



مقدمه ای مقاومت مصالح. مفهوم تنش و کرنش



اهمیت تنش

- شاید این سوال برای شما پیش آمده باشد که چرا از مفهوم تنش در محاسبات مهندسی مکانیک استفاده می شود و به نیرو بسنده نمی کنیم؟
- پاسخ این است که مفهوم تنش که یکی از مهم ترین عوامل طراحی قطعات است، در درون خود هم مفهوم نیرو و شدت آن را دارد و هم این که شکل ظاهری جسم و یا قطعه را نیز در محاسبات لحاظ می کند.
- این نکته مهمی است چون نیرویی که برای یک قطعه با سطح مقطع بزرگ می تواند بی خطر باشد (مقدار تنش کوچک) می تواند برای قطعه دیگر با سطح مقطع کوچکتر (مقدار تنش بیشتر) خطرناک باشد.



- **تعریف تنش و کرنش**

- تنش و کرنش، از ابتدایی‌ترین و مهم‌ترین مفاهیم موجود در مقاومت مصالح هستند. هنگامی که نیرویی بر یک سازه یا عضوی از آن وارد شود، تنش و کرنش به وجود می‌آیند. تنش را می‌توان به صورت نیروی وارده بر یک جسم در واحد سطح تعریف کرد.

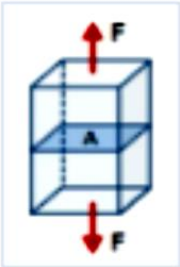
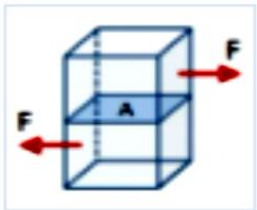
بر اساس این تعریف، معادله تنش به شکل زیر خواهد بود:

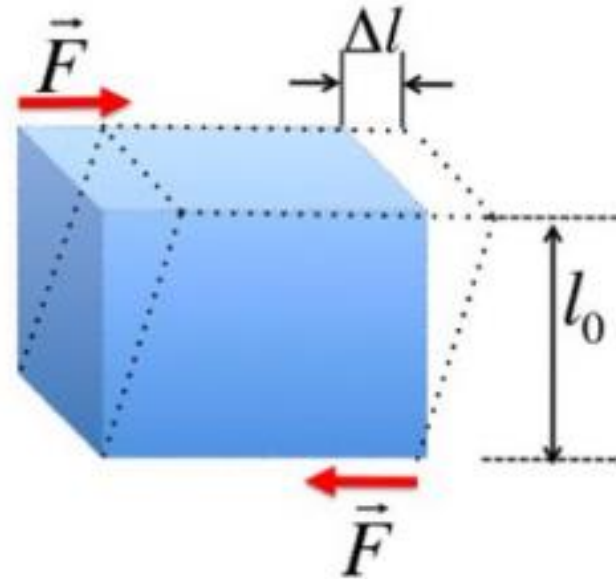
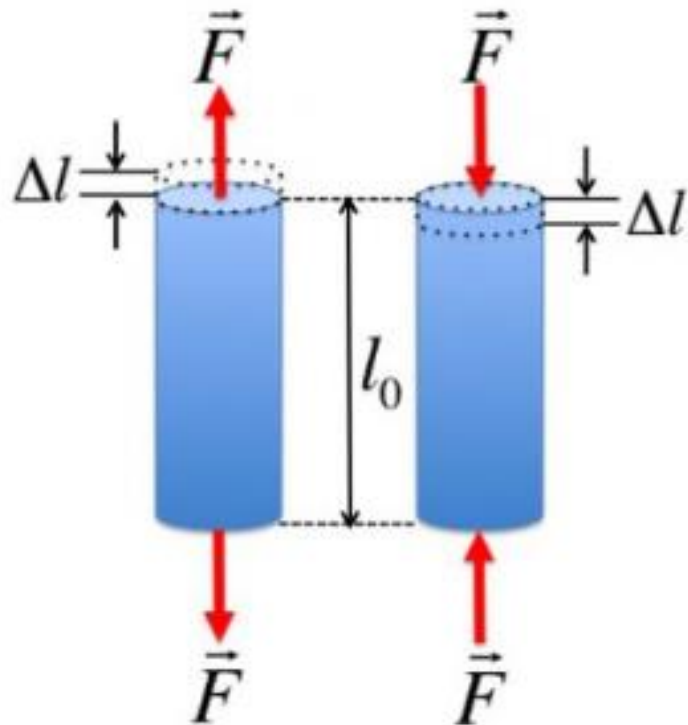
$$\sigma = \frac{F}{A}$$

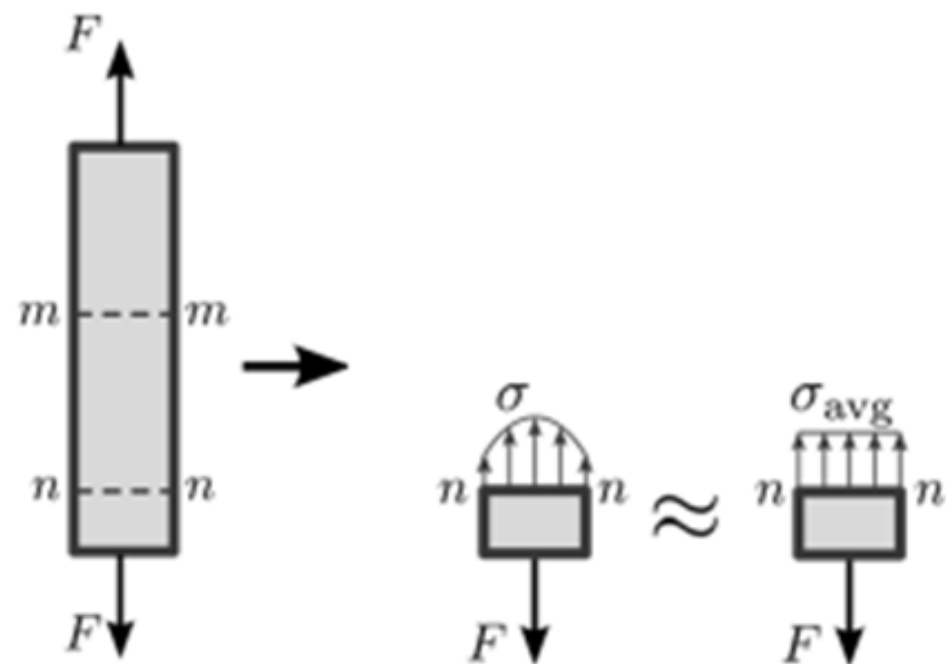
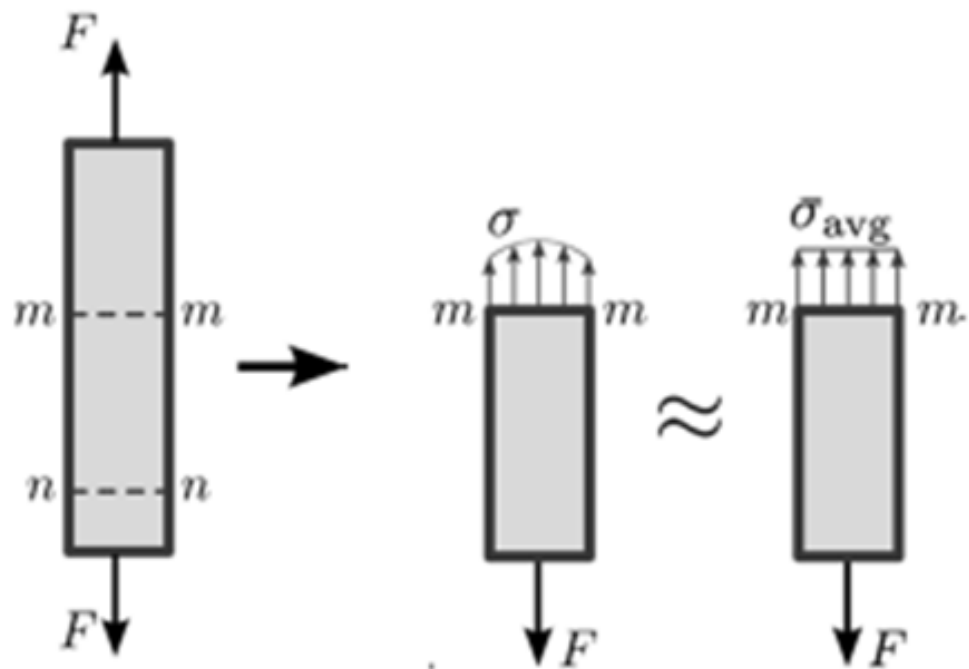
σ : تنش؛ F : نیروی وارده؛ A : مساحت سطح مقطعی که نیرو بر روی آن اعمال می‌شود

تنش در «سیستم بین‌المللی واحدها» (International System of Units) یا اصطلاحاً «SI»، با واحد نیوتن بر مترمربع (N/m^2) نشان داده می‌شود که معادل یک پاسکال (Pa) است.

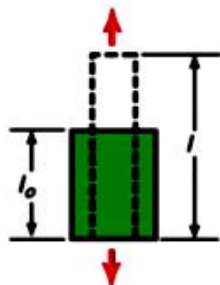


نمایش تصویری	نوع تنش	نوع بارگذاری
	تنش محوری (حالت کلی) تنش کششی (در صورت اعمال نیروی کششی) تنش فشاری (در صورت اعمال نیروی فشاری)	نیروی محوری
	تنش برشی عرضی	نیروی برشی

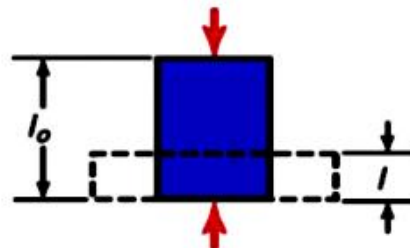




کرنش کششی (Tensile)

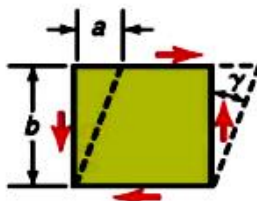


کرنش فشاری (Compressive)



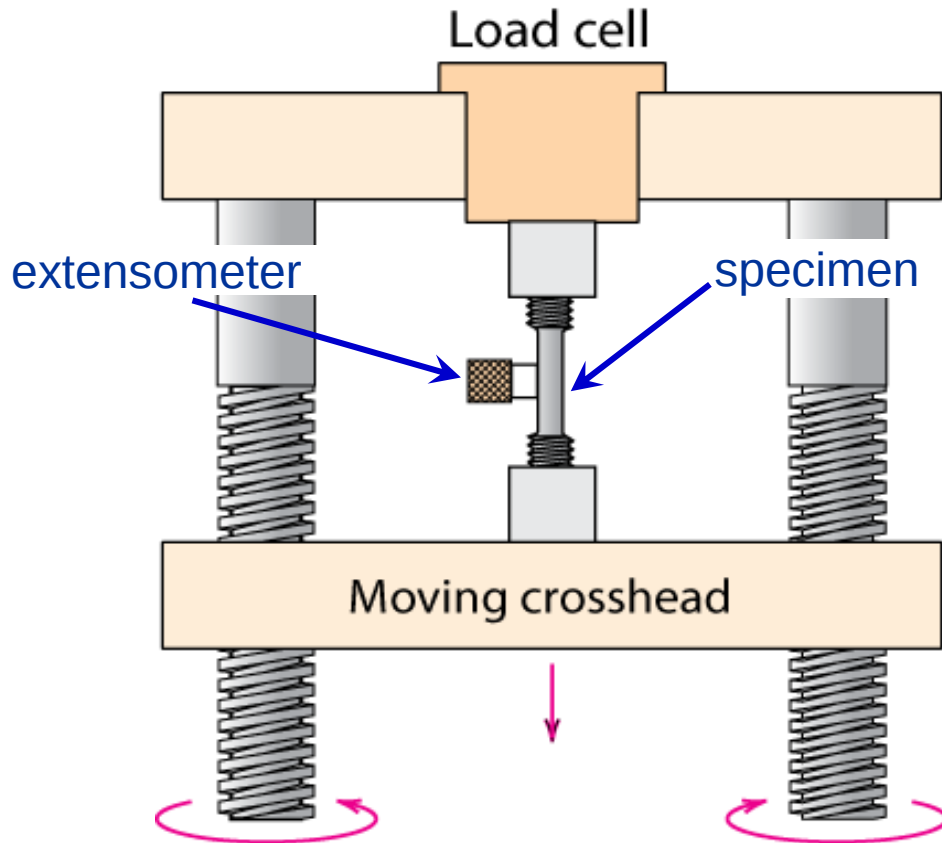
برشی (Shear)

مقدار آن برابر است با تانژانت زاویه تغییر یافتن حالت جسم در اثر تنش یا مقدار جابجایی سطحی که بر آن تنش برشی اعمال شده تقسیم بر فاصله همان سطح از نقطه‌ای که سطحی که جابجایی آن صفر است.



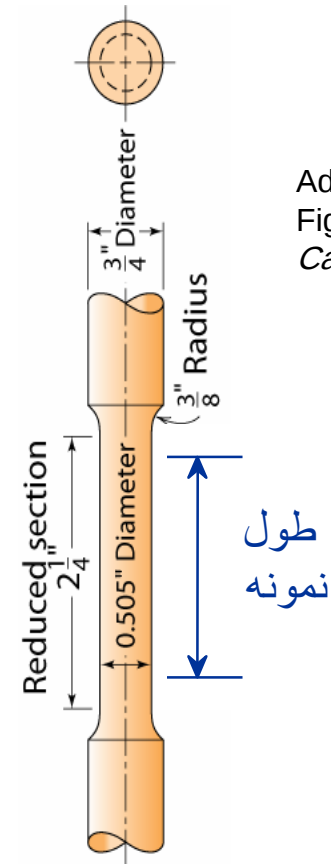
تست تنش - کرنش

ماشین مرسوم تست کشش

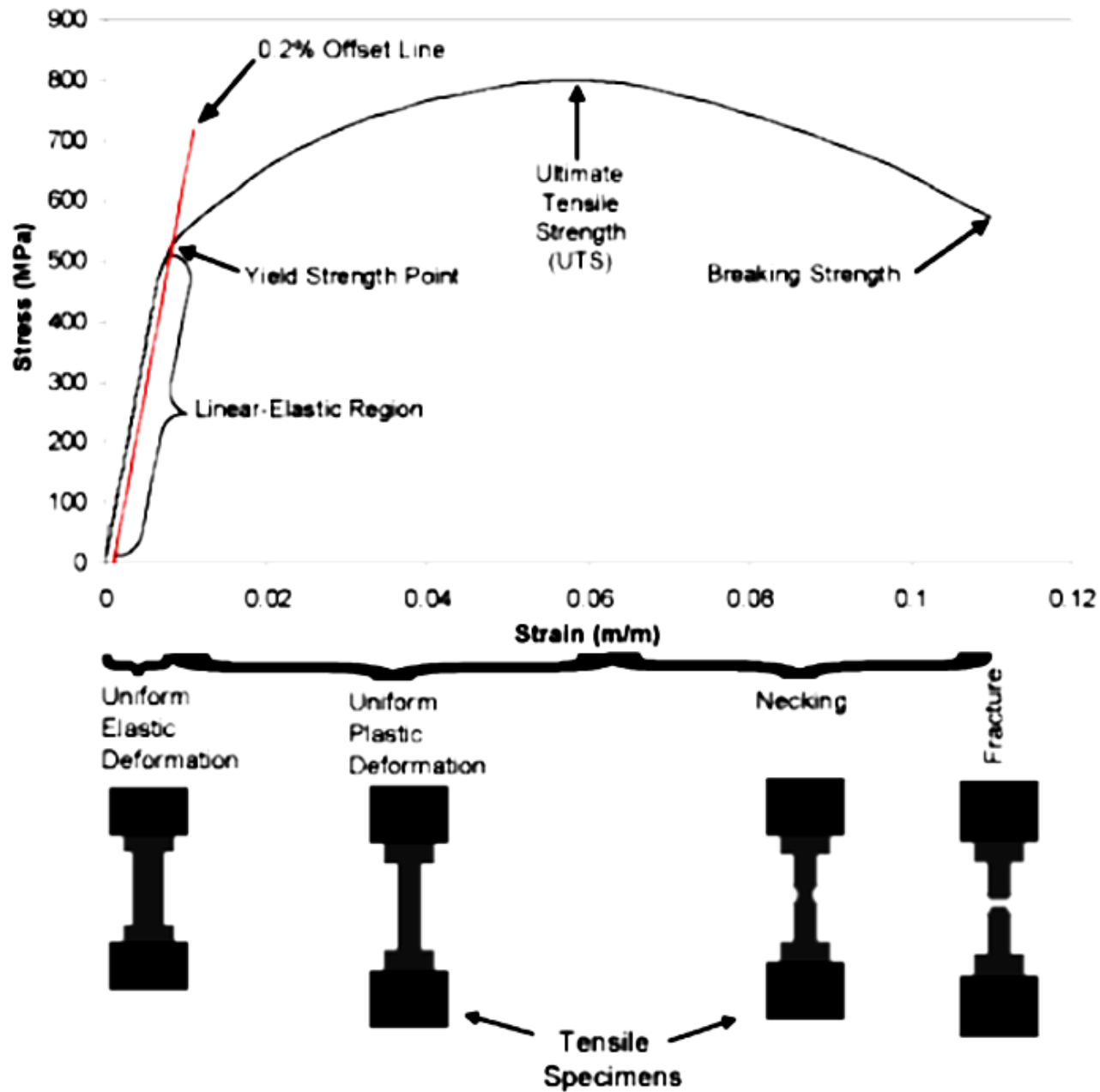


Adapted from Fig. 6.3, *Callister 7e*. (Fig. 6.3 is taken from H.W. Hayden, W.G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*, p. 2, John Wiley and Sons, New York, 1965.)

نمونه های مرسوم
کشش



Stress-Strain Curve

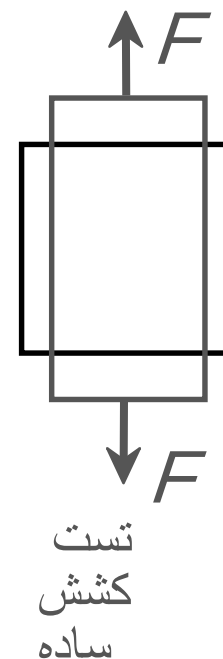
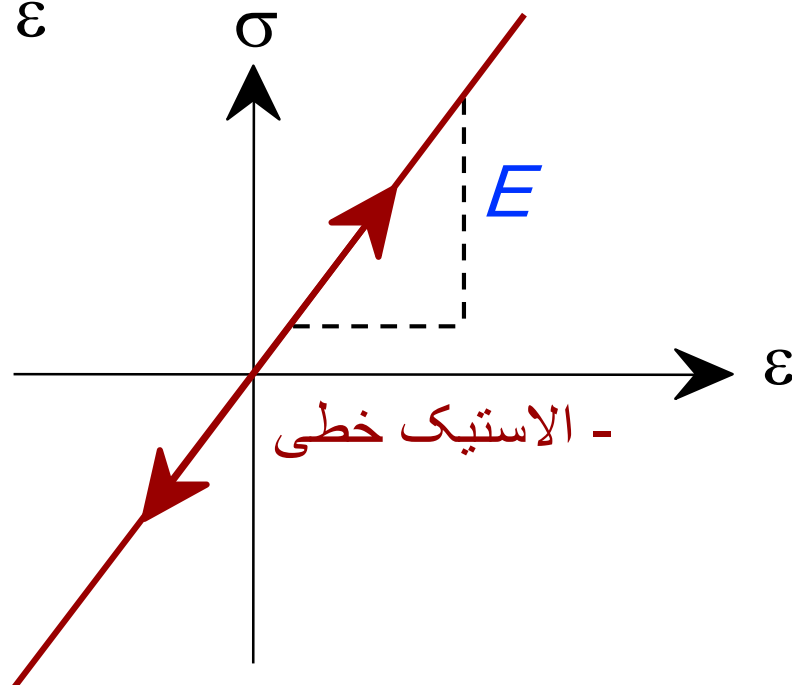


خواص الاستیک خطی

• مدول الاستیته (E): که به عنوان مدول یانگ شناخته می شود

قانون هوک:

$$\sigma = E \varepsilon$$



ضریب پواسون ν

ν : ضریب پواسون

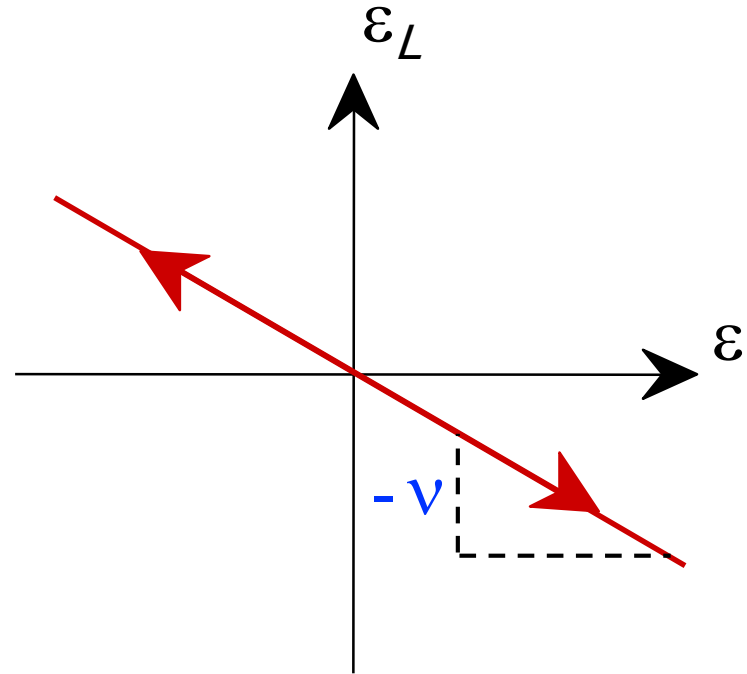
نسبت کرنش جانبی (عرضی) به کرنش محوری (طولی)
را نسبت پواسون یا ضریب پواسون گویند.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_L}{\varepsilon}$$

فلزات: $\nu \sim 0.33$

سرامیک ها: $\nu \sim 0.25$

پلیمرها: $\nu \sim 0.40$

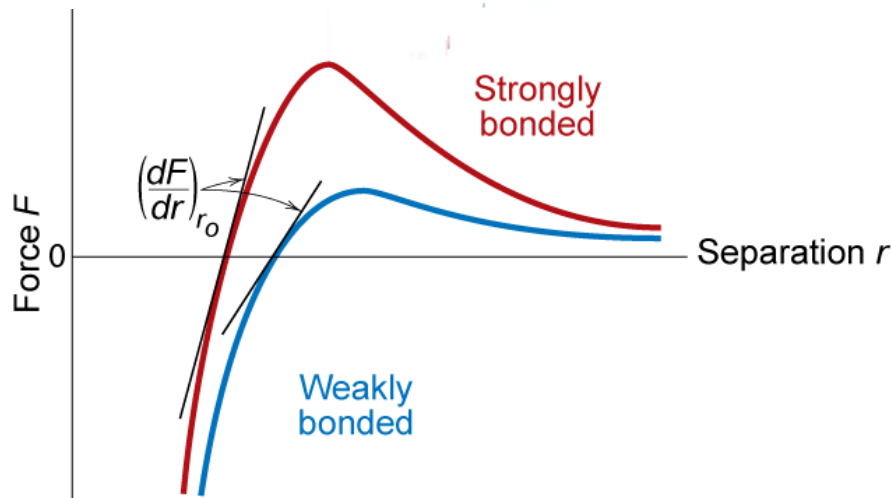


مدول الاستیته در مقیاس اتمی

- در مقیاس اتمی، تغییر شکل‌های الاستیک باعث کشیدگی یا فشردگی پیوندهای بین اتمی میشود و باعث تغییر فاصله اتمها میشود.
- هرچه نیروی بین اتمی قویتر باشد، تغییر فاصله بین اتمها سخت تر میشود و مدول الاستیک افزایش می یابد.
- مدول الاستیسیته متناسب است با شیب منحنی نیرو-فاصله در نقطه توازن

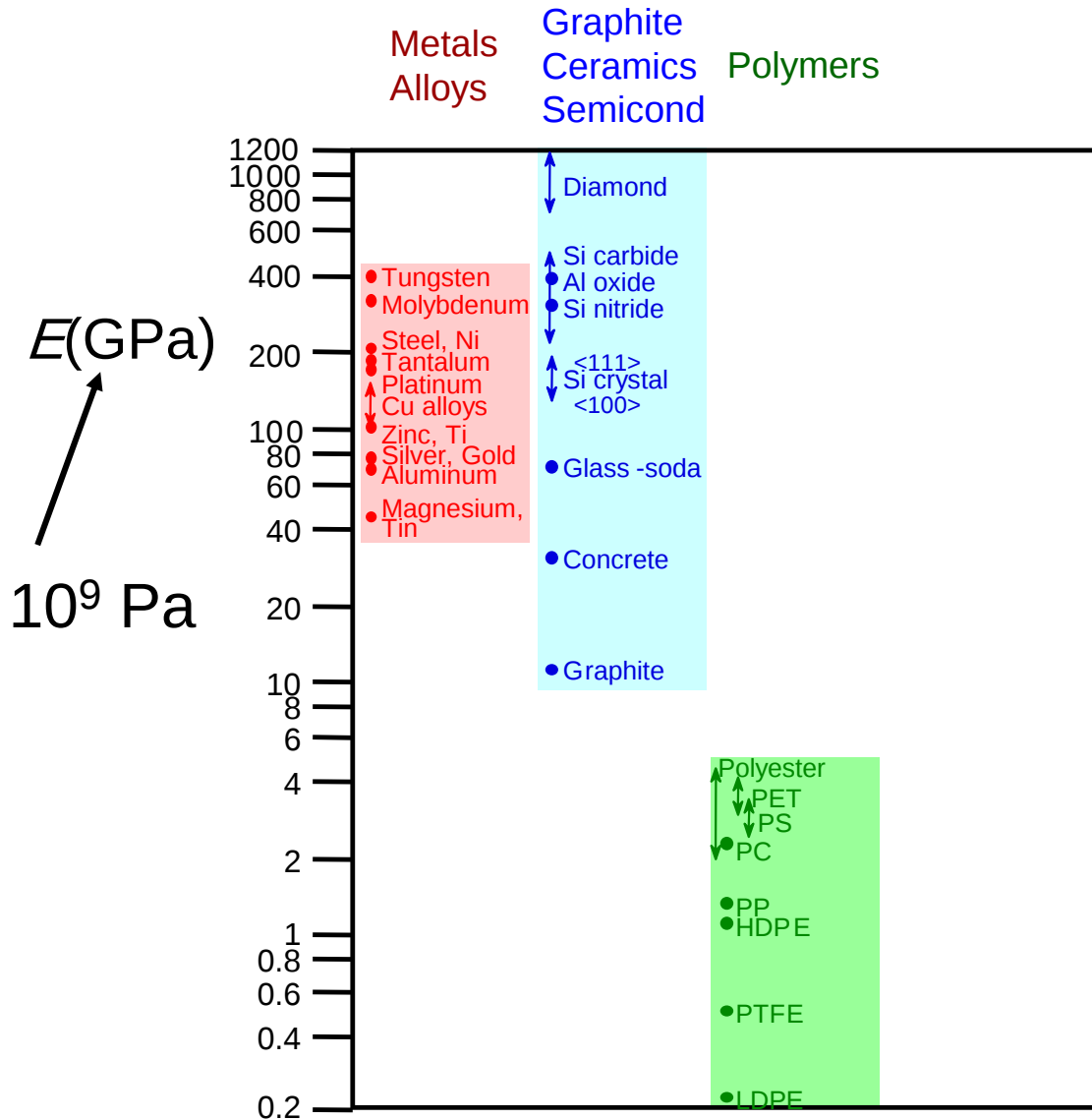
$$E \propto \left(\frac{dF}{dr} \right)_{r_0}$$

- مدول الاستیسیته سرامیکها در حد فلزات و پلیمرها پایین تر از آن است.
علت در نوع پیوندهای اتمی است.



Adapted from Fig. 6.7,
Callister 7e.

مقایسه های مدول یانگ

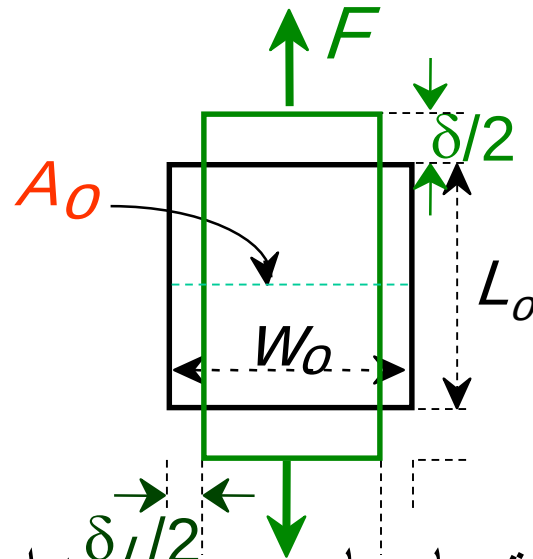


روابط الاستیکی خطی مفید

• کشش ساده:

$$\delta = \frac{FL_o}{EA_o}$$

$$\delta_L = -\nu \frac{FL_o}{EA_o}$$

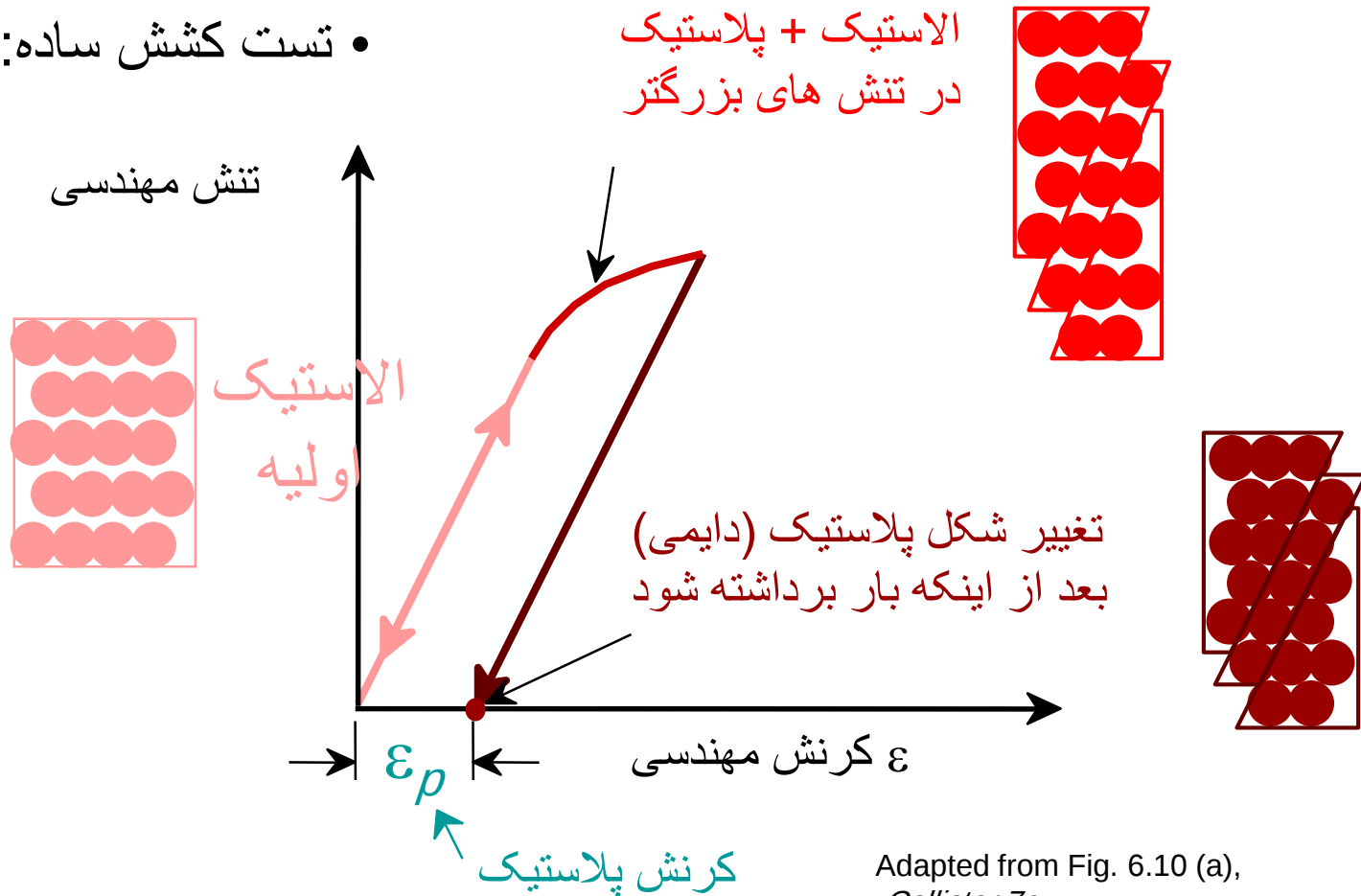


- مواد ، هندسه و پارامترهای بار دهی همه به اعوجاج کمک می کنند.
- مدول الاستیک بزرگتر، اعوجاج الاستیکی را مینیمم می کند.

تغییر شکل پلاستیک (دایمی)

($T < T_{melt}/3$ در دماهای پایین تر)

• تست کشش ساده:

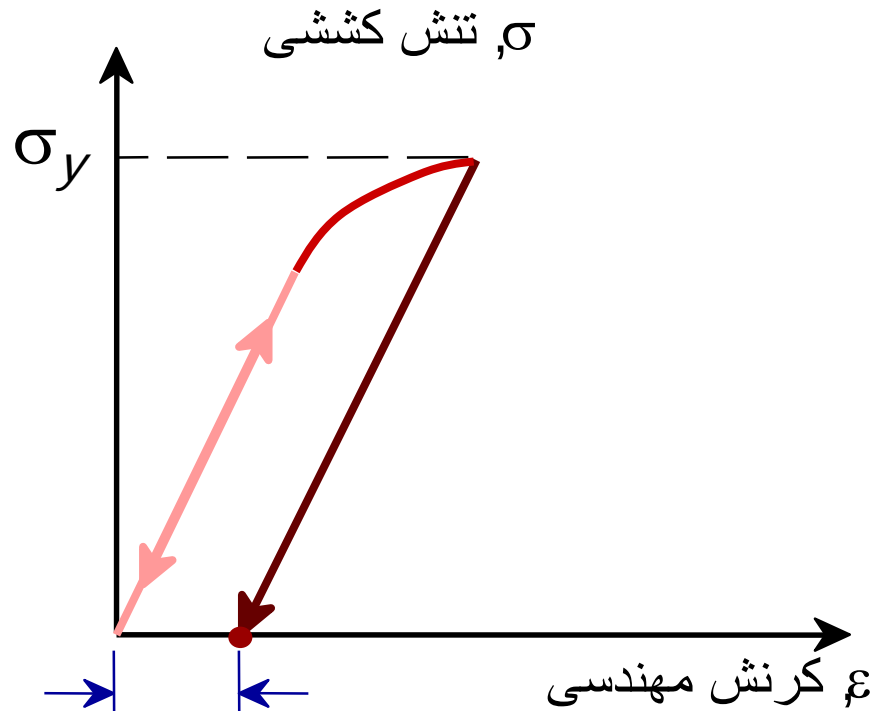


Adapted from Fig. 6.10 (a),
Callister 7e.

استحکام تسلیم σ_y

• تنش در جایی که تغییر شکل پلاستیک قابل توجه رخ می دهد

زمانی که $\epsilon_p = 0.002$



$\epsilon_p = 0.002$

استحکام تسلیم σ_y

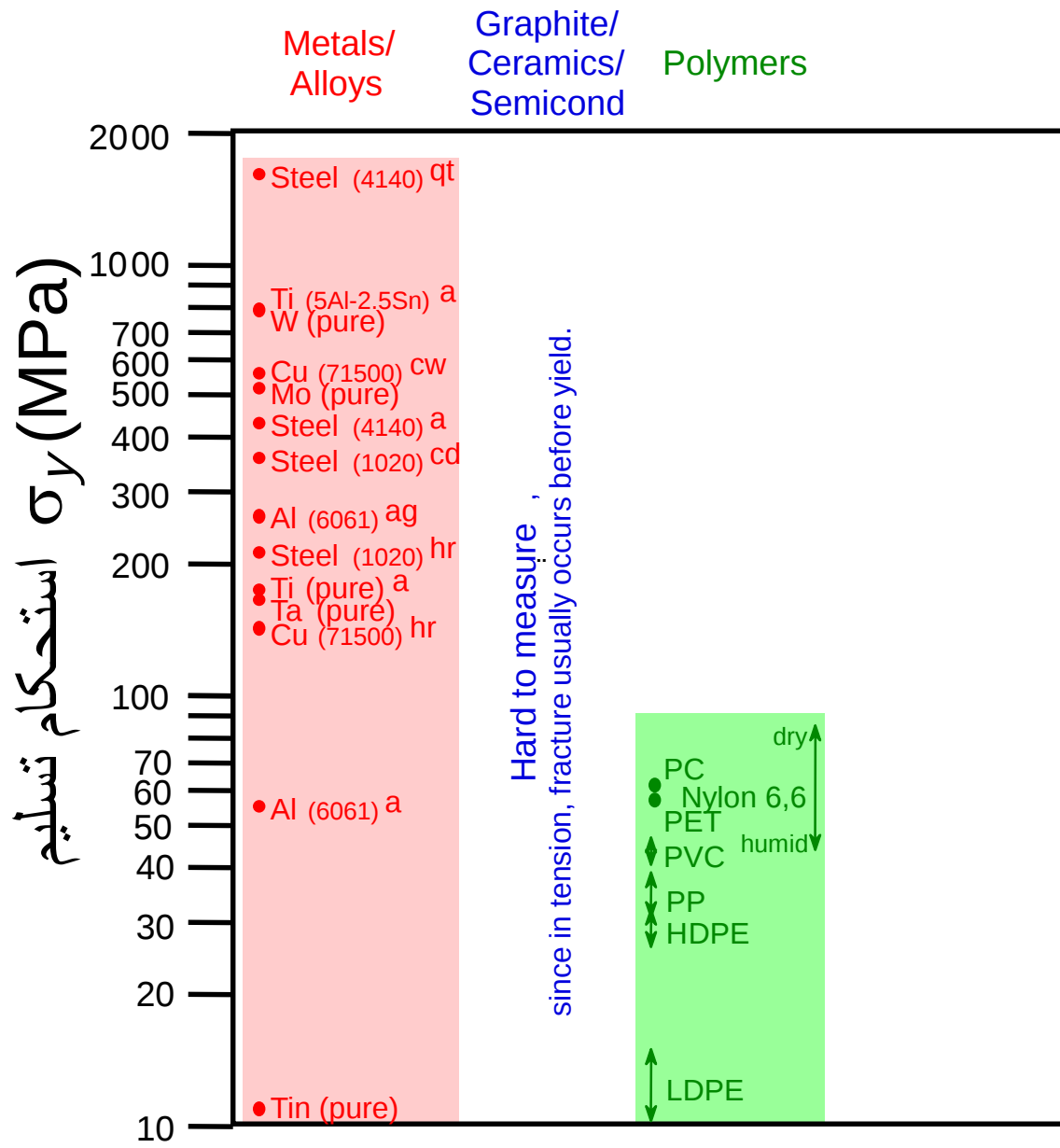
توجه: برای نمونه ۲ اینچی

$$\epsilon = 0.002 = \Delta z / z$$

$$\therefore \Delta z = 0.004 \text{ in}$$

Adapted from Fig. 6.10 (a),
Callister 7e.

مقایسه : استحکام تسلیم



مقادیر در دمای اتاق

Based on data in Table B4,
Callister 7e.

a = آنیل

hr = نورد گرم

ag = پیر سازی

cd = کشش سرد

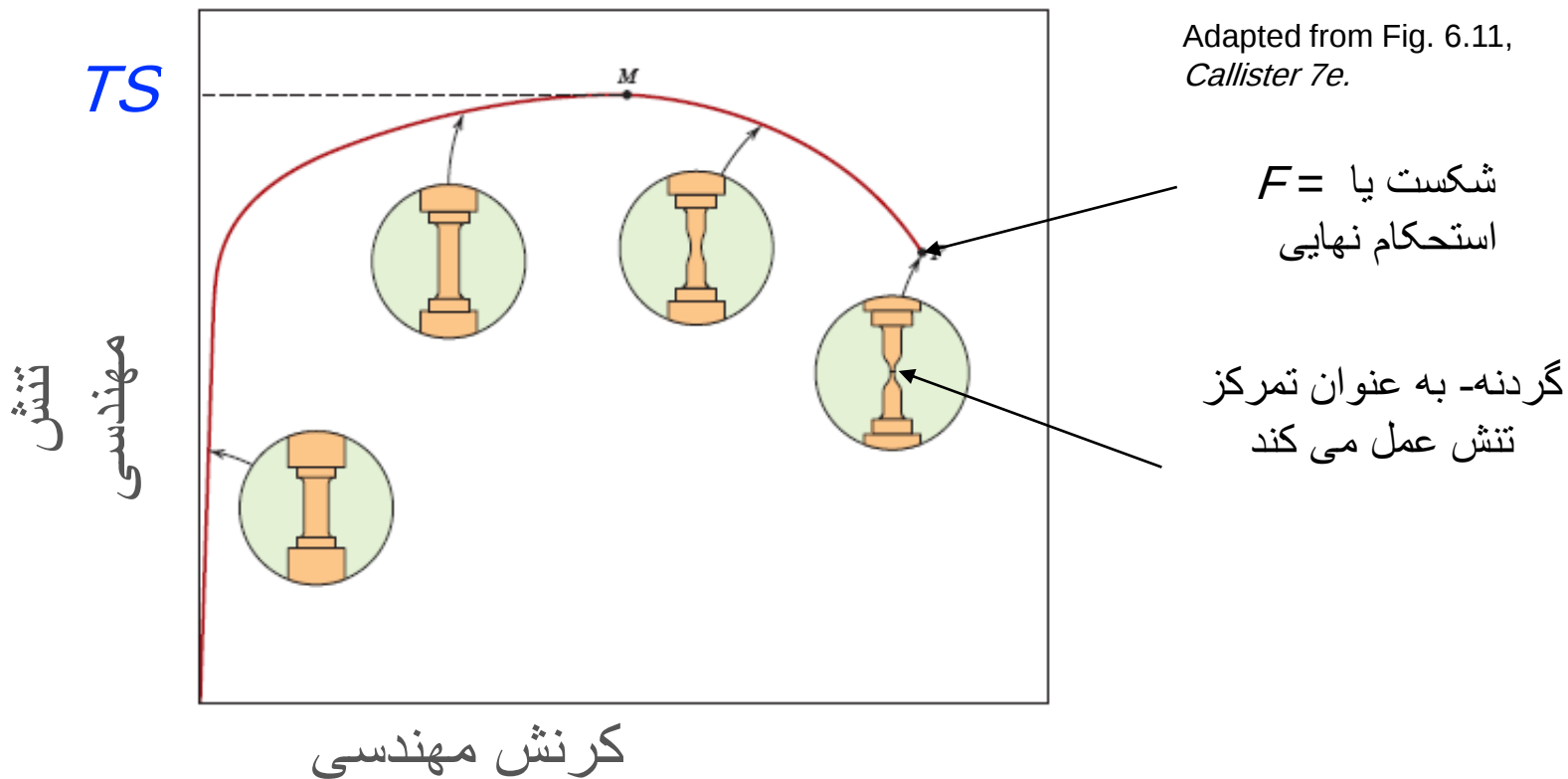
cw = کار سرد شده

qt = کوئنچ و تمپر شده



TS, استحکام کششی

- ماکزیمم تنش روی منحنی تنش – کرنش مهندسی



- فلزات : نقطه ماکزیمم زمانی هست که گردنه ای شدن شروع می شود

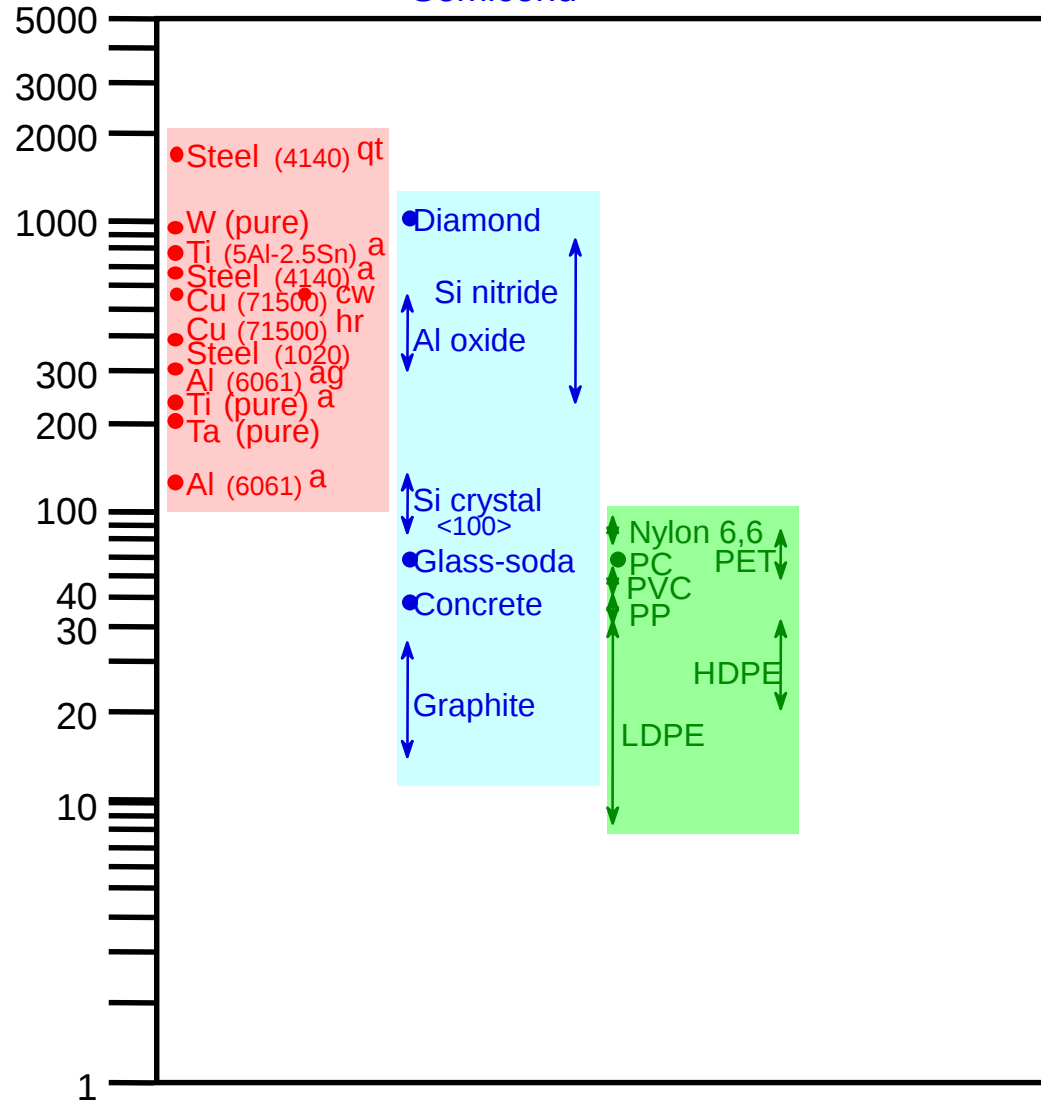
مقایسه: استحکام کششی

Metals/
Alloys

Graphite/
Ceramics/
Semicond

Polymers

کشش، استحکام، TS (MPa)



مقادیر در دمای اتاق

Based on data in Table B4,
Callister 7e.

a = آنیل

hr = نورد گرم

ag = پیر سازی

cd = کشش سرد

cw = کار سرد شده

qt = کوئنچ و تمپر شده

.

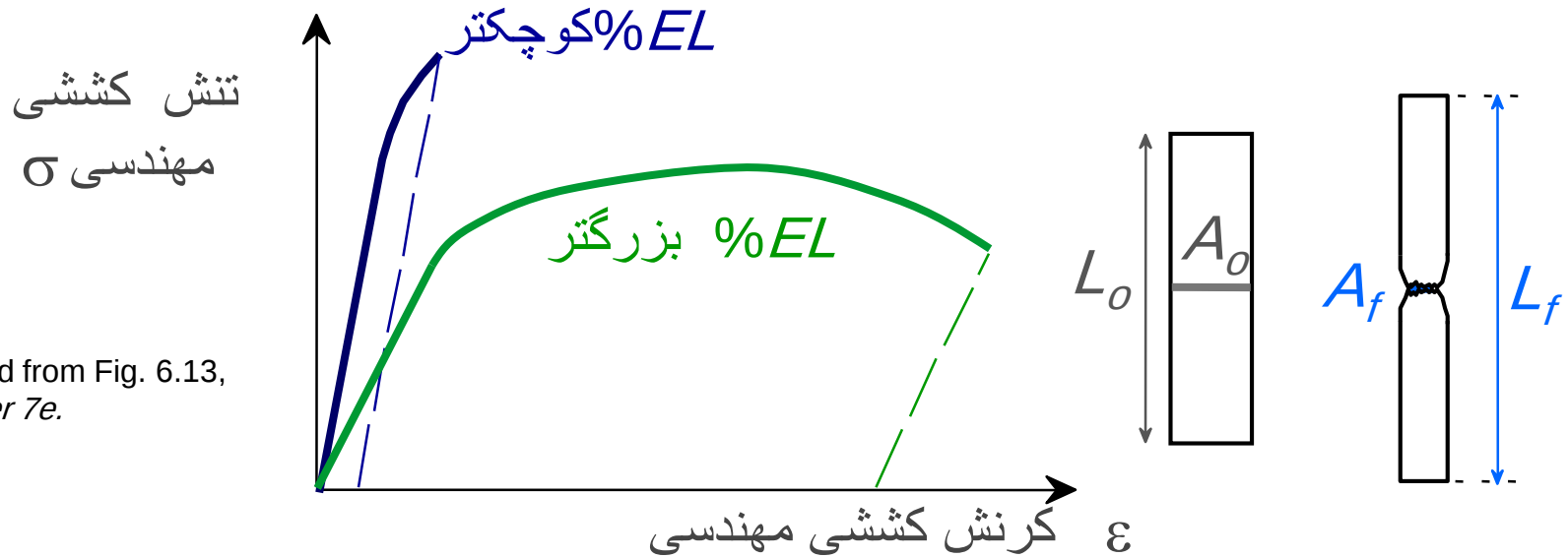


داکتیلیته

• شکست در کرنش کششی پلاستیک:

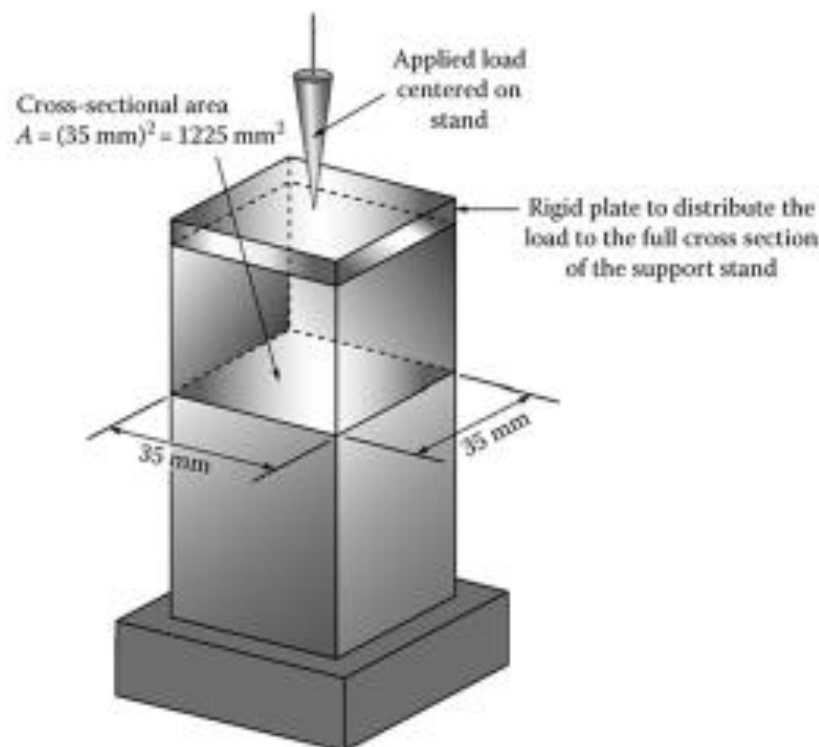
درصد ازدیاد طول

$$\%EL = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100$$



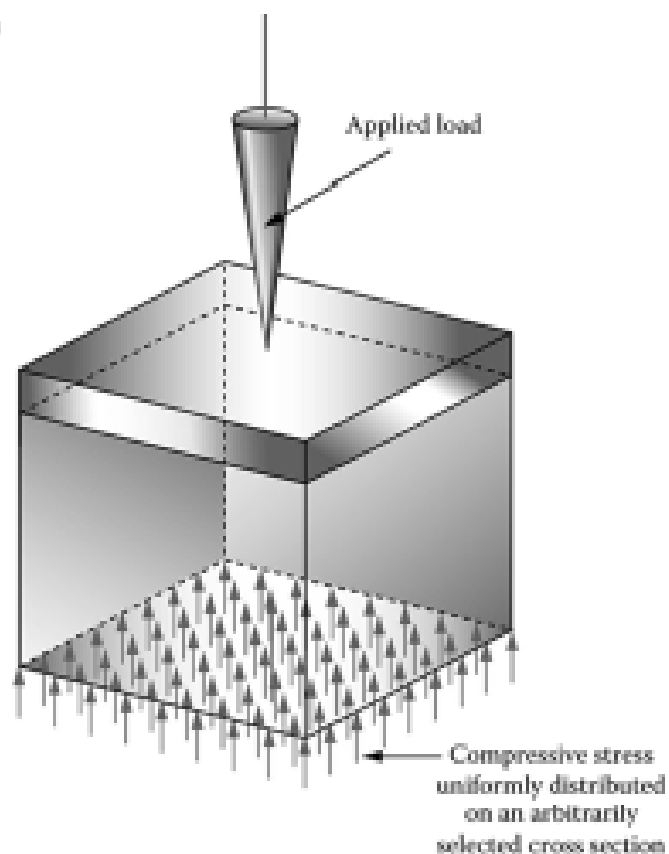
Adapted from Fig. 6.13,
Callister 7e.

در شکل نشان داده شده اگر نیروی محوری وارده برابر با $P=120\text{kN}$ باشد، تنش محوری را در صفحه نشان داده شده محاسبه کنید.



مثال ١

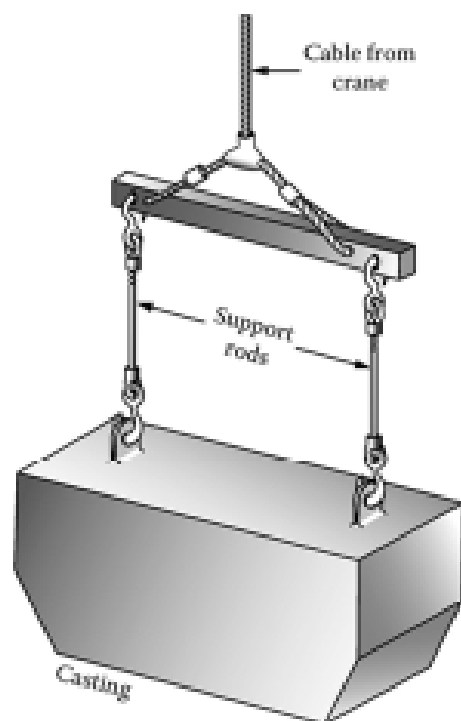
حل مساله:



$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{120 * 1000}{35 * 35} = 98 \frac{N}{mm^2} = 98 MPa$$

مثال ۰۲

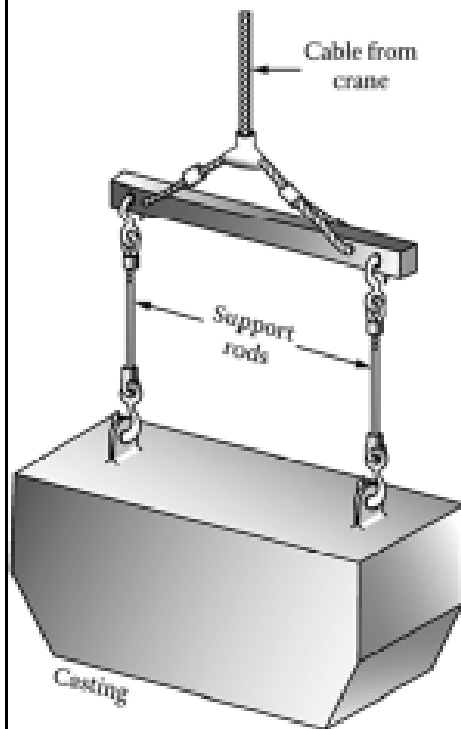
قالب ریخته گری به وزن 11.2 kN توسط ۲ میله به قطر ۱۲ میلیمتر به کابل اصلی جراثقال متصل است. جنس و ابعاد ۲ میله یکسان می باشد. مقدار تنش در هر میله را محاسبه کنید.



مثال ۲۰

حل مساله:

با توجه به مشابه بودن دو میله و تقارن کامل، نیروی وارده به هر میله برابر با نصف وزن قالب می باشد.

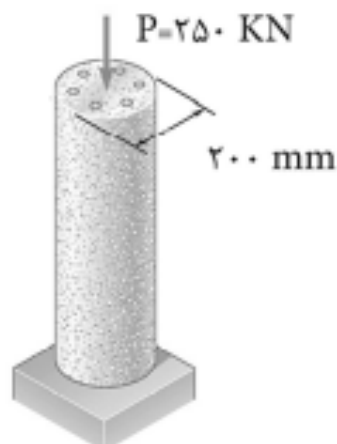


نیروی هر میله $\rightarrow F = \frac{W}{2} = \frac{11.2 * 1000}{2} = 5600 \text{ N}$

مساحت هر میله $\rightarrow A = \pi * \frac{d^2}{4} = \pi * \frac{12^2}{4} = 113 \text{ mm}^2$

تنش در هر میله $\rightarrow \sigma = \frac{F}{A} = \frac{5600}{113} = 49.5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 49.5 \text{ MPa}$

مثال ۰۳



ستونی کوتاه مطابق شکل روبه‌رو تحت تاثیر نیروی محوری $P=250\text{ KN}$ قرار دارد. مطلوب است محاسبه تنش در پای ستون (از وزن ستون صرف نظر شود).

حل مساله:

نیروی P فشاری است: $P = -250\text{ KN} = -250 \times 1000 = -250000\text{ N}$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times 200^2}{4} = 31400\text{ mm}^2$$

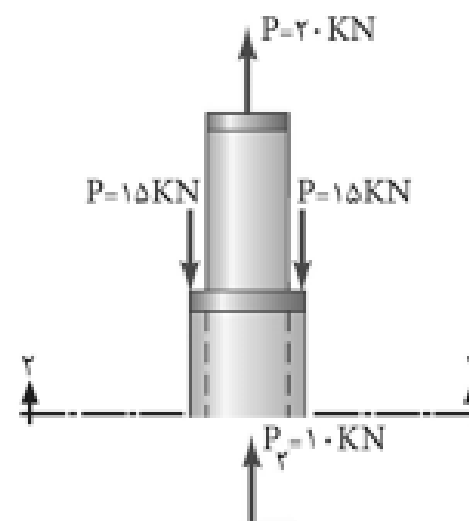
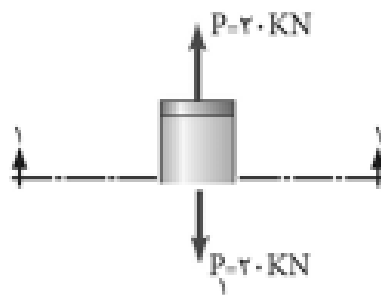
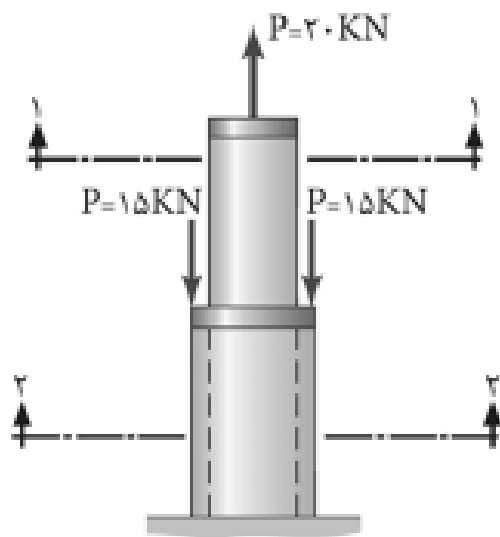
$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{-250000}{31400} \Rightarrow \sigma = -7/96 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ یا } \text{MPa}$$

علامت منفی نشانگر آن است که تنش محوری ایجاد شده فشاری می‌باشد.

57

مثال ٤

حل مساله:



مثال ۰۴

حل مساله:

الف) تنش در مقطع ۱-۱

$$\begin{cases} P = 20 \text{ KN} = 20000 \text{ N} \\ A = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{3/14 \times 50^2}{4} = 1962/5 \text{ mm}^2 \end{cases}$$

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} = \frac{20000}{1962/5} \Rightarrow \boxed{\sigma_1 = 10/19 \text{ MPa} \text{ کششی}}$$

ب) تنش در مقطع ۲-۲

با توجه به شکل برآیند نیروهای وارد به مقطع (۲-۲) برابر است با:

$$\begin{cases} P = -15 - 15 + 20 = -10 \text{ KN} = -10000 \text{ N} \\ A = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3/14 \times 80^2}{4} - \frac{3/14 \times 50^2}{4} = 3061/5 \text{ mm}^2 \end{cases}$$

$$\sigma_2 = \frac{P}{A} = \frac{-10000}{3061/5} \Rightarrow \boxed{\sigma_2 = -3/27 \text{ MPa} \text{ فشاری}}$$

مثال ۵

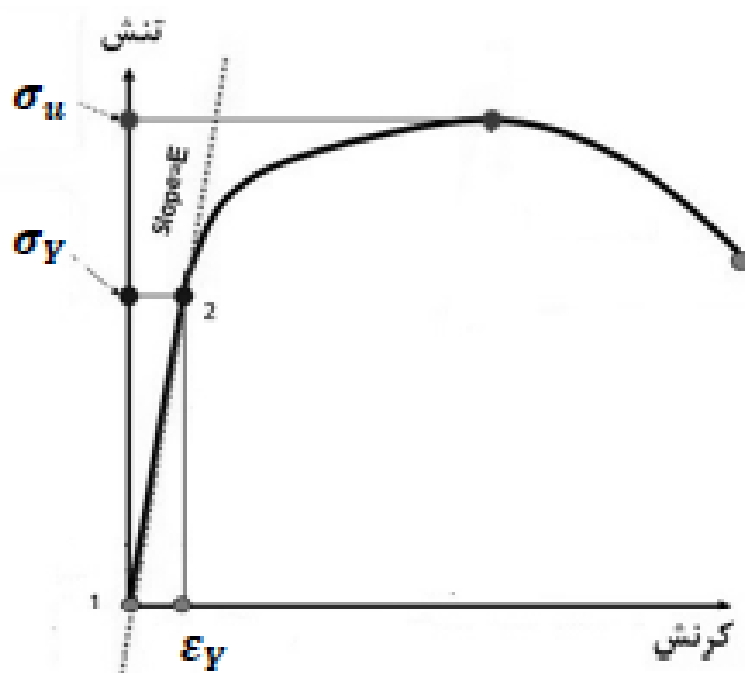
قطعه پیوسته ای مطابق شکل تحت تاثیر نیروی کششی P قرار گرفته است، هرگاه نیروی P را به آرامی افزایش دهیم، احتمال گسیختگی در کدام یک از نواحی a و b و c بیشتر است؟ چرا؟



مثال ۵

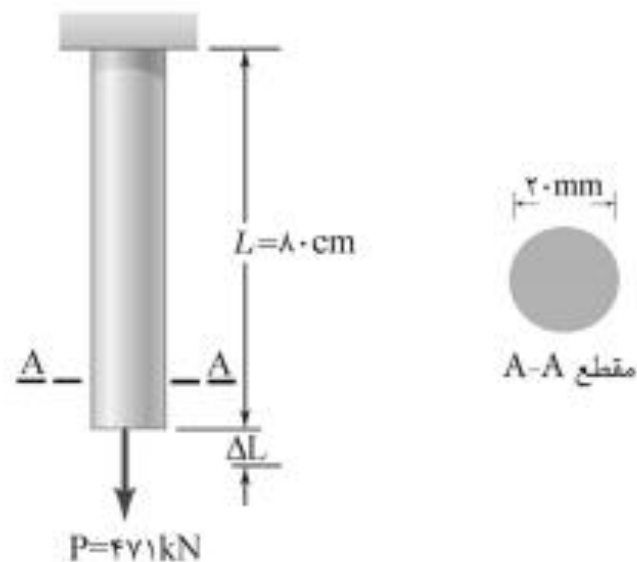
حل مساله:

با توجه به این که مقدار P در هر سه ناحیه ثابت است، با افزایش تدریجی نیروی P مطابق رابطه $\sigma = \frac{\pm P}{A}$ مقدار تنش در ناحیه C به دلیل سطح مقطع کوچک تر آن نسبت به نواحی a و b زودتر به تنشی می رسد که جسم دیگر قادر به تحمل آن نمی باشد.



مثال ۰۶

مطلوب است تغییر طول میله فولادی مطابق شکل زیر؛ اگر ضریب ارتجاعی میله $E = 2 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ باشد (از وزن میله صرف نظر می شود).



مثال ٥٠

حل مساله:

$$P = 471 \text{ KN} = 471000 \text{ N}$$

$$L = 80 \text{ cm} = 800 \text{ mm}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3/16 \times 2^2}{4} = 314 \text{ mm}^2$$

$$E = 2 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\Delta L = \frac{P \cdot L}{A \cdot E} = \frac{471000 \times 800}{314 \times 2 \times 10^5} \Rightarrow \boxed{\Delta L = 6 \text{ mm}}$$

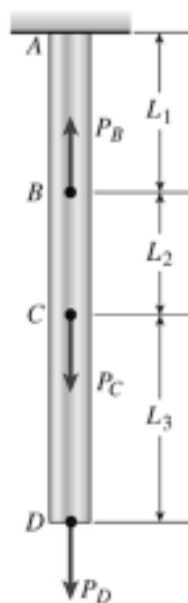
✓ چنانچه جسم دارای مقطع و یا جنس یکنواخت نباشد و یا بارگذاری در نقاط مختلف انجام شود در این صورت آن را به بخش های مختلف تقسیم نموده و تغییر طول هر بخش را مجزا محاسبه نمائیم.

✓ برای محاسبه تغییر طول نهایی جسم آن ها را با یکدیگر جمع جبری می نمائیم یعنی:

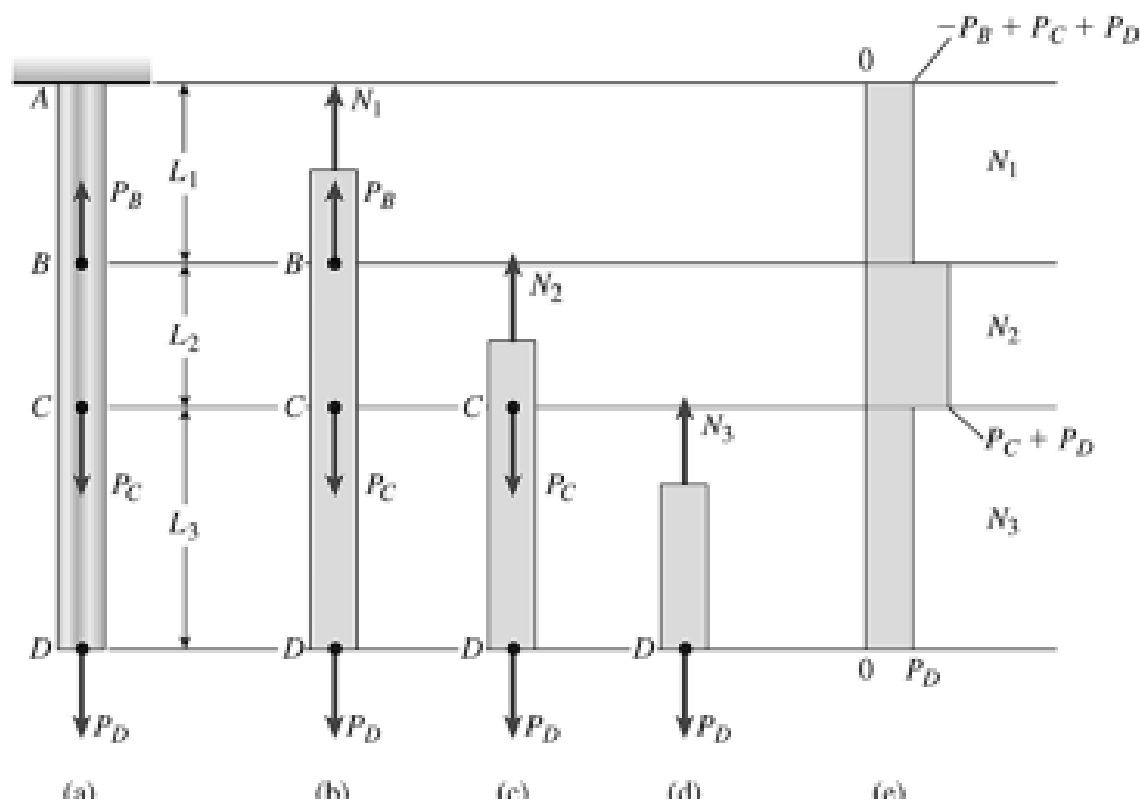
$$\Delta L = \sum_{i=1}^n \frac{P_i L_i}{A_i E_i}$$

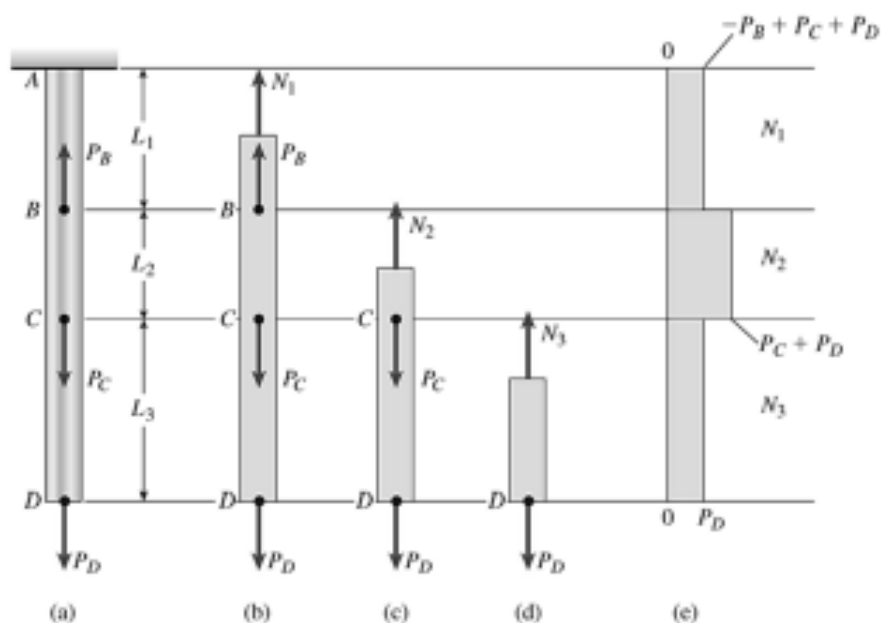
مثال ۰۷

در شکل نشان داده شده دو بار P_B و P_C در طول میله وارد شده اند. میزان تغییر شکل نهایی میله را محاسبه کنید.



در حل چنین مسائلی بایستی از یک نقطه از میله شروع به حرکت کرد و پس از هر گونه تغییر (تغییر مساحت یا اعمال نیرو)، مقدار نیروی داخلی را محاسبه نمود. در ادامه با محاسبه نیروی داخلی هر بخش میران تنش یا تغییر شکل آن بخش قابل محاسبه است.





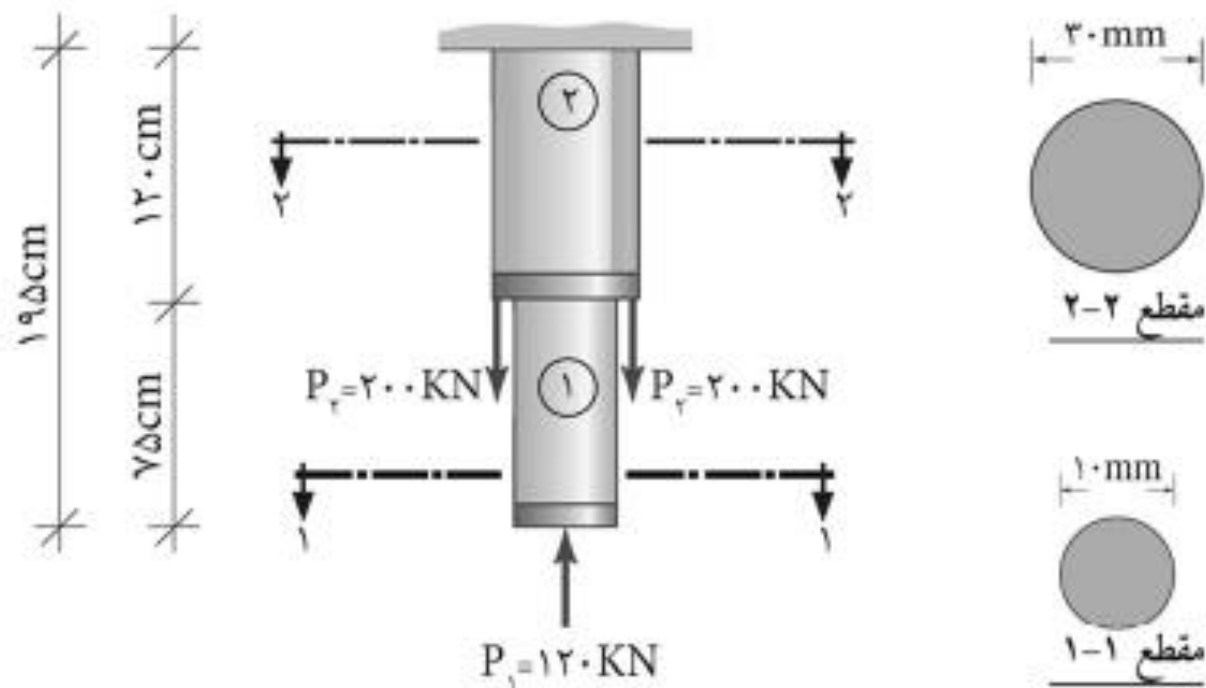
$$N_1 = -P_B + P_C + P_D \quad N_2 = P_C + P_D \quad N_3 = P_D$$

$$\delta_1 = \frac{N_1 L_1}{EA} \quad \delta_2 = \frac{N_2 L_2}{EA} \quad \delta_3 = \frac{N_3 L_3}{EA}$$

$$\delta = \sum_{i=1}^3 \delta_i = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$$

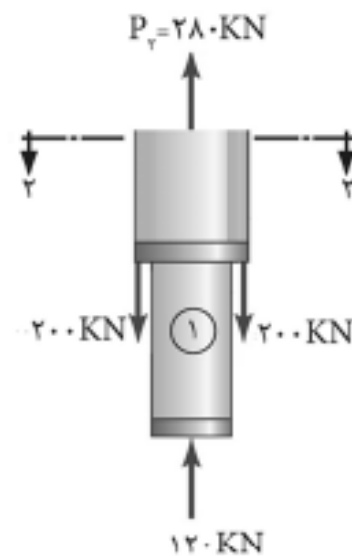
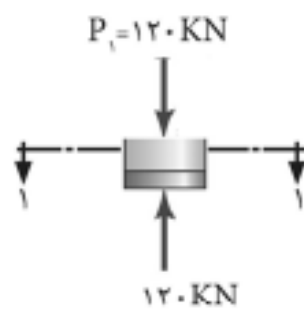
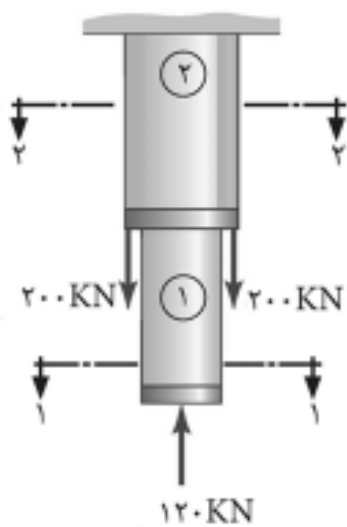
تغییر طول کلی جسم فولادی مطابق شکل زیر را محاسبه کنید.

$$(E = 2 \times 10^5 \frac{N}{mm^2})$$



مثال ٨ •

حل مساله:



حل مساله:

تغییر طول کلی جسم برابر است با جمع جبری تغییر طول هر یک از قطعات ۱ و ۲
یعنی:

$$\Delta L_t = \Delta L_1 + \Delta L_2$$

الف) تغییر طول قطعه شماره ۱:

$$P_1 = -120 \text{ KN} = -120000 \text{ N} \quad \text{نیروی } P \text{ فشاری می باشد.}$$

$$L_1 = 75 \text{ cm} = 750 \text{ mm}$$

$$A_1 = \frac{\pi D_1^2}{4} = \frac{3/16 \times 10^3}{4} = 78/5 \text{ mm}^2$$

$$E = 2 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\Delta L_1 = \frac{P_1 \cdot L_1}{A_1 \cdot E_1} = \frac{-120000 \times 750}{78/5 \times 2 \times 10^5}$$

$$\Delta L_1 = -5/73 \text{ mm} \quad \text{با توجه به علامت منفی، طول قطعه ۱ کاهش می یابد.}$$

مثال ۸

حل مساله:

ب) تغییر طول قطعه شماره ۲: $P_r = 200 + 200 - 120 = 280 \text{ KN} = 280000 \text{ N}$

$$L_r = 120 \text{ cm} = 1200 \text{ mm}$$

$$A_r = \frac{\pi D_r^2}{4} = \frac{3/14 \times 30^2}{4} = 706/5 \text{ mm}^2$$

$$E = 2 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\Delta L_r = \frac{P_r L_r}{A_r E_r} = \frac{280000 \times 1200}{706/5 \times 2 \times 10^5}$$

$$\Delta L_r = 2/38 \text{ mm}$$

افزایش طول قطعه ۲

تغییر طول کلی جسم برابر است با:

$$\Delta L_t = \Delta L_1 + \Delta L_r = -5/73 + 2/38 \Rightarrow \Delta L_t = -3/35 \text{ mm}$$

با توجه به علامت منفی، طول کل جسم کاهش می یابد.

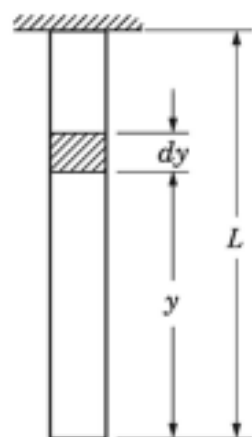
72



مثال ۹



میله منشوری نشان داده شده دارای مساحت A ، طول L و مدول الاستیسیته E می باشد. تغییر طول میله را تحت اثر وزن خود میله محاسبه کنید.



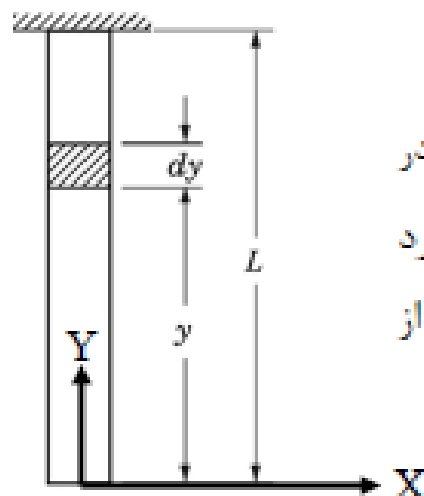
حل مساله:

اگر میله را به تکه های زیادی تقسیم کنیم، هر تکه تحت اثر وزن خود تغییر شکل می دهد. با جمع تغییرشکل تمامی تکه ها می توان تغییرشکل نهایی را محاسبه نمود.

$$\Delta = \sum \delta_i \longrightarrow \delta_i = \frac{P_i L_i}{E_i A_i}$$

یا

$$\Delta = \int d\delta \longrightarrow d\delta = d\left(\frac{P_i L_i}{E_i A_i}\right)$$



برای حل مساله، ابتدا دستگاه مختصات را مشخص می کنیم. در این مساله مبدا را در نقطه آزاد میله قرار می دهیم. سپس المانی به طول dy را در فاصله y از مبدا مورد بررسی قرار داده و پس از محاسبات مربوط به آن، محاسبات نهایی را با استفاده از انتگرال با تغییرات dy از صفر تا L انجام می دهیم.

$$\text{نیروی وارد به المان دیفرانسیلی} = \gamma * A * y$$

$$\text{تغییر طول المان دیفرانسیلی} = d\Delta = \frac{(\gamma A y) * dy}{AE}$$

$$\text{تغییر طول میله} = \Delta = \int_0^L d\Delta = \int_0^L \frac{(\gamma A y) * dy}{AE} = \frac{\gamma A}{AE} \int_0^L y dy = \frac{\gamma A}{AE} * \frac{L^2}{2}$$

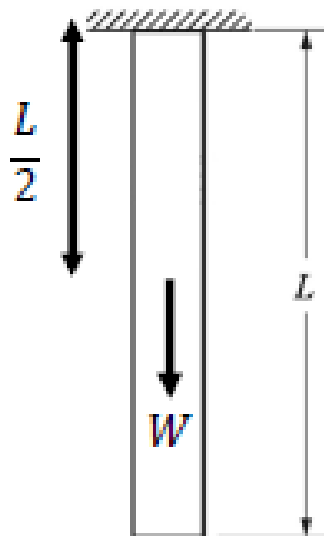
$$\Delta = \frac{\gamma A}{AE} * \frac{L^2}{2} = \frac{(\gamma AL) * L}{2AE} = \frac{WL}{2AE}$$

مثال ۰۹

حل مساله:

راه حل کوتاه

با توجه به منشوری بودن میله، وزن کل میله را محاسبه کرده و آنرا در محل مرکز جرم میله قرار می دهیم.



$$W = \gamma AL$$

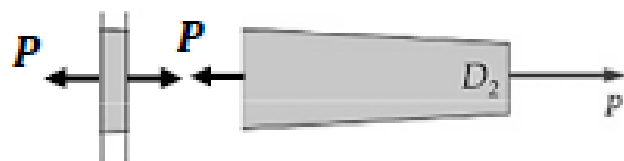
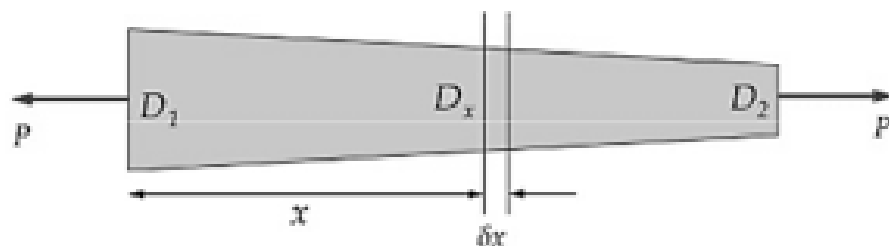
$$\Delta = \frac{PL}{AE} = \frac{W * \frac{L}{2}}{AE} = \frac{WL}{2AE}$$

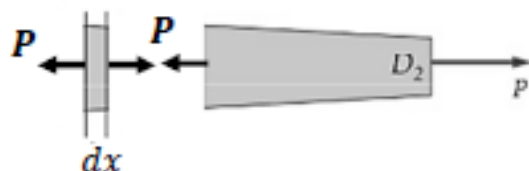
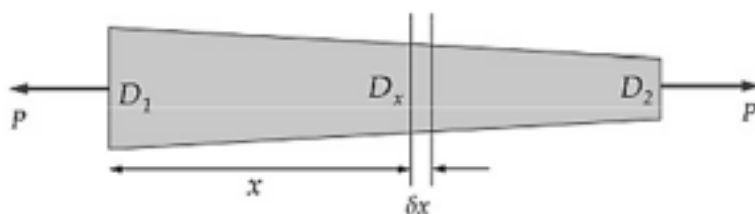
میله غیرمنشوری با مقطع دایره در شکل نشان داده شده و دارای طول L و مدول الاستیسیته E می باشد. تغییر طول میله را تحت اثر نیروی وارده محاسبه کنید.



حل مساله:

با توجه به ثابت نبودن مساحت میله بایستی از انتگرال گیری استفاده نمود.





$$\text{تغيير طول المان ديفرانسيلى} = d\Delta = \frac{P * dx}{A(x) * E}$$

$$\text{مساحت المان ديفرانسيلى} = \pi * \frac{(D_x)^2}{4}$$

$$\text{قطر المان ديفرانسيلى} = D_x = D_1 - \left(\frac{D_1 - D_2}{L} \right) * x$$

$$\text{تغيير طول ميله} = \Delta = \int_0^L d\Delta = \int_0^L \frac{P * dx}{A(x) * E} = \int_0^L \frac{P * dx}{\pi * \frac{(D_x)^2}{4} * E} = \frac{4P}{\pi E} \int_0^L \frac{dx}{(D_x)^2}$$

$$\Delta = \frac{4PL}{\pi E D_1 D_2}$$