



دانشکده مکانیک

استاتیک

شاهرخ حسینی هاشمی



<https://telegram.me/jozveabad>

فهرست مطالب

۱- مقدمه، ارایه برداری نیرو و تعادل ذره مادی

- ۱-۱ تعاریف ۹
- ۱-۲ سیستم آحاد ۱۲
- ۱-۳ نمایش بردارهای یکه ۱۳
- ۱-۴ نمایش نیروها ۱۴
- ۱-۵ نحوه ارایه یک نیرو در فضا به شکل برداری ۱۶
- ۱-۶ تعادل ذره مادی ۱۸
- مسائل ۱۹

۲- نیرو، گشتاور و زوج نیرو

- ۲-۱ نیروهای خارجی و داخلی..... ۴۴
- ۲-۲ اصل قابلیت انتقال نیرو..... ۴۶
- ۲-۳ ضرب برداری دو بردار..... ۵۰
- ۲-۳ گشتاور حول یک نقطه..... ۵۴
- ۲-۴ قضیه ورینون..... ۵۶
- ۲-۵ ضرب اسکالر دو بردار..... ۵۸
- ۲-۶ ضرب مختلط سه بردار..... ۶۱
- ۲-۷ گشتاور حول یک محور..... ۶۵
- ۲-۸ زوج نیرو و گشتاور زوج نیرو..... ۶۶
- ۲-۹ تجزیه یک نیروی مفروض به یک نیرو و بردار کوپل در نقطه ای معلوم..... ۶۹

۱۱-۲ رنج..... ۷۲

مسایل..... ۸۰

۳- تعادل جسم صلب

۱-۳ تعادل کامل..... ۱۰۱

۲-۳ دیاگرام آزاد..... ۱۰۴

۳-۳ عکس العمل های نامعین استاتیکی..... ۱۰۷

۴-۳ تعادل اجسام دو نیرویی..... ۱۱۳

۵-۳ تعادل اجسام سه نیرویی..... ۱۱۵

مسایل..... ۱۱۶

۴- تعیین مراکز

۱-۴ مراکز: ثقل و حجم..... ۱۲۴

۲-۴	مرکز سطح و گشتاور اول سطح.....	۱۲۸
۳-۴	مرکز خط.....	۱۳۰
۴-۴	مرکز نیرو.....	۱۳۱
۵-۴	قضایای پاپوس گلدینوس.....	۱۳۳
	مسایل.....	۱۳۵

۵- تحلیل سازه ها

۱-۵	تراس ها - قاب ها - ماشین ها.....	۱۴۸
۲-۵	تراس صلب و ساده.....	۱۵۰
۳-۵	تحلیل تراس ها (روش مفصل ها).....	۱۵۲
۴-۵	تحلیل تراس ها (روش مقاطع).....	۱۵۷
۵-۵	تحلیل قاب ها.....	۱۵۹
	مسایل.....	۱۶۳

۶- تحلیل تیرها

- ۱-۶ مقدمه..... ۱۹۶
- ۲-۶ نیروهای داخلی در عضوهای دو نیرویی..... ۱۹۹
- ۳-۶ نیروهای داخلی در عضوهای چند نیرویی..... ۲۰۰
- ۴-۶ تعیین نیروی برشی و گشتاور خمشی در تیرها ۲۰۱
- ۵-۶ دیاگرام نیروی برشی و گشتاور خمشی..... ۲۰۶
- ۶-۶ رابطه ما بین نیروی برشی و گشتاور خمشی..... ۲۱۲
- مسایل..... ۲۱۵

۷- تحلیل کابل ها

- ۱-۷ کابل ها با نیروی متمرکز..... ۲۳۱
- ۲-۷ کابل های سهمی..... ۲۳۵

۳-۷ کابل تحت تاثیر نیروی وزنش..... ۲۴۱

مسایل..... ۲۴۶

۸- اصطکاک

۱-۸ مقدمه..... ۲۵۰

۲-۸ گوه ها..... ۲۵۵

۳-۸ اصطکاک تسمه ها..... ۲۵۷

مسایل..... ۲۵۹

۹- ممان اینرسی

۱-۹ مقدمه..... ۲۶۶

۲-۹ ممان اینرسی سطح، ممان اینرسی قطبی و شعاع ژیراسیون (چرخش)..... ۲۶۹

۲۷۱.....	۳-۹ قضیه انتقال محورهای موازی.....
۲۷۲.....	۴-۹ حاصل ضرب اینرسی.....
۲۷۳.....	۵-۹ قضیه انتقال برای حاصلضرب اینرسی.....
۲۷۴.....	۶-۹ دوران محورهای مختصات.....
۲۸۱.....	مسایل.....

۱۰- کار مجازی و پایداری

۲۹۵.....	۱۰-۱ کار یک نیرو.....
۲۹۶.....	۱۰-۲ کار یک کوپل نیرو.....
۲۹۷.....	۱۰-۳ کار مجازی.....
۳۰۲.....	۱۰-۴ پایداری.....
۳۰۵.....	مسایل.....

۳۲۲.....	مراجع.....
----------	------------

۱- مقدمه، ارایه برداری نیرو و تعادل ذره مادی

تعاریف:

مکانیک: بخشی از علوم است که درباره وضع سکون و حرکت اجسام تحت تأثیر نیروها گفتگو میکند.

فضا: یک ناحیه هندسی است که بوسیله اجسام اشغال میشود و در آن رویدادها بوقوع میپیوندد. موقعیت هر نقطه از جسمی بوسیله مختصات مربوط به آن نقطه با انتخاب دستگاه مختصات مناسب مشخص میشود.

زمان: معیار توالی رویدادهاست. در مکانیک نیوتونی زمان یک کمیت مطلق محسوب میشود.

نیرو (Force) :

اثر برداری یک جسم بر جسم دیگر است. نیرویی که بر جسمی وارد میشود، تمایل دارد آن جسم را در راستا و جهتی که بر آن اثر کرده است به حرکت درآورد.

ذره مادی (Particle) :

نمایشگر یک جسم است با ابعاد قابل اغماض. به هنگامیکه ابعاد یک جسم در تشریح حرکت آن و یا اثر نیروهای وارده بر آن مطرح نیستند، جسم را ذره مادی فرض میکنند.

جسم صلب (Rigid body) :

جسمی است که بین اجزاء تشکیل دهنده آن هیچ تغییر شکل نسبی بوجود نیاید. بعبارت دیگر: هرگاه تغییر شکل جسم در مقایسه با ابعاد کلی جسم ناچیز باشد، جسم را صلب فرض میکنیم.

استاتیک (Statics) :

شاخه ای از علم مکانیک است که در ارتباط با تعادل اجسام بحث می کند. در استاتیک، فرض بر آنست که جسم مورد نظر کاملاً صلب است؛ یعنی هیچ تغییر شکلی بواسطه نیروهای اعمالی در آن ایجاد نمی شود.

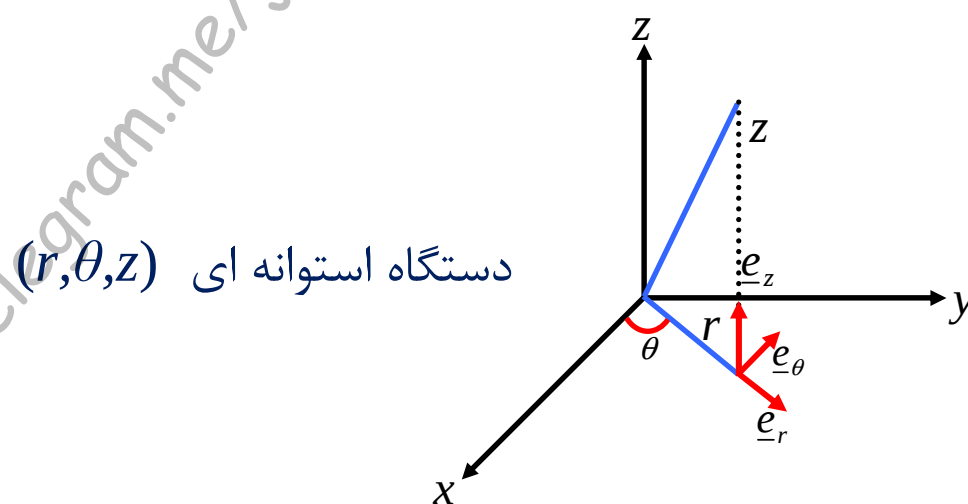
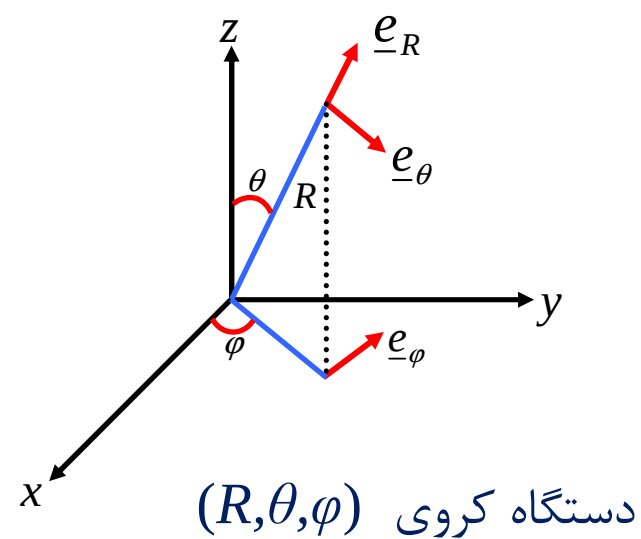
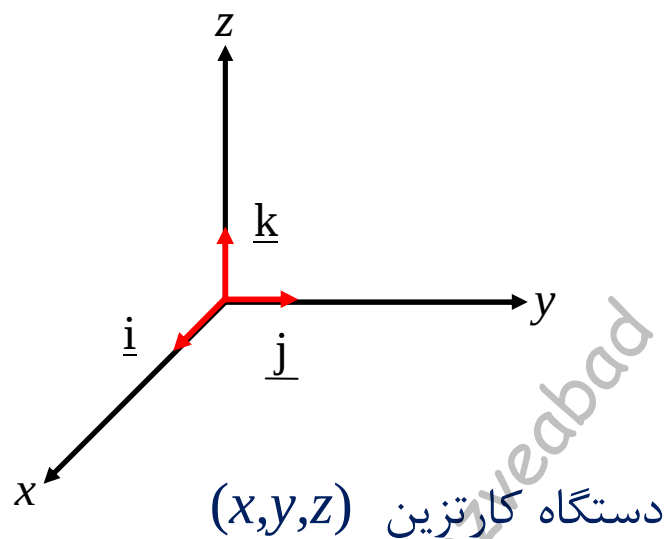
دیاگرام آزاد (Free body diagram) :

یک سیستم مکانیکی را میتوان بصورت یک جسم یا گروهی از اجسام که میتوان آنها را از یکدیگر مجزا نمود تعریف کرد. در حل مسایل مکانیک لازم است که نیروهای وارده بر جسم یا اجزای تشکیل دهنده سیستم مکانیکی مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور از دیاگرام آزاد که نمایشگر نیروهای وارده بر جسم یا اجزای تشکیل دهنده سیستم مکانیکی میباشد استفاده میکنند.

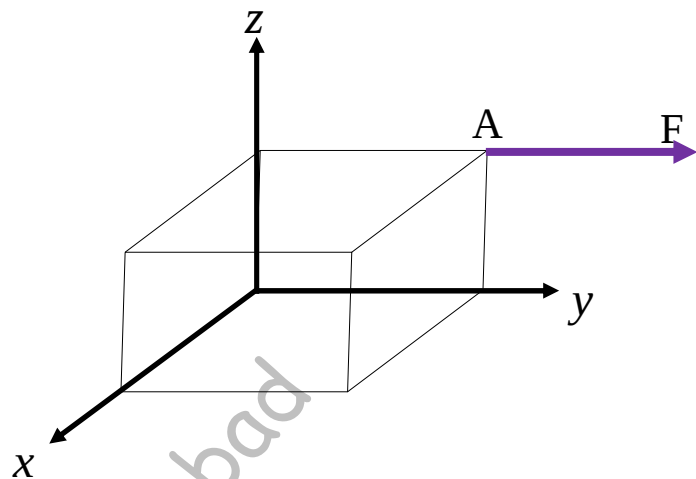
سیستم آحاد

		طول	جرم	زمان
SI	MKS	m	kg	s
	CGS	cm	gr	s
English		ft	slug	s

نمایش بردارهای یکه:

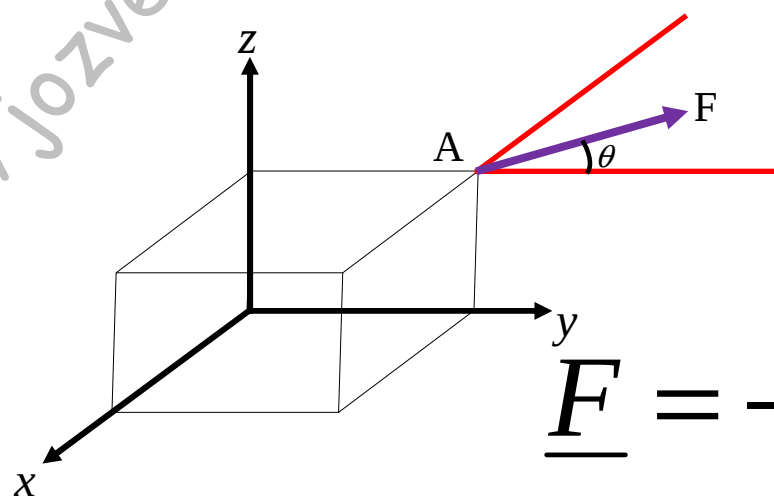


نمایش نیروها:



نیروی محوری:

$$\underline{F} = F \underline{j}$$

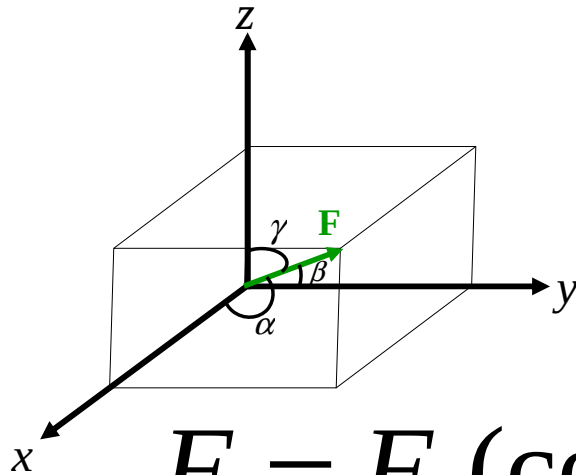


نیروی صفحه ای:

$$\underline{F} = -F_x \underline{i} + F_y \underline{j}$$

$$\underline{F} = -F \sin \theta \underline{i} + F \cos \theta \underline{j}$$

نیروی فضایی:



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

$$\underline{F} = F (\cos \alpha \underline{i} + \cos \beta \underline{j} + \cos \gamma \underline{k})$$

$$\cos \alpha = \frac{F_x}{F}$$

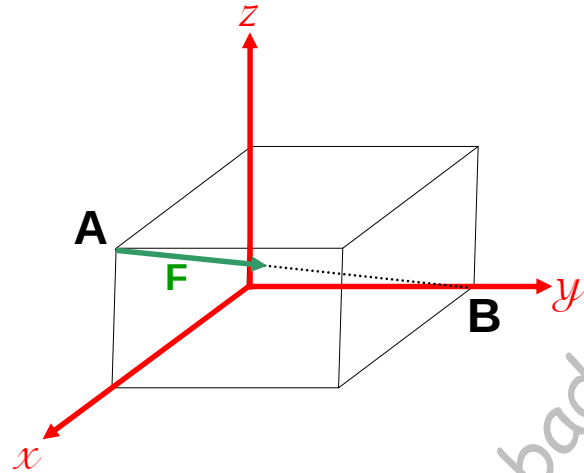
$$\cos \beta = \frac{F_y}{F}$$

$$\cos \gamma = \frac{F_z}{F}$$

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$$

نحوه ارایه یک نیرو در فضا به شکل برداری:

روش اول: با معلوم بودن مختصات دو نقطه از امتداد نیرو:



$$A = (x_A, y_A, z_A)$$

$$B = (x_B, y_B, z_B)$$

$$\underline{\lambda}_{AB} = \underline{\lambda} = \frac{\underline{AB}}{AB} = \frac{(x_B - x_A)\underline{i} + (y_B - y_A)\underline{j} + (z_B - z_A)\underline{k}}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}}$$

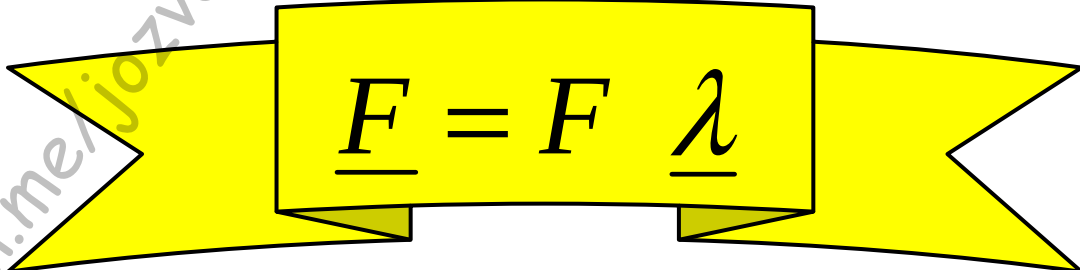
$$\underline{F} = F \underline{\lambda}$$

$$\underline{\lambda}_{BA} = -\underline{\lambda}_{AB}$$

روش دوم:

اگر کسینوس های هادی معلوم باشند، آنگاه داریم:

$$\underline{\lambda}_{AB} = \underline{\lambda} = \cos \alpha_x \underline{i} + \cos \alpha_y \underline{j} + \cos \alpha_z \underline{k}$$


$$\underline{F} = F \underline{\lambda}$$

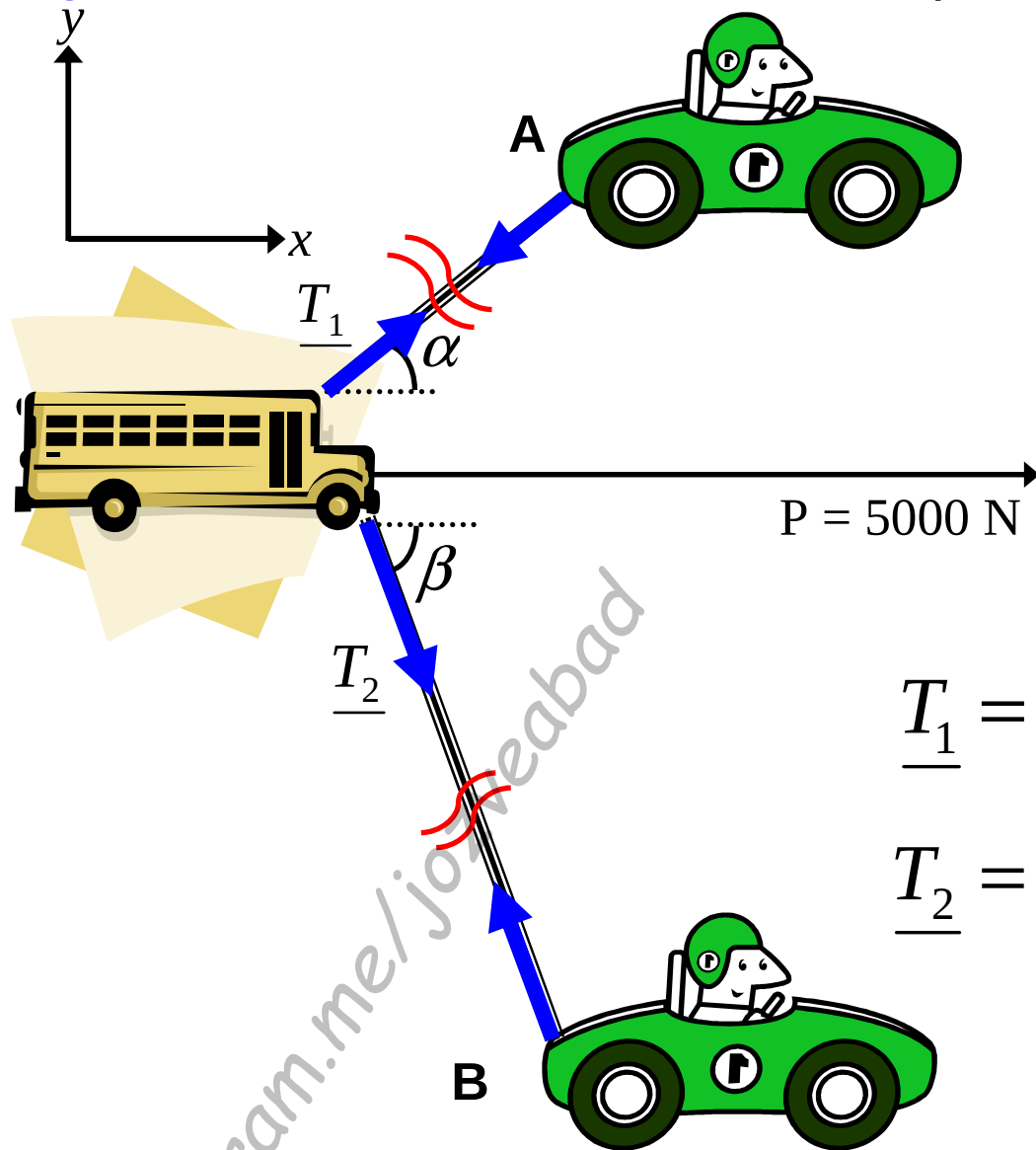
تعادل ذره مادی (Equilibrium of a particle)

یک ذره مادی به هنگامی در وضعیت تعادل است که برآیند نیروهای وارده بر آن برابر صفر باشد.

بعبارت دیگر؛ جهت ارضای قانون اول نیوتون میبایست داشته باشیم:

$$\underline{R} = \sum \underline{F} = 0$$

مثال: اتوبوسی بوسیله دو خودرو A و B در جهت و امتداد نشان داده شده در شکل تحت تأثیر نیروی کشیده می شود. چنانچه زوایای α و β به ترتیب برابر 30 و 45 باشند، نیروهای کشش وارده از طرف کابل ها را بر اتوبوس بیابید:



قدم اول: انتخاب دستگاه مختصات

قدم دوم: دیاگرام آزاد (رسم نیروها)

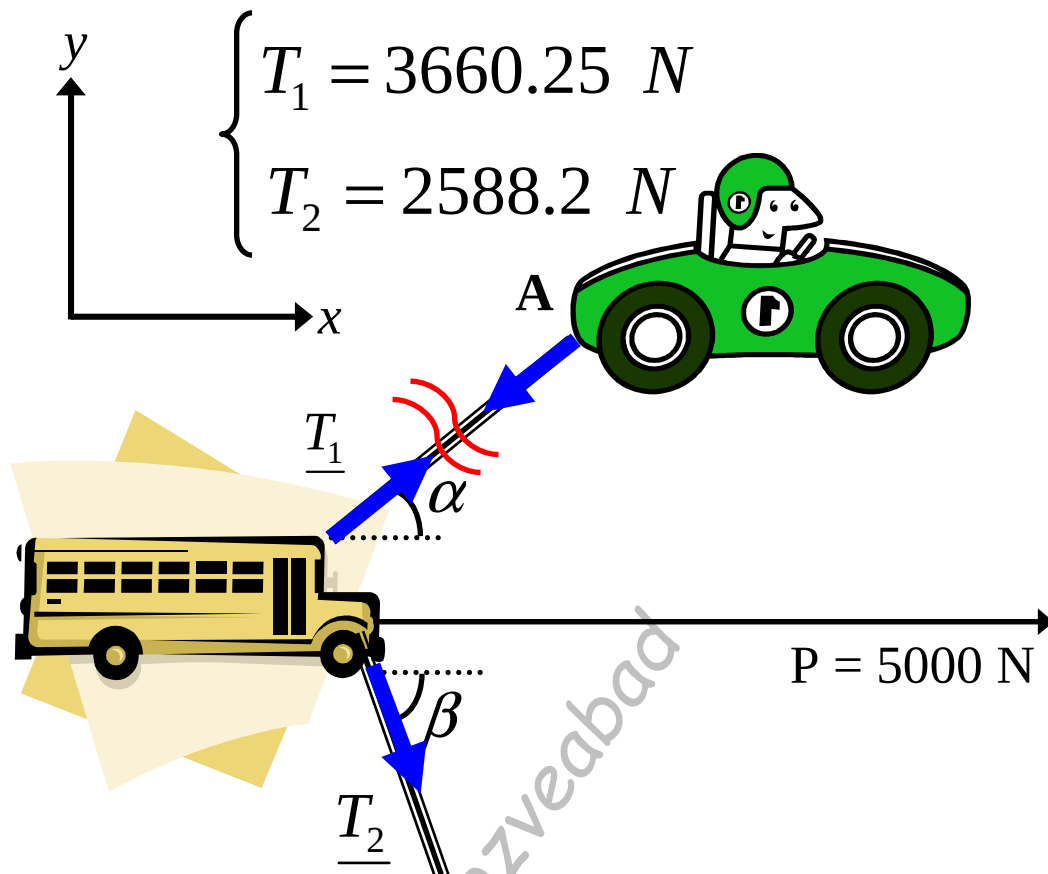
قدم سوم: معرفی نیروها

$$\underline{P} = 5000 \underline{i}$$

$$\underline{T}_1 = T_1 (\cos \alpha \underline{i} + \sin \alpha \underline{j})$$

$$\underline{T}_2 = T_2 (\cos \beta \underline{i} - \sin \beta \underline{j})$$

قدم آخر: محاسبه خواسته سؤال

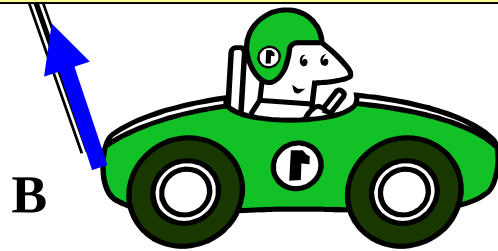


$$\begin{cases} T_1 = 3660.25 \text{ N} \\ T_2 = 2588.2 \text{ N} \end{cases}$$

$$\underline{P} = \underline{T}_1 + \underline{T}_2$$

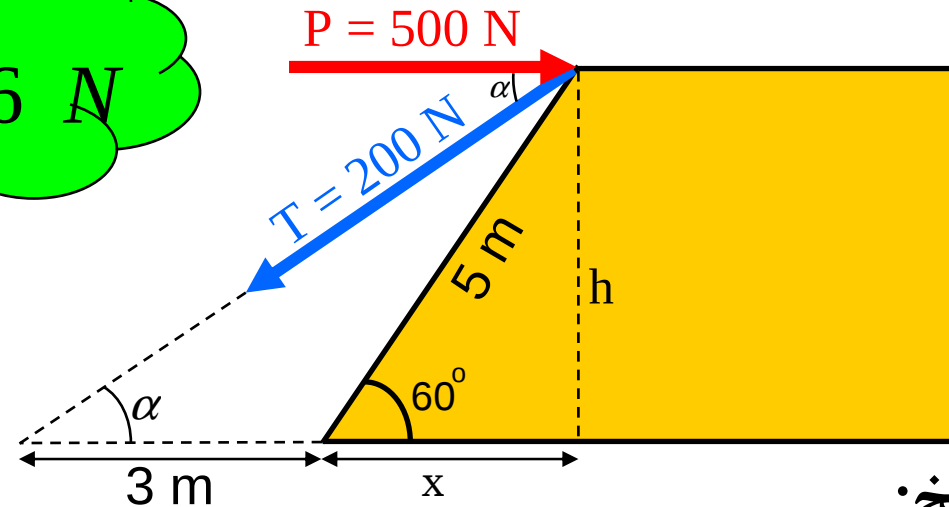
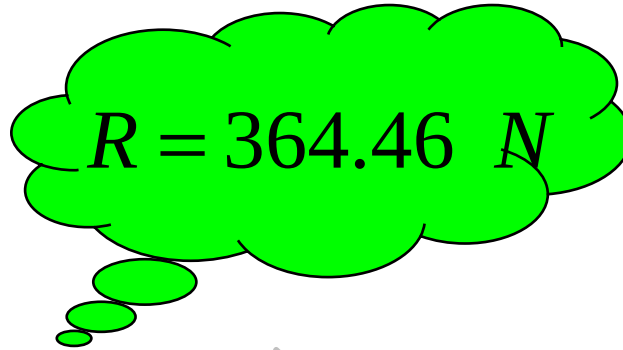
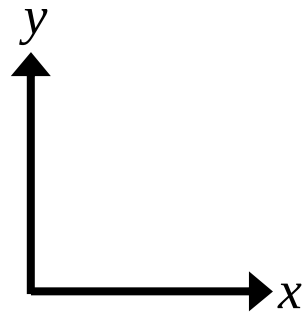
$$5000\mathbf{i} = (T_1 \cos 30 + T_2 \cos 45)\mathbf{i} + (T_1 \sin 30 - T_2 \sin 45)\mathbf{j}$$

$$\begin{cases} \alpha = 30^\circ \\ \beta = 45^\circ \end{cases}$$



$$\begin{cases} 5000 = T_1 \cos 30 + T_2 \cos 45 \\ T_1 \sin 30 - T_2 \sin 45 = 0 \end{cases}$$

مثال: بر سازه زیر دو نیروی P و T مطابق شکل وارد می شود. مطلوبست محاسبه برآیند نیروها و بزرگی آن؟



پاسخ:

$$\underline{P} = 500 \underline{i}$$

$$\underline{T} = -200 (\cos \alpha \underline{i} + \sin \alpha \underline{j})$$

$$\underline{T} = -200 (0.79 \underline{i} + 0.62 \underline{j})$$

$$\underline{R} = \underline{P} + \underline{T}$$

$$\underline{R} = (500 - 157.17) \underline{i} - 123.68 \underline{j}$$

$$\underline{R} = 342.83 \underline{i} - 123.68 \underline{j} \text{ N}$$

$$x = 5 \cos 60^\circ = 2.5$$

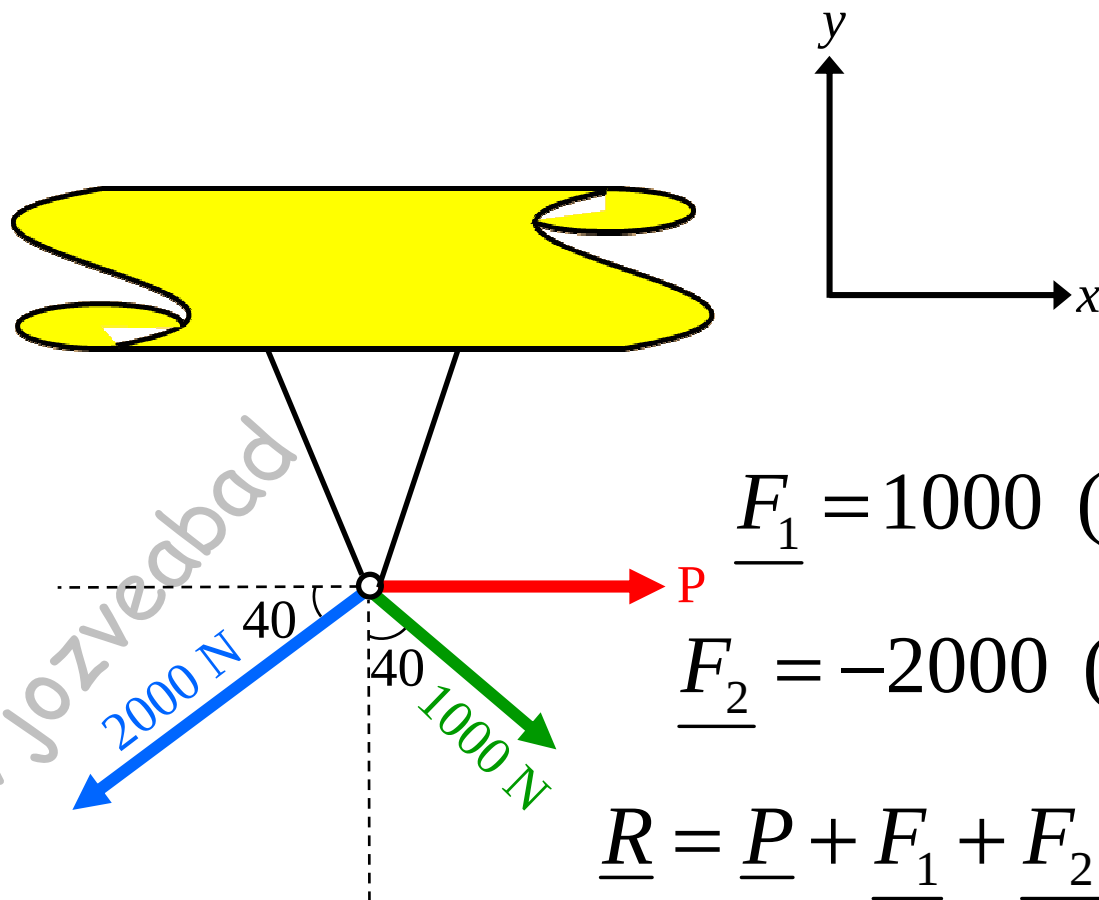
$$h = 5 \sin 60^\circ = 4.3$$

$$\tan \alpha = \frac{h}{x + 3} = \frac{4.3}{5.5}$$

$$\alpha = 38.2^\circ$$

مثال: یک جرثقیل سقفی مطابق شکل تحت تأثیر سه نیرو قرار گرفته است. نیروی P را بنحوی تعیین کنید که برآیند نیروها در امتداد قائم باشد؛

پاسخ:



$$\underline{P} = P \underline{i}$$

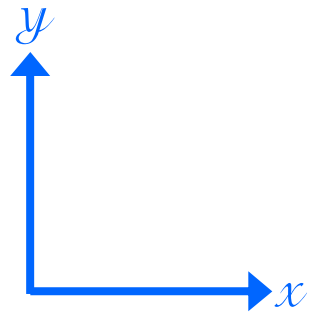
$$\underline{F}_1 = 1000 (\sin 40^\circ \underline{i} - \cos 40^\circ \underline{j})$$

$$\underline{F}_2 = -2000 (\cos 40^\circ \underline{i} + \sin 40^\circ \underline{j})$$

$$\underline{R} = \underline{P} + \underline{F}_1 + \underline{F}_2$$

$$\underline{R} = (P - 889.3)\underline{i} - (2051.62)\underline{j} \Rightarrow \begin{cases} \underline{P} = 889.3 \underline{i} \text{ N} \\ \underline{R} = -2051.62 \underline{j} \text{ N} \end{cases}$$

مثال: به سازه ای مطابق شکل که شامل دو میله AB و AC است، نیروی F در نقطه A اعمال شده است. این نیرو در امتداد اعضای AB و AC سازه چه نیروهایی را ایجاد میکند؟



$$F_{AB} = -313.8 \text{ N}$$

$$F_{AC} = 256.2 \text{ N}$$

$$\underline{F}_1 = F_{AB} (\cos 45 \underline{i} + \sin 45 \underline{j})$$

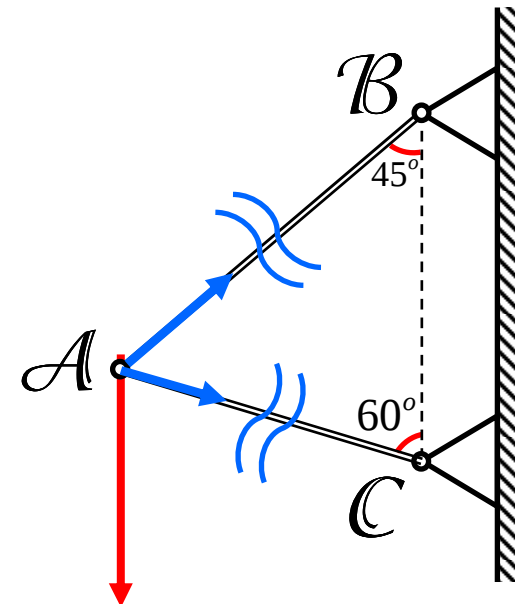
$$\underline{F}_2 = F_{AC} (\cos 30 \underline{i} - \sin 30 \underline{j})$$

$$\underline{F} = -350 \underline{j} \quad \underline{R} = \underline{F}_1 + \underline{F}_2 = \underline{F}$$

$$\underline{R} = (F_{AB} \cos 45 + F_{AC} \cos 30) \underline{i} + (F_{AB} \sin 45 - F_{AC} \sin 30) \underline{j} = -350 \underline{j}$$

$$F_{AB} \cos 45 + F_{AC} \cos 30 = 0 \quad \square \quad F_{AB} \sin 45 - F_{AC} \sin 30 = -350$$

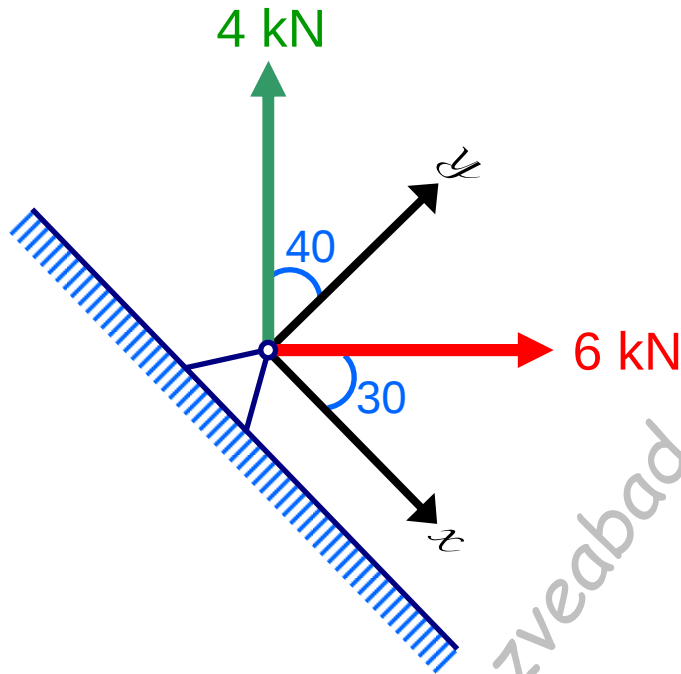
پاسخ:



$$F = 350 \text{ N}$$

مثال: به مفصلی از یک سازه مطابق شکل دو نیرو در امتدادهای نشان داده شده، اعمال شده اند. آن ها را با یک نیرو تعویض نمایید و امتداد نیروی تعویضی را مشخص کنید؛

پاسخ:



$$\underline{F}_1 = 6 (\cos 30 \underline{i} + \sin 30 \underline{j})$$

$$\underline{F}_2 = -4 (\sin 40 \underline{i} - \cos 40 \underline{j})$$

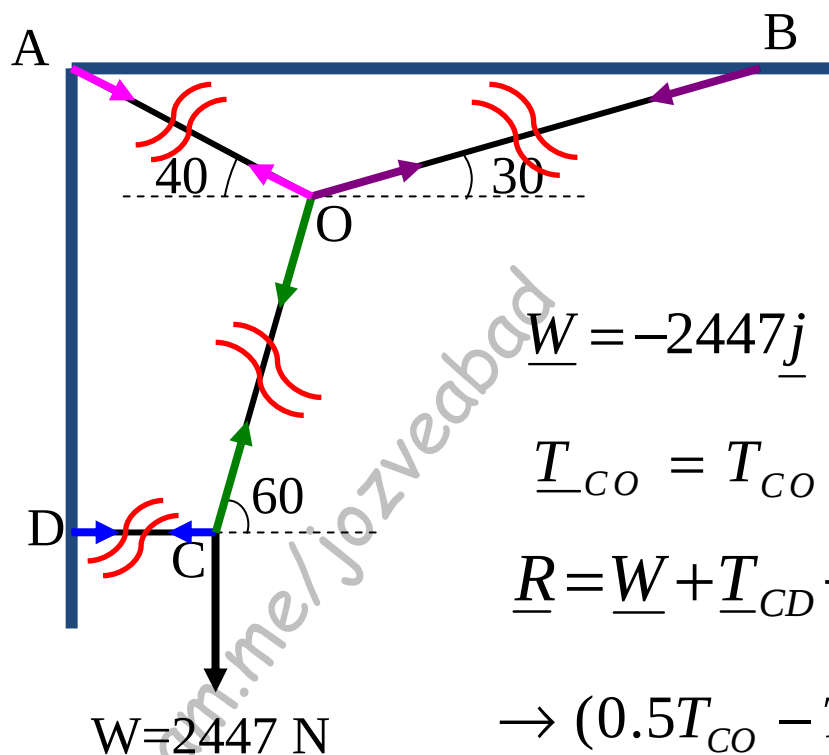
$$\underline{R} = \underline{F}_1 + \underline{F}_2$$

$$\underline{R} = (6 \cos 30 - 4 \sin 40) \underline{i} + (6 \sin 30 + 4 \cos 40) \underline{j}$$

$$\underline{R} = 2.62 \underline{i} + 6.06 \underline{j}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{R_y}{R_x} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{6.06}{2.62} \right) \Rightarrow \theta = 66.6^\circ$$

مثال: به نقطه C از یک سازه مطابق شکل نیروی $\underline{W}$ اعمال شده است. مطلوبست تعیین نیروهای کشش در کابلهای OA, OB, OC, CD



پاسخ:

$$\underline{W} = -2447\underline{j} \quad \underline{T}_{CD} = -T_{CD}\underline{i}$$

$$\underline{T}_{CO} = T_{CO} (\cos 60\underline{i} + \sin 60\underline{j})$$

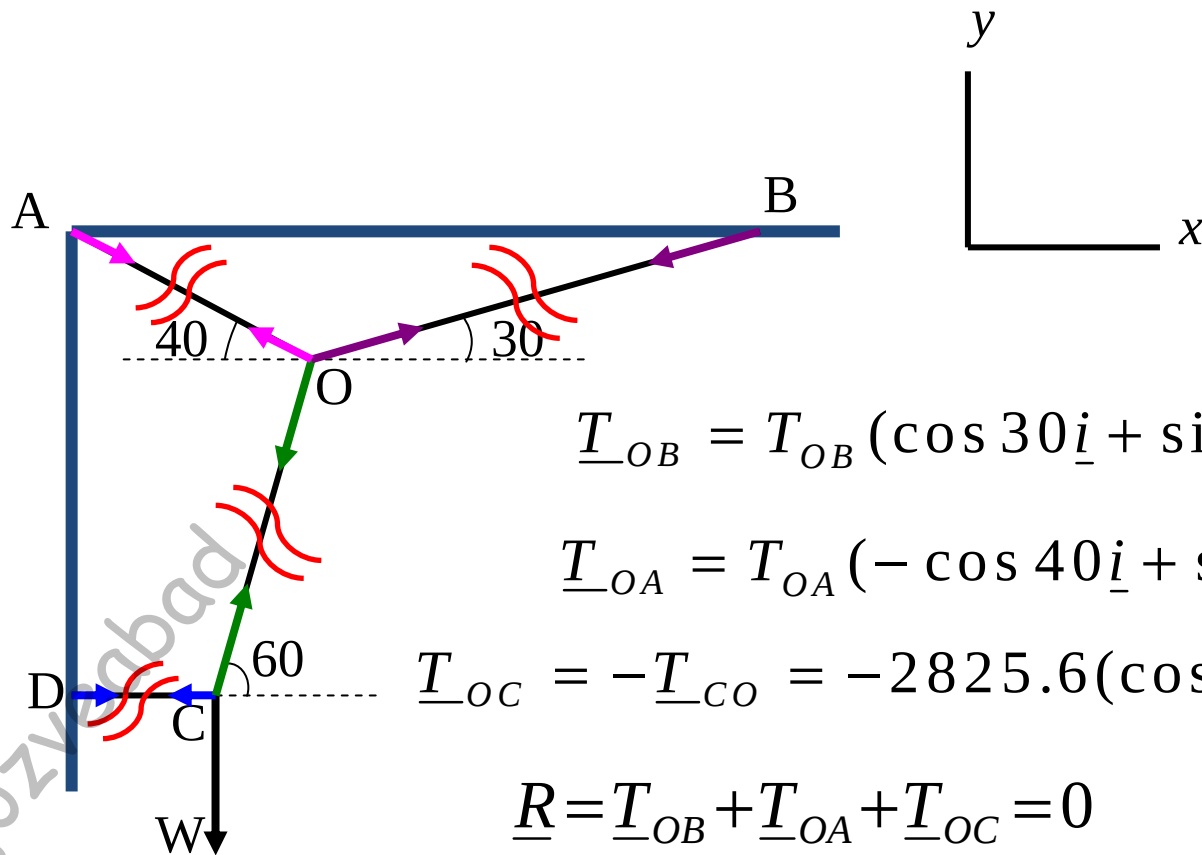
$$\underline{R} = \underline{W} + \underline{T}_{CD} + \underline{T}_{CO} = 0$$

$$\rightarrow (0.5T_{CO} - T_{CD})\underline{i} + (0.866T_{CO} - 2447)\underline{j} = 0$$

$$0.5T_{CO} - T_{CD} = 0 \quad 0.866T_{CO} - 2447 = 0$$

$$T_{CO} = 2825.6\text{ N}$$

$$T_{CD} = 1412.8\text{ N}$$



$$\underline{T}_{OB} = T_{OB} (\cos 30 \underline{i} + \sin 30 \underline{j})$$

$$\underline{T}_{OA} = T_{OA} (-\cos 40 \underline{i} + \sin 40 \underline{j})$$

$$\underline{T}_{OC} = -\underline{T}_{CO} = -2825.6 (\cos 60 \underline{i} + \sin 60 \underline{j})$$

$$\underline{R} = \underline{T}_{OB} + \underline{T}_{OA} + \underline{T}_{OC} = 0$$

$$\rightarrow (0.866T_{OB} - 1412.8 - 0.766T_{OA})\underline{i} + (0.5T_{OB} - 2447 + 0.643T_{OA})\underline{j} = 0$$

$$0.866T_{OB} - 1412.8 - 0.766T_{OA} = 0$$

$$0.5T_{OB} - 2447 + 0.643T_{OA} = 0$$

$$T_{OA} = 1503 \text{ N}$$

$$T_{OB} = 2961 \text{ N}$$

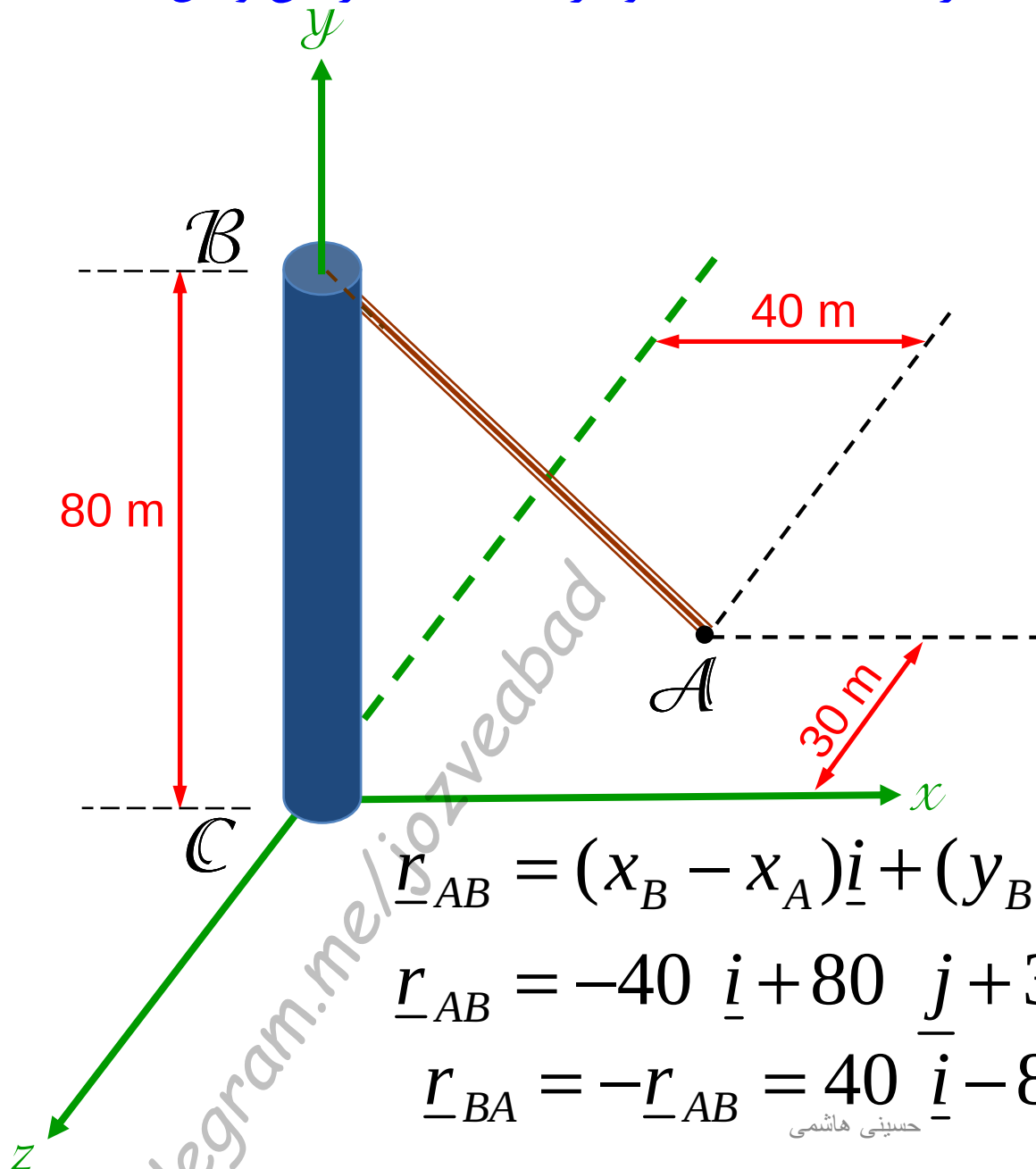
مثال: میله قائم BC بوسیله کابل AB در نقطه B به میله و در نقطه A به زمین وصل شده است. مطلوبست:

الف. بردار وضعیت AB ؛

ب. بردار وضعیت BA ؛

پ. بردار یکه AB .

پاسخ:



$$A(40, 0, -30)$$

$$B(0, 80, 0)$$

$$\underline{r}_{AB} = (x_B - x_A)\underline{i} + (y_B - y_A)\underline{j} + (z_B - z_A)\underline{k}$$

$$\underline{r}_{AB} = -40 \underline{i} + 80 \underline{j} + 30 \underline{k}$$

$$\underline{r}_{BA} = -\underline{r}_{AB} = 40 \underline{i} - 80 \underline{j} - 30 \underline{k}$$

$$\underline{\lambda}_{AB} = \frac{\underline{r}_{AB}}{r_{AB}} = \frac{(x_B - x_A)\underline{i} + (y_B - y_A)\underline{j} + (z_B - z_A)\underline{k}}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}}$$

A(40,0,-30)

B(0,80,0)

$$\underline{r}_{AB} = -40 \underline{i} + 80 \underline{j} + 30 \underline{k}$$

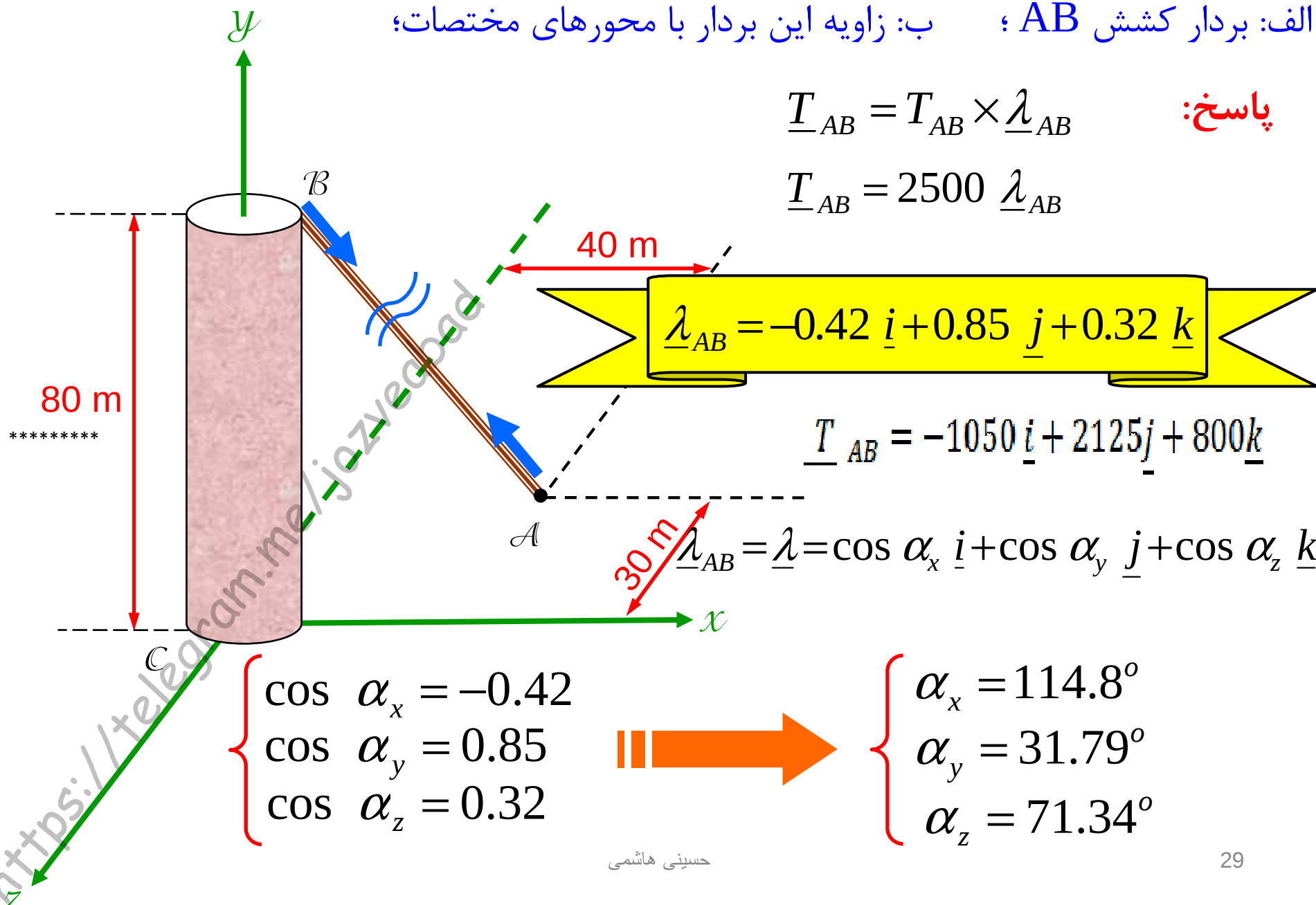
$$\underline{\lambda}_{AB} = \frac{\underline{r}_{AB}}{r_{AB}} = \frac{-40 \underline{i} + 80 \underline{j} + 30 \underline{k}}{\sqrt{(-40)^2 + (80)^2 + (30)^2}} = -0.42 \underline{i} + 0.85 \underline{j} + 0.32 \underline{k}$$

مثال: چنانچه در مثال قبل بزرگی نیروی کشش در کابل برابر 2500 N باشد، مطلوبست:

الف: بردار کشش AB ؛ ب: زاویه این بردار با محورهای مختصات؛

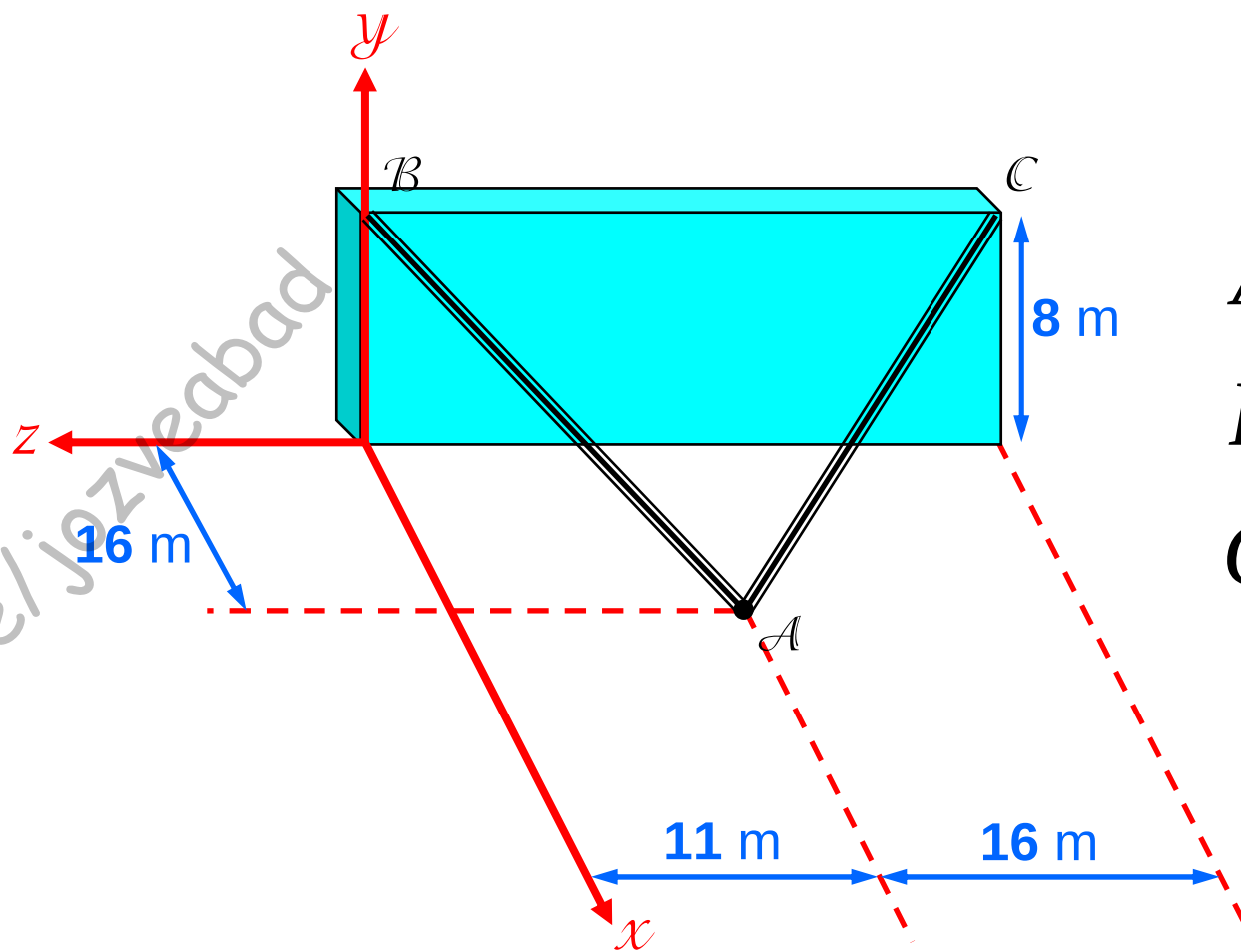
پاسخ: $\underline{T}_{AB} = T_{AB} \times \underline{\lambda}_{AB}$

$$\underline{T}_{AB} = 2500 \underline{\lambda}_{AB}$$



مثال: یک دیوار سیمانی بطور موقت بوسیله کابل های نشان داده شده در شکل نگهداری شده است. کشش در کابل AC برابر 1200 N و در کابل AB برابر 840 N است. مطلوبست: بزرگی و جهت برآیند نیروهای کابل AB و AC در نقطه A

پاسخ:



$$A(16, 0, -11)$$

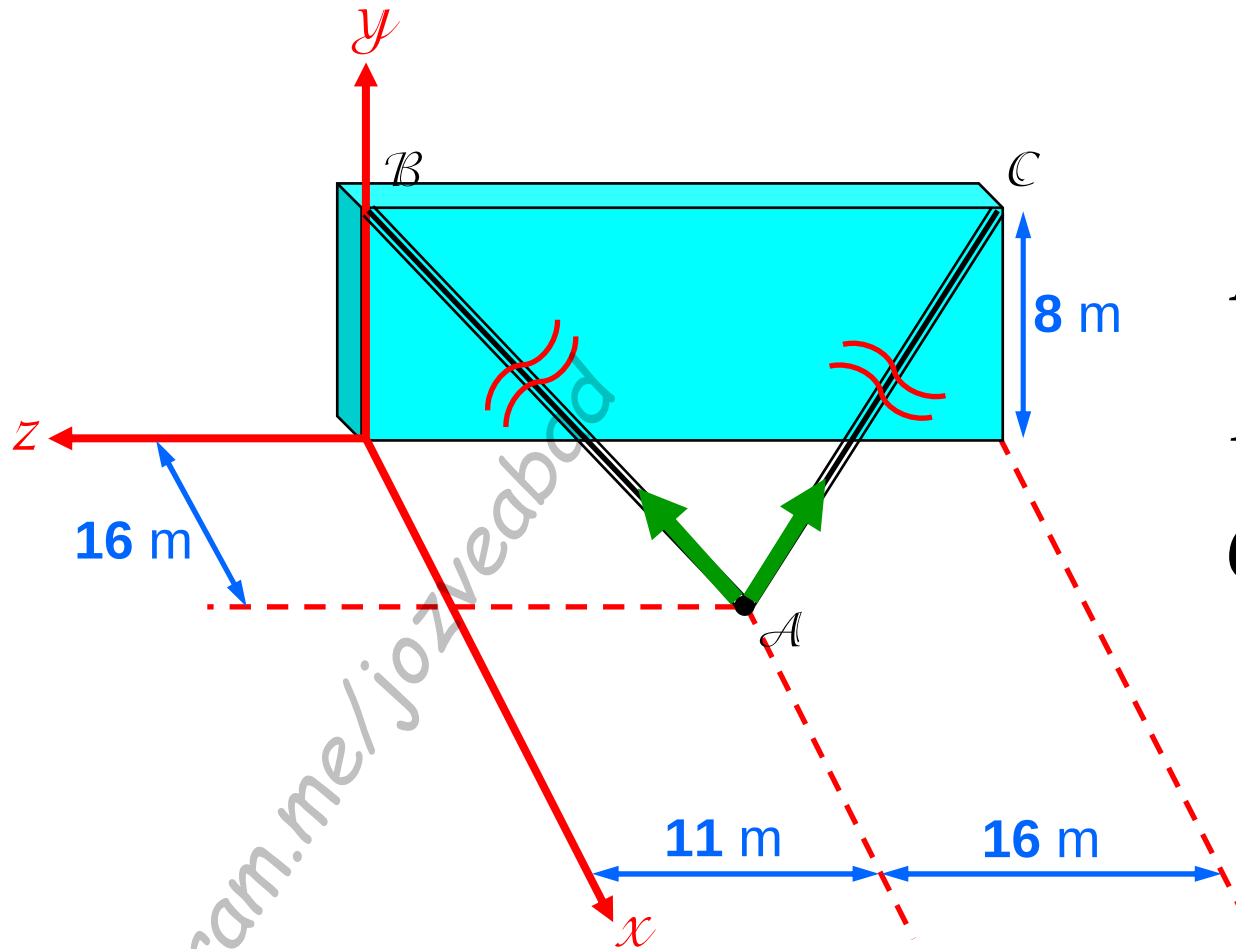
$$B(0, 8, 0)$$

$$C(0, 8, -27)$$

$$\begin{cases} T_{AB} = 840 \text{ N} \\ T_{AC} = 1200 \text{ N} \end{cases}$$

$$\underline{\lambda}_{AB} = \frac{\underline{r}_{AB}}{r_{AB}} = \frac{-16 \underline{i} + 8 \underline{j} + 11 \underline{k}}{\sqrt{(-16)^2 + (8)^2 + (11)^2}} = \frac{-16 \underline{i} + 8 \underline{j} + 11 \underline{k}}{21}$$

$$\underline{\lambda}_{AC} = \frac{\underline{r}_{AC}}{r_{AC}} = \frac{-16 \underline{i} + 8 \underline{j} - 16 \underline{k}}{\sqrt{(-16)^2 + (8)^2 + (-16)^2}} = \frac{-16 \underline{i} + 8 \underline{j} - 16 \underline{k}}{24}$$



$$A(16,0,-11)$$

$$B(0,8,0)$$

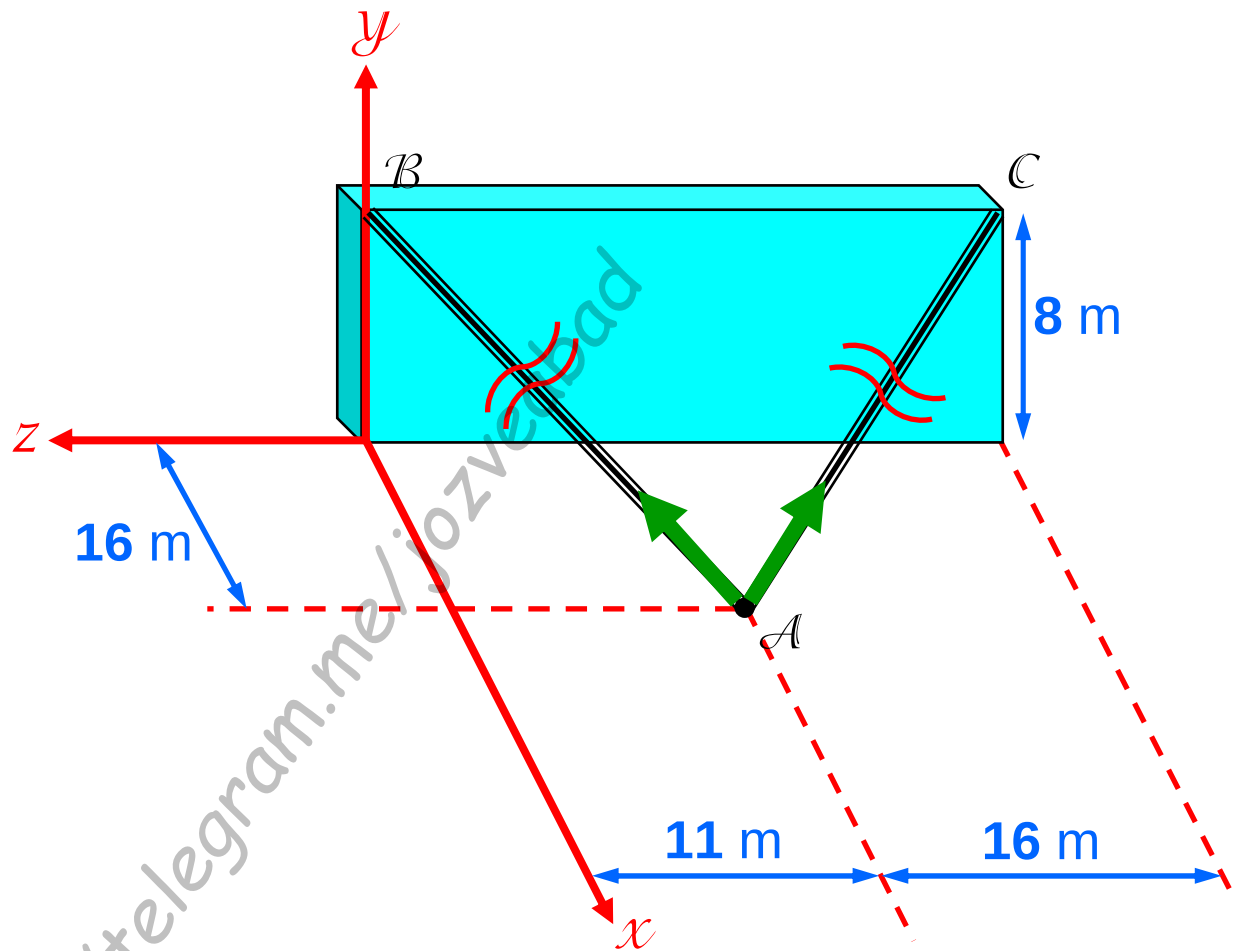
$$C(0,8,-27)$$

$$\begin{cases} T_{AB} = 840 \text{ N} \\ T_{AC} = 1200 \text{ N} \end{cases}$$



$$\underline{T}_{AB} = \underline{\lambda}_{AB} \times T_{AB} = -640 \underline{i} + 320 \underline{j} + 440 \underline{k}$$

$$\underline{T}_{AC} = \underline{\lambda}_{AC} \times T_{AC} = -800 \underline{i} + 400 \underline{j} - 800 \underline{k}$$



$$\underline{T}_{AB} = \underline{\lambda}_{AB} \times T_{AB} = -640 \underline{i} + 320 \underline{j} + 440 \underline{k}$$

$$\underline{T}_{AC} = \underline{\lambda}_{AC} \times T_{AC} = -800 \underline{i} + 400 \underline{j} - 800 \underline{k}$$

$$\underline{R} = -1440 \underline{i} + 720 \underline{j} - 360 \underline{k}$$

$$\underline{R} = \underline{T}_{AB} + \underline{T}_{AC}$$

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2} = 1649.7$$

$$\cos \theta_x = \frac{R_x}{R} = \frac{-1440}{1649.7} = -0.87$$

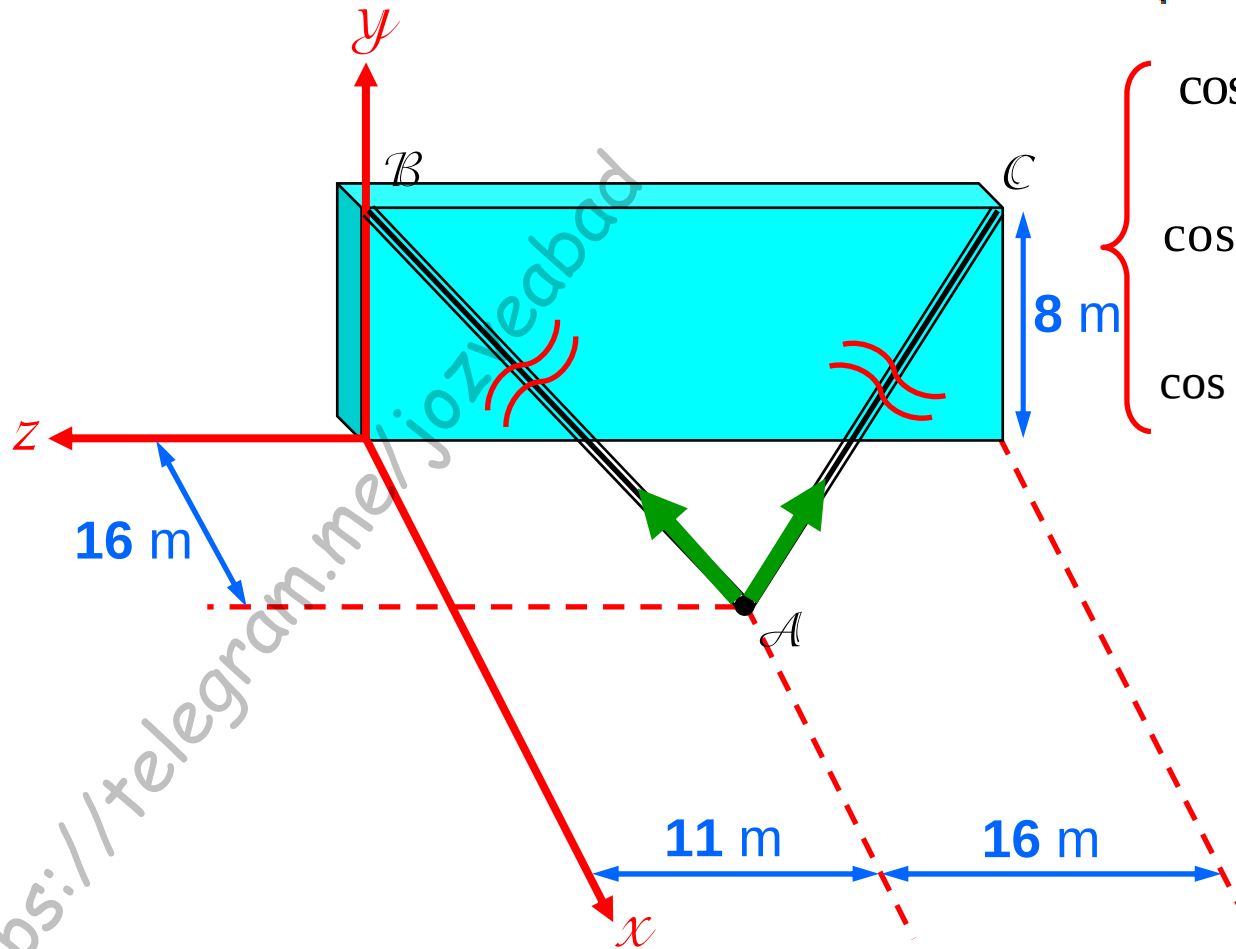
$$\cos \theta_y = \frac{R_y}{R} = \frac{720}{1649.7} = 0.44$$

$$\cos \theta_z = \frac{R_z}{R} = \frac{-360}{1649.7} = -0.22$$

$$\theta_x = 150.5^\circ$$

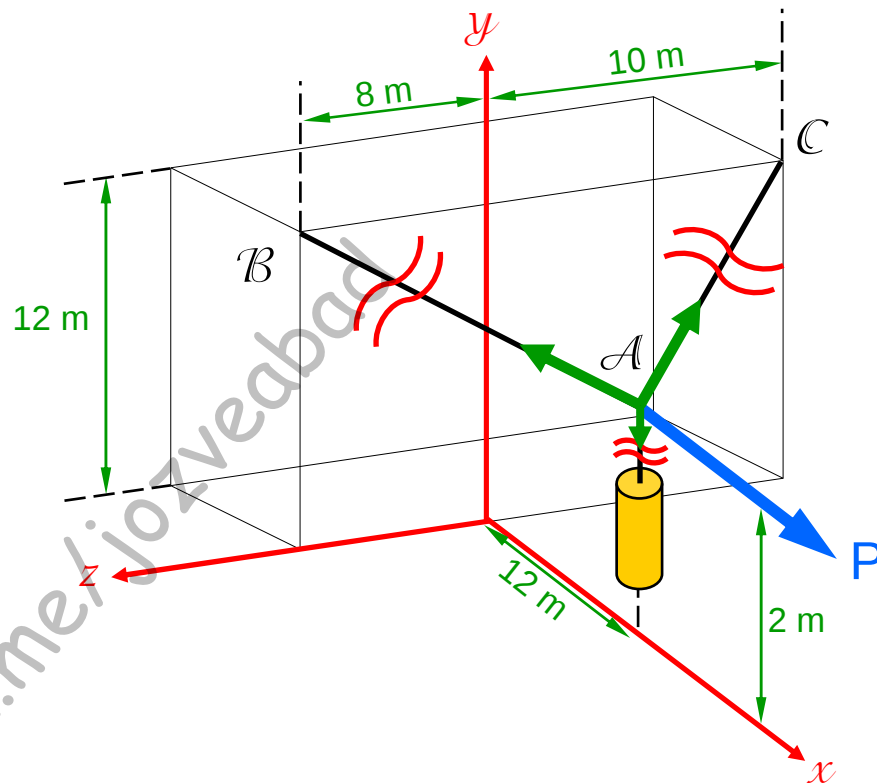
$$\theta_y = 64.1^\circ$$

$$\theta_z = 102.6^\circ$$



مثال: یک وزنه ۲۰۰ کیلوگرمی بوسیله دو کابل AB و AC و نیروی P در وضعیت شکل نگهداری شده است. مطلوبست: محاسبه بزرگی کشش کابل ها و بزرگی نیروی P

پاسخ



$$\underline{P} = P \underline{i}$$

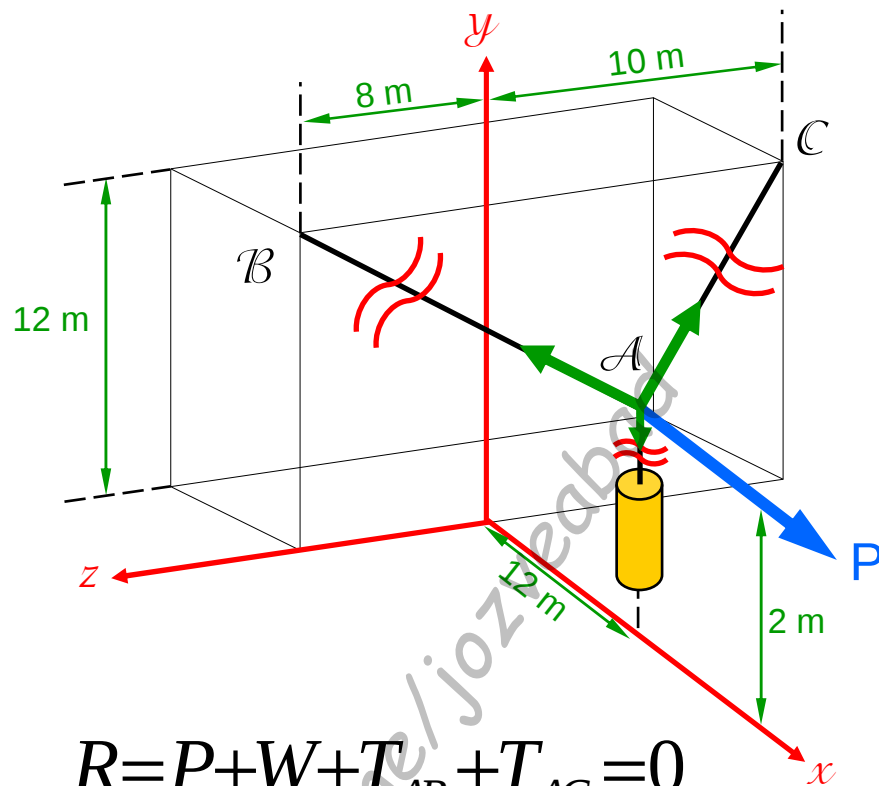
$$\underline{W} = -2000 \underline{j}$$

$$\underline{T}_{AB} = T_{AB} (-0.68 \underline{i} + 0.57 \underline{j} + 0.46 \underline{k})$$

$$A (1 \ 2 \ , \ 2 \ , \ 0)$$

$$C (0 \ , \ 1 \ 2 \ , \ -1 \ 0)$$

$$\underline{T}_{AC} = T_{AC} \times \underline{\lambda}_{AC} = T_{AC} \times \frac{-12 \underline{i} + 10 \underline{j} - 10 \underline{k}}{18.55} = T_{AC} (-0.65 \underline{i} + 0.54 \underline{j} - 0.54 \underline{k})$$



$$\underline{R} = \underline{P} + \underline{W} + \underline{T}_{AB} + \underline{T}_{AC} = 0$$

$$P = 2395.54 \text{ N}$$

$$T_{AB} = 1941.75 \text{ N}$$

$$T_{AC} = 1654.08 \text{ N}$$

$$\underline{P} = P \underline{i}$$

$$\underline{W} = -2000 \underline{j}$$

$$\underline{T}_{AB} = T_{AB} (-0.68 \underline{i} + 0.57 \underline{j} + 0.46 \underline{k})$$

$$\underline{T}_{AC} = T_{AC} (-0.65 \underline{i} + 0.54 \underline{j} - 0.54 \underline{k})$$

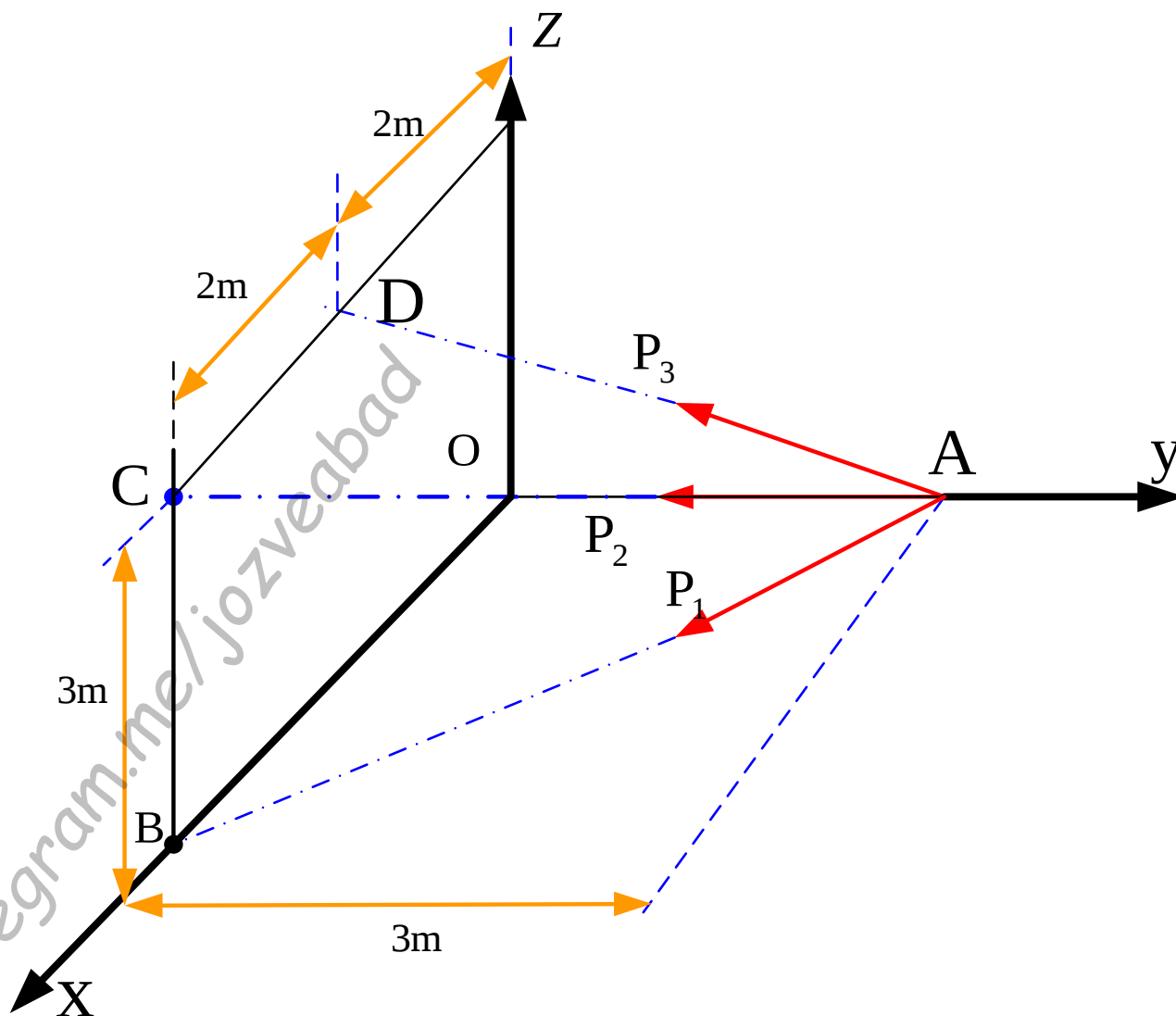
$$0.54 T_{AC} + 0.57 T_{AB} = 2000$$

$$0.46 T_{AB} - 0.54 T_{AC} = 0$$

$$-0.65 T_{AC} - 0.68 T_{AB} + P = 0$$

$$\underline{R} = (-0.65 T_{AC} - 0.68 T_{AB} + P) \underline{i} + (0.54 T_{AC} + 0.57 T_{AB} - 2000) \underline{j} + (0.46 T_{AB} - 0.54 T_{AC}) \underline{k} = 0$$

مثال: مقادیر سه نیروی نشان داده شده در شکل را با توجه به اینکه نیروی برآیند آنها برابر با $\underline{R} = 200\underline{i} - 100\underline{j} + 50\underline{k}$ (kN) باشد تعیین کنید.



A(0,3,0) , B(4,0,0) , C(4,0,3) , D(2,0,3)

پاسخ

$$\underline{\lambda}_{AB} = \frac{\underline{AB}}{AB} = \frac{4\underline{i} - 3\underline{j}}{5} = \frac{1}{5}(4\underline{i} - 3\underline{j})$$

$$\underline{\lambda}_{AC} = \frac{\underline{AC}}{AC} = \frac{4\underline{i} - 3\underline{j} + 3\underline{k}}{\sqrt{34}} = \frac{1}{\sqrt{34}}(4\underline{i} - 3\underline{j} + 3\underline{k})$$

$$\underline{\lambda}_{AD} = \frac{\underline{AD}}{AD} = \frac{2\underline{i} - 3\underline{j} + 3\underline{k}}{\sqrt{22}} = \frac{1}{\sqrt{22}}(2\underline{i} - 3\underline{j} + 3\underline{k})$$

$$\underline{P}_1 = P_1 \underline{\lambda}_{AB} = \frac{P_1}{5}(4\underline{i} - 3\underline{j})$$

$$\underline{P}_2 = P_2 \underline{\lambda}_{AC} = \frac{P_2}{\sqrt{34}}(4\underline{i} - 3\underline{j} + 3\underline{k})$$

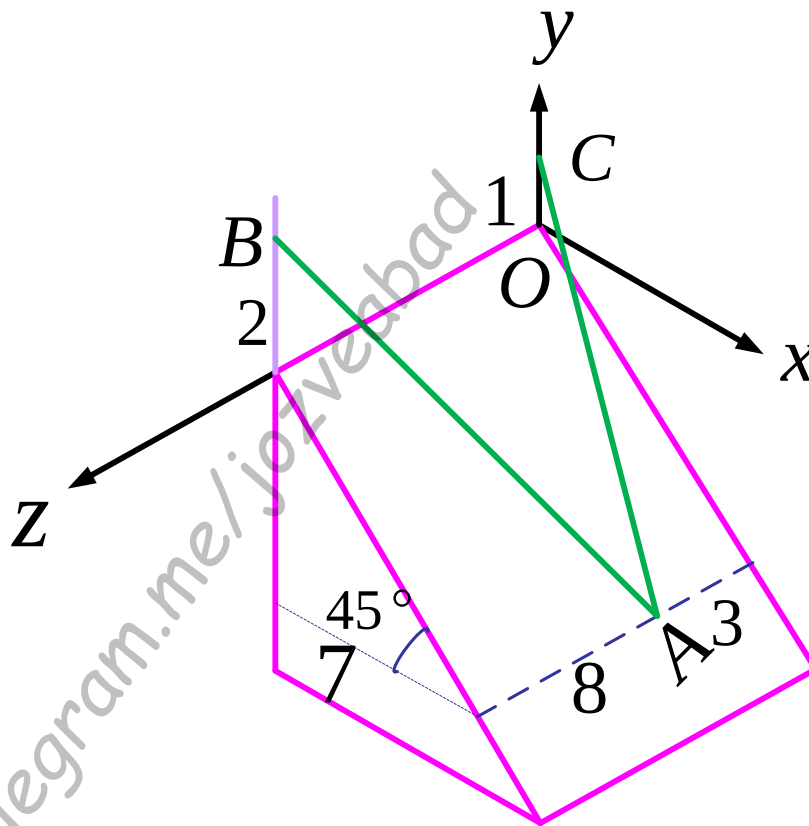
$$\underline{P}_3 = P_3 \underline{\lambda}_{AD} = \frac{P_3}{\sqrt{22}} (2\underline{i} - 3\underline{j} + 3\underline{k})$$

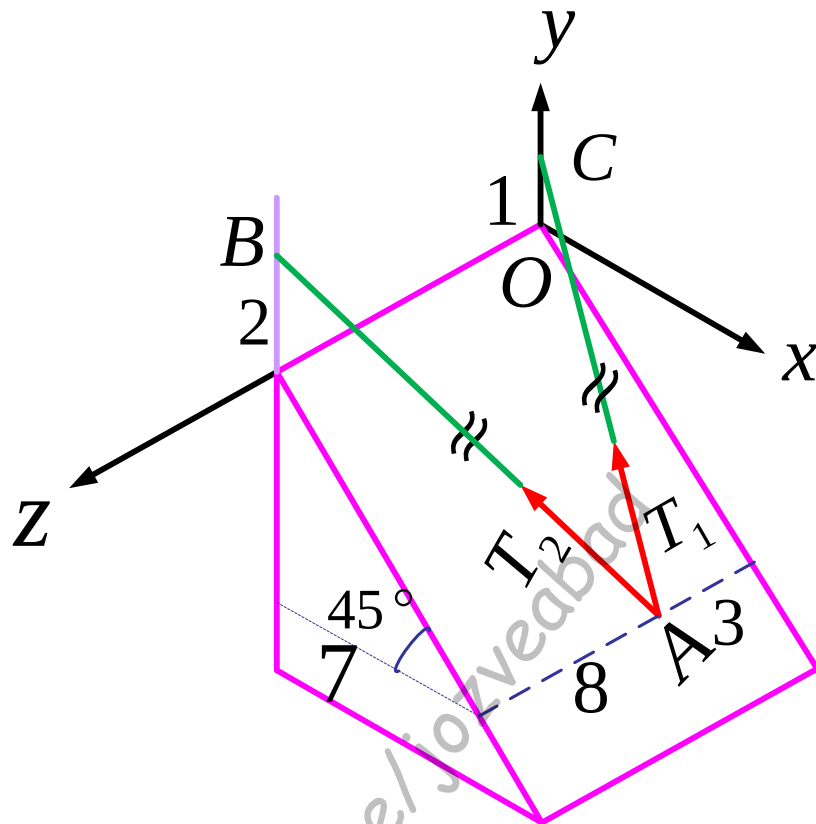
$$\begin{aligned} \underline{R} = \underline{P}_1 + \underline{P}_2 + \underline{P}_3 &= \left(\frac{4}{5} P_1 + \frac{4}{\sqrt{34}} P_2 + \frac{2}{\sqrt{22}} P_3 \right) \underline{i} - \left(\frac{3}{5} P_1 + \frac{3}{\sqrt{34}} P_2 + \frac{3}{\sqrt{22}} P_3 \right) \underline{j} \\ &+ \left(\frac{3}{\sqrt{34}} P_2 + \frac{3}{\sqrt{22}} P_3 \right) \underline{k} = 200\underline{i} - 100\underline{j} + 50\underline{k} \end{aligned}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{2}{5} P_1 + \frac{2}{\sqrt{34}} P_2 + \frac{1}{\sqrt{22}} P_3 = 100 \\ \frac{1}{5} P_1 + \frac{1}{\sqrt{34}} P_2 + \frac{1}{\sqrt{22}} P_3 = \frac{100}{3} \\ \frac{1}{\sqrt{34}} P_2 + \frac{1}{\sqrt{22}} P_3 = \frac{50}{3} \end{array} \right.$$

$$\begin{cases} P_1 = 250 \text{ kN} \\ P_2 = -293.3 \text{ kN} \\ P_3 = 471.86 \text{ kN} \end{cases}$$

مثال: جسمی به وزن 780N بوسیله ی دو ریسمان AC و AB مطابق شکل روی یک سطح صیقلی نگه داشته شده اند. مطلوب است تعیین کشش در ریسمان ها. (واحد ها بر حسب متر هستند).





$$C (0,1,0)$$

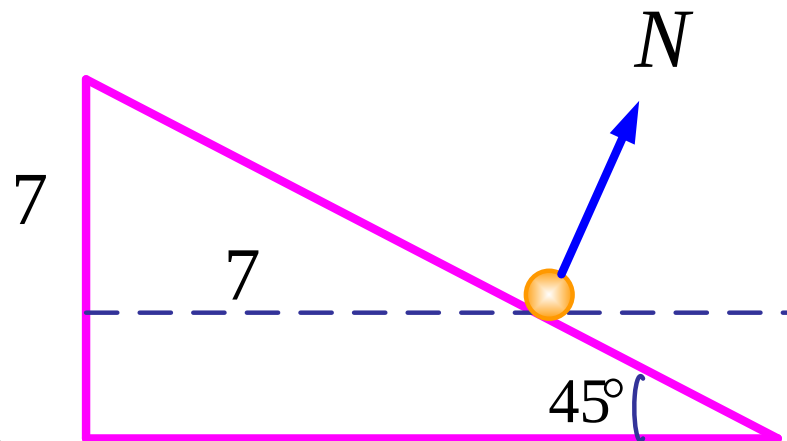
$$B (0,2,11)$$

$$A (7,-7,3)$$

$$w = -780 \underline{j}$$

$$\underline{T}_1 = T_1 \underline{\lambda}_{AC} = T_1 \frac{-7\underline{i} + 8\underline{j} - 3\underline{k}}{\sqrt{49 + 64 + 9}} = T_1 (-0.63\underline{i} + 0.72\underline{j} - 0.27\underline{k})$$

$$\underline{T}_2 = T_2 \underline{\lambda}_{AB} = T_2 \frac{-7\underline{i} + 9\underline{j} + 2\underline{k}}{\sqrt{49 + 81 + 64}} = T_2 (-0.5\underline{i} + 0.63\underline{j} + 0.56\underline{k})$$



$$\underline{N} = N \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \underline{i} + \frac{\sqrt{2}}{2} \underline{j} \right)$$

$$\sum \underline{F} = \underline{T}_1 + \underline{T}_2 + \underline{w} + \underline{N} = 0$$

$$0.63T_1 - 0.5T_2 + N \frac{\sqrt{2}}{2} = 0$$

$$0.72T_1 + 0.63T_2 + N \frac{\sqrt{2}}{2} - 780 = 0$$

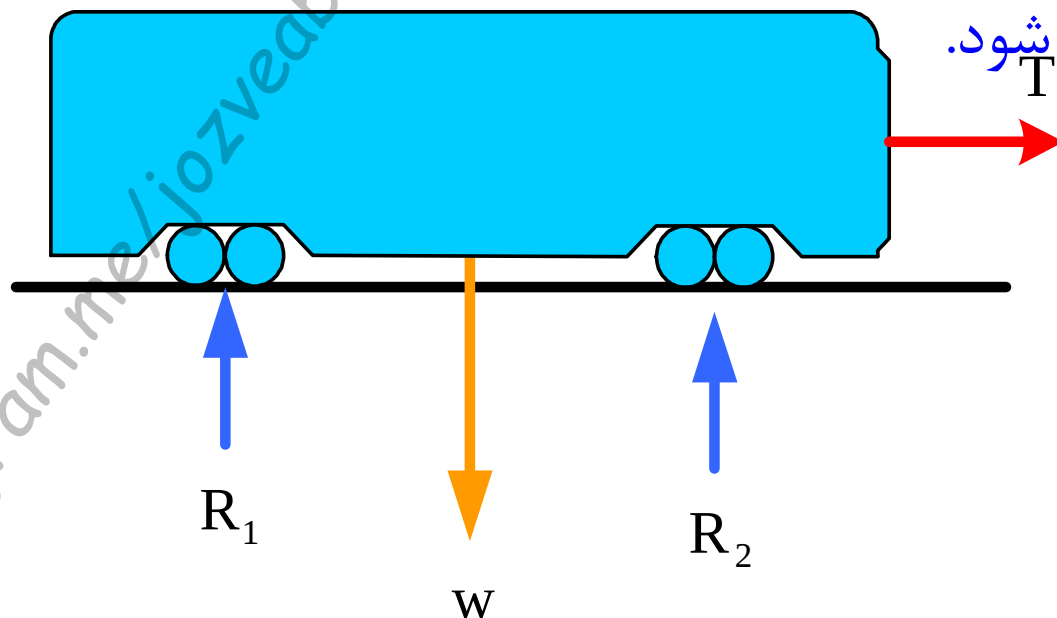
$$-0.7T_1 + 0.56T_2 = 0$$

$$T_1 = 411.5 \text{ N} \quad T_2 = 198.8 \text{ N} \quad N = 504.93 \text{ N}$$

۲- نیرو، گشتاور و زوج نیرو

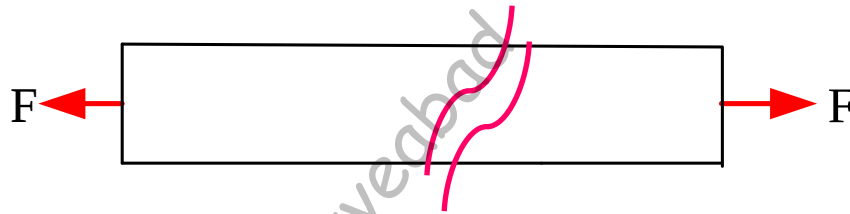
نیروهای خارجی و داخلی:

نیروهای خارجی، نیروهایی هستند که از طرف اجسام دیگر بر جسم صلب وارد می شوند و سبب رفتار خارجی جسم می شوند به عبارت دیگر یا عامل به حرکت درآوردن جسم اند یا عامل به سکون درآوردن آن. بعنوان مثال یک خودرو را در نظر بگیرید که در امتداد افقی به وسیله کابلی توسط افرادی کشیده شود.

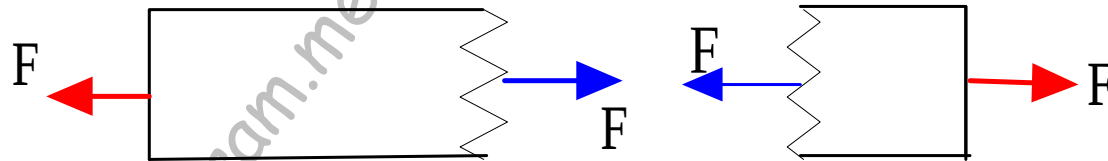


نیروهای داخلی نیروهایی هستند که سبب می شوند اجزاء تشکیل دهنده جسم صلب در جوار یکدیگر باقی بمانند و از هم جدا نشوند.

بعنوان مثال یک میله را در نظر بگیرید و فرض کنید که میله در دو انتها تحت تاثیر دو نیروی مساوی و مختلف الجهت قرار گرفته باشد.



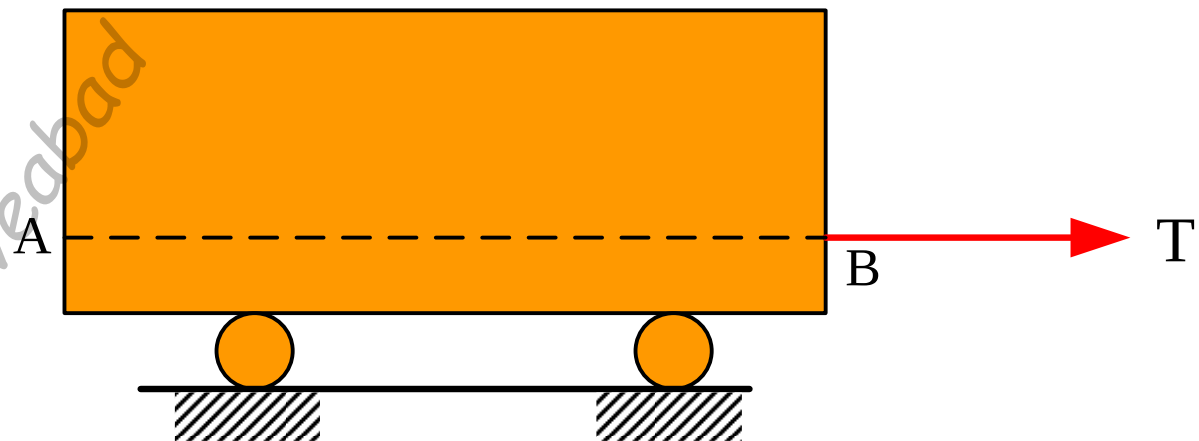
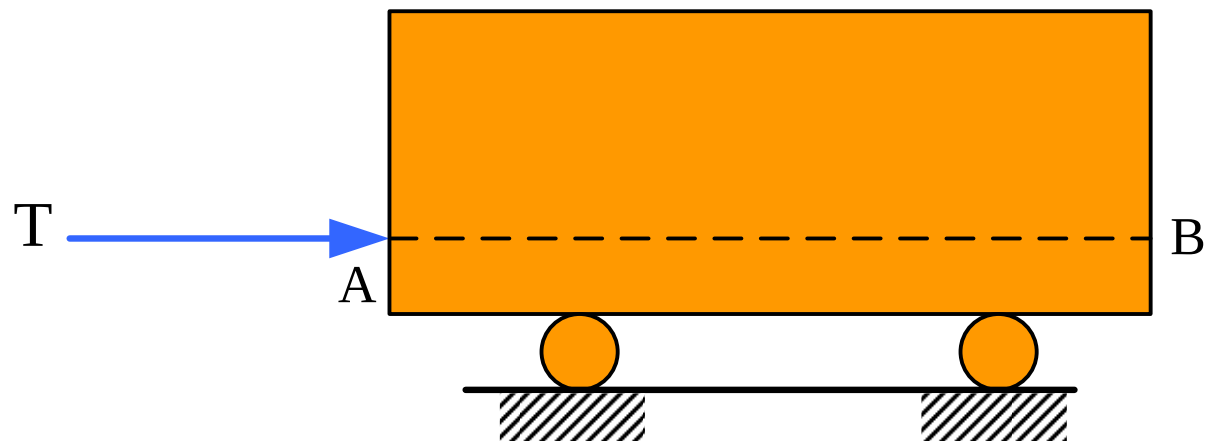
F های با رنگ آبی نیروهای داخلی اند.

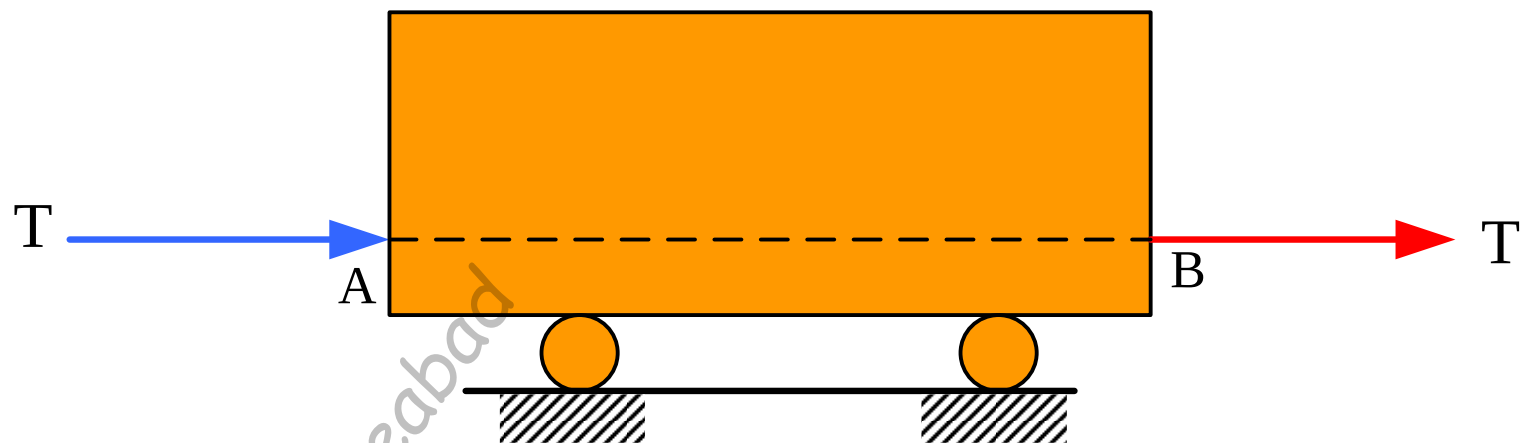


اصل قابلیت انتقال نیرو:

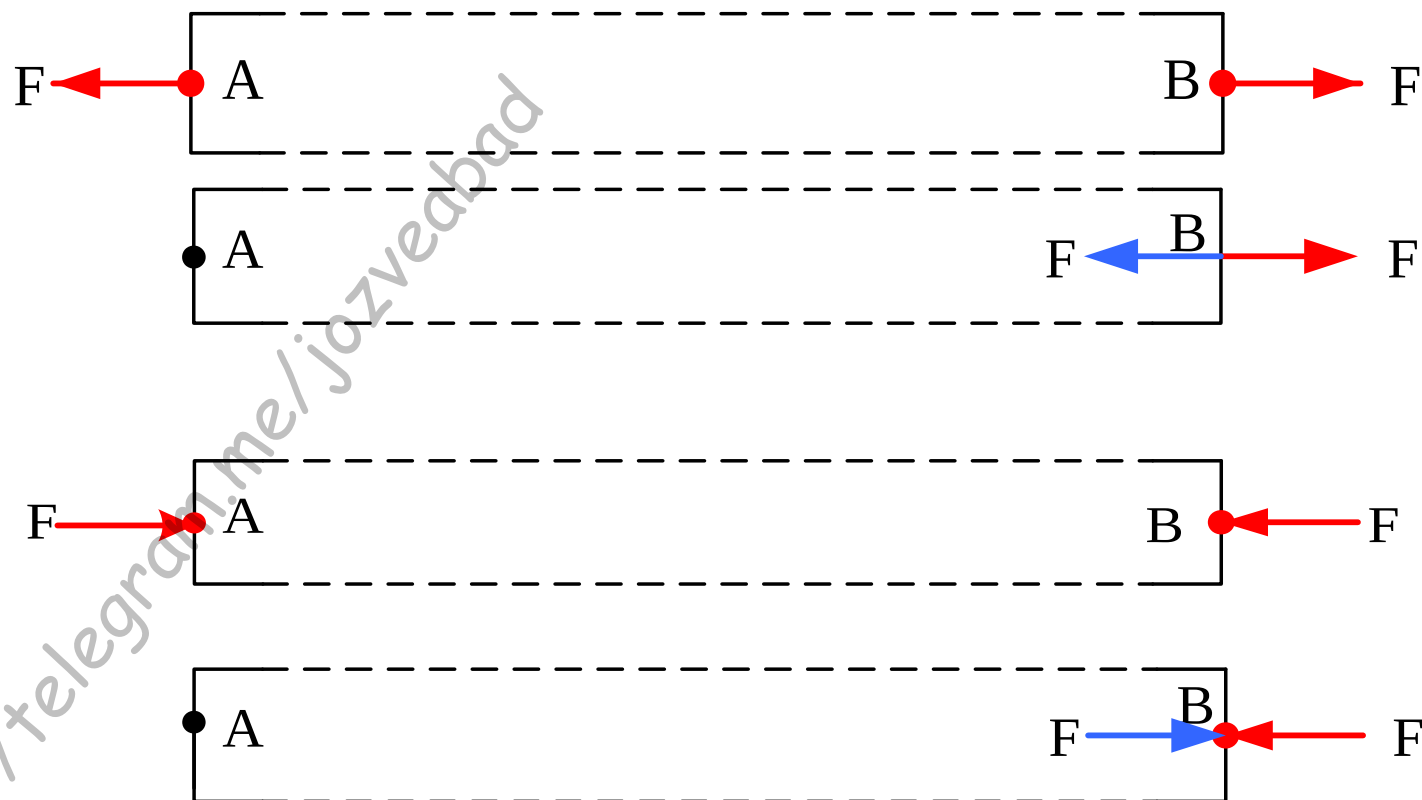
شرایط تعادل یا حرکت جسم صلب بدون تغییر خواهد ماند، چنانچه نیرویی را که به نقطه ای از جسم اثر می کند با یک نیرو در نقطه ای دیگر که مساوی و هم جهت با نیروی اولیه باشد تعویض کنیم. مشروط بر آن که امتداد نیروی تعویضی (خط اثر نیروی تعویضی) همان خط اثر نیروی اولیه باشد.

gram.me/jozveabad



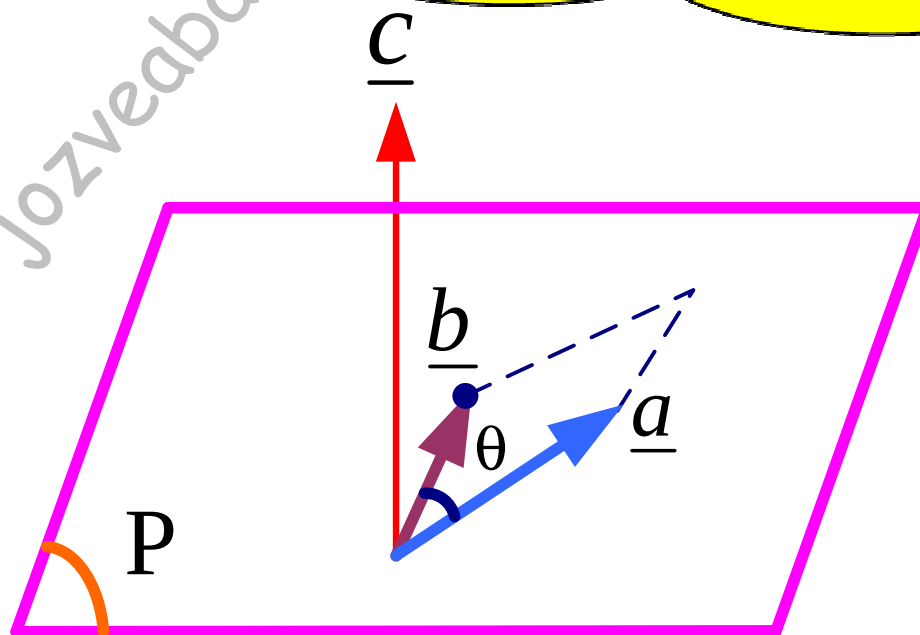


اصل قابلیت انتقال نیرو فقط برای مطالعه رفتار خارجی اجسام کاملاً درست است.



ضرب برداری دو بردار

طبق تعریف، ضرب برداری دو بردار یک بردار است.



b = بردار مؤخر

a = بردار مقدم

$$\underline{c} = \underline{a} \times \underline{b}$$

$$c = ab \sin \theta$$

مساحت متوازی الاضلاعی که روی دوبردار بنا شود.
امتداد عمود بر صفحه دو بردار $\underline{a}, \underline{b}$ به عبارت دیگر یعنی صفحه P

جهت بردار C به وسیله قانون دست راست تعیین می شود.

$$\underline{a} = a_x \underline{i} + a_y \underline{j} + a_z \underline{k}$$

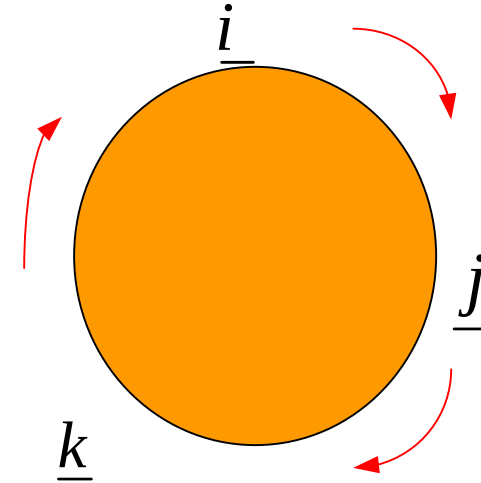
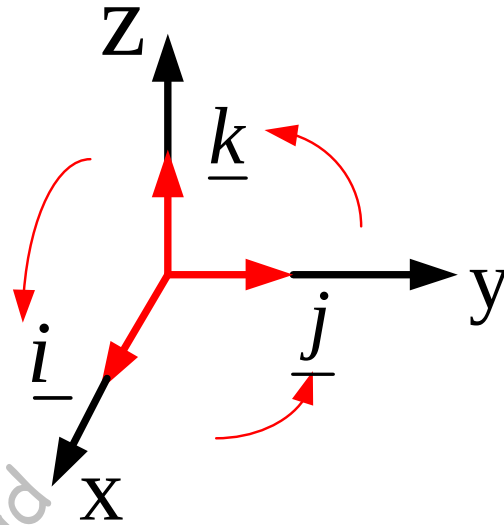
$$\underline{b} = b_x \underline{i} + b_y \underline{j} + b_z \underline{k}$$

$$\begin{aligned} \underline{c} = \underline{a} \times \underline{b} &= (a_x \underline{i} + a_y \underline{j} + a_z \underline{k}) \times (b_x \underline{i} + b_y \underline{j} + b_z \underline{k}) \\ &= a_x b_x (\underline{i} \times \underline{i}) + a_x b_y (\underline{i} \times \underline{j}) + a_x b_z (\underline{i} \times \underline{k}) + a_y b_x (\underline{j} \times \underline{i}) \\ &\quad + a_y b_y (\underline{j} \times \underline{j}) + a_y b_z (\underline{j} \times \underline{k}) + a_z b_x (\underline{k} \times \underline{i}) + a_z b_y (\underline{k} \times \underline{j}) \\ &\quad + a_z b_z (\underline{k} \times \underline{k}) \end{aligned}$$

$$\underline{i} \times \underline{j} = \underline{k}$$

$$\underline{j} \times \underline{k} = \underline{i}$$

$$\underline{k} \times \underline{i} = \underline{j}$$

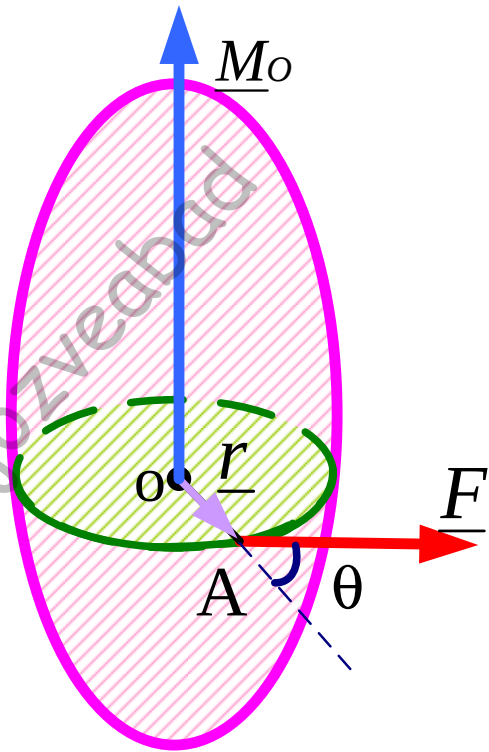


$$\begin{aligned} \underline{c} &= a_x b_y \underline{k} - a_x b_z \underline{j} - a_y b_x \underline{k} + a_y b_z \underline{i} + a_z b_x \underline{j} - a_z b_y \underline{i} \\ &= (a_y b_z - a_z b_y) \underline{i} + (a_z b_x - a_x b_z) \underline{j} + (a_x b_y - a_y b_x) \underline{k} \end{aligned}$$

$$= \begin{vmatrix} \underline{i} & \underline{j} & \underline{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix}$$

گشتاور حول یک نقطه

$\underline{r}$ بردار وضعیت است. از مبدأ به نقطه اثر نیروی $\underline{F}$ وصل شده است. ترتیب بردارها مهم است.



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

$$\begin{cases} \underline{r} = x\underline{i} + y\underline{j} + z\underline{k} \\ \underline{F} = F_x\underline{i} + F_y\underline{j} + F_z\underline{k} \end{cases}$$

$$M_O = rF \sin \theta$$

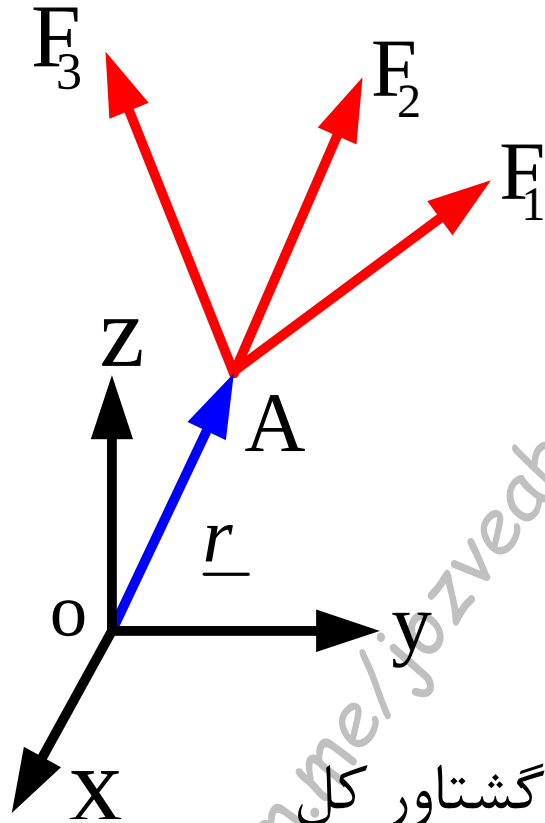
$$\underline{M}_O = \underline{r} \times \underline{F} = \begin{vmatrix} \underline{i} & \underline{j} & \underline{k} \\ x & y & z \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} = (yF_z - zF_y) \underline{i} - (xF_z - zF_x) \underline{j} + (xF_y - yF_x) \underline{k}$$

$$= M_{O_x} \underline{i} + M_{O_y} \underline{j} + M_{O_z} \underline{k}$$

$$\begin{cases} M_{O_x} = yF_z - zF_y \\ M_{O_y} = zF_x - xF_z \\ M_{O_z} = xF_y - yF_x \end{cases}$$

قضیه ورینون (Varignon)

یک نقطه از جسم صلب مثل نقطه A را در نظر می گیریم که به آن انواع نیروها وارد شده باشند.



$$\underline{M}_1 O = \underline{r} \times \underline{F}_1$$

$$\underline{M}_2 O = \underline{r} \times \underline{F}_2$$

$$\underline{M}_3 O = \underline{r} \times \underline{F}_3$$

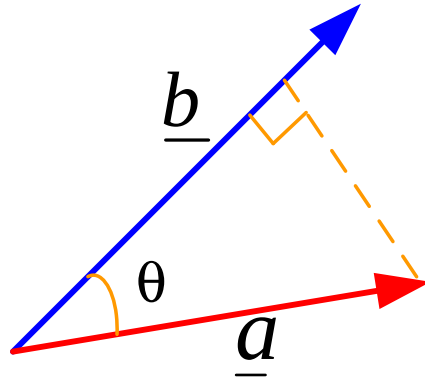
گشتاور کل: $\underline{M}_O = \underline{M}_1 O + \underline{M}_2 O + \underline{M}_3 O + \dots$

$$= \underline{r} \times (\underline{F}_1 + \underline{F}_2 + \underline{F}_3 + \dots) = \underline{r} \times \underline{R}$$

گشتاور برایندنیروهای متقارب حول یک نقطه
برابر است بامجموع برداری گشتاورهای حاصل
از هر یک از نیروها حول آن نقطه.

<https://telegram.me/jozveabad>

ضرب اسکالر دو بردار



$$\underline{a} \cdot \underline{b} = ab \cos \theta$$

$$\begin{cases} \underline{a} = a_x \underline{i} + a_y \underline{j} + a_z \underline{k} \\ \underline{b} = b_x \underline{i} + b_y \underline{j} + b_z \underline{k} \end{cases}$$

$$\underline{a} \cdot \underline{b} = (a_x \underline{i} + a_y \underline{j} + a_z \underline{k}) \cdot (b_x \underline{i} + b_y \underline{j} + b_z \underline{k})$$

$$= a_x b_x (\underline{i} \cdot \underline{i}) + a_x b_y (\underline{i} \cdot \underline{j}) + a_x b_z (\underline{i} \cdot \underline{k}) + a_y b_x (\underline{j} \cdot \underline{i}) + a_y b_y (\underline{j} \cdot \underline{j})$$

$$+ a_y b_z (\underline{j} \cdot \underline{k}) + a_z b_x (\underline{k} \cdot \underline{i}) + a_z b_y (\underline{k} \cdot \underline{j}) + a_z b_z (\underline{k} \cdot \underline{k})$$

$$= a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z = ab \cos \theta$$

کاربرد یک: تعیین زاویه ما بین دو بردار در فضا

$$\cos \theta = \frac{a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z}{ab}$$

کاربرد دو: تعیین تصویر یا مولفه یک بردار در امتداد یک بردار دیگر

$$\underline{a} \cdot \underline{b} = ab \cos \theta$$

تصویر یا مولفه a در امتداد b است

$$a \cos \theta$$

$$\frac{\underline{\underline{a.b}}}{\underline{\underline{b}}} = \underline{\underline{a}} \cdot \left(\frac{\underline{\underline{b}}}{\underline{\underline{b}}} \right) = \underline{\underline{a.\lambda}}$$

تصویر یا مولفه بردار a در امتداد b

$\underline{\underline{\lambda}}$: بردار یکه در امتداد بردار $\underline{\underline{b}}$

ضرب مختلط سه بردار

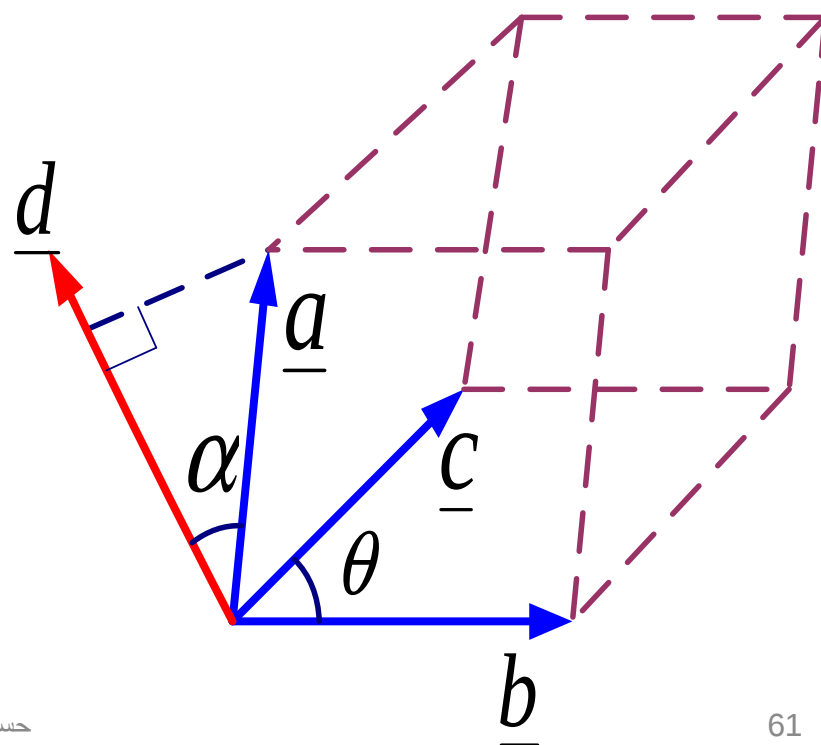
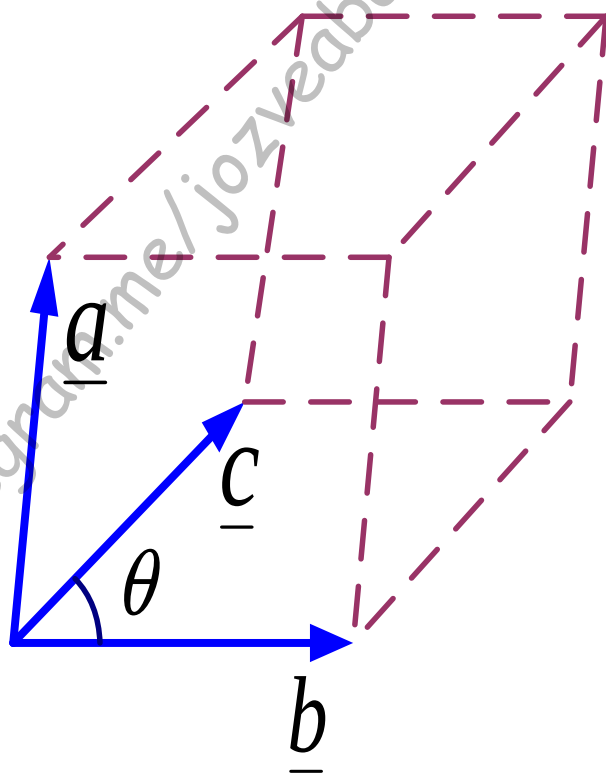
$$\underline{a} \cdot (\underline{b} \times \underline{c})$$

یک کمیت اسکالر

$$\underline{d} = \underline{b} \times \underline{c}$$

$$d = bc \sin \theta$$

$$\underline{a} \cdot (\underline{b} \times \underline{c}) = \underline{a} \cdot \underline{d} = ad \cos \alpha = abc \sin \theta \cos \alpha$$



$$\underline{a} \cdot (\underline{b} \times \underline{c}) = abc \sin \theta \cos \alpha$$

حجم متوازی السطوحی که روی سه بردار

$\underline{a}, \underline{b}, \underline{c}$ بنا می شود.

gram.me/jozveabad

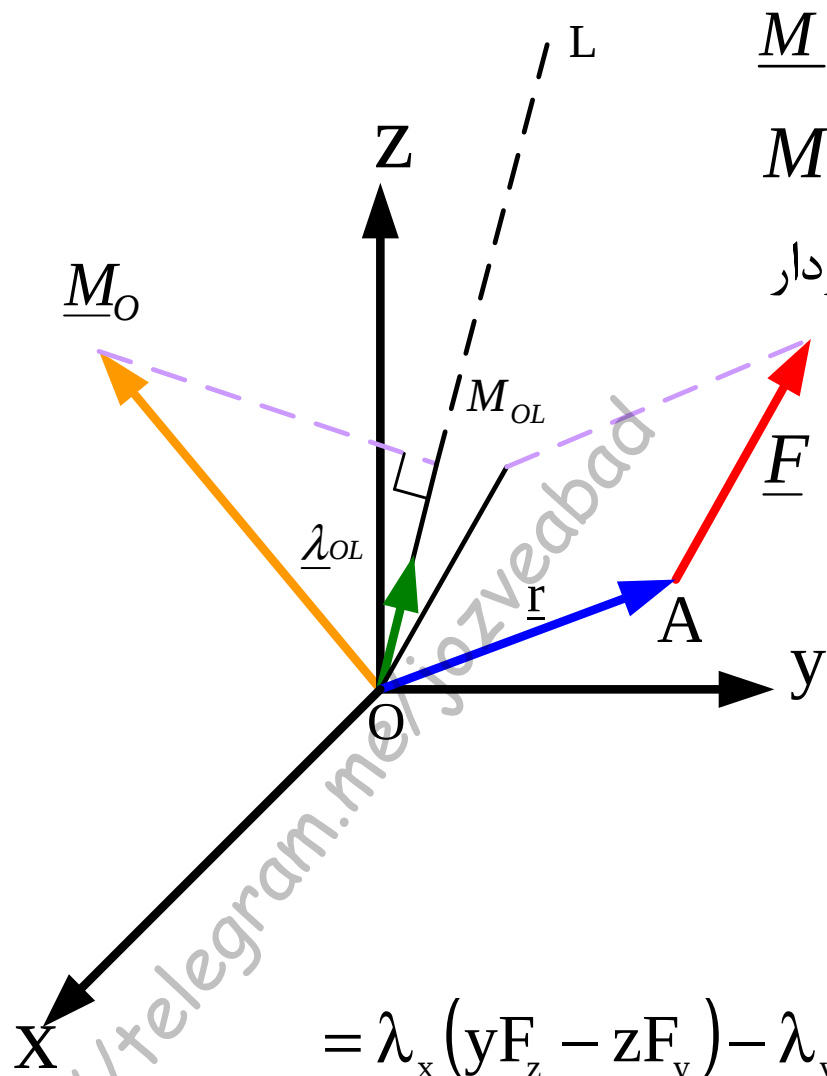
$$\begin{cases} \underline{a} = a_x \underline{i} + a_y \underline{j} + a_z \underline{k} \\ \underline{b} = b_x \underline{i} + b_y \underline{j} + b_z \underline{k} \\ \underline{c} = c_x \underline{i} + c_y \underline{j} + c_z \underline{k} \end{cases}$$

$$\underline{b} \times \underline{c} = \begin{vmatrix} \underline{i} & \underline{j} & \underline{k} \\ b_x & b_y & b_z \\ c_x & c_y & c_z \end{vmatrix} = (b_y c_z - c_y b_z) \underline{i} - (b_x c_z - c_x b_z) \underline{j} + (b_x c_y - c_x b_y) \underline{k} = \underline{d}$$

$$\begin{aligned}
 \underline{a} \cdot \underline{d} &= \underline{a} \cdot (\underline{b} \times \underline{c}) = (a_x \underline{i} + a_y \underline{j} + a_z \underline{k}) [(b_y c_z - c_y b_z) \underline{i} \\
 &\quad - (b_x c_z - c_x b_z) \underline{j} + (b_x c_y - c_x b_y) \underline{k}] \\
 &= a_x (b_y c_z - c_y b_z) + a_y (c_x b_z - c_z b_x) + a_z (b_x c_y - c_x b_y)
 \end{aligned}$$

$$= \begin{vmatrix} a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \\ c_x & c_y & c_z \end{vmatrix}$$

گشتاور حول یک محور



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

$$M_{OL} = \underline{\lambda}_{OL} \cdot (\underline{M}_O) = \underline{\lambda}_{OL} \cdot (\underline{r} \times \underline{F})$$

حجم متوازی السطوحی است که روی سه بردار

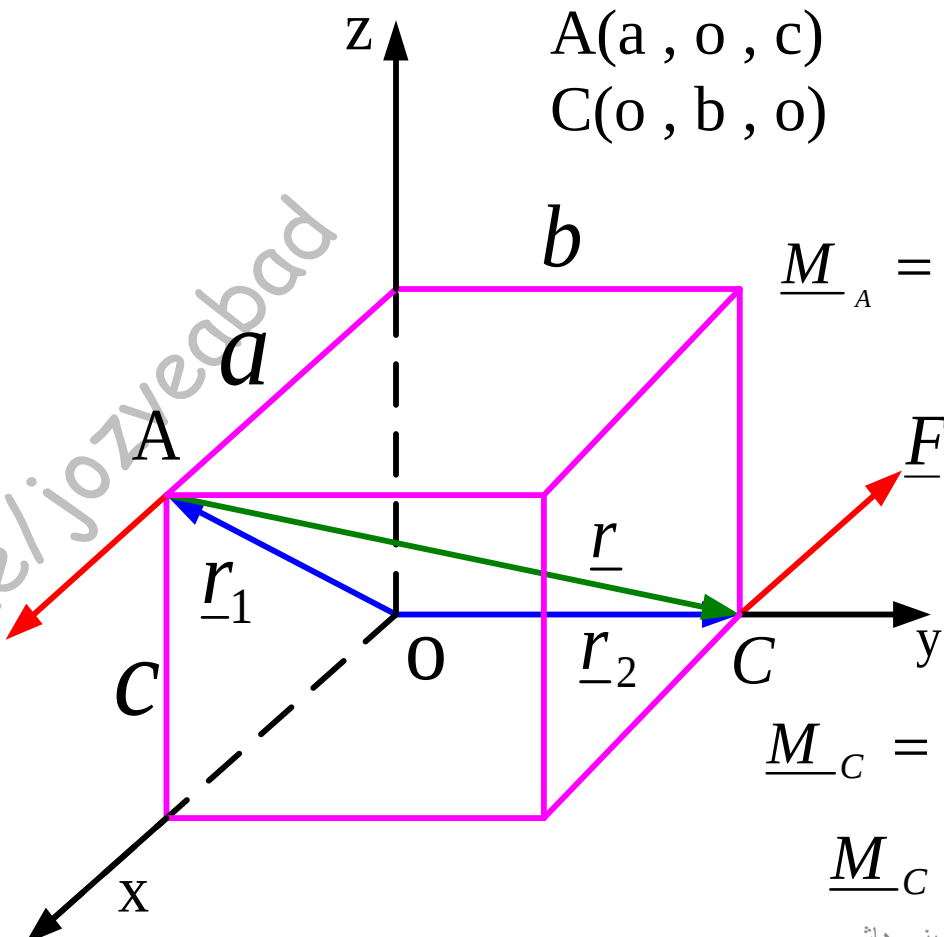
$\underline{F}, \underline{r}, \underline{\lambda}_{OL}$ بنامی شود

$$M_{OL} = \underline{\lambda}_{OL} \cdot (\underline{r} \times \underline{F}) = \begin{vmatrix} \lambda_x & \lambda_y & \lambda_z \\ x & y & z \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix}$$

$$= \lambda_x (yF_z - zF_y) - \lambda_y (xF_z - zF_x) + \lambda_z (xF_y - yF_x)$$

زوج نیرو (Force Couple) و گشتاور زوج نیرو

دو نیرو با اندازه های یکسان و راستاهای موازی را که مخالف جهت هم به دو نقطه از جسمی وارد شوند زوج نیرو میگویند.



$A(a, 0, c)$
 $C(0, b, 0)$

$\underline{r} = -a\underline{i} + b\underline{j} - c\underline{k}$
 $\underline{F})_C = -F\underline{i}$
 $\underline{M}_A = \underline{r} \times \underline{F})_C = (-a\underline{i} + b\underline{j} - c\underline{k}) \times (-F\underline{i})$
 $= F(c\underline{j} + b\underline{k})$
 $\underline{r}^* = -\underline{r} = a\underline{i} - b\underline{j} + c\underline{k}$
 $\underline{F})_A = F\underline{i}$
 $\underline{M}_C = \underline{r}^* \times \underline{F})_A = (a\underline{i} - b\underline{j} + c\underline{k}) \times F\underline{i}$
 $\underline{M}_C = F(c\underline{j} + b\underline{k})$

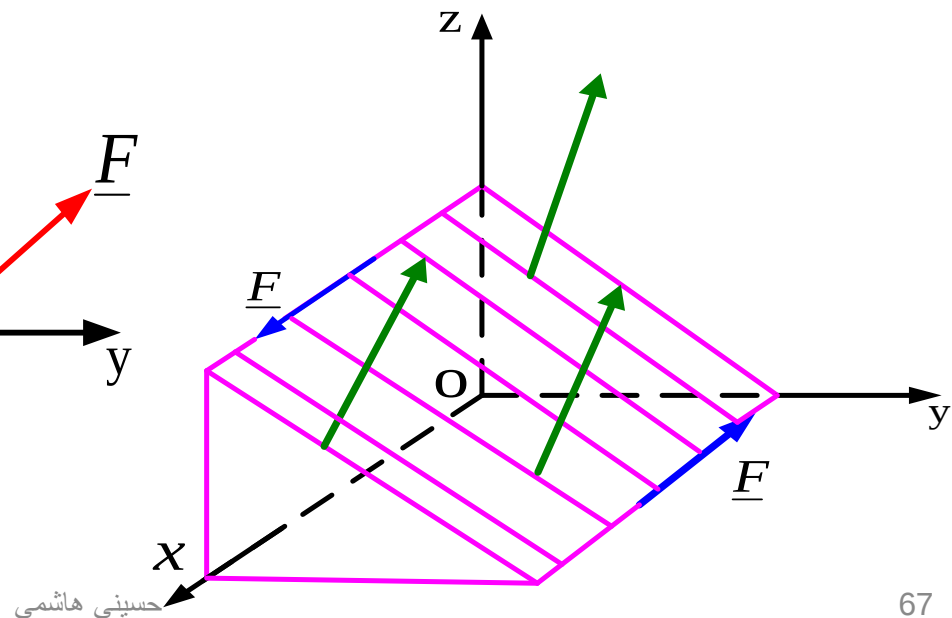
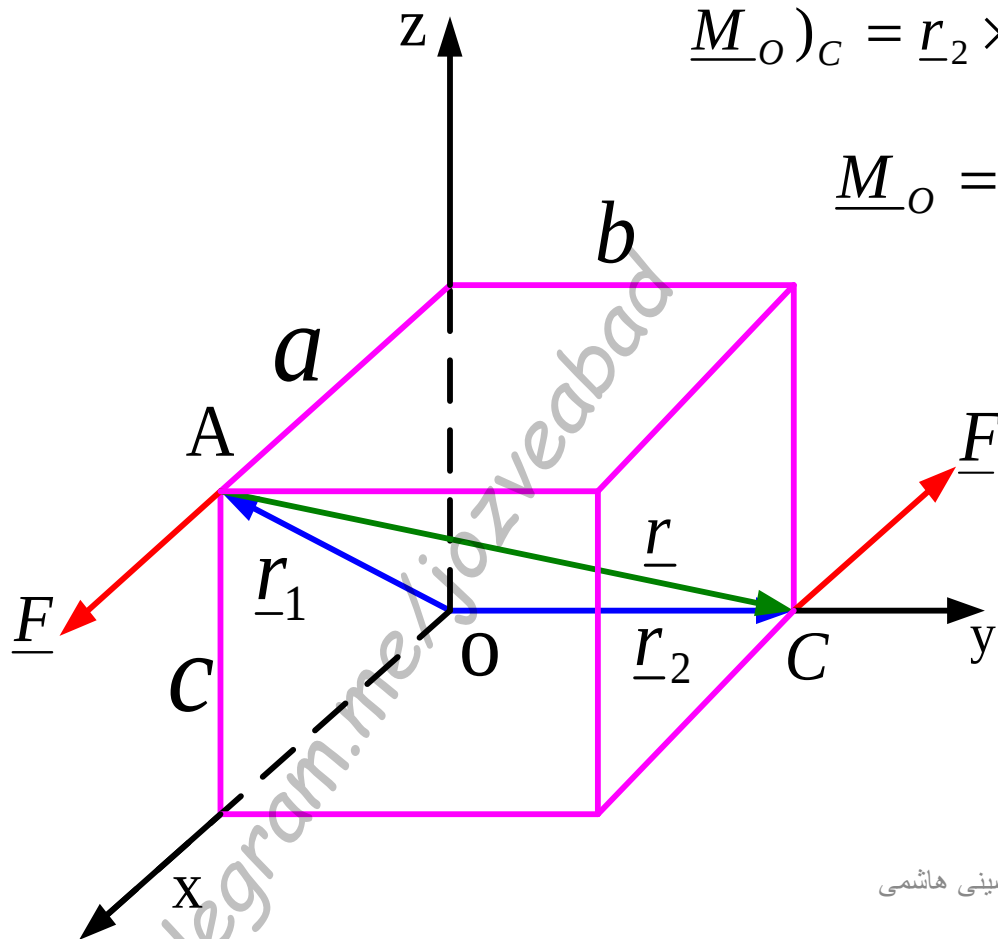
$$\underline{r}_1 = (a\underline{i} + c\underline{k}) \quad \underline{F})_A = F\underline{i}$$

$$\underline{M}_O)_A = \underline{r}_1 \times \underline{F})_A = (a\underline{i} + c\underline{k}) \times (F\underline{i}) = cF\underline{j}$$

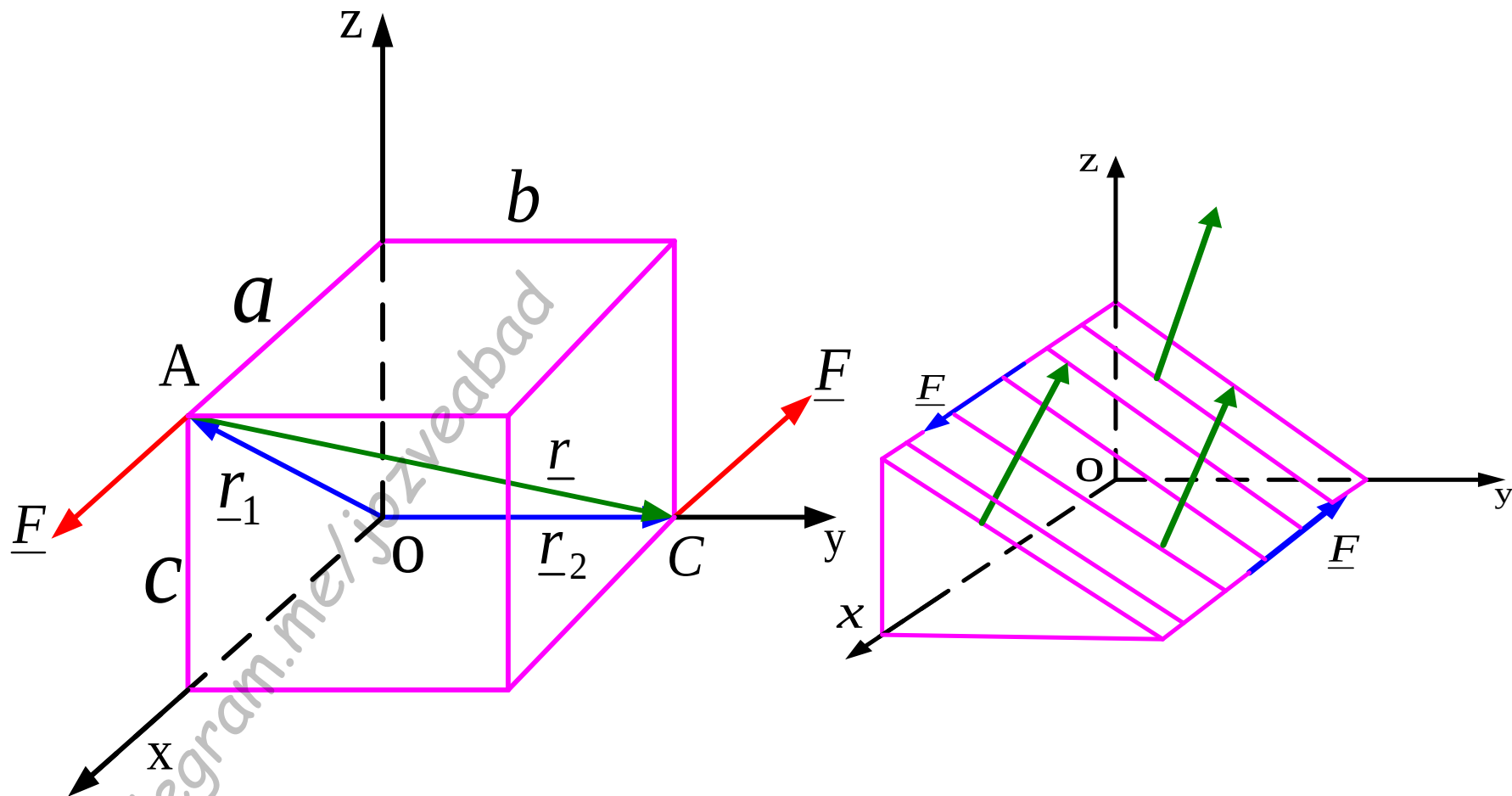
$$\underline{r}_2 = b\underline{j} \quad \underline{F})_C = -F\underline{i}$$

$$\underline{M}_O)_C = \underline{r}_2 \times \underline{F})_C = (b\underline{j}) \times (-F\underline{i}) = bF\underline{k}$$

$$\underline{M}_O = \underline{M}_O)_A + \underline{M}_O)_C = F(c\underline{j} + b\underline{k})$$

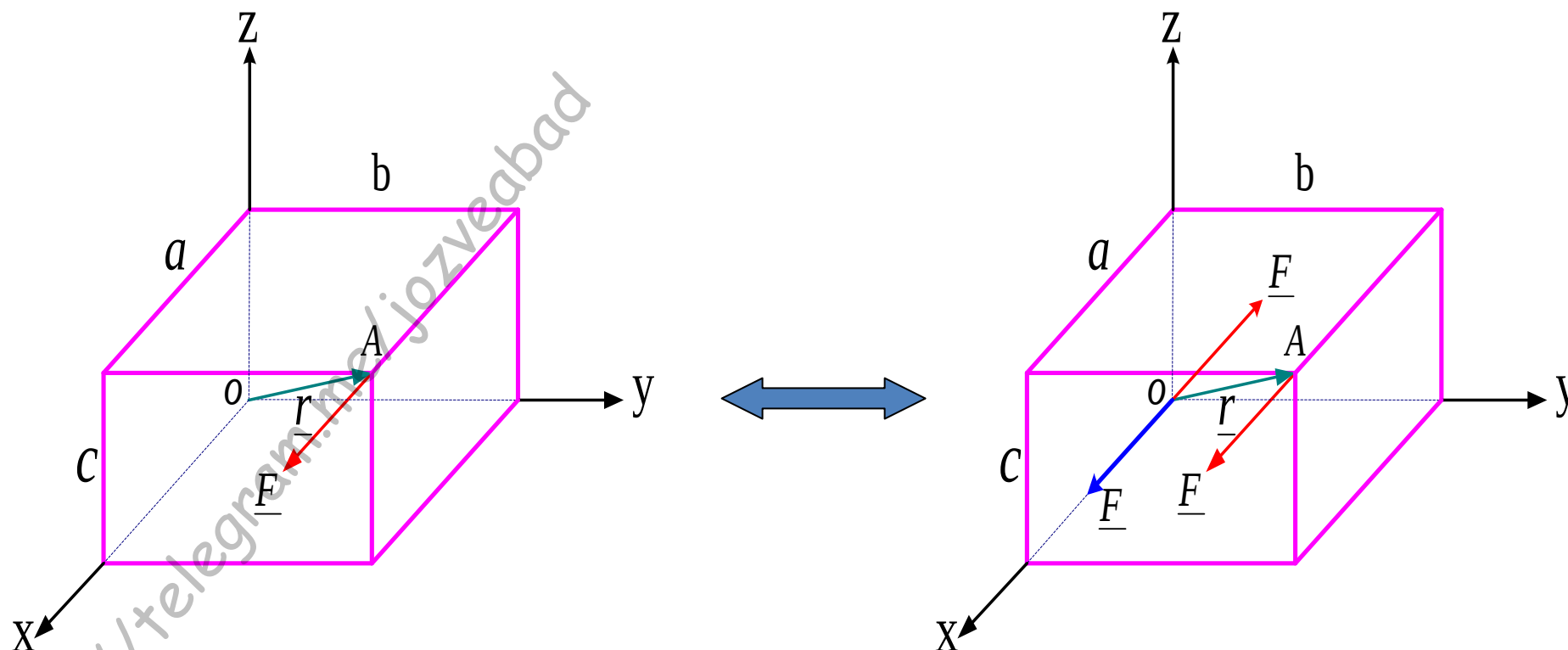


گشتاور زوج نیرو یک بردار آزاد (Free vector) است



تجزیه (تعویض) یک نیروی مفروض به یک نیرو و بردار کوپل در نقطه ای مثل O

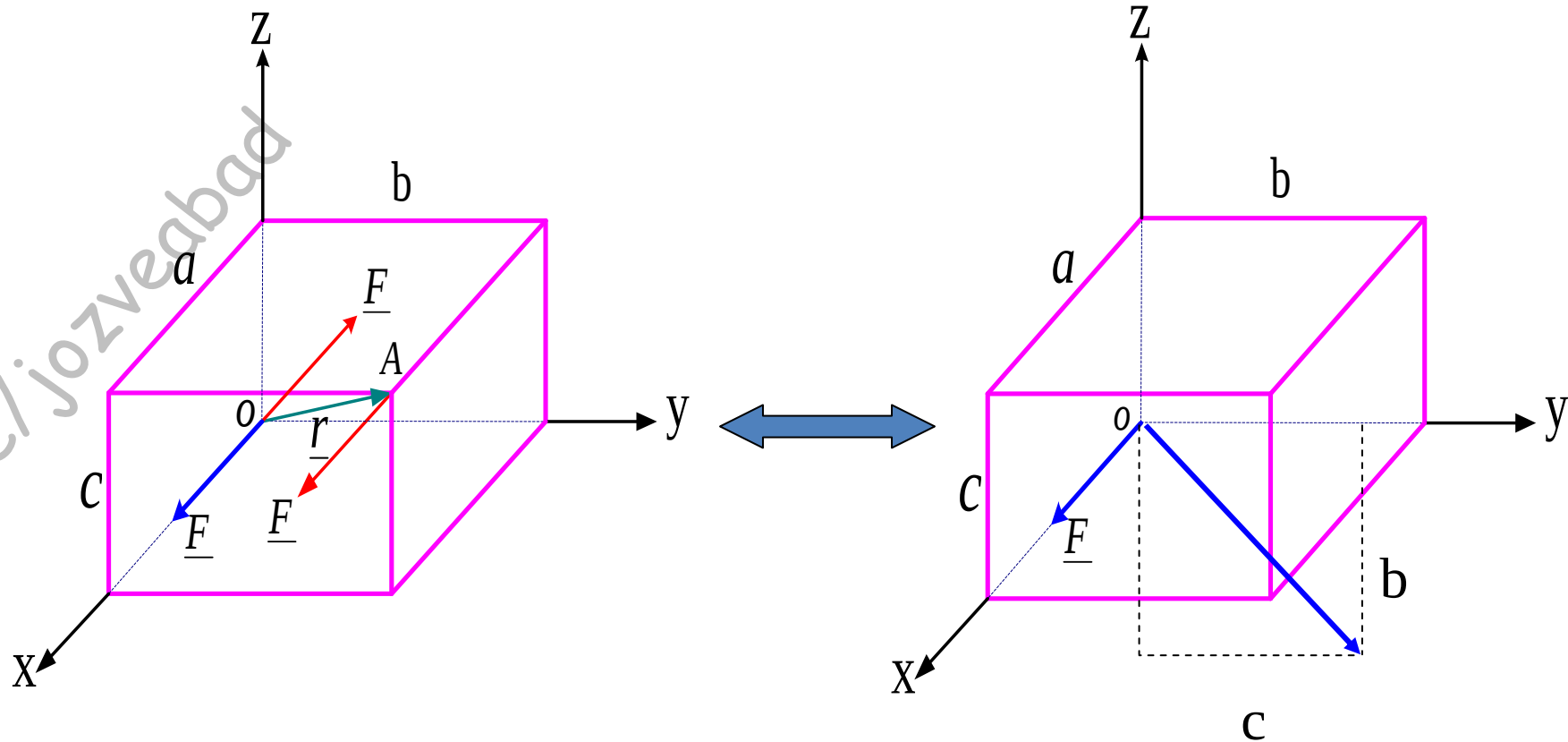
اثر زوج نیرو ایجاد گشتاور است.



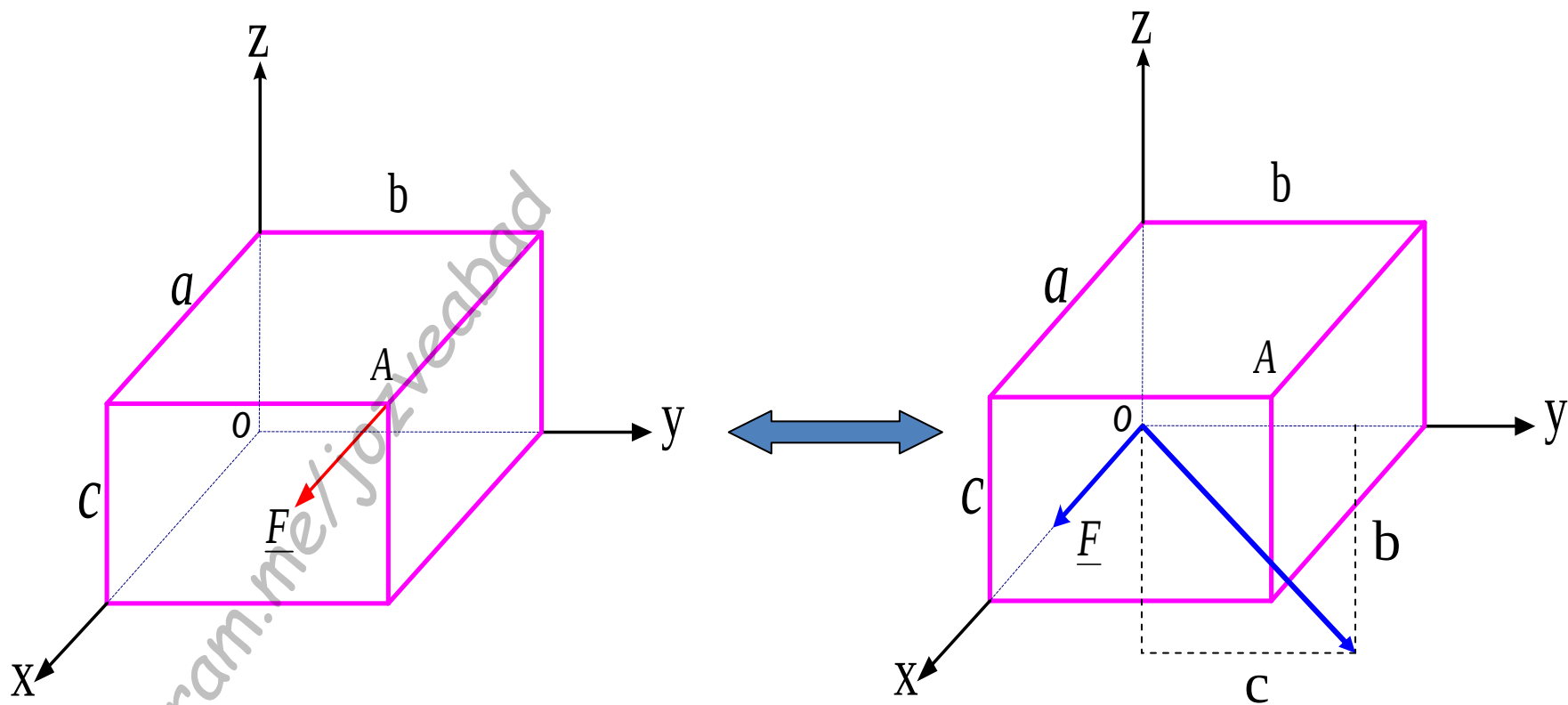
$$\underline{M}_O = (\underline{r} \times \underline{F})_A \quad \underline{r} = a\underline{i} + b\underline{j} + c\underline{k} \quad \underline{F}_A = F\underline{i}$$

$$\underline{M}_O = (\underline{r} \times \underline{F})_A = (a\underline{i} + b\underline{j} + c\underline{k}) \times F\underline{i} = F(c\underline{j} - b\underline{k})$$

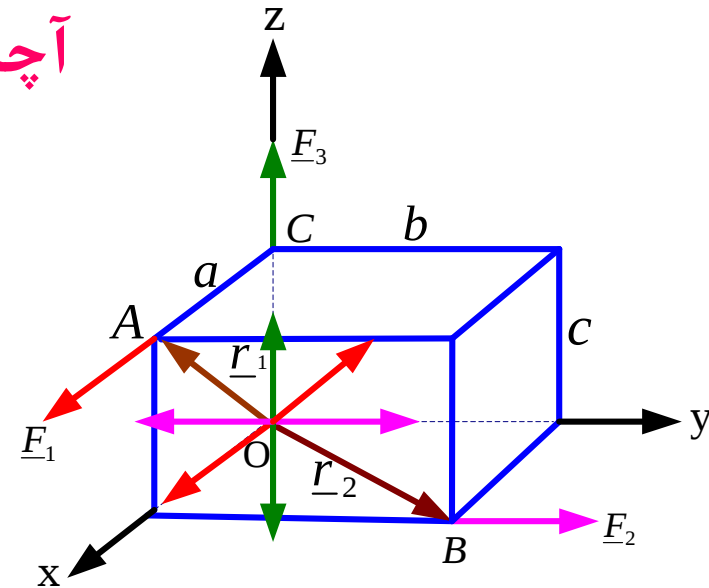
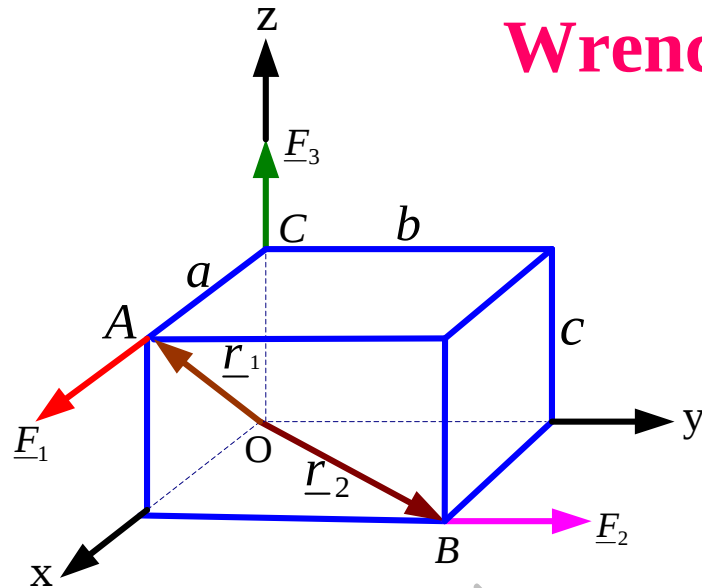
$$\underline{M}_O \cdot \underline{F} = F(c\underline{j} - b\underline{k}) \cdot (F\underline{i}) = 0$$



می توان نیرویی را که بنقطه ای از جسم وارد شده با یک نیرو و بردار کوپل در هر نقطه مفروضی تعویض کرد. نیروی تعویضی و بردار کوپل بر هم عمودند. بالعکس اگر یک نیرو و کوپل عمود بر هم داشته باشیم می توانیم آنها را با یک نیرو تعویض کنیم.



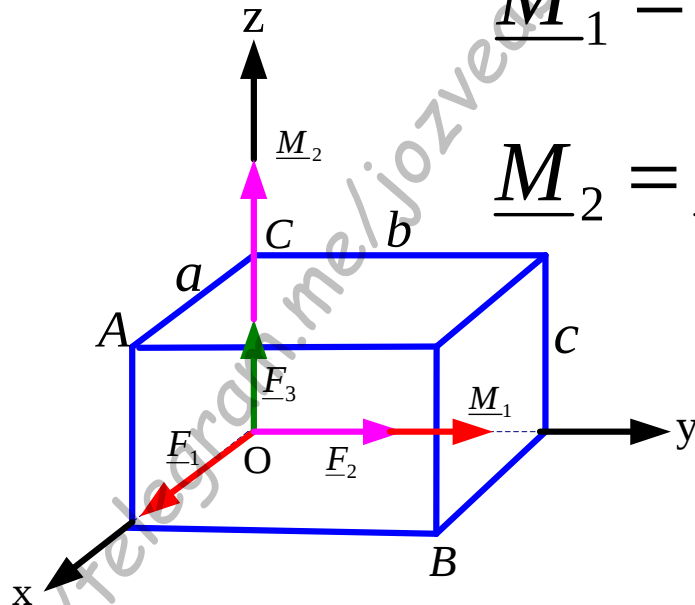
آچار Wrench



$$\underline{M}_1 = \underline{r}_1 \times \underline{F}_1 = (a\underline{i} + c\underline{k}) \times F_1\underline{i} = cF_1\underline{j}$$

$$\underline{M}_2 = \underline{r}_2 \times \underline{F}_2 = (a\underline{i} + b\underline{j}) \times F_2\underline{j} = aF_2\underline{k}$$

$$\underline{M}_3 = 0$$

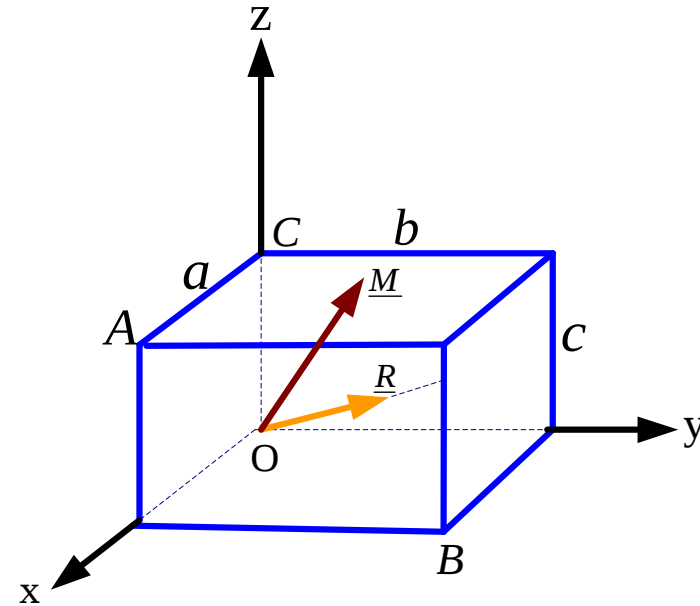
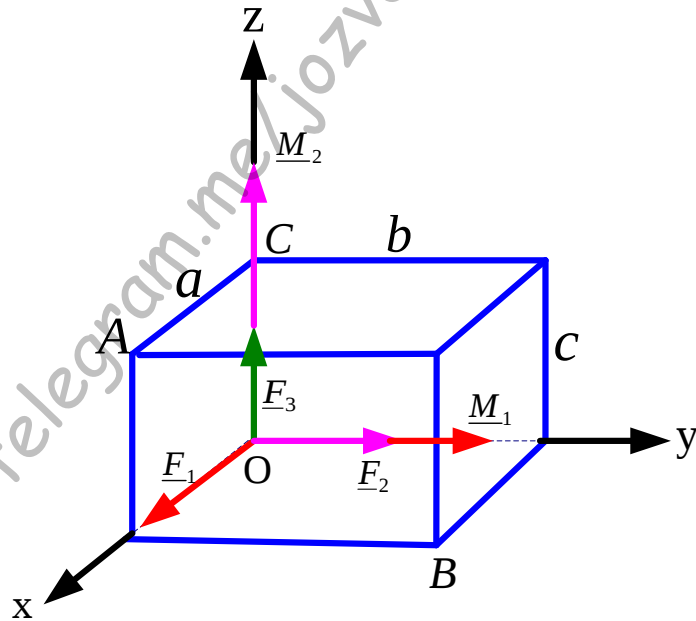


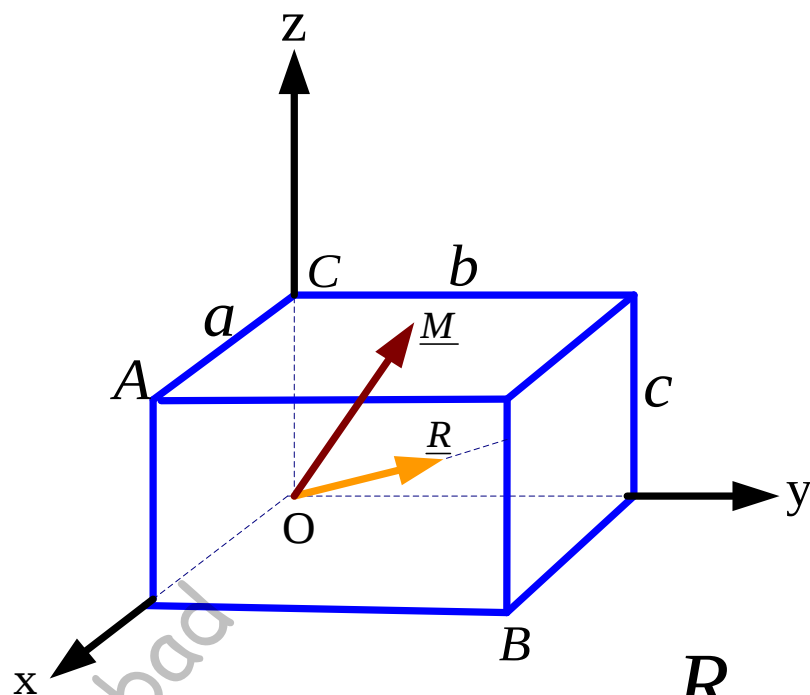
$$\underline{F}_1 = F_1 \underline{i} \quad \underline{F}_2 = F_2 \underline{j} \quad \underline{F}_3 = F_3 \underline{k}$$

$$\underline{R} = \underline{F}_1 + \underline{F}_2 + \underline{F}_3 = (F_1 \underline{i} + F_2 \underline{j} + F_3 \underline{k})$$

$$\underline{M}_1 = cF_1 \underline{j} \quad \underline{M}_2 = aF_2 \underline{k} \quad \underline{M}_3 = 0$$

$$\underline{M} = \underline{M}_1 + \underline{M}_2 + \underline{M}_3 = (cF_1 \underline{j} + aF_2 \underline{k})$$





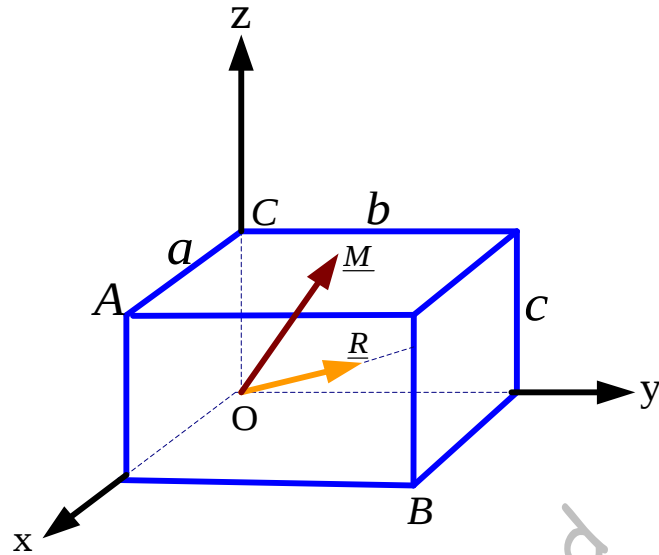
$$\underline{R} = F_1 \underline{i} + F_2 \underline{j} + F_3 \underline{k}$$

$$\underline{M} = (cF_1 \underline{j} + aF_2 \underline{k})$$

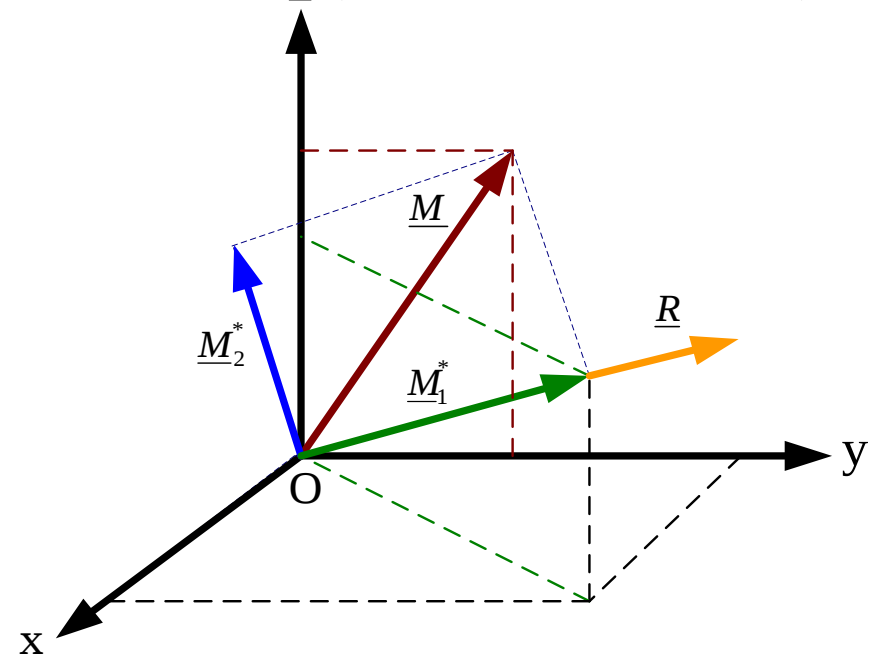
$$\underline{R} \cdot \underline{M} = F_2 (cF_1 + aF_3) \neq 0$$

هر نیرو و بردار کوپل مربوط به خودش بر هم عمودند لیکن بردارهای برآیند نیروها و برآیند کوپل ها بر هم عمود نیستند

$$\underline{R} = F_1 \underline{i} + F_2 \underline{j} + F_3 \underline{k}$$



$$\underline{M} = \underline{z} (cF_1 \underline{j} + aF_2 \underline{k})$$



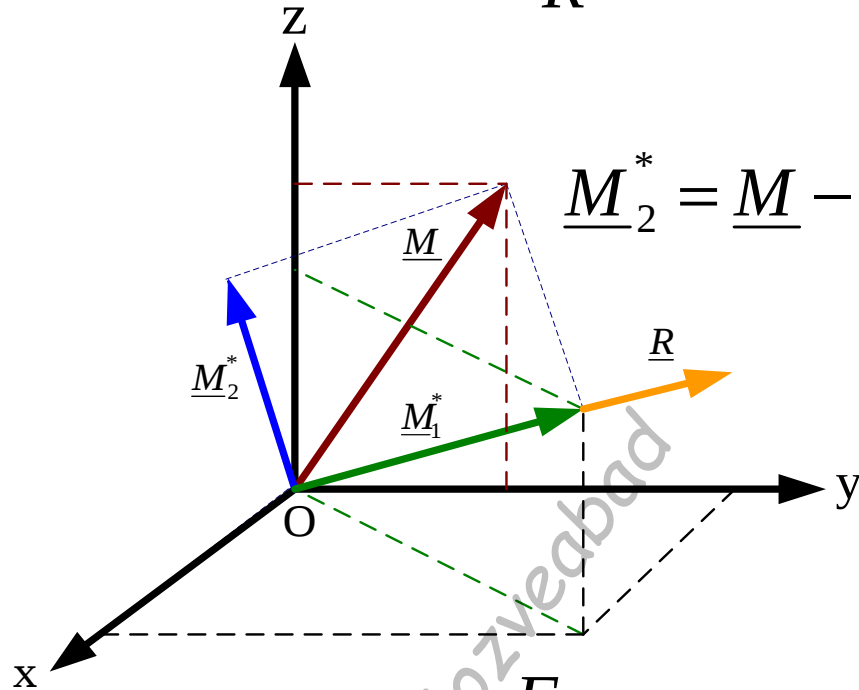
$$\underline{M} = \underline{M}_1^* + \underline{M}_2^*$$

$$\underline{\lambda}_R = \frac{\underline{R}}{R} = \frac{F_1 \underline{i} + F_2 \underline{j} + F_3 \underline{k}}{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}$$

$$M_1^* = \underline{\lambda}_R \cdot \underline{M} = \frac{F_2}{R} (cF_1 + aF_3)$$

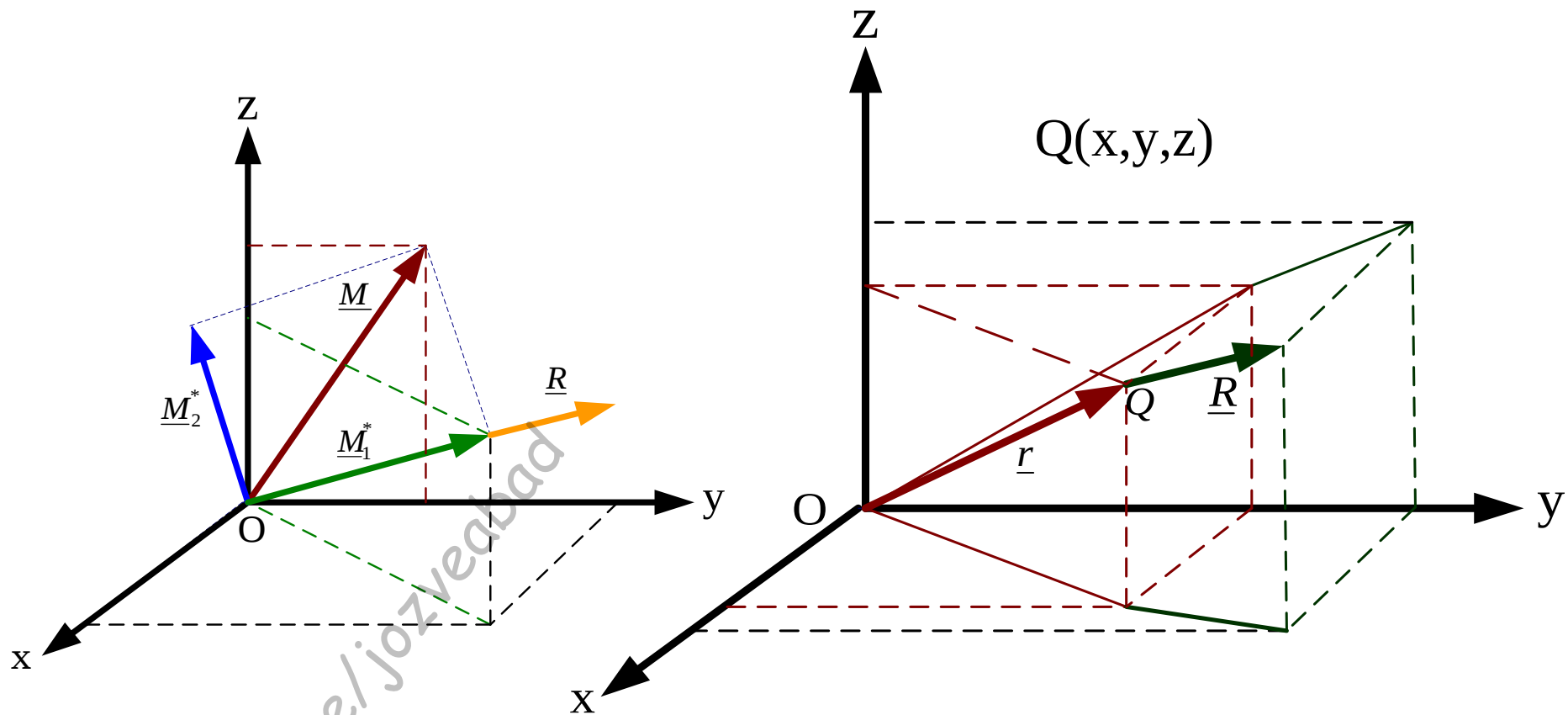
$$\underline{M}_1^* = M_1^* \underline{\lambda}_R = \frac{F_2}{R^2} (cF_1 + aF_3) \underline{R}$$

$$\underline{M}_1^* = M_1^* \underline{\lambda}_R = \frac{F_2}{R^2} (cF_1 + aF_3) \underline{R} \quad \underline{M} = (cF_1 \underline{j} + aF_2 \underline{k})$$



$$\underline{M}_2^* = \underline{M} - \underline{M}_1^* = cF_1 \underline{j} + aF_2 \underline{k} - \frac{F_2}{R^2} (cF_1 + aF_3) \underline{R}$$

$$\underline{M}_2^* = -\frac{F_2}{R^2} (cF_1 + aF_3) F_1 \underline{i} + [cF_1 - \frac{F_2}{R^2} (cF_1 + aF_3) F_2] \underline{j} \\ + [aF_2 - \frac{F_2}{R^2} (cF_1 + aF_3) F_3] \underline{k}$$



$$\underline{R} = F_1 \underline{i} + F_2 \underline{j} + F_3 \underline{k}$$

$$\underline{r} = x \underline{i} + y \underline{j} + z \underline{k}$$

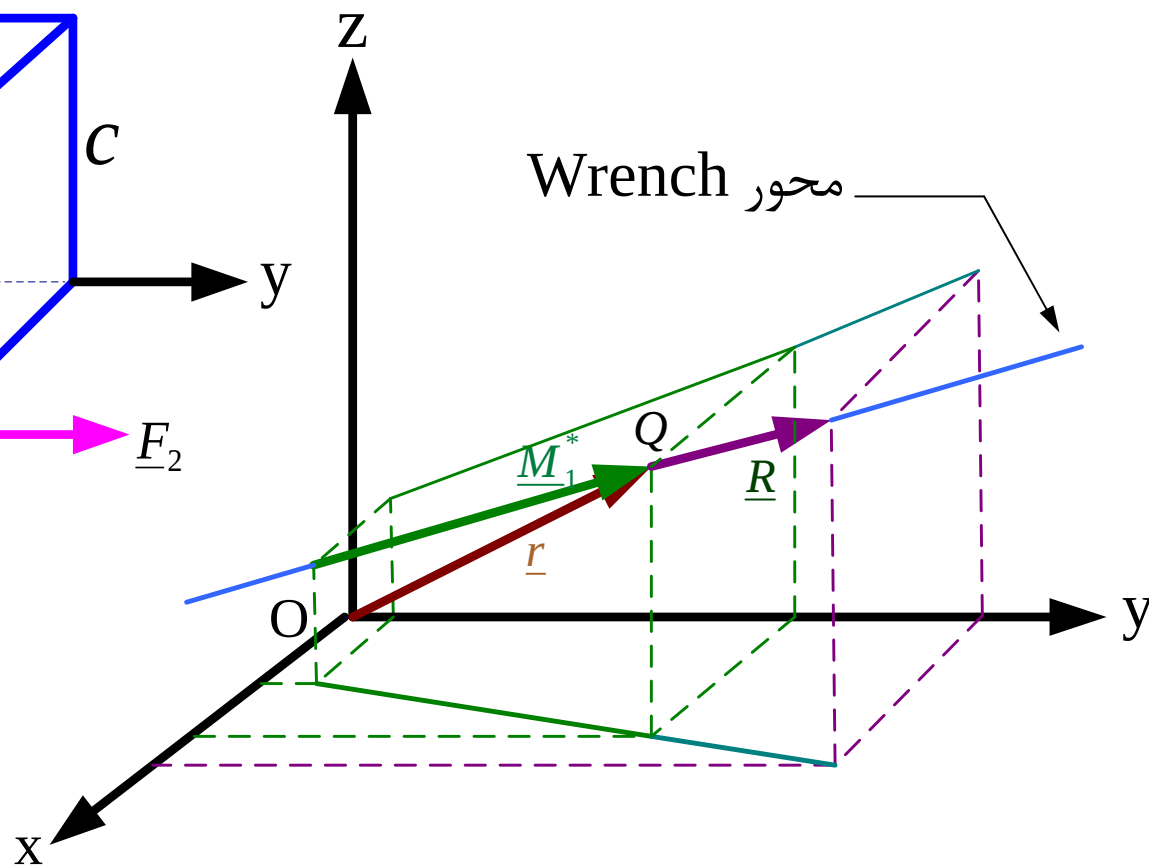
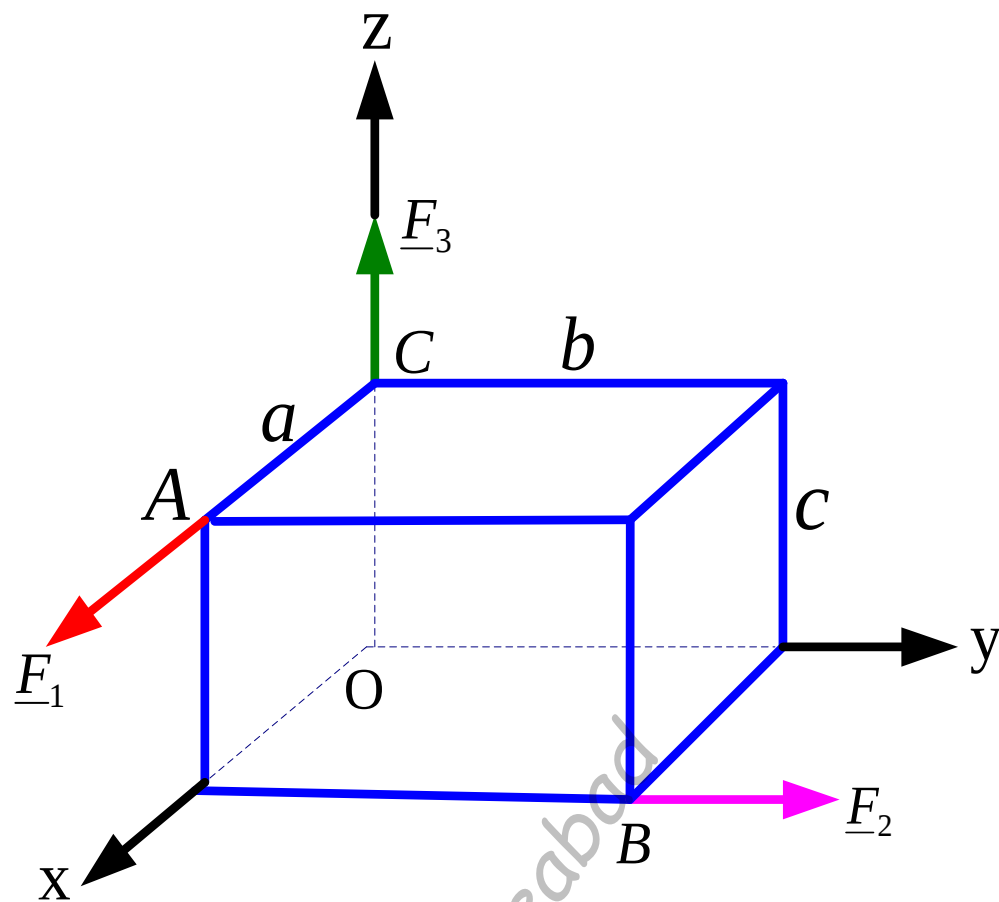
$$\begin{aligned} \underline{M}_2^* &= \underline{r} \times \underline{R} = (x \underline{i} + y \underline{j} + z \underline{k}) \times (F_1 \underline{i} + F_2 \underline{j} + F_3 \underline{k}) \\ &= (yF_3 - zF_2) \underline{i} + (zF_1 - xF_3) \underline{j} + (xF_2 - yF_1) \underline{k} \end{aligned}$$

$$\underline{M}_2^* = (yF_3 - zF_2)\underline{i} + (zF_1 - xF_3)\underline{j} + (xF_2 - yF_1)\underline{k}$$

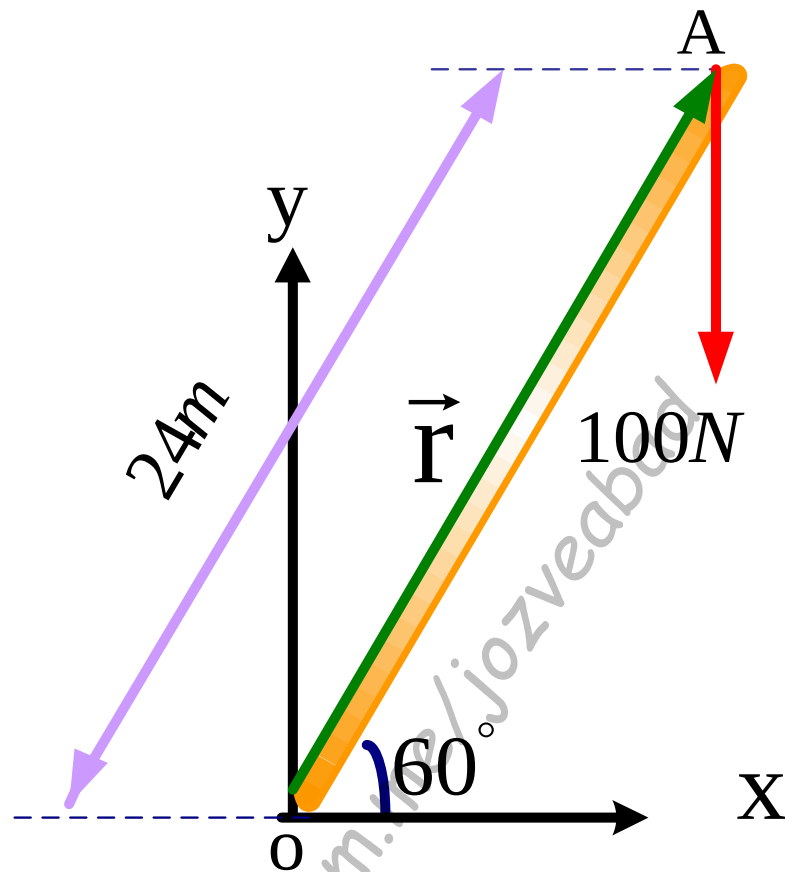
$$\underline{M}_2^* = cF_1\underline{j} + aF_2\underline{k} - \frac{F_2}{R^2}(cF_1 + aF_3)\underline{R}$$

$$\underline{M}_2^* = -\frac{F_2}{R^2}(cF_1 + aF_3)F_1\underline{i} + [cF_1 - \frac{F_2}{R^2}(cF_1 + aF_3)F_2]\underline{j} + [aF_2 - \frac{F_2}{R^2}(cF_1 + aF_3)F_3]\underline{k}$$

$$\begin{cases} -\frac{F_2}{R^2}(cF_1 + aF_3)F_1 = yF_3 - zF_2 \\ cF_1 - \frac{F_2}{R^2}(cF_1 + aF_3)F_2 = zF_1 - xF_3 \\ aF_2 - \frac{F_2}{R^2}(cF_1 + aF_3)F_3 = xF_2 - yF_1 \end{cases} \quad \begin{cases} x = \frac{F_2}{R^2 F_3}(cF_1 + aF_3)F_2 - c\frac{F_1}{F_3} \\ y = -\frac{F_1 F_2}{R^2 F_3}(cF_1 + aF_3) \\ z = 0 \end{cases}$$



مثال: برای میله OA مطابق شکل که در نقطه A تحت تاثیر نیروی صد نیوتن ($100N$) قرار دارد مطلوب است:

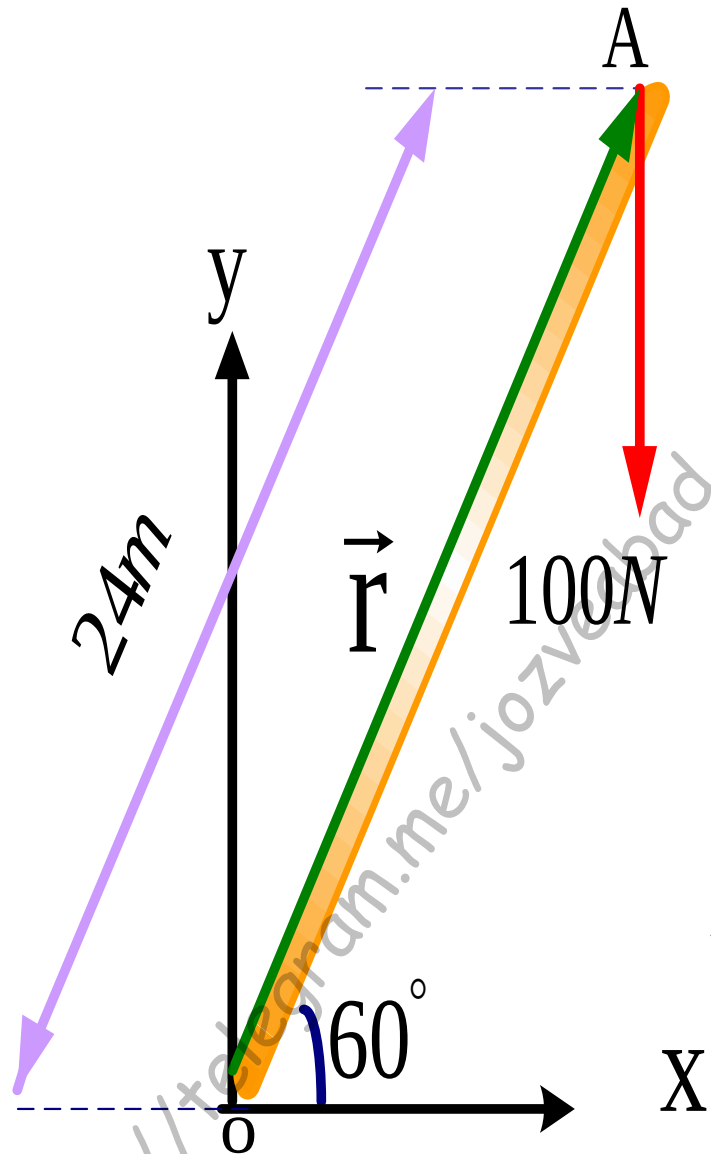
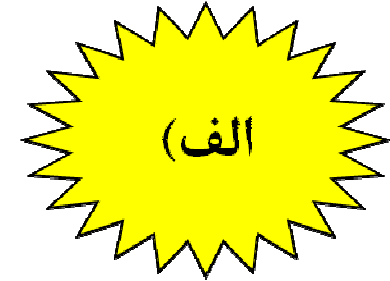


(الف) گشتاور نیروی $100N$ حول نقطه O .

(ب) بزرگی نیرویی که به طور افقی در نقطه A اعمال شود و همان گشتاور را حول نقطه O ایجاد نماید.

(ج) کوچکترین نیروی اعمال شده در نقطه A که همان گشتاور را حول نقطه O ایجاد کند.

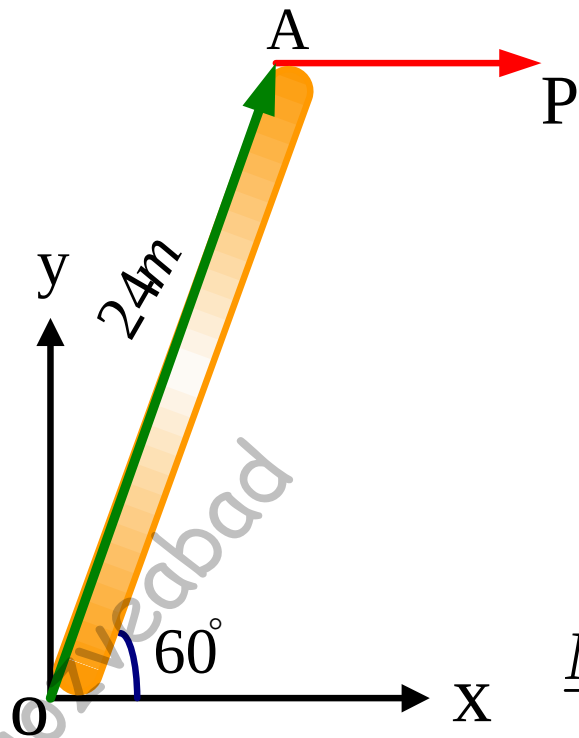
(د) چنانچه در نقطه ای از میله OA نیرویی با بزرگی $240N$ و در امتداد عمودی اعمال کنیم فاصله این نقطه از O چقدر باید باشد تا گشتاوری برابر با همان گشتاور قبلی ایجاد کند؟



$$\underline{F} = -100 \underline{j}$$

$$\underline{r} = 24 \cos 60 \underline{i} + 24 \sin 60 \underline{j} = 12(\underline{i} + \sqrt{3} \underline{j})$$

$$\underline{M}_o = \underline{r} \times \underline{f} = \begin{vmatrix} \underline{i} & \underline{j} & \underline{k} \\ 12 & 12\sqrt{3} & 0 \\ 0 & -100 & 0 \end{vmatrix} = -1200 \underline{k} \text{ (N.m)}$$



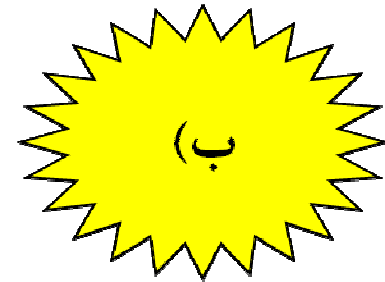
$$\underline{M} = \underline{r} \times \underline{p}$$

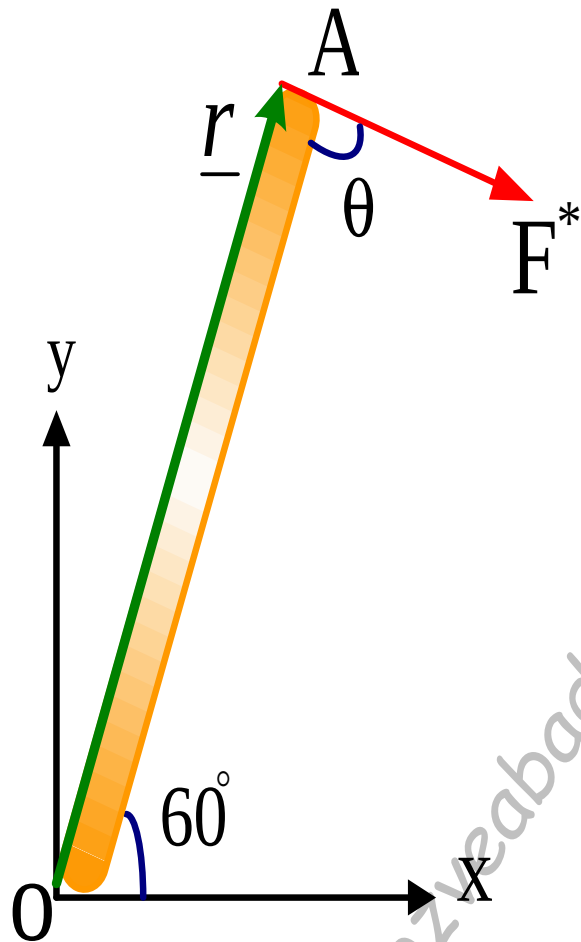
$$\underline{p} = p \underline{i}$$

$$\underline{r} = 12 (\underline{i} + \sqrt{3} \underline{j})$$

$$\underline{M} = \begin{vmatrix} \underline{i} & \underline{j} & \underline{k} \\ 12 & 12\sqrt{3} & 0 \\ p & 0 & 0 \end{vmatrix} = -12\sqrt{3}p \underline{k} = -1200 \underline{k}$$

$$p = \frac{1200}{12\sqrt{3}} = \frac{100\sqrt{3}}{3} N$$





$$\underline{M}_o = \underline{r} \times \underline{F}^* \quad M_o = r F^* \sin \theta$$

$$F^* = \frac{M_o}{r \sin \theta}$$

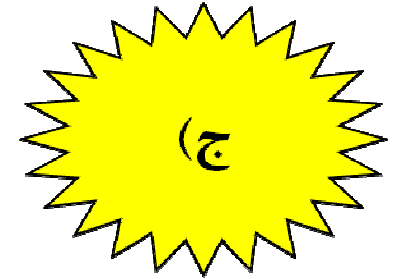
M_o و r ثابت اند

برای اینکه F^* کمترین مقدار باشد

$\sin \theta$ باید بیشترین مقدار خود را داشته باشد.

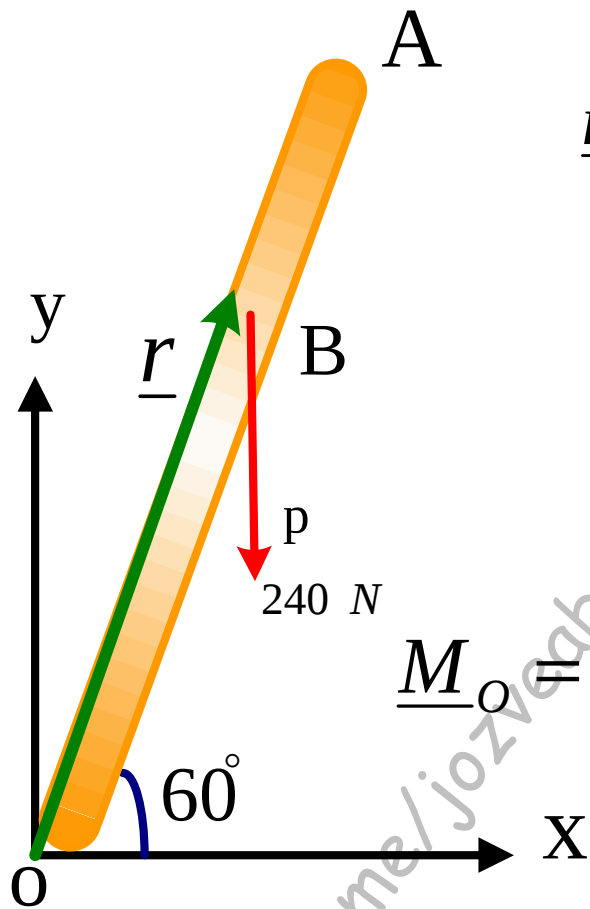
$$\sin \theta = 1 \rightarrow \theta = \pi/2$$

$$\underline{F}^* = F^* (\cos 30^\circ \underline{i} - \sin 30^\circ \underline{j}) \quad \underline{r} = 12 (\underline{i} + \sqrt{3} \underline{j})$$



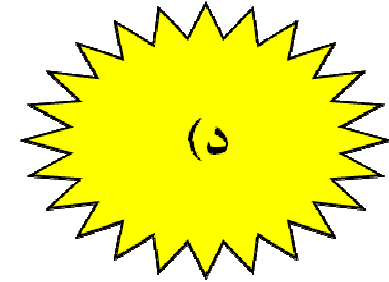
$$\underline{M}_O = \underline{r} \times \underline{F} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 12 & 12\sqrt{3} & 0 \\ \sqrt{3}/2 F & -F/2 & 0 \end{vmatrix} = (-6F - 18F) \hat{k}$$

$$24F = 1200 \Rightarrow F = 50 \text{ N}$$



$$\underline{r} = r (\cos 60 \underline{i} + \sin 60 \underline{j})$$

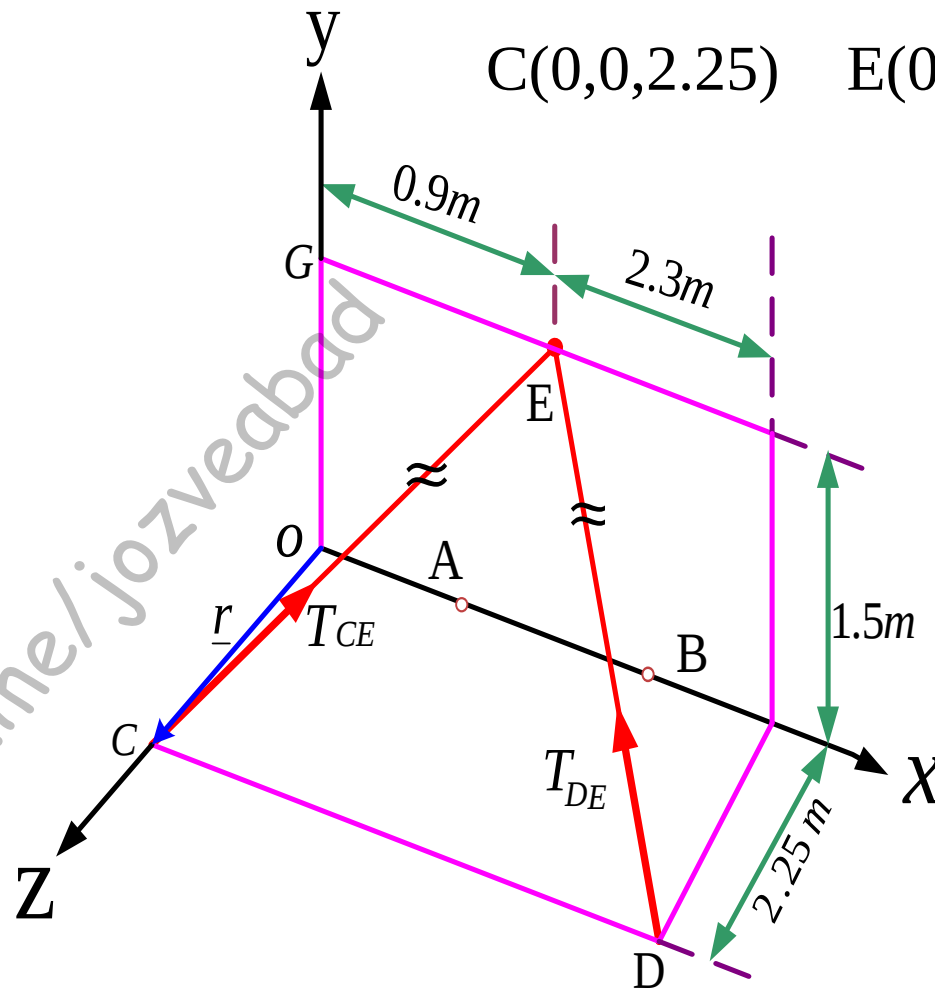
$$\underline{p} = -p \underline{j} = -240 \underline{j}$$



$$\underline{M}_O = \underline{r} \times \underline{p} = \begin{vmatrix} \underline{i} & \underline{j} & \underline{k} \\ r/2 & -\sqrt{3}/2 r & 0 \\ 0 & -240 & 0 \end{vmatrix} = -120r \underline{k}$$

$$120 r = 1200 \rightarrow r = 10 m$$

مثال: یک سکوی مستطیلی در نقاط A , B مفصل شده و به وسیله کابلی که از حلقه بدون اصطکاک E می گذرد نگهداری شده است. کشش در کابل CE 1934N است. مطلوب است گشتاور نیروی وارد شده بر کابل CE از نقطه C حول مبدأ دستگاه مختصات.



$$C(0,0,2.25) \quad E(0.9, 1.5, 0) \quad \underline{T}_{CE} = T_{CE} \underline{\lambda}_{CE}$$

$$\underline{\lambda}_{CE} = \frac{0.9\underline{i} + 1.5\underline{j} - 2.25\underline{k}}{\sqrt{(0.9)^2 + (1.5)^2 + (2.25)^2}}$$

$$\underline{T}_{CE} = \frac{1934}{2.85} \times (0.9\underline{i} + 1.5\underline{j} - 2.25\underline{k})$$

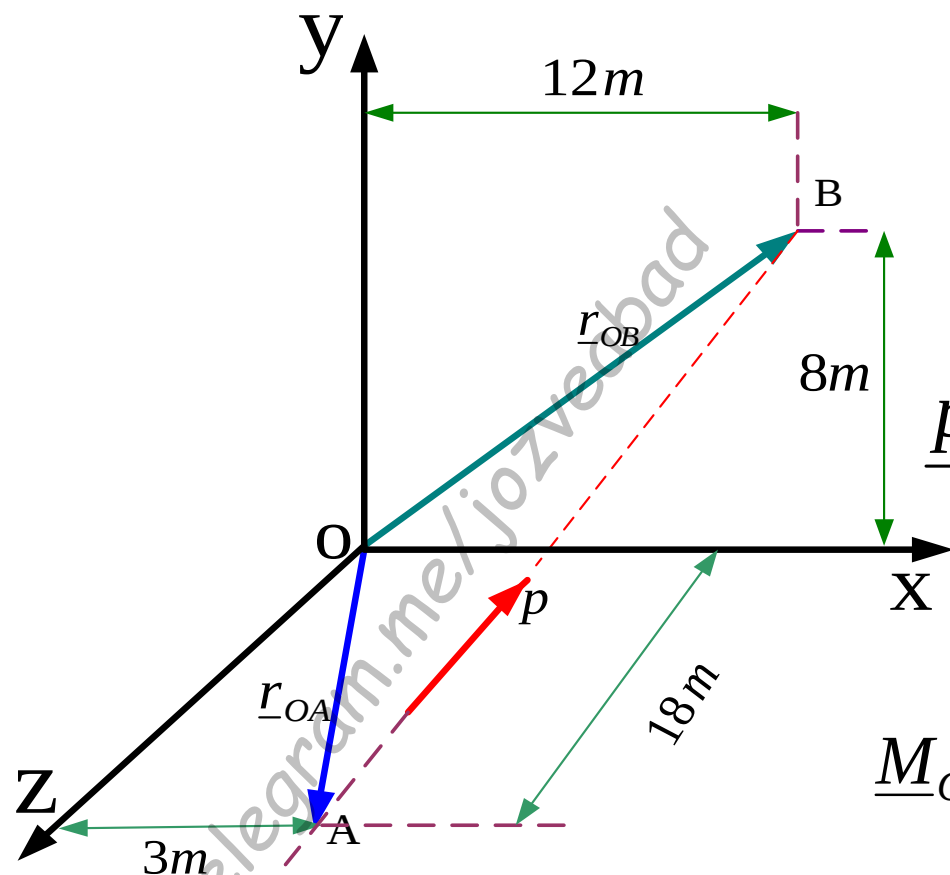
$$\underline{r} = 2.25 \underline{k}$$

$$\underline{M}_O = \underline{r} \times \underline{T}_{CE} = \begin{vmatrix} \underline{i} & \underline{j} & \underline{k} \\ 0 & 0 & 2.25 \\ 425.9 & 709.9 & -1064.9 \end{vmatrix} = -1597.2\underline{i} + 958.2\underline{j}$$

telegram.me/jozveabad

مثال: خط اثر نیروی P که برابر با 420N است از دو نقطه A , B مطابق شکل می گذرد. فاصله قائم خط اثر P را از مبدأ مختصات (O) به دست آورید.

$$A(3,0,18) \quad B(12,8,0)$$



$$\underline{\lambda}_{AB} = \frac{9\underline{i} + 8\underline{j} - 18\underline{k}}{\sqrt{(9)^2 + (8)^2 + (18)^2}}$$

$$\underline{p} = p \underline{\lambda}_{AB} = \frac{420}{21.66} (9\underline{i} + 8\underline{j} - 18\underline{k})$$

$$\underline{p} = (174.5\underline{i} + 155.1\underline{j} - 349\underline{k})$$

$$\underline{M}_O = \underline{r}_{OA} \times \underline{p} = \underline{r}_{OB} \times \underline{p}$$

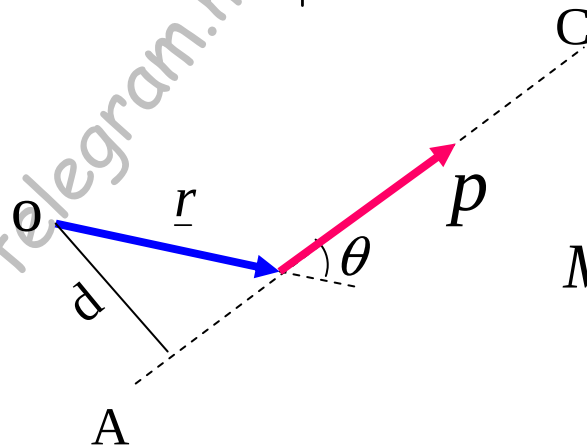
قابلیت انتقال نیرو

$$\underline{r}_{OA} = 3\underline{i} + 18\underline{k}$$

$$\underline{r}_{OB} = 12\underline{i} + 8\underline{j}$$

$$\underline{M}_O = \underline{r}_{OA} \times \underline{p} = \begin{vmatrix} \underline{i} & \underline{j} & \underline{k} \\ 3 & 0 & 18 \\ 174.5 & 155.1 & -349 \end{vmatrix} = -2792\underline{i} + 4188\underline{j} + 465\underline{k}$$

$$\underline{M}_O = \underline{r}_{OB} \times \underline{p} = \begin{vmatrix} \underline{i} & \underline{j} & \underline{k} \\ 12 & 8 & 0 \\ 174.5 & 155.1 & -349 \end{vmatrix} = -2792\underline{i} + 4188\underline{j} + 465\underline{k}$$



$$M_O = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2} = pr \sin \theta = pd$$

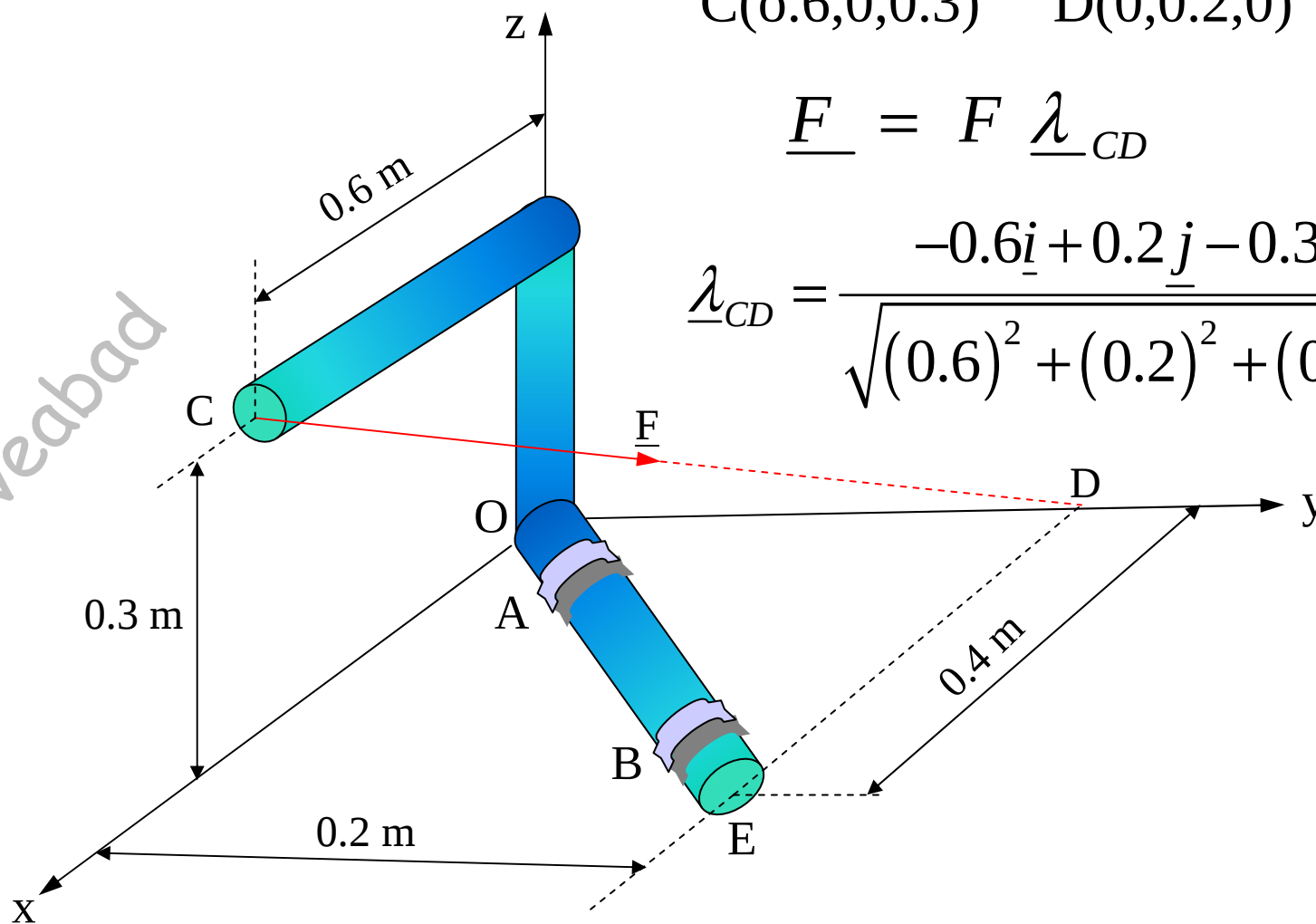
$$M_O = 5054.78 \quad d = \frac{M_O}{p} = 12 \text{ m}$$

مثال: میله نشان داده شده در شکل به وسیله دو یاتاقان A , B نگهداری شده است در صورتیکه بزرگی نیروی F ، 700N باشد گشتاور نیروی F را حول محور AB پیدا کنید.

$$C(0.6,0,0.3) \quad D(0,0.2,0)$$

$$\underline{F} = F \underline{\lambda}_{CD}$$

$$\underline{\lambda}_{CD} = \frac{-0.6\underline{i} + 0.2\underline{j} - 0.3\underline{k}}{\sqrt{(0.6)^2 + (0.2)^2 + (0.3)^2}}$$



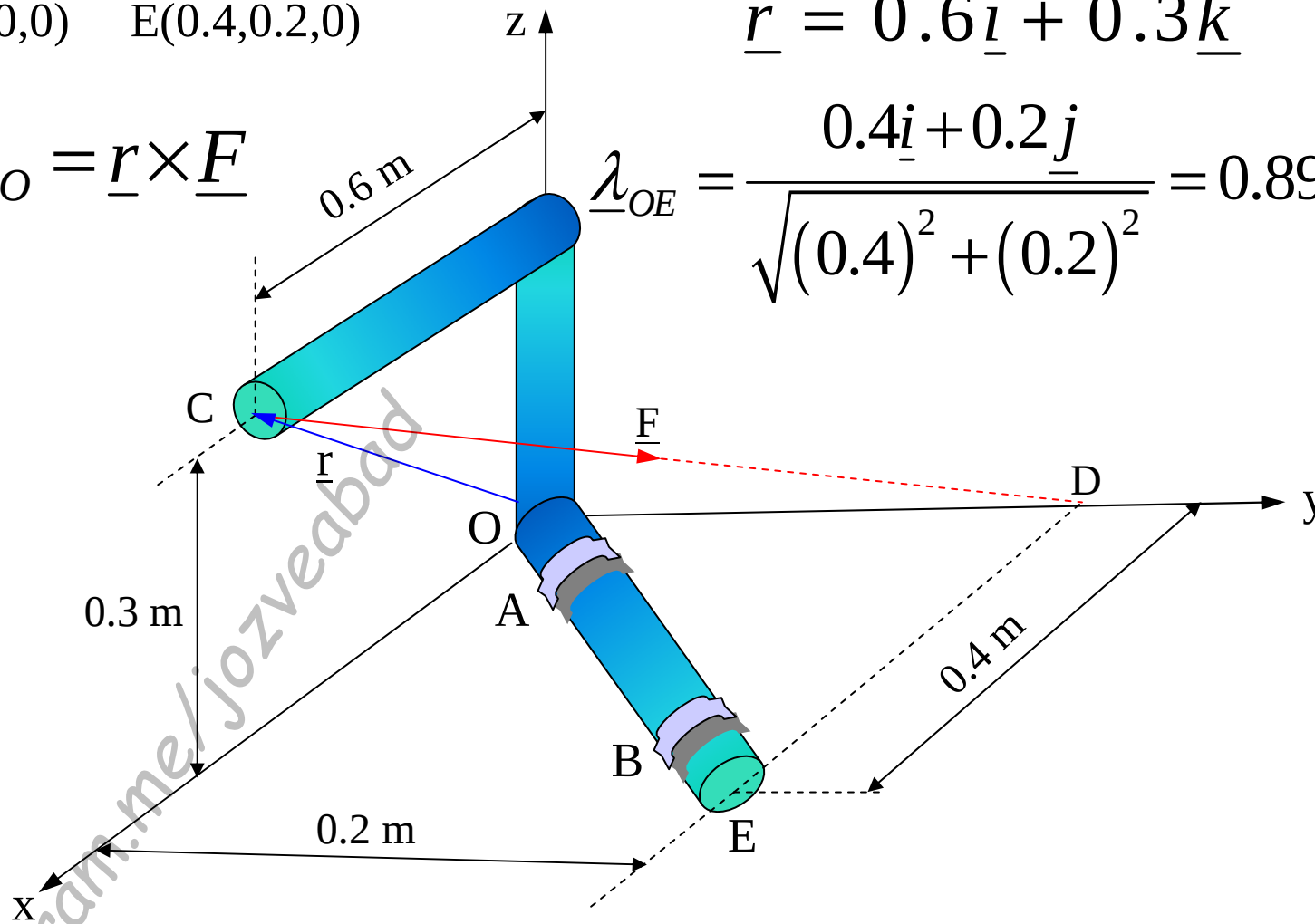
$$\underline{F} = (700) \frac{-0.6\underline{i} + 0.2\underline{j} - 0.3\underline{k}}{0.7} = -600\underline{i} + 200\underline{j} - 300\underline{k}$$

$$O(0,0,0) \quad E(0.4,0.2,0)$$

$$\underline{r} = 0.6\underline{i} + 0.3\underline{k}$$

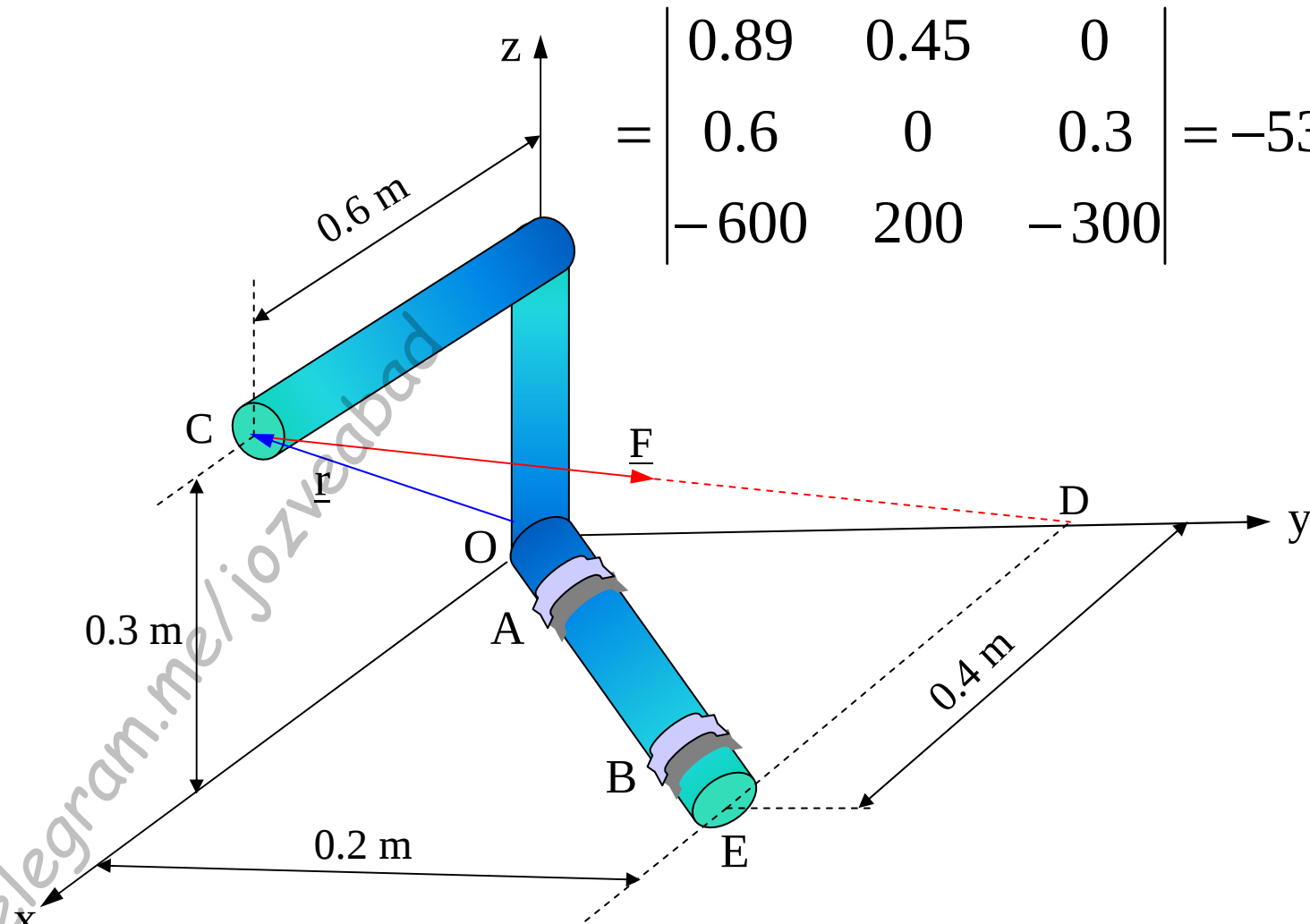
$$\underline{M}_O = \underline{r} \times \underline{F}$$

$$\lambda_{OE} = \frac{0.4\underline{i} + 0.2\underline{j}}{\sqrt{(0.4)^2 + (0.2)^2}} = 0.89\underline{i} + 0.45\underline{j}$$

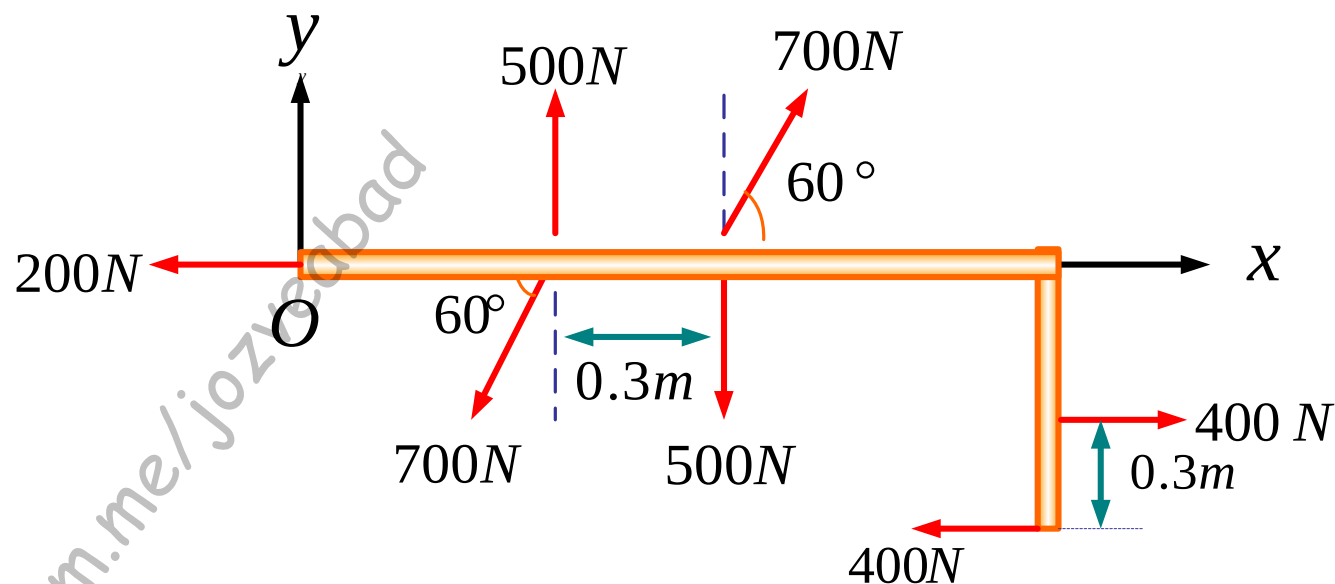


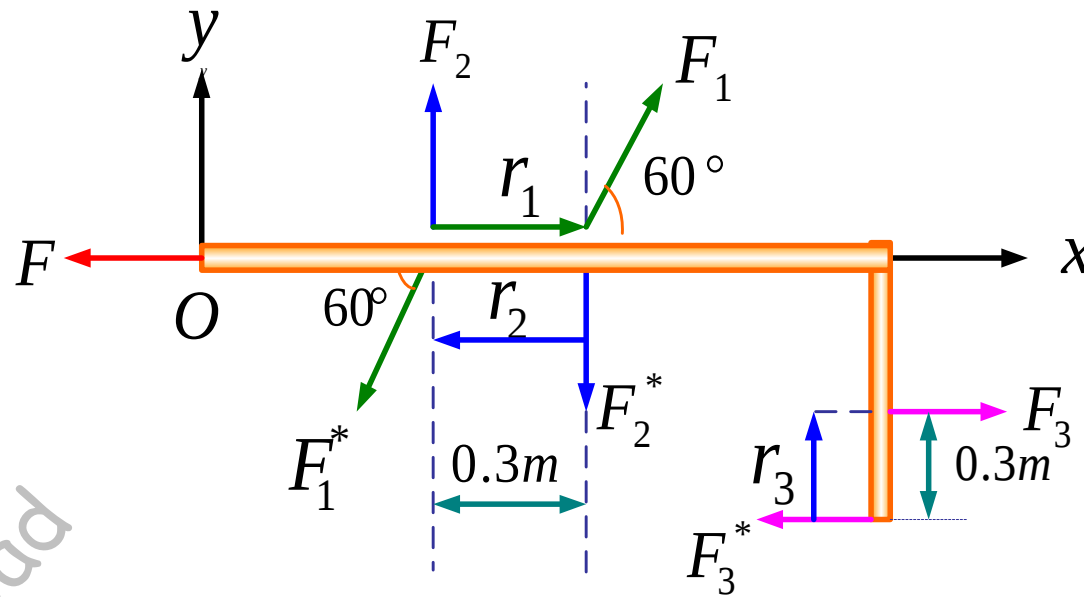
$$M_{AB} = \underline{\lambda}_{OE} \cdot \underline{M}_O = \underline{\lambda}_{OE} \cdot (\underline{r} \times \underline{F})$$

$$= \begin{vmatrix} 0.89 & 0.45 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0.3 \\ -600 & 200 & -300 \end{vmatrix} = -53.6 \text{ N.m}$$



مثال: سیستم نشان داده شده در شکل را با یک نیرو و بردار کوپل در نقطه O تعویض کنید.



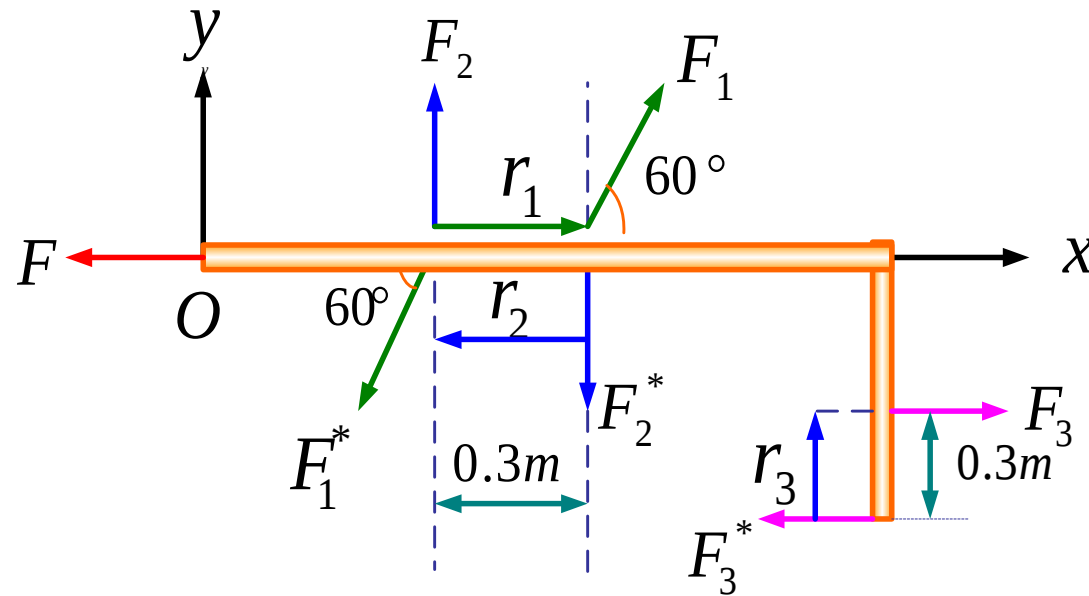


$$F = 200\text{ N} \quad F_1 = F_1^* = 700\text{ N} \quad F_2 = F_2^* = 500\text{ N} \quad F_3 = F_3^* = 400\text{ N}$$

$$\underline{F} = -200 \underline{i} \quad \underline{F}_1 = 700(\cos 60 \underline{i} + \sin 60 \underline{j}) \quad \underline{F}_2 = 500 \underline{j}$$

$$\underline{F}_3 = 400 \underline{i} \quad \underline{R} = \underline{F} = -200 \underline{i}$$

$$\underline{r}_1 = 0.3 \underline{i} \quad \underline{M}_1 = \underline{r}_1 \times \underline{F}_1 = 210 \underline{i} \times (\cos 60 \underline{i} + \sin 60 \underline{j}) = 105\sqrt{3} \underline{k}$$



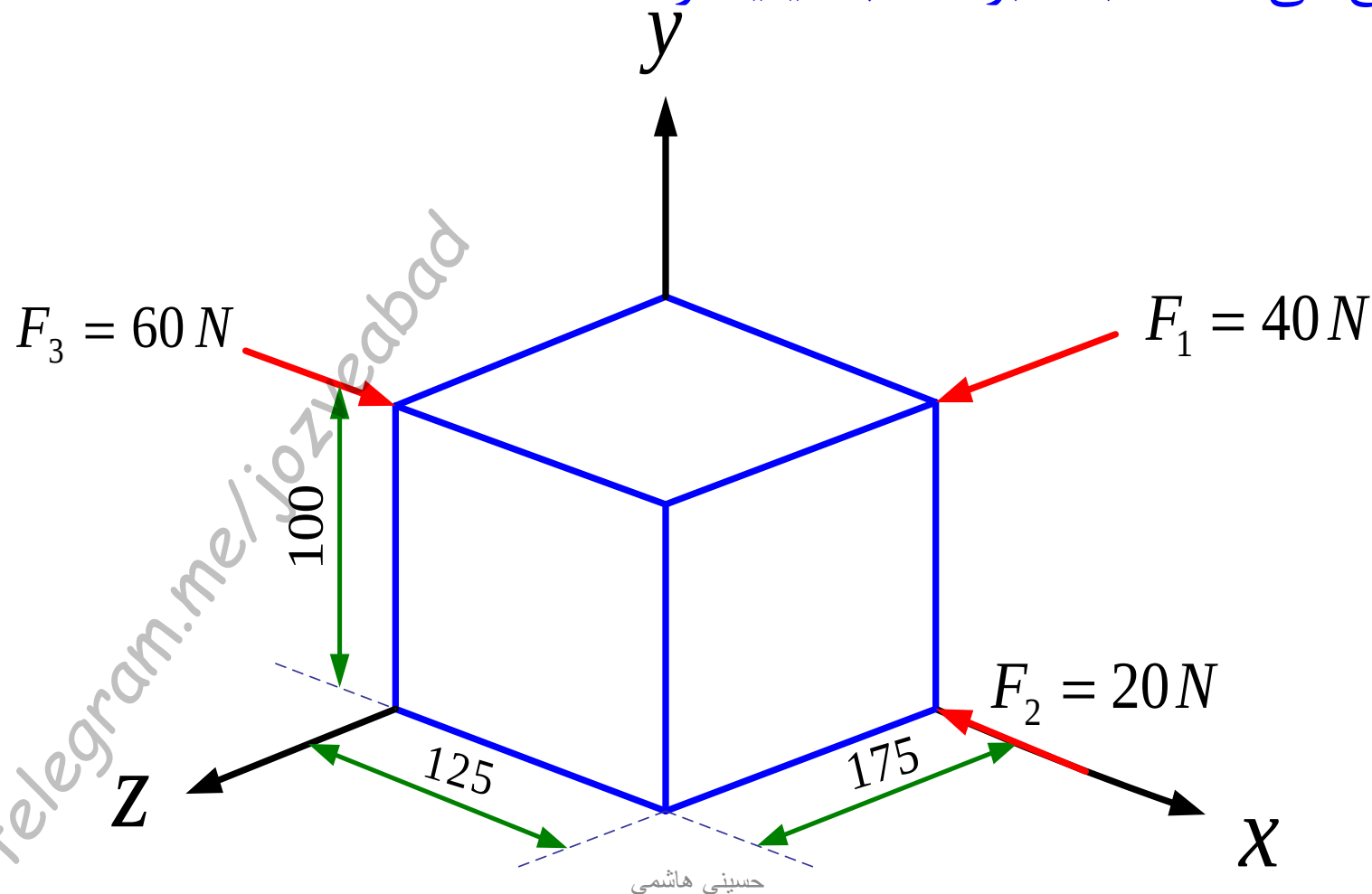
$$\underline{F}_2 = 500 \underline{j} \quad \underline{F}_3 = 400 \underline{i}$$

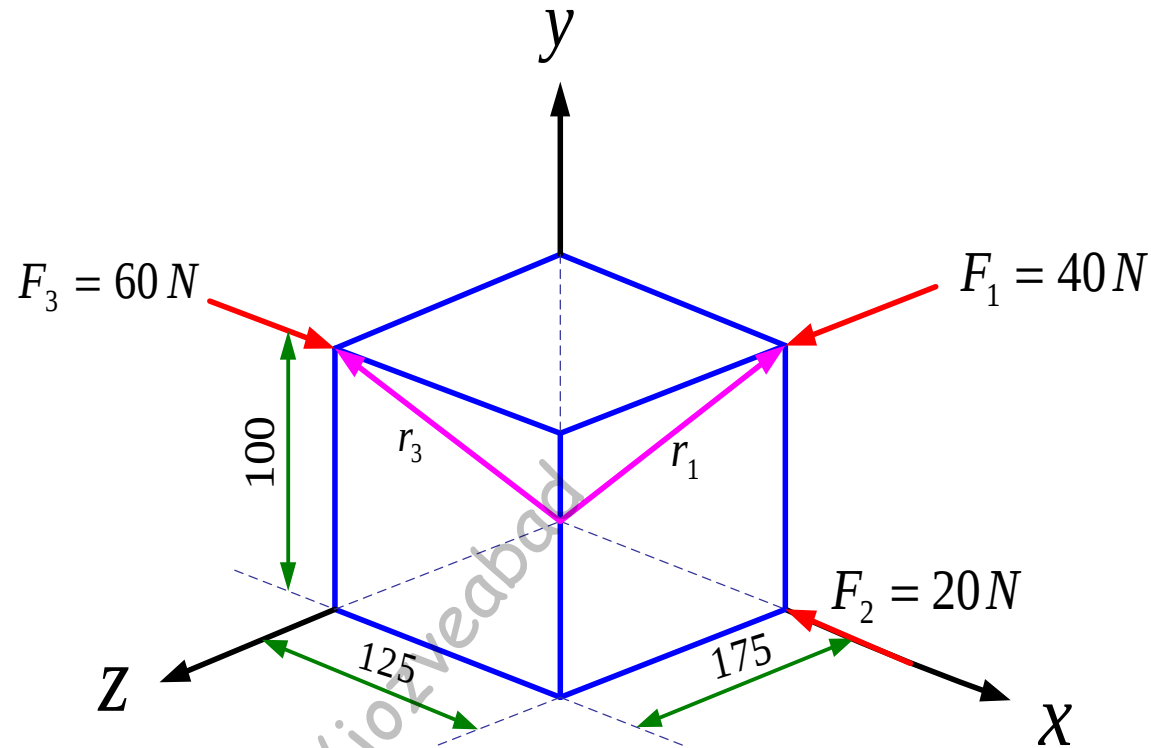
$$\underline{r}_2 = -0.3 \underline{i} \quad \underline{M}_2 = \underline{r}_2 \times \underline{F}_2 = -0.3 \underline{i} \times 500 \underline{j} = -150 \underline{k}$$

$$\underline{r}_3 = 0.3 \underline{j} \quad \underline{M}_3 = 0.3 \underline{j} \times 400 \underline{i} = -120 \underline{k}$$

$$\underline{M} = \underline{M}_1 + \underline{M}_2 + \underline{M}_3 = (-270 + 105\sqrt{3}) \underline{k} = -88.14 \underline{k}$$

مثال: سه نیرو در امتداد یال های یک جسم مکعب مستطیل شکل اعمال میشوند. مطلوب است: 1- تعویض این نیروها با یک رنج معادل 2- بزرگی و جهت برآیند R 3- نقطه ای که محور رنج صفحه YZ را قطع می کند. (ابعاد بر حسب میلیمتر هستند)



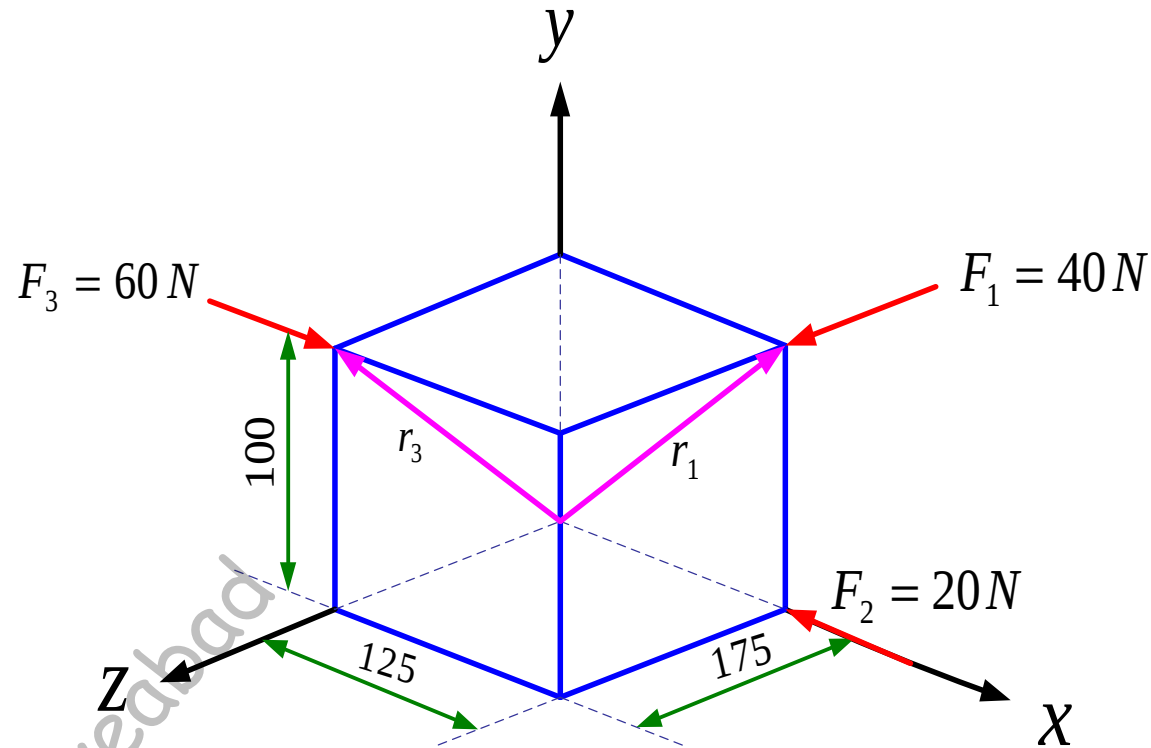


$$\underline{F}_1 = 40 \underline{k} \quad \underline{F}_2 = -20 \underline{i} \quad \underline{F}_3 = 60 \underline{i}$$

$$\underline{R} = \underline{F}_1 + \underline{F}_2 + \underline{F}_3 = 40(\underline{i} + \underline{k})$$

$$\underline{r}_1 = 0.125 \underline{i} + 0.1 \underline{j}$$

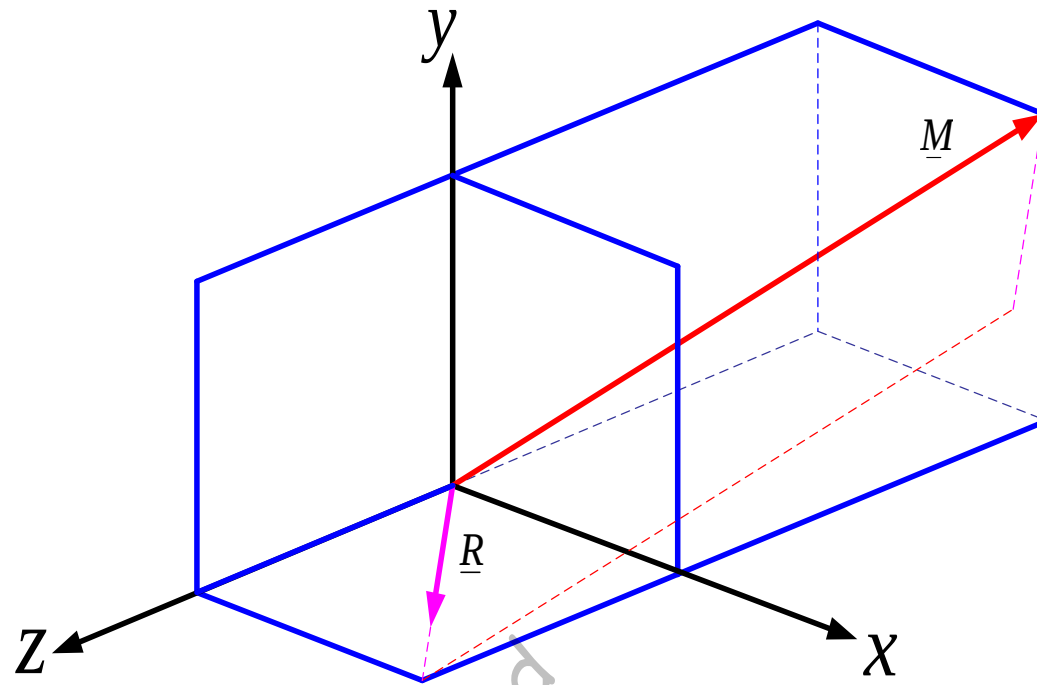
$$\underline{M}_1 = \underline{r}_1 \times \underline{F}_1 = (0.125 \underline{i} + 0.1 \underline{j}) \times (40) \underline{k} = -5 \underline{j} + 4 \underline{i}$$



$$\underline{M}_2 = 0 \quad \underline{F}_3 = 60 \underline{i} \quad \underline{r}_3 = 0.1 \underline{j} + 0.175 \underline{k}$$

$$\underline{M}_3 = \underline{r}_3 \times \underline{F}_3 = (0.1 \underline{j} + 0.175 \underline{k}) \times 60 \underline{i} = -6 \underline{k} + 10.5 \underline{j}$$

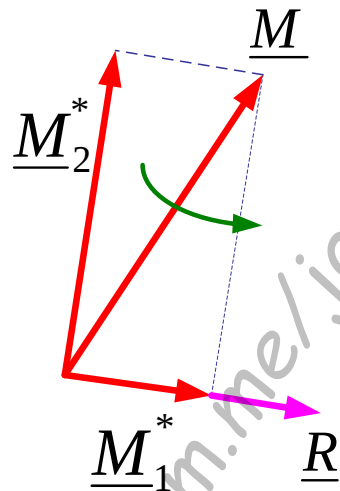
$$\underline{M} = \underline{M}_1 + \underline{M}_2 + \underline{M}_3 = 4 \underline{i} + 5.5 \underline{j} - 6 \underline{k}$$



$$\underline{M} = 4\underline{i} + 5.5\underline{j} - 6\underline{k}$$

$$\underline{R} = 40(\underline{i} + \underline{k})$$

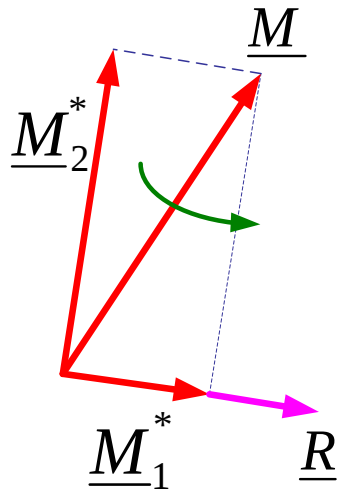
$$\underline{M} = \underline{M}_1^* + \underline{M}_2^*$$



$$\underline{\lambda} = \frac{\underline{R}}{|\underline{R}|} = \frac{40(\underline{i} + \underline{k})}{40\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2}(\underline{i} + \underline{k})$$

$$\underline{M}_1^* = \underline{M} \cdot \underline{\lambda} = 2\sqrt{2} - 3\sqrt{2} = -\sqrt{2}$$

$$\underline{M}_1^* = \underline{M}_1 \underline{\lambda} = -\sqrt{2} \left(\frac{\sqrt{2}}{2}(\underline{i} + \underline{k}) \right) = -(\underline{i} + \underline{k})$$



$$\underline{R} = 40(\underline{i} + \underline{k})$$

$$\underline{M}_1^* = -(\underline{i} + \underline{k}) \quad \underline{M} = 4\underline{i} + 5.5\underline{j} - 6\underline{k}$$

$$\underline{M}_2^* = \underline{M} - \underline{M}_1^* = 5\underline{i} + 5.5\underline{j} - 5\underline{k}$$

$$\underline{M}_2^* = \underline{r} \times \underline{R} = 40(x\underline{i} + y\underline{j} + z\underline{k}) \times (\underline{i} + \underline{k})$$

$$= 40y\underline{i} - 40(x - z)\underline{j} - 40y\underline{k}$$

$$\begin{cases} 40y = 5 \\ 40(x - z) = -5.5 \end{cases}$$

$$x = 0 \Rightarrow y = 1/8 \text{ m}, \quad z = 11/88 \text{ m}$$

۳- تعادل جسم صلب

$$\begin{cases} \underline{R} = \sum \underline{F} = 0 \\ \sum \underline{M} = 0 \end{cases}$$

تعادل کامل

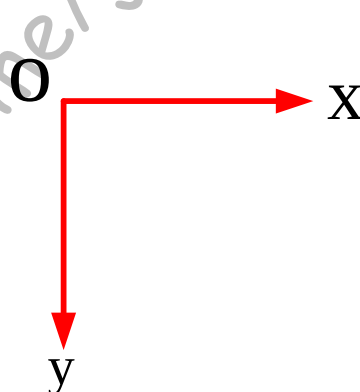
$$\sum \underline{F} = \sum F_x \underline{i} + \sum F_y \underline{j} + \sum F_z \underline{k} = 0$$

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ \sum F_y = 0 \\ \sum F_z = 0 \end{cases}$$

$$\sum \underline{M} = \sum M_x \underline{i} + \sum M_y \underline{j} + \sum M_z \underline{k} = 0$$

$$\begin{cases} \sum M_x = 0 \\ \sum M_y = 0 \\ \sum M_z = 0 \end{cases}$$

برای یک جسم صلب سه بعدی ۶ معادله اسکالر تعادل داریم:



$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ \sum F_y = 0 \\ \sum M_z = \sum M_O = 0 \end{cases}$$

برای یک جسم دوبعدی در صفحه xy

در صفحه XZ

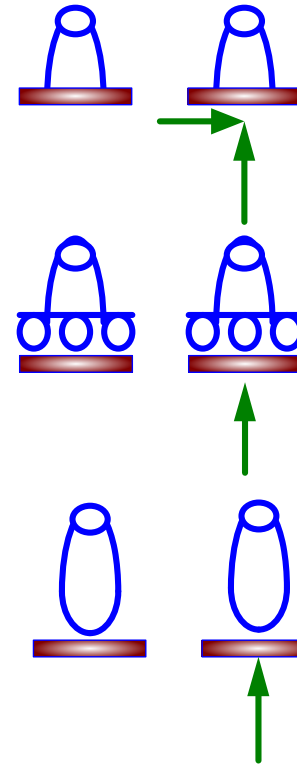
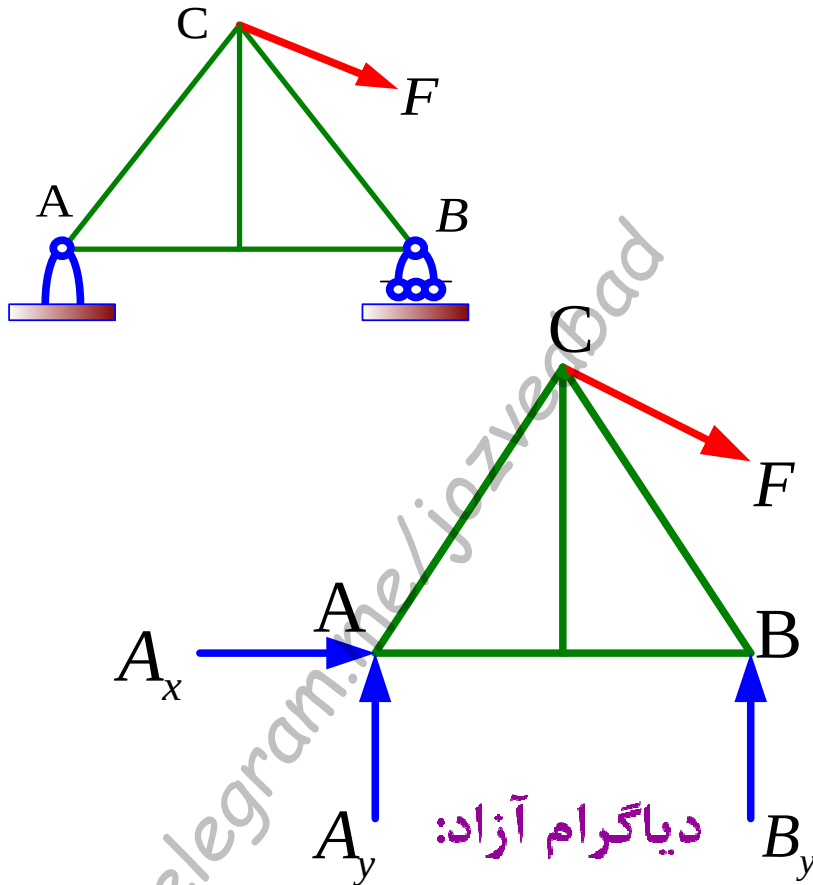
$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ \sum F_z = 0 \\ \sum M_y = \sum M_O = 0 \end{cases}$$

در صفحه yz

$$\begin{cases} \sum F_y = 0 \\ \sum F_z = 0 \\ \sum M_x = \sum M_O = 0 \end{cases}$$

دیاگرام آزاد FBD (Free Body Diagram)

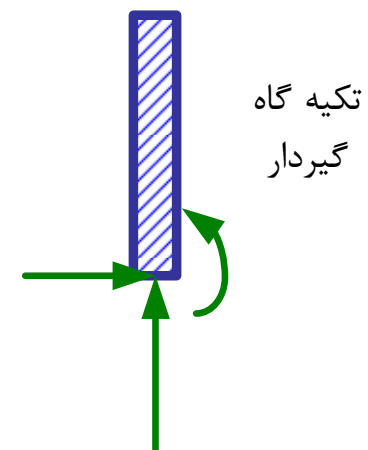
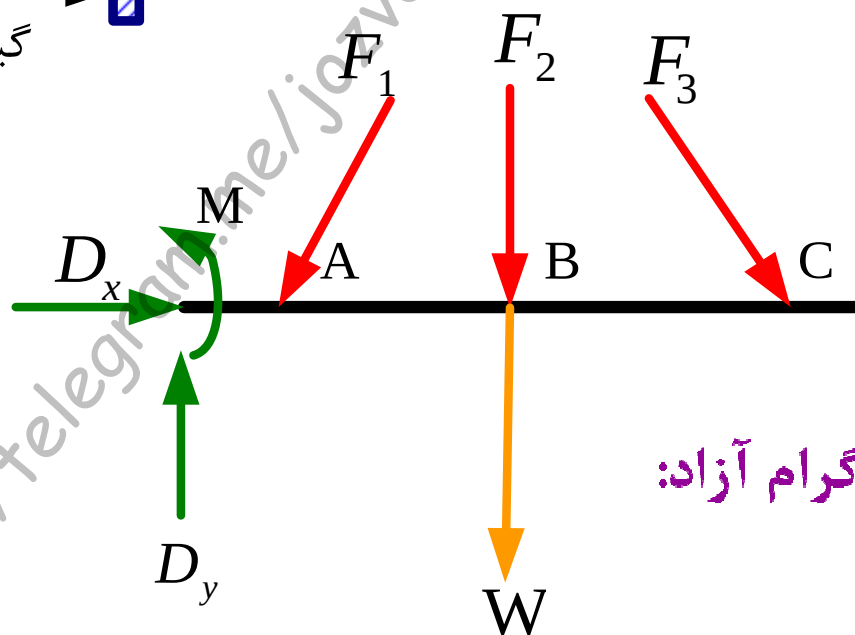
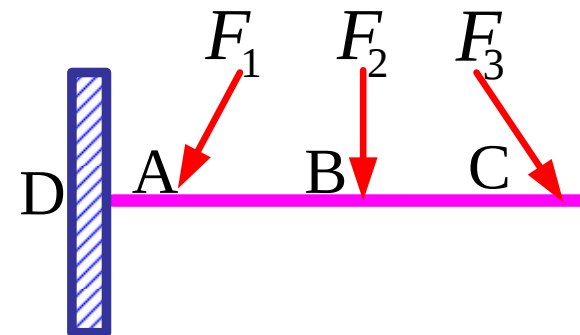
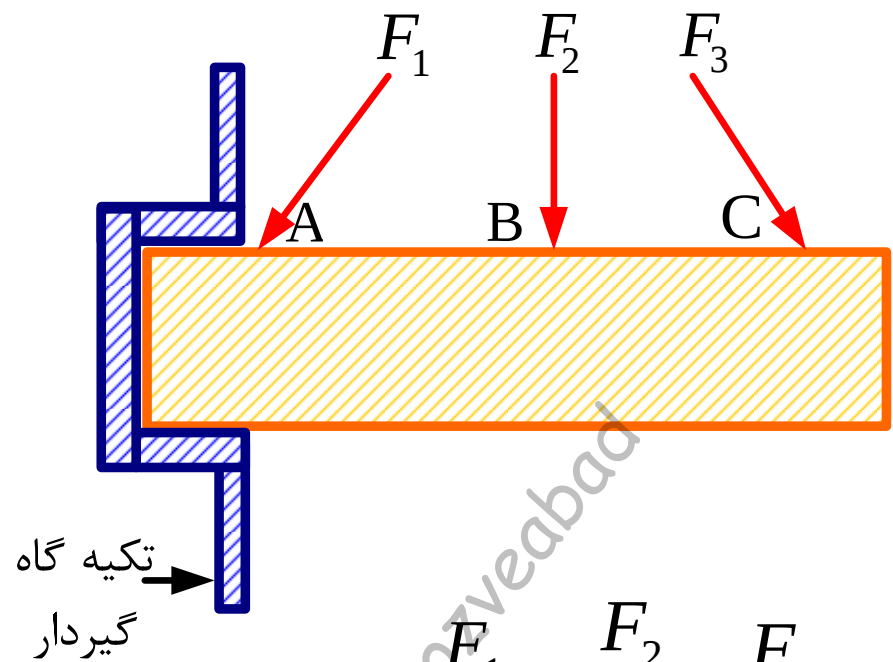
در حل مسائل مکانیک لازم است که نیروهای وارد بر جزء به جزء اجزای تشکیل دهنده سیستم مکانیکی مشخص شوند. برای این کار از دیاگرام آزاد که نمایشگر نیروهای وارد بر جزء به جزء اجزای تشکیل دهنده سیستم مکانیکی است استفاده می کنند.

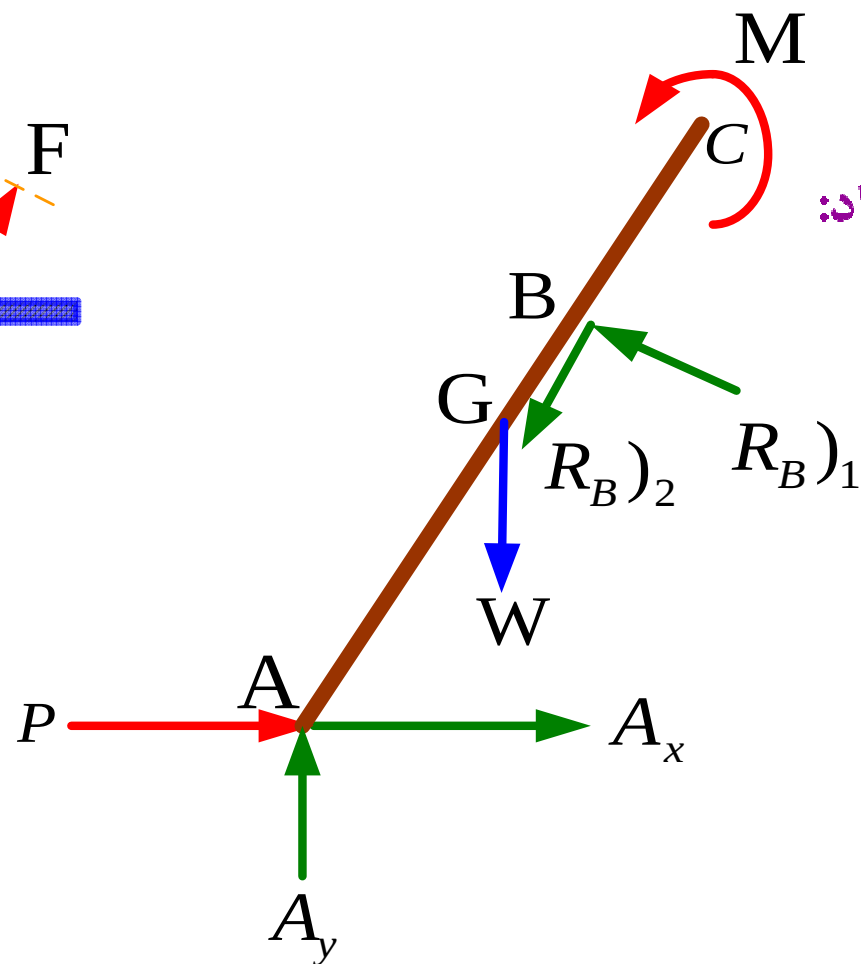
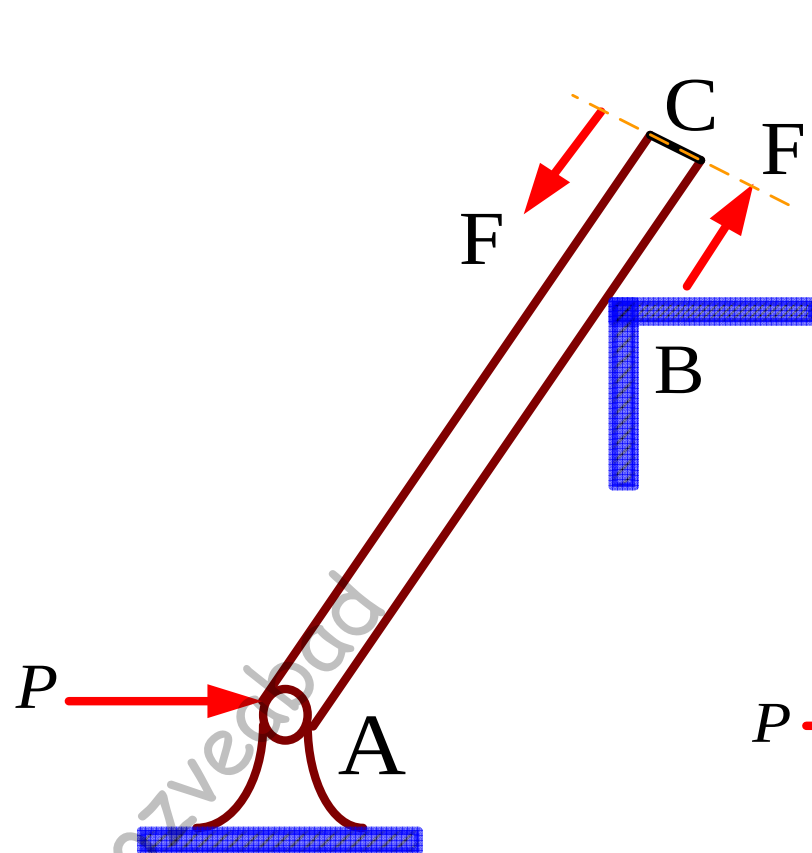


نمایش تکیه گاه مفصلي

نمایش تکیه گاه غلتان

تکیه گاه گهواره اي





دیگرام آزاد:

$$\underline{R_B})_2 = 0 \rightarrow \underline{R_B} = \underline{R_B})_1$$

$$\underline{R_B} = \underline{R_B})_1 + \underline{R_B})_2$$

اگر تکیه گاه B صیقلی باشد:

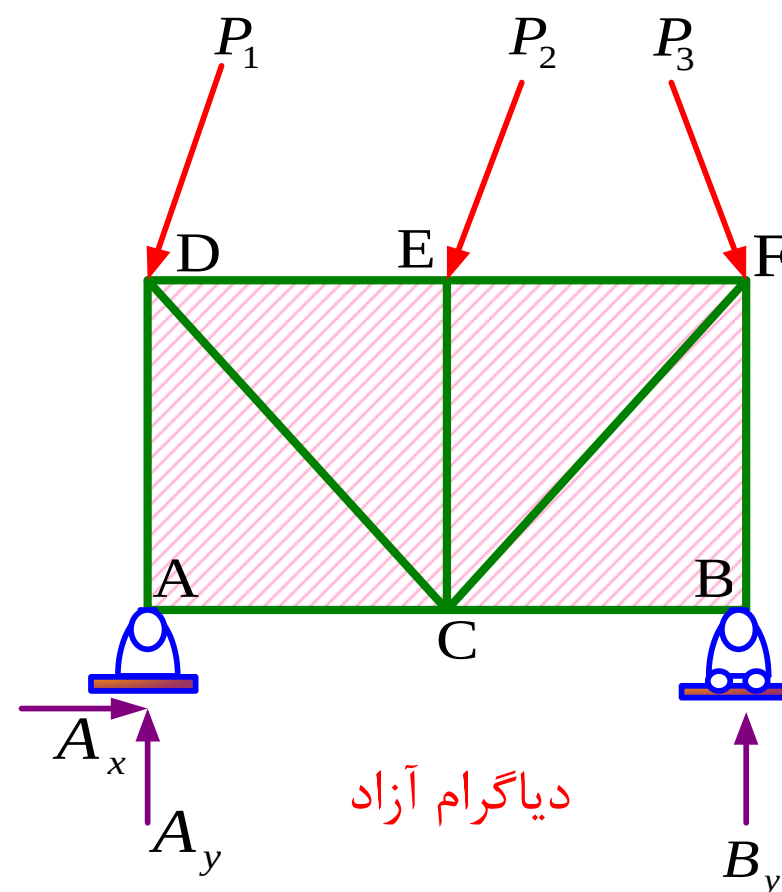
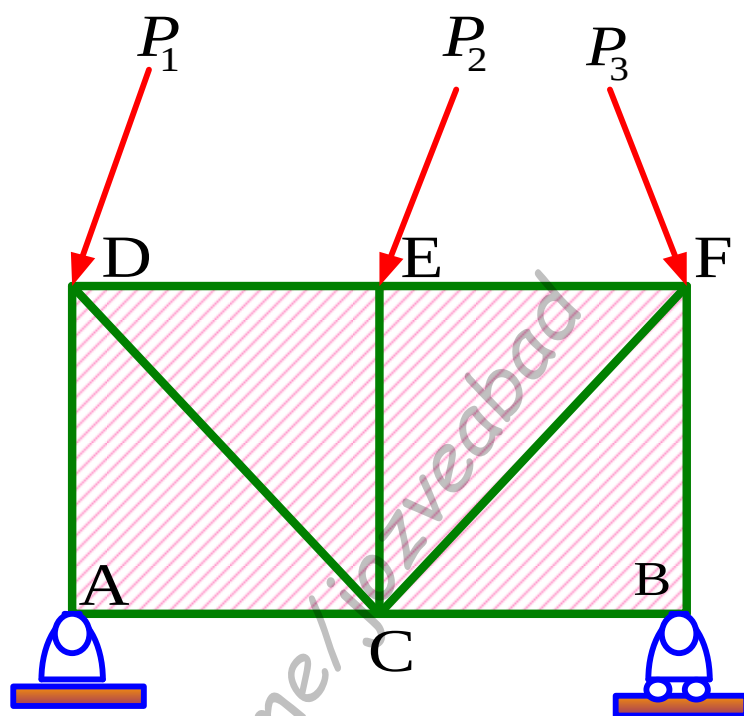
اگر تکیه گاه B غیر صیقلی باشد:
 $\underline{R_B})_2$ به منزله اصطکاک است.

عکس العمل های نامعین استاتیکی

از وزن سازه صرف نظر کرده ایم. ابعاد هم معلوم هستند. نیروهای P_1, P_2, P_3

نیز معلومند. با توجه به این که سازه را دو بعدی فرض کرده ایم بنا بر این سه

معادله تعادل داریم:



دیاگرام آزاد

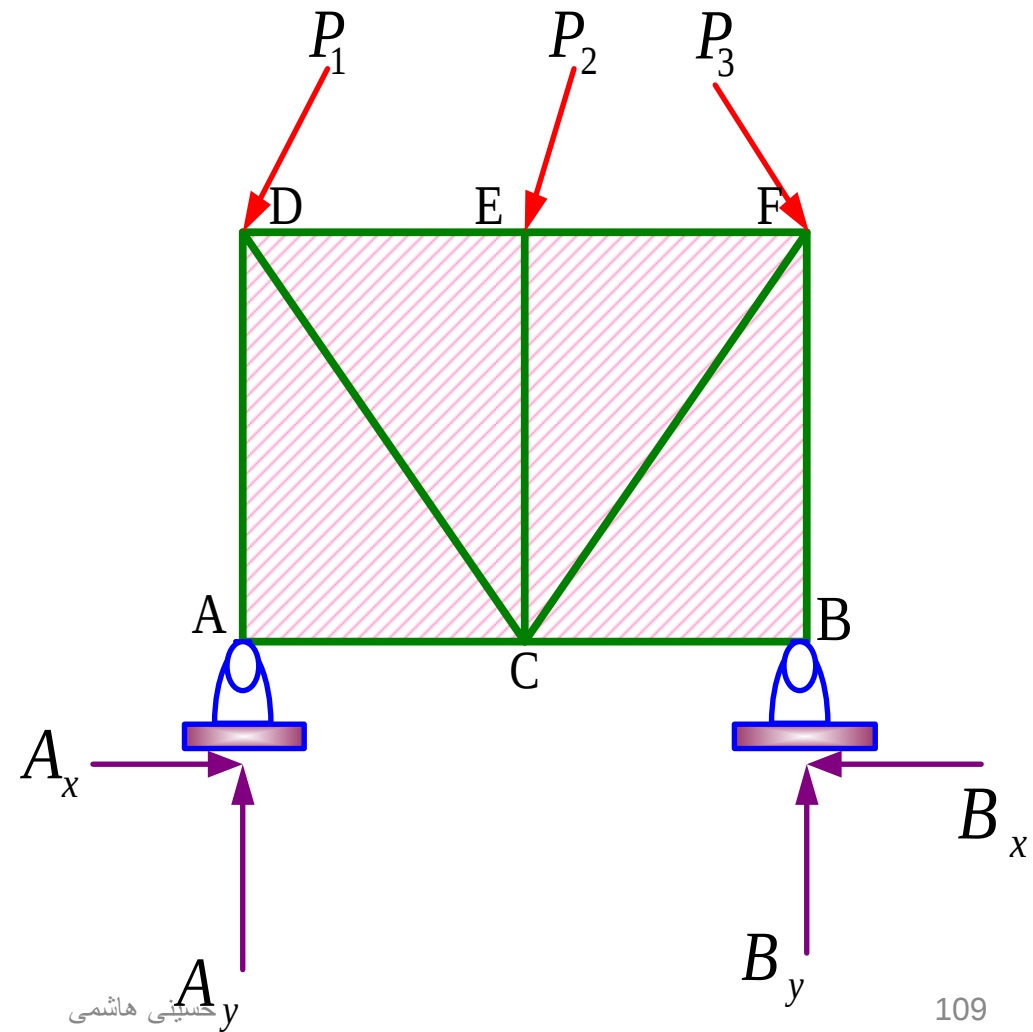
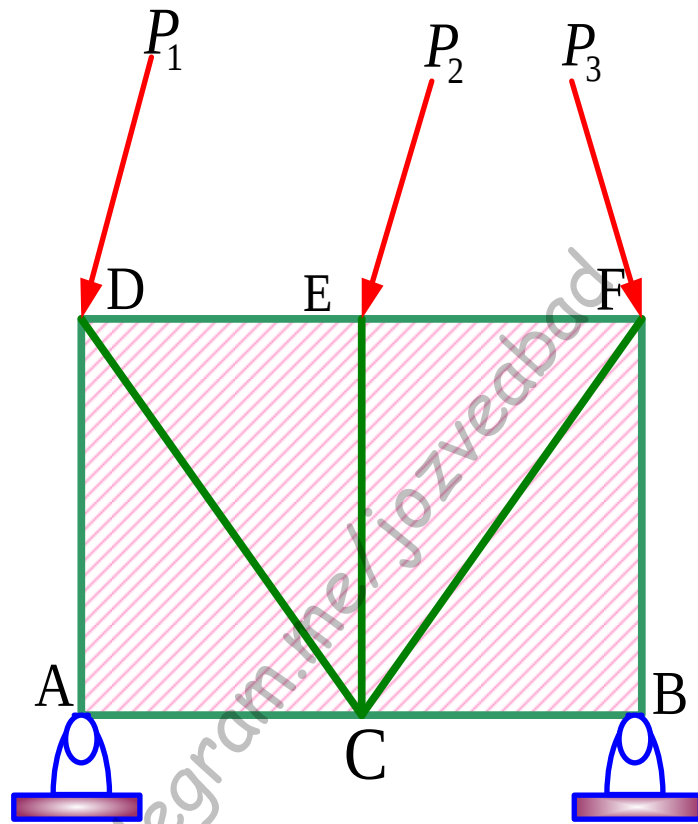
تعیین میشود $B_y \Rightarrow B_y$ تنها مجهول $\Rightarrow \sum M_A = 0$

تعیین میشود $A_y \Rightarrow A_y$ تنها مجهول $\Rightarrow \sum F_y = 0$

تعیین میشود $A_x \Rightarrow A_x$ تنها مجهول $\Rightarrow \sum F_x = 0$

از نظر استاتیکی عکس العمل ها معین اند.

سازه با همان شرایط قبل که این بار در هر دو تکیه گاه مفصل شده



$\sum M_A = 0 \Rightarrow$ تنها مجهول $B_y \Rightarrow B_y$ تعیین میشود

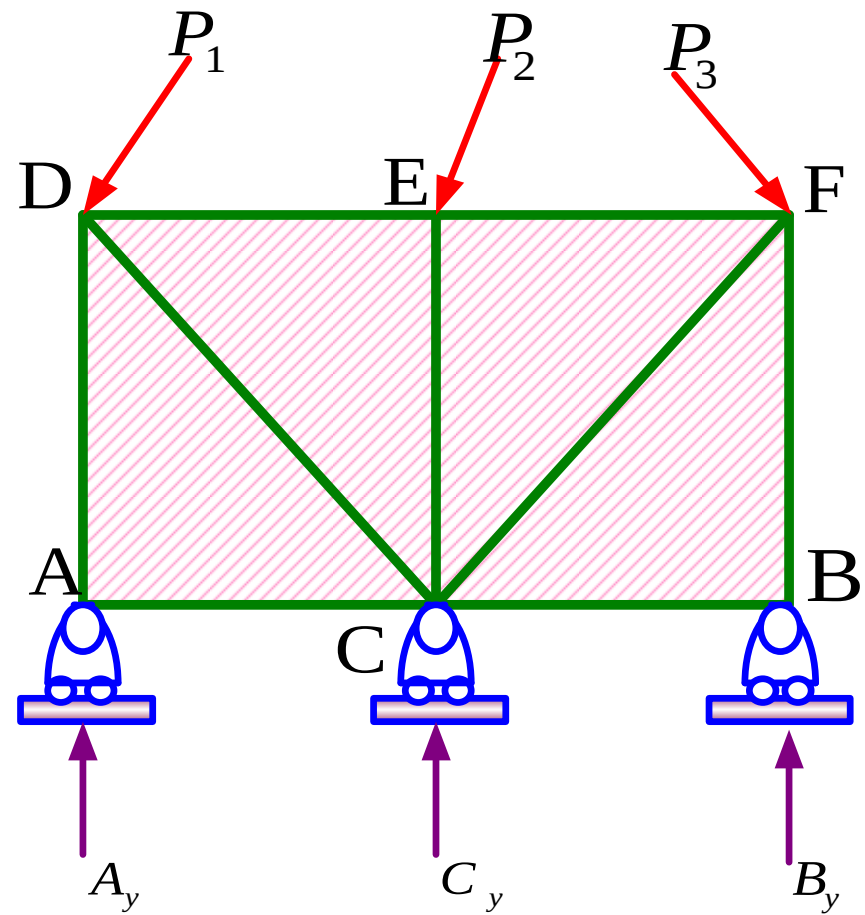
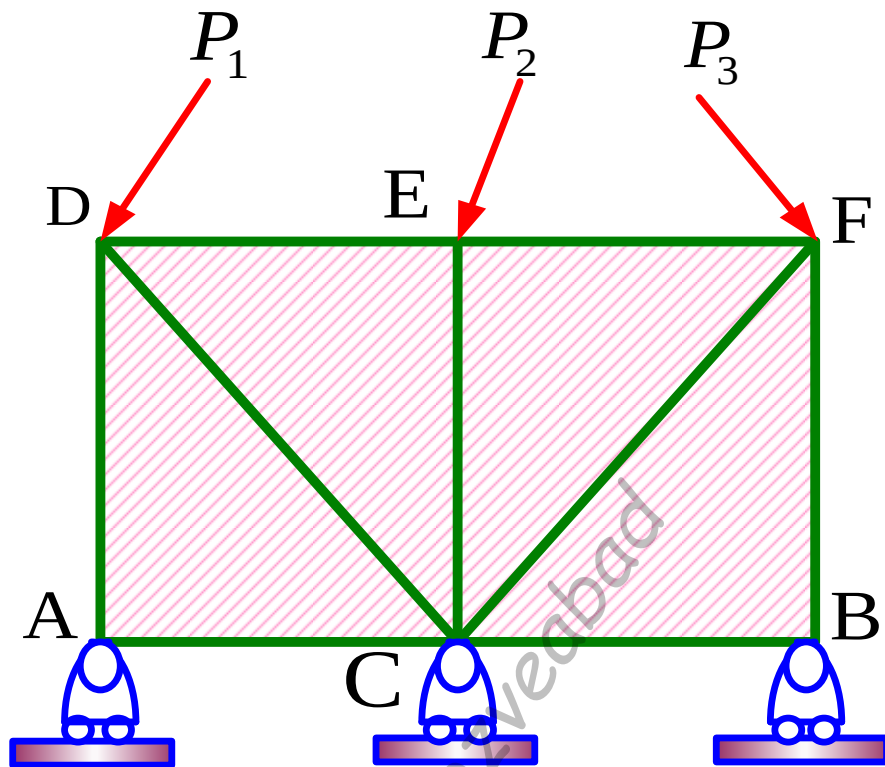
$\sum F_y = 0 \Rightarrow$ تنها مجهول $A_y \Rightarrow A_y$ تعیین میشود

$\sum F_x = 0 \Rightarrow B_x, A_x$ معادله ای با دو مجهول

بنابراین B_x, A_x از نظر استاتیکی عکس العمل های نامعین اند.

$$\sum M_D = 0, \sum M_C = 0, \sum M_B = 0, \sum M_E = 0, \sum M_F = 0$$

هیچکدام از معادلات بالا را نمی توان برای بدست آوردن مجهول جدیدی استفاده کرد.
نوشتن آنها معادله مستقلی را بدست نمی دهد



معادله ای با دو مجهول C_y, B_y می دهد. $\Rightarrow \sum M_A = 0$

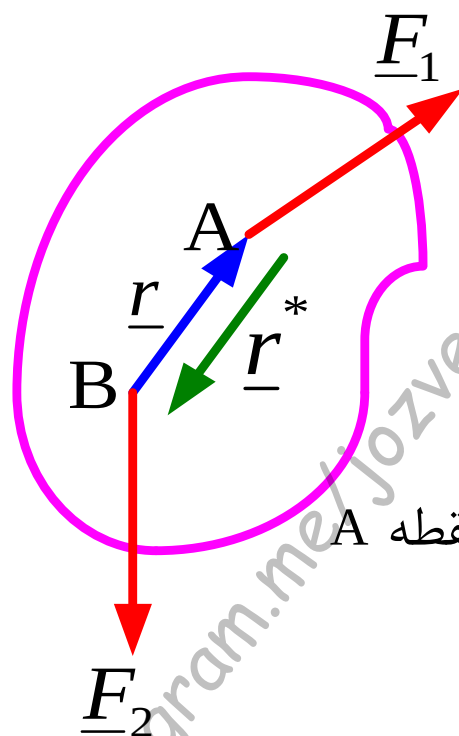
معادله ای با سه مجهول C_y, B_y, A_y می دهد. $\Rightarrow \sum F_y = 0$

معادله ای بدست می آید فاقد مجهولات C_y, B_y, A_y $\Rightarrow \sum F_x = 0$

عکس العمل ها از نظر استاتیکی نا معین اند

تعادل اجسام دو نیرویی

نسبت به نقطه B $\sum \underline{M}_B = \underline{r} \times \underline{F}_1 = 0$



می بایست نیروی F_1 در امتداد بردار $\underline{r}$ باشد.

نسبت به نقطه A $\sum \underline{M}_A = \underline{r}^* \times \underline{F}_2 = -\underline{r} \times \underline{F}_2 = 0$

می بایست نیروی F_2 در امتداد بردار $\underline{r}$ باشد.

برای برقراری شرایط تعادل دورانی یعنی : $\sum \underline{M} = 0$

میبایست دو نیرو در یک امتداد باشند

برای برقراری شرایط تعادل انتقالی یعنی : $\sum \underline{F} = 0 \rightarrow \underline{F}_1 + \underline{F}_2 = 0$

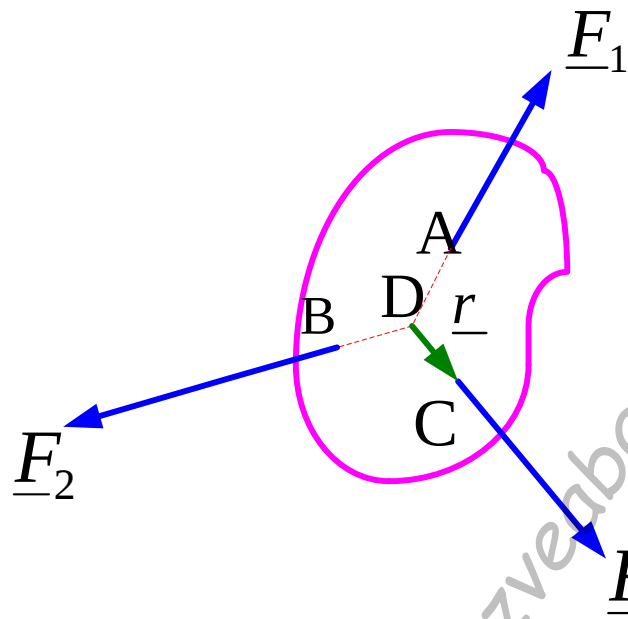
دو نیرو میبایست مساوی و مختلف الجهت باشند

نتیجه کلی: برای تعادل کامل جسم دو نیرویی دو نیرو باید مساوی و مختلف الجهت و نیز در یک راستا باشند

تبادل اجسام سه نیروی

دو بردار F_1, F_2 را امتداد می دهیم تا یکدیگر را در نقطه D قطع کنند.

از D به نقطه اثر F_3 وصل می کنیم.



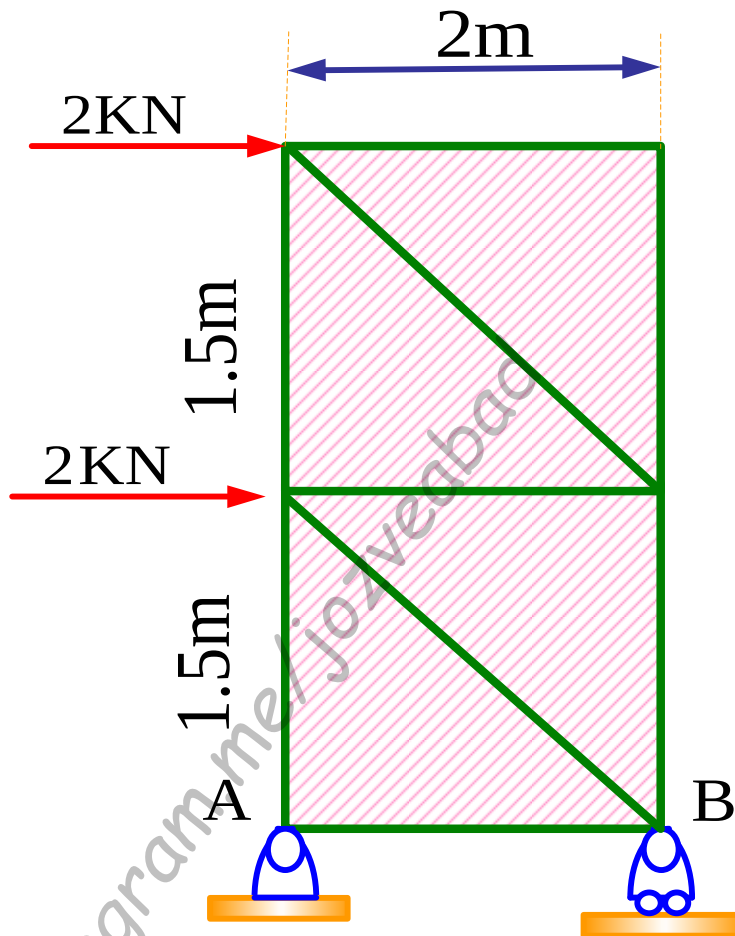
$$\sum \underline{M}_D = \underline{r} \times \underline{F}_3 = 0 \quad \text{تبادل دورانی:}$$

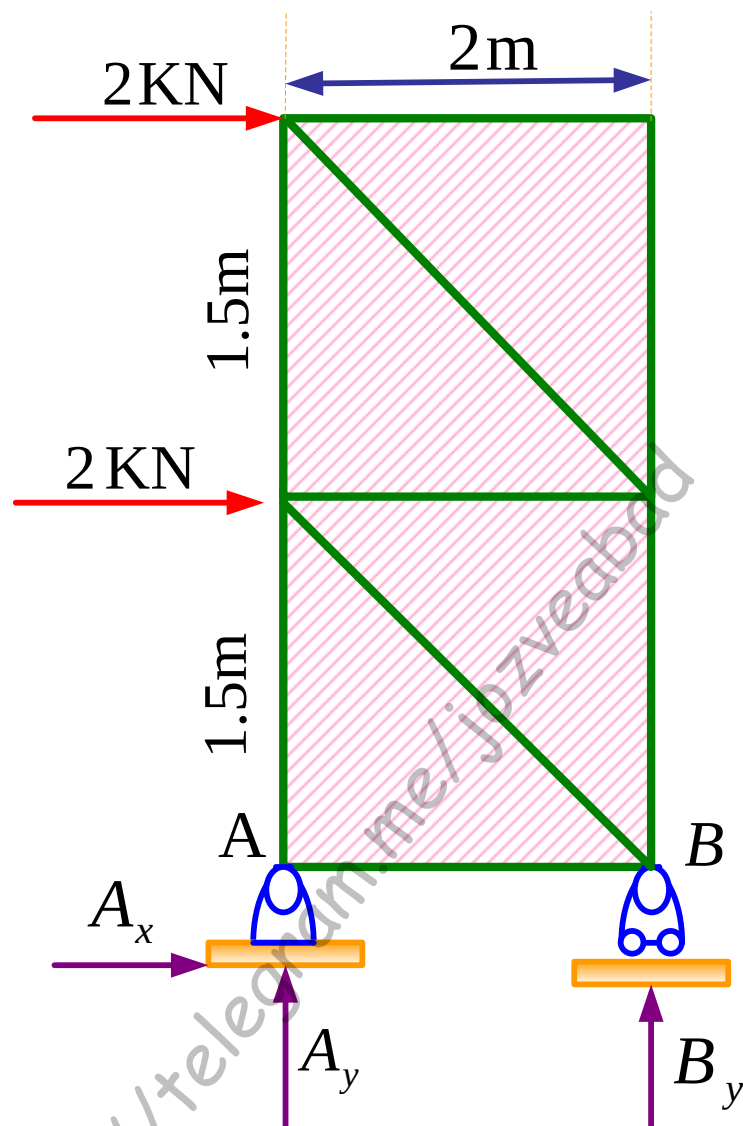
سه نیرو می بایست متقارب باشند.

$$\sum \underline{F} = \underline{F}_1 + \underline{F}_2 + \underline{F}_3 = 0 \quad \text{تبادل انتقالی:}$$

نتیجه: برای تبادل کامل جسم سه نیروی می بایست: سه نیرو متقارب بوده و همچنین شرط تبادل انتقالی نیز برقرار باشد

مثال: برای خردای نشان داده شده در شکل مؤلفه های عکس العمل در تکیه گاه های A , B را بیابید.





$$\sum F_x = 0 \Rightarrow A_x + 2 + 2 = 0$$

$$A_x = -4KN$$

علامت منفی نشان می دهد جهت آن مخالف جهتی است که ما فرض کرده ایم.

$$\sum M_A = 0 \Rightarrow 2B_y - 2 \times 3 - 2(1.5) = 0$$

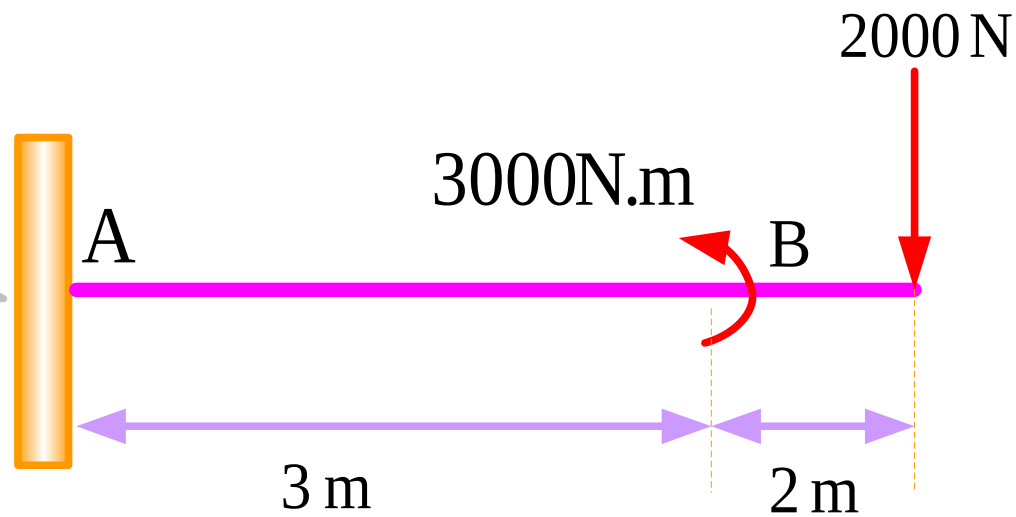
$$B_y = 4.5KN$$

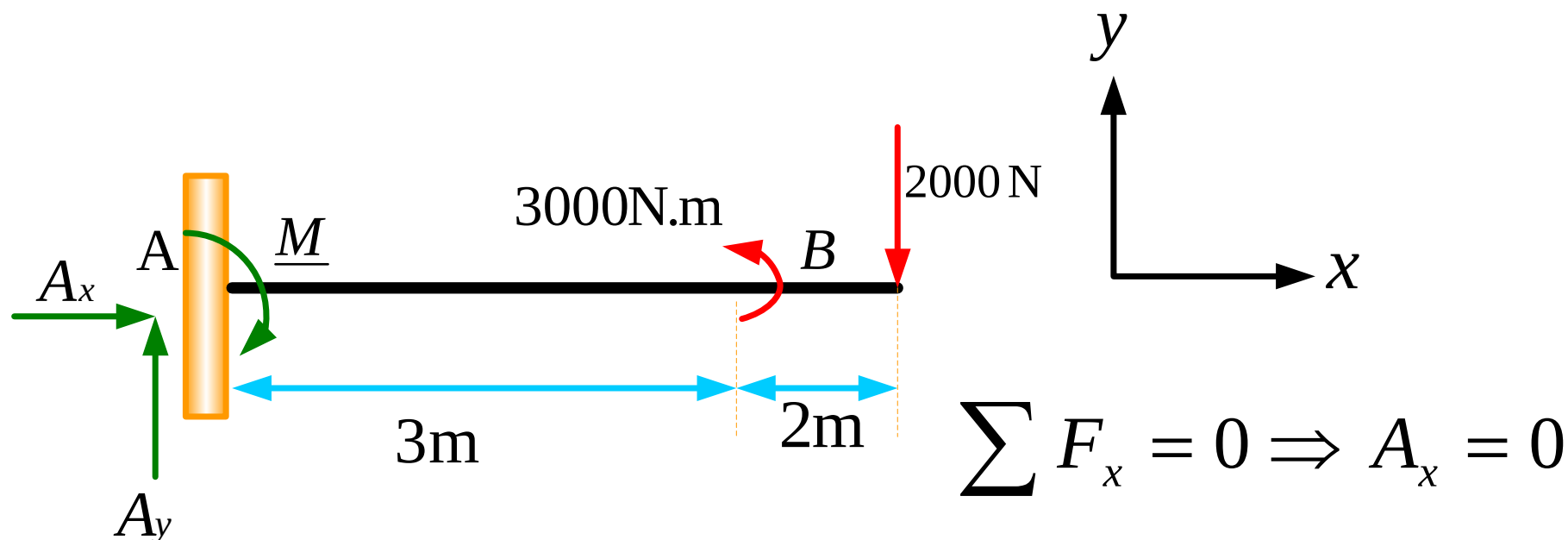
$$\sum F_y = 0 \Rightarrow A_y + B_y = 0 \rightarrow A_y = -B_y$$

$$A_y = -4.5KN$$

این ساختار از نظر استاتیکی عکس العمل هایش معین اند.

مثال: برای تیر نشان داده شده در شکل عکس العمل ها را در A تعیین کنید.





$$\sum F_x = 0 \Rightarrow A_x = 0$$

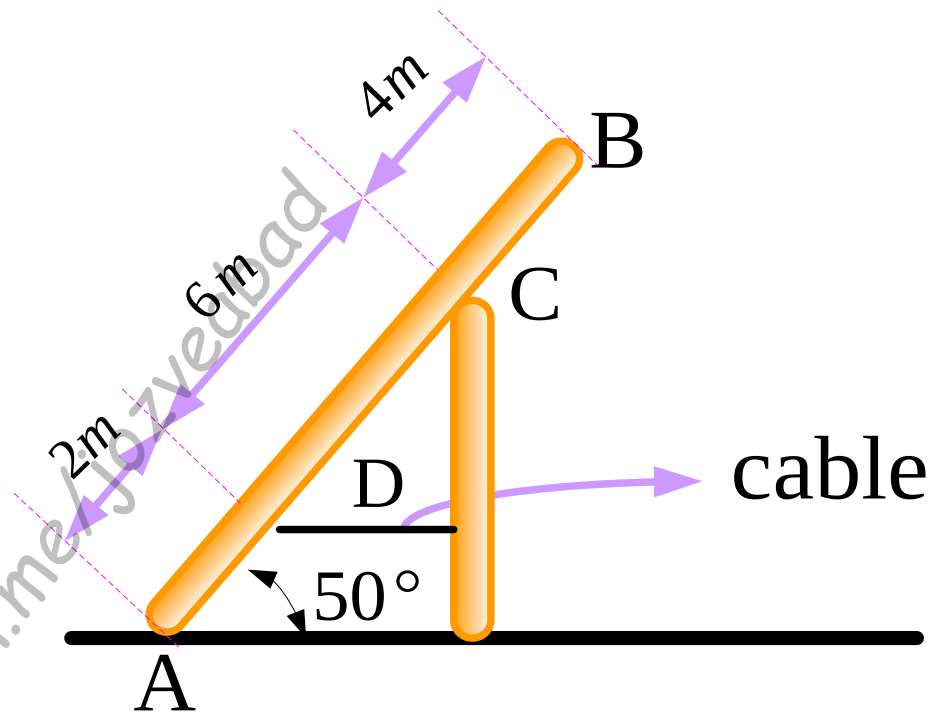
$$\sum F_y = 0 \Rightarrow A_y - 2000 = 0 \Rightarrow A_y = 2000 \text{ N}$$

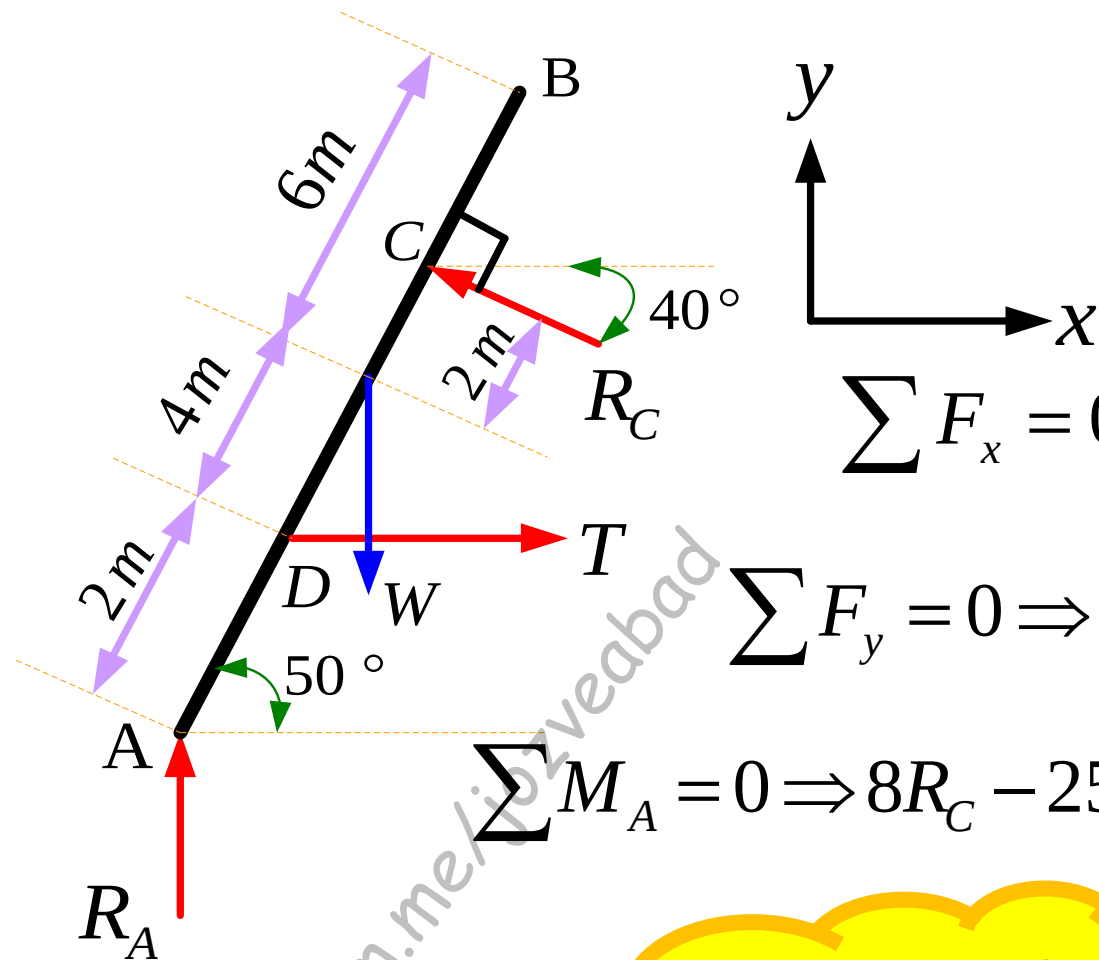
$$\sum M_A = 0 \Rightarrow 2000 \times 5 - 3000 + M = 0$$

$$M = -7000 \text{ N.m}$$

علامت منفی نشان می دهد جهت آن مخالف آن جهتی است که انتخاب کرده ایم.

مثال: میله AB به وزن 250N در وضعیت نشان داده شده در شکل قرار گرفته است چنانچه سطوح تکیه گاهی میله صیقلی فرض شوند مطلوبست تعیین کشش در کابل و نیروها در نقاط A و C.





$$\sum F_x = 0 \Rightarrow T - R_C \cos 40 = 0$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow R_C \sin 40 + R_A - 250 = 0$$

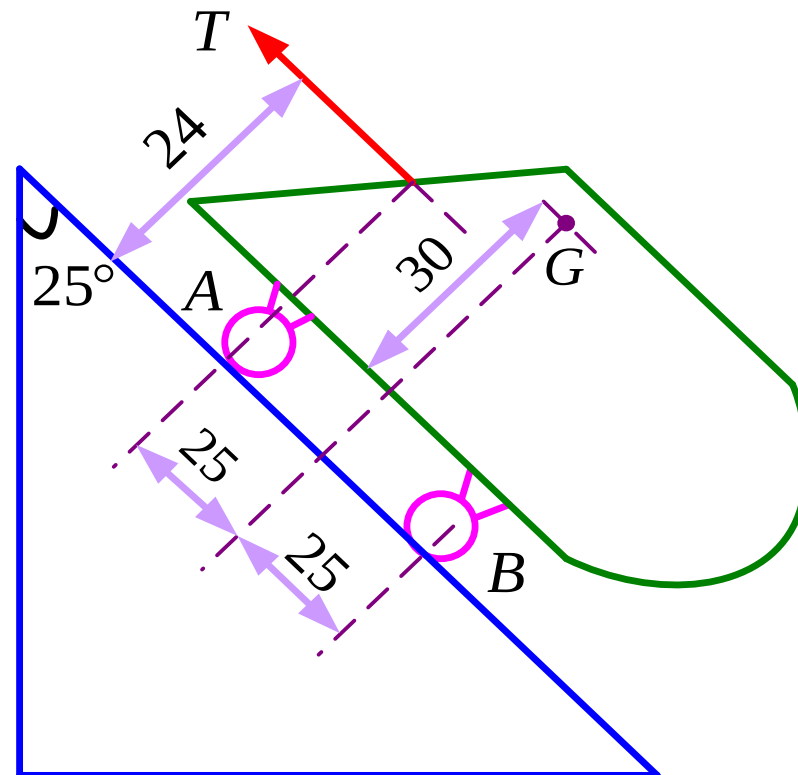
$$\sum M_A = 0 \Rightarrow 8R_C - 250 \times (6 \cos 50) - 2T \sin 50 = 0$$

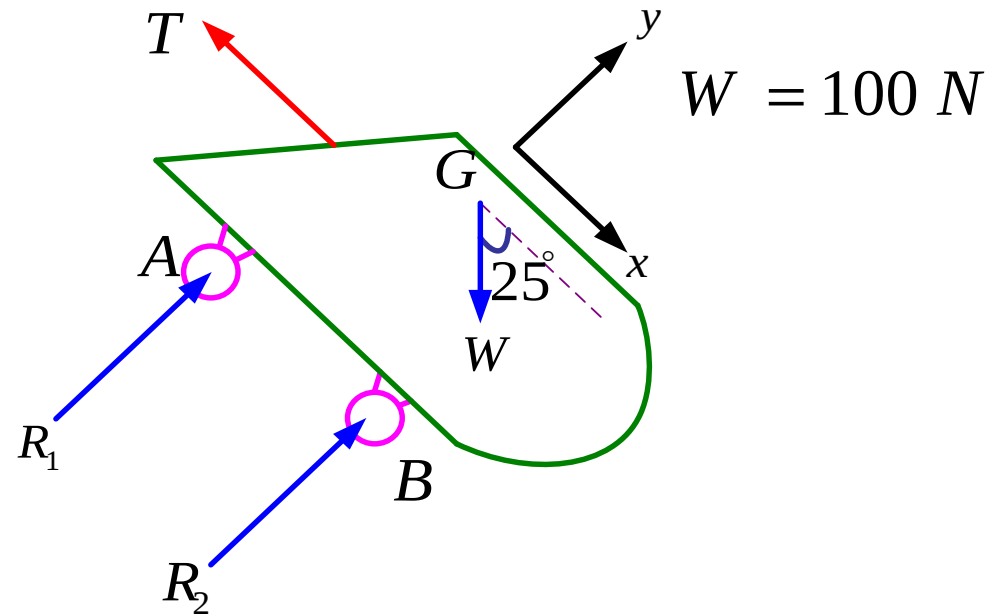
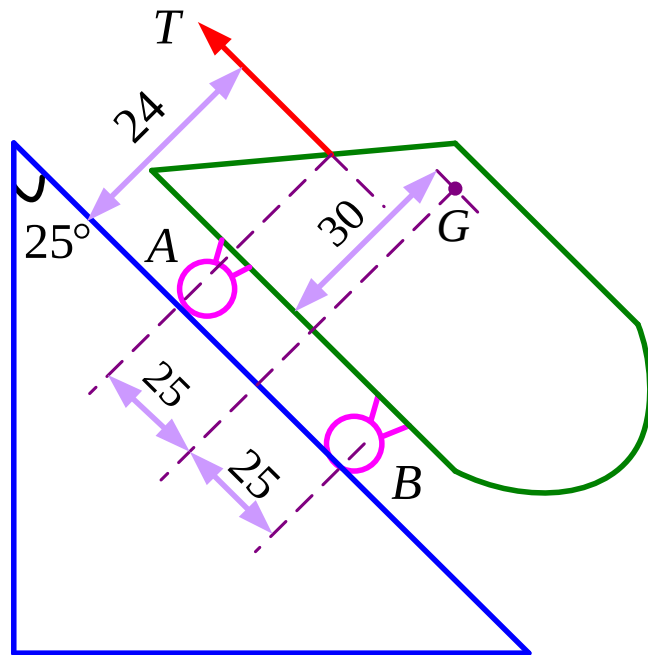
$$R_C = 141.3 \text{ N}$$

$$R_A = 159.3 \text{ N}$$

$$T = 108.23 \text{ N}$$

مثال: مدل ارابه ای به وزن 100N که مرکز ثقل آن در نقطه G می باشد بر روی سطح شیبداری مطابق شکل قرار گرفته است و به وسیله نیروی کشش T در امتداد سطح شیبدار نگهداری شده است. مطلوبست تعیین نیروی T و عکس العمل های چرخ ها در صورتیکه از اصطکاک صرف نظر شود. (ابعاد بر حسب سانتیمتر هستند)





$$\sum F_x = 0 \Rightarrow W \cos 25^\circ - T = 0 \Rightarrow T = 90.6 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0 \Rightarrow$$

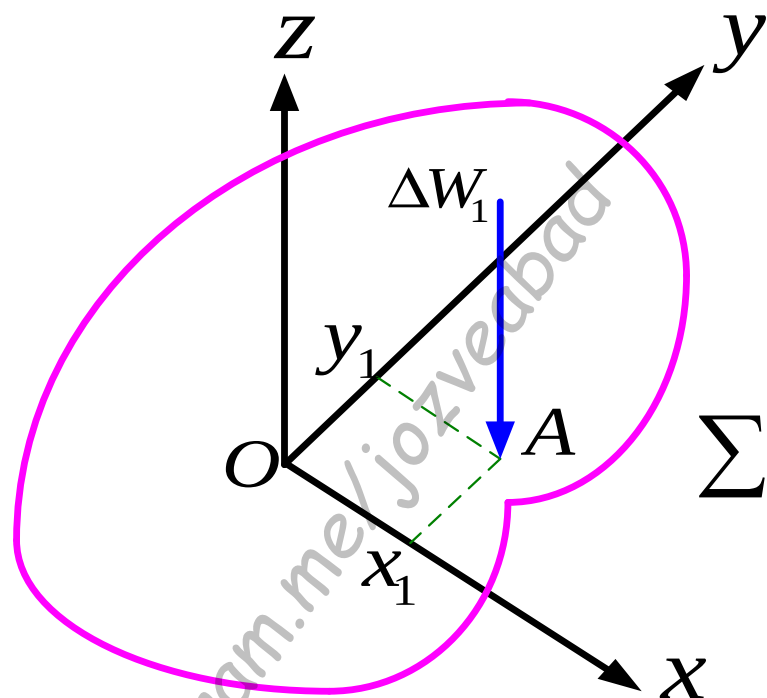
$$0.5R_2 + 0.24T - 0.3W \cos 25^\circ - 0.25W \sin 25^\circ = 0 \Rightarrow R_2 = 32.02 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow R_1 + R_2 - W \sin 25^\circ = 0 \quad R_1 = 10.3 \text{ N}$$

۴- تعیین مراکز

مراکز: ثقل و حجم

مرکز ثقل: نقطه اثر برآیند نیروهای وارده از طرف زمین بر ذرات تشکیل دهنده جسم است.



$$M_x^{(1)} = y_1 \Delta w_1$$

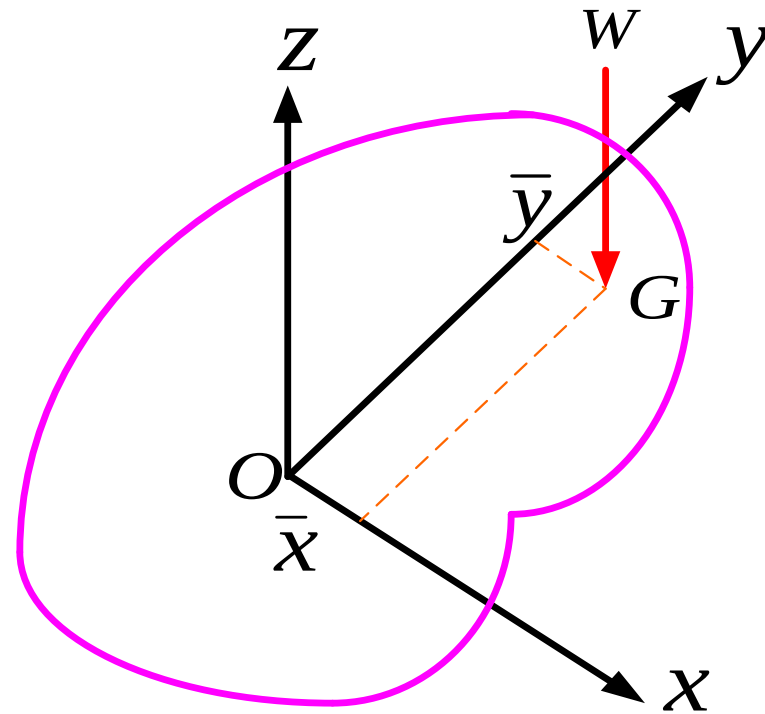
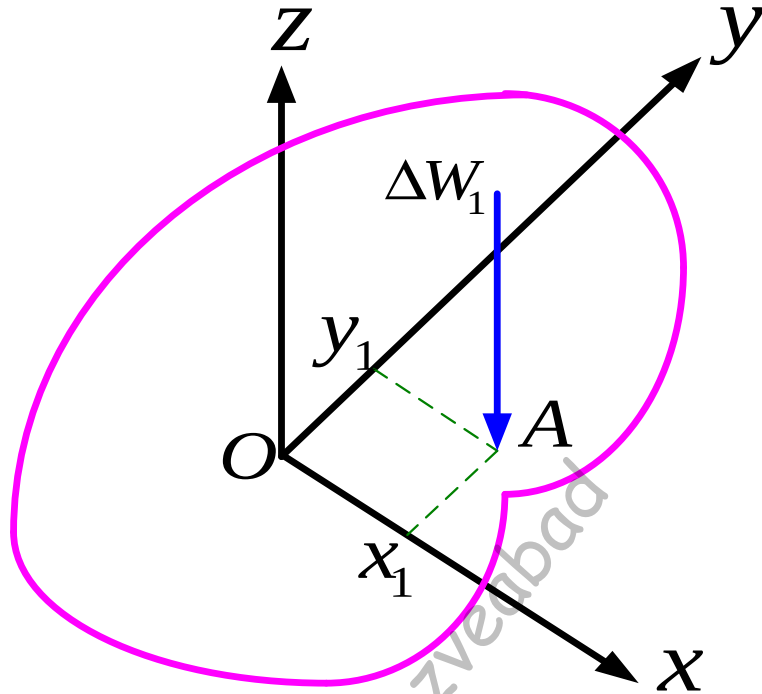
$$M_y^{(1)} = x_1 \Delta w_1$$

$$M_x^{(2)} = y_2 \Delta w_2$$

$$M_y^{(2)} = x_2 \Delta w_2$$

$$\sum M_x^{(i)} = \sum_{i=1}^{\infty} y_i \Delta w_i$$

$$\sum M_y^{(i)} = \sum_{i=1}^{\infty} x_i \Delta w_i$$



$$w\bar{x} = \sum M_y^{(i)} \quad w = \sum \Delta w_i \quad \sum M_y^{(i)} = \sum_{i=1}^{\infty} x_i \Delta w_i \quad \bar{x} = \frac{\sum x_i \Delta w_i}{\sum \Delta w_i} = \frac{\int x dw}{\int dw}$$

$$w\bar{y} = \sum M_x^{(i)} \quad \sum M_x^{(i)} = \sum_{i=1}^{\infty} y_i \Delta w_i \quad \bar{y} = \frac{\sum y_i \Delta w_i}{\sum \Delta w_i} = \frac{\int y dw}{\int dw}$$

مرکز ثقل

$$\bar{x} = \frac{\int x dw}{\int dw}, \quad \bar{y} = \frac{\int y dw}{\int dw}, \quad \bar{z} = \frac{\int z dw}{\int dw}$$

gram.me/jozveabad

مرکز حجم

$$w = \gamma v \Rightarrow \gamma = \rho g \Rightarrow w = \rho v g$$

وزن مخصوص

$$\Rightarrow \text{اگر جسم هموزن باشد} \quad dw = \rho g dv.$$

$$\bar{x} = \frac{\int x dw}{\int dw} = \frac{\rho g \int x dv}{\rho g \int dv} = \frac{\int x dv}{\int dv}$$

$$\bar{x} = \frac{\int x dv}{\int dv}, \quad \bar{y} = \frac{\int y dv}{\int dv}, \quad \bar{z} = \frac{\int z dv}{\int dv}$$

مرکز سطح و گشتاور اول سطح

$$v = At$$

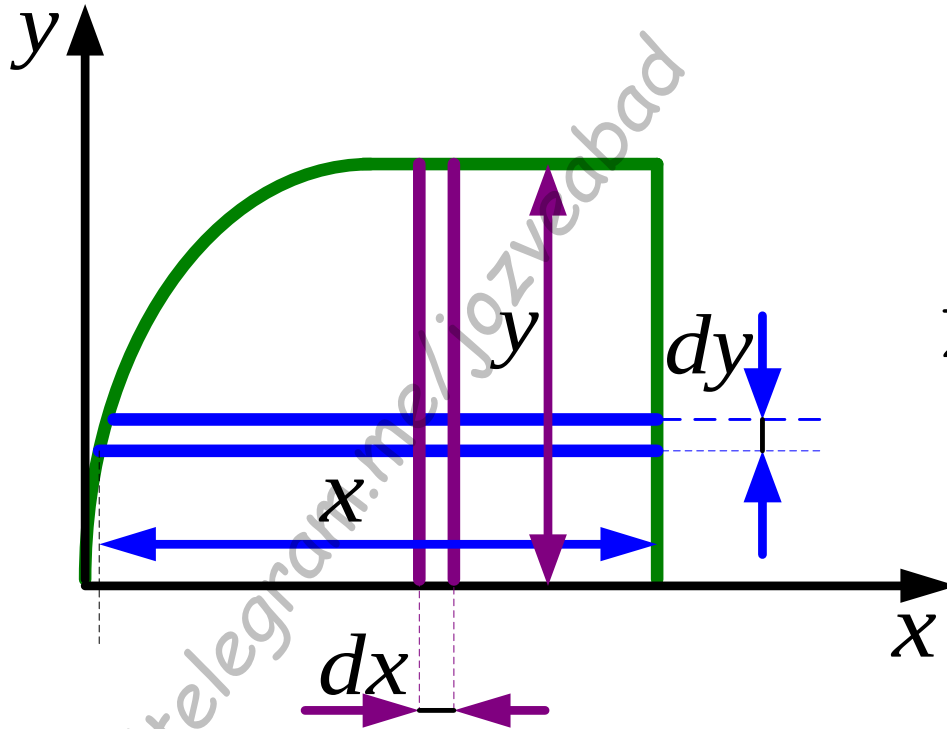
ضخامت (ثابت) $\leftarrow \rightarrow$ سطح مقطع

$$dv = t dA$$

$$dA = x dy$$

$$dA = y dx$$

$$\bar{x} = \frac{\int x dv}{\int dv} = \frac{t \int x dA}{t \int dA} = \frac{\int x dA}{\int dA}$$



اگر سطح در صفحه X, Y باشد

مرکز سطح

$$\bar{x} = \frac{\int x_{el} dA}{\int dA} \qquad \bar{y} = \frac{\int y_{el} dA}{\int dA}$$

$$Q_y = \int x dA$$

گشتاور اول سطح حول y

$$Q_x = \int y dA$$

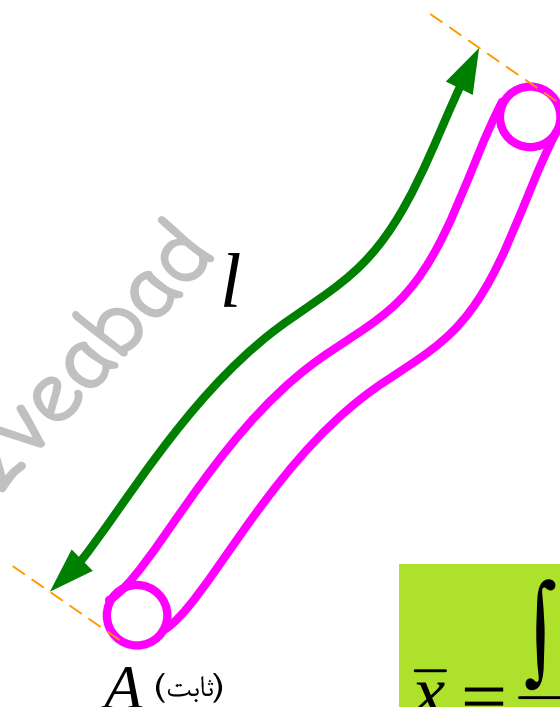
گشتاور اول سطح حول x

مرکز خط

جسمی که دو بعد آن درمقابل بعد سوم ناچیز باشد.

$$v = Al \quad dv = A dl$$

$$\bar{x} = \frac{\int x dv}{\int dv} = \frac{A \int x dl}{A \int dl} = \frac{\int x dl}{\int dl}$$

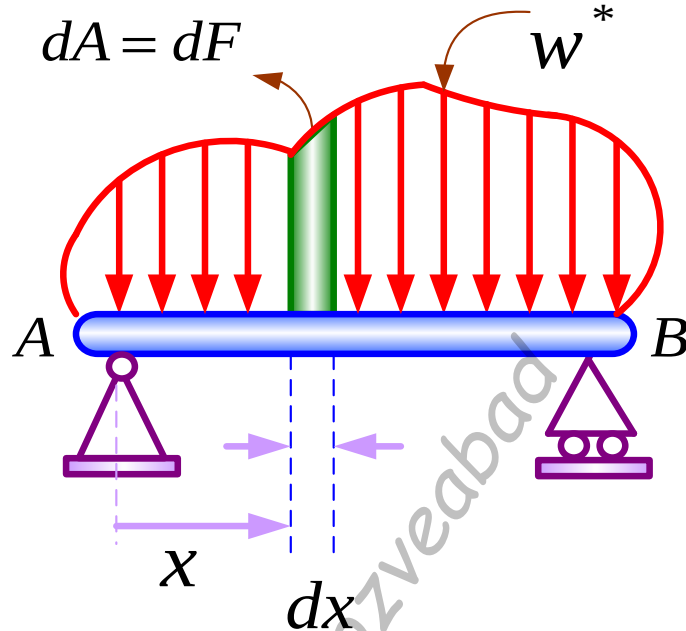


$$\bar{x} = \frac{\int x dl}{\int dl}, \quad \bar{y} = \frac{\int y dl}{\int dl}, \quad \bar{z} = \frac{\int z dl}{\int dl}$$

مرکز نیرو

w^* شدت نیرو در واحد طول $\leftarrow$ نیروی توزیعی در واحد طول

واحد آن در دستگاه (M K S) N/m است. $dA = dF$ w^*

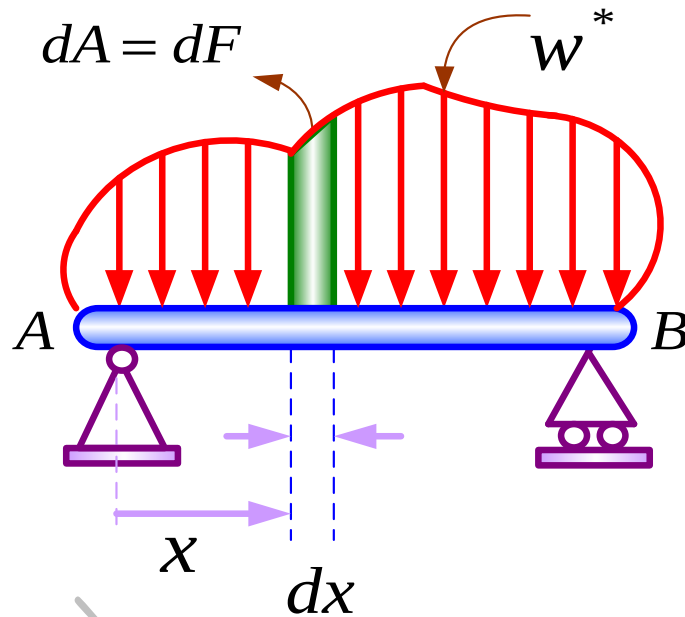


$$w^* = w^*(x) \quad (\text{شدت نیرو})$$

$$dF = dA = w^*(x)dx$$

$$F = A = \int w^*(x)dx$$

سطح زیر منحنی تغییرات شدت نیرو بر حسب طول تیر



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

$$\bar{x} = \frac{\int x dF}{\int dF}$$

$$dF = dA = w^*(x) dx$$

$$\Rightarrow \bar{x} = \frac{\int x dA}{\int dA} = \frac{\int x dF}{\int dF} = \frac{\int x w^*(x) dx}{\int w^*(x) dx}$$

قضایای پاپوس گلدینوس (Popus Goldinus)

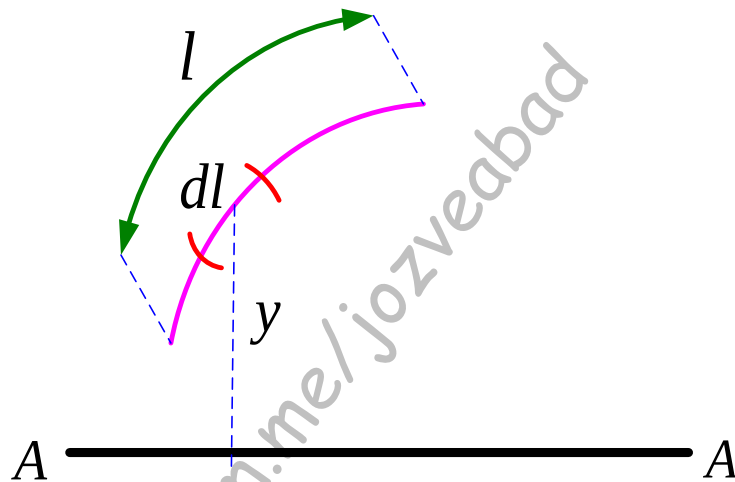
قضیه یک

$$dA = 2\pi y dl$$

$$A = 2\pi \int y dl$$

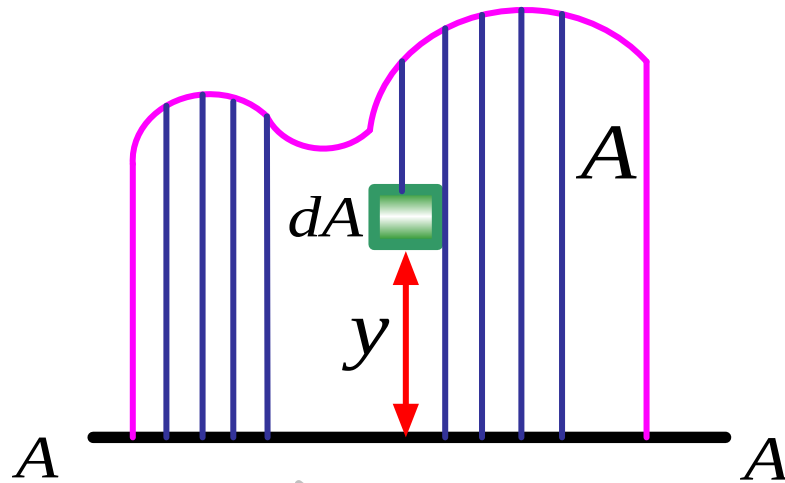
$$\bar{y} = \frac{\int y dl}{\int dl} = \frac{\int y dl}{l}$$

$$\mapsto A = 2\pi \bar{y} l$$



سطح جاروب شده بوسیله دوران خط به طول L برابر است با حاصل ضرب طول خط مولد سطح در مسافتی که مرکز خط در طی حادث شدن سطح می پیماید.

قضیه دو



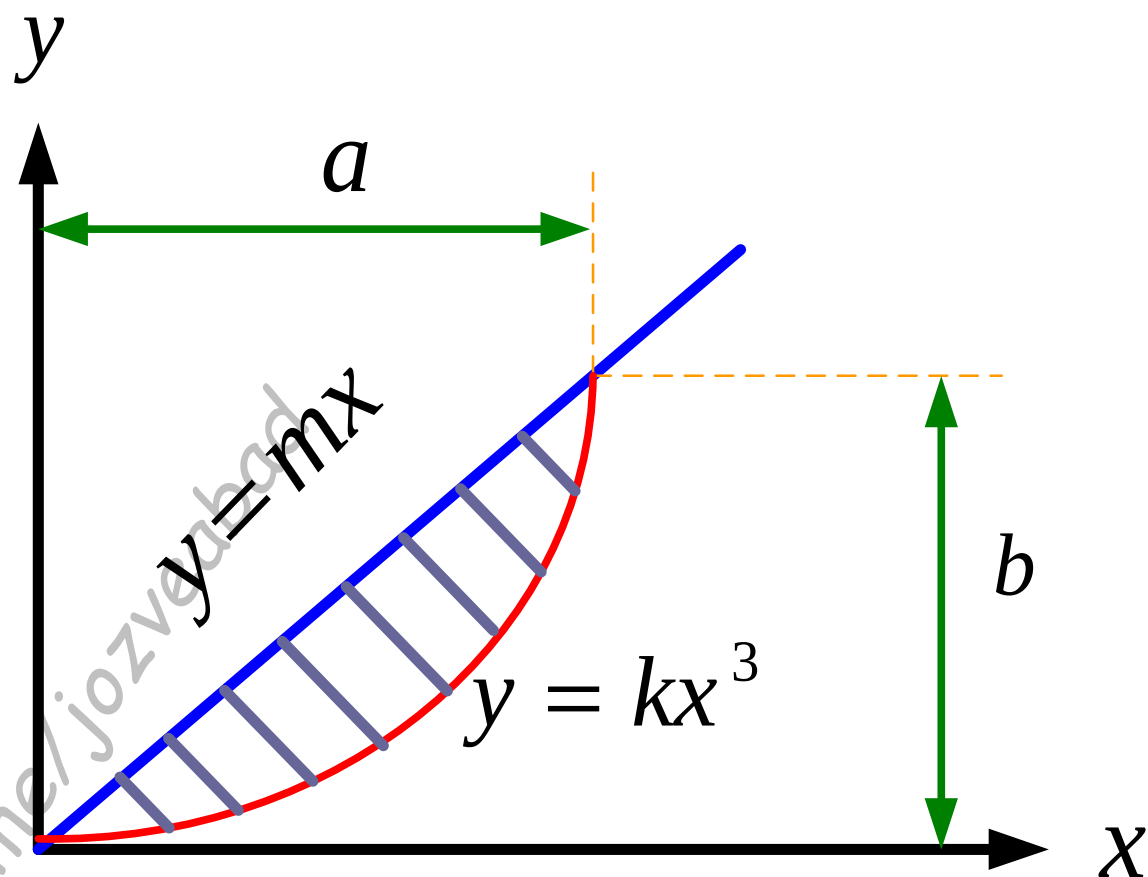
$$dv = 2\pi y dA \quad v = 2\pi \int y dA$$

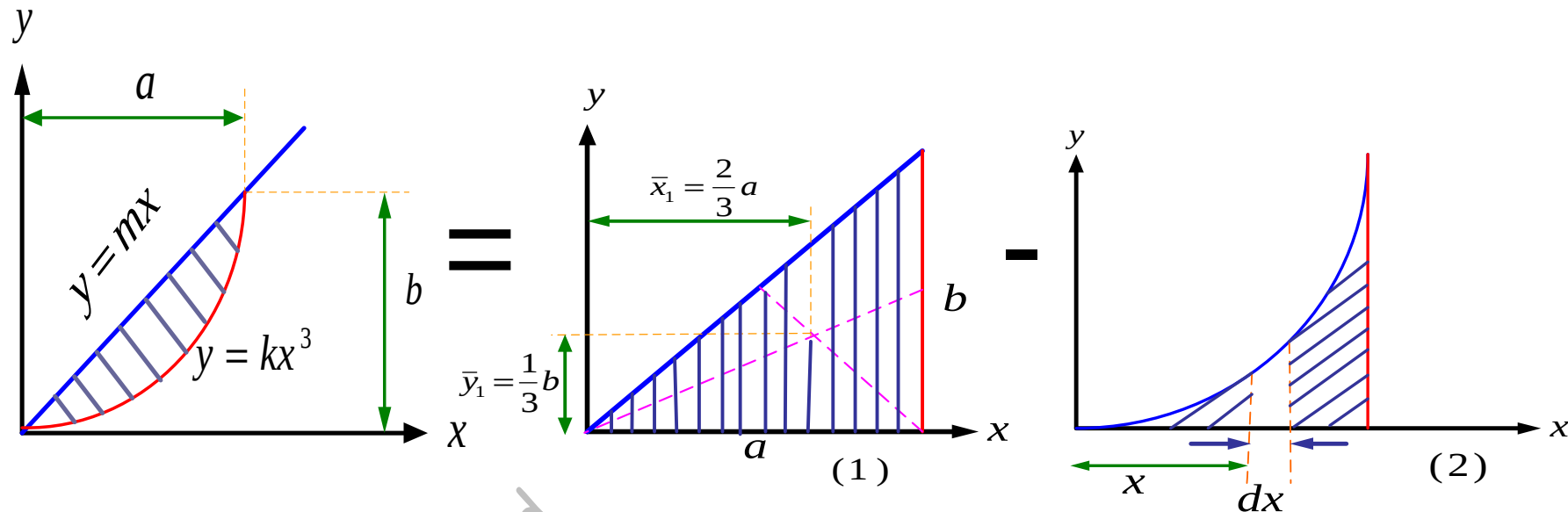
$$\bar{y} = \frac{\int y dA}{\int dA} = \frac{\int y dA}{A} \quad \text{مرکز سطح}$$

$$\int y dA = \bar{y} A \quad \mapsto \quad v = 2\pi \bar{y} A$$

حجم جاروب شده بوسیله دوران سطح بمساحت \$A\$ برابر است با حاصل ضرب مساحت سطح مولد حجم در مسافتی که مرکز سطح در طی حادث شدن حجم می پیماید.

مثال: برای سطح هاشور خورده مطابق شکل مختصات مرکز سطح را مشخص کنید.

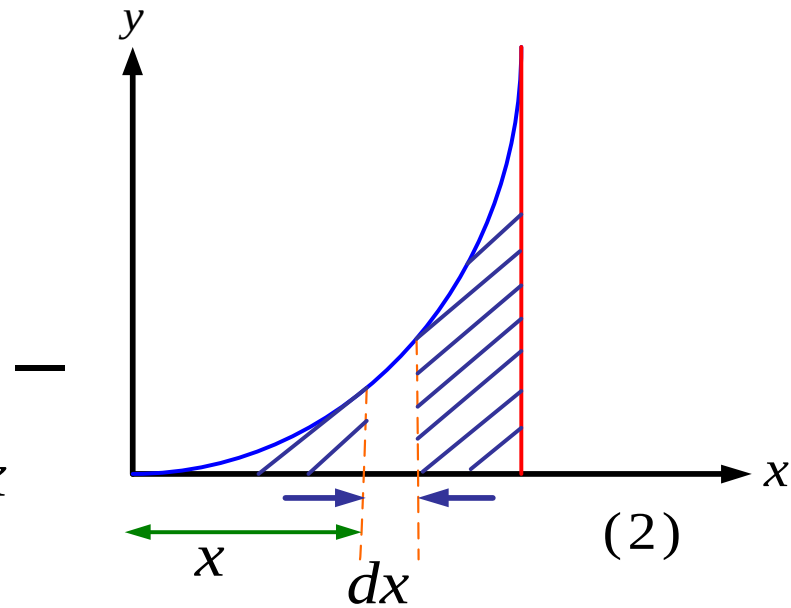
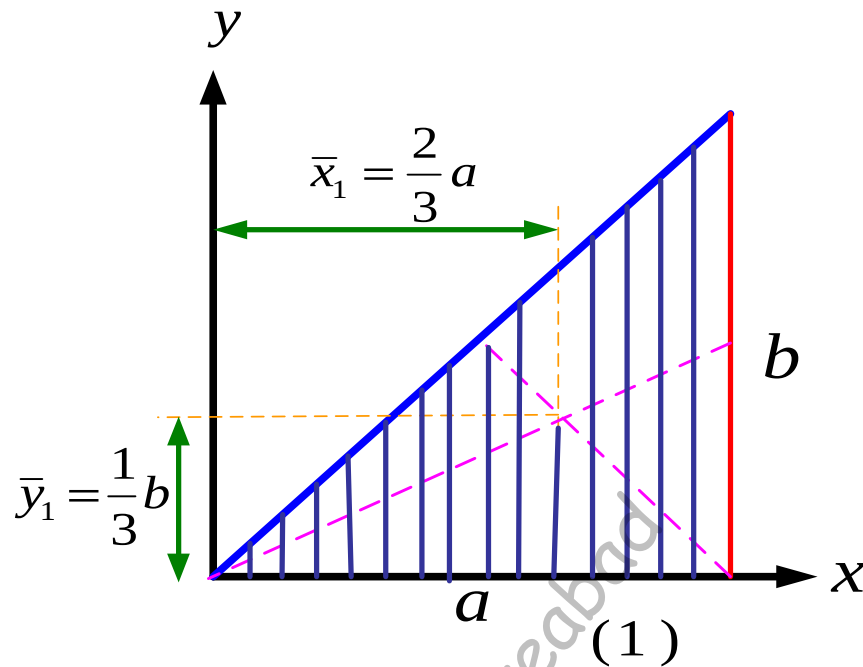




$$(1) \quad A_1 = \frac{ba}{2}$$

$$(2) \quad \because b = ka^3 \Rightarrow k = \frac{b}{a^3} \Rightarrow y = \frac{b}{a^3} x^3 \quad dA = ydx$$

$$\int dA = \int ydx = \int_0^a \frac{b}{a^3} x^3 dx = \frac{b}{a^3} \times \frac{1}{4} \times a^4 = \frac{1}{4} ab \quad A_2 = \frac{ba}{4}$$



$$\int x dA = \int x_{el} dA = \int xy dx = \frac{b}{a^3} \int_0^a x^4 dx = \frac{b}{a^3} \left(\frac{1}{5} \right) a^5 = \frac{1}{5} a^2 b$$

$$\int y dA = \int y_{el} dA = \int \frac{1}{2} y dA = \frac{1}{2} \int y^2 dx = \frac{1}{2} \frac{b^2}{a^6} \int_0^a x^6 dx = \frac{1}{14} ab^2$$

$$\bar{x} = \frac{\int x dA}{\int dA} = \frac{\int x_{el} dA}{\int dA}$$

$$\bar{y} = \frac{\int y dA}{\int dA} = \frac{\int y_{el} dA}{\int dA}$$

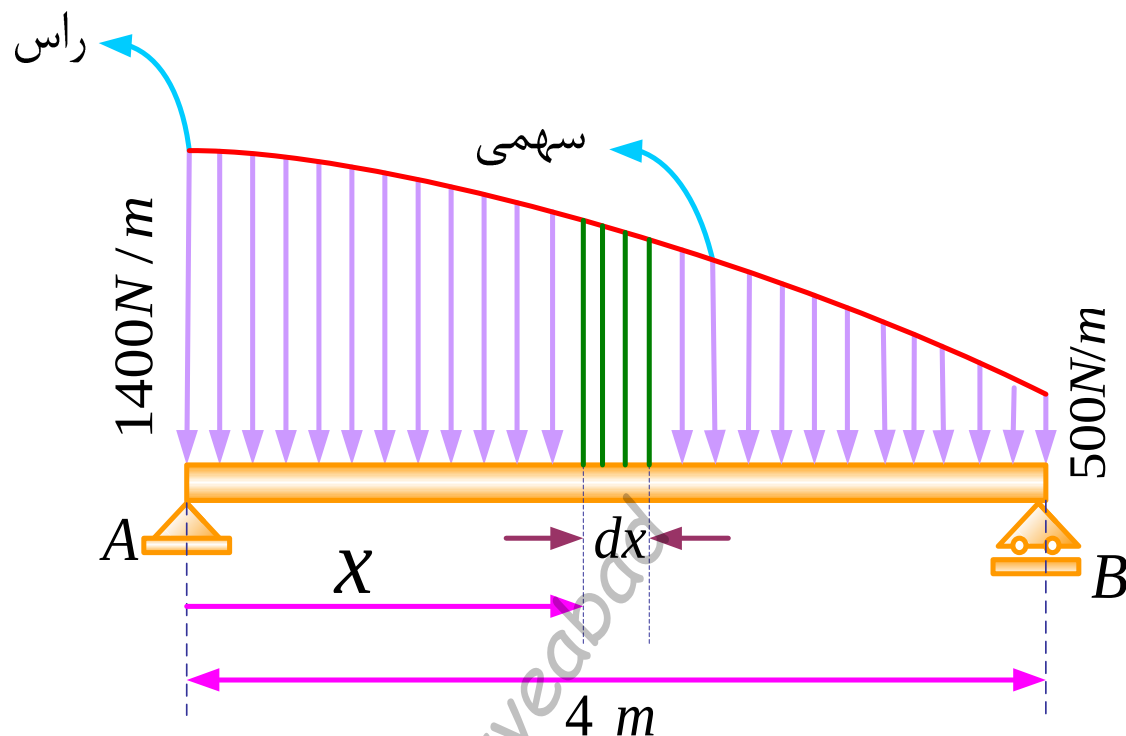
$$\bar{x}_2 = \frac{\frac{1}{5} a^2 b}{\frac{1}{4} ab} = \frac{4}{5} a$$

$$\bar{y}_2 = \frac{\frac{1}{14} b^2 a}{\frac{1}{4} ab} = \frac{2}{7} b$$

$$\bar{x} = \frac{\sum A_i \bar{x}_i}{\sum A_i} = \frac{A_1 \bar{x}_1 - A_2 \bar{x}_2}{A_1 - A_2} = \frac{\frac{a^2 b}{3} - \frac{2 a^2 b}{15}}{\frac{ab}{2} - \frac{ab}{4}} = \frac{8}{12} a$$

$$\bar{y} = \frac{\sum A_i \bar{y}_i}{\sum A_i} = \frac{A_1 \bar{y}_1 - A_2 \bar{y}_2}{A_1 - A_2} = \frac{\frac{ab^2}{6} - \frac{ab^2}{28}}{\frac{ab}{2} - \frac{ab}{4}} = \frac{8}{21} b$$

مثال: مطلوبست تعیین بزرگی و نقطه اثر نیروی توزیعی وارد بر تیر نشان داده شده در شکل و هم چنین تعیین نیروهای عکس العمل در نقاط A و B.



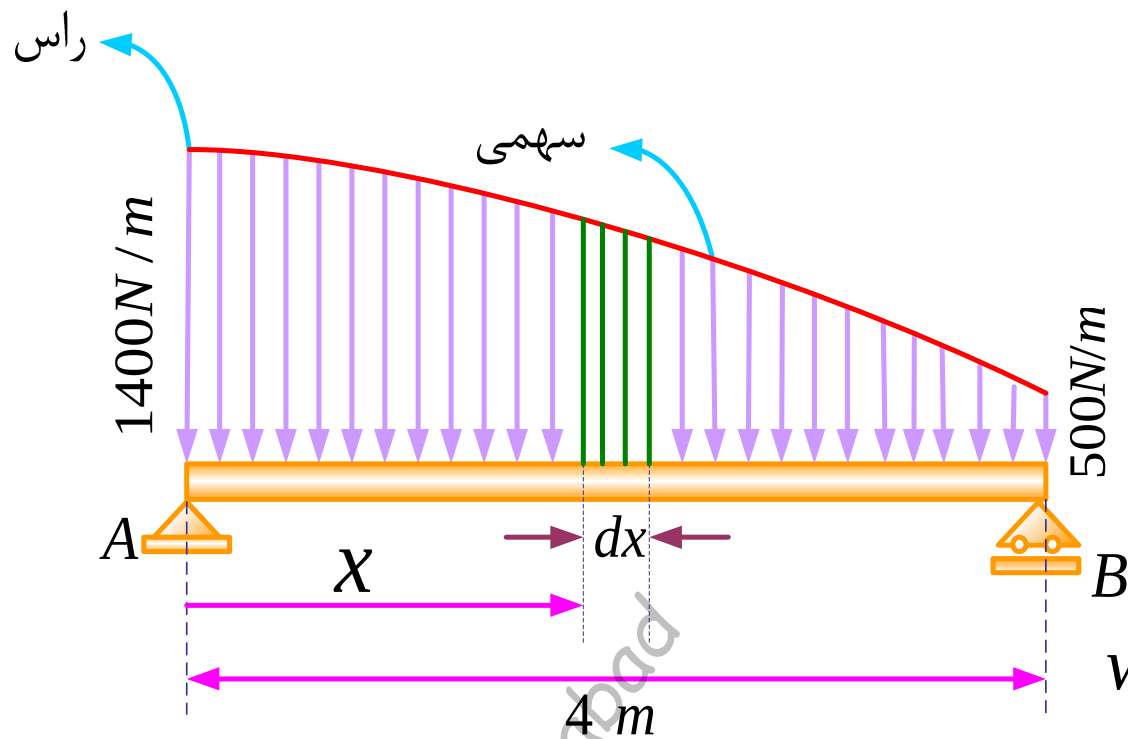
$$y = ax^2 + bx + c$$

نسبت به محور y متقارن است

$$y = ax^2 + c$$

$$\begin{cases} 1400 = a \times (0) + c \\ 500 = a \times 16 + c \end{cases}$$

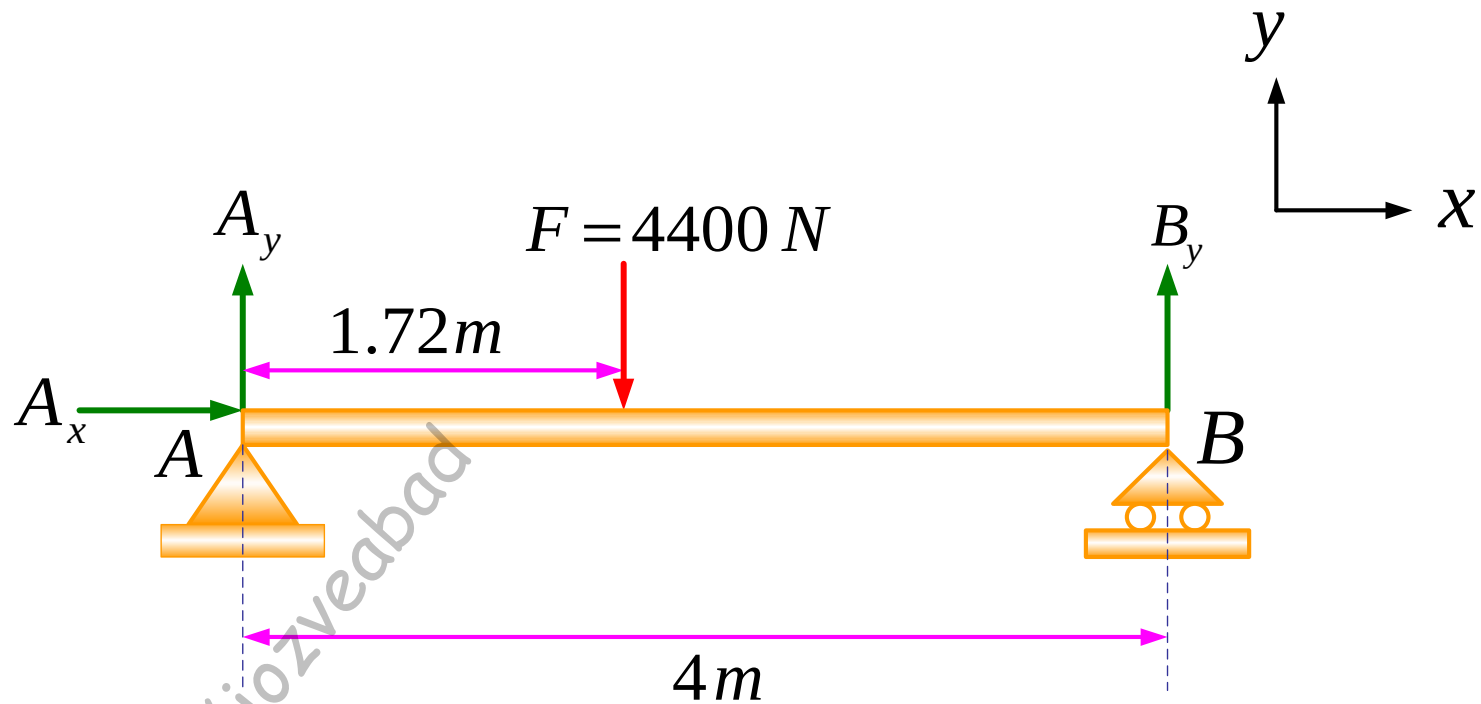
$$\Rightarrow \begin{cases} c = 1400 \\ 16a = -900 \rightarrow a = -\frac{225}{4} \end{cases} \Rightarrow y = -\frac{225}{4}x^2 + 1400$$



$$w^* = y = -\frac{225}{4}x^2 + 1400$$

$$F = A = \int y dx = \int w^*(x) dx = \int_0^4 \left(-\frac{225}{4}x^2 + 1400 \right) dx = 4400 \text{ N}$$

$$\bar{x} = \frac{\int x w^*(x) dx}{\int w^*(x) dx} = \frac{\int x dA}{\int dA} = \frac{\int x dA}{A} = \frac{\int_0^4 x \left(-\frac{225}{4}x^2 + 1400 \right) dx}{4400} = 1.72 \text{ m}$$



$$\sum F_x = 0 \Rightarrow A_x = 0$$

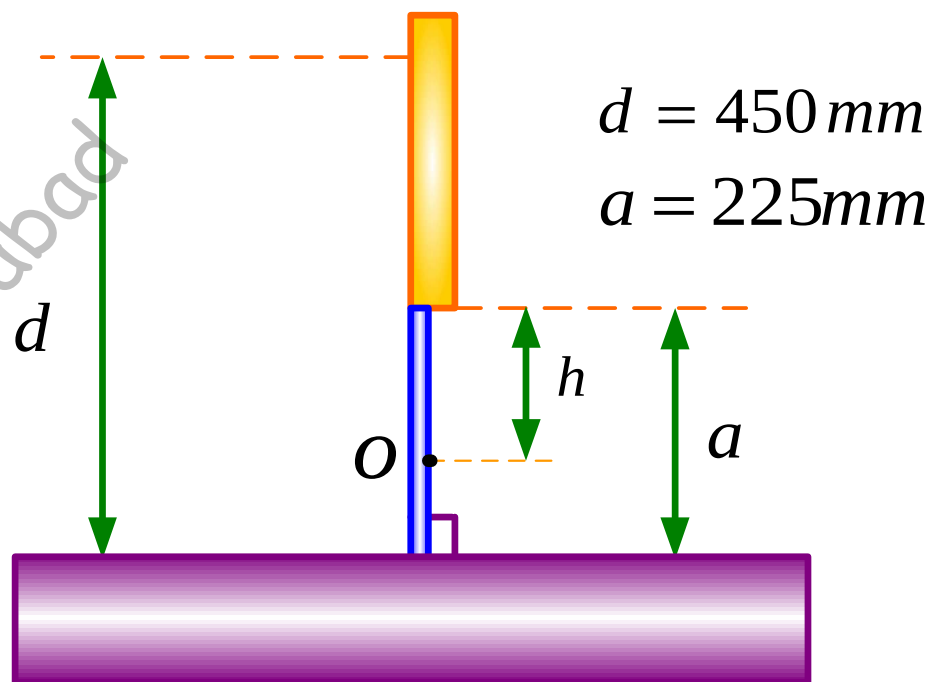
$$\sum F_y = 0 \Rightarrow -4400 + B_y + A_y = 0$$

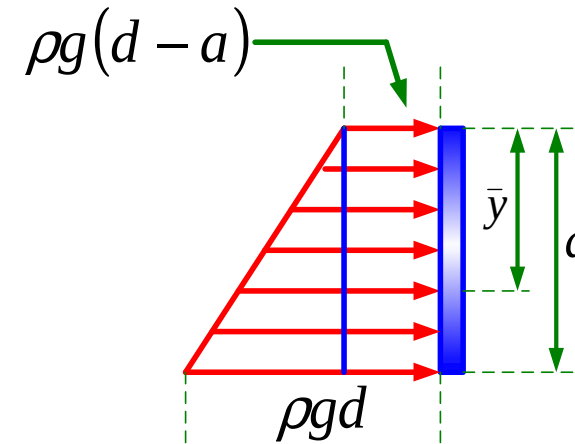
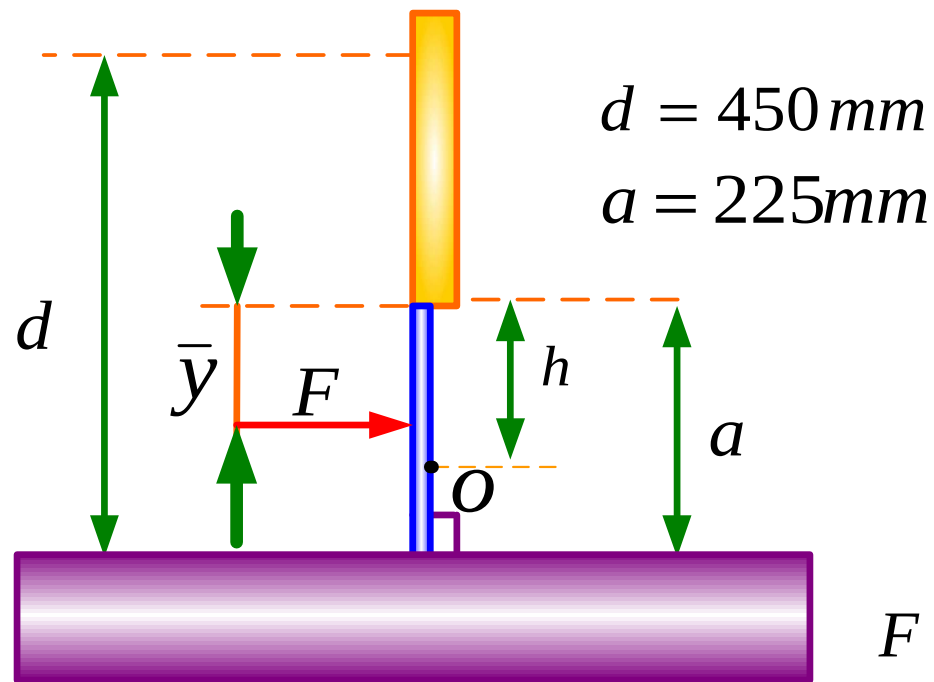
$$\sum M_A = 0 \Rightarrow 4400 \times 1.72 - 4B_y = 0$$

$$B_y = 1892 \text{ N}$$

$$A_y = 2508 \text{ N}$$

مثال: یک دریچه مربعی شکل اتوماتیک به ابعاد $225 \times 225 \text{ mm}^2$ حول محوری که از O می گذرد مفصل شده است به هنگامیکه ارتفاع سیال 450mm است دریچه شروع به باز شدن می کند مطلوبست تعیین فاصله h.





$$F = V = \frac{[\rho g (d - a) + \rho g d] a^2}{2}$$

$$A_1 = \rho g (d - a) a = 50625 \rho g$$

$$\bar{y}_1 = a / 2 = 112.5$$

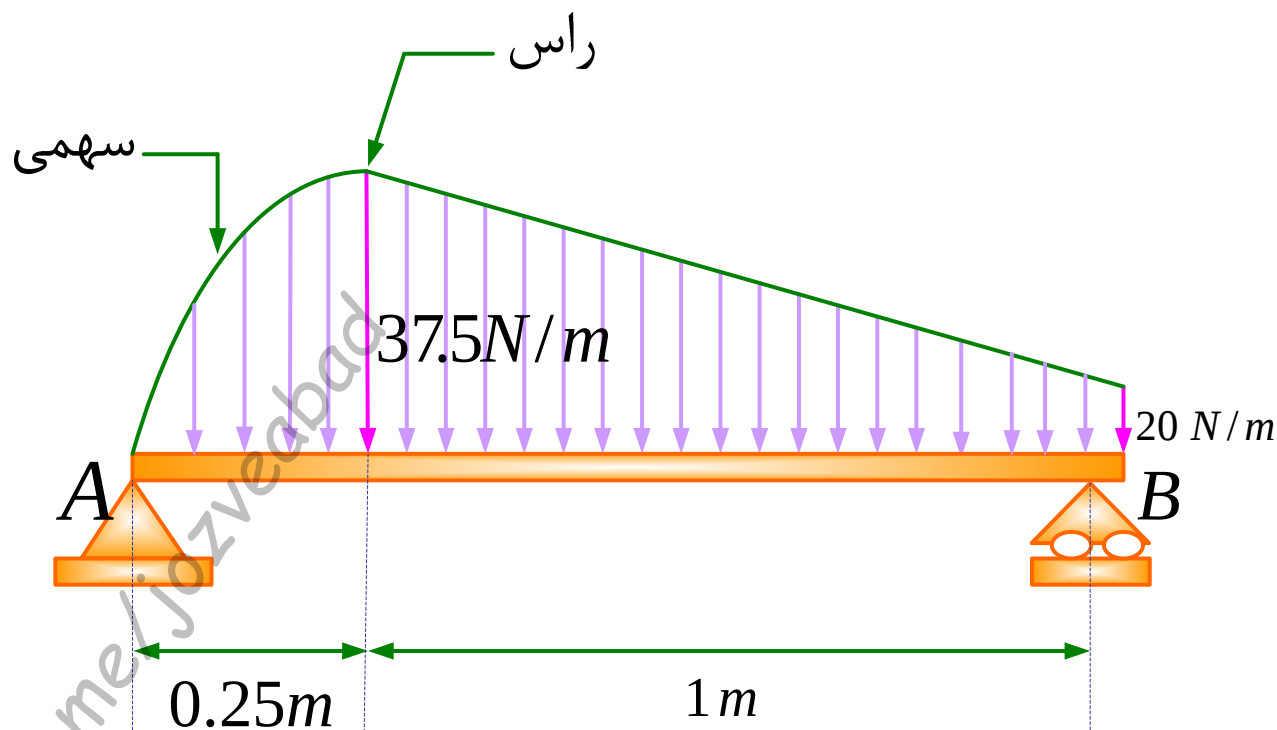
$$A_2 = \frac{1}{2} \rho g a \times a = \frac{1}{2} \rho g a^2 = 25312.5 \rho g$$

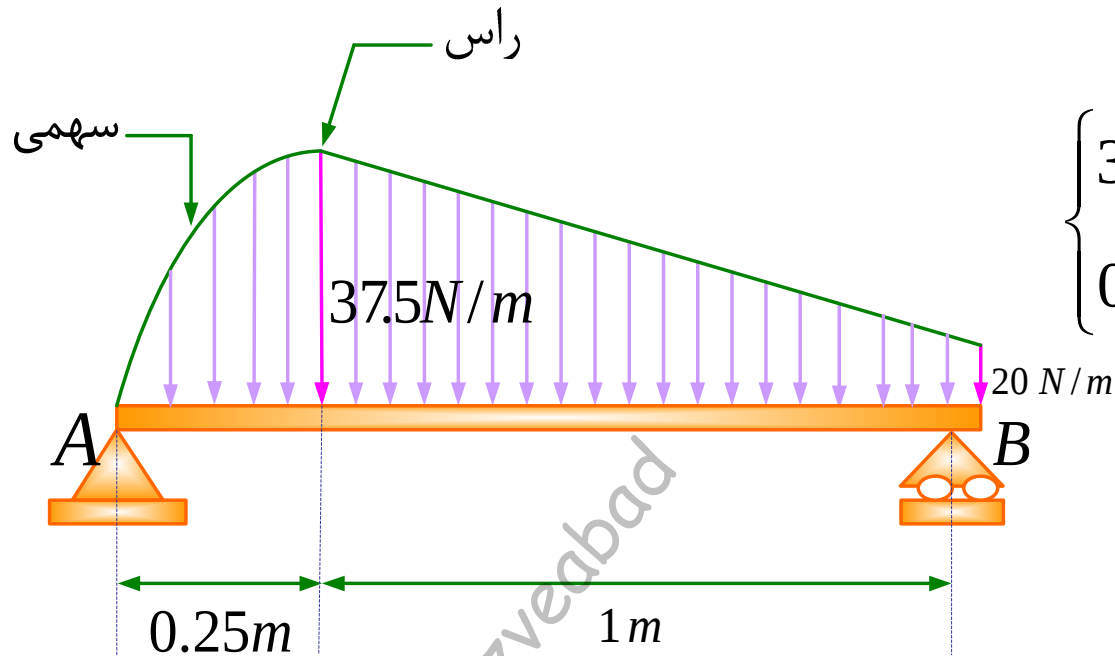
$$\bar{y}_2 = 2a / 3 = 150$$

$$\bar{y} = \frac{A_1 \bar{y}_1 + A_2 \bar{y}_2}{A_1 + A_2} = \frac{50625 \times 112.5 + 25312.5 \times 150}{50625 + 25312.5} = 125 \text{ mm}$$

$$\sum M_O = 0 \Rightarrow F(h - \bar{y}) = 0 \Rightarrow h = \bar{y} = 125 \text{ mm}$$

مثال: برای تیر مطابق شکل که تحت تأثیر نیروی توزیعی قرار دارد، مؤلفه های عکس العمل را در تکیه گاههای A و B تعیین کنید.





$$y = ax^2 + bx$$

$$\begin{cases} 37.5 = a(0.25)^2 + b(0.25) \\ 0 = a(0.5)^2 + b(0.5) \end{cases}$$

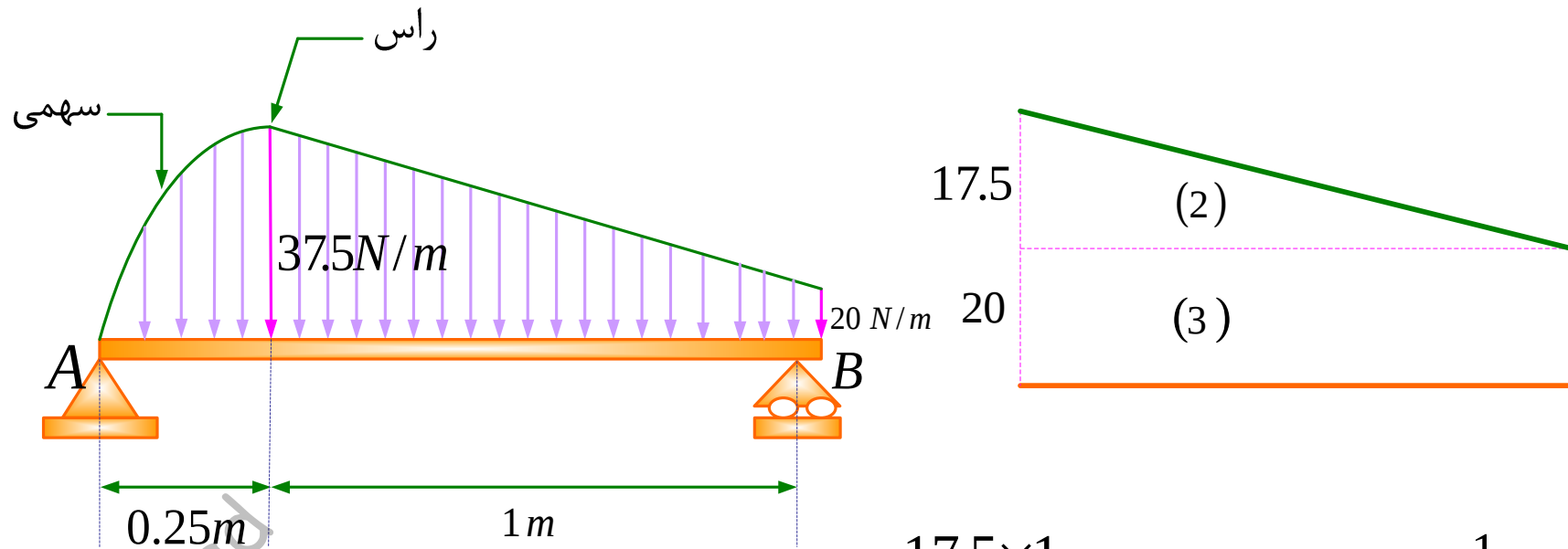
$$a = -600, \quad b = 300$$

$$w(x) = -600x^2 + 300x$$

$$A_1 = \int w(x) dx = 300 \int_0^{0.25} (-2x^2 + x) dx = 6.255 N = F_1$$

$$\int x dA = \int xw(x) dx = 300 \int_0^{0.25} (-2x^3 + x^2) dx = 0.977$$

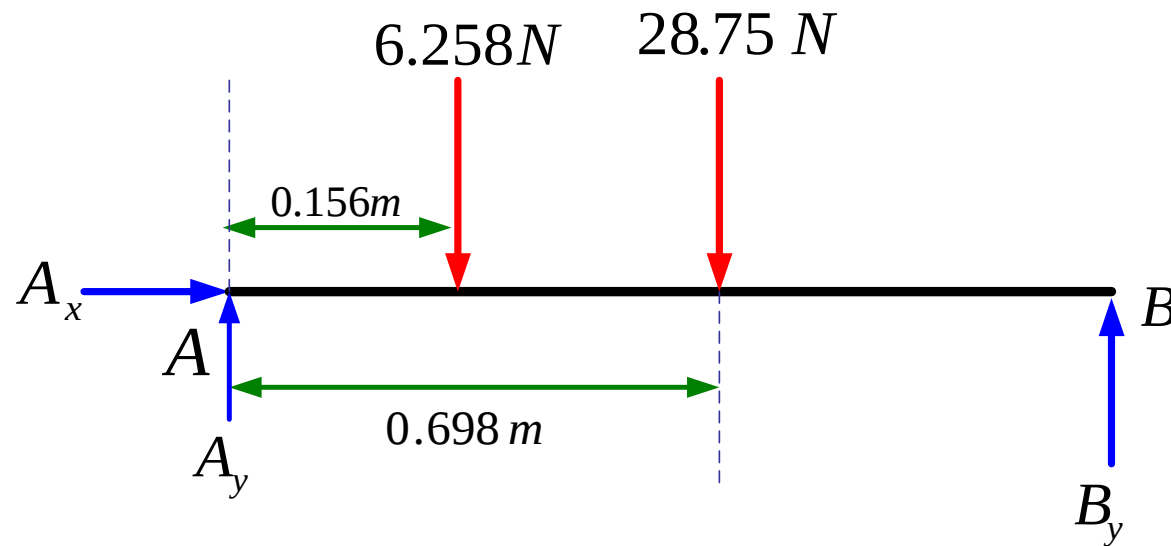
$$\bar{x}_1 = \frac{\int xw(x) dx}{\int w(x) dx} = \frac{\int x dA}{\int dA} = \frac{0.977}{6.225} = 0.156 \text{ m}$$



$$A_2 = \frac{17.5 \times 1}{2} = 8.75 N \quad \bar{x}_2 = \frac{1}{3} m$$

$$A_3 = 1 \times 20 = 20 \quad \bar{x}_3 = \frac{1}{2} m \quad x_2^* = \frac{A_2 \bar{x}_2 + A_3 \bar{x}_3}{A_2 + A_3} = 0.448 m$$

$$A_2^* = A_2 + A_3 = 28.75 N$$



$$A_1 = 6.25 \text{ N} = F_1$$

$$\bar{x}_1 = 0.156 \text{ m}$$

$$A_2^* = A_2 + A_3 = 28.75$$

$$x_2^* = 0.448 \text{ m}$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow A_x = 0$$

$$\sum M_A = 0$$

$$1.25 \times B_y - 28.75 \times 0.698 - 6.25 \times 0.15 = 0 \Rightarrow B_y = 16.83 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow 28.75 + 6.258 - A_y - B_y = 0 \Rightarrow A_y = 18.17 \text{ N}$$

۵- تحلیل سازه ها

تراس ها - قاب ها - ماشین ها

تراس ها

به منظور تحمل نیروها طراحی می شوند. از اعضای مستقیم دو نیرویی تشکیل شده اند و برای تحلیل فرض می شوند که در دو انتها به یکدیگر پین (مفصل) شده باشند. نیروها در امتداد عضو وارد می شوند و مساوی و مختلف الجهت در دو انتها هستند.

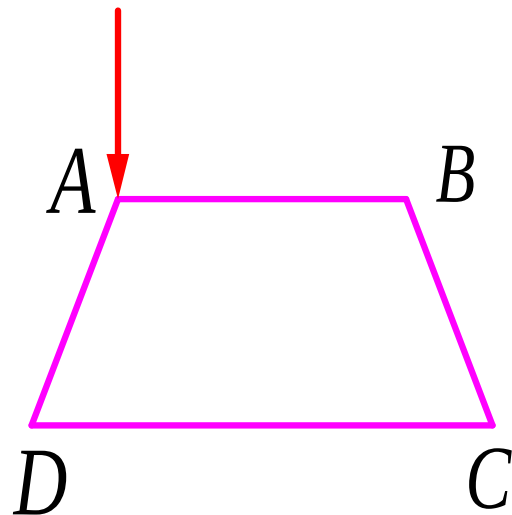
قاب ها

مانند تراس ها به منظور تحمل نیروها به کار گرفته می شوند. حداقل دارای یک عضو هستند که به آن عضو چندین نیرو اعمال می شود.

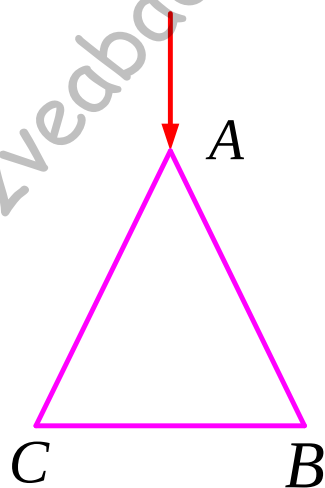
ماشین ها

به منظور انتقال و اصلاح نیروها به کار گرفته می شوند و دارای قسمت های متحرک هستند.

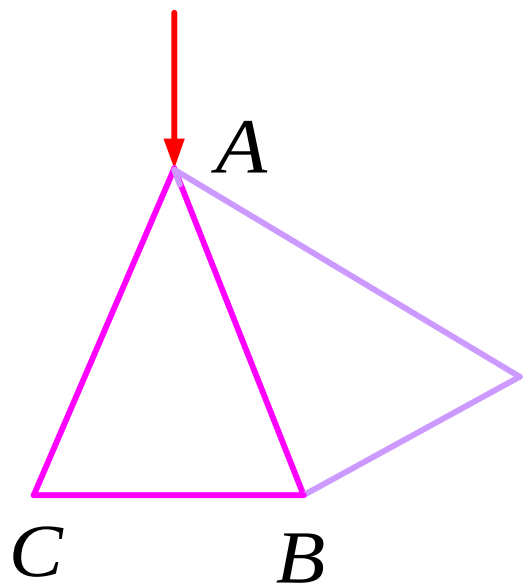
تراس صلب وساده



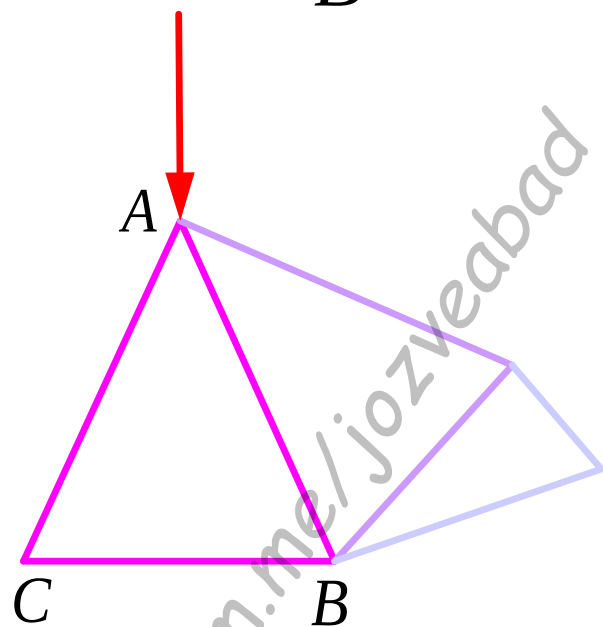
تراس صلب نیست.



تراس صلب است و می تواند نیرو تحمل کند.



تراس ساده که همچنین تراس صلب هم هست.



تعداد اعضاء = m

تعداد مفصل ها = n

$$m=3 \quad n=3$$

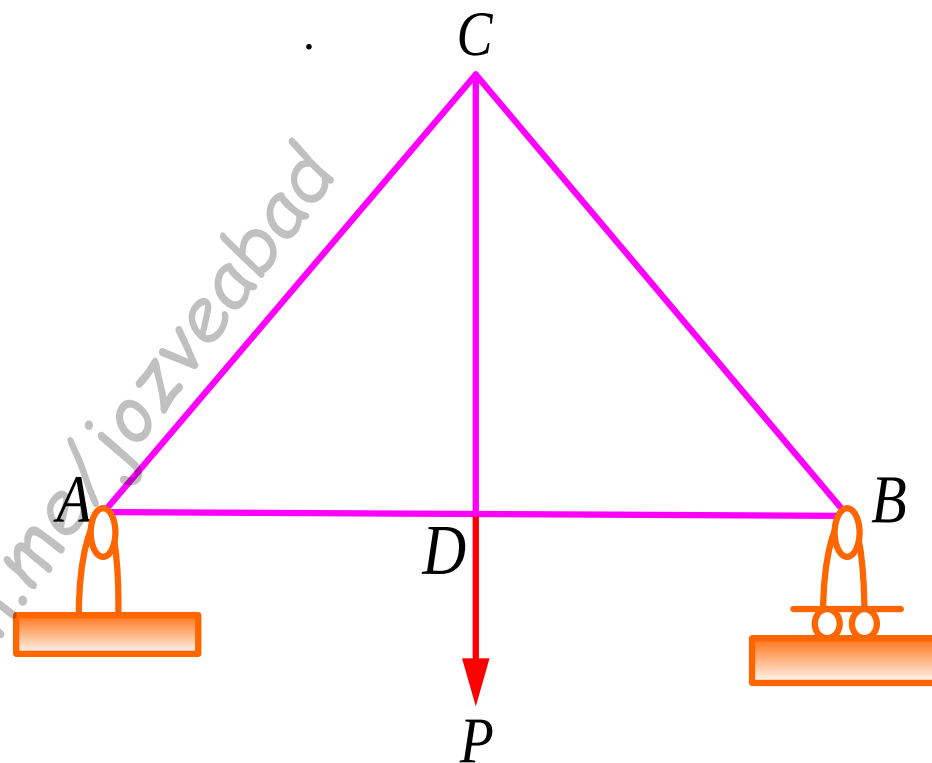
$$m=5 \quad n=4$$

$$m=7 \quad n=5$$

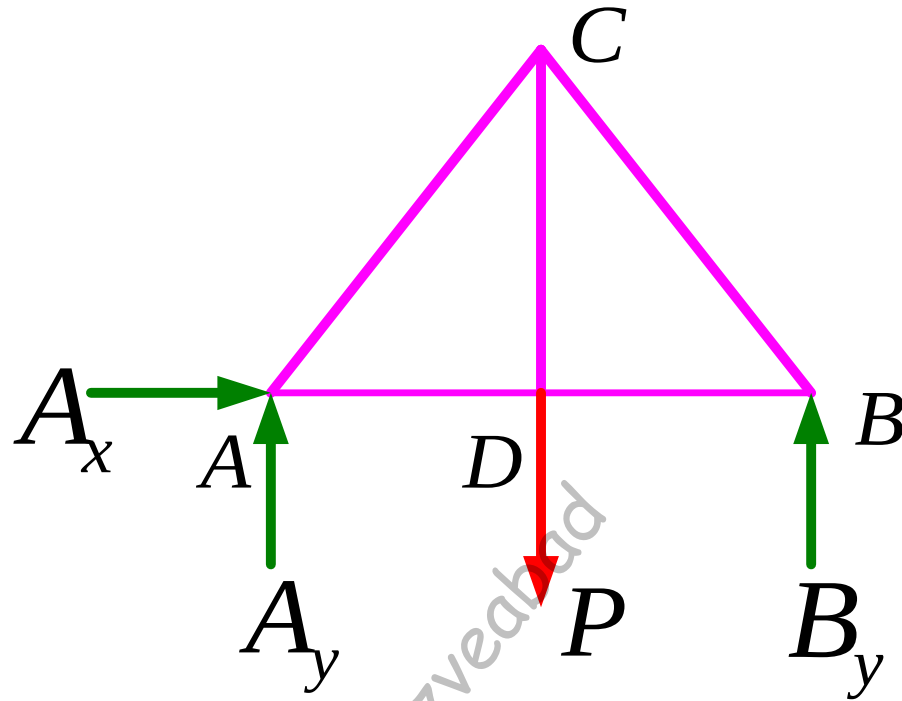
$$m = 2n - 3$$

تحليل تراس ها

(۱) روش مفصل ها



از وزن تراس در مقال نیروهای اعمالی
صرف نظر می شود.

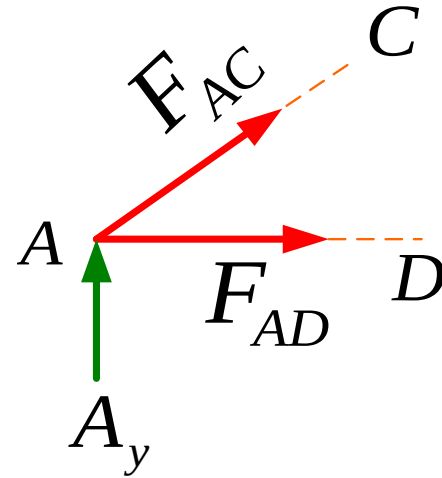
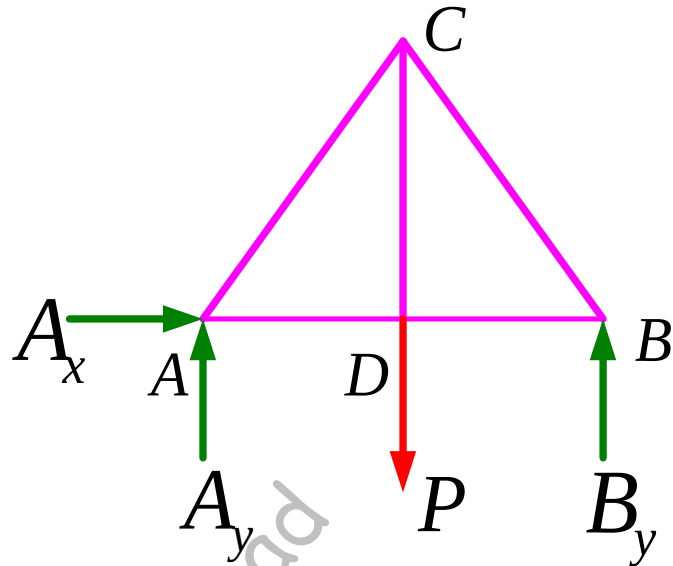


تعیین می شود $B_y \rightarrow$ تنها مجهول B_y است $\Rightarrow \sum M_A = 0$

تعیین می شود $A_y \rightarrow$ تنها مجهول A_y است $\Rightarrow \sum F_y = 0$

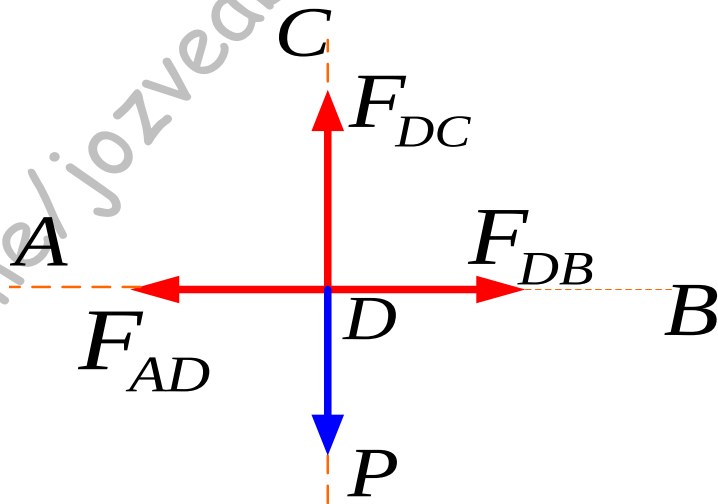
تعیین می شود $A_x \rightarrow$ تنها مجهول A_x است $\Rightarrow \sum F_x = 0$

دیاگرام آزاد برای تک تک گره ها



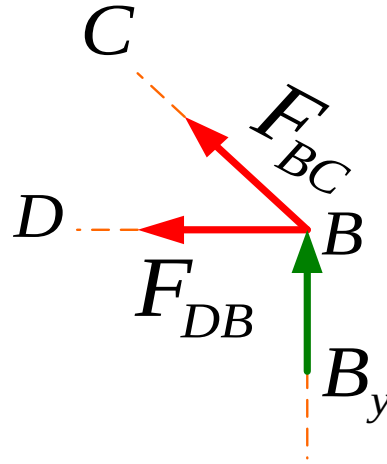
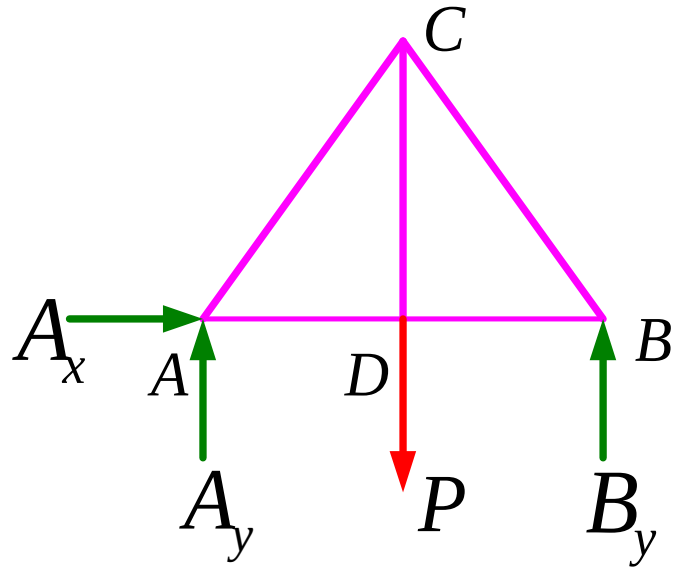
$$\sum F_x = 0$$

$$\sum F_y = 0$$



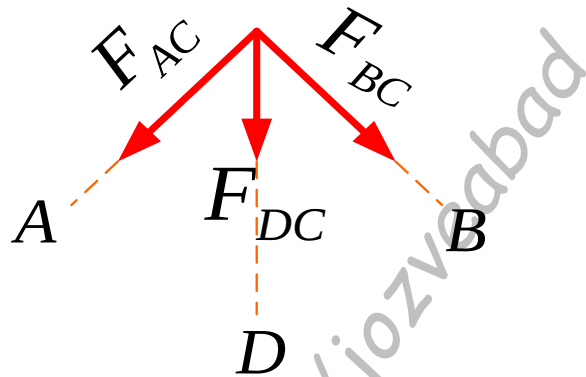
$$\sum F_x = 0$$

$$\sum F_y = 0$$



$$\sum F_x = 0$$

$$\sum F_y = 0$$



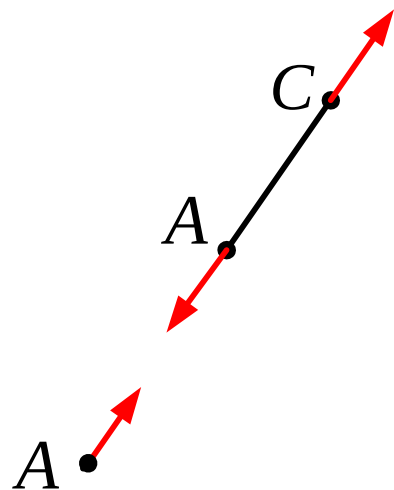
$$\sum F_x = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

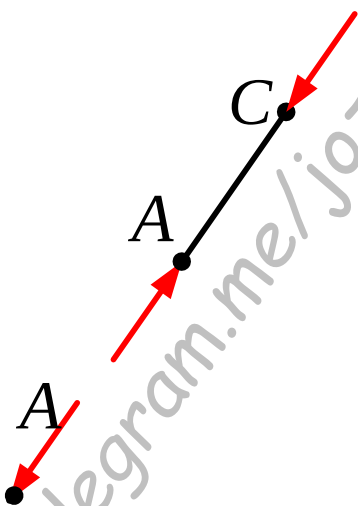
$F_{AC}, F_{AD}, F_{BC}, F_{DB}, F_{DC}$

مجهولات:

اگر نیرو به بیرون گره متوجه باشد آن عضوی که به آن مربوط می شود تحت تأثیر کشش است.

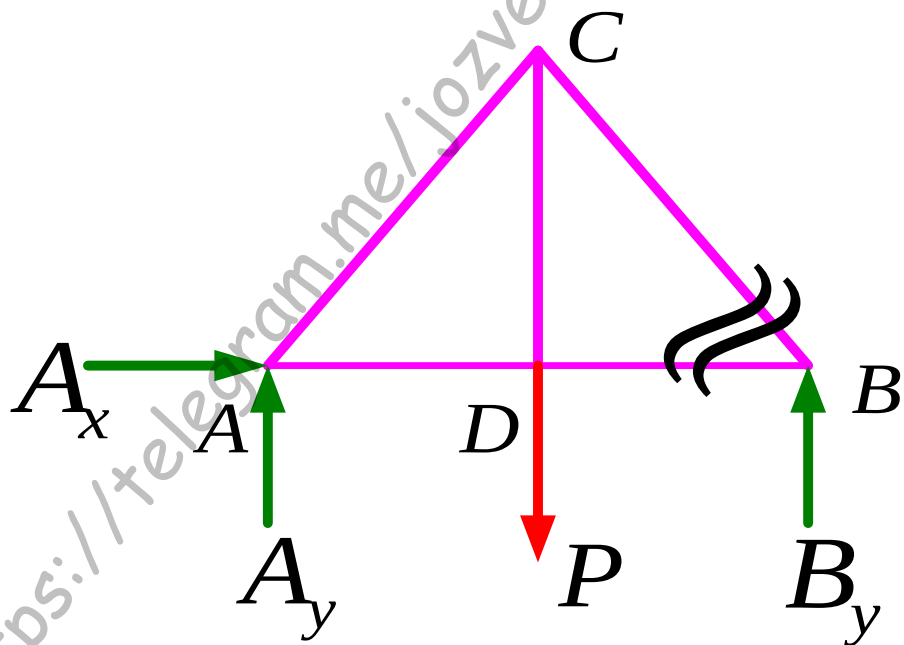
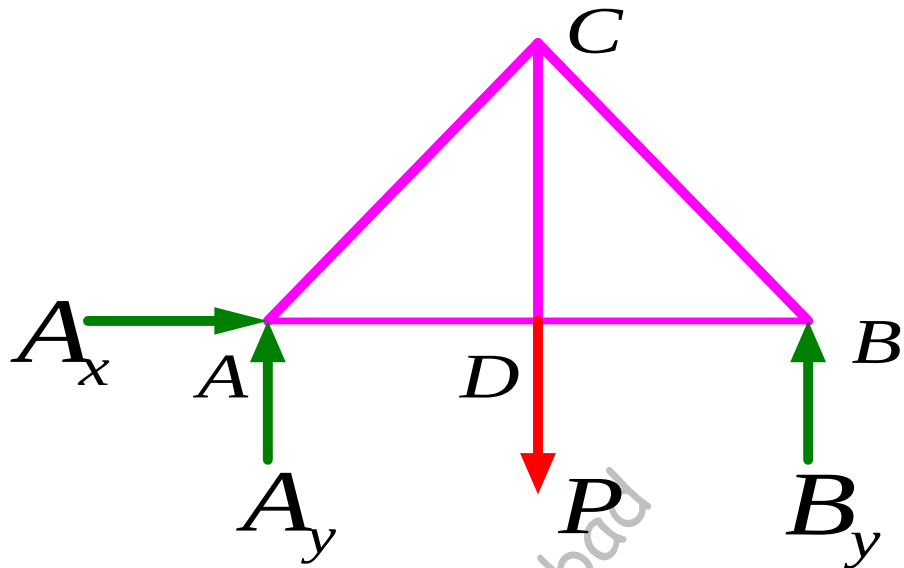


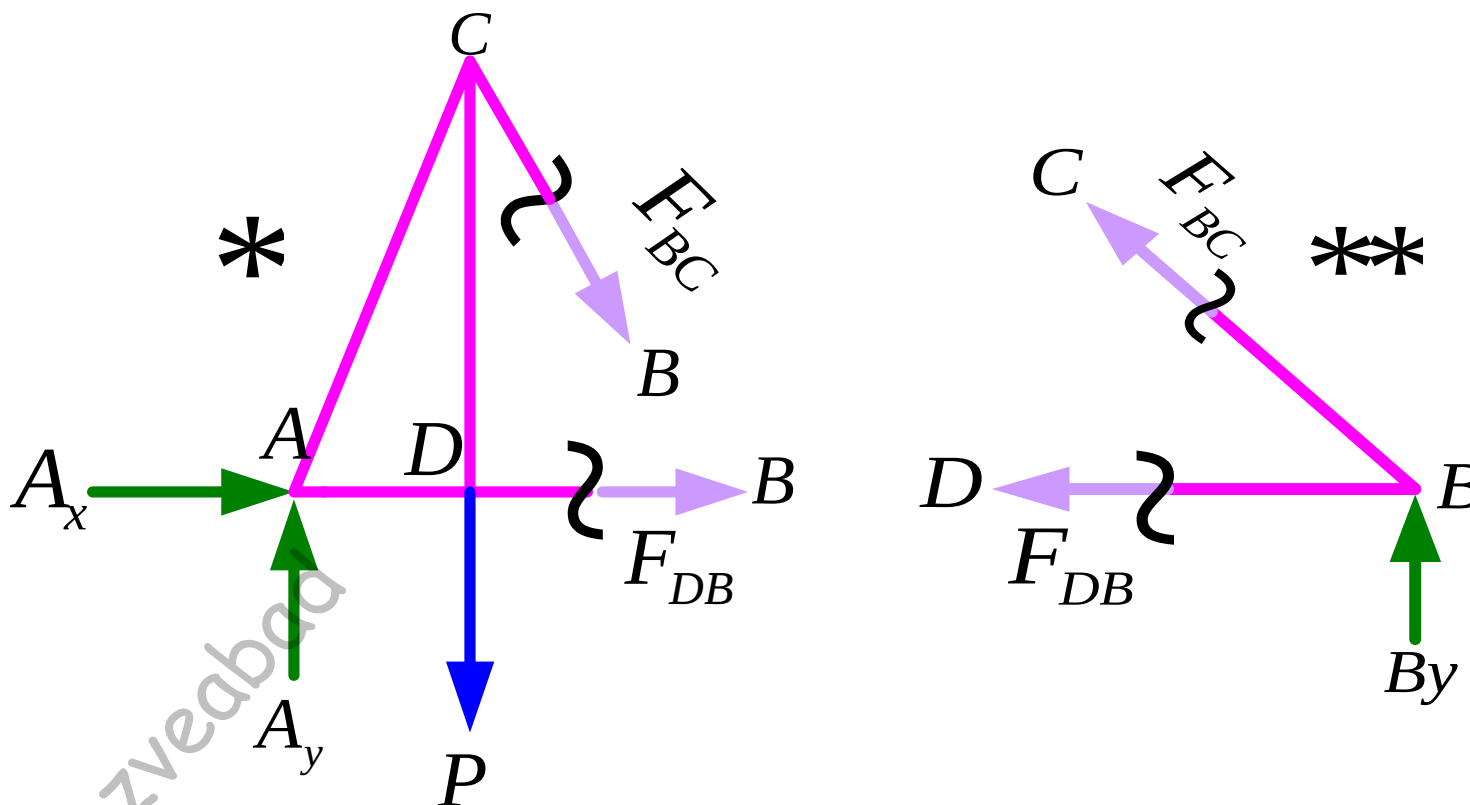
اگر نیرو به طرف گره متوجه باشد آن عضوی که به آن مربوط می شود تحت تأثیر تراکم است.



روش مقاطع

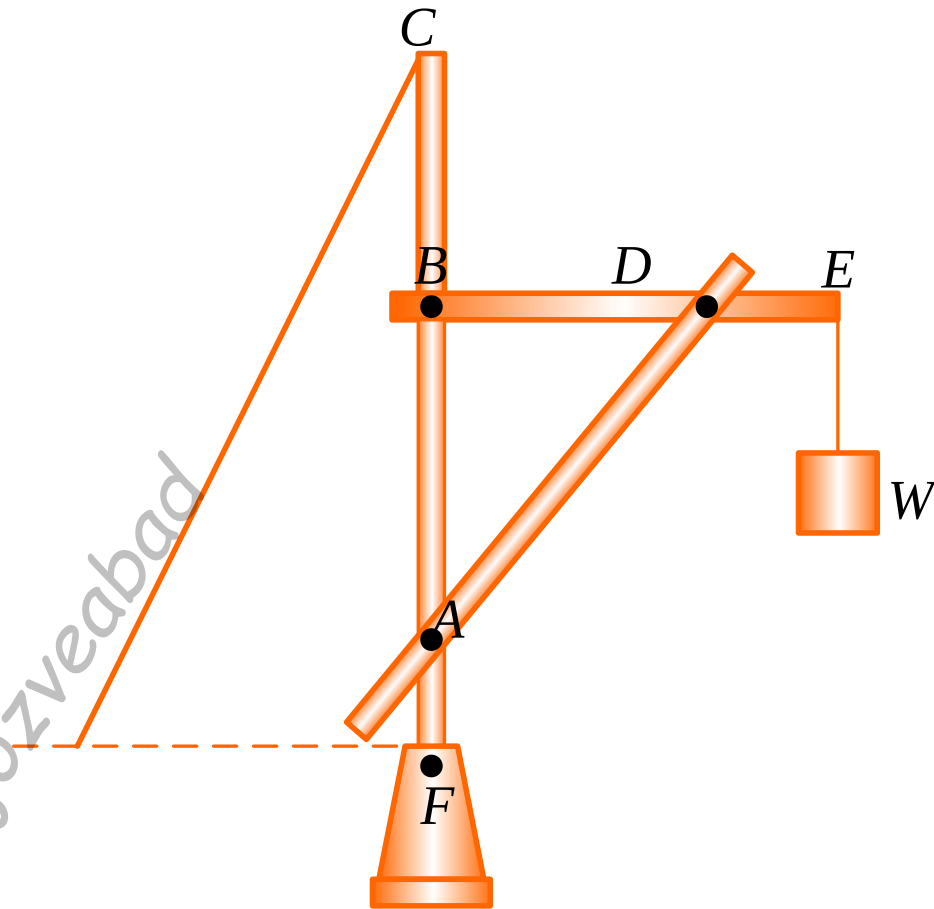
در تراس قبلی می خواهیم نیروی داخلی در عضو DB را بدست آوریم:

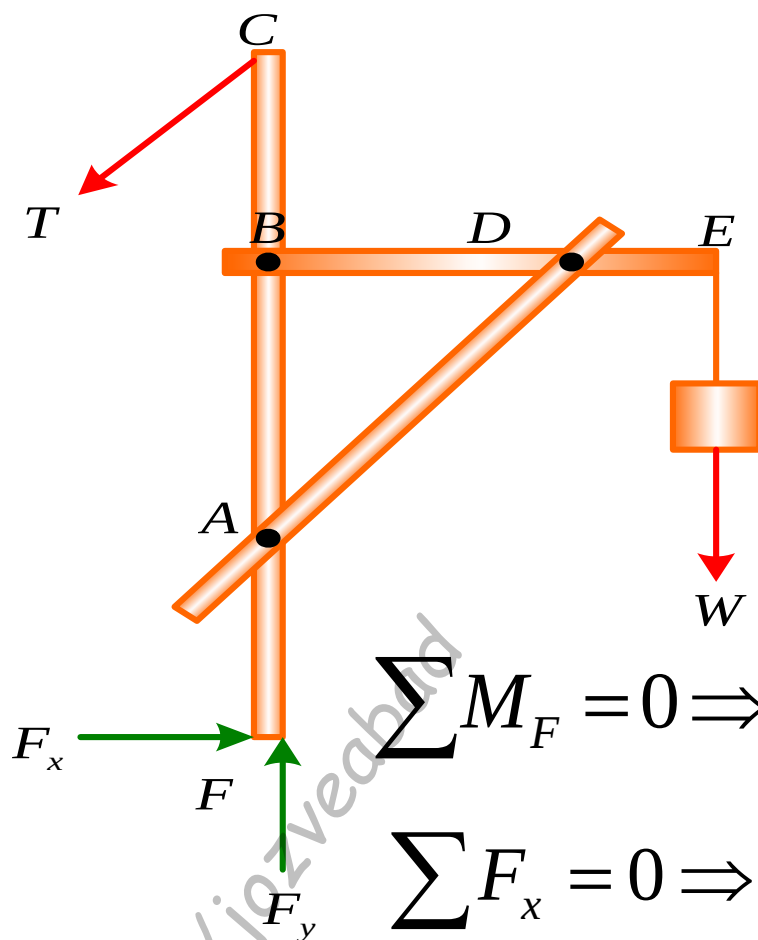




* $\rightarrow \sum M_C = 0 \Rightarrow F_{DB}$ تعیین می شود

تحليل قاب ها

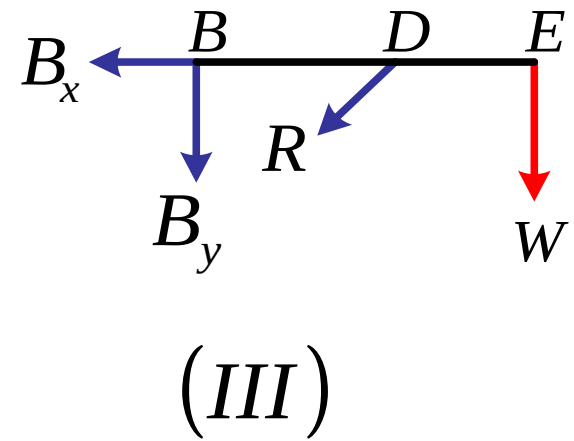
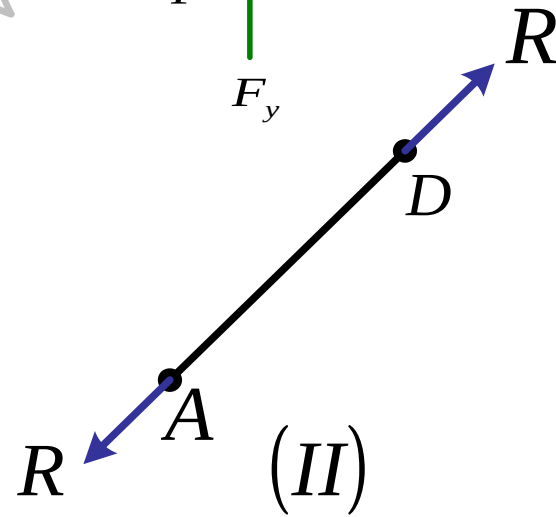
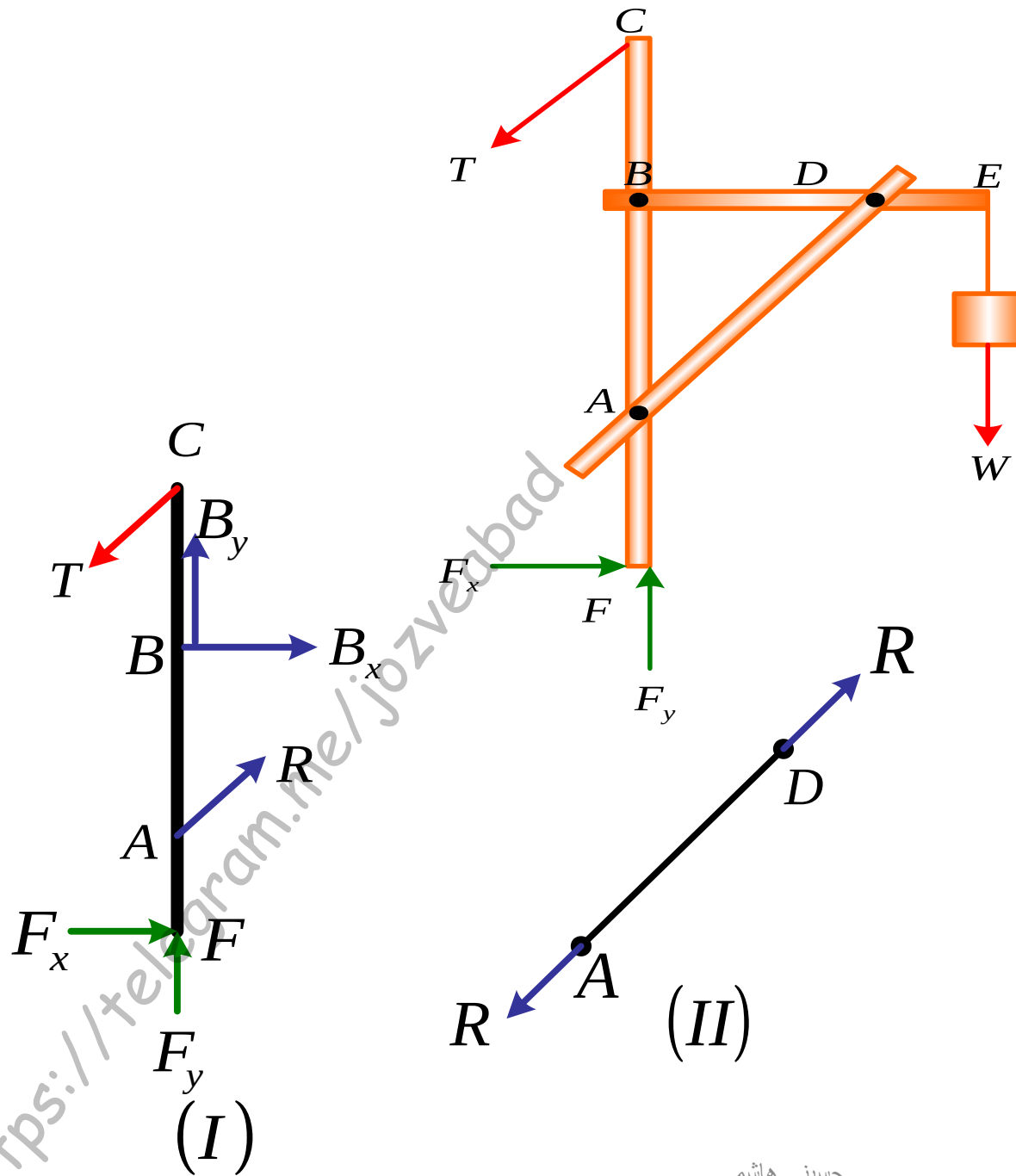


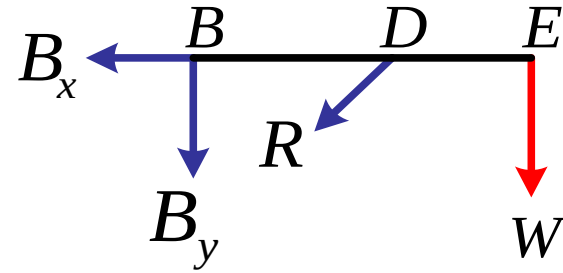


$\sum M_F = 0 \Rightarrow T$ تنها مجهول $\rightarrow$ T بدست می آید

$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_x$ تنها مجهول $\rightarrow$ F_x تعیین می شود

$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_y$ تنها مجهول $\rightarrow$ F_y تعیین می شود





مجهولات: B_y, B_x, R

$\sum M_B = 0 \Rightarrow R$ تعیین می شود $\rightarrow R$ تنها مجهول

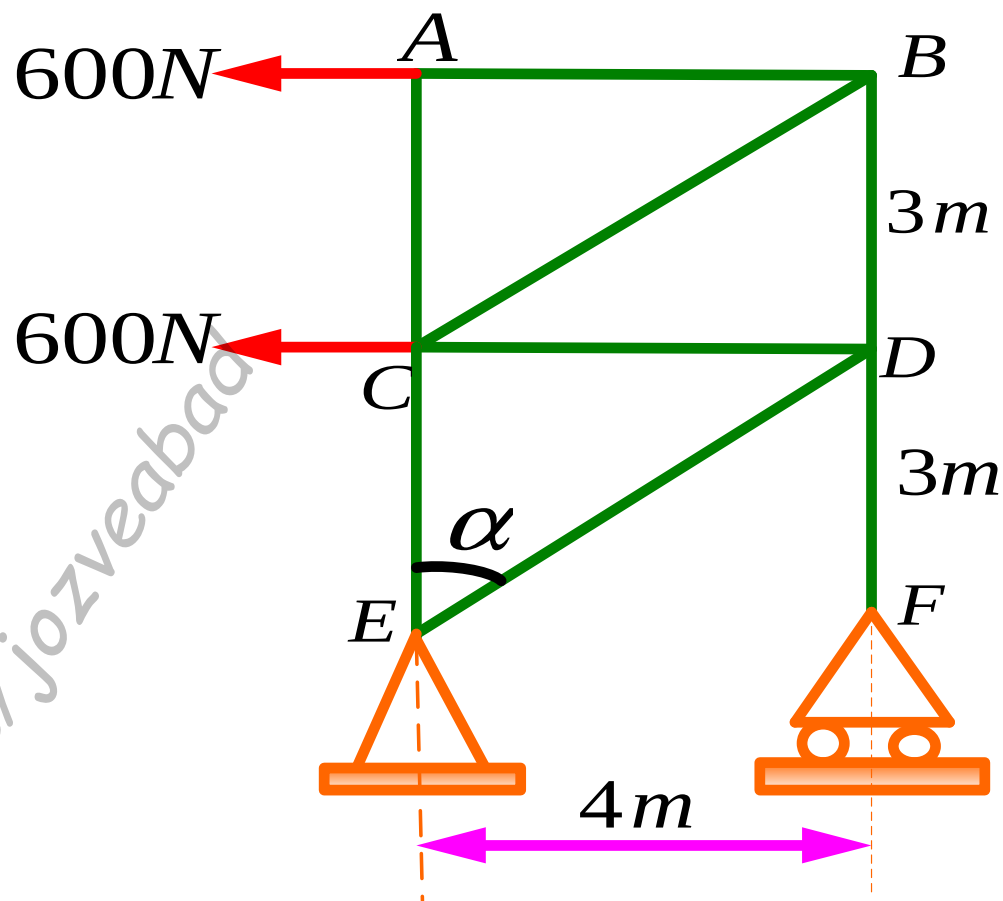
$\sum F_x = 0 \Rightarrow B_x$ تعیین می شود $\rightarrow B_x$ تنها مجهول

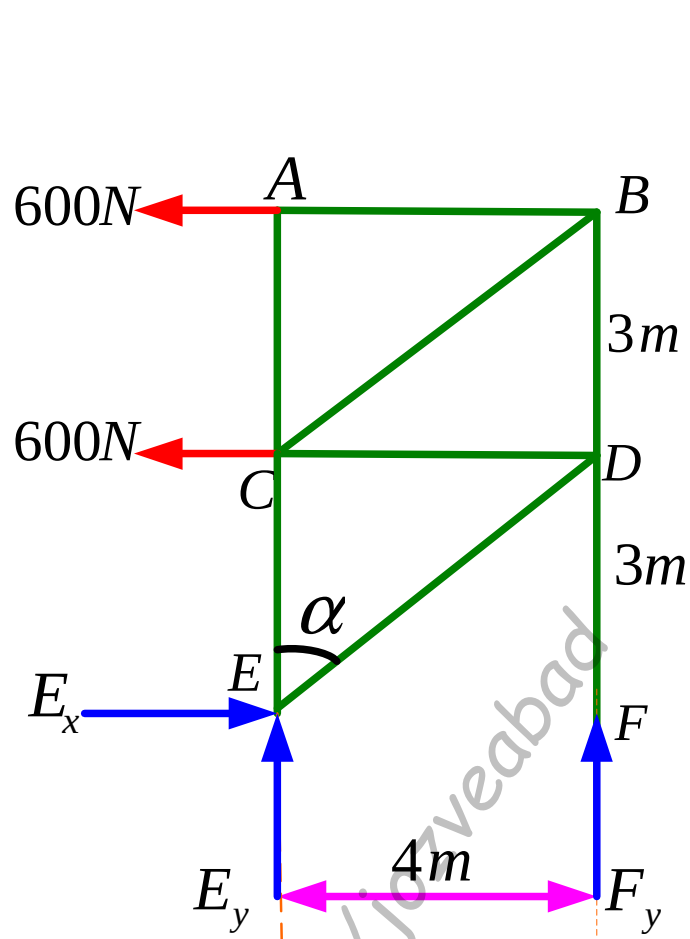
$\sum F_y = 0 \Rightarrow B_y$ تعیین می شود $\rightarrow B_y$ تنها مجهول

تحلیل ماشین ها

همانند تحلیل قاب ها می باشد.

مثال: با استفاده از روش مفصل ها نیروهای داخلی را در هریک از اعضای تراس ذیل بدست آورید.





$$\sum F_x = 0 \Rightarrow -600 - 600 + E_x = 0$$

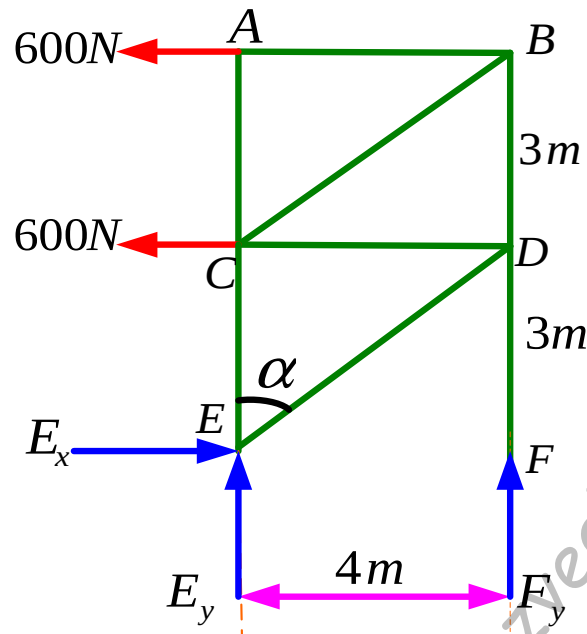
$$E_x = 1200N$$

$$\sum M_E = 0 \Rightarrow$$

$$4F_y + 600(6) + 600(3) = 0$$

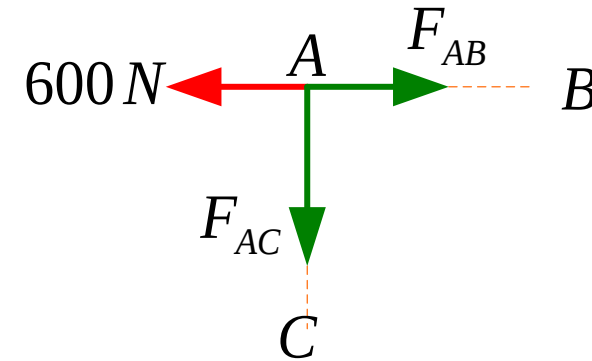
$$F_y = -1350N$$

$$\sum F_y \Rightarrow E_y + F_y = 0 \Rightarrow E_y = 1350$$



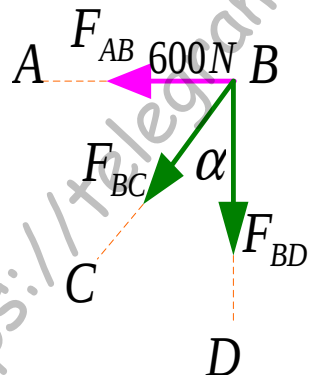
$$\sin \alpha = 0.8$$

$$\cos \alpha = 0.6$$



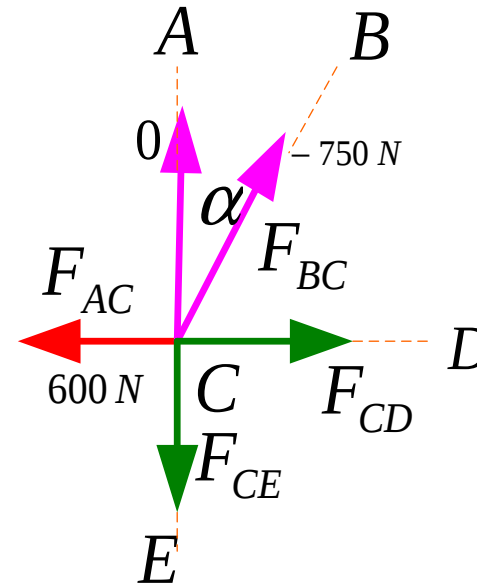
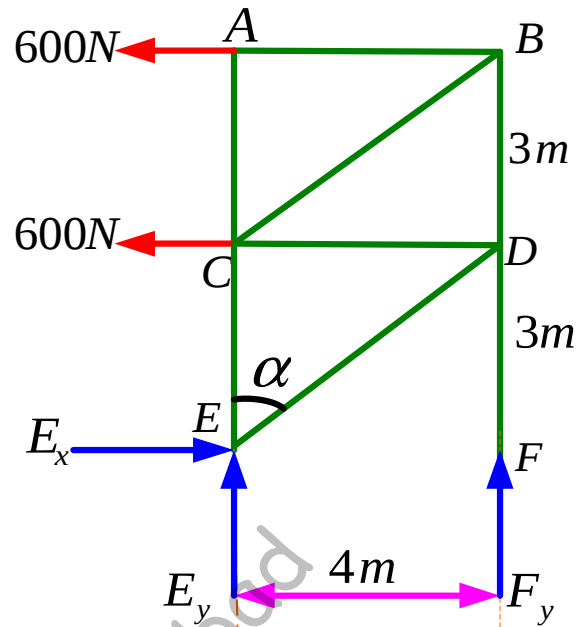
$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{AB} - 600 = 0 \quad \boxed{F_{AB} = 600N}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow \quad \boxed{F_{AC} = 0}$$



$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{AB} + 0.8F_{BC} = 0 \Rightarrow \quad \boxed{F_{BC} = -750N}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_{BD} + 0.6F_{BC} = 0 \Rightarrow \quad \boxed{F_{BD} = 450N}$$



$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{CD} - 600 + 0.8F_{BC} = 0$$

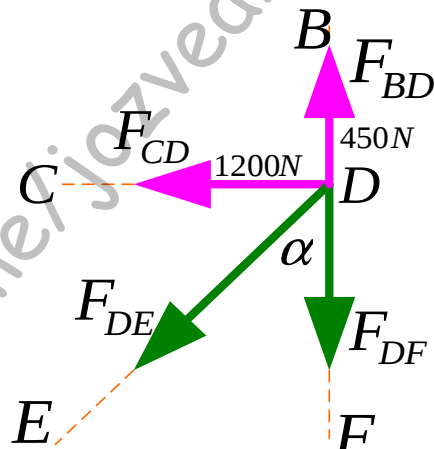
$$F_{CD} = 1200\text{N}$$

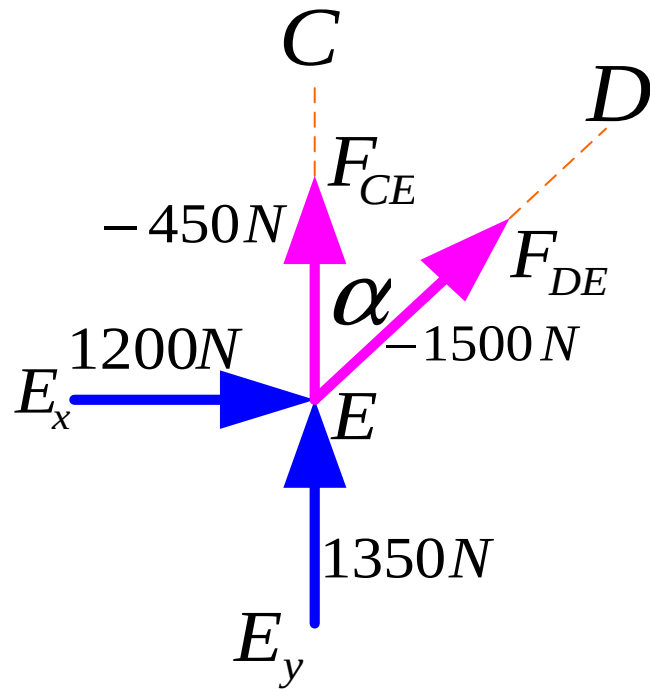
$$\sum F_y = 0 \Rightarrow 0.6F_{BC} + F_{AC} - F_{CE} = 0$$

$$F_{CE} = -450\text{N}$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow -F_{CD} - 0.8F_{DE} = 0 \quad F_{DE} = -1500\text{N}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow -F_{DF} - 0.6F_{DE} + F_{BD} = 0 \quad F_{DF} = 1350\text{N}$$





$$\sum F_x = 0$$

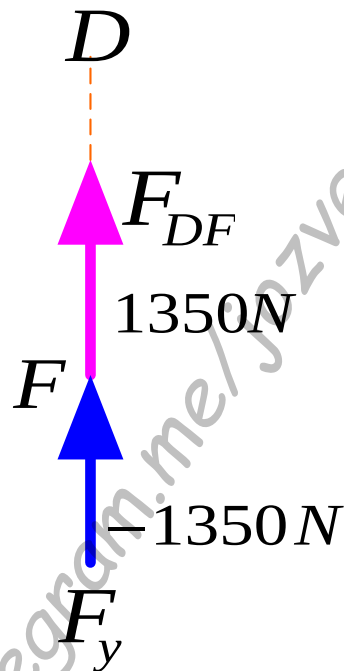
$$1200 + 0.8F_{DE} = 0$$

$$F_{DE} = -1500\text{ N}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{CE} + 1350 + 0.6F_{DE} = 0$$

$$F_{CE} = -450\text{ N}$$

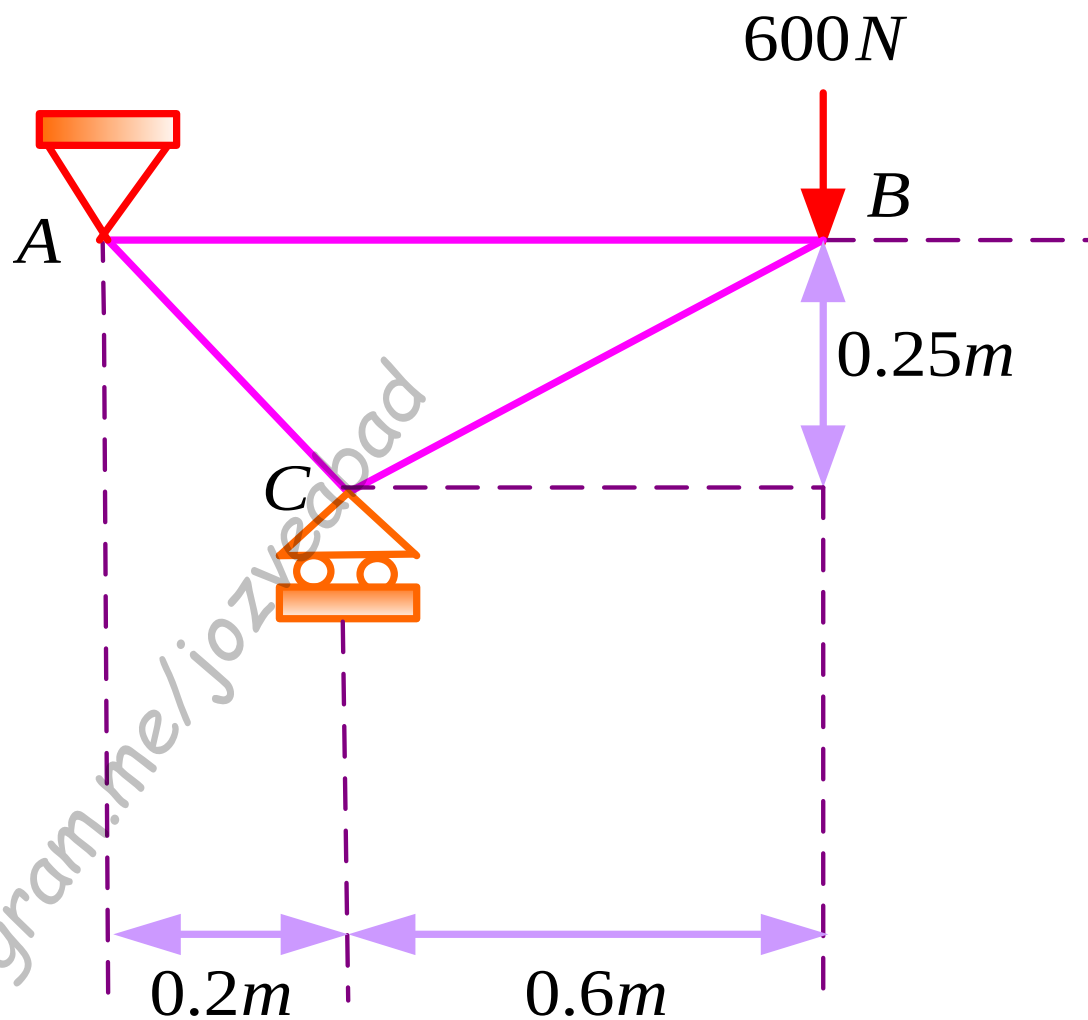


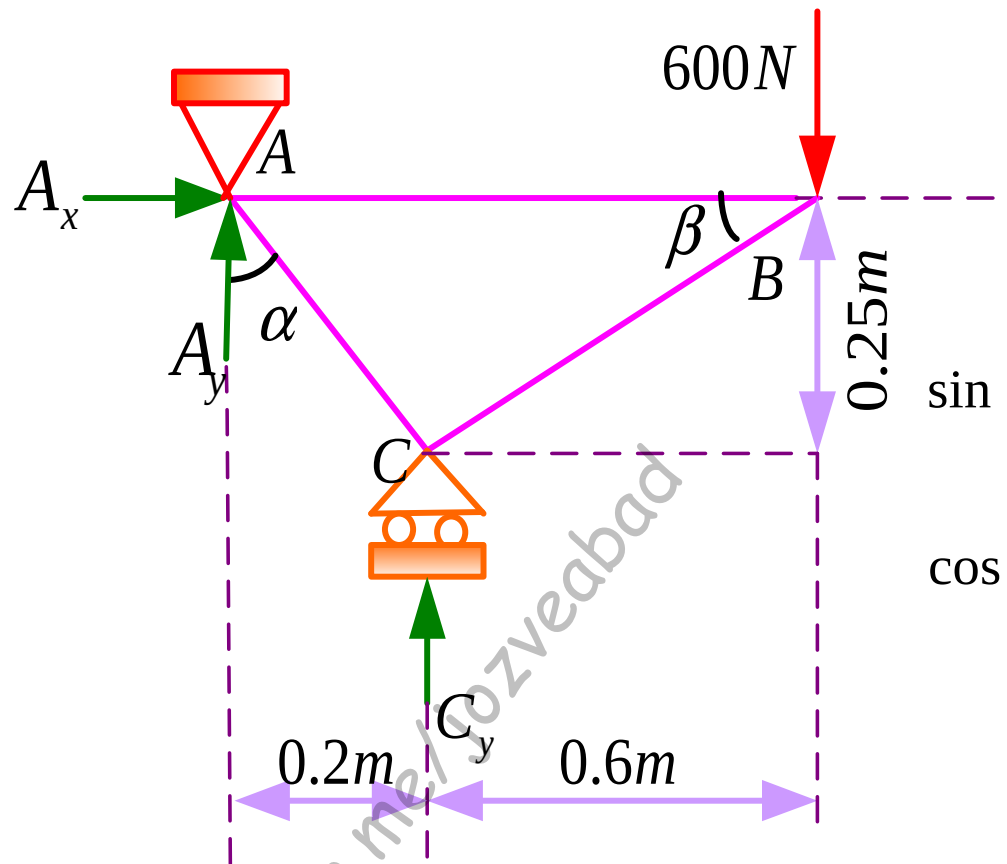
$$\sum F_y = 0$$

$$F_y + F_{DF} = 0$$

$$F_{DF} = 1350\text{ N}$$

مثال: برای تراس مطابق شکل نیروهای داخلی در هر یک از اعضا را تعیین کرده و اعضای کششی و فشاری را مشخص کنید.





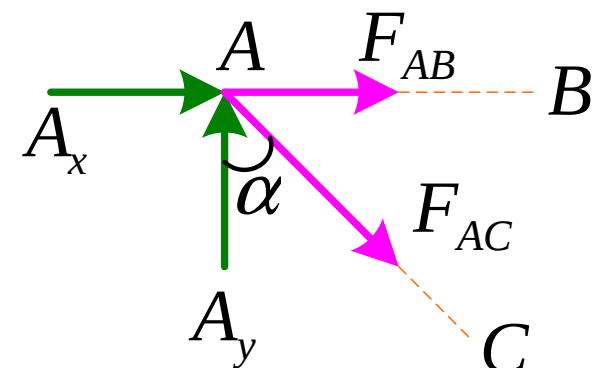
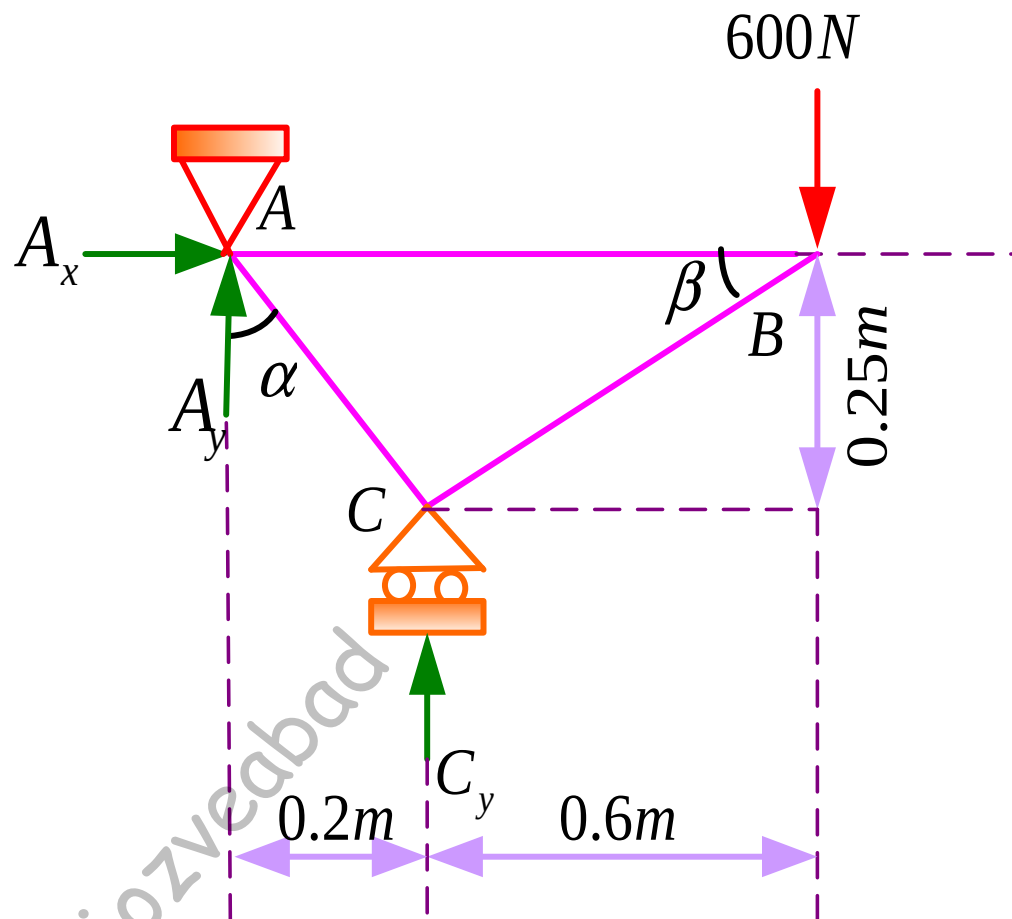
$$\sin \alpha = \frac{0.2}{\sqrt{(0.2)^2 + (0.25)^2}} = 0.63$$

$$\cos \alpha = \frac{0.25}{\sqrt{(0.2)^2 + (0.25)^2}} = 0.78$$

$$\sum M_A = 0 \Rightarrow 0.2C_y - 600(0.8) = 0 \Rightarrow C_y = 2400N$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow C_y + A_y - 600 = 0 \Rightarrow A_y = -1800N$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow A_x = 0$$



$$\sin \alpha = 0.63$$

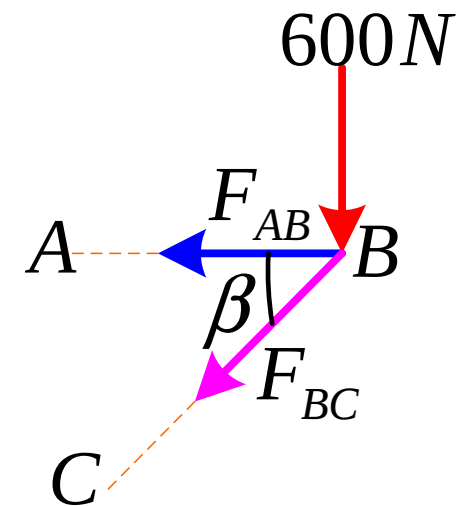
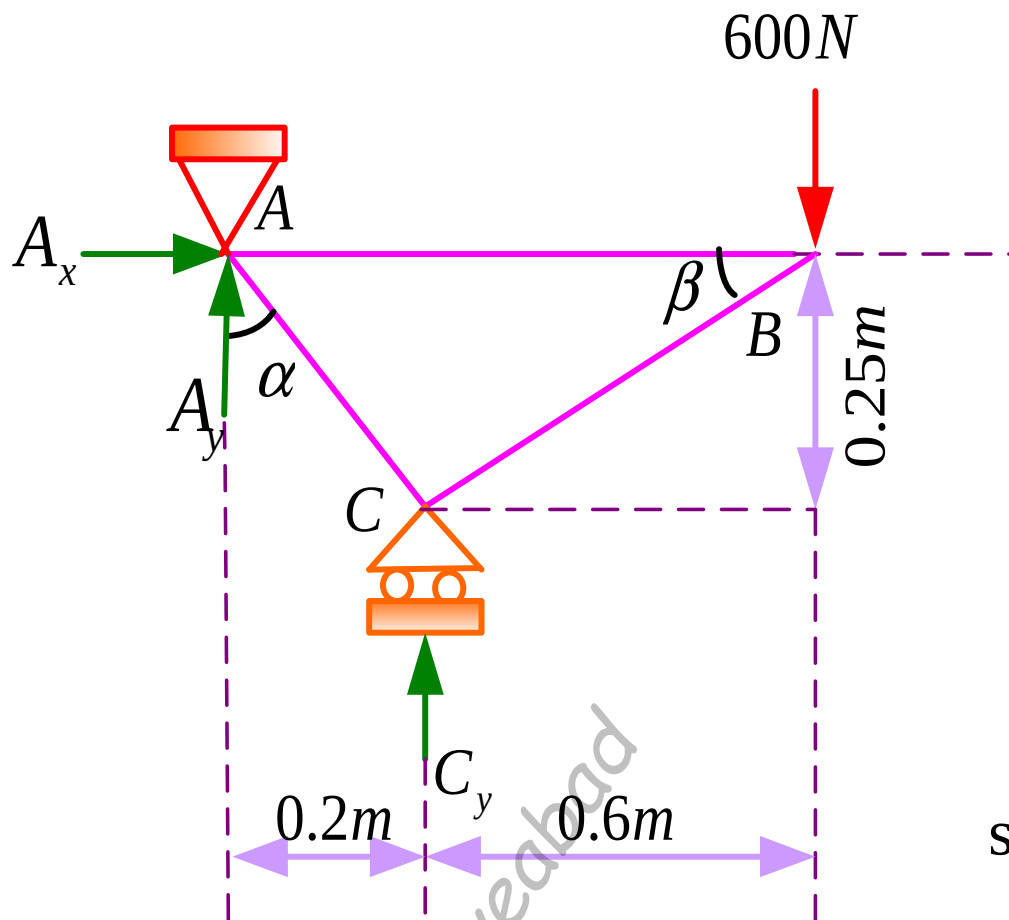
$$\cos \alpha = 0.78$$

$$A_x = 0 \quad A_y = -1800N$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{AB} + F_{AC} \sin \alpha = 0$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow A_y - F_{AC} \cos \alpha = 0$$

$$-1800 - F_{AC}(0.78) = 0 \Rightarrow \begin{cases} F_{AC} = -2307.6N \\ F_{AB} = 14358N \end{cases}$$

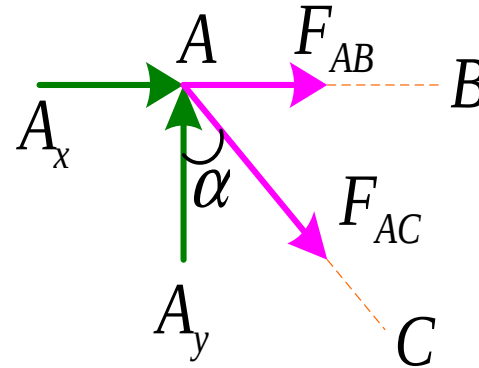
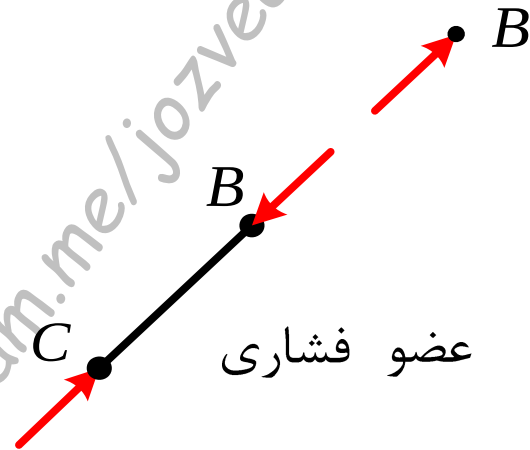
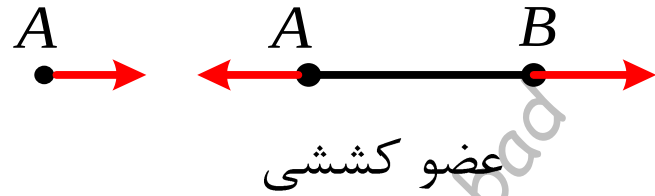
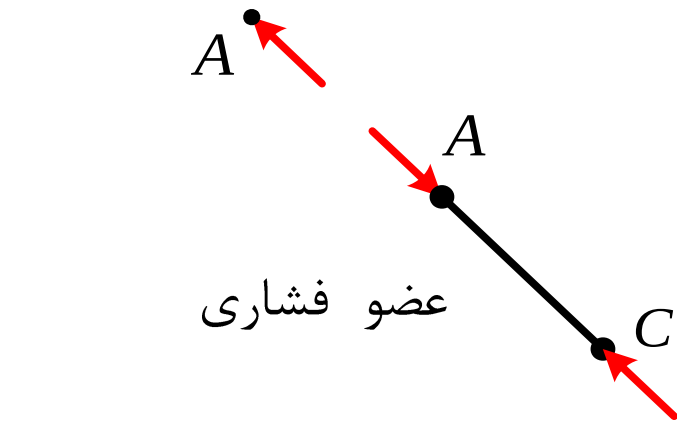


$$F_{AB} = 1435.8 \text{ N}$$

$$\sin \beta = \frac{0.25}{\sqrt{(0.25)^2 + (0.6)^2}} = 0.38$$

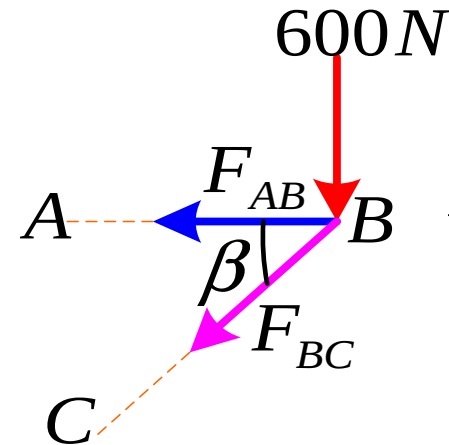
$$\cos \beta = \frac{0.6}{\sqrt{(0.25)^2 + (0.6)^2}} = 0.92$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{AB} + F_{BC} \cos \beta = 0 \Rightarrow F_{BC} = -1580.2$$



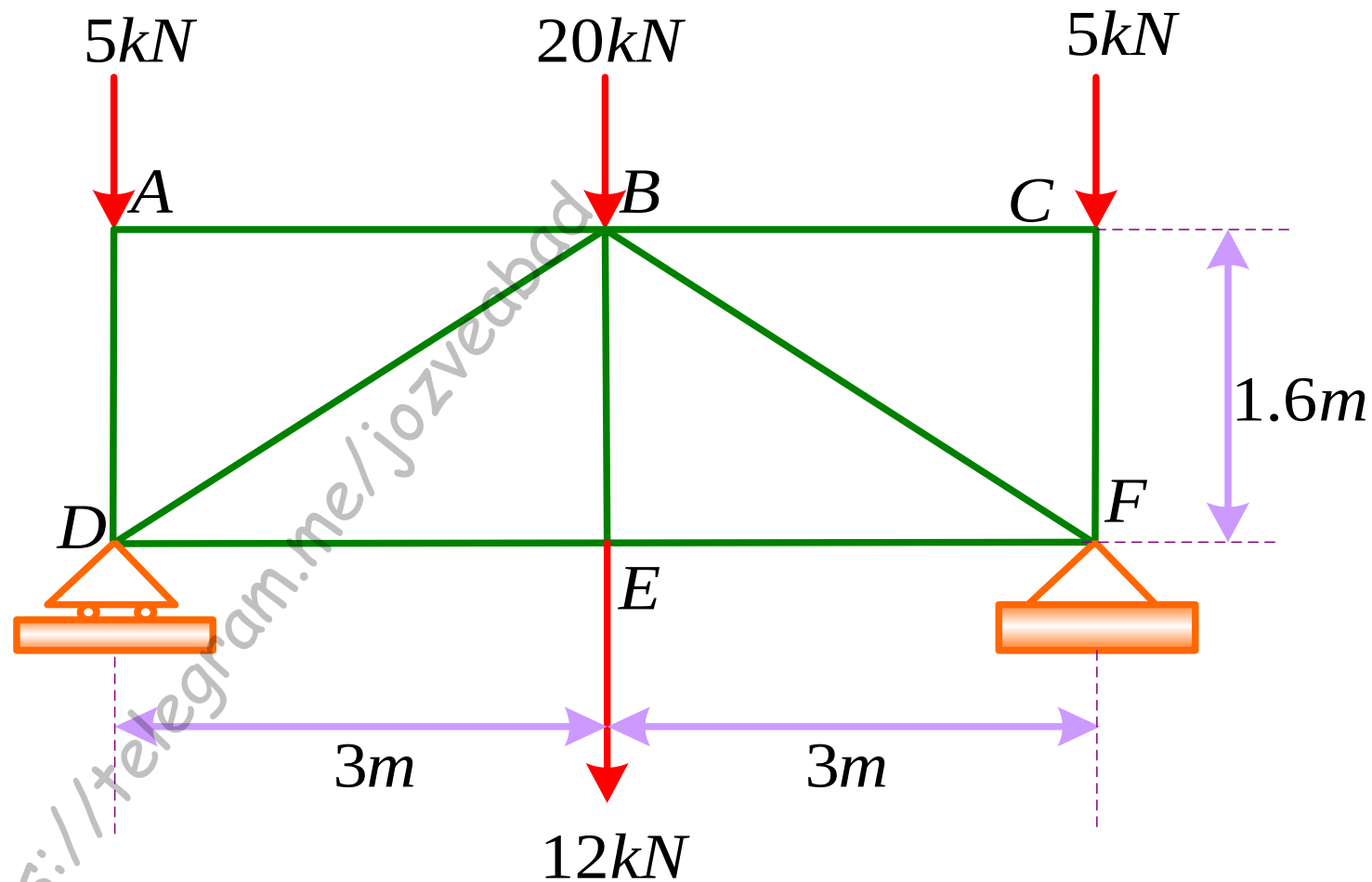
$$F_{AC} = -2307.6N$$

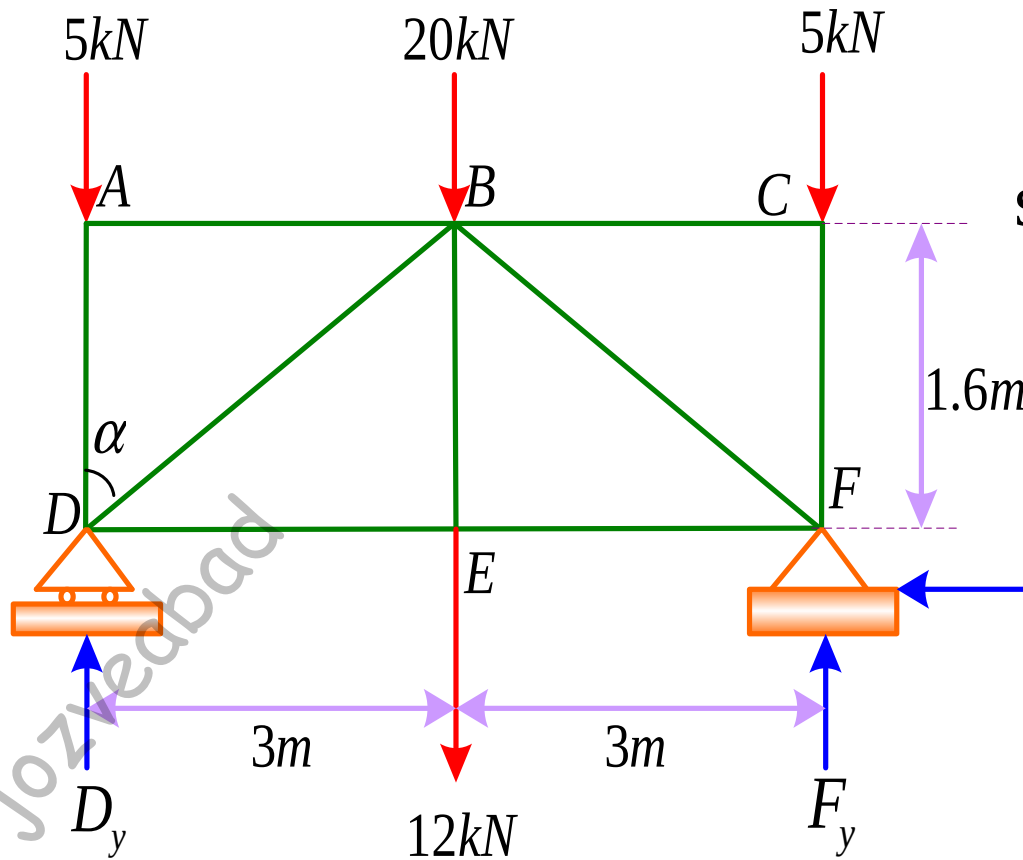
$$F_{AB} = 1435.8N$$



$$F_{BC} = -1580.2$$

مثال: برای ترانس نشان داده شده در شکل نیروهای داخلی را در هر یک از اعضا مشخص کنید.





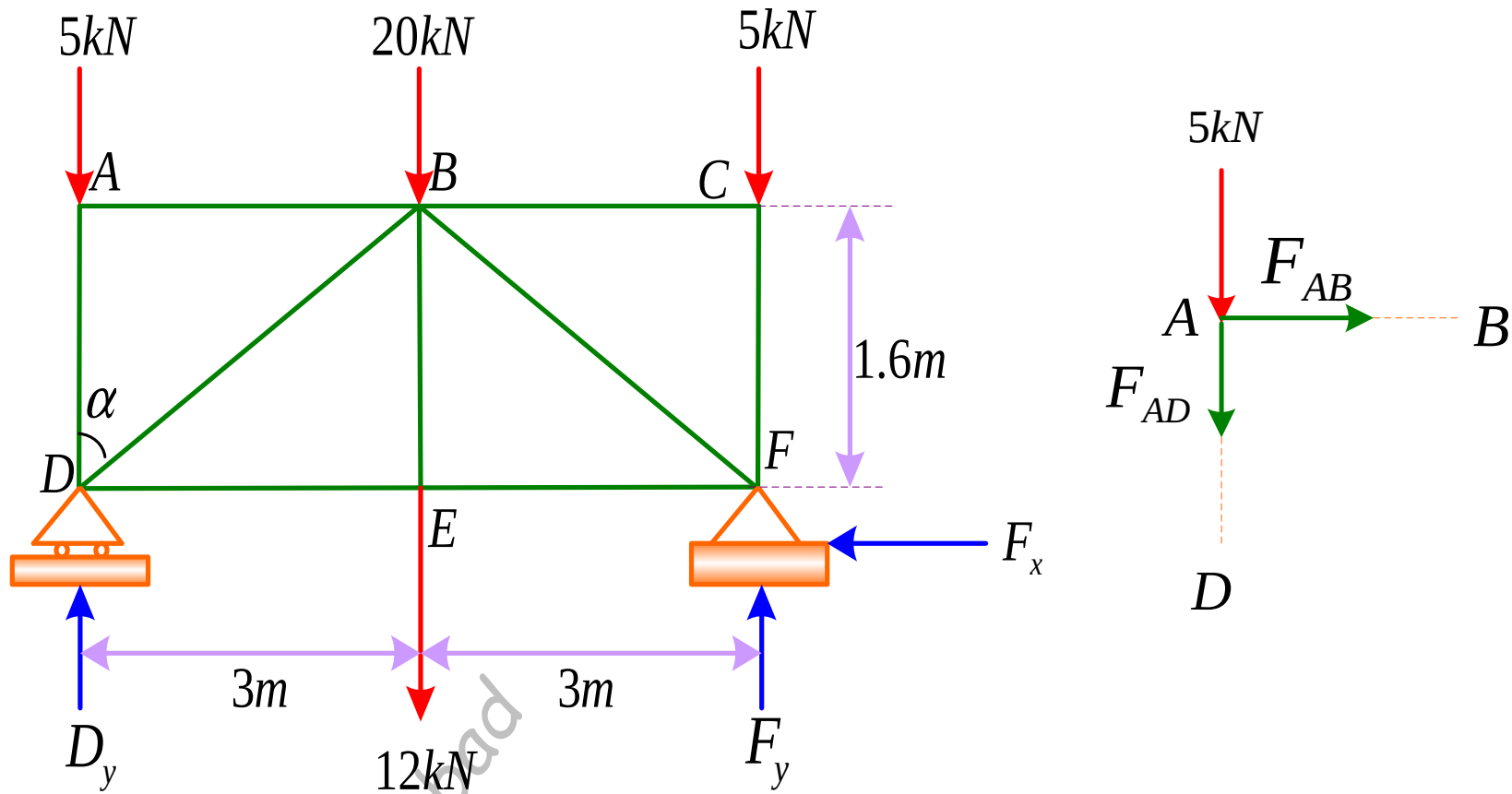
$$\sin \alpha = \frac{3}{\sqrt{3^2 + (1.6)^2}} = 0.88$$

$$\cos \alpha = \frac{1.6}{\sqrt{3^2 + (1.6)^2}} = 0.47$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_x = 0$$

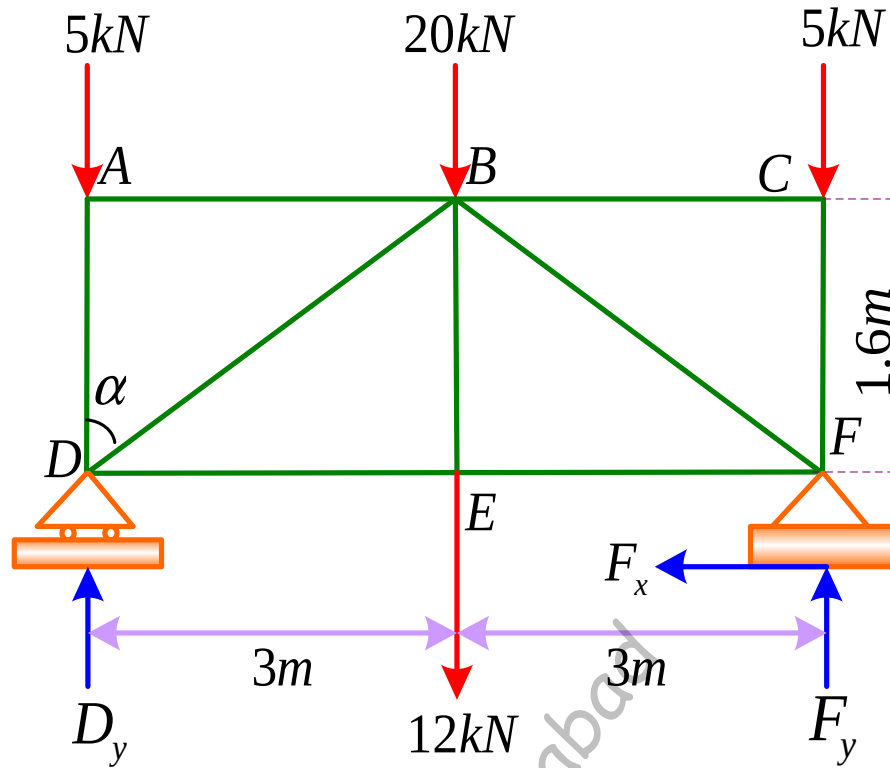
$$\sum M_F = 0 \quad D_y(6) - 12(3) - 20(3) - 5(6) = 0 \Rightarrow D_y = 21kN$$

$$\sum F_y = 0 \quad F_y + D_y - 5 - 20 - 12 - 5 = 0 \Rightarrow F_y = 21kN$$



$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{AB} = 0$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow 5 + F_{AD} = 0 \Rightarrow F_{AD} = -5kN$$

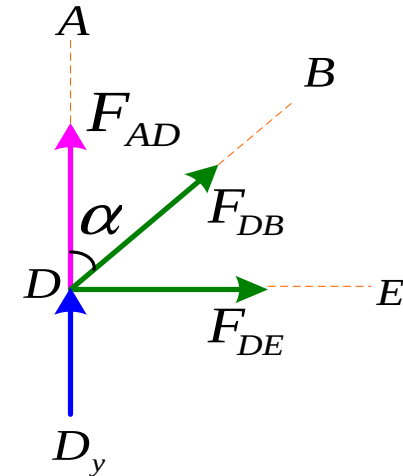


$$\sin \alpha = 0.88$$

$$\cos \alpha = 0.47$$

$$F_{AD} = -5kN$$

$$D_y = 21kN$$



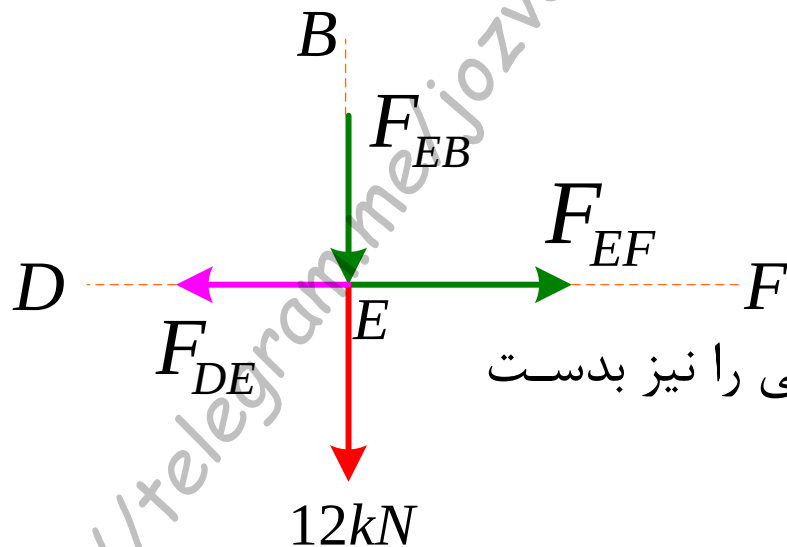
$$\sum F_y = 0 \Rightarrow D_y + F_{AD} + F_{DB} \cos \alpha = 0$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{DE} + F_{DB} \sin \alpha = 0 \Rightarrow$$

$$\begin{cases} F_{DB} = -34kN \\ F_{DE} = 30kN \end{cases}$$

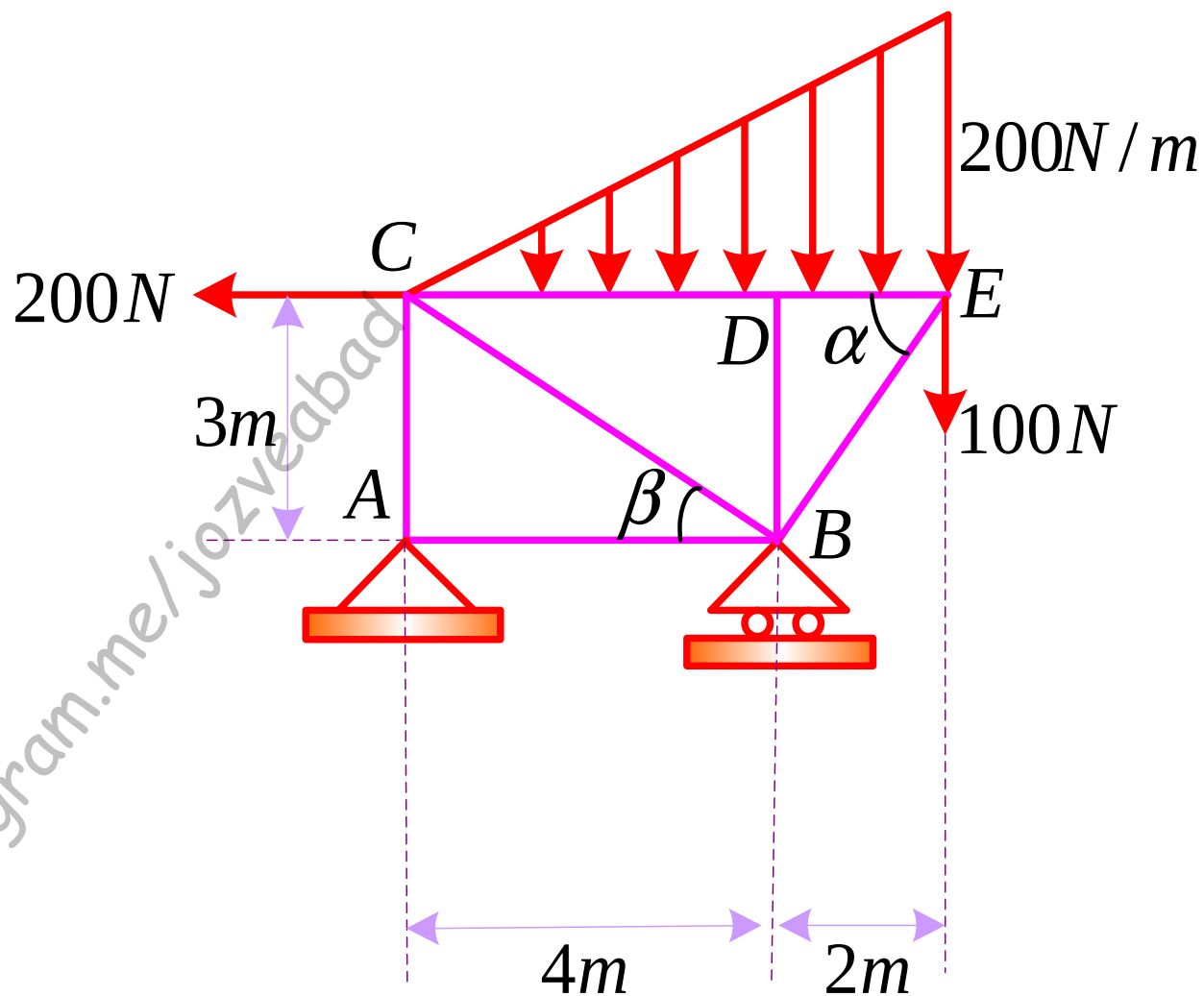
$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{EF} - F_{DE} = 0 \Rightarrow F_{EF} = 30kN$$

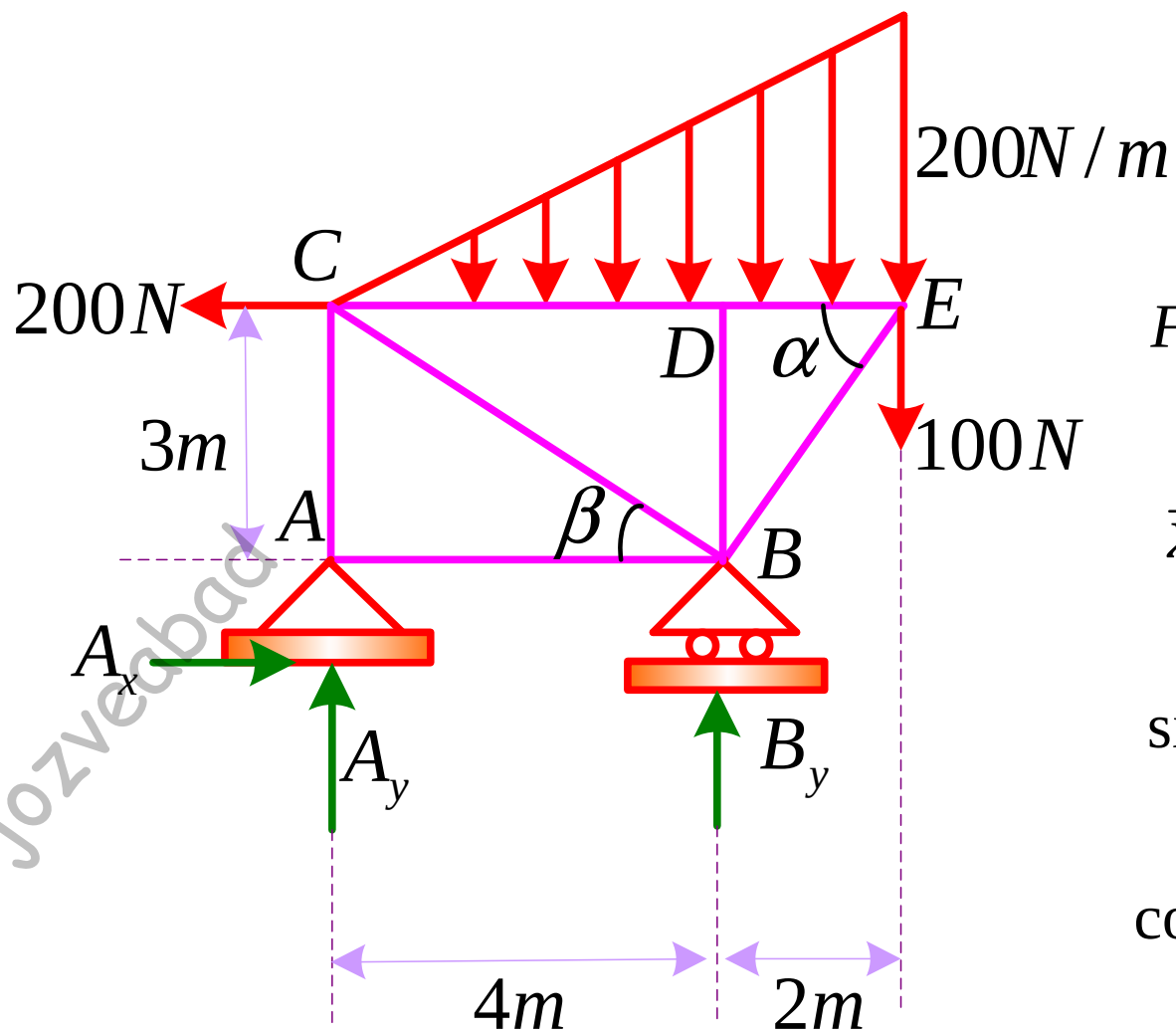
$$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_{EB} - 12 = 0 \Rightarrow F_{EB} = 12kN$$



چون شکل متقارن است می توانیم بقیه نیروهای داخلی را نیز بدست آوریم.

مثال: برای تراس نشان داده شده در شکل نیروهای داخلی در هر یک از اعضا را تعیین کنید.



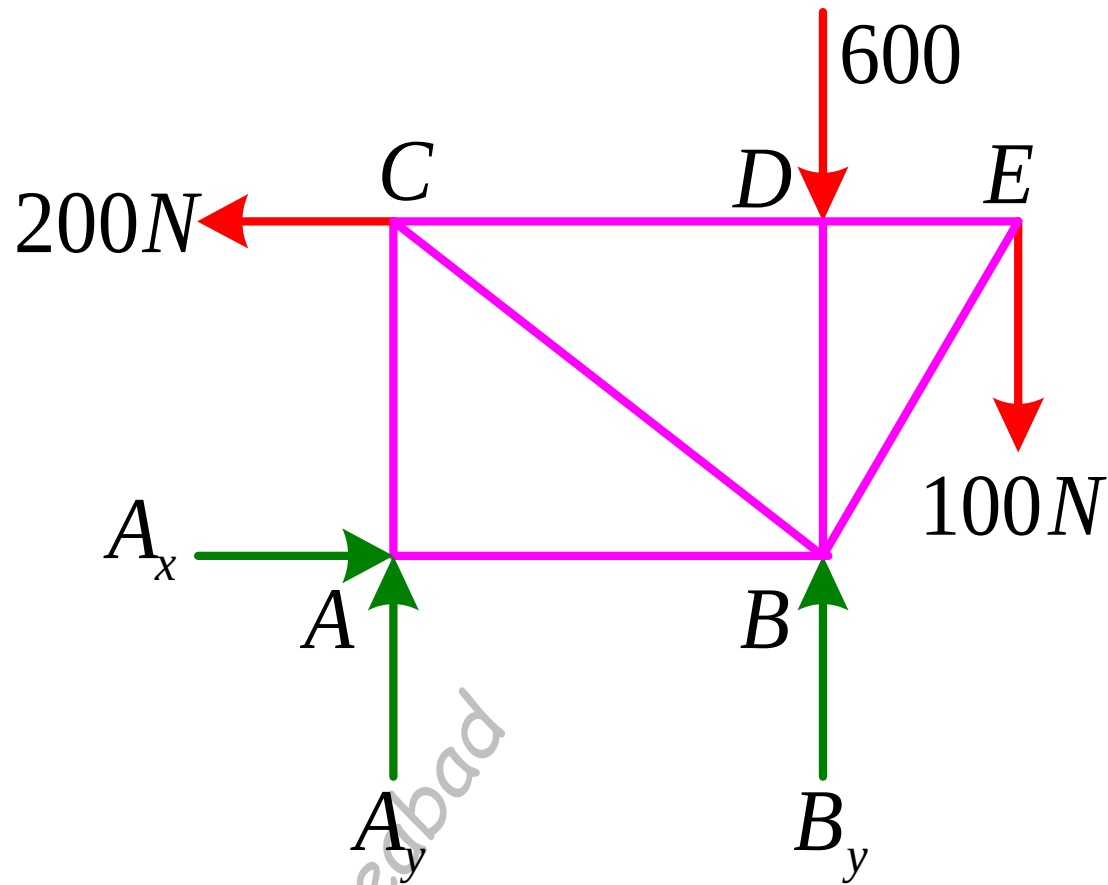


$$F = \frac{1}{2}(200 \times 6) = 600 \text{ N}$$

$$\bar{x} = \frac{2}{3} \times 6 = 4 \quad \text{از نقطه C}$$

$$\sin \alpha = \frac{3}{\sqrt{13}}$$

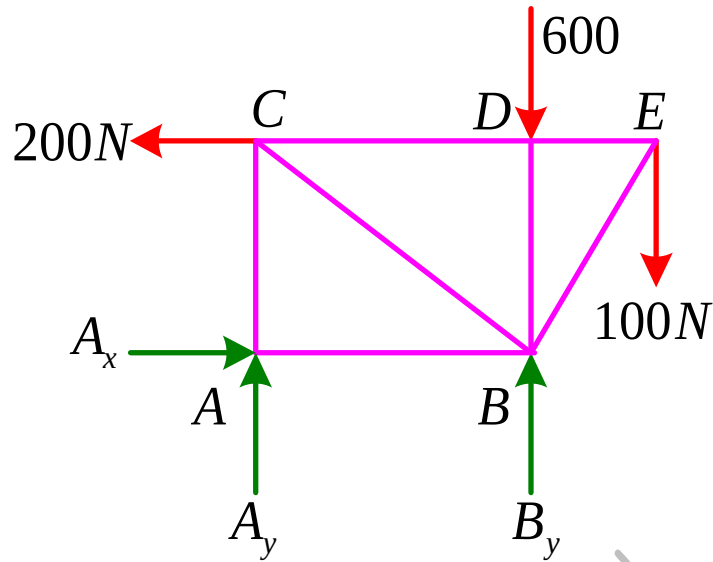
$$\cos \alpha = \frac{2}{\sqrt{13}}$$



$$\sum F_x = 0 \Rightarrow A_x - 200 = 0 \Rightarrow A_x = 200 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0 \Rightarrow 200(3) + 4B_y - 100(6) - 600(4) = 0 \Rightarrow B_y = 600 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow A_y + B_y - 600 - 100 = 0 \Rightarrow A_y = 100 \text{ N}$$

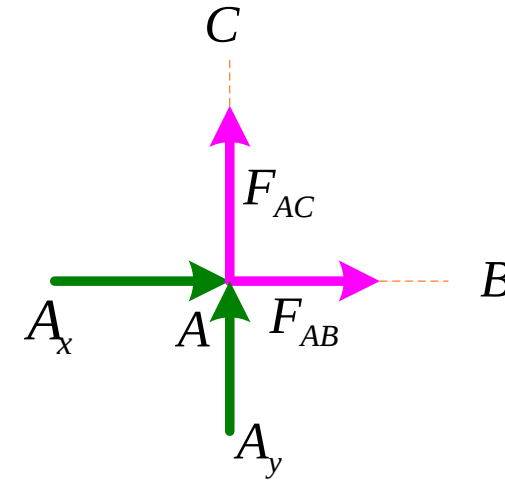


$$A_x = 200\text{ N}$$

$$A_y = 100\text{ N}$$

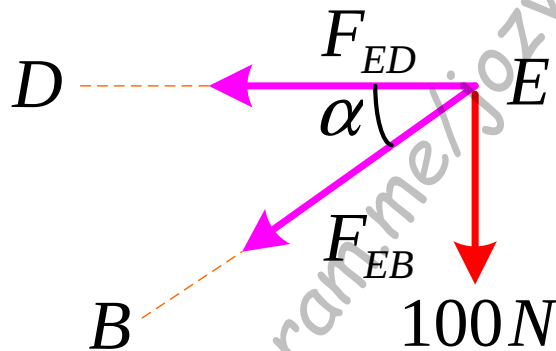
$$\sin \alpha = \frac{3}{\sqrt{13}}$$

$$\cos \alpha = \frac{2}{\sqrt{13}}$$



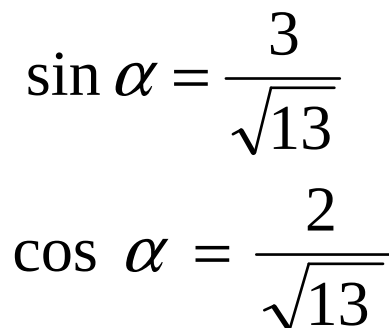
$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{AB} + A_x = 0 \Rightarrow F_{AB} = -200\text{ N}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_{AC} + A_y = 0 \Rightarrow F_{AC} = -100\text{ N}$$



$$\sum F_y = 0 \Rightarrow 100 + F_{EB} \sin \alpha = 0 \Rightarrow F_{EB} = -100 \frac{\sqrt{13}}{3}\text{ N}$$

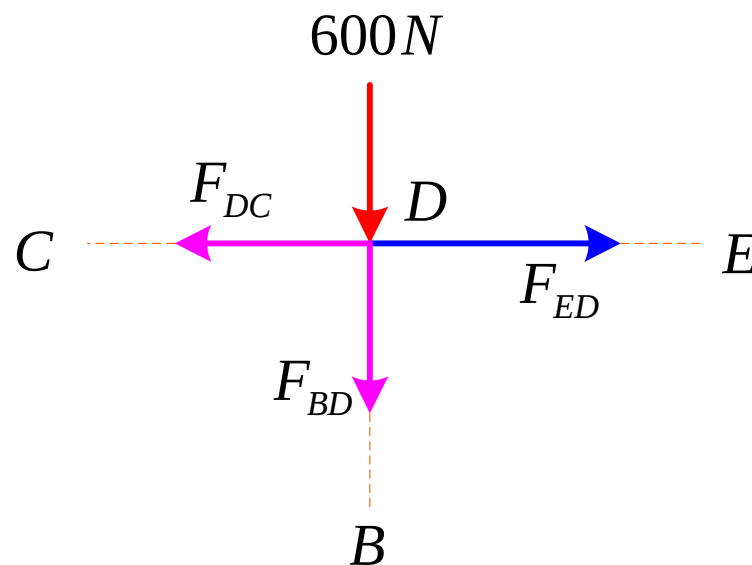
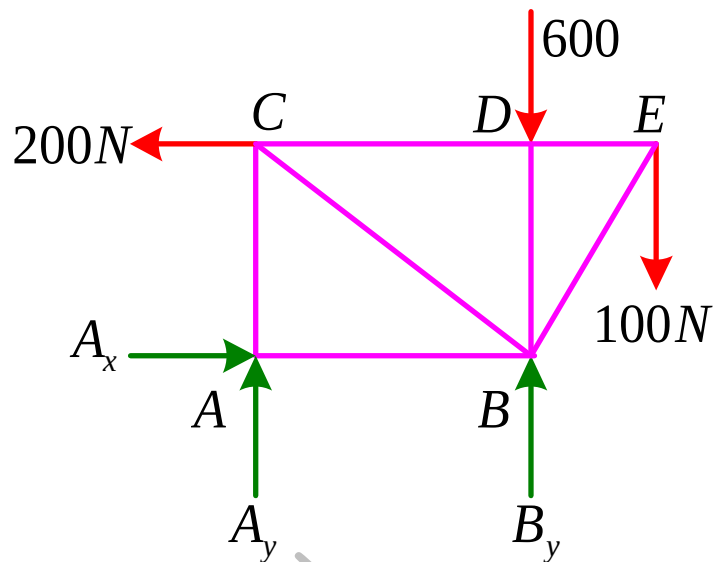
$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{ED} + F_{EB} \cos \alpha = 0 \Rightarrow F_{ED} = \frac{200}{3}\text{ N}$$



$$\cos \beta = \frac{4}{5} \quad , \quad \sin \beta = \frac{3}{5}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow B_y + F_{BD} + F_{BC} \sin \beta + F_{EB} \sin \alpha = 0 \Rightarrow F_{BD} = -600 \text{ N}$$



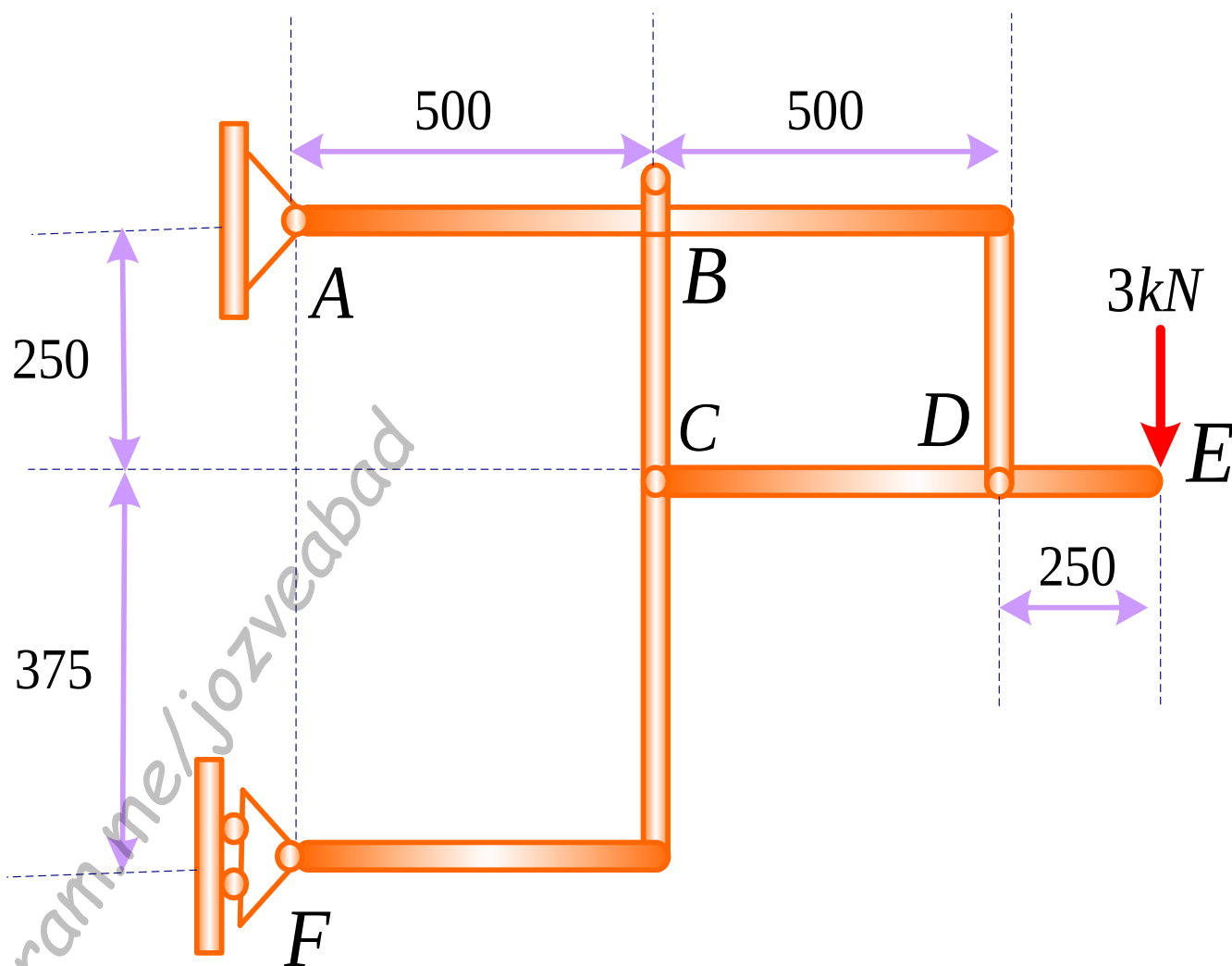


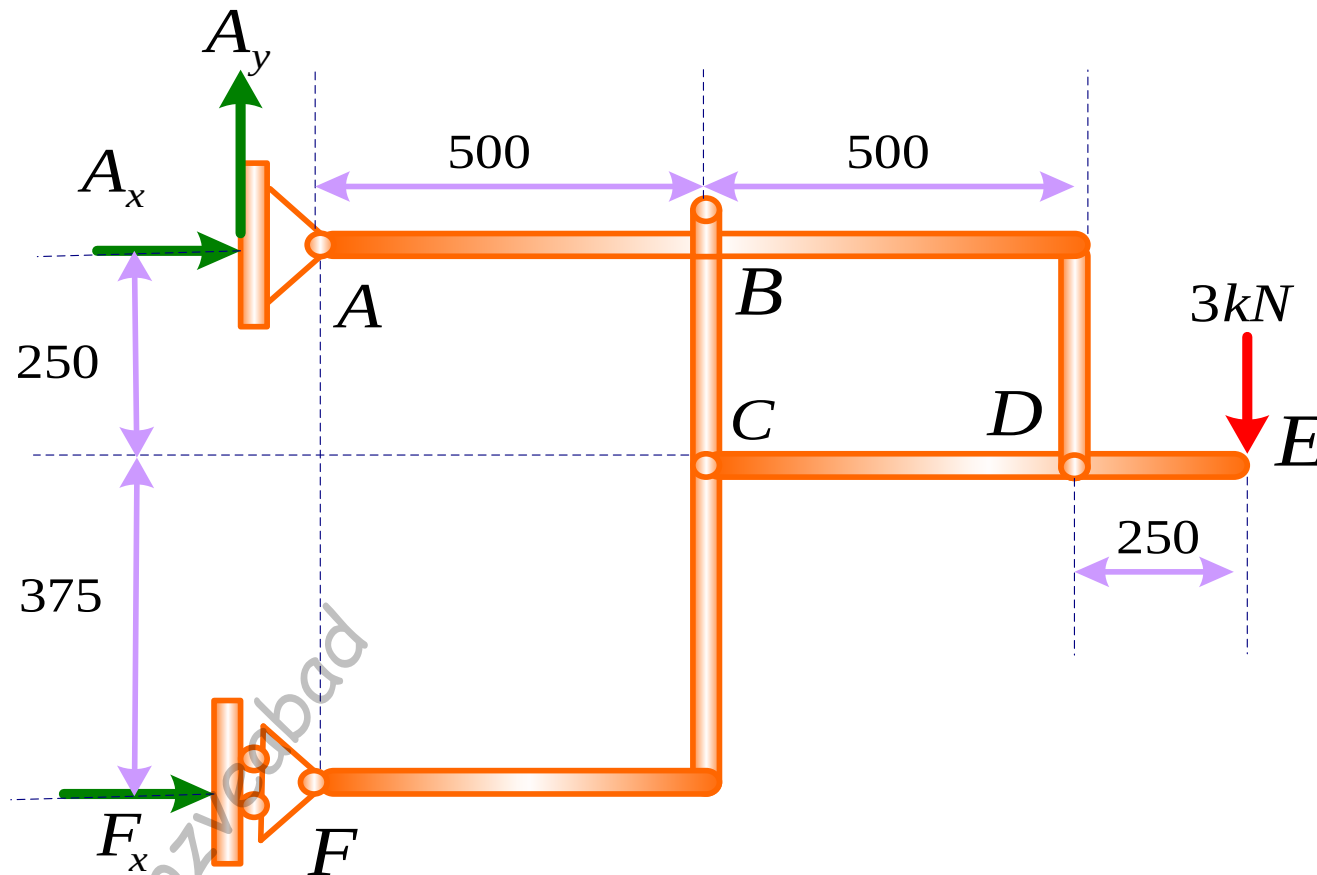
$$F_{ED} = \frac{200}{3} N$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{ED} - F_{DC} = 0 \Rightarrow F_{DC} = -\frac{200}{3} N$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow 600 + F_{BD} = 0 \Rightarrow F_{BD} = -600 N$$

مثال: برای قاب نشان داده شده در شکل نیروهای وارده بر اعضای قاب را تعیین کنید.
(ابعاد بر حسب میلیمتر هستند).

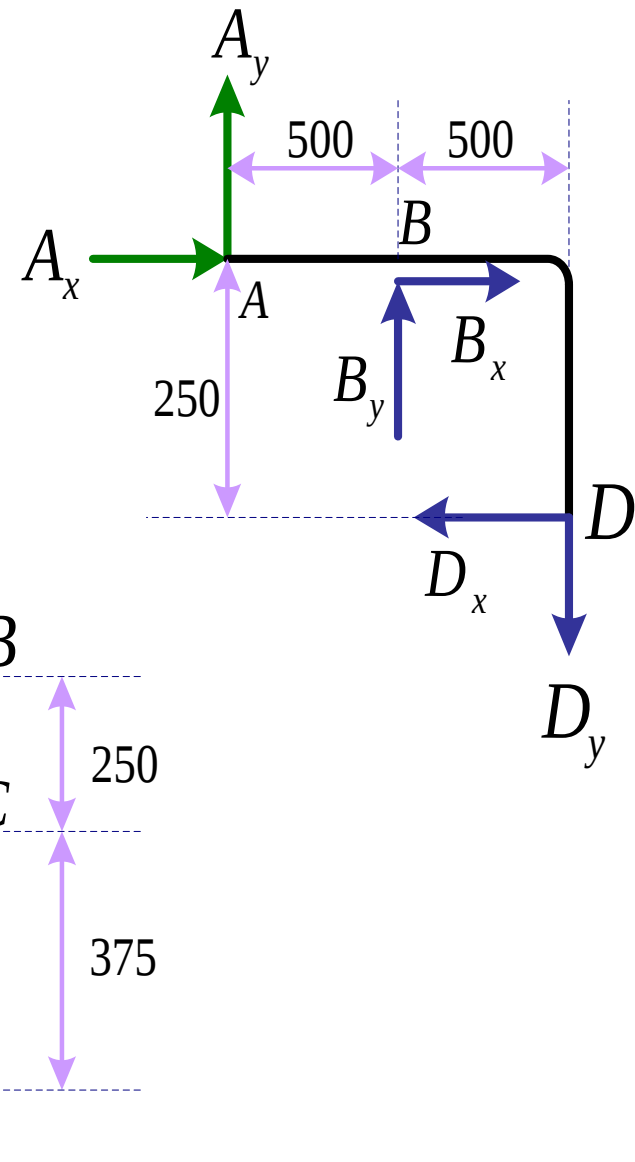
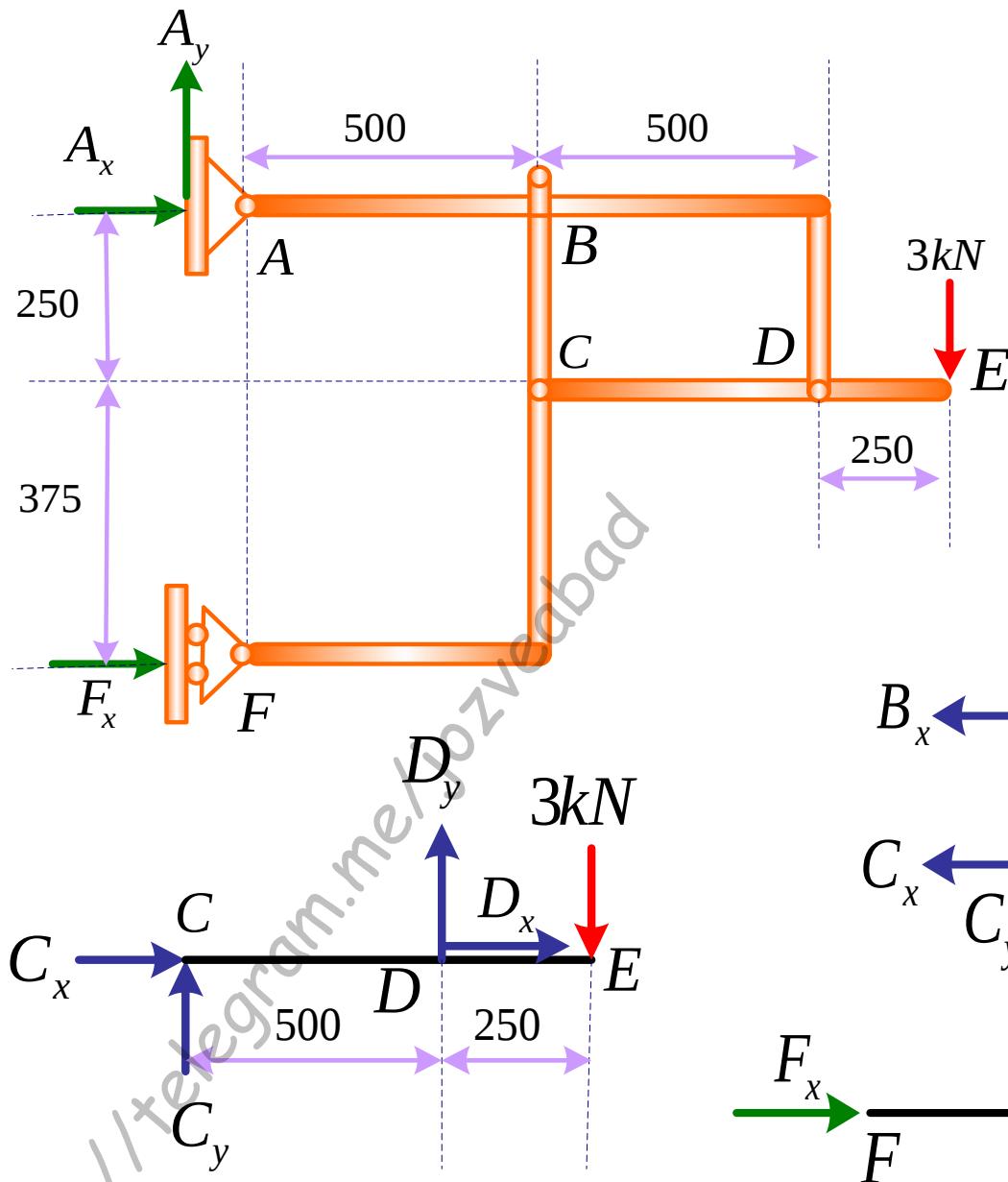




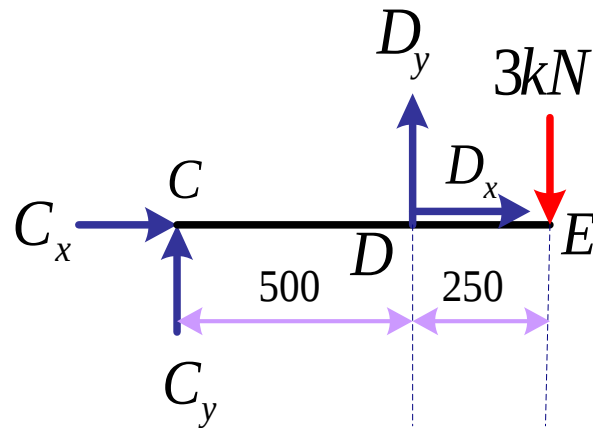
$$\sum M_A = 0 \Rightarrow 3(1.25) - F_x \times (0.625) = 0 \Rightarrow F_x = 6kN$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow A_y - 3 \rightarrow A_y = 3kN$$

$$\sum F_x = 0 \quad A_x + F_x = 0 \rightarrow A_x = -6kN$$



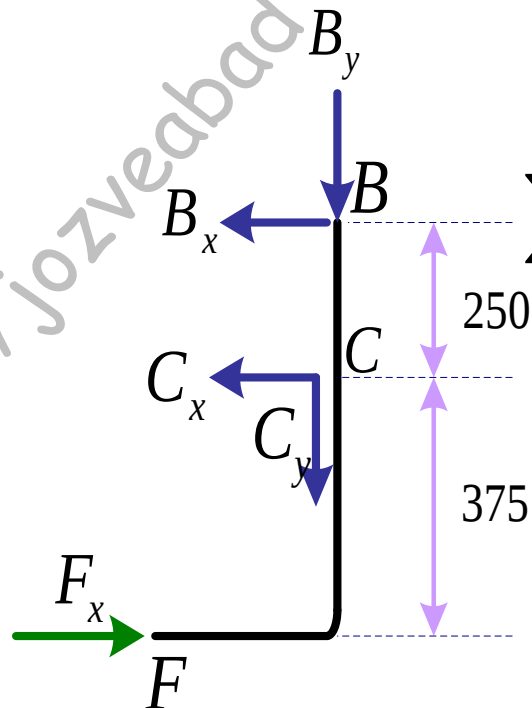
$$A_x = -6kN \quad F_x = 6kN \quad A_y = 3kN$$



$$\sum M_C = 0 \Rightarrow D_y(0.5) - 3(0.75) = 0 \Rightarrow D_y = 4.5kN$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow 4.5 - 3 + C_y = 0 \Rightarrow C_y = -1.5kN$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow D_x + C_x = 0$$



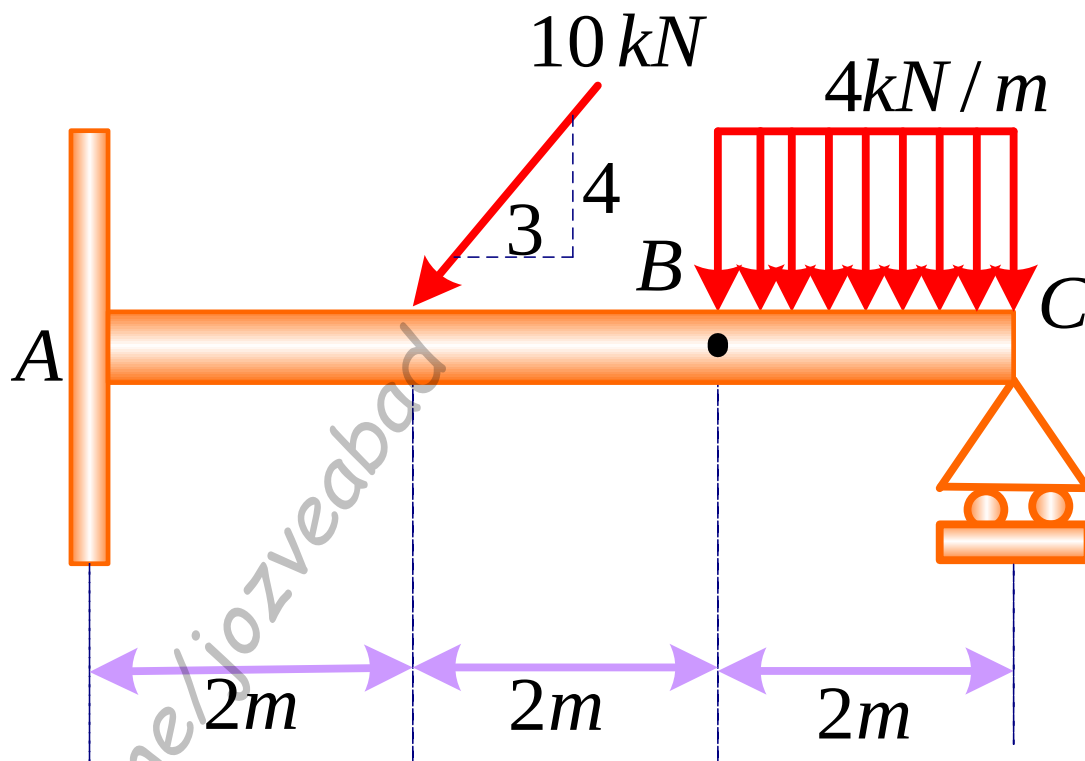
$$\sum M_B = 0 \Rightarrow F_x(0.625) - C_x(0.25) = 0 \Rightarrow C_x = 15kN$$

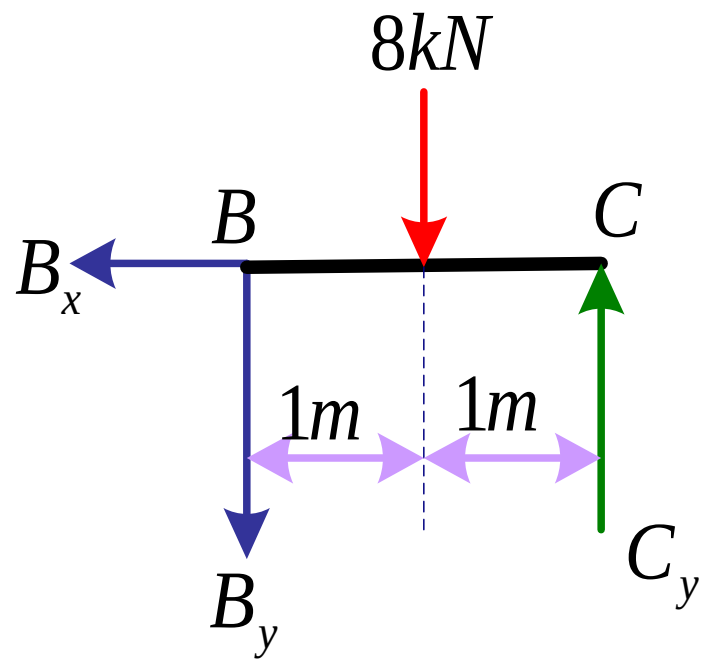
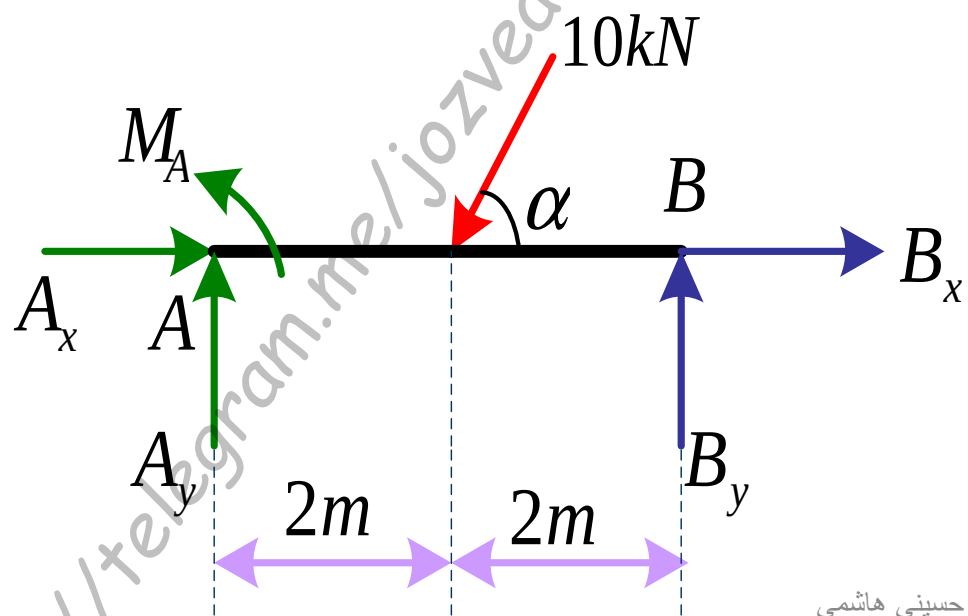
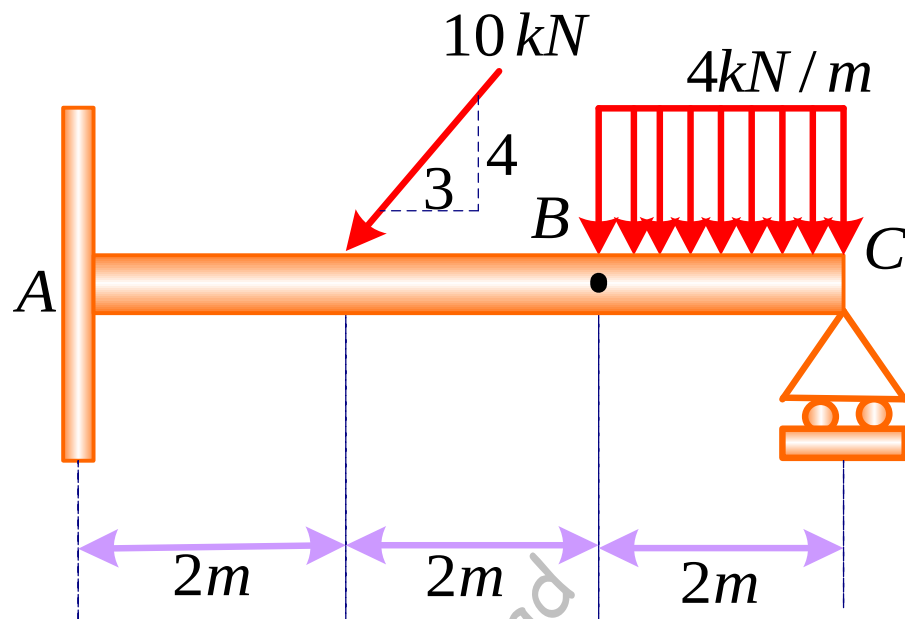
$$D_x = -C_x = -15kN$$

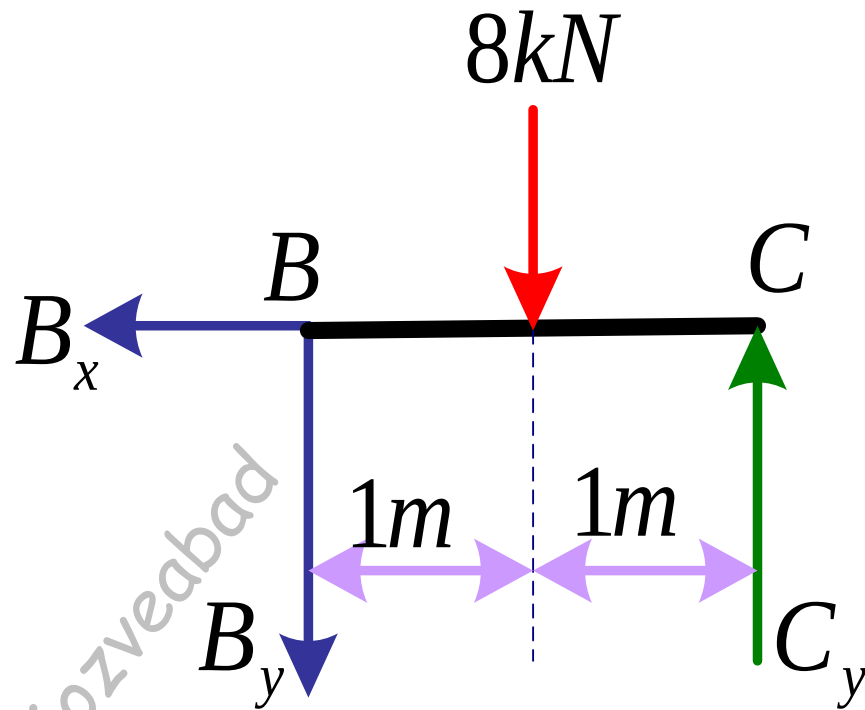
$$\sum F_y = 0 \Rightarrow B_y - 1.5 = 0 \Rightarrow B_y = 1.5kN$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow B_x + 15 - 6 = 0 \Rightarrow B_x = -9kN$$

مثال: برای تیر نشان داده شده در شکل که در B دارای اتصال مفصلی و در A گیردار است عکس العمل ها در تکیه گاه ها را بدست آورید.



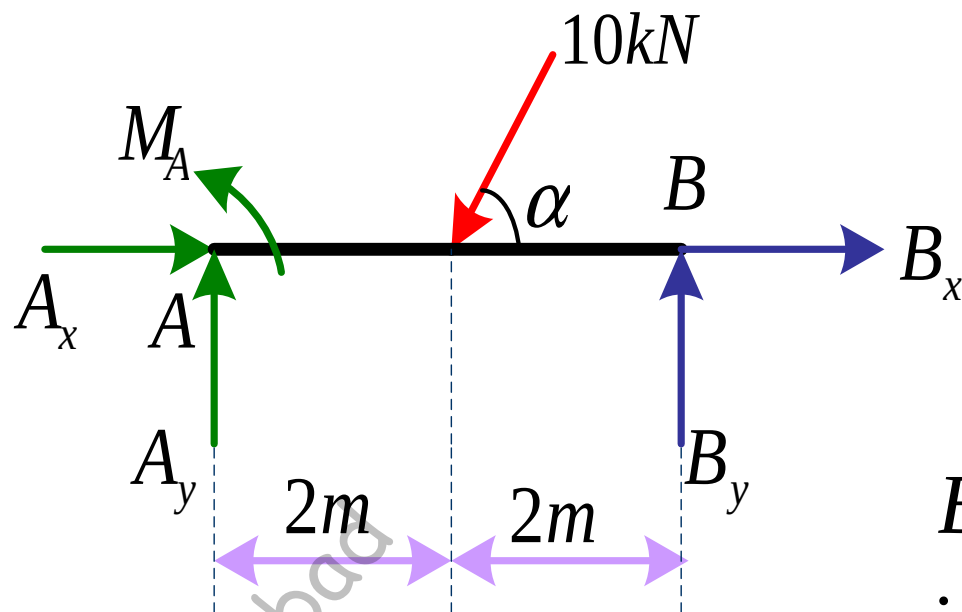




$$\sum M_B = 0 \rightarrow 2C_y - 8(1) \Rightarrow C_y = 4kN$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow C_y - B_y - 8 = 0 \Rightarrow B_y = -4kN$$

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



$$B_x = 0 \quad B_y = -4kN$$

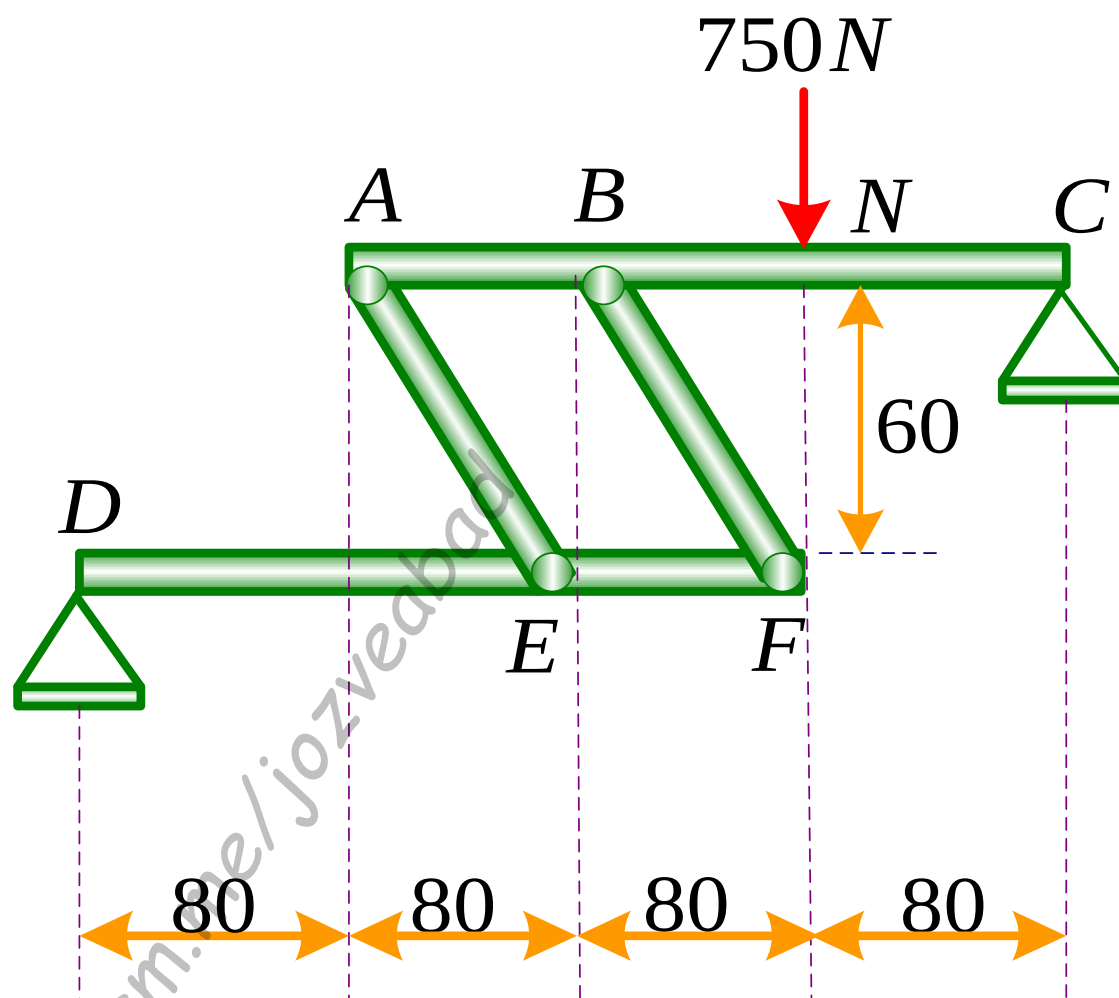
$$\sin \alpha = 0.8 \quad \cos \alpha = 0.6$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow B_y + A_y - 10 \sin \alpha = 0 \rightarrow A_y = 12kN$$

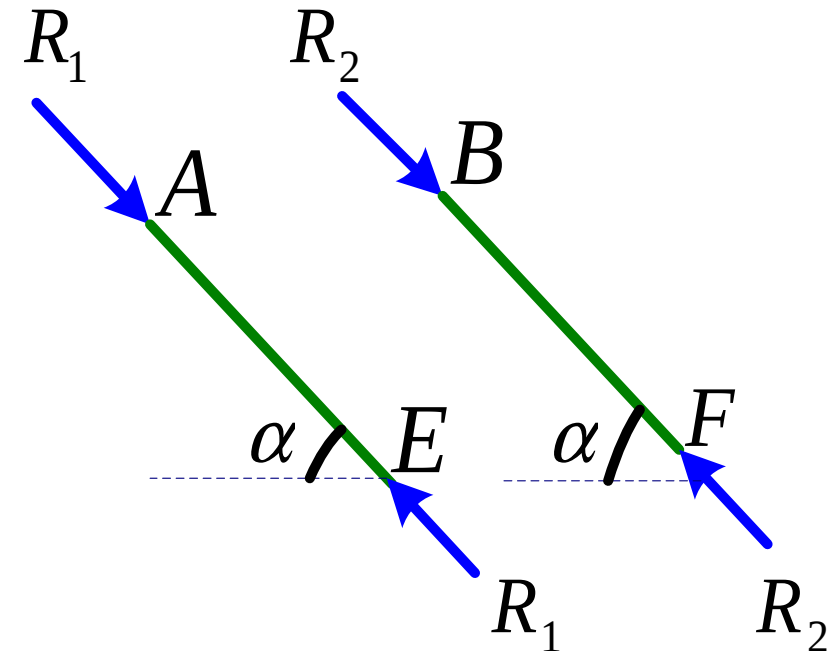
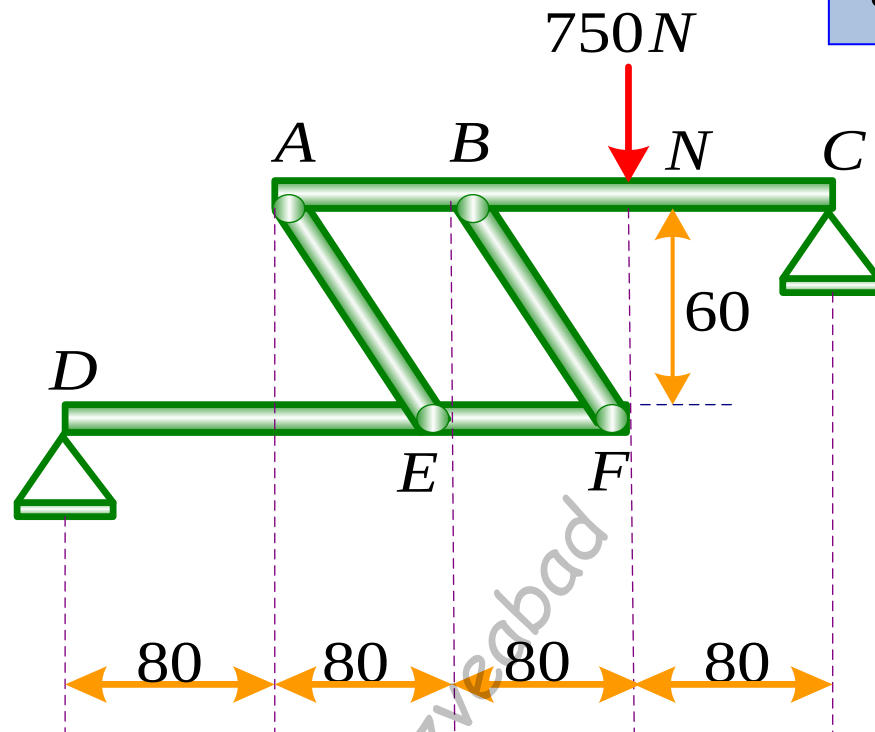
$$\sum F_x = 0 \rightarrow A_x + B_x - 10 \cos \alpha = 0 \rightarrow A_x = 6kN$$

$$\sum M_A = 0 \rightarrow 4B_y - 10 \sin \alpha \times 2 + M_A = 0 \Rightarrow M_A = 32kN.m$$

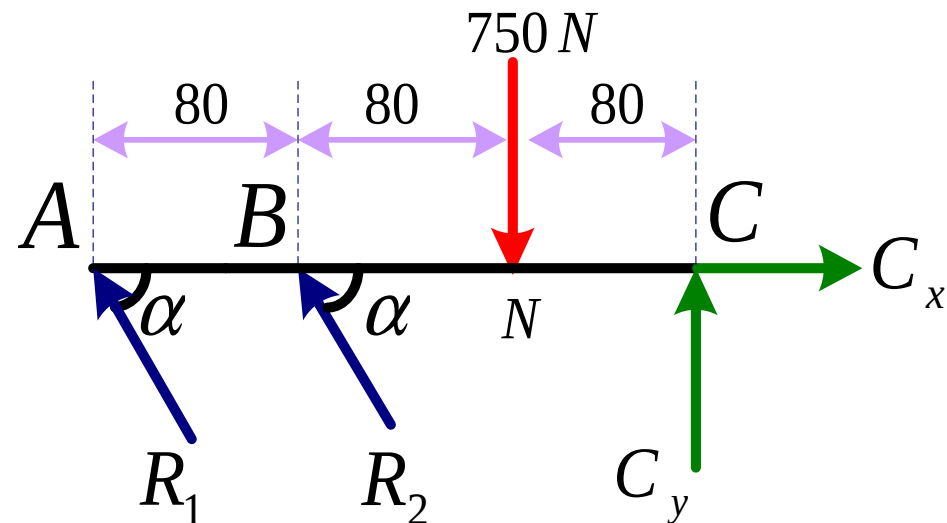
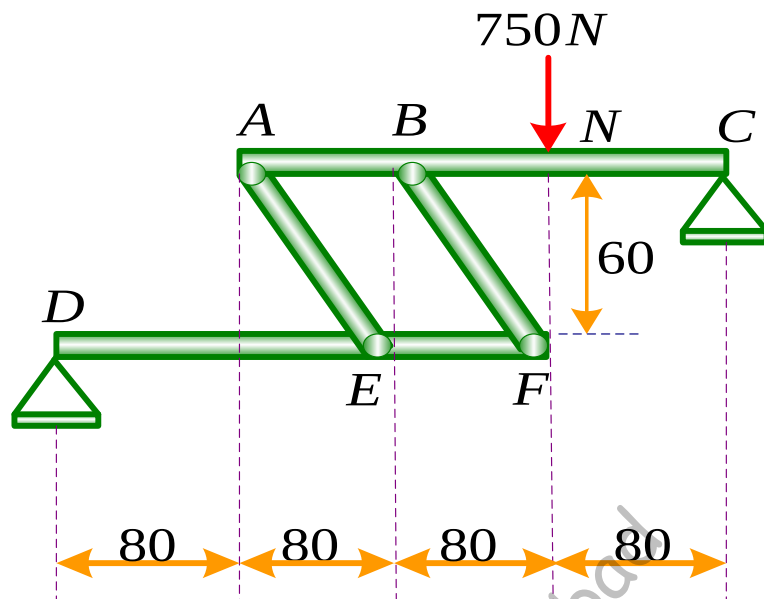
مثال: برای سازه نشان داده شده در شکل که در نقطه N تحت تأثیر نیروی 750N قرار دارد مؤلفه های عکس العمل ها را در نقاط C و D پیدا کنید. (ابعاد بر حسب میلیمتر هستند).



سازه دارای دو عضو دو نیرویی AE و BF است



$$\sin \alpha = \frac{60}{\sqrt{60^2 + 80^2}} = 0.6, \quad \cos \alpha = \frac{80}{\sqrt{60^2 + 80^2}} = 0.8$$



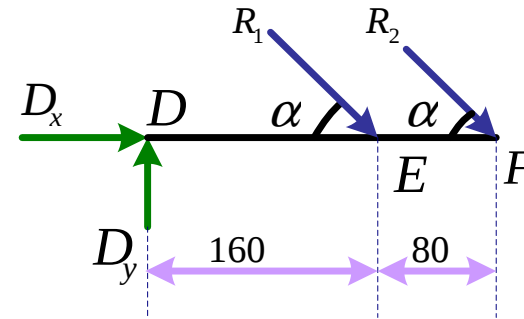
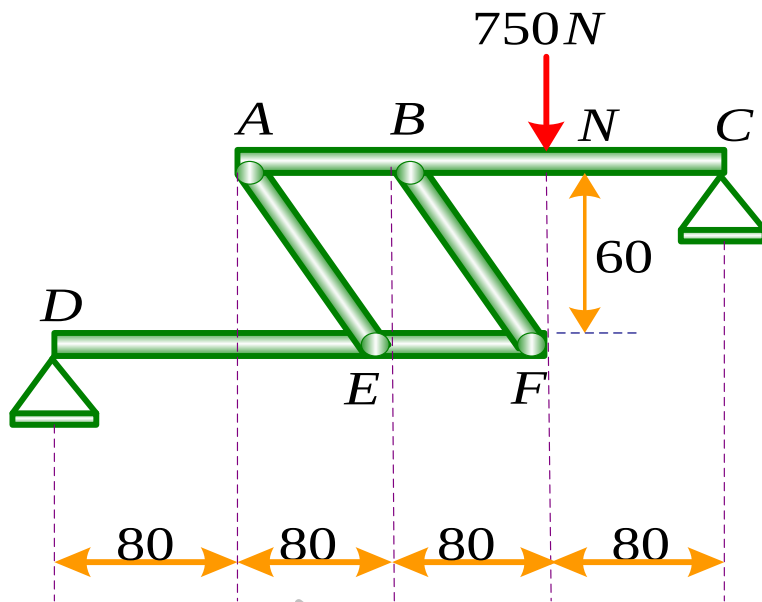
$$\sum M_C = 0 \Rightarrow R_1 \sin \alpha \times (0.24) + R_2 \sin \alpha \times (0.16) - 750 \times 0.08 = 0$$

$$3R_1 + 2R_2 = 1250$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow C_y - 750 + R_1 \sin \alpha + R_2 \sin \alpha = 0$$

$$C_y - 750 + 0.6 (R_1 + R_2) = 0$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow C_x - R_1 \cos \alpha - R_2 \cos \alpha = 0 \quad C_x - 0.8(R_1 + R_2) = 0$$



$$\sum M_D = 0 \Rightarrow R_1 \sin \alpha (0.16) + R_2 \sin \alpha (0.24) = 0 \quad \boxed{2R_1 + 3R_2 = 0}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow D_y - R_1 \sin \alpha - R_2 \sin \alpha = 0 \quad \boxed{D_y - 0.6(R_1 + R_2) = 0}$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow D_x + R_1 \cos \alpha + R_2 \cos \alpha = 0 \quad \boxed{D_x + 0.8(R_1 + R_2) = 0}$$

$$2R_1 + 3R_2 = 0$$

$$3R_1 + 2R_2 = 1250$$

$$R_1 = 750N$$

$$R_2 = -500N$$

$$C_x - 0.8(R_1 + R_2) = 0$$

$$C_x = 200N$$

$$D_y - 0.6(R_1 + R_2) = 0$$

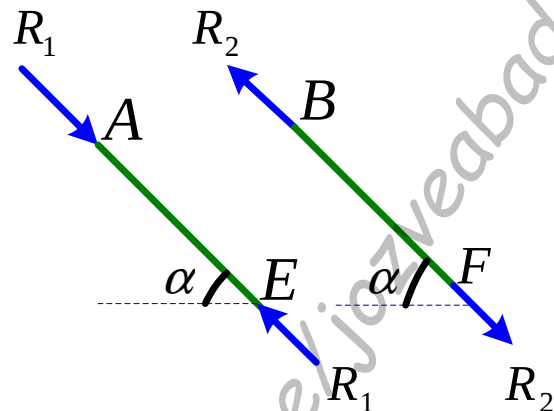
$$D_y = 150N$$

$$C_y - 750 + 0.6(R_1 + R_2) = 0$$

$$C_y = 600N$$

$$D_x + 0.8(R_1 + R_2) = 0$$

$$D_x = -200N$$



عضو AE فشاری و عضو BF کششی است.

۶- تحلیل تیرها

مقدمه

تیر: عضوی که به منظور تحمل نیروها در سرتاسر طولش طراحی میشود تیر نام دارد. تیرها طویل و مقاطع آنها به اشکال مختلفی میباشد (دایروی، مستطیلی، چند ضلعی، U شکل، T شکل، L شکل و ...)

نیروها: معمولاً عمود بر محور تیر اعمال می شوند و سبب برش و خمش می گردند . نیروها میتوانند متمرکز و یا توزیعی و یا ترکیبی از متمرکز و توزیعی باشند.

طراحی تیر

قسمت اول: نیروهای برشی و گشتاور خمشی در نقاط مختلف تیر تحت تأثیر نیروهای خارجی اعمالی تعیین می شود. (استاتیک)

قسمت دوم: تعیین سطح مقطع تیر به منظور تحمل نیروهای خارجی اعمالی. (مقاومت مصالح)

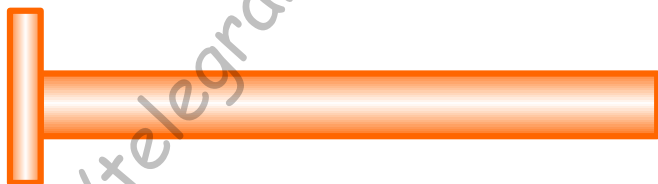
تیرها را بر حسب تکیه گاهشان طبقه بندی می کنند:



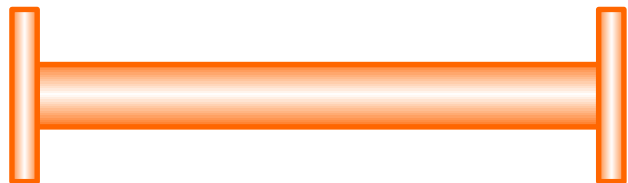
تیری که در دو انتها روی تکیه گاه ساده قرار دارد



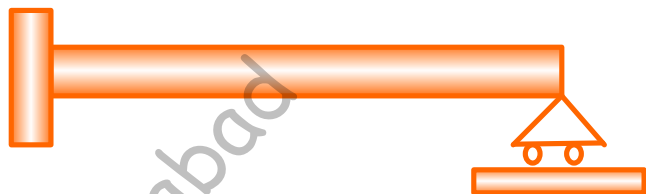
تیر نیمه آویزان



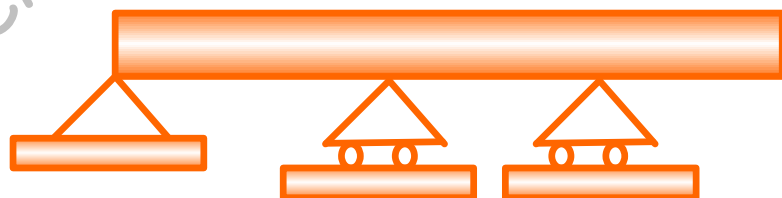
تیر یک سرگیردار



تیر دو سر گیردار



تیری که در یک سر گیردار و در سر دیگر روی تکیه گاه قرار دارد

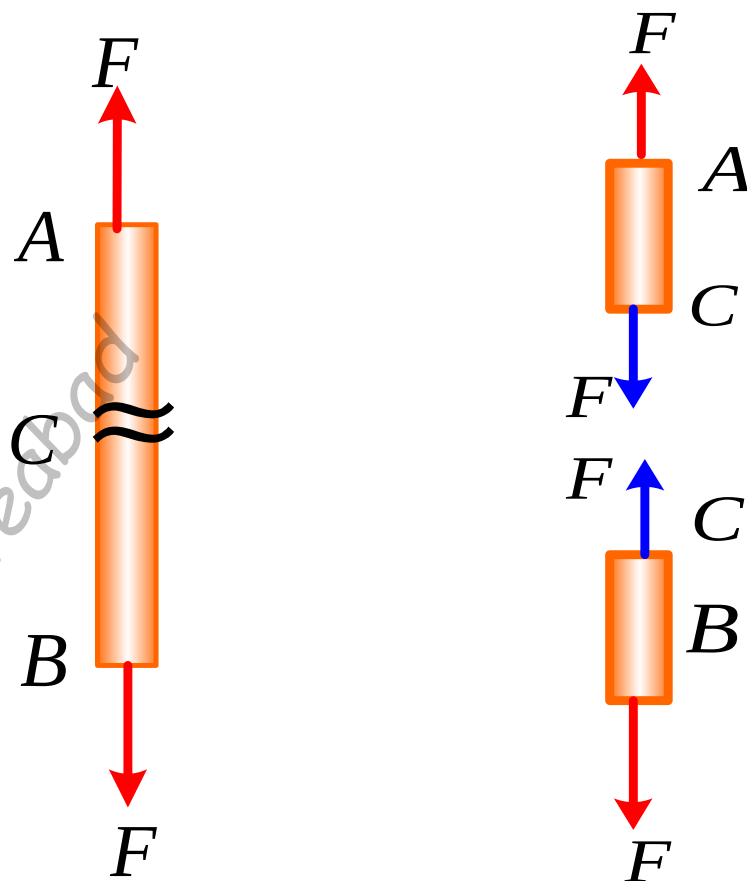


تیر با تکیه گاه های ساده متعدد

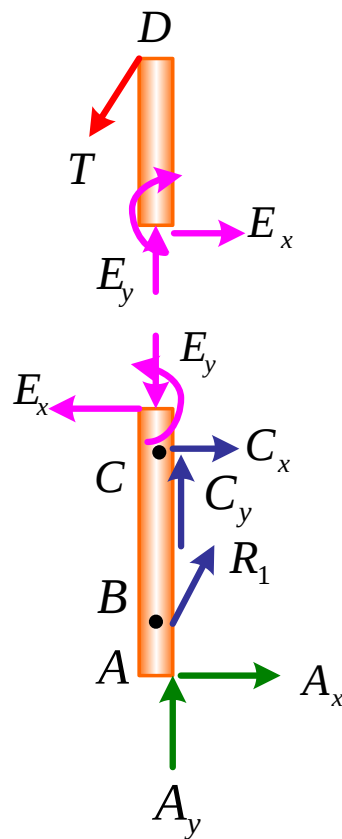
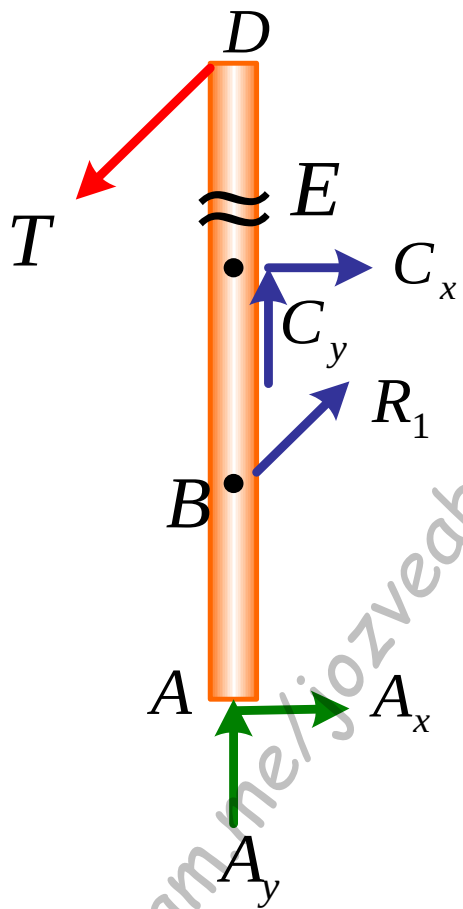
gram.me/jozveabad

تحلیل تیرها

نیروهای داخلی در عضوهای دو نیرویی

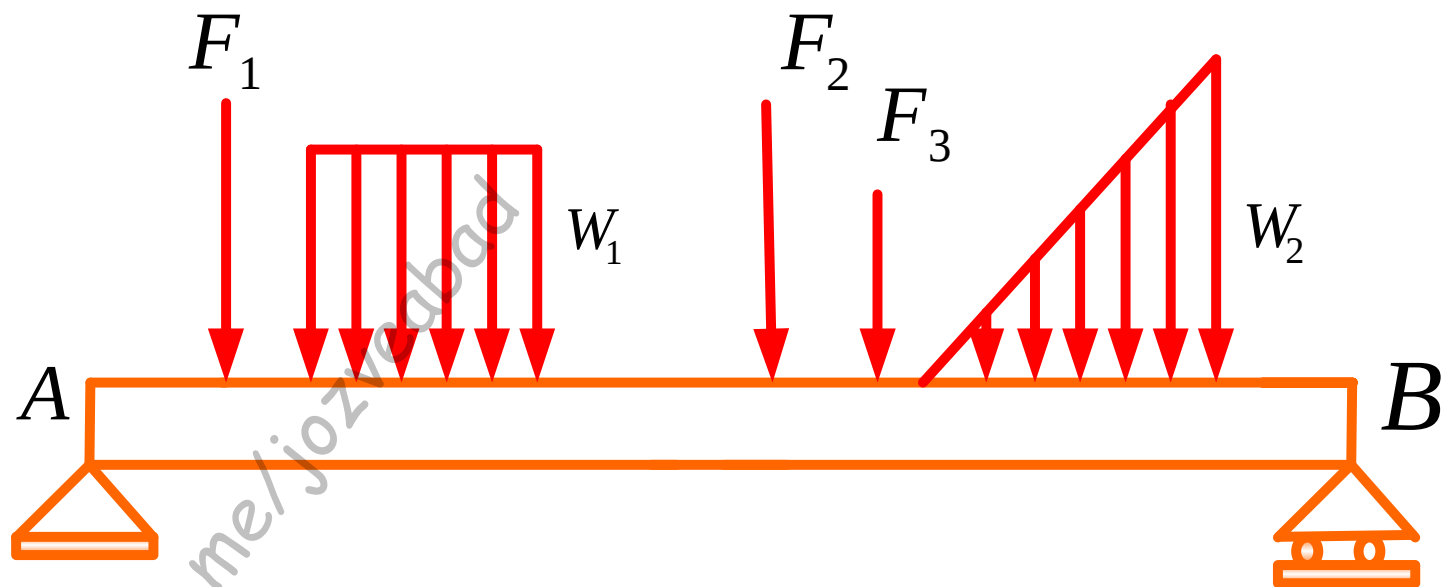


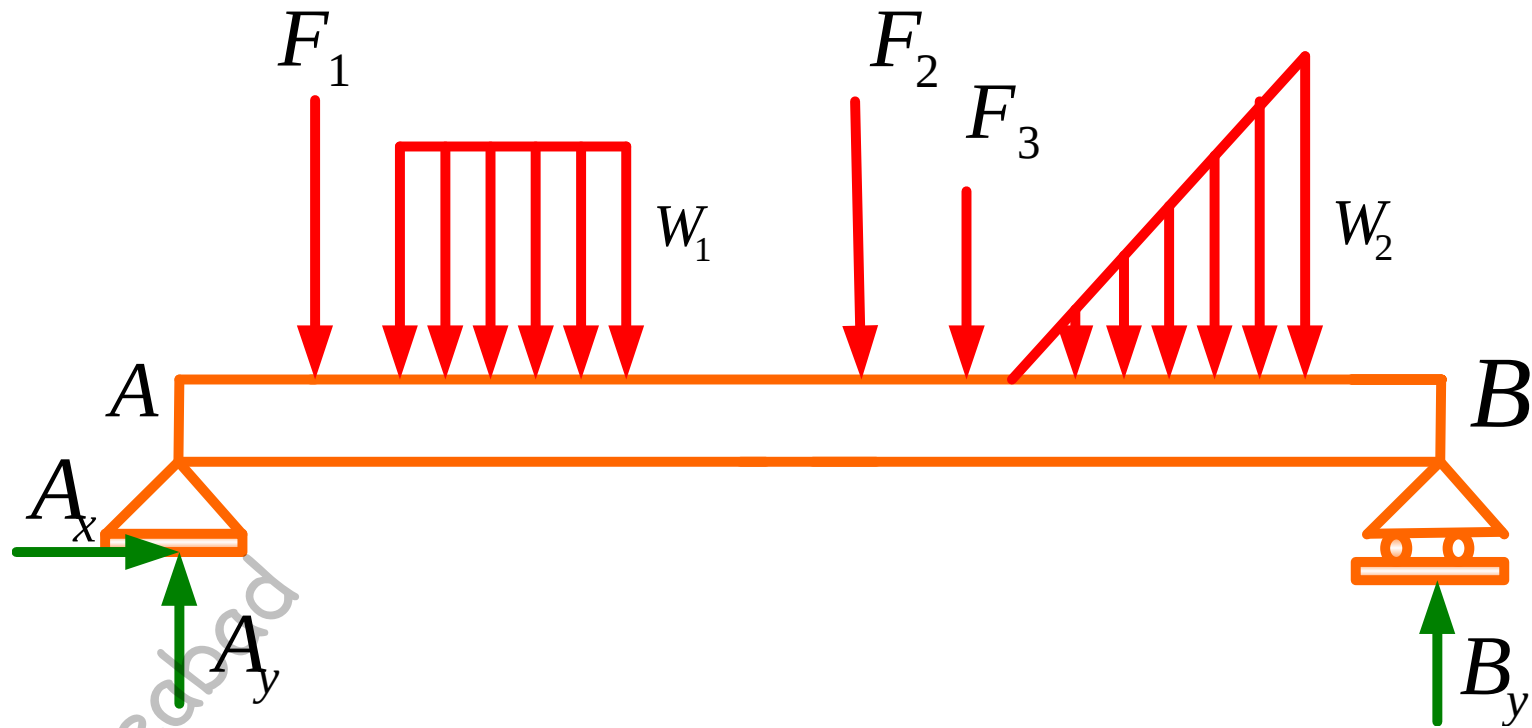
نیروهای داخلی در عضوهای چند نیرویی



به صورت یک سیستم نیرو و کوپل ظاهر می شود.

تعیین نیروی برشی و گشتاور خمشی در تیرها

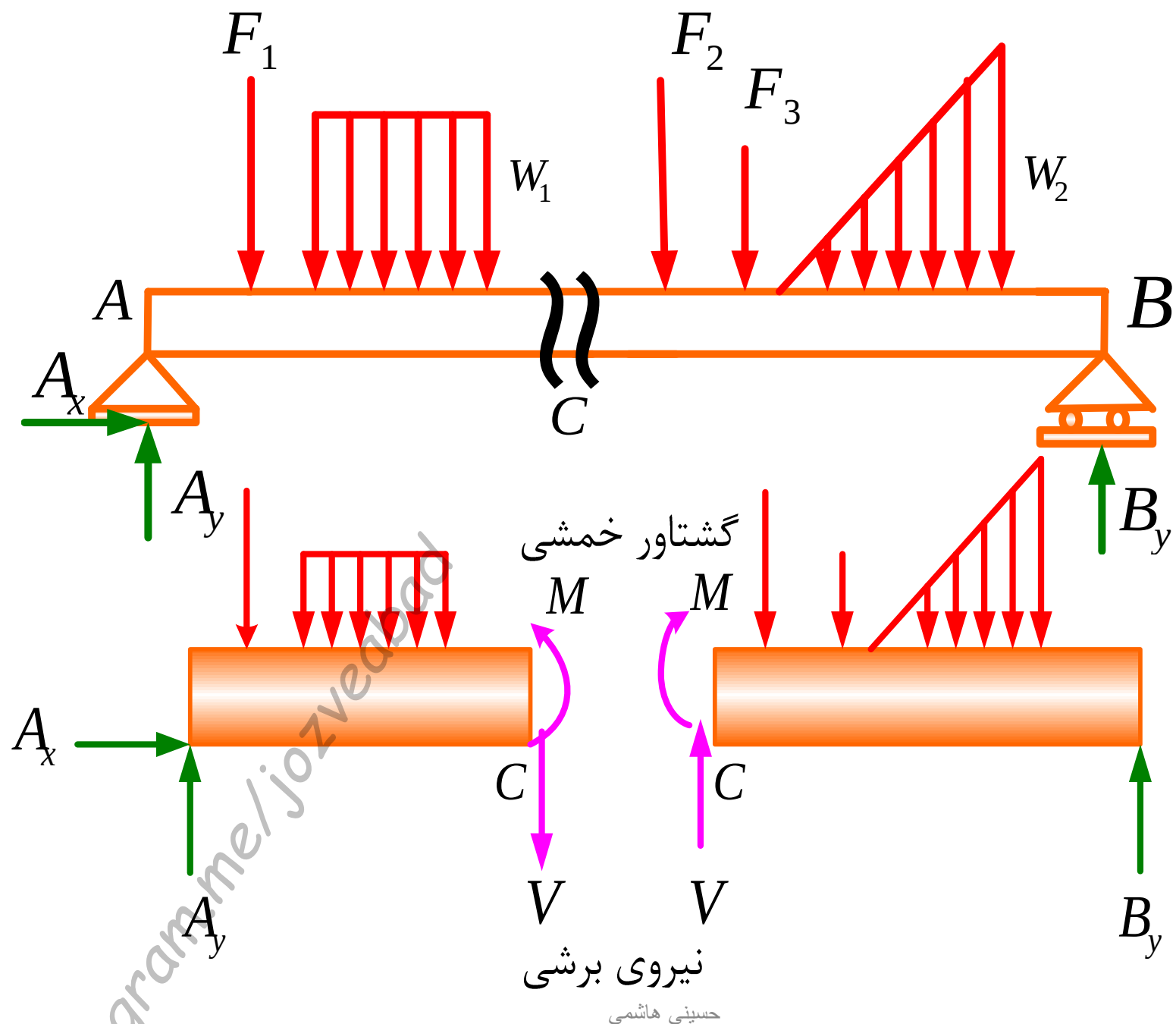


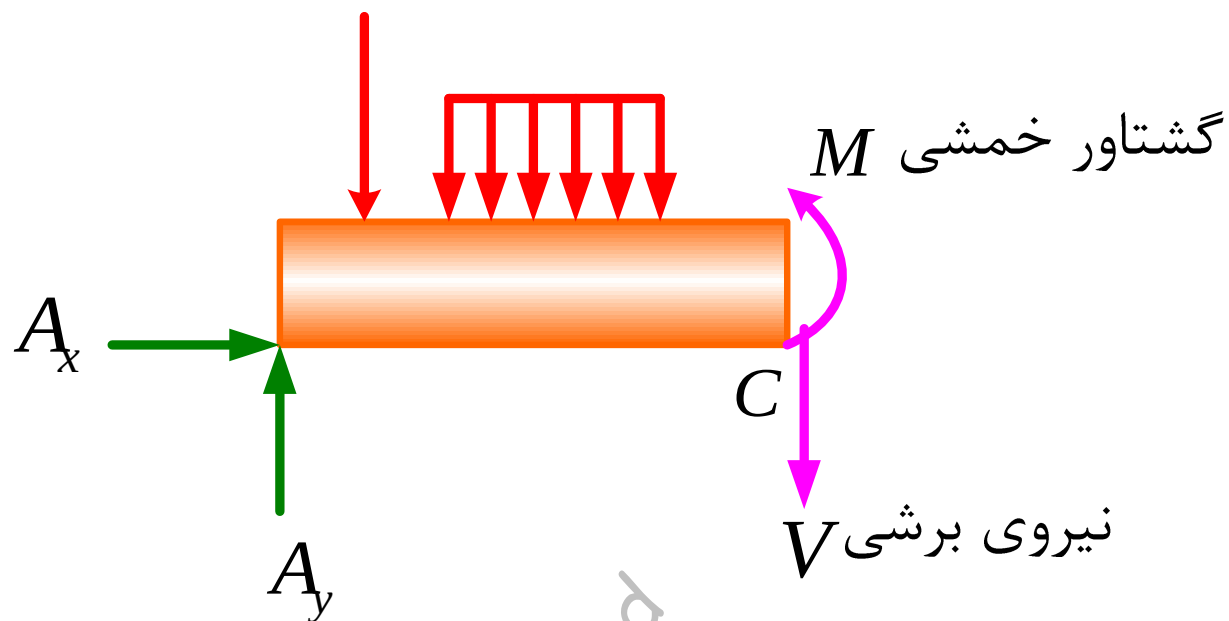


$$\sum M_A = 0 \Rightarrow B_y \text{ تعیین میشود } \rightarrow B_y \text{ تنها مجهول}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow A_y \text{ تعیین میشود } \rightarrow A_y \text{ تنها مجهول}$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow A_x = 0$$





$M = \text{گشتاور خمشی}$

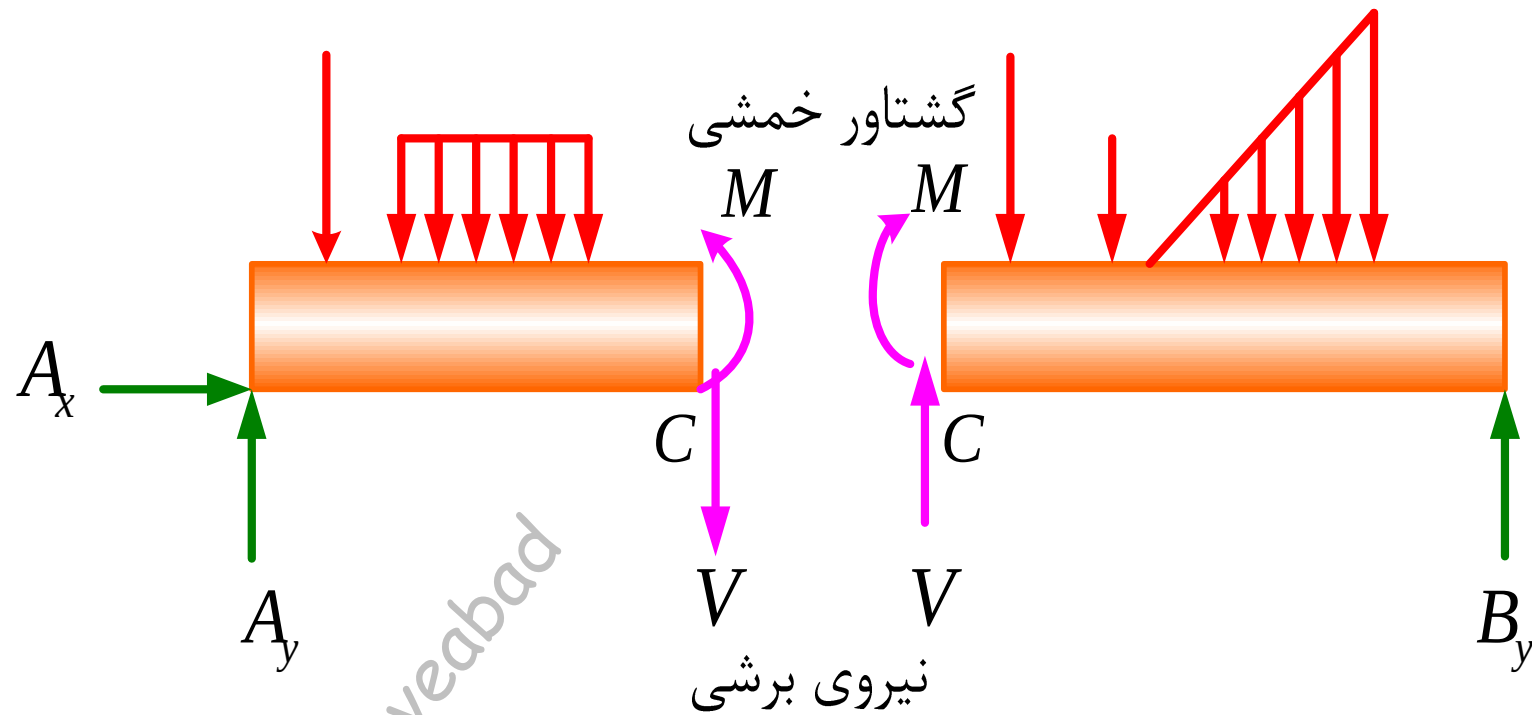
$V = \text{نیروی برشی}$

$\sum F_y = 0 \Rightarrow V$ تنها مجهول $\rightarrow V$ تعیین می شود

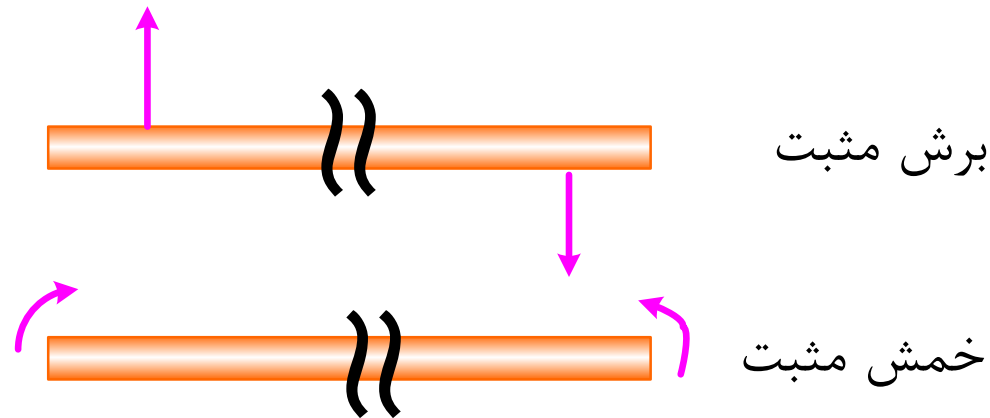
$\sum M_C = 0 \Rightarrow M$ تنها مجهول $\rightarrow M$ تعیین می شود

در حل مسائل رسم دیاگرام آزاد سمت چپ محل بریده شده کفایت می کند.

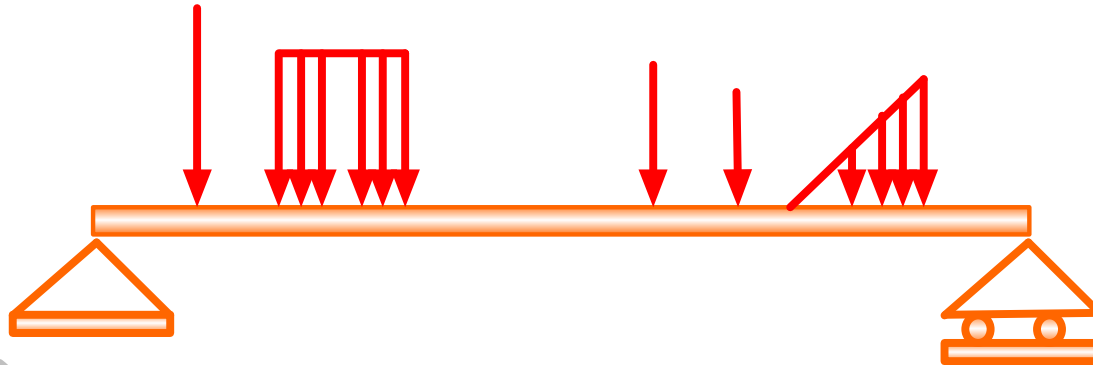
در حل مسائل تیرها همواره جهت های نیروی برشی و گشتاور خمشی را مطابق شکل انتخاب می کنیم.



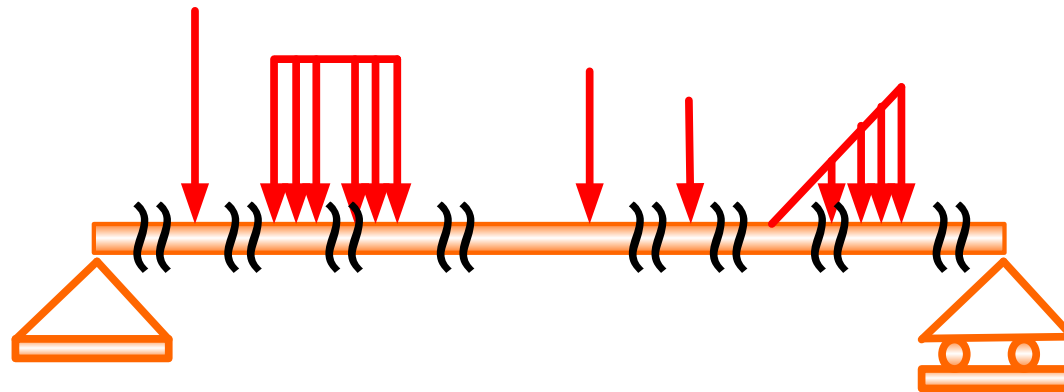
چنانچه جهت نیروی برشی و گشتاور خمشی مطابق شکل باشد برش و خمش را مثبت می نامند.

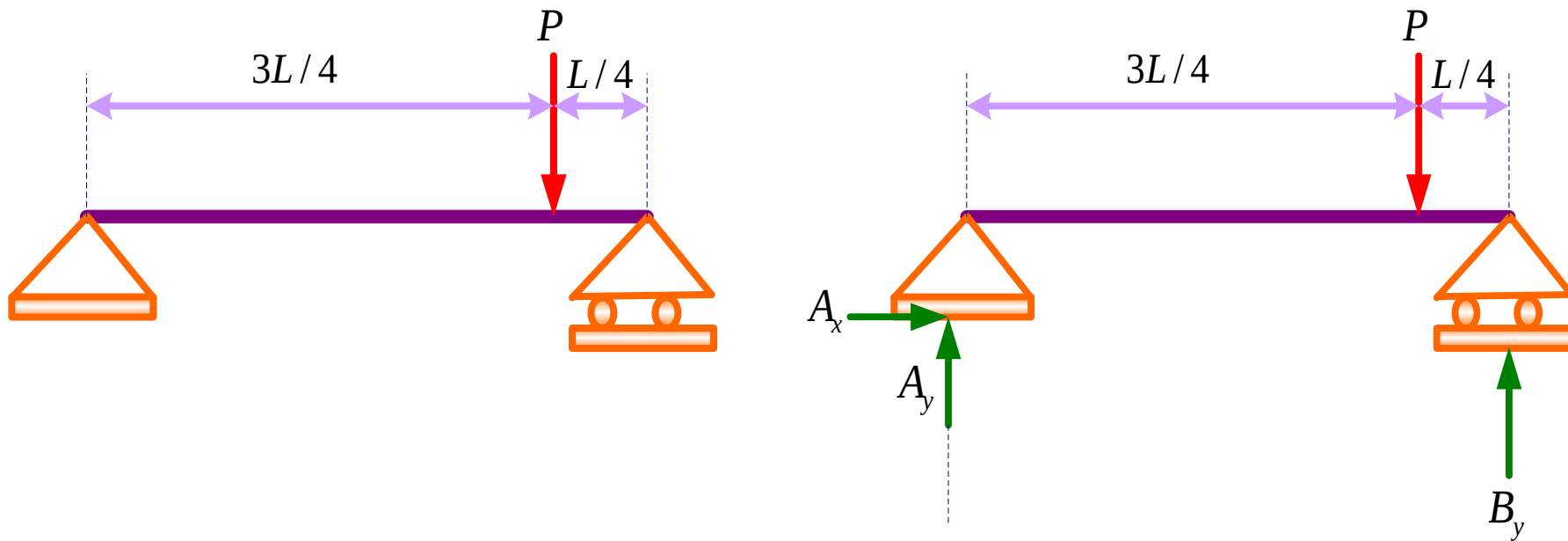


دیاگرام نیروی برشی و گشتاور خمشی



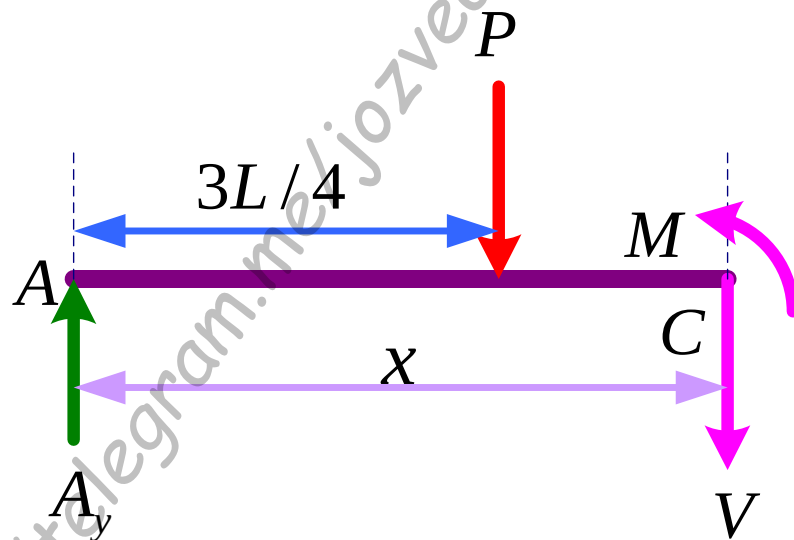
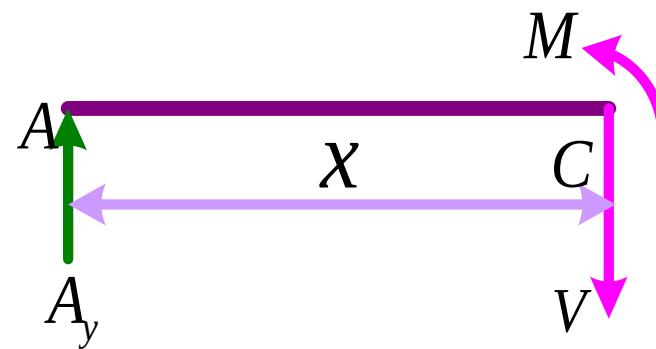
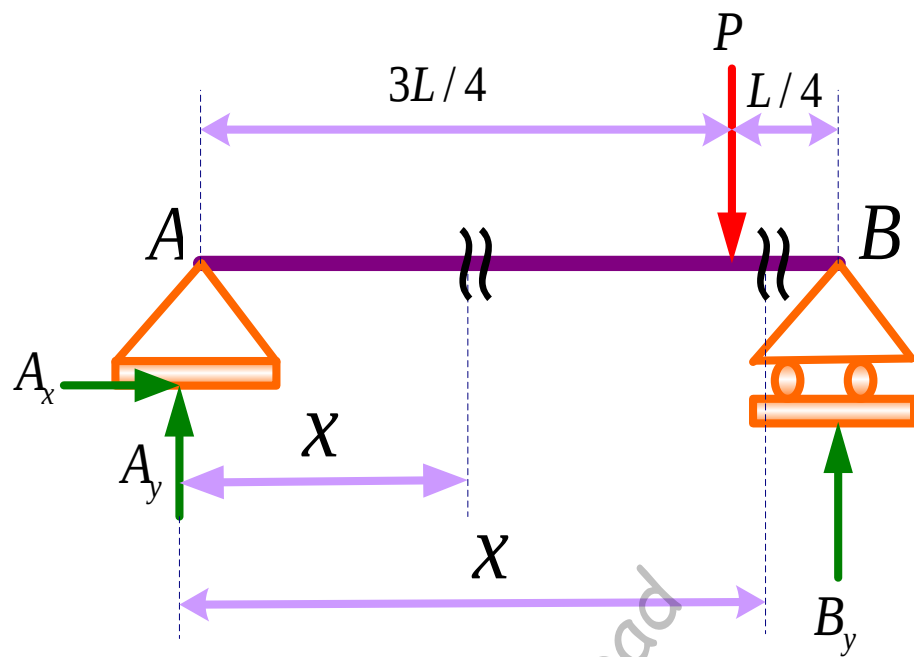
قبل از هر اتفاق جدید و بعد از آن یک برش لازمست. برای هر نیروی توزیعی هم یک برش لازمست.

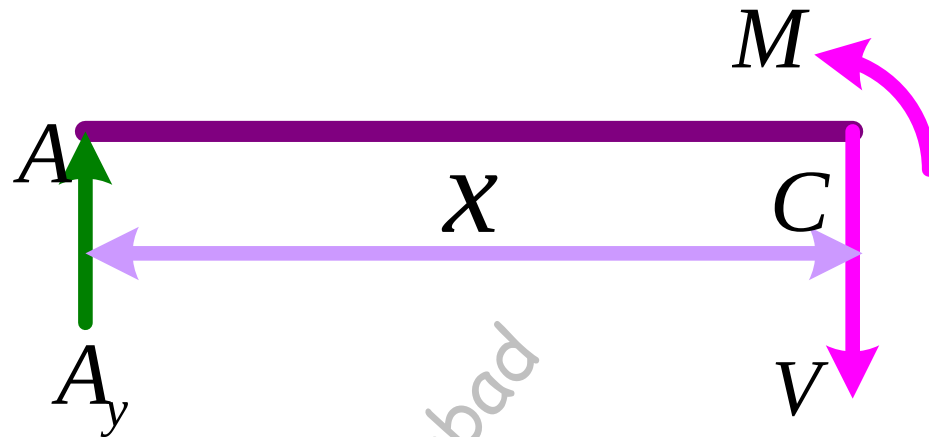




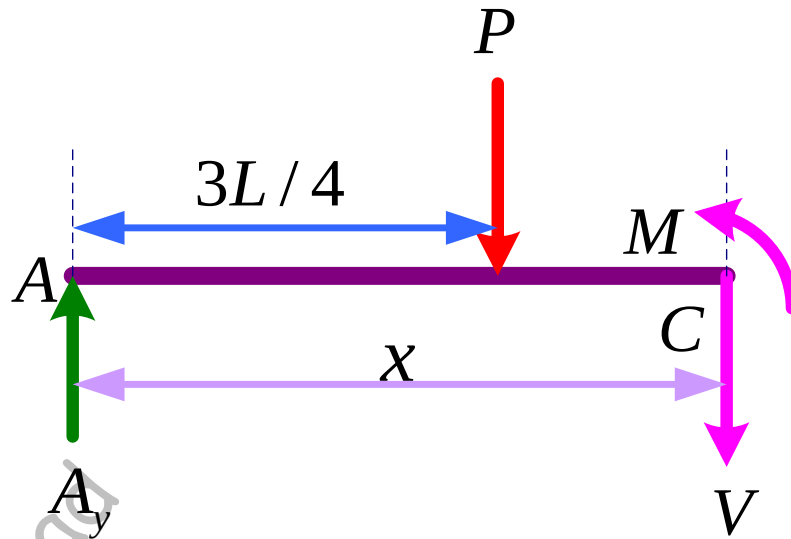
$$\sum M_A = 0 \Rightarrow LB_y - P\left(\frac{3l}{4}\right) = 0 \Rightarrow B_y = \frac{3P}{4}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow A_y + B_y - P = 0 \Rightarrow A_y = \frac{P}{4}$$



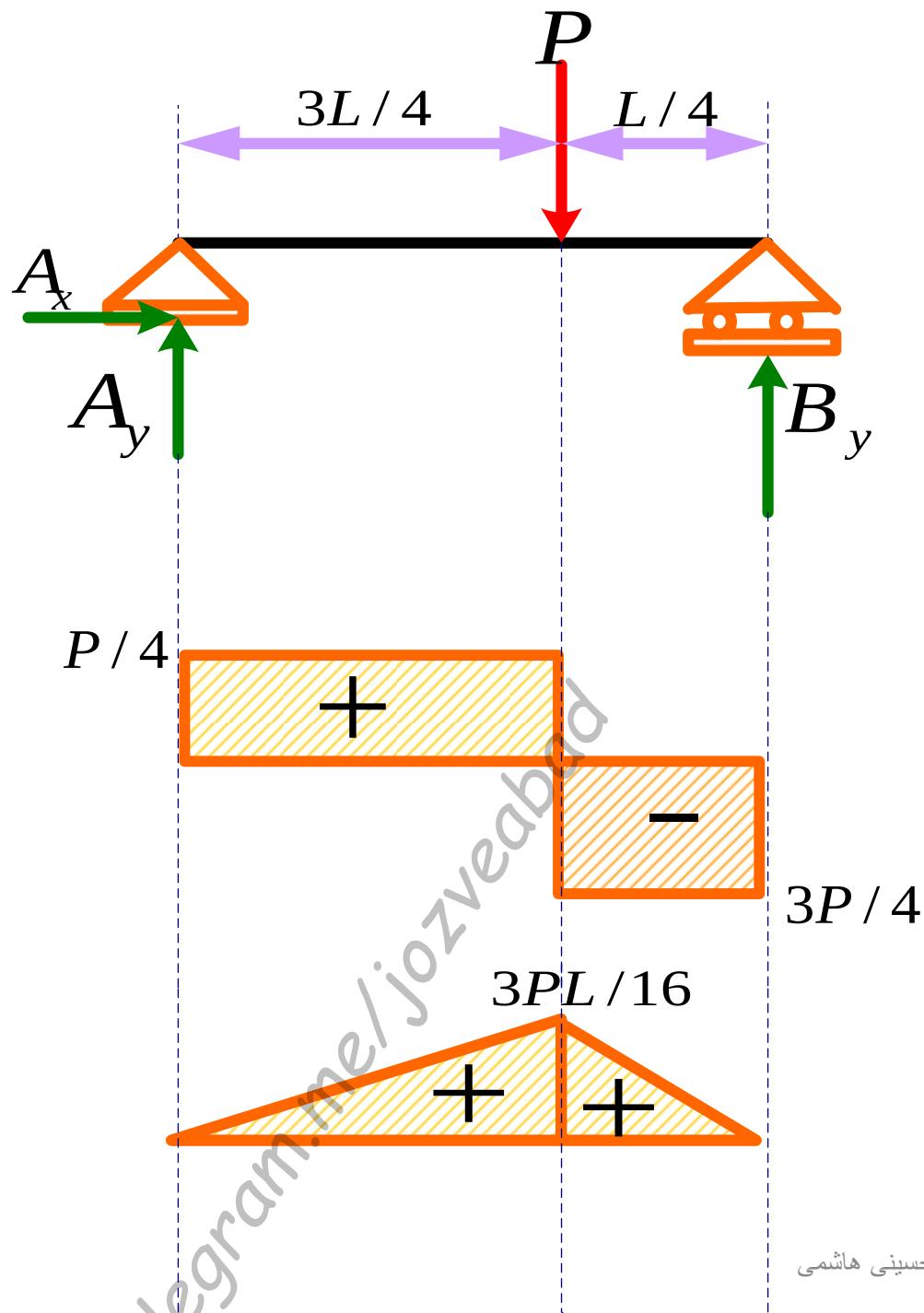


$$\left. \begin{aligned} \sum F_y = 0 &\Rightarrow A_y - V = 0 \Rightarrow V = \frac{P}{4} \\ \sum M_C = 0 &\Rightarrow A_y x - M = 0 \Rightarrow M = \frac{P}{4} x \end{aligned} \right\} 0 \leq x \leq 3L/4$$



telegram.me/joinweabot

$$\left. \begin{aligned} \sum F_y = 0 &\Rightarrow A_y - P - v = 0 \Rightarrow v = \frac{-3P}{4} \\ \sum M_C = 0 &\Rightarrow A_y x - \left(x - \frac{3L}{4}\right) P - M = 0 \Rightarrow M = \frac{3P}{4}(l - x) \end{aligned} \right\} 3L/4 \leq x \leq L$$



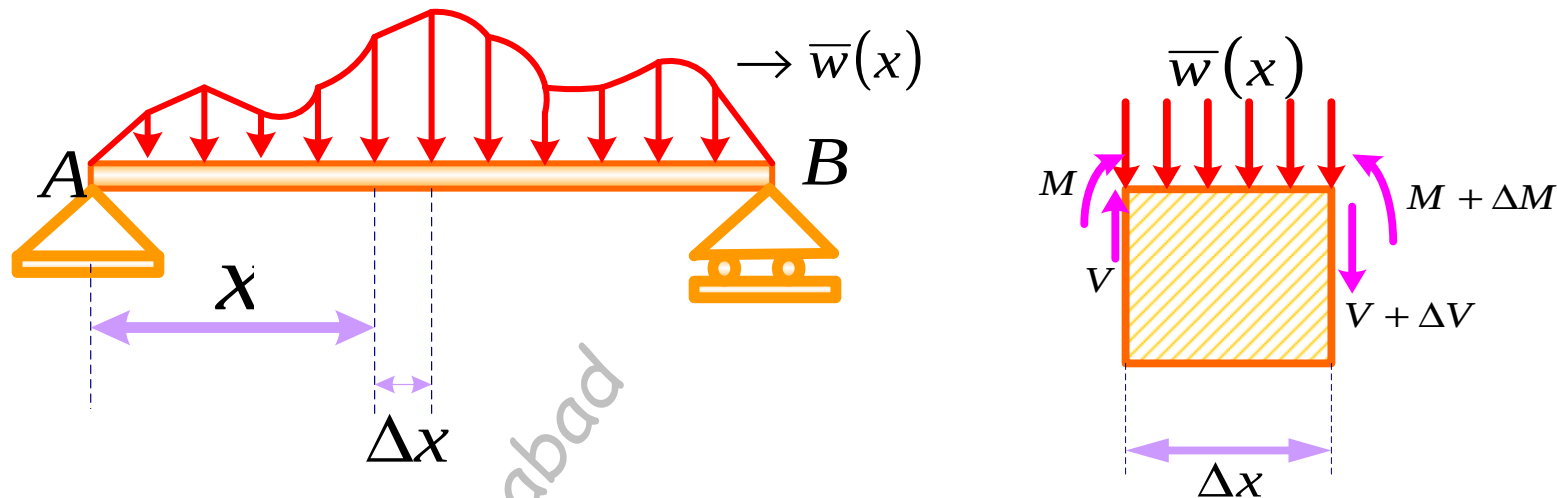
$$V = \frac{P}{4} \quad M = \frac{P}{4}x$$

$$0 \leq x \leq 3L/4$$

$$V = -\frac{3P}{4} \quad M = \frac{3P}{4}(L-x)$$

$$3L/4 \leq x \leq L$$

رابطه ما بین نیروی برشی و گشتاور خمشی

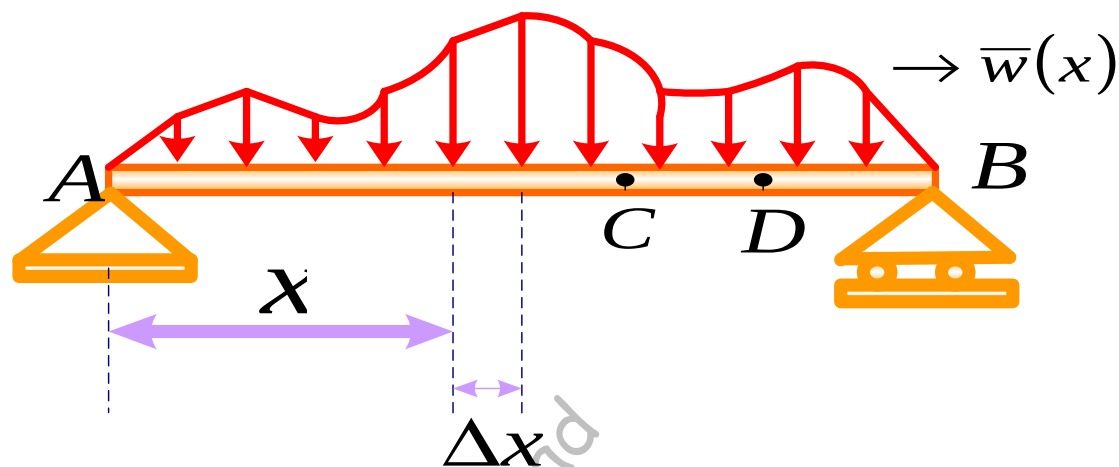


$$\sum F_y = 0 \Rightarrow V + \Delta V - V + \bar{W} \Delta x = 0 \quad \frac{\Delta V}{\Delta x} = -\bar{W}(x)$$

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta x} = \frac{dV}{dx} = -\bar{W}(x) \quad \frac{dV}{dx} = -\bar{W}(x)$$

$$\Delta x \rightarrow 0$$

منهای شدت نیرو = شیب منحنی تغییرات نیروی برشی بر حسب طول تیر

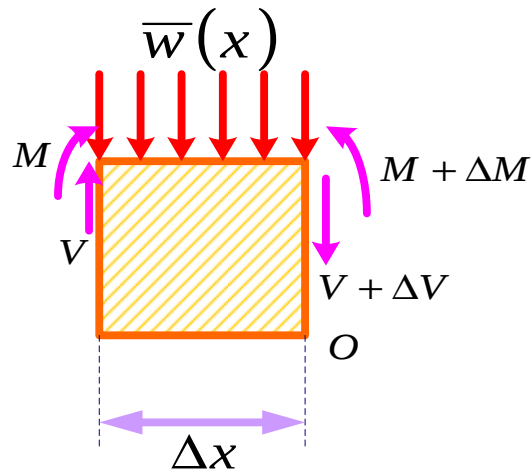


$$\frac{dv}{dx} = -\bar{W}(x)$$

$$dv = -\bar{W}(x)dx$$

$$\int_{V_c}^{V_d} dv = -\int_{x_c}^{x_d} \bar{W}(x)dx \Rightarrow V_d - V_c = -\int_{x_c}^{x_d} \bar{W}(x)dx$$

سطح زیر منحنی تغییرات شدت نیرو بر حسب طول تیر در فاصله x_c تا x_d



$$\sum M_O = 0 \Rightarrow V\Delta x + M - \bar{W}(x)\Delta x\left(\frac{\Delta x}{2}\right) - (M + \Delta M) = 0$$

$$V\Delta x - \bar{W}(x)\frac{\Delta x^2}{2} - \Delta M = 0$$

$$V - \frac{\bar{W}(x)}{2}\Delta x - \frac{\Delta M}{\Delta x} = 0 \Rightarrow \frac{\Delta M}{\Delta x} = -\frac{\bar{W}(x)}{2}\Delta x + V \quad \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta x} = \frac{dM}{dx} = V$$

$$V = \frac{dM}{dx}$$

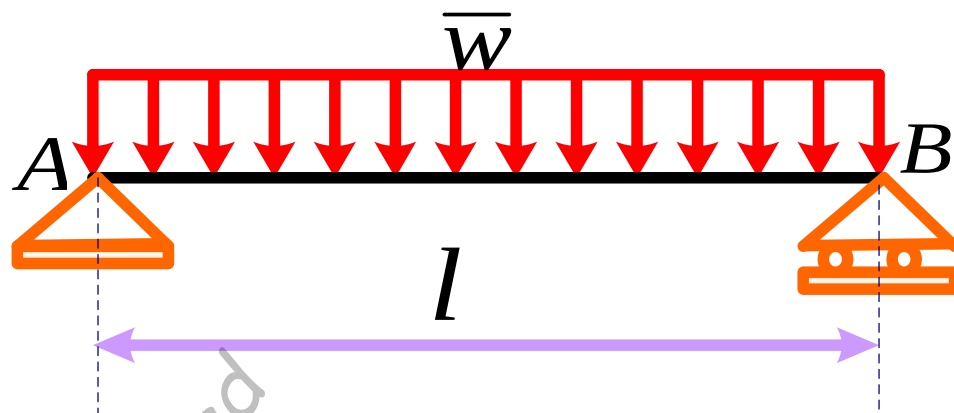
نیروی برشی = شیب منحنی تغییرات گشتاور خمشی بر حسب طول تیر

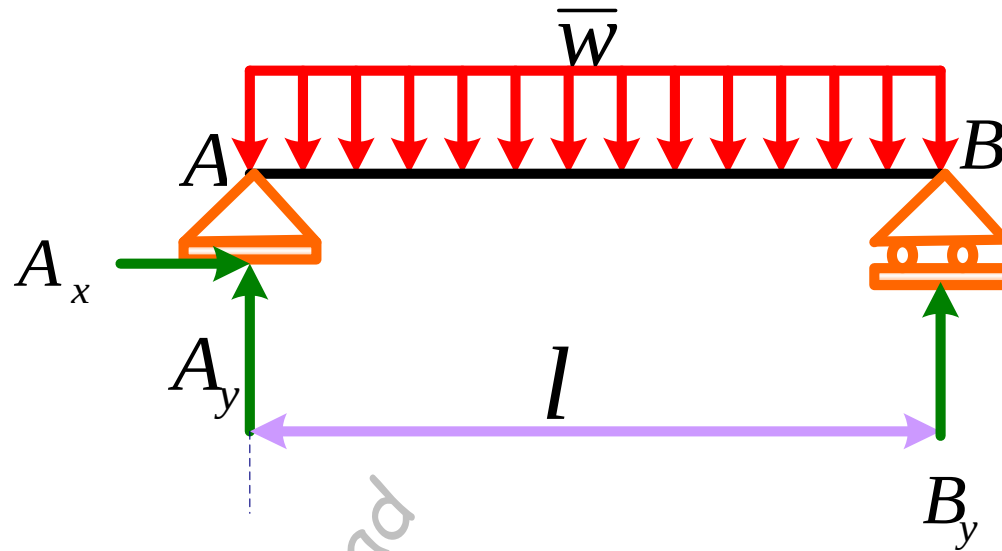
$$dM = Vdx \Rightarrow$$

$$\int_{M_c}^{M_d} dM = \int_{x_c}^{x_d} Vdx \Rightarrow M_d - M_c = \int_{x_c}^{x_d} Vdx$$

سطح زیر منحنی تغییرات نیروی برشی بر حسب طول تیر در فاصله x_c تا x_d

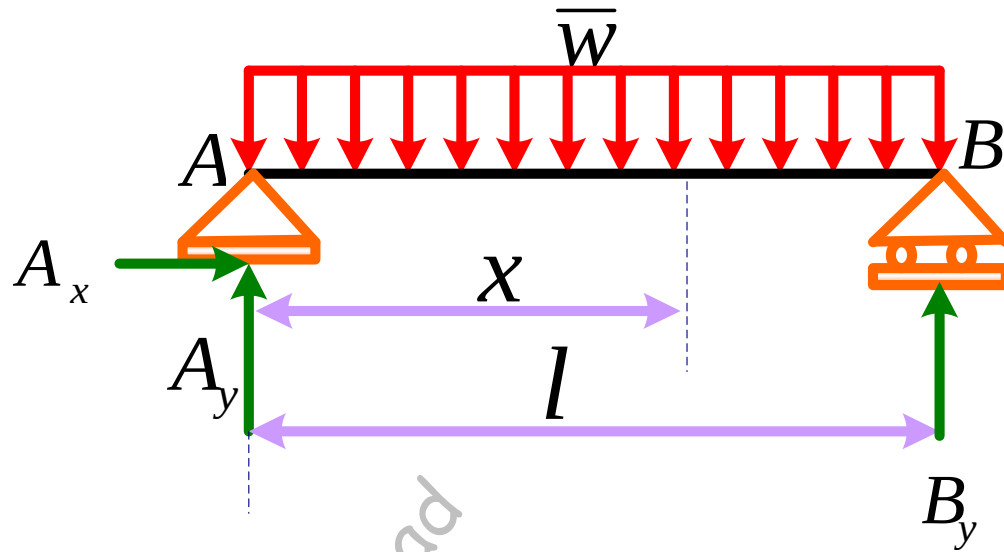
مثال: برای تیر نشان داده شده در شکل دیاگرام های نیروی برشی و گشتاور خمشی را رسم کنید.





$$\sum M_A = 0 \Rightarrow LB_y - \bar{W}(l)\left(\frac{l}{2}\right) = 0 \Rightarrow B_y = \bar{W} \frac{l}{2}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow A_y + B_y - \bar{W}(l)\left(\frac{l}{2}\right) = 0 \Rightarrow A_y = \bar{W} \frac{l}{2}$$



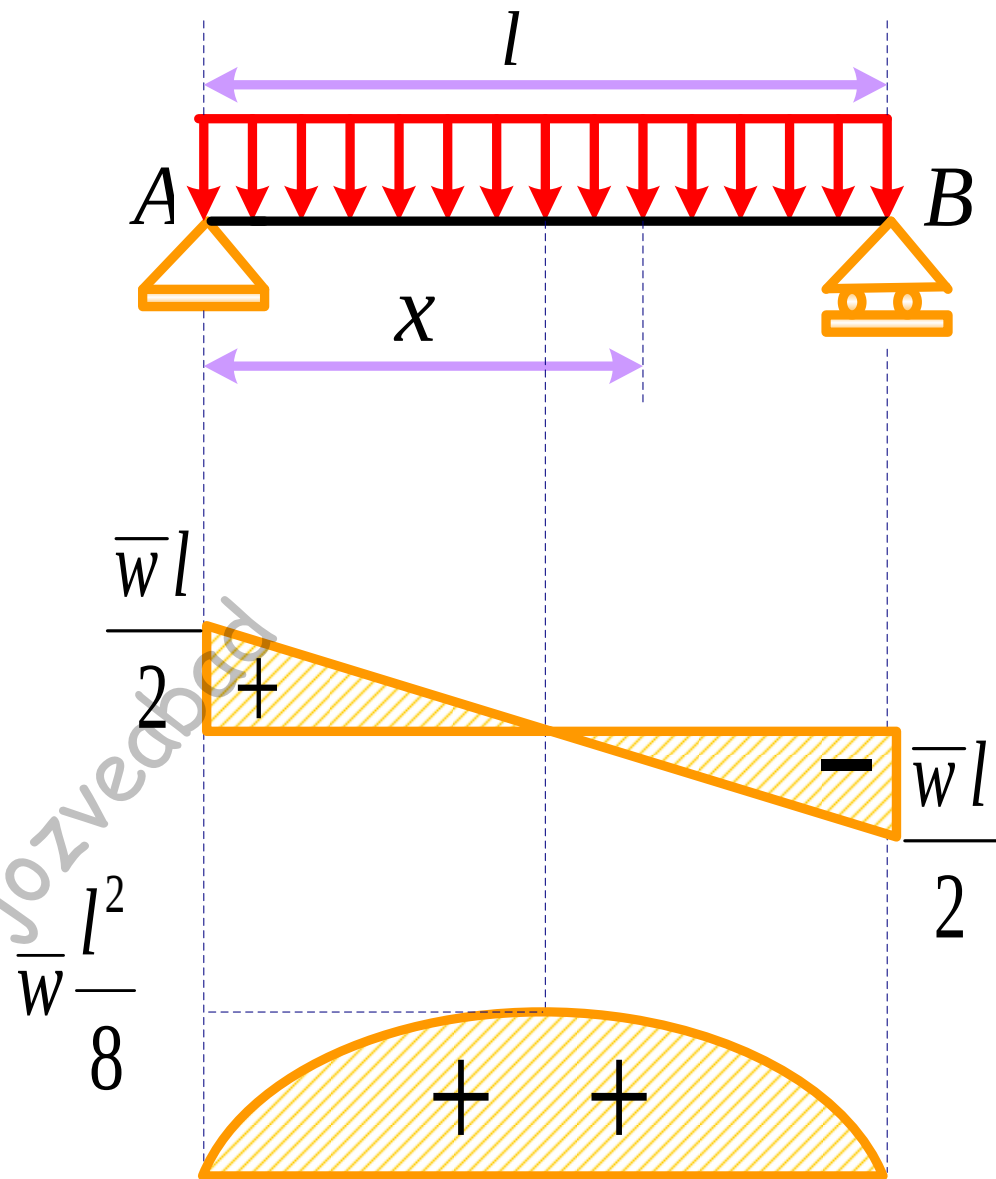
$$A_y = \bar{W} \frac{l}{2}$$

$$\frac{dV}{dx} = -\bar{W} \Rightarrow dV = -\bar{W} dx \Rightarrow \int_{A_y}^V dV = -\bar{W} \int_0^x dx$$

$$\Rightarrow V - A_y = -\bar{W}x \Rightarrow V = \bar{W} \left(\frac{l}{2} - x \right)$$

$$\frac{dM}{dx} = V = \bar{W} \left(\frac{l}{2} - x \right) \Rightarrow dM = \bar{W} \left(\frac{l}{2} - x \right) dx$$

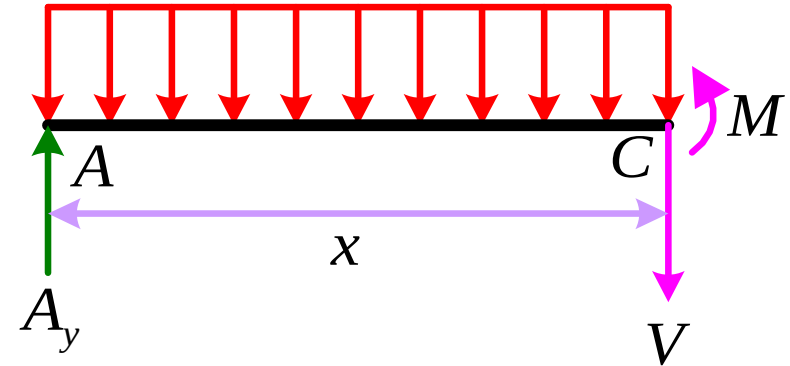
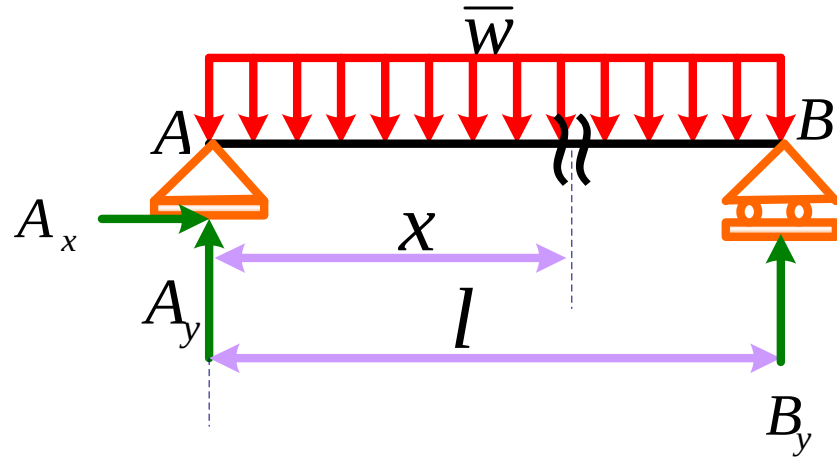
$$\int_0^M dM = \bar{W} \int_0^x \left(\frac{l}{2} - x \right) dx \Rightarrow M = \bar{W} \left(\frac{l}{2} x - \frac{x^2}{2} \right) \Rightarrow M = \frac{\bar{W}}{2} (lx - x^2)$$



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

$$M = \frac{\bar{W}}{2} (lx - x^2)$$

حل مسئله قبل با روش مقطع:

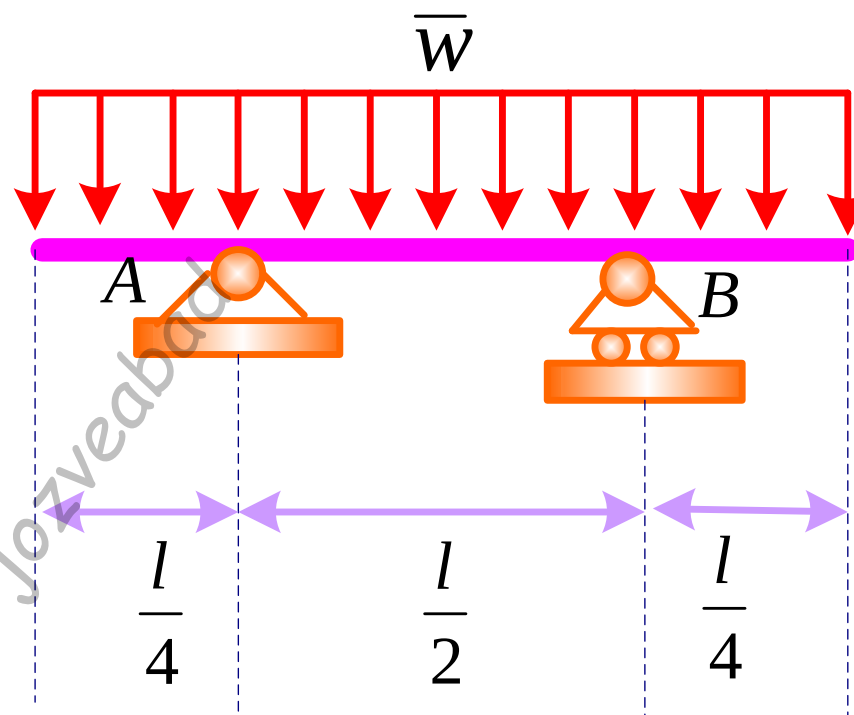


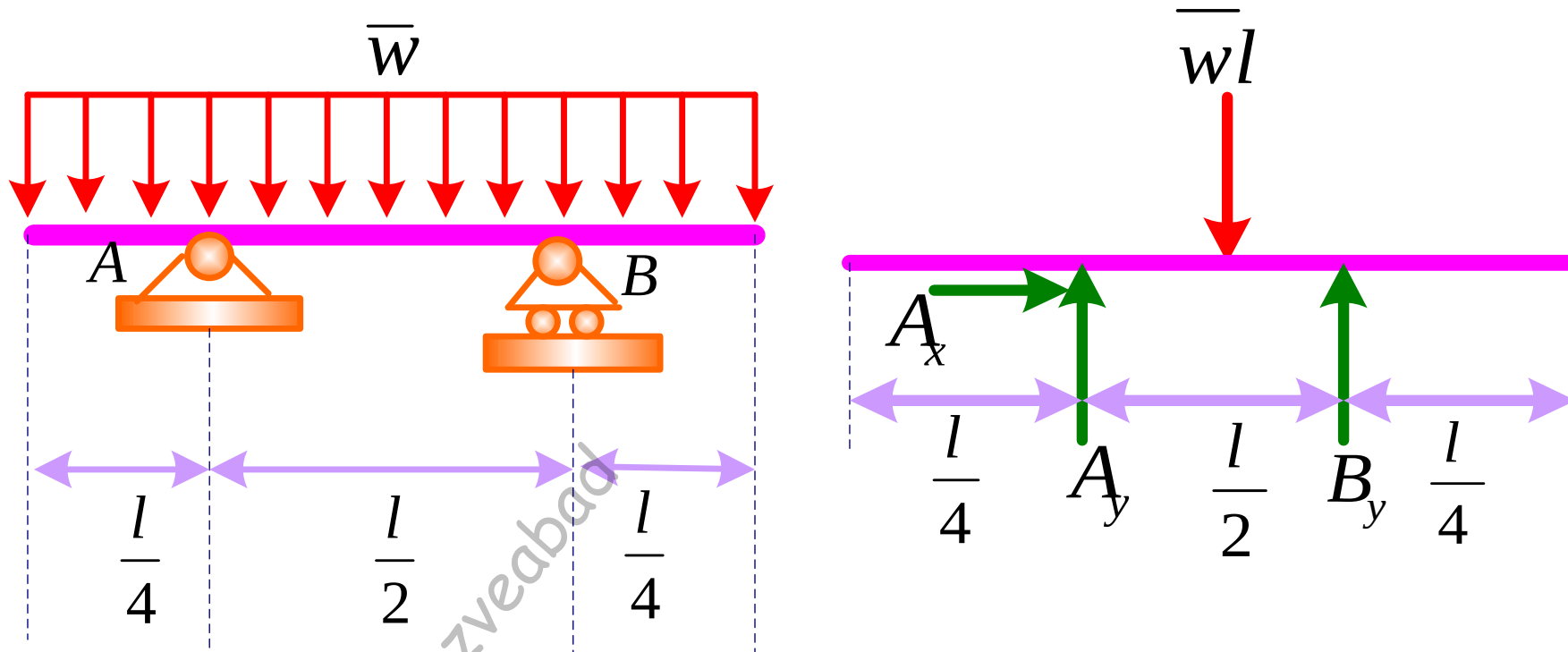
$$\sum F_y = 0 \Rightarrow A_y - \bar{W}x - V = 0 \quad V = A_y - \bar{W}(x) = \bar{W} \frac{l}{2} - \bar{W}x$$

$$V = \bar{W} \left(\frac{l}{2} - x \right) \quad \sum M_C = 0 \Rightarrow A_y x - \bar{W}x \left(\frac{x}{2} \right) - M = 0$$

$$M = \bar{W} \frac{l}{2} x - \bar{W} \frac{x^2}{2} = \frac{\bar{W}}{2} (lx - x^2)$$

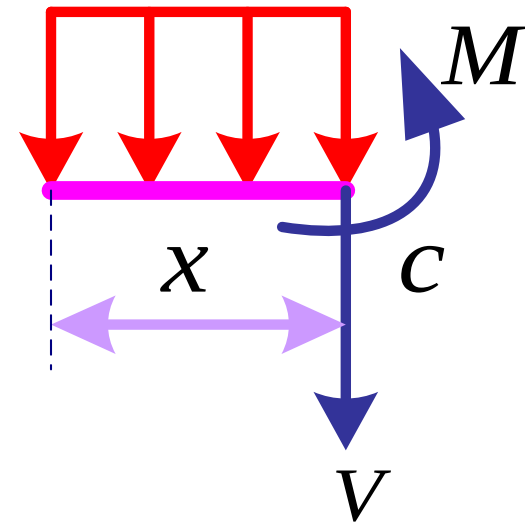
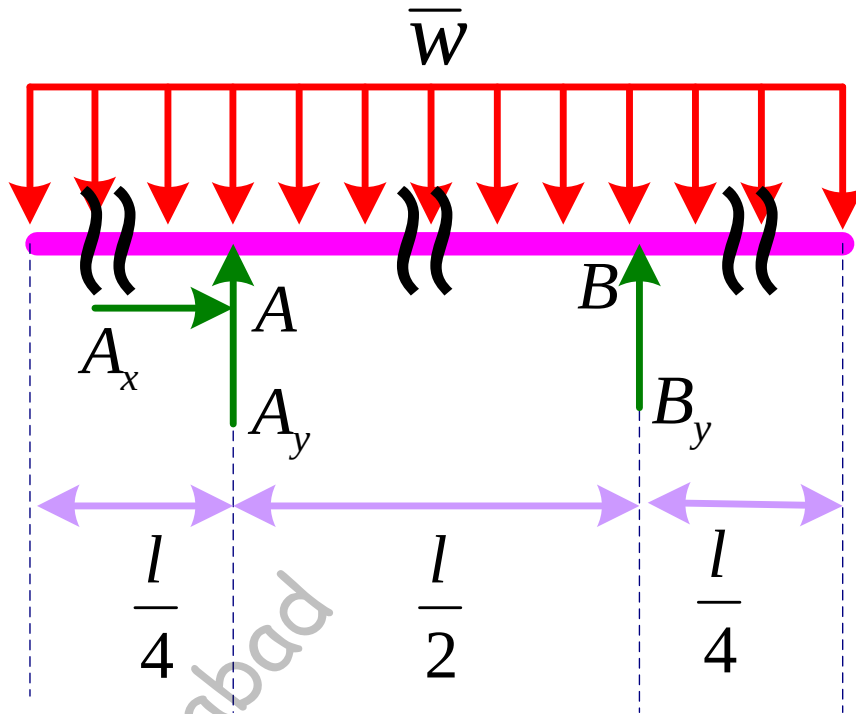
مثال: دیاگرام های نیروی برشی و گشتاور خمشی را برای تیر نشان داده شده در شکل که تحت تأثیر بار توزیعی با شدت ثابت قرار گرفته است رسم کنید.



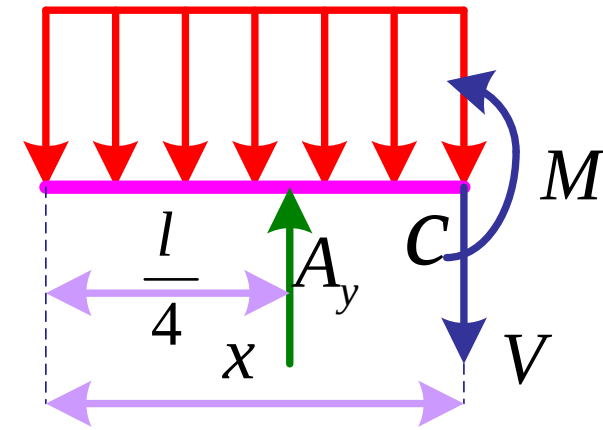
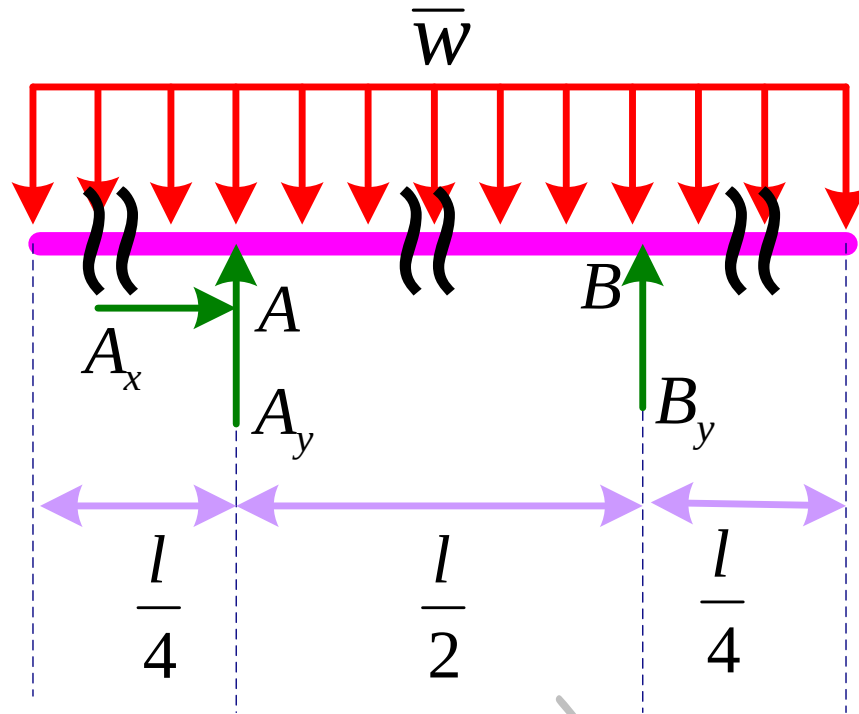


$$\sum M_A = 0 \Rightarrow B_y \left(\frac{l}{2} \right) - \bar{w}l \left(\frac{l}{4} \right) = 0 \Rightarrow B_y = \frac{\bar{w}l}{2}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow A_y + B_y - \bar{w}l = 0 \Rightarrow A_y = \bar{w} \frac{l}{2}$$



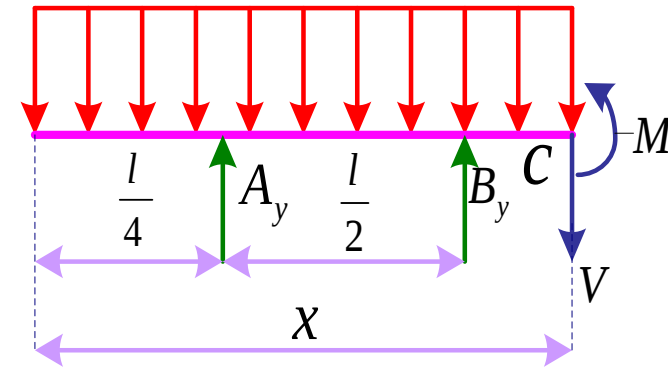
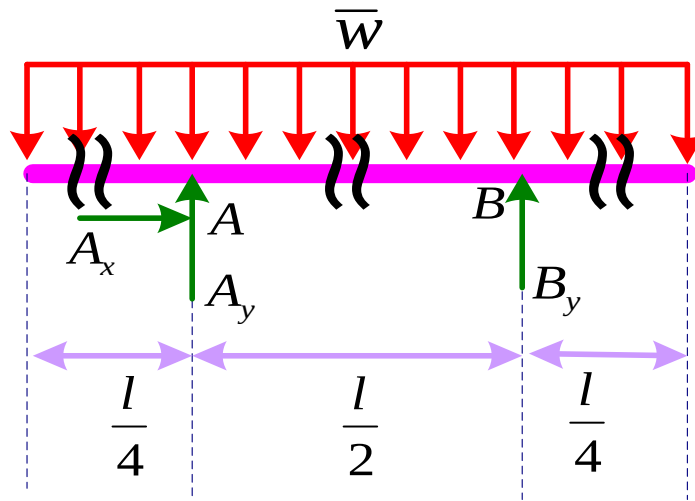
$$\left. \begin{aligned} \sum F_y = 0 &\Rightarrow \bar{W}x + v = 0 \Rightarrow v = -\bar{W}x \\ \sum M_C = 0 &\Rightarrow \bar{W}x\left(\frac{x}{2}\right) + M = 0 \Rightarrow M = -\frac{\bar{W}x^2}{2} \end{aligned} \right\} 0 \leq x \leq l/4$$



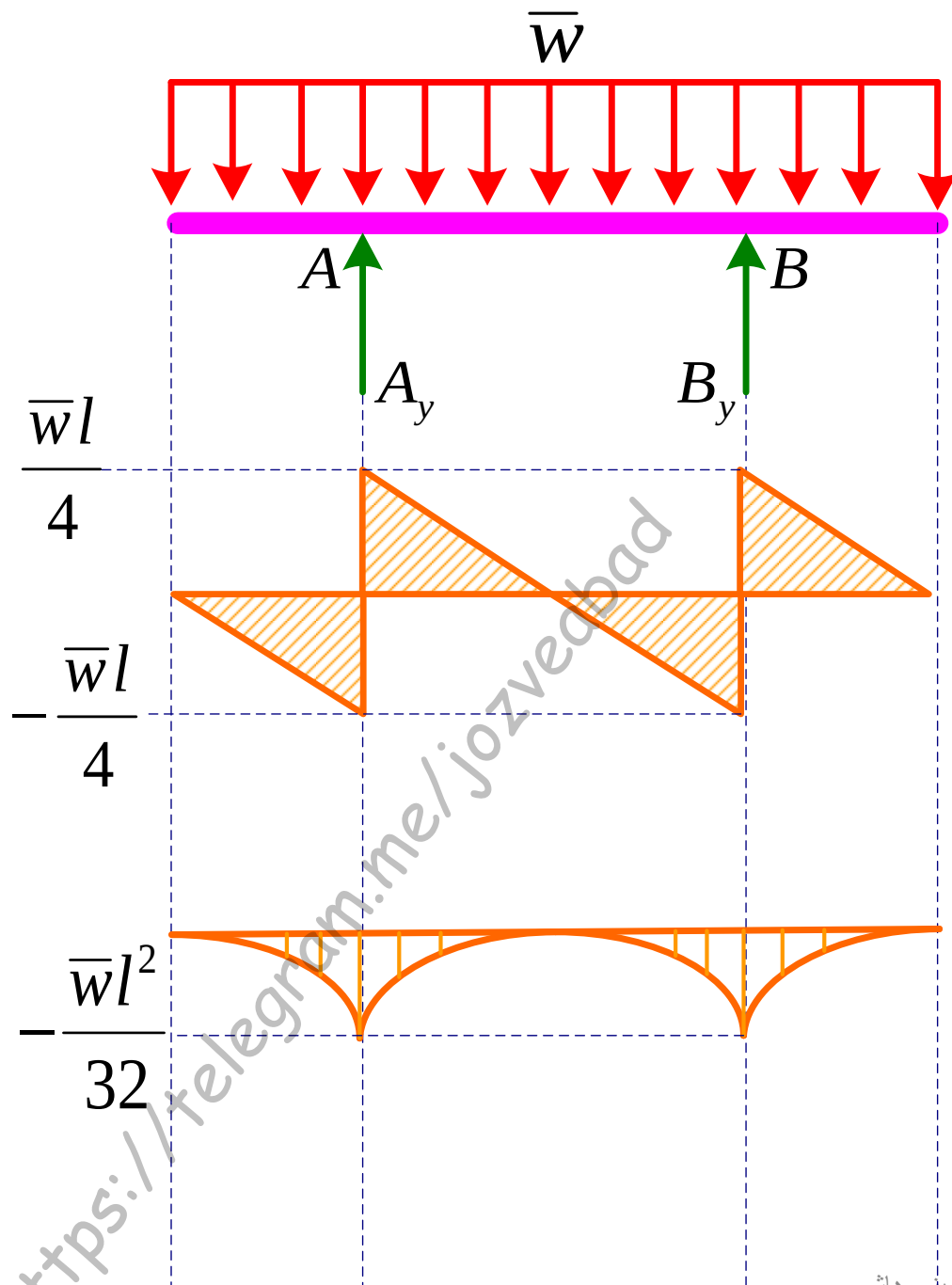
$$A_y = \bar{W} \frac{l}{2}$$

$$\left. \begin{aligned} \sum F_y = 0 &\Rightarrow A_y - \bar{W}x - V = 0 \Rightarrow V = \bar{W} \left(\frac{l}{2} - x \right) \\ \sum M_C = 0 &\Rightarrow -A_y \left(x - \frac{l}{4} \right) + \bar{W}x \left(\frac{x}{2} \right) + M = 0 \\ &\Rightarrow M = -\frac{\bar{W}x^2}{2} + \frac{\bar{W}l}{2} \left(x - \frac{l}{4} \right) \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{l}{4} \leq x \leq \frac{3l}{4}$$



$$\left. \begin{aligned} \sum F_y = 0 &\Rightarrow A_y + B_y - \bar{W}x - V = 0 \Rightarrow V = \bar{W}(l - x) \\ \sum M_C = 0 &\Rightarrow -A_y \left(x - \frac{l}{4} \right) + \bar{W}x \left(\frac{x}{2} \right) - B_y \left(x - \frac{3l}{4} \right) + M = 0 \\ &\Rightarrow M = \frac{\bar{W}l}{2} \left(x - \frac{l}{4} \right) + \frac{\bar{W}l}{2} \left(x - \frac{3l}{4} \right) - \frac{\bar{W}x^2}{2} \end{aligned} \right\} \frac{3l}{4} \leq x \leq l$$



$$A_y = \bar{W} \frac{l}{2} \quad B_y = \frac{\bar{W}l}{2}$$

$$v = -\bar{W}x \quad M = -\frac{\bar{W}x^2}{2}$$

$$0 \leq x \leq l/4$$

$$v = \bar{W} \left(\frac{l}{2} - x \right) \quad M = -\frac{\bar{W}x^2}{2} + \frac{\bar{W}l}{2} \left(x - \frac{l}{4} \right)$$

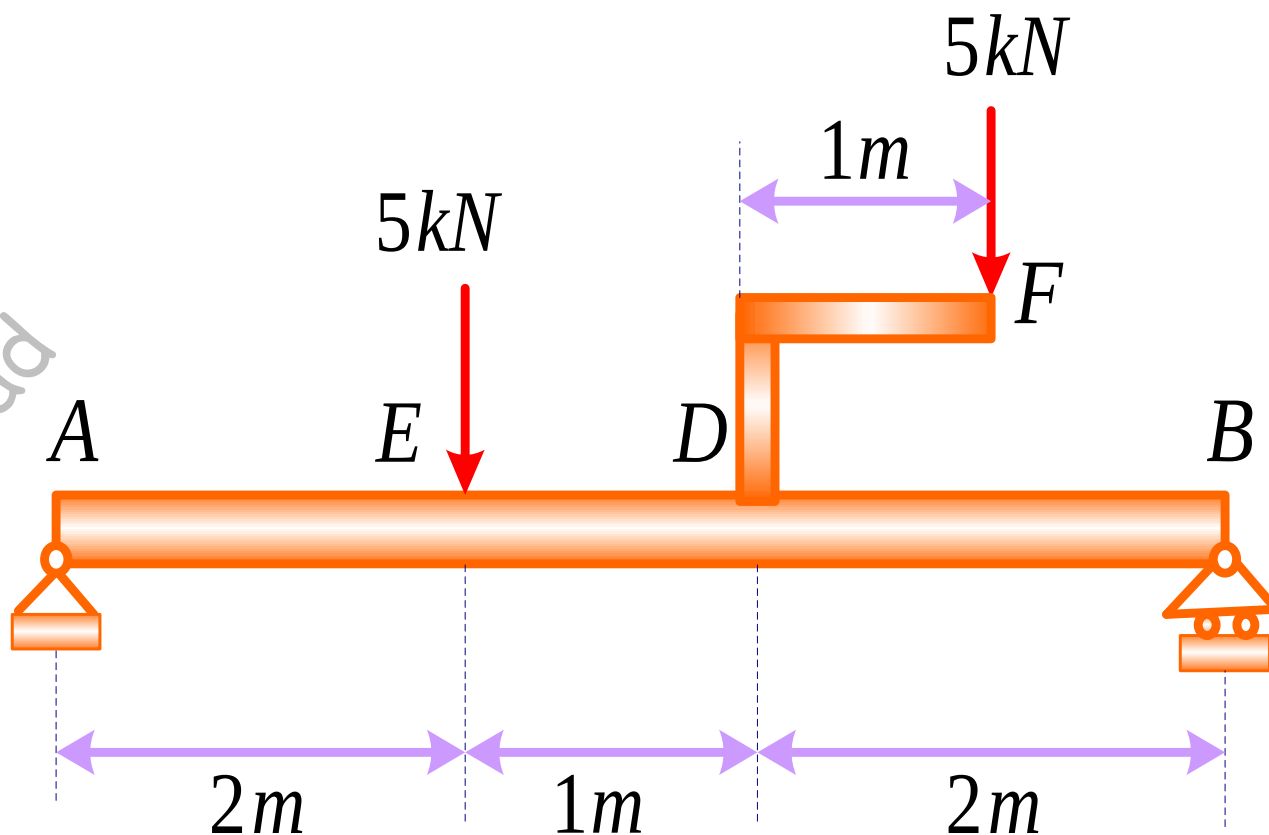
$$l/4 \leq x \leq 3l/4$$

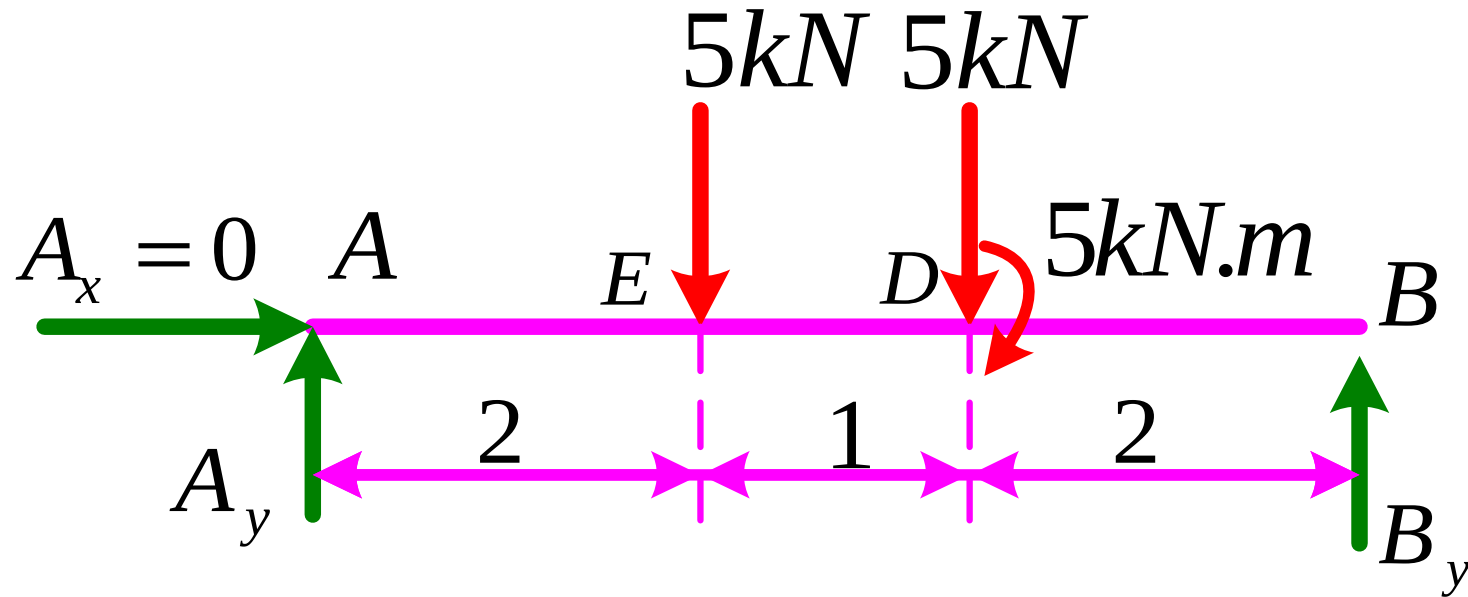
$$v = \bar{W}(l - x)$$

$$M = \frac{\bar{W}l}{2} \left(x - \frac{l}{4} \right) + \frac{\bar{W}l}{2} \left(x - \frac{3l}{4} \right) - \frac{\bar{W}x^2}{2}$$

$$3l/4 \leq x \leq l$$

مثال: دیاگرام های نیروی برشی و گشتاور خمشی را برای تیر نشان داده شده در شکل رسم کنید؟



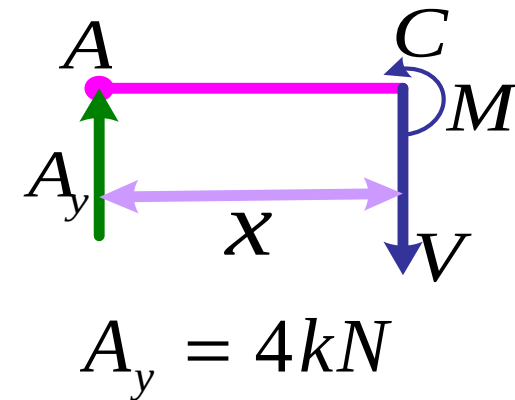
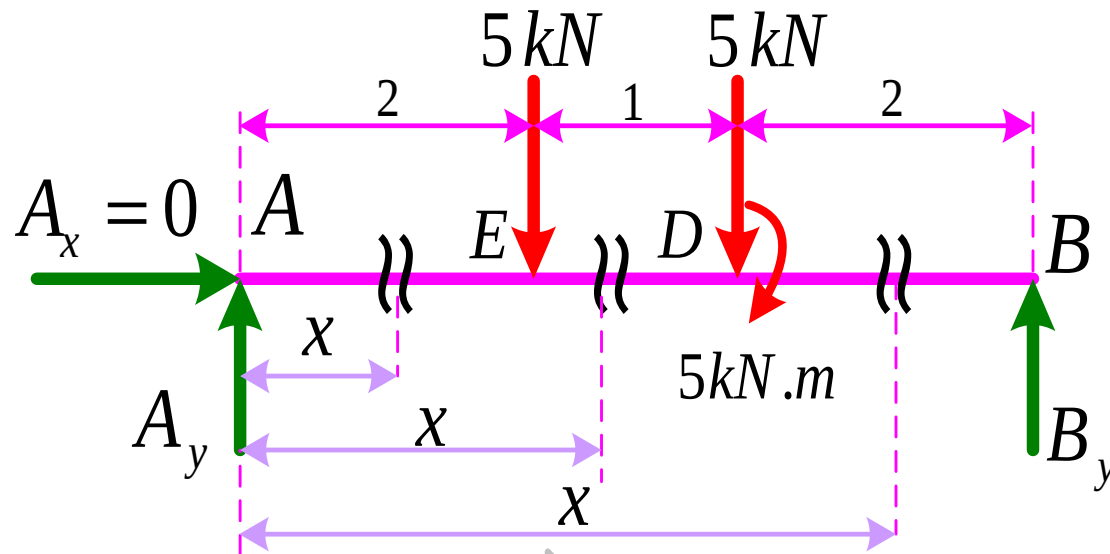


$$\sum M_A = 0 \Rightarrow 2 \times 5 + 3 \times 5 + M - 5B_y = 0$$

$$B_y = 6kN$$

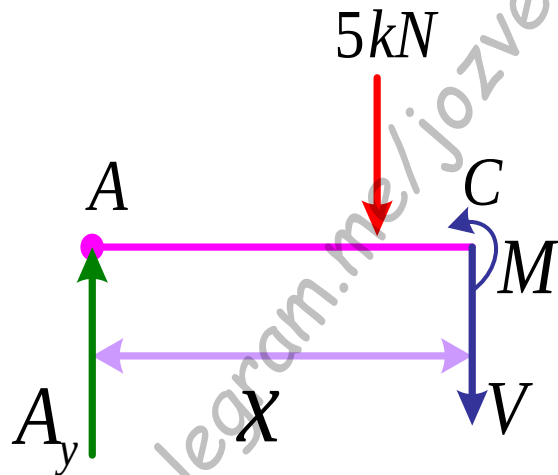
$$\sum F_y = 0 \Rightarrow A_y + B_y - 10 = 0$$

$$A_y = 4kN$$



$$\sum F_y = 0 \Rightarrow v = 4 \text{ kN} \quad \sum M_C = 0 \Rightarrow M - A_y x = 0 \Rightarrow M = 4x$$

$$0 \leq x \leq 2$$

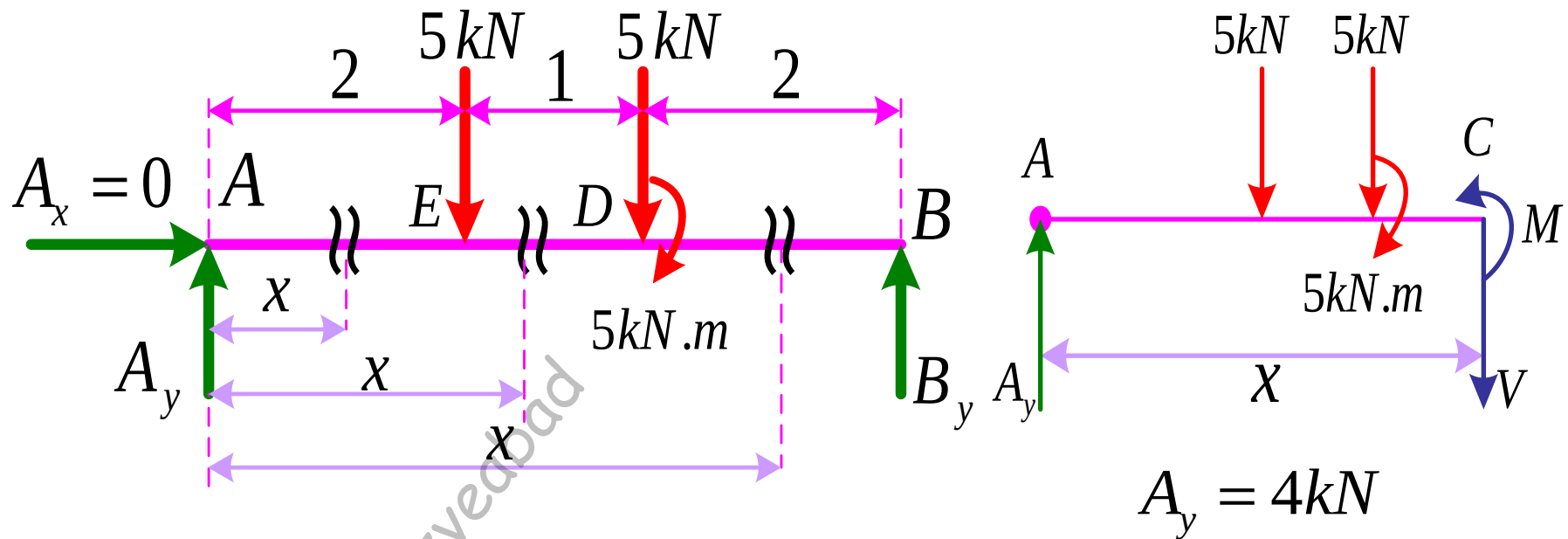


$$\sum F_y = 0 \Rightarrow v = -1 \text{ kN}$$

$$\sum M_C = 0 \Rightarrow M + 5(x - 2) - 4x = 0$$

$$\Rightarrow M = -x + 10$$

$$2 \leq x \leq 3$$

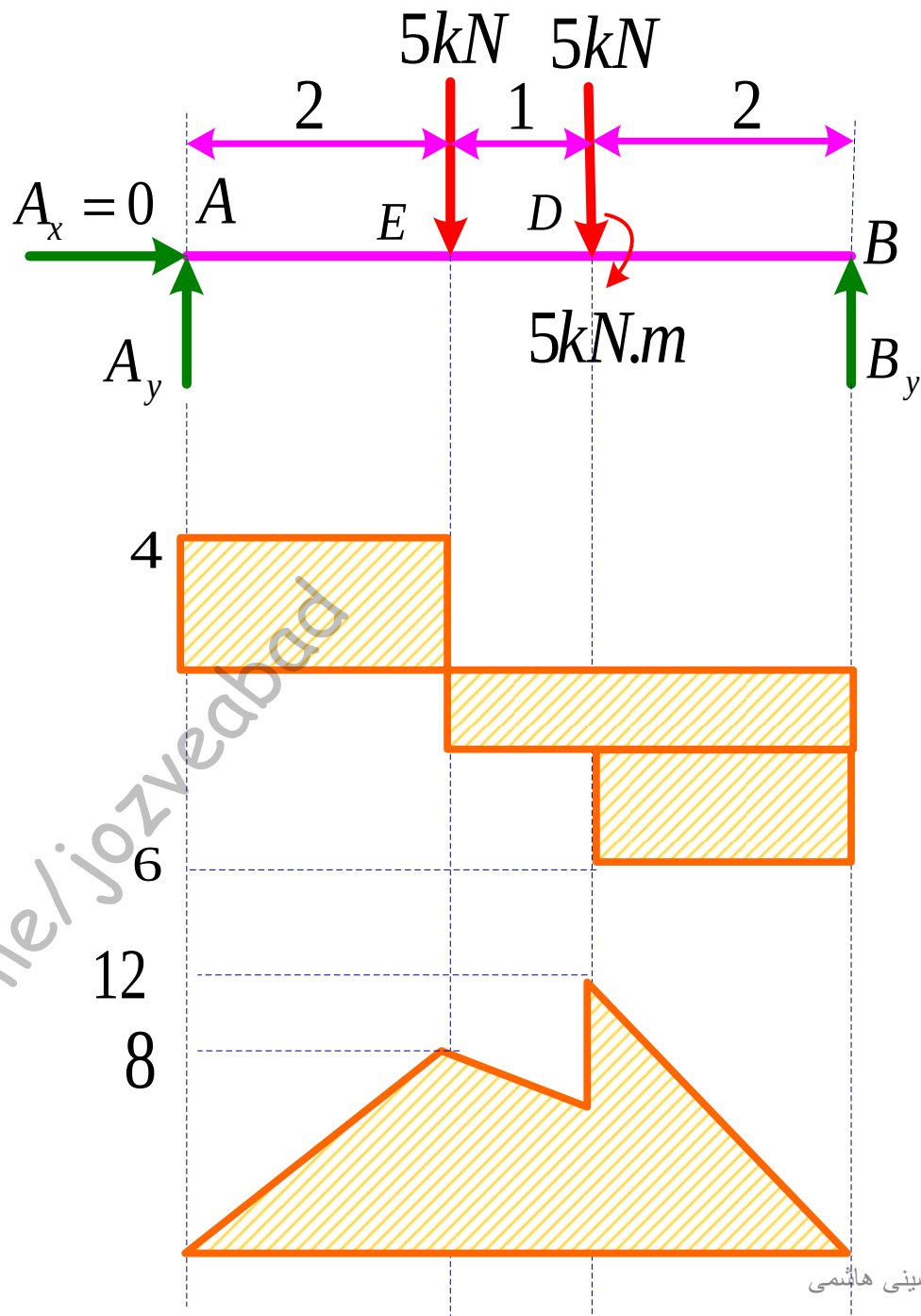


$$\sum F_y = 0 \Rightarrow v = -6\text{ kN}$$

$$\sum M_C = 0 \Rightarrow -M - 5(x-3) - 5(x-2) + 5 + 4x = 0$$

$$M = -6x + 30$$

$$3 \leq x \leq 5$$



$$V = 4\text{ kN} \quad M = 4x$$

$$0 \leq x \leq 2$$

$$V = -1\text{ kN} \quad M = -x + 10$$

$$2 \leq x \leq 3$$

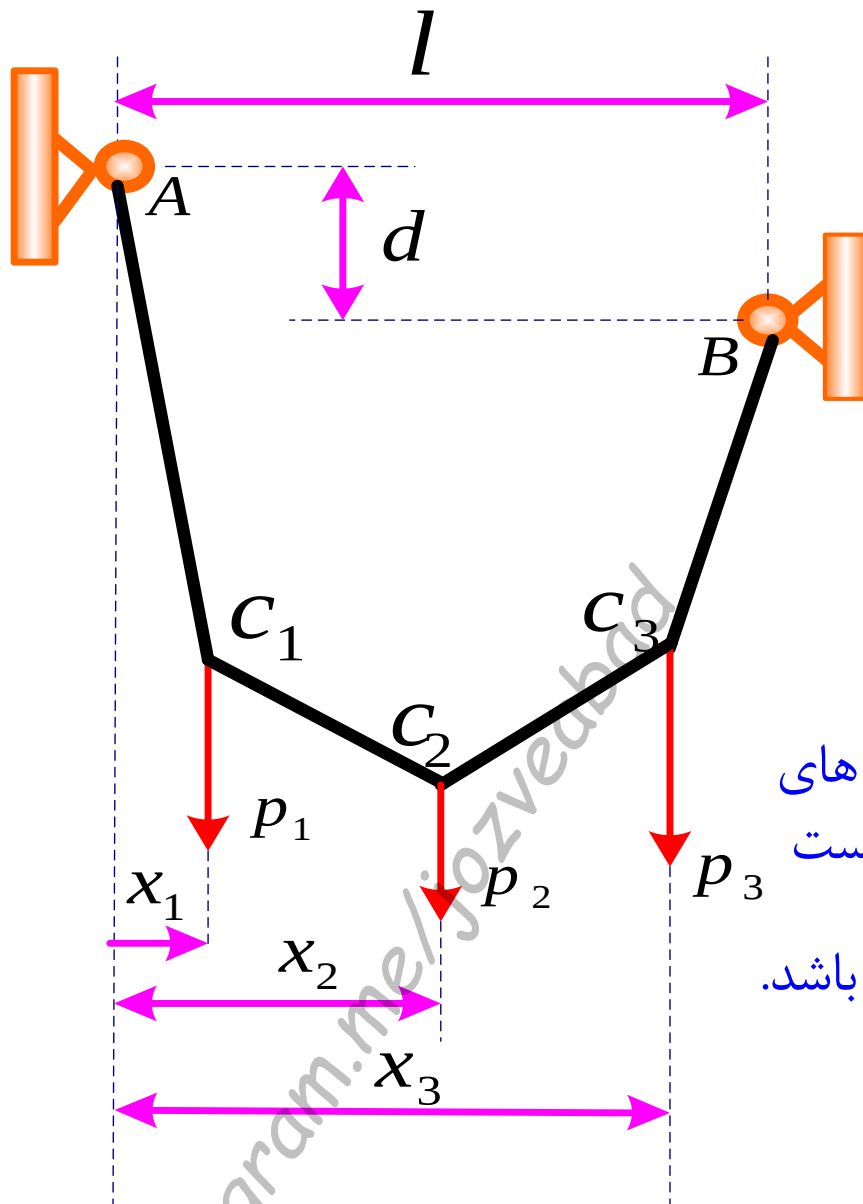
$$V = -6\text{ kN} \quad M = -6x + 30$$

$$3 \leq x \leq 5$$

$$A_y = 4\text{ kN} \quad B_y = 6\text{ kN}$$

۷- تحلیل کابل ها

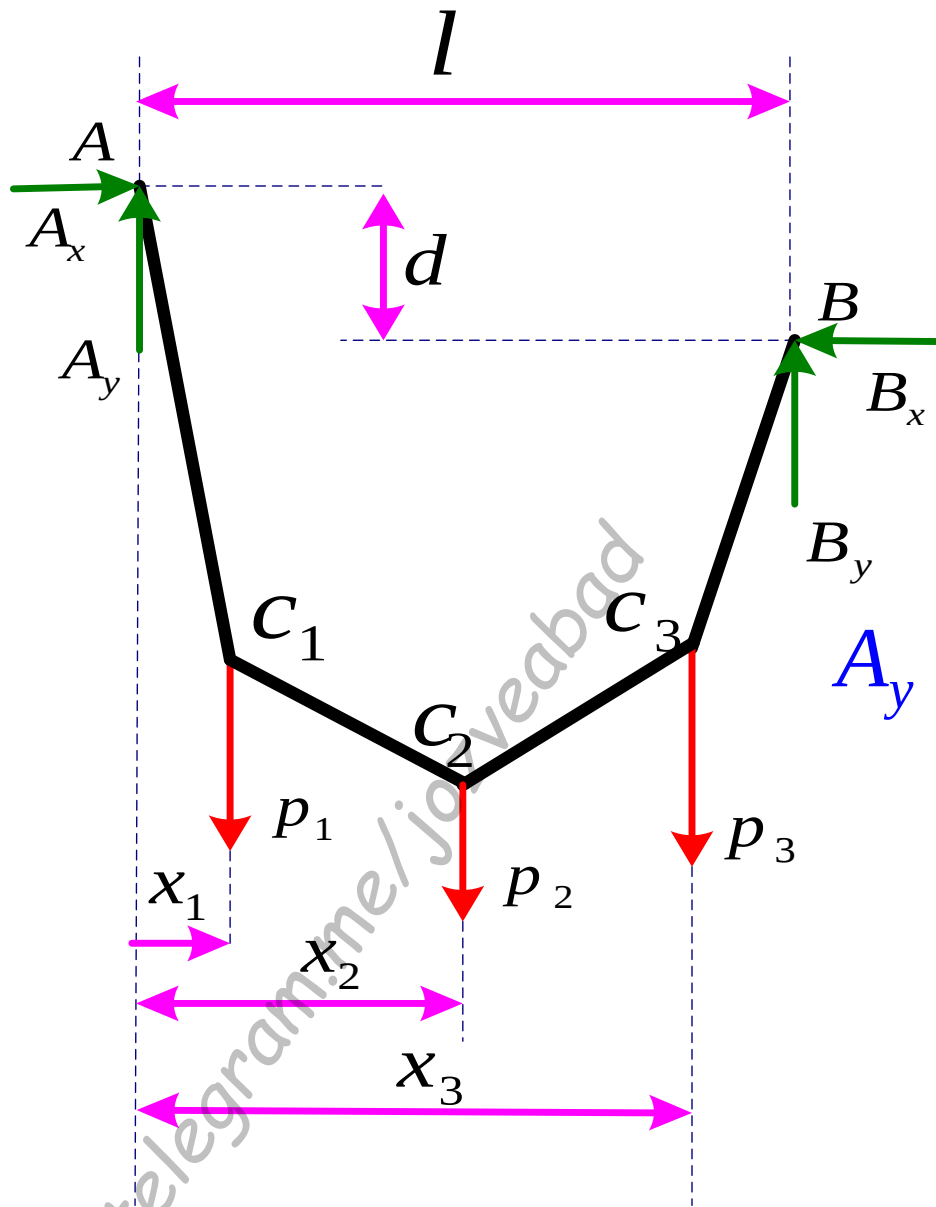
۱- کابل ها با نیروی متمرکز



کابل مقابل بین دو نقطه A و B وصل شده است و به نقاط مختلف آن نیرو اعمال می شود. این کابل، کابل قابل انعطاف است یعنی مقاومت کابل در مقابل خمش، ضعیف است. شکل کابل متأثر از نیروهای وارد بر آن است.

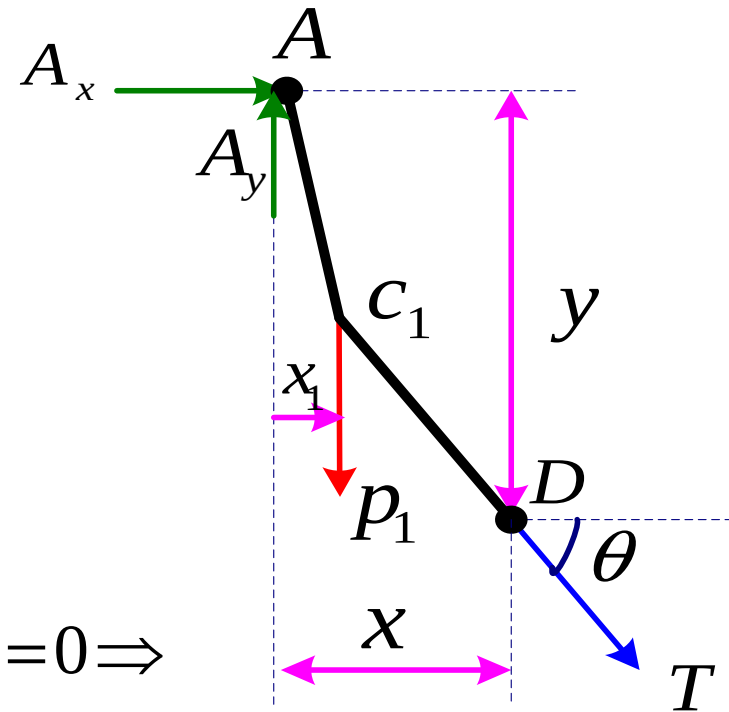
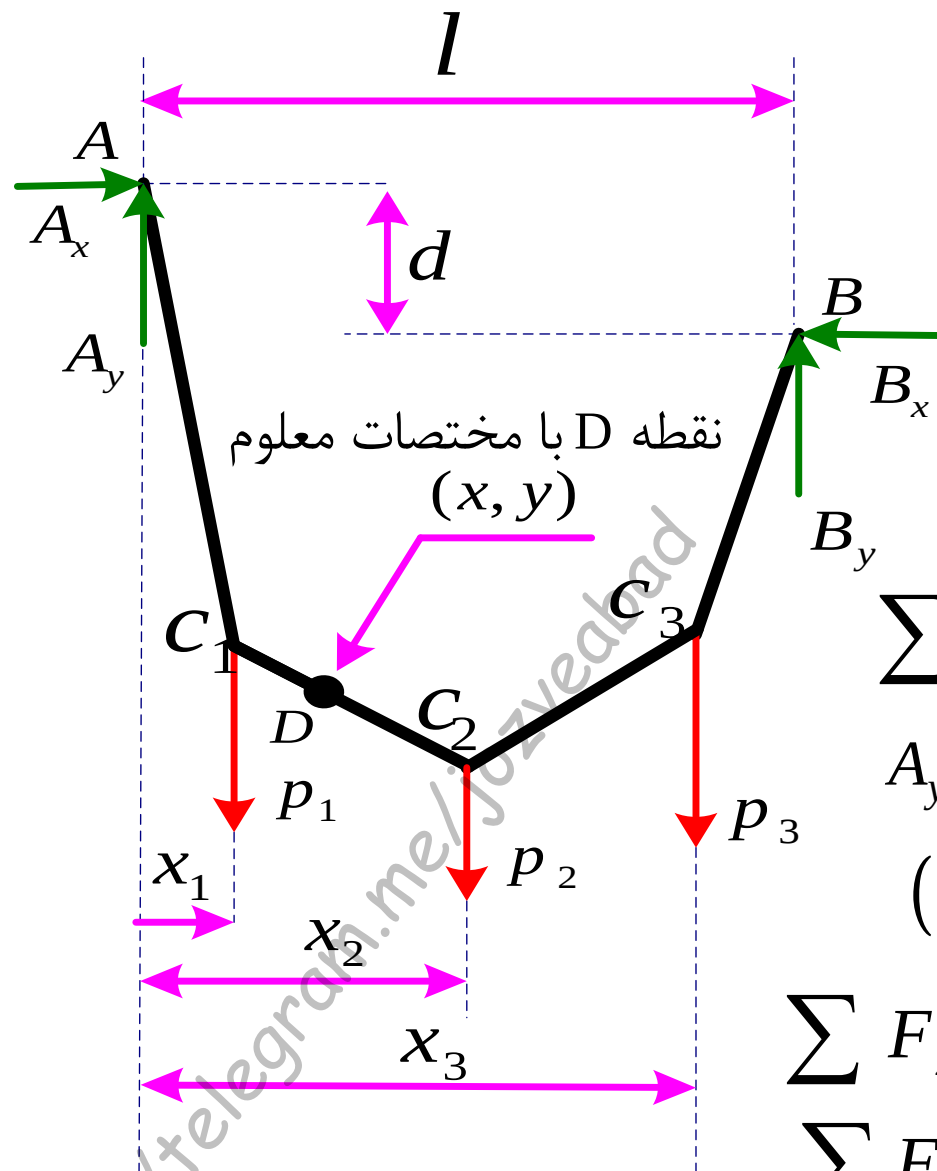
هدف تعیین مولفه های عکس العمل ها در تکیه گاه های A و B و فواصل قائم نقاط C_1 و C_2 و C_3 از A هست نیروی کشش در هر قست از کابل در امتداد آن می باشد.

دیاگرام آزاد کل کابل:



$$\sum M_B = 0 \Rightarrow$$

(a) معادله با دو مجهول A_x و A_y



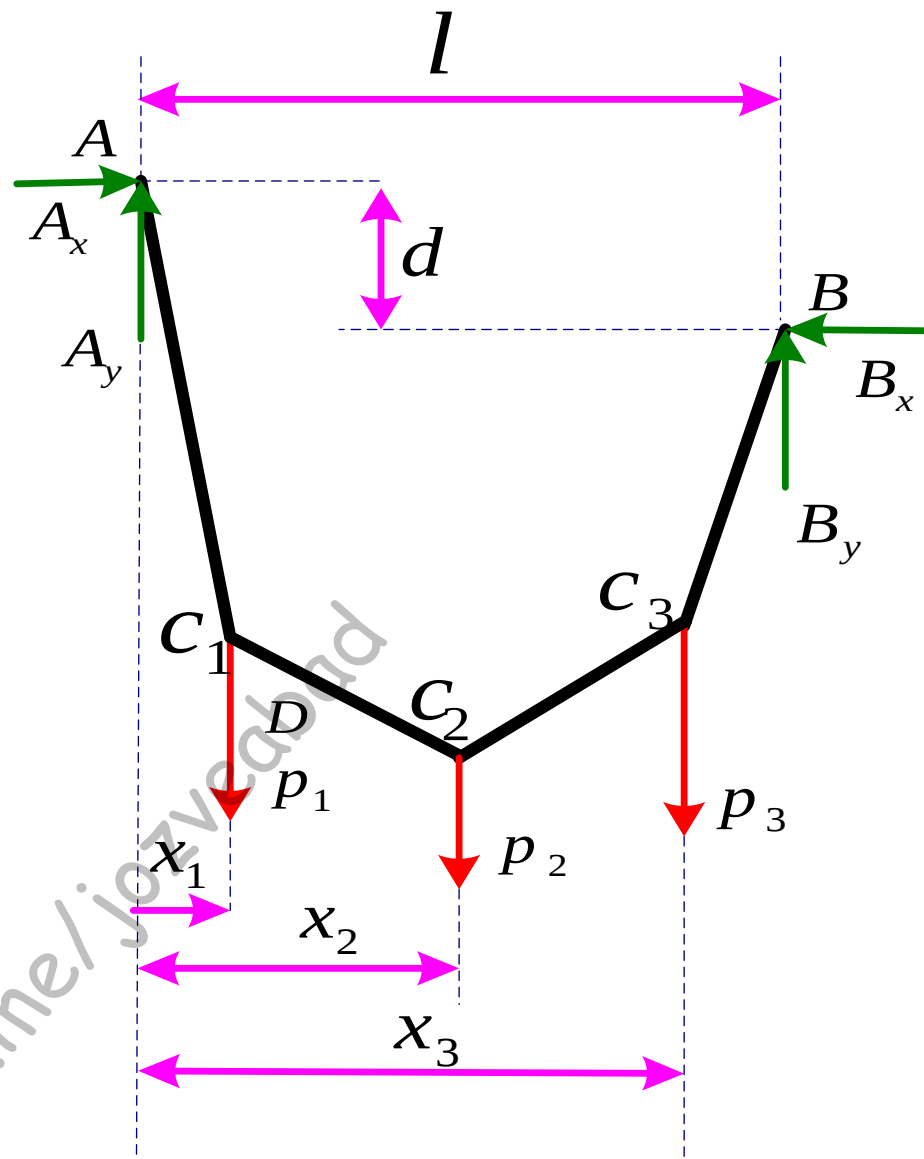
$$\sum M_D = 0 \Rightarrow$$

یک معادله با دو مجهول A_x و A_y (b)

تعیین می شوند $A_x, A_y \rightarrow (a), (b)$

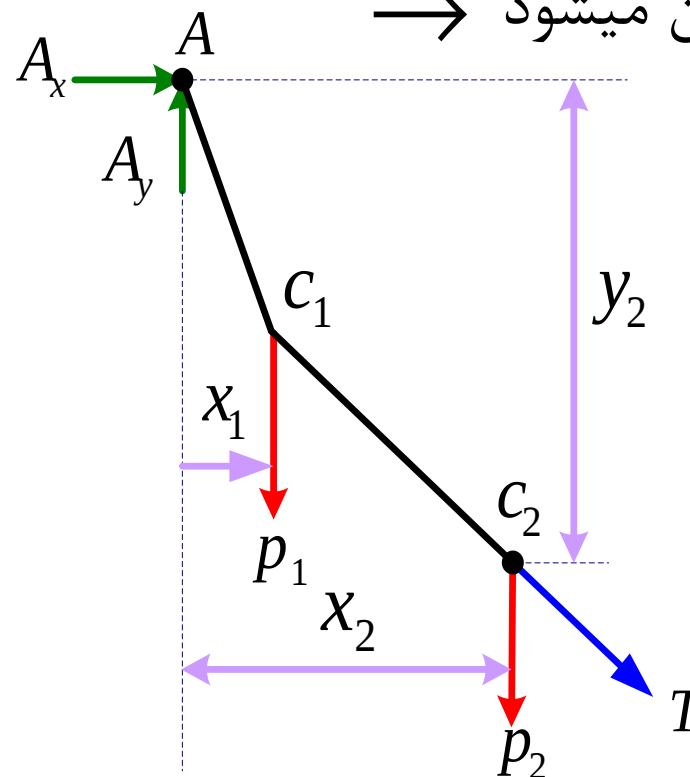
$$\left. \begin{aligned} \sum F_x = 0 &\Rightarrow \text{دو مجهول } T, \theta \\ \sum F_y = 0 &\Rightarrow \text{دو مجهول } T, \theta \end{aligned} \right\}$$

تعیین می شوند. θ, T



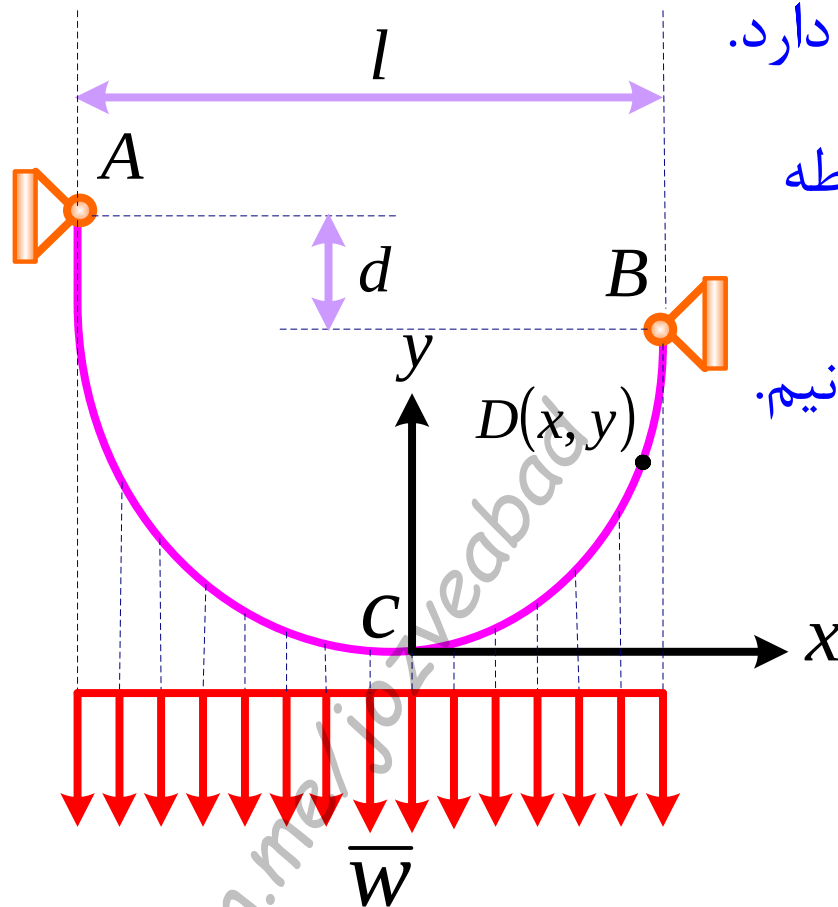
$\sum F_x = 0 \Rightarrow B_x$ مجهول
 $\rightarrow B_x$ تعیین میشود

$\sum F_y = 0 \Rightarrow B_y$ مجهول
 $\rightarrow B_y$ تعیین میشود



$\sum M_{C_2} = 0 \Rightarrow y_2$ مجهول y_2 تعیین می شود

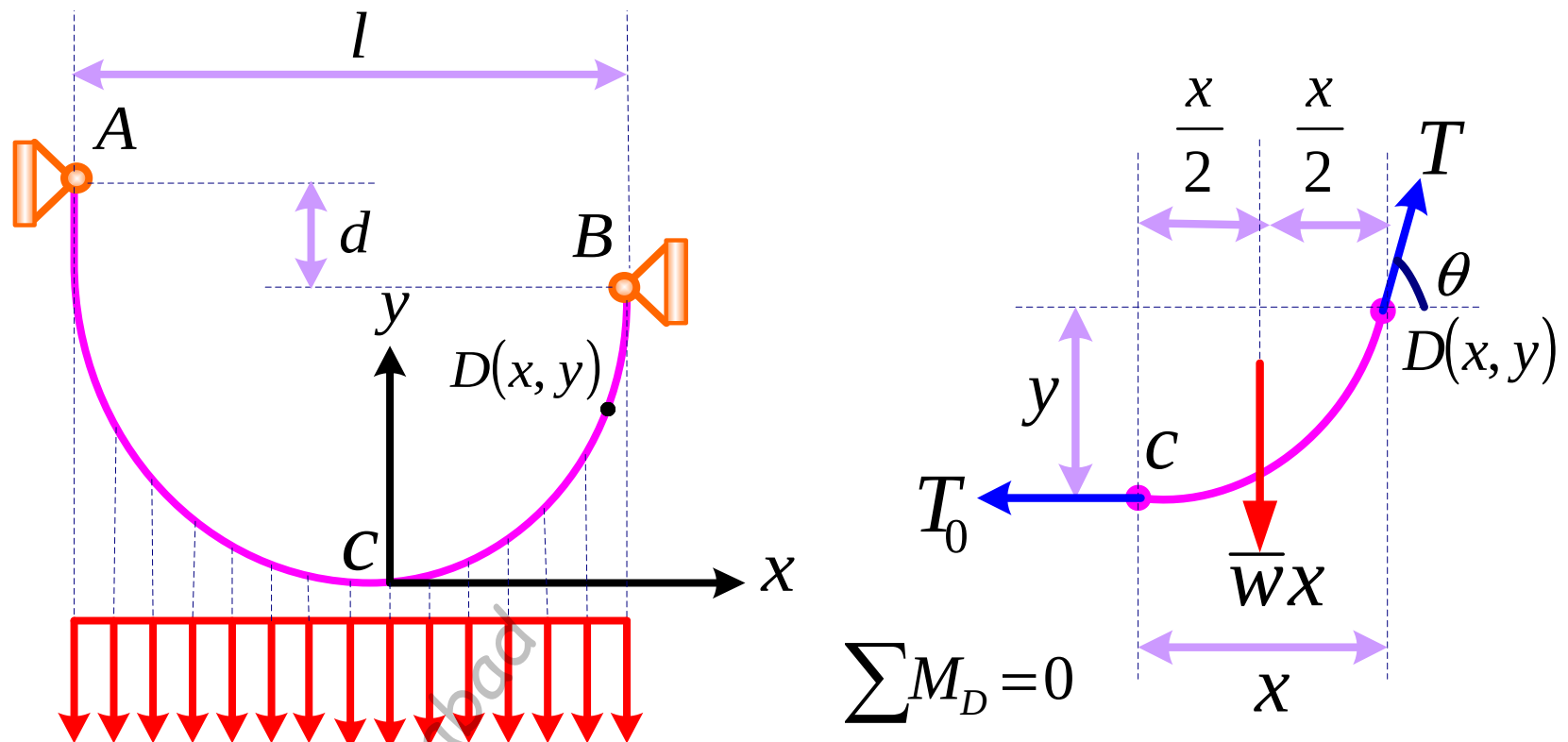
۲- کابل های سه می



کابل تحت تاثیر نیروی توزیعی ثابتی قرار دارد.

دستگاه مختصات را بر روی پایین ترین نقطه کابل انتخاب میکنیم.

برخلاف کابل قبلی، مختصات D را نمی دانیم. یعنی (x, y) مجهول هستند.



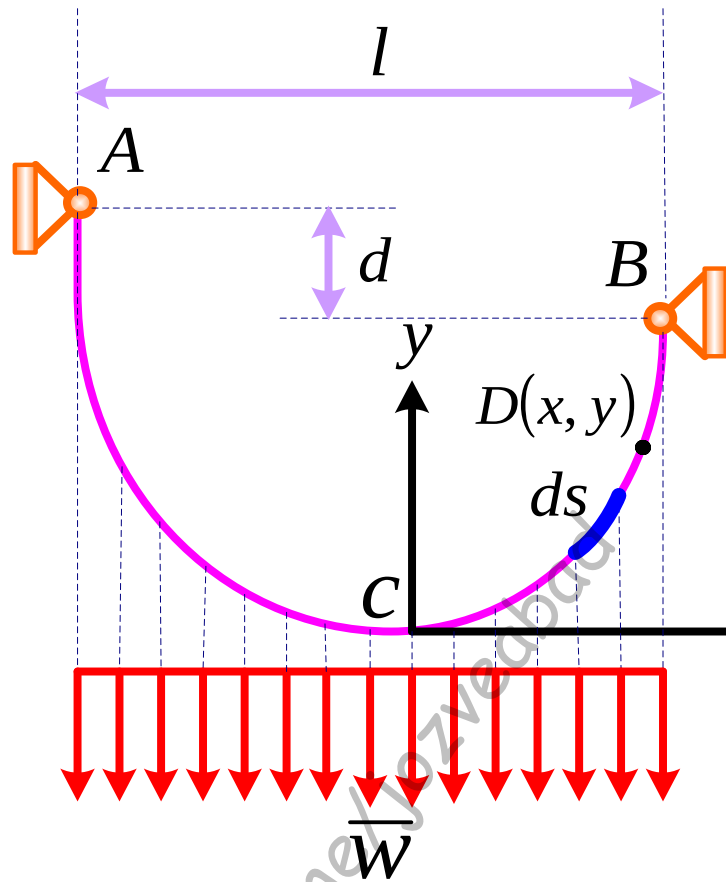
$$\sum M_D = 0$$

$$T_0 y - \bar{W} x \left(\frac{x}{2} \right) = 0 \Rightarrow y = \frac{\bar{W}}{2T_0} x^2$$

معادله یک سهمی است که رأس آن در مبدأ مختصات می باشد.

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow T \cos \theta = T_0$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow T \sin \theta - \bar{W} x = 0 \rightarrow T \sin \theta = \bar{W} x \quad T^2 = T_0^2 + \bar{W}^2 x^2 \quad \tan \theta = \frac{\bar{W} x}{T_0}$$

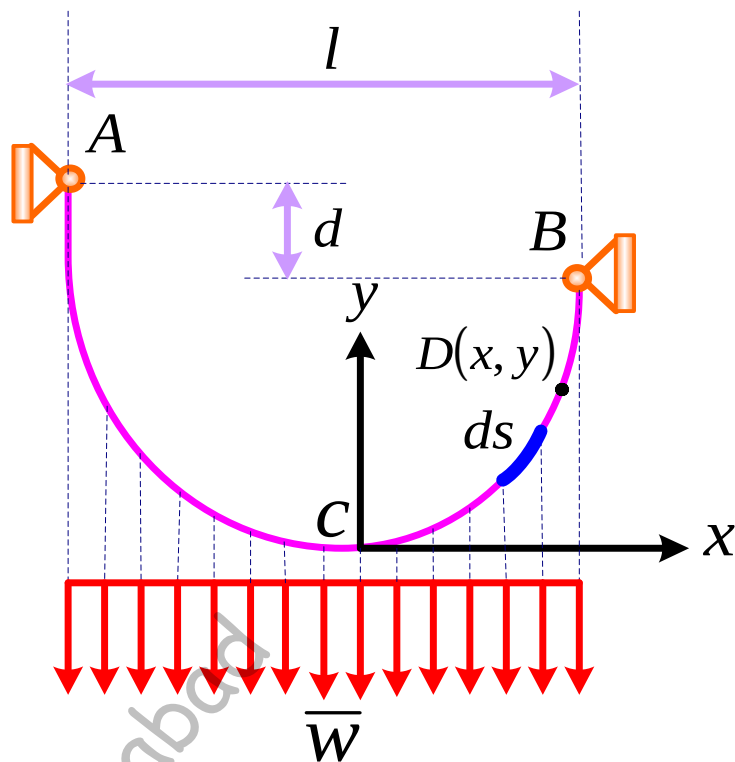


$$(ds)^2 = (dx)^2 + (dy)^2 = (dx)^2 \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]$$

$$y = \frac{\bar{W}}{2T_0} x^2$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\bar{W}}{T_0} x \rightarrow (ds)^2 = (dx)^2 \left(1 + \frac{\bar{W}^2}{T_0^2} x^2 \right)$$

$$ds = \left(1 + \frac{\bar{W}^2}{T_0^2} x^2 \right)^{\frac{1}{2}} dx$$



$$ds = \left(1 + \frac{\bar{W}^2}{T_0^2} x^2 \right)^{\frac{1}{2}} dx$$

$$Z = \frac{\bar{W}^2}{T_0^2} x^2 \quad n = 1/2$$

$$ds = (1 + Z)^n dx$$

$$(1 + Z)^n = 1 + nZ + \frac{n(n-1)}{2!} Z^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!} Z^3 + \dots$$

$$ds = \left(1 + \frac{\bar{W}^2}{2T_0^2} x^2 - \frac{\bar{W}^4}{8T_0^4} x^4 + \frac{\bar{W}^6}{16T_0^6} x^6 + \dots \right) dx$$

$$\int_0^{s_{CB}} ds = \int_0^{x_B} \left(1 + \frac{\bar{W}^2}{2T_0^2} x^2 - \frac{\bar{W}^4}{8T_0^4} x^4 + \frac{\bar{W}^6}{16T_0^6} x^6 + \dots \right) dx$$

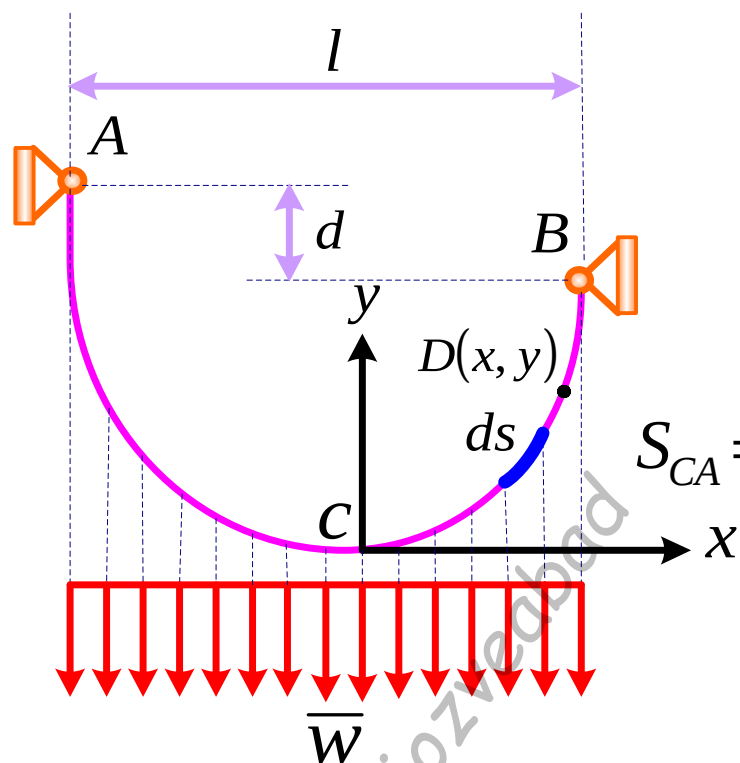
$$S_{CB} = x_B + \frac{\bar{W}^2}{6T_0^2} x_B^3 - \frac{\bar{W}^4}{40T_0^4} x_B^5 + \frac{\bar{W}^6}{112T_0^6} x_B^7 + \dots$$

$$S_{CB} = x_B \left(1 + \frac{\bar{W}^2}{6T_0^2} x_B^2 - \frac{\bar{W}^4}{40T_0^4} x_B^4 + \frac{\bar{W}^6}{112T_0^6} x_B^6 + \dots \right)$$

$$y_B = \frac{\bar{W}}{2T_0} x_B^2 \quad \frac{\bar{W}}{T_0} = 2 \frac{y_B}{x_B^2}$$

$$S_{CB} = x_B \left[1 + \frac{2}{3} \left(\frac{y_B}{x_B} \right)^2 - \frac{2}{5} \left(\frac{y_B}{x_B} \right)^4 + \frac{4}{7} \left(\frac{y_B}{x_B} \right)^6 + \dots \right]$$

به طریق مشابه برای قسمت CA



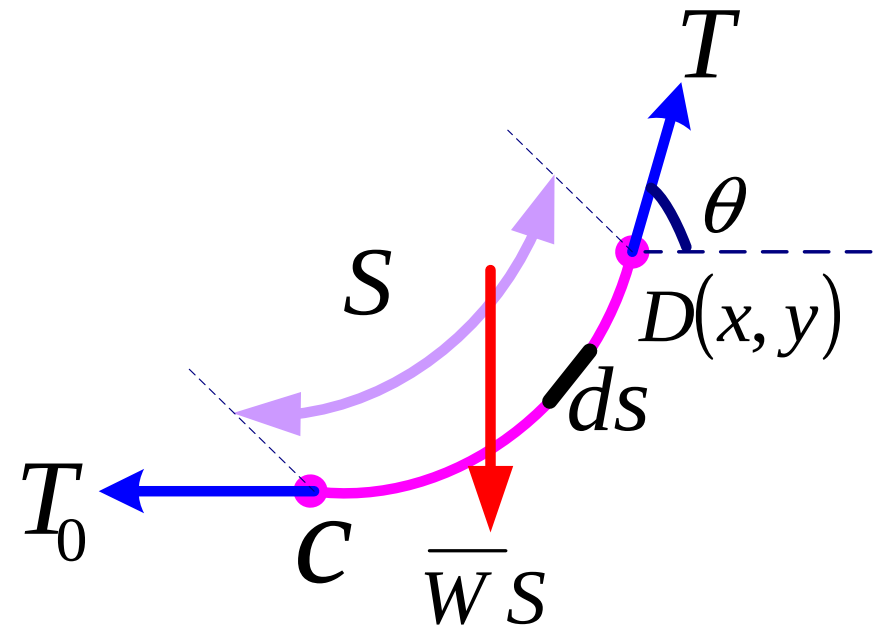
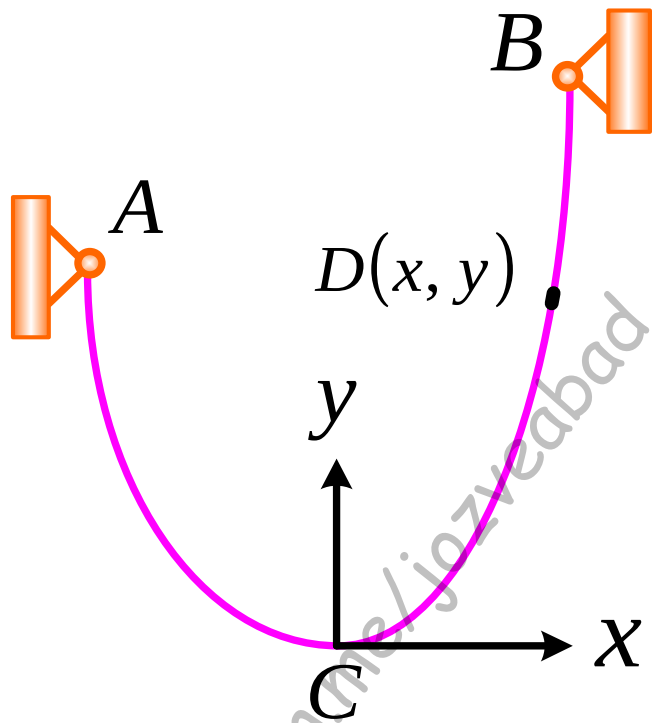
$$y_A = \frac{\bar{W}}{2T_0} x_A^2 \quad \frac{\bar{W}}{T_0} = 2 \frac{y_A}{x_A^2}$$

$$S_{CA} = x_A \left[1 + \frac{2}{3} \left(\frac{y_A}{x_A} \right)^2 - \frac{2}{5} \left(\frac{y_A}{x_A} \right)^4 + \frac{4}{7} \left(\frac{y_A}{x_A} \right)^6 + \dots \right]$$

$$\begin{cases} x_B - x_A = l \\ y_A - y_B = d \end{cases}$$

۳- کابل تحت تاثیر نیروی وزنش

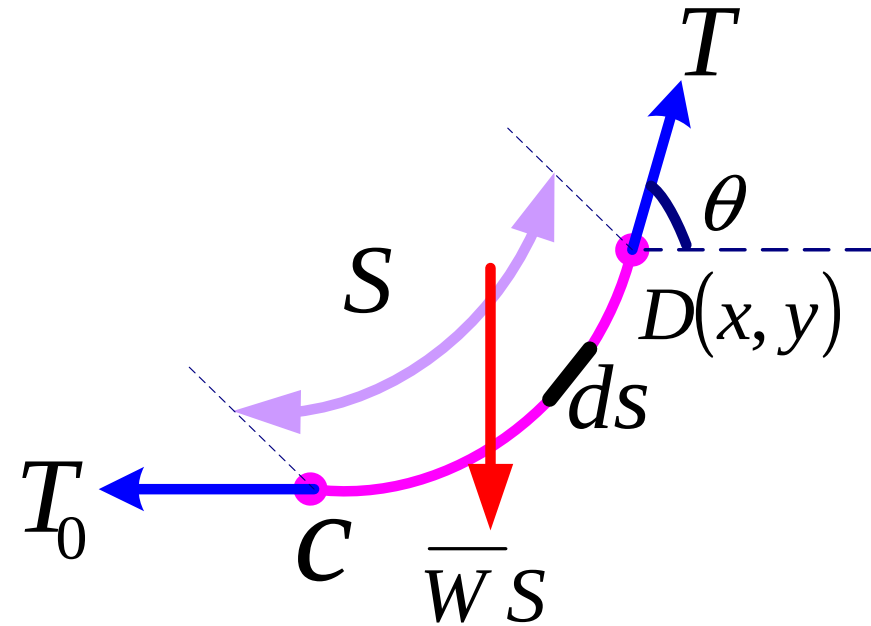
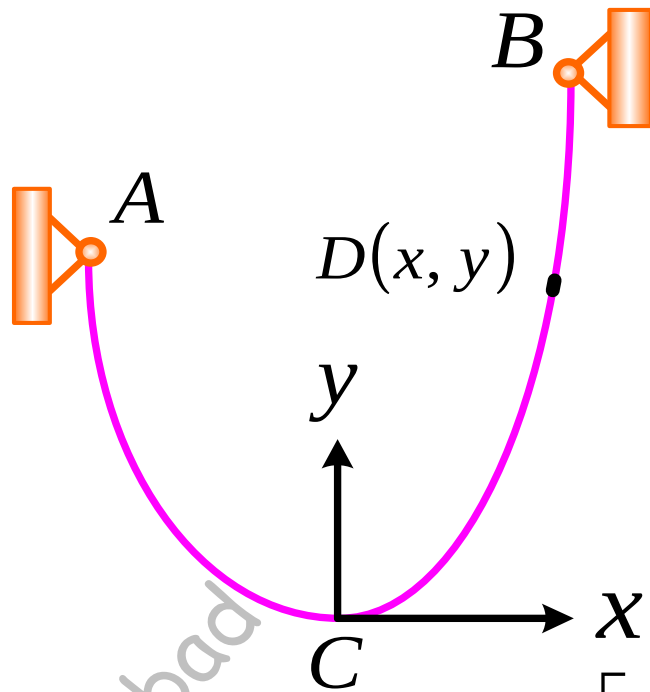
هدف تعیین منحنی شکل کابل می باشد.



$\bar{W}$: نیروی وزن کابل بر واحد طول کابل

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow T \cos \theta - T_0 \Rightarrow T \cos \theta = T_0$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow \bar{W}S - T \sin \theta = 0 \Rightarrow T \sin \theta = \bar{W}S \quad \tan \theta = \frac{\bar{W}S}{T_0} = \frac{dy}{dx}$$



$$(ds)^2 = (dx)^2 + (dy)^2 = (dx)^2 \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] \quad \frac{dy}{dx} = \frac{\bar{W}S}{T_0}$$

$$(ds)^2 = (dx)^2 \left[1 + \frac{\bar{W}^2 S^2}{T_0^2} \right] \Rightarrow ds = \sqrt{1 + \frac{\bar{W}^2 S^2}{T_0^2}} dx$$

$$\Rightarrow \int_0^x dx = \int_0^S \frac{ds}{\sqrt{1 + \frac{\bar{W}^2 S^2}{T_0^2}}} \rightarrow x = \int_0^S \frac{ds}{\sqrt{1 + \frac{\bar{W}^2 S^2}{T_0^2}}}$$

$$x = \int_0^S \frac{ds}{\sqrt{1 + \frac{\bar{W}^2 S^2}{T_0^2}}}$$

$$\frac{\bar{W}S}{T_0} = \sinh \alpha \Rightarrow \frac{\bar{W}}{T_0} ds = \cosh \alpha d\alpha \Rightarrow S = \frac{T_0}{\bar{W}} \sinh(\alpha)$$

$$x = \int \frac{T_0}{\bar{W}} \frac{\cosh \alpha d\alpha}{\cosh \alpha} = \frac{T_0}{\bar{W}} \int_0^{\sinh^{-1} \frac{S\bar{W}}{T_0}} d\alpha = \frac{T_0}{\bar{W}} \sinh^{-1} \frac{S\bar{W}}{T_0}$$

$$\Rightarrow \sinh^{-1} \left(\frac{S\bar{W}}{T_0} \right) = \frac{\bar{W}x}{T_0} \Rightarrow \frac{S\bar{W}}{T_0} = \sinh \left(\frac{\bar{W}x}{T_0} \right)$$

$$S = \frac{T_0}{\bar{W}} \sinh \left(\frac{\bar{W}x}{T_0} \right)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\bar{W}S}{T_0}$$

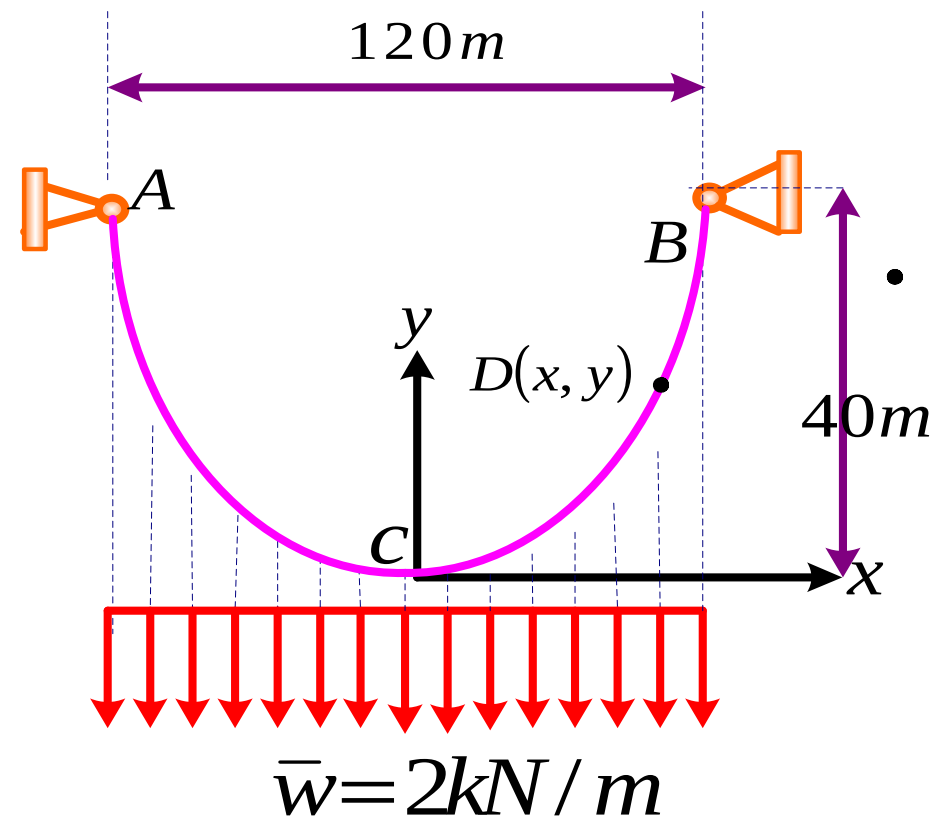
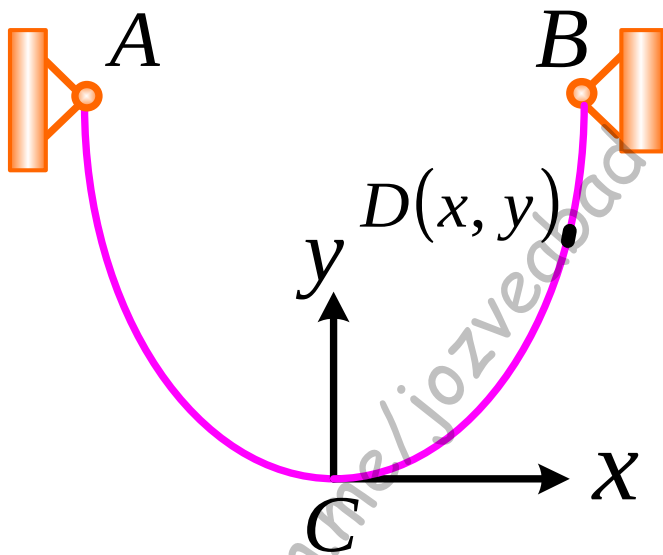
$$S = \frac{T_0}{\bar{W}} \sinh\left(\frac{\bar{W}x}{T_0}\right)$$

$$\frac{dy}{dx} = \sinh \frac{\bar{W}x}{T_0} \Rightarrow dy = \sinh \frac{\bar{W}x}{T_0} dx \xrightarrow{\int} y = \frac{T_0}{\bar{W}} \cosh\left(\frac{\bar{W}x}{T_0}\right) + C_1$$

$$0 = \frac{T_0}{\bar{W}} + C_1 \Rightarrow C_1 = -\frac{T_0}{\bar{W}}$$

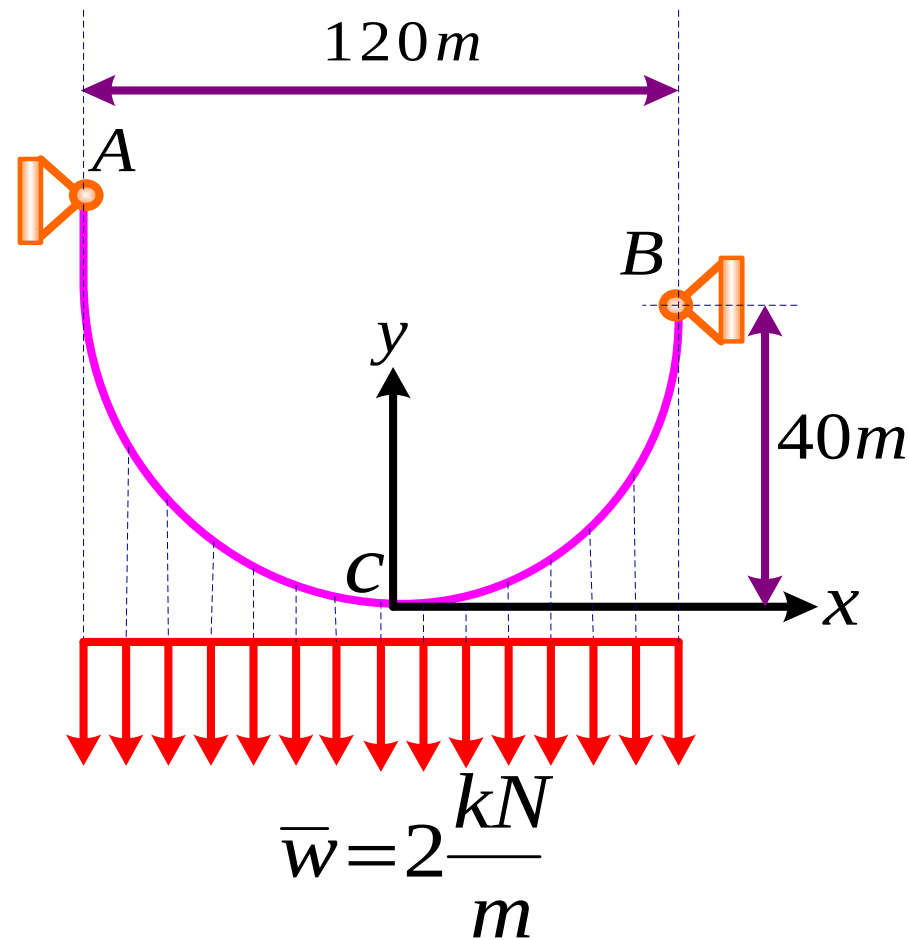
$$y = \frac{T_0}{\bar{W}} \left(\cosh \left(\frac{\bar{W}}{T_0} x \right) - 1 \right)$$

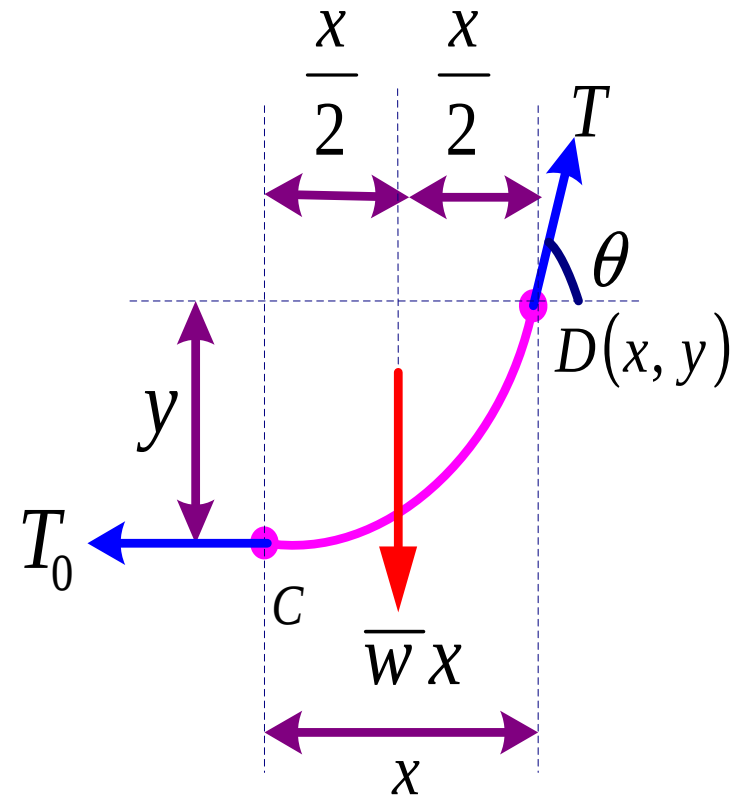
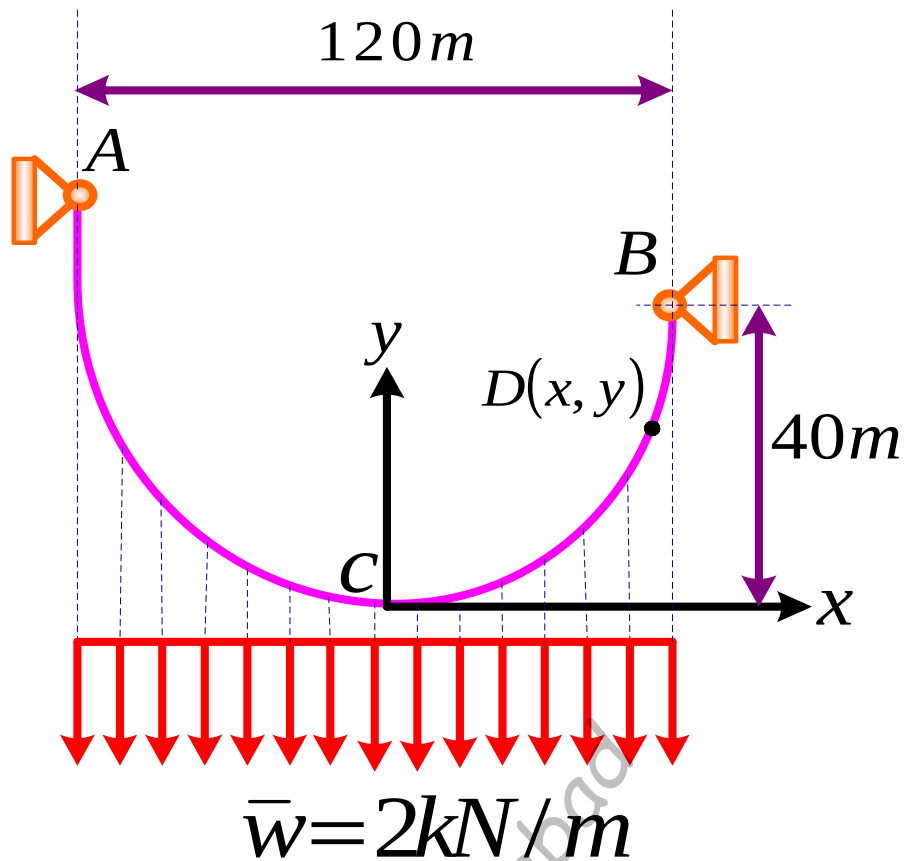
معادله Catenary



مثال: برای کابل نشان داده در شکل مطلوبست:

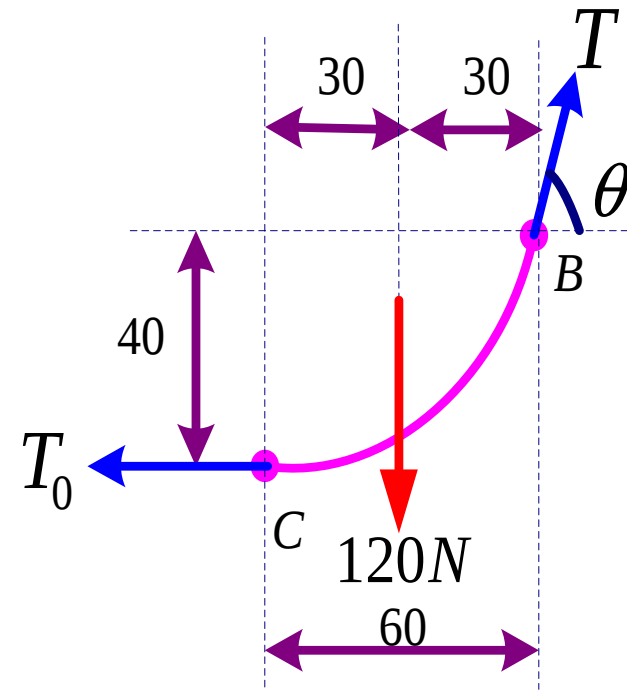
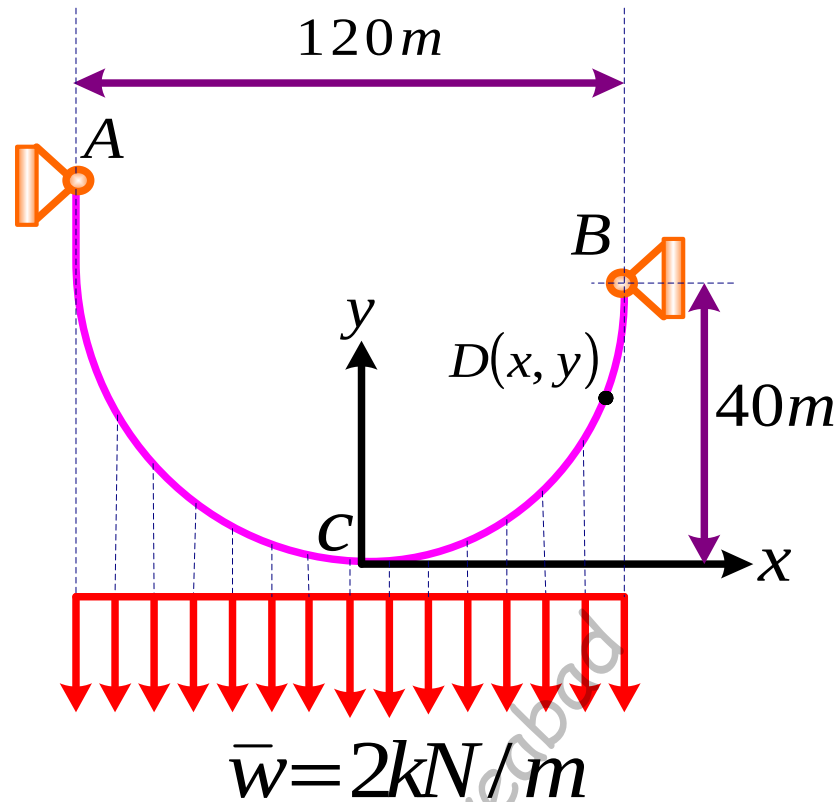
- 1- کشش در پایین ترین نقطه کابل.
- 2- کشش ماکزیمم.
- 3- طول قسمت CB کابل. (نقطه C پایین ترین نقطه کابل است)





$$\sum M_D = T_0 y - \bar{W}x \left(\frac{x}{2} \right) = 0 \Rightarrow y = \frac{\bar{W}}{2T_0} x^2 \quad \text{نمایشگر سهمی است}$$

$$y_B = \frac{\bar{W}}{2T_0} x_B^2 \Rightarrow T_0 = \frac{\bar{W}}{2y_B} x_B^2 = \frac{2(3600)}{80} = 90\text{kN}$$

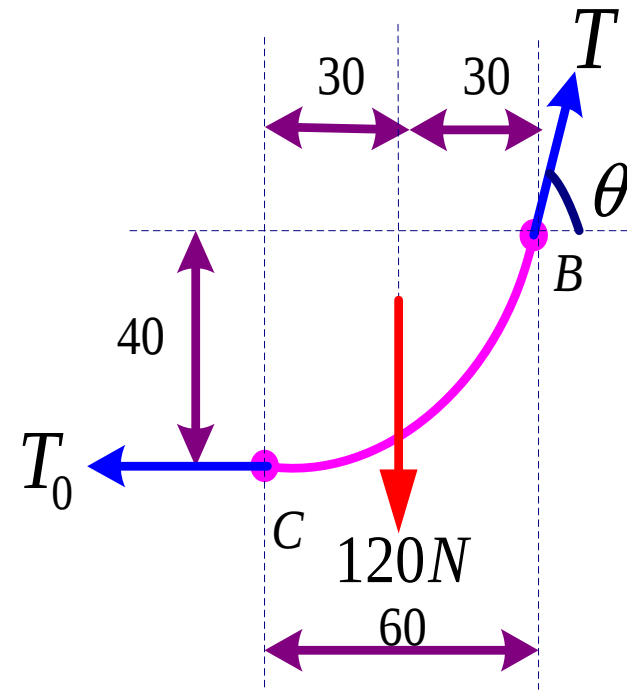
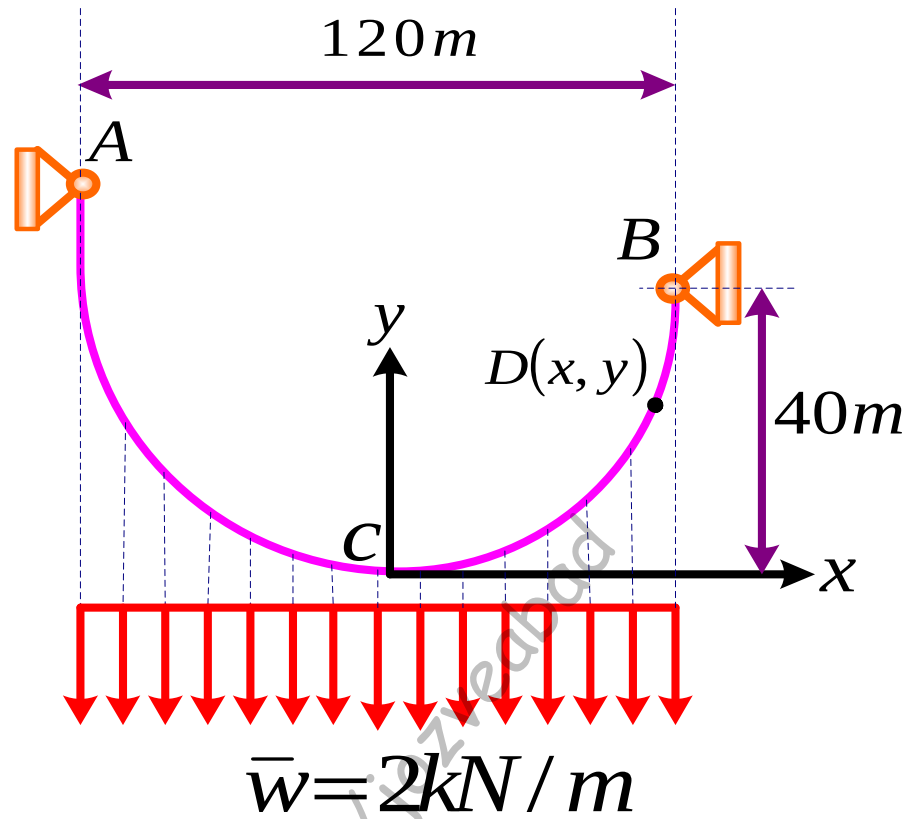


$$\sum F_x = 0 \Rightarrow T \cos \theta - T_0 \Rightarrow T \cos \theta = 90$$

$$\sum F_y \Rightarrow T \sin \theta - 60 \bar{W} = 0 \Rightarrow T \sin \theta = 120$$

$$T^2 = (90)^2 + (120)^2 \Rightarrow T = 150 \text{ kN}$$

$$\tan \theta = \frac{4}{3} \Rightarrow \theta = \tan^{-1} \frac{4}{3} = 53^\circ$$

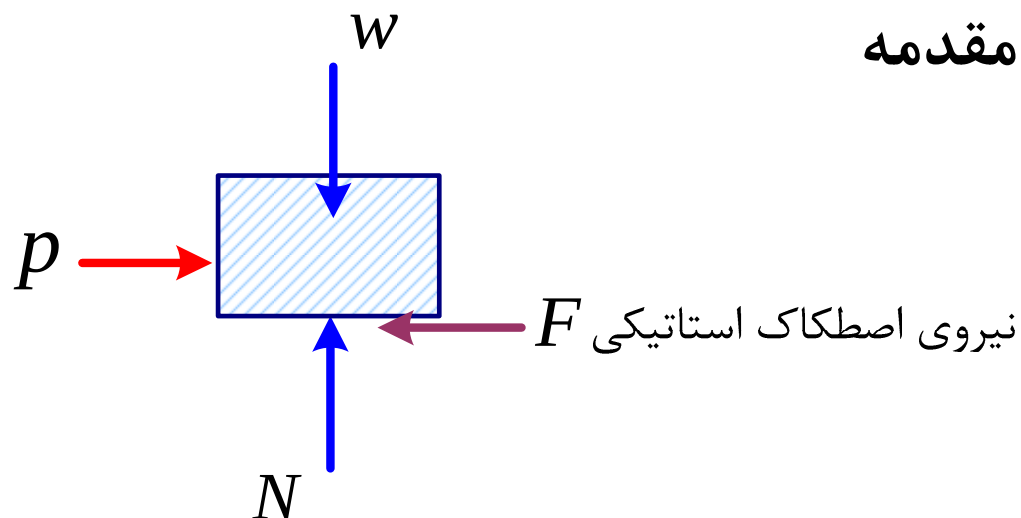
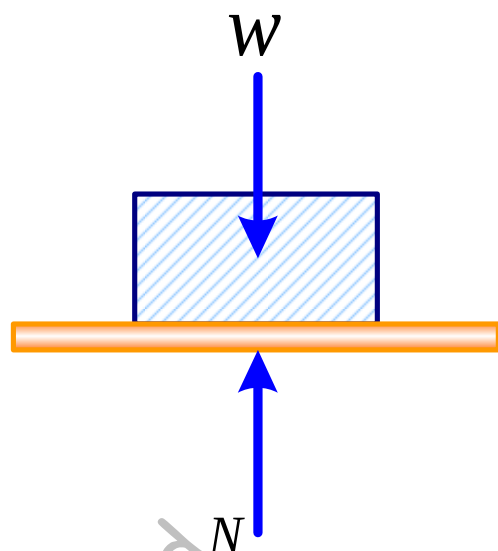


$$S_{CB} = x_B \left[1 + \frac{2}{3} \left(\frac{y_B}{x_B} \right)^2 - \frac{2}{5} \left(\frac{y_B}{x_B} \right)^4 + \frac{4}{7} \left(\frac{y_B}{x_B} \right)^6 \right] \dots$$

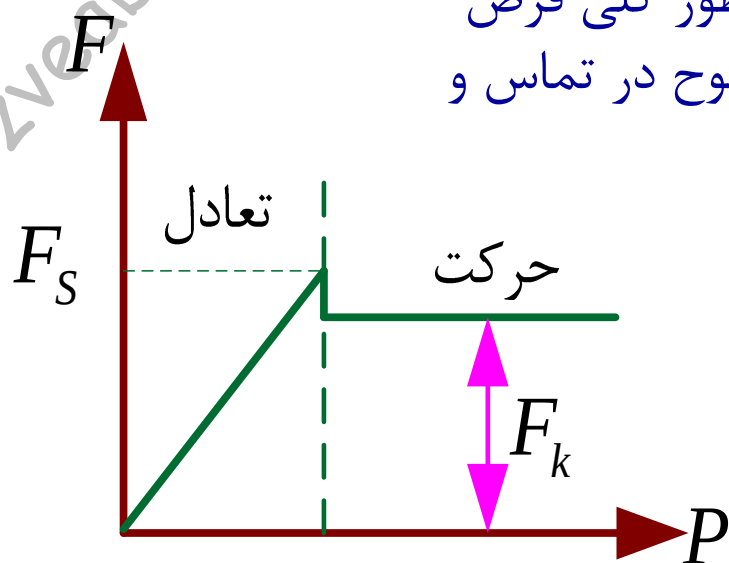
$$S_{CB} = 60 \left[1 + \frac{8}{27} - \frac{32}{405} + \frac{256}{5103} + \dots \right] = 76.04 \text{ m}$$

۸- اصطکاک

مقدمه



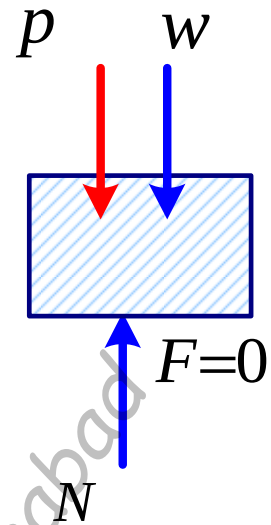
ماهیت این نیروها کاملاً شناخته شده نیست اما بطور کلی فرض میشود که این نیروها بواسطه غیر منظم بودن سطوح در تماس و تا حدودی بواسطه جاذبه ملکولی باشند



$$F_s = \mu_s N_s$$

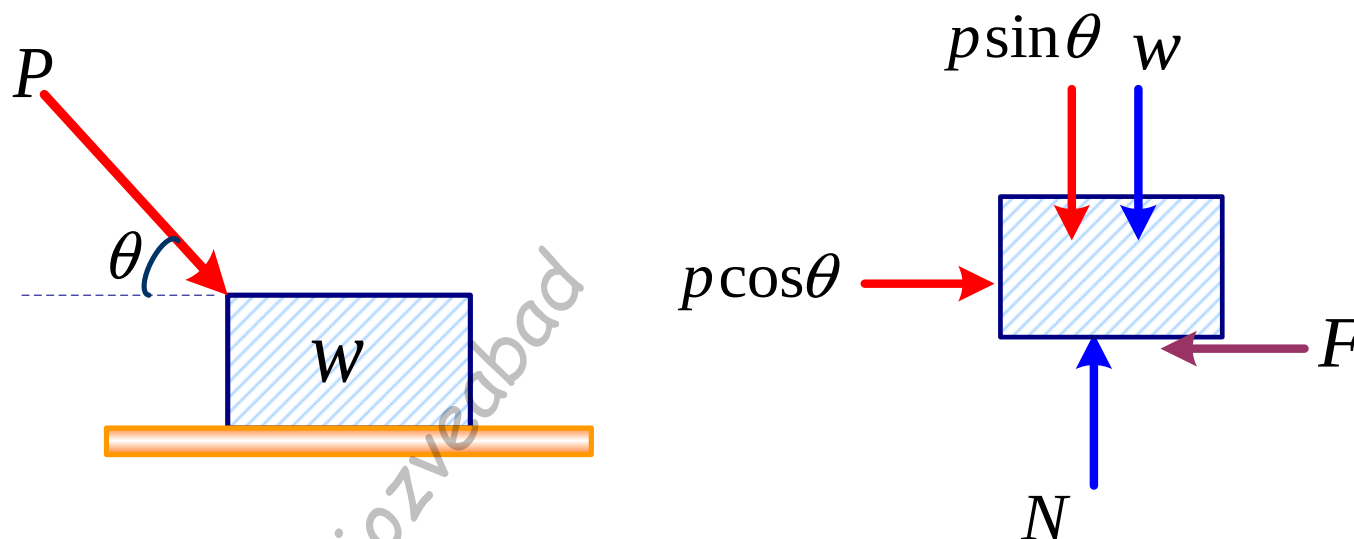
$$F_k = \mu_k N_k$$

حالت اول: نیروی های اعمالی به جسم تمایل به حرکت دادن جسم در طول سطح تماس ندارند.



$$\sum F_y = 0 \Rightarrow W + p - N = 0$$

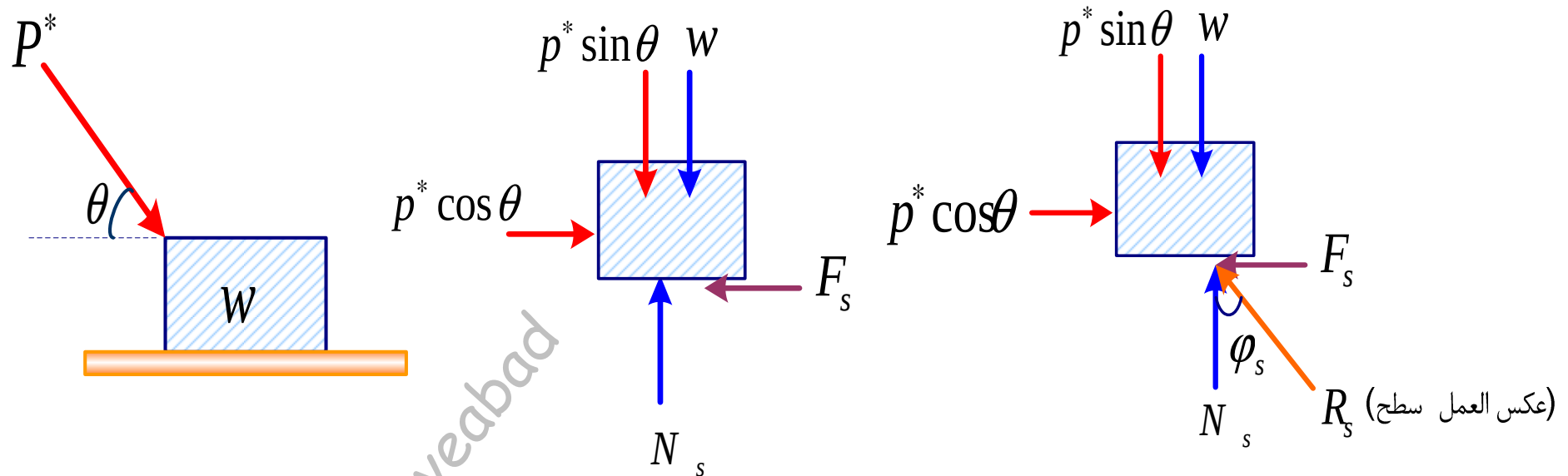
حالت دوم: نیروهای اعمالی به جسم تمایل به حرکت دادن جسم در طول سطح تماس دارند اما به اندازه کافی بزرگ نیستند تا قادر باشند جسم را به حرکت در آورند.



$$\sum F_y = 0 \Rightarrow W + p \sin \theta - N = 0$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow p \cos \theta - F = 0 \Rightarrow p \cos \theta = F < F_s$$

حالت سوم: نیروی P^* سبب می شود که جسم در امتداد افقی در آستانه لغزش قرار بگیرد.



$$\sum F_y = 0 \Rightarrow W + p^* \sin \theta - N_s = 0$$

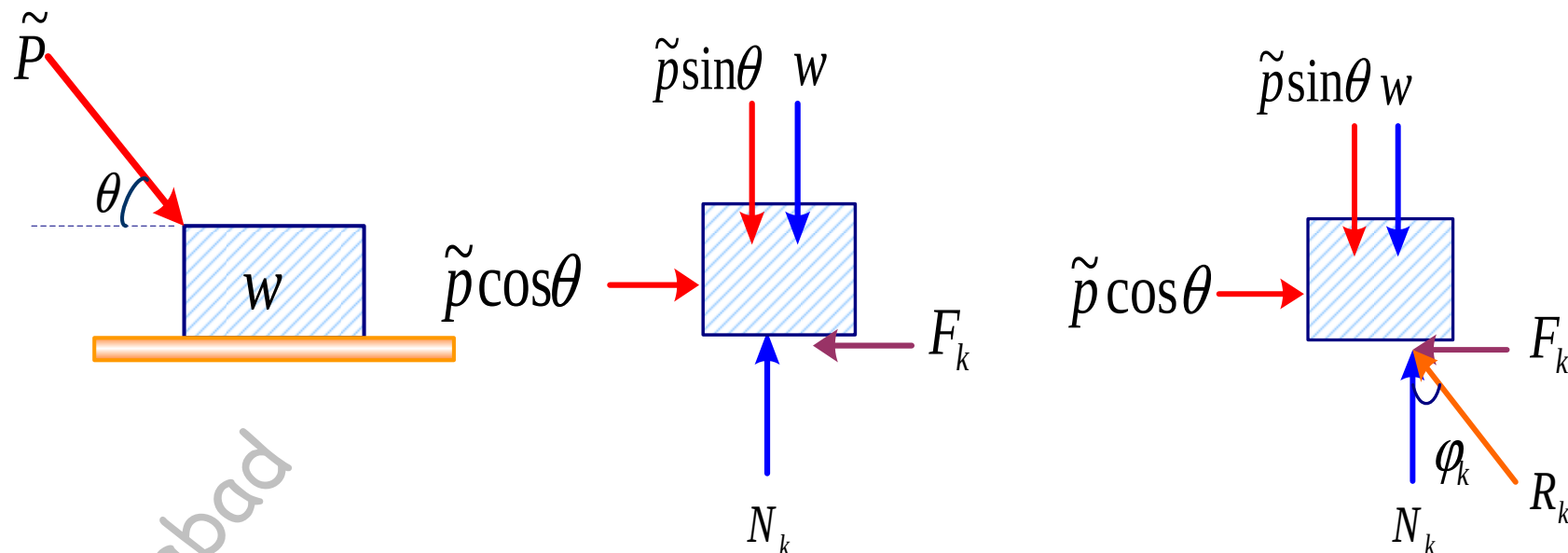
$$\sum F_x = 0 \Rightarrow p^* \cos \theta - F_s = 0 \quad p^* \cos \theta = F_s$$

$$\underline{R}_s = \underline{F}_s + \underline{N}_s \quad \tan \varphi_s = \frac{F_s}{N_s}$$

$$\Rightarrow \tan \varphi_s = \frac{\mu_s N_s}{N_s} = \mu_s$$

زاویه اصطکاک در حالت استاتیکی

حالت چهارم: نیروی $\tilde{P}$ سبب می شود که جسم در امتداد افقی به حرکت در آید.



$$\sum F_y = 0 \Rightarrow W + \tilde{P} \sin \theta - N_K = 0$$

$$\sum F_x = ma_x \quad (\text{دینامیک}) \quad \tilde{P} \cos \theta > F_s$$

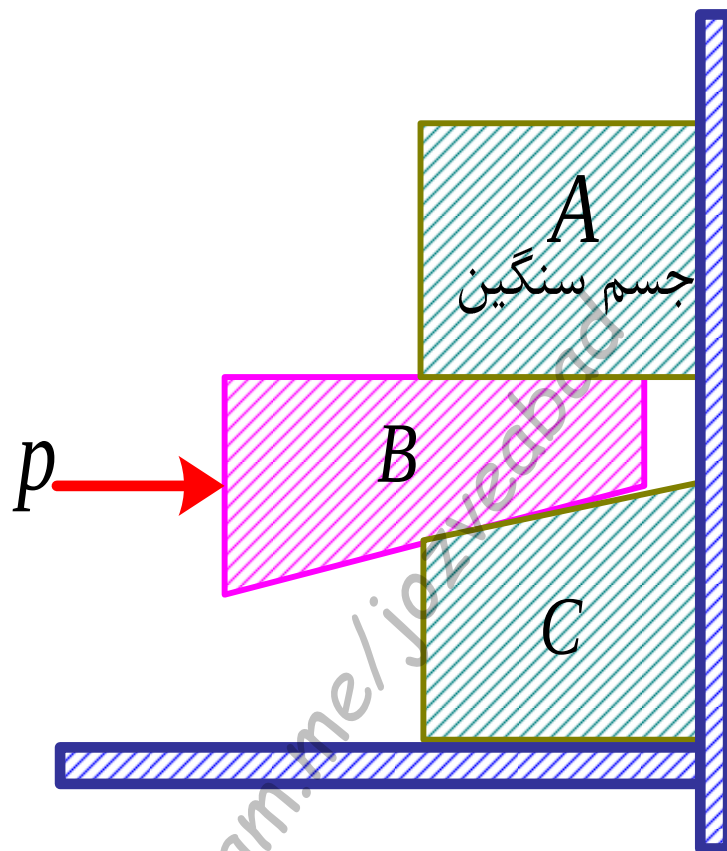
F_k : نیروی اصطکاک دینامیکی

F_s : نیروی اصطکاک استاتیکی

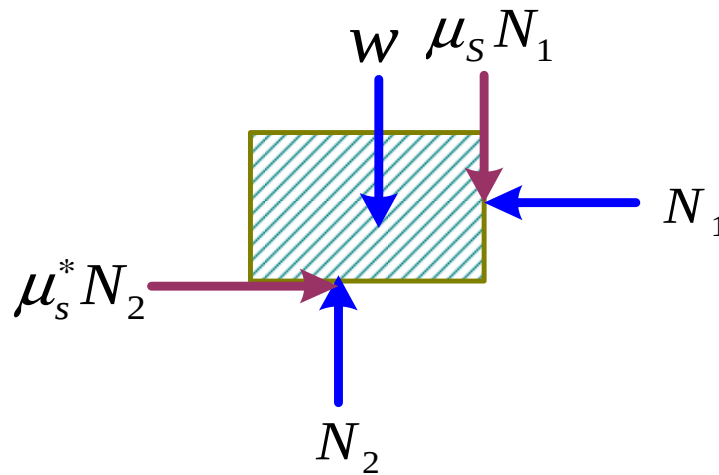
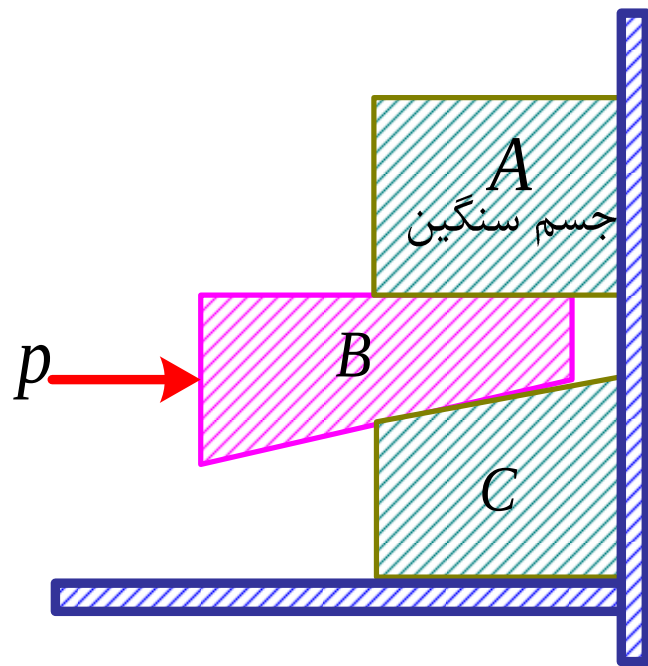
$$\underline{R}_k = \underline{F}_k + \underline{N}_k \quad \tan \varphi_k = \frac{F_k}{N_k} = \frac{\mu_N N_K}{N_K} = \mu_K$$

گوه ها

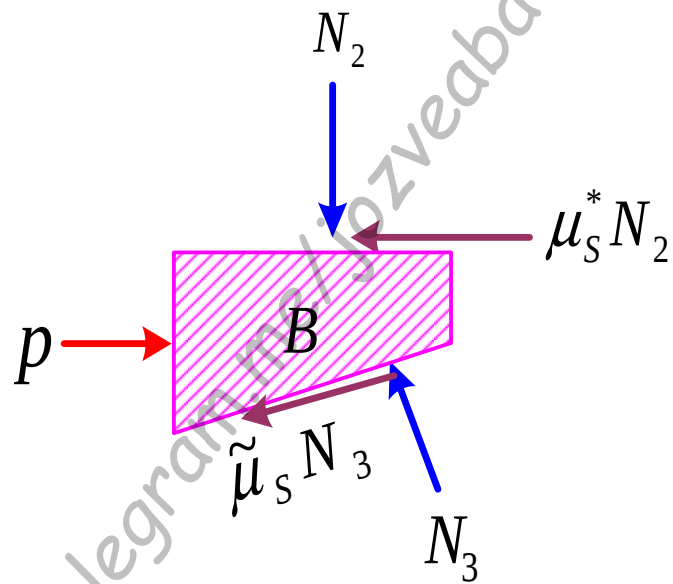
ماشین هایی ساده هستند که برای بلند کردن اجسام سنگین مورد استفاده قرار می گیرند. معمولاً از وزن گوه ها صرف نظر می شود .



می خواهیم جسم سنگین A را با گوه B با استفاده از نیروی P در آستانه ی لغزش به سمت بالا قرار دهیم. همه سطوح اصطکاک دارند.



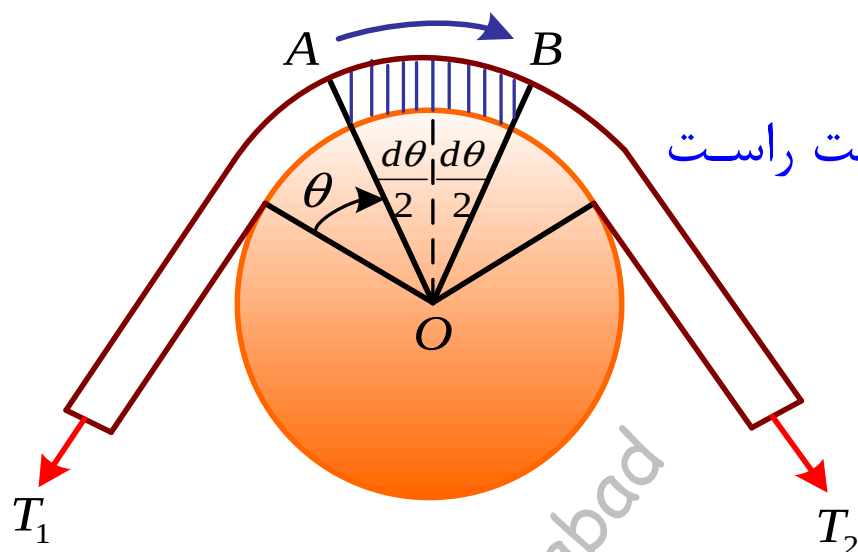
$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0 \\ \sum F_y &= 0\end{aligned}$$



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

اصطکاک تسمه ها

فرض می کنیم تسمه در آستانه لغزش به سمت راست باشد.



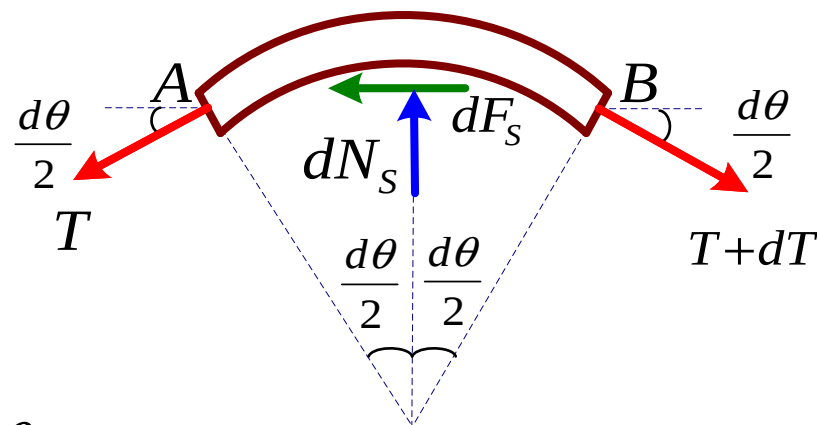
$$dF_s = \mu_s dN_s$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow (T + dT) \cos \frac{d\theta}{2} - T \cos \frac{d\theta}{2} - \mu_s dN_s = 0$$

$$(I) \quad dT \cos \frac{d\theta}{2} = \mu_s dN_s$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow -(T + dT) \sin \frac{d\theta}{2} - T \sin \frac{d\theta}{2} + dN_s = 0$$

$$(II) \quad dN_s = 2T \sin \frac{d\theta}{2} + dT \sin \frac{d\theta}{2}$$



$$(I) \quad dT \cos \frac{d\theta}{2} = \mu_s dN_s \quad dN_s = \frac{1}{\mu_s} dT \cos \frac{d\theta}{2}$$

$$(II) \quad dN_s = 2T \sin \frac{d\theta}{2} + dT \sin \frac{d\theta}{2} - \frac{1}{\mu_s} dT \cos \frac{d\theta}{2} - 2T \sin \frac{d\theta}{2} - dT \sin \frac{d\theta}{2} = 0$$

$$\sin \frac{d\theta}{2} = \frac{d\theta}{2} \quad \cos \frac{d\theta}{2} = 1$$

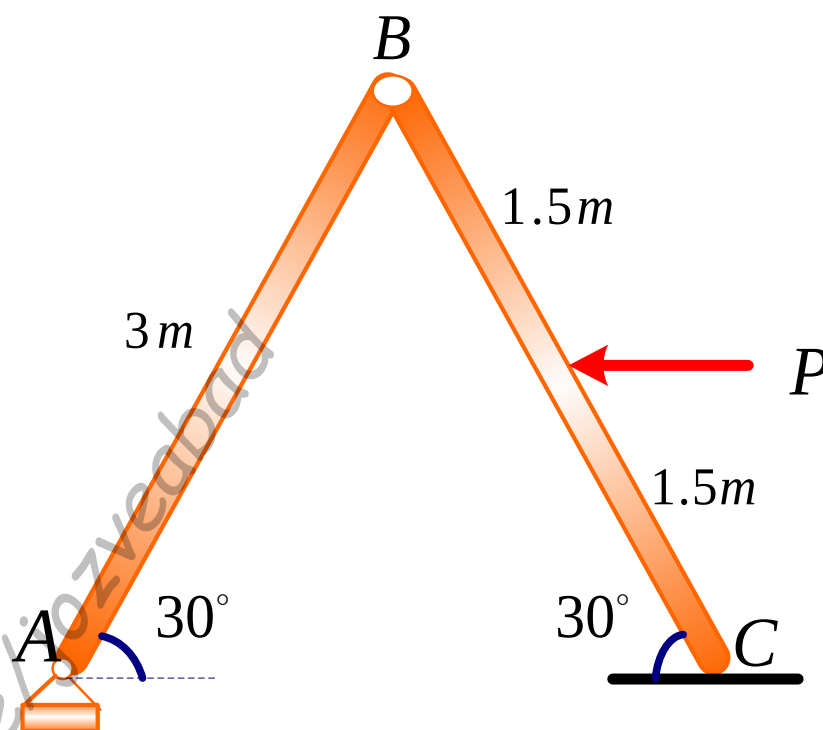
$$\frac{1}{\mu_s} dT - T d\theta = 0 \Rightarrow \quad \frac{1}{\mu_s} dT = T d\theta$$

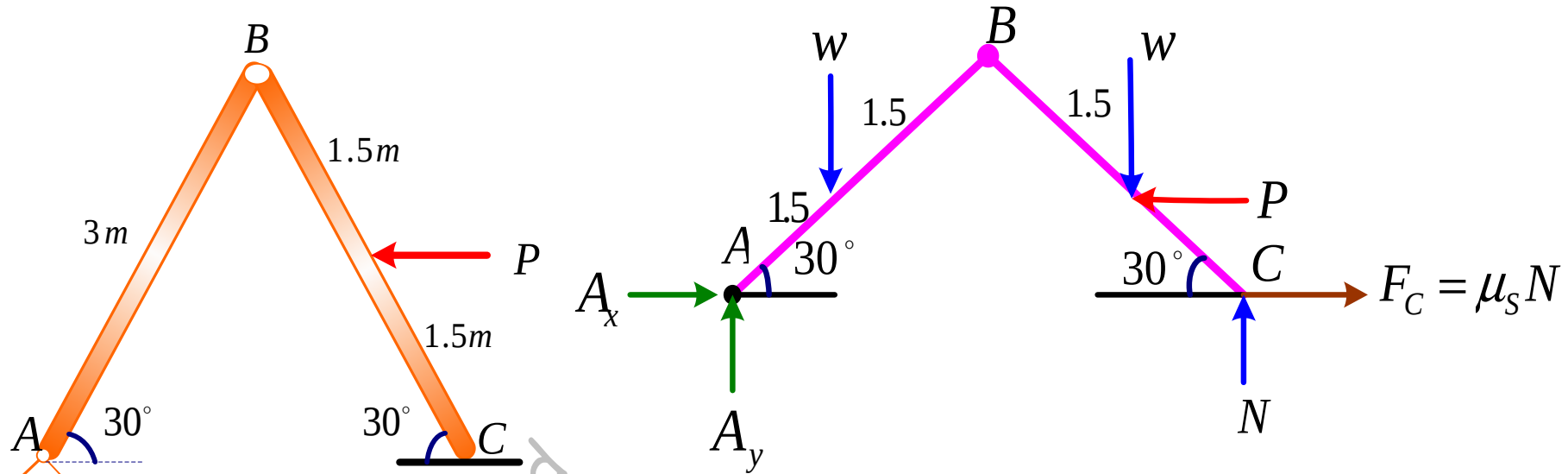
$$\frac{dT}{T} = \mu_s d\theta \xrightarrow{\int} \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = \int_0^\theta \mu_s d\theta \Rightarrow \quad \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \mu_s \theta$$

$$\frac{T_2}{T_1} = e^{\mu_s \theta} \Rightarrow$$

$$T_2 = T_1 e^{\mu_s \theta}$$

مثال: برای دستگاه نشان داده شده در شکل چنانچه جرم میله های AB و BC برابر 100 kg و ضریب اصطکاک استاتیکی بین میله BC در نقطه C و سطح افقی برابر 0.5 باشد حداقل و حداکثر نیروی P را برای آنکه دستگاه در حالت تعادل استاتیکی باقی بماند تعیین کنید؟ $g=9.81\text{m/s}^2$



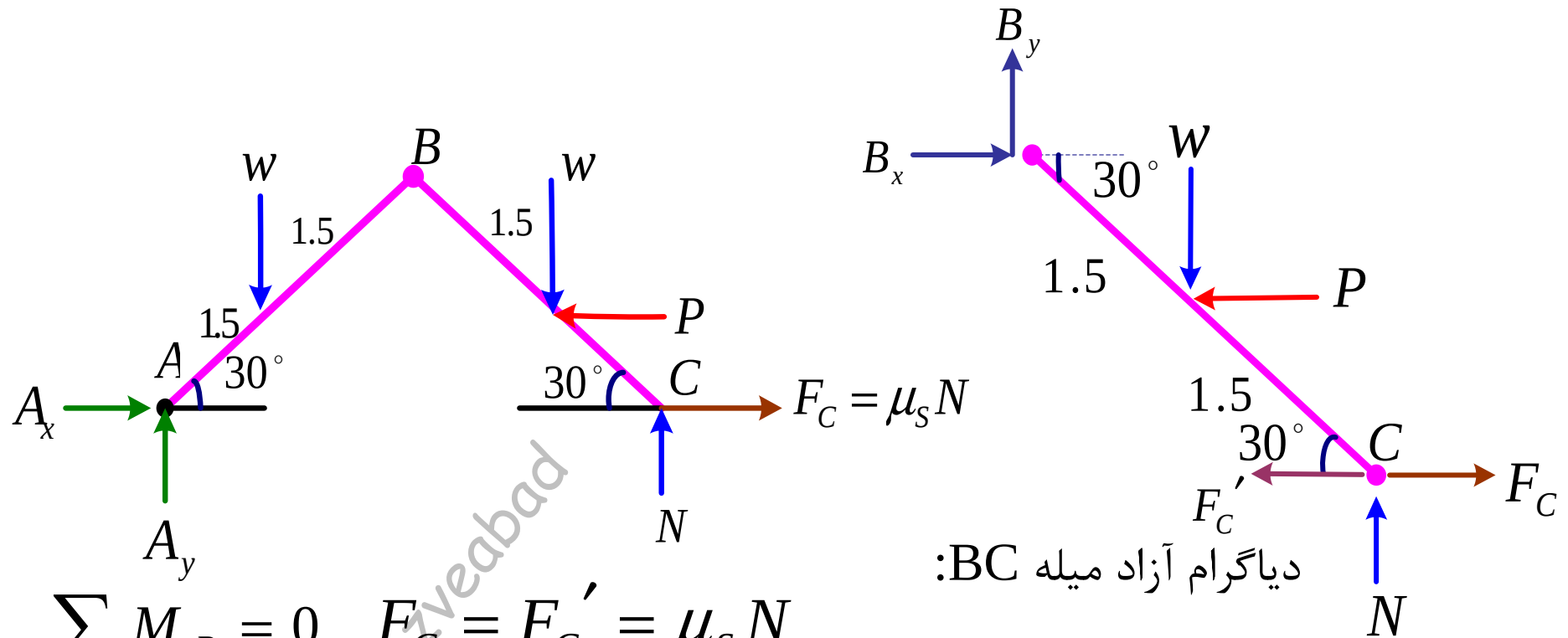


دیاگرام آزاد کل دستگاه

$$\sum M_A = 0$$

$$N(6 \cos 30^\circ) + P(1.5 \sin 30^\circ) - W(4.5 \cos 30^\circ) - W(1.5 \cos 30^\circ) = 0$$

$$3\sqrt{3} N + 0.75 p = 5097.4$$



$$\sum M_B = 0 \quad F_C = F_C' = \mu_s N$$

$$-W(1.5 \cos 30^\circ) - p(1.5 \sin 30^\circ) + N(3 \cos 30^\circ) + F_C(3 \sin 30^\circ) = 0$$

$$-W(1.5 \cos 30^\circ) - p(1.5 \sin 30^\circ) + N(3 \cos 30^\circ) - F_C'(3 \sin 30^\circ) = 0$$

$$2.59N - 0.75p - 1274.35 + 0.75N = 0$$

$$3.34N - 0.75p = 1274.35$$

$$2.59N - 0.75p - 1274.35 - 0.75N = 0$$

$$1.84N - 0.75p = 1274.35$$

$$3\sqrt{3} N + 0.75p = 5097.4$$

با لحاظ کردن F_C

$$3.34N - 0.75p = 1274.35 \rightarrow P = 1633.4N \quad N = 746.11N$$

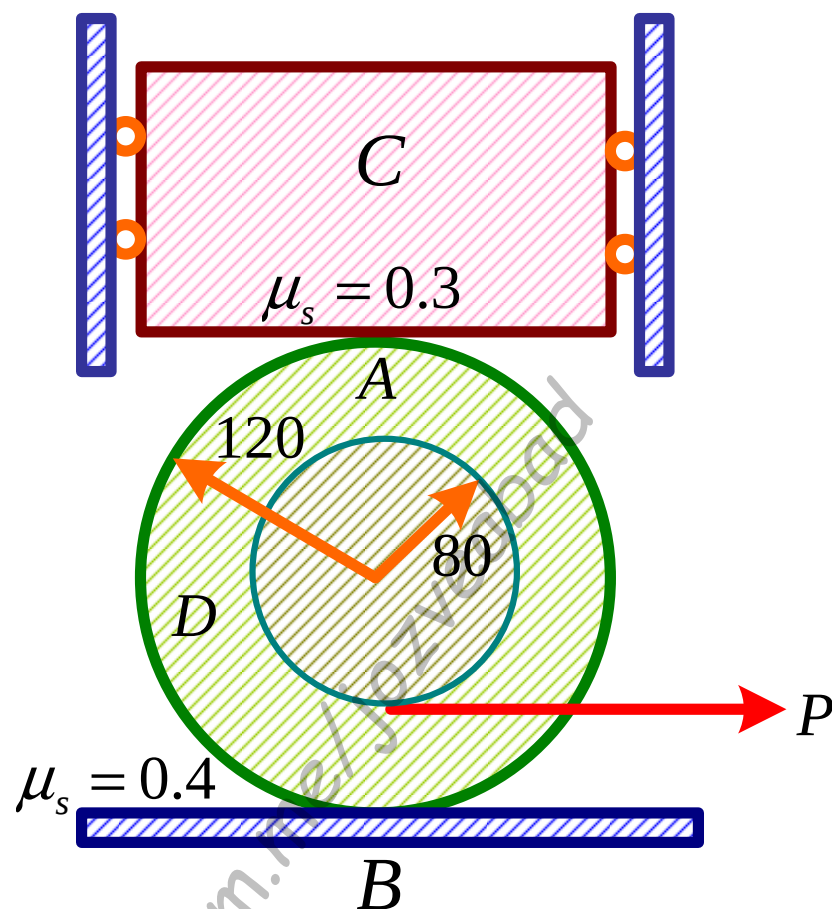
با لحاظ کردن F'_C

$$1.84N - 0.75p = 1274.35 \rightarrow P = 524.5N \quad N = 906.3N$$

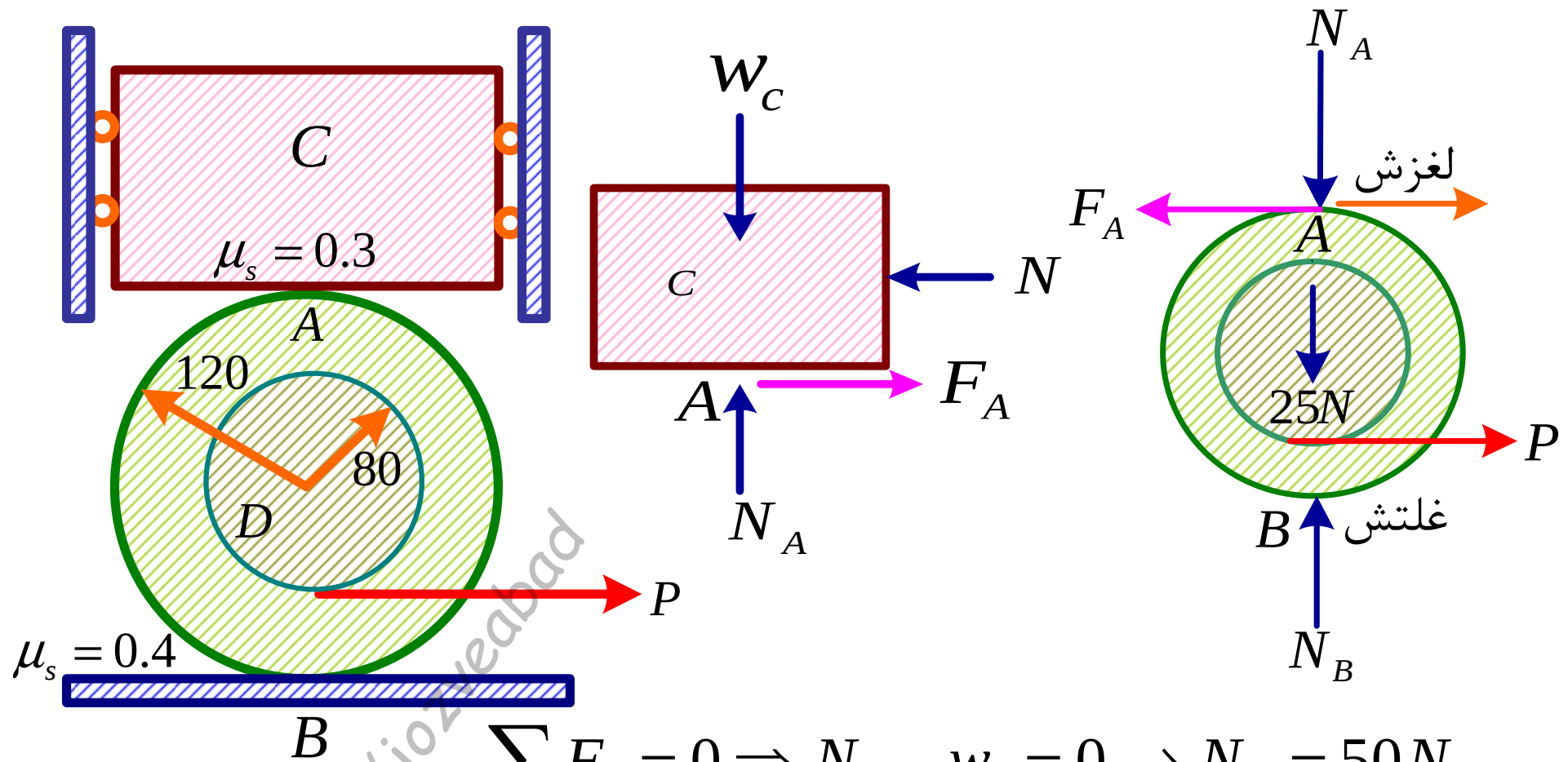
$$P_{\min} = 524.5N$$

$$P_{\max} = 1633.4N$$

مثال: قرقره D مطابق شکل در نقطه A با جعبه C و در نقطه B با سطح افقی در تماس است. چنانچه وزن جعبه برابر 50N و وزن قرقره برابر 25N باشد بیشترین نیروی P را که می توان بدون بر هم زدن تعادل دستگاه وارد کرد تعیین کنید؟



چنانچه قرار باشد تحت تأثیر نیروی P در آستانه حرکت باشد می تواند به صورت لغزش در A و غلتش در B و یا به صورت غلتش در A و لغزش در B باشد.

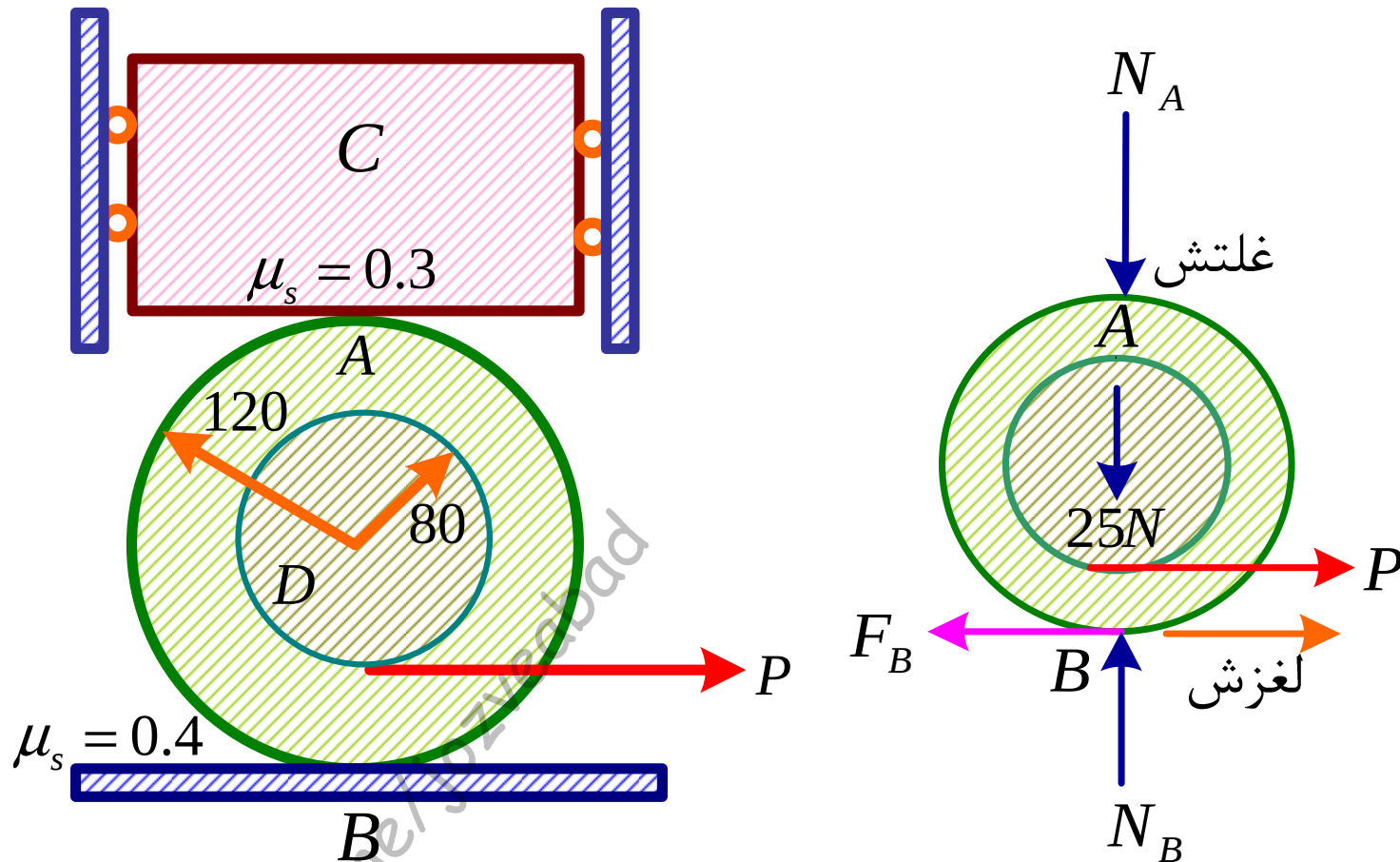


$$\sum F_y = 0 \Rightarrow N_A - W_C = 0 \rightarrow N_A = 50N$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow N_A + 25 - N_B = 0 \rightarrow N_B = 75N$$

$$F_A = \mu_s N_A = 0.3 \times 50 = 15N$$

$$\sum M_B = 0 \Rightarrow P(40) - F_A(240) = 0 \quad P = 6F_A = 6 \times 15 = 90N$$



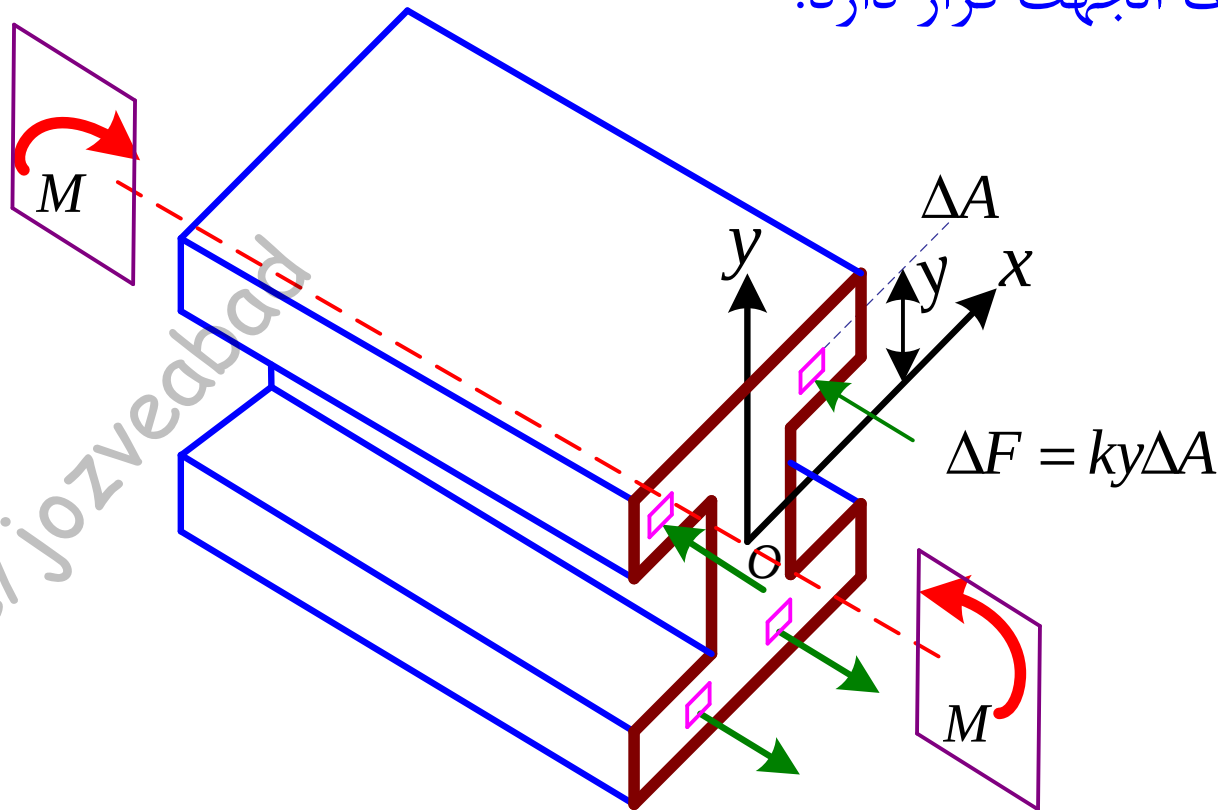
$$F_B = \mu_s N_B = 0.4 \times 75 = 30 N$$

$$\sum M_A = 0 \Rightarrow P(200) - F_B(240) = 0$$

$$P = 1.2 F_B = 1.2(30) = 36 N$$

۹- ممان اینرسی

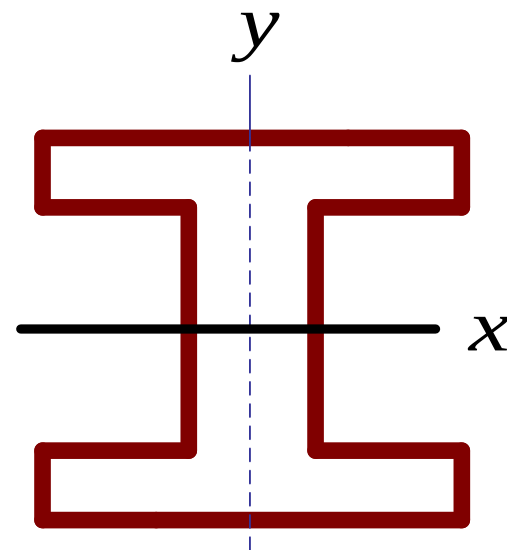
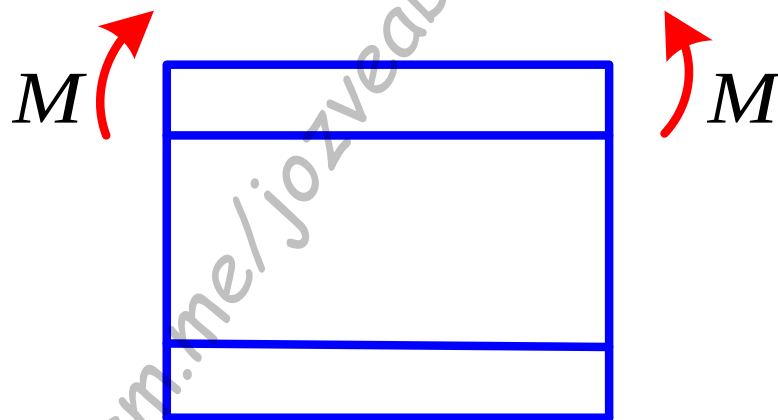
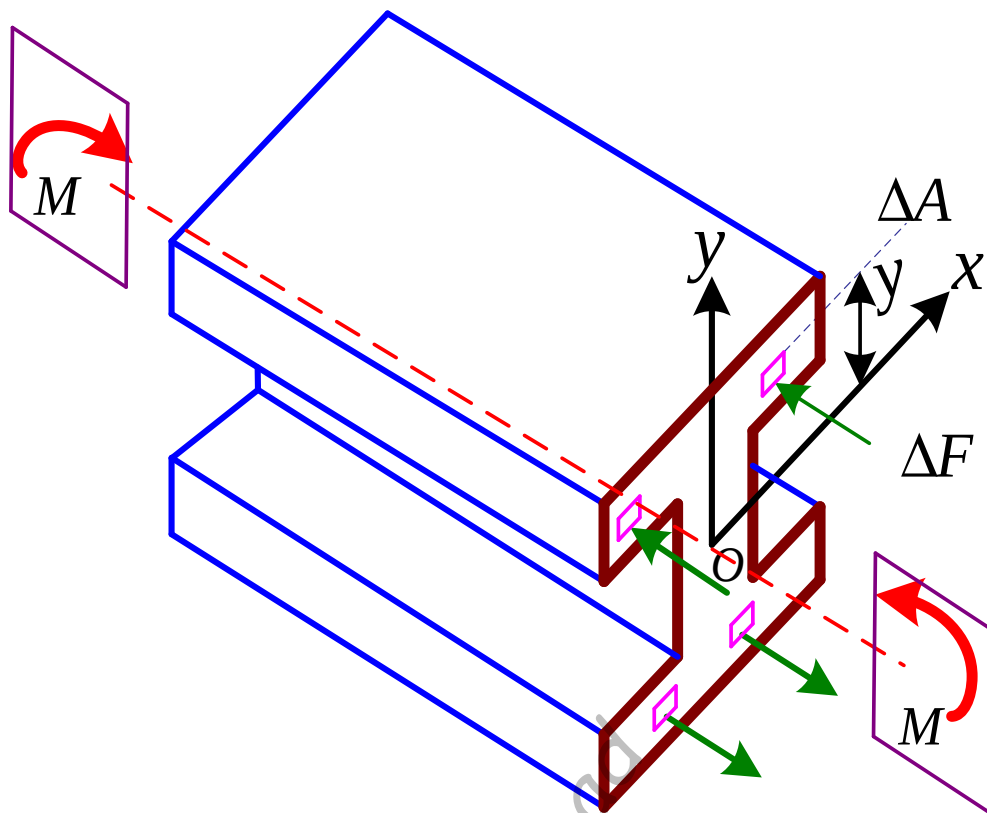
تیری با مقطع I شکل مطابق شکل زیر را در نظر بگیرید که تحت تأثیر دو گشتاور مساوی و مختلف الجهت قرار دارد.

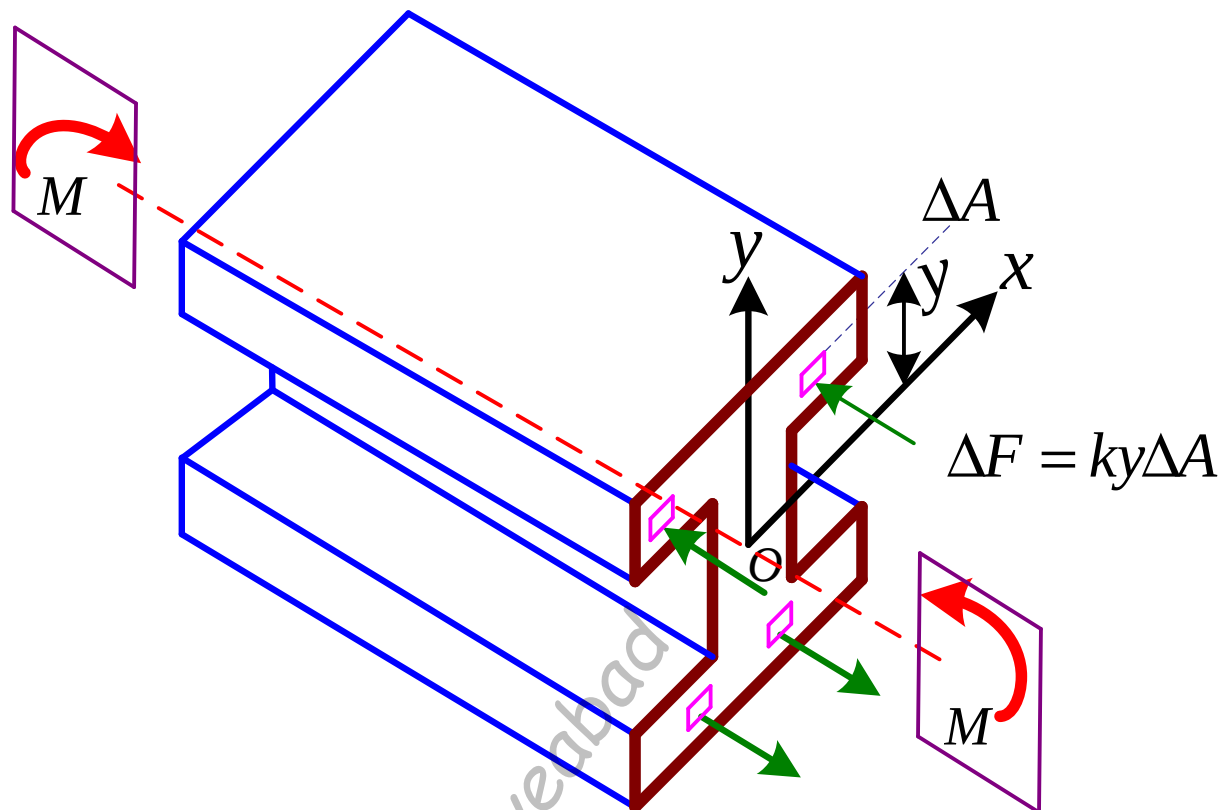


این تیر تحت تأثیر خمش خالص قرار گرفته (pure bending).

محور X مار بر مرکز سطح مقطع است.
 محور X را که مرکز سطح از آن گذشته
 محور خنثی می نامند. در یک طرف
 محور خنثی نیروها به صورت فشاری و در
 طرف دیگر آن به صورت کششی می
 باشند.

$$\Delta F = ky\Delta A$$





بر آیند نیروهای داخلی

$$R = \sum \Delta F$$

$$K \sum y \Delta A = k \int y dA$$

$$\bar{y} = \frac{\int y dA}{A} = 0$$

$$R = K \int y dA = 0$$

گشتاور نیروها

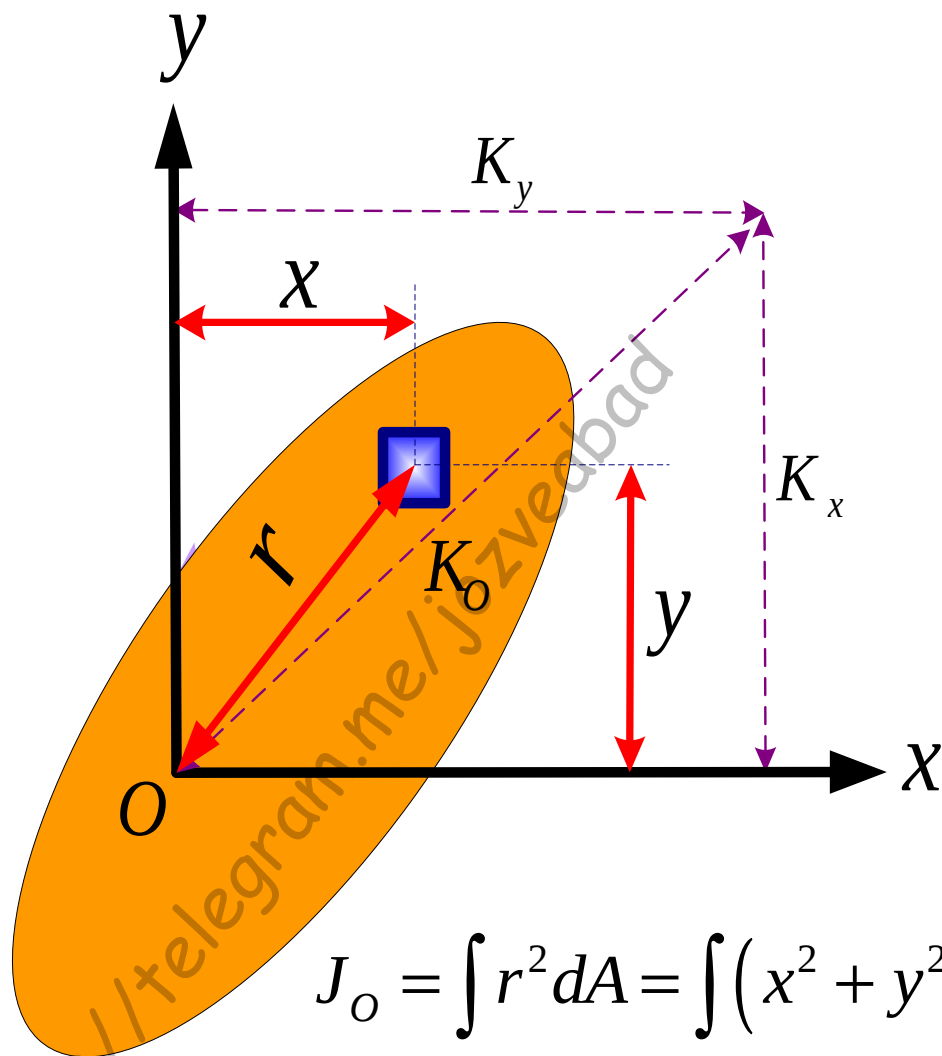
$$\Delta M = y \Delta F = K y^2 \Delta A$$

$$M = K \sum y^2 \Delta A = K \int y^2 dA$$

$$I = \int y^2 dA$$

ممان اینرسی سطح یا گشتاور دوم سطح حول محور x

ممان اینرسی سطح، ممان اینرسی قطبی و شعاع ژیراسیون (چرخش)



$$I_x = \int y^2 dA$$

I_x ممان اینرسی سطح حول x

$$I_y = \int x^2 dA$$

I_y ممان اینرسی سطح حول y

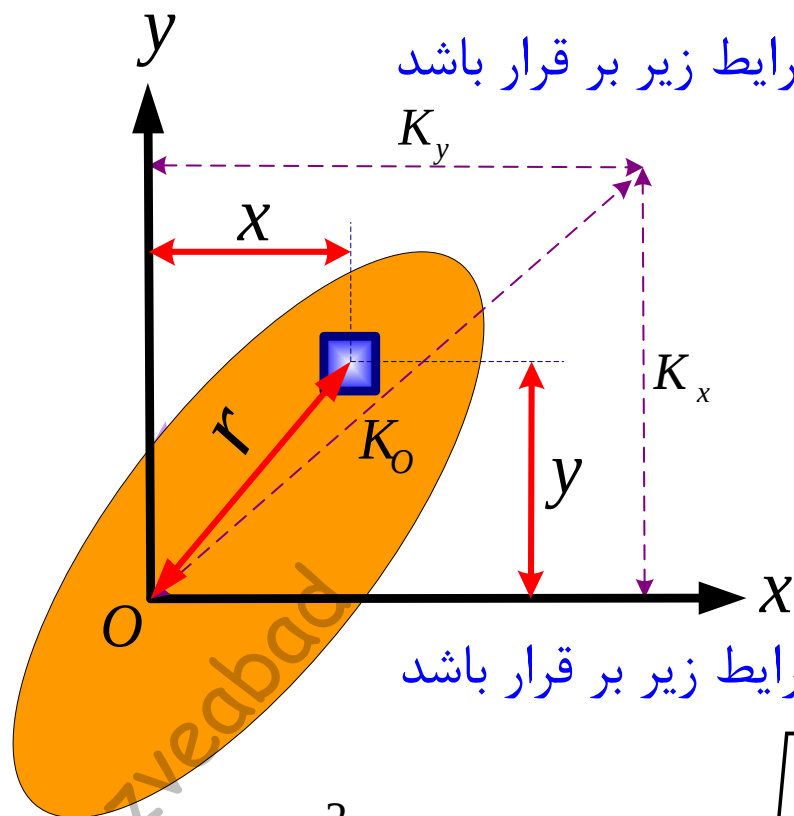
$$J_O = \int r^2 dA$$

J_O ممان اینرسی قطبی

$$r^2 = x^2 + y^2$$

$$J_O = \int r^2 dA = \int (x^2 + y^2) dA = \int y^2 dA + \int x^2 dA = I_x + I_y$$

$$J_O = I_x + I_y$$



فاصله ای را از محور x طوری انتخاب میکنیم که شرایط زیر برقرار باشد

$$AK_x^2 = I_x \rightarrow K_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}}$$

شعاع ژیراسیون سطح حول محور x

فاصله ای را از محور y طوری انتخاب میکنیم که شرایط زیر برقرار باشد

$$AK_y^2 = I_y \rightarrow K_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$$

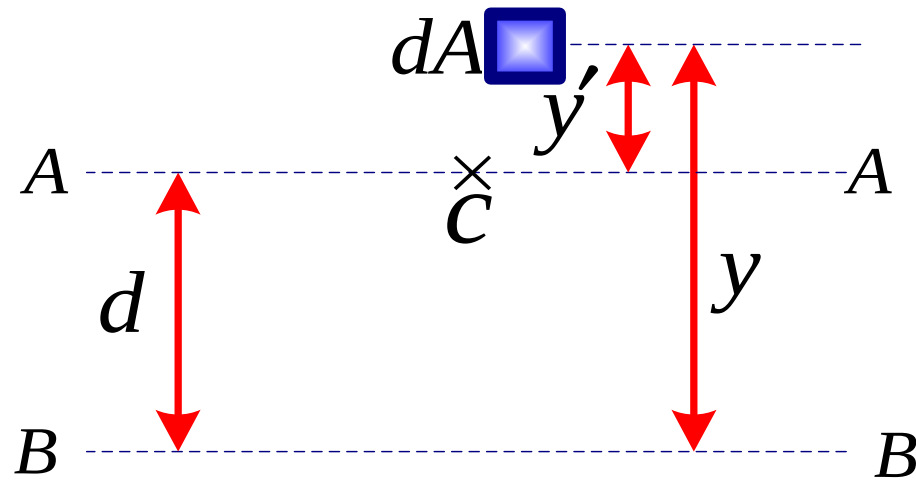
شعاع ژیراسیون سطح حول محور y

فاصله ای را از O طوری انتخاب میکنیم که شرایط زیر برقرار باشد

$$AK_O^2 = J_O \rightarrow K_O = \sqrt{\frac{J_O}{A}}$$

شعاع ژیراسیون قطبی

$$K_O^2 = K_x^2 + K_y^2$$



قضیه انتقال محوره‌های موازی

C: مرکز سطح

محور AA: مار بر مرکز سطح

محور BB: موازی محور AA

$$I_{BB} = \int y^2 dA = \int (y' + d)^2 dA = \int y'^2 dA + 2d \int y' dA + d^2 \int dA$$

$$\bar{y} = \frac{\int y' dA}{A} = 0 \rightarrow \int y' dA = 0$$

$$I_{BB} = I_{AA} + Ad^2$$

قضیه انتقال محوره‌های موازی

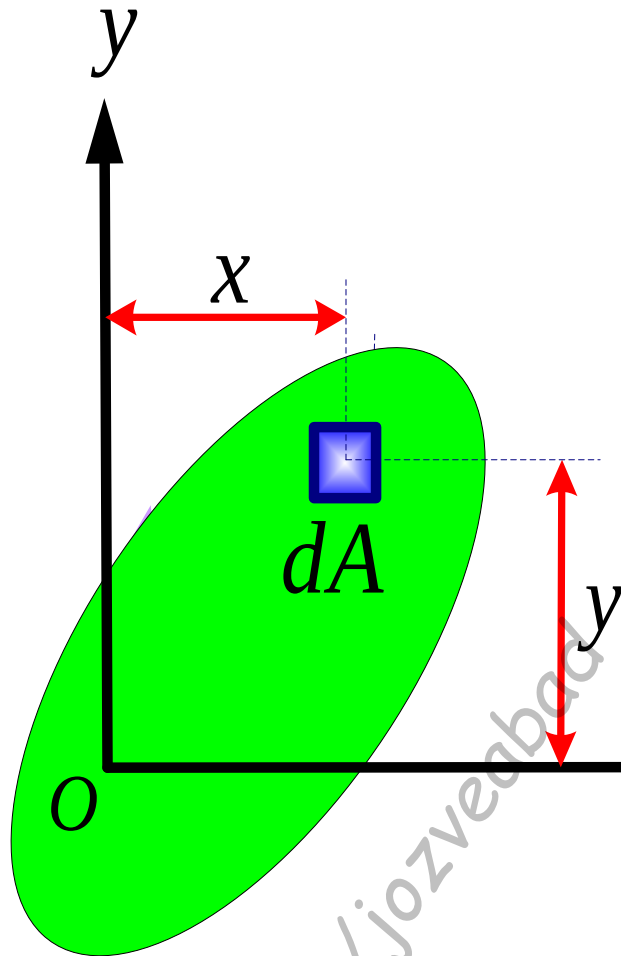
I_{AA} : ممان اینرسی نسبت به محور مار بر مرکز سطح

حاصل ضرب اینرسی

$$I_{xy} = \int xy dA$$

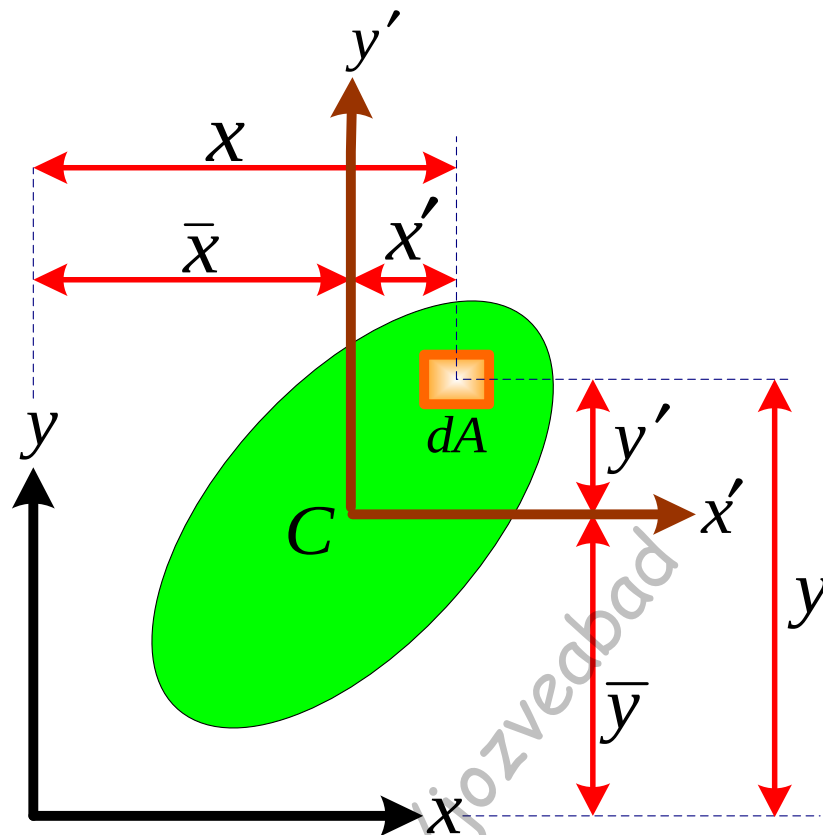
حاصل ضرب اینرسی سطح نسبت به محورهای y, x

حاصل ضرب اینرسی می تواند مثبت یا منفی باشد



قضیه انتقال برای حاصلضرب اینرسی

C مرکز سطح است



$$I_{xy} = \int xy dA = \int (\bar{x} + x')(\bar{y} + y') dA$$

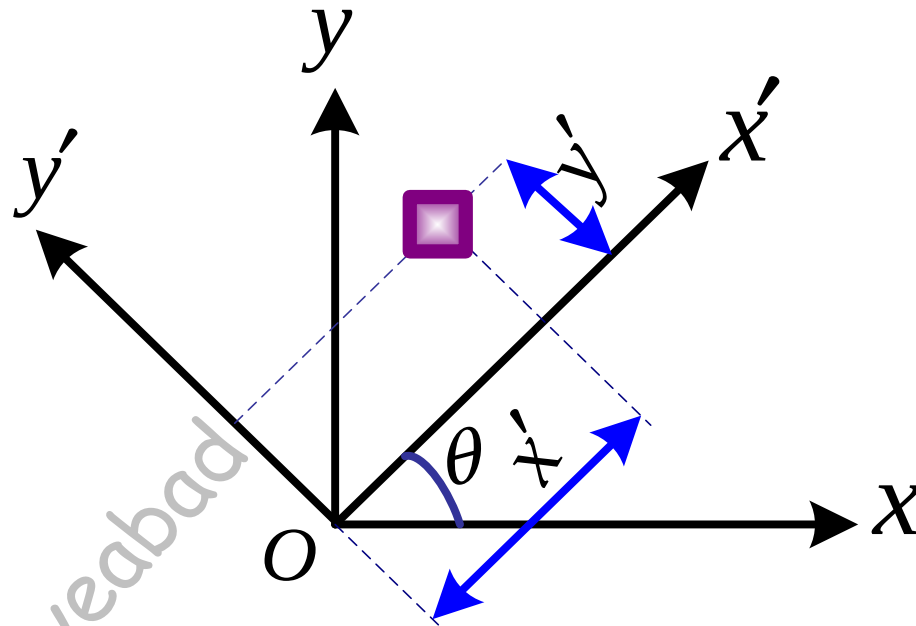
$$= \bar{x}\bar{y} \int dA + \bar{x} \int y' dA + \bar{y} \int x' dA + \int x'y' dA$$

$$I_{xy} = I_{x'y'} + \bar{x}\bar{y}A$$



حاصل ضرب اینرسی سطح نسبت به
دستگاه مختصات با مرکز منطبق بر
مرکز سطح

دوران محورهای مختصات



$$x' = x \cos \theta + y \sin \theta$$

$$y' = y \cos \theta - x \sin \theta$$

$$I_{x'} = \int y'^2 dA = \int (y \cos \theta - x \sin \theta)^2 dA$$

$$= \cos^2 \theta \int y^2 dA - 2 \sin \theta \cos \theta \int xy dA + \sin^2 \theta \int x^2 dA$$

$$I_{x'} = I_x \cos^2 \theta - 2 \sin \theta \cos \theta I_{xy} + I_y \sin^2 \theta$$

$$I_{x'} = I_x \cos^2 \theta - 2 \sin \theta \cos \theta I_{xy} + I_y \sin^2 \theta$$

$$\cos^2 \theta = \frac{1 + \cos 2\theta}{2} \quad \sin^2 \theta = \frac{1 - \cos 2\theta}{2}$$

$$I_{x'} = \frac{I_x + I_y}{2} + \frac{I_x - I_y}{2} \cos 2\theta - I_{xy} \sin 2\theta$$

$$I_{y'} = \int x'^2 dA = \int (x \cos \theta + y \sin \theta)^2 dA$$

$$= \cos^2 \theta \int x^2 dA + 2 \sin \theta \cos \theta \int xy dA + \sin^2 \theta \int y^2 dA$$

$$= I_y \cos^2 \theta + 2 \sin \theta \cos \theta I_{xy} + I_x \sin^2 \theta$$

$$I_{y'} = I_y \cos^2 \theta + 2 \sin \theta \cos \theta I_{xy} + I_x \sin^2 \theta$$

$$I_{y'} = \frac{I_x + I_y}{2} - \frac{I_x - I_y}{2} \cos 2\theta + I_{xy} \sin 2\theta$$

$$\begin{aligned} I_{x'y'} &= \int x'y'dA = \int (x \cos \theta + y \sin \theta)(y \cos \theta - x \sin \theta) dA \\ &= \cos^2 \theta \int xy dA - \sin \theta \cos \theta \int x^2 dA \\ &\quad + \sin \theta \cos \theta \int y^2 dA - \sin^2 \theta \int xy dA \end{aligned}$$

$$I_{x'y'} = I_{xy} \cos 2\theta + \frac{I_x - I_y}{2} \sin 2\theta$$

$$I_{x'} = \frac{I_x + I_y}{2} + \frac{I_x - I_y}{2} \cos 2\theta - I_{xy} \sin 2\theta$$

$$I_{y'} = \frac{I_x + I_y}{2} - \frac{I_x - I_y}{2} \cos 2\theta + I_{xy} \sin 2\theta$$

$$I_{x'y'} = I_{xy} \cos 2\theta + \frac{I_x - I_y}{2} \sin 2\theta$$

$$I_{x'} + I_{y'} = I_x + I_y$$

مجموع ممان اینرسی ها در دستگاه قدیم
برابر است با مجموع ممان اینرسی ها در
دستگاه جدید

$$I_{x'} = \frac{I_x + I_y}{2} + \frac{I_x - I_y}{2} \cos 2\theta - I_{xy} \sin 2\theta$$

$$I_{x'y'} = I_{xy} \cos 2\theta + \frac{I_x - I_y}{2} \sin 2\theta$$

$$\begin{cases} I_{x'} - \frac{I_x + I_y}{2} = \frac{I_x - I_y}{2} \cos 2\theta - I_{xy} \sin 2\theta \\ I_{x'y'} = \frac{I_x - I_y}{2} \sin 2\theta + I_{xy} \cos 2\theta \end{cases}$$

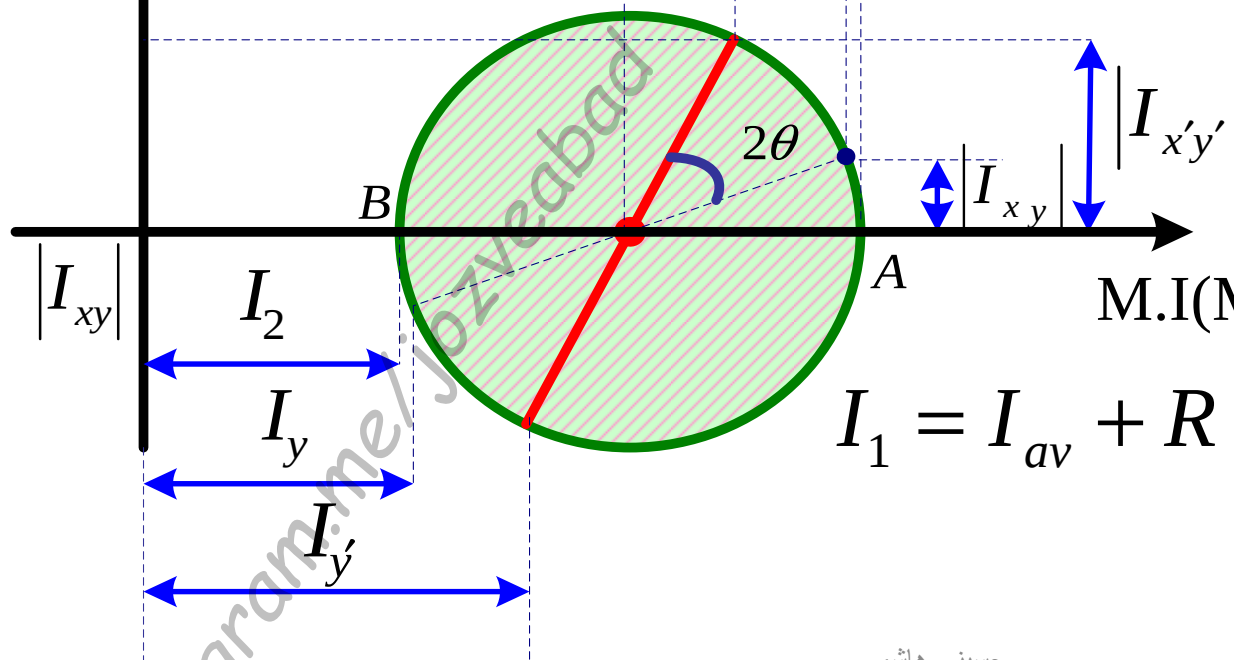
$$\left(I_{x'} - \frac{I_x + I_y}{2} \right)^2 + I_{x'y'}^2 = \left[\left(\frac{I_x - I_y}{2} \right)^2 + I_{xy}^2 \right]$$

P.I(Product Inertia)

$$I_{av} = \frac{I_x + I_y}{2} \quad R = \left[\left(\frac{I_x - I_y}{2} \right)^2 + I_{xy}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$(I_{x'} - I_{av})^2 + I_{x'y'}^2 = R^2$$

معادله دایره موهر
(Mohr)



M.I(Moment of Inertia)

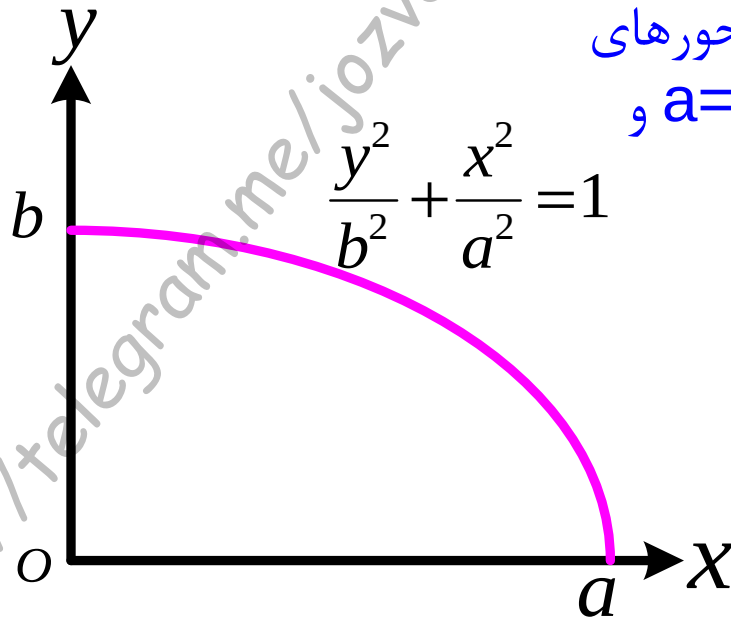
$$I_1 = I_{av} + R \quad I_2 = I_{av} - R$$

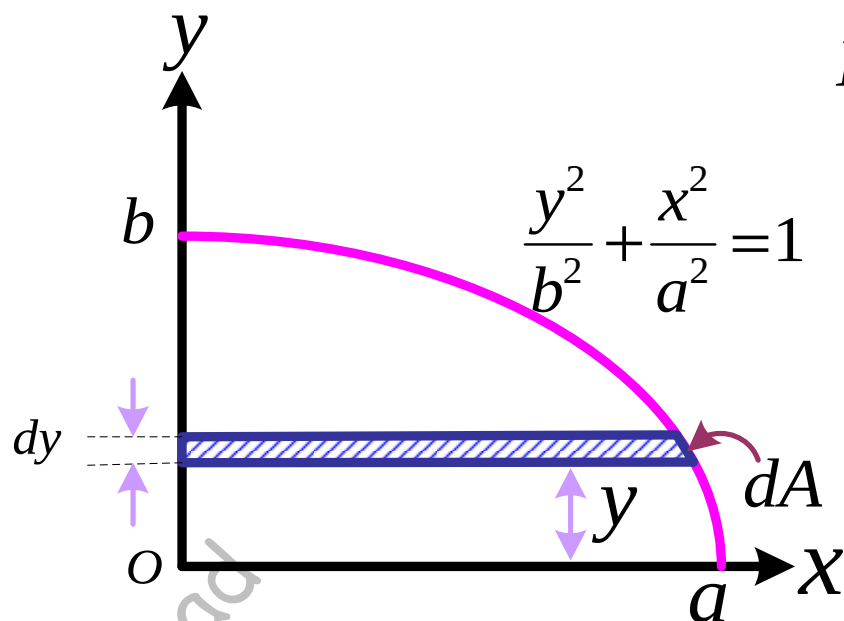
اگر $I_{xy} > 0$ باشد مقدار I_x در بالای محور افقی و مقدار I_y در پایین محور افقی نمایش داده می شود.

اگر $I_{xy} < 0$ باشد مقدار I_x در پایین محور افقی و مقدار I_y در بالای محور افقی نمایش داده می شود.

مثال: برای سطح نشان داده شده در شکل مطلوب است:

- ۱- گشتاورهای اینرسی حول محوره‌های X و Y.
- ۲- حاصل ضرب‌های اینرسی نسبت به محوره‌های X و Y.
- ۳- ممان اینرسی قطبی و شعاع‌های ژیراسیون حول محوره‌های X و Y و نقطه O.
- ۴- گشتاورهای اینرسی حول محوره‌های ماربر مرکز سطح که به موازات محوره‌های X و Y می‌باشند.
- ۵- حاصل ضرب اینرسی نسبت به محوره‌های ماربر مرکز سطح.
- ۶- تعیین گشتاورهای اینرسی نسبت به محوره‌های ماربر مرکز سطح. (در صورتیکه $a=20\text{mm}$ و $b=10\text{mm}$ باشد)





$$I_x = \int y^2 dA$$

$$dA = x dy = a \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} dy$$

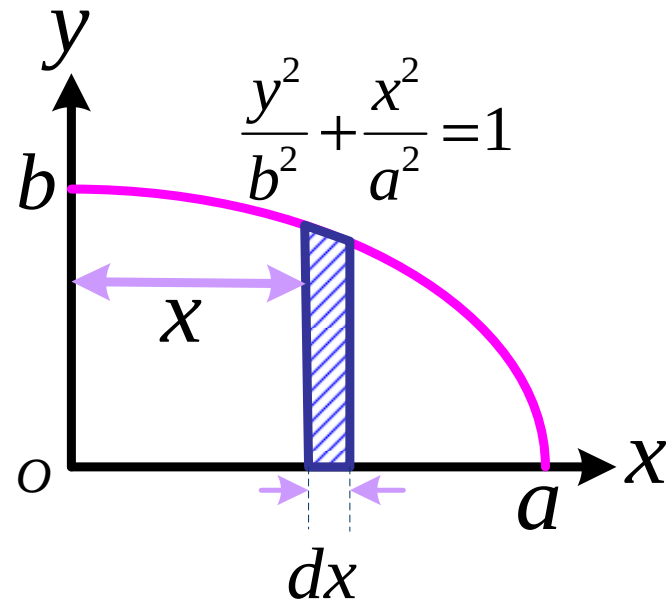
$$I_x = a \int_0^b y^2 \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} dy$$

$$\frac{y}{b} = \sin \alpha \rightarrow \frac{dy}{b} = \cos \alpha d\alpha$$

$$I_x = ab^3 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha d\alpha = ab^3 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{4} \sin^2 2\alpha d\alpha$$

$$= \frac{ab^3}{8} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 - \cos 4\alpha) d\alpha = \frac{ab^3}{8} \left[\alpha - \frac{1}{4} \sin 4\alpha \right]_0^{\frac{\pi}{2}} = \frac{\pi ab^3}{16}$$

$$I_x = \frac{\pi ab^3}{16}$$



$$I_y = \int x^2 dA$$

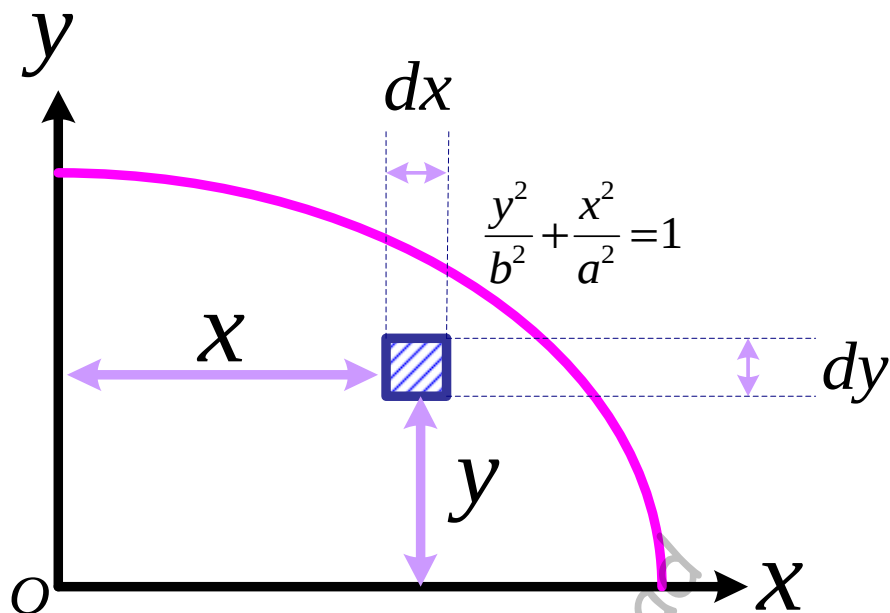
$$dA = ydx = b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}dx$$

$$I_y = b \int_0^a x^2 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} dx$$

$$\frac{x}{a} = \sin \alpha \Rightarrow \frac{dx}{a} = \cos \alpha d\alpha$$

$$I_y = ba^3 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha d\alpha = \frac{ba^3}{4} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 2\alpha d\alpha = \frac{\pi ba^3}{16}$$

$$I_y = \frac{\pi ba^3}{16}$$



$$I_{xy} = \int xy dA$$

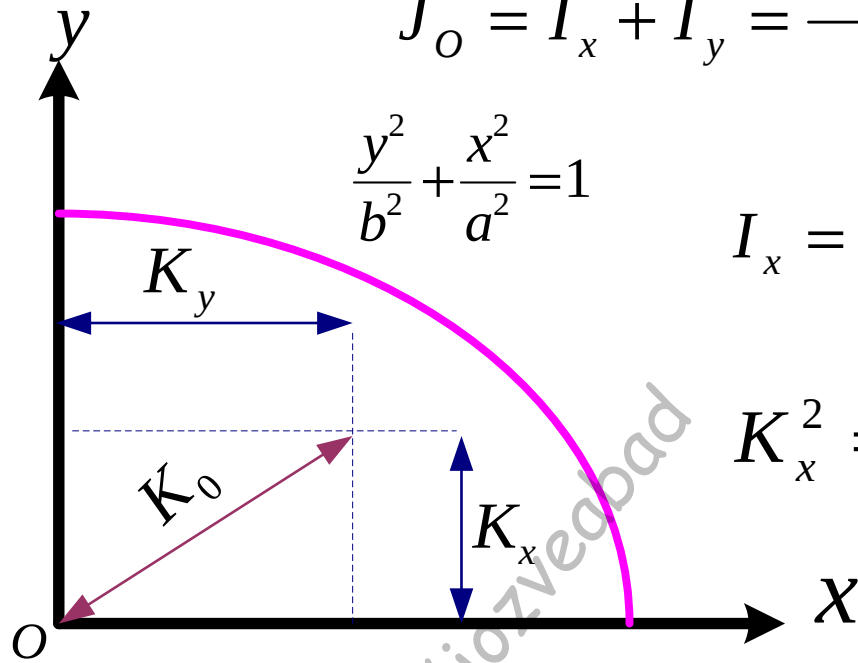
$$dA = dx dy$$

$$I_{xy} = \iint xy dx dy = \int_0^a x dx \int_0^{b\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}} y dy$$

$$\frac{1}{2} \int_0^a x dx \left[y^2 \right]_0^{b\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}} = \frac{b^2}{2} \int_0^a x \left(1 - \frac{x^2}{a^2} \right) dx$$

$$= \frac{b^2}{2} \left[\frac{1}{2} x^2 - \frac{1}{4} \frac{x^4}{a^2} \right]_0^a = \frac{a^2 b^2}{8}$$

$$I_{xy} = \frac{a^2 b^2}{8}$$



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

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

$$\frac{y^2}{b^2} + \frac{x^2}{a^2} = 1$$

$$I_x = AK_x^2 \quad A = \frac{\pi ab}{4} \Rightarrow \frac{\pi ab}{4} K_x^2 = \frac{\pi ab^3}{16}$$

$$K_x^2 = \frac{b^2}{4} \Rightarrow K_x = \frac{b}{2}$$

$$K_x = \frac{b}{2}$$

شعاع ژیراسیون حول x

$$I_y = AK_y^2 \quad \frac{\pi ab}{4} K_y^2 = \frac{\pi ba^3}{16}$$

$$K_y = \frac{a}{2}$$

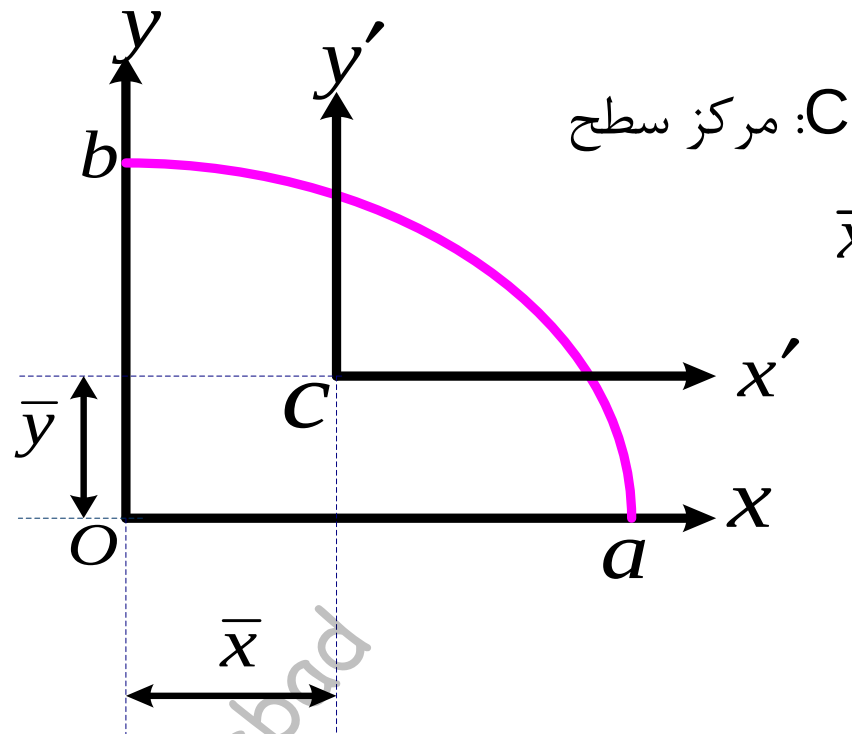
شعاع ژیراسیون حول y

$$AK_O^2 = J_O$$

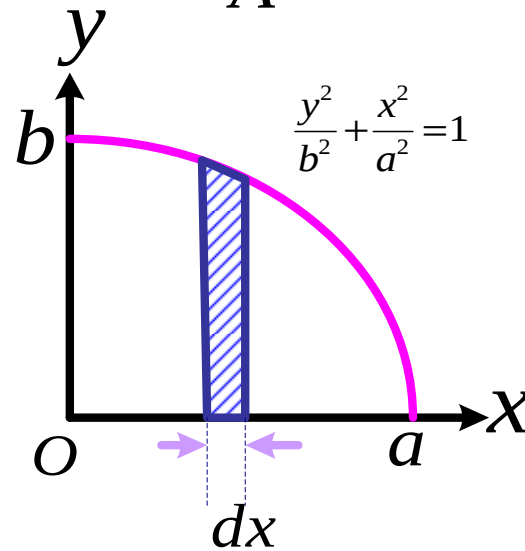
$$\frac{\pi ab}{4} K_O^2 = \frac{\pi ab(a^2 + b^2)}{16}$$

$$K_O = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2}$$

شعاع ژیراسیون قطبی



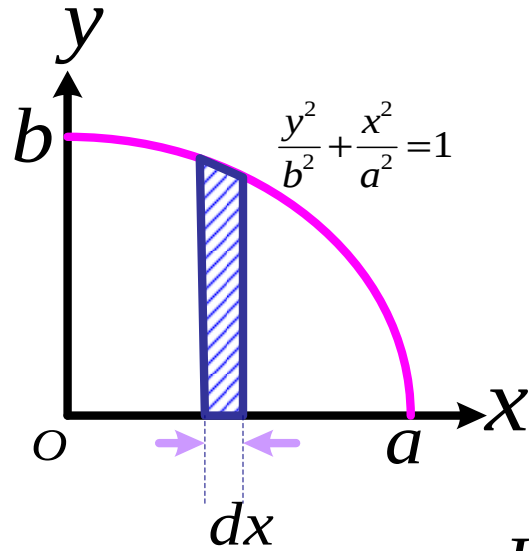
$$\bar{x} = \frac{\int \bar{x}_{el} dA}{A}, \quad \bar{y} = \frac{\int \bar{y}_{el} dA}{A}$$



$$dA = y dx$$

$$\int \bar{y}_{el} dA = \frac{1}{2} \int y^2 dx = \frac{b^2}{2} \int_0^a \left(1 - \frac{x^2}{a^2} \right) dx = \frac{ab^2}{3}$$

$$\bar{y} = \frac{ab^2 / 3}{ab \pi / 4} = \frac{4b}{3\pi}$$

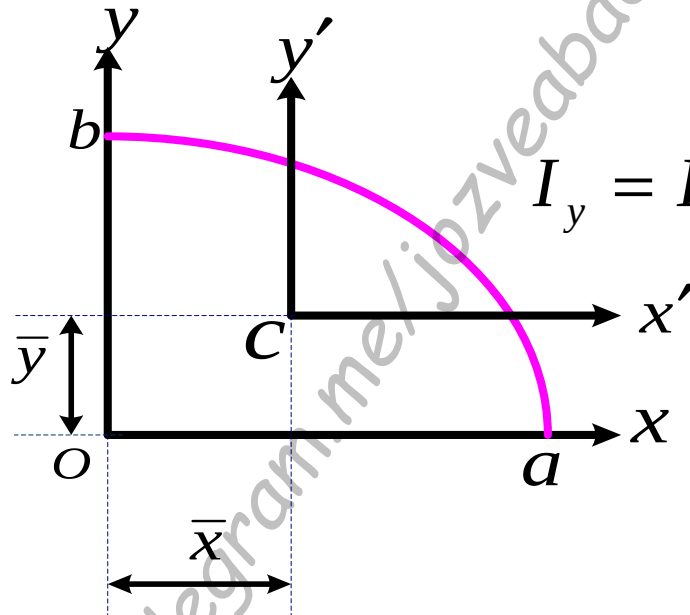


$$\int \bar{x}_{el} dA = \int xy dx = b \int_0^a x \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} dx = \frac{ba^2}{3}$$

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

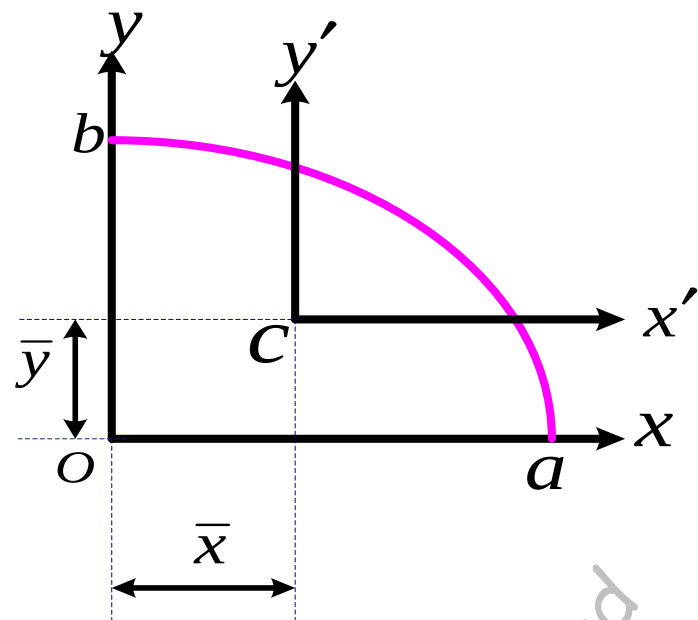
$$I_x = I_{x'} + A\bar{y}^2 \Rightarrow \frac{\pi ab^3}{16} = I_{x'} + \frac{\pi ab}{4} \left(\frac{16b^2}{9\pi^2} \right)$$

$$I_{x'} = \left(\frac{1}{16} - \frac{4}{9\pi^2} \right) \pi ab^3$$



$$I_y = I_{y'} + A\bar{x}^2 \Rightarrow \frac{\pi ba^3}{16} = I_{y'} + \frac{\pi ab}{4} \left(\frac{16a^2}{9\pi^2} \right)$$

$$I_{y'} = \left(\frac{1}{16} - \frac{4}{9\pi^2} \right) \pi ba^3$$



$$I_{xy} = I_{x'y'} + \bar{x}\bar{y}A$$

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

$$\frac{a^2b^2}{8} = I_{x'y'} + \frac{16ab}{9\pi^2} \times \frac{\pi ab}{4}$$

$$I_{x'y'} = \left(\frac{1}{8} - \frac{4}{9\pi} \right) a^2b^2$$

$$I_{x'} = \left(\frac{1}{16} - \frac{4}{9\pi^2} \right) \pi a b^3$$

$$I_{y'} = \left(\frac{1}{16} - \frac{4}{9\pi^2} \right) \pi b a^3$$

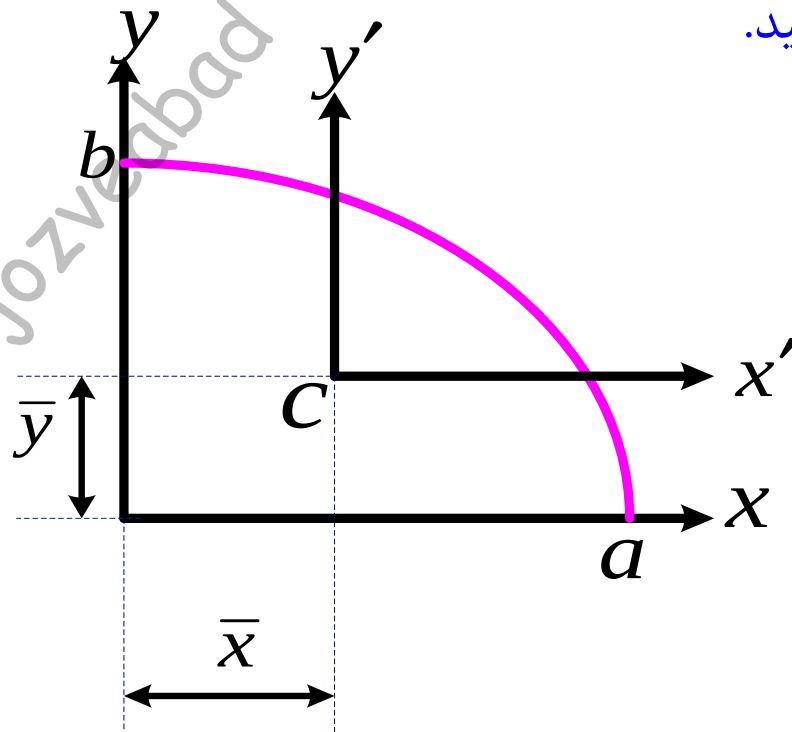
$$I_{x'y'} = \left(\frac{1}{8} - \frac{4}{9\pi} \right) a^2 b^2$$

$$a = 20 \text{ mm} \quad b = 10 \text{ mm}$$

$$I_{x'} = 1097.6 \text{ mm}^4 \quad I_{y'} = 4390.4 \text{ mm}^4 \quad I_{x'y'} = -658.8 \text{ mm}^4$$

مثال: برای ربع بیضی مثال قبل مطلوبست :

- (1) رسم دایره موهر و نمایش $I_{x'}, I_{y'}, I_{x'y'}$ بر روی آن.
- (2) گشتاورهای اصلی اینرسی و راستاهای اصلی آن ها.
- (3) چنانچه دستگاه مختصات UV از دوران دستگاه مختصات $x'y'$ به اندازه θ حاصل گردد زاویه θ را به طریقی تعیین کنید که $I_{UV} = 0$ باشد و سپس I_U, I_V را بیابید.

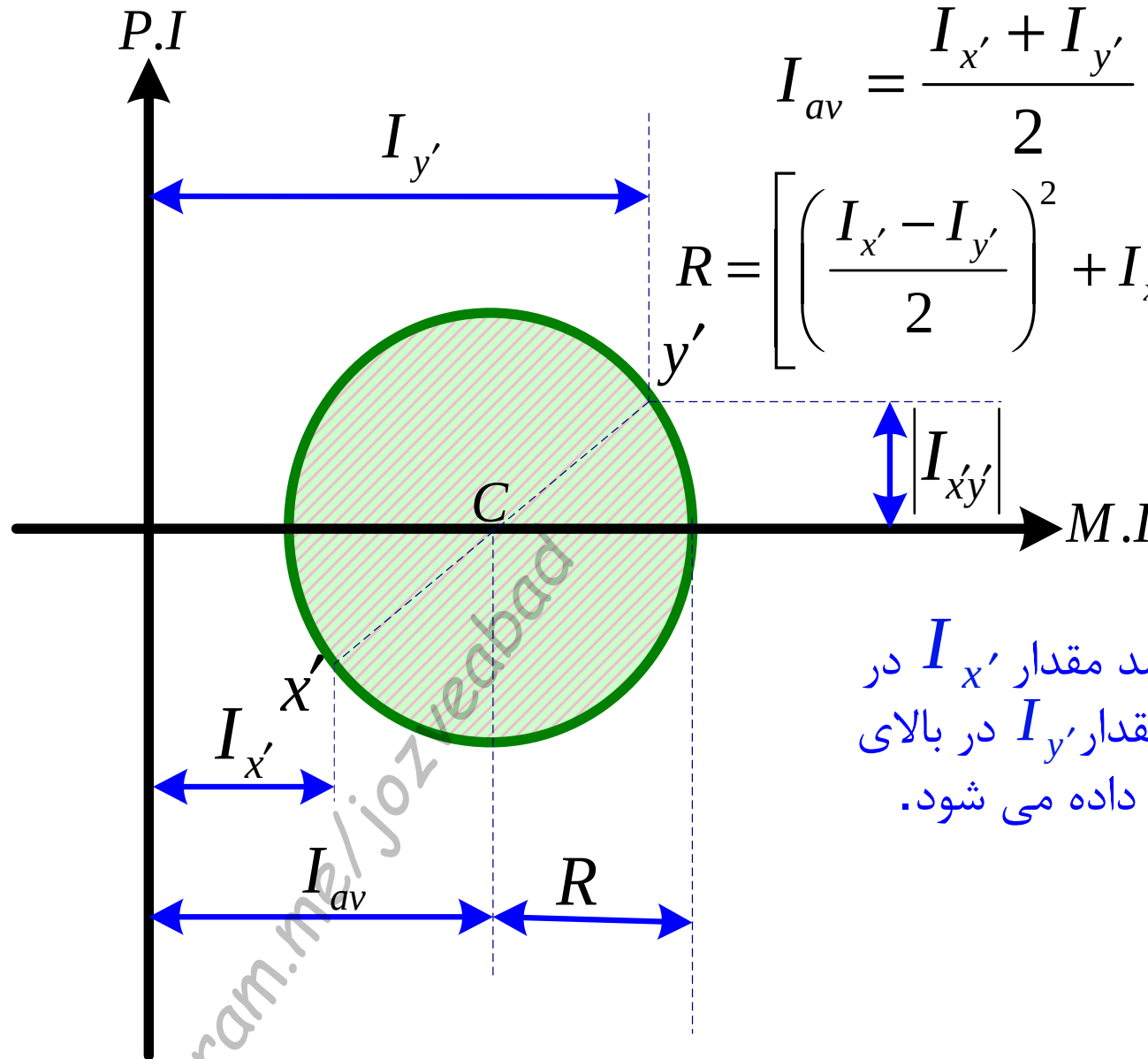


$$\begin{cases} I_{x'} = 1097.6 \text{ mm}^4 \\ I_{y'} = 4390.4 \text{ mm}^4 \\ I_{x'y'} = -658.8 \text{ mm}^4 \end{cases}$$

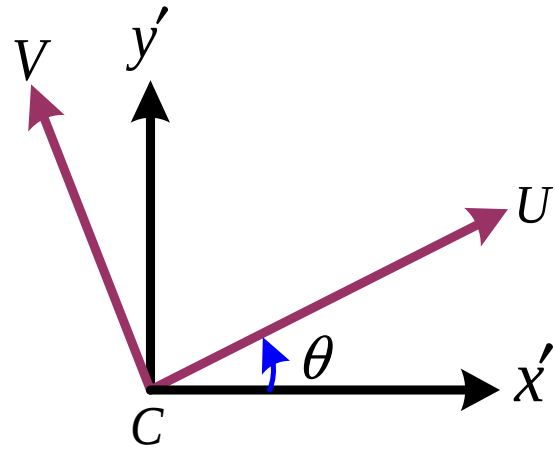
$$I_{x'} = 1097.6 \text{ mm}^4 \quad I_{y'} = 4390.4 \text{ mm}^4 \quad I_{x'y'} = -658.8 \text{ mm}^4$$

$$I_{av} = \frac{I_{x'} + I_{y'}}{2} = 2744 \text{ mm}^4$$

$$R = \left[\left(\frac{I_{x'} - I_{y'}}{2} \right)^2 + I_{x'y'}^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 1773.32 \text{ mm}$$



اگر $I_{x'y'} < 0$ باشد مقدار $I_{x'}$ در پایین محور افقی و مقدار $I_{y'}$ در بالای محور افقی نمایش داده می شود.



$$I_U = \frac{I_{x'} + I_{y'}}{2} + \frac{I_{x'} - I_{y'}}{2} \cos 2\theta - I_{x'y'} \sin 2\theta$$

$$I_V = \frac{I_{x'} + I_{y'}}{2} - \frac{I_{x'} - I_{y'}}{2} \cos 2\theta - I_{x'y'} \sin 2\theta$$

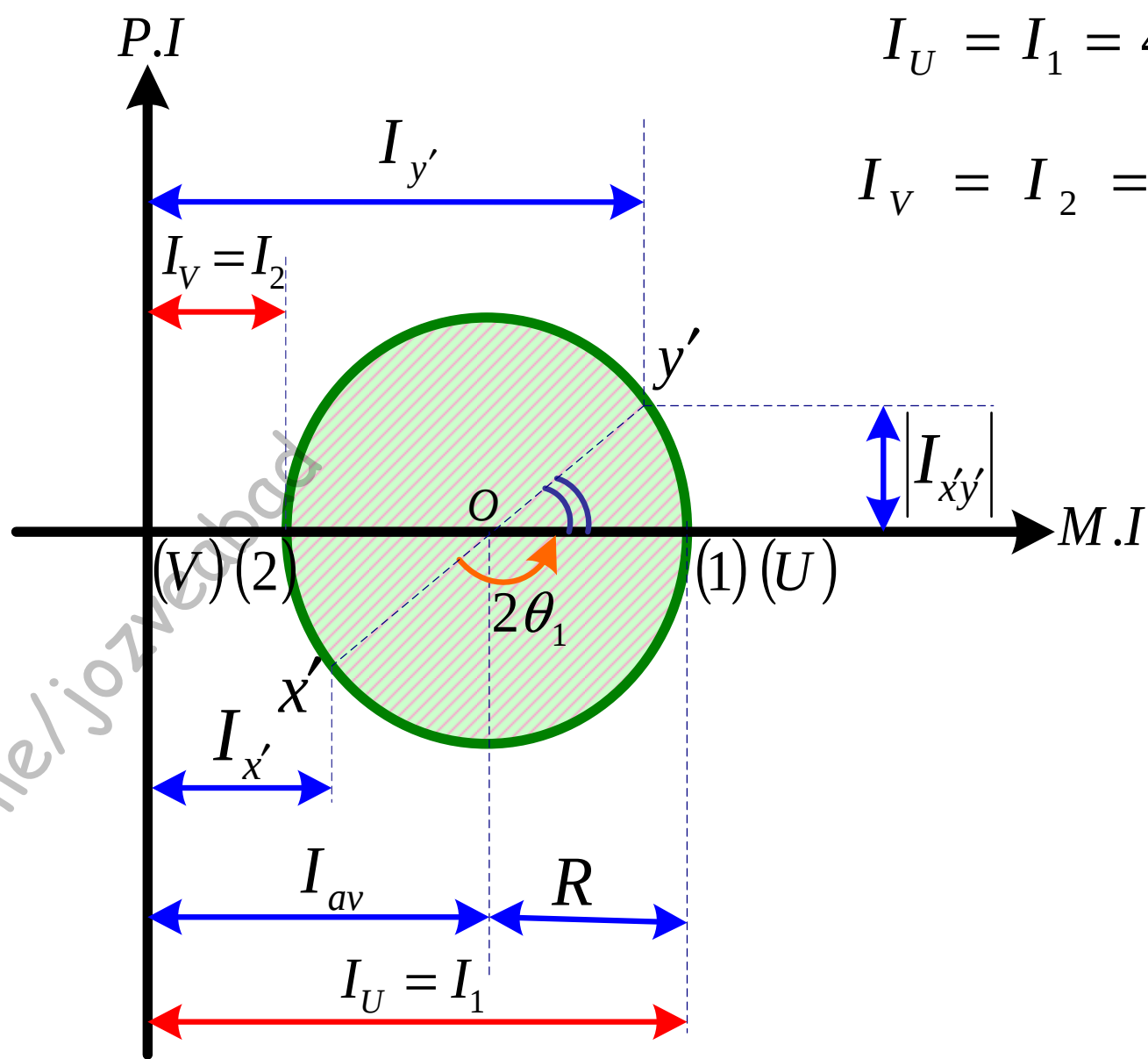
$$I_{UV} = \frac{I_{x'} - I_{y'}}{2} \sin 2\theta + I_{x'y'} \cos 2\theta$$

$$I_{UV} = 0 \quad \tan 2\theta = \frac{-2I_{x'y'}}{I_{x'} - I_{y'}} = -0.4 = \tan 158.2^\circ \Rightarrow 2\theta = 158.2^\circ$$

$$2\theta = 158.2^\circ \Rightarrow \theta = 79.1^\circ$$

$$I_U = I_1 = 4517.32 \text{ mm}^4$$

$$I_V = I_2 = 970.68 \text{ mm}^4$$

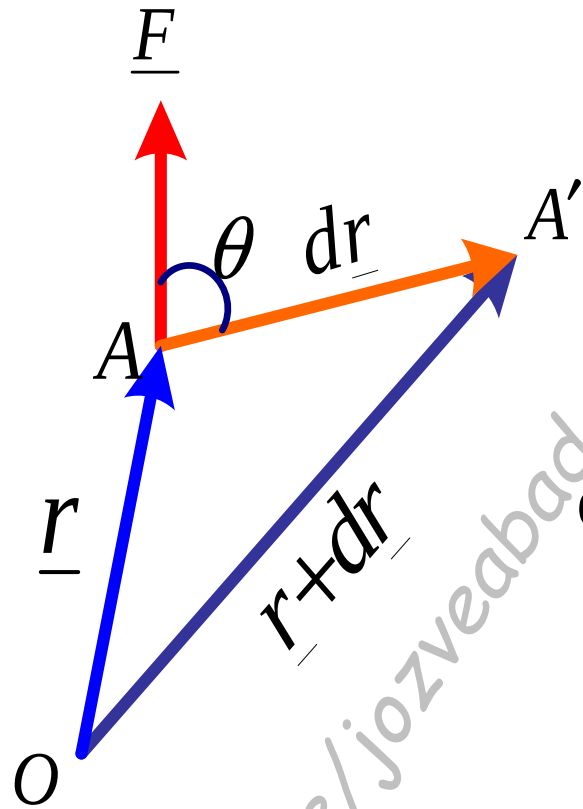


$$I_U = I_1 = 4517.32 \text{ mm}^4$$

$$I_V = I_2 = 970.68 \text{ mm}^4$$

۱۰- کار مجازی و پایداری

کار یک نیرو

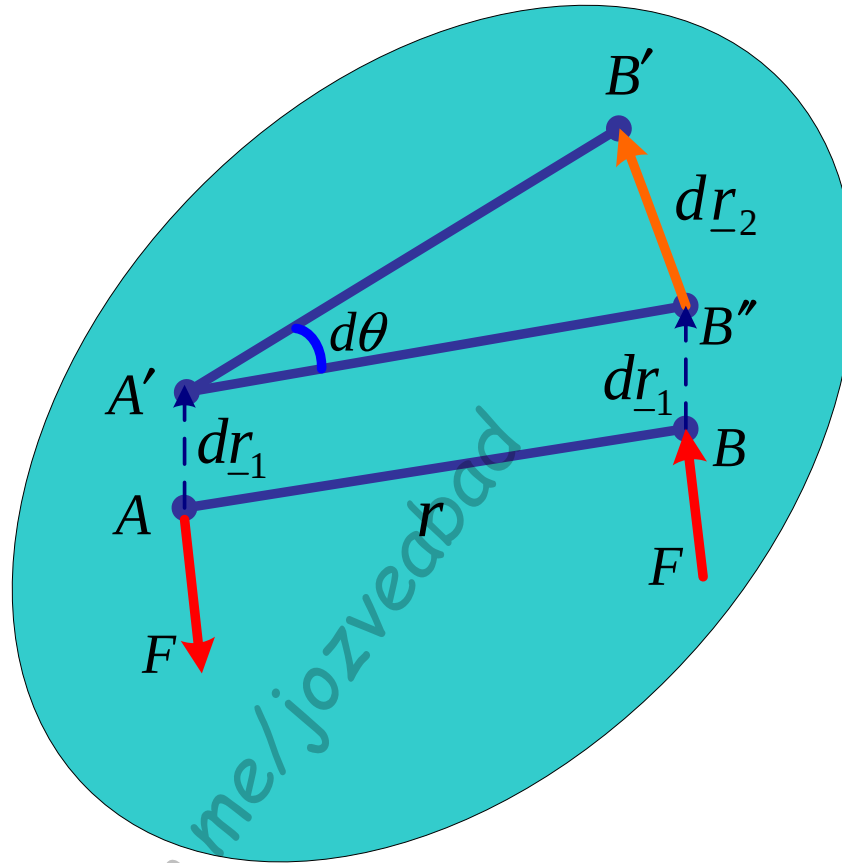


$$dU = \underline{F} \cdot d\underline{r} = F dr \cos \theta \quad \text{اسکالر}$$

$$\text{MKS} \quad \text{واحد کار} = N.m = \text{Joule} \quad \text{ژول}$$

$$\text{CGS} \quad \text{واحد کار} = \text{dyne.cm} = \text{Erge} \quad \text{ارگ}$$

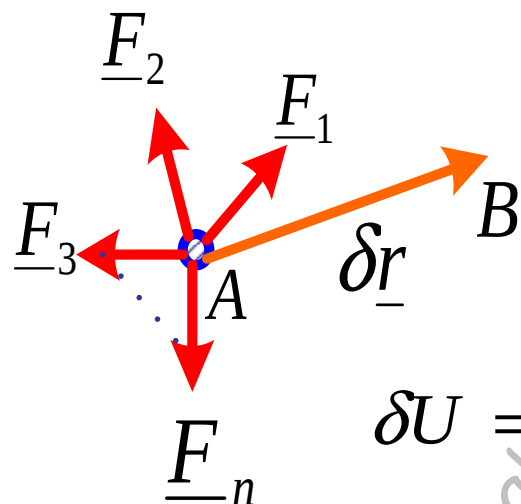
کار یک کوپل نیرو



$$dr_2 = r d\theta$$

$$dU = \underline{F} \cdot d\underline{r}_2 = F r d\theta = M d\theta$$

کار مجازی



$\delta \underline{r}$: جا به جایی مجازی:

$d \underline{r}$: جا به جایی واقعی:

$$\delta U = \underline{F}_1 \cdot \delta \underline{r} + \underline{F}_2 \cdot \delta \underline{r} + \underline{F}_3 \cdot \delta \underline{r} + \dots + \underline{F}_n \cdot \delta \underline{r}$$

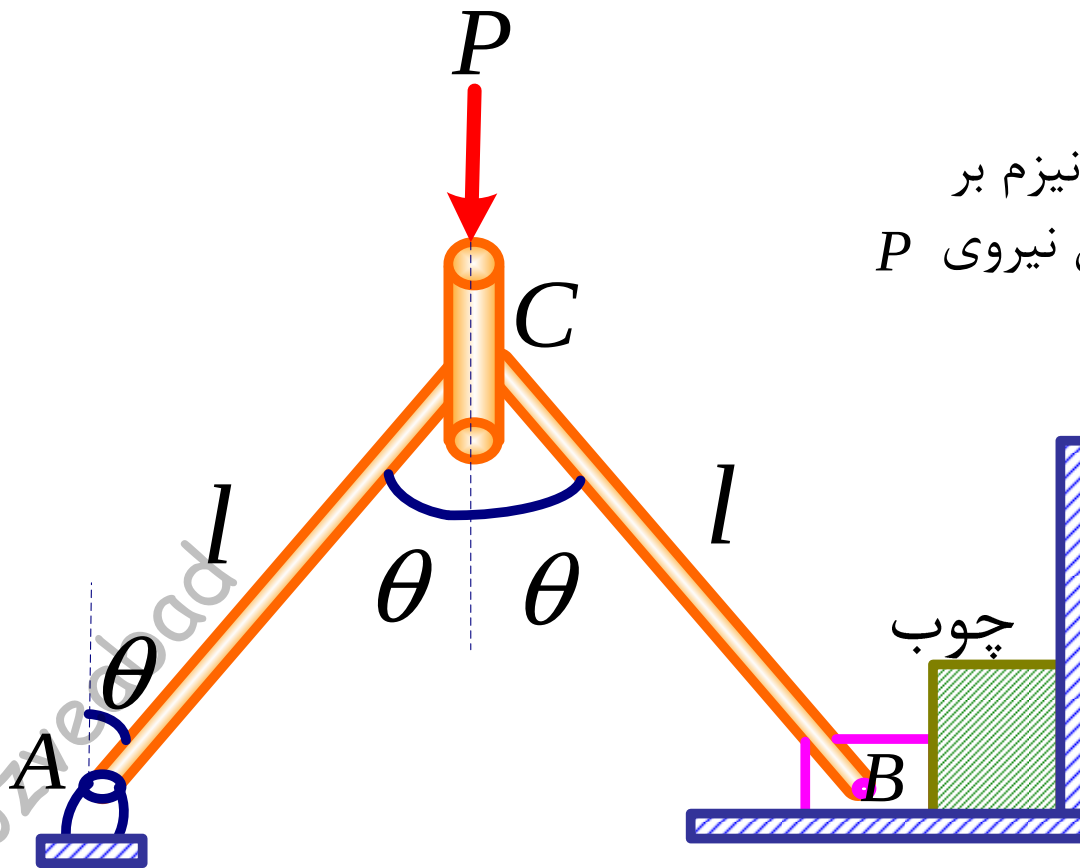
$$\delta U = (\underline{F}_1 + \underline{F}_2 + \underline{F}_3 + \dots + \underline{F}_n) \cdot \delta \underline{r}$$

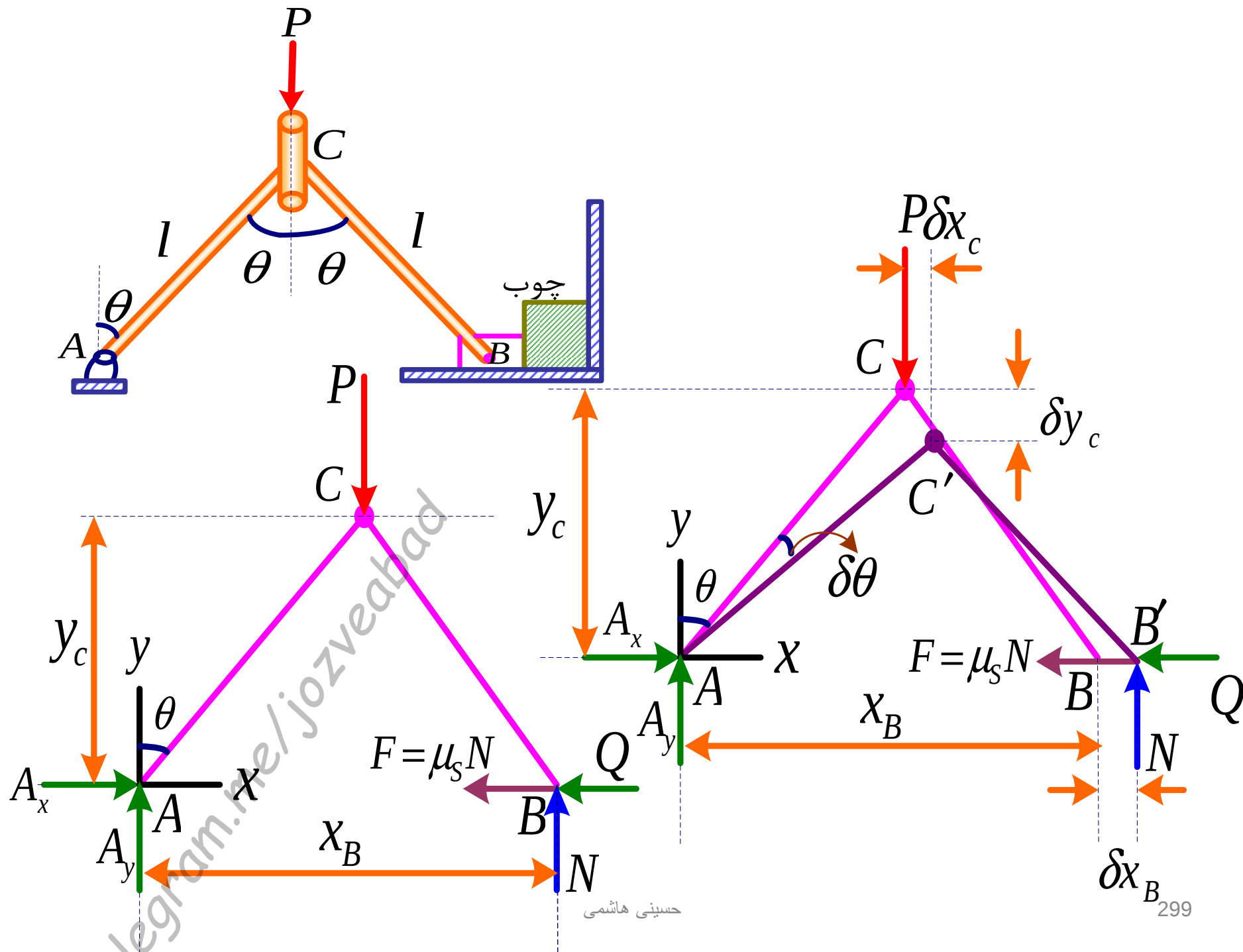
$$\delta U = \underline{R} \cdot \delta \underline{r}$$

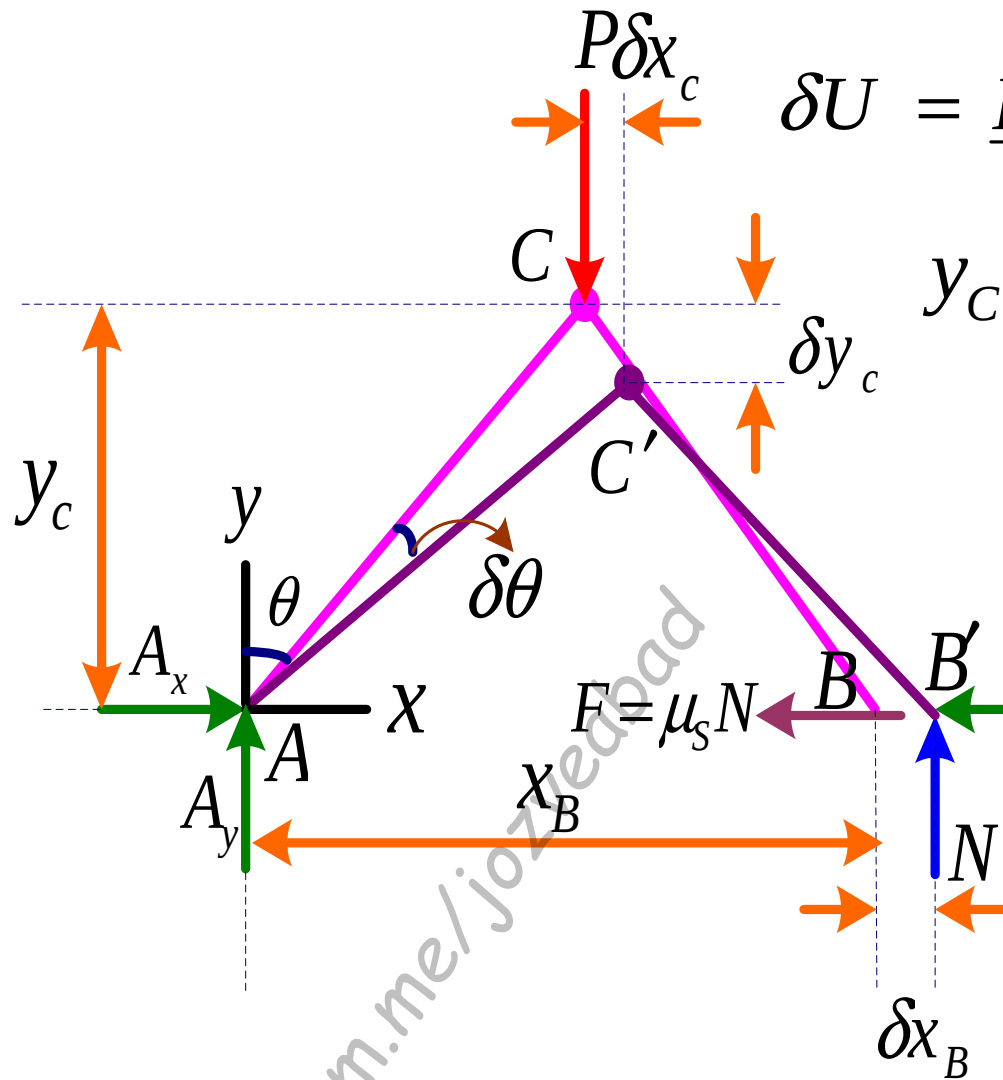
اگر سیستم تحت تأثیر نیروهای اعمالی در حالت تعادل باشد یعنی $\underline{R} = 0$ در این صورت کار برآیند نیروها برای هر جا بجایی مجازی برابر صفر می باشد

$$\underline{R} = 0 \rightarrow \delta U = \underline{R} \cdot \delta \underline{r} = 0 \quad \text{اصل کار مجازی}$$

تعیین نیروی وارده از طرف مکانیزم بر
قطعه چوب با فرض معلوم بودن نیروی P







$$\delta U = \underline{P} \cdot \delta \underline{y}_C + \underline{F} \cdot \delta \underline{x}_B + \underline{Q} \cdot \delta \underline{x}_B$$

$$y_C = l \cos \theta \quad x_B = 2l \sin \theta$$

$$\delta y_C = -l \sin \theta \delta \theta$$

$$\delta x_B = 2l \cos \theta \delta \theta$$

$$\underline{P} = -P \underline{j}$$

$$\underline{Q} = -Q \underline{i}$$

$$\underline{F} = -\mu_s N \underline{i}$$

$$\delta \underline{y}_C = -l \sin \theta \delta \theta \underline{j}$$

$$\delta \underline{x}_B = 2l \cos \theta \delta \theta \underline{i}$$

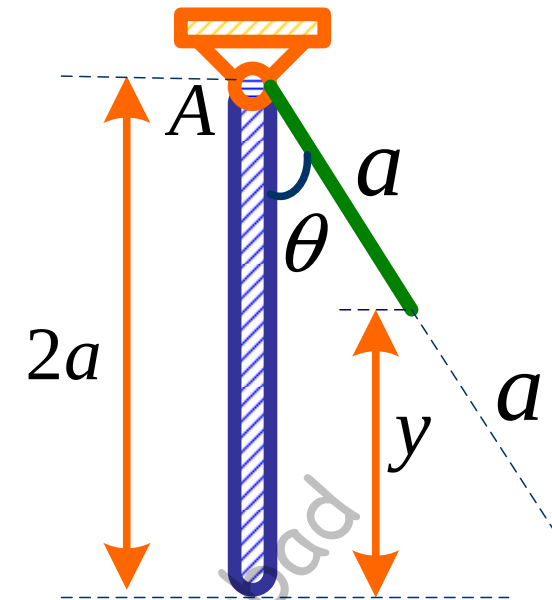
$$\delta U = Pl \sin \theta \delta \theta - \mu_s N (2l \cos \theta) \delta \theta - Q (2l \cos \theta) \delta \theta$$

$$\delta U = l \delta \theta (P \sin \theta - 2\mu_s N \cos \theta - 2Q \cos \theta)$$

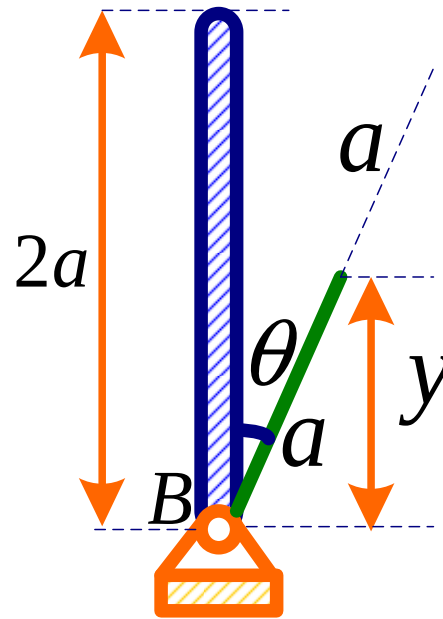
$$\delta U = 0$$

$$P \sin \theta - 2\mu_s N \cos \theta - 2Q \cos \theta = 0$$

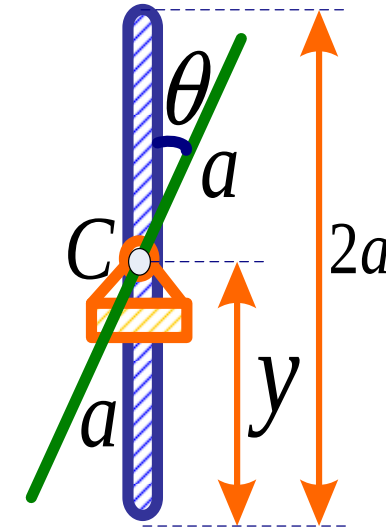
$$Q = \frac{P}{2} \tan \theta - \mu_s N$$



با ثبات (پایدار)



بی ثبات (ناپایدار)



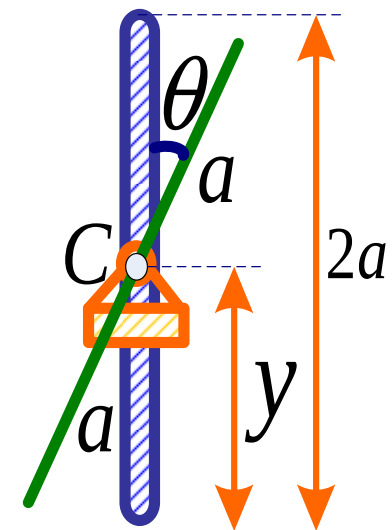
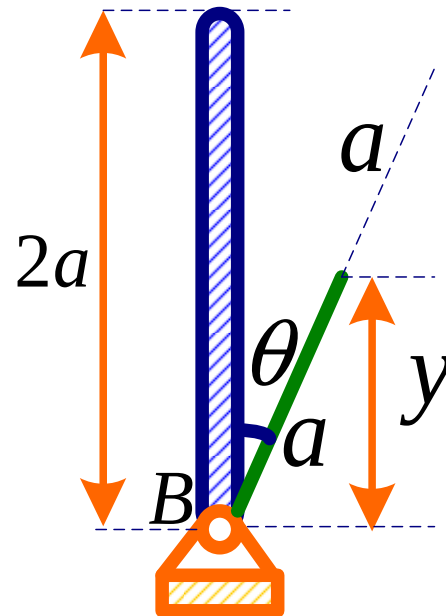
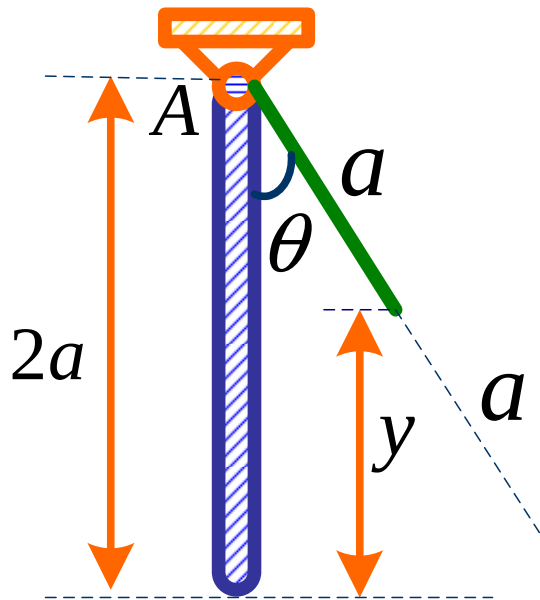
خنثی

پایداری

بعد از رها شدن از موقعیت منحرف شده θ دوباره به وضعیت اولیه یعنی تعادل باز می گردد.

بعد از رها شدن از موقعیت θ به هیچ وجه به وضعیت اولیه باز نمی گردد.

در هر وضعیت θ که قرار بگیرد در همان موقعیت باقی خواهد ماند.



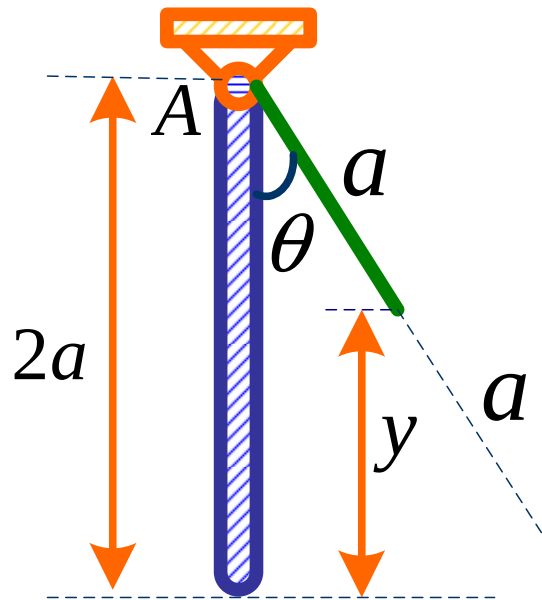
تابع انرژی پتانسیل $V = wy$

W وزن میله ها

$$y = 2a - a \cos \theta \Rightarrow V = wa(2 - \cos \theta)$$

$$y = a \cos \theta \Rightarrow V = wa \cos \theta$$

$$y = a \Rightarrow V = wa$$



$$V = wa(2 - \cos \theta) \quad \frac{d^2V}{d\theta^2} = wa \cos \theta \quad \frac{d^2V}{d\theta^2} > 0$$

در موقعیت تعادل ($\theta=0$) دارای کمترین انرژی پتانسیل

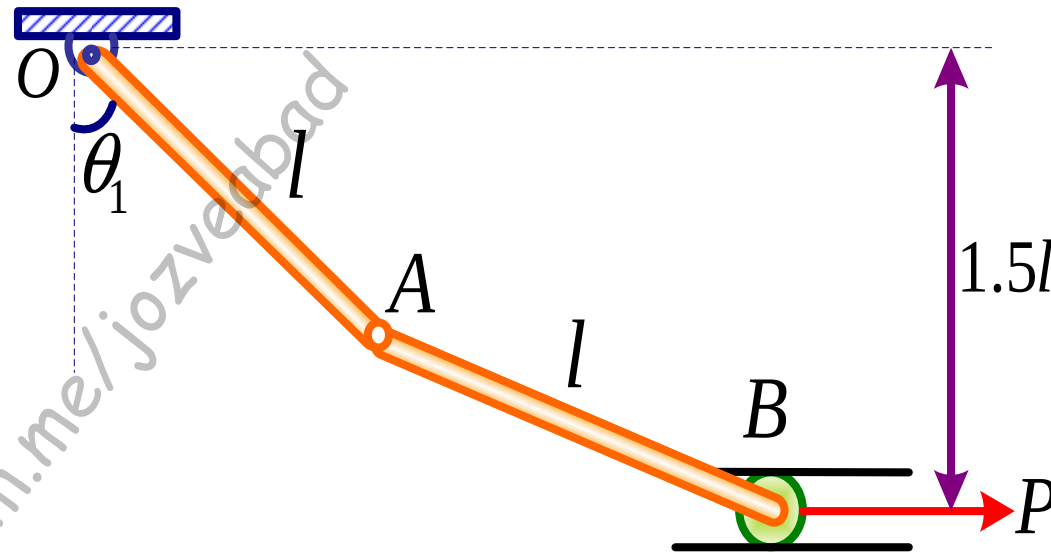
$$V = wa \cos \theta \quad \frac{d^2V}{d\theta^2} = -wa \cos \theta \quad \frac{d^2V}{d\theta^2} < 0$$

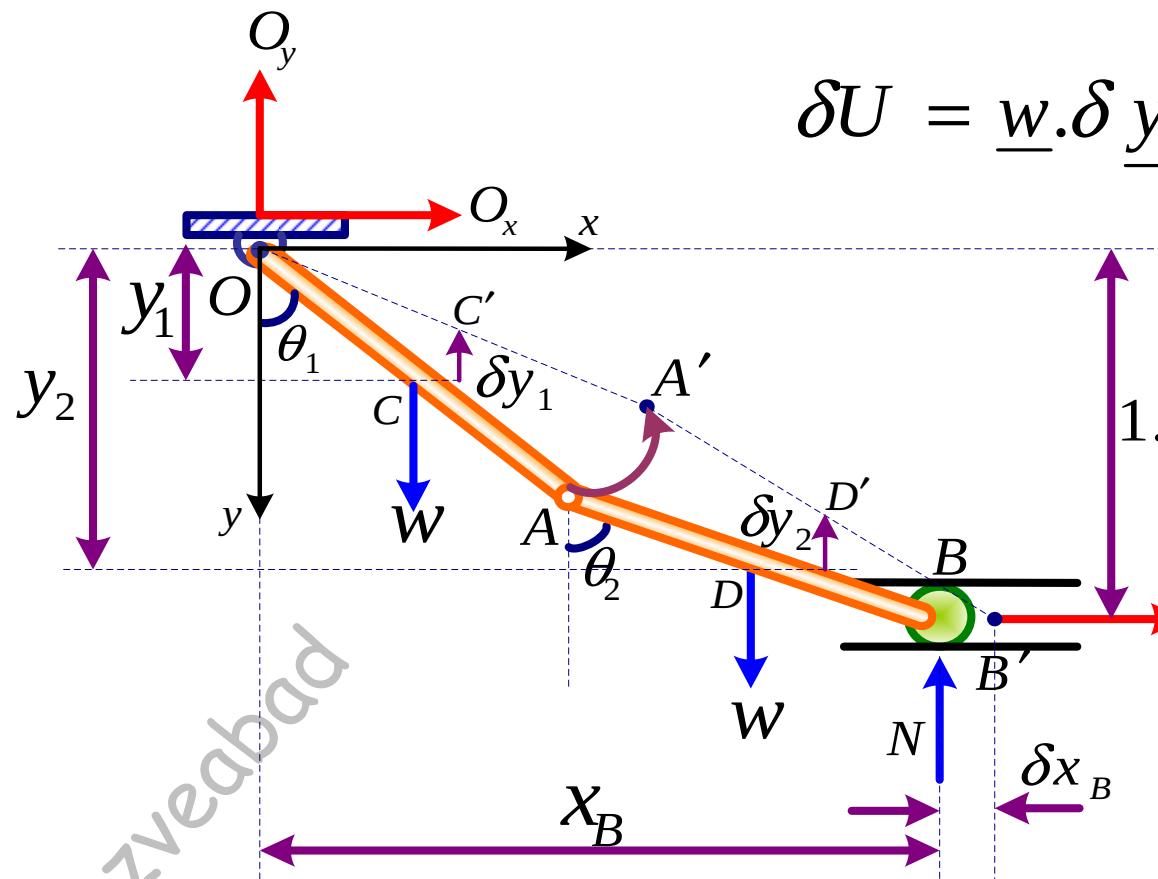
در موقعیت تعادل ($\theta=0$) دارای بیشترین انرژی پتانسیل

$$V = wa \quad \frac{d^2V}{d\theta^2} = 0$$

در هر موقعیت θ انرژی پتانسیل ثابت است.

مثال: مکانیزم نشان داده شده در شکل شامل دو میله همگن هر یک به طول l و وزن W می باشد. غلتک B در یک شیار افقی که به فاصله $1.5l$ زیر پین O قرار دارد حرکت می کند. با استفاده از اصل کار مجازی نیروی P که دستگاه را برای $\theta_1 = 30^\circ$ در تعادل نگه دارد تعیین کنید. (از اصطکاک صرف نظر کنید)





$$\delta U = \underline{w} \cdot \delta \underline{y}_1 + \underline{w} \cdot \delta \underline{y}_2 + \underline{P} \cdot \delta \underline{x}_B$$

$$\underline{w} = w \underline{j} \quad \underline{P} = P \underline{i}$$

$$y_1 = \frac{l}{2} \cos \theta_1$$

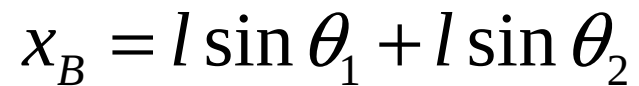
$$\delta y_1 = -\frac{l}{2} \sin \theta_1 \delta \theta_1$$

$$\delta \underline{y}_1 = -\frac{l}{2} \sin \theta_1 \delta \theta_1 \underline{j}$$

$$y_2 = l \cos \theta_1 + \frac{l}{2} \cos \theta_2 \quad l \cos \theta_1 + l \cos \theta_2 = 1.5l$$

$$\cos \theta_2 = 1.5 - \cos \theta_1 \quad y_2 = \frac{l}{2} \cos \theta_1 + 0.75l$$

$$\delta \underline{y}_2 = -\frac{l}{2} \sin \theta_1 \delta \theta_1 \underline{j}$$



$$\cos \theta_2 = 1.5 - \cos \theta_1$$

$$\delta\theta_2 = \frac{-\sin\theta_1}{\sin\theta_2}\delta\theta_1$$

$$\delta \underline{x}_B = l \left(\cos \theta_1 - \sin \theta_1 \cot \theta_2 \right) \delta \theta_1 \underline{i}$$

$$\delta U = \underline{w} \cdot \delta \underline{y}_1 + \underline{w} \cdot \delta \underline{y}_2 + \underline{P} \cdot \delta \underline{x}_B \quad \underline{w} = w \underline{j} \quad \underline{P} = P \underline{i}$$

$$\delta \underline{y}_1 = -\frac{l}{2} \sin \theta_1 \delta \theta_1 \underline{j} \quad \delta \underline{y}_2 = -\frac{l}{2} \sin \theta_1 \delta \theta_1 \underline{j}$$

$$\delta \underline{x}_B = l (\cos \theta_1 - \sin \theta_1 \cot \theta_2) \delta \theta_1 \underline{i}$$

$$\delta U = -w \frac{l}{2} \sin \theta_1 \delta \theta_1 - w \frac{l}{2} \sin \theta_1 \delta \theta_1 + pl (\cos \theta_1 - \sin \theta_1 \cot \theta_2) \delta \theta_1$$

$$\delta U = (-wl \sin \theta_1 + pl \cos \theta_1 - pl \sin \theta_1 \cot \theta_2) \delta \theta_1$$

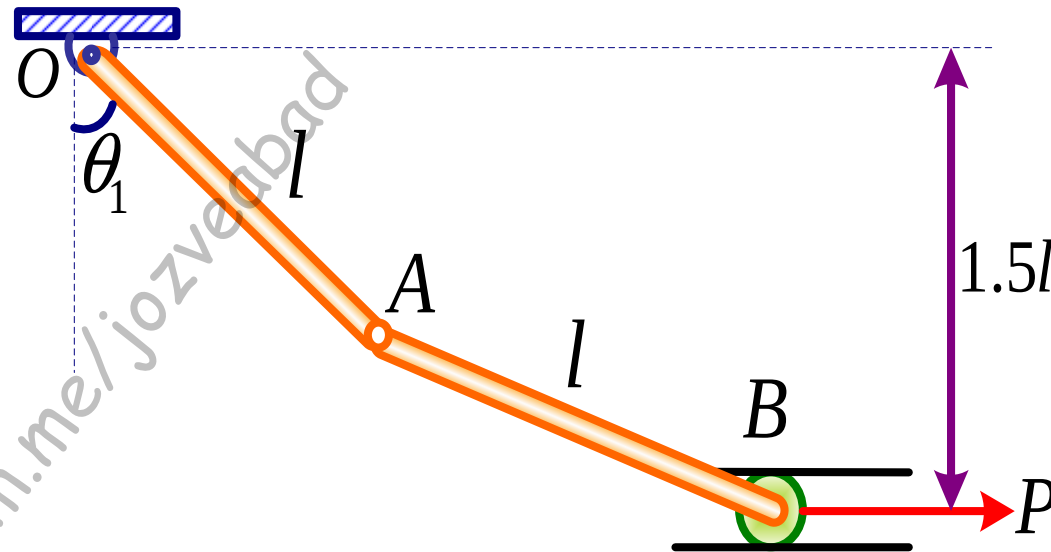
$$\delta U = 0$$

$$P = \frac{w \sin \theta_1}{\cos \theta_1 - \sin \theta_1 \cot \theta_2}$$

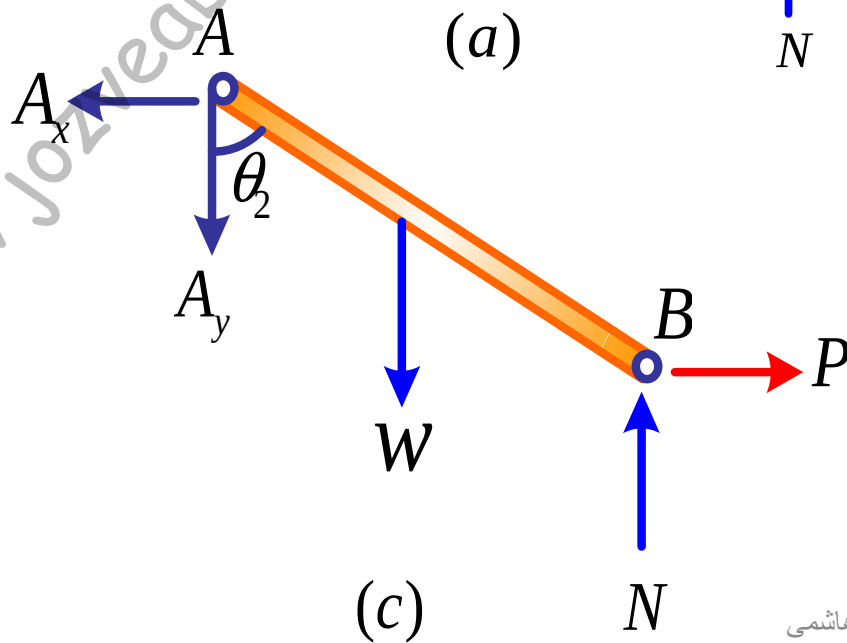
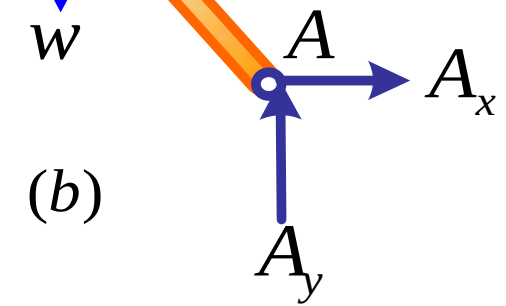
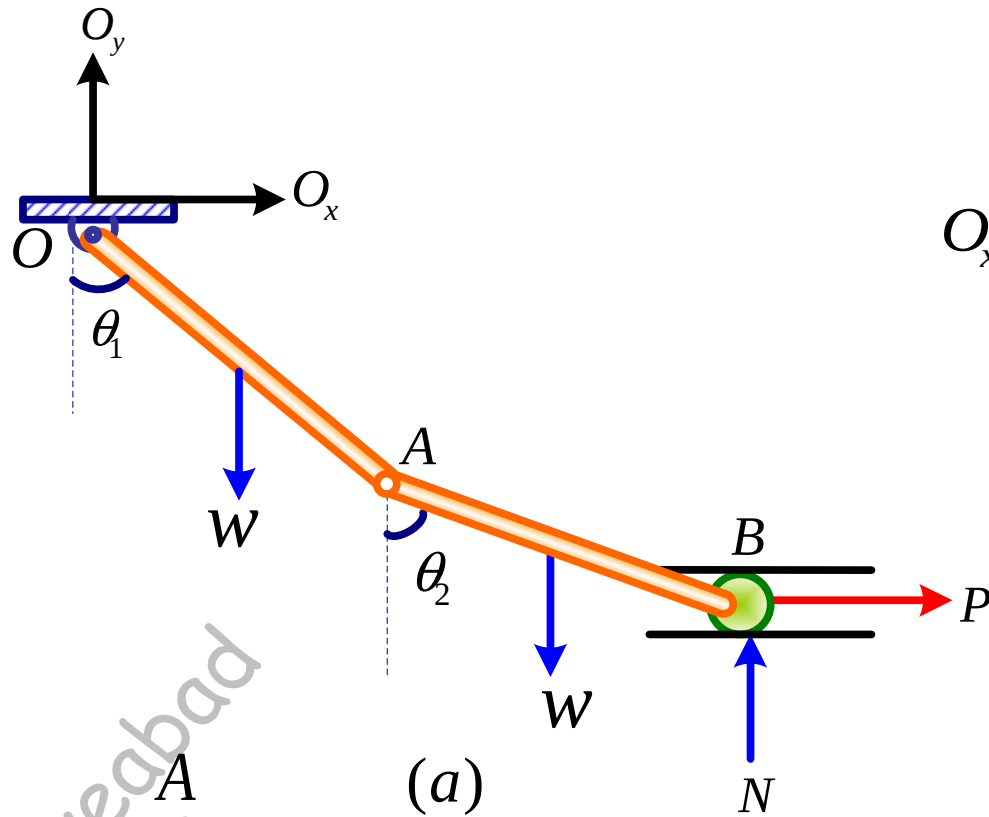
$$\theta_1 = 30^\circ \rightarrow \cos \theta_1 + \cos \theta_2 = 1.5 \Rightarrow \cos \theta_2 = 50.65$$

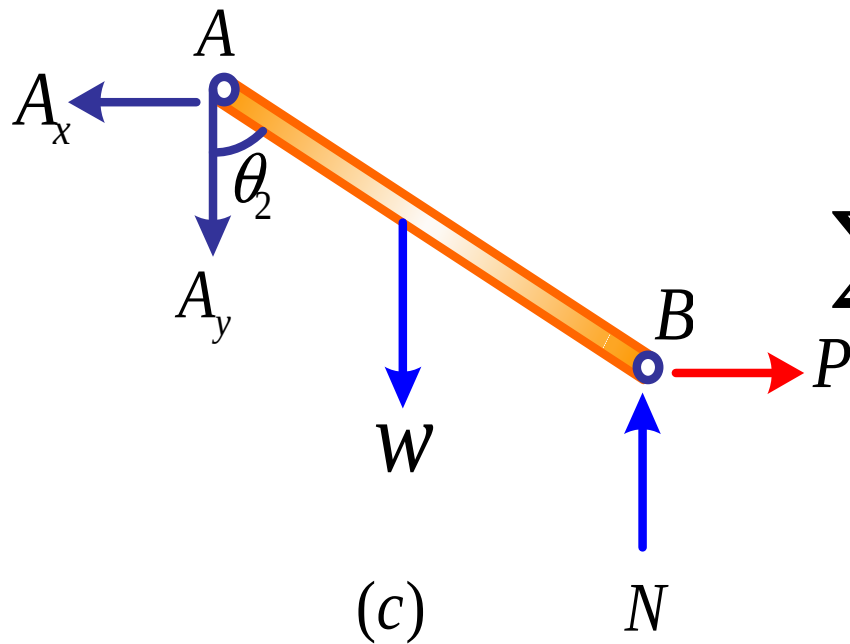
$$\theta_2 = 50.65^\circ \Rightarrow P = 1.097w$$

مثال: مکانیزم نشان داده شده در شکل شامل دو میله همگن هر یک به طول l و وزن W می باشد. غلتک B در یک شیار افقی که به فاصله $1.5l$ زیر پین O قرار دارد حرکت می کند. با استفاده از تحلیل قاب ها نیروی P که دستگاه را برای $\theta_1 = 30^\circ$ در تعادل نگه دارد تعیین کنید. (از اصطکاک صرف نظر کنید)



روش دوم





$$\sum F_x = 0 \Rightarrow P - A_x = 0 \Rightarrow A_x = P$$

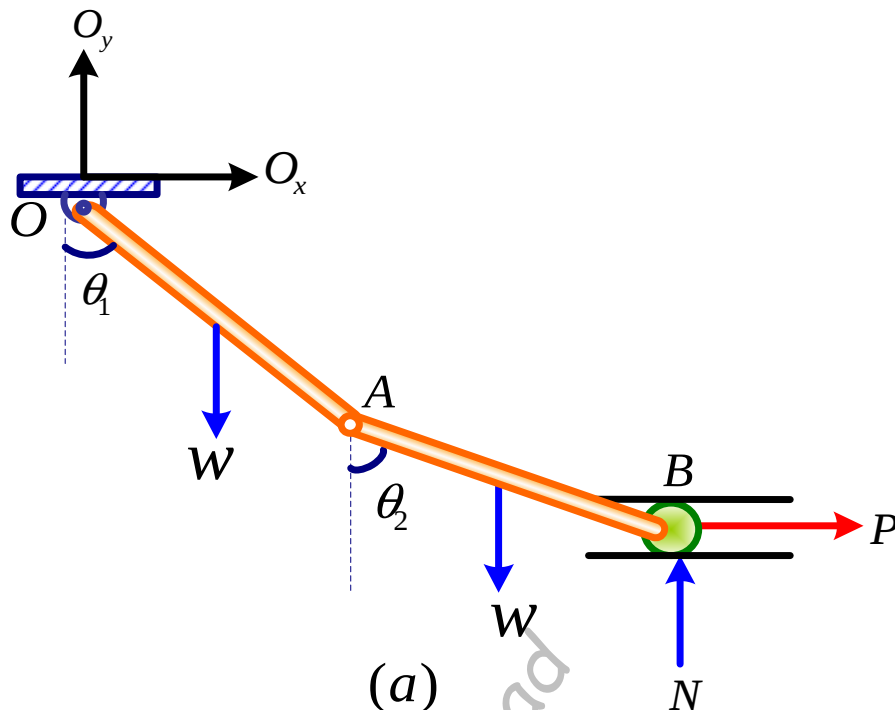
$$\sum F_y = 0 \Rightarrow A_y + w - N = 0$$

$$A_y = N - w$$

$$\sum M_A = 0 \Rightarrow Nl \sin \theta_2 + Pl \cos \theta_2 - w \frac{l}{2} \sin \theta_2 = 0$$

$$N = \frac{w \sin \theta_2 - 2P \cos \theta_2}{2 \sin \theta_2} = \frac{w}{2} - 2 \cot \theta_2$$

$$A_y = N - w = -\left(\frac{w}{2} + P \cot \theta_2 \right)$$



$$N = \frac{w}{2} - 2 \cot \theta_2$$

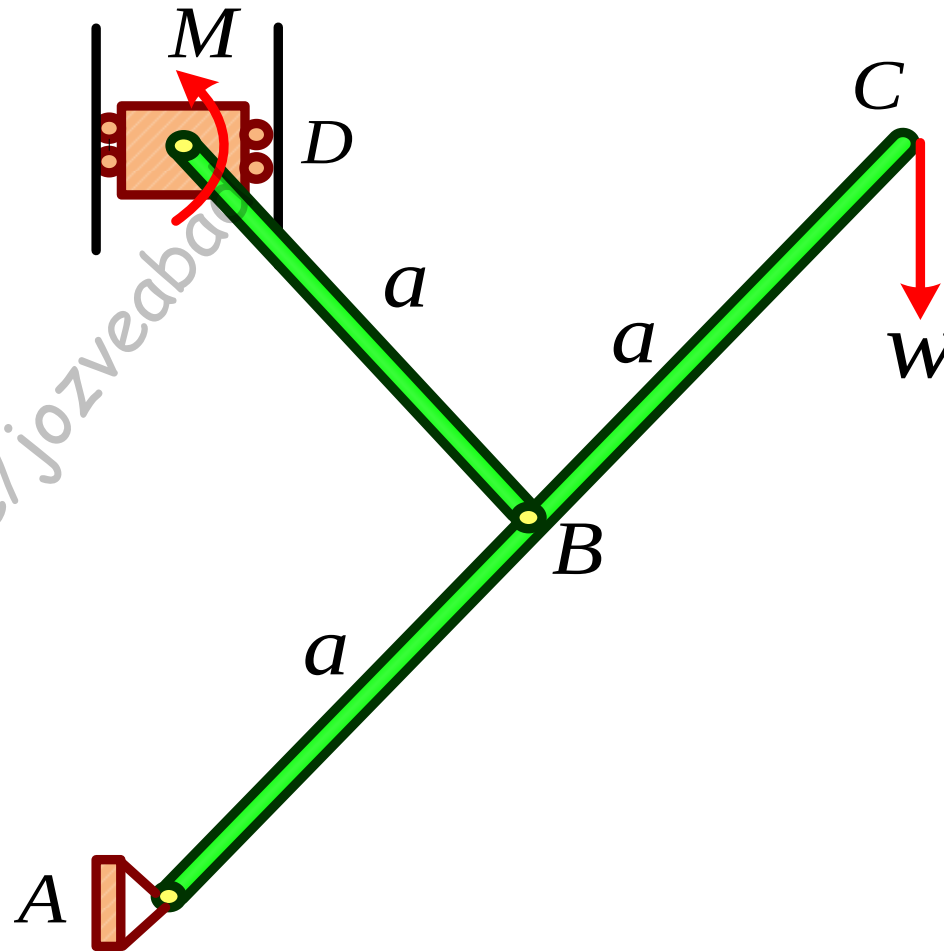
$$\sum M_O = 0 \Rightarrow \frac{l}{2} w \sin \theta_1 + w \left(l \sin \theta_1 + \frac{l}{2} \sin \theta_2 \right)$$

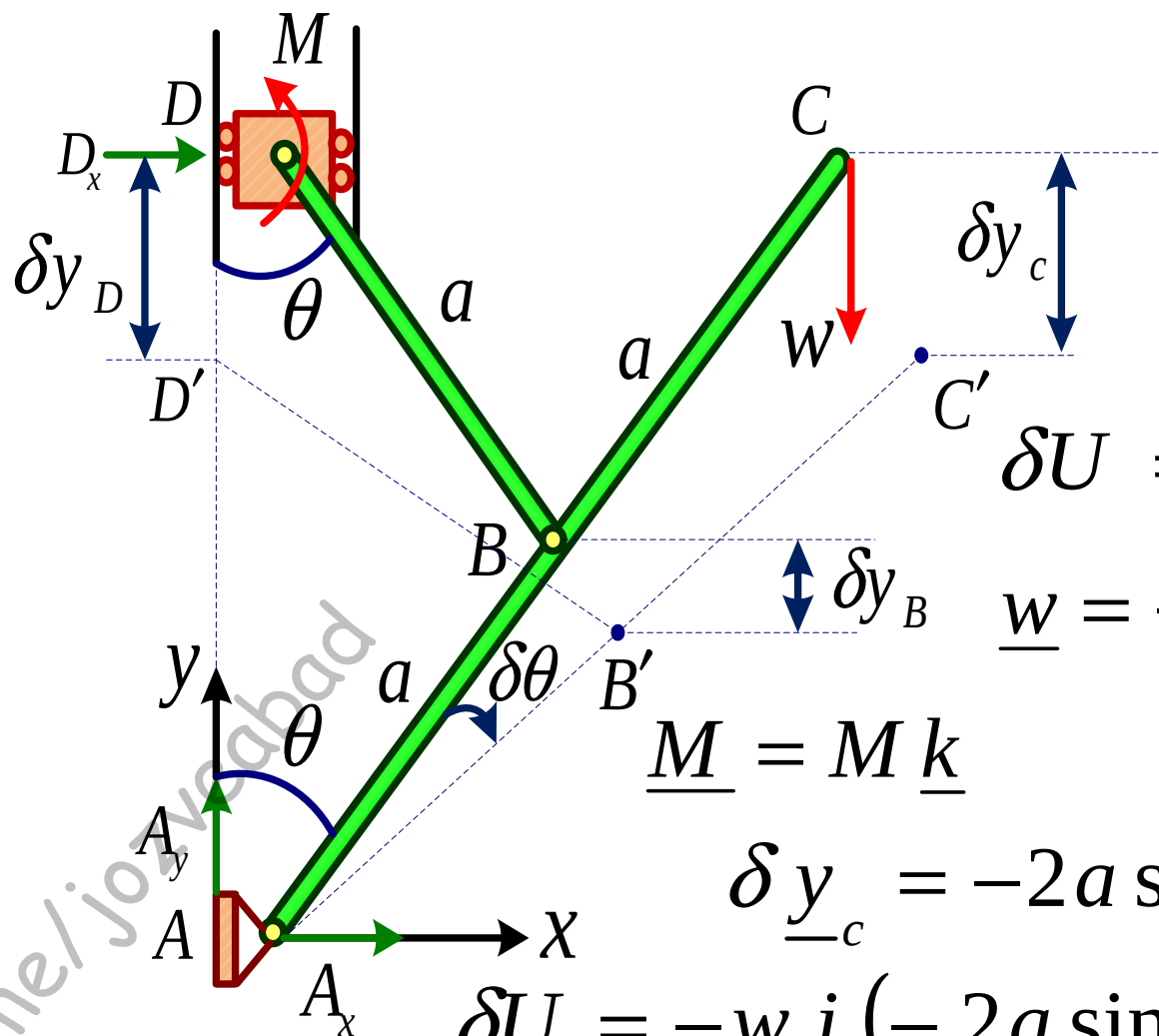
$$-P(l \cos \theta_1 + l \cos \theta_2) - Nl(\sin \theta_1 + \sin \theta_2) = 0$$

$$P = \frac{w \sin \theta_1}{\cos \theta_1 - \sin \theta_1 \cot \theta_2}$$

$$\theta_1 = 30^\circ \rightarrow \theta_2 = 50.65^\circ \Rightarrow p = 1.097w$$

مثال: برای مکانیزم مقابل گشتاور M را طوری تعیین کنید که سیستم در حالت تعادل باشد. از وزن میله ها صرف نظر کنید.
(مسئله را با استفاده از روش کار مجازی و نیز معمولی حل کنید.)





$$\delta U = \underline{w} \cdot \delta \underline{y}_c + \underline{M} \cdot \delta \underline{\theta}$$

$$\underline{w} = -w \underline{j} \quad \delta \underline{\theta} = \delta \theta \underline{k}$$

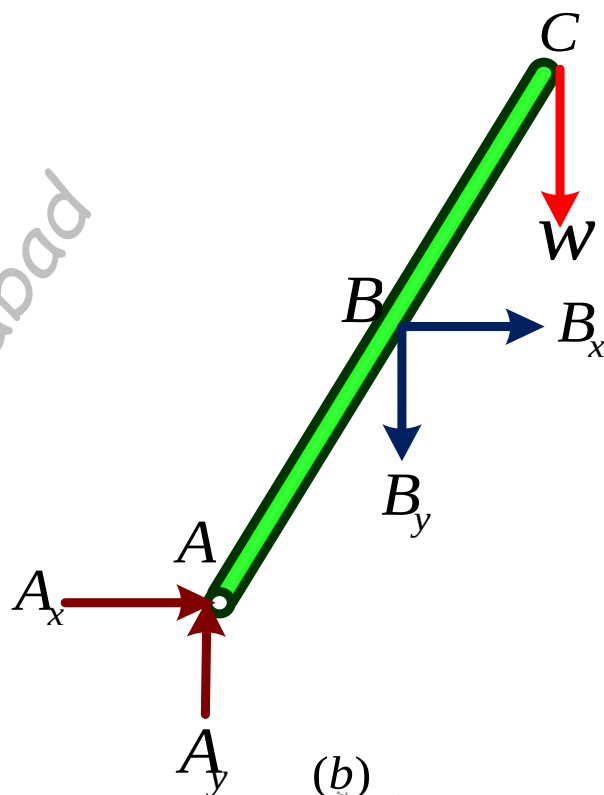
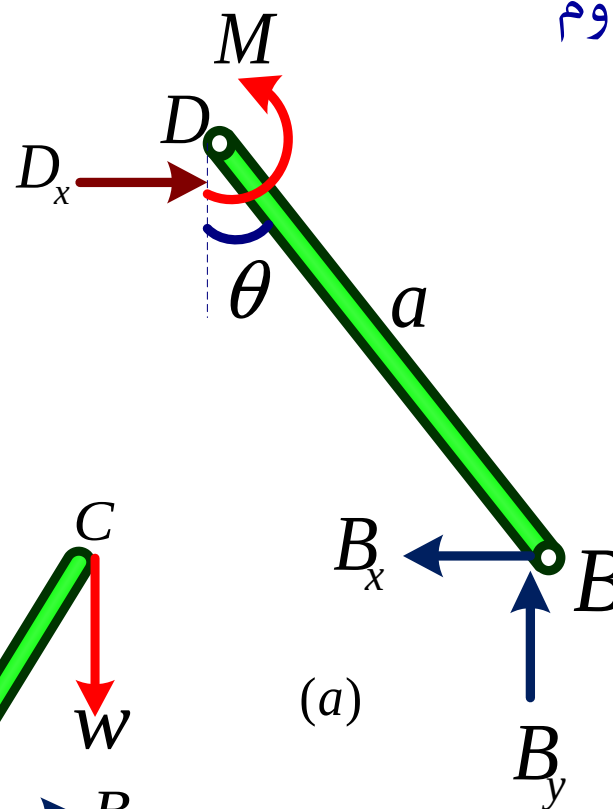
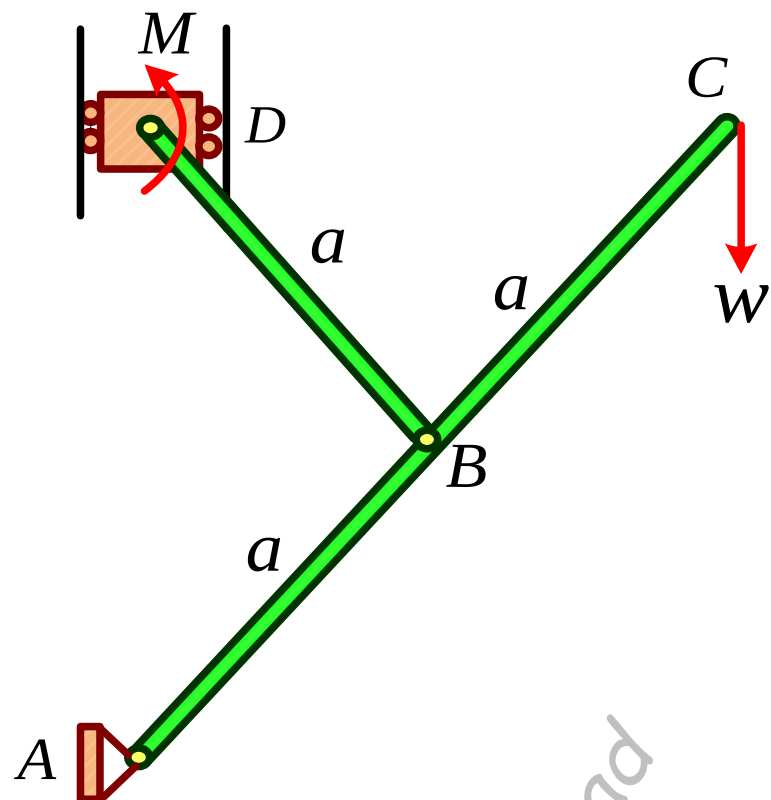
$$\underline{M} = M \underline{k} \quad y_c = 2a \cos \theta$$

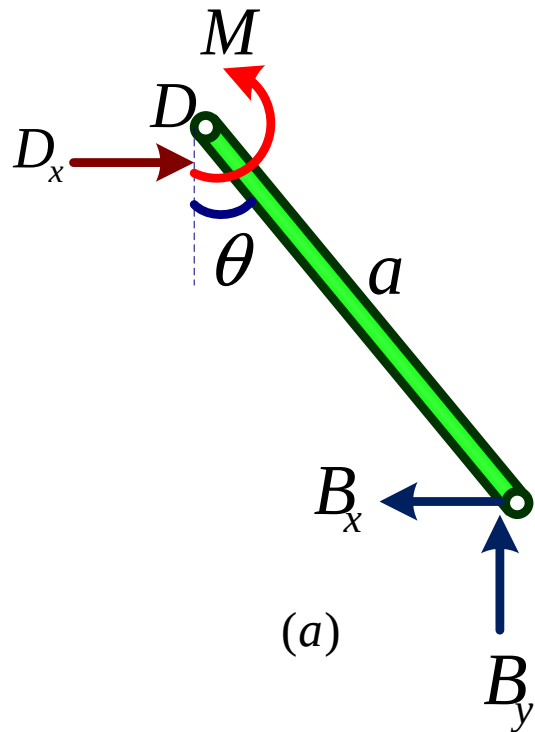
$$\delta \underline{y}_c = -2a \sin \theta \delta \theta \underline{j}$$

$$\delta U = -w \underline{j} \cdot (-2a \sin \theta \delta \theta) \underline{j} + M \underline{k} \cdot \delta \theta \underline{k}$$

$$\delta U = 2aw \sin \theta \delta \theta + M \delta \theta \rightarrow \delta U = 0$$

$$\Rightarrow M = -2aw \sin \theta$$



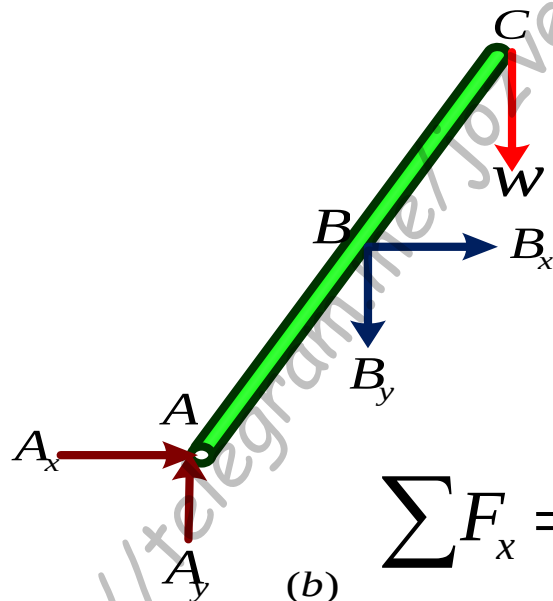


$$\sum F_y = 0 \Rightarrow B_y = 0$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow D_x - B_x = 0 \Rightarrow B_x = D_x$$

$$\sum M_D = 0 \Rightarrow B_x a \cos \theta - M = 0 \Rightarrow M = B_x a \cos \theta$$

(a)



$$\sum M_A = 0 \Rightarrow w 2a \sin \theta + B_x a \cos \theta = 0$$

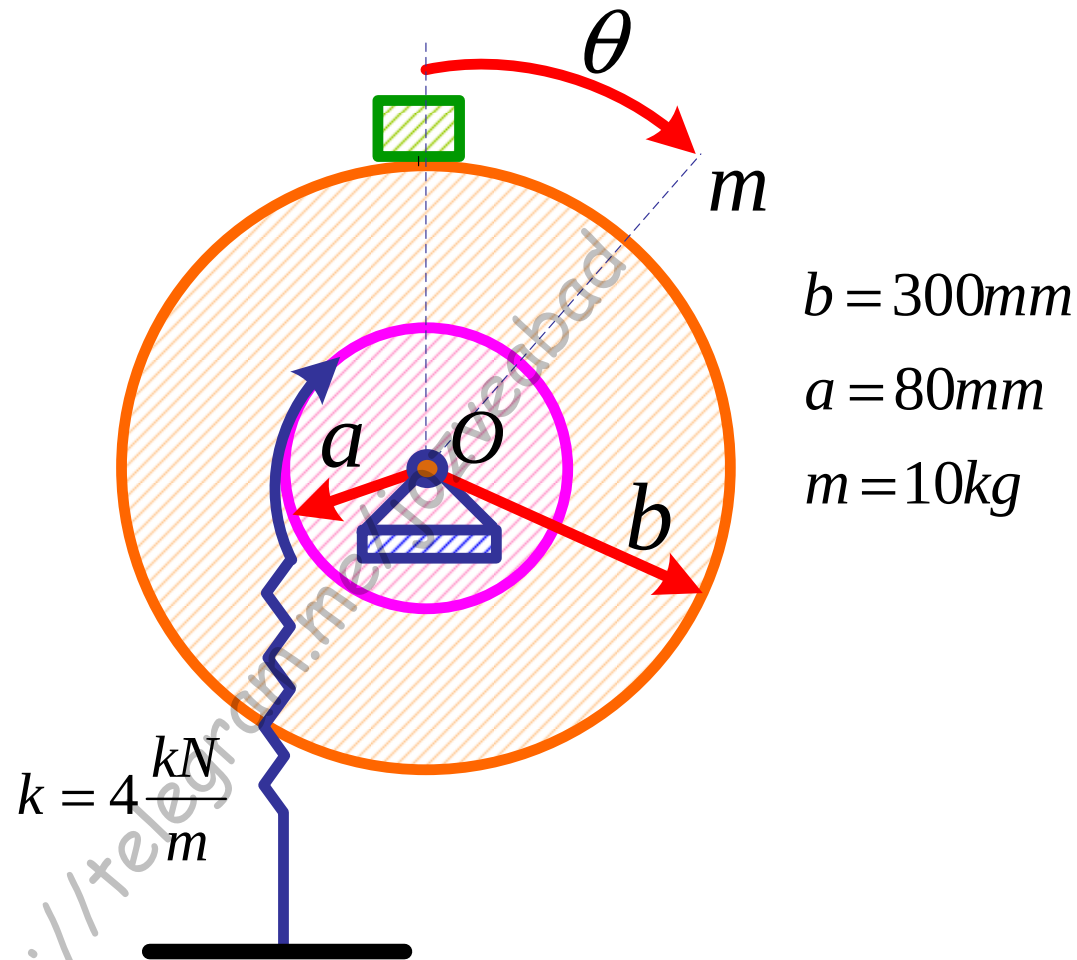
$$B_x = -2w \tan \theta \quad D_x = -2w \tan \theta$$

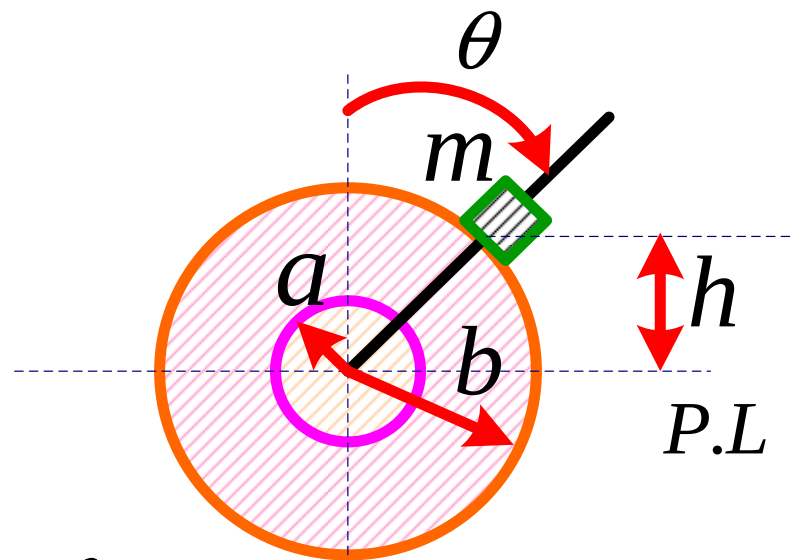
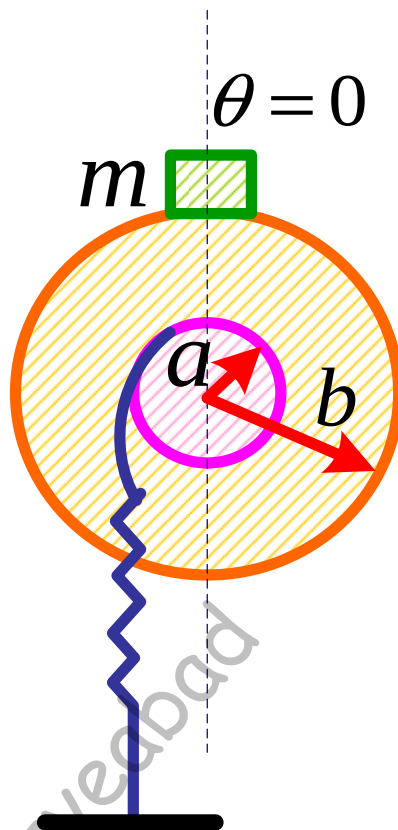
$$M = -2aw \sin \theta$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow A_y - B_y - w = 0 \Rightarrow A_y = w$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow A_x + B_x = 0 \Rightarrow A_x = -B_x \quad A_x = 2w \tan \theta$$

مثال: قطعه ای به جرم 10kg بر روی محیط دیسکی به شعاع 300 mm نصب شده است. به هنگامی که $\theta = 0$ است فنر آزاد است. وضعیت یا وضعیت های تعادل آن را تعیین کرده و در هر حالت نشان دهید تعادل چگونه است؟





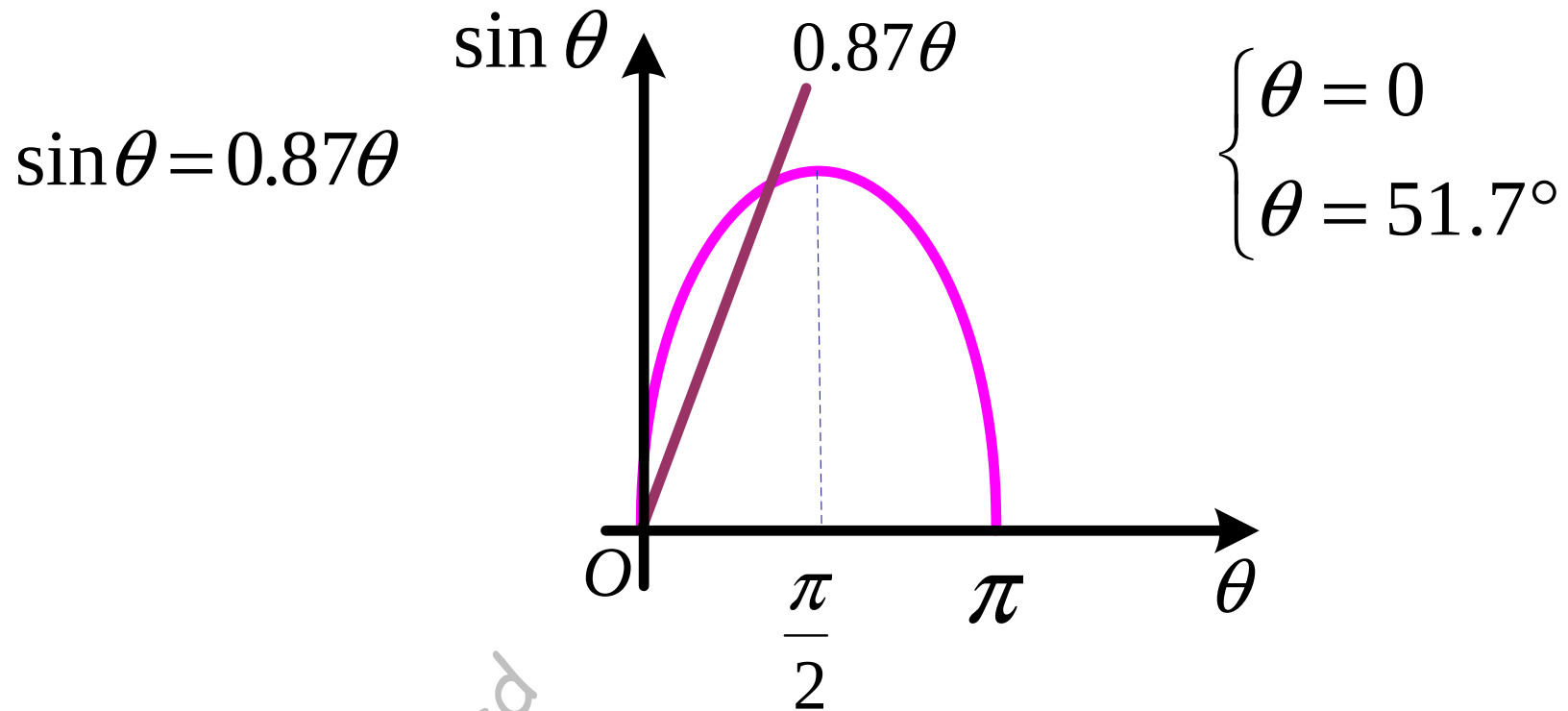
$$S = a \theta$$

$$V_s = \frac{1}{2} k s^2 = \frac{1}{2} K a^2 \theta^2 \quad V_g = mgh = mgb \cos \theta$$

$$V = V_s + V_g = \frac{1}{2} K a^2 \theta^2 + mgb \cos \theta \quad \frac{dV}{d\theta} = k a^2 \theta - mgb \sin \theta$$

$$\frac{dV}{d\theta} = 0 \Rightarrow k a^2 \theta = mgb \sin \theta \quad \sin \theta = \frac{k a^2}{mgb} \theta$$

$$\sin \theta = \frac{4000(0.08)^2}{10 \times 9.81 \times 0.3} \theta \Rightarrow \sin \theta = 0.87 \theta$$



Check :

$$\sin 51.7^\circ = 0.784 \quad 51.7^\circ = 0.902 \text{ rad} \quad 0.87(0.902) = 0.784$$

$$\frac{dV}{d\theta} = ka^2\theta - mgb \sin \theta \qquad \frac{d^2V}{d\theta^2} = ka^2 - mgb \cos \theta$$

$$\theta = 0 \rightarrow \frac{d^2V}{d\theta^2} = ka^2 - mgb = -3.8 < 0 \quad \text{تعادل ناپایدار است.}$$

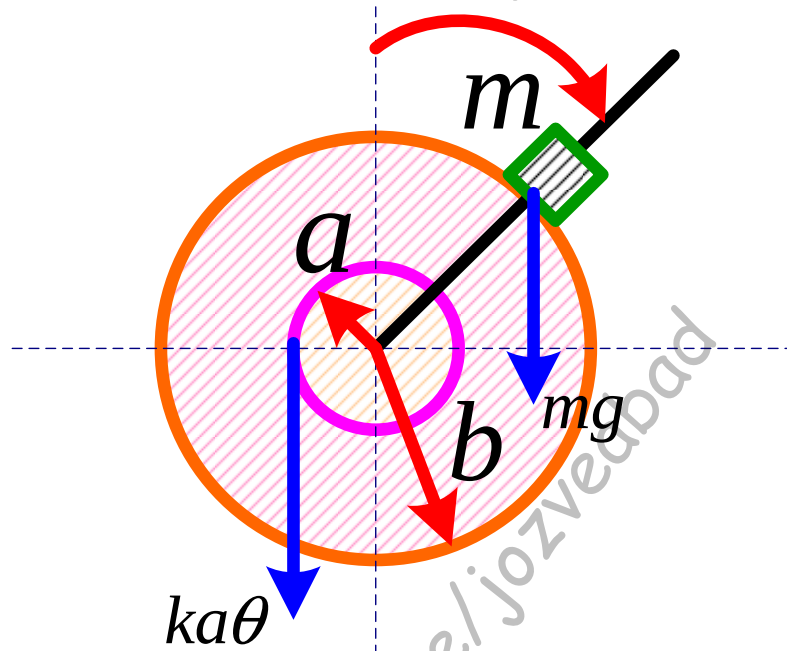
$$\theta = 51.7^\circ \rightarrow \frac{d^2V}{d\theta^2} = 7.36 > 0 \quad \text{تعادل پایدار است.}$$

بررسی:

$$\sum M = 0 \Rightarrow mgb \sin \theta - aka\theta = 0$$

$$\sin \theta = \frac{ka^2}{mgb} \theta$$

$$\sum M = 0 \Rightarrow mgb \sin \theta - aka\theta = 0$$



θ	$mgb \sin \theta$	$ka^2 \theta$
0	0	0
10	5.11	4.47
20	10.06	8.93
30	14.71	13.40
40	18.92	17.87
50	22.54	22.34
60	25.48	26.81
70	27.65	31.27

مراجع

- 1- Engineering Mechanics: Statics, SI Version, 6th Edition
by J. L. Meriam, L. G. Kraige
January 2008, Wiley
- 2- Engineering Mechanics, Statics, 2nd Edition
by William F. Riley, Leroy D. Sturges
January 1996, Wiley

gram.me/jozveabad