel F$  آنگاه  $\vec{P} = r\vec{F}$

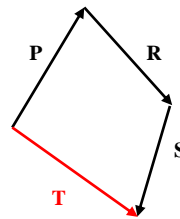
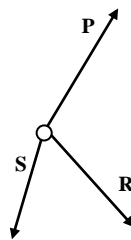
$\vec{P} = \vec{F}$  اگر و فقط اگر  $P \parallel F$  و  $r=1$



P قرینه Q است اگر و فقط اگر  $P \parallel F$  و  $r=-1$

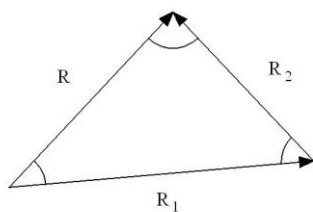


باید چندین نیرو که از یک نقطه عبور می کنند :



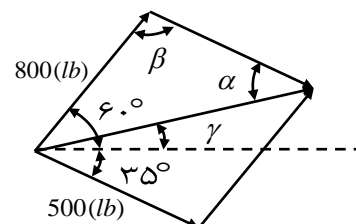
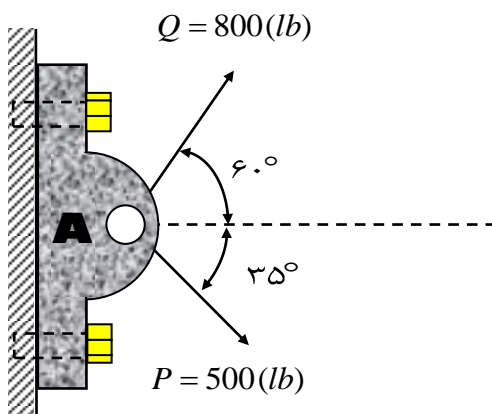
$$\vec{R} + \vec{P} + \vec{S} = \vec{T}$$

تجزیه نیرو به مولفه‌ها (عکس عمل جمع دو بردار) :



$$\vec{R} = \vec{R}_1 + \vec{R}_2$$

مثال: مطلوب است برابند دو نیروی  $\vec{P}$ ,  $\vec{Q}$  و زاویه آن با سطح افق :



با استفاده از قانون کوسینوسها :

$$R^2 = P^2 + Q^2 - 2PQ\cos\theta \quad (\beta = 85^\circ)$$

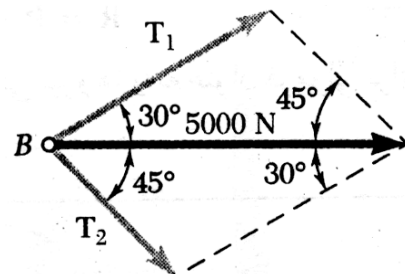
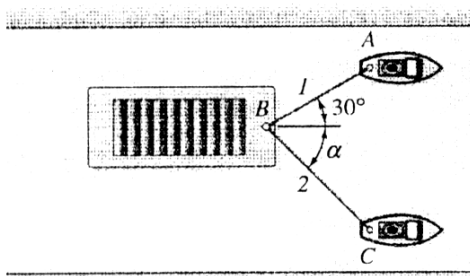
$$R = \sqrt{500^2 + 800^2 - 2 \times 500 \times 800 \times \cos 85} = 905.7 N$$

با استفاده از قانون سینوسها :

$$\frac{P}{\sin \alpha} = \frac{R}{\sin 85} \Rightarrow \frac{500}{\sin \alpha} = \frac{905.7}{\sin 85} \Rightarrow \alpha = 33.36$$

$$R = 905.7(N) \quad \gamma = 60 - 33.36 = 26.64^\circ \quad \text{زاویه با افق}$$

**مثال:** کشتی B توسط دو قایق A و C در حال حمل می‌باشد اگر برایند نیروهایی که کابل‌های 1 و 2 به کشتی B وارد می‌کنند برابر با 5000N باشد و در جهت مثبت X باشد مطلوب است:  
الف) نیروهای کششی به هر کابل وقتی که  $\alpha = 45^\circ$ .  
ب) مقدار زاویه  $\alpha$  به طوری که نیروی کششی در کابل 2 حداقل گردد.



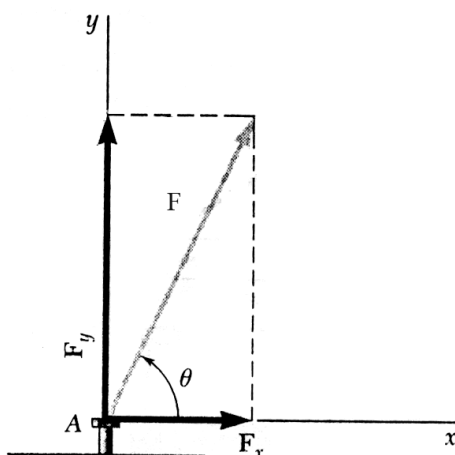
بوسیله قانون سینوسها و قانون متوازی الاضلاع می‌توان  $T_1$  و  $T_2$  را به دست آورد.

$$\frac{T_1}{\sin 45} = \frac{T_2}{\sin 30} = \frac{R}{\sin 105} \Rightarrow \begin{cases} T_1 = 3660(N) \\ T_2 = 2590(N) \end{cases} \quad R = 5000(N)$$

برای اینکه  $T_1$  Minimum باشد باید  $T_1 \perp T_2$  باشد :

$$\frac{T_1}{\sin 60} = \frac{T_2}{\sin 30} = \frac{R}{\sin 90} \Rightarrow \begin{cases} T_1 = 4330(N) \\ T_2 = 2500(N) \end{cases}$$

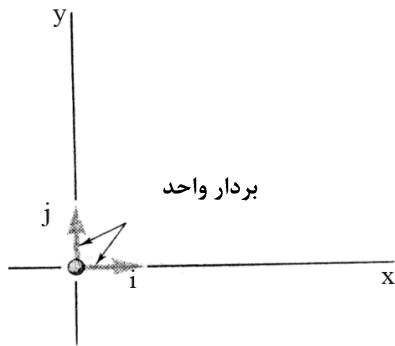
مولفه‌های متعامد (مستطیلی) یک بردار



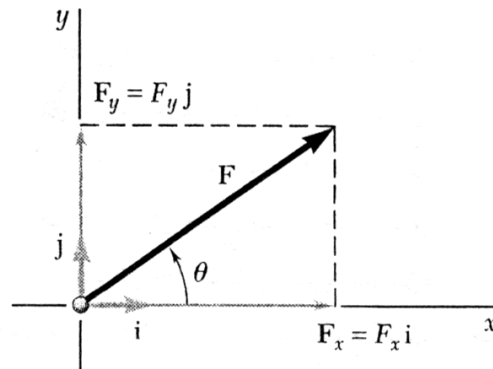
$$F_x = F \cos \theta$$

$$F_y = F \sin \theta$$

- بردار واحد برداری است که اندازه آن 1 واحد باشد.
- بردار واحد در جهت x را  $\vec{i}$  و در جهت y را  $\vec{j}$  می‌نامیم.



با توجه به ضرب بردارها خواهیم داشت:



$$\vec{F}_x = F_x \vec{i}$$

$$\vec{F}_y = F_y \vec{j}$$

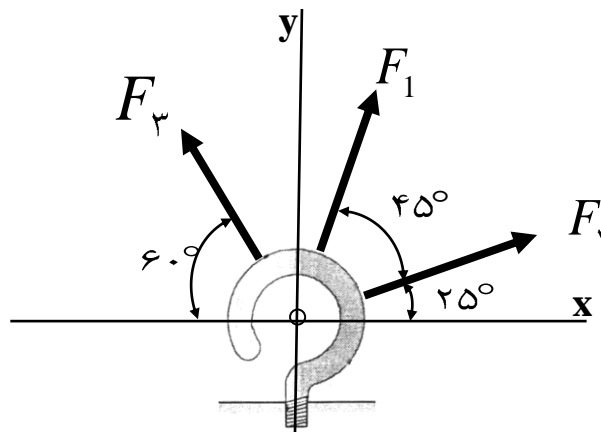
$$\vec{F} = \vec{F}_x + \vec{F}_y = F_x \vec{i} + F_y \vec{j}$$

$$F_x = F \cos \theta, \quad F_y = F \sin \theta$$

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

مثال: برابند نیروهای زیر را بیابید.

$$F_3 = 600(N), \quad F_2 = 350(N), \quad F_1 = 800(N)$$

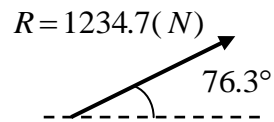


شکل 14.2

نیرو	مقدار	$F_x$	$F_y$
$F_1$	800	$800\cos 70$	$800\sin 70$
$F_2$	350	$350\cos 25$	$350\sin 25$
$F_3$	600	$-600\cos 60$	$600\cos 60$
$R = \sum F_i$		+291 (N)	1200 (N)

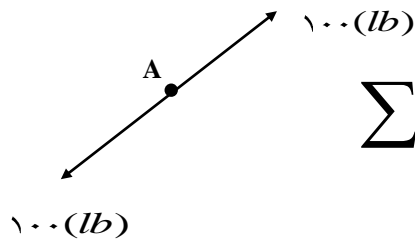
$$R = 291\vec{i} + 1200\vec{j}$$

$$\theta = \text{Arc tan} \frac{1200}{291} = 76.3^\circ$$



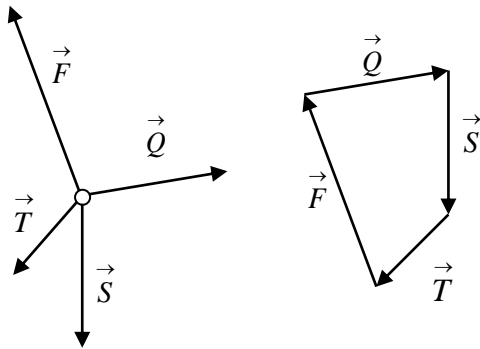
### تعدادل یک ذره (نقطه)

اگر برآیند نیروهایی که روی یک جسم و یا یک ذره اثر می کنند برابر با صفر باشد ، آنگاه آن جسم در حال تعدادل است.



$$\sum \vec{F} = 0 \Rightarrow$$

نقطه A در تعدادل است



$$\vec{Q} + \vec{S} + \vec{T} + \vec{F} = 0$$

اگر نیروها در صفحه xy باشند.

$$\oplus \rightarrow \sum F_x = 0$$

$$\oplus \uparrow \sum F_y = 0$$

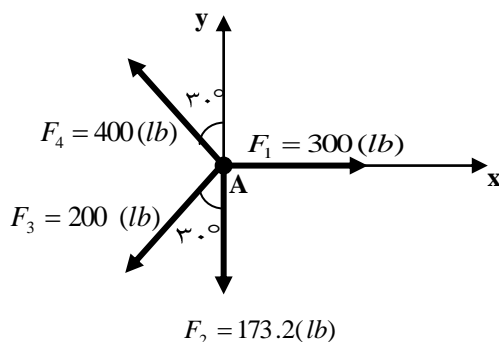
اگر نیروها در فضای xyz باشد.

$$\oplus \rightarrow \sum F_x = 0$$

$$\oplus \uparrow \sum F_y = 0$$

$$\oplus \downarrow \sum F_z = 0$$

مثال: آیا نقطه A در حال تعدادل است؟

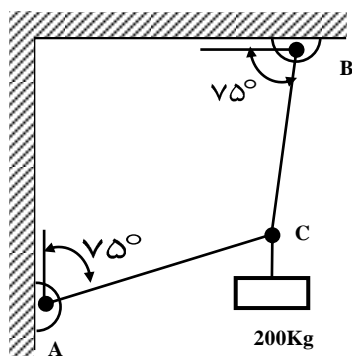


$$\sum \vec{F} = 0 \Rightarrow \sum F_x = 0, \sum F_y = 0$$

$$R_x = \sum F_x = 0: F_1 - F_3 \sin 30 - F_4 \sin 30 = 300 - 200 \sin 30 - 400 \sin 30 = 0$$

$$R_y = \sum F_y = 0: F_4 \cos 30 - F_3 \cos 30 - F_2 = 400 \cos 30 - 200 \cos 30 - 173 = 0$$

چون  $R_x$  و  $R_y$  هر دو صفر می‌باشند پس نقطه A در تعادل است.



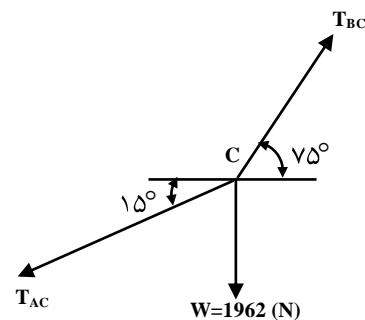
**مثال:** کشش در طنابها را بدست آورید.  
(W وزن جسم است)

در مرحله اول باید همواره دیاگرام آزاد نیروها را رسم کنیم.

$$W = mg = 200 \cdot (9.81) = 1962 (N)$$

$$+\uparrow \sum F_y = 0 \Rightarrow T_{AC} \sin \alpha + T_{BC} \sin \beta - W = 0$$

$$\rightarrow \sum F_x = 0 \Rightarrow -T_{AC} \cos \alpha + T_{BC} \cos \beta = 0$$



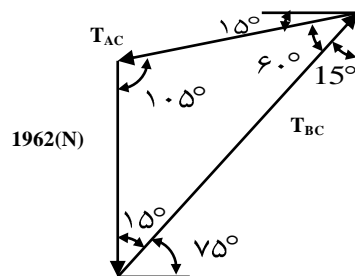
$$W = 1962 (N)$$

$$T_{BC} \sin 15 - T_{AC} \cos 15 = 0$$

$$T_{BC} \cos 15 - T_{AC} \sin 15 - W = 0$$

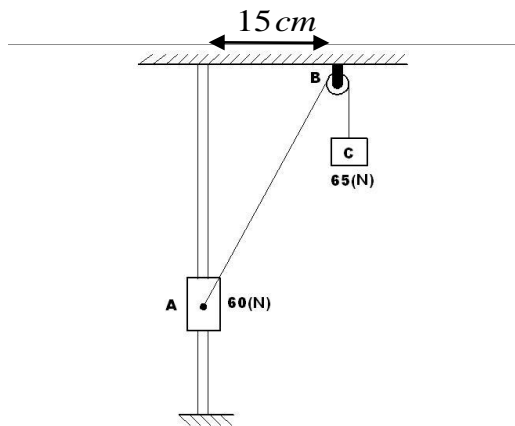
$$\Rightarrow T_{AC} = 586.3 (N)$$

$$\Rightarrow T_{BC} = 2188 (N)$$

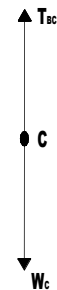


مثال: یک طوقه به وزن  $60(N)$  می تواند روی یک میله بدون اصطکاک حرکت کند و به یک وزنه  $65(N)$  متصل باشد.  $h$  را طوری تنظیم کنید که سیستم در حال تعادل باشد.  $W_C = 65(N)$  ,  $W_A = 60(N)$

حل:  $AB = \sqrt{(15)^2 + h^2}$



تعادل وزنه C:

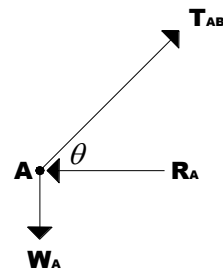


$$\sum \vec{F} = 0 \Rightarrow \sum F_x = 0, \sum F_y = 0$$

$$+ \uparrow \sum F_y = 0 \Rightarrow T_{BC} - W_C = 0 \Rightarrow T_{BC} = W_C = 65(N)$$

تعادل وزنه A :

$$T_{AB} = 65(N)$$



$$\sum \vec{F} = 0 \Rightarrow \sum F_x = 0, \sum F_y = 0$$

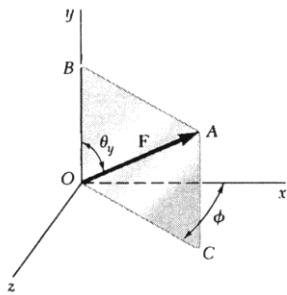
$$\rightarrow \sum F_x = 0 \Rightarrow T_{AB} \cos \theta - R_A = 0$$

$$+ \uparrow \sum F_y = 0 \Rightarrow T_{AB} \sin \theta - W_A = 0$$

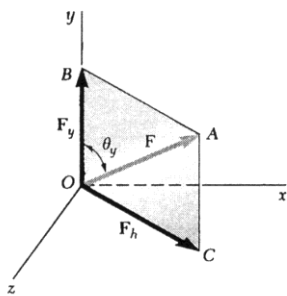
$$\Rightarrow \sin \theta = \frac{W}{T} \Rightarrow h = 15 * \tan \theta = 36(cm)$$

## نیروها در فضای سه بعدی:

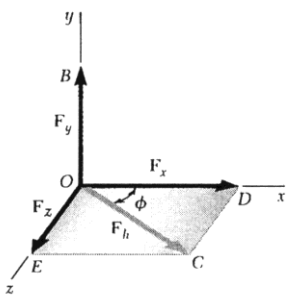
مولفه های متعامد :



(الف)



(ب)



(ج)

$$\vec{F} = F_x \vec{i} + F_y \vec{j} + F_z \vec{k}$$

$$\vec{F}_x = |\vec{F}_x| = |\vec{F}| \cos \theta_x$$

$$\vec{F}_y = |\vec{F}_y| = |\vec{F}| \cos \theta_y$$

$$\vec{F}_z = |\vec{F}_z| = |\vec{F}| \cos \theta_z$$

$$\vec{F}_x = F_x \vec{i}, \vec{F}_y = F_y \vec{j}, \vec{F}_z = F_z \vec{k}$$

$$\vec{F} = F (\cos \theta_x \vec{i} + \cos \theta_y \vec{j} + \cos \theta_z \vec{k})$$

$$\vec{F} = F \lambda \quad (\lambda = \cos \theta_x \vec{i} + \cos \theta_y \vec{j} + \cos \theta_z \vec{k})$$

$$\vec{\lambda} = \lambda_x \vec{i} + \lambda_y \vec{j} + \lambda_z \vec{k}$$

$$\lambda_x = \lambda \cos \theta_x$$

$$\lambda_y = \lambda \cos \theta_y$$

$$\lambda_z = \lambda \cos \theta_z$$

$$\lambda_x = \lambda \cos \theta_x, \lambda_y = \lambda \cos \theta_y, \lambda_z = \lambda \cos \theta_z$$

$$\cos^2 \theta_x + \cos^2 \theta_y + \cos^2 \theta_z = 1$$

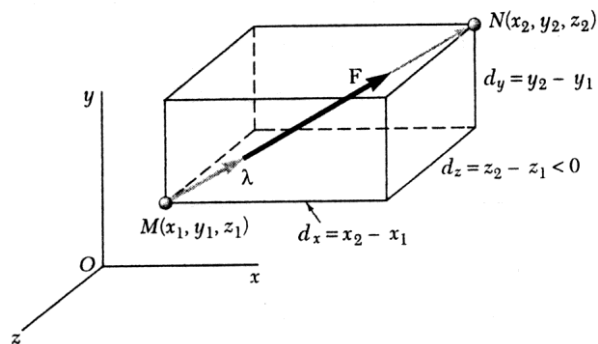
$$\vec{F} = F_y + F_h, \quad F_h = F_z + F_x$$

$$F_y = F \cos \theta_y, \quad F_h = F \sin \theta_y$$

$$F_x = F_h \cos \phi = F \sin \theta_y \cos \phi$$

$$F_z = F_h \sin \phi = F \sin \theta_y \sin \phi$$

نیروی که توسط مقدار و دو نقطه روی خط آن مشخص می شود



$$\overrightarrow{MN} = d_x \vec{i} + d_y \vec{j} + d_z \vec{k}$$

$$\left. \begin{aligned} d_x &= x_2 - x_1 \\ d_y &= y_2 - y_1 \\ d_z &= z_2 - z_1 \end{aligned} \right\} d = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2}$$

$$\vec{\lambda} = \frac{\overrightarrow{MN}}{MN} = \frac{1}{d} (d_x \vec{i} + d_y \vec{j} + d_z \vec{k})$$

$\vec{\lambda}$  بردار واحد در جهت بردار MN می باشد

$$\vec{F} = F \vec{\lambda} = \frac{F}{d} (d_x \vec{i} + d_y \vec{j} + d_z \vec{k})$$

$$F_x = \frac{F d_x}{d}, \quad F_y = \frac{F d_y}{d}, \quad F_z = \frac{F d_z}{d}$$

جمع نیروهایی که از یک نقطه در فضا می گذرند

$$\vec{R} = F_1 + F_2 + F_3 + \dots$$

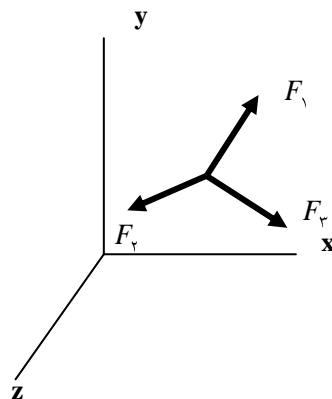
$$\vec{R} = R_x \vec{i} + R_y \vec{j} + R_z \vec{k}$$

$$R_x = (\sum F_x)$$

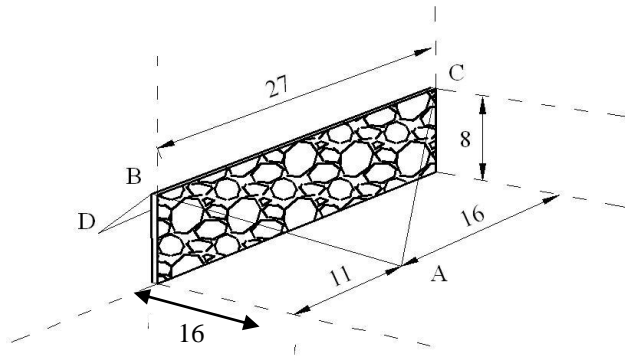
$$R_y = (\sum F_y)$$

$$R_z = (\sum F_z)$$

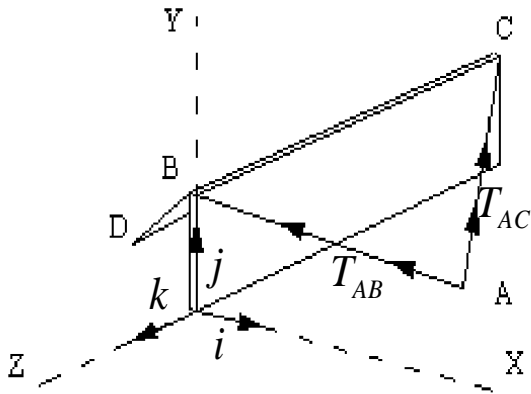
$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}$$



**مثال:** یک دیوار بتنی توسط 4 طناب نگه داشته شده است. اگر نیروی کششی در طناب AB برابر  $840(N)$  باشد و نیروی کششی در طناب AC برابر  $1200(N)$  باشد به دست آورید مقدار نیروی برآیندی که توسط طنابهای AB و AC بر نقطه A وارد می شود.



$$\begin{aligned}\vec{R}_A &= \vec{T}_{AB} + \vec{T}_{AC} \\ \vec{R}_A &= T_{AB} \vec{\lambda}_{AB} + T_{AC} \vec{\lambda}_{AC} \\ \vec{\lambda}_{AC} &= \frac{-16\vec{i} + 8\vec{j} - 16\vec{k}}{24} \\ \vec{\lambda}_{AB} &= \frac{-16\vec{i} + 8\vec{j} + 11\vec{k}}{21} \\ \Rightarrow \vec{T}_{AC} &= \frac{1200}{24}(-16\vec{i} + 8\vec{j} - 16\vec{k})\end{aligned}$$



$$\Rightarrow \vec{T}_{AB} = \frac{840}{21}(-16\vec{i} + 8\vec{j} + 11\vec{k})$$

$$\vec{R}_A = \vec{T}_{AB} + \vec{T}_{AC} = -1440\vec{i} + 720\vec{j} - 360\vec{k} (N)$$

$$R_A = \sqrt{(-1440)^2 + (720)^2 + (-360)^2} = 1650 (N)$$

$$\sum F = 0$$

$$\sum F_x = 0, \sum F_y = 0$$

$$\cos \theta_x = \frac{R_x}{R} = \frac{-1440}{1650} \Rightarrow \theta_x = 150/8^\circ$$

$$\cos \theta_y = \frac{R_y}{R} = \frac{720}{1650} \Rightarrow \theta_y = 64/1^\circ$$

$$\cos \theta_z = \frac{R_z}{R} = \frac{-360}{1650} \Rightarrow \theta_z = 102/6^\circ$$

تعادل یک نقطه در فضا:

تعادل در فضای دو بعدی:

$$\sum F_x = 0, \sum F_y = 0$$

تعادل در فضای سه بعدی:

$$\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum F_z = 0$$

مثال: مطلوب است وزن جسم مکعب مستطیل، اگر نیروی کششی در کابل AD برابر 924N باشد.

$$\sum \vec{F} = 0 \Rightarrow \vec{T}_{AB} + \vec{T}_{AC} + \vec{T}_{AD} + \vec{W} = 0$$

$$\vec{T}_{AB} = T_{AB} \vec{\lambda}_{AB}, \vec{T}_{AC} = T_{AC} \vec{\lambda}_{AC}, \vec{T}_{AD} = T_{AD} \vec{\lambda}_{AD}, \vec{W} = -W \vec{j}$$

$$\vec{\lambda}_{AB} = \frac{28\vec{i} + 45\vec{j}}{53}$$

$$\vec{\lambda}_{AC} = \frac{45\vec{j} - 24\vec{k}}{51}$$

$$\vec{\lambda}_{AD} = \frac{-26\vec{i} + 45\vec{j} + 18\vec{k}}{55}$$

$$\vec{T}_{AB} = \frac{T_{AB}}{53} (28\vec{i} + 45\vec{j})$$

$$\vec{T}_{AC} = \frac{T_{AC}}{51} (45\vec{j} - 24\vec{k})$$

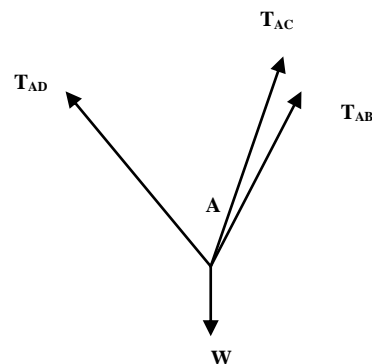
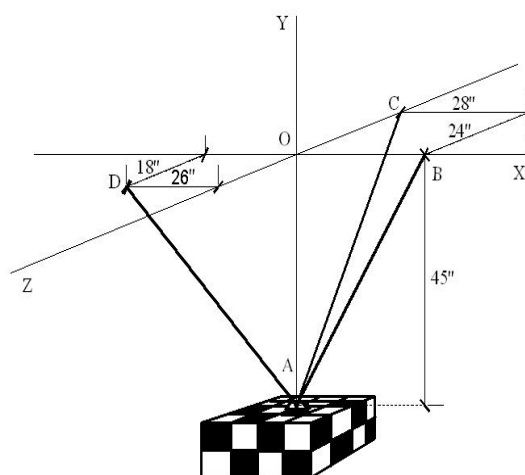
$$\vec{T}_{AD} = \frac{924}{55} (-26\vec{i} + 45\vec{j} + 18\vec{k})$$

$$\vec{W} = -W\vec{j}$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow \frac{28}{53} T_{AB} - \frac{924(26)}{55} = 0 \Rightarrow T_{AB} = 826.8$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow \frac{45}{53} T_{AB} + \frac{45}{51} T_{AC} + \frac{924(45)}{55} - W = 0$$

$$\sum F_z = 0 \Rightarrow -\frac{24}{51} T_{AC} + \frac{924(18)}{55} = 0$$

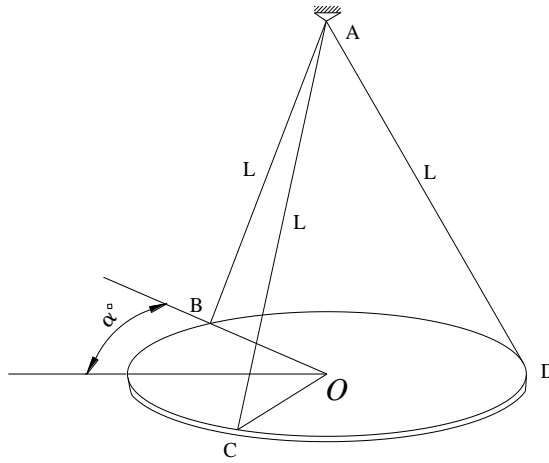


$$\Rightarrow W = 2009 \text{ (N)}$$

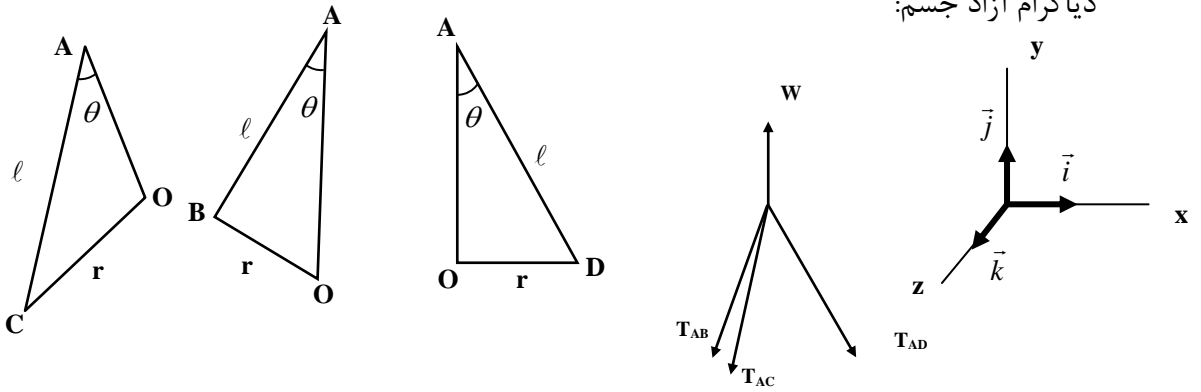
$$\Rightarrow \vec{T}_{AC} = 624.6 \text{ (N)}$$

مثال: ورقه دایره‌ای به شعاع  $200 \text{ (mm)}$  توسط 3 طناب نگه داشته شده است و  $\alpha = 30^\circ$  می باشد.

مطلوب است کمترین طول لازم  $\ell$  برای اینکه کشش در طناب از  $35 \text{ (N)}$  بیشتر نشود. جرم ورق  $6 \text{ (Kg)}$  می باشد.



$$M = 6(\text{kg}) \Rightarrow W = 6g = 58.86(\text{N})$$



دیگرام آزاد جسم:

$$\sum F = 0 \xrightarrow{1} \sum F_z = 0 \Rightarrow T_{AB} = T_{AC}$$

$$\xrightarrow{2} \sum F_x = 0 \Rightarrow T_{AD} \sin \theta - (T_{AC} \sin \theta \cos 30) \times 2 = 0$$

$$\xrightarrow{3} \sum F_y = 0 \Rightarrow T_{AD} \cos \theta - (T_{AC} \cos \theta) \times 2 + 6g = 0$$

$$T_{AD} = 1.73 T_{AB}$$

$$T_{AB} = T_{AC} = \frac{15.77}{\cos \theta}, \quad T_{AD} = \frac{27.32}{\cos \theta}$$

$$\theta = 38.7^\circ \quad (T_{AD} = 35)$$

$$\sin \theta = \frac{0.2}{l} \Rightarrow l = 0.32 \text{ (m)} = 320 \text{ (mm)}$$

فصل سوم

اجسام صلب سیستم

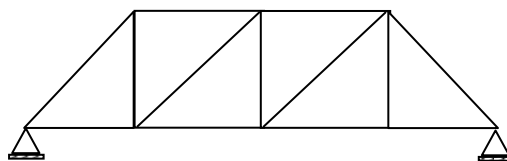
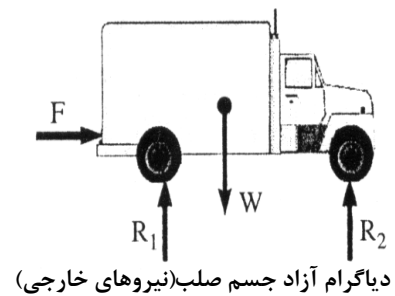
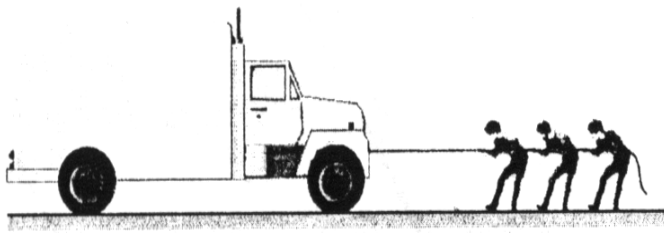
نیروهای معادل

## اجسام صلب : سیستم نیروهای معادل

- اکثراً در طبیعت ما با اجسام سر و کار داریم تا نقاط، و می توانیم اجسام را تشکیل شده از نقاط بدانیم.
- در این فصل در مورد اجسام سخت و یا صلب در حالت استاتیک صحبت خواهیم کرد، یعنی اینکه جسم هیچ نوع تغییر شکلی نخواهد پذیرفت. در اصل این یک فرض می باشد چون که هیچ جسمی بطور صد در صد صلب نخواهد بود. ولی این کمبود در صلبیت جسم، در نیروها هیچ نوع اثری نخواهد گذاشت.
- در این فصل راجع به اجسام صلب و نیروهای معادل نیروهای وارد شده بر آن صحبت خواهیم کرد.
- در این فصل همچنین راجع به اصل انتقال نیروهای معادل صحبت خواهیم کرد.

## نیروهای داخلی و خارجی

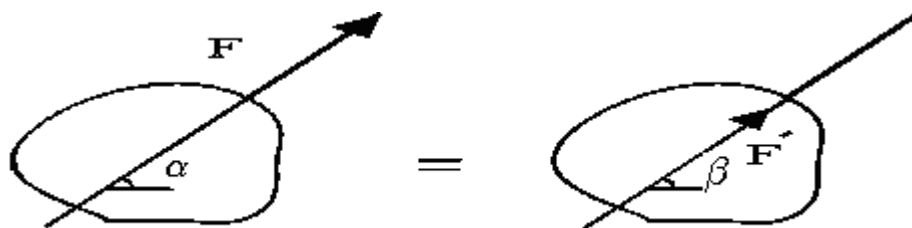
- نیروهای خارجی، نیروهایی می باشند که اثر سایر اجسام خارجی را روی جسم صلب می گذارند. آنها کاملاً مسئول رفتار جسم صلب می باشند.
- نیروهای داخلی، نیروهایی می باشند که نگهدارنده اجزاء مختلف یک جسم صلب بصورت یک عضو می باشند.



دیاگرام آزاد یک خرپا (نیروهای داخلی)

## اصل انتقال - نیروهای معادل

این اصل می گوید که تعادل یک جسم بهم نخواهد خورد در صورتی که نیروئی که بر آن جسم وارد شده را بر روی خطی که آن نیرو اثر می کند انتقال دهیم.

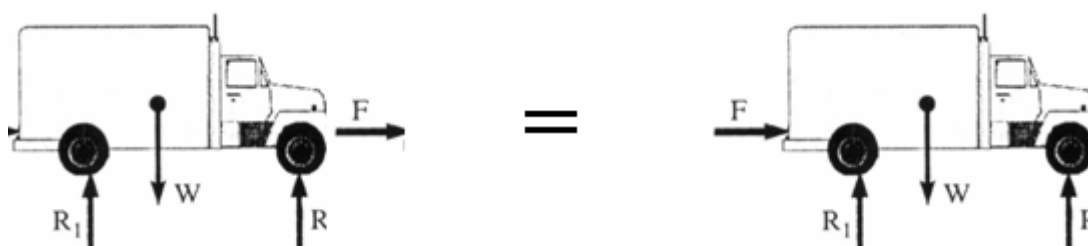


$$F = F \quad \text{هم مقدار}$$

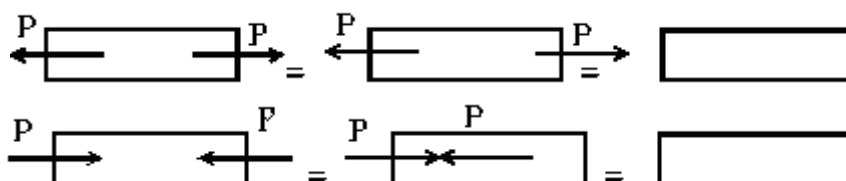
$$b = a \quad \text{هم جهت}$$

این قانون را نمی توانیم هم اکنون ثابت کنیم ، مگر در دینامیک و در بخش سیستم های هم ارز و فقط می توانیم به آزمایش ها استناد کنیم .

- اثر این قانون در مثال قبلی به این شکل خواهد بود که در کامیون ، می توان نیروی وارد شده  $F$  را در جلو به انتهای کامیون وارد کرد .



**نکته :** در مورد نیروهای داخلی این قانون ممکن است که سیستم های معادل را بسازد اما اثر نیروها را درست در نظر نگیرد .

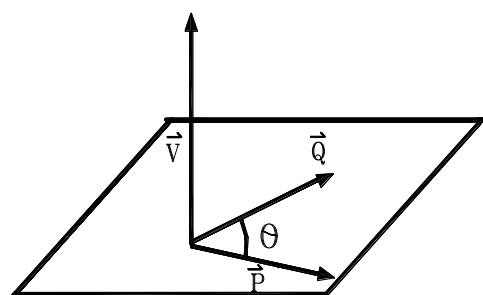


### حاصلضرب برداری دو بردار

از حاصلضرب برداری در مبحث مماس ، گشتاور یک نیرو حول یک نقطه و یا یک محور استفاده خواهیم کرد .  
حاصلضرب برداری دو بردار چنین تعریف می شود که مثلاً در

$$\vec{V} = \vec{P} \times \vec{Q}$$

- الف ( امتداد  $\vec{V}$  عمود بر صفحه ای باشد که  $\vec{P}$  و  $\vec{Q}$  در آن قرار دارند .  
 ب ( مقدار  $\vec{V}$  برابر باشد با  $PQ \sin \theta$  که  $\theta$  زاویه بین  $\vec{P}$  و  $\vec{Q}$  می باشد .  
 ج ( جهت  $\vec{V}$  از قانون دست راست بدست بیاید .

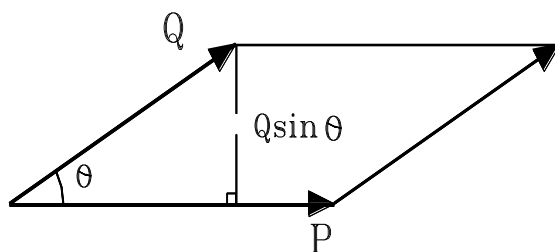


$$\vec{V} = \vec{P} \times \vec{Q}$$

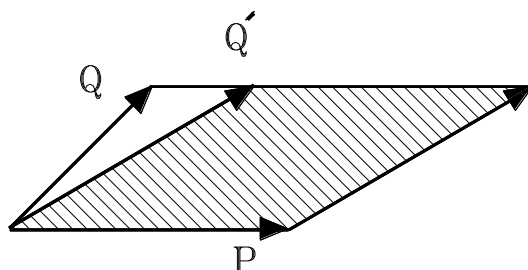
$$|\vec{V}| = |\vec{P}| |\vec{Q}| \sin \theta$$

اندازه ی بردار  $V$  برابر با مساحت متوازی الاضلاعی است که  $P, Q$  تشکیل می دهند

$$|\vec{V}| = |\vec{P}| |\vec{Q}| \sin \theta$$



$$\vec{V} = \vec{P} \times \vec{Q} = \vec{P} \times \vec{Q}'$$



$Q'$  روی یک ضلع از متوازی الاضلاع اولیه قرار می گیرد

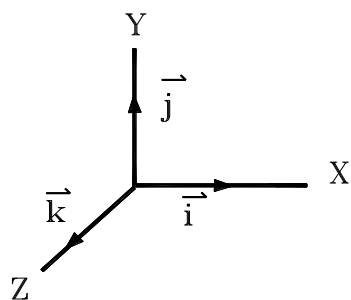
خواص حاصلضرب برداری :

$$\vec{V} = \vec{P} \times \vec{Q} = -\vec{Q} \times \vec{P} \quad (\text{الف})$$

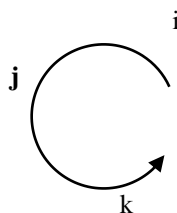
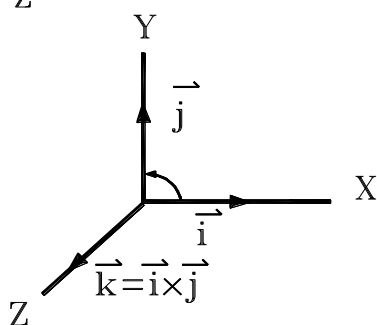
$$\vec{P} \times (\vec{Q}_1 + \vec{Q}_2) = \vec{P} \times \vec{Q}_1 + \vec{P} \times \vec{Q}_2 \quad (\text{ب})$$

$$(\vec{P} \times \vec{Q}) \times \vec{S} \neq \vec{P} \times (\vec{Q} \times \vec{S}) \quad (\text{ج})$$

## حاصلضرب برداری بر حسب مؤلفه های متعامد

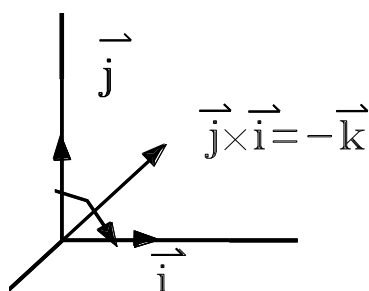


$$\begin{array}{lll} \vec{i} \times \vec{i} = 0 & \vec{j} \times \vec{i} = -\vec{k} & \vec{k} \times \vec{i} = \vec{j} \\ \vec{i} \times \vec{j} = \vec{k} & \vec{j} \times \vec{j} = 0 & \vec{k} \times \vec{j} = -\vec{i} \\ \vec{i} \times \vec{k} = -\vec{j} & \vec{j} \times \vec{k} = \vec{i} & \vec{k} \times \vec{k} = 0 \end{array}$$

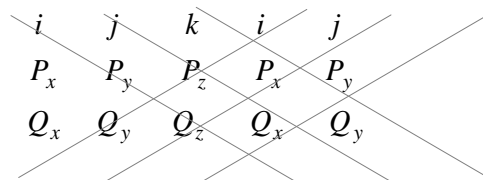


$$\vec{V} = \vec{P} \times \vec{Q} = (P_x \vec{i} + P_y \vec{j} + P_z \vec{k}) \times (Q_x \vec{i} + Q_y \vec{j} + Q_z \vec{k})$$

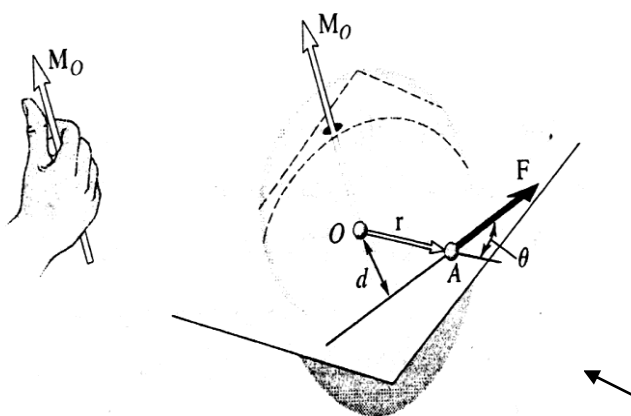
$$\vec{V} = (P_y Q_z - P_z Q_y) \vec{i} + (P_z Q_x - P_x Q_z) \vec{j} + (P_x Q_y - P_y Q_x) \vec{k}$$



$$|\vec{V}| = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ P_x & P_y & P_z \\ Q_x & Q_y & Q_z \end{vmatrix} \quad (\text{deter minate})$$



$$P_y Q_z \vec{k} - P_z Q_y \vec{i} + P_x Q_z \vec{j} - P_y Q_z \vec{i} + P_z Q_x \vec{j} - P_x Q_y \vec{k}$$



## گشتاور یک نیرو حول یک نقطه

$\vec{F}$  = نیروی وارد بر جسم سخت در نقطه A

$\vec{r}$  = برداری که مکان A را نسبت به نقطه O مشخص می کند (بردار وضعیت)

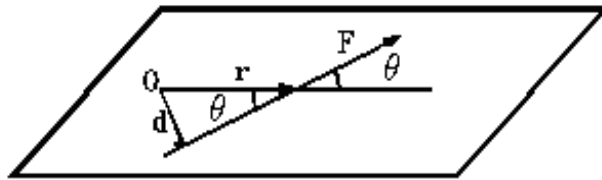
$$\vec{M}_o = \vec{r} \times \vec{F}$$

ممان F حول نقطه O

جهت  $M_o$  : یک بردار می باشد که عمود بر

صفحه  $\vec{r}$  و  $\vec{F}$  است و سوی آن توسط قانون

دست راست بدست می آید .



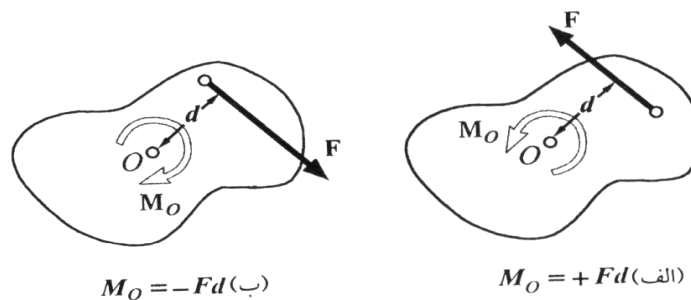
مقدار  $M_o$  تعیین کننده مقدار دورانی است که نیروی  $F$  حول یک محور خاصی که از نقطه  $O$  می گذرد ، انجام می دهد .

$$M_o \text{ واحد : } \begin{matrix} \text{N.m} & (\text{SI}) \\ \text{lb.ft} & (\text{FPS}) \end{matrix}$$

اصل جابجائی یک بردار و نیرو را می توان دوباره به این صورت بیان کرد که دو سیستم وقتی معادل خواهند بود که نه تنها نیروهای آنها با هم برابر و هم سو و هم جهت باشند ، بلکه گشتاورهای ایجاد شده در نقاط  $O$  یک مقدار باشند .

$$F = F' \quad M_o = M_o'$$

**مسائل دو بعدی :**



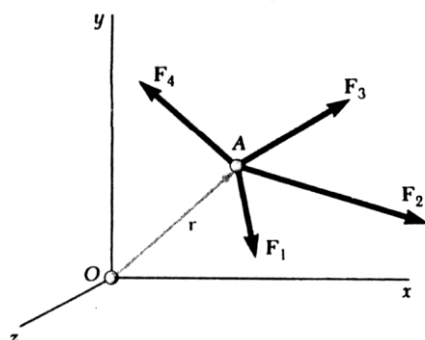
بعضی مسائل در مکانیک طوری هستند که جسم را در یک صفحه می توان قرار داد و ضخامت آن در مسئله تأثیری نخواهد داشت .

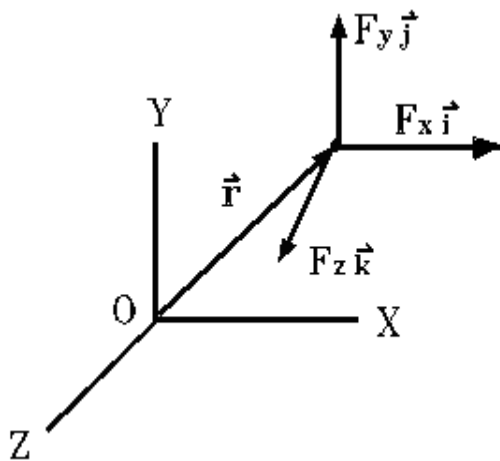
### قضیه وارینون

اگر چندین نیرو در یک نقطه اثر کنند مثلاً در نقطه  $A$  خواهیم داشت :

$$\vec{r} \times (\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots) = \vec{r} \times \vec{F}_1 + \vec{r} \times \vec{F}_2 + \dots$$

گشتاور و یا ممان حول نقطه  $O$  برای برآیند چندین نیرویی که از یک نقطه می گذرند برابر است با مجموع ممان های آن نیروها حول همان نقطه  $O$  .





$$\vec{r} = r_x \vec{i} + r_y \vec{j} + r_z \vec{k}$$

$$\vec{F} = F_x \vec{i} + F_y \vec{j} + F_z \vec{k}$$

$$\vec{M}_O = \vec{r} \times \vec{F}$$

$$\vec{M}_O = M_x \vec{i} + M_y \vec{j} + M_z \vec{k}$$

$$\vec{M}_O = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ r_x & r_y & r_z \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix}$$

$$M_x = r_y F_z - r_z F_y$$

$$M_y = r_z F_x - r_x F_z$$

$$M_z = r_x F_y - r_y F_x$$

$$\vec{r}_{A/B} = x_{A/B} \vec{i} + y_{A/B} \vec{j} + z_{A/B} \vec{k}$$

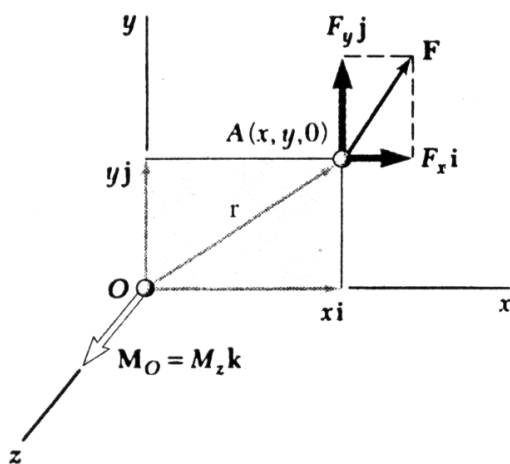
$$\vec{F} = F_x \vec{i} + F_y \vec{j} + F_z \vec{k}$$

$$\vec{M}_B = \vec{r}_{A/B} \times \vec{F} = (\vec{r}_A - \vec{r}_B) \times \vec{F}$$

$$\begin{cases} x_{A/B} = x_A - x_B \\ y_{A/B} = y_A - y_B \\ z_{A/B} = z_A - z_B \end{cases}$$

$$\vec{M}_B = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_{A/B} & y_{A/B} & z_{A/B} \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix}$$

در مسائل دو بعدی :



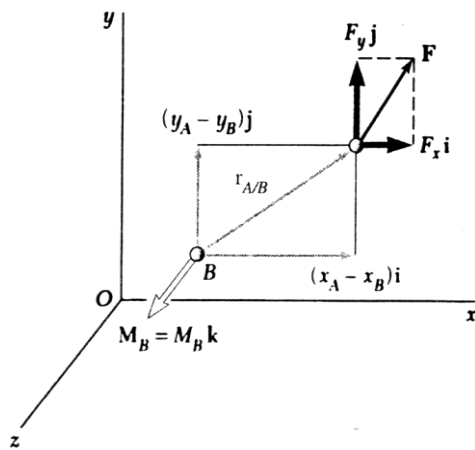
$$\vec{r} = x \vec{i} + y \vec{j}$$

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

$$\vec{M}_O = \vec{r} \times \vec{F} = (x \vec{i} + y \vec{j}) \times (F_x \vec{i} + F_y \vec{j})$$

$$\vec{M}_O = (xF_y - yF_x) \vec{k}$$

$$M_x = 0, \quad M_y = 0, \quad M_z = xF_y - yF_x$$



$$\vec{r}_{A/B} = \vec{r}_A - \vec{r}_B$$

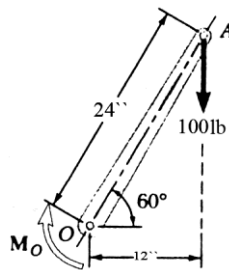
$$\vec{r}_{A/B} = (x_A - x_B) \vec{i} + (y_A - y_B) \vec{j}$$

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

$$\vec{M}_B = \vec{r}_{A/B} \times \vec{F}$$

$$\vec{M}_B = [(x_A - x_B) F_y - (y_A - y_B) F_x] \vec{k}$$

$$M_x = 0, \quad M_y = 0, \quad M_z = (x_A - x_B) F_y - (y_A - y_B) F_x$$

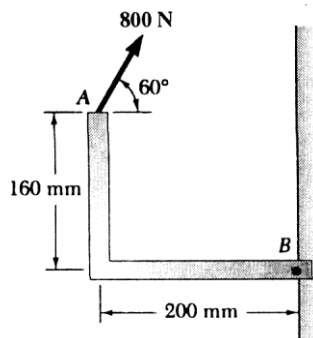


مثال:  $M_o = ?$

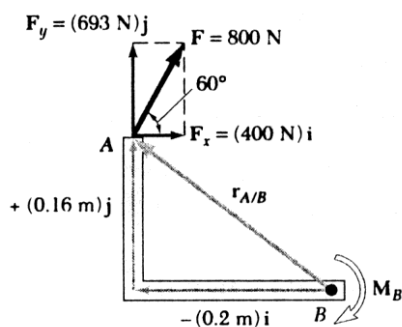
$$M = rF \sin \theta = Fd$$

$$= (100) (24 \sin 30^\circ) = (100) (12)$$

$$M = 1200 \text{ (lb.inch)} \quad \curvearrowright$$



مثال:  $M_B = ?$



$$\vec{M} = \vec{r}_{A/B} \times \vec{F}$$

$$\vec{r}_{A/B} = -0.2 \vec{i} + 0.16 \vec{j} \quad (\text{m})$$

$$\vec{F} = (800 \cos 60^\circ) \vec{i} + (800 \sin 60^\circ) \vec{j}$$

$$= 400 \vec{i} + 693 \vec{j} \quad (\text{N})$$

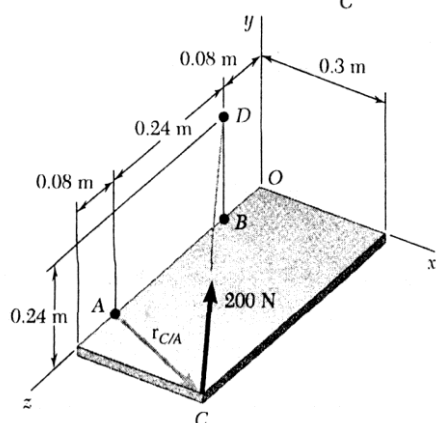
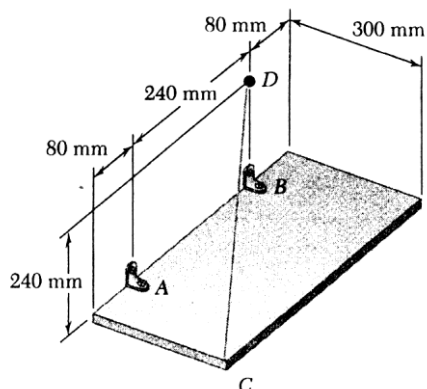
$$\vec{M}_B = [-0.2 \vec{i} + 0.16 \vec{j}] \times [400 \vec{i} + 693 \vec{j}]$$

$$= -138.6 \vec{k} - 64 \vec{k} = -202.6 \vec{k} \quad (\text{N.m})$$

$$M = 202.6 \text{ (N.m)} \quad \curvearrowright$$

مثال:

یک صفحه توسط دو لولا در نقطه A و B و یک سیم CD نگه داشته شده است. در سیم CD اگر نیروی کشش برابر با 200 N باشد، بدست آورید ممان آن نیرو را از طرف C حول نقطه A.



$$\vec{M}_A = \vec{r}_{C/A} \times \vec{F}$$

$$\vec{r}_{C/A} = A\vec{C} = -0.3\vec{i} + 0.08\vec{k}$$

$$\vec{F} = F \hat{\lambda}_{CD} = (200) \frac{C\vec{D}}{CD}$$

$$C\vec{D} = -0.3\vec{i} + 0.24\vec{j} - 0.32\vec{k} \quad (m)$$

$$CD = \sqrt{(-0.3)^2 + (0.24)^2 + (-0.32)^2} = 0.50 \quad (m)$$

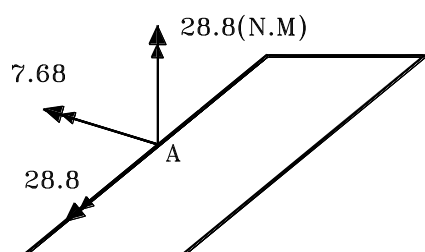
$$\vec{F} = \frac{200}{0.5} [-0.3\vec{i} + 0.24\vec{j} - 0.32\vec{k}] = -120\vec{i} + 96\vec{j} - 128\vec{k} \quad (N)$$

$$\vec{M}_A = \vec{r}_{C/A} \times \vec{F} = (0.3\vec{i} + 0.08\vec{k}) (-120\vec{i} + 96\vec{j} - 128\vec{k})$$

$$= (0.3)(96)\vec{k} + (0.3)(-128)(-\vec{j}) + (0.08)(-120)\vec{j} + (0.08)(96)(-\vec{i})$$

$$\vec{M}_A = -7.68\vec{i} + 28.8\vec{j} + 28.8\vec{k} \quad (N.m)$$

راه حل دوم:



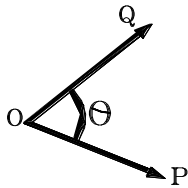
$$\vec{M}_A = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_C - x_A & y_C - y_A & z_C - z_A \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix}$$

$$\vec{M}_A = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0.3 & 0 & 0.08 \\ -120 & 96 & -128 \end{vmatrix}$$

$$\vec{M}_A = -7.68\vec{i} + 28.8\vec{j} + 28.8\vec{k} \quad (N.m)$$

## حاصلضرب عددی دو بردار

$$\vec{P} \cdot \vec{Q} = PQ \cos \theta$$

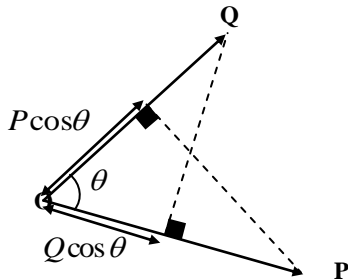


$$\vec{P} \cdot \vec{Q} = \vec{Q} \cdot \vec{P}$$

$$\vec{P} \cdot (\vec{Q}_1 + \vec{Q}_2) = \vec{P} \cdot \vec{Q}_1 + \vec{P} \cdot \vec{Q}_2$$

$$\vec{P} \cdot \vec{Q} = (P_x \vec{i} + P_y \vec{j} + P_z \vec{k}) \cdot (Q_x \vec{i} + Q_y \vec{j} + Q_z \vec{k})$$

$$\vec{P} \cdot \vec{Q} = P_x Q_x + P_y Q_y + P_z Q_z$$



$$\vec{i} \cdot \vec{i} = 1$$

$$\vec{i} \cdot \vec{j} = 0$$

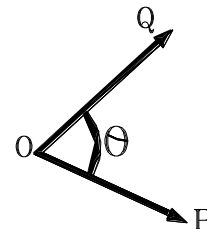
$$\vec{j} \cdot \vec{j} = 1$$

$$\vec{j} \cdot \vec{k} = 0$$

$$\vec{k} \cdot \vec{k} = 1$$

$$\vec{k} \cdot \vec{i} = 0$$

زاویه ای که دو بردار با هم دارند



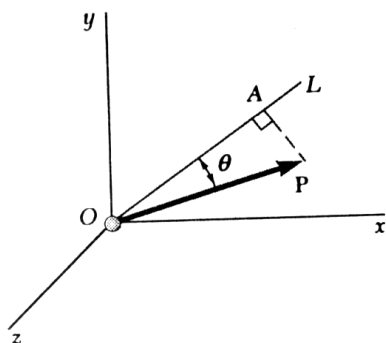
$$\vec{P} = P_x \vec{i} + P_y \vec{j} + P_z \vec{k}$$

$$\vec{Q} = Q_x \vec{i} + Q_y \vec{j} + Q_z \vec{k}$$

$$\vec{P} \cdot \vec{Q} = PQ \cos \theta = P_x Q_x + P_y Q_y + P_z Q_z$$

$$\cos \theta = \frac{P_x Q_x + P_y Q_y + P_z Q_z}{PQ}$$

تصویر یک بردار بر روی یک محور :



تصویر بردار P روی محور L

$$P_{OL} = P \cos \theta$$

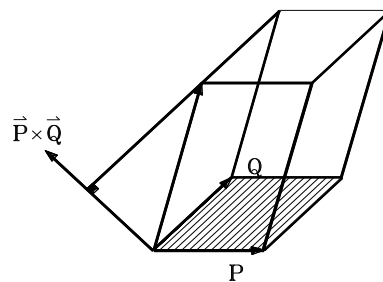
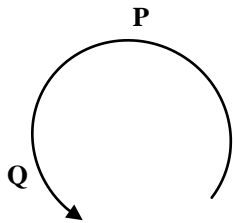
$$P_{OL} = \vec{P} \cdot \vec{\lambda} = P \lambda \cos \theta = P (1) \cos \theta = P \cos \theta$$

یا

$$P_{OL} = P_x \cos \theta_x + P_y \cos \theta_y + P_z \cos \theta_z$$

$$(\vec{\lambda} = \cos \theta_x \vec{i} + \cos \theta_y \vec{j} + \cos \theta_z \vec{k})$$

## ضرب مختلط سه بردار



حجم منشور (مکعب)  $\vec{S} \cdot (\vec{P} \times \vec{Q}) =$

مساحت متوازی الاضلاع  $\vec{P} \times \vec{Q} =$

$$\vec{S} \cdot (\vec{P} \times \vec{Q}) = \vec{P} \cdot (\vec{Q} \times \vec{S}) = \vec{Q} \cdot (\vec{S} \times \vec{P})$$

$$= -\vec{S} \cdot (\vec{Q} \times \vec{P}) = -\vec{P} \cdot (\vec{S} \times \vec{Q}) = -\vec{Q} \cdot (\vec{P} \times \vec{S})$$

$$\vec{P} \times \vec{Q} = \vec{V} = V_x \vec{i} + V_y \vec{j} + V_z \vec{k}$$

$$\vec{S} \cdot (\vec{P} \times \vec{Q}) = \vec{S} \cdot \vec{V} = S_x V_x + S_y V_y + S_z V_z$$

$$\vec{S} \cdot (\vec{P} \times \vec{Q}) = S_x (P_y Q_z - P_z Q_y) + S_y (P_z Q_x - P_x Q_z) + S_z (P_x Q_y - P_y Q_x)$$

$$\vec{S} \cdot (\vec{P} \times \vec{Q}) = \begin{vmatrix} S_x & S_y & S_z \\ P_x & P_y & P_z \\ Q_x & Q_y & Q_z \end{vmatrix}$$

## ممان یک نیرو حول یک محور

$$\vec{M}_O = \vec{r} \times \vec{F}$$

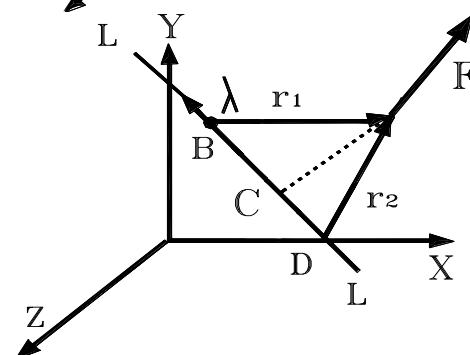
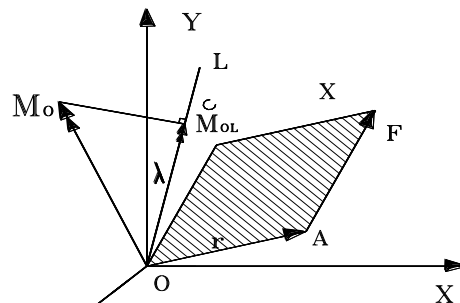
$$|\vec{M}_{OL}| = \vec{\lambda} \cdot \vec{M}_O$$

$$\vec{M}_{OL} = M_{OL} \vec{\lambda}$$

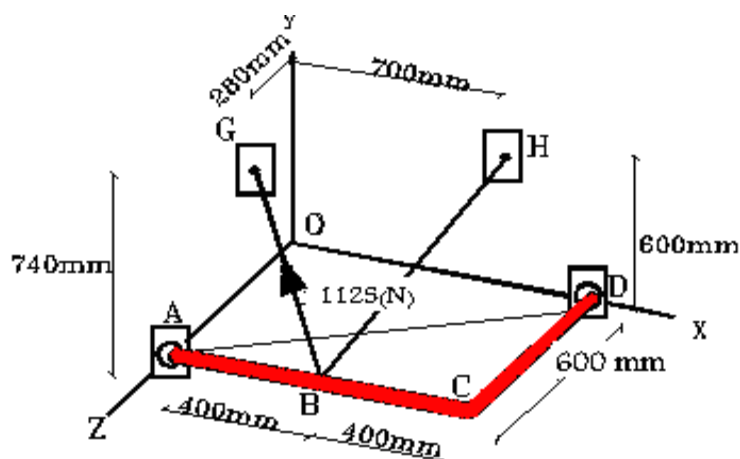
$$M_{OL} = \begin{vmatrix} \lambda_x & \lambda_y & \lambda_z \\ r_x & r_y & r_z \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix}$$

$$M_{LL} = \vec{\lambda} \cdot \vec{M}_B = \vec{\lambda}_1 \cdot (\vec{r}_1 \times \vec{F})$$

$$M_{LL} = \vec{\lambda} \cdot \vec{M}_D = \vec{\lambda}_2 \cdot (\vec{r}_2 \times \vec{F})$$



مثال: مماس نیروی وارد شده در طناب BG را در نقطه B حول محور AD بدست آورید .



$$\vec{AD} = 0.8\vec{i} - 0.6\vec{k} \quad (m) \quad , \quad |AD| = 1.00 \, m$$

$$\vec{\lambda}_{AD} = \frac{\vec{AD}}{|AD|} = 0.8\vec{i} - 0.6\vec{k} \quad \vec{r}_{B/A} = 0.4\vec{i}$$

$$\vec{BG} = -0.4\vec{i} + 0.74\vec{j} - 0.32\vec{k} \quad (m) \quad , \quad |BG| = 0.9 \, m$$

$$\vec{\lambda}_{BG} = \frac{\vec{BG}}{|BG|} \Rightarrow \vec{F}_{BG} = F_{BG} \frac{\vec{BG}}{|BG|} = 1125 \left( \frac{-0.4\vec{i} + 0.74\vec{j} - 0.32\vec{k}}{0.9} \right)$$

$$\vec{F}_{BG} = -500\vec{i} + 925\vec{j} - 400\vec{k}$$

$$\vec{M}_{AD} = \vec{\lambda}_{AD} \cdot (\vec{r}_{B/A} \times \vec{F}_{BG}) = \begin{vmatrix} 0.8 & 0 & -0.4 \\ 0.4 & 0 & 0 \\ -500 & 925 & -400 \end{vmatrix} = -222 \, (N \cdot m)$$

مثال: اگر  $\vec{P} = 4\vec{i} - 2\vec{j} + 3\vec{k}$  و  $\vec{Q} = 2\vec{i} + 4\vec{j} - 5\vec{k}$  و  $\vec{S} = 7\vec{i} - \vec{j} + s_z\vec{k}$  باشند .  $s_z$  را طوری بدست آورید که هر سه بردار در یک صفحه قرار گیرند .

برای اینکه هر سه بردار در یک صفحه قرار گیرند ، لازم است که

$$\vec{P} \cdot (\vec{Q} \times \vec{S}) = 0$$

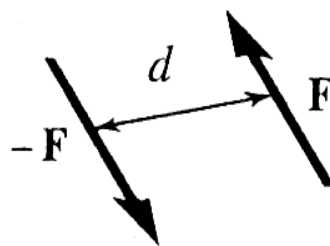
$$\begin{vmatrix} 4 & -2 & 3 \\ 2 & 4 & -5 \\ 7 & -1 & s_z \end{vmatrix} = 0 \Rightarrow 16s_z + 70 - 6 - 84 - 20 + 4s_z = 0$$

$$20s_z - 40 = 0$$

$$\boxed{s_z = 2}$$

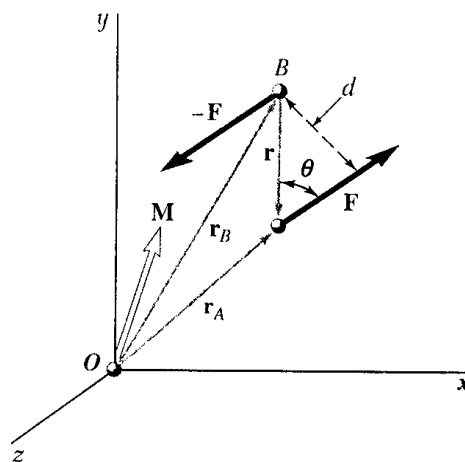
## ممان یک کوپل

به مجموعه دو نیروی  $F$  و  $-F$  که دارای یک مقدار باشند و در جهت مخالف هم بوده کوپل می گویند .



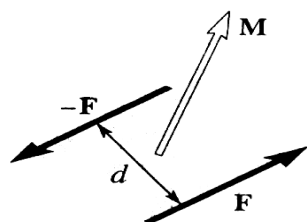
$$\vec{R} = \vec{F} + (-\vec{F}) = 0$$

$$M = F \cdot d$$



$$\vec{m} = \vec{r}_A \times \vec{F} + \vec{r}_B \times (-\vec{F}) = (\vec{r}_A - \vec{r}_B) \times \vec{F}$$

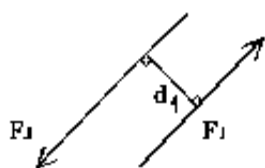
$$m = \vec{r} \times \vec{F}$$



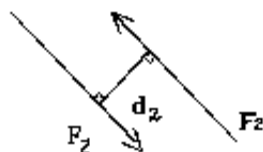
$$m = r F \sin \theta = F d$$

بردار کوپل یک بردار آزاد می باشد ، زیرا که ممان آن بستگی به نقطه خاصی ندارد و نسبت به هر نقطه همان مقدار ممان  $F d$  را خواهد داشت .

دو کوپل موقعی برابر می باشند که مقدار و جهت ممان های حاصل از آنها با هم برابر باشند .

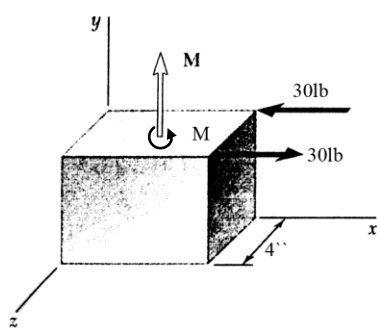


$$\vec{M}_1 = \vec{M}_2$$

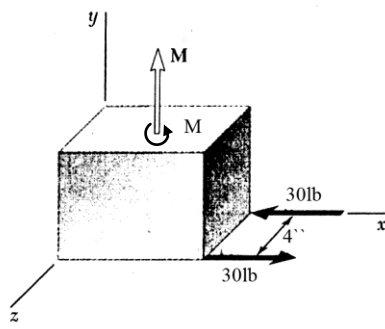


$$F_1 d_1 = F_2 d_2$$

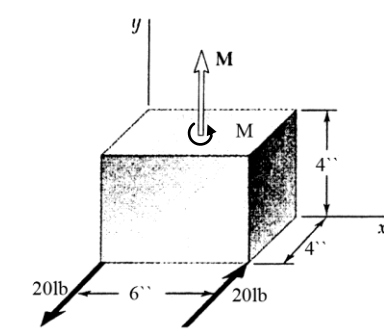
## کوپل های معادل



$$M = 30(4) = 120(\text{lb.m})$$



$$M = 30(4) = 120(\text{lb.m})$$



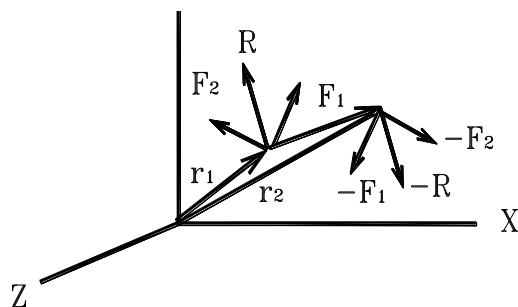
$$M = 20(6) = 120(\text{lb.m})$$

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

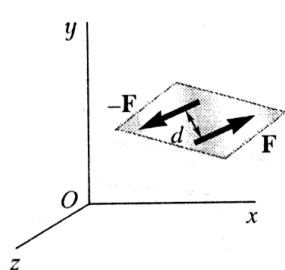
$$\vec{M} = \vec{r}_1 \times \vec{R} + \vec{r}_2 \times (-\vec{R}) = (\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \times \vec{R}$$

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{R} = \vec{r} \times (\vec{F}_1 + \vec{F}_2)$$

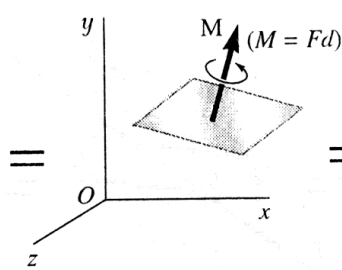
$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}_1 + \vec{r} \times \vec{F}_2 = \vec{M}_1 + \vec{M}_2$$



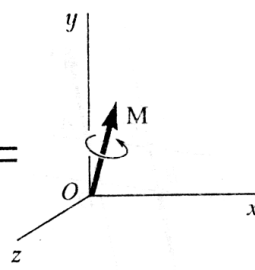
• کوپلی را بوسیله بردار نشان می دهند



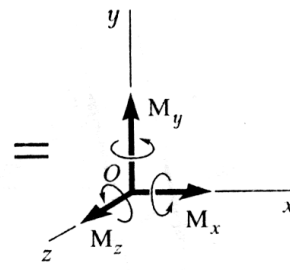
(الف)



(ب)



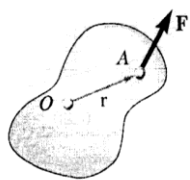
(ج)



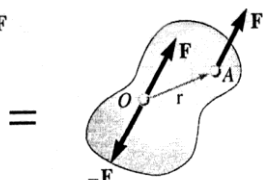
(د)

## تجزیه یک نیرو به یک نیرو در یک نقطه و یک کوپل

نیروی F در نقطه A واقع شده و به دلیلی می خواهیم آن را به نقطه O منتقل کنیم .

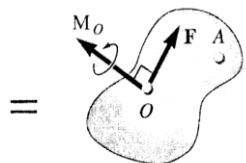


(الف)

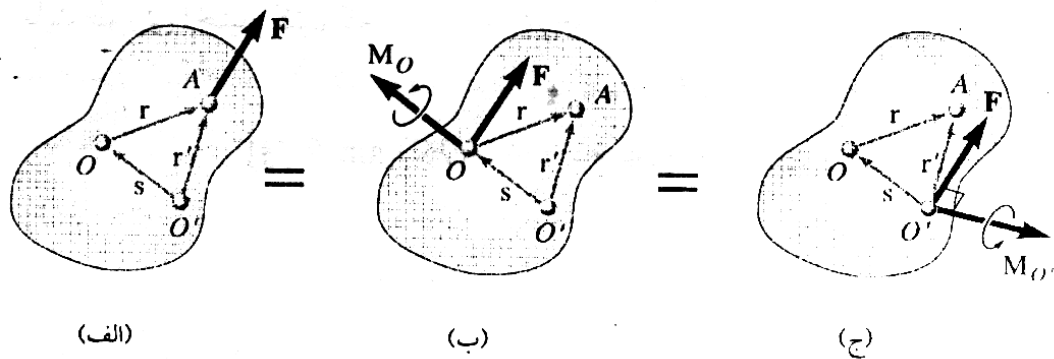


(ب)

$$\vec{M}_O = \vec{r} \times \vec{F}$$



(ج)



$$\vec{M}_O = \vec{M}_O + \vec{s} \times \vec{F}$$

$$\vec{M}_O = \vec{r} \times \vec{F}$$

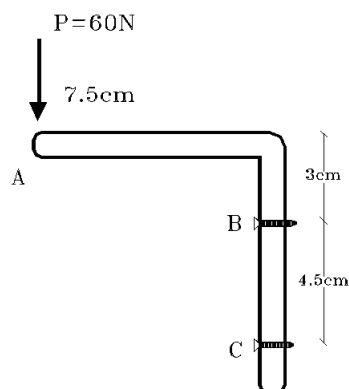
برعکس می توان یک سیستم نیرو - کوپل را به یک نیروی تنها تبدیل کرد . ( البته نیرو و کوپل بصورت برداری بایستی بر هم عمود باشند).

**مثال:**

نیروی P در نقطه A داده شده است . این بخش توسط دو پیچ در نقاط B و C به دیوار نگهداشته شده است .

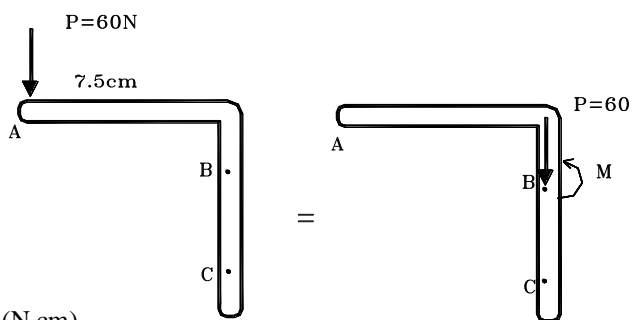
الف ) نیروی فوق را با یک سیستم نیروی معادل در نقطه B جایگزین کنید .

ب ) دو نیروی افقی در نقاط B و C بدست بیاورید که معادل کوپل بند الف باشد.



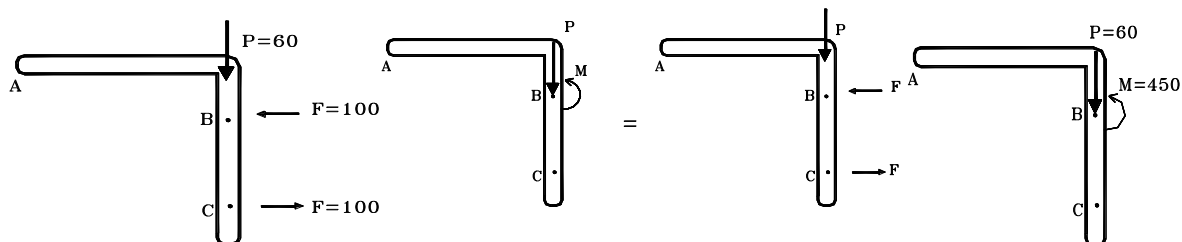
**حل:**

الف)



ب)

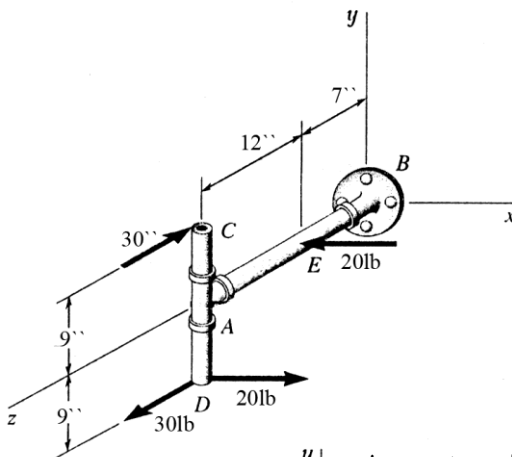
$$M = P(7.5) = 60(7.5) = 450 \text{ (N.cm)}$$



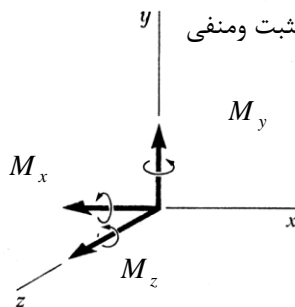
$$F(4.5)=M$$

$$F=450/4.5=100 \text{ (N)}$$

مثال: بدست آورید مولفه های یک کوپل معادل دو کوپل در مسئله زیر را :



حل: در نقطه A دو نیرو را که مقدار آنها 20 پوند است ، قرار می دهیم باعلامت مثبت و منفی



$$\Rightarrow M_x = -30 (18) = -540 \text{ (lb.in)}$$

کوپل در صفحه yz

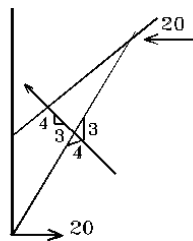
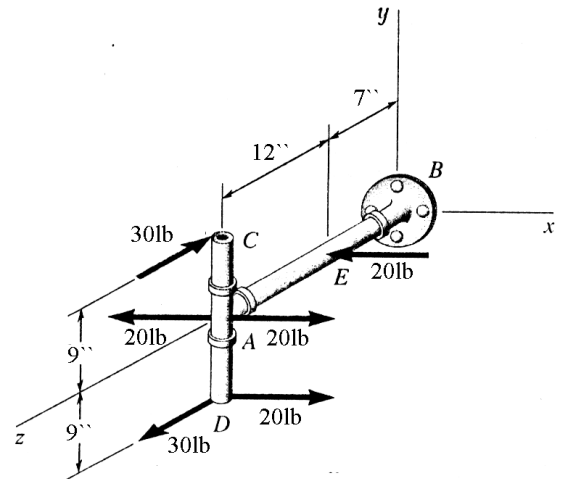
$$\Rightarrow M_y = 20 (12) = 240 \text{ (lb.in)}$$

کوپل در صفحه xz

$$\Rightarrow M_z = 20 (9) = 180 \text{ (lb.in)}$$

کوپل در صفحه xy

$$\vec{M} = -540\vec{i} + 240\vec{j} + 180\vec{k} \quad (\text{lb.in})$$



راه دوم: می توان ممان تمام نیروها را در یک نقطه دلخواه مثل نقطه D بدست آورد .

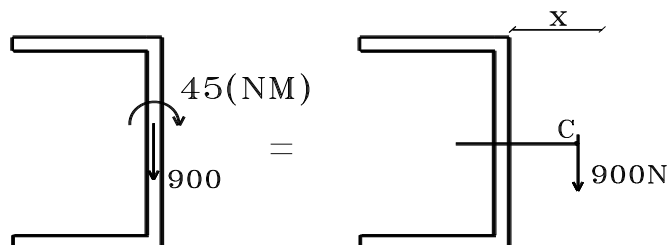
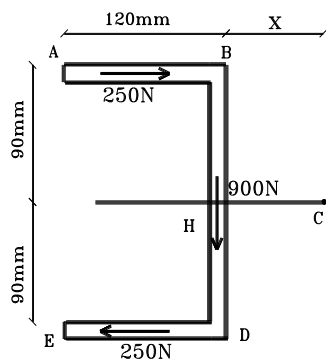
$$\vec{M} = \vec{M}_0 = (18\vec{j}) \times (-30\vec{k}) + (9\vec{j} - 12\vec{k}) \times (-20\vec{i})$$

$$\vec{M} = -540\vec{i} + 240\vec{j} + 180\vec{k} \quad (\text{lb.in})$$

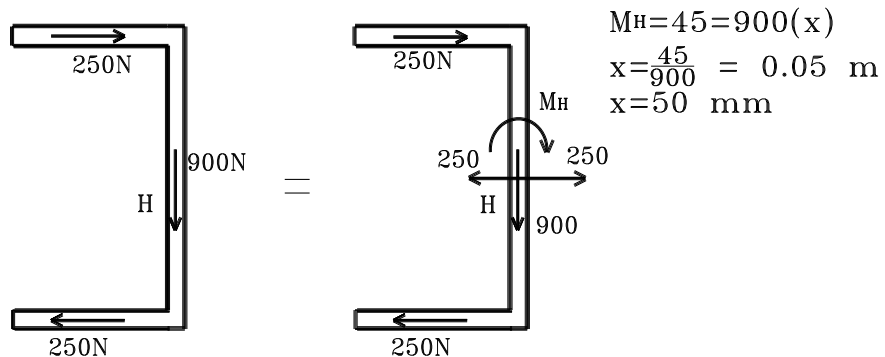
مثال: نیروهای برشی وارد شده بر سطح این مقطع توسط سه نیرو در بالها و جان نشان داده شده اند .

الف ) این نیروها را با یک نیرو و کوپل در نقطه H جایگزین کنید .

ب ) این نیروها و کوپل را با یک نیرو در نقطه C به فاصله X جایگزین کنید و X را بدست آورید .



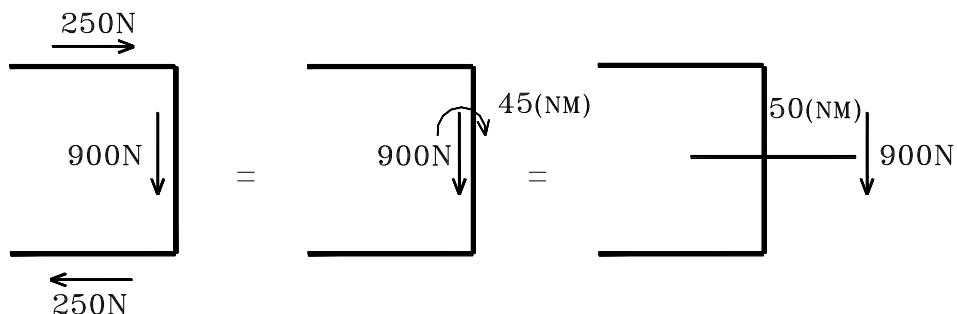
$$M_H = 250(0.18) = 45 \text{ (N.M)}$$



$$M_H = 45 = 900(x)$$

$$x = \frac{45}{900} = 0.05 \text{ m}$$

$$x = 50 \text{ mm}$$



### سیستم نیروهای معادل

دو سیستم موقعی معادل یکدیگرند که مجموع نیروها با هم برابر باشند و هم ینطور مجموع ممان های حاصل از نیروها در یک نقطه با هم برابر باشند .

$$\sum \vec{F} = \sum \vec{F}'$$

$$\sum \vec{M}_O = \sum \vec{M}'_O$$

سیستم  $F_x, F_y, F_z$

سیستم  $F'_x, F'_y, F'_z$

$$\sum F_x = \sum F'_x, \quad \sum F_y = \sum F'_y, \quad \sum F_z = \sum F'_z$$

$$\sum M_x = \sum M'_x, \quad \sum M_y = \sum M'_y, \quad \sum M_z = \sum M'_z$$

## سیستم نیروهای هم ارز

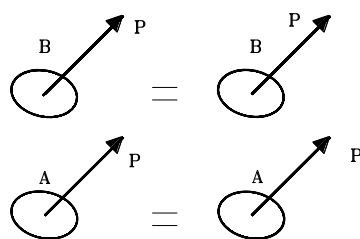
اگر دو سیستم با نیروهای مختلف بر یک جسم سخت اثر کنند و مقدار برآیند آن ها و همینطور ممان های آنها حول یک نقطه برابر باشند با هم در آن سیستم هم ارز خواهند بود .

$$\sum \vec{R} = \sum \vec{R}'$$

$$\sum \vec{M}_o = \sum \vec{M}'_o$$

در حقیقت دو سیستم هم ارز بر روی یک جسم سخت حتماً معادل خواهند بود . ولی آن را نمی توان برای یک سری سیستم جرم ها یا ذرات بسط داد . یعنی اینکه اگر بجای یک جسم سخت یک سری از اجسام باشند و برآیند نیروهای اعمال شده روی آنها برابر باشد و همینطور ممانهای آنها حول یک نقطه ، آن دو سیستم نیرو را می توان هم ارز نامید ولی نمی توان معادل نامید .

سیستم ها هم ارز می باشند ولی معادل هم نمی باشند ، زیرا اثر نیروها بروی اجسام با هم متفاوت می باشد .



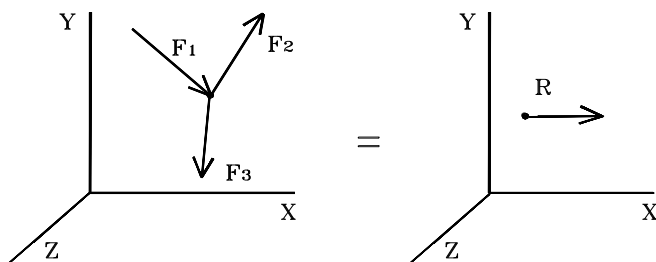
$$\sum \vec{R} = \sum \vec{R}'$$

$$\sum \vec{M}_o = \sum \vec{M}'_o$$

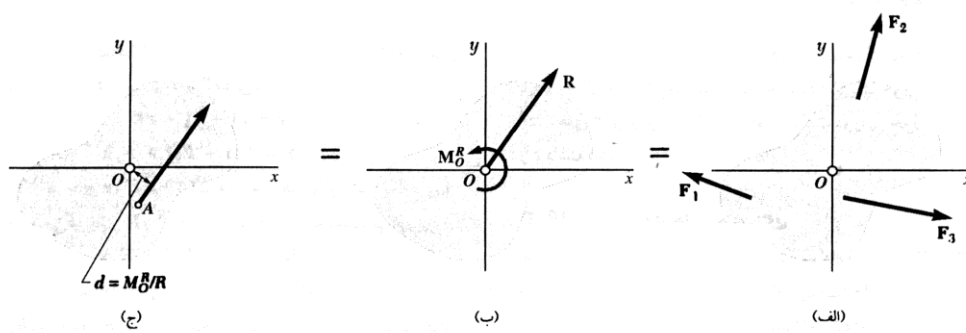
## تبدیل یک سیستم نیرو به حداقل ممکنه

قبلاً نشان داده شد که یک سیستم نیرو را می توان به یک سیستم نیرو - کوپل تبدیل کرد . حال نشان خواهیم داد که چگونه یک سیستم را می توان تنها به یک سیستم نیرو تبدیل کرد ( اما فقط در حالات ذیل )

- نیروها از یک نقطه عبور می کنند .



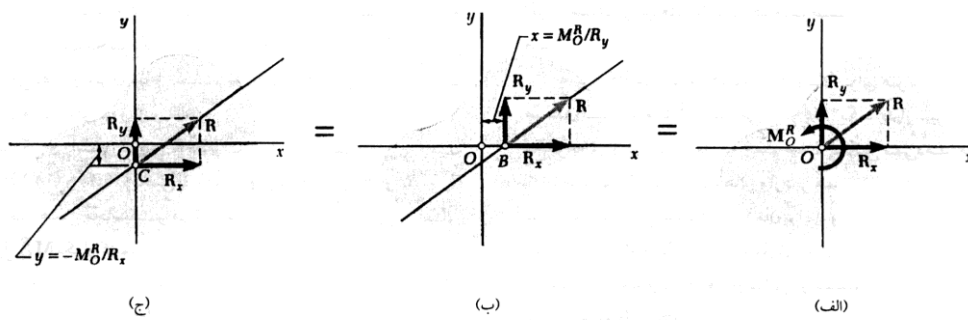
- نیروها در یک صفحه قرار دارند.



$$d = \frac{M_o}{R} \quad \vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3$$

$$\vec{M}_o = \vec{r}_1 \times \vec{F}_1 + \vec{r}_2 \times \vec{F}_2 + \vec{r}_3 \times \vec{F}_3$$

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3$$



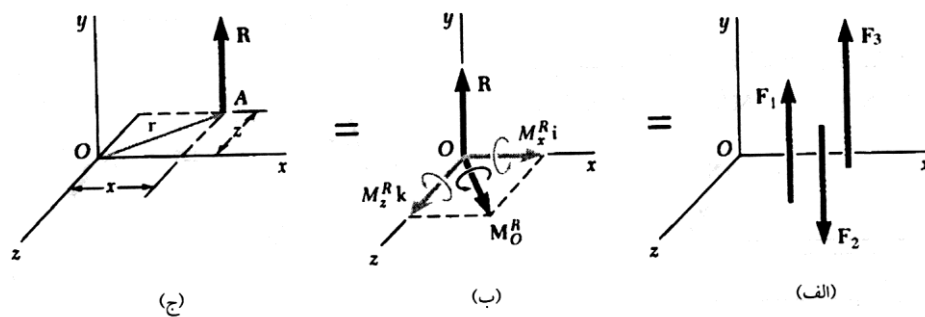
$$x R_y - y R_x = M_o$$

$$R_x = \sum F_x$$

$$R_y = \sum F_y$$

$$M_o = \sum M_o$$

- نیروها موازی اند



$$R = R_y = \sum F_y$$

$$M_x^R = \sum M_x$$

$$M_z^R = \sum M_z$$

$$\vec{r} \times \vec{R} = \vec{M}_o^R$$

$$(x \vec{i} + z \vec{k}) \times R_y \vec{j} = M_x^R \vec{i} + M_z^R \vec{k}$$

$$\begin{cases} -z R_y = M_x^R \\ x R_y = M_z^R \end{cases}$$

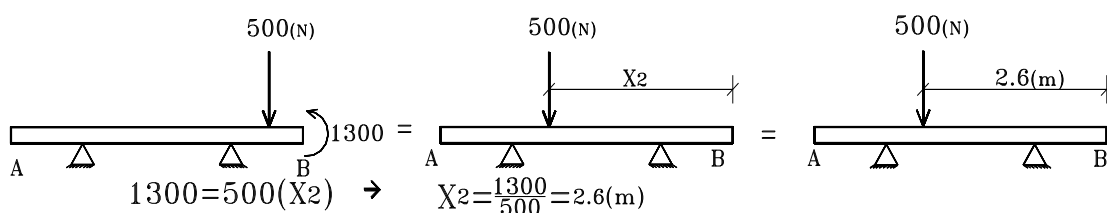
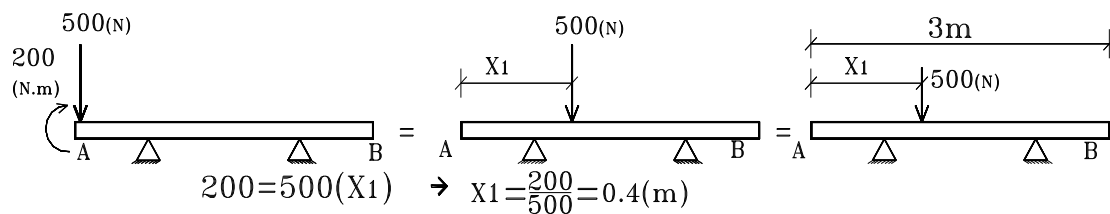
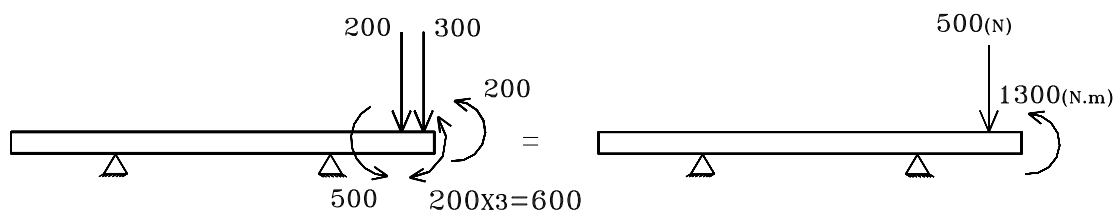
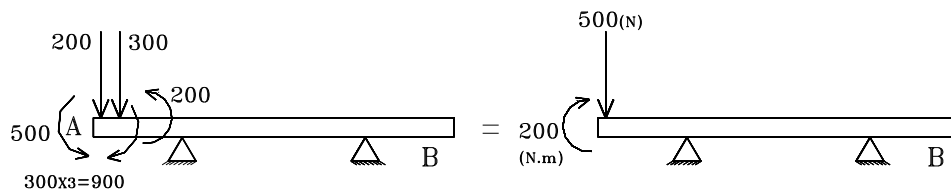
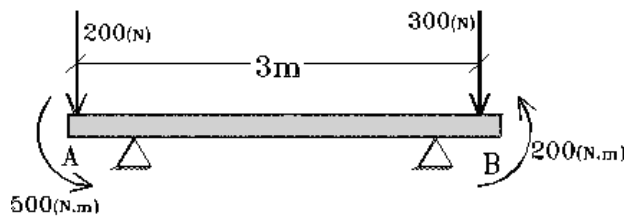
در حالت کلی در فضای سه بعدی، سیستم نیروها را می توان با یک سیستم نیرو ممان جایگزین کرد اما نمی توان آن را به حداقل رساند و به یک سیستم نیروها تبدیل کرد.

**مثال:** در تیر مقابل بدست آورید

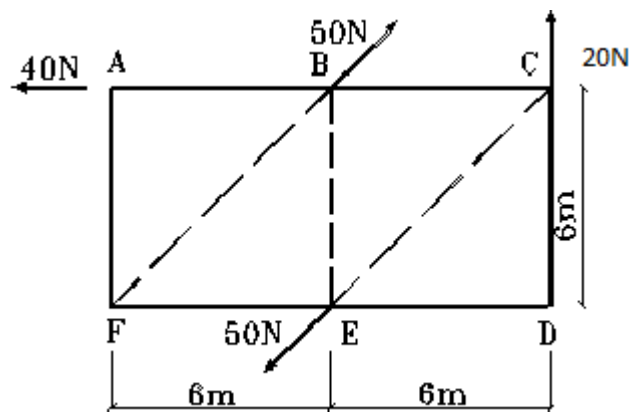
الف) سیستم معادل نیروهای مقابل در نقطه A بصورت نیرو - کوپل

ب) سیستم معادل نیروهای مقابل در نقطه B بصورت نیرو - کوپل

ج) سیستم معادل بصورت یک نیرو آنها



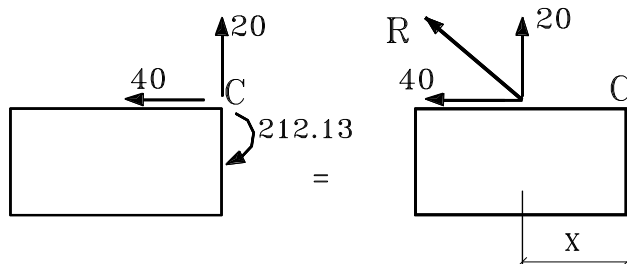
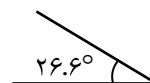
مثال: در صفحه  $6m \times 12m$  مقابل که تحت اثر چهار نیرو قرار گرفته است مطلوبست برآیند تمام چهار نیرو و محل اثر آن. 20



$$\vec{R} = -40\vec{i} + 20\vec{j} \Rightarrow R = 44.7 \text{ (N)}$$

$$\vec{M}_C = \vec{r}_{B/C} \times \vec{F} + 0 = -6\vec{i} \times 50 (\cos 45^\circ \vec{i} + \sin 45^\circ \vec{j})$$

$$\vec{M}_C = -212.13\vec{k} \text{ (N.m)}$$

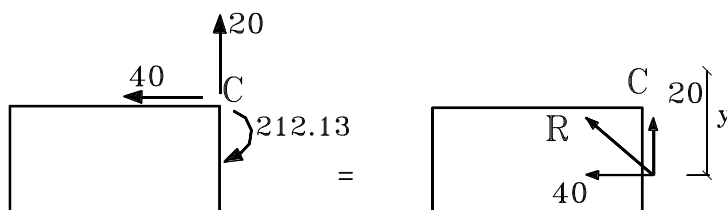


تقاطع با خط AC

$$\vec{M}_C = -x\vec{i} \times 20\vec{j}$$

$$-212.13\vec{k} = -20x\vec{k}$$

$$x = 10.61 \text{ m}$$



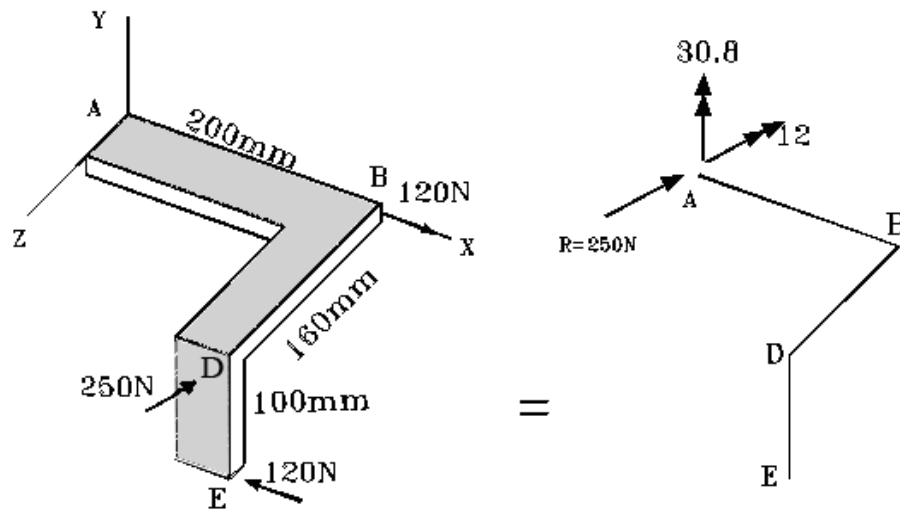
تقاطع با خط CD

$$\vec{M}_C = -y\vec{i} \times -40\vec{i}$$

$$-212.13\vec{k} = -40y\vec{k}$$

$$y = 5.30 \text{ m}$$

مثال: مطلوبست سیستم معادل نیرو در نقطه A.

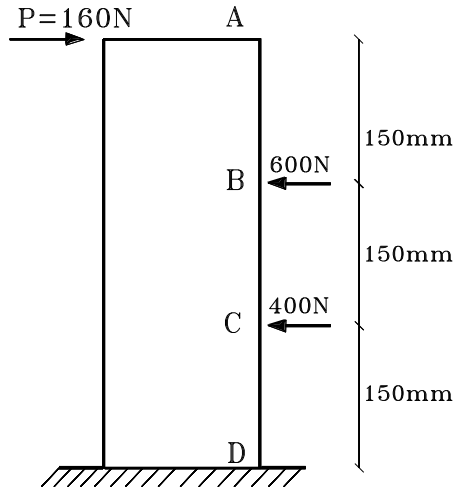


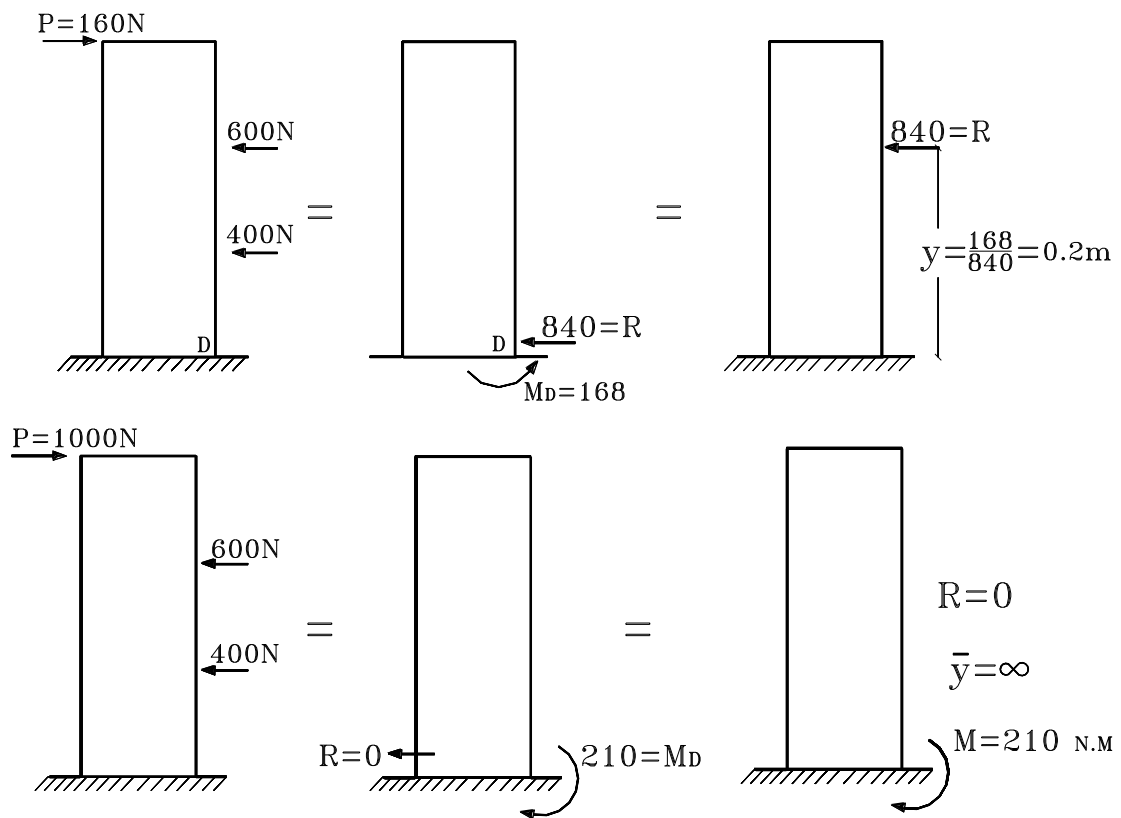
$$\vec{R} = 120 \vec{i} - 120 \vec{i} - 250 \vec{k} = -250 \vec{k}$$

$$\vec{M}_A^R = -0.2 \vec{i} \times (-250 \vec{k}) + [-0.1 \vec{j} + 0.16 \vec{k}] \times (-120 \vec{i}) = 50 \vec{j} - 12 \vec{k} - 19.2 \vec{j}$$

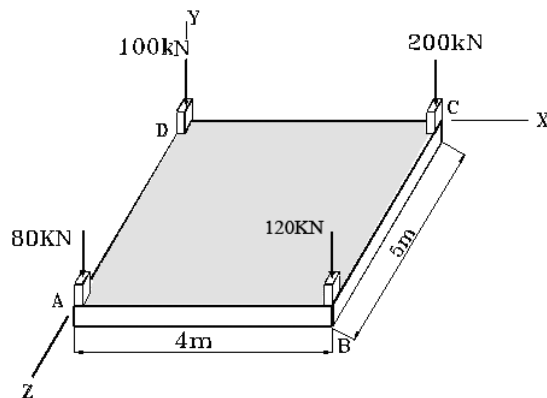
$$\vec{M}_A^R = 30.8 \vec{j} - 12 \vec{k}$$

مثال: مطلوبست برآیند نیروهای مقابل و سیستم معادل بصورت واحد و محل اثر آن.



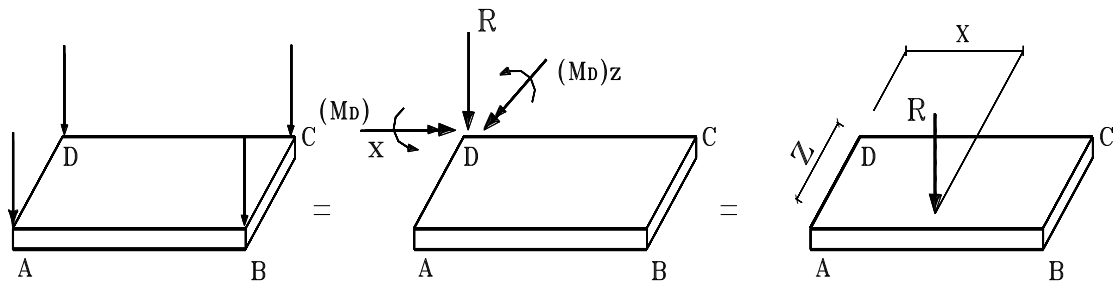


**مثال:** مطلوبست نیروی معادل چهار نیروی وارده بر فونداسیون گسترده (MAT) به صورت نیروی واحد و مطلوبست محل اثر آن.

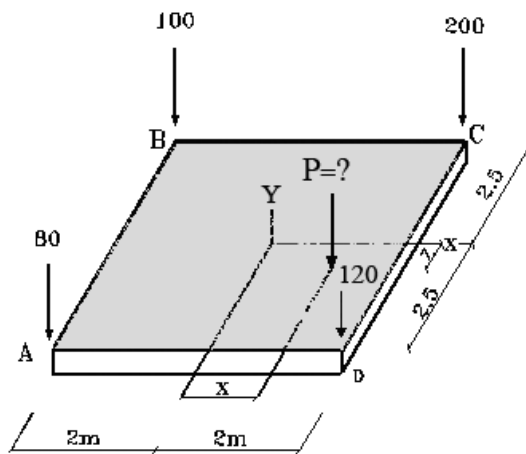


سیستم نیروی معادل در نقطه D

$$\begin{aligned}\vec{R} &= -80\vec{j} - 120\vec{j} - 200\vec{j} - 100\vec{j} = -500\vec{j} \quad (\text{kN}) \\ \vec{M}_D^R &= 5\vec{k} \times (-80\vec{j}) + [4\vec{i} + 5\vec{k}] \times (-120\vec{j}) + 4\vec{i} \times (-200\vec{j}) \\ \vec{M}_D^R &= 1000\vec{i} - 1280\vec{k} = -500x\vec{k} + 500z\vec{i} \\ 1000 &= 500z \Rightarrow z = 2 \quad (\text{m}) \\ 1280 &= -500x \Rightarrow x = 2.66 \quad (\text{m})\end{aligned}$$



**مثال:** در مثال قبلی مطلوبست کمترین نیرویی که به عنوان نیروی اضافه می تواند بر سیستم گسترده وارد گردد که برآیند چند نیرو از برآیند پنج نیرو از مرکز آن زاویه بگذرد ، همچنین مطلوبست محل اثر آن نیرو .  
 $P=?$     ( $x=?$  ,  $z=?$ )



اگر P نیروی اضافه باشد برای آنکه محل برآیند پنج نیرو در مرکز زاویه باشد ، خواهیم داشت .  $\vec{M}_O^R = 0$

$$\sum \vec{M}_O^R = \sum \vec{r} \times \vec{F} = (-2\vec{i} + 2.5\vec{k}) \times (-80\vec{j}) + (2\vec{i} + 2.5\vec{k}) \times (-120\vec{j}) + (2\vec{i} - 2.5\vec{k}) \times (-200\vec{j}) + (-2\vec{i} - 2.5\vec{k}) \times (-100\vec{j}) + (x\vec{i} + z\vec{k}) \times (-P\vec{j}) = 0$$

$$(200 + 300 - 500 - 250 + Pz)\vec{i} + (160 - 240 - 400 + 200 - Px)\vec{k} = 0$$

$$Pz = 250 \quad \Rightarrow \quad P = \frac{250}{z}$$

$$Px = -280 \quad \Rightarrow \quad P = \frac{-280}{x}$$

$$|x| \leq 2 \text{ (m)} \quad \Rightarrow \quad P \geq \frac{280}{2} = 140 \text{ (kN)}$$

$$|z| \leq 2.5 \text{ (m)} \quad \Rightarrow \quad P \geq \frac{250}{2.5} = 100 \text{ (kN)}$$

$$P = 140 \text{ kN}$$

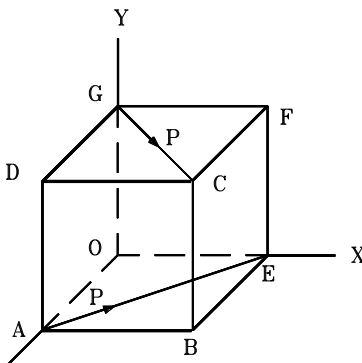
بنابراین حداقل نیروی وارده می باید  $\Leftarrow$

$$P = 140 \text{ kN} \quad \text{قابل قبول است} \quad \begin{cases} 140z = 250 & \Rightarrow z = 1.786 \text{ (m)} \\ 140x = -280 & \Rightarrow x = -2 \text{ (m)} \end{cases}$$

روی لبه AD و 0.714 m از نقطه A.

$$\begin{cases} 100z = 250 & \Rightarrow z = 2.5 \text{ (m)} \\ 100x = -280 & \Rightarrow x = -2.8 \text{ (m)} \end{cases} \quad \text{قابل قبول نیست}$$

**مثال:** در سیستم نیروهای زیر ابتدا سیستم معادل آنها را در نقطه O بدست بیاورید و سپس سیستم معادل را بصورت آچار یا wrench بدست بیاورید.



$$\bar{R} = \frac{P}{\sqrt{2}} \bar{i} + \frac{P}{\sqrt{2}} \bar{j} + \frac{P}{\sqrt{2}} \bar{i} - \frac{P}{\sqrt{2}} \bar{k} = \sqrt{2} P \bar{i}$$

$$\begin{aligned} \bar{M}_O^R &= a \bar{j} \times \left( \frac{P}{\sqrt{2}} \bar{i} + \frac{P}{\sqrt{2}} \bar{k} \right) + a \bar{k} \times \left( \frac{P}{\sqrt{2}} \bar{i} - \frac{P}{\sqrt{2}} \bar{k} \right) \\ &= \frac{Pa}{\sqrt{2}} (\bar{i} + \bar{j} - \bar{k}) \end{aligned}$$

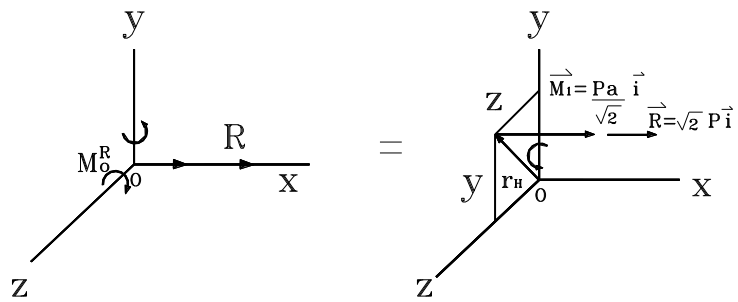
سیستم کوپل و نیرو در O

$$M_1 = \frac{\bar{R} \cdot \bar{M}_O^R}{R} = \frac{\sqrt{2} P \bar{i} \cdot \frac{Pa}{\sqrt{2}} (\bar{i} + \bar{j} - \bar{k})}{\sqrt{2} P} = \frac{Pa}{\sqrt{2}}$$

$$p = \frac{M_1}{R} = \frac{\frac{Pa}{\sqrt{2}}}{\sqrt{2} P} = \frac{a}{2}$$

محور آن آچار موازی محور x می باشد.

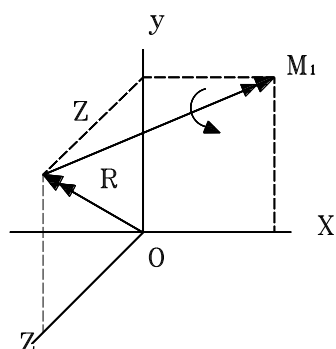
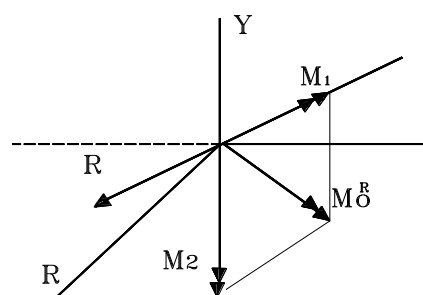
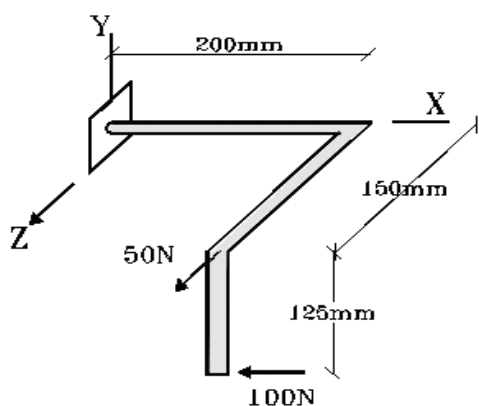
حال می بایستی که نقطه برخورد آن محور را با صفحه yz بدست آورد:



$$\begin{aligned}
 \vec{M}_O^R &= \vec{M}_1 + \vec{r}_H \times \vec{R} \\
 \frac{Pa}{\sqrt{2}} (\vec{i} + \vec{j} - \vec{k}) &= \frac{Pa}{\sqrt{2}} \vec{i} + (y \vec{j} + z \vec{k}) \times \sqrt{2} P \vec{i} \\
 &= \frac{Pa}{\sqrt{2}} \vec{i} - \sqrt{2} P y \vec{k} + \sqrt{2} P z \vec{j} \\
 \left. \begin{aligned} -\frac{Pa}{\sqrt{2}} &= -\sqrt{2} P y \quad \Rightarrow \quad y = \frac{a}{2} \\ \frac{Pa}{\sqrt{2}} &= \sqrt{2} P z \quad \Rightarrow \quad z = \frac{a}{2} \end{aligned} \right\} \rightarrow
 \end{aligned}$$

پس محور آچار (wrench) بایستی در نقطه  $y = z = a/2$  با صفحه  $yz$  تقاطع پیدا کند .

مثال:



مطلوبست : الف ( سیستم نیروی معادل در نقطه O  
ب ( سیستم نیروی آچاری ( wrench )

$$\vec{R} = -100\vec{i} + 50\vec{k} \quad (N)$$

$$\vec{M}_O^R = (-0.125\vec{j} + 0.15\vec{k}) \times (-100\vec{i}) + (0.2\vec{i}) \times (50\vec{k}) \quad (\text{الف})$$

$$= -12.5\vec{k} - 15\vec{j} - 10\vec{j}$$

$$\vec{R} = -100\vec{i} + 50\vec{k} \quad (N)$$

$$\vec{M}_O^R = -25\vec{j} - 12.5\vec{k} \quad (N.m)$$

$$R = \sqrt{100^2 + 50^2} = 111.8 \quad (N)$$

$$\cos \theta_x = -\frac{100}{111.8} \Rightarrow \theta_x = 153.4^\circ$$

$$\cos \theta_z = -\frac{50}{111.8} \Rightarrow \theta_z = 63.4^\circ$$

$$\cos \theta_y = 0 \Rightarrow \theta_y = 90^\circ$$

ب

$$M_1 = \frac{\vec{R} \cdot \vec{M}_O^R}{R} = \frac{(-100\vec{i} + 50\vec{k}) \cdot (-25\vec{j} - 12.5\vec{k})}{111.8} = \frac{50(-12.5)}{111.8}$$

$$M = -5.59 \quad (N.m)$$

$$\text{pitch} = p = \frac{M_1}{R} = \frac{-5.59}{111.8} = -0.05 \quad (m)$$

$$\vec{R} = -100\vec{i} + 50\vec{k}$$

$$\vec{M}_1 = \frac{M_1}{R} \vec{R} = -0.05 \vec{R} = 5\vec{i} - 2.5\vec{k}$$

محور آچار موازی با صفحه xz می باشد . می بایستی تقاطع آن با صفحه yz مشخص شود .

$$\vec{M}_O^R = \vec{r} \times \vec{R} + \vec{M}_1, \quad \vec{r}_D = y\vec{j} + z\vec{k}$$

$$-25\vec{j} - 12.5\vec{k} = (y\vec{j} + z\vec{k}) \times (-100\vec{i} + 50\vec{k}) + 5\vec{i} - 2.5\vec{k}$$

$$-25\vec{j} - 12.5\vec{k} = 100y\vec{k} + 50y\vec{i} - 100z\vec{j} + 5\vec{i} - 2.5\vec{k}$$

$$0 = 50y + 5 \Rightarrow y = -0.1 \quad (m)$$

$$-25 = -100z \Rightarrow z = 0.25 \quad (m)$$

فصل چہارم

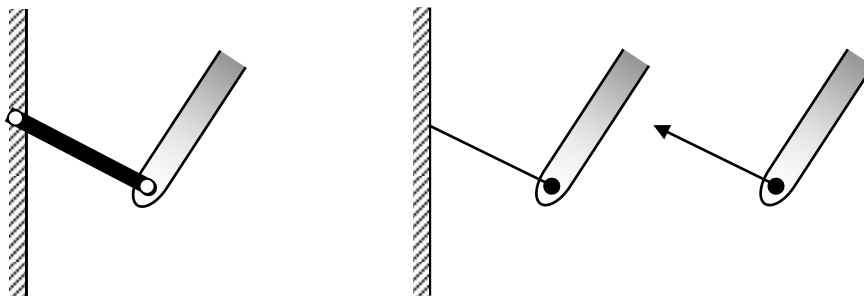
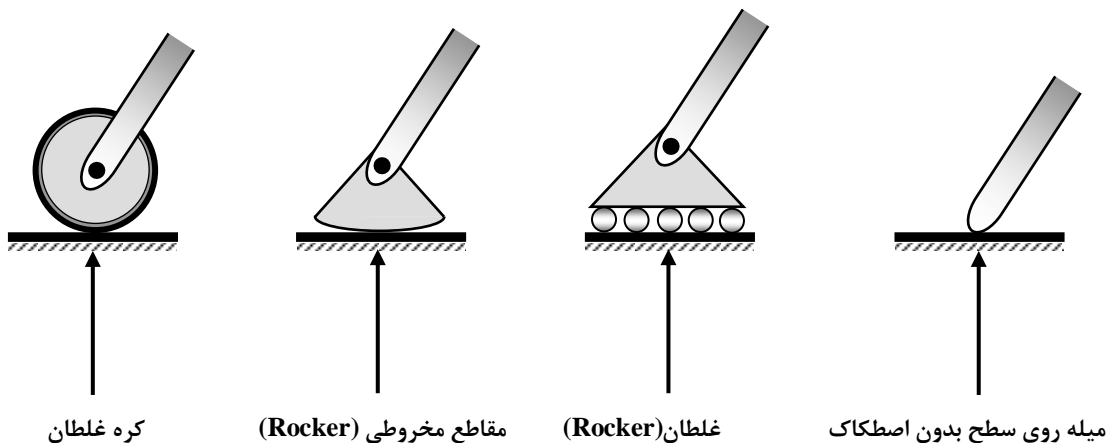
# تعادل اجسام صلب

## تعدادل جسم در صفحه دو بعدی:

$$\begin{array}{l} \text{جلوگیری از حرکت انتقالی} \\ \text{جلوگیری از حرکت دورانی} \end{array} \quad \begin{array}{l} \sum \vec{F} = 0 \Rightarrow \sum F_x = 0, \sum F_y = 0 \\ \sum M_x = 0, \sum M_y = 0, \sum M_z = 0 \end{array}$$

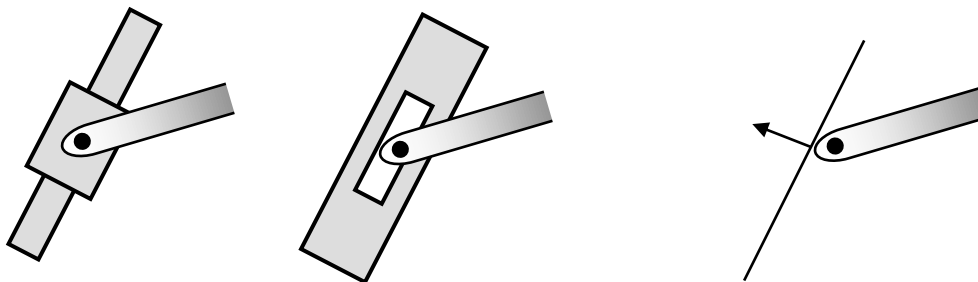
## شرایط تکیه گاه های دو بعدی:

1) تکیه گاههایی که دارای یک عکس العمل در جهت مشخص هستند.  
کابل تنها نیروی کششی را تحمل می کند.



بست کوتاه (short link)

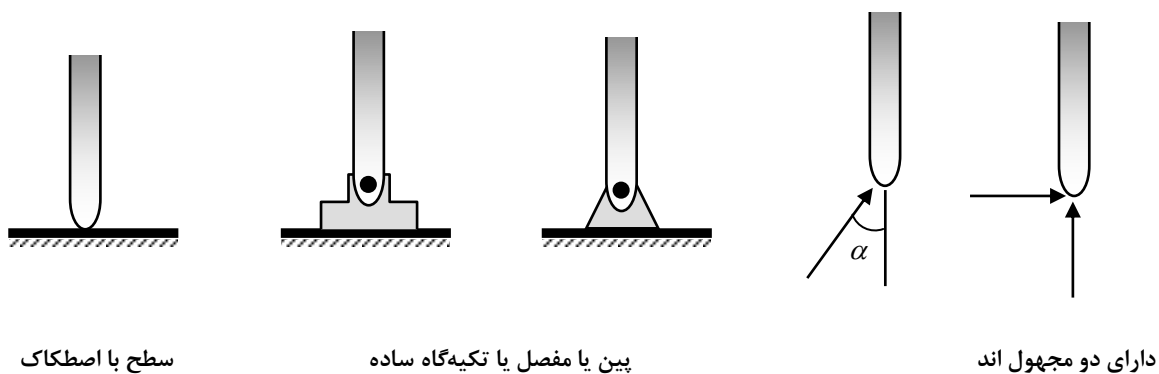
کابل کوتاه (short cable)



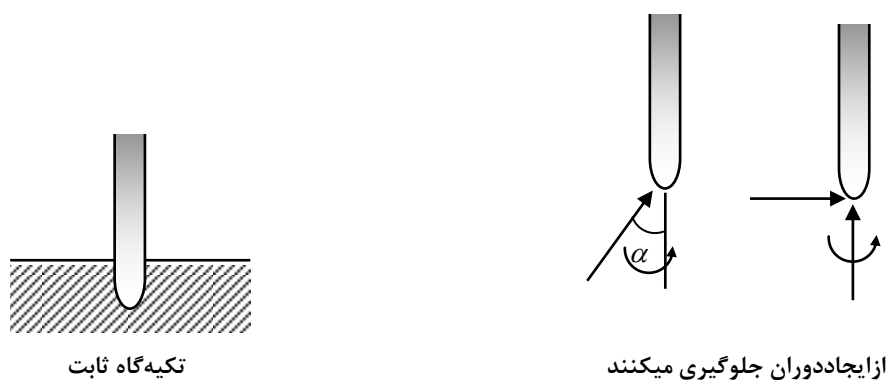
طوقه روی میله صیقلی

پین در شکاف صیقلی

2) تکیه گاههایی که دارای دو عکس العمل در جهت مشخص باشند (یا دارای یک عکس العمل و جهت نامشخص باشند).

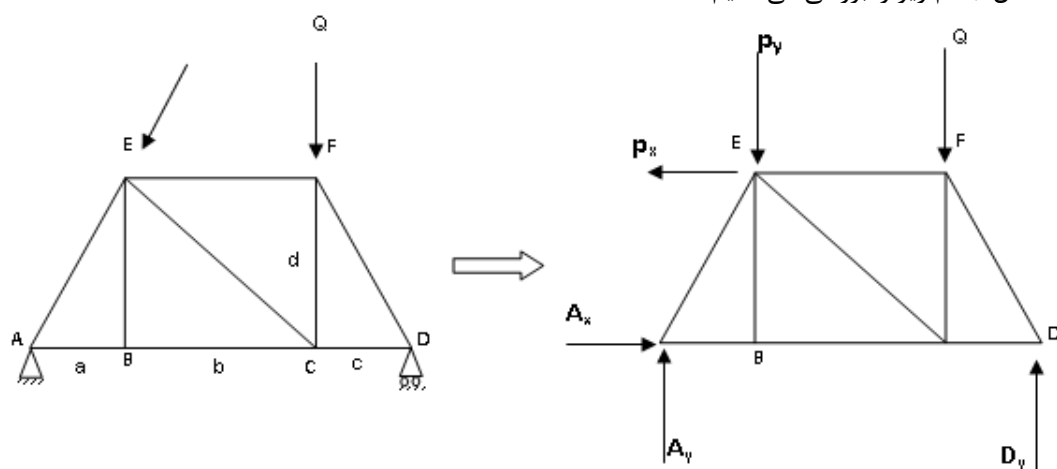


3) تکیه گاههایی که دارای سه عکس العمل می باشند.



تعداد یک جسم صلب دو بعدی:

مثال: تعداد جسم زیر را بررسی می کنیم



دیاگرام آزاد جسم

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

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow Px - Ax = 0$$

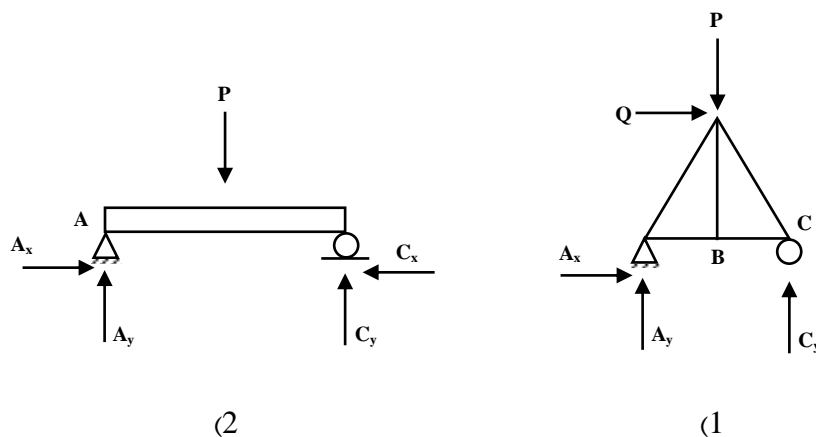
$$Ax = Px$$

$$+ \uparrow \sum F_y = 0 \Rightarrow -Py + Ay - Q + By = 0$$

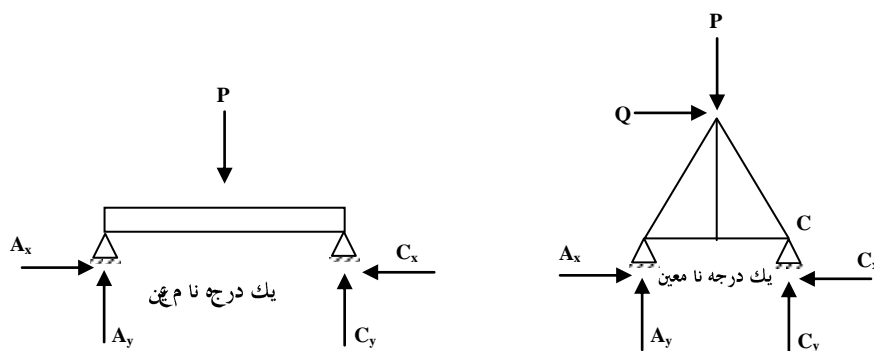
$$\curvearrowright \sum M_A = 0 \Rightarrow -Py(a) - Q(a+b) - Px(d) + Dy(a+b+c) = 0$$

می توانستیم به جای استفاده از رابط  $\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum M_A = 0$  از مجموعه روابط  $\sum F_x = 0, \sum M_B = 0, \sum M_A = 0$  یا از  $\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum M_B = 0$  استفاده کنیم.

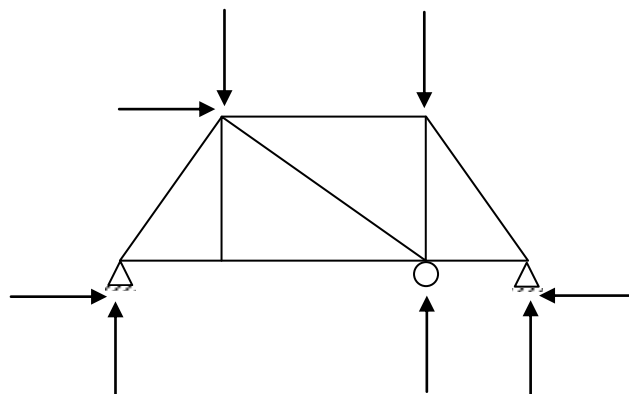
عکس العمل های نامعین:



- (1) سازه پایدار معین (سه معادل و سه مجهول)  
 (2) سازه پایدار نامعین (یک درجه) (سه معادل و چهار مجهول)



سازه پایدار نامعین (یک درجه) (سه معادل و چهار مجهول)

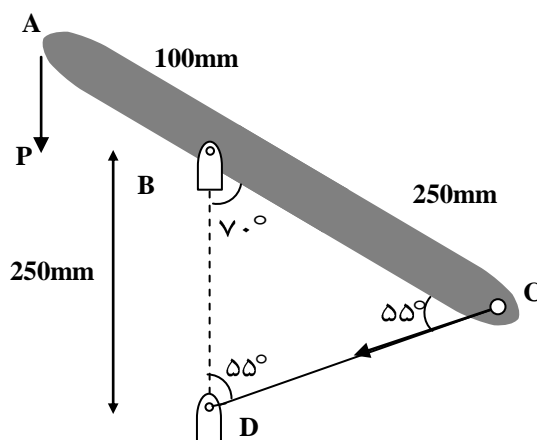


سازه پایدار نامعین (دو درجه) (سه معادل و پنج مجهول)

### سازه ناپایدار:

اغلب به سازه هایی گفته می شود که نمی توانند از حرکت انتقالی یا دورانی جسم در یک یا چند جهت (بدلیل نحوه قرارگرفتن تکیه گاه در آنها) جلوگیری کنند. در اغلب این سازه ها هنگام محاسبه ی گشتاور نیروها، خط اثر نیروها از یک نقطه عبور کرده و در نتیجه لنگر صفر نمی شود.

مثال: مطلوب است عکس العمل در تکیه گاه B و نیروی کششی در کابل CD.



$$\sum M_B = 0 \Rightarrow 0.1P \cos 20 - 0.25 \cos 35 T = 0$$

$$\sum M_D = 0 \Rightarrow -B_x (0.25) + P(0.1 \cos 20) = 0$$

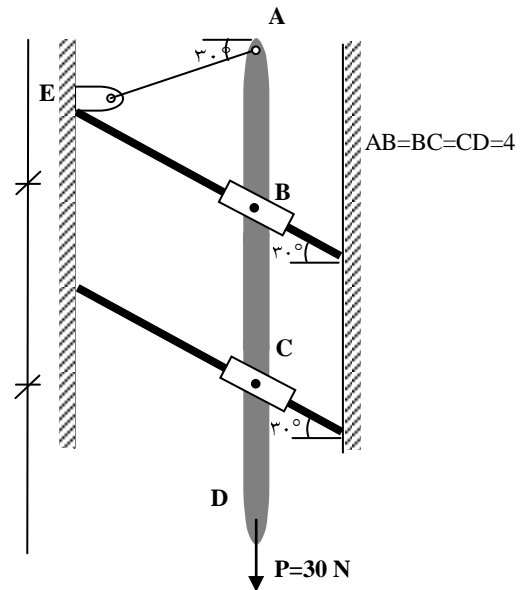
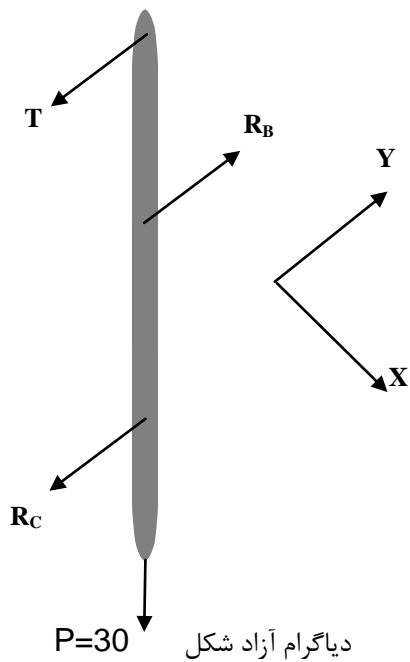
$$B_x = 150.3(N) \rightarrow$$

می توان با لنگر گرفتن نسبت به نقطه C  $B_y$  را بدست آورد. یا راه آسانتر:

$$+\uparrow \sum F_y = 0 \Rightarrow -P + B_y - T \sin 35 = 0$$

$$B_y = 505(N) \uparrow$$

مثال: مطلوب است عکس العمل B, C و کشش کابل در AE.



$$+\swarrow \sum F_x = 0 \Rightarrow P \cos 60 - T \cos 60 = 0 \Rightarrow T = 30 (KN)$$

$$+\curvearrowright \sum M_B = 0$$

$$T \cos 30 (4) + R_C \sin 30 (4) = 0$$

$$R_C = -52 (KN)$$

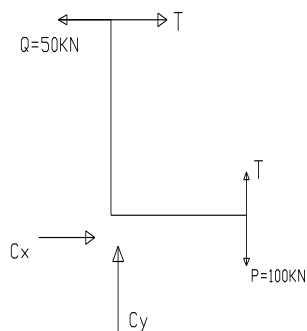
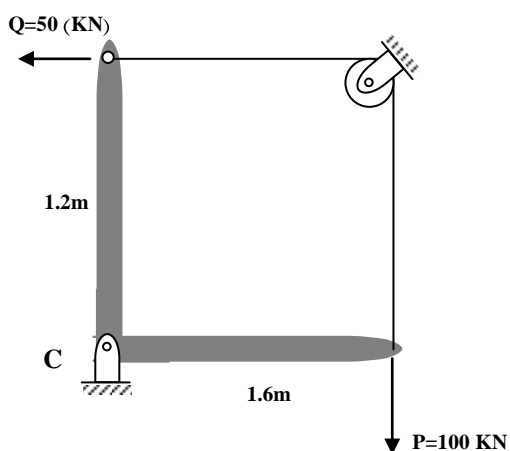
$$+\curvearrowright \sum M_C = 0 \Rightarrow$$

$$T \cos 30 (8) - R_B \sin 30 (4) = 0$$

$$R_B = 103.7 (KN)$$

مثال: مطلوب است کشش در دو کابل

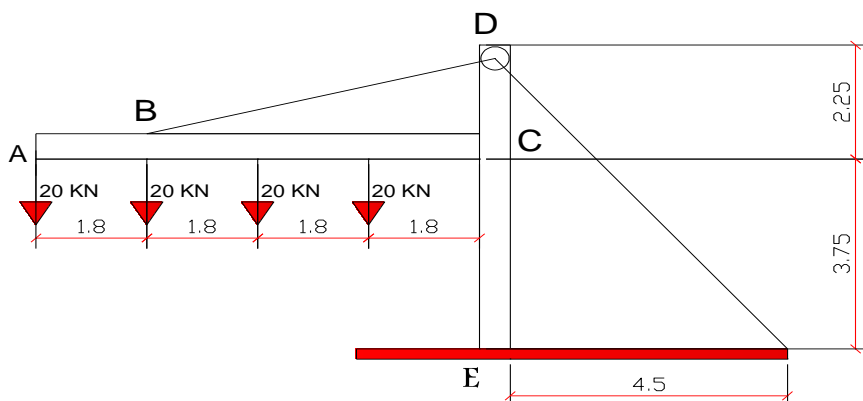
کشش در دو طرف کابل یک اندازه است. زیرا در قرقره داریم:

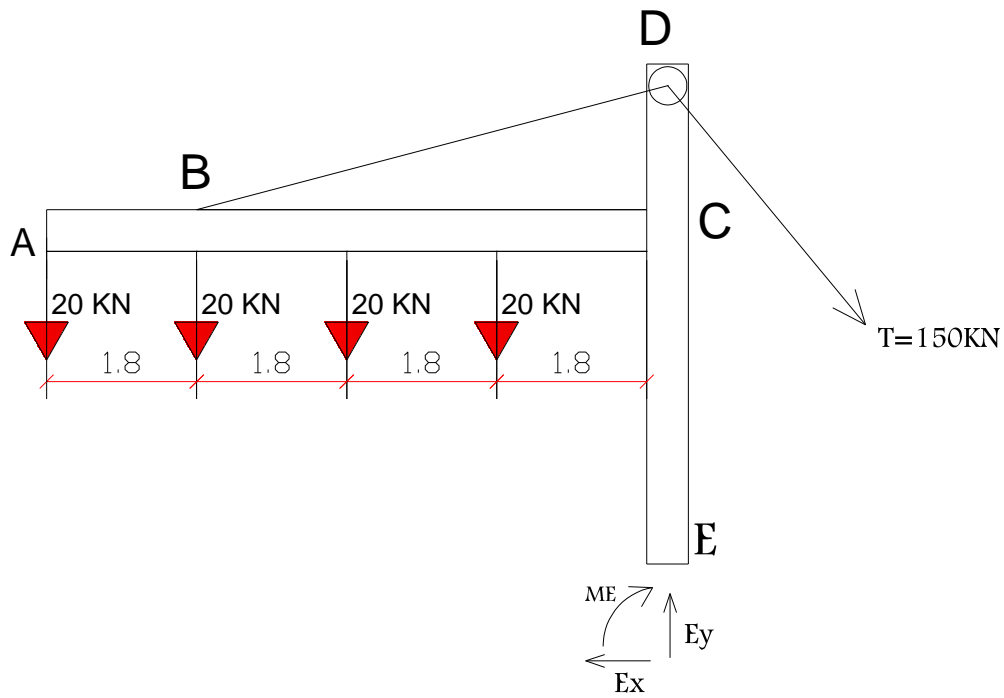


در نتیجه خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \sum M_C = 0 &\Rightarrow 50 \cdot 1.2 - 1.2 \cdot T - 1.6 \cdot 100 + 1.6 \cdot T = 0 \\ &\Rightarrow T = 250 \text{ (kN)} \uparrow \end{aligned}$$

مثال: اگر نیروی کشش در کابل 150kN باشد مطلوب است عکس العمل ها در تکیه گاه D.





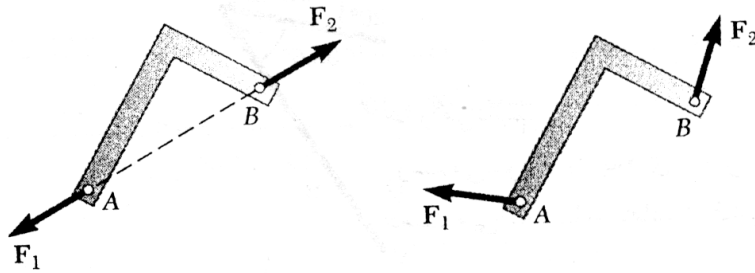
$$\begin{aligned} \rightarrow \sum F_x &= 0 \\ -E_x + T\left(\frac{3}{5}\right) &= 0 \end{aligned}$$

در نتیجه خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} E_x &= 90 \text{ kN} \leftarrow \\ \uparrow \sum F_y &= 0 \\ -4(20) - T\left(\frac{4}{5}\right) + E_y &= 0 \Rightarrow E_y = 200 \text{ kN} \uparrow \\ \sum M_E &= 0 \Rightarrow \\ -M_E + 20(1.8)(1+2+3+4) - 6T\left(\frac{3}{5}\right) &= 0 \\ \Rightarrow M_E &= -180 \text{ (kN.m)} \end{aligned}$$

### تعدادل جسم تحت اثر دو نیرو

بعضی از اوقات یک جسم امکان دارد تحت اثر فقط دو نیرو قرار گیرد، در این حالت به آن جسم دو نیرویی می گویند . در این حالت دو نیرو می بایستی در یک راستا و مخالف جهت یکدیگر باشند.

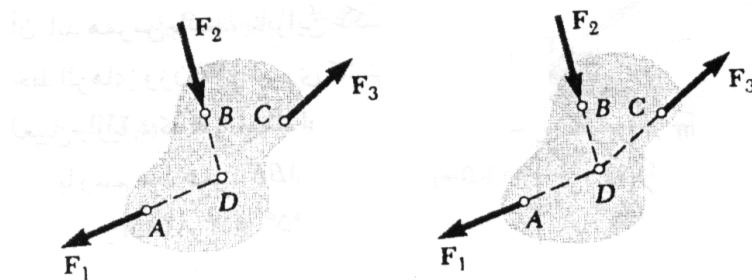


بنابراین دو نیرو باید در یک راستا و با هم برابر باشند.

$$\sum \vec{F} = 0, \sum \vec{M} = 0$$

### تعدادل جسم تحت اثر سه نیرو

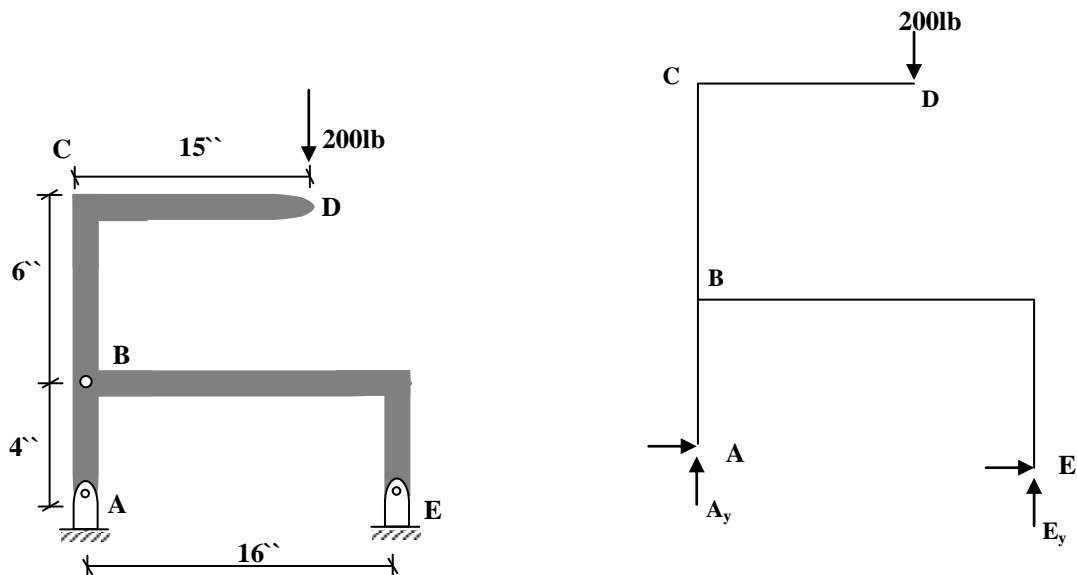
در بعضی از مواقع یک جسم امکان دارد تحت اثر سه نیرو قرار گیرد در این حالت به آن جسم سه نیرویی می گویند در این حالت سه نیرو می بایستی از یک نقطه عبور کنند و یا با هم موازی باشند.



$$\sum \vec{F} = 0, \sum \vec{M} = 0$$

اگر نیروها با هم موازی نباشند باید سه نیرو هم‌رس باشند تا جسم در تعادل باشد. با استفاده از قانون سینوس ها می توان مقادیر محصول را بدست آورد.

مثال: مطلوب است عکس العمل تکیه گاه در A و E



با گشتاور گرفتن نسبت به G به آسانی داریم:

$$A_y = E_y = 100(N)$$

برایند سه نیروی E.A.P برابر صفر و این سه نیرو در H هم‌رسند.

$$\frac{E_x}{E_y} = \frac{GE}{GT} \text{ داریم:}$$

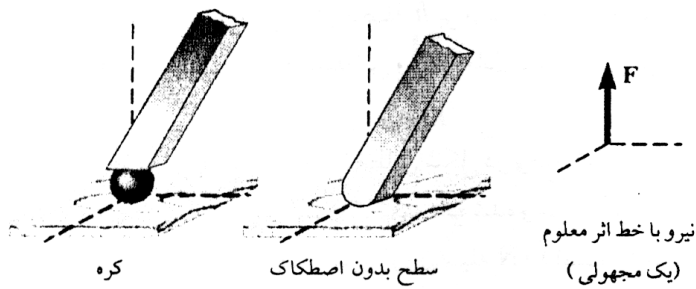
تعداد سه بعدی:

$$\sum \vec{F} = 0 \Rightarrow \sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum F_z = 0$$

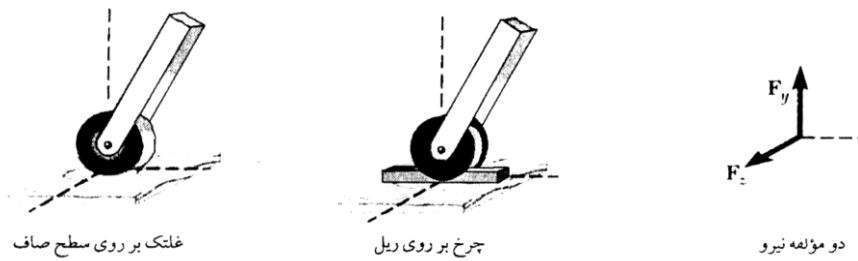
$$\sum \vec{M} = 0 \Rightarrow \sum M_x = 0, \sum M_y = 0, \sum M_z = 0$$

تکیه گاههای سه بعدی

(1) تکیه گاههایی با یک عکس العمل:



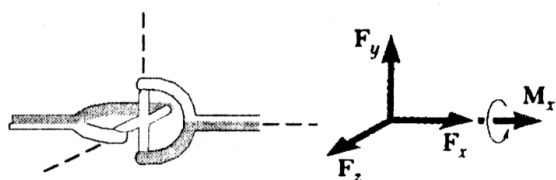
(2) تکیه گاههای با دو عکس العمل



(3) تکیه گاههایی با سه عکس العمل



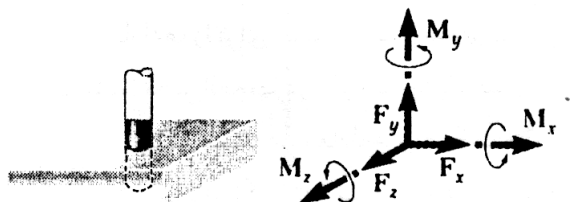
(4) تکیه گاههای دارای چهار عکس العمل



اتصال گردان

سه مؤلفه نیرو و یک کوپل

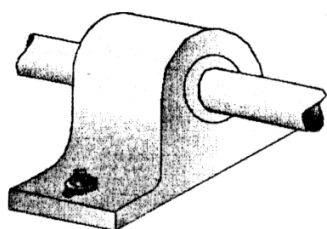
(5) تکیه گاههای با شش عکس العمل



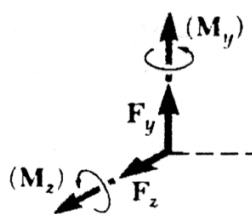
تکیه گاه ثابت

سه مؤلفه نیرو و سه کوپل

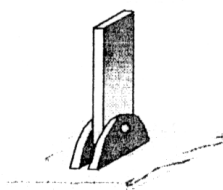
(6) تکیه گاه یاتاقان



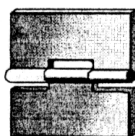
لولای و یاتاقان برای نگهداری بار شعاعی



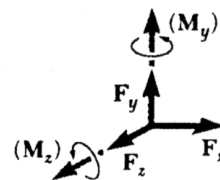
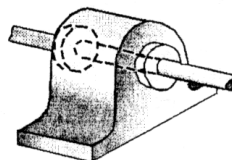
مؤلفه های دو نیرو (ودو کوپل)



پین و دیوارکوب

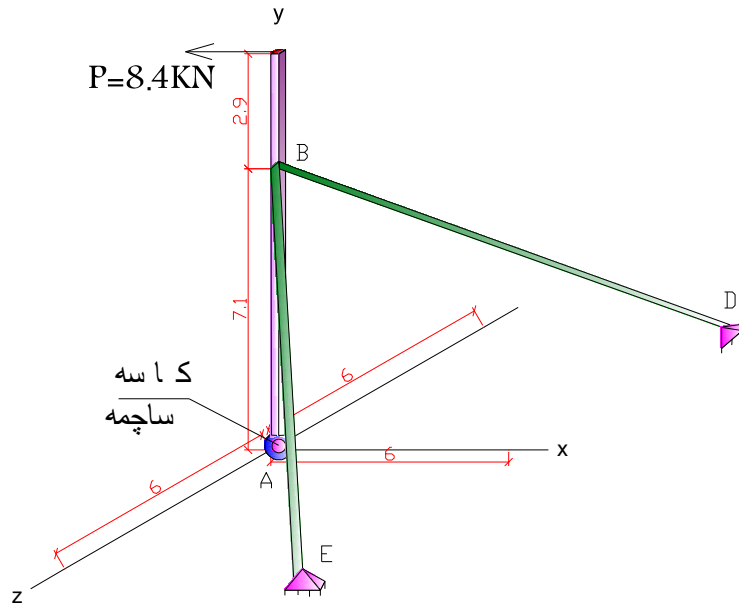


لولای و یاتاقان برای نگهداری فشارمحوری و بارشعاعی



سه مؤلفه نیرو (ودو کوپل)

مثال: مطلوب است عکس العمل تکیه گاه A و نیروهای کشش در کابل های BD و BE



معادلات

$$\sum F_x = 0 \quad \sum F_y = 0 \quad \sum F_z = 0$$

$$\sum M_x = 0 \quad \sum M_y = 0 \quad \sum M_z = 0$$

تقارن نسبت به صفحه xy:

$$A_x = 0$$

$$T_{BD} = T_{BE}$$

$$\vec{T}_{BD} = T_{BD} \vec{\lambda}_{BD} = T_{BD} \left( \frac{6\vec{i} - 7\vec{j} - 6\vec{k}}{h} \right)$$

و داریم:

$$\vec{T}_{BE} = T_{BE} \vec{\lambda}_{BE} = T_{BE} \left( \frac{6\vec{i} - 7\vec{j} + 6\vec{k}}{h} \right)$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow -8.4 + A_x + \frac{T_{BE}}{h}(6) + \frac{T_{BD}}{h}(6) = 0$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow A_y - \frac{T_{BD}}{h}(7) - \frac{T_{BE}}{h}(7) = 0$$

$$\sum M_A = 0 \Rightarrow \sum \vec{r}_i \times \vec{F}_i = 0$$

$$(10\vec{j}) \times (-8.4\vec{i}) + (7\vec{j}) \times \vec{T}_{BD} + 7\vec{j} \times \vec{T}_{BE} = 0$$

و داریم:

$$\sum M_z = 0$$

$$10 \times (8.4) - \frac{4}{11} T_{AD}(7) - \frac{4}{11} T_{AE}(7) = 0$$

$$T_{AD} = T_{AE} = 11(KN)$$

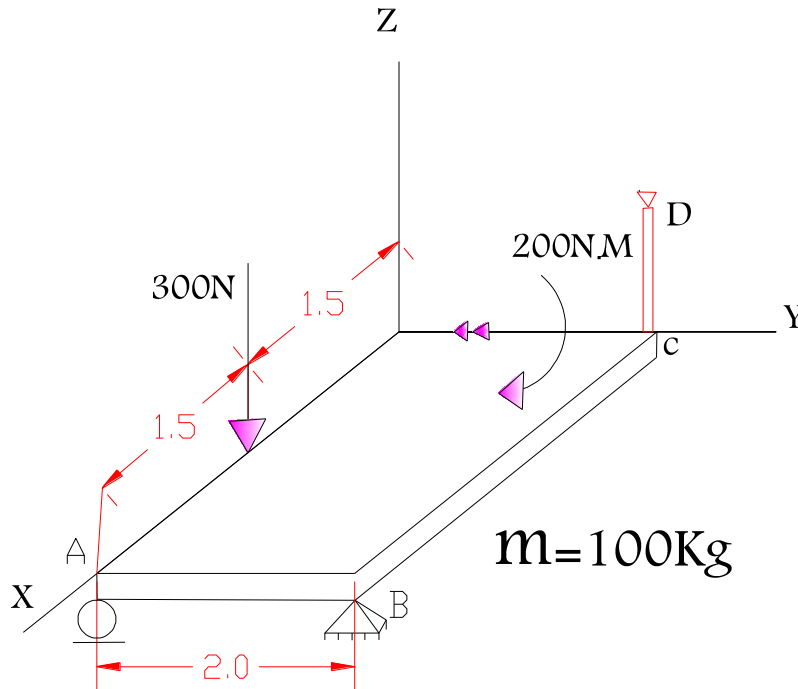
$$A_x = -3.6(KN) \leftarrow$$

$$A_y = 14(kN) \uparrow$$

مثال: جرم 100kg مطلوب است تعیین عکس العمل ها.

تعداد معادلات مجهول 6

تعداد مجهولات 5



$$\sum F_x = 0 \rightarrow B_x = 0$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow B_y = 0$$

$$\sum F_z = 0 \Rightarrow A_z + B_z - 300 - 981 + T_{CD} = 0$$

$$\sum M_{ox} = 0 \Rightarrow T_{CD}(2) + B_z(2) - 981(1) = 0$$

$$\sum M_{oy} = 0$$

$$\Rightarrow -200 + 300(1.5) + 981(1.5) - A_z(3) - B_z(3) = 0$$

$$A_z = 790 \text{ N} \uparrow$$

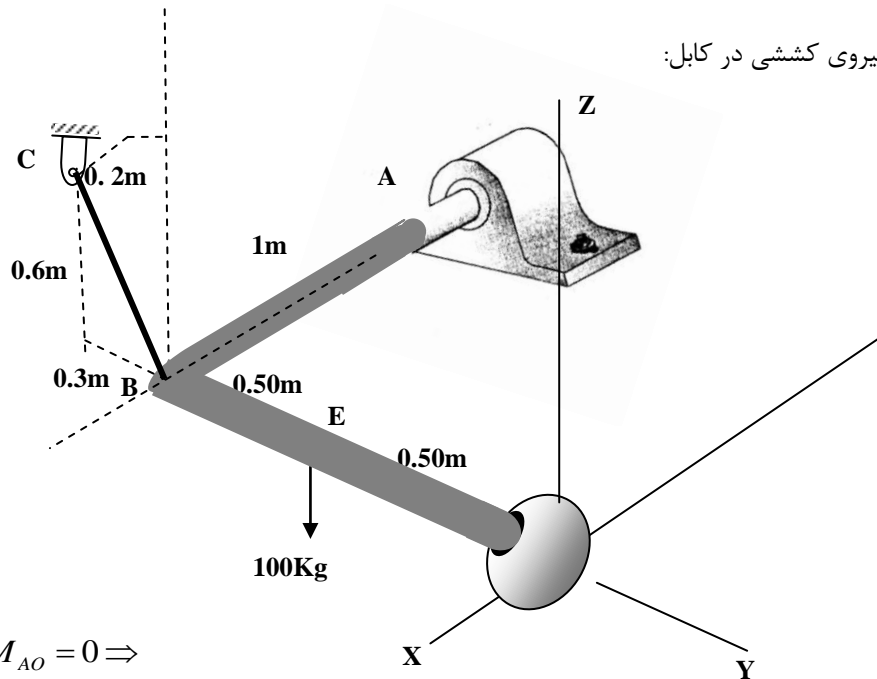
$$B_z = -219 \text{ N} \downarrow$$

$$T_{CD} = 707 \text{ N}$$

از آنجایی که نیرویی وجود ندارد که حول محور Z ایجاد لنگر کند داریم :

$$\sum M_{OZ} = 0$$

مثال: مطلوب است نیروی کششی در کابل:



$$\sum M_{AO} = 0 \Rightarrow$$

$$\lambda_{OA} \cdot \left( \sum r_i \times F_i \right) = 0$$

$$\lambda_{OA} \cdot \left( \vec{r}_{OB} \times \vec{T}_{BC} + \vec{r}_{OE} \times (-981\vec{k}) \right)$$

$$\vec{r}_{OA} = -\vec{i} - \vec{j}$$

$$\vec{r}_{OB} = -\vec{j}$$

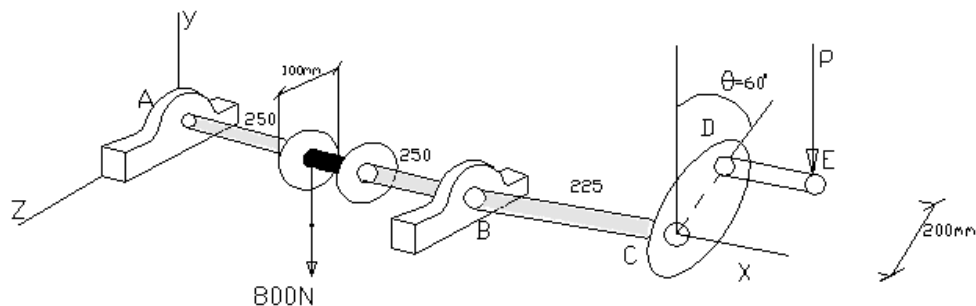
$$\vec{T} = T_{BC} \lambda_{AC} = T_{BC} \left( \frac{0.2\vec{i} - 0.3\vec{j} + 0.6\vec{k}}{0.7} \right)$$

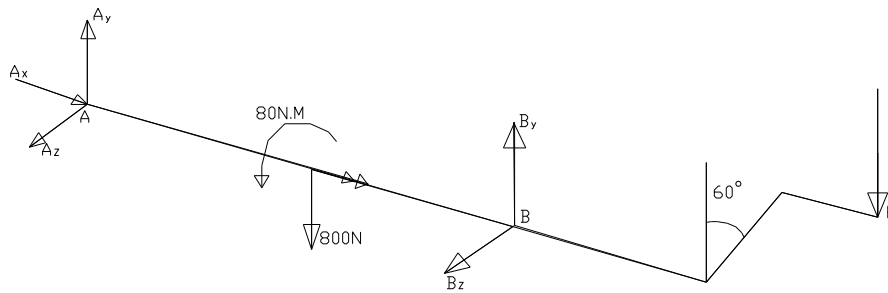
$$\lambda_{OA} = \frac{\vec{OA}}{|\vec{OA}|} = \frac{-\vec{i} - \vec{j}}{\sqrt{2}}$$

$$\Rightarrow T_{BC} = 572 \text{ (N)}$$

$$\Rightarrow T_{BD} = 572 \left( \frac{0.2\vec{i} - 0.3\vec{j} + 0.6\vec{k}}{0.7} \right)$$

مثال: مطلوب است عکس العمل تکیه گاهها و نیروی P جهت ایجاد تعادل





$$\sum F = 0 \Rightarrow$$

$$A_x \vec{i} + A_y \vec{j} + A_z \vec{k} + B_y \vec{j} + B_z \vec{k} - 800 \vec{j} - P \vec{j} = 0$$

از طرفی داریم:

$$\sum M_x = 0 \Rightarrow 80 - 0.2p \sin 60 = 0$$

$$\Rightarrow p = 462 (N)$$

حل از رابطه (1) داریم:

$$\begin{cases} A_x = 0 \\ A_y + B_y - 80 - 462 = 0 \\ A_z + B_z = 0 \end{cases}$$

$$\sum M_A = 0 \Rightarrow (0.25 \vec{i} + 0.1 \vec{k}) \times (-800 \vec{j}) + (0.5 \vec{j}) \times (B_y \vec{j} + B_z \vec{k}) + (0.8 \vec{i} + 0.2 \cos 60 \vec{j} - 0.2 \sin 60 \vec{k}) \times (-462 \vec{j}) = 0 \vec{j}$$

$$\sum M_y = 0 \Rightarrow 0.5 B_z = 0 \rightarrow B_z = 0$$

$$\sum M_z = 0 \Rightarrow -2 + 0.5 B_y - 0.8(462) = 0 \rightarrow B_y = 1139 (N)$$

$$\rightarrow A_z = 0$$

$$\rightarrow A_y = 123 (N)$$

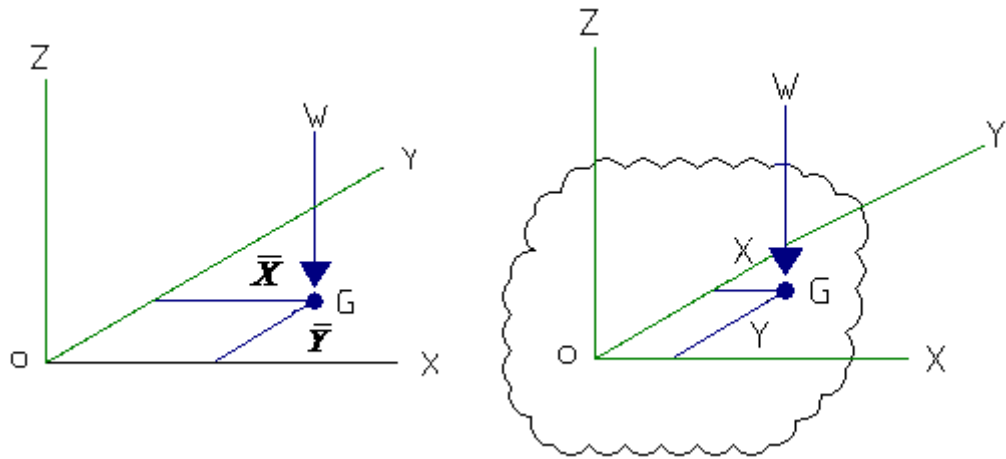
فصل پنجم

# نیروهای گسترده ، مرکزهای هندسی و مرکزهای گرانی

## مرکز ثقل‌ها و مرکز سطوح :

### مرکز ثقل سطوح :

مثلا در فصل‌های قبلی گفتیم که وزن یک جسم را که نیرویی است که بر آن جسم وارد می‌شود می‌توانیم بصورت یک نیروی تنها در یک نقطه قرار دهیم. این نیرو کلاً بصورت بار گسترده‌ای است که بر آن جسم وارد می‌شود، ولی می‌توان به جای آنها از سیستم نیروی معادل استفاده کرد و تمام آن و یا برآیند آنها را در یک نقطه که به آن نقطه مرکز ثقل می‌نامیم قرار دهیم.



مختصات مرکز ثقل جسم دو بعدی نسبت به دستگاه X,Y,Z

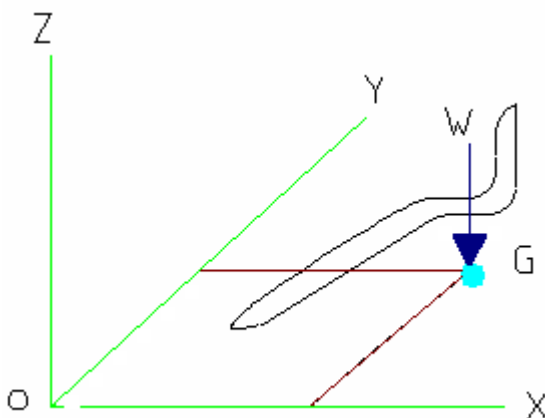
$$W = \sum \Delta w_i = \Delta w_1 + \Delta w_2 + \Delta w_3 + \dots + \Delta w_n$$

$$\bar{X}W = x_1\Delta w_1 + x_2\Delta w_2 + x_3\Delta w_3 + \dots + x_n\Delta w_n = \sum x_i\Delta w_i$$

$$\bar{Y}W = y_1\Delta w_1 + y_2\Delta w_2 + y_3\Delta w_3 + \dots + y_n\Delta w_n = \sum y_i\Delta w_i$$

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i\Delta w_i}{W}, \bar{Y} = \frac{\sum y_i\Delta w_i}{W}, W = \sum \Delta w_i$$

$$\bar{X} = \frac{\int xdw}{W}, \bar{Y} = \frac{\int ydw}{W}, W = \int dw$$



$$G(X, Y) = (\bar{X}, \bar{Y})$$

مراکز سطوح و خطوط :

هنگامیکه جسمی در یک صفحه دارای ضخامت یکنواخت و جنس هموژنیس و یا یکسان ( همگن ) باشد می توان نوشت :

$$\Delta W = \gamma.t.\Delta A \quad \Delta A = \text{مساحت} \quad t = \text{ضخامت} \quad \gamma = \text{وزن مخصوص}$$

$$W = \int dw = \int \gamma.t.\Delta A = \gamma.t \int dA$$

$$A = \int dA$$

$$\int xdw = \int x\gamma.t.dA = \gamma.t \int x dA$$

$$\int ydw = \int y\gamma.t.dA = \gamma.t \int y dA$$

$$\bar{X} = \frac{\int xdw}{W} = \frac{\int x dA}{A}$$

$$\bar{Y} = \frac{\int ydw}{W} = \frac{\int y dA}{A}$$

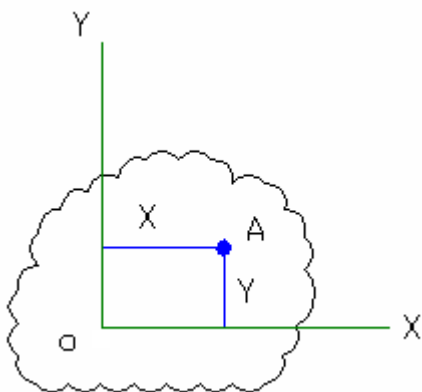
مراکز سطح یک جسم دو بعدی نسبت به دستگاه مختصات X,Y,Z

پس اگر یک جسمی دو بعدی دارای ضخامتی یکنواخت و جنس همگنی باشد، نقطه مرکز سطح با نقطه مرکز ثقل در یک نقطه قرار می گیرد.

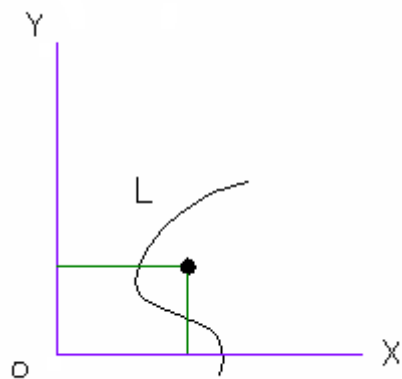
$$\int x dA = \text{گشتاور مساحت A نسبت به محور y می نامند}$$

$$\int y dA = \text{گشتاور مساحت A نسبت به محور x می نامند}$$

$$C(X,Y) = (\bar{X}, \bar{Y})$$



برای یک مفتول یا سیم :



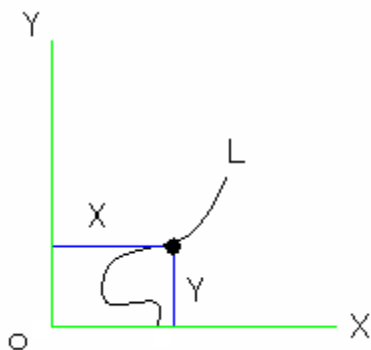
$$\Delta W = \gamma \cdot a \Delta L$$

$$\Delta L = \text{طول}$$

$$a = \text{مساحت سطح مقطع سیم}$$

$$\gamma = \text{وزن مخصوص}$$

$$\bar{X} = \frac{\int x dL}{L}, \bar{Y} = \frac{\int y dL}{L}$$



محورهای تقارن :

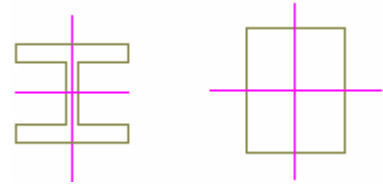
تقارن با یک محور:



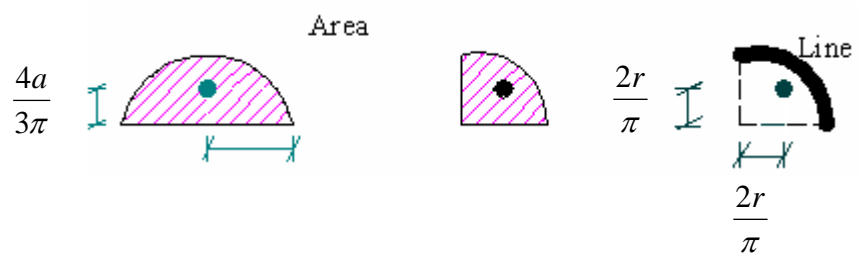
تقارن نسبت به یک نقطه



تقارن با دو محور

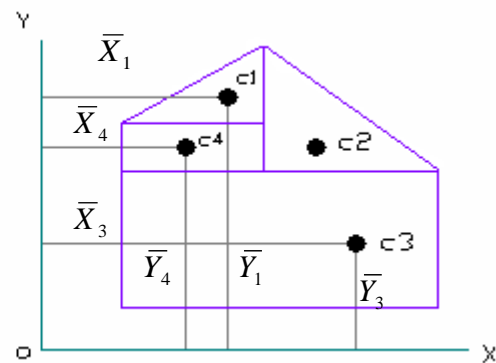
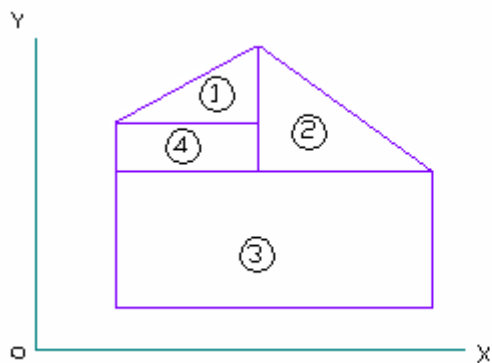


مرکز سطح اشکال عمومی



سطوح و خطوط مختلط :

در خیلی از موارد یک جسم دو بعدی و یا یک خط از چندین مقطع مختلط تشکیل می شود مانند دایره و مستطیل و یا مثلث . در اینگونه موارد می توان آن سطح را به اشکال منتظم هندسی تقسیم کرد و از روابط گذشته استفاده کرد و مرکز سطح را بدست آورد.



مرکز سطح قسمت یک =  $C_1$

مرکز سطح قسمت دو =  $C_2$

مرکز سطح قسمت سه =  $C_3$

مرکز سطح قسمت چهار =  $C_4$

$$A = \sum A_i = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$$

$$\bar{X}_1 A_1 + \bar{X}_2 A_2 + \bar{X}_3 A_3 + \bar{X}_4 A_4 = \bar{X} A$$

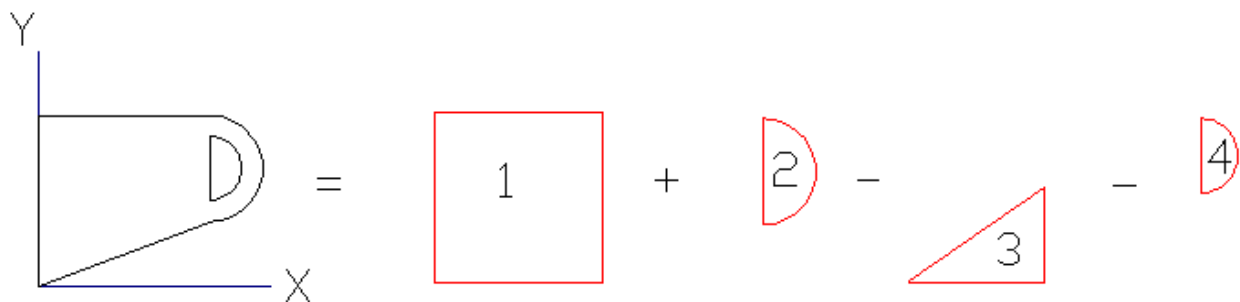
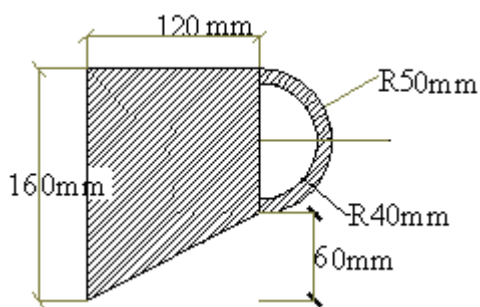
$$\bar{Y}_1 A_1 + \bar{Y}_2 A_2 + \bar{Y}_3 A_3 + \bar{Y}_4 A_4 = \bar{Y} A$$

$$A = \sum A_i$$

$$\bar{X} = \frac{\int \bar{x}_i dA_i}{A}$$

$$\bar{Y} = \frac{\int \bar{y}_i dA_i}{A}$$

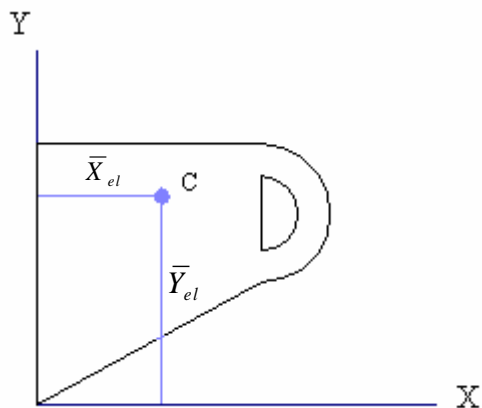
مثال: مختصات مرکز سطح شکل زیر را بدست آورید.



قسمت	علامت	$A \text{ (mm}^2\text{)}$	$\bar{X}_i$	$\bar{Y}_i$	$AX_i$	$AY_i$
1	+	$120 \times 160 = 19,200$	60	80	1,152,000	1,536,000
2	+	$\frac{\pi \cdot (50)^2}{2} = 3927$	$120 + \frac{40(50)}{3\pi} = 140$	110	553,707	431,970
3	-	$\frac{120 \times 160}{2} = 3600$	80	20	-288,000	-72,000
4	-	$\frac{\pi \cdot (40)^2}{2} = 2513$	$120 + \frac{4(40)}{3\pi} = 137$	110	-344,281	-276,430
کلی		17140			1,073,426	1,614,540

$$\bar{X} = \frac{\sum Ax_i}{\sum A_i} = \frac{1073426}{17140} = 62.6(mm)$$

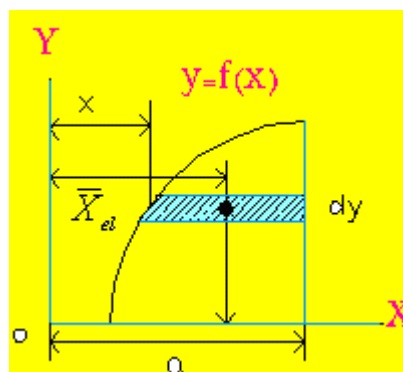
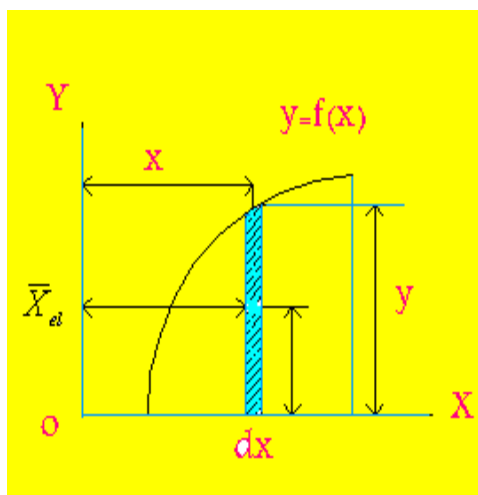
$$\bar{Y} = \frac{\sum Ay_i}{\sum A_i} = \frac{1619540}{17140} = 94.5(mm)$$



بدست آوردن مرکز سطح به روش انتگرال گیری :

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

برای سطوحی که اشکال منتظم هندسی نداشته باشند و از اشکال نامنتظم و یا اشکالی که اطراف آن ها سطح از منحنی های مختلف است ، تشکیل شده باشند ، می توان از روش انتگرال گیری استفاده کرد و مرکز سطح را بدست آورد :



مرکز سطح ریمان برای شکل 1 ( سمت راست ) :

$$\bar{X}_{el} = x, \bar{Y}_{el} = \frac{y}{2}$$

مرکز سطح ریمان برای شکل 2 (سمت چپ ) :

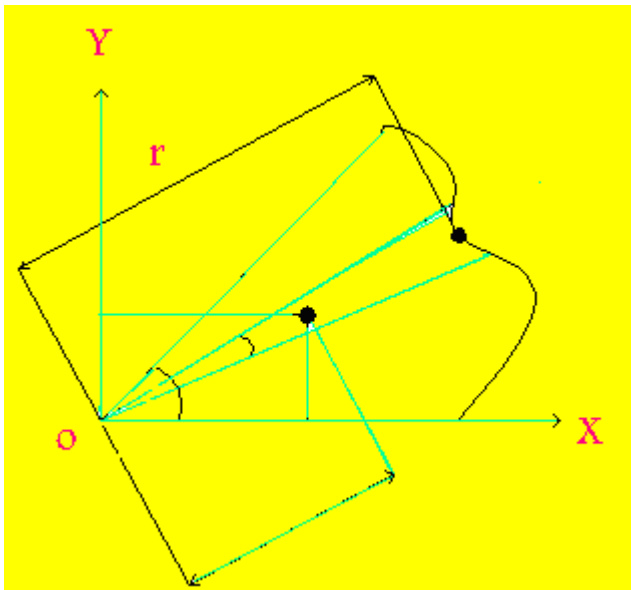
$$\bar{X}_{el} = \frac{a+x}{2}, \bar{Y}_{el} = y$$

مساحت ریمان برای شکل 1 (سمت راست ) :

$$dA = ydx$$

مساحت ریمان برای شکل 2 (سمت چپ ) :

$$dA = (a-x)dy$$



$$\bar{X}_{el} = \frac{2r}{3} \cos \theta$$

$$\bar{Y}_{el} = \frac{2r}{3} \sin \theta$$

$$dA = \frac{1}{2} r(r d\theta) = \frac{1}{2} r^2 d\theta$$

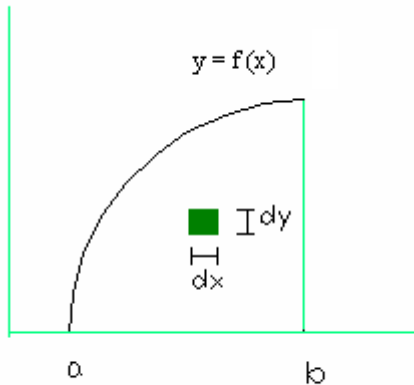
گشتاور اولیه نسبت محور y :

$$\sum M_y : A\bar{X} = \int \bar{X}_{el} dA$$

### گشتاور اولیه نسبت محور X :

$$\sum M_x : A\bar{Y} = \int \bar{Y}_{el} dA$$

برای بدست آوردن مرکز سطح از فرمول فوق استفاده می کنیم و باید  $X_{el}$  و  $Y_{el}$  را بر حسب X و Y جایگزین کرده و  $dA$  را بر حسب X و Y محاسبه کنیم ، سپس  $\bar{X}$  و  $\bar{Y}$  را به دست آوریم .  
برای شکل زیر داریم :

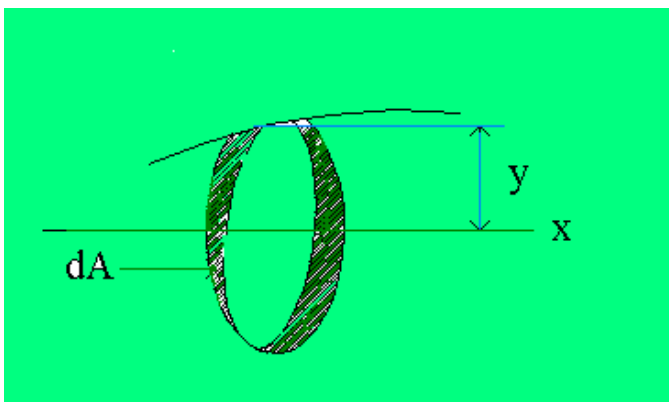


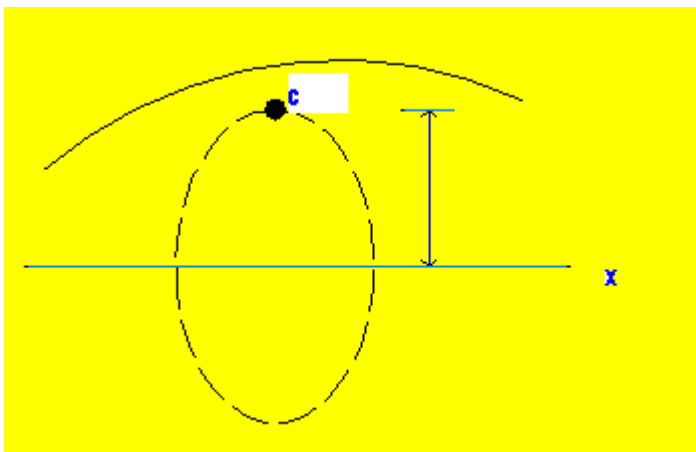
$$\int x dA = \int \int x dy dx = \int x \left( \int dy \right) dx = \int_a^b x \left( \int_0^{f(x)} dy \right) dx$$

### تئوری پاپیوس - گلدینیوس :

#### تئوری اول :

سطح یک منحنی دورانی برابر است با طول آن منحنی ضرب در فاصله ای که مرکز سطح آن منحنی می پیماید ، تا آن سطح به وجود آید .





$$dA = (2\pi \cdot y) dL$$

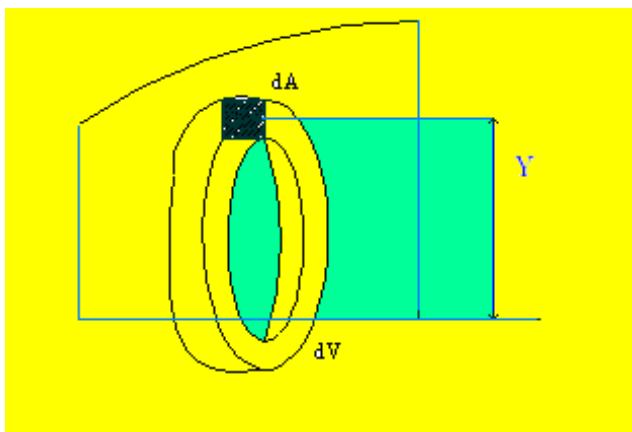
$$A = \int 2\pi \cdot y dL$$

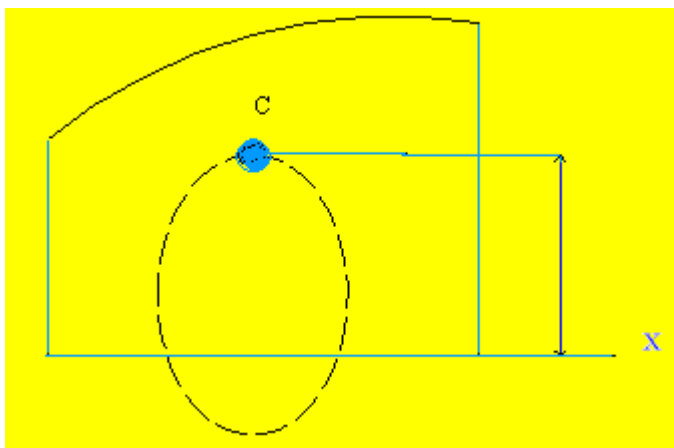
$$\int y dL = \bar{Y} L$$

$$A = 2\pi \cdot \bar{Y} L$$

### تئوری دوم :

حجم جسمی که از دوران یک منحنی حول یک محور بدست می آید برابر است با سطح مقطع آن جسم ضرب در فاصله ای که مرکز سطح آن منحنی هنگام دوران می پیماید .





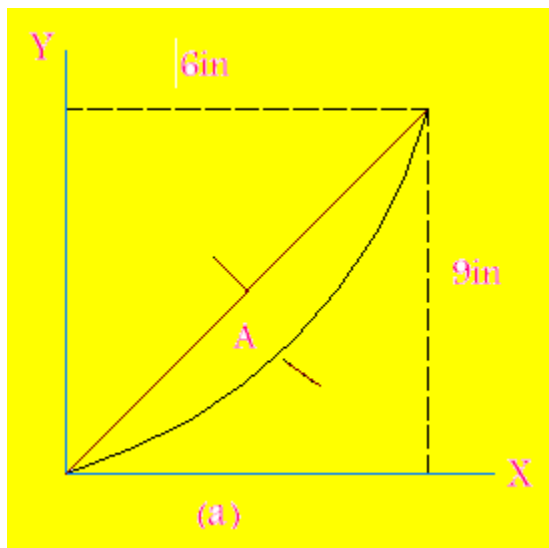
$$V = \int dv$$

$$dv = 2\pi \cdot y dA$$

$$V = \int 2\pi \cdot y dA$$

$$\int y dA = \bar{Y}A \Rightarrow V = 2\pi \cdot \bar{Y}A$$

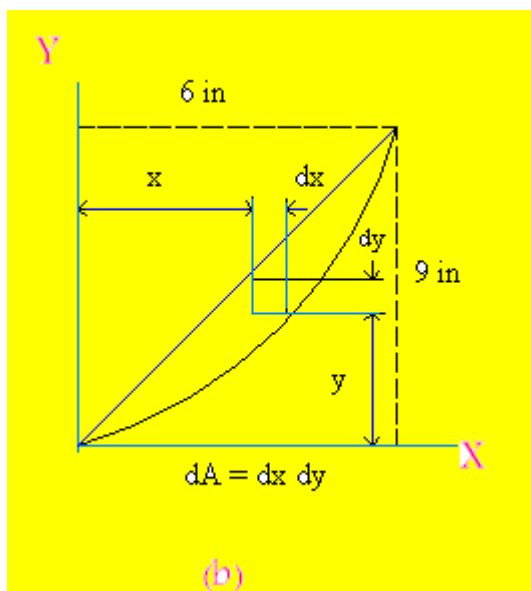
**مثال:** مطلوب است : محورهای مرکز سطح که بین خط مستقیم  $x = \frac{2y}{3}$  و سهمی  $x^2 = 4y$  قرار گرفته اند ( شکل a ). از روشهای (1) انتگرال دوگانه، (2) انتگرال ساده با استفاده از المان دیفرانسیل سطح افقی، (3) انتگرال ساده با استفاده از المان دیفرانسیل سطح عمودی، استفاده کنید ( X و Y بر اساس اینچ ) .



حل :

قسمت اول - انتگرال دوگانه :

المان دیفرانسیل سطح دوگانه در شکل b نشان داده شده است. بر اساس اینکه بخواهیم نسبت به X یا Y انتگرال بگیریم dA را می توان به صورت  $dx \cdot dy$  یا  $dy \cdot dx$  نوشت. پس ابتدا نسبت به Y انتگرال می گیریم، مساحت برابر است با :



$$A = \int dA = \int_0^6 \left( \int_{\frac{x^2}{4}}^{\frac{3x}{2}} dy \right) dx$$

$$= \int_0^6 \left( \frac{3x}{2} - \frac{x^2}{4} \right) dx = 9(in^2).$$

اولین لحظه سطح برای محور Y برابر است با :

$$Q_y = \int_A x dA = \int_0^6 \left( \int_{\frac{x^2}{4}}^{\frac{3x}{2}} x dy \right) dx$$

$$= \int_0^6 \left( \frac{3x}{2} - \frac{x^2}{4} \right) x dx = 279(in^3).$$

اولین لحظه سطح برای محور X برابر است با :

$$Q_x = \int_A y dA = \int_0^6 \left( \int_{\frac{x^2}{4}}^{\frac{3x}{2}} y dy \right) dx$$

$$= \int_0^6 \frac{1}{2} \left( \frac{9x^2}{4} - \frac{x^4}{16} \right) dx = 32.4(in^3).$$

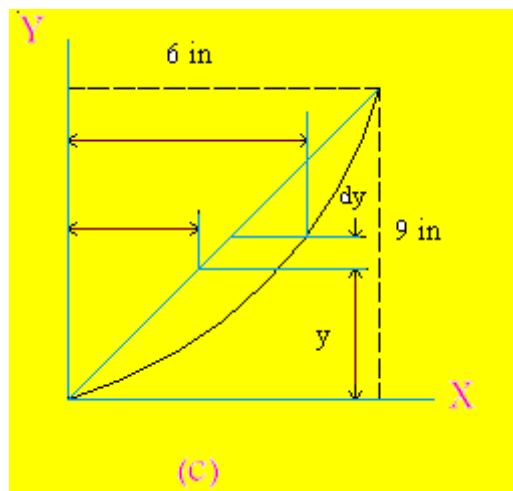
بنابراین محورهای مرکز سطح برابر است با :

$$\bar{X} = \frac{Q_y}{A} = \frac{27}{9} = 3(in.)$$

$$\bar{Y} = \frac{Q_x}{A} = \frac{32.4}{9} = 3.6(in.).$$

اگر ابتدا نسبت به X انتگرال می گرفتیم ، آنگاه داشتیم :

$$A = \int dA = \int_0^9 \left( \int_{\frac{2y}{3}}^{-2\sqrt{y}} dx \right) dy$$



$$Q_y = \int_A x dA = \int_0^9 \left( \int_{\frac{2y}{3}}^{-2\sqrt{y}} x dx \right) dy$$

$$Q_x = \int_A y dA = \int_0^9 \left( \int_{\frac{2y}{3}}^{-2\sqrt{y}} y dx \right) dy$$

توجه داریم که این انتگرالها معادل انتگرالهای قبلی است.

قسمت دوم - انتگرال ساده با استفاده از المان دیفرانسیل سطح افقی :

در شکل c ، dA و  $\bar{X}_{el}$  مشخص شده اند پس برای محاسبه مساحت داریم :

$$A = \int_A dA = \int_0^9 \left( 2\sqrt{y} - \frac{2y}{3} \right) dy = 9(in^2)$$

$$dQ_y = \bar{X}_{el} dA \Rightarrow dQ_y = \frac{1}{2} \left( 2\sqrt{y} + \frac{2y}{3} \right) \left( 2\sqrt{y} - \frac{2y}{3} \right) dy = \left( 2y - \frac{2y^2}{9} \right) dy$$

اولین لحظه سطح برای محور Y برابر است با :

$$Q_y = \int_0^9 \left( 2y - \frac{2y^2}{9} \right) dy = 27(in^3).$$

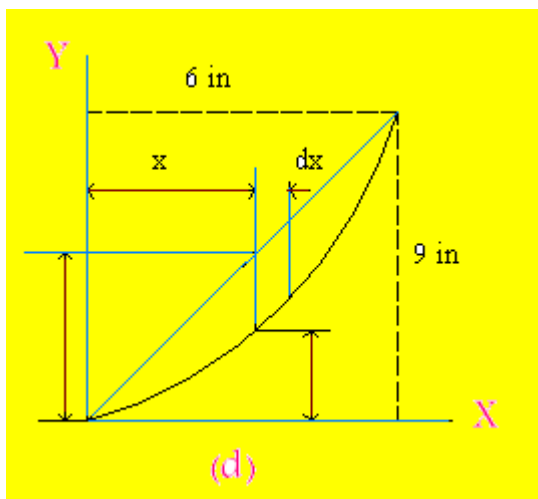
$$dQ_x = y dA \Rightarrow dQ_x = y \left( 2\sqrt{y} - \frac{2y}{3} \right) dy = \left( 2y^{\frac{3}{2}} - \frac{2y^2}{3} \right) dy$$

اولین لحظه سطح برای محور X برابر است با :

$$Q_x = \int_0^9 \left( 2y^{\frac{3}{2}} - \frac{2y^2}{3} \right) dy = 32.4(in^3).$$

توجه شود که  $A$ ،  $Q_x$  و  $Q_y$  برابر همان مقدارهای حساب شده در قسمت اول اند، بنابراین محورهای مرکز سطح نیز همان است.

قسمت سوم - انتگرال ساده بلاستفاده از المان دیفرانسیل سطح عمودی :  
در شکل  $d$ ،  $dA$  و  $\bar{Y}_{el}$  مشخص شده اند. پس برای محاسبه مساحت داریم :



$$A = \int_A dA = \int_0^6 \left( \frac{3x}{2} - \frac{x^2}{4} \right) dx = 9(in^2).$$

با استفاده از اطلاعات موجود در شکل  $d$  داریم:

$$dQ_y = x dA = x \left( \frac{3x}{2} - \frac{x^2}{4} \right) dx$$

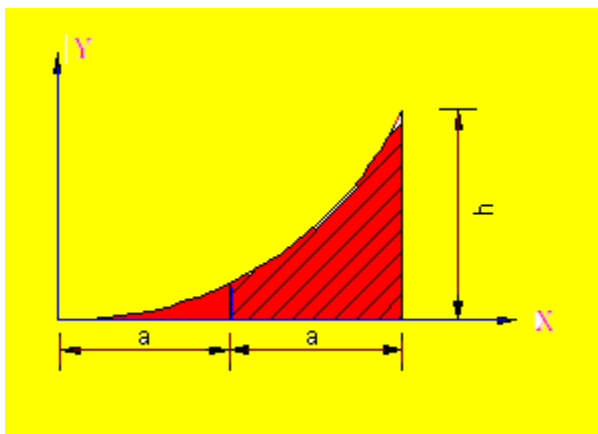
بنابراین اولین لحظه برای محور  $y$  برابر است با:

$$Q_y = \int_A dQ_y = \int_0^6 \left( \frac{3x^2}{2} - \frac{x^3}{4} \right) dx = 27(in^3).$$

$$dQ_x = \bar{y}_{el} dA \Rightarrow dQ_x = \frac{1}{2} \left( \frac{3x}{2} + \frac{x^2}{4} \right) \left( \frac{3x}{2} - \frac{x^2}{4} \right) dx = \frac{1}{2} \left( \frac{9x^2}{4} - \frac{x^4}{16} \right) dx$$

$$\Rightarrow Q_x = \int_A dQ_x = \int_0^6 \frac{1}{2} \left( \frac{9x^2}{4} - \frac{x^4}{16} \right) dx = 32.4(in^3).$$

مقادیر بدست آمده  $A$ ،  $Q_x$  و  $Q_y$  در قسمت بالا همان مقادیر بدست آمده در قسمت های 1 و 2 می باشند، بنابراین  $\bar{X}$  و  $\bar{Y}$  نیز همان مقادیر هستند.



مثال: مطلوبست مرکز سطح شکل مقابل:

$$y = kx^2$$

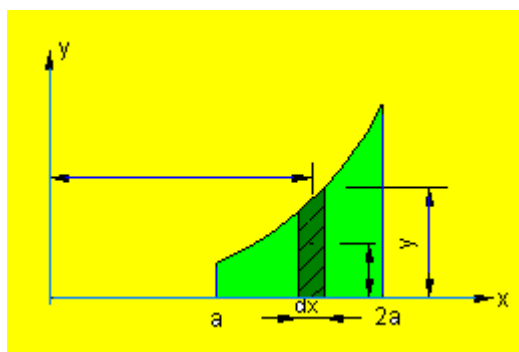
$$x = 2a, y = h: h = k(2a)^2 \Rightarrow k = \frac{h}{4a^2}$$

$$y = \frac{h}{4a^2} x^2$$

$$\bar{y}_{el} = \frac{1}{2} y = \frac{h}{8a^2} x^2$$

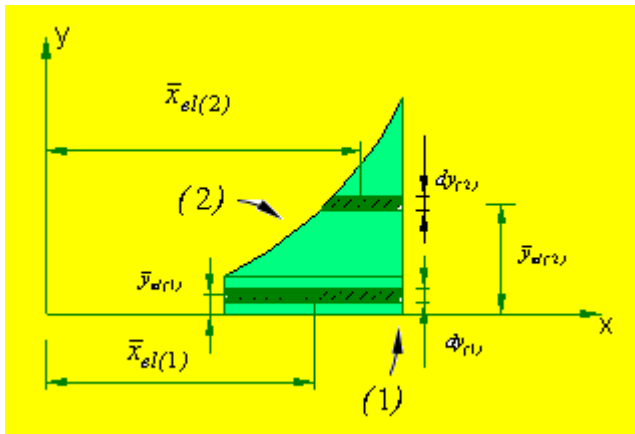
$$\bar{x}_{el} = x$$

$$dA = ydx = \frac{h}{4a^2} x^2 dx$$



$$A = \int dA = \frac{h}{4a^2} \int_a^{2a} x^2 dx = \frac{7}{12} ah$$

$$\left. \begin{aligned} \int \bar{x}_{el} dA &= \int_a^{2a} x \left( \frac{h}{4a^2} \right) x^2 dx = \frac{15}{16} ha^2 \\ \int \bar{y}_{el} dA &= \frac{1}{2} \int_a^{2a} \left( \frac{h}{4a^2} x^2 \right) dx = \frac{31}{160} h^2 a \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} \bar{x} &= \frac{\int \bar{x}_{el} dA}{\int dA} = \frac{45}{28} a = 1.61a \\ \bar{y} &= \frac{\int \bar{y}_{el} dA}{\int dA} = \frac{93}{280} h = 0.33h \end{aligned} \right.$$



$$\bar{y}_{el(1)} = y, \bar{x}_{el(1)} = \frac{3}{2}a$$

$$dA_{(1)} = ady$$

$$y = \frac{h}{4a^2}x^2 \Rightarrow x = 2a\sqrt{\frac{y}{h}}$$

$$\bar{y}_{el(2)} = y$$

$$\bar{x}_{el(2)} = \frac{2a+x}{2} = \frac{2a+2a\sqrt{\frac{y}{h}}}{2} = a\left(1+\sqrt{\frac{y}{h}}\right)$$

$$dA_{(2)} = (2a-x)dy = 2a\left(1-\sqrt{\frac{y}{h}}\right)dy$$

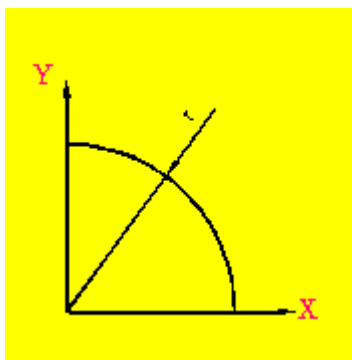
$$\bar{x}_{(2)} = \frac{\int \bar{x}_{el(2)}dA}{A_{(2)}}, \bar{y}_{(2)} = \frac{\int \bar{y}_{el(2)}dA}{A_{(2)}}$$

$$A = A_{(1)} + A_{(2)}$$

$$\rightarrow \bar{x} = \frac{\bar{x}_{(1)}A_{(1)} + \bar{x}_{(2)}A_{(2)}}{A}, \quad \bar{y} = \frac{\bar{y}_{(1)}A_{(1)} + \bar{y}_{(2)}A_{(2)}}{A}$$

**مثال:** منحنی مقابل یک چهارم دایره کامل می باشد . مرکز خط آنرا بدست آورید.

حل:



$$\bar{x} = \frac{\int \bar{x}_{el} dL}{L}, \quad \bar{y} = \frac{\int \bar{y}_{el} dL}{L}$$

به علت قرینه بودن این کمان حول زاویه  $45^\circ$  داریم :

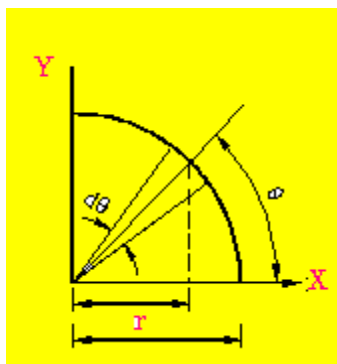
$$\bar{x} = \bar{y}$$

$$\bar{x}_{el} = r \cos \theta$$

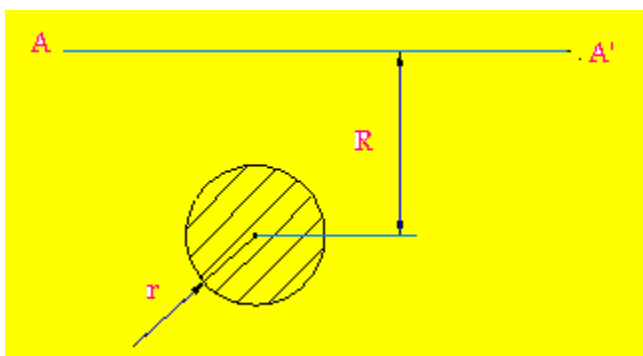
$$dL = r d\theta$$

$$\int \bar{x}_{el} dL = \int_0^{\frac{\pi}{2}} r^2 \cos \theta d\theta = r^2 \sin \theta \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} = r^2$$

$$\bar{x}L = \int \bar{x}_{el} dL \Rightarrow \bar{x} \left( \frac{1}{2} \pi r \right) = r^2 \Rightarrow \bar{x} = \bar{y} = \frac{2r}{\pi}$$



**مثال:** مطلوبست سطح دورانی و نیز حجم حاصل از دوران دایره به شعاع  $r$  و به فاصله  $R$  از محور  $AA'$  حول محور  $AA'$ .  
حل:



$$\text{سطح دورانی: } 2\pi\bar{y}L = 2\pi R(2\pi r) = 4\pi^2 r^2 R$$

$$\text{حجم دورانی: } 2\pi\bar{y}A = 2\pi R(\pi r^2) = 2\pi^2 r^2 R$$

مرکز ثقل اجسام سه بعدی:

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}W &= \int x dW \\ \bar{y}W &= \int y dW \\ \bar{z}W &= \int z dW \end{aligned} \right\} W = \gamma V$$

برای اجسام همگن داریم:

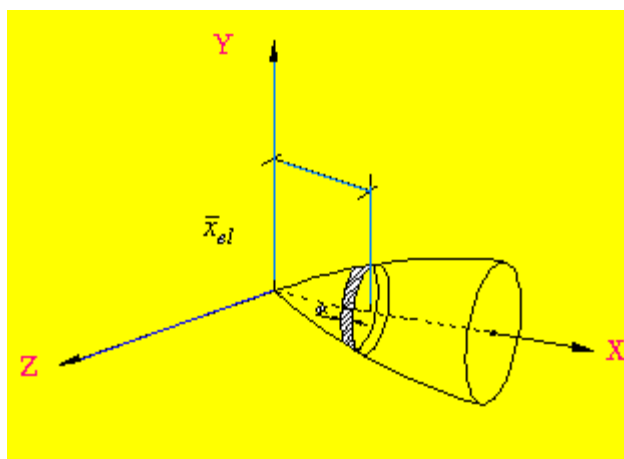
$$\bar{x}V = \int x dV, \bar{y}V = \int y dV, \bar{z}V = \int z dV$$

برای اجسام مختلط:

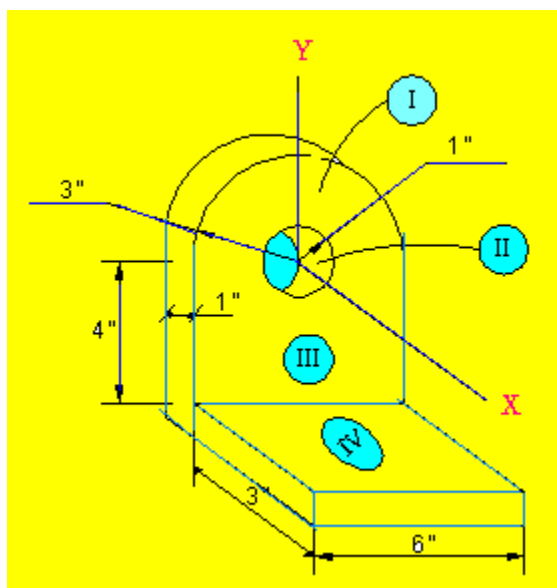
$$\begin{array}{lll} \bar{x}\Sigma W = \Sigma \bar{x}W & \bar{y}\Sigma W = \Sigma \bar{y}W & \bar{z}\Sigma W = \Sigma \bar{z}W \\ \bar{x}\Sigma V = \Sigma \bar{x}V & \bar{y}\Sigma V = \Sigma \bar{y}V & \bar{z}\Sigma V = \Sigma \bar{z}V \end{array}$$

بدست آوردن مرکز ثقل به وسیله انتگرال:

$$\begin{array}{lll} \bar{x}V = \int x dV & \bar{y}V = \int y dV & \bar{z}V = \int z dV \\ \bar{x}V = \int \bar{x}_{el} dV & \bar{y}V = \int \bar{y}_{el} dV & \bar{z}V = \int \bar{z}_{el} dV \end{array}$$



مثال: مرکز ثقل جسم روبرو را بدست بیاورید



حل:

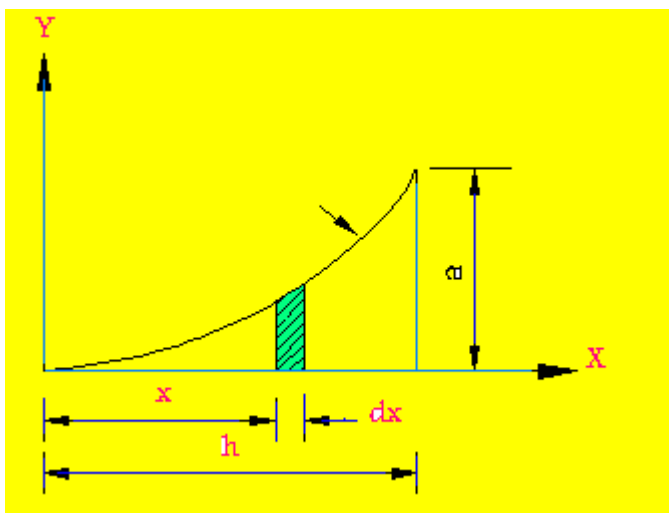
	$V(in^3)$	$\bar{x}(in)$	$\bar{y}(in)$	$\bar{y}V(in^4)$	$\bar{x}V(in^4)$
<i>I</i>	$\frac{\pi}{2}(3)^2 = 14.14$	$0$	$\frac{4}{3}\left(\frac{3}{\pi}\right) = 1.27$	$18$	$0$
<i>II</i>	$-\pi(1)^2 = -\pi$	$0$	$0$	$0$	$0$
<i>III</i>	$(1)(5)(6) = 30$	$0$	$-2.5$	$-75$	$0$
<i>IV</i>	$(3)(6)(1) = 18$	$2$	$-4.5$	$-81$	$36$
$\Sigma$	$59$			$-138$	$36$

$$\bar{x} = \frac{\Sigma \bar{x}V}{V} = \frac{36}{59} = 0.61"$$

$$\bar{y} = \frac{\Sigma \bar{y}V}{V} = \frac{-138}{59} = -2.34"$$

مثال: مرکز ثقل جسمی را که از دوران قسمت هاشور زده

در شکل روبرو حول محور X ایجاد می شود ، بدست آورید . معادله ی منحنی  $y = kx^n$  است.



حل:

$$dV = \pi r^2 dx = \pi k^2 x^{2n} dx$$

$$V = \int dV = \pi k^2 \int_0^h x^{2n} dx = \frac{\pi k^2 h^{2n+1}}{2n+1}$$

$$\int \bar{x}_{el} dV = \pi k^2 \int_0^h x^{2n+1} dx = \frac{\pi k^2 h^{2n+2}}{2n+2}$$

$$\bar{x}V = \int \bar{x}_{el} dV \Rightarrow \bar{x} \cdot \left( \frac{\pi k^2 h^{2n+1}}{2n+1} \right) = \frac{\pi k^2 h^{2n+2}}{2n+2}$$

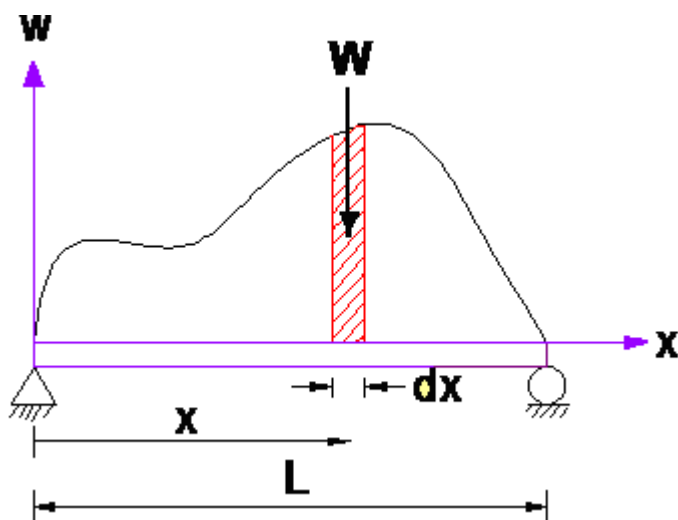
$$\bar{x} = \frac{2n+1}{2n+2} h$$

$$n=1 \Rightarrow \bar{x} = \frac{2(1)+1}{2(1)+2} h = \frac{3}{4} h \quad \text{برای مخروط}$$

$$n = \frac{1}{2} \Rightarrow \bar{x} = \frac{2}{3} h \quad \text{برای قطع مخروط}$$

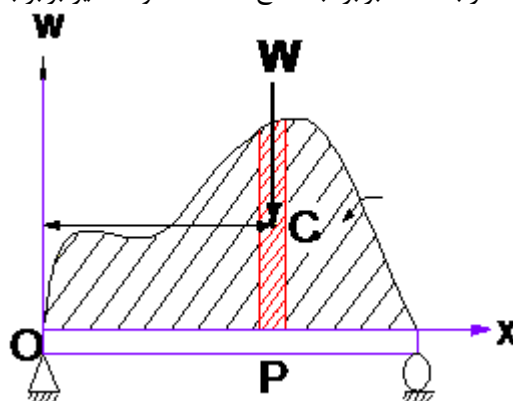
**توزیع نیرو روی میله ها:**

کاربرد مرکز سطح برای مسائل نیرو های موجود روی تیرها نیز می باشد. فرض می کنیم مصالح روی یک جسم مطابق شکل مقابل باشد. توسط شکل مقابل می توان توزیع بار بر حسب وزن بر واحد طول تیر را نشان داد.



$$dW = w dx \Rightarrow W = \int_0^L w dx$$

حاصلضرب  $w dx$  برابر با سطح  $dA$  است و  $W$  نیز برابر با سطح کل  $A$  می باشد.



$$W = \int dw$$

$$dw = w dx$$

$$A\bar{x} = \int x dA$$

$$(OP)W = \int x dw$$

$$(OP)W = \int_0^L x(w) dx$$

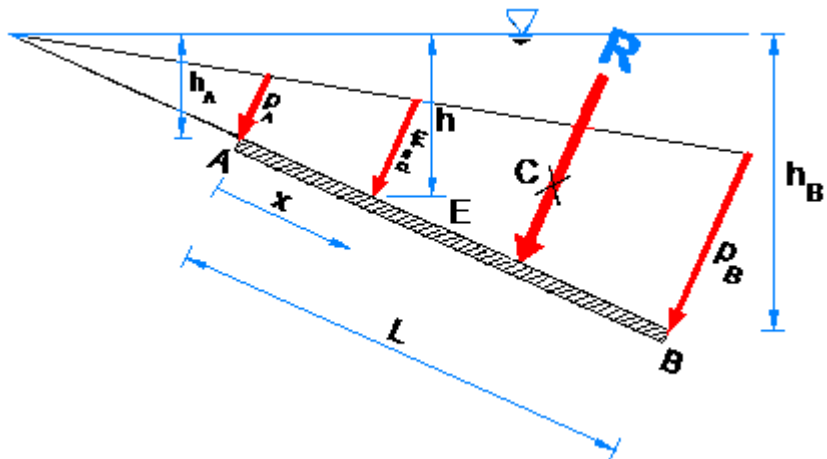
نیروهای وارده بر سطوح اجسام غوطه ور:

$$p = \gamma h$$

وزن مخصوص  $\gamma$

ارتفاع سطح تا سطح آزاد مایع  $h$

نقطه E مرکز سطح



نقطه C مرکز فشار

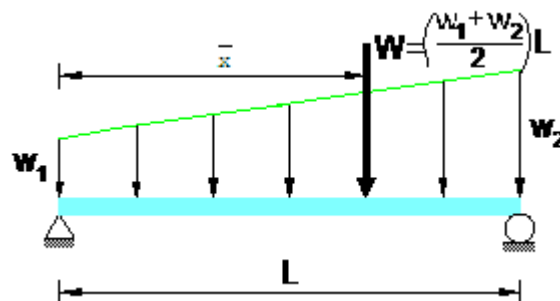
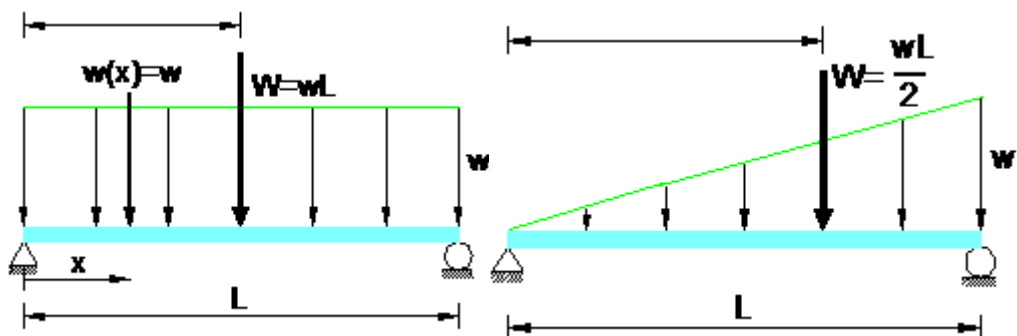
$$R = p_E L = \frac{1}{2} (p_A + p_B) L$$

فشار وارد بر صفحه (کل)

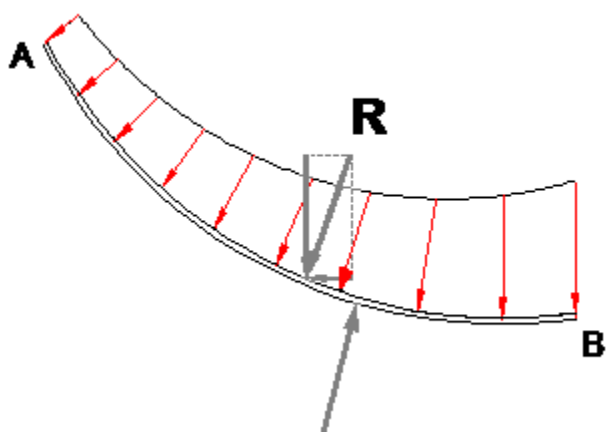
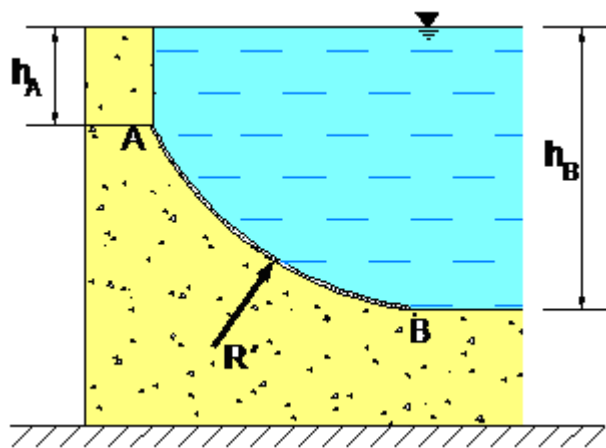
بار گسترده یکنواخت :

$$\bar{x} = \frac{L}{2}$$

$$\bar{x} = \frac{2L}{3}$$

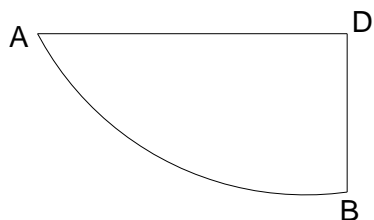


برای محاسبه نیروی برآیند از طرف آب که بر بخش AB در سد نمایش داده شده زیر وارد می شود مراحل زیر را انجام می دهیم:

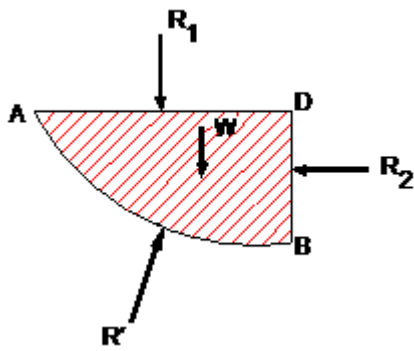


نیروی برآیند وارد شده از طرف آب بر سطح منحنی

حجم مایع ABD را جدا می کنیم.



و برآیند نیروهای وارد بر سطح AB ( یعنی R ) را بصورت مؤلفه های افقی و عمودی در نظر می گیریم:

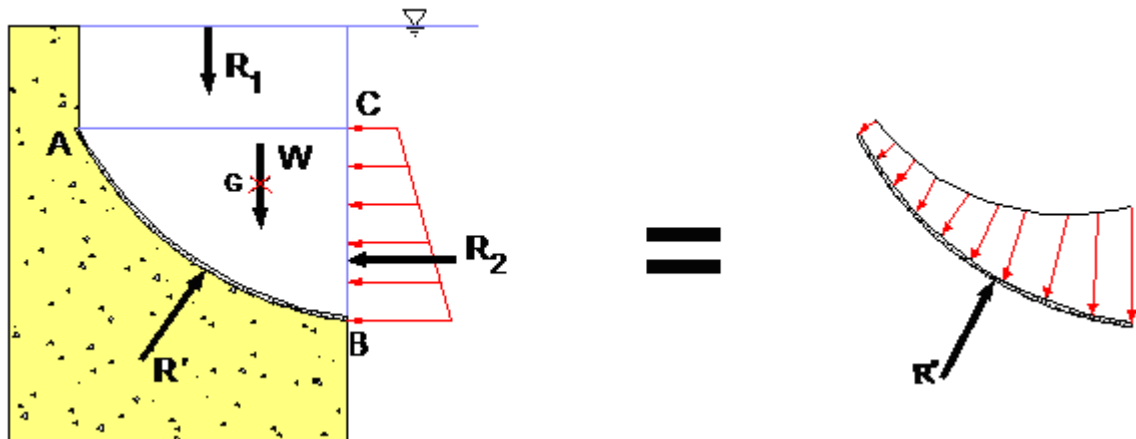


مؤلفه های عمودی ←  $\begin{cases} W = \text{مربوط به حجم مایع جدا شده} \\ \text{برآیند نیروهای خارجی وارد بر سطح AD} \end{cases}$

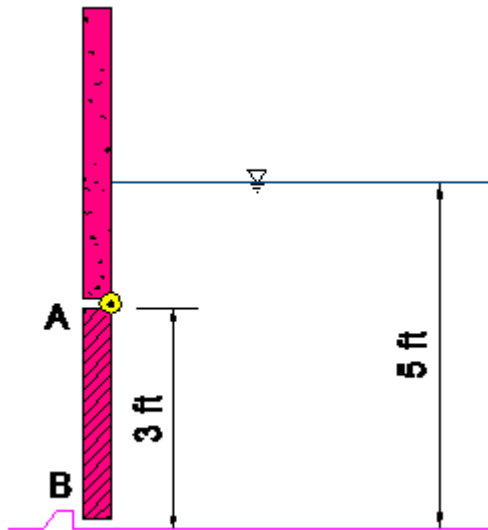
برآیند نیروهای خارجی وارد بر سطح BD  $\leftarrow R_2 =$  مؤلفه افقی

(برآیند نیروی وارد بر سطح منحنی، قسمت پایین)  $- R = R' =$  (نیروی وارد بر سطح منحنی، قسمت بالا)

در شکل زیر، دو حالت نمایش داده شده معادل هم هستند، اما انتگرال گیری در حالت سمت راست دشوار است زیرا هم فشار و هم ارتفاع تغییر می کند، در صورتیکه اگر قسمت ABC را بصورت سمت چپ در نظر بگیریم دچار مشکل نخواهیم شد.



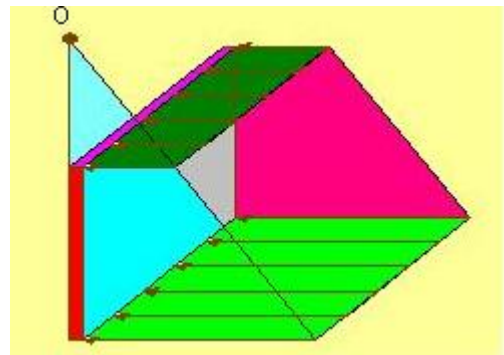
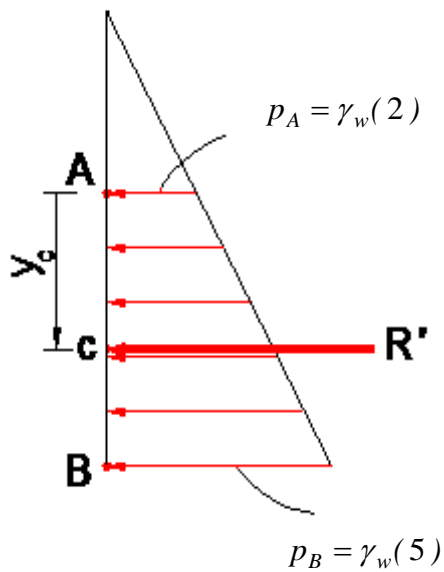
**مثال:** درب  $3\text{ft} \times 3\text{ft}$  در پائین دیوار بتنی قرار گرفته است؛  
الف) مقدار و محل برآیند نیروهای وارد بر درب را معین کنید.



ب) اگر این درب در نقطه A به دیوار بتنی لولا شده باشد نیروی وارد بر نقطه B را بدست آورید.

$$\gamma_{conc} = 150 \left( \frac{lb}{ft^3} \right) \quad \gamma_{water} = 62.4 \left( \frac{lb}{ft^3} \right)$$

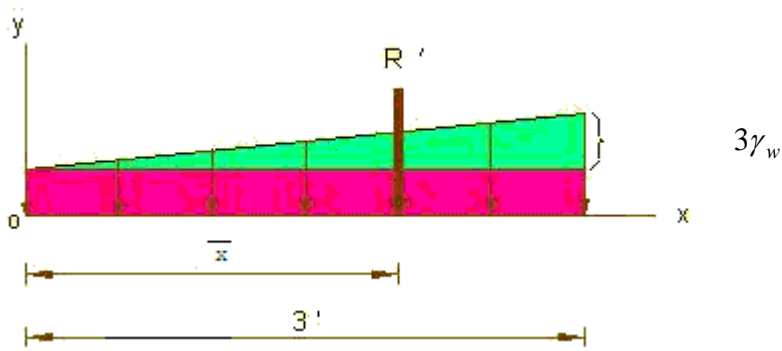
حل الف)



$$R' = \frac{1}{2} (p_A + p_B) L$$

$$R' = \frac{1}{2} [\gamma_w(2) + \gamma_w(5)] (3) = \frac{21}{2} \gamma_w$$

$$= (3) R' = \frac{63}{2} \gamma_w \quad \text{کل R}$$



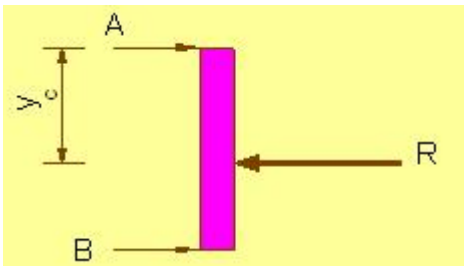
$$\bar{x}R' = [2\gamma_w(3)](1.5) + [1.5\gamma_w(3)](2) = 9\gamma_w + 9\gamma_w = 18\gamma_w$$

$$\bar{x}R' = \sum \bar{x}_i R'_i$$

$$y_c = \bar{X} = \frac{18\gamma_w}{\frac{21}{2}\gamma_w} = \frac{36}{21} = \frac{12}{7} = 1.714'$$

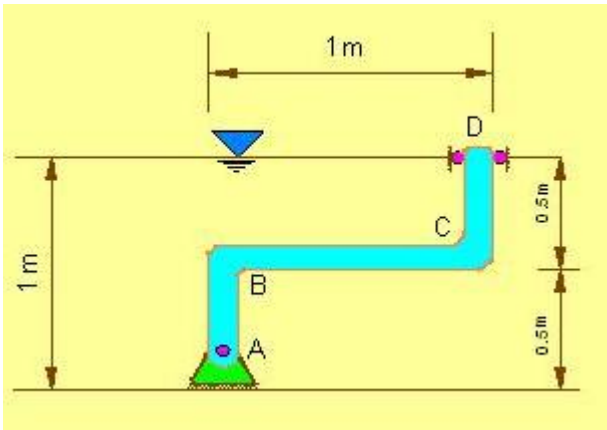
$$R = 31.5 \times 62.4 = 1966 \text{ (lb)}$$

$$\sum M_A = 0 \quad \text{حل ب}$$



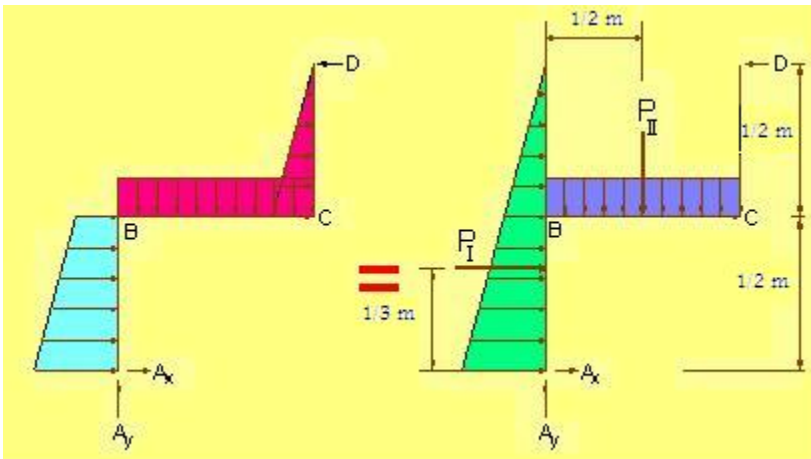
$$\Rightarrow 3B - y_c R = 0 \Rightarrow B = 1123 \text{ (lb)}$$

مثال: دریچه ABCD که از ورق ساخته شده و دارای عرض 2 متر است در نقطه A به زمین لولا شده است. عکس العمل ها را در نقاط A و B بدست آورید.



$$\gamma = \rho g = 1000 (9.81) = 9.81 (kN/m^3)$$

حل:



$$w_A = 2\gamma(1) = 2\gamma \quad P_I = \frac{1}{2} w_A(1) = \gamma$$

$$w_B = 2\gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \gamma \quad P_{II} = w_B(1) = \gamma$$

$$\sum M_A = 0 \Rightarrow (1)D - \frac{1}{3}P_I - \frac{1}{2}P_{II} = 0$$

$$D - \frac{1}{3}\gamma - \frac{1}{2}\gamma = 0$$

$$D = \frac{5}{6}\gamma = \frac{5}{6}(9.81) = 8.18(kN) \leftarrow$$

$$\rightarrow \sum F_x = 0 \Rightarrow A_x + P_I - D = 0$$

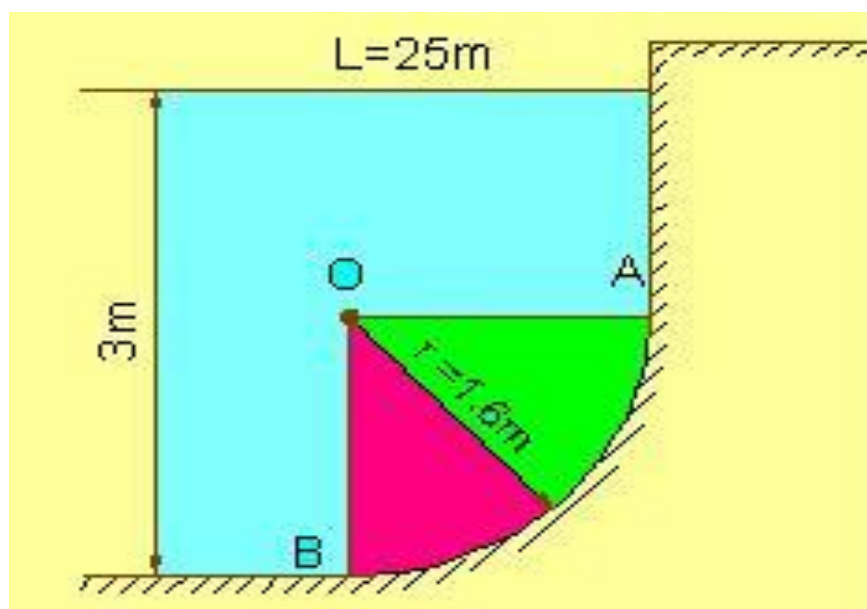
$$A_x = \frac{5}{6}\gamma - \gamma = \frac{1}{6}\gamma = \frac{1}{6}(9.81)$$

$$A_x = 1.635(kN) \leftarrow$$

$$+\uparrow \sum F_y = 0 \Rightarrow A_y - P_{II} = 0$$

$$A_y = \gamma = 9.81(kN) \uparrow$$

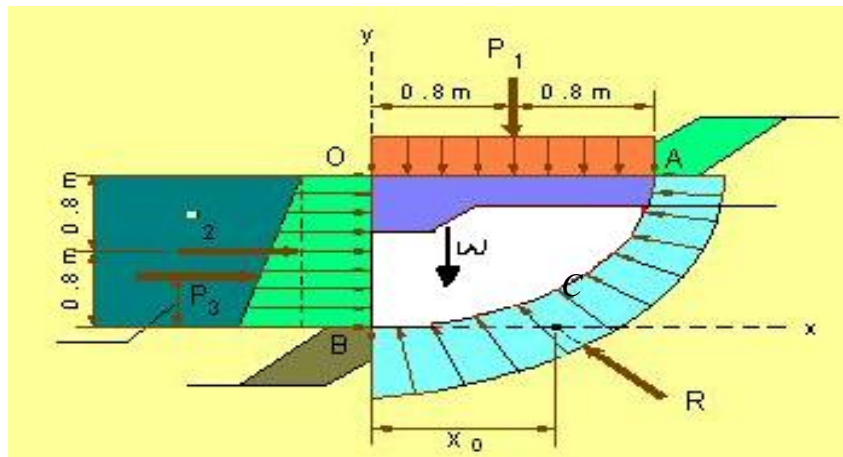
**مثال:** یک استخر شنا تا عمق 3 متر از آب پر شده است (مطابق شکل).  
 بزرگی و خط اثر نیروی برآیندی که بر ربع دایره AB وارد می شود را تعیین کنید. طول دیوار 25 متر و چگالی آب برابر  $1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$  است.



حل:

$$\gamma = \rho g = 1000 (9.81) = 9.81 \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

$$\frac{4(1.6)}{3\pi} = 0.6791(m)$$



$$p_1 = \gamma h = (9.81)(1.4) \\ = 13.734(kN/m^2)$$

$$p_3 = \gamma h = (9.81)(3) \\ = 29.43(kN/m^2)$$

$$p_2 = \gamma h = (9.81)(3) \\ = 29.43(kN/m^2)$$

$$P_1 = p_1 A = (13.73)(1.6)(25) = 549.2(kN)$$

$$P_2 = p_2 A = (13.73)(1.6)(25) = 549.2(kN)$$

$$P_3 = \frac{p_2 - p_1}{2} A = \frac{29.43 - 13.73}{2}(1.6)(25) = 314.0(kN)$$

$$W = (9.81) \frac{\pi(1.6)^2}{4} (25) = 493.1 kN$$

$$W = \gamma \times (\text{وزن آب موجود در ناحیه OAB})$$

$$\rightarrow \sum F_x = 0$$

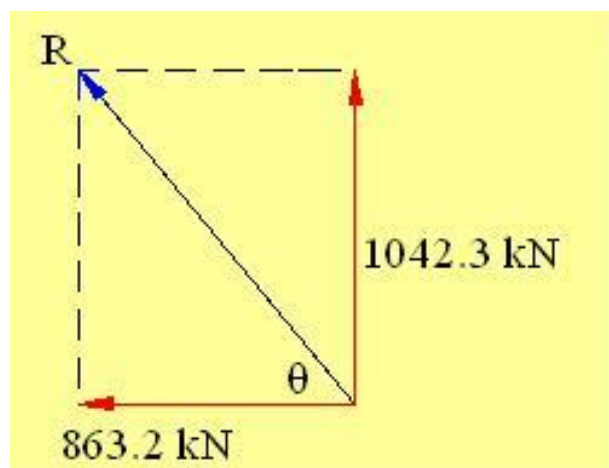
$$\Rightarrow P_2 + P_3 - R_x = 0$$

$$R_x = P_2 + P_3 = 549.2 + 314.0 = 863.2(kN)$$

$$+\uparrow \sum F_y = 0$$

$$\Rightarrow R_y - W - P_1 = 0$$

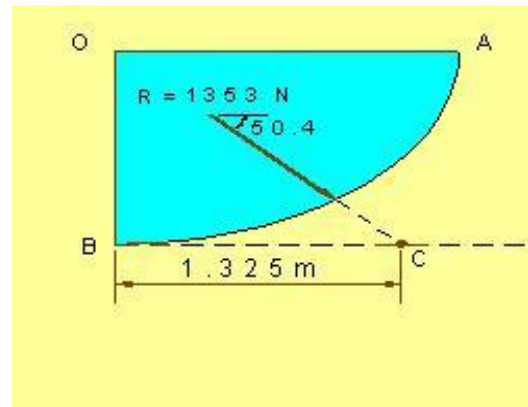
$$R_y = W + P_1 = 493.1 + 549.2 = 1042.3(kN)$$



$$R = \sqrt{(863.2)^2 + (1042.3)^2} = 1353 \text{ kN}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{1042.3}{863.2} = 50.4^\circ$$

برای یافتن خط اثر R داریم:



تذکر:  $X$  ، فاصله بین B و C (محل تقاطع R و محور X ها) می باشد.

$$\begin{aligned} \sum M_B = 0 &\Rightarrow R_y x_0 - P_1(0.8) - P_2(0.8) - P_3(0.5333) - W(0.6791) = 0 \\ \Rightarrow x_0 &= \frac{549.2(0.8) + 549.2(0.8) + 314.0(0.5333) + 493.1(0.6791)}{1042.3} = 1.325 \text{ (m)} \end{aligned}$$

نیرویی که توسط آب بر دیوار اعمال می شود مساوی و در خلاف جهت نیرویی است که در بالا تعیین شد.

فصل ششم

# تحلیل سازه‌ها

## مقدمه

در فصلهای قبل، مسائل تعادل اجسام یک جسم صلب تنها را بررسی کردیم. در این مسائل تمام نیروها خارجی بودند. حال تعادل سازه هایی را بررسی می کنیم که از چند قسمت تشکیل شده اند. در این حالت، نه تنها نیروهای خارجی وارد به سازه، بلکه نیروهای بین قسمت های مختلف آن را، که برای کل سازه به عنوان نیروهای داخلی اند، می یابیم.

در این فصل سه گروه مهم از سازه های مهندسی را بررسی می کنیم:

## خرپاها

1) سازه های مقید کامل اند که برای تحمل بار به کار می روند و معمولاً ساکن اند.

2) از عضو های مستقیمی ساخته شده اند که در دو انتها به هم مفصل شده اند. لذا عضو های خرپا دو نیرویی اند، یعنی، عضوی که دو

نیروی برابر و ناهمسو در امتداد آن اثر می کنند. (بصورت کششی یا فشاری است)

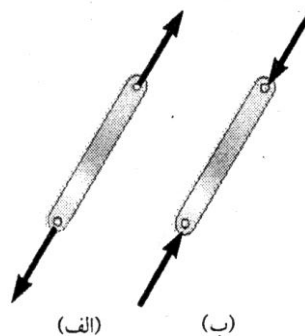
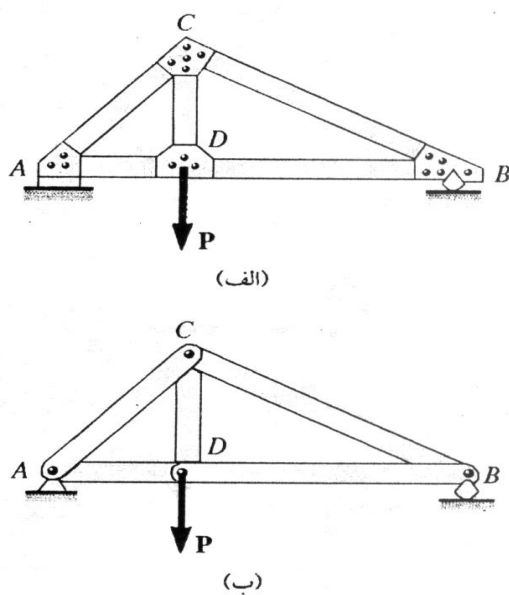
3) نیروها در مفصل قرار می گیرند.

4) نقاط مشترک مفصل فرض می شود.

5) وزن ها هم فرض می شود که در مفصل ها وارد می گردد.

6) تمام عضو های خرپا در گره ها به یکدیگر لولا می شوند یعنی می توانند دوران کنند. (گشتاور در

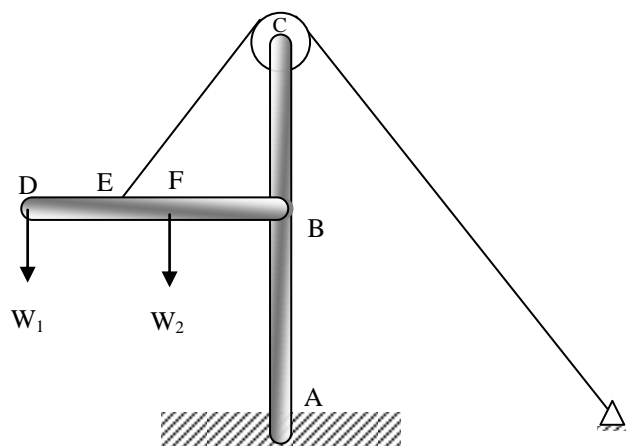
در نظر گرفته نمی شود.)



## قاب ها

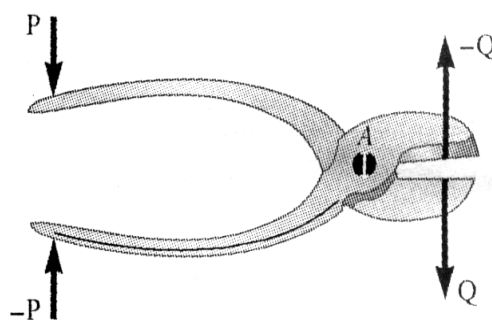
- 1) سازه های مقید کامل اند که برای تحمل بار به کار می روند و معمولاً ساکن اند.
- 2) قاب ها همواره شامل حداقل یک عضو چند نیرویی هستند، یعنی، عضوی که سه یا تعداد بیشتری نیرو، که معمولاً در امتداد عضو نیستند، بر آن اثر می کنند.

3) وظیفه قاب انتقال نیرو به تکیه گاه ها می باشد.



## ماشین ها

- 1) سازه هایی هستند که دارای قطعات متحرک اند.
- 2) برای انتقال و تبدیل نیرو ها به کار می روند.
- 3) ماشین ها مانند قاب ها، همواره شامل حداقل یک عضو چند نیرویی هستند.
- 4) وظیفه آن ها انتقال نیرو یا تبدیل نیروست.



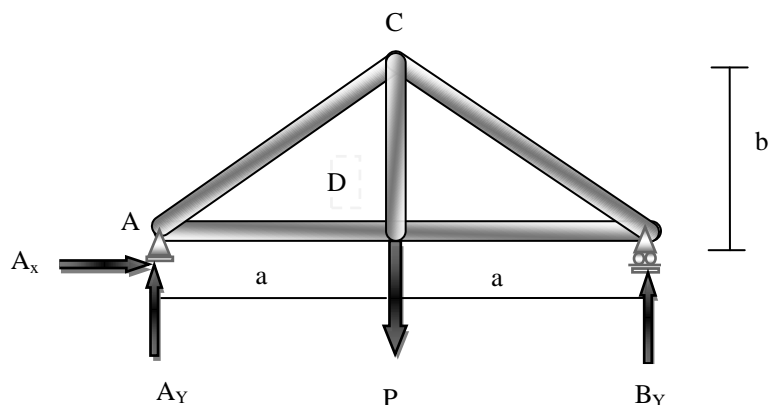
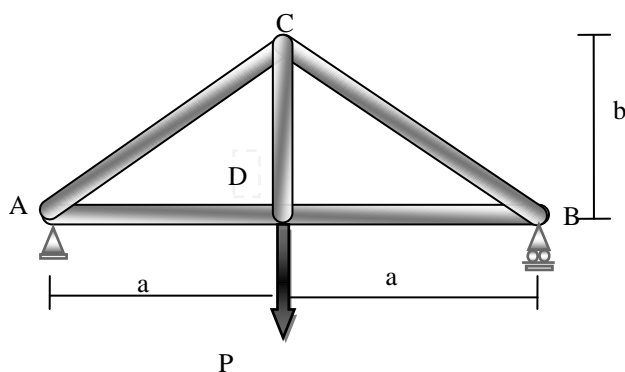
## تحلیل خرپا با روش مفصل‌ها (اتصالات)

- 1) ترسیم نمودار آزاد جسم خرپا (برای تعیین واکنش در تکیه گاه‌ها)
- 2) انتخاب مفصل اول (انتخاب مفصل اول یکتا نیست، با تعیین واکنش در تکیه گاه‌های خرپا هر یک از دو مفصل را به عنوان نقطه شروع تحلیل میتوان انتخاب کرد).
- 3) ترسیم نمودار آزاد مفصلی که فقط دو عضو را به هم متصل کرده است.
- 4) ترسیم نمودار آزاد مفصلی که فقط نیروها در دو عضو اتصالی مجهولند.
- 5) تکرار این روش تا نیروها در تمام عضوهای خرپا تعیین شوند.

### مثال:

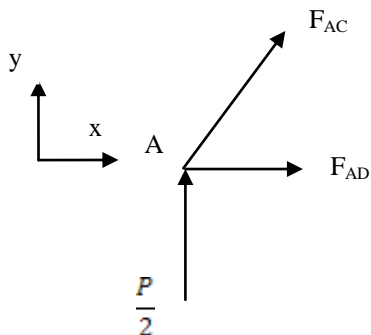
با استفاده از روش مفصل‌ها، نیرو در هر یک از عضوهای خرپای نشان داده شده را تعیین کنید و بگویید هر عضو تحت کشش است یا فشار؟

نکته: در خرپادونوع هرودار هم فشاری (compression) یا کششی (tension) که به اختصار با (C) و (T) نشان می‌دهیم. هنگامی که نیرو داخل گره رود فشاری (C) است و هنگامی که نیرو از گره خارج شود کششی (T) است.



$$\begin{aligned}
 + \rightarrow \sum F_x = 0 &\Rightarrow A_x = 0 \\
 \sum M_A = 0 &\Rightarrow -P \times a + B_y \times 2a = 0 \Rightarrow B_y = \frac{P}{2} \\
 + \uparrow \sum F_y = 0 &\Rightarrow A_y = \frac{P}{2}
 \end{aligned}$$

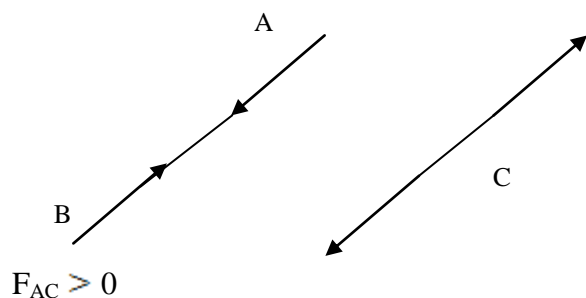
در دیاگرام جسم آزاد A خواهیم داشت:



دو معادله داریم چون سؤال در صفحه است .

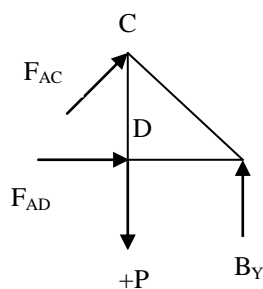
$$\begin{aligned}
 + \uparrow \sum F_y = 0 \\
 \frac{P}{2} + F_{AC} \sin \theta = 0 &\Rightarrow F_{AC} = -\frac{P}{2 \sin \theta} \quad (C) \\
 + \rightarrow \sum F_x = 0 &\Rightarrow F_{AC} \cos \theta + F_{AD} = 0 \\
 F_{AD} = +\frac{P}{2 \sin \theta} \cos \theta &\quad (T)
 \end{aligned}$$

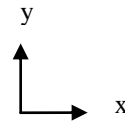
عضو C تحت کشش است .



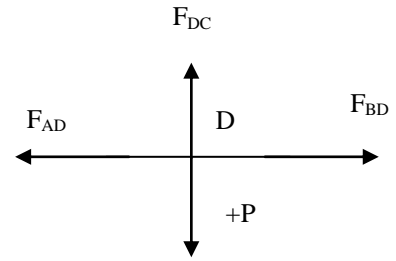
لازم به ذکر است تحلیل بای از گره های معین شروع شود.

بقیه شکل:

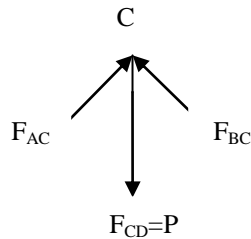




دیگرام آزاد جسم D:



دیگرام آزاد جسم C:



$$\begin{aligned}\sum F &= 0 \\ \sum F_x &= 0 \\ \Rightarrow F_{BD} - F_{AD} &= 0 \\ + \uparrow \sum F_y &= 0 \Rightarrow F_{CD} = P \quad (T)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum F_C &= 0 \\ + \rightarrow \sum F_x &= 0 \Rightarrow F_{BC} = F_{AD}\end{aligned}$$

لازم به ذکر است تحلیل گره (B) برای چک کردن درستی جواب ها مفید است ولی لازم نیست که آن را تحلیل کنیم.

### خرپای معین (از نظر داخلی و خارجی):

هرخرپای ساده ای که دارای تکیه گاه ساده است مقید کامل و معین استاتیکی است

اگر تعداد گره هادر خرپا برابر  $j$  و تعداد عضوها  $m$  و تعداد عکس العمل ها  $r$  باشد. داریم تعداد معادلات  $2j$  است و تعداد مجهولات  $m+r$  است پس اگر:

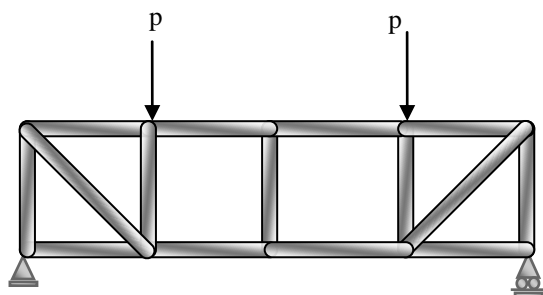
$$m+r < 2n \quad \leftarrow \text{مقید ناقص (چون برخی از معادله ها برقرارن)}$$

$$m+r > 2n \quad \leftarrow \text{نامعین (چون بعضی مجهولات را نمی توان تعیین کرد)}$$

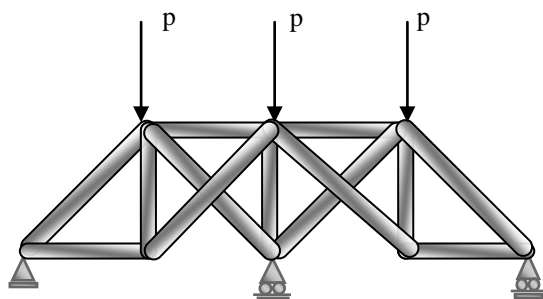
**(3)  $m+r=2n$**   $\leftarrow$  تعداد معادلات و مجهولات با هم برابرند البته نه به این معنی که میتوان تمام مجهولات را حل کرد یا تمام معادلات برقرار میشوند برای این که خرپا مقید کامل است یا ناقص باید بررسی کرد که آیا میتوان تمام واکنش ها ونیرو ها در تمام عضو ها را تعیین کرد یا نه؛ اگر میتوان خرپا مقید کامل و معین استاتیکی است.

$$m+r-2j = \text{درجه نامعین}$$

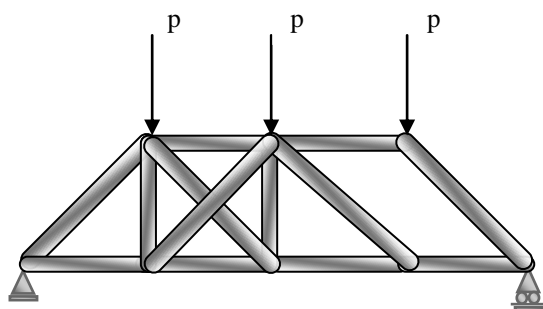
**مثال:** سازه های نشان داده شده را بر حسب مقید کامل، مقید ناقص، مقید نادرست طبقه بندی کنید. (آن هایی که مقید کاملند بر حسب معین و نامعین طبقه بندی کنید).



خرپای ساده با  $r=3$ ,  $m=16$ ,  $n=10$  بنابراین  $2n=20 > m+r=19$  در نتیجه سازه مقید ناقص است.



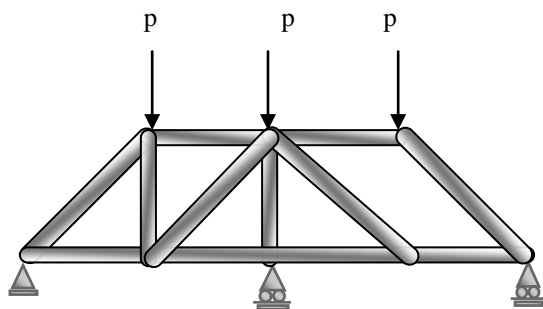
خرپای ساده با  $r=4$ ,  $m=13$ ,  $n=8$  بنابراین  $2n=16 < r+m=17$  در نتیجه مقید ولی نامعین است.



خرپای غیر ساده با  $r=3$ ,  $m=13$ ,  $n=8$  بنابراین  $2n=16 = r+m$

$$\sum M_A = aF_1 \neq 0$$

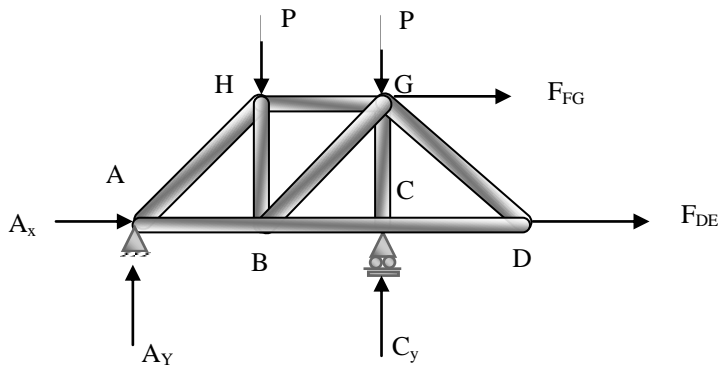
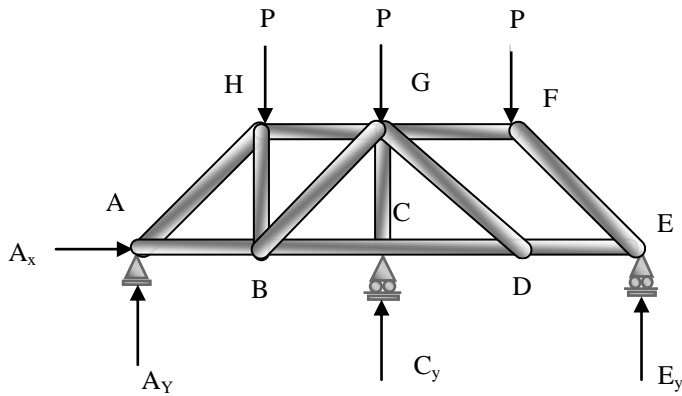
بنابراین سازه قید نامناسب است.



خرپای ساده با  $r=4$ ,  $m=12$ ,  $n=8$  بنابراین  $2n=16 = r+m$

## بررسی برای معین بودن:

یک بار می توان مفصل F به ازای نیروهای در EF، FG، و مفصل E به ازای  $E_y$  و نیرو در DE حل کرد.

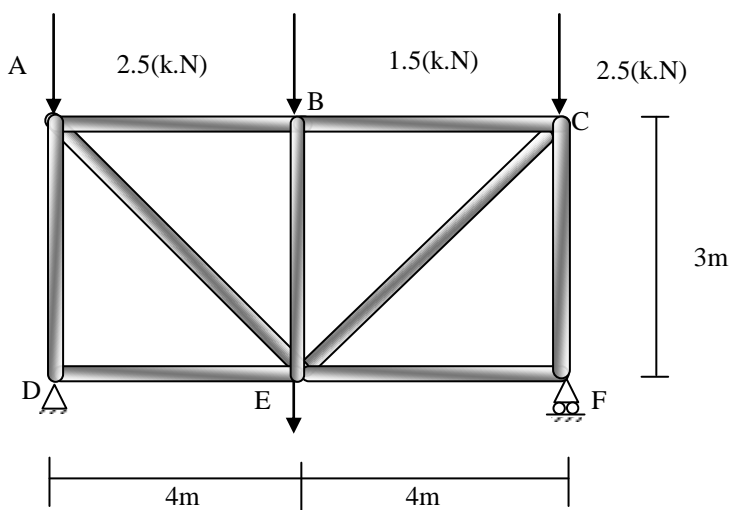


این سطوح یک خرپای ساده ABCDGH با

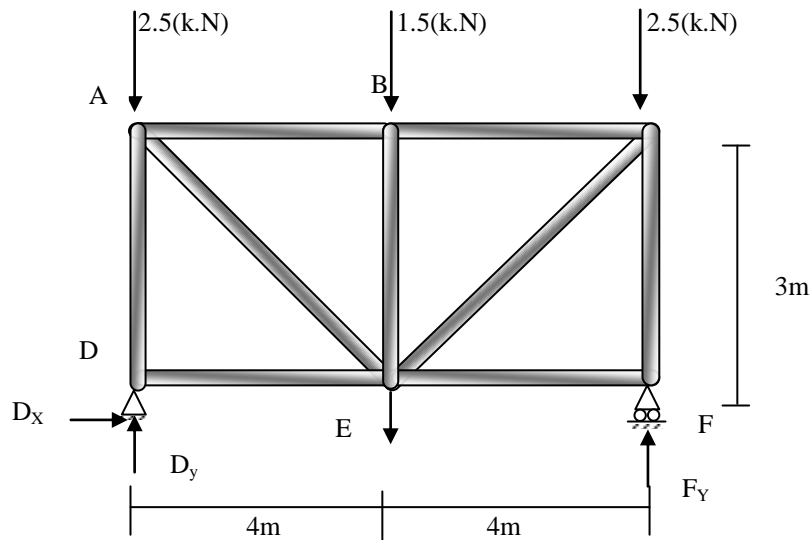
$n = 6$ ,  $m = 9$ ,  $R = 3$  بنابراین  $r + m = 12 = 2n$  سازه به طور کامل مقید و معین است.

**مثال:** با استفاده از روش مفصل ها، نیرو در هر یک از عضوهای خرپای نشان داده شده را تعیین کنید و بگویید هر عضو تحت کشش

است یا فشار؟



دلیگرام آزاد جسم : C



خرپای فوق معین است زیرا:

$$m=9 \quad r=3 \quad j=6$$

$$m + r = 2J$$

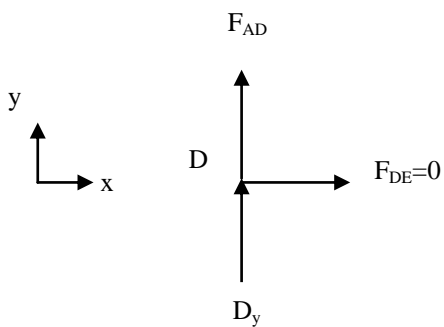
برای تقارن در بارگذاری داریم:

$$+\rightarrow \sum F_X = 0 \Rightarrow$$

$$D_x = 0$$

$$+\uparrow \sum F_Y = 0$$

$$\Rightarrow D_y = F_y$$



$$D_y + F_y = 8$$

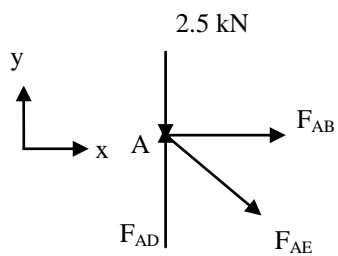
$$D_y = F_y = 4 \text{ kN}$$

در گره D داریم:

$$F_{AD} = 4 \text{ kN} = D_y = F_{CF} \quad (C)$$

$$F_{DE} = 0$$

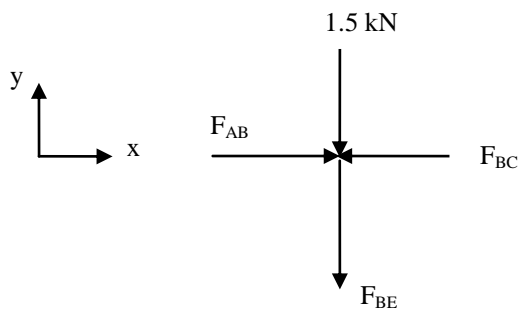
در گره A داریم:



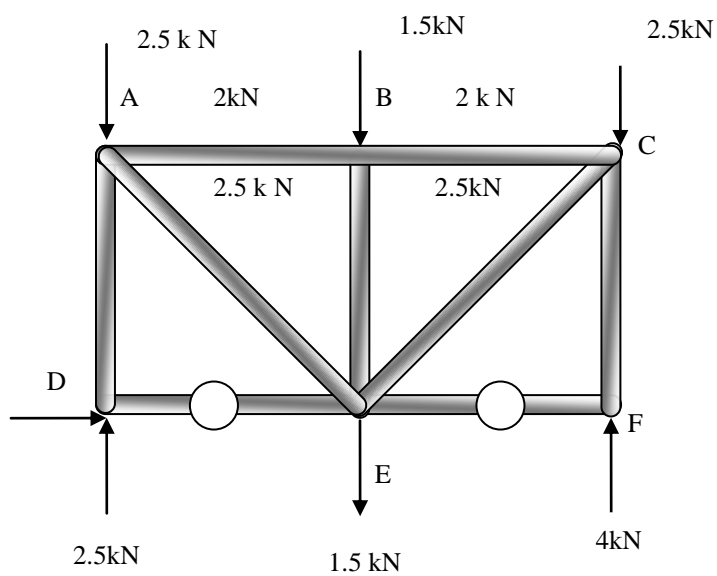
$$F_{AE} \times \frac{3}{5} + 4 - 2.5 = 0 \implies F_{AE} = -2.5 \text{ kN (T)}$$

$$-F_{AB} - F_{AE} \times \frac{4}{5} = 0 \implies F_{AB} = 2 \text{ kN}$$

در گره B داریم:



$$F_{BE} = 1.5 \text{ kN}$$

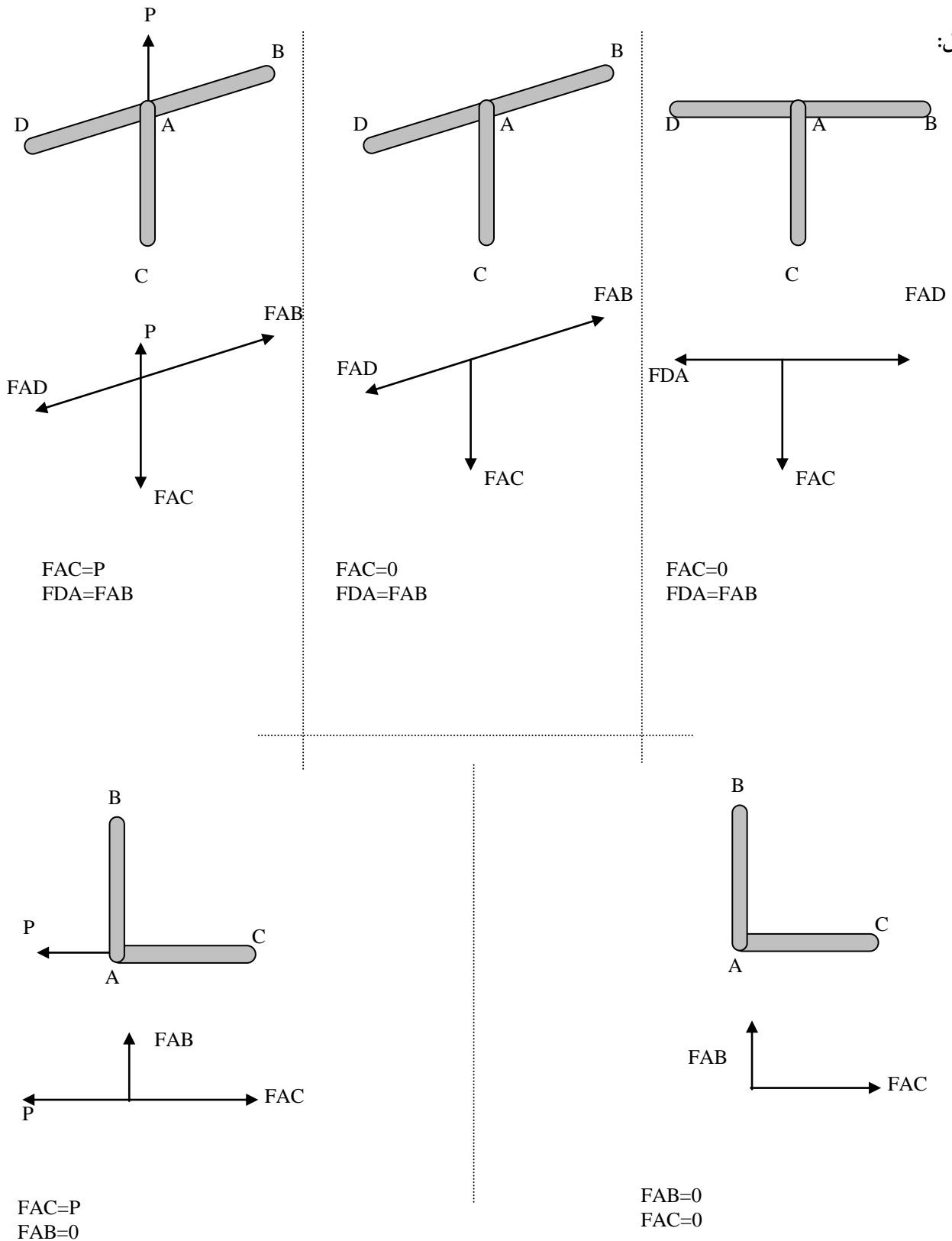


## حالات خاص گره ۱۰۰:

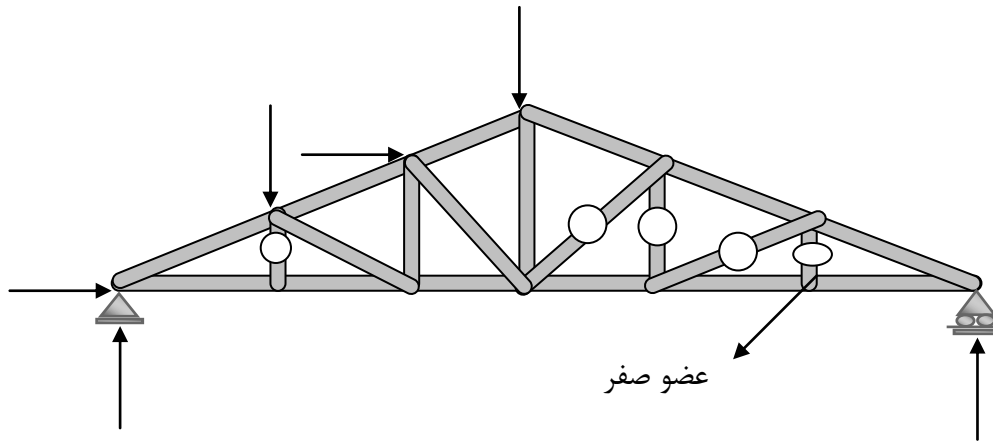
اگر سه عضو در گره به هم متصل شوند و نیروی خارجی به مفصل وارد نشود و دو عضو در یک راستا باشند عضو دیگر عضو

صفر نیرویی گویند .

مثال:



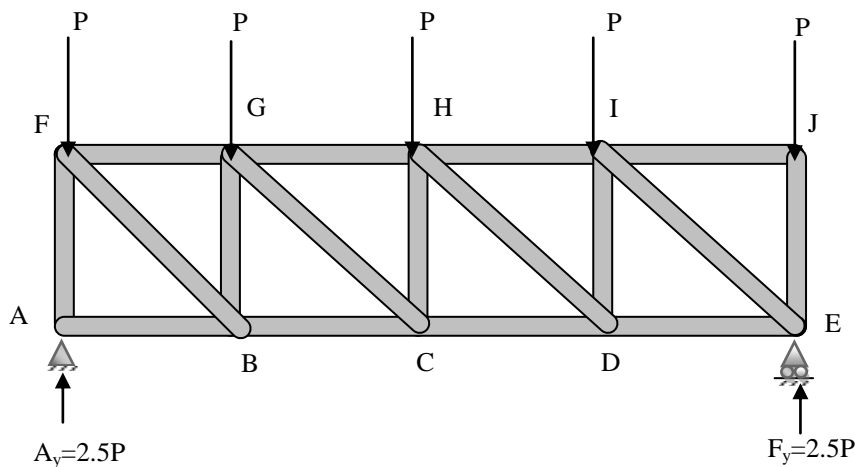
مثال: عضوهای صفر نیروی را نشان دهید.



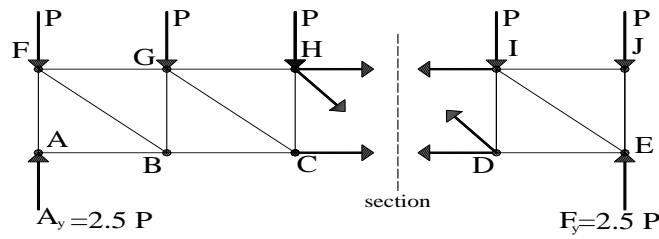
### تحلیل خرپا به روش برش روش قطع یا روش برش: (section)

- برای تعیین نیروها در تمام عضوهای یک خرپای ساده روش مفصل ها که قبلا بررسی شد معمولا بهترین روش است ولی برای تعیین نیرو در یک عضو تنها یا در چند عضو اندک یک خرپای ساده، روش مقاطع بهتر است.
- (1) ترسیم نمودار آزاد جسم خرپا (برای تعیین واکنش در تکیه گاه ها)
  - (2) عبور خط برش از سه عضو خرپا، که یکی از آنها عضو مورد نظر است. پس از حذف این عضوها خرپا به دو سمت جداگانه تقسیم می شود.
  - (3) انتخاب یکی از دو قسمت خرپا و ترسیم نمودار جسم آزاد آن
  - (4) نوشتن سه معادله تعادل
- در عبور خط برش باید دقت شود که خط برش فقط سه عضو را قطع کند زیرا باحل معادله های تعادل نمی توان بیش از سه مجهول را حل کرد.

مثال: فرض کنیم  $F_{HD}$  را بخواهیم :



برش روبرو می‌تواند مقادیر  $F_{HD}$  بدهد.



سازه باید دارای دو نیمه در تعادل باشد.

از تعادل در صفحه سه معادله و سه مجهول و  $F_{HD}$  بدست می‌آید.

باید توجه داشته باشیم که از آنجایی که سه معادله تعادل داریم برش ما باید به گونه ای باشد که سه نیروی مجهول داشته باشیم.

ضمناً می‌توانستیم بجای نیمه ی سمت چپ نیمه سمت راست را مورد نظر قرار دهیم.

با برش فوق داریم:

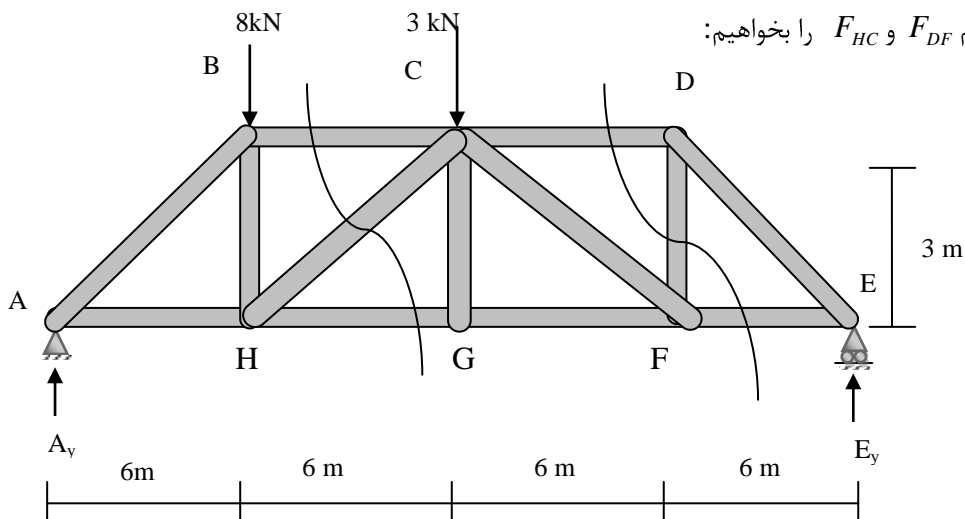
$$+\rightarrow \sum F_X = 0$$

$$+\uparrow \sum F_Y = 0 \Rightarrow$$

$$F_{HD} \sin \theta - 2P + 2.5P = 0 \Rightarrow F_{HD} = \frac{-0.5P}{\sin \theta}$$

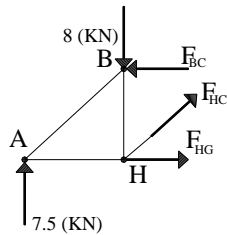
$$\sum M_A = 0$$

مثال: فرض کنیم  $F_{HC}$  و  $F_{DF}$  را بخواهیم:



برش روبرو می‌تواند مقادیر  $F_{HC}$  بدهد.

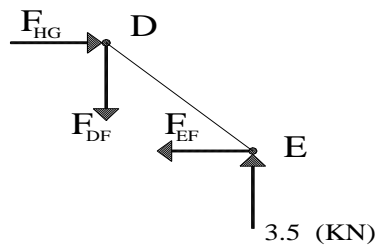
سازه باید دارای دو نیمه در تعادل باشد.



از تعادل در صفحه سه معادله و سه مجهول داریم و  $F_{HC}$  بدست می آید.

ضمناً می توانستیم بجای نیمه ی سمت چپ نیمه سمت راست را مورد نظر قرار دهیم.

برش روبرو می تواند مقادیر  $F_{DF}$  بدهد.



$$+\uparrow \sum M_E = 0 \quad -A_y \times 24 + 8 \times 18 + 3 \times 12 = 0 \quad \Longrightarrow \quad A_y = 7.5 \quad \text{k N}$$

$$\Longrightarrow (+) \sum F_y = 0 \quad E_y = 3.5 \text{ K N}$$

با برش سمت چپ داریم:

$$\oplus \uparrow \sum F_y = 0 \Rightarrow 7.5 - 8 + F_{HC} \times \frac{4}{5} = 0 \Rightarrow F_{HC} = \frac{5}{8} \text{ (KN) (T)}$$

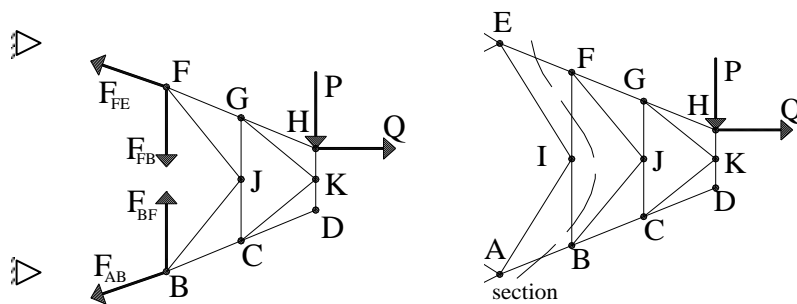
با برش سمت راست داریم:

$$+ \uparrow \sum F_y = 0 \Longrightarrow F_{DF} = 3.5 \quad \text{k N} \quad (\text{T})$$

نکته: گاهی ممکن است برای بدست آوردن ردهای داخلی مورد نظر چند برش قبل از رسیدن به عضو مورد نظر بزرگ تا

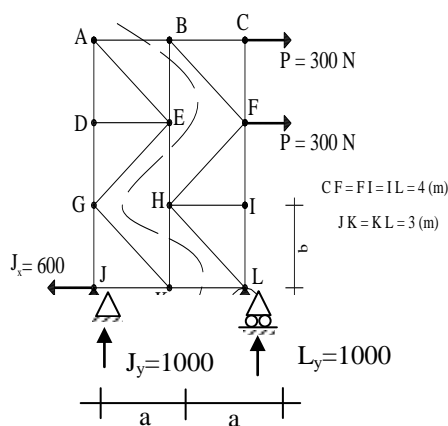
مجهولات برش اصلی کاهش یابد.

مثال:



$$\odot \sum M_F = 0 \Rightarrow F_{AB} \text{ بدست می آید.}$$

مثال:

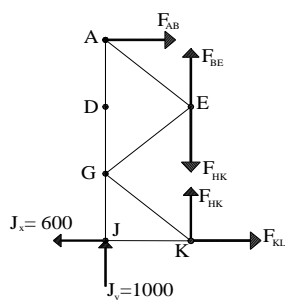


خرپای پایدار معین:  $M = 21 \quad r = 3 \quad j = 12 \quad m + r = 2j$

$$L_y \times (2 \times 3) = (2 \times 4) \times p + (3 \times 4) \times p$$

$$\Rightarrow L_y = \left( \frac{5 \times 4}{2 \times 3} \right) \times p = 1000 \text{ (N)}$$

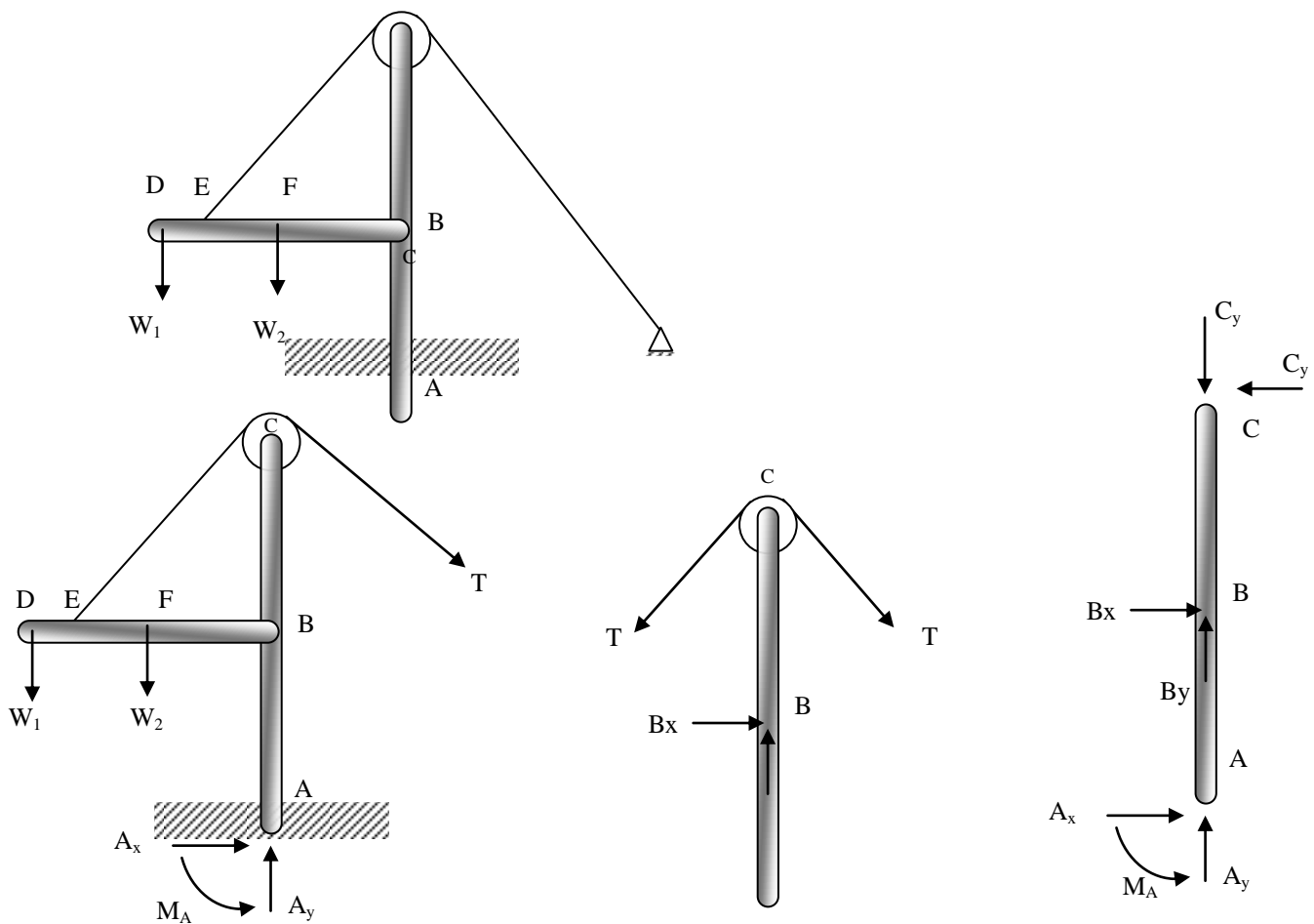
$$-j_y + L_y = 0 \rightarrow j_y = \left( \frac{5 \times 4}{2 \times 3} \right) \times p = 600 \text{ (N)}$$



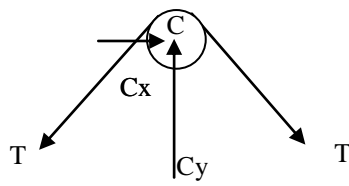
$$\odot \sum M_K = 0 \rightarrow j_y \times (3) - F_{AB} \times (3 \times 4) = 0 \Rightarrow F_{AB} = 250 \text{ (N) (T)}$$

## قاب ها و ماشین ها:

برخلاف خرپاها که سازه هایی هستند با عضوهای صاف و مستقیم و دو نیروئی، قاب ها و ماشین ها سازه هایی هستند که حداقل یکی از آن عضوها از دو نیرویی بیشتر باشد. عضو چندنیرویی طبق تعریف عضوی است که سه یا تعداد بیشتری نیرو و سه یا تعداد بیشتری کوپل به آن وارد می شود. قاب سازه ای است که برای تحمل بار طراحی می شود و معملاً در محل خود ثابت است. ماشین سازه ای است که دارای قطعات متحرک است و برای تبدیل نیرو یا کوپل ورودی یا کوپل خروجی معینی طراحی می شود. برای تعیین نیروهای وارد بر هر یک از ایضای سیستم آن را منزوی می کنیم و دیاگرام آزاد آن را رسم می کنیم و معادلات تعادل را برای آن می نویسیم. هنگام نمایش نیروها در دیاگرام آزاد اعضای مختلف بای عمل و عکس العمل را با دقت رعایت می کنیم.

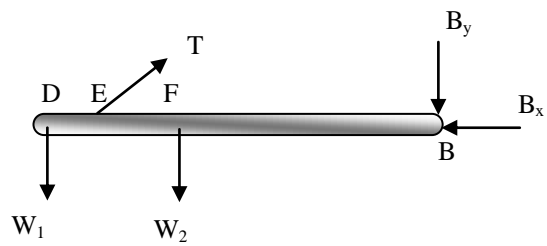


1- دیاگرام آزاد قاب



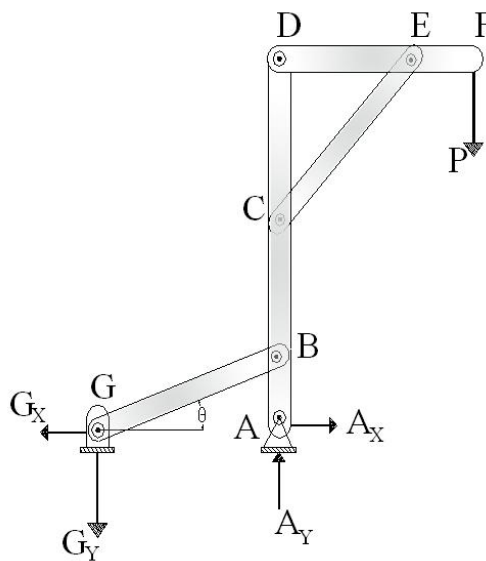
4- دیاگرام آزاد قرقه

2- دیاگرام آزاد عضو AC با قرقه



5- دیاگرام آزاد عضو DB

مثال:



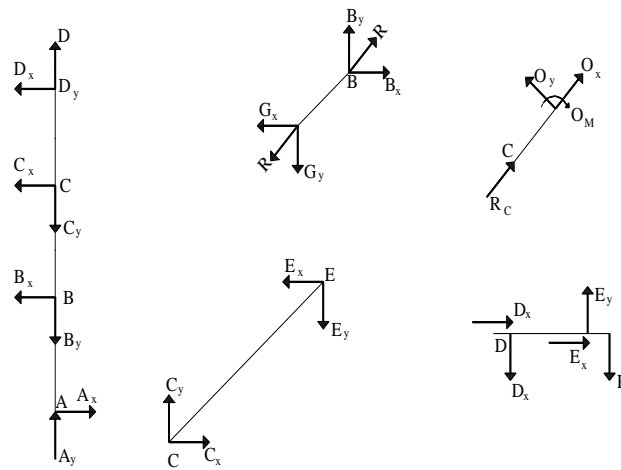
$$\tan \theta = \frac{G_y}{G_x} \Rightarrow G_x = \frac{G_y}{\tan \theta}$$

$$\oplus \odot \sum M_D = 0 \Rightarrow C_x = ? \text{ \& } C_y = ?$$

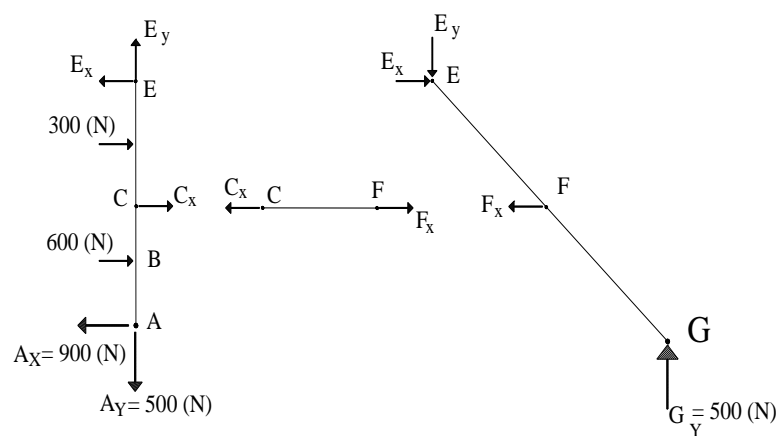
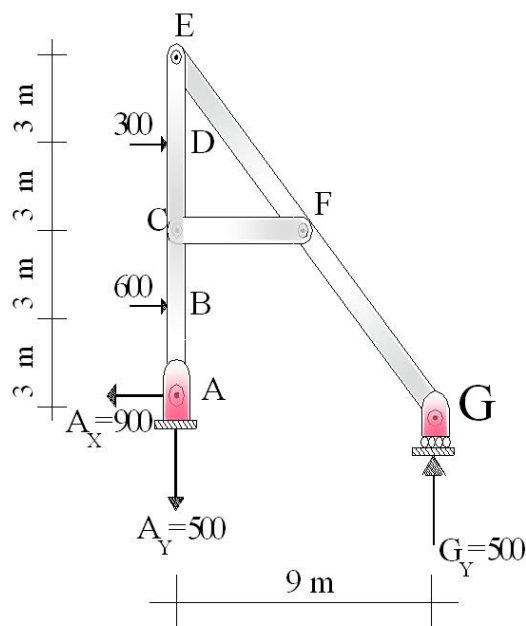
$$\oplus \uparrow \sum F_y = 0 \Rightarrow O_y = 0$$

$$\oplus \circlearrowleft \sum M_O = 0 \Rightarrow O_M = 0$$

$$\oplus \rightarrow \sum F_x = 0 \Rightarrow R_C + O_x = 0 \Rightarrow O_x = -R_C$$



مثال: ریزوهای داخلی را بیابید .



ابتدا رُخوهای عکس العمل را محاسبه می‌کنیم سپس رُخوهای داخلی :

$$\oplus \odot \sum M_A = 0 \Rightarrow G_y = P \Rightarrow 600 \times (3) + 300 \times (9) = G_y \times (9) \Rightarrow G_y = 500 (N)$$

$$\oplus \uparrow \sum F_y = 0 \Rightarrow A_y = -500 (N)$$

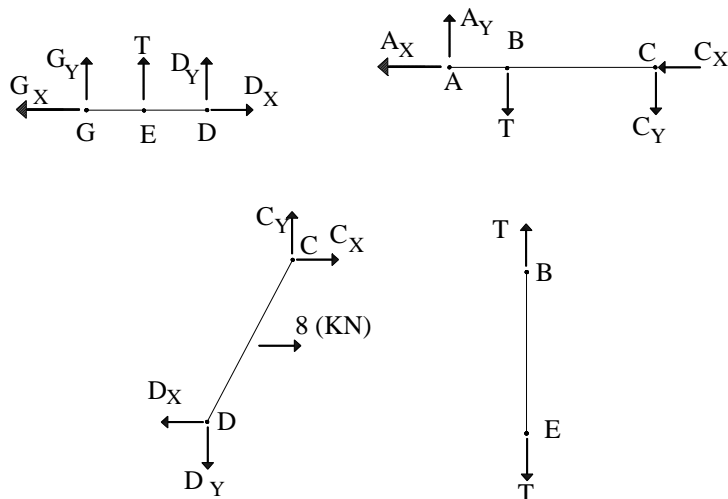
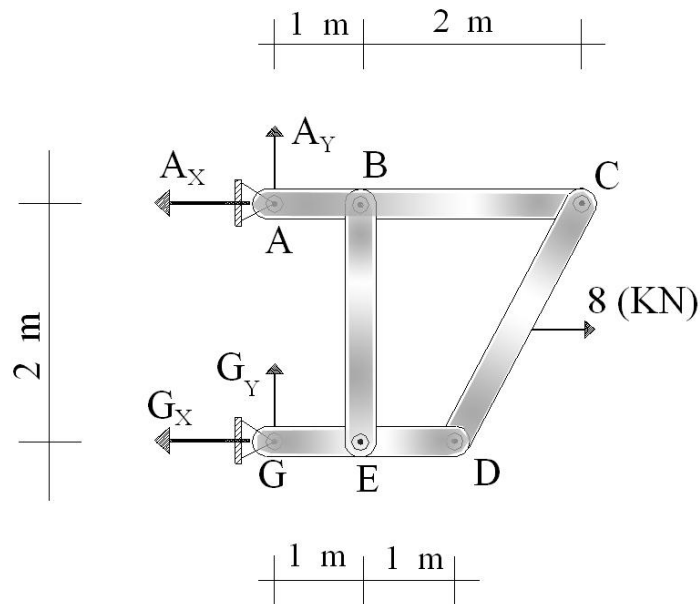
$$\oplus \rightarrow \sum F_x = 0 \Rightarrow A_x = 900 (N)$$

$$\oplus \odot \sum M_C = 0 \Rightarrow -900 \times (6) + 600 \times (3) - 300 \times (3) - E_y \times (6) = 0 \Rightarrow$$

$$E_y = -750 (N)$$

نکته: در قاب‌ها نیروها می‌توانند در نقطه‌ای به غیر از مفصل نیز وارد شوند.

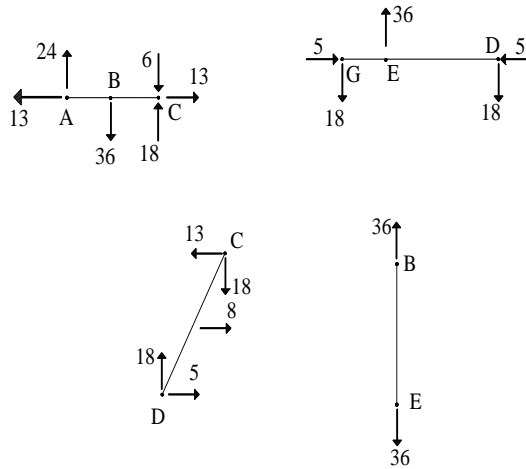
مثال:



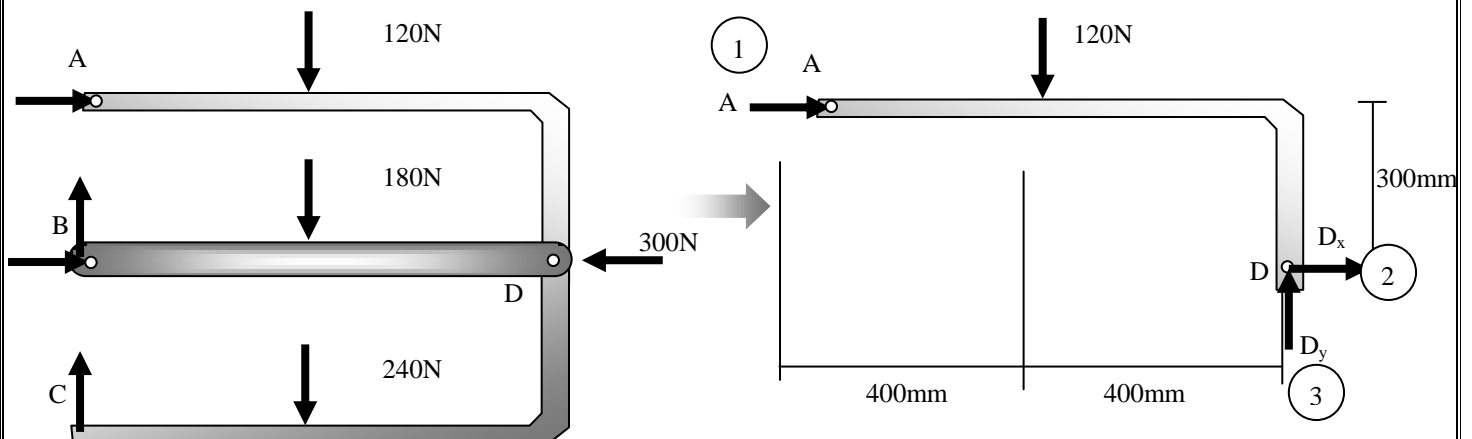
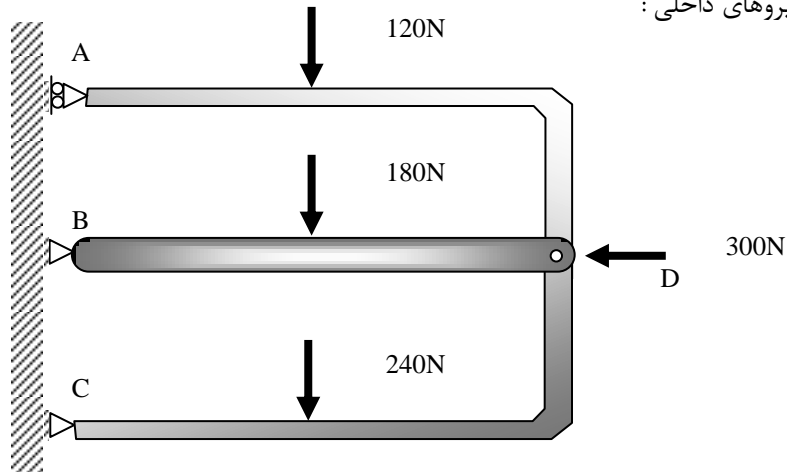
9 معادله و 9 مجهول زی که قابل حل می باشد .

$$A_x, A_y, T, C_x, C_y, D_x, D_y, G_x, G_y$$

اگر نیروی 6 (KN) روی گره C قرار گیرد در این صورت دلی گرام جواب ها پس از حل معادلات به صورت زی در می آیند .



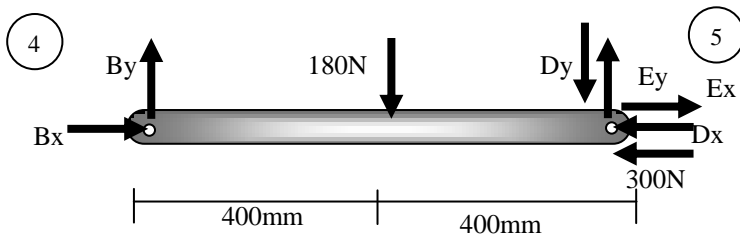
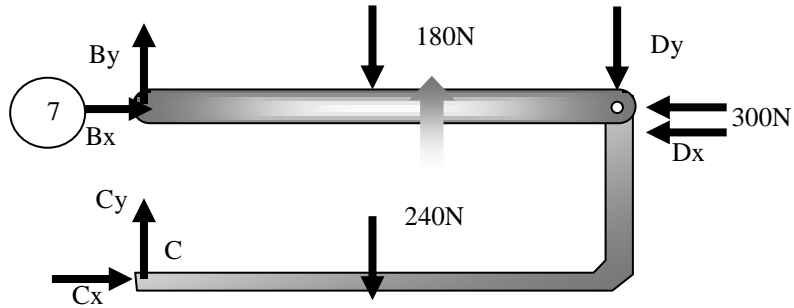
مثال: مطلوب است تعیین نیروهای داخلی :



$$(i) + \sum M_D = \cdot \Rightarrow A = 160 \rightarrow$$

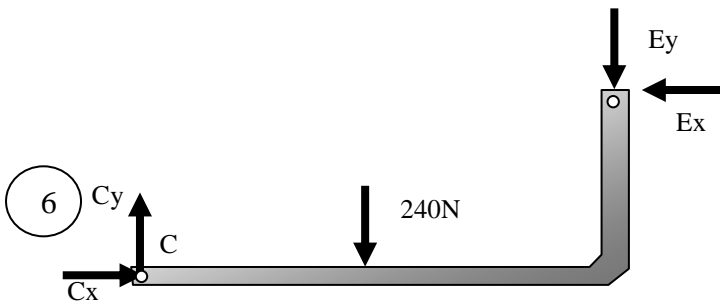
$$(ii) + \rightarrow \sum F_x = \cdot \Rightarrow D_x = 160 \leftarrow$$

$$(iii) + \uparrow \sum F_y = \cdot \Rightarrow D_y = 160 \uparrow$$



$$(iv) + \sum M_D = \cdot \Rightarrow B_y = 90 \uparrow$$

$$(v) + \uparrow \sum F_y = \cdot \Rightarrow E_y = 210 \uparrow$$

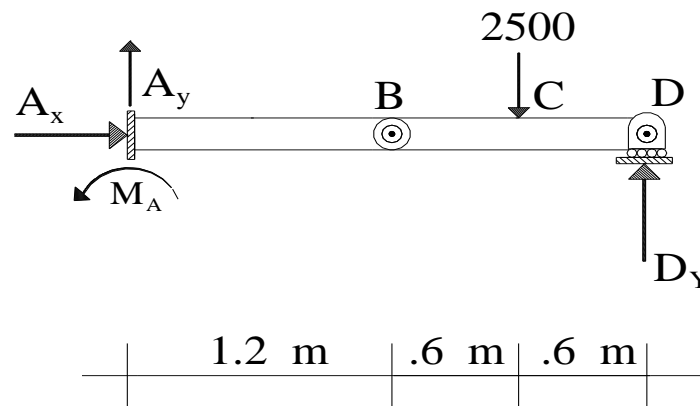


$$(6) + \sum M_C = \cdot \Rightarrow E_x = 880 \uparrow$$

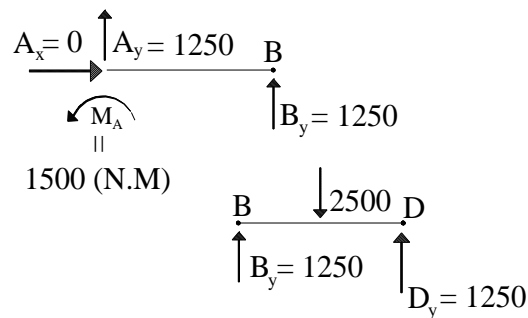
$$(6) + \uparrow \sum F_y = \cdot \Rightarrow C_y = 450 \uparrow$$

$$(7) + \rightarrow \sum F_x = \cdot \Rightarrow B_x = 740 \leftarrow$$

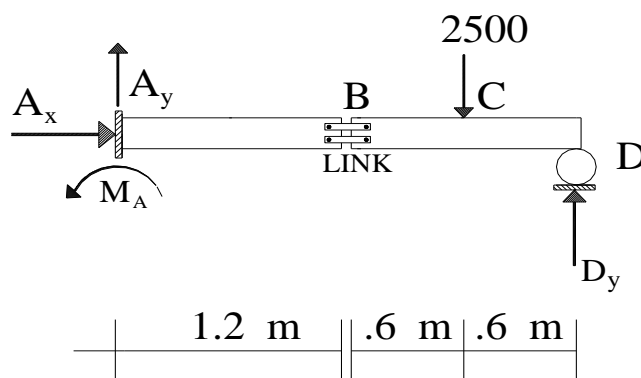
مثال: مطلوب است تعیین نیروهای داخلی :



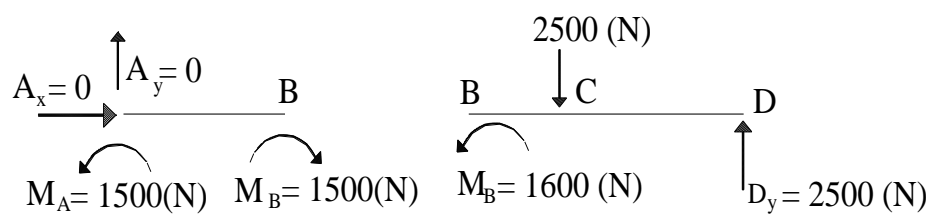
پس از حل کردن داریم :

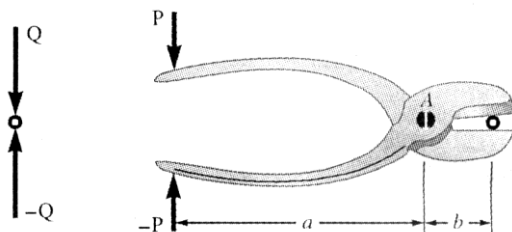


مثال: مطلوب است تعیین نیروهای داخلی :

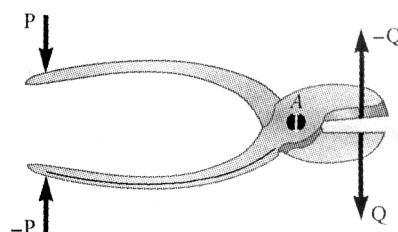
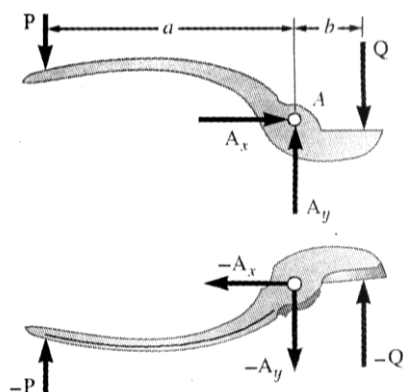


در واقع چون دو ریزو با هم فاصله دارند یک کوپل ایجاد می کنند .

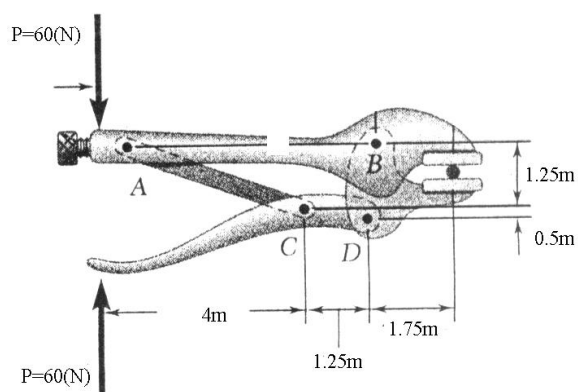




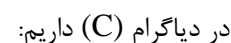
$$\oplus \odot M_B = 0 \Rightarrow (b) \times Q - (a) \times P = 0 \Rightarrow Q = P \times a/b$$



مثال: مطلوب است تعیین نیروهای وارده بر سیستم در E , F .



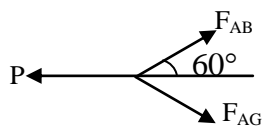
توجه به شکل خواهیم داشت:



$$\begin{aligned} & (-60) \times (5.25) + F_{AC} \times \frac{1.25}{\sqrt{(3.5)^2 + (1.25)^2}} \times (1.25) - F_{AC} \times \frac{(3.5)}{\sqrt{(3.5)^2 + (1.25)^2}} \times (0.25) = 0 \\ \Rightarrow & \frac{F_{AC}}{\sqrt{(3.5)^2 + (1.25)^2}} = 458.2 \text{ (N)} \end{aligned}$$

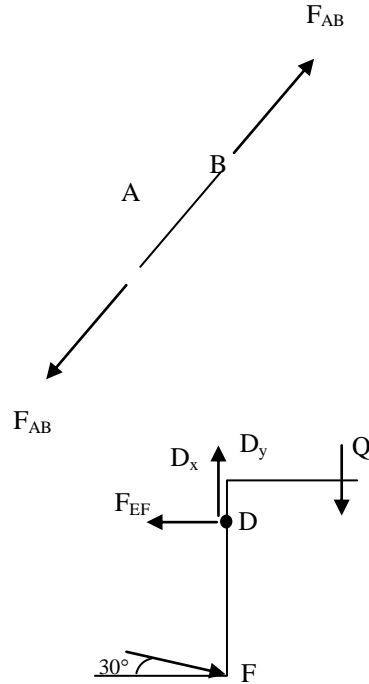
در دیاگرام (a) داریم:

$$Q \times (1.5) + 60 \times (5.5) - F_{AC} \times \frac{(5) \times (1.25)}{\sqrt{(1.25)^2 + (3.5)^2}} = 0 \Rightarrow Q = 1689 (N)$$



$$P = 2F_{AB} \cos 60^\circ$$

$$F_{AB} = P$$



$$+\circlearrowleft \sum M_D = 0:$$

$$- Q(4) + (F_{EF} \cos 30)(4) = 0$$

$$F_{EF} = \frac{Q}{\cos 30} = 1.15Q$$

$$\rightarrow \sum F_x = 0:$$

$$-D_x + F_{EF} \cos 30 = 0$$

$$D_x = F_{EF} \cos 30$$

$$+\uparrow \sum F_y = 0:$$

$$D_y - F_{EF} \sin 30 - Q = 0$$

$$D_y = 1.575Q$$

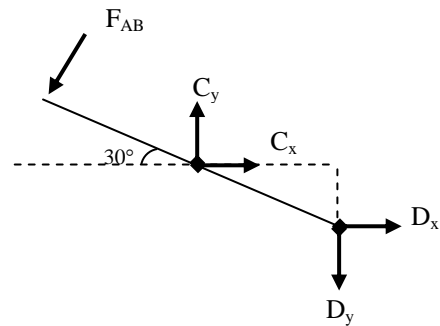
$$+\circlearrowleft \sum M_C = 0:$$

$$+F_{EB}(9.238) - 8D_y + D_x(8 \tan 30) = 0$$

$$+P(9.238) - 8(1.575Q) + (4.619)Q = 0$$

$$+9.238 - 7.98Q = 0$$

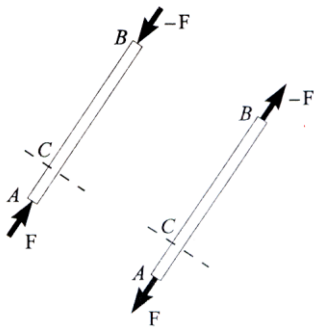
$$\boxed{Q = 1.157P} \quad , \quad \boxed{P = 0.866Q}$$



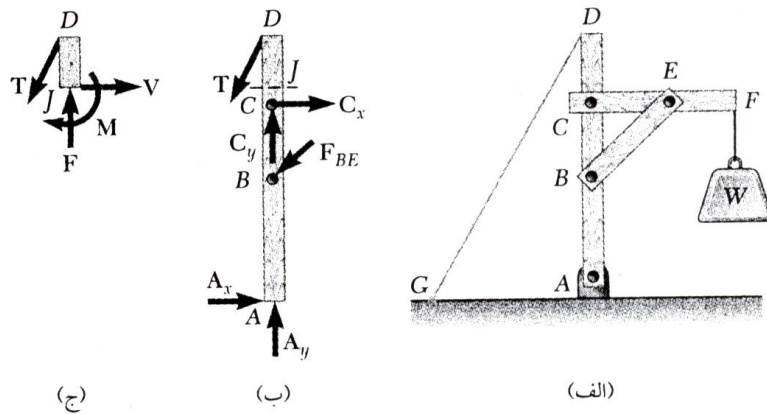
# فصل هفتم

## نیروها در تیرها و کابلها

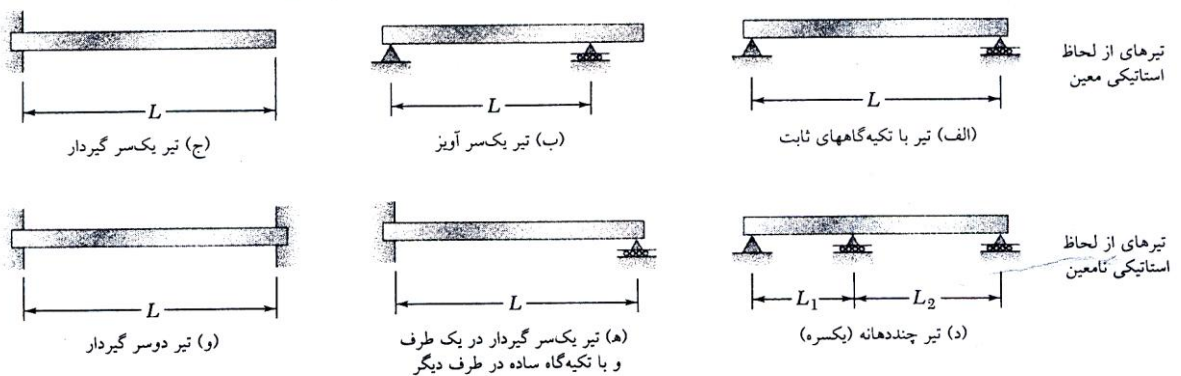
## عضوهای خرپا - نیروهای دو جهت محور عضو 0 - عضو دو نیروئی



## عضوهای قاب - در حالت کلی عضوهایی با نیروهای مانند محوری و برشی و خمشی



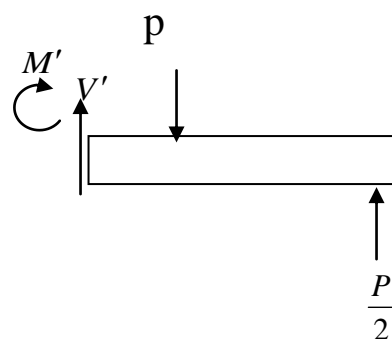
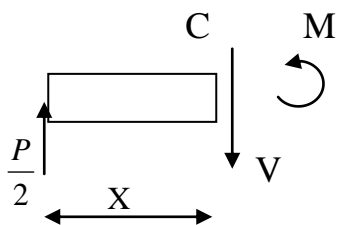
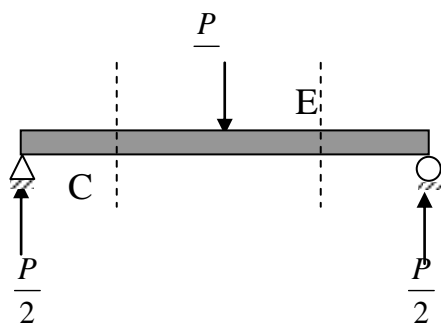
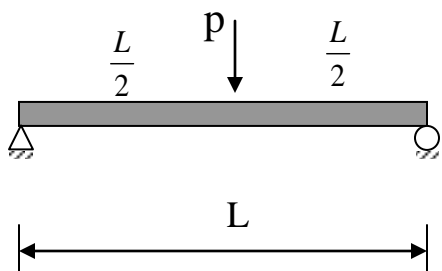
## تیرها - حالات مختلف با رگذاری و تکیه گاه ها



می خواهیم نیروهای داخلی در نقطه C از این تیر را بدست بیاوریم.

$$\begin{aligned} \sum M_A = 0 &\Rightarrow R_B = \text{اول به} \\ \sum f_g = 0 &\Rightarrow R_A = \\ \sum f_y = 0 &\Rightarrow V = \text{دوم} \\ \sum Mc = 0 &\Rightarrow M = \end{aligned}$$

- دیاگرام برش ها و گشتاورها (خمش ها)



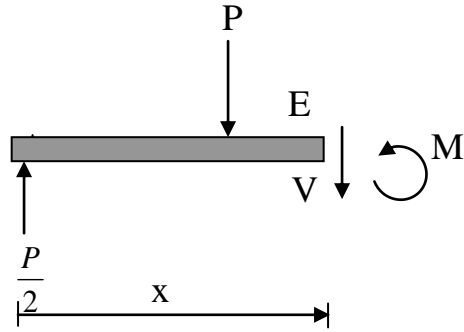
شکل AC :

$$+\uparrow \sum F_y = 0 \quad \frac{P}{2} - V = 0 \quad V = \frac{P}{2}$$

$$+\uparrow \sum M_C = 0 \quad M = \frac{P}{2} x$$

$$@ \ x = 0 \Rightarrow V = \frac{P}{2} , \quad M = 0$$

$$@ \ x = \frac{L}{2} \Rightarrow V = \frac{P}{2} , \quad M = \frac{PL}{4}$$



شکل AE :  $+\uparrow \sum F_y = 0 \quad \frac{P}{2} - P - V = 0 \quad V = -\frac{P}{2}$

$+\uparrow \sum M_c = 0 \quad M = P(L-x)/2$

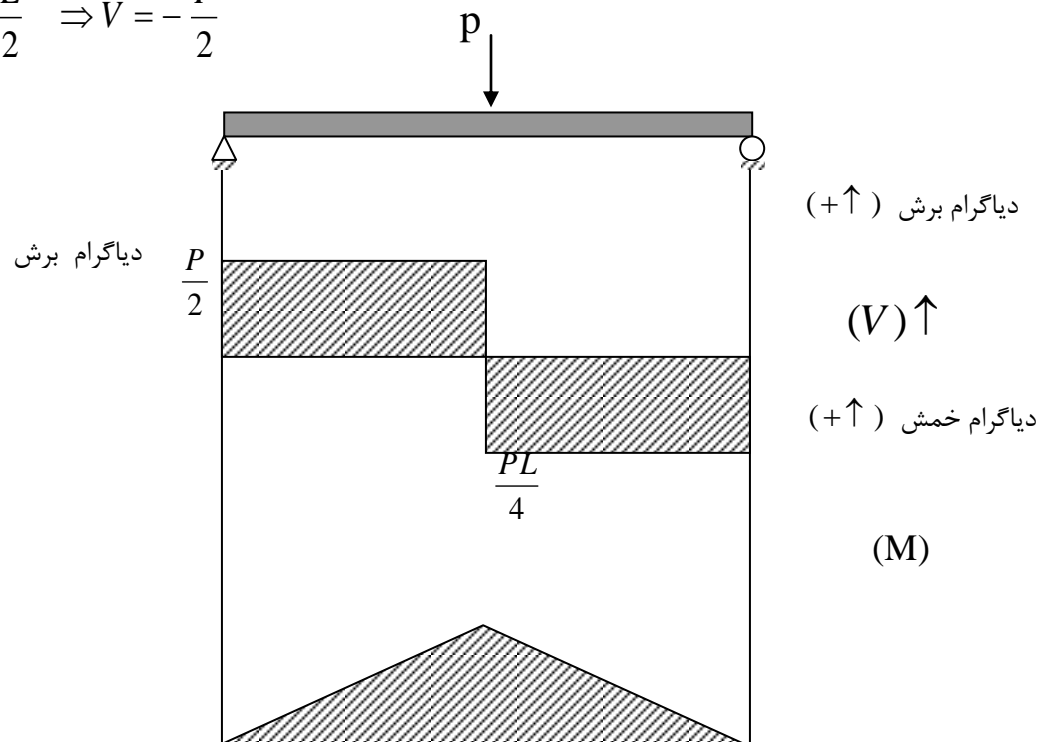
@  $x = \frac{L}{2} \Rightarrow M = \frac{PL}{4}$

@  $x = L \Rightarrow M = 0$

@  $x = \frac{L^-}{2} \Rightarrow V = \frac{P}{2}$

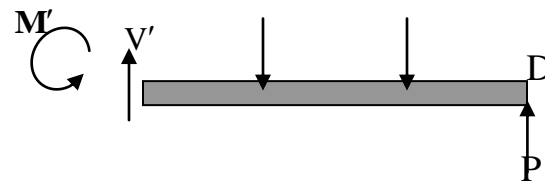
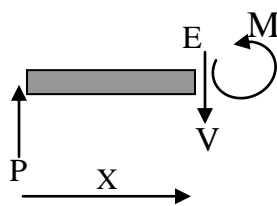
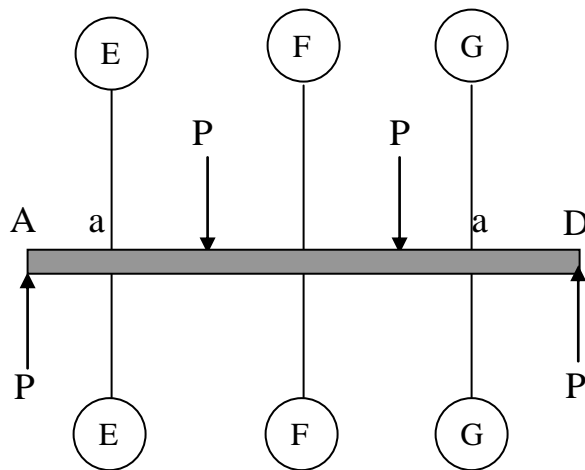
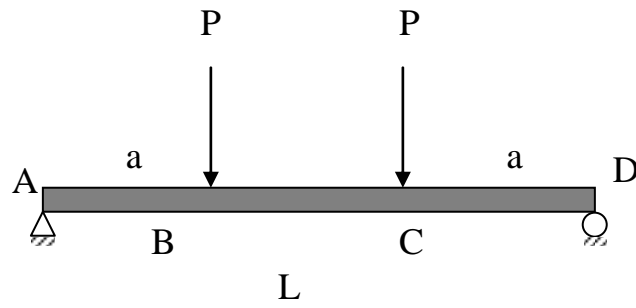
@  $x = L \Rightarrow V = -\frac{P}{2}$

@  $x = \frac{L^+}{2} \Rightarrow V = -\frac{P}{2}$



مثال :

نمودار خمشی و برش تیر زیر را رسم کنید



$$0 < x < a$$

$$+\uparrow \sum F_y = 0 \Rightarrow V = P$$

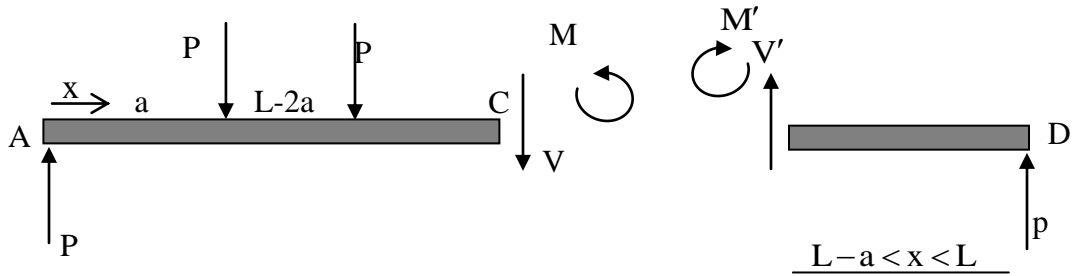
$$+\curvearrowright \sum M_E = 0 \Rightarrow M = Px$$

$$a < x < L - a$$

$$+\uparrow \sum F_y = 0 \Rightarrow V = 0$$

$$\curvearrowright \sum M_E = 0 \Rightarrow m = P(x)$$

$$L - a < L$$



$$+\uparrow \sum F_y = 0 \Rightarrow V = -p$$

$$+\curvearrowright \sum M_G = 0 \Rightarrow m = P(L) - P(x)$$

$$m - Px + P(x-a) + P[x - (L-a)] = 0$$

$$m - Px + Px - Pa + Px - P(L-a) = 0$$

$$x=0 \Rightarrow V=P, \quad m=0$$

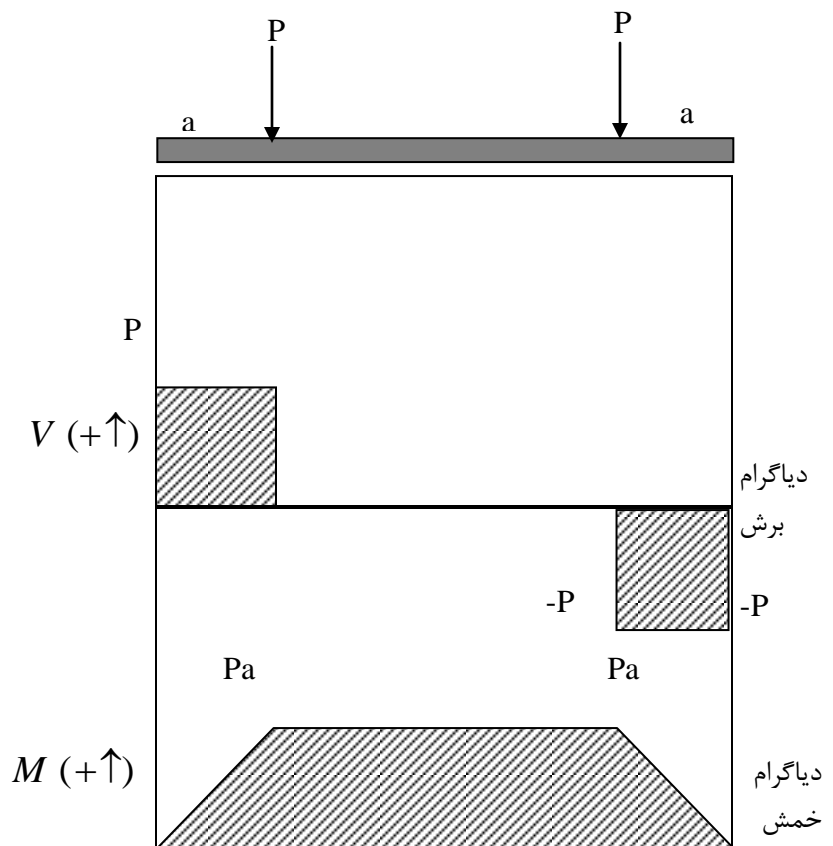
$$x=a^- \Rightarrow V=P, \quad m=Pa$$

$$x=a^+ \Rightarrow V=0, \quad m=Pa$$

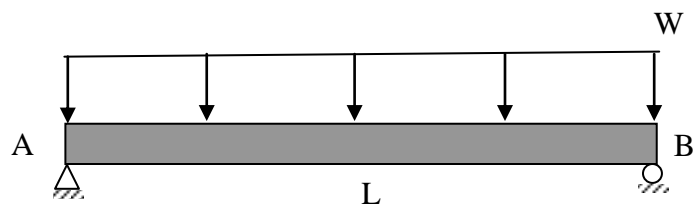
$$x=(L-a)^- \Rightarrow V=0, \quad m=Pa$$

$$x=(L-a)^+ \Rightarrow V=0, \quad m=Pa$$

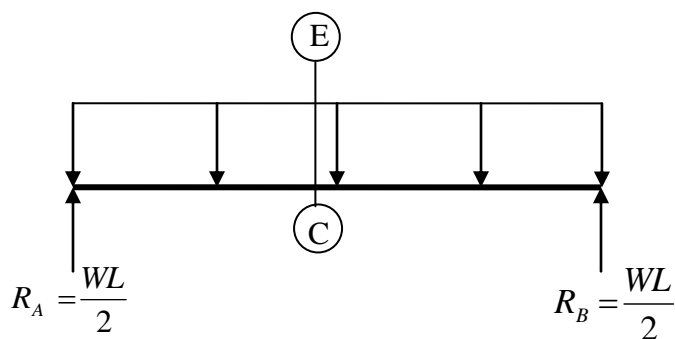
$$x=L \Rightarrow V=-p, \quad m=0$$



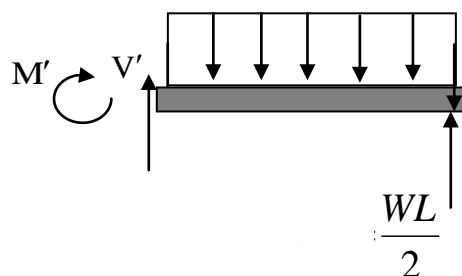
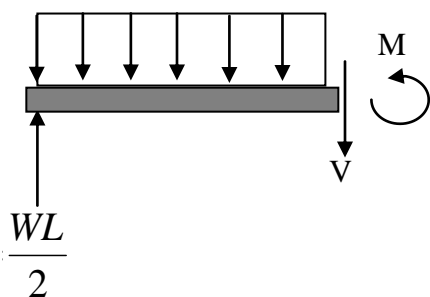
مثال : نمودار خمشی برش تیر زیر را رسم کنید .



$$+ \sum M_A = 0 \Rightarrow R_B = \frac{WL}{2}$$



$$R_A = \frac{WL}{2}$$



$$+ \uparrow \sum F_y \Rightarrow \frac{WL}{2} - WX - V = 0$$

$$V = W \left( \frac{L}{2} - x \right)$$

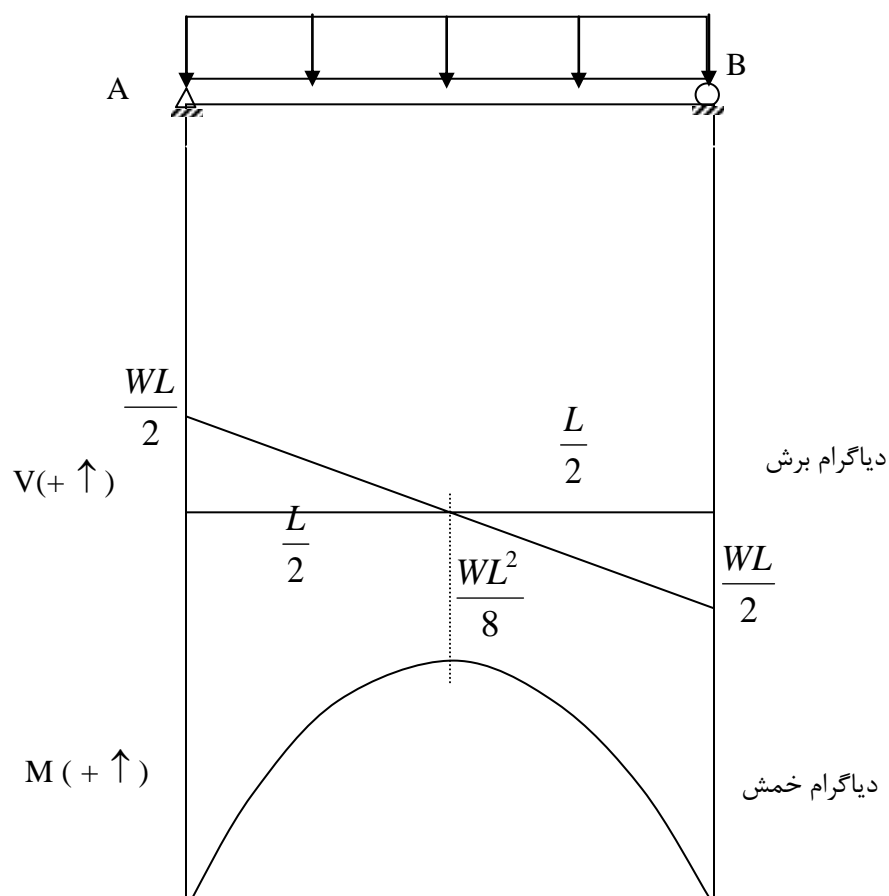
$$+ \curvearrowright \sum M_c = 0 \Rightarrow \frac{WL}{2} x - \frac{Wx^2}{2} + M = 0$$

$$M = \frac{W}{L} (Lx - x^2)$$

$$x=0 \Rightarrow V = \frac{WL}{2}, M=0$$

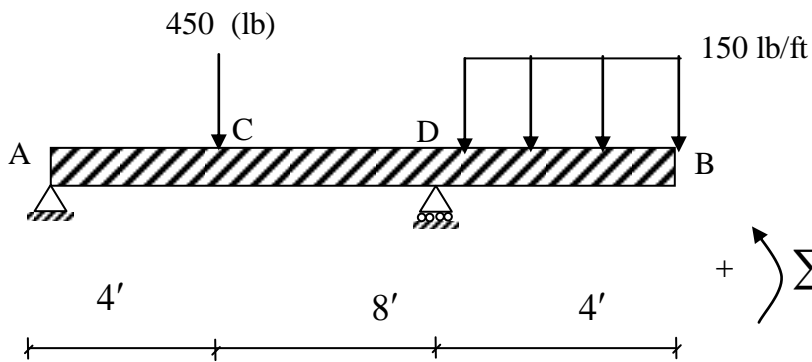
$$x=\frac{L}{2} \Rightarrow V=0, M=\frac{WL^2}{8}$$

$$x=L \Rightarrow V=-\frac{WL}{2}, M=0$$



لنگر خمشی از برش یک درجه بیشتر است .  
همواره جایی که برش صفر است ماکزیمم لنگر خمشی داریم .

مثال :



$$+ \curvearrowright \sum m_A = 0 \Rightarrow 12 R_D - 460 (4) - 600 (14) = 0$$

$$R_D = 850 \text{ (lb)} \uparrow$$

$$+ \uparrow \sum F_y = 0 \Rightarrow R_A = 200 \text{ (lb)} \uparrow$$

C to A

$$0 < x < 4$$

$$+ \uparrow \sum F_y = 0 \Rightarrow R_A - V = 0 \Rightarrow V = 200$$

$$+ \curvearrowright \sum M = 0 \Rightarrow M - 200x - 460(x-4) = 0 \Rightarrow m = 1800 - 260x$$

D to C

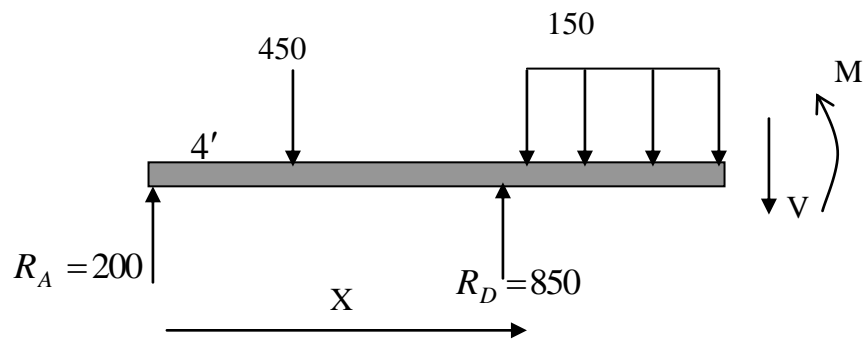
$$4 < x < 12$$

$$+ \uparrow \sum f_y \Rightarrow R_A - 450 - V = 0 \Rightarrow V = -250$$

$$+ \curvearrowright \sum M = 0 \Rightarrow M - 200X - 450(x-4) = 0 \Rightarrow M = 1800 - 250x$$

$$12 < x < 16$$

D ٤ B ٭



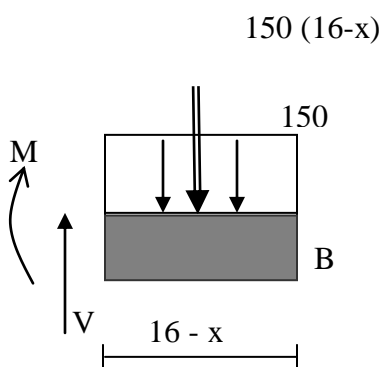
$$+ \uparrow \sum F_y = 0 \Rightarrow 200 + 850 - 450 - 150(x-12) - V = 0$$

$$V = 150(16-x)$$

$$+ \curvearrowright \sum M = 0 \Rightarrow -200x + 450(x-4) + 150(x-12)\left(\frac{x-12}{2}\right) + M$$

$$-850(x-12) = 0$$

$$M = -75 (16-x)^2$$



$$+ \uparrow \sum F_y = 0 \quad V = 150(16-x)$$

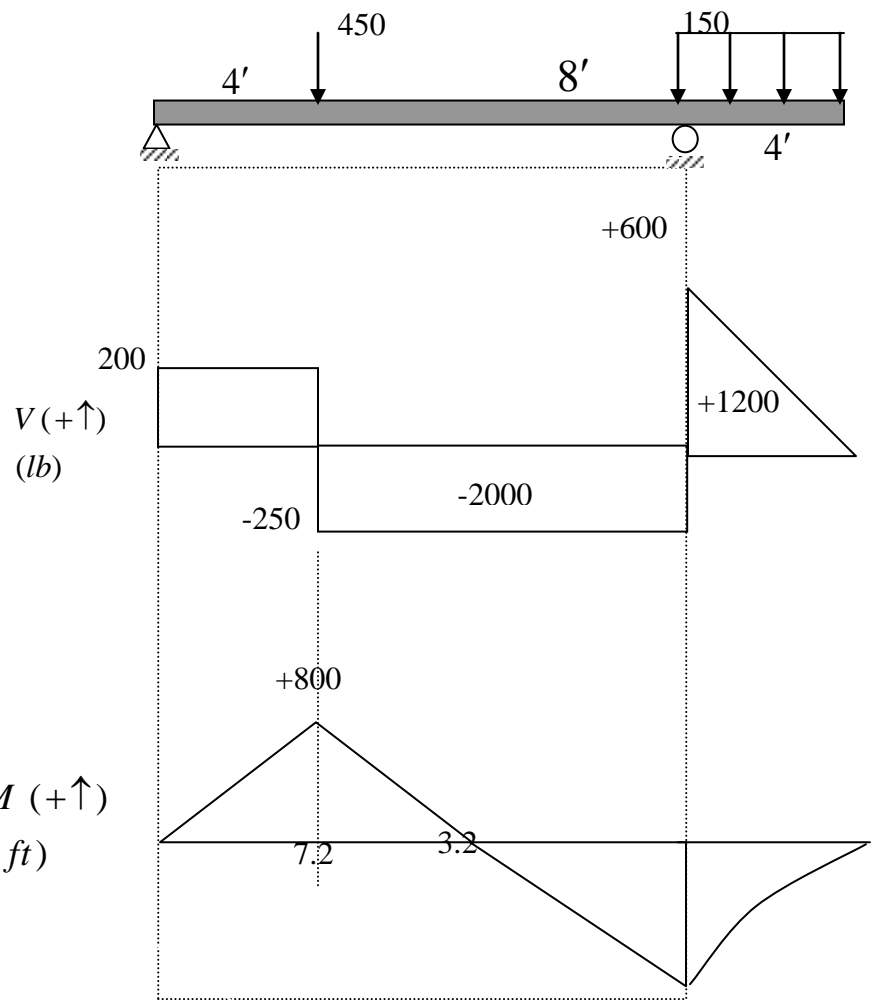
$$+ \curvearrowright \sum M = 0 \quad -M = 150(16-x)\left(\frac{16-x}{2}\right) = 0$$

$$M = -75 (16-x)^2$$

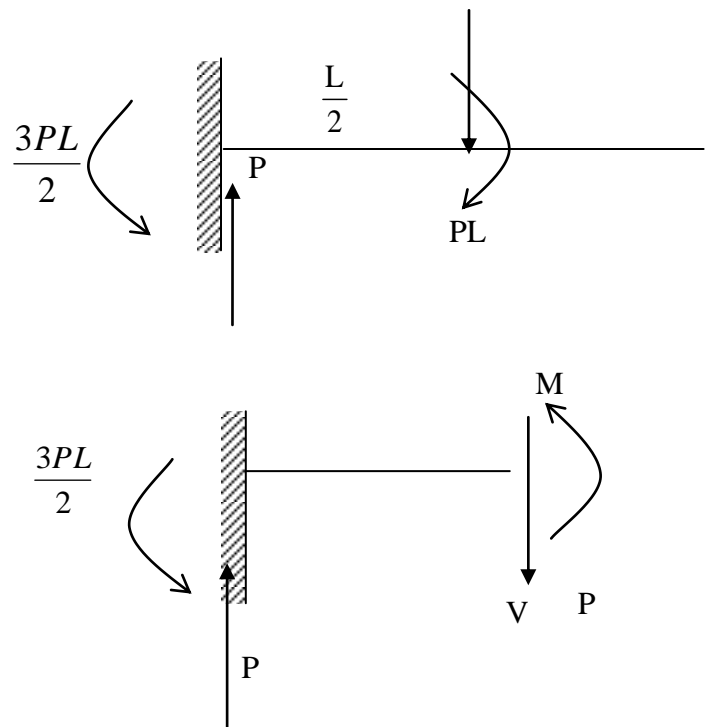
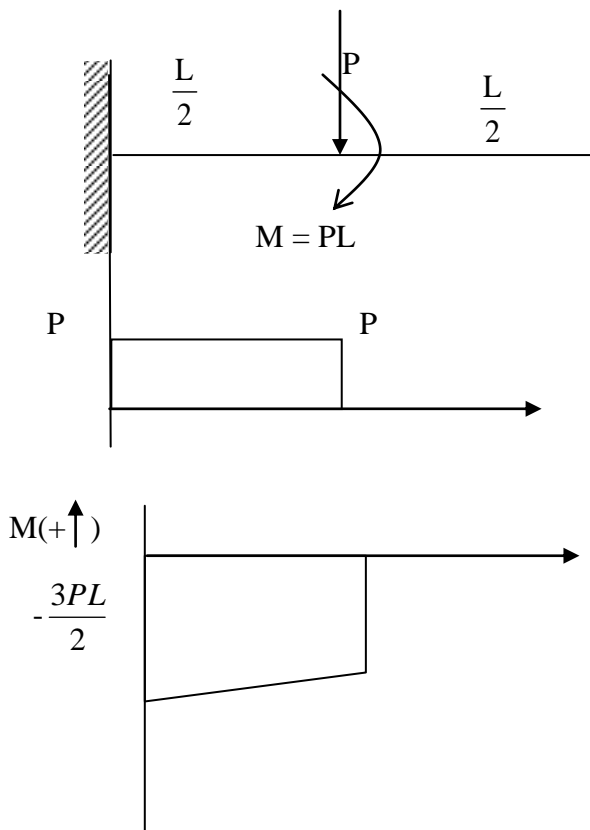
$$9 < x < 12$$

$$M = 1800 - 260x = 0$$

$$A = \frac{1800}{250} 7.2 \text{ (ft)}$$



مثال:



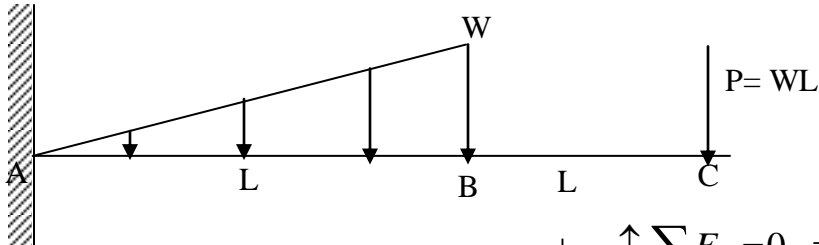
$$+\curvearrowright \sum M = 0 \Rightarrow \frac{3 PL}{L} + M - Px = 0$$

$$+\uparrow \sum F_y = 0 \rightarrow P - V = 0 \rightarrow P = V$$

$$M = Px - \frac{3 PL}{L}$$

$$x=0 \Rightarrow V = P, M = -\frac{3 PL}{L}$$

$$x = \frac{L^2}{2} \Rightarrow V = P, M = -PL$$



مثال :

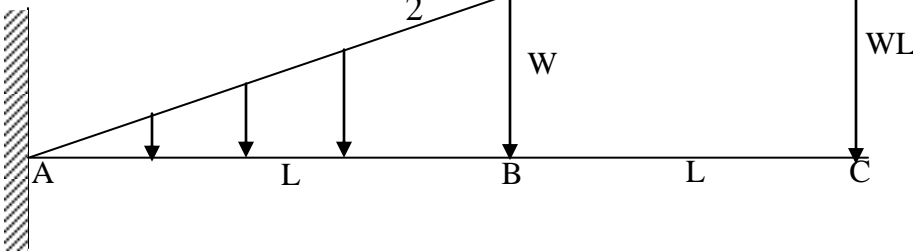
$$+\uparrow \sum F_y = 0 \Rightarrow -\frac{WL}{L} - WL + R_A = 0$$

$$+\curvearrowright \sum M = 0$$

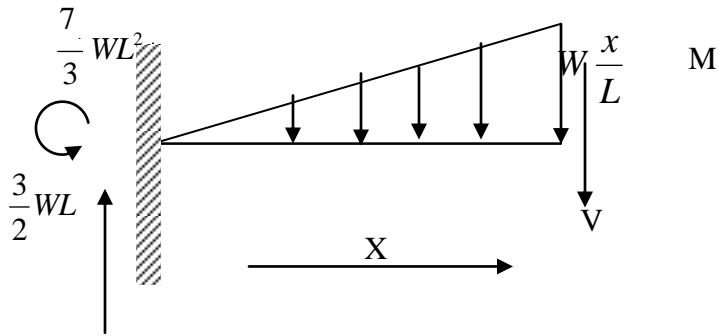
$$\frac{WL}{2} \left( \frac{qL}{3} \right) + WL (2L) - M = 0$$

$$M = \frac{7}{3} WL^2$$

$$M = \frac{7}{2} EL^2$$



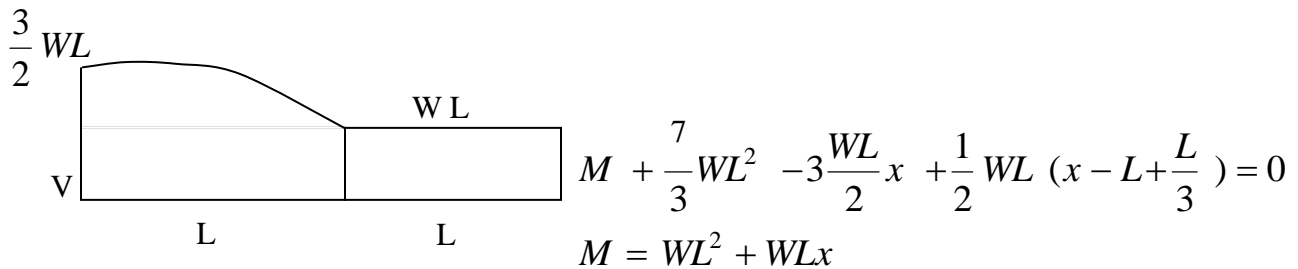
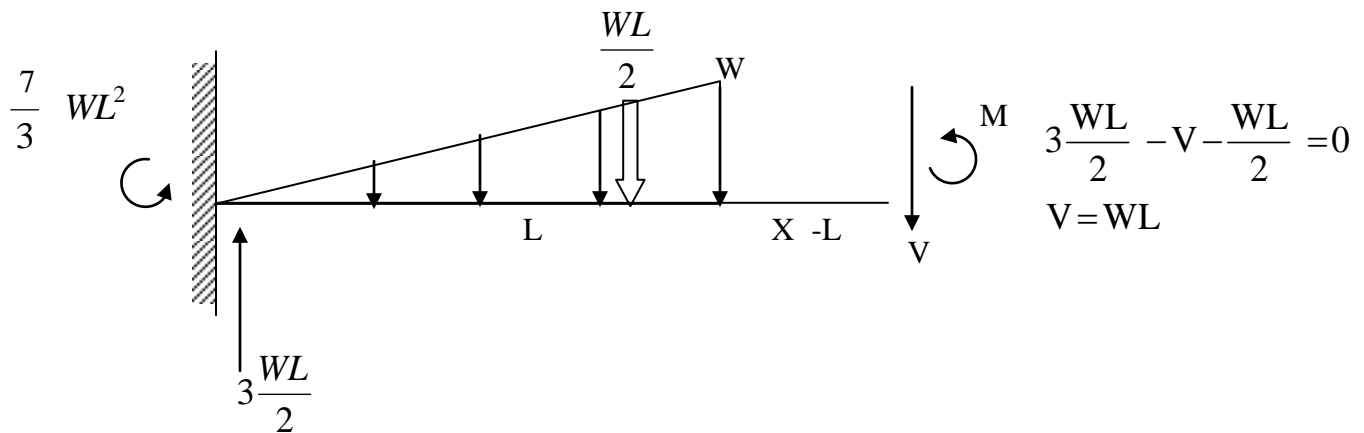
$$R_A = \frac{WL}{2} + WL = 3 \frac{WL}{2}$$

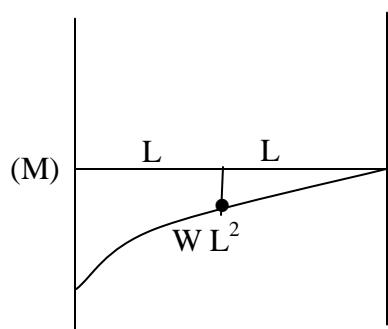


$$+ \quad \uparrow \sum F_y = 0 \Rightarrow \quad 3\frac{WL}{2} - V - W\left(\frac{x}{L}\right)\left(\frac{x}{2}\right) = 0$$

$$V = 3\frac{WL}{2} - \frac{Wx^2}{2L}$$

$$+ \quad \curvearrowright \sum M = 0 \Rightarrow M + \frac{-7}{3}WL^2 + \frac{3WL}{2}X - W\frac{x^3}{6L}$$





$$x=0 \Rightarrow V=3\frac{WL}{2}, M=-\frac{1}{2}WL^2$$

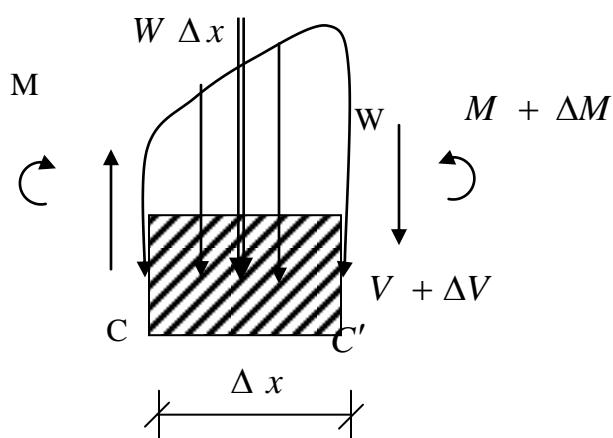
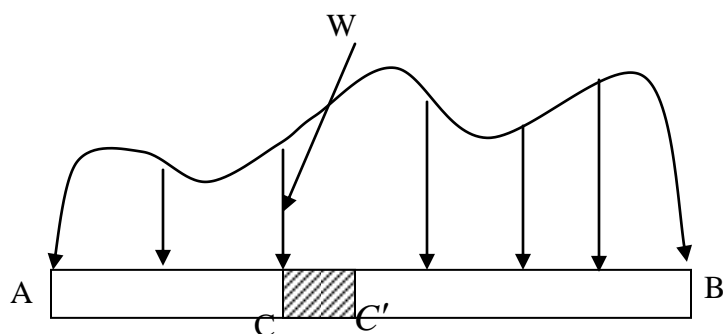
$$x=\frac{L}{3} \Rightarrow V=\frac{26}{18}WL$$

$$x=L \Rightarrow V=WL, M=-WL^2$$

$$x=\frac{2L}{3} \Rightarrow V=\frac{23}{18}WL$$

$$x=2L \Rightarrow V=0, M=0$$

### ارتباط بین نیرو، برش و خم



$$V - (V + \Delta V) - W \Delta X = 0$$

$$\Delta V = -W \Delta X$$

ضریب زاویه  
برش

$$\frac{dV}{dx} = -W$$

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta x} = -W$$

$$\int \frac{dV}{dx} dx = \int -W dx$$

$$V \Big|_{V_C}^{V_D} = - \int_{x_C}^{x_D} W dx \Rightarrow V_D - V_C = - \int_{x_C}^{x_D} W dx =$$

مساحت زیر نیروها بین C و D

این فرمول برای فاصله هائی می باشد که نیروی متمرکز وجود نداشته باشد .  
فقط بین نیروهای متمرکز صادق می باشد .

$$(M + \Delta M) - M - V \Delta x + W \Delta x \frac{\Delta x}{2} = 0$$

$$\Delta M = V \Delta x - \frac{1}{2} W (\Delta x)^2$$

$$\frac{\Delta M}{\Delta x} = V - \frac{1}{2} W (\Delta x) \quad \Delta x \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{dM}{dx} = V$$

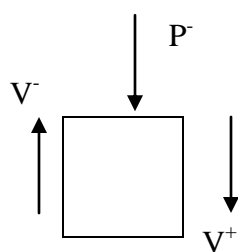
$$\boxed{\frac{dM}{dx} = V}$$

نیروی برش = ضریب زاویه خم

وقتی که  $V = 0$  ← نقطه ماکزیمم خم

$$\int \frac{dM}{dx} dx = \int V dx + \int_{M_c}^{M_D} dM = \int_{x_c}^{x_D} V dx$$

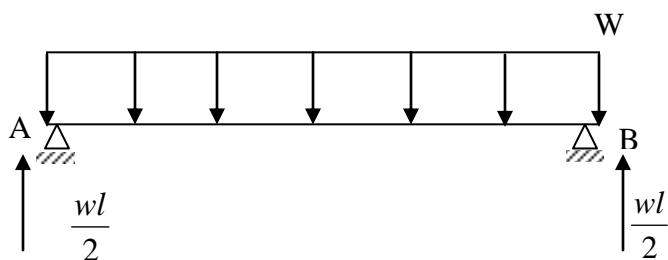
$$M_D - M_c = \int_{x_c}^{x_D} V dx = \text{مساحت زیر نیروهای برش بین C و D}$$



$$-P - V^+ + V^- = 0$$

$$V^+ = V^- - P$$

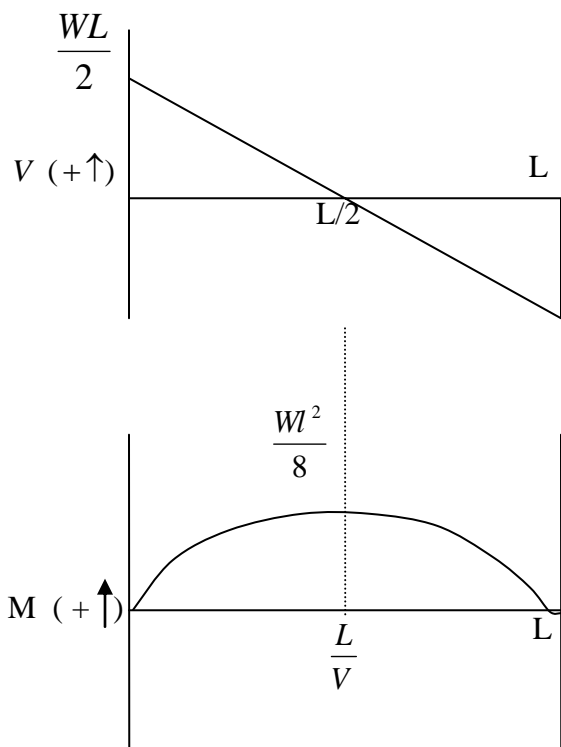
مثال:



$$\frac{dV}{dx} = -W$$

$$V - V_A = - \int_0^x W dx = -Wx$$

$$V = V_A - Wx = \frac{WL}{2} - Wx = W \left( \frac{L}{2} - x \right)$$



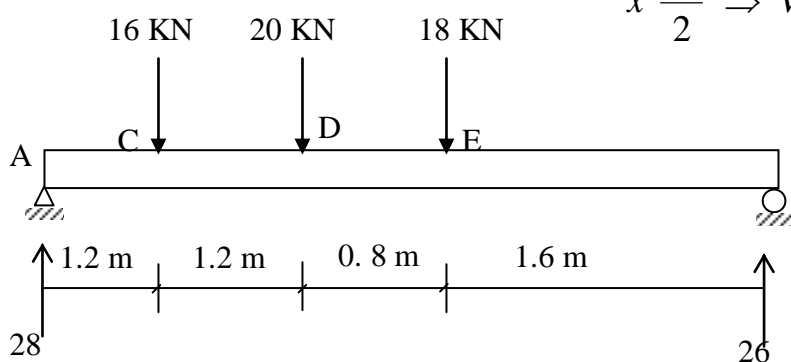
$$\frac{dM}{dx} = V$$

$$M - M_A = \int_D^x v dx = \int_D^x W \left( \frac{L}{2} - x \right) dx = \frac{W}{2} (Lx - x^2)$$

کشتاور خمشی یک سهمی است .

نقطه ماکزیمم در  $x = \frac{L}{2}$  قرار دارد چونکه  $V = 0$

$$x \frac{L}{2} \Rightarrow V=0 \quad M=M_{\max} = \frac{WL^2}{8}$$



مثال

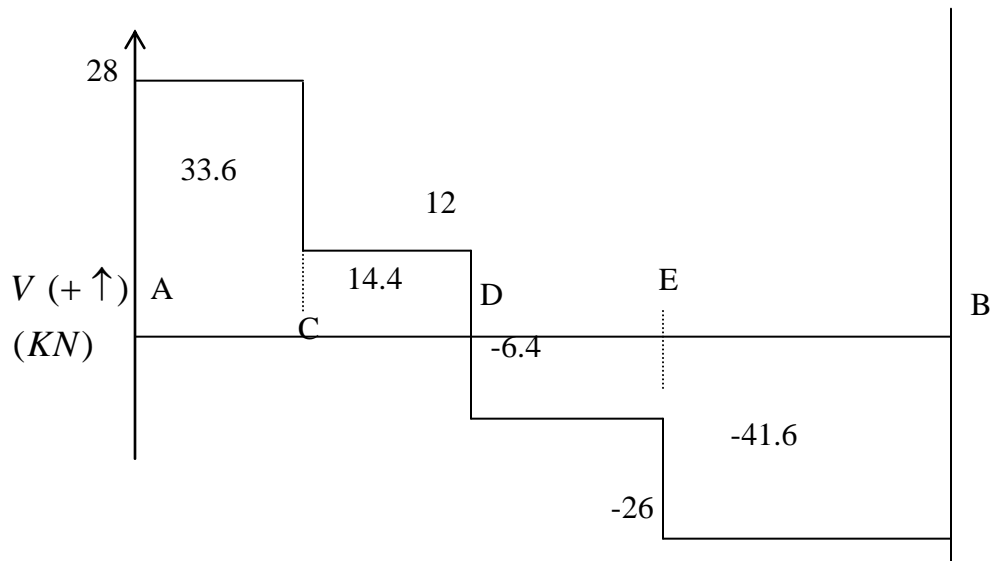
$$V_c - V_A = - \int_{x_A}^{x_C} W dx = 0$$

$$V_C^- - V_A = 0 \Rightarrow V_C^- = V_A = 28 \text{ (KN)}$$

$$V_C^+ = V_C^- - 16 = 12 \text{ (KN)}$$

$$V_D^- - V_C^+ = - \int_{x_C}^{x_D} W dx = 0 \Rightarrow V_D^- = V_C^+ = 12 \text{ (KN)}$$

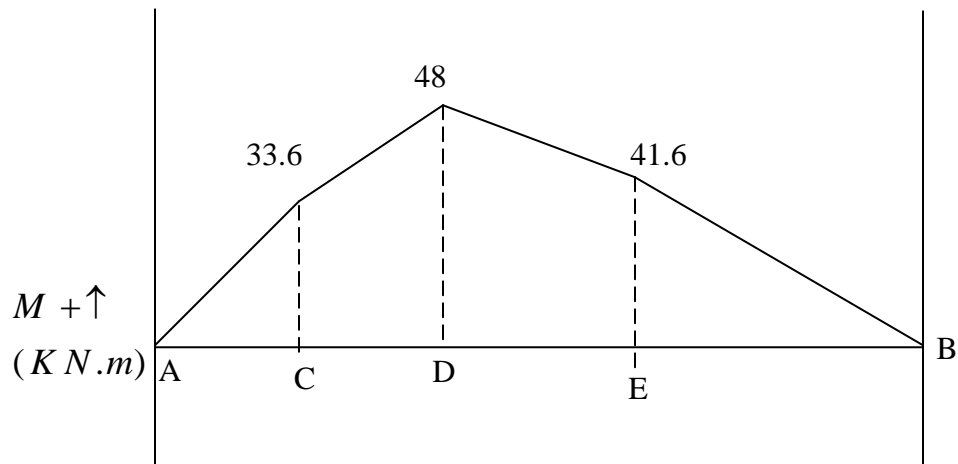
$$V_D^+ = V_D^- - 20 = 12 - 20 = -8 \text{ (KN)}$$



$$V_E^- - V_D^+ = - \int_{x_D}^{x_E} W dx = 0 \Rightarrow V_E^- = V_D^+ = 8 \text{ KN}$$

$$V_E^+ = V_E^- - 18 = -26 \text{ (KN)}$$

$$V_B - V_C^+ = - \int_{x_E}^{x_B} W dx = 0 \Rightarrow V_B = V_E^+ = -26 \text{ (KN)}$$



$$M_C - M_A = \int_{x_A}^{x_C} V dx = \int_0^{1.2} 28 dx = 28 (1.2) = 33.6$$

$$M_C = 0 + 33.6 = 33.6 \text{ (KN.m)}$$

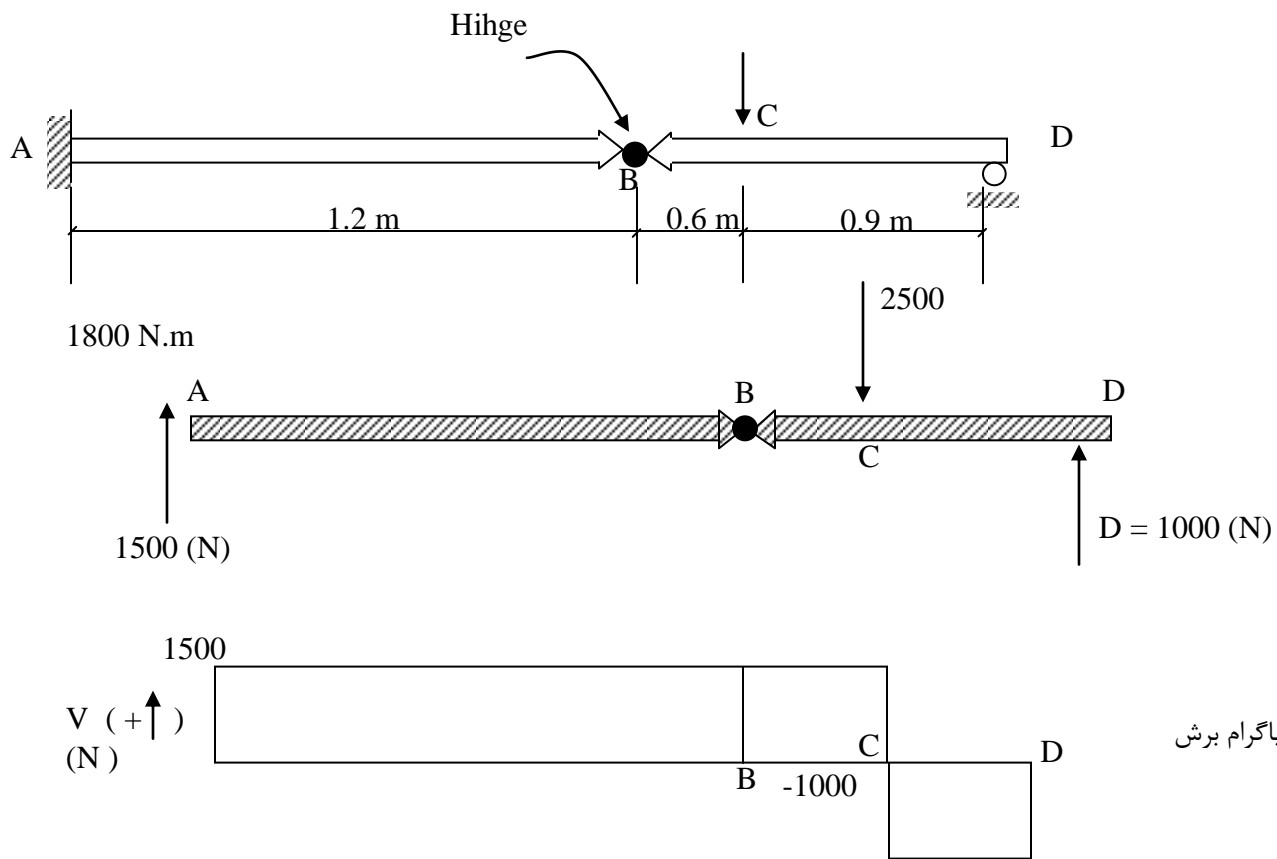
$$M_D - M_C = \int_{x_C}^{x_D} V dx = \int_{1.2}^{2.4} 14.4 dx = 14.4 (2.4 - 1.2)$$

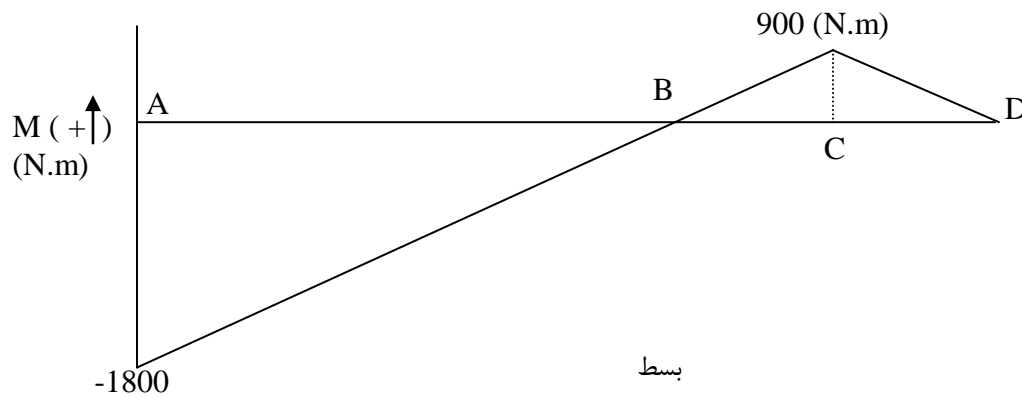
$$M_D = M_C + 14.4 = 33.6 + 14.4 = 48 \text{ (KN.m)}$$

$$M_E - M_D = \int_{x_D}^{x_E} V dx = \int_{2.4}^{3.2} (-6.4) dx = -6.4 (3.2 - 2.4)$$

$$M_E = M_D - 6.4 \times 0.8 = 48 - 6.4 \times 0.8 = 44.6 \text{ (KN.m)}$$

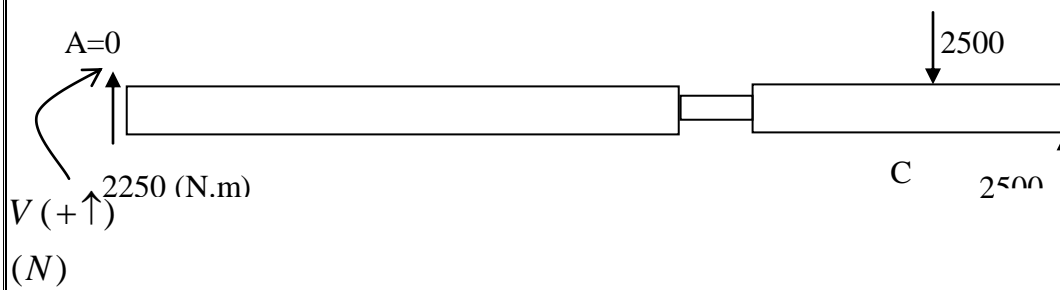
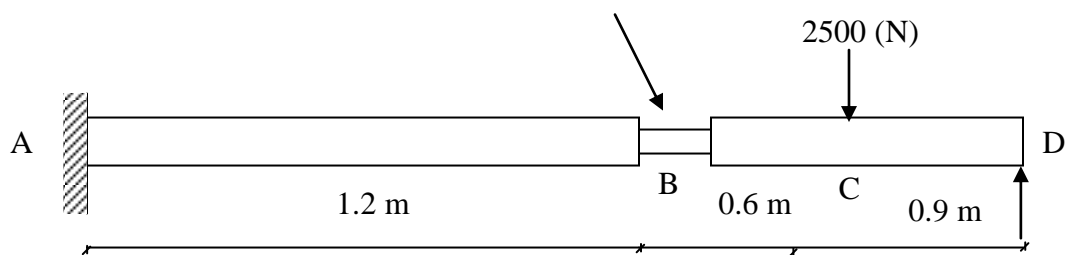
$$M_B - M_E = \int_{x_E}^{x_B} V dx = \int_{3.2}^{4.8} (-41.6) dx = -41.6 (1.6)$$



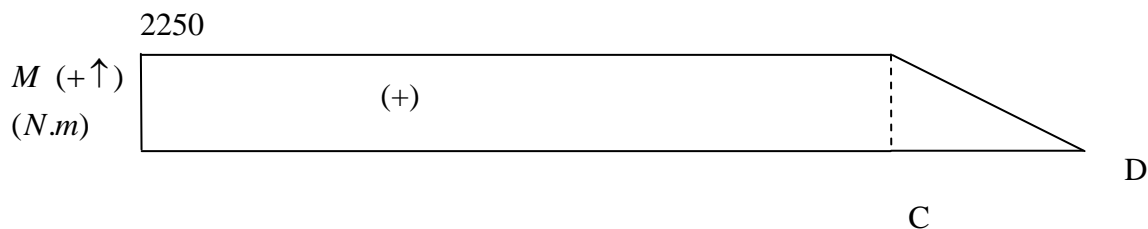


دیاگرام خمش

بسط



دیاگرام برش

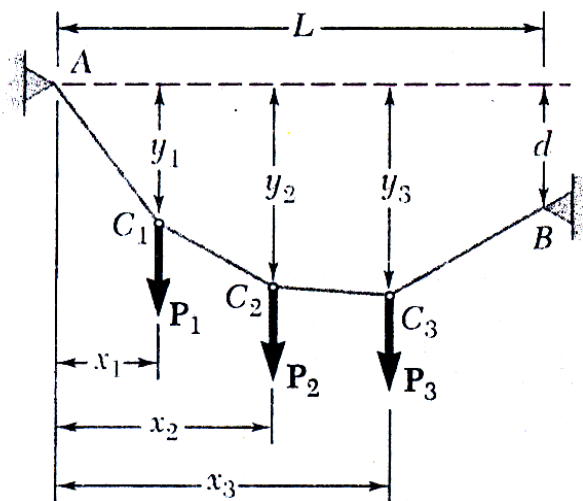


کابل با نیروهای متمرکز :

کابل ها در مهندسی در موارد مختلف استفاده می شوند : پل های معلق ، دکل ها و غیره

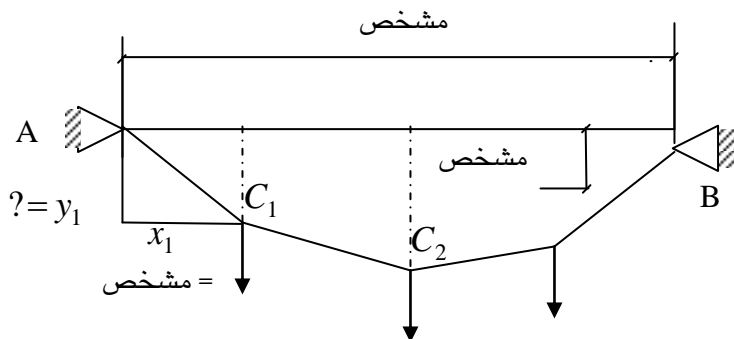
کابل ها را می توان به دو دسته تقسیم کرد : 1- کابل های با نیروی متمرکز . 2- کابل های تحت نیروی گسترده .

فرض می کنیم که کابل در دو نقطه A و B در تکیه گاه قرار دارد و تحت اثر چند نیرو در نقاط C1 الی C4 قرار گرفته است که فواصل افقی آن مشخص است . فرض می کنیم که کابل کاملاً نرم و در مقابل خمش از خود مقاومتی نشان نمی دهد .



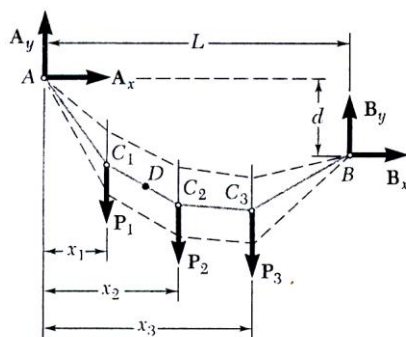
همچنین فرض می کنیم که وزن کابل را می توان در مقابل نیروهای وارده نادیده گرفت .

سپس با در نظر گرفتن وارد شدن نیروها در نقاط مختلف و بدون نیروی گسترده هر قسمت از کابل بین دو نیرو را می توان عضو با دو نیرو در نظر گرفته که در کشش می باشد .



می دانیم فاصله بین A و B را هم در جهت افقی و هم در جهت عمودی .

می بایستی که شکل این کابل را پس از وارد کردن نیروها بدست بیاوریم و همینطور مقدار کشش در طناب را در قسمت های مختلف یعنی در حقیقت مقدار فاصله بین نقطه A از C1 در جهت عمودی مشخص گردد و همینطور مقادیر فواصل بین نقاط A و C2 و C3 و C4 در جهت عمودی مشخص گردد .



یک معادله بر حسب  $A_y, A_x$

( با گرفتن مماس در نقطه B )

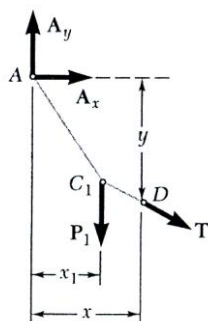
دیاگرام آزاد کل

در این حالت می توانیم یک معادله برای  $A_y, A_x$

بنویسیم اگر مختصات نقطه D را بدانیم

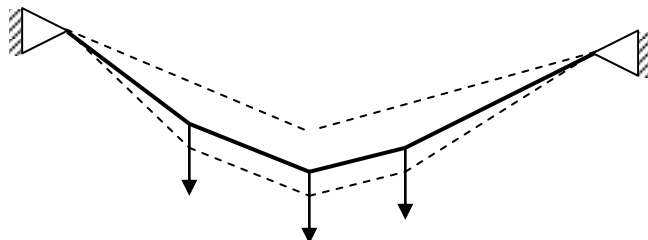
( با گرفتن مماس در نقطه D )

دیاگرام قسمت چپ کابل

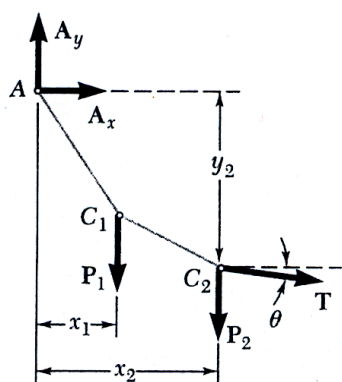


اگر مختصات نقطه D را نداشته باشیم این مسئله بصورت نامعین می بود

و هر جوابی برای کابل در تغییر شکل می توانست داشته باشد .



هنگامیکه عکس العمل در نقطه A مشخص گردد تمام مختصات نقاط زیر نیرو را هم می توان از دیانگرام آزاد قسمتی از کابل مشخص کرد .



$$\curvearrowright + \sum M_{C2} = 0 \Rightarrow (y_2)(A_x) - A_x(x_2) + P_1(x_2 - x_1) = 0$$

$$+ \uparrow \sum F_y = 0 \Rightarrow -T \sin \theta - P_1 - P_2 + A_y = 0$$

$$\rightarrow + \sum F_x = 0 \Rightarrow T \cos \theta + A_x = \boxed{T \cos \theta = -A_x}$$

مولفه افقی کشش در کابل در تمام طول طناب یکسان می باشد .

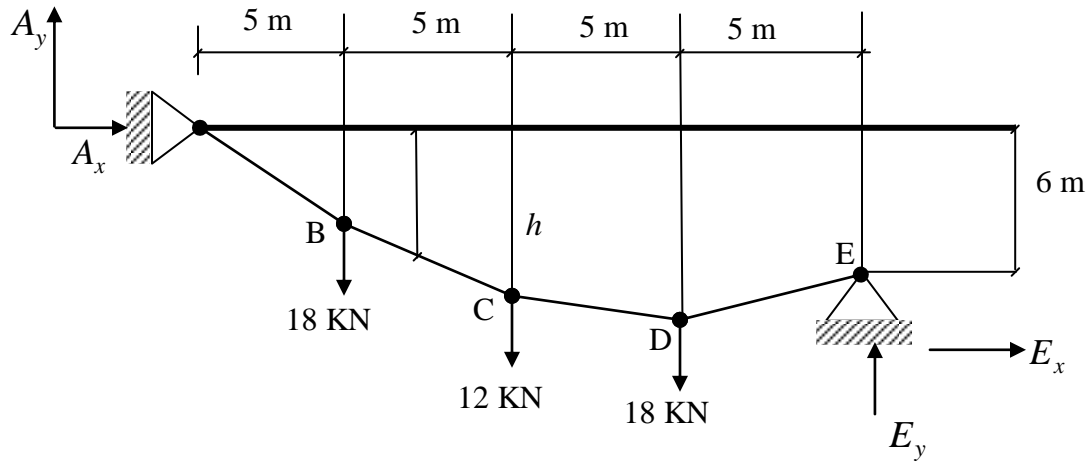
همچنین بدست می آید که کشش بیشترین است وقتی که  $\cos \theta$  کمترین باشد یعنی در قسمتی که بیشترین زاویه را با افق

داشته باشیم که طبیعتاً در دو انتهای کابل نزد تکیه گاه خواهد بود.

مثال\_

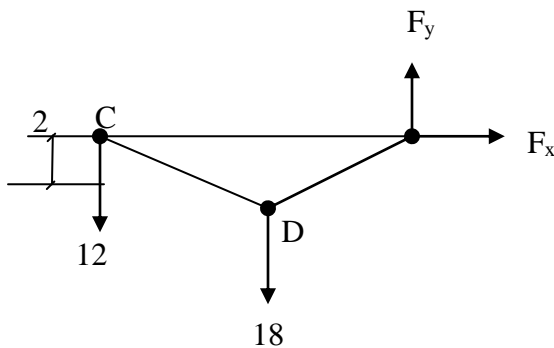
الف) اگر  $8m = R_c$  باشد عکس العمل در نقطه E و حداکثر کشش در طناب را بدست بیاورید.

ب) مقدار  $R_c$  را طوری بدست بیاورید که قسمت  $CD$  کابل افقی باشد و همینطور عکس العمل  $E$  بدست بیاورید.



$$+ \sum M_A = 0 \quad \curvearrowright \quad E_x(6) + (E_y(10) - (18)(5) - 12(10) - 18(15)) = 0$$

$$6E_x + 20E_y - 480 = 0 \quad \Rightarrow \quad 3E_x + 10E_y = 240 \quad (1)$$



$$+ \sum M_C = 0 \quad \Rightarrow \quad -E_x(2) - E_y(10) - 18(5) = 0 \quad \Rightarrow \quad 2E_x - 10E_y = -90 \quad (2)$$

$$E_x = 30 \text{ KN} \rightarrow$$

$$E_y = 15 \text{ KN} \uparrow$$

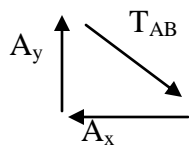
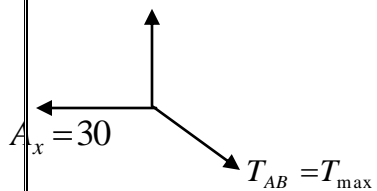
بین (1) و (2) خواهیم داشت

$$\sum F_x = 0 \quad A_x + E_x = 0 \quad \Rightarrow \quad A_x = -30 \text{ KN} \quad \Rightarrow \quad A_x = 30 \text{ KN} \leftarrow$$

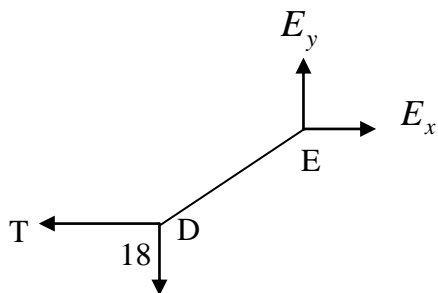
$\Rightarrow$  در سیستم کل

$$\sum F_y = 0 \quad A_y - 18 - 12 - 18 + E_y = 0 \quad \Rightarrow \quad A_y = 33 \text{ KN} \uparrow$$

$$A_y = 33$$



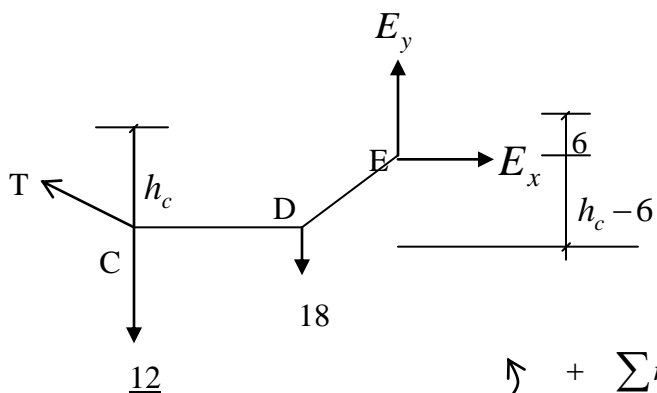
$$T_{AB} = \sqrt{33^2 + 30^2} = 44.6 \text{ KN}$$



(ب)

$$+ \uparrow \sum F_y = 0 \Rightarrow E_y - 18 = 0 \Rightarrow E_y = 18 \text{ KN} \uparrow$$

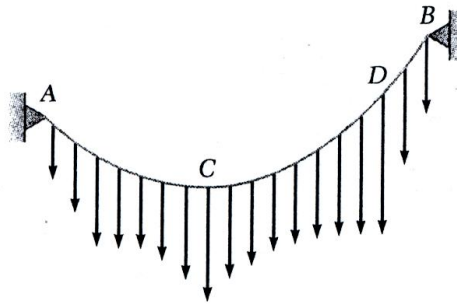
$$3 E_x + 10 E_y = 240 \quad (1) \Rightarrow E_x = 20 \text{ KN} \rightarrow$$



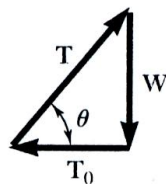
$$\curvearrowright + \sum m_C = 0 \Rightarrow (18)(10) - (20) \left( h_c - \frac{\sigma}{6} \right) - 18(5) = 0$$

$$h_c = 10.5 \text{ (m)}$$

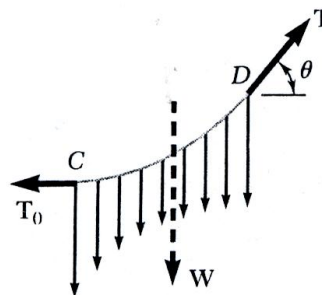
کابل با نیروهای گسترده :



(الف)



(ج)



(ب)

هر قسمت به صورت منحنی می باشد و نیروی T بصورت مماس بر منحنی می باشد

این رابطه می گوید که مولفه افقی کشش همیشه ثابت است برابر است با  $T_0$  ( کشش در پائین ترین نقطه کابل )

$$T \cos \theta = T_0$$

این رابطه می گوید که مولفه عمودی کشش برابر است با مقدار نیروی گسترده از پائین ترین نقطه

$$T \sin \theta = W$$

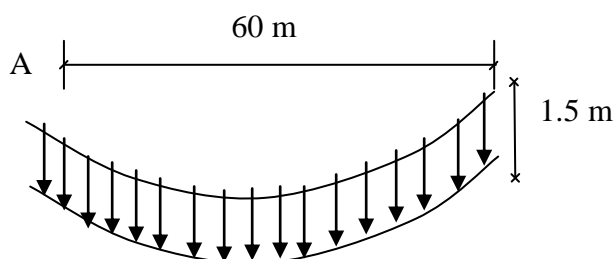
$$T = \sqrt{T_0^2 + W^2}$$

برای T داریم:

کشش کمترین است در پائین ترین نقطه و ماکزیمم در یکی از دو نقطه تکیه گاه ها

$$\tan \theta = \frac{W}{T_0}$$

مثال -



(الف) ماکزیمم کشش را در سیم را بدست بیاورید.

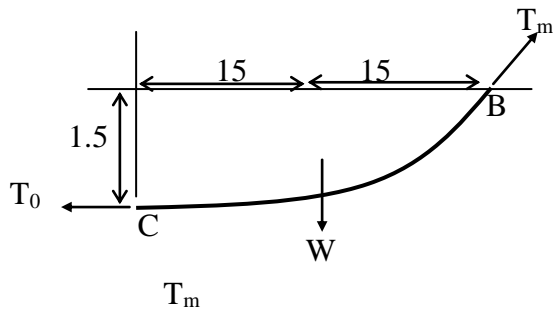
ب) طول سیم را بدست بیاورید.

$$0.6 \text{ kg/m} = \text{جرم}$$

$$L = 60 \text{ m} \quad h = 1.5 \text{ m}$$

$$\omega = 0.6 (9.8) = 5.89 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

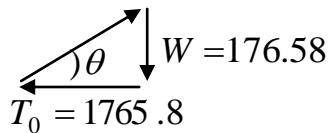
$$W = 5.89 (30) = 176.58 \text{ (N)}$$



$$\sum M_B = (176.58) (15) - T_0 (1.5) = 0$$

$$(1765.8) \text{ (N)} \quad )$$

$$T_m = \sqrt{(176.5)^2 + (1765.8)^2} = 1774.6 \text{ (N)}$$



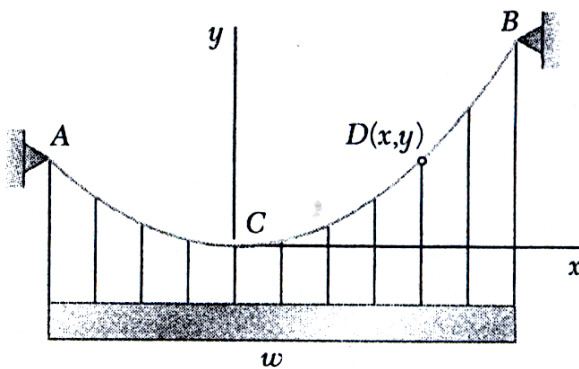
$$S_B = X_B - \left[ 1 + \frac{2}{3} \left( \frac{y_B}{X_B} \right)^2 \right] = 30 \left[ 1 + \frac{2}{3} \left( \frac{1.5}{30} \right)^2 \right] = 30.05 \text{ (m)}$$

$$TOTAL = 2 S_B = 2 (30.05) = 60.1 \text{ (m)}$$

کابل سهمی

(کابل با نیروی گسترده یکنواخت)

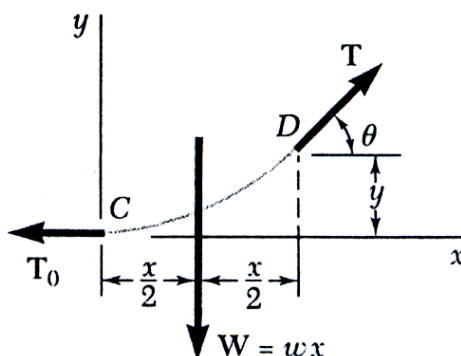
فرض کنیم که وزن سیم ها را صرف نظر کنیم



کل بار در فاصله  $x$   $W = \omega x$

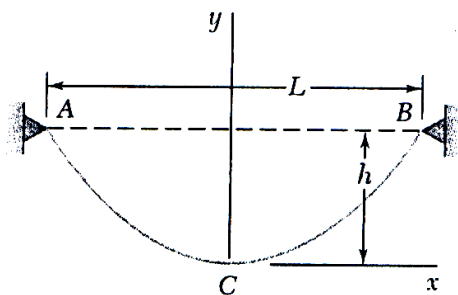
$$T = \sqrt{T_0^2 + \omega^2 x^2}$$

$$\tan \theta = \frac{\omega x}{T_0}$$



$$\sum M_D = 0 \Rightarrow \omega x \left(\frac{x}{2}\right) - T_0 y = 0 \Rightarrow y = \frac{\omega x^2}{2 T_0}$$

معادله سهمی که رأس آن در نقطه C در مرکز مختصات می باشد.



مینیمم کشش در طناب  $T_0$

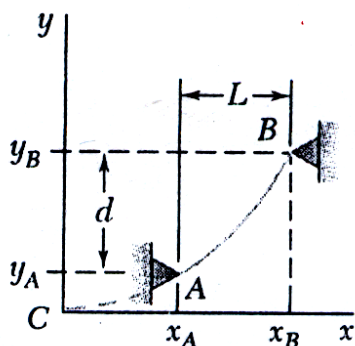
اگر  $h$  و  $L$  مشخص شود می توانیم کمترین

کشش را بدست بیاوریم با جایگزین کردن

روابط زیر:

$$T_0 = \frac{\omega x^2}{2 y} = \frac{W L^2}{8 h} \quad y = h, \quad x = \frac{L}{2}$$

اگر هر دو تکیه گاه در یک ارتفاع نباشد دیگر مختصات تکیه گاه ها مشخص نیست و می بایستی بدست آورد.



می دانیم:

$$y_B - y_A = d \quad T_{\min} \quad A_x = B_x \quad x_B - x_A = L$$

$$S_B = \int_0^{x_B} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx$$

$$S = \int dL$$

$$S = \int \sqrt{dx^2 + dy^2} = \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx$$

در بسط نیوتنی

$$S_B = \int_0^{x_B} \sqrt{1 + \frac{W^2 x^2}{T_0^2}} dx = \int_0^{x_B} \left( 1 + \frac{W^2 x^2}{2T_0^2} - \frac{W^4 x^4}{8T_0^4} + \dots \right) dx$$

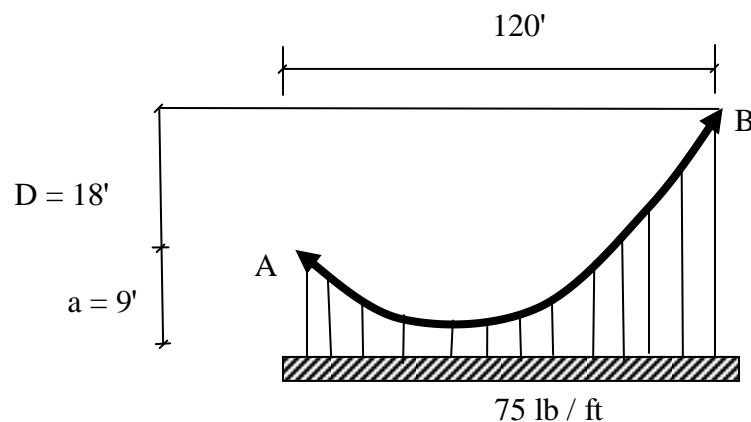
$$S_B = x_B \left( 1 + \frac{W^2 x^2}{6T_0^2} - \frac{W^4 x_B^4}{40T_0^4} + \dots \right) \quad \frac{W x_B^2}{2T_0} y_B$$

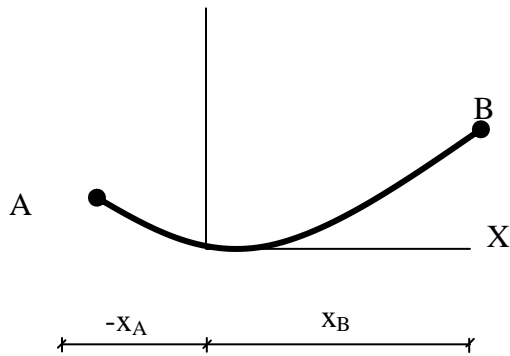
$$S_B = x_B \left[ 1 + \frac{2}{3} \left( \frac{y_B}{x_B} \right)^2 - \frac{2}{3} \left( \frac{y_B}{x_B} \right)^4 + \dots \right] \Rightarrow S_B \approx x_B \left[ 1 + \frac{2}{3} \left( \frac{y_B}{x_B} \right)^2 \right]$$

مثال - بدست بیاورید کمترین

و بیشترین کشش را در طناب .

( اگر پائین ترین نقطه طناب در 9' زیر تکیه گاه A )





A نقطه

B نقطه

$$X_B - X_A = 120'$$

$$X_A = X_B - 120'$$

$$y_A = \frac{wx_A^2}{2T_0} = 9 = \frac{w(x_B - 120)^2}{2T_0}$$

$$y_B = \frac{wx_B^2}{2T_0} = 27 = \frac{w x_B^2}{2T_0}$$

$$\frac{1}{3} = \frac{(X_B - 120)^2}{X_B^2} \Rightarrow 2X_B^2 - 720 X_B + 43200 = 0 \Rightarrow X_B = 76.08 \text{ (ft)}$$

$$27 = \frac{WX_B^2}{2T_0} = \frac{75 (76.08)^2}{2T_0} \Rightarrow T_0 = 8034 \text{ (lb)}$$

$$T_{\min} = T_0$$

$$T_{\max} = \sqrt{T_0^2 + W^2 X_B^2} = \sqrt{(8038)^2 + (75)^2 (76.08)^2} = 9860 \text{ (lb)}$$

$$T = \sqrt{T_0^2 + W^2 X_A^2} = \sqrt{(8038)^2 + (75)^2 (120 - 76.08)^2} = < T_{\max}$$

در B :

$$S_B = X_B \left[ 1 + \frac{2}{3} \left( \frac{y_B}{X_B} \right)^2 \right]$$

در A :

$$S_A = X_A \left[ 1 + \frac{2}{3} \left( \frac{y_A}{X_A} \right)^2 \right]$$

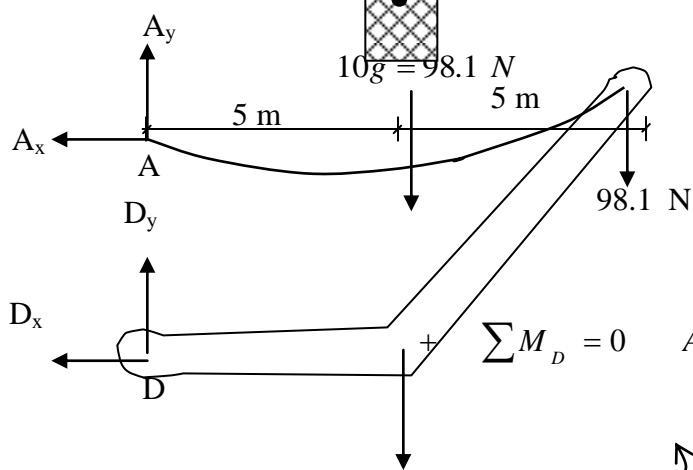
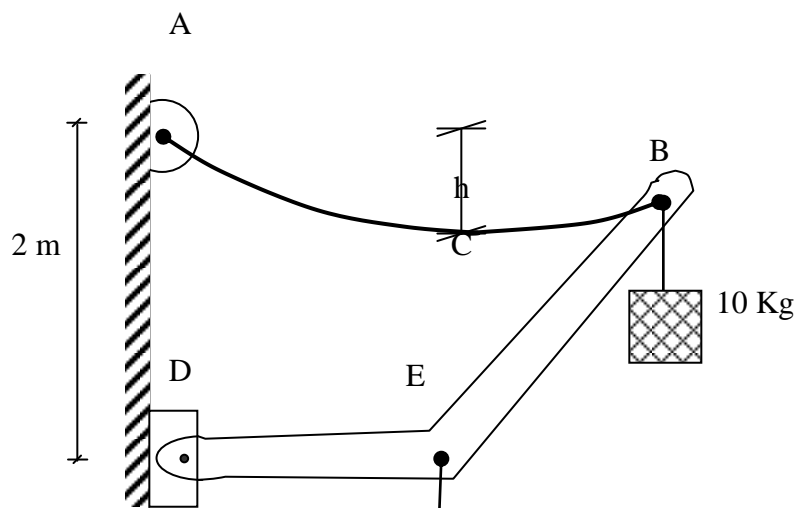
$$S = |S_A| + |S_B|$$

مثال - کل جرم طناب ABC برابر است با 10 Kg اگر فرض کنیم که این جرم روی طناب بصورت یکنواخت قرار می گیرد

بدست بیاورید .

الف ( عمق کابل را (h)

ب) ضریب زاویه طناب در نقطه A



$$\sum M_D = 0 \quad A_x (2) - 98.1(5) - 98.1(10) - 147.15 (5) = 0$$

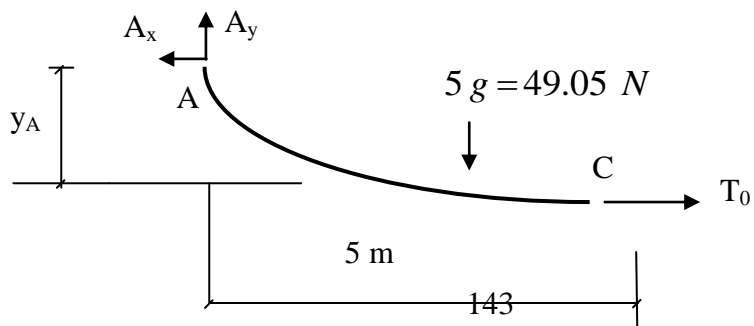
$$A_x = 1103.6 (N)$$

$$T_0 = A_x = 1103.6 (N)$$

$$15g = 147.15 N$$

$$+ \uparrow \sum F_y = 0 \Rightarrow A_y - 49.05 = 0$$

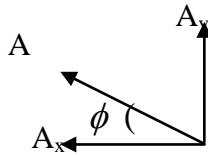
$$A_y = 49.05 (N)$$



$$\curvearrowright + \sum M_C = 0 \Rightarrow A_x y_X - A_y^{(5)} - 49.05 (2.5) = 0$$

$$(1103.6) y_A - A_x y_X - A_y (5) + 49.05(2.5) = 0$$

$$y_A = 0.111 (m) \Rightarrow h = 111 (mm)$$



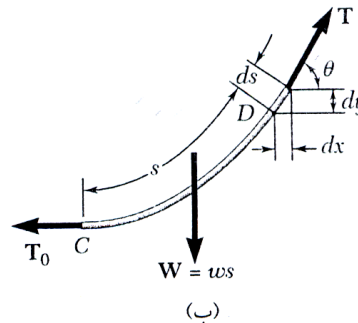
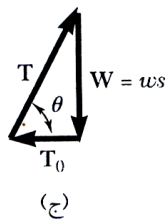
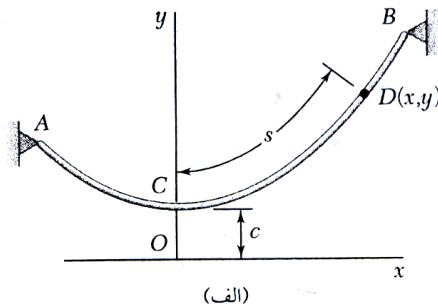
$$\tan \phi = \frac{A_y}{A_x} = \frac{49.05}{1103.6} = 0.044 \Rightarrow \phi = 2.54^\circ$$

کابل زنجیره ای :

کابلی است که باری یکنواخت در امتداد طول خود دارد .

وزن واحد طول در امتداد خود کابل =

$\omega$



$$T = \sqrt{T_0^2 + W^2} \Leftrightarrow T = \sqrt{T_0^2 + W^2}$$

$$T = \sqrt{C^2 \omega^2 + S^2 \omega^2} = W \sqrt{C^2 + S^2} \quad T_0 c C \omega \quad \Leftrightarrow C = \frac{T_0}{\omega}$$

در این دیاگرام معادله منحنی شکل کابل مشخص نیست .

ژول

$$d_x = d_s \cos \theta = d_s \frac{T_0}{T}$$

$$\Leftrightarrow \cos \theta = \frac{T_0}{T}$$

$$dx = \frac{\omega c ds}{\omega \sqrt{C^2 + S^2}} = \frac{ds}{\sqrt{1 + S^2 / C^2}}$$

$$X = \int dx = \int_0^s \frac{ds}{\sqrt{1 + S^2 / C^2}} = C \sinh^{-1} \frac{S}{C} \Rightarrow$$

$$dy = d_x \tan \theta = \frac{W}{T_0} dx = \frac{S}{C} dx = \sinh \frac{X}{C} dx \quad \Leftrightarrow \tan \theta = \frac{W}{T_0}$$

$$\int_c^y dy = y - C = C \sinh \frac{x}{C}$$

$$y - C = \int_0^x \sinh \frac{x}{C} dx = C \left[ \cosh \frac{x}{C} \right]_0^x = C (\cosh \frac{x}{C} - 1) \Rightarrow$$

$$y = C \cosh \frac{x}{C}$$

$$w^2 y^2 = w S^2 + w c^2 = T^2$$

$$T_0 = \omega c, \quad W = \omega s, \quad T = \omega y$$

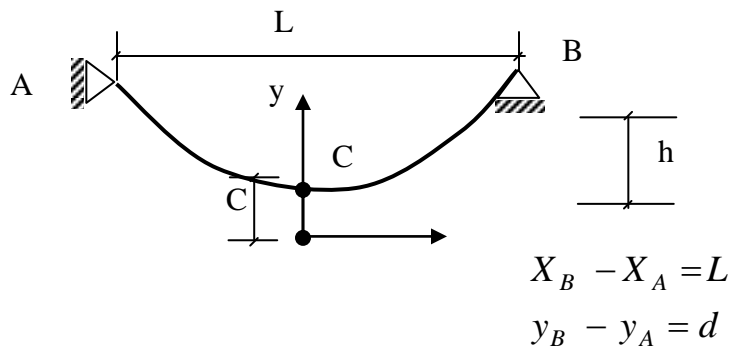
$$y^2 - S^2 = C^2$$

اگر دو نقطه A و B هم سطح باشند

$$h = y_A - C = \text{عمق کابل}$$

L = طول دهانه کابل

C = فاصله نقط ممانی هم کابل



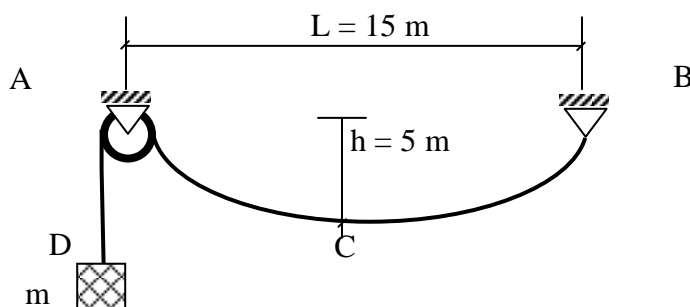
اگر دو نقطه هم سطح نباشند مانند کابل سهمی خواهیم داشت  
مثال - وزنه D به جرم 40 Kg به

یک کابل که از نقطه A می گذرد متصل

$$h = 5m, \quad L = 15m \quad \text{اگر}$$

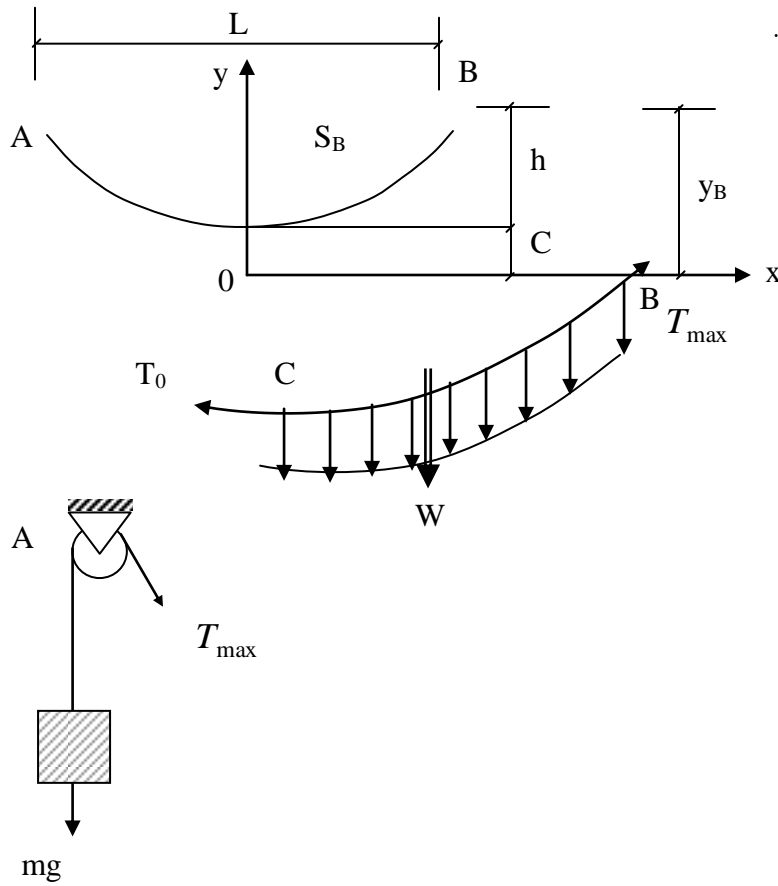
معین کنید .

الف ( طول کابل از A تا B



ب) جرم کابل را بصورت جرم در طول

از جرم کابل در قسمت AD صرفنظر گردد.



$$T_0 = \omega c$$

$$W = \omega c$$

$$T = \omega y$$

$$T_{\max} = T_A = T_B = 392.4 \text{ (N)}$$

$$L = 15 \text{ m} , \quad x_B = 7.5 \text{ m} , \quad h = 5 \text{ m}$$

$$y_B = C \cosh \frac{x_B}{C} = C \cosh \frac{7.5}{C} \quad y_B = h + C = 5 + C$$

$$C \cosh \frac{7.5}{C} = 5 + C \quad \Rightarrow \quad \cosh \frac{7.5}{C} = \frac{5}{C} + 1 \quad \Rightarrow \quad C = 6.3175 \text{ (m)}$$

$$y^2 - S^2 = C^2 , \quad S_B = C \sinh \frac{x_B}{C}$$

$$S_B = 6.3175 \sinh \frac{7.5}{6.3175} = 9.39 \text{ (m)} \quad \Rightarrow \quad 2S_B = 18.78 \text{ (m)}$$

$$T_{\max} = \omega y_B = \omega (h + C) \Rightarrow \quad 392.4 = \omega (5 + 6.3175)$$

$$w = 34.67 \text{ N/m}$$

$$m' = \frac{w}{g} = \frac{34.67}{9.81} = 3.53 \text{ Kg/m}$$

فصل هشتم

# اصطکاک

برای سطوحی که سخت و خشن می باشند. اگر جسمی با آن سطح در تماس بیافتد. حتماً نیرویی به نام اصطکاک بین آن دو بوجود می آید. البته بعضی از اوقات دو جسم در مقابل حرکت روی هم دارای هیچ نوع اصطکاکی نخواهند بود. یعنی اینکه سطح های آنها دارای اصطکاک نیستند. البته این مسئله کلاً در هیچ نوع جسمی صدق نمی کند چونکه اصطکاک همیشه خواهد بود حتی اگر تعداد آن ناچیز باشد.

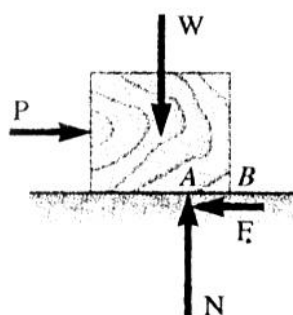
پس اصطکاک نیرویی است که در مقابل با حرکت ممانعت خواهد کرد و جهت آن نیرو مخالف جهت حرکت خواهد بود. مقدار اصطکاک یک حدی خواهد داشت که متناسب است با مقدار نیروی عمود بر سطح (جهت اصطکاک)

### انواع اصطکاک:

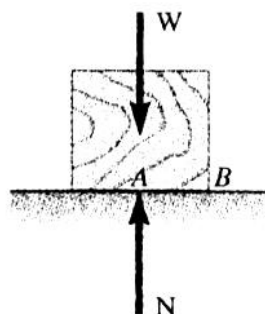
1- اصطکاک خشک: Coulumb Friction

2- اصطکاک مایعات: Fluid Friction

### قوانین اصطکاک خشک: ضریب اصطکاک



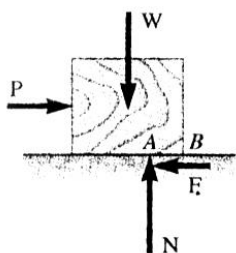
(ب)



(الف)

اگر P اضافه شود همینطور F هم اضافه شود تا اینکه مقدار P به حد ماکزیمم  $F_m$  می رسد. اگر P از حد  $F_m$  بگذرد دیگر بالانس تعادل استاتیکی برقرار نخواهد بود. بعد از یک لحظه که حرکت آغاز شد، مقدار اصطکاک از حد  $F_m$  کمتر خواهد شد. مجازاً وضع مولکولی حجم و سطح و نفوذ آن مولکول ها نسبت به هم در موقع حرکت، کمتر خواهد شد. و از آن به بعد سرعت آن بلوک اضافه خواهد گردید در حالیکه بزرگی اصطکاک، ثابت خواهد ماند.

اگر P کوچک باشد این بلوک حرکت نخواهد کرد. یعنی نیرویی می بایست باشد که به آن اصطکاک می گویند و مقاومت در موقع حرکت خواهد داشت.



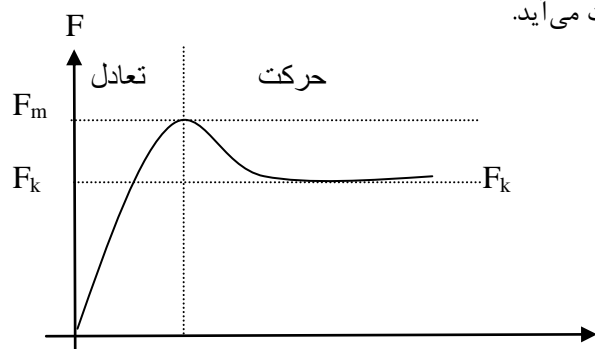
بسته به نوع وضعیت سطح تماس دارند و بصورت تقریبی از روی آزمایشات بدست می آید.

ضریب اصطکاک ایستایی:  $\mu_s$

ضریب اصطکاک:  $\mu_x$

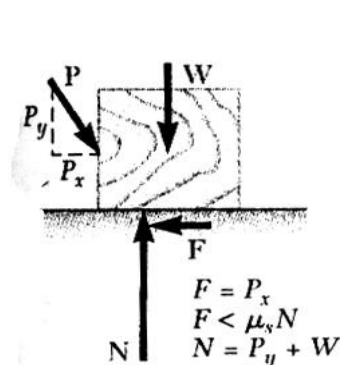
آزمایشات بدست می آید.

$$\begin{cases} F_m = \mu_s N \\ F_x = \mu_x N \end{cases}$$

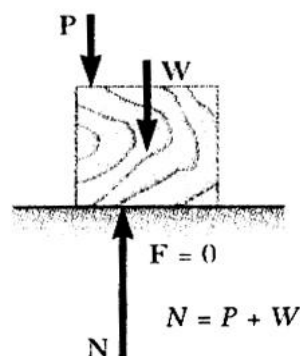


# مقادیر تقریبی ضریب اصطکاک ایستایی برای سطوح خشک

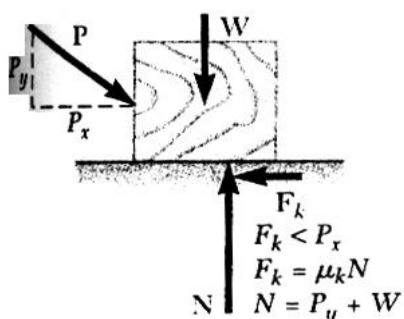
فلز روی فلز	۰٫۶۰-۰٫۱۵
فلز روی چوب	۰٫۶۰-۰٫۲۰
فلز روی سنگ	۰٫۷۰-۰٫۳۰
فلز روی چرم	۰٫۶۰-۰٫۳۰
چوب روی چوب	۰٫۵۰-۰٫۲۵
چوب روی چرم	۰٫۵۰-۰٫۲۵
سنگ روی سنگ	۰٫۷۰-۰٫۴۰
خاک روی خاک	۰٫۱۰-۰٫۲۰
لاستیک روی سیمان	۰٫۹۰-۰٫۶۰



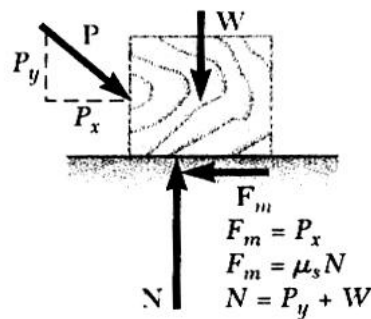
(ب) بدون حرکت ( $P_x < F_m$ )



(الف) بدون اصطکاک ( $P_x = 0$ )



(د) در حال حرکت  
 $\longrightarrow (P_x > F_m)$



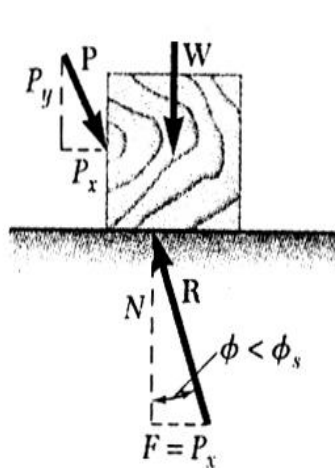
(ج) در شرف حرکت  
 $\longrightarrow (P_x = F_m)$

## زاویه اصطکاک:

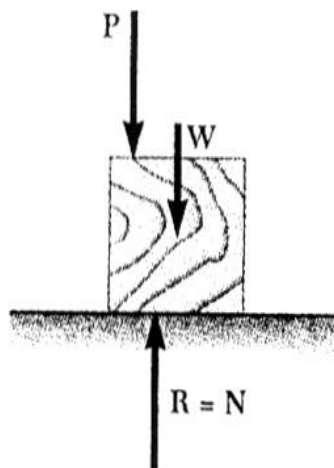
بعضی از اوقات بهتر است که نیروی اصطکاک و نیروی عمودی (نرمال)  $N$  را با یک نیرو جانشین کرد. این نیروی برآیند را  $R$  می‌نامیم.

زاویه اصطکاکی دینامیکی  $\phi_n =$

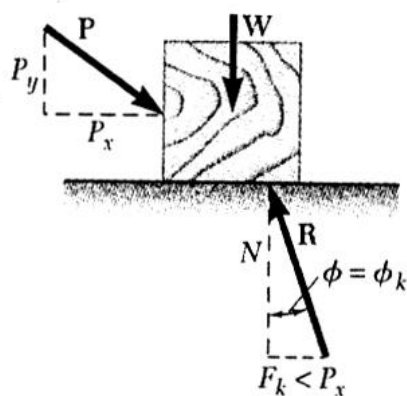
زاویه اصطکاکی استاتیکی  $\phi_s =$



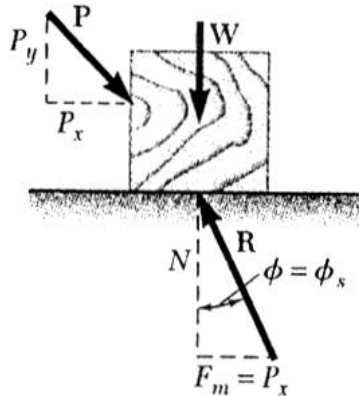
(ب) بدون حرکت



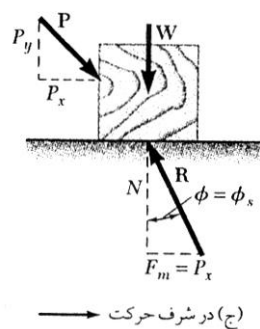
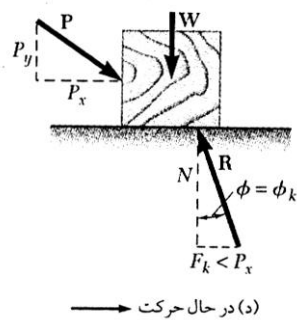
(الف) بدون اصطکاک



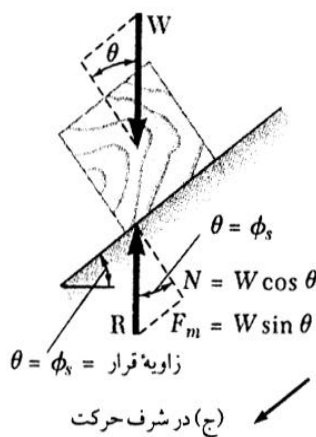
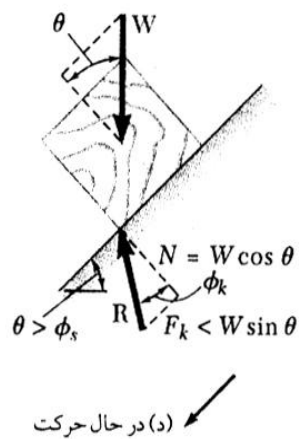
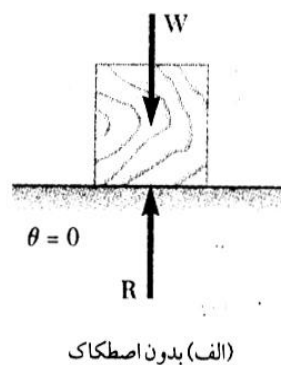
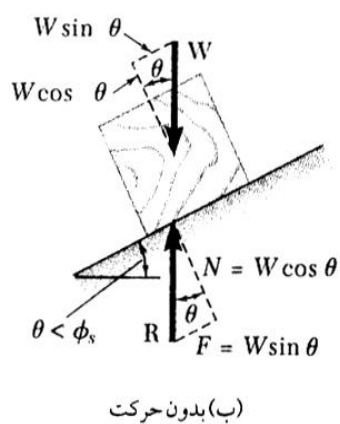
(د) در حال حرکت

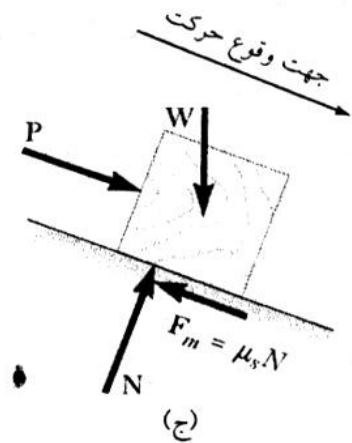
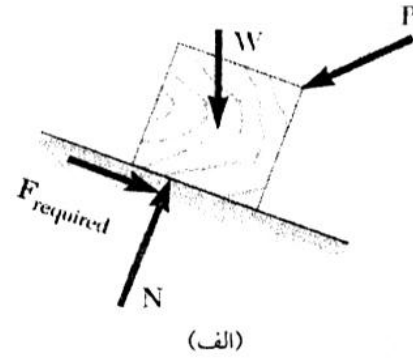
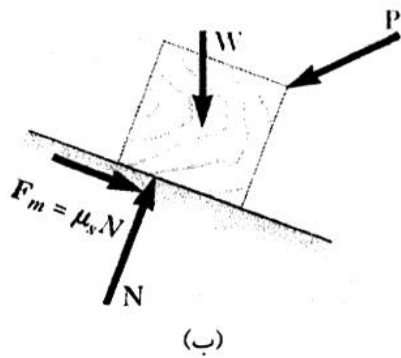


(ج) در شرف حرکت



اصطکاک در سطح شیب‌دار:



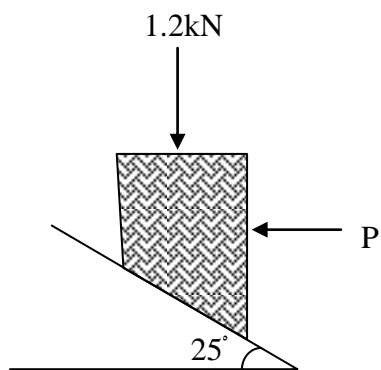


مثال ها:

مثال: گروه اول مسائل اصطکاکی

(الف) بدست بیاورید اگر بلوک در حال تعادل است یا خیر  $\mu_k = 0.25$

(ب) بدست بیاورید مقدار و جهت نیروی اصطکاک را  $P = 750N$



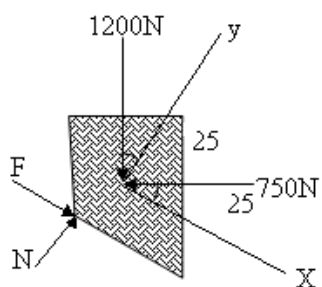
$$\Sigma F_x = 0 \rightarrow F + 1200 \sin 25 - 750 \cos 26 = 0$$

$$F = 172.6 \text{ (N)}$$

$$\Sigma F_y = 0 \rightarrow N - (1200) \cos 26 - 750 \sin 26 = 0$$

$$N = 1404.5 \text{ (N)}$$

$$F_m = \mu_s N = 1404.5(0.36) = 491.6 \text{ (N)}$$

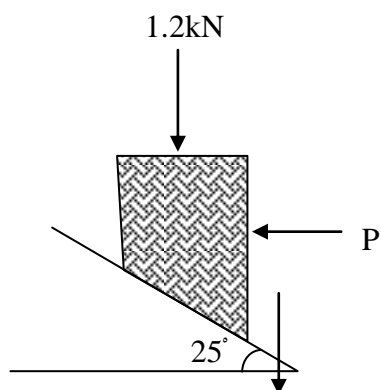


$$F < F_m \rightarrow F = 1726 \text{ (N)} \text{0 تعادل برقرار است}$$

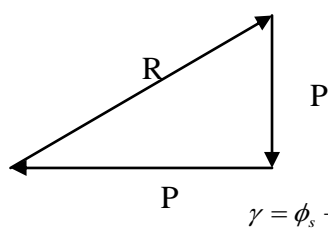
**مثال :** گروه دوم مسائل اصطکاکی 2

(الف) کمترین مقدار  $\theta$  را که بلوک را به طرف بالا به حرکت در آورد، بدست بیاورید.

(ب) کمترین مقدار P را که بلوک مقابل را پس از حرکت بطرف بالا در حال حرکت نگهدارد ، بدست بیاورید.

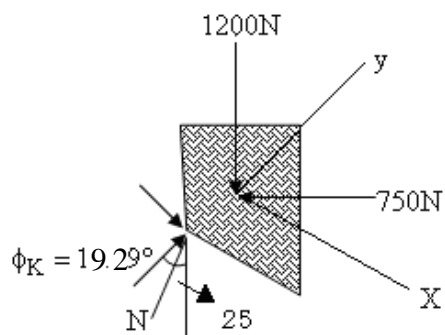


(الف)



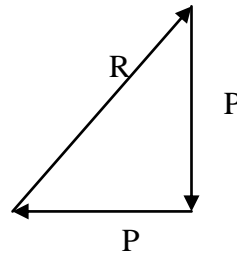
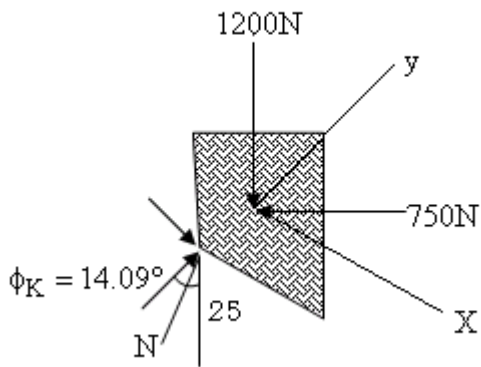
$$\phi_s = \tan^{-1} 0.35 = 19.29^\circ$$

$$\gamma = \phi_s + \theta = 44.29^\circ$$



$$p = 1200 \tan 44.29 = 1171 \text{ (N)}$$

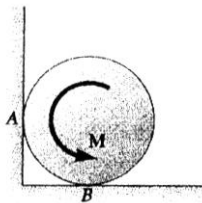
ب)



$$\gamma = \phi_k + \theta = 39.09^\circ$$

$$p = 1200 \tan 39.04 = 973(\text{N})$$

**مثال :** بدست بیاورد مقدار کوپل  $M$  که به دیسک مقابل وارد می شود و هیچ چرخشی وارد نمی کند. وزن دیسک  $W$  می باشد با ضریب اصطکاک  $\mu_s$



$$F_A = \mu_s M \quad F_B = \mu_s N_B$$

$$\Sigma M_B = 0 \quad M - r F_A - r = 0 \quad M = k N_A (1 + \mu_s)$$

$$\Sigma F_x = 0 \quad N_A - F_B = 0 \quad \rightarrow N_A = \mu_s N_B$$

$$\Sigma F_y = 0 \quad N_B + F_A - W = 0 \quad \rightarrow N_B = W - \mu_s N_A$$

$$N_A = \mu_s (W - \mu_s N_A) \rightarrow N_A = \frac{\mu_s W}{1 + \mu_s^2}$$

$$N = W r \mu_s \left( \frac{1 + \mu_s}{1 + \mu_s^2} \right)$$

**مثال :**

معین کنید مقدار و جهت حداقل نیروی  $P$  را:

(الف) برای شروع حرکت بطرف بالا

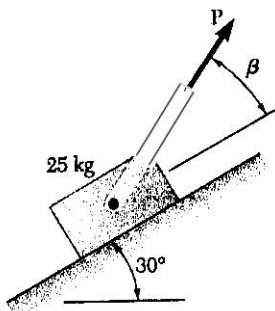
(ب) نیروی لازم برای جلوگیری حرکت جسم بطرف پائین

$$W=40(\text{lb})$$

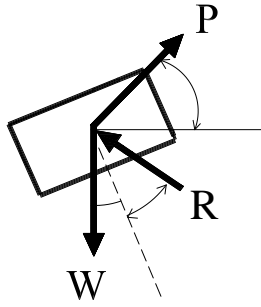
$$=25^\circ \quad \alpha$$

$$=0.20 \quad \mu_s$$

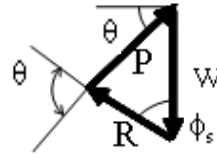
$$\tan \phi_s = \mu_s = 0.20 \quad \phi_s = 11.3^\circ \quad \Rightarrow$$



(الف)



برای حداقل P  
این زاویه  $90^\circ$  است



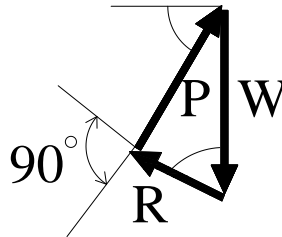
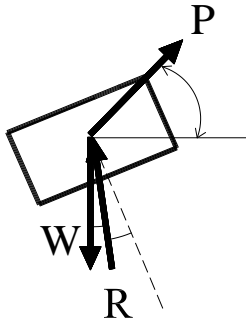
$$40(\text{lb})$$

$$25^\circ + 11.3^\circ = 36.3^\circ$$

$$\theta = 36.3^\circ$$

$$P = 40 \sin 36.3^\circ = 23.7 \text{ (lb)}$$

(ب)



$$40(\text{lb})$$

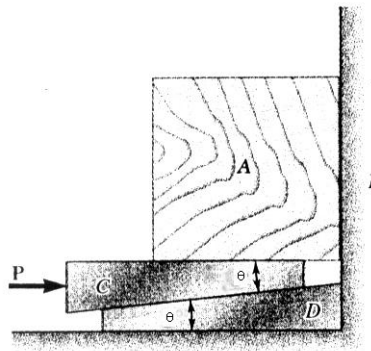
$$25^\circ - 11.3^\circ = 13.7^\circ$$

$$\theta = 13.7^\circ$$

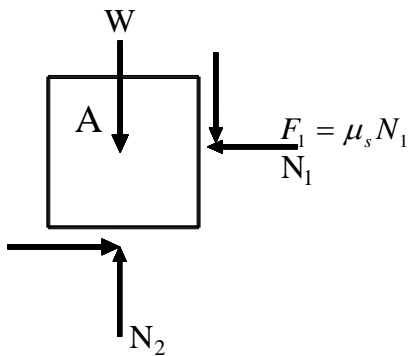
$$P = 40 \sin 13.7^\circ = 9.47 \text{ (lb)}$$

### نگاه دارنده ( WEDGE )

ابزار و یا ماشین هایی هستند که برای بالا بردن بلوک ها و سنگ ها و همینطور اجسام سنگین دیگر بکار میروند. این نیروهای سنگین را می توان بطریق وارد کردن یک نیروی کمتر بلند کرد. همینطور بخاطر شکل این نگاهدارنده ها بعد از بلند کردن این اجسام آنها به حالت خوب بخاطر اصطکاک در همان مکان ها خواهند ماند. مثلاً بخواهیم بلوک A را با کمترین نیروی p به طرف بالا ببریم...



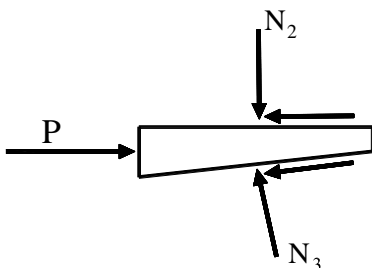
$$F_2 = \mu_s N_2$$



$$W = \text{معلوم}$$

$$P = ?$$

$$N_1, N_2, N_3, P: \text{نامعلوم}$$



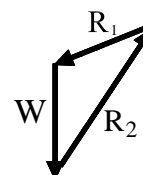
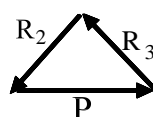
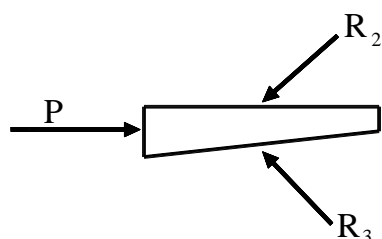
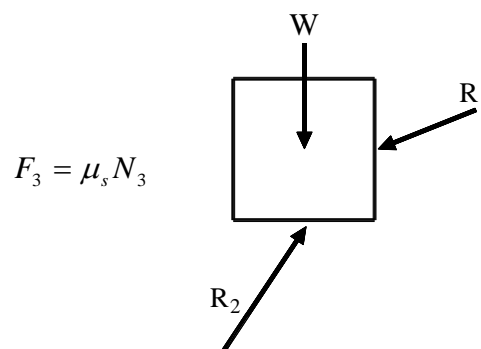
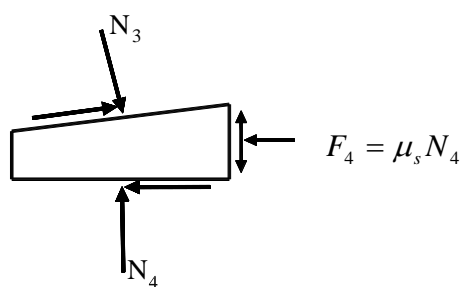
$$F_2 = \mu_s N_2$$

$$F_3 = \mu_s N_3$$

$$\left. \begin{array}{l} \sum F_x = 0 \\ \sum F_y = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{از شکل 1} \\ \text{از شکل 2} \end{array}$$

4 معادله و 4 مجهول

$$\begin{array}{l} \sum F_x = 0 \\ \sum F_y = 0 \end{array}$$



مثال : تیر مقابل توسط یک گاهه آهنی E , F تنظیم می شود .

ورق CD به تیر AB جوش داده شده است . عکس العمل تیر

توسط نیروهای خارجی به روی بتن برابر است با 100kN.

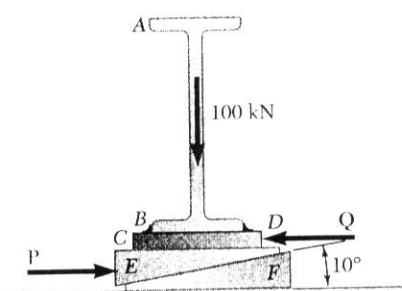
$$\text{بین آهن ها} = 0.30 \mu_s$$

$$\text{بین بتن و آهن} = 0.60 \mu_s$$

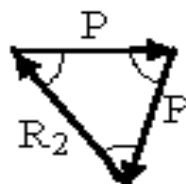
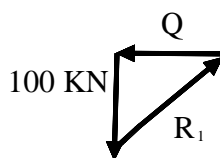
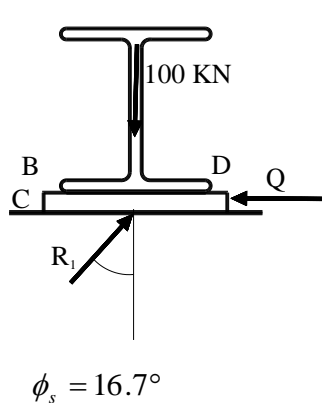
اگر حرکت افقی تیر مقابل توسط Q جلوگیری شود، بدست بیاورید:

الف) مقدار نیروی P را که برای بالا بردن این تیر لازم است.

ب) مقدار Q را. (از وزن گوه ها صرف نظر کنید).



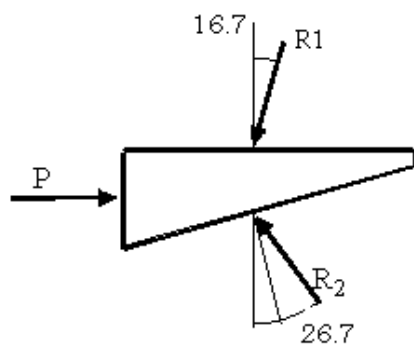
فرض می کنیم که به هنگام حرکت تیر آهن بوسیله ی گاهه وسطی ، گاهه زیرین حرکت نخواهد کرد.



$$\Rightarrow \mu_s = 0.30 \quad \phi_s = 16.7^\circ$$

$$\leftarrow Q = (100) \tan 16.7^\circ = 30 \text{ kN}$$

$$R_1 = \frac{100}{\cos 16.7^\circ} = 104.4 \text{ kN}$$

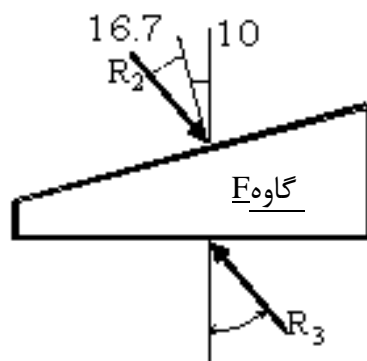


$$90^\circ - 16.7^\circ = 73.3^\circ \quad , \quad 90^\circ - 26.7^\circ = 63.3^\circ$$

گاوِه E

$$26.7^\circ + 16.7^\circ = 43.4^\circ$$

می بایستی چک کنیم و ببینیم که آیا گاوِه F لیز خواهد خورد یا خیر؟



$$= 16.7^\circ + 10^\circ = 26.7^\circ \theta$$

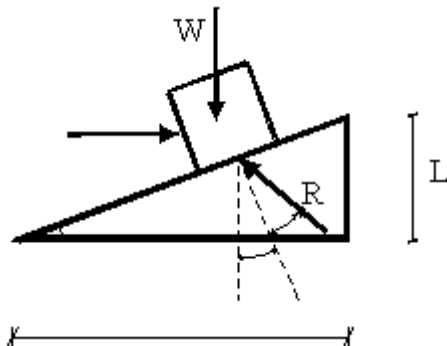
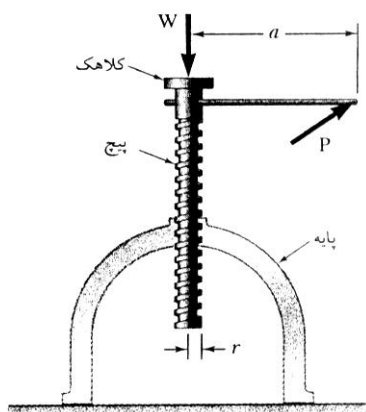
$$\phi_{Conc} = \tan^{-1} 0.60 = 31.0^\circ$$

گاوِه F حرکت نخواهد کرد  $\Rightarrow \theta < \phi$

## پیچ ها - با برجستگی های مربعی ( SQUARE-THREADED SCREWS )

این نوع پیچ ها برای جک ها و ماشین های مختلف بکار می رود .

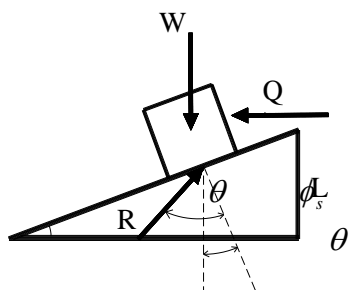
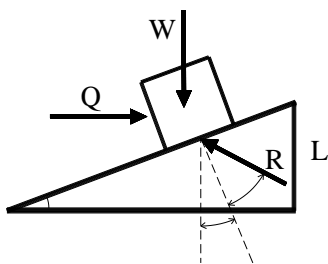
$$P = ? \quad Q = ?$$



$$\frac{Pa}{r} = Q = \text{فاصله ای که پیچ بعد از یک دور با لایتر خواهد رفت .}$$

می بایستی از این شکل مقدار  $P$  را که لازم است وزن  $W$  را به بالا برد بدست بیاوریم.

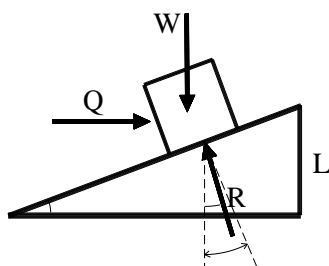
سفت کردن پیچ ← حرکت در حال شروع بطرف بالا  
( برای بالا بردن  $W$  )



باز کردن پیچ ← حرکت در حال شروع بطرف پائین  
 $\phi_s > \theta$

( حالت قفل کننده ) self locking

( برای پائین بردن  $W$  )

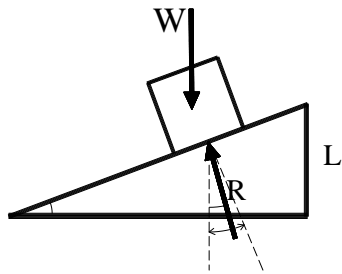


حرکت در حال شروع بطرف پائین

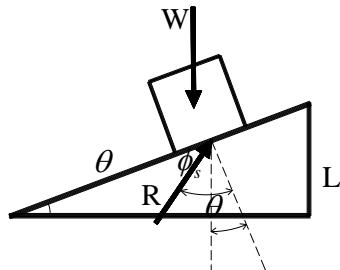
اگر  $\phi_s < \theta$

برای نگه داشتن این جسم می بایستی

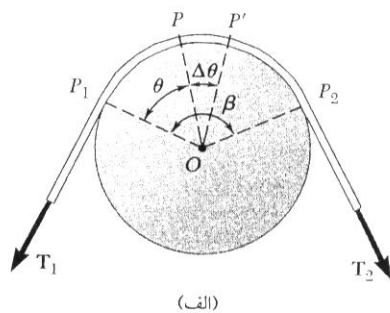
$Q$  به طرفی که نشان داده شده است وارد شود .



if  $\phi_s < \theta$   
حالت خود بخود باز شونده  
(unwind)



if  $\phi_s > \theta$   
حالت قفل کننده  
(self locking)



### اصطکاک تسره

اگر تسره مقابل را در نظر بگیریم و بدانیم که بعد از وارد کردن نیروی  $T_2$  به طناب نیروی طناب در سر دیگر  $T_1$  بستگی پیدا می کند به مقدار اصطکاک در روی قرقره . اگر پس از وارد شدن نیروی  $T_2$  این طناب در شرف حرکت شود سپس از رابطه زیر معادله  $T_2, T_1$  بدست می آید .

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = \mu_s \beta$$

مقدار زاویه ای که طناب به دور قرقره پیچیده شده است . ( رادیان )

$$T_2 > T_1$$

طناب نسبت به قرقره در

شرف لیز خوردن می باشد

یعنی هم قرقره و هم

طناب با هم می چرخند .

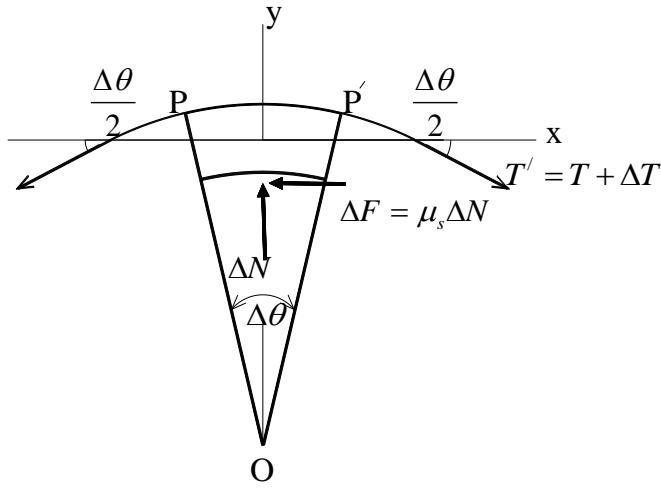
$$T_2 = T_1 e^{\mu_s \beta} \quad \frac{T_2}{T_1} = e^{\mu_s \beta}$$

اگر طناب پس از وارد شدن نیروی  $T_2$  به آن به حرکت نیافتد ولیز بخورد سپس طناب نسبت به قرقره در حال حرکت است.

$$T_2 = T_1 e^{\mu_k \beta}$$

اگر طناب در روی قرقره به هیچ عنوانی در شرف حرکت نباشد و هیچ حرکت نداشته باشد دیگر روابط بالا برقرار نخواهد بود . در آن

$$T_1 = T_2 \text{ صورت}$$



$$\sum F_x = 0$$

$$(T + \Delta T) \cos \frac{\Delta \theta}{2} - T \cos \frac{\Delta \theta}{2} - \mu_s \Delta N = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$\Delta N - (T + \Delta T) \sin \frac{\Delta \theta}{2} - T \sin \frac{\Delta \theta}{2} = 0$$

$$\Delta N = (T + \Delta T) \sin \frac{\Delta \theta}{2} + T \sin \frac{\Delta \theta}{2}$$

$$\Delta T \cos \frac{\Delta \theta}{2} - \mu_s (2T + \Delta T) \sin \frac{\Delta \theta}{2} = 0$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} \cos \frac{\Delta \theta}{2} - \mu_s \left( T + \frac{\Delta T}{2} \right) \frac{\sin \frac{\Delta \theta}{2}}{\frac{\Delta \theta}{2}} = 0$$

$$\frac{dT}{d\theta} - \mu_s T = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta \theta}{2} \rightarrow 0 \quad \frac{dT}{T} = \mu_s d\theta$$

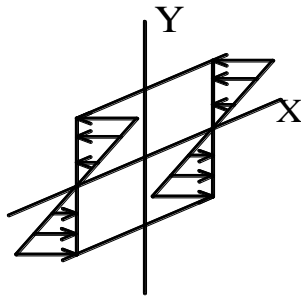
$$\ln \frac{T_2}{T_1} = \mu_s \beta \quad \Rightarrow \quad \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = \int_0^\beta \mu_s d\theta$$

## فصل نهم

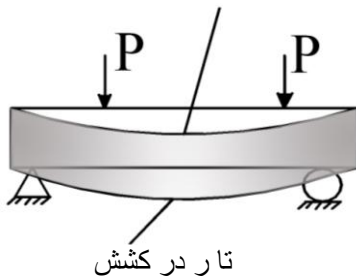
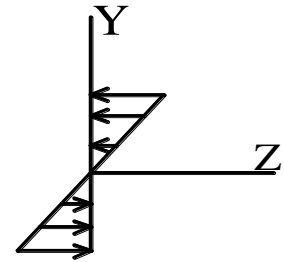
# نیروهای گسترده و گشتاور لختی

## گشتا ورماند (ممان اینرسی) Moment of inertia

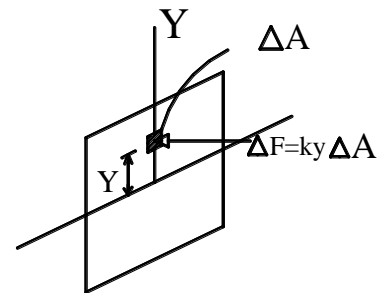
در طراحی تیرها باید به سرتاسر تیر نگاه کرد و حداکثر تنش موجود را بدست آورد.



تار در فشار



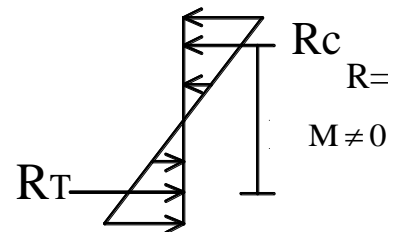
گشتاور اولیه مقطع حول محور X



(شکل 9-1)

$$R = \int \kappa y dA = \kappa \int y dA$$

$$\int y dA = \bar{y} A = 0$$



$R_C$  و  $R_T$  ایجاد یک کوپل میکنند.

## گشتاور دوم مقطع حول محور X یا ممان اینرسی

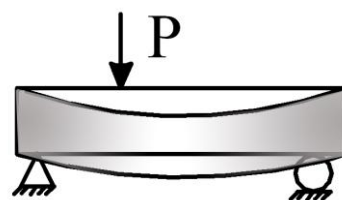
$$\Delta M = y \Delta f = y k y \Delta A$$

$$M = \int k y^2 dA = k \int y^2 dA$$

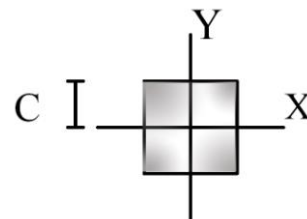
$$I_y = \int x^2 dA$$

$$I_x = \int y^2 dA$$

$$\sigma_x = \frac{m_c}{I_x}$$



(شکل 9-2)

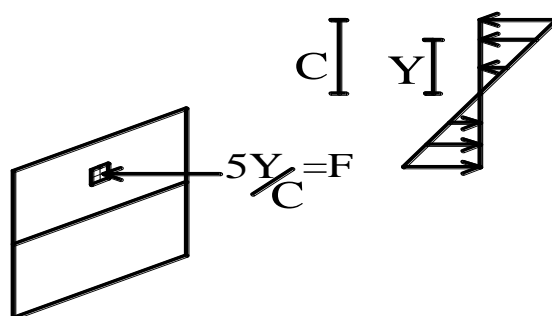


(شکل 9-3)

ممان اینرسی تعریف خاصی ندارد اما می توان گفت که ممان اینرسی نمایانگر مقاومت جسم در مقابله با خمش است. هر چقدر ممان اینرسی زیادتر شود تنش بخاطر خمش کمتر خواهد شد و بالعکس.

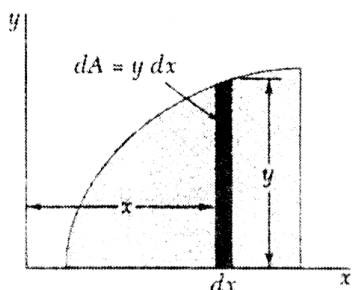
$$\Delta P = f dA$$

$$\Delta M = y \Delta F = f y dA = \frac{\sigma y}{c} y dA = \frac{\sigma y^2 dA}{c}$$



$$m = \int \frac{\sigma y^2 dA}{c} = \frac{\sigma}{c} \int y^2 dA \Rightarrow \sigma = \frac{m c}{\int y^2 dA} = \frac{M C}{I}$$

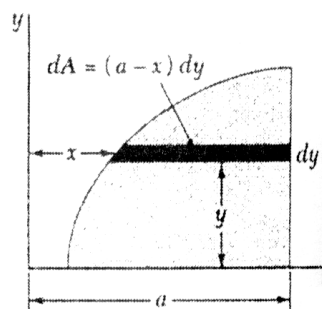
- بدست آوردن ممان اینرسی یک مساحت توسط روش انتگرالگیری



(شکل 9-4)

$$dI_y = x^2 dA$$

$$I_y = \int x^2 dA = \int x_{el}^2 dA$$



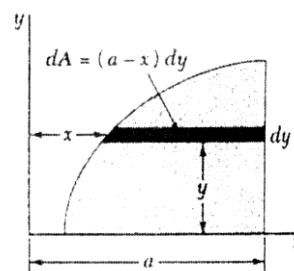
$$dI_x = y^2 dA$$

$$I_x = \int y^2 dA$$

$$\bar{x} = \int x dA$$

$$\bar{x}^2 A \neq \int x^2 dA = I_y$$

(شکل 5-9)



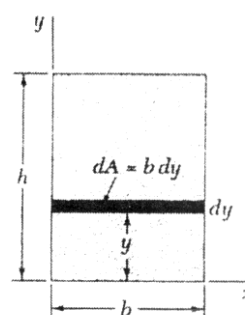
- ممان اینرسی مقطع مستطیل:

$$dA = b dy$$

$$dI_x = y^2 b dy$$

$$I_x = \int_0^h b y^2 dy = \frac{1}{3} b h^3$$

(شکل 6-9)

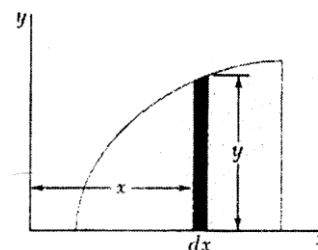


- ممان اینرسی از یک المان کوچک:

$$dI_y = x^2 dA = x^2 y dx$$

$$dI_x = \frac{1}{3} y^3 dx$$

(شکل 7-9)



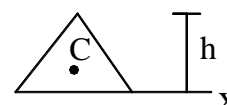
$$I_x = b h^3 / 36 + (\frac{h}{3})^2 (b h / 2) = \frac{b h^3}{36} + \frac{b h^3}{18} = \frac{b h^3}{12}$$

$$\bar{I} = b h^3 / 36$$

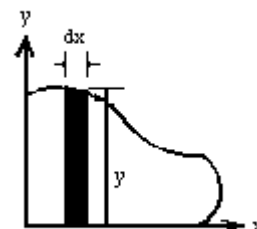
$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N} \Rightarrow \bar{x} A = \int x dA \Rightarrow \int \bar{x}_{el} dA = \int x dA$$

$$\bar{x}^2 \neq \sum x_i^2 \Rightarrow \bar{x}^2 A \neq \int x^2 dA \Rightarrow \int \bar{x}_i^2 dA \neq \int x^2 dA$$

(شکل 8-9)



(شکل 9-9)

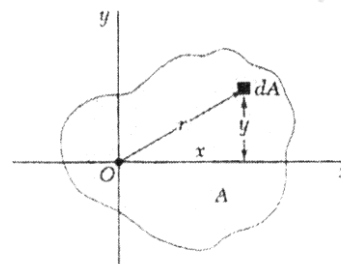


## ممان اینرسی قطبی (polar moment of inertia):

$$J_o = \int r^2 dA \quad \text{گشتاورمانند قطبی}$$

(نسبت به یک نقطه)

(شکل 9-10)



$$J_o = \int r^2 dA = \int (x^2 + y^2) dA = \int y^2 dA + \int x^2 dA$$

$$J = I_x + I_y$$

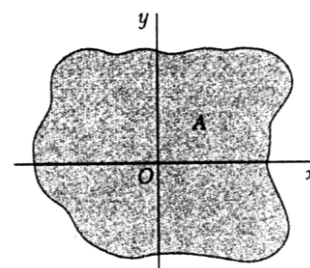
- شعاع ژیراسیون یک مقطع (شعاع ماند radius of gyration):

شعاع چرخشی سطحی

$$k_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \Rightarrow I_x = k_x^2 (A)$$

$k_x =$  شعاع ماند حول محور x

(شکل 9-11)

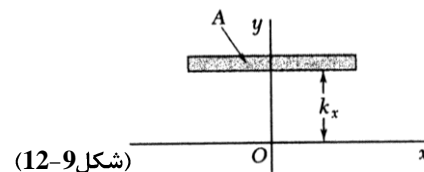


گشتاور سطح A نسبت به محور x

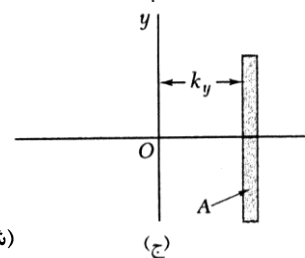
\*\* هر چقدر  $k_x$  بزرگتر شود یعنی اینکه قسمتی از مساحت از تار خنثی بیشتر فاصله خواهد گرفت

$$k_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \Rightarrow I_y = k_y^2 (A)$$

$k_y =$  شعاع ماند حول محور y



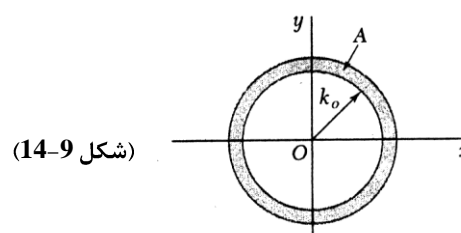
(شکل 9-12)



(شکل 9-13)

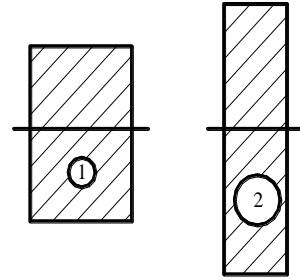
$$k_o = \sqrt{\frac{J_o}{A}} \Rightarrow J_o = k_o^2 (A)$$

$k_o =$  شعاع ماند حول یک نقطه



(شکل 9-14)

$$r_0 \approx 0 < r_1 = \sqrt{\frac{I_1}{A}} < r_2 = \sqrt{\frac{I_2}{A}}$$



(شکل 9-15)

مثال: گشتاور لختی سطح مشخص شده را نسبت به محور  $y$  ها مشخص کنید؟

$$y_1 = k_1 x^2 \Rightarrow b = k_1 a^2 \Rightarrow k_1 = \frac{b}{a^2} \Rightarrow y_1 = \frac{b}{a^2} x^2$$

$$y_2 = k_2 x^{\frac{1}{2}} \Rightarrow b = k_2 a^{\frac{1}{2}} \Rightarrow k_2 = \frac{b}{a^{\frac{1}{2}}} \Rightarrow y_2 = \frac{b}{a^{\frac{1}{2}}} x^{\frac{1}{2}}$$

$$dI_y = x^2 dA = x^2 (y_2 - y_1) dx$$

$$I_y = \int x^2 dA = \int x^2 (y_2 - y_1) dx = \int_0^a x^2 \left( \frac{b}{a^{\frac{1}{2}}} x^{\frac{1}{2}} - \frac{b}{a^2} x^2 \right) dx$$

$$= \frac{b}{a^{\frac{1}{2}}} \int_0^a x^{\frac{5}{2}} dx - \frac{b}{a^2} \int_0^a x^4 dx = \frac{3}{35} a^3 b$$

$$dI_x = \left( \frac{1}{3} y_2^3 - \frac{1}{3} y_1^3 \right) dx = \frac{1}{3} \left( \frac{b^3}{a^{\frac{3}{2}}} x^{\frac{3}{2}} - \frac{b^3}{a^6} x^6 \right) dx$$

$$I_x = \int dI_x = \frac{3}{35} ab^3$$

$$dI_x = y_1^2 x dy - y_2^2 x dy$$

$$dI_x = \left( \frac{b}{a^2} x^2 \right)^2 x dy - \left( \frac{b}{a^{\frac{1}{2}}} x^{\frac{1}{2}} \right)^2 x dy$$

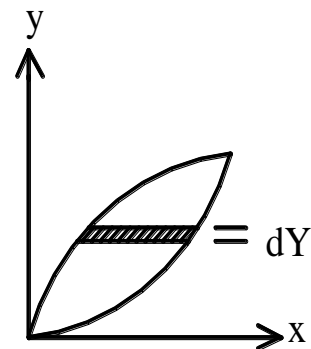
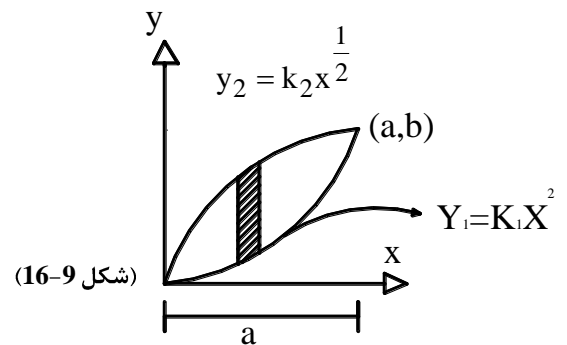
$$= \frac{b^2}{a^4} x^5 dy - \frac{b^2}{a} x^2 dy$$

$$I_x = \int dI_x = \dots$$

$$A = \dots$$

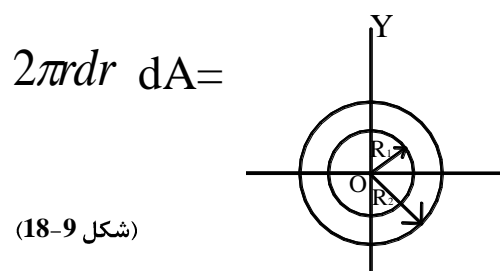
$$k_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}}$$

$$k_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$$



(شکل 9-17)

مثال: گشتاور لختی قطبی و گشتاور لختی حول محور Y را رابدهست آورید؟



(شکل 9-18)

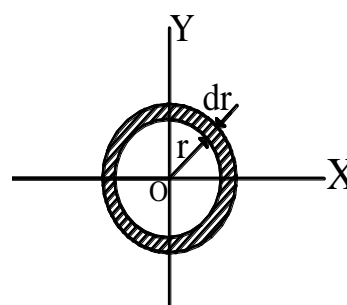
$$dJ = r^2 dA = r^2 (2\pi r dr) = 2\pi r^3 dr$$

$$J = \int dJ = 2\pi \int_{R_1}^{R_2} r^3 dr = 2\pi \frac{r^4}{4} \Big|_{R_1}^{R_2}$$

$$J = \frac{\pi}{2} (R_2^4 - R_1^4)$$

$$J = I_x + I_y - 2I_{xy} \quad (\text{شکل 9-19})$$

$$I_x = \frac{\pi}{4} (R_2^4 - R_1^4)$$

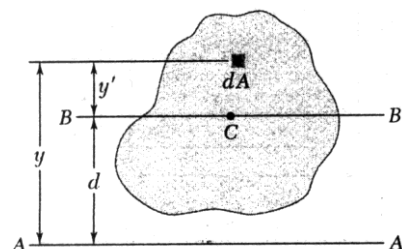


تئوری محورهای موازی:

نسبت به محور AA'

$$I = I_{AA'} = ?$$

(شکل 9-20)



$$I = \int y^2 dA = \int (y' + d)^2 dA = \int y'^2 dA + \int d^2 dA + \int 2y'd dA$$

$$I = \int y'^2 dA + d^2 \int dA + 0$$

$$\boxed{I = \bar{I} + d^2 A}$$

$I =$  گشتاورماندنسبت به هر محور

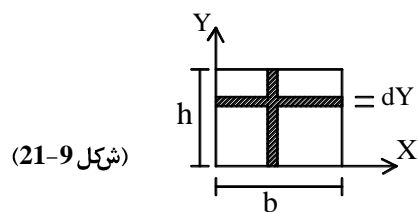
$\bar{I} =$  گشتاور ماند نسبت به محور مرکز سطح

$$k^2 = \bar{k}^2 + d^2$$

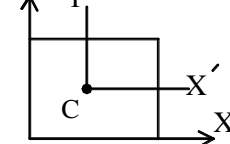
$$J_0 = \bar{J}_0 + d^2 A$$

$$k_0^2 = \bar{k}_0^2 + d^2$$

مثال:

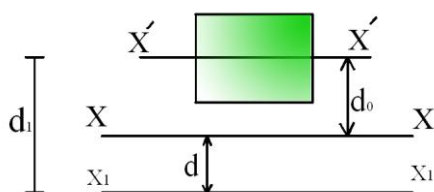


$$I_x = \int y^2 dA = \int y^2 b dy = b \int_0^h y^2 dy = \frac{bh^3}{3}$$



$$I = \bar{I} + Ad^2$$

$$\bar{I} = I - Ad^2 = \frac{bh^3}{3} - bd\left(\frac{h}{2}\right)^2 = \frac{bh^3}{3} - \frac{bh^3}{4} = \frac{bh^3}{12}$$



$$I_x =$$

$$I_{x_1} = ?$$

$$I_x = \bar{I} + Ad_0^2$$

$$\bar{I} = I_x - Ad_0^2$$

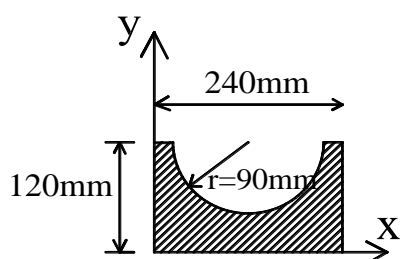
$$I_{x_1} = \bar{I} + Ad_1^2 = I_x - Ad_0^2 + Ad_1^2$$

$$I_{x_1} \neq I_x + Ad^2$$

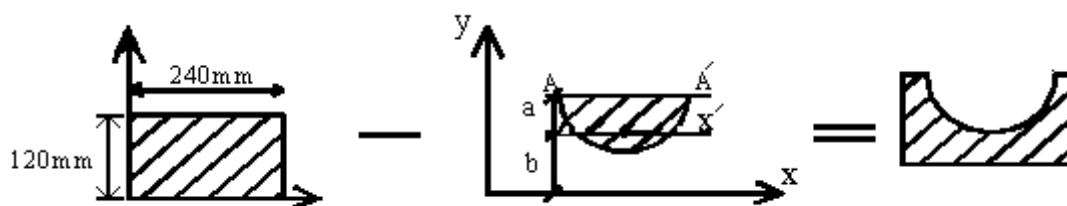
$$d = d_1 - d_0$$

مثال: ممان اینرسی شکل مقابل را نسبت به محور I

بدست آورید.



(شکل 9-22)



$$I_x = \frac{1}{3}bh^3 = \frac{1}{3}(240)(120)^3 = 138.2 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$a = \frac{4r}{3\pi} = \frac{4 \times 90}{3\pi} = 38.2 \text{ mm}$$

$$b = 120 - a = 81.8 \text{ mm}$$

$$I_{AA'} = \frac{1}{8}\pi r^4 = \frac{1}{8}\pi(90)^4 = 25.76 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$A = \frac{1}{2} \pi r^2 = \frac{1}{2} \pi (90)^2 = 12.72 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

$$I_{AA'} = \bar{I}_{x'} + A d^2$$

$$25.76 \times 10^6 = \bar{I}_{x'} + (12.72 \times 10^3)(38.2)^2$$

$$\bar{I}_{x'} = 7.20 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

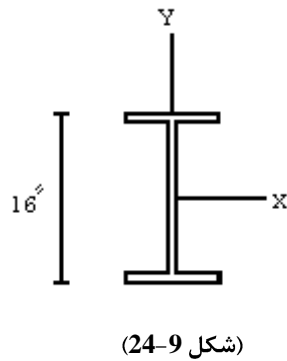
$$I_x = \bar{I}_{x'} + A b^2 = 7.20 \times 10^6 + (12.72 \times 10^3)(81.8)^2 = 92.3 \times 10^6$$

$$I_x = 138.2 \times 10^6 - 92.3 \times 10^6 = 45.9 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

مستطیل		$\bar{I}_{x'} = \frac{1}{12} b h^3$ $\bar{I}_{y'} = \frac{1}{12} b^3 h$ $I_x = \frac{1}{3} b h^3$ $I_y = \frac{1}{3} b^3 h$ $J_C = \frac{1}{12} b h (b^2 + h^2)$
مثلث		$\bar{I}_{x'} = \frac{1}{36} b h^3$ $I_x = \frac{1}{12} b h^3$
دایره		$\bar{I}_x = \bar{I}_y = \frac{1}{4} \pi r^4$ $J_O = \frac{1}{2} \pi r^4$
نیم دایره		$I_x = I_y = \frac{1}{8} \pi r^4$ $J_O = \frac{1}{4} \pi r^4$
ربع دایره		$I_x = I_y = \frac{1}{16} \pi r^4$ $J_O = \frac{1}{8} \pi r^4$
بیضی		$\bar{I}_x = \frac{1}{4} \pi a b^3$ $\bar{I}_y = \frac{1}{4} \pi a^3 b$ $J_O = \frac{1}{4} \pi a b (a^2 + b^2)$

(شکل 9-23)

ممان اینرسی سطوح مختلط:

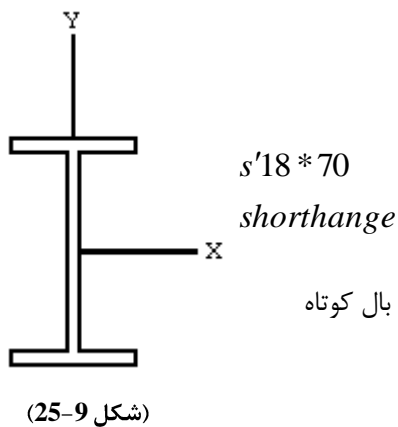


W16\*64

ارتفاع = 16"  
وزن = 64  $\frac{lb}{ft}$

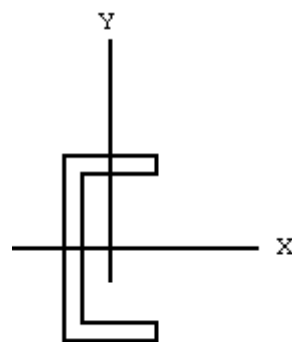
$A = 18.80 \text{ in}^2$

$I_x = 836 \text{ in}^4$      $h_x = 6.66"$   
 $I_y = 73.3 \text{ in}^4$      $h_y = 1.97"$



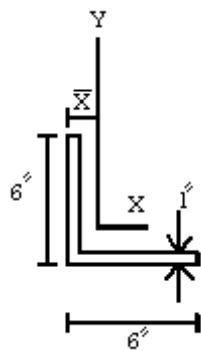
s'18\*70  
shorthange

بال کوتاه



10\*25  
channel  
ناودانی

$A = 7.35 \text{ in}^2$   
 $\bar{x} = .62"$   
 $I_x = 91.2 \text{ in}^4$   
 $I_y = 24 \text{ in}^4$



L6\*6\*1

Angle

نبشی

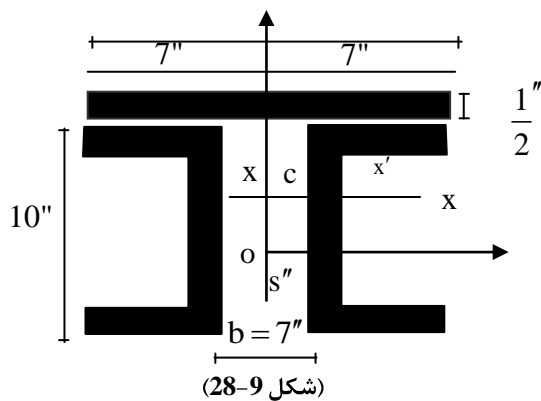
$A = 11.0 \text{ in}^2$      $\bar{x} = \bar{y} = 1.80"$   
 $I_x = 35.6 \text{ in}^4$      $I_y = 35.5 \text{ in}^4$   
 $k_x = 1.80 \text{ in}$      $k_y = 1.83 \text{ in}$

مثال:

نسبت به مرکز سطح

$I'_x = ?$

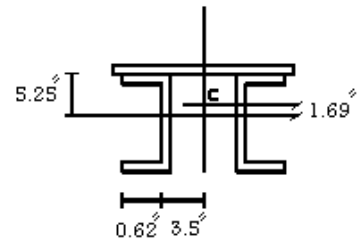
$I'_y = ?$



	A	$\bar{y}$	$\bar{y}A$
p14*1/2	7	5.25	36.75
C10*25	7.35	0	0
C10*25	7.35	0	0
$\Sigma$	21.7	2.25	36.75

$$\bar{Y} \sum A_i = \sum \bar{Y}_i A_i \Rightarrow \bar{Y}(21.7) = 36.75$$

$$\Rightarrow \bar{Y} = 1.69''$$



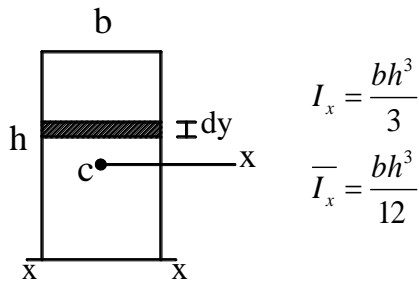
(شکل 9-29)

1 ورق:  $I_x = \bar{I}_x + Ad^2 = \frac{1}{12}(0.5)^3(0.4) + (0.5)(14)(5.35 - 1.694)^2 = 88.7 \text{ in}^4$

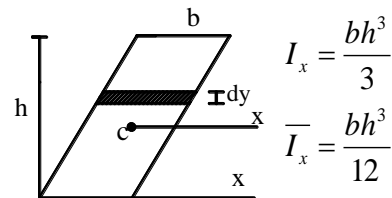
2 نبشی:  $I_x = \bar{I}_x + Ad^2 = 91.2 + 7.35(1.69)^2 = 112.3 \text{ in}^4$

$$I_x = I_{x1} + 2I_{x2} = 88.7 + 2 * 112.3 = 313 \text{ in}^4$$

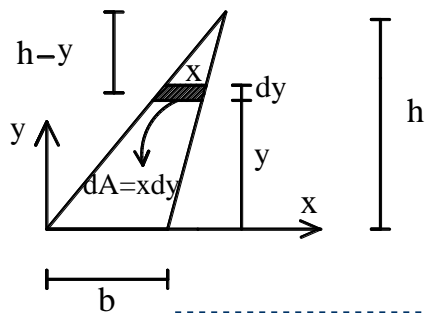
کل  $I_y = \frac{1}{12}(0.5)(14)^3 + 2(8.4 + 7.35(3.5 + .62)^2) = 114.3 + 2 * 128.2 = 371 \text{ in}^4$



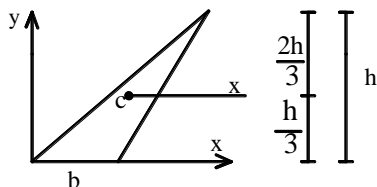
(شکل 9-30)



(شکل 9-31)



(شکل 9-33)



$$I_x = \bar{I}_x + Ad^2 \Rightarrow \frac{bh^3}{12} = \bar{I}_x + \left(\frac{bh}{2}\right)\left(\frac{h}{3}\right)^2$$

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

(شکل 9-32)

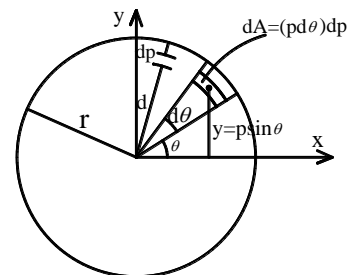
$$x = \frac{b}{h}(h - y)$$

از مثلث های مشابه:

$$I_x = \int y^2 dA = \int_0^h y^2 \frac{b}{h}(h - y) dy$$

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

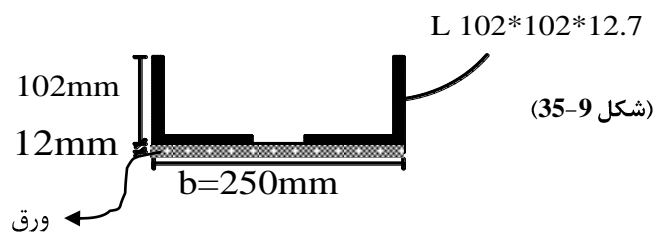
(شکل 9-34)



$$I_x = \int y^2 dA = \int_0^r \int_0^{2\pi} (\rho \sin \theta)^2 \rho d\theta d\rho = \int_0^r \int_0^{2\pi} \rho^3 \sin^2 \theta d\theta d\rho$$

$$I_x = \int_0^{2\pi} \left( \int_0^r \rho^3 d\rho \right) \sin^2 \theta d\theta = \frac{r^4}{4} \int_0^{2\pi} \sin^2 \theta d\theta = \frac{\pi r^4}{4}$$

مثال:



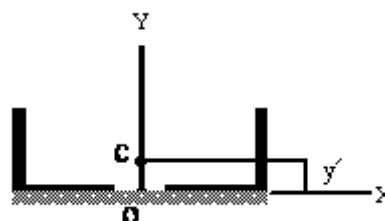
$$I_x = ?$$

$$I_y = ?$$

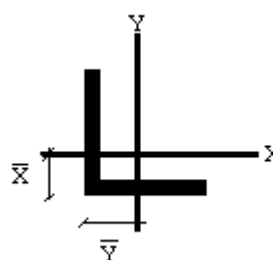
$$A = 2420 \text{ mm}^2$$

$$\bar{I}_x = \bar{I}_y = 2.31 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\bar{x} = \bar{y} = 30 \text{ mm}$$



$$\bar{y} = \frac{2 \times 2420 \times 30 - 12 \times 250 \times 6}{2420 \times 2 + 12 \times 250} = 16.22 \text{ mm}$$



$$\bar{I}_x = \bar{I}_{x'} + Ad^2 = \frac{1}{12} \times 250 \times 12^3 + 12 \times 250 \times (16.22 + 6)^2 = 1.52 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

برای ورق :

$$\bar{I}_y = \frac{1}{12} \times 12 \times 250^3 = 15.63 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

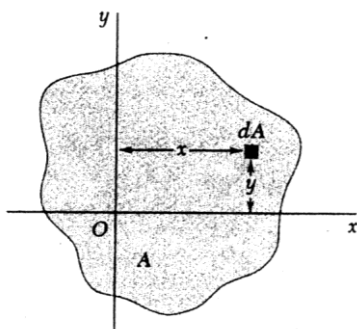
$$\begin{aligned} \bar{I}_x &= 2(\bar{I}_{x'} + Ad^2) = 2(2.31 \times 10^6 + 2420 \times (30 - 16.22)^2) = 5.54 \times 10^6 \text{ mm}^4 \\ \bar{I}_y &= 2(\bar{I}_{y'} + Ad^2) = 2(2.31 \times 10^6 + 2420 (125 - 30)^2) = 48.3 \times 10^6 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

برای نبشی ها :

$$\begin{aligned} \bar{I}_x &= 1.52 \times 10^6 + 5.54 \times 10^6 = 7.06 \times 10^6 \text{ mm}^4 \\ \bar{I}_y &= 15.6 \times 10^6 + 48.3 \times 10^6 = 63.93 \times 10^6 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

برای کل مقطع :

حاصل ضرب اینرسی:  $I_{xy}$  (product of inertia)



(شکل 9-36)

$$I_{xy} = \int xy dA$$

$$I_{xy} > 0 \text{ یا } I_{xy} < 0$$

$$I_{xx}$$

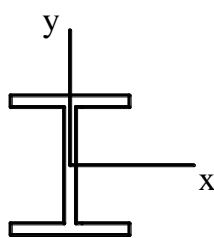
$$I_{yy}$$

برخلاف

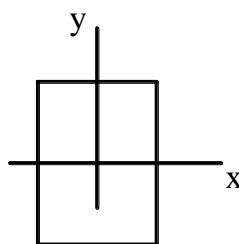
$$I_{xx} = \int y^2 dA > 0$$

$$I_{yy} = \int x^2 dA > 0$$

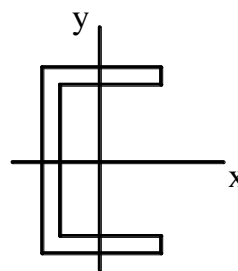
\*\*\* برای اشکال قرینه نسبت به یک یا دو محور  $I_{xy} = 0$  است.



$$I_{xy} = 0$$



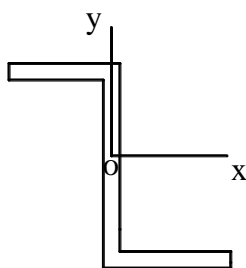
$$I_{xy} = 0$$



$$I_{xy} = 0$$

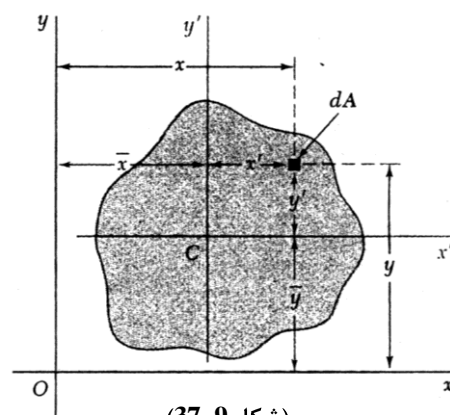
$$I_{xy} \neq 0$$

برای اشکال قرینه نسبت به یک نقطه (به غیر از دایره)

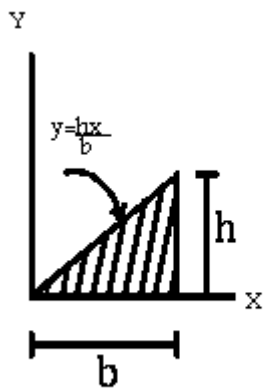


$$I_{xy} \neq 0$$

$$I_{xy} = \bar{I}_{x'y'} + \bar{x}\bar{y}A$$



(شکل 9-37)



(شکل 9-38)

مثال:  $I_{xy} = ?$

$$I_{xy} = \int dI_{xy}$$

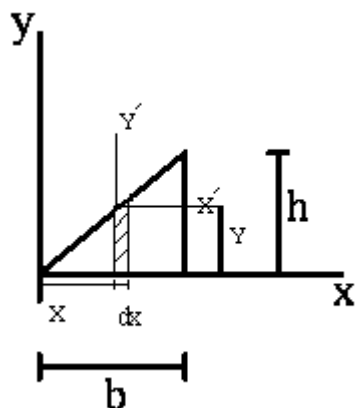
$$dI_{xy} = d\bar{I}_{x'y'} + \bar{x}_{el}\bar{y}_{el}dA$$

$$d\bar{I}_{x'y'} = 0$$

$$\bar{x}_{el} = x$$

$$\bar{y}_{el} = \frac{y}{2}$$

برای یک المان جز



(شکل 9-39)

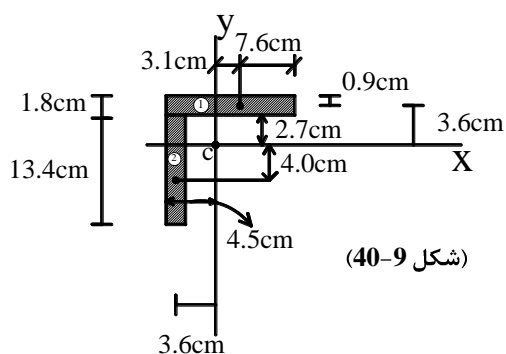
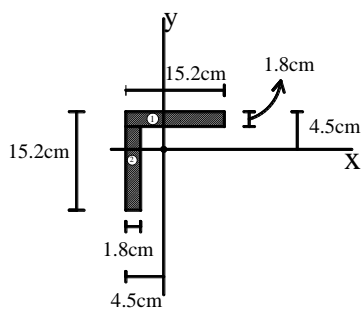
$$dA = ydx, y = \frac{hx}{b}$$

$$I_{xy} = \int dI_{xy} = 0 + \int_0^b x\left(\frac{1}{2}y\right)ydx = \frac{1}{2} \int_0^b x\left(\frac{hx}{b}\right)^2 dx$$

$$I_{xy} = \frac{1}{8} h^2 b^2$$

$$I_{xy} = \int_A xy dA = \int_0^b x \left( \int_0^{\frac{hx}{b}} y dy \right) dx = \int_0^b x \frac{h^2 x^2}{2b^2} dx = \frac{h^2 x^4}{8b^2} \Big|_0^b = \frac{h^2 b^2}{8}$$

مثال:  $I_{xy} = ?$



(شکل 9-40)

به خاطر قرینه بودن هر قسمت  $\bar{I}_{x'y'} = 0$

$$I_{xy} = \sum \bar{I}_{x'y'} + \sum \bar{x}\bar{y}A = \sum \bar{x}\bar{y}A$$

$$I_{xy} = \sum \bar{X}\bar{Y}A = 653 \text{ cm} = 6.53 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_{x'} = \frac{I_x + I_y}{2} + \frac{I_x - I_y}{2} \cos 2\theta - I_{xy} \sin 2\theta \Rightarrow$$

$$I_{y'} = \frac{I_x + I_y}{2} - \frac{I_x - I_y}{2} \cos 2\theta + I_{xy} \sin 2\theta \Rightarrow$$

	$A(\text{cm}^2)$	$\bar{X}(\text{cm})$	$\bar{Y}(\text{cm})$	$\bar{X}\bar{Y}A$
①	27.4	3.1	3.6	306
②	24.1	-3.6	-4.0	347
$\Sigma$	55.5	-5.0	-0.4	653

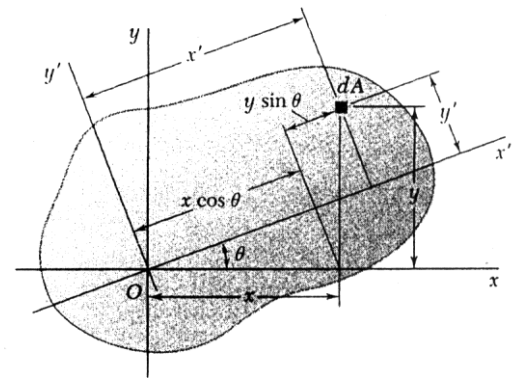
$$I_{x'y'} = \frac{I_x - I_y}{2} \sin 2\theta + I_{xy} \cos 2\theta$$

$$I_{\max, \min} = \frac{I_x + I_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{I_x - I_y}{2}\right)^2 + I_{xy}^2}$$

محورهای اصلی اینرسی

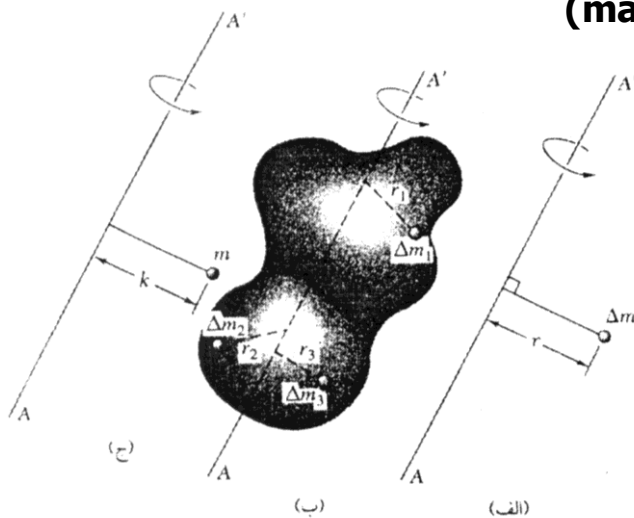
$$\tan 2\theta = -\frac{2I_{xy}}{I_x - I_y}$$

$$I_{x'} + I_{y'} = I_x + I_y$$



(شکل 9-41)

### ممان اینرسی جرم (mass moments of inertia)



(شکل 9-42)

مانند سطح یک جرم  $\Delta m$  را در فاصله  $r^2$  ضرب کنیم بصورت  $r^2 \Delta m$  می‌توانیم آنرا ممان اینرسی جرم طول محور  $AA'$  بنامیم.

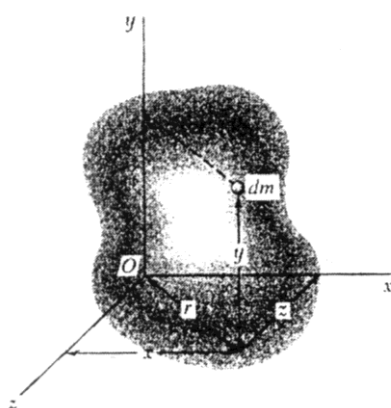
$$r_1^2 \Delta m_1 + r_1^2 \Delta m_2 + \dots = \sum r_i^2 \Delta m_i$$

$$I_n^m = \int r^2 dm$$

ممان اینرسی جرم

(واحد  $\text{kg.m}^2$ )

ممان اینرسی جرم نمایانگر مقاومت از سیستم در مقابل هر نوع حرکت از جرم می‌باشند.



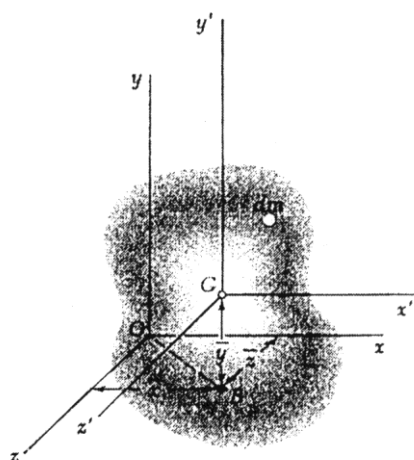
(شکل 9-43)

$$I_y^m = \int r^2 dm = \int (z^2 + x^2) dm$$

$$I_x^m = \int r^2 dm = \int (y^2 + z^2) dm$$

$$I_t^m = \int (x^2 + y^2) dm$$

دستگاه در مرکز ثقل جسم  $ox'y'z'$   
(مرکز ثقل جسم) **G**



(شکل 9-44)

$$G(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$$

$$x = \bar{x} + x'$$

$$y = \bar{y} + y'$$

$$z = \bar{z} + z'$$

$$I_n^m = \int (y^2 + z^2) dm = \int [(y' + \bar{y})^2 + (z' + \bar{z})^2] dm$$

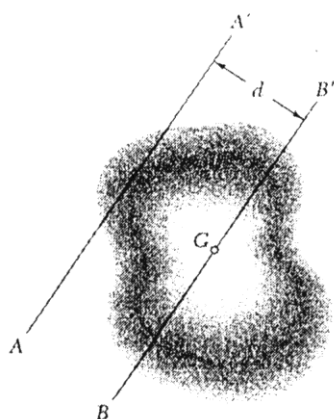
قانون تئوری محورهاى موازى

$$I_x^m = \bar{I}_{x'}^m + m(\bar{y}^2 + \bar{x}^2)$$

$$I_y^m = \bar{I}_{y'}^m + m(\bar{x}^2 + \bar{z}^2)$$

$$I_t^m = \bar{I}_{t'}^m + m(\bar{x}^2 + \bar{z}^2)$$

$$I^m = \bar{I}^m + md^2$$



(شکل 9-45)

$$I_{AA'} = \bar{I}_{BB'} + md^2$$

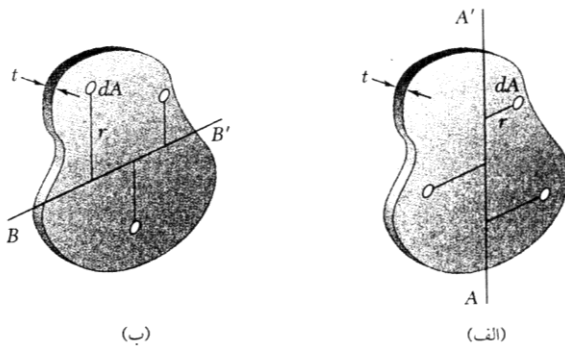
$$k^2 = \bar{k}^2 + d^2$$

### ممان اینرسی صفحات رازک:

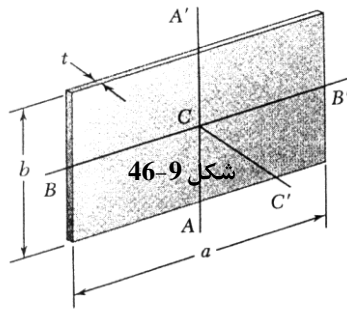
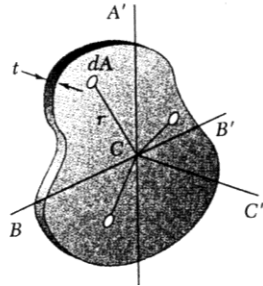
برای جرم‌های همگن و ممان و با یک ضخامت

$$I_{AA'}^m = \int r^2 dm \quad dm = \rho t dA$$

$$\rho = \text{جرم مخصوص} \quad \frac{\text{جرم}}{\text{داده حجم}} = \frac{m}{V}$$



(ب)



(شکل 9-47)

$$I_{AA'}^m = \rho t \int r^2 dA$$

$$I_{AA'}^m = \rho t I_{AA'}$$

$$I_{BB'}^m = \rho t I_{BB'}$$

$$I_{CC'}^m = \rho t J_c = \rho t (I_{AA'} + I_{BB'})$$

### ورق مستطیلی

$$I_{AA'}^m = \rho t I_{AA'} = \rho t \left( \frac{1}{12} a^3 b \right)$$

$$I_{BB'}^m = \rho t I_{BB'} = \rho t \left( \frac{1}{12} a b^3 \right)$$

$$\text{اما } \rho t a b = m = \text{جرم}$$

$$I_{AA'}^m = \frac{1}{12} m a^2$$

$$I_{BB'}^m = \frac{1}{12} m b^2$$

$$I_{CC'}^m = I_{AA'}^m + I_{BB'}^m = \frac{1}{12} m (a^2 + b^2)$$

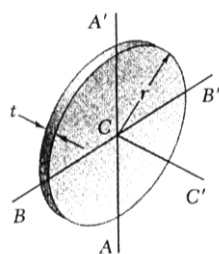
### ورق دایره‌ای

$$I_{AA'}^m = \rho t I_{AA'} = \rho t \left( \frac{1}{4} \pi r^4 \right)$$

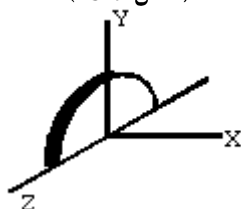
$$\rho t \left( \frac{1}{4} \pi r^2 \right) = m = \text{جرم}$$

$$I_{AA'}^m = I_{BB'}^m = \frac{1}{4} m r^2$$

$$I_{CC'}^m = I_{AA'}^m + I_{BB'}^m = \frac{1}{2} m r^2$$



(شکل 9-48)



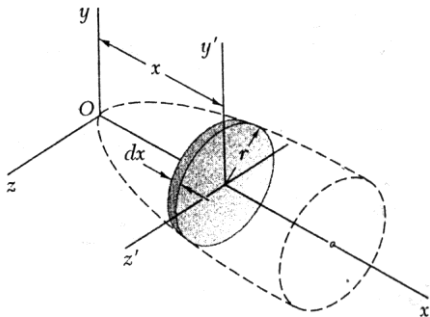
شکل 9-49

$$I_x^m = \rho t I_x = \rho t \left( \frac{1}{4} \pi r^2 \right)$$

$$= \rho t \pi \frac{r^2}{2} \left( \frac{r^2}{4} \right) = \frac{1}{2} m r^2$$

- ممان اینرسی جرمی اجسام سه بعدی توسط روش انتگرالگیری :

اگر جسم همگن باشد انتگرالگیری دوبله یا سوبله داریم.



(شکل 9-50)

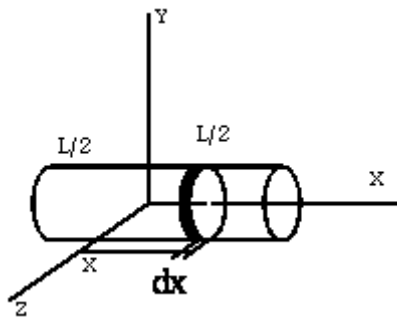
$$dm = \rho \pi r^2 dx$$

$$dI_x^m = \frac{1}{2} r^2 dm$$

$$dI_y^m = dI_{y'}^m + x^2 dm = \left(\frac{1}{4} r^2 + x^2\right) dm$$

$$dI_z^m = dI_{z'}^m + x^2 dm = \left(\frac{1}{4} r^2 + x^2\right) dm$$

مثال:  $I_y^m = ?$



(شکل 9-51)

$$dm = \rho dV = \rho \pi a^2 dx$$

$$dI_y^m = \left(\frac{1}{4} a^2 + x^2\right) dm = \left(\frac{1}{4} a^2 + x^2\right) (\rho \pi a^2 dx)$$

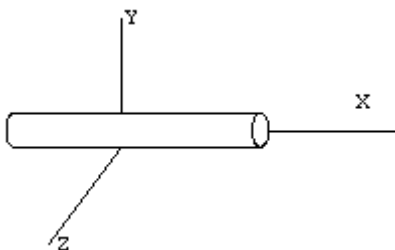
$$I_y^m = \int dI_y^m = \int \left(\frac{1}{4} a^2 + x^2\right) \rho \pi a^2 dx$$

$$= \int_{-l/2}^{l/2} \frac{1}{4} \rho \pi a^2 dx + \int_{-l/2}^{l/2} \rho \pi a^2 x^2 dx = \frac{1}{4} \rho \pi a^4 l + \frac{1}{12} \rho \pi a^2 l^3$$

$$= \frac{1}{12} \rho \pi a^2 l (3a^2 + l^2)$$

$$m = \rho V = \rho \pi a^2 l \Rightarrow I_y^m = \frac{1}{12} m (3a^2 + l^2)$$

$$I_x^m = \frac{1}{2} m a^2$$



(شکل 9-52)

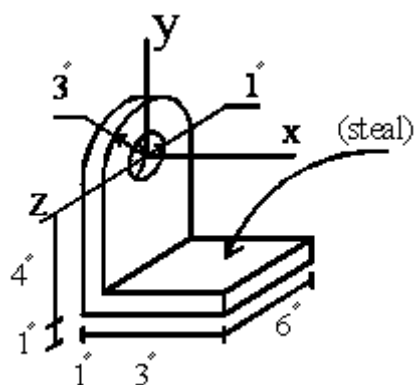
میله ی نازک

$$I_y^m = \frac{m}{12} (0 + l^2) = \frac{ml^2}{12} = I_z^m$$

$$I_x^m \approx 0$$

- ممان اینرسی اجسام مرکب

مثال:  $I_x^m = ?$


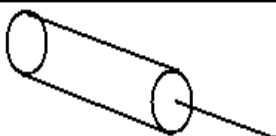
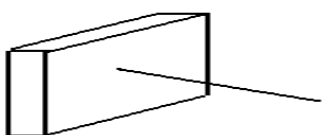
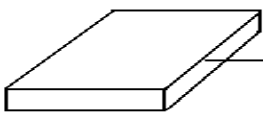


(شکل 9-53)

$$\rho = 0.000734 \frac{lb.s^2}{in^4}$$

$$\delta = 490 \frac{lb}{ft^3}$$

$$\rho = \frac{490}{32.2} \left( \frac{lb}{ft^3} \right) \left( \frac{1ft}{12in} \right)^4 = 0.000734 \frac{lb.s^2}{in^4}$$

	$m$	$I_x^m$
	$\rho \frac{\pi}{2} (3)^2 (1)$ $= 14.14\rho$	$I_x^m = \frac{1}{2} mr^2 = \frac{1}{2} (14.14\rho)(3)^2$ $= 63.62\rho$
	$-\rho\pi(1)^2(1)$ $= -3.14\rho$	$I_x^m = \frac{1}{2} mr^2 = \frac{1}{2} (-3.14\rho)(1)^2$ $= -1.57\rho$
	$\rho(4)(6)(1)$ $= 24\rho$	$I_x^m = \frac{1}{12} (24\rho)(4^2 + 6^2) + (24\rho)(2)^2$ $= 200\rho$
	$\rho(4)(6)(1)$ $= 24\rho$	$I_x^m = \frac{1}{12} (24\rho)(1^2 + 6^2) + 24\rho(4.5)^2$ $= 560\rho$
$\Sigma$	$59\rho$	$822\rho$

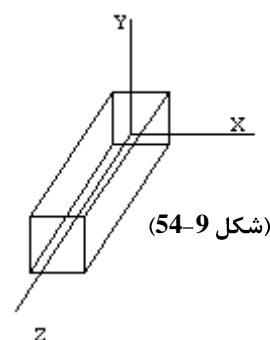
$$I_x^m = 822\rho = 822(0.000734) = 0.6033 lb.in.s^2$$

$$h_x^m = \sqrt{\frac{I_x^m}{m}} = 3.73"$$

$$I_x = \frac{1}{12} m(a^2 + b^2)$$

$$I_y = \frac{1}{12} m(a^2 + c^2)$$

$$I_z = \frac{1}{12} m(b^2 + c^2)$$



(شکل 9-54)

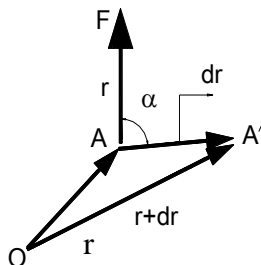
# فصل دهم

## روش کار مجازی

## METHOD OF VIRTUAL WORK

## روش کار مجازی

کار نیرو:



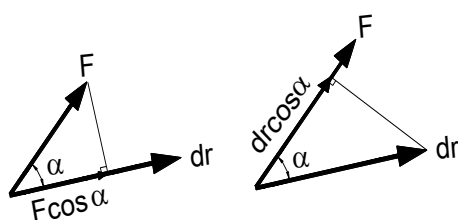
$$du = \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

$$du = F dr \cos \alpha \quad \text{کار ناشی از اثر یک نیرو در یک نقطه}$$

$$du > 0 \quad \text{if } 0 < \alpha < 90^\circ$$

$$du < 0 \quad \text{if } 90 < \alpha < 180^\circ$$

$$du = 0 \quad \text{if } \alpha = 90$$



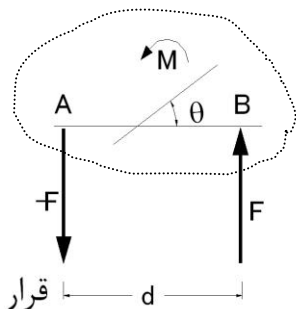
$$(joule = N.m)$$

واحد کار:

شکل 1-10

$$du = (F \cos \alpha) dr = F (dr \cos \alpha)$$

بعضی از نیروها کار انجام نمی دهند و  $du=0$  مانند عکس العمل های داخل pin بدون اصطکاک که بدنه اصلی توسط آن نگه داشته شده است به دور pin دوران کند، مانند عکس العمل روی سطح بدون اصطکاک که جسم متصل به آن سطح روی سطح حرکت کند، مانند نیروی واقع در تکیه گاه ثابت، مانند نیروی وزن که خود جسم به سمت افقی حرکت می کند، مانند عکس العمل روی یک غلتک و غیره.



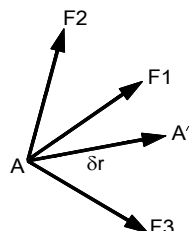
شکل 2-10

$$M = Fd \quad \text{کار ناشی از دوران جسم توسط یک کوپل یا گشتاور}$$

$$du = Md\theta$$

**اصل کار مجازی:** فرض کنیم که نقطه A تحت تاثیر نیروهای  $F_1$  و  $F_2$  و  $F_3$

گرفته و فرض کنیم که نقطه A به نقطه A' تغییر مکان بدهد این تغییر مکان ممکن است که اتفاق بیافتد و ممکن است که اتفاق نیافتد. پس این تغییر مکان بصورت مجازی فرض شده است.



جابجایی مجازی  $\delta =$

مشتق درجه اول r است و آنرا برای تشخیص جابجایی مجازی dr بکار می برند.  
برای جابجایی حقیقی  $d =$  برای جابجایی مجازی  $\delta =$  operators  $\rightarrow$

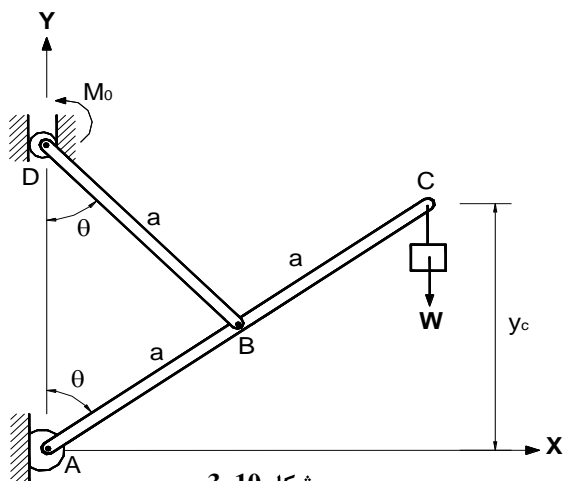
$$\delta u = \vec{F}_1 \cdot \delta \vec{r} + \vec{F}_2 \cdot \delta \vec{r} + \vec{F}_3 \cdot \delta \vec{r} + \dots = (\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots) \delta \vec{r}$$

$$\delta u = \vec{R} \cdot \delta \vec{r} \quad \vec{R} = \sum \vec{F}_i$$

تئوری کار مجازی می گوید که اگر نقطه ای در تعادل باشد جمع کل کارهای مجازی نیروهای وارد بر آن، نقطه برای تمام تغییر مکانهای مجازی آن نقطه صفر خواهد بود.

$$\left. \begin{aligned} \delta u = 0 \Rightarrow R = 0 \Rightarrow \text{اگر تعادل} \Rightarrow \text{لازم} \\ \Rightarrow \delta u = 0 \Rightarrow R \cdot \delta r = 0 \Rightarrow R = 0 \Rightarrow \text{کافی} \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow \text{لازم و کافی}$$

همچنین تئوری کار مجازی برای یک جسم صلب می گوید که اگر جسمی در تعادل باشد، جمع کل کارهای مجازی نیروهای خارجی وارد بر آن جسم برای هر تغییر مکان مجازی صفر خواهد بود.



شکل 3-10

**مثال:** با استفاده از روش کار مجازی نیروی کوپل  $M_0$  را طوری بدست آورید که سیستم روبرو در تعادل باشد.

**حل:** عکس العمل ها در نقطه A کار انجام نمی دهند. زیرا تکیه گاه است. عکس العمل در نقطه D افقی است در حالیکه حرکت می تواند در جهت عمودی باشد پس کار در آنجا نیز صفر خواهد بود. همینطور در نقطه B نیروهای داخلی کارشان صفر است چون دو عضو همدیگر را خنثی خواهند کرد.

$$\delta u = 0 \Rightarrow M_0 \delta \theta - W y_c = 0$$

$$\delta \theta =$$

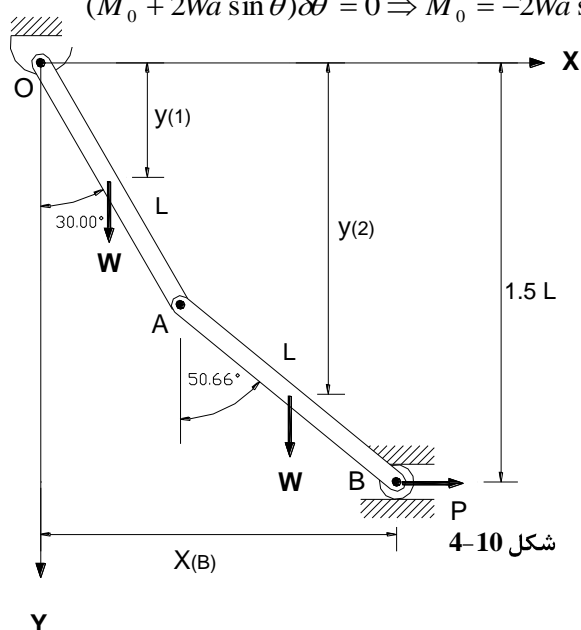
دوران مجازی عضو BD

$\delta y_c$  = تغییر مکان مجازی نقطه C

$$y_c = 2a \cos \theta \Rightarrow \delta y_c = \frac{dy_c}{d\theta} \delta \theta = -2a \sin \theta (\delta \theta)$$

$$\delta u = 0 \Rightarrow M_0 \delta \theta - W(-2a) \sin \theta (\delta \theta) = 0$$

$$(M_0 + 2Wa \sin \theta) \delta \theta = 0 \Rightarrow M_0 = -2Wa \sin \theta$$



شکل 4-10

**مثال:** دو میله OA و AB هر کدام به وزن W و طول L به یکدیگر در نقطه A لولا شده اند. مقدار لازم P را برای تعادل این سیستم در حالتیکه  $\theta = 30^\circ$  بدست بیاورید.

$$y_1 = \frac{l}{2} \cos \theta_1 \quad y_2 = l \cos \theta_1 + \frac{l}{2} \cos \theta_2$$

$$\delta y = W \delta y_1 + W \delta y_2 + P \delta x_b = 0$$

$$l \cos \theta_1 + l \cos \theta_2 = 1.5l \Rightarrow \cos \theta_1 + \cos \theta_2 = 1.5 \quad \theta_1 = 30^\circ \Rightarrow \theta_2 = 50.66^\circ$$

$$\delta y_1 = \frac{dy_1}{d\theta_1} \delta \theta_1 = -\frac{l}{2} \sin \theta_1 \delta \theta_1 = -0.25l \delta \theta_1$$

$$\delta y_2 = \frac{dy_2}{d\theta_1} \delta \theta_1$$

$$y_2 = l \cos \theta_1 + \frac{l}{2} \cos \theta_2 = l \cos \theta_1 + \frac{l}{2} (1.5 - \cos \theta_1)$$

$$y_2 = \frac{l}{2} \cos \theta_1 + 0.25l$$

$$\delta y_2 = -\frac{l}{2} \sin \theta_1 \delta \theta_1 = -0.25l \delta \theta_1$$

$$x_B = l \sin \theta_1 + l \sin \theta_2$$

$$\delta x_B = \frac{\delta x_B}{\delta \theta_1} \delta \theta_1 + \frac{\delta x_B}{\delta \theta_2} \delta \theta_2 = l \cos \theta_1 \delta \theta_1 + l \cos \theta_2 \delta \theta_2$$

$$\cos \theta_1 + \cos \theta_2 = 1.5$$

از روابط قبل  $\delta \theta_2$  را بر حسب  $\delta \theta_1$  به دست می آوریم.  $\Leftarrow$

$$\frac{\delta}{\delta \theta_1} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \delta \theta_1 + \frac{\delta}{\delta \theta_2} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \delta \theta_2 = 0$$

$$-\sin \theta_1 \delta \theta_1 - \sin \theta_2 \delta \theta_2 = 0 \Rightarrow \delta \theta_2 = -\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \delta \theta_1$$

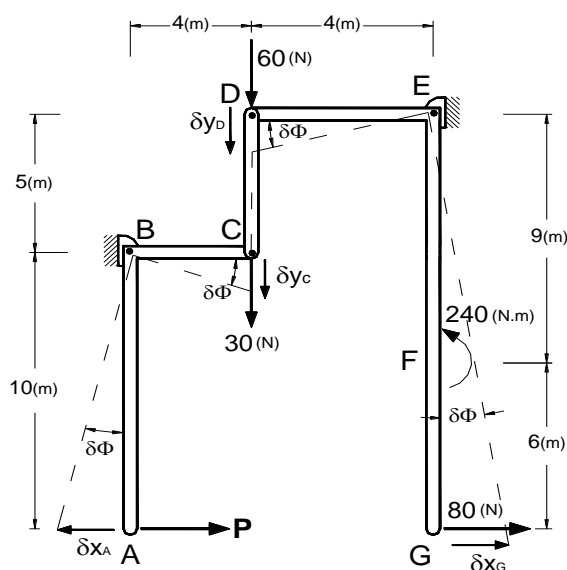
$$\delta x_B = l \cos \theta_1 \delta \theta_1 + l \cos \theta_2 \left( \frac{-\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \right) \delta \theta_1$$

$$\text{برای } \theta_1 = 30^\circ, \theta_2 = 50.66^\circ \Rightarrow \delta x_B = 0.456l \delta \theta_1$$

$$\delta u = 0 \Rightarrow W(-0.25l \delta \theta_1) + W(-0.25l \delta \theta_1) + P(0.456l \delta \theta_1) = 0$$

$$(-0.5W + 0.456P) \delta \theta_1 = 0$$

$$\delta \theta_1 \neq 0 \Rightarrow P = 1.096W$$



شکل 5-10

مثال: بدست بیاورید مقدار نیروی افقی P لازم در نقطه A تا سیستم مقابل را به تعادل برساند. (اندازه ها بر حسب اینچ)

حل: فرض کنیم که در نقطه B عضو به اندازه  $\delta \theta$  می چرخد.

$$\delta x_A = 10 \delta \theta \leftarrow$$

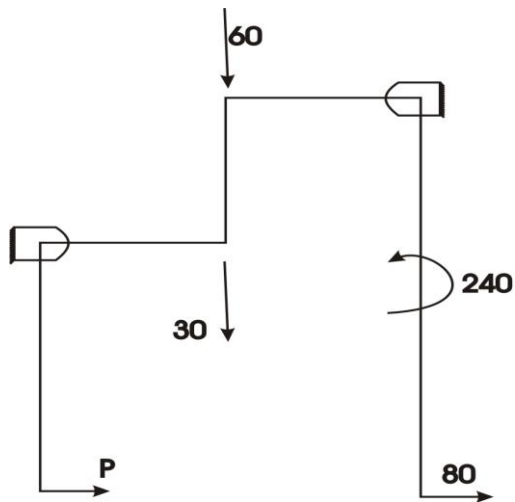
$$\delta y_C = 4 \delta \theta \downarrow$$

$$\delta y_D = \delta y_C = \delta \theta \downarrow$$

$$\delta \phi = \frac{\delta y_D}{6} = \frac{2}{3} \delta \theta$$

$$\delta x_G = 15 \delta \phi = 15 \left( \frac{2}{3} \right) \delta \theta = 10 \delta \theta$$

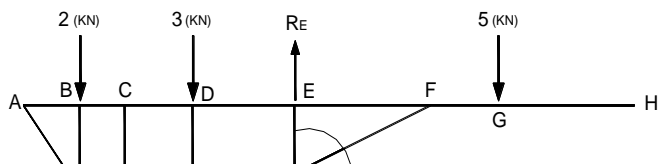
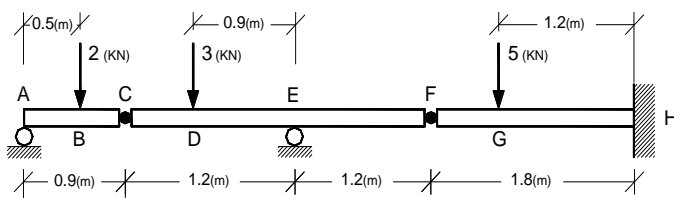
$$\delta u = 0 \Rightarrow -P \delta x_A + 30 \delta y_C + 60 \delta y_D + 240 \delta \phi + \delta x_G = 0$$



$$-P(10\delta\theta) + 30(4\delta\theta) + 60(4\delta\theta) + 240\left(\frac{2}{3}\delta\theta\right) + 80(10\delta\theta) = 0$$

$$P = 132.0(lb)$$

مثال: در تیر مقابل از روش کار مجازی مقدار عکس العمل  
در نقطه E را بدست آورید.



$$\delta y_C = \frac{2.7}{1.2} \delta y_E = 2.25 \delta y_E$$

$$\delta y_C = \frac{2.7}{1.2} \delta y_E = 2.25 \delta y_E$$

$$\delta y_B = \frac{0.5}{0.4} \delta y_E = 1.25 \delta y_E$$

$$\delta u = 0 \Rightarrow 2\delta y_B + 3\delta y_D - R_E \delta y_E = 0$$

$$[2(1.25) + 3(1.75) - R_E] \delta y_E = 0$$

$$\delta y_E \neq 0 \Rightarrow R_E = 7.25 \text{ KN } \uparrow$$