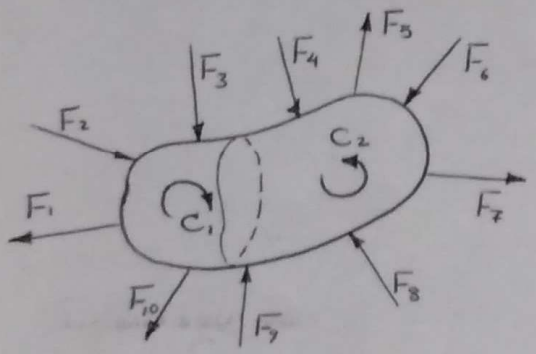
مقدمه

- علم مقاومت مصالح به بررسی مقاومت و استحکام مواد و مصالح تحت بارگذاری (مکانیکی، حرارتی و ...) تا یک نقطه معینی مانند شکست، سیلان (جاری شدن) و یا تغییر شکل معنی الاستیکی می پردازد. به عنوان مثال در طراحی تیرهای افقی یک ساختمان جایی که تیر تحت تأثیر نیروهای عرضی (عمود بر محور طولی تیر) قرار می گیرند، یک تغییر شکل یا جابجایی عرضی معینی تعیین کننده حداکثر مجاز مقدار نیروهای وارده بر تیر است. همچنین در طراحی وسایل اندازه گیری دقیق این تغییر شکل باید به صفر برسد. ولی حداکثر بار مجاز برای کابل یک جرثقیل می تواند نقطه شروع تغییر شکل دائمی و یا یک ضریب اطمینان نقطه پاره شدن کابل در نظر گرفته شود.

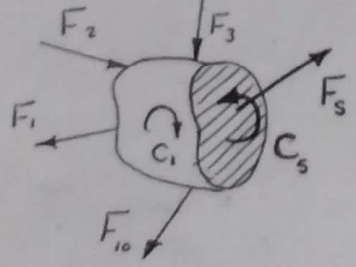
لازم به توضیح است مباحث درس استاتیک نقش اساسی به عنوان ابزار بررسی مسایل درس مقاومت مصالح دارند. لذا لازم است دانشجو قبل از شروع مباحث درس مقاومت مصالح، به عنوان مرور مطالب، نگاهی به مباحث تعادل، گشتاور حول نقطه و حول محور، گشتاور کوپل، جمان اول سطح، جمان دوم سطح و رسم دیاگرام نیروی برشی و ممان خمشی در تیر باشد.

نیروهای داخلی

- شکل (۱-۱) را به عنوان جسم در حال تعادل، در نظر می گیریم. اگر این جسم، در مقطع نشان داده شده، برش بخورد (شکل ۲-۱) برای این که در حال تعادل باشد و هست، حتماً نیروهای داخلی در این مقطع وجود خواهد داشت. که می تواند نیرو و یا کوپل و یا هر دو باشد. (F_s و C_s). نیروی F_s اگر نسبت به سطح مقطع مایل باشد، می تواند دارای مولفه عمود بر سطح و مولفه مماس بر سطح باشد، که هرکدام دارای یک اثر خاص خود هستند که در مباحث بعدی به آنها اشاره خواهد شد.

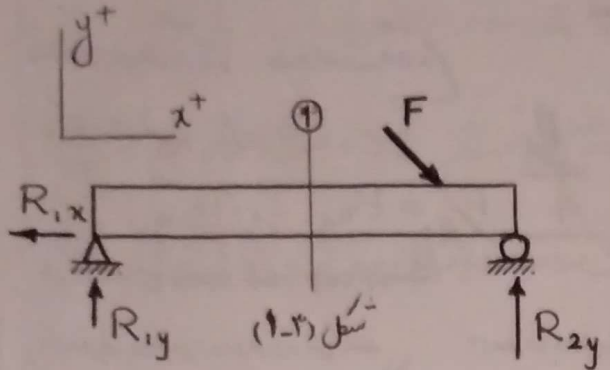


شکل (۱-۱)



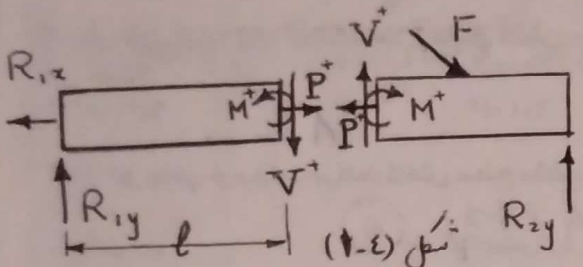
شکل (۲-۱)

علامت قراردادی نیروهای داخلی در حالت دو بعدی :



شکل (۱-۴)

- در شکل مقابل که تحت بارگذاری و در حال تعادل می باشد ، اگر در نقطه ① یک مقطع فرضی در قطعه ایجاد شود ، در مقطع مذکور جهت خط تعادل نیروهای داخلی باید در نظر گرفته شود.



شکل (۱-۴)

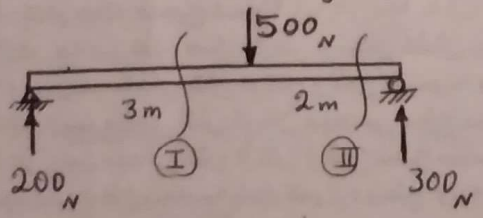
در قطعه سمت چپ که در مقطع ① نیروی محاسل برسطح با حرف V ، نیروی عمود برسطح با حرف P و گشتاور وارد برسطح با حرف M نشان داده شده است ، که جهات هر کدام از آنها ، جهات مثبت ، در این مقطع را نشان می دهد که قطعه بریده شده در سمت چپ مقطع است . برای قطعه سمت راست جهات عکس M, V, P نشان داده شده در قطعه سمت چپ ، جهات مثبت قراردادی هستند .

لازم به توضیح است که در نوشتن معادلات تعادل برای هرکدام از این قطعه ها ، جهات مثبت و منفی هر بردار (نیرو یا گشتاور) نسبت به جهات محورهای مختصات دو بعدی علامت گذاری خواهند شد. به عنوان مثال در نوشتن معادله تعادل برای قطعه سمت چپ اگر محورهای مختصات x و y مطابق شکل بالا باشند خواهیم داشت :

$\Sigma F_x = 0 \qquad -R_{1x} + P = 0$

$\Sigma F_y = 0 \qquad R_{1y} - V = 0$

$\Sigma M = 0 \qquad -l(R_{1y}) + M = 0$



شکل (۱-۵)

ملاحظه می شود ، جهت نیروی برشی V با اینکه در مقطع سمت چپ به سمت پایین است ولی می گوییم ، نیروی برشی در این مقطع مثبت است .

بنابراین در شکل (۱-۵) اگر تیر از مقطع I بریده شود دارای نیروی برشی +200 (در مقطع سمت چپ به سمت پایین و در مقطع سمت راست به سمت بالا) خواهد بود.

و اگر تیر از مقطع II بریده شود، دارای نیروی برشی -300 (در مقطع سمت چپ به طرف بالا و در مقطع سمت راست به سمت پایین) خواهد بود.

تنش (stress)

نسبت نیرو به سطح مقطع یا تو بر نیرو در واحد سطح را تنش گویند. واحد تنش در سیستم SI، نیوتن بر متر مربع ($\frac{N}{m^2}$) یا پاسکال (Pa) است ولی از آنجا که تنش متعلقه توسط اکثر فلزات در مقیاس پاسکال عدد بزرگی است لذا از واحد بزرگتر، مگا پاسکال (MPa) استفاده می‌شود.

واحد دیگری در سیستم انگلیسی استفاده می‌شود Psi (پوند بر اینچ مربع) است که مقیاس بزرگتر از آن با علامت ksi (کیلو پوند بر اینچ مربع) نشان داده می‌شود.

پاسکال: مقدار نیرویی است که بر حسب نیوتن به یک متر مربع وارد می‌شود.

مگا پاسکال: " " " " " " " میلی متر مربع وارد می‌شود.

Psi: مقدار نیرویی است (بر حسب پوند نیرو) که بر واحد سطح (بر حسب اینچ مربع) وارد می‌شود.

ksi: " " " (" " کیلو پوند) " " " (" " " ") " "

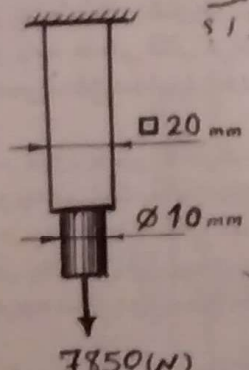
$1\,MPa = 10^6\,Pa$, $1\,ksi = 10^3\,Psi$, $1\,Psi \cong 0.007\,MPa$, $1\,Psi \cong 6898\,Pa$

تنش قایم: اگر نیروی وارده بر یک سطح مقطع عمود بر آن باشد، تنش به وجود آمده در سطح مقطع را قایم گویند. (σ)

تنش برشی: اگر نیروی وارده بر یک سطح مقطع مماس بر آن باشد، تنش به وجود آمده را برشی گویند. (τ)

علامت σ (سیگما) نشانگر تنش قایم و علامت τ (تاو) نشانگر تنش برشی است.

مثال (۱-۱): در میله دو مقطعی شکل مقابل مقدار حداکثر تنش قایم چند MPa و چند Psi است؟

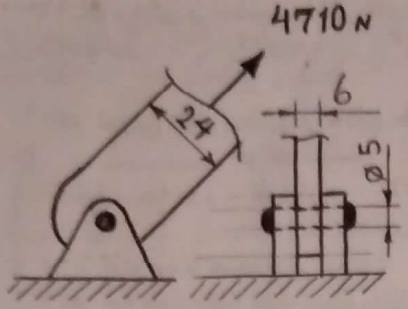


مساحت سطح مربعی $= A_1 = 400\,mm^2$

مساحت سطح دایره‌ای $= A_2 \cong 78.5\,mm^2$

$$\sigma_1 = \frac{7850}{400} = 19.625\,MPa \quad , \quad \sigma_2 = \frac{7850}{78.5} = 100\,MPa$$

$$\sigma_{max} = 100\,MPa \cong 14285.7\,Psi$$



مثال (۲-۱) : تنش قایم در میله با مقطع مستطیل و تنش برشی در پین تکیه‌گاه را بدست آورید.

$$\sigma_{min} = \frac{4710}{(24 \times 6)} = 32.71 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max} = \frac{4710}{(24-5) \times 6} = 41.3 \text{ MPa}$$

$$\tau = \frac{4710}{2[(3.14 \times 5^2)/4]} = 120 \text{ MPa}$$

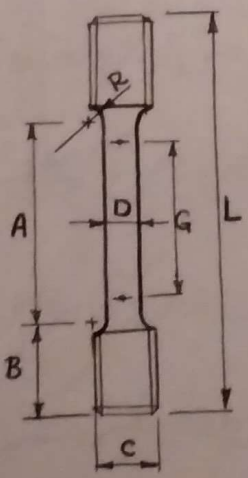
لازم به ذکر است که تنش قایم اگر کششی باشد با علامت مثبت و اگر فشاری باشد با علامت منفی نشان داده می‌شود. به عنوان مثال پایه‌ای میزی که روی آن وسیله‌ای گذاشته شده است تنش فشاری را تحمل می‌کند، یا دو قطعه که توسط یک پیچ به هم متصل می‌شوند تحت تنش فشاری هستند و یا ستون‌های بتونی یا فولادی ساختمان در ازای تحمل وزن طبقات بالا تحت تنش فشاری قرار میگیرند.

آزمایش کشش :

- جهت به دست آوردن خواص مکانیکی مواد از یک نمونه مصالح، نمونه‌ای از آن را تحت کشش قرار می‌دهند و مشاهده می‌کنند با هر نیرو مقدار تغییر طول میله نمونه ثبت می‌شود و این کار تا مرحله گسیختن یا شکست نمونه ادامه پیدا می‌کند. نتایج به دست آمده از چنین آزمایشی به صورت منحنی تنش کرنش (تنش در محور عمودی و کرنش در محور افقی) رسم می‌شود.

شرایط محیطی و نحوهٔ اعمال بار روی نتایج آزمایش تأثیر دارد. هرچه دما افزایش یابد باعث نرم شدن نمونه خواهد شد و نمونه رفتار مکانیکی مواد نرم را از خود نشان خواهد داد و در صورت کاهش دما رفتار مکانیکی نمونه به رفتار مواد ترد نزدیک خواهد شد. سرعت اعمال بار به نمونه باید شبه حالت استاتیکی باشد که چنین حالتی را اصطلاحاً ایزو استاتیک گویند.

یک نمونه آزمایش کشش مطابق استاندارد (ASTM) در شکل زیر آمده است.



شکل (۲-۱)

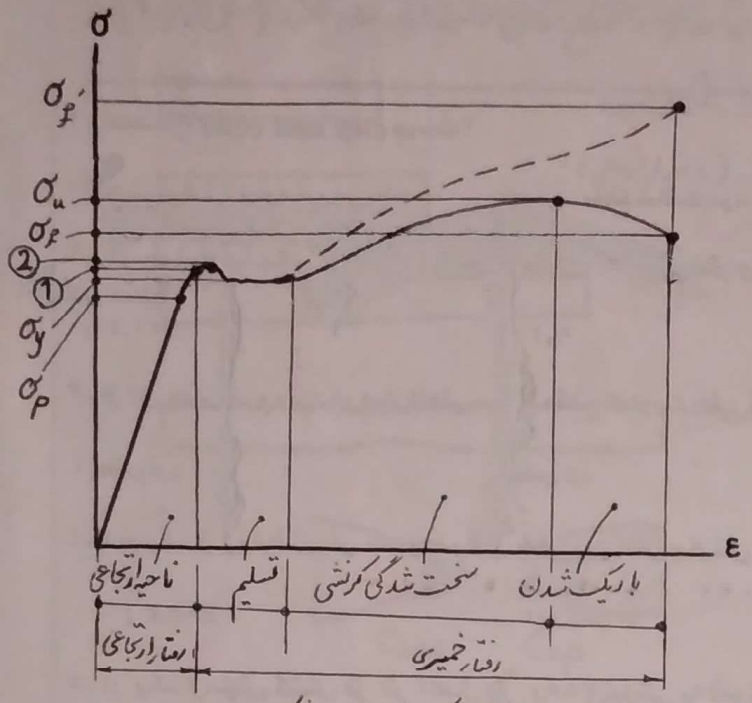
A = 60 mm
B = 35 mm
C = 20 mm
D = 12.5 ± 0.25 mm
L_o = G = 50 ± 0.1 mm
R = 10 mm
L = 125 mm

لازم به ذکر است در محاسبه تنش، سطح محاسبه شده، سطح اولیه می‌باشد. که این امر باعث می‌شود تنش محاسبه شده، همواره کوچکتر از تنش واقعی که در آن سطح محاسبه شده، سطح مقطع مشاهده با نیروی وارده در

هر لحظه است باشد و این امر باعث می‌شود دو نوع منحنی تنش - کرنش ۱- واقعی ۲- مهندسی به دست آید که در محاسبات

مهندسی از منحنی تنش - کرنش مهندسی استفاده می‌شود.

نمودار تنش - کرنش فولاد معمولی



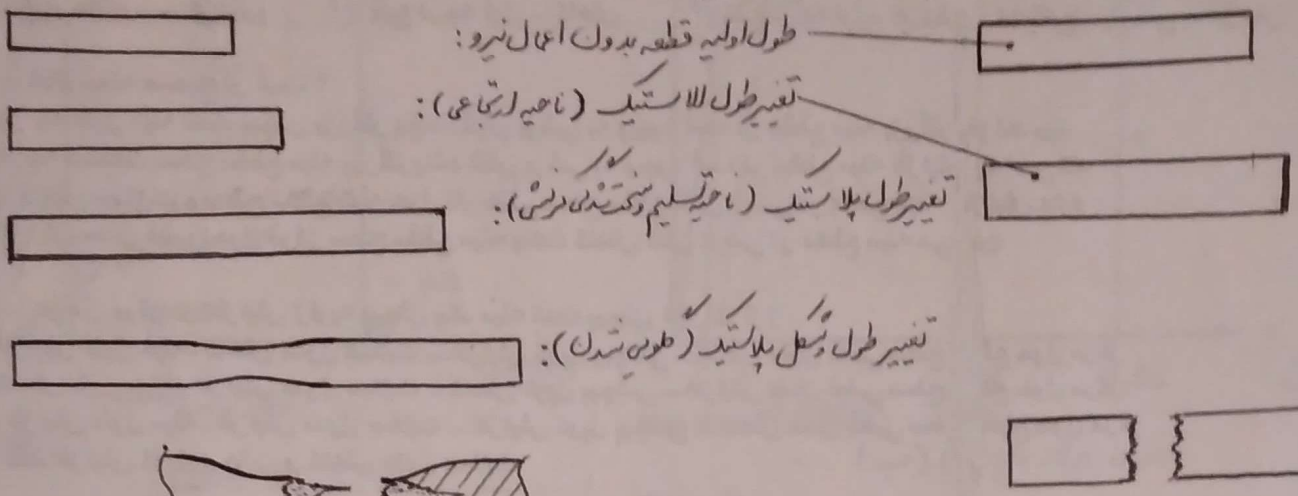
نمودار تنش - کرنش مصالح شکل پذیر (فولاد)

شکل (۷-۱)

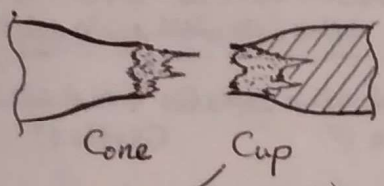
- شکل (۷-۱) نشاندهنده نمودار تنش - کرنش واقعی و مهندسی مصالح شکل پذیر (فولاد نرمه) می‌باشد. منحنی خط‌چین نشاندهنده تنش - کرنش واقعی و منحنی خط‌ممتد نشاندهنده تنش - کرنش مهندسی است.

در حالت کلی، منحنی دارای دو منطقه رفتار ارتجاعی و رفتار خمیری است که منطقه رفتار خمیری به سه منطقه جدا از هم تسلیم، سخت شدگی کرنشی و باریک شدن تقسیم می‌شود. در منطقه رفتار ارتجاعی با حذف نیروی اعمالی به نمونه تحت کشش، نمونه به طول اولیه خواهد رسید. این ناحیه به ناحیه الاستیک نیز معروف است. حداکثر تنش در این ناحیه نقطه شماره ① در شکل (۷-۱) می‌باشد. بعد از منطقه رفتار ارتجاعی محدوده رفتار خمیری یا محدوده پلاستیک می‌باشد که در شکل نمونه دائمی خواهد بود و با حذف نیرو، نمونه به طول اولیه نخواهد رسید. از نقطه ① به بعد نمونه تحت یک تنش تقریباً ثابت کرنش زیادی خواهد داشت که این ناحیه به منطقه تسلیم یا سیلان (جاری شدن) معروف است. $\varepsilon_y = (10-40)\varepsilon_p$ بعد از منطقه تسلیم به علت کارسردی (cold working) که به دلیل ادامه آزمایش روی نمونه انجام می‌پذیرد تنش اعمالی رفته رفته شروع به افزایش می‌کند. این منطقه به منطقه سخت شدگی کرنشی معروف است. حداکثر تنش در این ناحیه با σ_u نشان داده شده است. ناحیه آخر منطقه باریک شدن یا گلویی شدن می‌باشد که به دلیل ضعف متالورژیکی در داخل نمونه، از یک نقطه ضعیف شده و نمونه از آن نقطه شروع به باریک شدن می‌کند و در نهایت زمانی که تنش اعمالی به تنش شکست ماده می‌رسد نمونه گسیخته می‌شود.

- بنابراین مواد شکل پذیر دارای حوزه ناحیه بدون تنش - کرنش می باشند. مقطع شکست چنین موادی معمولاً به حالت مخروطی و فنجانی (Cup and Cone). یعنی یک مقطع حالت برآمدگی و مقطع مقابل حالت فرورفتگی دارد (شکل ۸-۲).



شکل (۹-۲): مقطع شکست مواد تُرد.



شکل (۸-۲): مقطع شکست مواد نرم

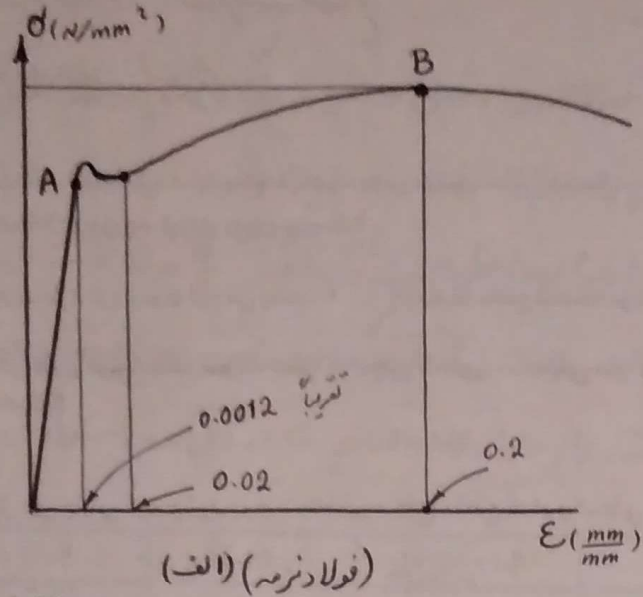
تنش حد خطی (σ_p): حداکثر تنش در محدوده خطی یا ناحیه ارتجاعی را گویند. (محدوده خطی در ناحیه ارتجاعی)

تنش سیلان (σ_y): تنشی است که در آن تحت تنش ثابت کرنش زیادی در نمونه صورت می‌گیرد و نمونه شروع به جاری شدن می‌کند. کرنش در محدوده سیلان 40-10 برابر محدوده خطی است.

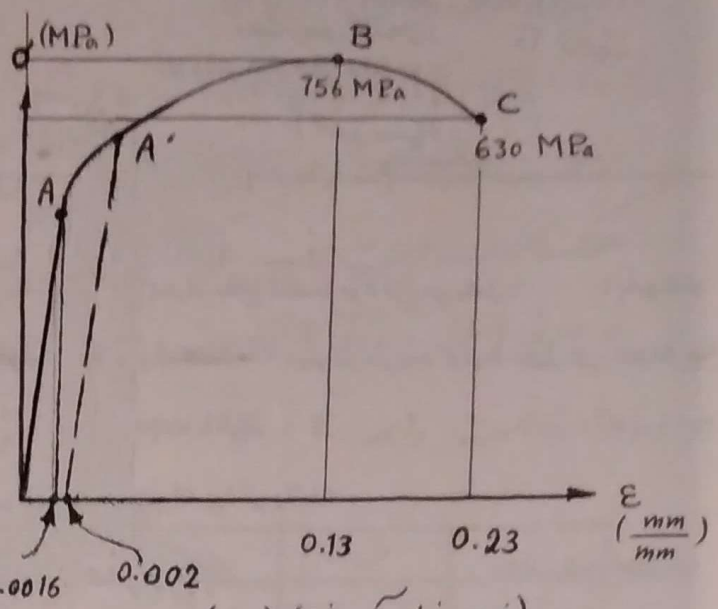
تنش نهایی (σ_u): حداکثر تنش متحمله توسط نمونه آزمایش، قبل از وقوع شکست را گویند.

تنش شکست (σ_f): تنش مربوط به زمان شکست نمونه تحت آزمایش کشش را گویند.

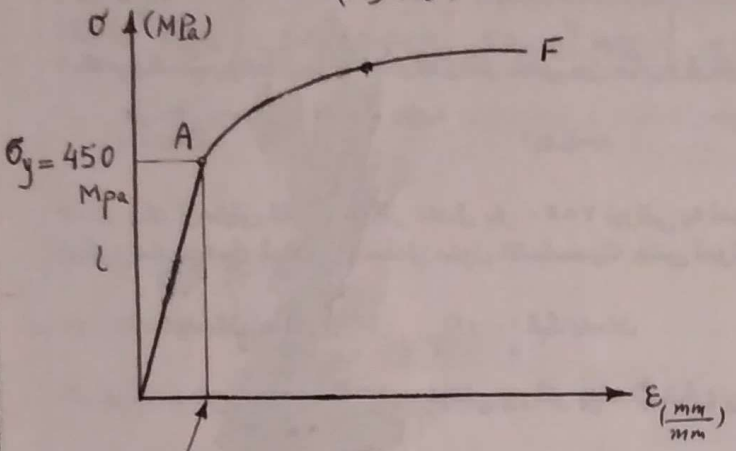
در مواد تُرد مراحل مذکور بالا در طی آزمایش کشش به صورت کامل دیده نمی‌شود بلکه مواد تُرد مانند بتن، چدن، فولاد سخت شده، بعد از یک تغییر طول جزیی در محدوده ارتجاعی شکسته می‌شوند و مقطع شکست تقریباً به حالت هموار و عمود بر محور طولی نمونه است (شکل ۹-۲). نمونه‌ای از نمودار تنش - کرنش مواد مختلف در شکل (۱۰-۲) آمده است.



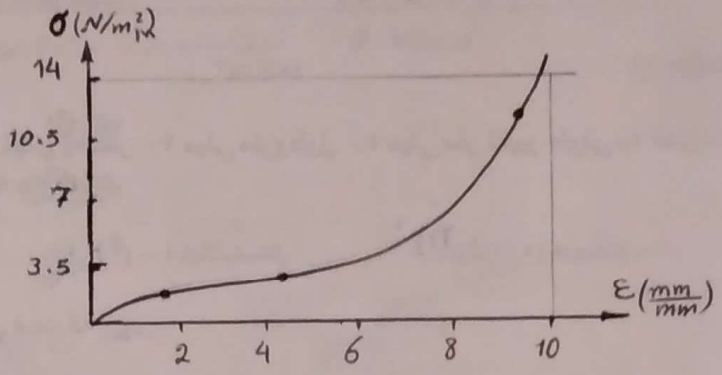
(فولاد نرمه) (الف)



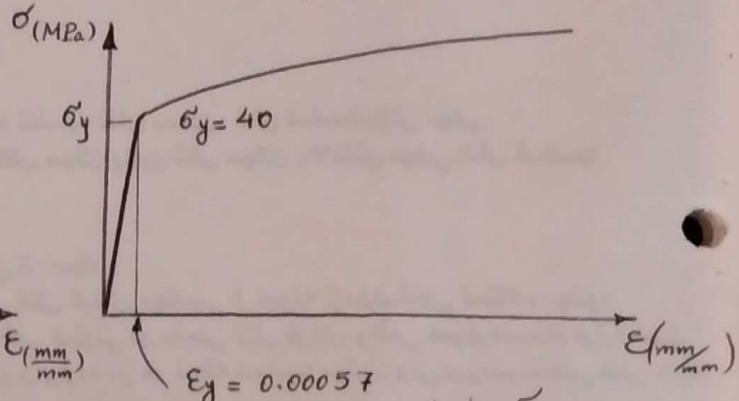
(نوعی فولاد آلیاژی) (ب)



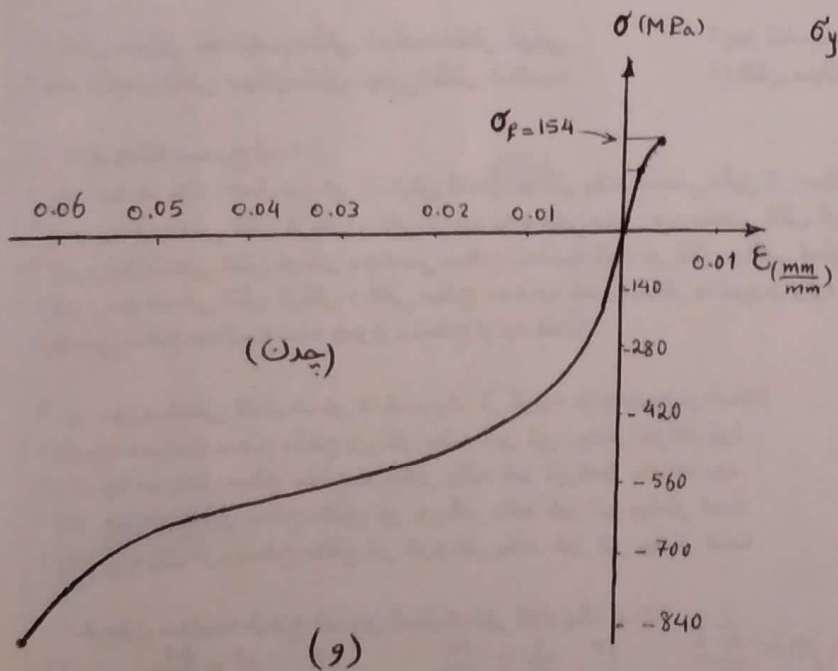
(ج) (نوعی آلومینیم آلیاژی)



(لاستیک) (د)



(هـ) (آلومینیم)



(چدن) (و)

شکل (۱-۱۰)

قانون هوک و ضریب ارتجاعی

نقطهٔ A که در منحنی‌های الف، ب و ج از شکل ۱۰-۲ آمده است، تنش حد خطی یا حداکثر تنش در ناحیهٔ خطی است. در محدودهٔ رفتار الاستیک (محدودهٔ خطی) رابطهٔ بین تنش و کرنش به صورت $\sigma = E\varepsilon$ بیان می‌شود. این رابطه به قانون هوک معروف است. حرف E که نشانگر ضریب زاویهٔ نمودار در محدودهٔ خطی است و از رابطهٔ $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ بدست می‌آید به مدول یانگ، مدول الاستیسیته و یا ضریب ارتجاعی معروف است و از نظر فیزیکی معرف سختی مصالح در مقابل بارهای وارده است. واحد E، MPa از جنس واحد تنش است. برای برخی از مواد، مقادیر E در ذیل آمده است.

فولاد	چدن خاکستری	چدن چکش خوار	آلومینیم	برنج	بتن مقاوم	برنز
2×10^5 MPa	0.9×10^5 MPa	1.7×10^5 MPa	0.75×10^5 MPa	1.05×10^5 MPa	0.315×10 MPa	1.12×10^5 MPa

0.315×10^5