



معاونت آموزشی پژوهشی دانشگاه

گروه مکانیک

دستورالعمل آزمایشگاه مقاومت مصالح

بهمن ۹۹

فهرست

3	.....سختی
3	.....آزمایش سختی راکول
6	.....آزمایش سختی برینل
11	.....آزمایش سختی ویکرز
14	.....آزمایش سختی نوپ
15	.....آزمایش سختی شر یا اسکرواسکوپ
31	.....آزمایش ضربه
37	.....آزمایش برش
41	.....آزمایش کشش
46	.....آزمایش چقرمگی
48	.....آزمایش فشار
53	.....آزمایش خمش
55	.....آزمایش خمش مرکب
63	.....آزمایش پیچش
70	.....آزمایش خیز
75	.....آزمایش مرکز برش
79	.....آزمایش کمانش ستون ها
92	.....آزمایش خستگی
99	.....کاربرد استرین گیج ها در تعیین مدول الاستیسیته
107	.....آزمایش فتوالاستیسیته
110	.....آرایش استرن گیج ها

سختی

سختی به عنوان مقاومت یک ماده در مقابل تغییر شکل پلاستیکی و یا فرو رفتن ماده سخت تر دیگری در آن تعریف شده است. سختی یک خاصیت تعریف شده فیزیکی و استاندارد شده نیست زیرا به وسیله عددی که از طریق یکی از روشهای به کار برده شده به دست می آید تعیین می شود در بسیاری از موارد آزمایش کشش که از لحاظ تهیه نمونه وقت گیر و پر خرج است توسط آزمایش ساده سختی جایگزین می شود. روشهای مختلفی برای تعیین سختی وجود دارد که هر کدام به نوبه خود مزایا و معایبی دارد و معمولا تمامی این روشها تا کنون در بررسیهای کنترل کیفی و کارهای تحقیقاتی بسیار سودمند بوده است.

سختی راکول

هدف آزمایش :

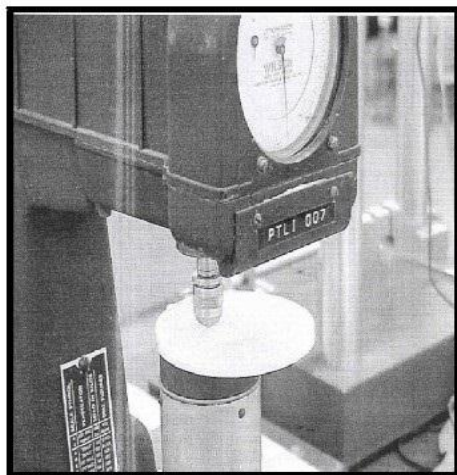
تعیین سختی مواد به روش راکول A, B, C

وسایل مورد نیاز لازم :

قطعات با دو سطح صاف (آلومینیم، فولاد، برنج) و دستگاه سختی سنج

توضیحات :

در اندازه گیری سختی مواد به روش راکول از فروشونده مخروطی شکل الماسی با زاویه 120 درجه به نام راکول A, C و یا از یک ساچمه فولادی سخت شده به نام راکول B استفاده می شود. شکل زیر یک دستگاه سختی سنج راکول را نشان می دهد.



در روش راکول عمق فرورفتگی که در اثر وارد آوردن نیروی مشخصی بر روی نمونه ایجاد شده اندازه گیری میشود و از آن به عنوان مقیاسی برای تعیین سختی راکول استفاده می گردد.

در این روش ابتدا یک نیروی 10 کیلو گرمی را به طور عمودی در سطح افقی جسم فرو می شود که در نتیجه فرورفتگی بسیار ریزی در سطح به وجود می آید . در این موقع عقربه دستگاه را بر روی صفر قرار داده و سپس بار 140 کیلو گرمی (در راکول C) و بار 90 کیلو گرمی (در راکول B) و بار 50 کیلو گرمی (در راکول A) به نام بار اصلی به آن اضافه می شود. سختی پس از وارد آوردن بار اصلی و نگهداشتن آن به مدت لازم برای ایجاد تغییر شکل پلاستیکی مستقیماً از روی صفحه مدرج نصب شده بر روی دستگاه سختی سنج خوانده می شود. بدین ترتیب عدد سختی راکول معیاری از فرورفتگی پلاستیکی و یا دائمی ایجاد شده در جسم در اثر نیروی اصلی است.

امتیازات روش راکول عبارتند از:

- 1) سرعت عمل زیرا که سختی مستقیماً به کمک صفحه مدرجی که بر روی دستگاه نصب شده قابل تعیین است بدین علت برای آزمایشات کنترل کیفی مخصوصاً در تولیدات به صورت سری سازی کاربرد زیادی دارد.
- 2) برای اندازه گیری سختی های بالا مناسب است.

روش آزمایش

ابتدا قطعه را روی سندان دستگاه قرار داده و سپس نیروی اولیه دستگاه را که مقدار آن 10 کیلو گرم می باشد را به طوری که عقربه کوچک دستگاه روی نقطه قرمز قرار گیرد وارد می کنیم سپس عقربه دستگاه را روی صفر قرار داده و نیروی اصلی را به وسیله پدال دستگاه و در صورت روشن بودن دستگاه وارد می کنیم ، چنانچه عقربه بزرگ دستگاه از 5/4 دور بیشتر بزند باید روش B, C را عوض کرد یعنی باید یک مرتبه آزمایش را پایین تر انجام دهیم یعنی اگر C بود به B و اگر B بود به A تغییر دهیم اگر دور عقربه از 5/4 دور کمتر باشد عقربه دستگاه مقدار سختی را به درستی نشان می دهد.

روش	فولاد	برنج	آلومینیم	فولاد سخت شده
راکول A	48	53	8	-
راکول B	50	54	-	-
راکول C	-	-	-	55

موارد استعمال در صنعت :

در صنعت، فولاد را گرم و حرارت می‌دهند و با سرد کردن و آب دادن آن، سختی آنرا افزایش می‌دهند. مقدار سختی بسیار مهم است. چون از این طریق می‌توان به میزان مقاومت کششی و فشاری فولاد و فلزهای مختلف دست یافت.

معیارهای مختلف راکول¹¹

معیار	مخفف	بار	فرورونده	کاربرد
A	HRA	60 kgf	مخروط الماسی 120°	فولادهای نازک و سخت‌کاری سطحی شده
B	HRB	100 kgf	کره فولادی با قطر 16/1 اینچ	آلیاژهای آلومینیوم، آلیاژهای مس و فولادهای نرم
C	HRC	150 kgf	مخروط الماسی 120°	فولادهای سخت، آلیاژهای تیتانیوم
D	HRD	100 kgf	مخروط الماسی 120°	آهن مالیبیل پرلیتی
E	HRE	100 kgf	کره فولادی با قطر 8/1 اینچ	چدن، آلیاژهای آلومینیوم منیزیم
F	HRF	60 kgf	کره فولادی با قطر 16/1 اینچ	آلیاژهای مس آنیل شده
G	HRG	150 kgf	کره فولادی با قطر 16/1 اینچ	برلیم-مس، آهن‌های مالیبیل
H	HRF	60 kgf	کره فولادی با قطر 8/1 اینچ	آلومینیوم، روی، سرب
K	HRF	150 kgf	کره فولادی با قطر 8/1 اینچ	مواد بسیار نرم یا نازک
L	HRF	60 kgf	کره فولادی با قطر 4/1 اینچ	مواد بسیار نرم یا نازک
M	HRF	100 kgf	کره فولادی با قطر 4/1 اینچ	مواد بسیار نرم یا نازک
P	HRF	150 kgf	کره فولادی با قطر 4/1 اینچ	مواد بسیار نرم یا نازک
R	HRF	60 kgf	کره فولادی با قطر 2/1 اینچ	مواد بسیار نرم یا نازک
S	HRF	100 kgf	کره فولادی با قطر 2/1 اینچ	مواد بسیار نرم یا نازک
V	HRF	150 kgf	کره فولادی با قطر 2/1 اینچ	مواد بسیار نرم یا نازک

سختی برینل

هدف آزمایش:

بدست آوردن سختی اجسام با استفاده از روش برینل

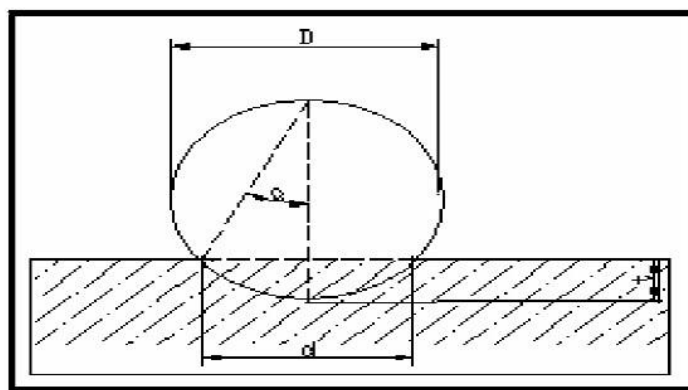
مواد و وسایل مورد نیاز:

دستگاه سختی سنج برینل ، میکروسکوپ چشمی ، یک قطعه با دو سطح صاف



توضیحات

سختی برینل یکی از قدیمیترین روشهای استاندارد شده است که معمولاً هنوز مورد استفاده قرار می گیرد. در این آزمایش از یک ساچمه فولادی سخت شده به قطر D به عنوان فرو شونده مورد استفاده قرار می گیرد که با نیرو F به آرامی و به طور یکنواخت (بدون ضربه) بر سطح صیقلی شده قطعه مورد آزمایش به صورت عمودی فشار داده خواهد شد. پس از حذف نیرو و برداشتن ساچمه از روی قطعه ابتدا مقدار تغییر شکل الاستیک بازگشت کرده تغییر شکل پلاستیکی به صورت حفره ای به قطر d و عمق t در سطح قطعه مورد آزمایش بر جای باقی می ماند، قطر اثر ایجاد شده توسط میکرومتر اندازه گیری و سپس عدد سختی برینل از رابطه زیر بدست می آید.



$$\text{BHN} = \frac{\text{نیرو}}{\text{سطح فرو رفتگی}} = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi Dt}$$

از دو رابطه هندسی زیر استفاده می کنیم برای به دست آوردن عمق t

$$\text{tg} \alpha = \frac{d/2}{D-t} \quad , \quad \text{tg} \alpha = \frac{t}{d/2}$$

چون یک طرف دو رابطه فوق با هم برابر است ، بنابراین این طرف دوم آنها هم باید باهم برابر باشد:

$$\begin{aligned} \frac{t}{d/2} &= \frac{d/2}{D-t} \\ 4t^2 - 4Dt + d^2 &= 0 \\ t &= \frac{1}{2} \left(D \pm \sqrt{D^2 - d^2} \right) \end{aligned}$$

و بنابراین سختی برینل از رابطه زیر بدست می آید:

$$\text{BHN} = \frac{2F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

ولی در عمل برای سهولت و صرفه جویی در وقت از این رابطه برای محاسبه سختی مستقیماً استفاده نمی شود، بلکه با اندازه گیری قطر اثر، عدد سختی برینل را مستقیماً از جداولی که همراه دستگاه اندازه گیری است تعیین می کنند.

سختی برینل با تغییر قطر ساچمه و مقدار نیرو تغییر می کند. مقدار نیرویی را که وارد می کنیم با توجه به رابطه بدست

$$F = XD^2 \text{ نوشت که } X = \frac{F}{D^2} \text{ را } \langle\langle \text{درجه نیرو} \rangle\rangle \text{ می نامند.}$$

درجه نیرو و قطر ساچمه را نسبت به جنس نمونه مورد آزمایش و ضخامت آن باید طوری انتخاب کنیم که پس از برداشت نیرو از روی نمونه قطر اثر ساچمه (d) بین 0/2 تا 0/7 قطر ساچمه (D) باشد. چنانچه قطر (d) کوچکتر از 0/2 D باشد، محیط یا لبه فرورفتگی به خوبی نمایان نمی شود. لذا برای اینکه سختیهای به دست آمده برای مواد مختلف قابل

مقایسه باشد، لازم است با یک فروشونده ثابت از نیروهای مختلف استفاده شود. به طوریکه نسبت $\frac{F}{D^2}$ برای هر فلز

مقدار ثابتی باشد. این نسبت برای فولاد و چدن 30، برای آلیاژهای مس 10 و برای آلیاژهای آلومینیوم 5 و برای آلیاژهای

سرب 2/5 است. جدول (1). باید توجه کرد که فواصل فرورفتگیهای مختلف از یکدیگر حداقل 2d انتخاب می شود تا بدین

وسیله از تأثیر مقدار سختی نقاط مجاور بر روی یکدیگر در نتیجه تمایل به کار سختی یا سختی کرنشی موضعی از نمونه در اثر تغییر شکل پلاستیکی سرد جلوگیری به عمل آید. مدت زمان وارد آمدن نیرو باید به اندازه کافی باشد تا تغییر

شکل پلاستیکی بتواند به خوبی انجام گیرد. این مدت زمان برای فلزات سخت که درجه حرارت ذوبی بیش از $600^{\circ}C$ دارند حدود 10 ثانیه و برای فلزات نرم که درجه حرارت ذوب آنها کمتر از $600^{\circ}C$ است حدود 30 ثانیه است.

قطر ساچمه D mm	نیرو به کیلوگرم نیرو (kgf)			
	فولادها و چدن	آلیاژهای Cu	آلیاژهای AL	Pb و فلز نرم
		$10D^2$	$5D^2$ $30D^2$	$2.5D^2$
10	3000	1000	500	250
5	750	250	125	62.5
2.5	187.5	62.5	31.25	15.625
علامت اختصاری	BHN30	BHN10	BHN5	BHN2.5

معایب این روش:

این روش برای مواد بسیار نرم و بسیار سخت مناسب نمی باشد.

محدودیت در ضخامت نمونه به طوری که ضخامت آن نباید کمتر از $2/5$ میلیمتر باشد و یا به عبارتی دیگر نباید کمتر از 10 برابر عمق فرورفتگی باشد.

لبه فرو رفتگی را همیشه نمی توان به راحتی دید و تشخیص آن در مورد برخی از فلزات که دارای رنگ خاصی هستند دشوار است. با وجود این معایب روش برینل بسیار ساده است و امتیاز آن در این است که سطح اثر فرورفتگی نسبتاً بزرگ است، به طوری که در اندازه گیری سختی غیر یکنواختیهای بسیار جزئی، در نتیجه آزمایش تأثیر ندارد و دیگر اینکه به کمک روابط تقریبی داده شده، می توان حد تسلیم و یا استحکام کششی را تعیین کرد. برای مثال استحکام کششی فولاد های ساختمانی را میتوان به طور تقریب از رابطه زیر که به طور تجربی به دست آمده است تعیین کرد:

$$\sigma = 3.5 \text{BHN} \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma = 0.43 \text{BHN}$$

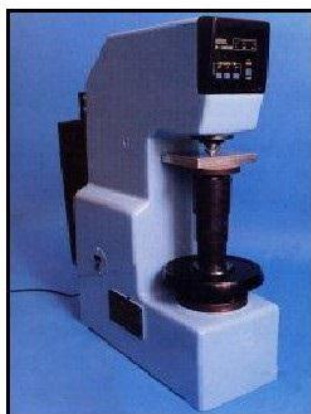
برای فولاد معمولی

$$\sigma = 0.36 \text{BHN}$$

برای فولاد نیکل دار

روش آزمایش

ابتدا قطعه با دو سطح صاف را بالای سندان دستگاه قرار داده و سپس قطعه را بالا آورده تا نوک ساچمه به قطعه برخورد کند. سپس مقدا نیرو را به مدت 5 تا 30 ثانیه اعمال می کنیم، حفره ایجاد شده با میکروسکوپ چشمی اندازه می گیریم و سپس سختی برینل را با استفاده از فرمول بدست می آوریم.



نتیجه آزمایش:

این آزمایش را برای دو قطعه از جنس آلو مینیوم و فولاد انجام دادیم .

قطر ساچمه در این آزمایش $D=10\text{mm}$ است.

مقدار نیرو را باتوجه به جنس قطعه و قطر ساچمه ، از جدول محاسبه

می کنیم.

$$P = 5D^2 = 5 \times 10^2 = 500$$

آلومینیوم

$$BHN = \frac{2 \times 500}{\pi 10 (10 - \sqrt{10^2 - 4.3^2})} = 32.75$$

$d = 4.3\text{mm}$ (قطر حفره ایجاد شده)

$$P = 30D^2 = 3000$$

فولاد

$$BHN = 47.74$$

$$d = 6\text{mm}$$

آزمایش سختی ویکرز

هدف آزمایش:

بدست آوردن سختی اجسام و مقایسه آن با روشهای دیگر

مواد و وسایل لازم:

- قطعه ای با دو سطح صاف

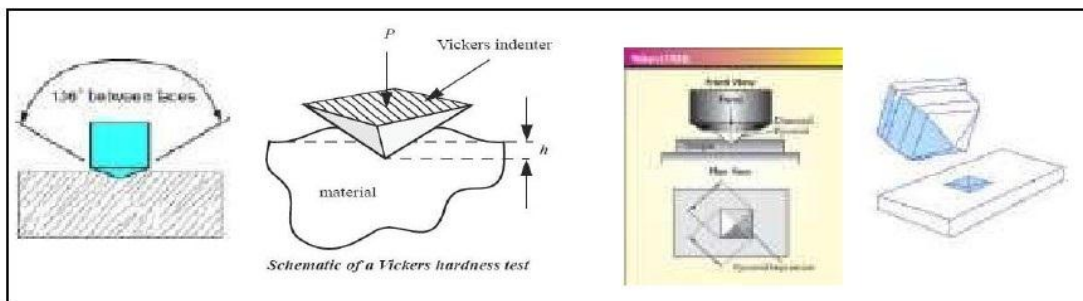
- دستگاه ویکرز

- میکروسکوپ چشمی



توضیحات:

در این آزمایش از یک الماس هرمی شکل با قاعده مربع با زاویه راس 136° استفاده می شود. بدلیل شکل سنبه ای این آزمایش اغلب آزمایش سختی هرم الماسی نامیده می شود. عدد سختی ویکرز (V.H.N) بصورت بار تقسیم بر مساحت فرو رفتگی تعیین می شود.



$$A = \frac{D_m^2}{2}$$

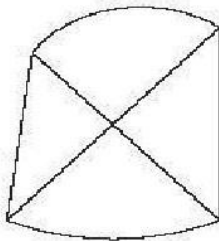
$$A = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

$$\frac{P}{A} = \frac{F \cos \theta}{\frac{D_m^2}{2}} = \frac{2 F \cos 22^\circ}{D_m^2} = \frac{1.854 F}{D_m^2}$$

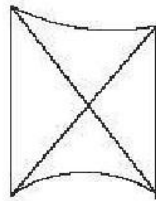
در این رابطه f بر حسب کیلوگرم نیرو (نیوتن) و قطر اثر d بر حسب میلی متر است. در نتیجه H بر حسب $\frac{N}{mm^2}$ بدست می آید. ولی در عمل برای تعیین سختی ویکرز از جداولی که سختی نسبت به قطر اندازه گیری شده اثر هرم و همچنین نیروی وارد بر آن می شود. این روش بیشتر برای کارهای تحقیقاتی استفاده می شود.

روش انجام آزمایش:

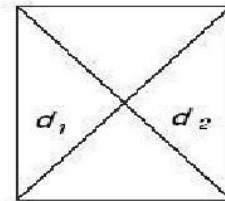
ابتدا قطعه مورد آزمایش را روی سندان دستگاه قرار داده و سپس با چرخاندن دستگاه قطعه را به نوک سنبه مماس می کنیم. سپس نیروی اولیه دستگاه را به اندازه 10 ثانیه وارد کرده و نیروی اصلی که بین 5 تا 35 کیلوگرم می باشد را به مدت 30 ثانیه وارد می کنیم. با برگرداندن اهرم دستگاه مشاهده می کنیم که یکی از اشکال زیر در قطعه کار ایجاد شده است.



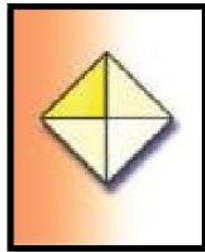
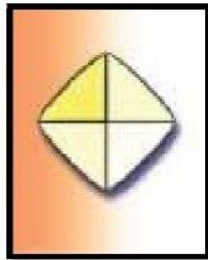
سخت شدگی مثلاً در اثر انتقال حرارت



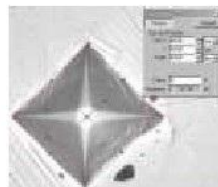
حالت آتیل شده (نرم شدگی)



شکل صحیح



سطح واقعی قطعه کار به صورت زیر می باشد:



سپس دو قطر حفرة ایجاد شده را با میکروسکپ چشمی اندازه گرفته و در فرمول قرار می دهیم تا مقدار سختی بدست آید.

نتایجی که در این آزمایش حاصل می شود به صورت زیر می باشد:

$d_1 = 0.45$	$d_2 = 0.55$	$d_m = 0.5$	فولاد
$d_1 = 0.85$	$d_2 = 0.9$	$d_m = 0.875$	آلومینیوم
$d_1 = 0.6$	$d_2 = 0.65$	$d_m = 0.625$	برنج

$F = 500 N$	$V.H.N = 3.7 \times 10^3$	فولاد
$F = 500 N$	$V.H.N = 1.21 \times 10^3$	آلومینیوم

مزایای روش ویکرز:

- سختی سنجی ویکرز برای اندازه گیری سخت ترین مواد تحت بارهای متغیر بسیار دقیق و مناسب است.
- برای تعیین سختی لایه های بسیار نازک، مانند لایه های سطحی گالوانیزه شده، لایه های سطحی آب داده و سخت شده به کار می رود.
- همچنین سطح برای مقطع های بسیار نازک به عنوان میکرو سختی سنج به کار می رود.

معایب روش ویکرز:

- گرانی دستگاه
- حساسیت فرو شونده
- صرف وقت زیاد برای تهیه نمونه از مقاطع نازک و اندازه گیری قطر اثر آن است.
- اشکال دیگری که این روش دارد این است که سطح جسم باید کاملا صاف باشد.
- ولی امروزه دستگاههای مجهز به سیستمهای اندازه گیری و محاسبه کامپیوتری عدد سختی را مستقیما ارائه می دهند .

نکاتی که در سختی سنجی اهمیت زیادی دارند:

1. فرو رونده و قسمت نگه دارنده قطعه باید تمیز بوده و بطور مناسب قرار گیرند.
2. سطح آزمایش باید تمیز و خشک، صاف و بدون زنگ باشد.
3. سطح باید صاف و عمود بر سنبه باشد.
4. آزمایش سطوح استوانه ای سختی را کمتر از سختی واقعی نشان داده و میزان خطا به شعاع انحنا، بار، فرو رونده و سختی ماده بستگی دارد از رو اصلاحهای نظری و تجربی خاصی صورت گرفته است.
5. ضخامت قطعه باید طوری باشد که در سمت مخالف قطعه علامت یا برآمدگی تولید نشود و توصیه می شود ضخامت حداقل ده برابر عمق فرو رفتگی باشد.
6. فاصله بین فرو رفتگی ها باید 3 تا 5 برابر قطر فرو رفتگی باشد.
7. سختی سنجی را در کناره های قطعه انجام نداده و معمولا 3 تا 5 برابر قطر فرو رفتگی داخل باشد.

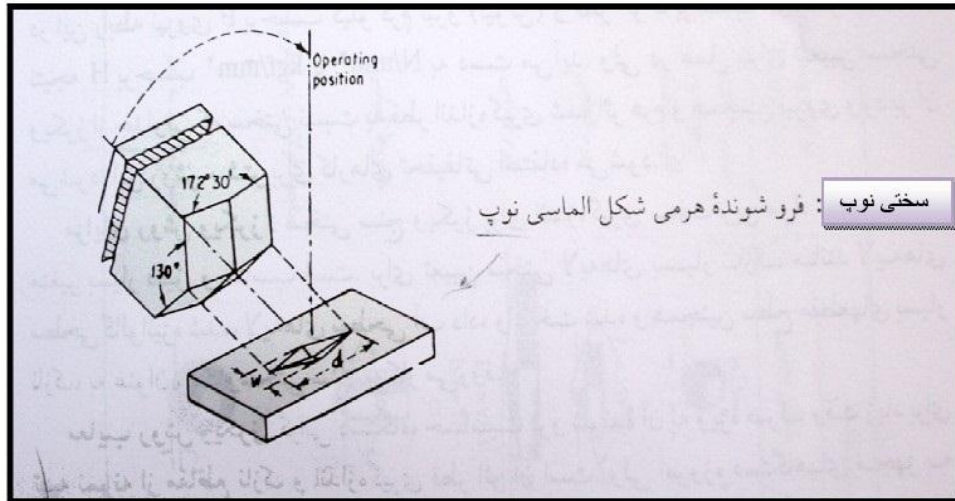
سختی نوپ

در این روش از فرو شونده هرمی شکل از جنس الماس استفاده می شود شکل 5-4 و نیروی وارد بر آن بین 15 گرم تا 3 کیلوگرم نیرو است .

عدد سختی در این روش از تقسیم نیرو بر تصویر افقی سطح اثر که لوزی شکل است به دست می آید و به نام عدد سختی نوپ نامیده می شود. در اندازه گیری سطح اثر به سبب کوچک بودن اندازه آن از میکروسکوپ استفاده می شود. برای محاسبه سختی نوپ می توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$HK = \frac{14.229F}{d^2}$$

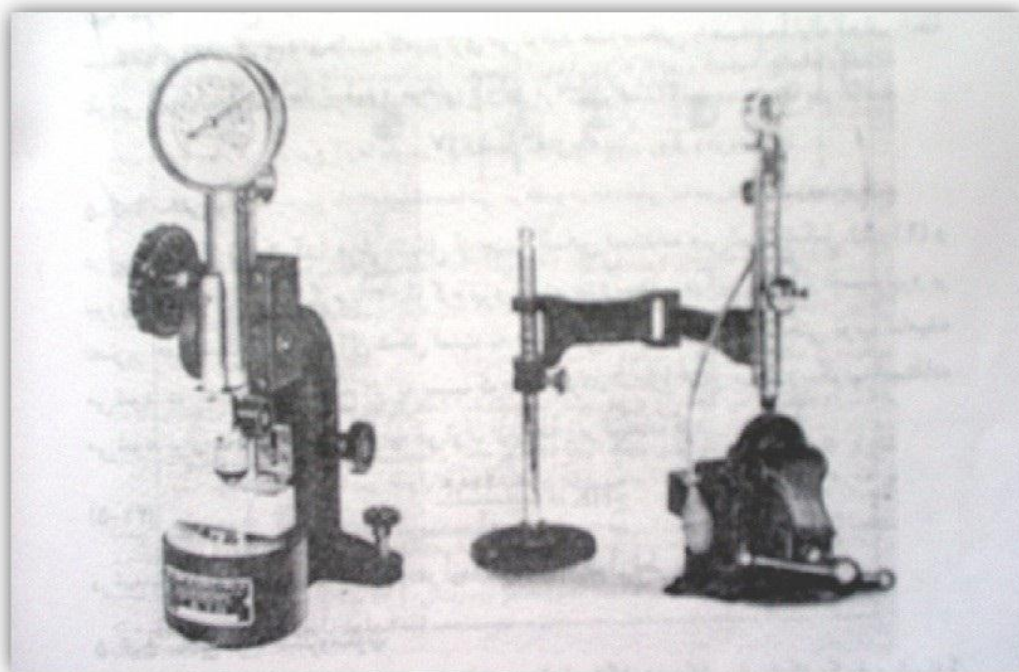
در این رابطه $F =$ نیروی به کار رفته در آزمایش و $d =$ طول قطر بزرگ اثر است



سختی شر یا اسکروسکوپ

در آزمایش سختی به روش شر سختی بر اساس مقدار بازگشت چکشی است که یک فرو شوونده الماسی نوک تیز در انتهای آن قرار گرفته و از ارتفاع استاندارد شده معینی (حدود 250mm) به طور عمود بر سطح قطعه مورد آزمایش رها می شود بدین جهت به سختی الاستیکی یا سختی ارتجاعی (برگشتی) هم معروف است. ارتفاع برگشت از روی صفحه مدرجی که به 100 قسمت درجه بندی شده خوانده می شود.

یکی از مزایای دستگاه شرقابلیت حمل و نقل آن است که می تواند به راحتی برای تعیین سختی قطعات بزرگ مانند غلتکهاو چرخ دنده ها و از این قبیل در محل کار استفاده می شود.



معادل های سختی ها

VPN	ROCKWELL SCALES											BRINELL		SCLE RO- SCOP E	U.T.S.					
	DPH HV/ 10	A	B	C	D	E	F	G	H	K	15 N	30 N	45 N		15 T	30 T	45 T	BH N 500 kg	BHN 300 0kg	Kp si	M pa
186 5	9 2		8 0	8 7							97	92	87							
178 7	9 2		7 9	8 6							96	92	87							
171 0	9 1		7 8	8 5							96	91	86							
163 3	9 1		7 7	8 4							96	91	85							
155 6	9 0		7 6	8 3							96	90	84							
147 8	9 0		7 5	8 3							95	89	83							
140	8		7	8							95	89	82							

0	9		4	2															
132	8		7	8					95	88	81								
	3	9	3	1															
124	8		7	8					95	87	80								
	5	8	2	0															
116	8		7	8					94	87	79								
	0	7	1	0															
107	8		7	7					94	86	78						101		
	6	7	0	9															
100	8		6	7					94	85	77							99	
	4	6	9	8															
940	8		6	7					93	84	75							97	
	6		8	7															
900	8		6	7					93	84	74							95	
	5		7	6															
865	8		6	7					93	83	73							92	
	5		6	5															
832	8		6	7					92	82	72					739	91		
	4		5	5															
800	8		6	7					92	81	71					722	88		
	4		4	4															

772	8 3	6 3	7 3					91	80	70					705	87		
746	8 3	6 2	7 2					91	79	69					688	85		
720	8 2	6 1	7 2					91	79	68					670	83		
697	8 1	6 0	7 1					90	78	67					654	81	32 0	22 06
674	8 1	5 9	7 0					90	77	66					634	80	31 0	21 37
653	8 0	5 8	6 9					89	76	64					615	78	30 0	20 69
633	8 0	5 7	6 9					89	75	63					595	76	29 0	20 00
613	7 9	5 6	6 8					88	74	62					577	75	28 2	19 44
595	7 9	12 0	5 5	6 7				88	73	61					560	74	27 4	18 89
577	7 8	12 0	5 4	6 6				87	72	60					543	72	26 6	18 34
560	7 8	11 9	5 3	6 5				87	71	59					523	71	25 7	17 72

544	7 11 5 6 7 9 2 5							86 70 57						512	69	24 16 5 89
528	7 11 5 6 7 8 1 4							86 69 56						496	68	23 16 9 48
513	7 11 5 6 6 7 0 3							86 69 55						481	67	23 16 3 07
498	7 11 4 6 5 7 9 2							85 68 54						469	66	22 15 7 65
484	7 11 4 6 5 6 8 1							85 67 53						455	64	22 15 1 24
471	7 11 4 6 4 6 7 1							84 66 51						443	63	21 14 7 96
458	7 11 4 6 4 5 6 0							84 65 50						432	62	21 14 2 62
446	7 11 4 5 3 5 5 9							83 64 49						421	60	20 14 6 20
434	7 11 4 5 3 4 4 9							83 63 48						409	58	20 13 0 79
423	7 11 4 5 2 3 3 8							82 62 47						400	57	19 13 6 51
412	7 11 4 5 2 3 2 7							82 61 46						390	56	19 13 1 17

402	7 1	11 2	4 1	5 6						81	60	44					381	55	18 7	12 89
392	7 1	11 2	4 0	5 5						80	60	43					371	54	18 2	12 55
382	7 0	11 1	3 9	5 5						80	59	42					362	52	17 7	12 20
372	7 0	11 0	3 8	5 4						79	58	41					353	51	17 3	11 93
363	6 9	11 0	3 7	5 3						79	57	40					344	50	16 9	11 65
354	6 9	10 9	3 6	5 2						78	56	38					336	49	16 5	11 38
345	6 8	10 9	3 5	5 2						78	55	37					327	48	16 0	11 03
336	6 8	10 8	3 4	5 1						77	54	36					319	47	15 6	10 76
327	6 7	10 8	3 3	5 0						77	53	35					311	46	15 2	10 48
318	6 7	10 7	3 2	4 9						76	52	34					301	44	14 7	10 14
310	6 6	10 6	3 1	4 8			9 1			76	51	33					294	43	14 4	99 3

302	6	10	3	4			9											286	42	14	96	
	6	5	0	8			1			75	50	31								0	5	
294	6	10	2	4			8												279	41	13	94
	5	4	9	7			9			75	50	30								7	5	
286	6	10	2	4			8												271	41	13	91
	5	4	8	6			8			74	49	29								3	7	
279	6	10	2	4			8												264	40	12	88
	4	3	7	5			7			73	48	28								9	9	
272	6	10	2	4			8												258	39	12	86
	4	3	6	5			6			73	47	27								6	9	
266	6	10	2	4			8												253	38	12	85
	3	2	5	4			5			72	46	26								4	5	
260	6	10	2	4			8												247	37	12	83
	3	1	4	3			4			72	45	24								1	4	
254	6	10	2	4			8												240	36	11	81
	2	0	3	2			3			71	44	23	93	82	72	201				8	4	
248	6	99	2	4			8												234	35	11	79
	2		2	2			1			71	43	22	93	82	71	195				5	3	
243	6	98	2	4			7												228	35	11	77
	1		1	1			9			70	42	21	93	81	70	189				2	2	
238	6	97	2	4			7												222	34	10	75
	1		0	0			8			69	42	20	92	81	69	184				9	2	

234	6 0	97	1 9			7 7					92	80	69	181	218	34	10 7	73 8
230	5 9	96	1 8			7 6					92	80	68	179	214	33	10 6	73 1
226	5 9	96	1 7			7 5					92	80	68	177	210	33	10 4	71 7
222	5 8	95	1 6			7 4					92	79	67	175	208	32	10 2	70 3
217	5 8	95	1 5			7 3					92	79	67	171	205	31	10 0	69 0
213	5 8	94	1 4			7 3					91	79	66	169	203	31	99	68 3
208	5 7	93	1 3			7 1					91	78	66	167	200	30	98	67 6
204	5 7	92	1 2			7 0	10 0				91	78	65	163	195	30	96	66 2
200	5 6	92	1 1			6 9	10 0				91	77	64	162	193	29	95	65 5
196	5 6	91	1 0			6 8	10 0				90	77	64	160	190	28	93	64 1
192	5 6	90	9			6 6	99				90	76	63	157	185	27	91	62 7

188	5 5	89	8				6 4	98				90	76	62	154	180	26	88	60 7
184	5 4	88	7				6 3	97				90	75	61	151	176	26	86	59 3
180	5 4	87	6				6 1	97				89	75	60	148	172	26	84	57 9
176	5 3	86	5				5 9	96				89	74	59	145	169	25	83	57 2
172	5 3	85	4				5 8	95				89	74	58	142	165	25	81	55 8
168	5 2	84	3				5 6	94				88	73	57	140	162	25	79	54 5
164	5 1	83	2				5 4	93				88	72	56	137	159	24	78	53 8
160	5 1	82	1				5 3	92				88	72	55	135	156	24	76	52 4
156	5 0	81	0				5 1	91				87	71	54	133	153	24	75	51 7
152	5 0	80					4 9	91				87	70	53	130	150		73	50 3
148	4 9	79					4 8	90				87	70	52	128	147			

144	4 9	78				4 6	89				86	69	51	126	144			
141	4 8	77				4 4	88				86	68	50	124	141			
139	4 7	76				4 3	87				86	68	49	122	139			
137	4 7	75			10 0	4 1	86				85	67	49	120	137			
135	4 6	74			99	3 9	85				85	66	48	118	135			
132	4 6	73			99	3 8	85				85	66	47	116	132			
130	4 5	72			98	3 6	84				84	65	46	114	130			
127	4 5	71		10 0	98	3 5	83				84	64	45	112	127			
125	4 4	70		10 0	97	3 3	82				84	64	44	110	125			
123	4 4	69			99	96 1	81				83	63	43	109	123			
120	4 3	68			98	96 0	80				83	62	42	107	121			

118	4 3	67			98	95	2 8	79				83	62	41	106	119			
116	4 2	66			97	95	2 7	78				82	61	40	104	117			
115	4 2	65			96	94	2 5	78				82	60	39	102	116			
114	4 2	64			96	94	2 4	77				82	60	38	101	114			
113	4 1	63			95	93	2 2	76				81	59	37	99	112			
112	4 1	62			95	92	2 1	75				81	58	36	98	110			
111	4 0	61			94	92	1 9	74				81	57	35	96	108			
110	4 0	60			93	91	1 8	73				81	57	34	95	107			
108	3 9	59			93	91	1 6	72				80	56	32	94	106			
107	3 9	58			92	90	1 5	71				80	55	31	92	104			
106	3 8	57			91	90	1 3	71				80	55	30	91	102			

105	3 8	56			91	89	1 2	70				79	54	29	90	101			
104	3 8	55			90	88	1 0	69				79	53	28	89	99			
103	3 7	54			90	88	9	68				79	53	27	87				
102	3 7	53			89	87	7	67				78	52	26	86				
101	3 6	52			88	87	6	66				78	51	25	85				
100	3 6	51			88	86	4	65				78	51	24	84				
100	3 5	50			87	86	3	65				77	50	23	83				
99	3 5	49			87	85		64				77	49	22	82				
98	3 5	48			86	85		63				77	49	21	81				
97	3 4	47			85	84		62				76	48	20	80				
96	3 4	46			85	83		61				76	47	19	79				

95	$\frac{3}{3}$	45			84	83			60				76	46	18	79				
95	$\frac{3}{3}$	44			84	82			59				75	46	17	78				
94	$\frac{3}{2}$	43			83	82			58				75	45	16	77				
93	$\frac{3}{2}$	42			82	81			58				75	44	15	76				
92	$\frac{3}{1}$	41			82	81			57				74	44	14	75				
91	$\frac{3}{1}$	40			81	80			56				74	43	13	74				
90	$\frac{3}{1}$	39			80	79			55				74	42	11	74				
90	$\frac{3}{0}$	38			80	79			54				73	42	10	73				
89	$\frac{3}{0}$	37			79	78			53				73	41	9	72				
88	$\frac{2}{9}$	36			79	78		$\frac{10}{0}$	52				73	40	8	71				
88	$\frac{2}{9}$	35			78	77		$\frac{10}{0}$	52				72	40	7	71				

87	$\frac{2}{8}$	34			77	77			99	51				72	39	6	70				
87	$\frac{2}{8}$	33			77	76			99	50				72	38	5	69				
86	$\frac{2}{8}$	32			76	75			99	49				71	38	4	68				
86	$\frac{2}{7}$	31			76	75			98	48				71	37	3	68				
85	$\frac{2}{7}$	30			75	74			98	47				71	36	2	67				
85	$\frac{2}{6}$	29			74	74			98	46				70	36	1	66				
84	$\frac{2}{6}$	28			74	73			97	45				70	35		66				
84	$\frac{2}{5}$	27			73	73			97	45				70	34		65				
83	$\frac{2}{5}$	26			73	72			97	44				69	33		65				
83	$\frac{2}{4}$	25			72	71			96	42				69	33		64				
82	$\frac{2}{4}$	24			71	71			96	42				69	32		64				

82	$\frac{2}{4}$	23			71 70	96 41				68 31	63				
81	$\frac{2}{3}$	22			70 70	95 40				68 31	63				
81	$\frac{2}{3}$	21			70 69	95 39				68 30	62				
80	$\frac{2}{2}$	20			69 69	95 38				68 29	62				
80	$\frac{2}{2}$	19			68 68	94 38				67 29	61				
79	$\frac{2}{1}$	18			68 67	94 37				67 28	61				
79	$\frac{2}{1}$	17			67 67	93 36				67 27	60				
78	$\frac{2}{1}$	16			67 66	93 35				66 26	60				
78	$\frac{2}{0}$	15			66 66	93 34				66 26	59				
77		14			65 65	92 33				66 25	59				
77		13			65 65	92 32				65 24	58				
76		12			64 64	92 32				65 24	58				

76	11			64	64			91	31				65	23		57				
75	10			63	63			91	30				64	22		57				
75	9			62	62			91	29				64	22		56				
74	8			62	62			90	28				64	21		56				
74	7			61	61			90	27				63	20		56				
73	6			61	61			90	26				63	20		55				
73	5			60	60			89	26				63	19		55				
72	4			59	60			89	25				62	18		55				
72	3			59	59			88	24				62	17		54				
71	2			58	58			88	23				62	17		54				
71	1			58	58			88	22				61	16		53				
70	0			57	57			87	21				61	15		53				
DPH																BH				
HV/	A	B	C	D	E	F	G	H	K	15	30	45	15	30	45	N	BHN		Kp	M
10										N	N	N	T	T	T	500	300		si	pa
																kg	0kg			
VPN	ROCKWELL SCALES														BRINELL		SCLE	U.T.S.		
																	RO-			
																	SCOP			
																	E			

آزمایش ضربه

هدف آزمایش: مقدار انرژی جذب شده در مقابل شکستن یا نیروهای وارده در اثر ضربه

وسایل مورد نیاز:

۱- قطعه ای به ابعاد 10 در 10 و طول 57 mm.

2 دستگاه ضربه (شارپی).

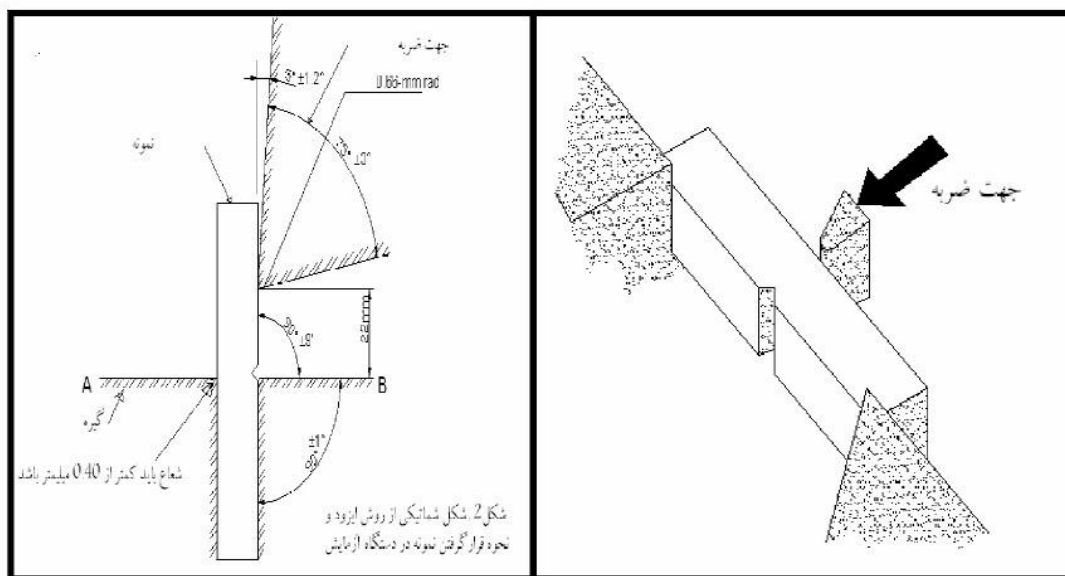
توضیحات:

یک ماده با وجود انعطاف پذیری و استحکام بالایی که دارد تحت تأثیر عواملی می تواند ترد و شکننده شود، بدین صورت که تحت آن شرایط تمایل به یک شکست ناگهانی با مقدار بسیار کمی تغییر شکل پلاستیکی پیدا می کند. طبیعتاً این پدیده می تواند خطرات زیادی را به دنبال داشته باشد. عمده ترین عوامل مؤثر عبارتند از: درجه حرارت‌های پائین، سرعت‌های بالای وارد آمدن تنش، حالت تنش سه محوری.



علل ظاهرگشتن خاصیت تردی می تواند، تجمع رسوبات یا فازهای سخت مخصوصاً در مرزدانه ها، نفوذ گازها(ترد شدن در اثر گاز هیدروژن)، ایجاد عیوب نقطه ای(جاهای خالی) در اثر اشعه دادن و همچنین اثرات خوردگی و اکسیداسیون باشد. از این جهت گفته می شود که در موضعی که بی نظمی وجود دارد مقدار تنش ایجاد شده به طور موضعی از تنش شکست تجاوز کرده و ترک ظاهر می شود و به محض شروع ترک تمرکز تنش پیش می آید و ترک گسترش یافته منجر به شکست می شود.

به کمک آزمایش ضربه می توان محدودیتهای درجه حرارتی را که در آن مواد رفتاری ترد و یا نرم از خود نشان می دهند، مشخص کرد. در این آزمایش ضربه، مقدار کار یا انرژی لازم برای شکست یک نمونه(از جنس فلز یا مواد پلیمری)، که تحت شرایط نامناسب تنش قرار گرفته باشد(با ایجاد یک شیار در آن)، اندازه گیری می شود. چنانچه این مقدار انرژی کم باشد می توان چنین نتیجه گیری نمود که ماده ترد بوده و دارای حساسیت بالائی در مقابل نیروهای ضربه ای است و اگر این انرژی بالا باشد ماده نرم و انعطاف پذیر است و بار بیشتری را می تواند تحمل کند و یا به عبارتی دارای سفتی(چقرمگی) بالایی است. با این آزمایش همچنین می توان محدوده درجه حرارت انتقال شکست نرم به شکست ترد را تعیین کرد.

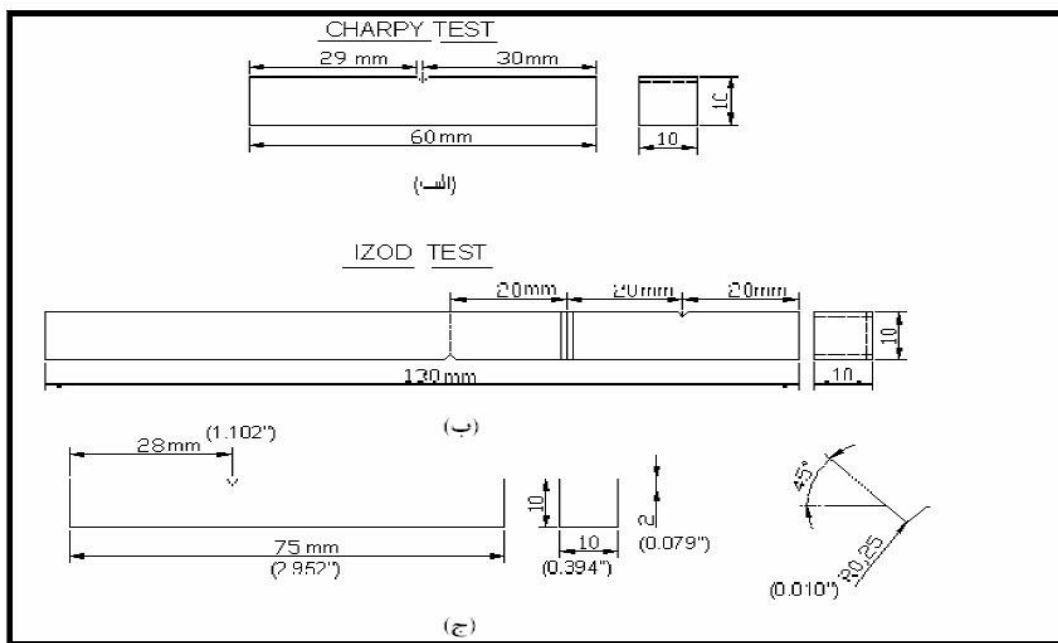


از مهم‌ترین و متداول‌ترین روش‌های آزمایش ضربه دو روش چرپی و ایزود است. این دو روش تنها در طرز قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه آزمایش ضربه با یکدیگر تفاوت دارد. در روش چرپی دو انتهای نمونه به طور آزاد بر روی تکیه‌گاه قرار گرفته و ضربه توسط آونگی که از نقطه تعادلش منحرف شده به پشت شیار نمونه وارد می‌شود. در روش ایزود، نمونه به طور عمودی درگیره بسته شده و ضربه اندکی بالاتر از شیار به نمونه وارد می‌شود. در هر دو نوع روش مقدار انرژی یا کاری که صرف شکست و یا احیاناً تغییر شکل نمونه شده اندازه‌گیری می‌شود.

بدین ترتیب که حاصل ضرب وزن آونگ در اختلاف ارتفاع آونگ قبل و بعد از ضربه تعیین می‌شود. این مقدار انرژی برابر تفاضل انرژی پتانسیل اولیه و انرژی پتانسیل باقیمانده است:

$$E = E_0 - E_1 = mg (h_0 - h_1)$$

ابعاد نمونه و همچنین نوع شکل شیار (یا U یا V) و ابعاد آن استاندارد شده است. از آنجایی که انرژی لازم برای شکست، به چگونگی حالت تنش در نمونه بستگی دارد، بنابراین در نتایج آزمایش عواملی چون شکل و اندازه نمونه، نوع و عمق شیار، شعاع ته شیار و ضخامت مقطع شیار مؤثر خواهد بود.



از عوامل مهم دیگر در این آزمایش درجه حرارت است. زیرا فلزات در درجه حرارتهای بالا نرمتر یا انعطاف پذیرترند، لذا برای شکست آنها انرژی بیشتری لازم است. در درجه حرارتهای پایین بیشتر فلزات رفتاری تردتر خواهند یافت. به همین جهت در صنایع هواپیماسازی، کشتی سازی، قطارسازی، پل سازی، مخزن سازی (مخازن گاز مایع و غیره) لازم است که رفتار فلزات را در درجه حرارتهای پایین نیز مد نظر قرار دهد. در درجه حرارتهای نسبتاً بالا مقدار کار یا انرژی لازم برای شکست نمونه بالا است و شکستها در این درجه حرارتهای به طور کاملاً واضحی تغییر شکل پلاستیکی را نشان می دهند. در درجه حرارتهای پایین مقدار انرژی لازم برای شکست بسیار پایین است و شکستها در درجه حرارتهای پایین همراه با تغییر شکل پلاستیکی نبوده و به صورت شکست اجسام ترد است. آزمایش ضربه همچنین برای بررسی و کنترل در صحیح بودن عملیات حرارتی و همچنین برای تعیین حساسیت فولادها در مقابل تردی پیر سختی و تردی بازپختی استفاده می شود.

روش آزمایش:

ابتدا وزنه ای به اندازه 19.5kg و طول پاندول 82cm با سرعت 5m/s بر جسم مورد نظر نیرو وارد می کنیم. در اثر برخورد وزنه پاندول با جسم مورد نظر، جسم متلاشی می شود که مقدار انرژی لازم روی صفحه ی مدرج دستگاه ثبت می گردد. مقدار زاویه ابتدای پاندول $\alpha = 156^\circ$ و زاویه ای که روی صفحه ی مدرج دستگاه ثبت می گردد با توجه به جنس مورد نظر مشخص می شود، که مقدار آن برحسب β ، تعیین می گردد. علاوه بر مقدار انرژی مشخص شده روی دستگاه می توان از فرمول زیر مقدار انرژی لازم را بدست آورد:

$$A = W \times L \times (\cos \beta - \cos \alpha)$$

چگونگی انجام آزمایش:

ابتدا در قطعه مورد نظر شیاری به عمق 2mm ایجاد نمایید و سپس قطعه را در مابین دو تکیه گاه قرار می دهیم، سپس مقدار نیروی لازم را توسط پاندول و وزنه به پشت شیار وارد نمایید. در اثر برخورد وزنه جسم متلاشی می شود و مقدار انرژی جسم بدست می آید. قطعات بر اساس میزان کرنی که در مقاطع مختلف آن وجود دارد مقدار انرژی شکست آن متفاوت می شود. مقدار گرما در مقدار انرژی جذب شده تأثیر دارد، گرما باعث می شود که جنبش مولکولها بیشتر شده و در نتیجه جسم حالت انعطاف از خود نشان می دهد و نرم می شود و در نتیجه دیرتر شکسته می شود.

نتیجه آزمایش: پس از آزمایش نتایج زیر حاصل می شود:

جنس	زاویه α	زاویه β	نیروی F
فولاد	156	87	15/5
آلومینیوم	156	145	2
برنج	156	142	15/5

نتیجه کلی:

قطعه در اثر مقدار کرنی که در مقاطع مختلف a وجود دارد مقدار انرژی شکست آن متفاوت است مقدار گرما در مقدار انرژی جذب شده اثر می گذارد گرما باعث میشود جنش ملکولها بالاتر برود و جسم حالت انعطاف از خود نشان دهد و دیرتر شکسته شود به طور کلی اجسام نرم انرژی بیشتری نسبت به اجسام سخت جذب می کنند بطور کلی اجسام نرم انرژی بیشتری نسبت به اجسام سخت جذب می کنند .

نتیجه گیری:

تفاوت مقاومت در برابر ضربه از لحاظ دانه بندی فلز: با مشاهده سطح مقطع شکست در دو نمونه فولادی و برنجی در دمای یکسان در می یابیم که نوع قرارگیری ذرات فلز در فولاد به صورت رشته های کنار هم است ولی در نمونه برنجی قرارگیری ذرات به صورت دانه های جدا از هم است . به همین دلیل سطح مقطع شکست در نمونه فولادی ناصاف تر از نمونه برنجی است. از طرفی دانه های برنج دارای قطر بیشتری نسبت به دانه های فولاد است و با توجه به نتایج بدست آمده در آزمایش که بیانگر آن است که در دمای یکسان برنج انرژی بیشتری در خود ذخیره می کند (نرم تر است) می توان نتیجه گرفت هر اندازه میزان قطر دانه های فلز بیشتر باشد آن فلز نرم تر است ، در نتیجه مقاومت بیشتری در برابر بارهای ضربه ای تحمل می کند.

آزمایش برش

هدف آزمایش: در این آزمایش به دنبال آشنایی با روشهای برش فلزات و تعیین حد استحکام فلزات در برش هستیم. آزمایش برش با اینکه مقادیر دقیق و بنیادی استحکام برش را نمی دهد، لیکن معیار خوبی برای ارزیابی کیفی ماده و تعیین رفتار آن در فرایندهای تولید و شکل دادن که با بریدن با قالبهای نر و ماده (لقمه زنی) و قیچی کاری سر و کار دارند، می باشد.

تنوری آزمایش: دو نوع آزمون اساسی برای تعیین خواص برشی مواد مورد استفاده هستند. یک روش بر اساس اعمال گشتاور پیچشی به یک نمونه ی آزمایش استوانه ای قرار دارد، که موجب پیچیدن آن می شود، و روش دیگر آزمون برشی مستقیم است. در آزمون اول تنش برشی تقریباً خالصی در ماده به وجود می آید اما این تنش برشی در تمام مقطع یکنواخت نیست و از مقدار صفر در محور مرکزی استوانه تا مقدار بیشینه در سطح خارجی آن تغییر می کند. در این روش در محدوده ی کشسان با بالا بردن گشتاور پیچشی، زاویه ی پیچش به طور مستقیم افزایش می یابد. تا زمانی که همه ی تنشها و کرنشها کشسان باشند، تغییرات تنش در قطر نمونه چندان اهمیتی ندارد اما هنگامی که تنش برشی در سطح نمونه به حد تسلیم می رسد و کرنشهای مومسان (پلاستیک) شروع می شوند، نتایج آزمایش غیر قابل اعتماد می شوند. کرنش مومسان به طور نامنظم به درون نمونه گسترش می یابد و موادی مانند فولاد نرم با نقطه ی تسلیم مشخص، بی نظمی بیشتری از فلزات دیگر نشان می دهند.

یک راه حل برای کاهش این مشکلات استفاده از استوانه ی تو خالی است که در این قبیل نمونه ها تفاوت بین تنش برشی در سطح خارجی و داخلی کاهش می یابد ولی در عوض اشکال موجود آن است که تمایل به کمانش مومسان در نمونه های لوله ای شکل با کاهش ضخامت دیواره به شدت افزایش پیدا می کند.

در بعضی موارد آزمونهای برش مستقیم مورد استفاده قرار می گیرند، ولی بدست آوردن نتایج کمی از این آزمونها دشوار است. برای شبیه سازی برخی فرایندهای شکل دادن قطعات فلزی مناسب است و نتایج آن بیشتر کیفی می باشد. در این نوع آزمونها نیروی خمشی بر نمونه وارد می شود و نمونه دچار شکست خواهد شد. نکته ی مهم این است که استحکام به هنگام برش نه تنها به نسبت لغزیدگی مواد بستگی دارد بلکه به تمام تنشهای تکمیلی که به هنگام برش در اثر خمش به وجود می آیند بستگی دارد. مقدار حد استحکام به هنگام برش فقط در موقعی ارزش علمی دارد که نیروی وارده بر نمونه با شرایط کار قطعات در معرض برش نزدیک باشد.

روش های آزمون برش یک عیب مشترک دارند . حتی اگر تمام اجزای دستگاه از مواد بسیار سخت و با تفرانسهای بسیار دقیق ساخته شده باشند ، قدری خمش صورت می گیرد و تنشهای ایجاد شده در ماده از نوع برشی خالص نیستند و مقداری تنش خمشی با آنها همراه است . نکته دیگر این که بین حد استحکام در کشش مواد σ (آزمایش کشش روی میله ی فولادی) و حد استحکام در برش τ تناسب تقریبی قرار دارد برای مثال : $\tau = (0.6 \text{ to } 0.8) \sigma$

شرح آزمایش :

سه نمونه ی فولادی ، برنجی و آلومینیومی را انتخاب کرده و قطر آنها را اندازه گیری می کنیم ($d=8 \text{ mm}$) . دستگاه دارای دوفک است که یکی از آنها ثابت بوده و نمونه را نگه می دارد و دیگری متحرک است و نمونه را از وسط می کشد . نمونه ها را به طور جداگانه در بین فکهای دستگاه قرار می دهیم و دستگاه را روشن می کنیم با باز کرد شیر دستگاه مقدار نیرو را رفته رفته زیاد می کنیم و افزایش نیرو را به هنگام متلاشی شدن نمونه یادداشت می کنیم . دستگاه به نرم افزار مجهز است که نمودار تغییرات نیرو و جابجایی نمونه را برای ما ثبت می کند (نمودار در ادامه ارایه شده است). حد استحکام (τ_{max}) نمونه را در برش از روی رابطه ی زیر حساب می کنیم :

$$\tau = \frac{F_{max}}{2A}$$

در این رابطه F_{max} نیرویی است که نمونه در اثر آن بریده شده است و A مساحت سطح مقطع عرض نمونه می باشد . حد استحکام نمونه تحت برش τ را باید با حد استحکام نمونه تحت کشش σ مقایسه کرد .

آلومینیوم

$$d = 8 \text{ mm} \quad , \quad F_{max} = 1300 \text{ kg} = 13000 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{13000 \text{ N}}{2 * \pi * 4^2} = 13000/100.48 = 129.4 \text{ N/mm}^2$$

فولاد نرم

$$d = 8 \text{ mm} \quad , \quad F_{max} = 2750 \text{ kg} = 27500 \text{ N}$$

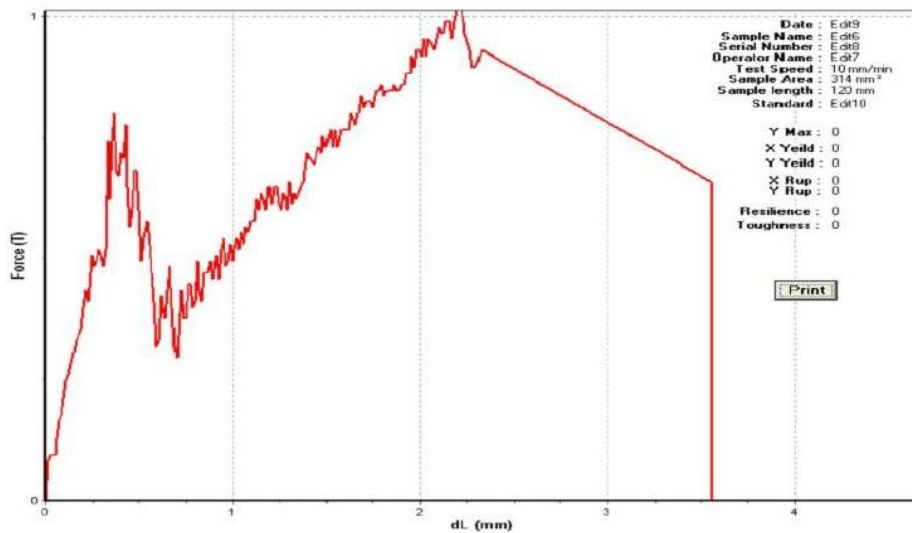
$$\tau = \frac{27500 \text{ N}}{2 * \pi * 4^2} = 27500/100.48 = 273.7 \text{ N/mm}^2$$

برنج

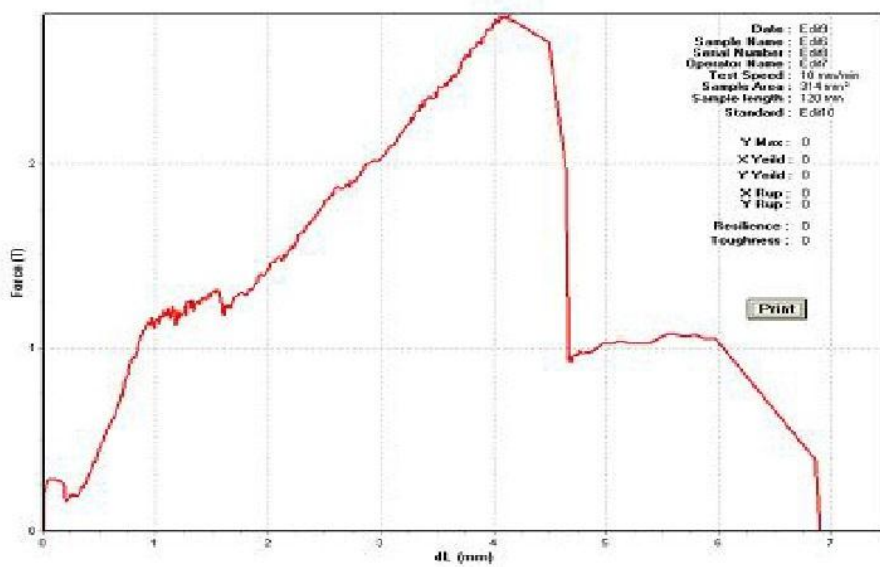
$$d = 8 \text{ mm} \quad , \quad F_{max} = 2540 \text{ kg} = 25400 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{25400 \text{ N}}{2 * \pi * 4^2} = 25400/100.48 = 252.9 \text{ N/mm}^2$$

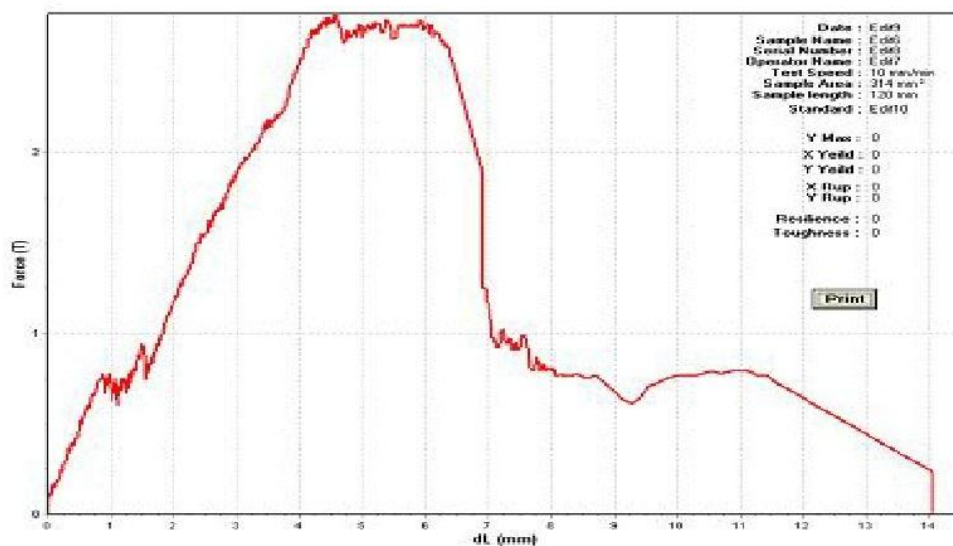
مقاومت برشی τ , N/mm ²	نیروی بیشینه F , N	قطر نمونه D ,mm	نمونه
129.4	13000	8	آلومینیوم
252.9	25400	8	برنج
273.7	27500	8	فولاد نرم



عودار برش آلومینیوم



عودار برش برنج



مودار برش فولاد

نتیجه گیری :

با تقسیم مقدار مقاومت برشی فولاد بر ضریب تناسب مقداری نزدیک به مقدار مقاومت کششی بدست می آید ($273.7/0.6 = 460$ که این مقدار به σ نزدیک است) پس رابطه برقرار خواهد بود . همچنین با توجه به مقادیر بدست آمده در می یابیم که علاوه بر سایر آزمونهای تنش ی این آزمون هم به سختی نمونه ی در حال آزمایش وابسته است و هر چه نمونه سخت تر باشد در مقابل برش مقاومت بیشتری نشان می دهد به همین دلیل است که در صنایع قطعات نگه دارنده و در ساختمان سازی ستون ها و تیر های داخل سقف ها را از فولاد می سازند چرا که در اثر نیرو دچار برش نشده و متلاشی نمی گردد .

آزمایش کشش

هدف:

بدست آوردن استحکام مواد، مقدار مدول الاستیسیته و ترسیم منحنی تنش- کرنش.

وسایل مورد نیاز

قطعه ای به قطر 16 میلیمتر و طول 34 سانتیمتر، ساعت اندازه گیری و دستگاه کشش.

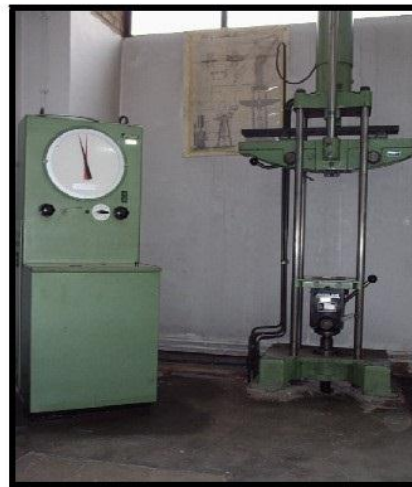
توضیحات:

در یک آزمایش کشش اطلاعات فراوانی از خواص جسم به دست می آید مانند: استحکام، مدول الاستیسیته، ضریب

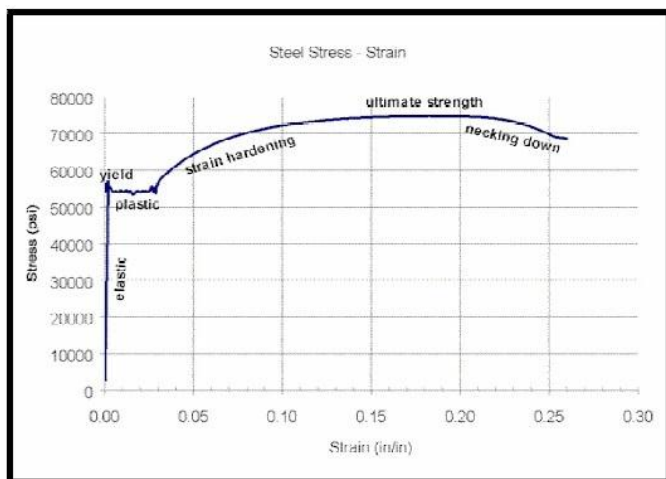
برجهنگی، شکل پذیری و تردی، چقرمگی

در این آزمایش نمونه ای از ماده موردنظر را در یکی از انواع ماشینهای کشش می کشند. چند نوع ماشین کشش در شکل

زیر نشان داده شده است:



نیروی اعمال شده بر نمونه توسط خود دستگاه اندازه گیری شده و کرنش در طول نمونه توسط وسیله ای که بر روی خود نمونه وصل میشود اندازه گیری میشود. از اطلاعات حاصله در مورد نیرو و کرنش میتوان، منحنی تنش - کرنش را که نمونه آن در شکل زیر دیده میشود بدست آورد. تنش را بر مبنای نیروی وارده تقسیم بر سطح مقطع اولیه نمونه محاسبه میکنند.



$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

در شکل فوق تا سطح معینی از نیرو، تنش و کرنش با هم تناسب خطی دارند. حد تنش که از آن به بعد با کرنش تناسب خطی ندارد حد تناسب نام دارد. در تنشهای پایینتر از حد تناسب، جسم از قانون هوک تبعیت میکند. طبق این قانون در محدوده ارتجاعی اجسام، تنش و کرنش با هم تناسب خطی دارند. نسبت بین تنش و کرنش در محدوده ارتجاعی به مدول یانگ و یا ضریب ارتجاعی شهرت دارد، که خاصیت ذاتی ماده بوده و از اهمیت خاصی برخوردار است. ضریب ارتجاعی معیاری از سفتی جسم است و در نتیجه میزان مقاومت جسم با سطح مقطع مشخص را در مقابل تغییر شکل هنگام وارد شدن نیرو نشان میدهد.

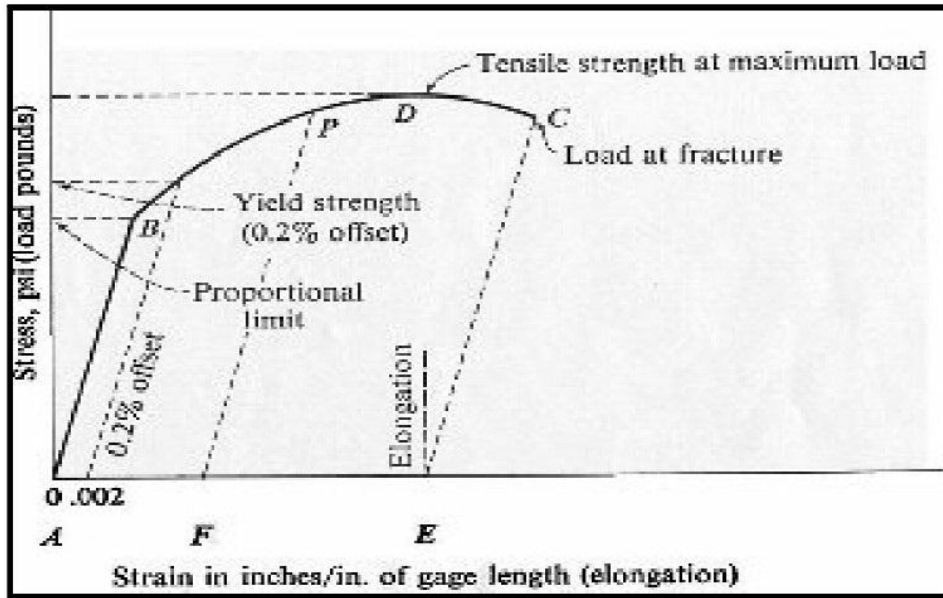
تا سطح معینی از تنش، پس از برداشتن نیرو جسم به شکل اولیه خود برمیگردد. در نتیجه از تنش صفر تا این تنش رفتار جسم ارتجاعی است. بزرگترین تنش که در آن هنوز جسم واقعاً ارتجاعی است حد ارتجاعی نام دارد. در برخی از اجسام حد ارتجاعی و حد تناسب بر هم منطبق اند ولی در اکثر موارد حد ارتجاعی کمی بالاتر از حد تناسب است.

مقدار انرژی قابل ذخیره شدن در واحد حجم جسم در محدوده ارتجاعی بر چهندگی نام دارد که غالباً به آن ضریب برچهندگی نیز گفته میشود. چون انرژی حاصلضرب نیرو و فاصله است، مساحت سطح زیر منحنی تنش - کرنش در

محدوده ارتجاعی همان ضریب برجهندگی جسم است زیرا :

$$\sigma \times \varepsilon = \frac{N}{m^2} \times \frac{m}{m} = \frac{J}{m^3}$$

انرژی برجهندگی از نوع انرژی پتانسیل است و در موقع برداشتن نیرو از روی جسم آزاد میشود. بعد از حد ارتجاعی، تناسب بین تنش و کرنش از بین می رود و در برخی مواد در حدی از تنش بدون اضافه شدن نیرو تغییر شکل ادامه می یابد. این حد نقطه تسلیم و یا تنش نقطه تسلیم نامیده میشود. بسیاری از مواد نقطه تسلیم مشخص ندارند. منحنی تنش و کرنش این قبیل اجسام عموماً به شکل زیر است.



برای این مواد مقاومت تسلیم را به جای تنش تسلیم به کار می برند و طبق تعریف، مقدار تنشی است که موجب ایجاد میزان مشخصی تغییر شکل دائمی میشود. در شرایط کلی کرنش هایی چون 0/2 درصد را به کار می برند. در این صورت با داشتن منحنی تنش - کرنش با رسم خطی به موازات قسمت خطی منحنی، مطابق شکل فوق، میتوان مقاومت تسلیم جسم را به دست آورد.

ازدیاد طول بعد از حد ارتجاعی پلاستیکی بوده و به آن تغییر شکل دائمی و یا تغییر شکل پلاستیکی میگویند. این نوع ازدیاد طول بعد از برداشتن نیرو از بین نمی رود.

چنانچه کشیدن نمونه بعد از نقطه تسلیم ادامه یابد تنش حاصله به تدریج اضافه میشود و به حداکثر خود میرسد، که مقاومت نهایی یا مقاومت کششی نام دارد. هنگام کشیدن مواد نسبتاً شکل پذیر بعد از حد ارتجاعی حالت گردنه ایجاد میشود. در نتیجه این عمل نیروی لازم برای تغییر شکل کم شده و منحنی تنش - کرنش سیر نزولی خود را طی میکند. چنانچه نمونه را بیشتر بکشند بالاخره به دو قسمت خواهد شد. تنش ایجاد شده در نمونه هنگام شکستن مقاومت شکست یا مقاومت گسستگی نام دارد. در اجسام نسبتاً شکل پذیر مقاومت شکست کمتر از مقاومت نهایی جسم است. شکل کلی منحنی تنش - کرنش اجسام ترد مانند شکل فوق است. در این قبیل مواد مقاومت شکست و مقاومت نهایی با هم برابرند و گردنه مشاهده نمیشود.

شکل پذیری و تردی:

قابلیت تغییر شکل پلاستیکی ماده بدون خطر شکستن، شکل پذیری نام دارد. ازدیاد طول نمونه های کشش در تمام طول یکسان نیست، حتی اگر سطح مقطع نمونه قبل از آزمایش دز تمام طول نمونه یکسان باشد. معمولاً شکل پذیری را بر حسب ازدیاد طول نمونه با طول مشخص بیان میکنند. معیار دیگر سنجش شکل پذیری، کم شدن سطح مقطع نمونه پس از ایجاد گردنه است. بنابراین گاهی اوقات درصد کم شدن سطح مقطع پس از گردنه در مقایسه با مقطع اولیه به عنوان شکل پذیری ماده گزارش میشود. اگر تغییر شکل دائمی نمونه قبل از شکستن بسیار ناچیز یا صفر باشد جسم ترد است. بنابراین، میتوان تردی را عدم وجود شکل پذیری دانست.

ارائه نتایج بدست آمده از آزمایش کشش :

نتایج زیر بدست آمده است: mm و طول 15mm در اثر اعمال نیرو بر قطعه از جنس آلومینیوم با قطر 8

mm افزایش طول	(ton) نیرو
0.36	0.25
0.71	0.64
1.52	0.87
2.94	0.96
4.35	1.04
5.81	1.11
7.3	1.16
8.75	1.18
10.3	1.20

چقرمگی

طبق تعریف، مقدار کار لازم برای شکستن واحد حجم ماده چقرمگی نام دارد.

چون سطح زیر منحنی تنش - کرنش نمایانگر مقدار انرژی لازم برای گسستن نمونه آ آزمایش است میتوان چقرمگی ماده را از آزمایش کشش بدست آورد. واحد ضریب چقرمگی، انرژی بر واحد حجم است. چقرمگی یک خاصیت نسبتاً کیفی است زیرا بر حسب بارگذاری نمونه، نتیجه آزمایش تفاوت فراوان میکند. غالباً این خاصیت در ارتباط با لرزش و ضربه بکار میرود.

روش انجام آزمایش

ابتدا قطعه ای به طول 34 سانتیمتر و قطر 16 میلیمتر روی دستگاه به صورتی که مابین دو فک دستگاه قرار گیرد قرار دهید. قطعه در هر فک به اندازه 7 سانتیمتر فرو می رود. سپس نیروهایی به اندازه 500 نیوتن به طور پیوسته وارد نمایند. در حین وارد کردن نیرو تغییر طول جسم را اندازه گرفته در نقطه ای که نیرو افزایش می یابد ولی تغییر طول نداریم مقدار تنش برابر با تنش جاری شدن میباشد. مقدار نیرو را افزایش داده تا در قطعه حالت پارگی ایجاد شود. به وسیله مقدار تغییر طول، منحنی را رسم کنید.

برای یک آزمایش عملی در آزمایشگاه مقاومت مصالح نتایج زیر حاصل شده اند. از روی این اطلاعات دیاگرام تنش - کرنش

ترسیم شده است

$$\varepsilon = \Delta D / D = (16 - 16.28) / 16 = -0.0175 \quad \text{قطر اولیه: 16 میلیمتر ، طول اولیه: 34 سانتیمتر.}$$

$$\varepsilon = \Delta L / L = (38 - 34) / 34 = 0.1176 \quad \text{قطر ثانویه: 8.28 میلیمتر ، طول ثانویه: 38 سانتیمتر.}$$

F(N)	$\Delta L(\text{mm})$	$\sigma (N/mm^2)$	$\varepsilon(\%)$
500	0.92	2.48	0.46
1000	1.61	4.9	0.80
1500	2.29	7.4	1.1
2000	2.87	9.9	1.4
2500	3.49	12.4	1.7
3000	3.95	14.8	1.9
3500	4.41	17.3	2.2
4000	4.81	19.8	2.4
4500	5.30	22.3	2.6
5000	5.71	24.8	2.8
5500	6.10	27.2	3.0
6000	6.52	29.7	3.2
6500	6.90	32.3	3.4
7000	7.33	34.7	3.6
7500	7.76	37.2	3.8
8000	8.17	39.6	4.1
8500	8.69	42.1	4.3
9000	9.32	44.6	4.6
9500	10.32	47.1	5.1
10000	12.40	49.6	6.2
10500	18.60	52.1	9.2
11000	22.30	54.5	11.1

فشار

آزمایش فشار معمولاً برای بررسی کیفیت مواد ترد مانند چدن و آلیاژهای ترد و همچنین مواد غیر فلزی دیگری که در شرایط کاری بیشتر تحت تاثیر نیروهای فشاری قرار خواهد گرفت، مثل تکیه گاههای فلزی یا آلیاژهای یاتاقانی، مواد سرامیکی، بتن و همچنین برای بررسی رفتار مواد فلزی که در عملیات شکل دهی تحت تنشهای فشاری قرار می گیرند به کار می رود.

در آزمایش فشار، نمونه استوانه ای شکل توپر را در قسمت مرکزی فکها یا صفحه های فشاری دستگاه آزمایش قرار داده و از دو طرف تحت تاثیر نیروی فشاری قرار می دهند. تجربه نشان می دهد که:

الف - مدول الاستیکی مواد تحت تاثیر تنشهای کششی و فشاری برابر است.

ب - در مواد نرم (شکل پذیر) نتایج به دست آمده از آزمایش کشش و فشار تقزیم برابر است. این گونه مواد تحت تاثیر نیروهای فشاری معمولاً بدون اینکه بشکنند به فشردگی خواهند شد. بعد از اینکه تغییر شکل به مقدار ماکزیمم خود رسید، ترکهای طولی در نتیجه تنشهای کششی و یا ترکهای حدود 45 درجه ای در اثر تنشهای برشی در لایه سطح خارجی ایجاد می شود.

ج - در مواد ترد نتایج حاصله از کشش و فشار، تفات قابل توجهی نشان می دهد. برای مثال در چدن خاکستری اثر شیار در لایه های گرافیتی بر خلاف آزمایش کشش بی تاثیر است. ولی چوب به علت ساختار الیافی خود از این جهت مستثنی است.

د - نتایج حاصله از آزمایش فشار توسط عواملی مانند نوع پرداخت کاری سطح قاعده نمونه و نوع روغن کاری تغییر خواهد کرد.

کمیتهایی که آزمایش فشار به دست می آید و مشابه کمیتهای قابل اندازه گیری به وسیله آزمایش کشش است، عبارتند از:

1- حد تسلیم یا تنش سیلان که در مواد نرم همان تنشی است که به ازای آن تغییر شکل پلاستیکی شروع می شود (σ_y)

هرگاه این حد در نمودار بدست آمده بطور کاملاً واضحی مشخص نباشد بجای آن تنشی را که به ازای آن 0/2% تغییر شکل نسبی برجای ماندنی داریم یعنی $\sigma_{0.2}$ را تعیین میکنیم.

۲- استحکام فشاری، تنشی است که به ازای آن اولین نشانه از ترک یا شکست روی سطح نمونه ظاهر میشود

{ $\sigma = F_{max} / A_0$ } اما برخلاف آزمایش کشش از آغاز تغییر شکل تا لحظه شکست نیرو افزایش می یابد زیرا به

سطح مقطع نمونه بطور پیوسته تا لحظه شکست افزوده میشود.

استحکام فشاری حقیقی رامیتوان با استفاده از رابطه زیر تعیین کرد :

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0 h_0/h} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{h}{h_0}$$

3- فشردگی نسبی شکست یا به عبارتی کاهش نسبی ارتفاع تا شکست $\sigma = \sigma_0 \left(1 - \frac{\Delta h}{h_0} \right) = \sigma_0 (1 - e)$ مقدار فشردگی نسبی شکست صنعتی و حقیقی بصورت زیر محاسب

$$e_{صنعتی} = \frac{\Delta h}{h_0}$$

$$e_{حقیقی} = - \int_{h_0}^h \frac{dh}{h} = - \ln \frac{h}{h_0} = \ln \frac{h_0}{h}$$

4- افزایش نسبی سطح مقطع شکست

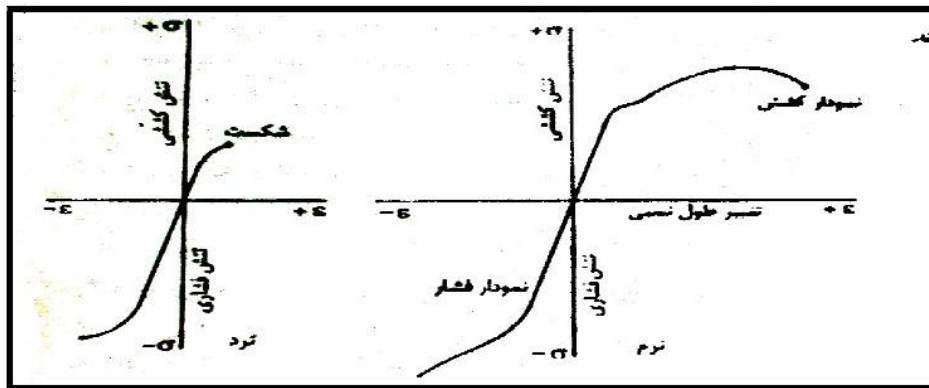
افزایش نسبی سطح مقطع شکست، بزرگترین مقدار تغییر شکل پلاستیکی (برآمدگی سطح جانبی) در زمان ظاهر گشتن

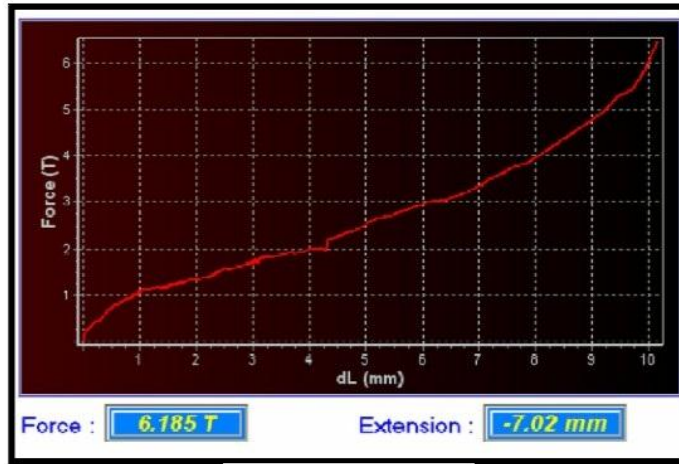
اولین ترک است .

$$e_A = \frac{\Delta A}{A_0} \cdot 100$$

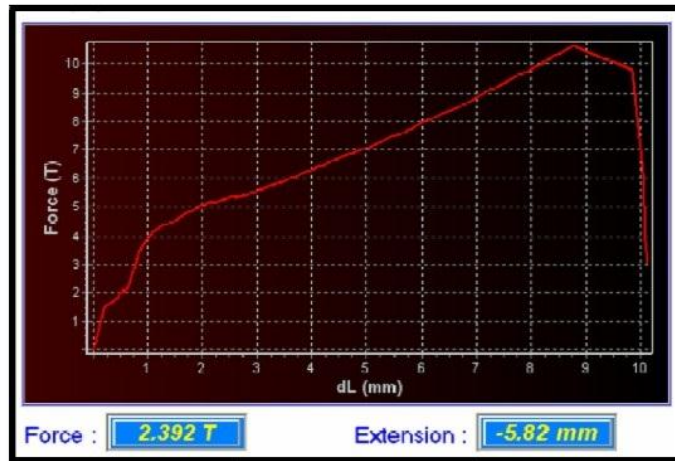
در اشکال زیر رفتار مواد نرم و ترد تحت

تنشهای کششی و فشاری برای مقایسه با یکدیگر نشان داده شده است

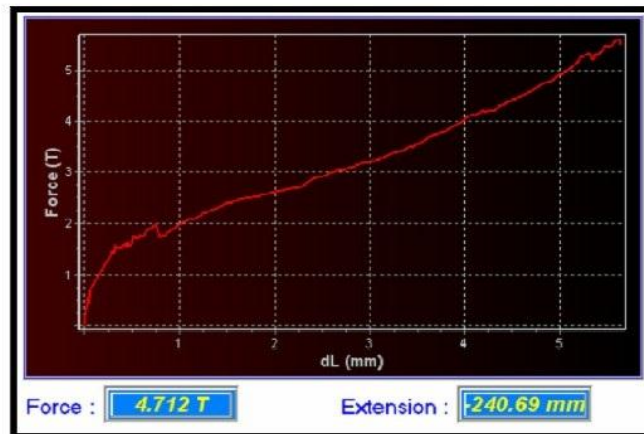




شکل نمودار فشار آلومینیوم



شکل نمودار فشار برنج

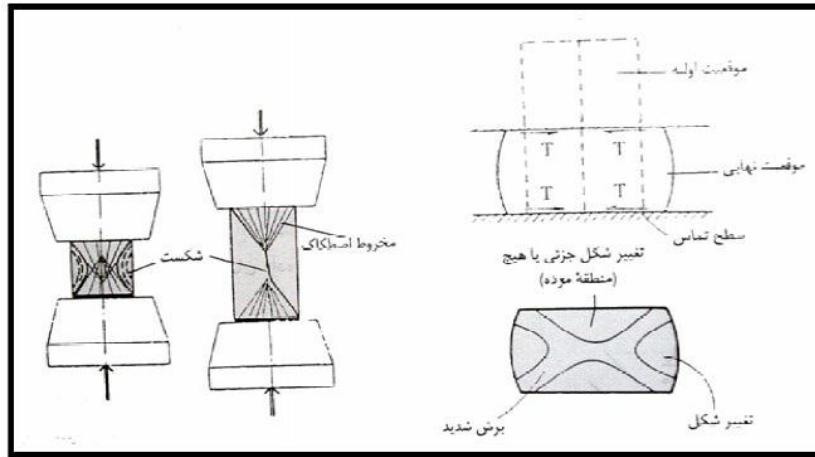


شکل نمودار فشار فولاد

تأثیر عوامل موثر بر نتایج آزمایش

1 حالت تنش و اصطکاک :

در آزمایش فشار نیروی خارجی معمولاً از طریق صفحات فضا موازی (فکها) که سطح تماس آنها با نمونه روغنکاری نشده است ($\mu > 0$) ضریب اصطکاک) انجام میگیرد. همراه با فشار محوری بعلمت وجود اصطکاک در سطح قاعده های نمونه تنشهای عرضی در جهت شعاع و مماس وارد میشود. لذا در نتیجه وجود اصطکاک و تنشهای ناشی از آن از تغییر شکل همگن و یکنواخت نمونه ممانعت میشود. و این ممانعت با افزایش فاصله از سطح فکها بصورت مخروطی کاهش می یابد. بدین صورت نواحی تاثیرپذیر مخروطی شکل بدست می آید (که هر یک از ناحیه ها اصطلاحاً مخروط فشار یا مخروط اصطکاک یا منطقه مرده نامیده میشود). که در آنها تنش هنوز بحد تسلیم (حد سیلان) نرسیده است. بدین ترتیب قسمتهای مخروطی شکل از نمونه که در تماس با فکهای دستگاه فشار قرار دارد به مقدار بسیار جزئی تغییر شکل یافته و یا هیچ تغییر شکلی نمی یابد و برعکس در قسمت وسط نمونه های نرم تغییر شکل پلاستیکی بدون هیچ ممانعتی صورت میگیرد. بطوری که نمونه بشکل یک بشکه که دور تا دور وسط آن متورم شده باشد در آمده و بدین ترتیب تغییر شکل بصورت غیر یکنواخت انجام می گیرد و درموقع شکست مواد ترد مشاهده میشود که مخروطهای اصطکاک برجا می ماند در صورتیکه بقیه قسمتهای نمونه بصورت لایه ای فرو میریزد که این پدیده به نسبت ارتفاع به قطر نمونه بستگی دارد (شکل زیر)



چنانچه از ممانعت تغییر شکل بوسیله روغنکاری بقدر کافی در سطح تماس بین فکها و سطوح قاعده نمونه جلوگیری شود بصورتیکه $\mu=0$ باشد ابتدا با تقریب نسبتاً خوبی یک حالت تنش تک محوری و یک حالت تغییر شکل سه محوری برقرار میشود. در اینصورت نمونه در امتداد محور فشرده و در جهت عمود بر آن (در جهت شعاع و مماس) انبساط خواهد یافت. با فراتر رفتن مقدار انبساط از حد معینی که بستگی به جنس نمونه دارد تنشهای شعاعی و مماسی ایجاد و شکست در

جهت عمود بر امتداد تغییر شکل در نمونه ظاهر میشود و بنابراین نمونه های روانکاوای شده در آزمایش فشار در جهت طول می شکنند .

- نسبت ارتفاع به قطر نمونه:

نمونه ها با ابعادی متناسب با ابعاد و خواص جسم مورد آزمایش و همچنین نسبت به نوع دستگاه آزمایش فشار انتخاب

میشوند. ابعاد متداول عبارتند از : $h_0 = ad_0$

در این رابطه h و d به ترتیب ارتفاع و قطر اولیه نمونه و a ضریبی است که میتواند بین 1 تا 3 تغییر کند .

در نمونه های بلند باید به خطر خمش تا حد شکست (کمانش) توجه شود. چون مخروطهای اصطکام بوجود آمده در اثر اصطکاک بطرف وسط نمونه کاهش می یابند نسبت ارتفاع به قطر بطور عمده ای بر روی استحکام فشاری تاثیر خواهد گذاشت. به اینصورت که موقعی که هردو مخروط در یکدیگر داخل میشوند استحکام فشاری به مقدار ماکزیم خود خواهد رسید . برای برای یک قطر ثابت با افزایش نسبت d/h (یعنی با کاهش ارتفاع) شکست به ازای تنشهای بالاتری ظاهر میشود. از طرفی وجود اصطکاک بین سطح تماس نمونه و فکهای دستگاه آزمایش فشار سبب تغییر شکل نا همگن یا غیر یکنواخت میشود. یک راه برای کم کردن اصطکاک و در نتیجه افزایش تغییر شکل یکنواخت در نمونه تحت فشار کاهش نسبت d_0/h_0 است. اما کاهش بسیار زیاد قطر هم سبب کاهش حد فشردگی یا بروز خطر کمانش و شکست زودرس خواهد شد. از این جهت با استفاده از روغن کاری می توان تاثیر اصطکاک را تا حد امکان به حداقل رسانید. تجربه نشان داده است که مقدار مناسب برای d_0/h_0 حدود 0/5 است .

3- در پرداختکاری سطح قاعده نمونه:

نوع و درجه پرداختکاری سطوح قاعده از عواملی است که کم و بیش بروی استحکام فشاری به دست آمده تاثیر خواهد گذاشت .

4- شکل نمونه :

نمونه های استوانه ای شکل استحکام فشاری بالاتری را نسبت به نمونه های مکعبی شکل با همان سطح قاعده و همان ارتفاع نشان میدهد , زیرا که توزیع تنش در نمونه های استوانه ای شکل مناسبتر از نمونه های مکعبی شکل است .

آزمایش خمش (Bending Test)

توضیحات :

در این آزمایش برخلاف آزمایش کشش و فشار که نیروی وارده موازی محور قطعه مورد آزمایش می باشد نیروی عمود بر قطعه وارد خواهد آمد و یا به عبارت دیگر نحوه بار گذاری به صورتی است که در مقطع عرضی قطعه فقط ممان خمشی ایجاد گردد و از بوجود آمدن نیروهای برشی و غیره جلوگیری می گردد و چون مقدار ممان در تمام مقطع یکسان نیست توزیع تنش نیز به صورت یکنواخت نبوده و تنش خمشی در یک مقطع ماکزیمم را دارا می باشد یعنی در همان مقطع که ممان ماکزیمم مقدار خود را دارا می باشد وقتی یک قطعه در اثر خمش خم گردد نسبت بین ممان خمشی وارده و تغییر شکل آن از یک طرف و نسبت بین تغییر شکل و تنش آن از یک طرف از طرف دیگر توسط فرمولهای زیر بیان می شود:

$$\frac{E}{R} = \frac{M}{I} \cdot \frac{\sigma}{Y} = \frac{M}{I}$$

R= شعاع خمش

E= مدول یا ننگ

M= ممان خمشی

Y= فاصله تنش وارد شده تا صفحه خمش

σ = تنش کششی (فشاری)

I= ممان اینرسی



مواد و نحوه ی آزمایش:

یک قطعه چوب و دستگاه کشش و فشار،

یک کامپیوتر برای رسم نمودار

هدف آزمایش:

بدست آوردن ممان اینرسی قطبی و

همچنین مقاومت جسم مورد نظر

روش آزمایش

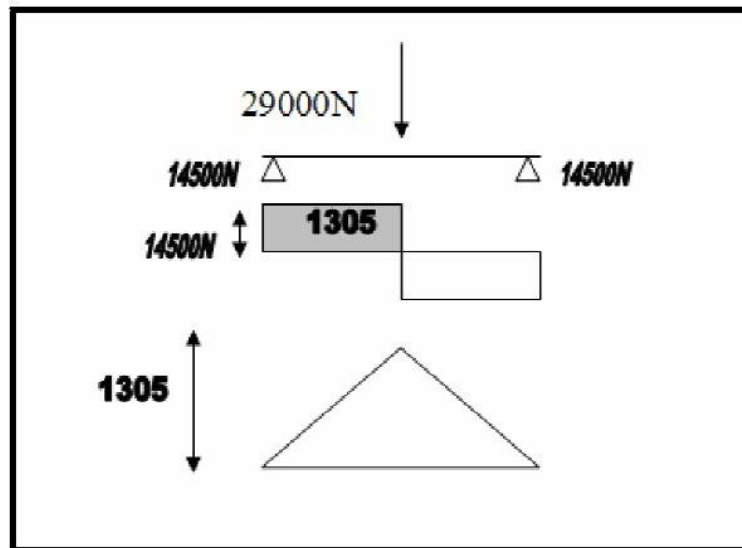
ابتدا ابعاد قطعه مورد نظر را اندازه گرفته سپس ما بین دو تکیه گاه دستگاه قرار می دهیم، فاصله دو تکیه گاه را یادداشت می کنیم و نیروی دستگاه را اعمال کرئیم تا قطعه بشکند مقدار حداکثر نیرو و همچنین استفاده از ابعاد ممان قطبی و در نتیجه تنش و مقاومت قطعه را بدست می آوریم که مقطع نمونه آزمایش تاثیر زیادی دارد که مقطع مربعی نتیجه خوبی می دهد و همچنین زیاد بودن نسبت طول به عرض در مقطع مربعی نتایج مطلوب تری را به دنبال دارد.

ابعاد سطح مقطع: $4.7 \text{ cm} * 4.7 \text{ cm}$

فاصله دو تکیه گاه: 18 cm

نیروی لازم برای شکست در مرحله اول 2900 kgf

از جهت دیگر 2950 kgf می باشد که به دلیل مربعی بودن مقطع می باشد



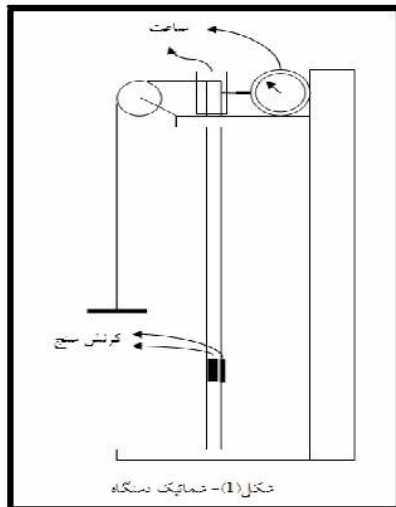


خمش مرکب

هدف آزمایش:

- 1- پیدا کردن مدول الاستیسیته (E) مصالح تیر؛
- 2- بررسی رابطه بین جهت بار و جهت تغییر مکان مکز مقطع تیر؛
- 3- تعیین مکان هندسی مرکز مقطع تیر در اثر تغییر جهت بار ثابت؛
- 4- تعیین تنش های ماکزیمم در اثر تغییر جهت بار ثابت

ابتدا به اندازه گیری تغییر مکان سر تیر ر اثر بارهای وارده می پردازیم. بدین صورت که یک بار در جهت Z و یک بار در جهت Y بار گذاری را انجام داده ونتایج را پس از قرائت از روی ساعت، در جدول یادداشت می کنیم. پس از این مرحله، از دستگاه Strain indicator کمک گرفته و بوسیله کرنش سنجهای نصب شده روی تیر، در ازای بار ثابت که جهت اعمال آن تغییر می کند کرنش را اندازه می گیریم. همچنین تغییر مکان سر تیر در جهت مورد نظر را نیز اندازه می گیریم. پس از آن با کمک مقادیری که اندازه گیری شده اند و مقادیر تئوری نمودارهایی برای مقایسه تئوری و تجربی رسم می کنیم. این نمودارها عبارتند از نمودار بار بر حسب تغییر مکان، نمودار مکان هندسی تغییرات مرکز مقطع تیر، نمودار تنش های ماکزیمم در محل استرین گیج ها و نمودار تغییرات زاویه .



نام وسایل آزمایش و شکل شماتیک دستگاه:

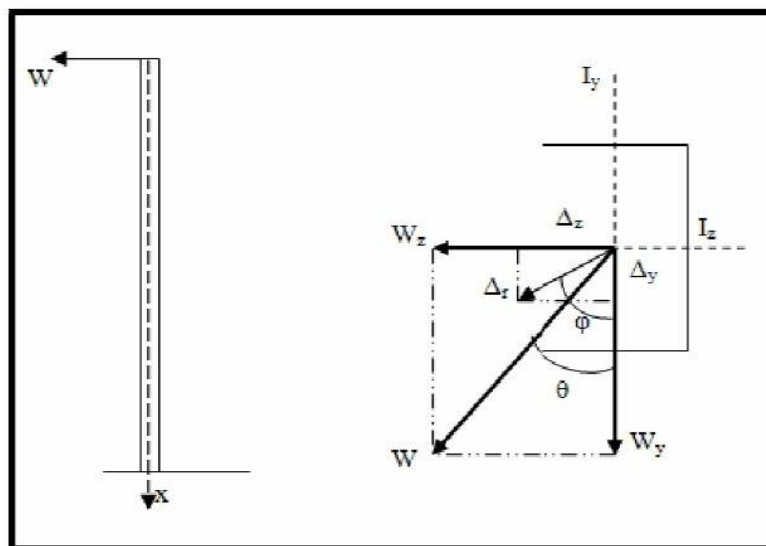
- 1- دستگاه تیر یکسرگیردار؛
- 2- Strain indicator؛
- 3- ساعت اندازه گیری؛
- 4- وزنه های 0.5 کیلویی.

تئوری آزمایش:

برای تغییر مکان سر یک تیر یکسرگیردار داریم:

$$\Delta = \frac{W L^3}{3 E I} \begin{cases} \Delta: \text{جابجایی سر تیر} \\ W: \text{بار} \\ L: \text{طول تیر} \\ I: \text{ممان سطح} \\ E: \text{مدول الاستیسیته} \end{cases}$$

اگر راستای تیر را X در نظر گرفته و باری درجهتی غیر از Y و Z به تیر وارد کنیم، جهت تغییر مکان با جهت بار گذاری تفاوت خواهد داشت. بنابراین اگر بار W تحت زاویه θ اثر کند، خواهیم داشت:



$$\Delta_z = \frac{W_z L^3}{3 E I_y}$$

$$\Delta_y = \frac{W_y L^3}{3 E I_z}$$

$$\Delta_z = \frac{W L^3 \sin \theta}{3 E I_y}$$

$$\Delta_y = \frac{W L^3 \cos \theta}{3 E I_z}$$

$$\frac{\Delta_z}{\Delta_y} = \frac{I_z}{I_y} \tan \theta \Rightarrow \tan \phi = \left(\frac{I_z}{I_y} \right) \tan \theta$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{I_z \tan \theta}{I_y} \right)$$

$$(*) \left(\frac{\Delta_z}{a} \right)^2 + \left(\frac{\Delta_y}{b} \right)^2 = 1 \rightarrow \begin{cases} a = \frac{W L^3}{3 E I_y} \\ b = \frac{W L^3}{3 E I_z} \end{cases}$$

رابطه (*) مکان هندسی تغییر مکان مرکز مقطع تیر در اثر بار ثابت وارده می باشد .

$$\sigma_x = -\frac{M_z y}{I_z} + \frac{M_y z}{I_y} \quad ; \quad \text{رابطه تنوری برای تنش به صورت رو به رو است}$$

مقطع تیر به ابعاد $620 \times 22 \times 16$ است

پاسخ به سوالات :

ج 1) مقادیر بدست آمده ($E_z=201.2$ و $E_y=195.8$) تقریباً به مقادیر واقعی $200 GPa$ نزدیک هستند. مقدار اختلاف

موجود هم شاید به سبب نبودن ریسمان متصله برای قرائت اعداد در وسط تیر باشد.

ج 2) شیب منحنی ها تقریباً انتظار را برآورده کرده و ما را به مقادیر واقعی نزدیک می کنند، البته مقداری هم تفاوت وجود

دارد که شاید ناشی از دلیل ذکر شده در بالا یا خطا در اندازه گیری ابعاد تیر (و در نتیجه ممان اینرسی سطح) باشد.

ج 3) بیضی هایی خواهند بود با ابعاد متفاوت.

ج 4) تغییر W باعث کوچک و بزرگ شدن اقطار بیضی به یک نسبت می شود.

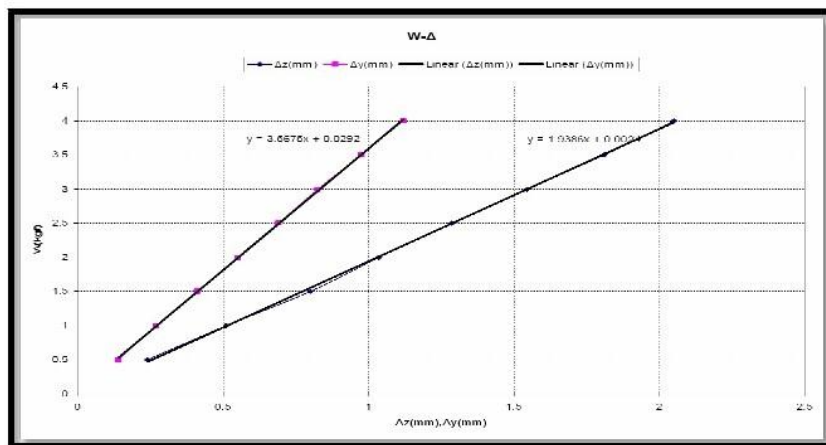
شرح آزمایش:

پس از قرار دادن آویز مخصوص در انتهای ریسمان، ساعت مربوط به جهت مربوطه (در اینجا جهت Z) را صفر می کنیم. اکنون بارگذاری را با وزنه های 0.5 کیلویی تا حد 4 کیلو انجام داده و مقادیر Δ_z را یادداشت می کنیم. دوباره همین عملیات را برای جهت Y تکرار می کنیم. نتایج را در جدول (1) یادداشت می کنیم. پس از این مراحل، بار ثابت 4 کیلوگرم را در فواصل 15 درجه ای به تیر وارد کرده و تغییر مکان تیر در جهت Z را از روی ساعت می خوانیم. همچنین ϵ_z را از روی دستگاه Strain indicator که به کرنش سنج روی میله در جهت Z وصل است می خوانیم. دوباره همین عملیات را برای جهت Y تکرار می کنیم.

نتایج آزمایش:

$$I_y = \frac{22 \times 16^3}{12} = 7509.33 \text{mm}^4; I_z = \frac{16 \times 22^3}{12} = 14197.33 \text{mm}^4$$

W(Kgf)	Δ_z (mm)	Δ_y (mm)
0.5	0.24	0.14
1	0.51	0.27
1.5	0.8	0.41
2	1.035	0.55
2.5	1.285	0.69
3	1.545	0.825
3.5	1.81	0.975
4	2.05	1.12



$$\left. \begin{aligned} \frac{W}{\Delta_y} = 3.5675 \Rightarrow \frac{3E_y I_y}{L^3} = 3.5675 \Rightarrow E_y = 3.5675 \times 9.81 \times \frac{62^3}{3 \times 7509.33} = 195.83 \text{ GPa} \\ \frac{W}{\Delta_z} = 1.9386 \Rightarrow \frac{3E_z I_z}{L^3} = 3.5675 \Rightarrow E_z = 1.9386 \times 9.81 \times \frac{62^3}{3 \times 14197.33} = 201.19 \text{ GPa} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$E = \frac{1}{2}(E_y + E_z) = 198.51 \text{ GPa}$$

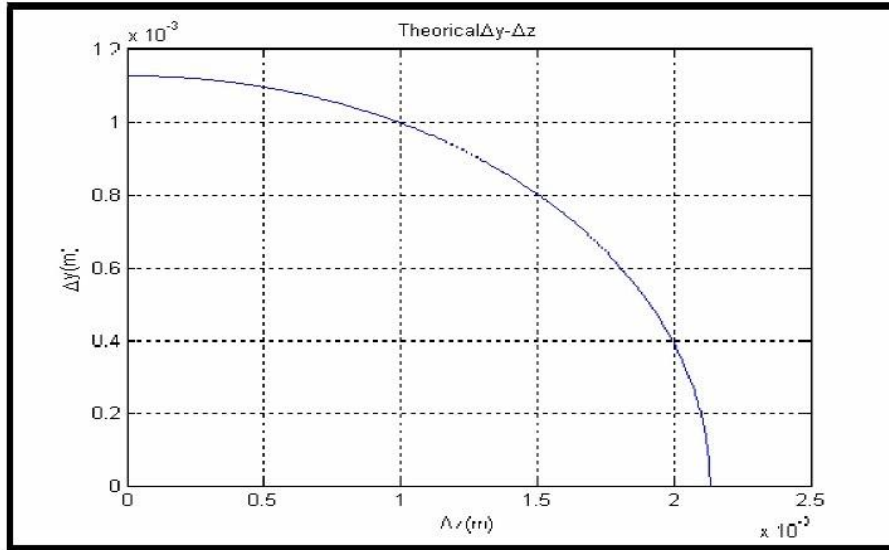
θ (Deg)	Δ_z (mm)	ϵ_x ($\mu\text{in/in}$)
0	0	0
15	0.62	46
30	1.27	78
45	1.67	88
60	2.03	122
75	2.21	110
90	2.24	120

جدول (2)

θ (Deg)	Δ_y (mm)	ϵ_z ($\mu\text{in/in}$)
0	1.14	100
15	1.05	98
30	0.88	66
45	0.665	52
60	0.36	34
75	0.04	14
90	0	0

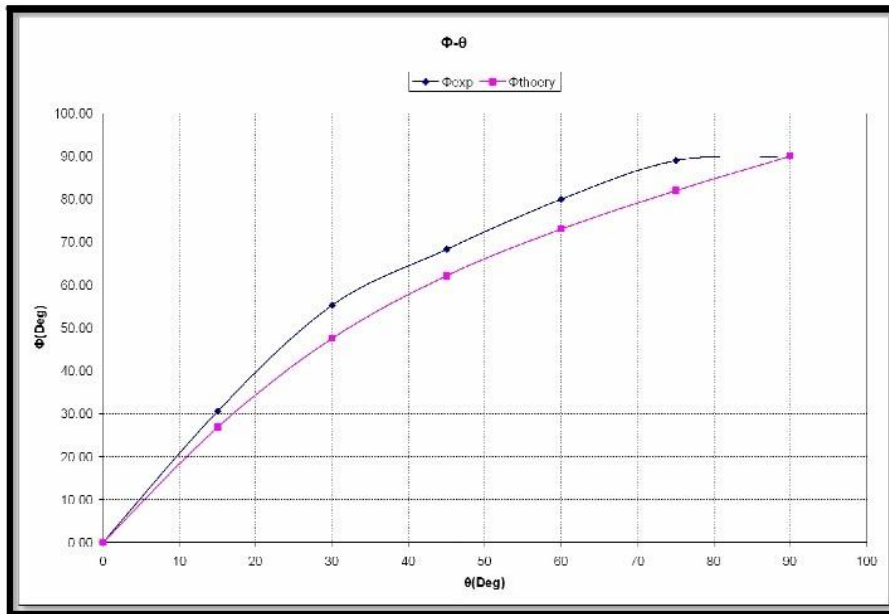
جدول (3)

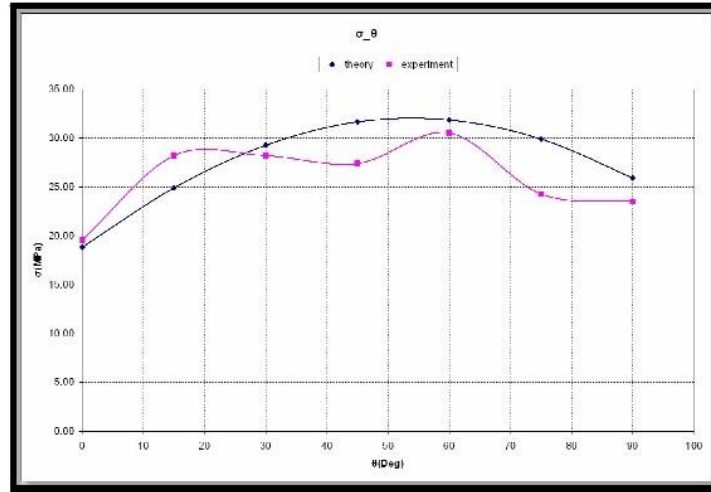




θ (Deg)	Δ_r (mm)	Φ_{exp} (Deg)	Φ_{theo} (Deg)	σ_{theo} (MPa)	σ_{exp} (MPa)
0	1.14	0.00	0.00	-18.85	-19.583
15	1.22	30.56	26.87	-11.50	-10.18316
30	1.55	55.28	47.51	-3.37	2.34996
45	1.80	68.29	62.12	5.00	7.04988
60	2.06	79.94	73.02	13.02	17.23304
75	2.21	88.96	81.93	20.16	18.79968
90	2.24	90.00	90.00	25.92	23.4996

جدول (4)





نمونه محاسبات:

$$\theta = 30^\circ :$$

$$\Delta_r = \sqrt{\Delta_y^2 + \Delta_z^2} = \sqrt{(0.88)^2 + (1.27)^2} = 1.55 \text{ mm}$$

$$\phi_{\text{exp}} = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\Delta_z}{\Delta_y} \right) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{1.27}{0.88} \right) = 55.28^\circ$$

$$\phi_{\text{theo}} = \text{tg}^{-1} \left(\frac{I_z}{I_y} \text{tg} \theta \right) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{14197.33}{7509.33} \text{tg} 30^\circ \right) = 47.51^\circ$$

$$\sigma_{\text{theo}} = + \frac{M_y z}{I_y} - \frac{M_z y}{I_z} = \frac{4 \times 9.81 \times 620 \times \sin(30) \times 8}{7509.33} - \frac{4 \times 9.81 \times 620 \times \cos(30) \times (-11)}{14197.33} = +18.85 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{exp}} = E (\varepsilon_z + \varepsilon_y) = 19.5383 \text{ MPa}$$

بحث و اظهار نظر:

همانطور که مشاهده می شود مدول الاستیسیته بدست آمده ($198.51 GPa$) به محدوده واقعی آن ($200 GPa$) نزدیک

است. منحنی های تئوری و تجربی هم توافق خوبی (بجز منحنی تنش) با هم دارند. دلیل ایجاد این خطاها می تواند بخاطر:

1. در مرکز قرار نداشتن ریسمان مربوط به بارگذاری؛

2. خطا در هنگام قرائت اعداد از روی ساعت و یا Strain indicator؛

3. شل بودن پایه قرقره؛

4. اشکال در محل دایره ای که ریسمان با آن به تیر وصل است؛

کاربرد علمی – صنعتی:

از آزمایش خمش مرکب برای بدست آوردن و محاسبه مدول الاستیسیته مصالح که یکی از خواص مکانیکی مهم و ضروری در بررسی مصالح است می توان استفاده کرد. همچنین از این آزمایش برای بدست آوردن تنش های ماکزیمم در مقاطع دلخواه یک تیر، ناشی از خمش دو محوره، برای استفاده و بکارگیری در بررسی این تنش ها و محاسبه مقاومت تیر در برابر بارگذاری مربوطه می توان بهره برد. بخصوص در زمینه طراحی قطعات مکانیکی دستگاه های مختلف که در صنعت بکار می روند و تحت تأثیر این نوع بارگذاری یعنی خمش دو محوره قرار می گیرند نیز بکار می رود. همچنین این آزمایش در آزمایشگاه مقاومت مصالح نیز کاربرد فراوانی دارد زیرا از این آزمایش در جهت تعیین رابطه بین جهت بار و جهت تغییر مکان مرکز مقطع تیر و نیز تعیین مکان هندسی مرکز مقطع تیر در اثر جهت بار ثابت استفاده نمود.

منابع و مراجع:

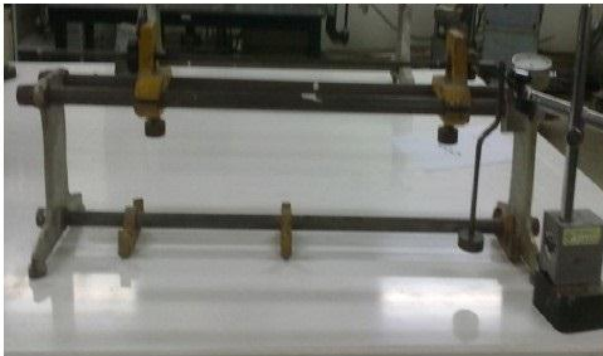
1- مقاومت مصالح؛ بیر جانستون

2- جزوه آزمایشگاه مقاومت مصالح؛ یونس علیزاده؛ سال تحصیلی 83-84

پیچش

هدف آزمایش:

بدست آوردن مدول سختی یا ضریب ارتجاعی برشی مصالح (G)



در این آزمایش ابتدا با میله توپر فولادی آغاز می کنیم. روش کار به اینگونه است که ابتدا ساعتهای روی دستگاه را صفر می کنیم. سپس با کمک دستگاه مخصوص بارگذاری را انجام داده و از روی ساعتهای اعداد را می خوانیم. اگر عدد روی ساعت اول را Δ_1 نامیده و ساعت دوم را Δ_2 بنامیم، برای بدست آوردن میزان پیچش میله در طول L از آن فاصله میان دو

$$\left. \begin{array}{l} \theta_1 = \frac{\Delta_1}{a} \\ \theta_2 = \frac{\Delta_2}{a} \end{array} \right\} \Rightarrow \theta = \frac{1}{a} (\Delta_1 - \Delta_2) : \text{ساعت، از آنجایی که زاویه ای کوچک است خواهیم داشت}$$

از مقاومت مصالح می دانیم که برای پیچش یک میله در $\theta = \frac{T L}{G J}$ ، در آن T گشتاور پیچشی، $J = \frac{\pi d^4}{32}$ ممان اینرسی قطبی، G مدول برشی و L طول نمونه می باشد.

$$T = \frac{GJ}{L} \theta \Rightarrow T = K \theta$$

شیب منحنی $T - \theta$ ، K است و از آنجا $G = K \frac{L}{J}$ را محاسبه می نماییم.

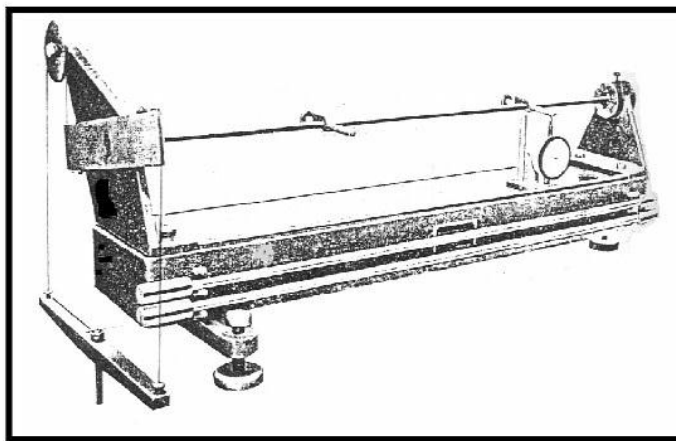
در مرحله بعدی با همان وسیله این بار یک میله توخالی برنجی با مقطع بسته را به همین شیوه مورد آزمایش قرار می دهیم تا صلابت پیچشی آنرا بدست آوریم. ممان اینرسی سطح از روابط زیر بدست می آید:

$$J = 2\pi R^3 t \quad \text{یا} \quad J = \frac{\pi}{32} (d_o^4 - d_i^4)$$

آخرین نمونه آزمایش یک میله برنجی کاملاً مشابه قبلی است با این تفاوت که مقطع آن در بخشی از میله که ما در آنجا پیچش را اندازه می گیریم باز است یعنی بخشی از میله شیاردار است. در اینجا با کمک G بدست آمده از مرحله قبل J را بدست می آوریم و با مقدار تئوری بدست آمده از رابطه $\frac{2}{3}\pi R^3 t$ مقایسه می کنیم.

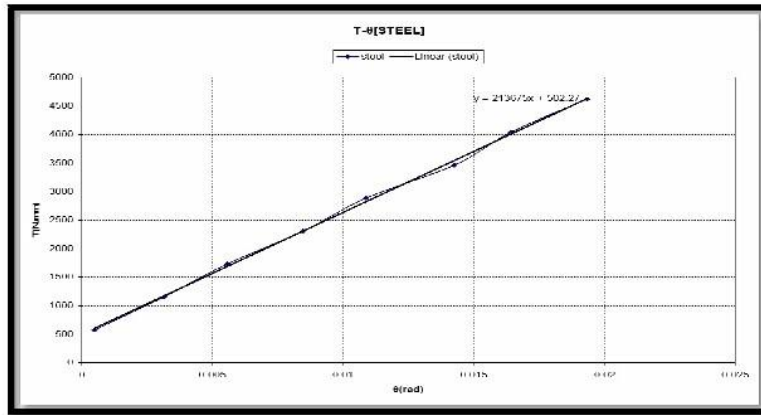
نام وسایل آزمایش:

- 1- دستگاه مخصوص آزمایش پیچش؛
- 2- میله های توخالی برنجی (باشیار و بدون شیار) و میله توپر فولادی؛
- 3- وزنه های پائندی و گرمی.



نتایج آزمایش:

فولاد توپر				
W(lb)	ساعت اول ×0.001in	ساعت دوم ×0.001in	θ(rad)	T(N.mm)
1	2	1	0.000483	577.5594
2	9.5	3	0.00314	1155.119
3	17	5.5	0.005556	1732.678
4	25.5	8	0.008454	2310.238
5	32.5	10	0.01087	2887.797
6	42.5	13	0.014251	3465.357
7	49	15	0.016425	4042.916
8	58	18	0.019324	4620.475



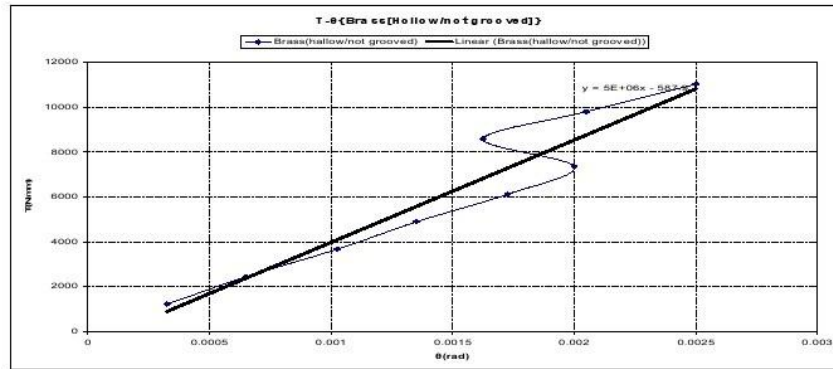
نمونه محاسبات:

$$\left. \begin{aligned}
 J &= \frac{\pi}{32} d^4 = \frac{\pi}{32} \times (0.375 \times 25.4)^4 = 808.09 \text{ mm}^4 \\
 L &= 14 \times 25.4 = 355.6 \text{ mm}
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{J}{L} = 2.2725 \text{ mm}^3$$

$$\left. \begin{aligned}
 L &= 14 \text{ in} \\
 a &= 2.07 \text{ in} \\
 R &= 5.11 \text{ in} \\
 d &= 0.375 \text{ in}
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow W = 4lb \Rightarrow \theta = \frac{1}{2.07} (25.5 - 8) \times 0.001 = 0.008454 \text{ rad}$$

$$G = \frac{T}{\frac{J}{L} \theta} = \frac{213675}{2.2725} = 94027.68 \text{ MPa} \Rightarrow G_{\text{steel}} \approx 94 \text{ GPa}$$

برنجی توخالی بدون شیار				
$500 \text{ gr} \times W$	ساعت اول $\times 0.01 \text{ mm}$	ساعت دوم $\times 0.01 \text{ mm}$	$\theta(\text{rad})$	$T(\text{N.mm})$
1	7	0.5	0.000325	1226.25
2	17	4	0.00065	2452.5
3	30	9.5	0.001025	3678.75
4	45	18	0.00135	4905
5	62.5	28	0.001725	6131.25
6	78	38	0.002	7357.5
7	80.5	48	0.001625	8583.75
8	91	50	0.00205	9810
9	108	58	0.0025	11036.25



نمونه محاسبات:

$$\begin{cases} d_o = 38 \text{ mm} \\ d_i = 35.5 \text{ mm} \\ R = 250 \text{ mm} \\ a = 200 \text{ mm} \\ L = 395 \text{ mm} \end{cases}$$

$$W = 1500 \text{ gr} \Rightarrow \theta = \frac{1}{200} (30 - 9.5) \times 0.01 = 0.001025$$

$$J = \frac{\pi}{32} (d_o^4 - d_i^4) = \frac{\pi}{32} (38^4 - 35.5^4) = 48783.63 \text{ mm}^4$$

$$\frac{J}{L} = \frac{48783.63}{395} = 123.5 \text{ mm}^3$$

$$G = \frac{T}{\frac{J}{L} \theta} = \frac{5 \times 10^6}{123.5} = 40485.83 \text{ MPa} \Rightarrow \boxed{G_{\text{brass}} \approx 40.5 \text{ GPa}}$$

بحث و اظهار نظر:

برای صلابت پیچشی از جدول [1] و آزمایش داریم:

نوع ماده	G آزمایش (GPa)	G تئوری (GPa)
برنج	40.5	39
فولاد	94	77

می بینیم که برای برنج نتیجه از توافق قابل قبولی برخوردار است ولی در مورد فولاد نتیجه حاصل با نتایج استاندارد اختلاف دارد. در مورد ممان سطح هم نتیجه اصلا تطابق خوبی با تئوری ندارد. شاید دلیل آن تغییر شکل یافتن مقطع در طول سالها (!) استفاده از آن باشد ولی مهمترین دلیل ممکن است سراسری نبودن شیار در لوله باشد

کاربرد علمی - صنعتی:

از این آزمایش می توان برای محاسبه صلابت پیچشی جنس های گوناگون استفاده نمود. همچنین از این آزمایش می توان برای بدست آوردن ممان اینرسی قطبی مصالح فلزی با مقاطع گوناگون استفاده کرد. این نتایج در طراحی مقاطع محکم ولی سبک می توانند کارساز باشند.

عنوان : محاسبه ضریب ارتجاعی برش

اعضایی که تحت پیچش قرار می گیرند در کارهای مهندسی زیاد به چشم می خورند . در این آزمایش عضوی را که تحت پیچش قرار دارد مورد بحث و بررسی قرار می گیرد . این پیچش در اثر اعمال یک گشتاور یا کوپل روی عضو صورت می گیرد . شفت مدوری را که یک انتهایش به تکیه گاه ثابت محصول است در نظر بگیرید . اگر گشتاور (T) به انتهای دیگر این شفت یا میله اعمال می گردد . شفت پیچش خورده و انتهای آزاد آن به اندازه (P) می چرخد این زاویه را زاویه پیچش می نامند . آزمایشات و مشاهدات انجام یافته نشان می دهد که در یک محور مشخص از گشتاور (T) زاویه پیچش (P) با گشتاور متناسب است . همچنین زاویه (P) با طول شفت نیز متناسب می باشد . (زاویه پیچش) در ناحیه الاستیک که از رابطه : $P=T.L/G.J$ بدست می آید .

معادله فوق ما را به یک روش راحت برای تعیین مدول صلابت یا ضریب ارتجاعی بررسی یک ماده داده شده مجهز می نماید . نمونه ای از این ماده به شکل یک مفتول استوانه ای با قطر و طول معلوم در یک ماشین آزمایش پیچش سوار شده و گشتاور اعمال می شود و مقادیر زاویه پیچش (P) ثبت می شود.

آزمایش زیربروی قطعه ای از جنس مس با قطرهای 5mm و 10mm

صورت گرفته است.

$$\tau = \frac{t.c}{j} \quad \rho = \frac{t.l}{j.g}$$

گشتاور=t

شعاع=C

ممان اینرسی=J

ممان اینرسی دایره توپر

$$j = \frac{\pi}{2} c^4$$

دایره خالی

$$j = \frac{\pi}{2} (c^4 - c^4)$$

$$\tau = \frac{1.9 \times 9.8 \times 10 \times 5 \times 10}{\frac{\pi}{2} \times 5^4} = 9.48 \text{ mpa}$$

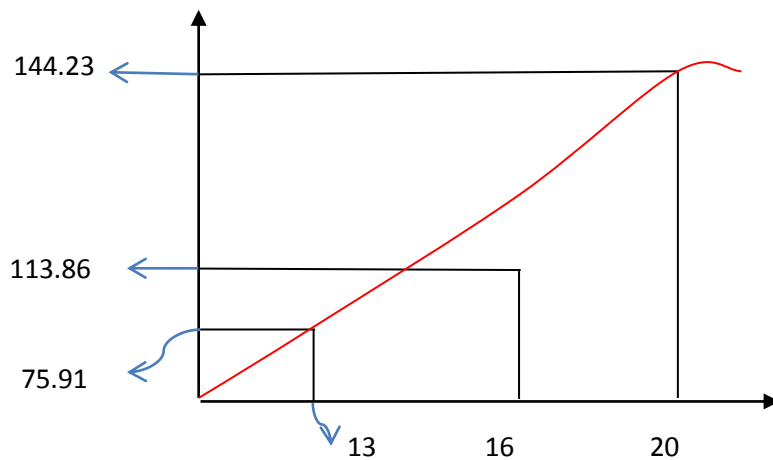
$$\tau = \frac{1.9 \times 9.8 \times 15 \times 5 \times 10}{\frac{\pi}{2} \times 5^4} = 14.32 \text{ mpa}$$

$$\tau = \frac{1.9 \times 9.8 \times 19 \times 5 \times 10}{\frac{\pi}{2} \times 5^4} = 18.02 \text{ mpa}$$

$$\tau = \frac{1.9 \times 9.8 \times 10 \times 2.5 \times 10}{\frac{\pi}{2} \times 2.5^4} = 75.91 \text{ mpa}$$

$$\tau = \frac{1.9 \times 9.8 \times 15 \times 2.5 \times 10}{\frac{\pi}{2} \times 2.5^4} = 113.86 \text{ mpa}$$

$$\tau = \frac{1.9 \times 9.8 \times 19 \times 2.5 \times 10}{\frac{\pi}{2} \times 2.5^4} = 144.23 \text{ mpa}$$

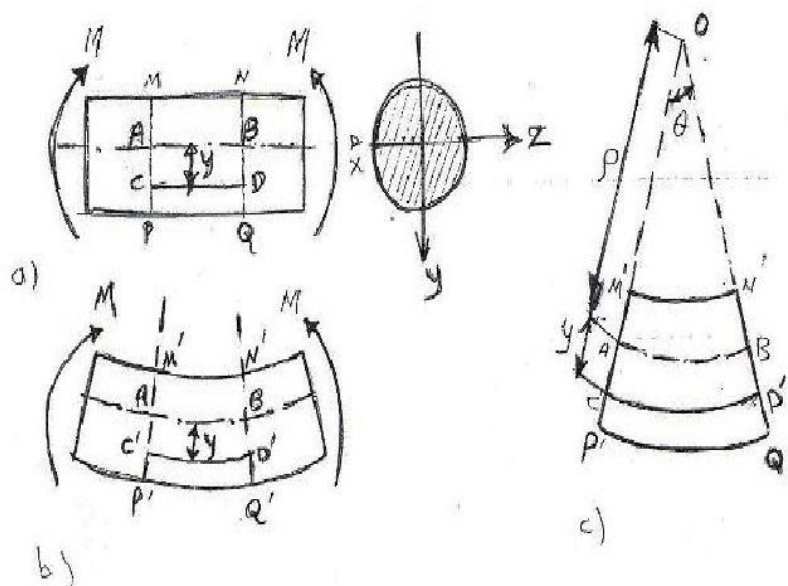


(نمودار زاویه پیچش برای مس با قطر 5mm)

خیز

هدف آزمایش: ما در آزمایش خمش با اعمال نیروی عمودی بر میله مقدار تنش خمشی را در نمونه بدست آوردیم. در این آزمایش می خواهیم مقدار جا به جایی عمودی میله را که بر اثر نیروی وارده و تحت تاثیر گشتاور M ایجاد می شود را بدست آورده و با مقدار نظری آن که از روابط بدست می آید، مقایسه کنیم.

تنوری آزمایش: این آزمایش در دو حالت صورت می گیرد، در حالت اول نمونه روی مفصل ها به طور افقی قرار گرفته است و نیرو در میان آن به طور عمود وارد می شود این نیرو باعث ایجاد گشتاور M خواهد شد گشتاور ایجاد شده به صورت یک کوپل موجب خم شدن میله می شود و در اثر خمشی نقاط روی تیر به صورت عمودی نسبت به زمانی که نیرو نبود، جا به جا می شوند و تار خنثی همچون کمانی از یک دایره خواهد شد که شعاع آن (شعاع انحنا ρ) فاصله ی تار خنثی تا نقطه ی O می باشد. در ضمن در طول افقی تیر نیز تغییراتی دیده می شود که لایه های بالای تار خنثی در حال تراکم بوده و کاهش طول دارند و لایه های پایین تار خنثی در حال کشش بوده و افزایش طول خواهند داشت. جا به جایی در جهت Y وابسته به نیرو و در نتیجه گشتاور پیچشی است به طوری که هر گاه نیرو افزایش یابد جابه جایی بیشتر می شود و افزایش نیرو موجب افزایش گشتاور پیچشی خواهد شد. هر جا گشتاور پیچشی ماکزیمم باشد، خیز نیز در آن محل بیشترین مقدار خود را خواهد داشت.



روابط محاسبه ی جابه جایی میله به صورت زیر است :

$$Y_a = \frac{-PL^3}{48EI}$$

در حالت دوم میله از یک طرف در تکیه گاهی ثابت شده است و نیرو روی طرف دیگر میله اعمال می شود این نیرو علاوه بر آن که باعث ایجاد گشتاور خمشی در نمونه می شود ، ممکن است گشتاور برشی را که حاصل ضرب نیرو در شعاع مقطع میله می باشد ، ایجاد کند که برای جلوگیری از ایجاد آن نیرو باید بر روی محور میله وارد شود تا بازوی گشتاور صفر شود . جا به جایی عمودی نقاط در این حالت همواره در سر ثابت میله صفر است . هرچه به محل اعمال نیرو نزدیک می شویم بر مقدار تغییرات افزوده می شود به طوری که حداکثر تغییر مکان در نقطه ی وارد شدن نیرو می باشد . در این روش حداکثر گشتاور خمشی در سر ثابت میله ایجاد می شود چرا که گشتاور خمشی از حاصلضرب نیرو در بازوی گشتاور (طول میله L) بدست می آید به همین منظور رابطه ی بین تغییر مکان عمودی ماکزیمم میله با گشتاور ماکزیمم عکس یکدیگر خواهد بود . از نقطه ای که میله شروع به جابه جایی می کند زاویه ی خمشی θ ایجاد می شود که رابطه ی آن به صورت زیر است :

$$\theta = \frac{PL^2}{2EI}$$

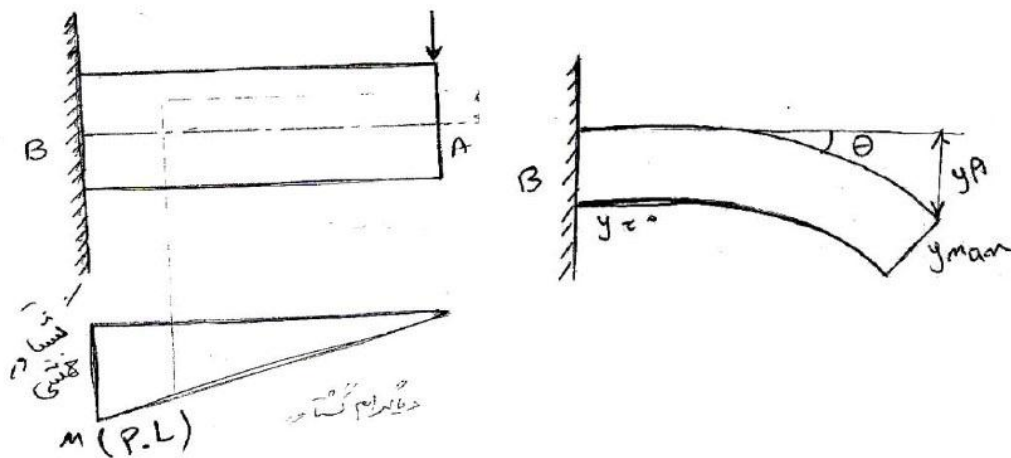
که در آن : P نیرو ، L طول ، E مدول الاستیسیته ی میله ، I ممان دوم سطح مقطع میله است .

رابطه ی محاسبه ی تغییر مکان ماکزیمم در روش دوم به صورت زیر است :

$$Y_A = \frac{-1}{3} * \frac{PL^3}{EI}$$

شرح آزمایش: در روش اول نمونه ای از جنس فولاد اسپیکا (ضد زنگ) را زیر دستگاه قرار می دهیم و دستگاه را روشن می کنیم. نیرو را به صورت عمودی بر نمونه وارد می کنیم. آنقدر نیرو را افزایش می دهیم تا اینکه خمش در تیر به چشم دیده شود سپس دستگاه را متوقف کرده و نیرو را یادداشت می کنیم مقدار تغییر مکان عمودی تیر در طول آزمایش توسط نرم افزار تعیین می شود. در پایان مقدار تغییر مکان را یادداشت کرده و با مقدار نظری آن مقایسه خواهیم کرد.

در روش دوم دو تیر برنجی و فولادی (ابعاد در ادامه ارایه شده است) را که از یک سر به میز متصل و ثابت شده اند را به طور جداگانه تحت تاثیر نیروهای مختلف قرار می دهیم. در محلی که نیرو وارد می شود یک ساعت اندازه گیری قرار داده ایم تا در اثر اعمال نیرو مقدار جابه جایی تیر نمونه را مشخص کنیم داده ها را با داده های نظری که از فرمول بدست می آیند مقایسه کرده و در جدولی گرد آوری می کنیم.



روش اول :

$$L = 622 \text{ mm} , \quad H = 31 \text{ mm} , \quad b = 153 \text{ mm} \quad F = 100000 \text{ N}$$

$$Y_{\text{azmayesh}} = -9.91 \text{ mm} , \quad Y_{\text{teory}} = ?$$

روش دوم :

$$\text{Brass} : \quad H = 15.3 \text{ mm} , \quad B = 15.3 \text{ mm} , \quad L = 615 \text{ mm}$$

$$F = 2.5 \text{ N} , \quad y = 0.52 \text{ mm}$$

$$F = 5 \text{ N} , \quad y = 1 \text{ mm}$$

$$F = 7.5 \text{ N} , \quad y = 1.53 \text{ mm}$$

$$F = 10 \text{ N} , \quad y = 2.12 \text{ mm}$$

$$F = 12.5 \text{ N} , \quad y = 2.63 \text{ mm}$$

$$F = 15 \text{ N} , \quad y = 3.68 \text{ mm}$$

$$\text{Steel} : \quad H = 10.06 , \quad b = 15.55 \text{ mm} , \quad L = 617 \text{ mm}$$

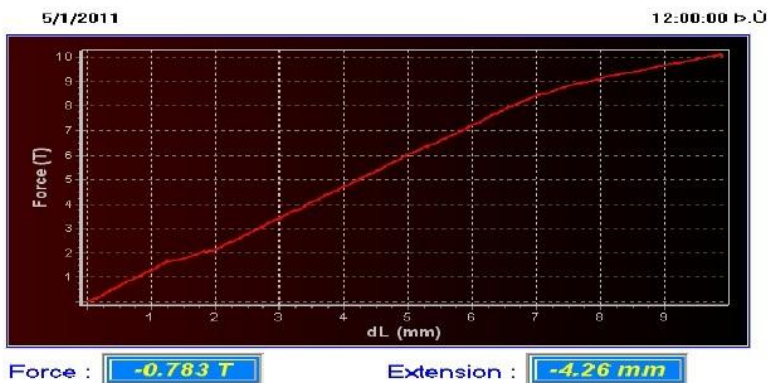
$$F = 5 \text{ N} , \quad y = 0.65 \text{ mm}$$

$$F = 10 \text{ N} , \quad y = 1.56 \text{ mm}$$

$$F = 12.5 \text{ N} , \quad y = 1.75 \text{ mm}$$

$$F = 15 \text{ N} , \quad y = 2.1 \text{ mm}$$

$$F = 17.5 \text{ N} , \quad y = 2.48 \text{ mm}$$



تغییرات از روی رابطه Y , mm	تغییرات از روی آزمایش y,mm	نیرو F , N	ارتفاع H , mm	عرض B , mm	طول L ,mm	نمونه
	0.65	5	10.06	15.55	617	فولاد
	1.56	10				
	1.75	12.5				
	2.1	15				
	2.48	17.5				
	0.52	2.5	15.3	15.3	615	برنج
	1	5				
	2.12	7.5				
	1.53	10				
	2.63	12.5				
	3.68	15				

نتیجه گیری : علت تفاوت بین مقادیر نظری و تجربی خطاهایی است که در زمان آزمایش درون دستگاه و ساعت اندازه گیری و یا حتی توسط اپراتور ایجاد می شود . با توجه به داده ها و اینکه می دانیم فولاد(به علت نرمی بیشتر) انعطاف پذیر تر از برنج است میزان جابه جایی درون نمونه ی فولادی مقدار بیشتری دارد .

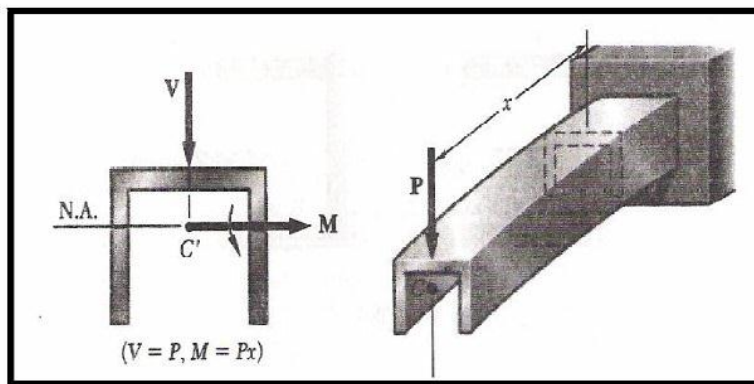
مرکز برش

هدف آزمایش :

در این آزمایش می خواهیم نمونه ای را که نیروی عمودی برشی بر سطح نامتقارن آن وارد شده است را مورد بررسی قرار دهیم و با جابه جایی این نیرو روی سطح ، مرکز برش که همان نقطه ی تعادل نمونه در برابر پیچش است را بدست بیاوریم تا بتوانیم با نیروی مورد نظر تنها تنش خمشی در مقطع نمونه ایجاد کنیم .

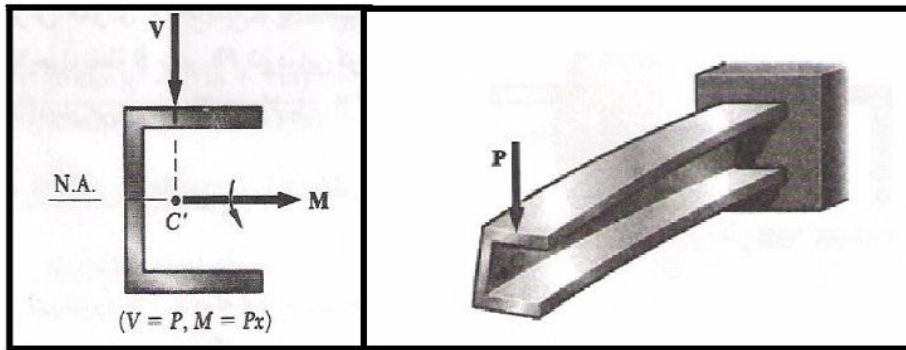
تنوری آزمایش :

هنگامی که مقطع متقارن باشد نیروی برشی بر روی محور تقارن به صورت عمودی وارد خواهد شد در نتیجه نیروی برشی ، دو تنش نرمال و برشی ایجاد می شود که توسط روابط زیر قابل محاسبه می باشند :



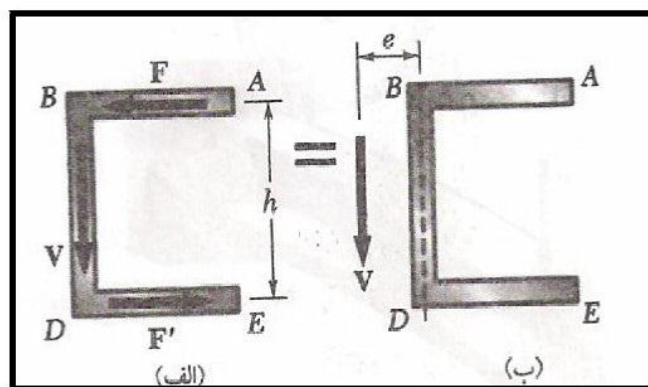
$$\sigma = -\frac{M y}{I} \quad , \quad \tau = \frac{V Q}{I t}$$

که در روابط بالا V نیروی برشی ، M گشتاور خمشی ، Q گشتاور اول سطح ، I گشتاور دوم سطح ، t ضخامت مقطع و y فاصله ی المان سطح تا تار خنثی می باشد . اما اگر در شکل بالا مقطع 90 درجه بچرخد دیگر شکل متقارن نخواهد بود و محور Y جدید را نمی توان محور تقارن نامید و همانطور که در شکل زیر می بینید نیروی برشی باعث ایجاد پیچش در مقطع نمونه خواهد شد . بر اثر این نامتقارنی مقطع روابط بالا دیگر قابل استفاده نخواهد بود . محور تار خنثی 90 درجه چرخیده و روی محور تقارن حالت قبل از جابه جایی منطبق می شود .



هنگامی که نیروی برشی روی سطح مقطع وارد می شود، روی آن پخش شده و نیروی برشی افقی را در سطح تیر اعمال می کند این نیرو در شکل فوق ابتدا روی بال تحت تاثیر نیرو ایجاد شده و سپس از طریق جان تیر به طرف دیگر آن منتقل می شود نیرو های افقی روی بالها را با F نشان می دهند که از نظر مقداری مساوی و در خلاف جهت یکدیگر هستند و چون به طور موازی وارد می شوند و با فاصله H از یکدیگر واقع شده اند، یک گشتاور (کوپل نیرو) در سطح مقطع ایجاد می کنند (حاصل ضرب نیرو در فاصله H دو نیرو از هم). برای خنثی کردن این گشتاور بایستی نیرو به نقطه O (مرکز برش) با فاصله e از مرکز جرم C منتقل شود چرا که با این انتقال گشتاور $M = e \cdot V$ ایجاد می شود و این گشتاور در مقابل گشتاور حاصل از زوج نیروی F خواهد بود و مانع پیچش مقطع خواهد شد بنا بر این:

$$e = \frac{F \cdot H}{V} \rightarrow e \cdot V = F \cdot H$$



برای بدست آوردن F بایستی نیروی برشی واحد طول بال تیر (q) را محاسبه کنیم و سپس المانی به طول s را روی آن انتخاب کرده و با انتگرال گیری از حاصلضرب q در ds در بازه y صفر تا b (طول بال تیر) مقدار نیروی افقی را محاسبه کنیم بعد از بدست آوردن F با جایگذاری در رابطه y فوق مقدار e را بدست می آوریم .

$$\int_0^b \frac{VQ}{I} * ds = \frac{Vthb^2}{4I} F = \int_0^b q * ds =$$

$$e = \frac{Vthb^2}{4I} \cdot \frac{h}{V} = \frac{th^2 b^2}{4I} = \frac{b}{2 + \frac{h}{3b}}$$

شرح آزمایش :

تیری به شکل ناودان را مطابق اشکال بالا در یک تکیه گاه ثابت کرده ایم و به دو سر آن دو ساعت اندازه گیری را تماس داده ایم . روی دستگاه خطوطی با فواصل یکسان در دو طرف مرکز جرم ایجاد شده است که بر اساس این فواصل در دو طرف مرکز جرم نیروی برشی V را جابه جا می کنیم . بعد از هر جابه جایی تیر دچار پیچش در مقطع می شود که این تغییرات توسط ساعت ها در دو طرف نمایش داده می شود . مقدار جابه جایی های دو سر تیر را در سمت راست و چپ مرکز جرم در چند نقطه بدست می آوریم و مقادیر بدست آمده از ساعت ها را در دو نمودار به طور همزمان در یک صفحه رسم می کنیم . محل تلاقی این دو نمودار نشان می دهد که در آن نقطه مقدار جابه جایی در دو ساعت یکسان بوده است و پیچش اتفاق نیافتاده و مرکز برش تیر خواهد بود .

در مولفه y افقی نمودار ، نقطه C در مرکز محور واقع شده است و مقادیر سمت چپ و راست با توجه به تعداد خطوط و فاصله y بین خطوط مشخص می شوند و محور عمودی میزان تغییر مکان خوانده شده از روی ساعت ها می باشد . روش دیگر بدست آوردن مرکز برش از طریق رابطه y بالای صفحه می باشد که در آن b طول بال تیر و h فاصله y دو بال از یکدیگر خواهد بود .

در نمودار زیر مقادیر بر حسب میلی متر بوده و اعداد روی ساعتها میزان فشرده شده آنها را نشان می دهد .

$$e = \frac{b}{2 + \frac{h}{3b}} = \frac{14.75}{2 + \frac{13.5}{3 \cdot 14.75}} = \frac{14.75}{2.3} = 6.413 \text{ mm}$$

فاصله y خطوط 1.5 میلی متر است .

جهت نیرو	حرکت	طول بال تیر B , mm	فاصله دو بال H , mm	سمت راست	سمت چپ	مقدار e از روی رابطه				
راست		14.75	13.5	وسط - 0.39	0.70	6.413				
				خط 1 - 0.63	0.49					
				خط 5 - 0.69	0.47					
				خط 8 - 0.72	0.37					
				خط 11 - 0.86	0.26					
					0					
				چپ					خط 4 - 0.13	0.9
									خط 6 - 0	1.08
									خط 8 - 0	1.03
									خط 10 - 0	1.05
خط 13 - 0	1.16									

تذکر: تیر مورد آزمایش نسبت به اشکال داخل گزارش 180 درجه در جهت خلاف عقربه ساعت اختلاف دارد و ساعتها در

بالای تیر نصب شده اند و جهت های راست و چپ بر این اساس بیان شده است .

کمانش ستون ها

هدف آزمایش:

اندازه گیری بار بحرانی برای کمانش ستون ها و همچنین تنش بحرانی و مقایسه این مقادیر با نتایج تئوری.

چکیده گزارش:

در این آزمایش با انتخاب تیرهای متفاوت و به کمک دستگاه کمانش هیدرولیکی، منحنی های نیرو-تغییر مکان را ترسیم می کنیم. همچنین نمودار تنش بر حسب ضریب لاغری را نیز رسم می-کنیم. سپس این نتایج را با تئوری اولر بررسی کرده و بار بحرانی را برای هر تیر حساب می کنیم.

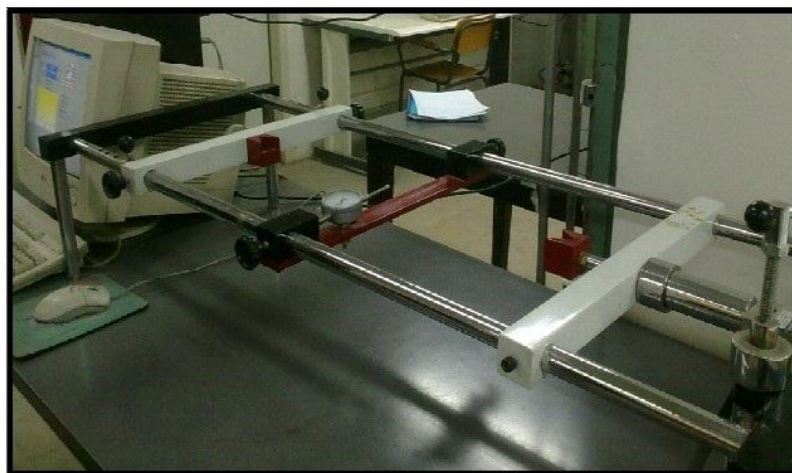
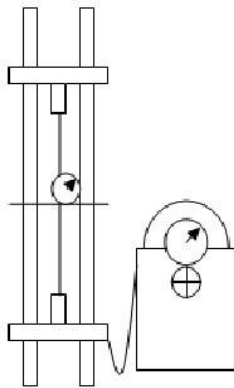
نام وسایل آزمایش و شکل شماتیک دستگاه:

1- دستگاه هیدرولیکی تست کمانش؛

2- میله هایی در ابعاد مختلف

3- ساعت اندازه گیر

4- خط کش و کولیس



تئوری آزمایش:

اگر بخواهیم ستونی را به گونه ای طراحی کنیم که بتواند بار P را تحمل کند باید این ستون به گونه ای انتخاب شود که مقدار $\sigma = \frac{P}{A}$ یعنی تنش در مقطع عرضی، از تنش مجاز ماده کمتر باشد و علاوه بر آن باید کمانش ستون نیز در نظر گرفته شود اکنون می خواهیم مقدار بحرانی P ، یعنی مقدار P_{cr} که به ازای آن وضعیت نشان داده شده در شکل 1.11 دیگر پایدار نیست تعیین کنیم. اگر $P > P_{cr}$ ، کوچکترین ناهمراستایی یا آشفتگی سبب کمانش ستون می شود و آن را به صورت نشان داده شده در شکل 2.11 خم می کند.

هدف ماتعیین شرایطی است که آرایش شکل 2.11 را ممکن می کند. چون هر ستون را می توان تیری در نظر گرفت که در وضعیت عمودی قرار دارد و در معرض باری محوری است از روش خیز تیرها استفاده می کنیم و فاصله از سر A ستون تا نقطه مفروش Q، واقع بر منحنی خیز را با X و خیز آن نقطه را با Y نشان می دهیم (شکل 7.11 الف). نتیجه می شود که محور X عمودی و روبه پائین و محور Y افقی و روبه سمت راست است، با در نظر گرفتن تعادل پیکر آزاد AQ (شکل 7.11 ب)، در می یابیم که لنگر خمشی در نقطه Q برابر است با $M = -Py$. با قراردادن این مقدار به جای M

در معادله $\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI}$ نتیجه چنین می شود:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} = -\frac{P}{EI}y$$

با انتقال آخرین جمله به سمت راست داریم:

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{P}{EI}y = 0$$

این یک معادله دیفرانسیل خطی همگن درجه دو با ضرایب ثابت است. با قراردادن

$$p^2 = \frac{P}{EI}$$

می توانیم معادله را به صورت زیر بنویسیم:

$$\frac{d^2y}{dx^2} + p^2y = 0$$

که همان معادله دیفرانسیل مربوط به حرکت نوسانی ساده است، با این تفاوت که در اینجا، متغیر مستقل به جای زمان

فاصله است. جواب عمومی معادله چنین است: $y = A \sin(px) + B \cos(px)$

شرایط مرزی در سرهای A و B ستون چنین می باشد که در $x=0$ و $y=0$ می باشد با قراردادن در معادله نتیجه می شود

$$B=0 \text{ و } x=L \text{ و } y=0 \text{ را قرار می دهیم و نتیجه می گیریم:}$$

$$A \sin(pL) = 0$$

این معادله به شرطی ارضا می شود که $\sin(pL) = 0$ یا $A=0$. اگر نخستین شرط برقرار شود جواب به صورت $y=0$ خواهد شد و ستون مستقیم است. برای آنکه شرط دوم برقرار شود باید داشته باشیم $pL = n\pi$ یا با جایگزینی p و حل معادله نسبت به P نتیجه می شود

$$P = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2}$$

کوچکترین مقدار P که از معادله بدست می آید با $n=1$ متناظر است، پس داریم:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

عبارت بدست آمده فرمول اوپلر نامیده می شود. با قراردادن این عبارت در جواب عمومی خواهیم داشت:

$$y = A \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right)$$

که معادله منحنی خیز پس از کماتش ستون است.

تنش متناظر با بار بحرانی را تنش بحرانی می نامند و آن را با σ_{cr} نشان می دهند که چنین بدست می آید:

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 EA r^2}{AL^2} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L}{r}\right)^2}$$

کمیت $\frac{L}{r}$ ضریب لاغری نامیده میشود.

این فرمول برای ستونی که هر دوسر آن با پین متصل شده باشد به کار می رود. اکنون نحوه تعیین بار بحرانی P_{cr} را در مورد ستون هایی که سرهایی با وضعیتهای مختلف دارند، آورده می شود.

در مورد ستونی با یک سر آزاد A و یک سر ثابت B که با P را حمل می کند (9-11 الف) می بینیم که ستون بصورت نیمه بالایی ستونی سر-پین دار رفتار می کند (شکل 9-11 ب) پس بار بحرانی در ستون شکل 9-11 الف)، با بار بحرانی در ستون سر-پین دار شکل 9-11 ب) برابر است و با استفاده از طول ستون معادل با دو برابر طول واقعی L

ستون مفروض ، می توان مقدار آن را از فرمول اویلر بدست آورد. می گوئیم که طول موثر L_e ستون شکل 11-9 برابر است با و مقدار $L_e = 2L$ را در فرمول اویلر می گذاریم

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2}$$

تنش بحرانی به همین روش وبا استفاده از فرمول زیر بدست می آید:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_e}{r}\right)^2}$$

کمیت $\frac{L_e}{r}$ را ضریب لاغری موثر ستون می نامند و در حالت مورد نظر برابر $\frac{2L}{r}$ میباشد . حال ستونی با دوسر ثابت A , B را در نظر می گیریم که بار P را حمل می کند (شکل 11-10) تقارن تکیه گاهها و بارگذاری حول محوری افقی که از C مرکز می گذرد ایجاد می کند که برش در C و مولفه های افقی واکنشهای A و B برابر صفر می باشد (شکل 11-11) نتیجه می شود که قیدهایی که تکیه گاه A و نیمه پائینی CD ستون بر نیمه بالایی AC آن وارد میکنند یکسان اند (شکل 12-11) پس قسمت AC باید حول مرکز خود D متقارن باشد و D نقطه عطف باشد 0 در این نقطه لنگر خمشی صفر است . استدلالی مشابه نشان می دهد که لنگر خمشی در نقطه مرکزی E نیمه پائینی ستون نیز باید صفر باشد (شکل 13-11 الف) چون لنگر خمشی در سرهای ستون سر پین دار صفر است ، نتیجه می شود که قسمت DE ستون شکل 13-11 (الف) باید همچون ستونی سر پین دار رفتار کند (شکل 13-11 ب) پس نتیجه می

گیریم که طول موثر ستونی با دوسر ثابت برابر است با $L_e = \frac{L}{2}$

در مورد ستونی بایک سر ثابت B و سر پین دار A که بار P را حمل می کند (شکل 14-11) باید معادله دیفرانسیل منحنی خیز را بنویسیم و حل کنیم تا طول موثر ستون بدست آید. از نمودار پیکر آزاد کل ستون (شکل 15-11) نخست در می یابیم که نیروی عرضی V ، به علاوه بار محوری P بر سر A وارد می شود و V استاتیکی - نامعین است. اکنون نمودار پیکر آزاد قسمت AQ ستون را در نظر می گیریم (شکل 16-11) و می بینیم که لنگر خمشی در نقطه Q برابر است با :

$$M = -Py - Vx$$

با قراردادن این مقدار در معادله $\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI}$ داریم:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} = -\frac{P}{EI}y - \frac{V}{EI}x$$

جمله y دار را به سمت چپ معادله می بریم و می نویسیم:

$$\frac{d^2y}{dx^2} + p^2y = -\frac{V}{EI}x$$

این معادله دیفرانسیل خطی ناهمگن درجه دو با ضرایب ثابت است. جواب خصوصی چنین است:

$$y = -\frac{V}{p^2EI}x$$

که برابر است با:

$$y = -\frac{V}{P}x$$

و جواب عمومی آن چنین است:

$$y = A\sin(px) + B\cos(px)$$

با جمع جوابهای عمومی و خصوصی داریم:

$$y = A\sin(px) + B\cos(px) - \frac{V}{P}x$$

ثابتهای A, B و اندازه نیروی عرضی مجهول V از شرایط مرزی در شکل (11-15) بدست می آیند. نخست $x=0$ و

$y=0$ را در معادله قرار می دهیم، در می یابیم که $B=0$ سپس با قراردادن $x=L$ و $y=0$ نتیجه می شود:

$$A\sin(pL) = \frac{V}{P}L$$

پس از محاسبه داریم:

$$\frac{dy}{dx} = Ap\cos(px) - \frac{V}{P}$$

و با قراردادن $x=L$ و $\frac{dy}{dx} = 0$ داریم:

$$Ap\cos(pL) = \frac{V}{P}$$

برای برقراری جواب باید داشته باشیم

$$\tan(pL) = pL$$

با حل این معادله به روش آزمون و خطا، در می یابیم که کوچکترین مقدار pL که معادله را ارضا کند عبارتست از:

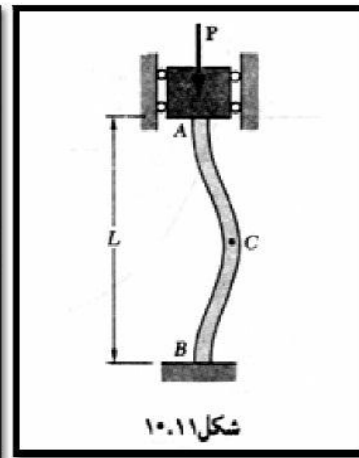
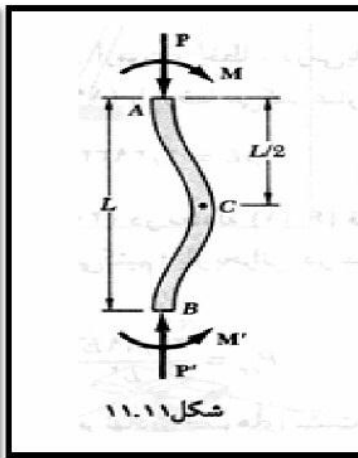
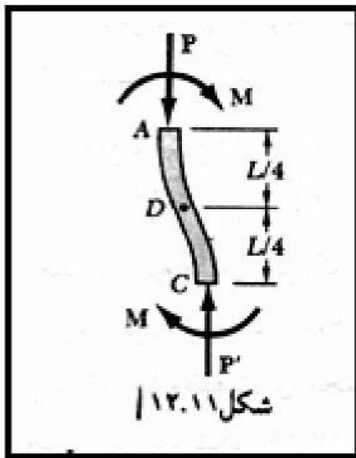
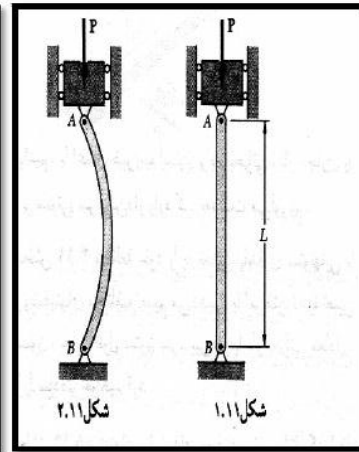
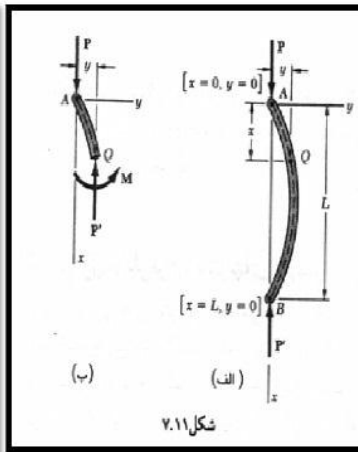
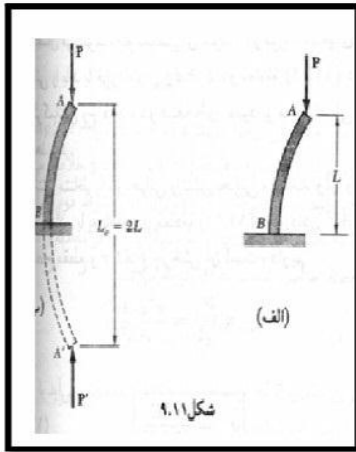
$$pL = 4.4934$$

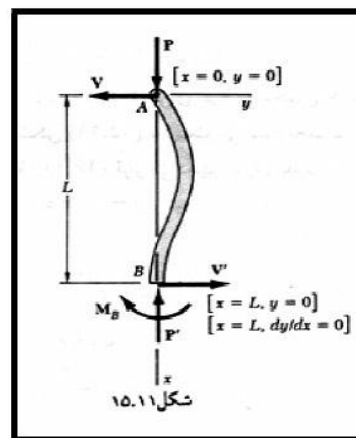
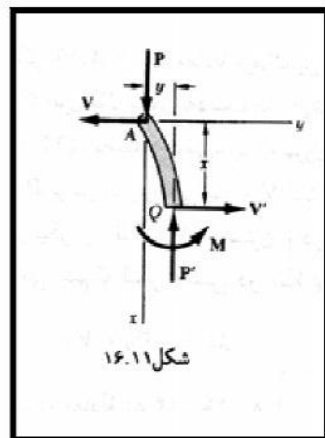
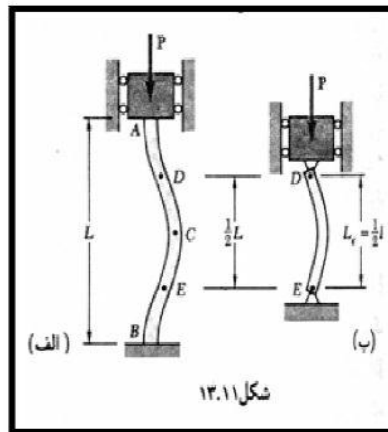
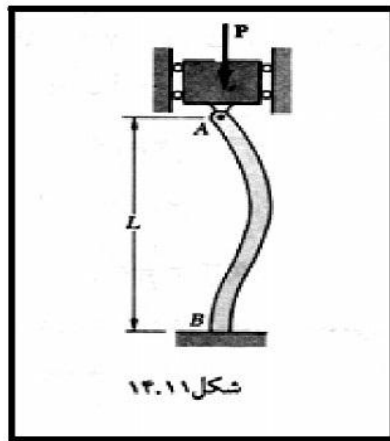
مقدار p را از معادله بدست می آوریم و خواهیم داشت:

$$P_{cr} = \frac{20.19EI}{L^2}$$

طول موثر ستون برابر است با:

$$L_e = 0.699L \approx 0.7L$$





پاسخ به سوالات:

۱ در مورد دستگاه آزمایش اظهار نظر کنید آیا روش بهتری برای اندازه گیری کمانش می توانید ارائه بدهید در صورت مثبت بودن به طور کامل تشریح کنید:

* دستگاه اصلاً پایداری و ثبات ندارد به طوری که شاید با یک بی احتیاطی از هم بپاشد و یا واژگون شود.. در مورد سفت کردن فک بالایی هم مشکلاتی وجود دارد (که البته بیشتر به محل دستگاه مربوط است تا خود دستگاه). اتصال کل مجموعه فک بالایی به دسته گردان و حرکت با آن به نظر راحت تر است.

۲ فرمول تنوری را برای آزمایشی که انجام دادید ثابت کنید:

* به طور کامل در قسمت تنوری اثبات شده است .

شرح آزمایش:

ابعاد 5 میلله را اندازه گیری کرده و ضریب لاغری (L/r) را تعیین می نمائیم . حال هر یک از میلله ها را بین دو تکیه گاه دستگاہ قرار داده و با چرخاندن فلکه بالایی دستگاہ میلله را بین دو تکیه گاه مفصلی محکم می کنیم . پایه ساعت و ساعت اندازه گیری را در وسط میلله قرار داده و روی صفر تنظیم میکنیم . فلکه را آنقدر می چرخانیم که تغییر مکان جزئی (حدود 0.01mm) ساعت اندازه گیری مشاهده شود . به محض مشاهده تغییر مکان جزئی مقدار روی گیج فشار دستگاہ را P_1 می نامیم و از اینجا به بعد به ازای مقادیر صحیح فشار به اندازه های (1bar) فشار را افزایش می دهیم و هر بار تغییر مکان (Δ) را یادداشت کرده و مقادیر فشار P_2 را نیز همینطور اعمال نیرو را تا جاییکه مقدار نیرو ثابت شود ، ادامه می دهیم و جدول مربوط به هر میلله را کامل می کنیم .

نتایج آزمایش:

	L=1448 mmD=12.86 mm P1=2 bar		L=1466.8 mmD=11mm P1=1 bar		L=1612.9 mmD=15.875 mm P1=3 bar		L=1371.6 mmD=15.875 mm P1=3 bar	
P2 (bar)	F(N)=170(P ₂ -P ₁)	Δ	F(N)=170(P ₂ -P ₁)	Δ	F(N)=170(P ₂ -P ₁)	Δ	F(N)=170(P ₂ -P ₁)	Δ
2.0			170	0.2				
2.5			255	0.78				
3.0	170	0.215	340	1.65				
3.5			425	2.88				
4.0	340	0.8	510	4.65	170	0.11	170	0.11
4.5			595	7.4				
5.0	510	1.44	680	12.1	340	0.26	340	0.225
5.5								
6.0	680	2.25			510	0.48	510	0.4
6.5								
7.0	850	4.1			680	0.62	680	0.565
7.5								
8.0	1020	7.9			850	0.78	850	0.72
8.5								
9.0	1190	12.55			1020	1	1020	0.87
9.5								
10.0					1190	1.285	1190	1.235
10.5							1275	1.41
11.0					1360	1.57	1360	1.7
11.5							1445	1.88
12.0					1530	1.85	1530	2.22
12.5							1615	2.5
13.0					1700	2.24	1700	2.8
13.5							1785	3.195
14					1870	2.73	1870	3.63
14.5							1955	4.05
15					2040	3.05	2040	4.92
15.5							2125	5.73
16					2210	3.53	2210	6.7
16.5					2295	4.1	2295	7.8
17					2380	4.6	2380	9.34
17.5					2465	4.91	2465	11.07
18					2550	5.36	2550	13.77
18.5					2635	5.9		
19					2720	6.9		
19.5					2805	8.17		

جدول (1)

KL	d	$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$	KL/r	Experimental		Theoretical	
				$F_{cr}(N)$	$\sigma_{cr}(MPa)$	$F_{cr}(N)$	$\sigma_{cr}(MPa)$
1371.6	15.875	3.968	345.66	2550	12.883	3271	16.52
1612.9	15.875	3.968	406.47	2805	14.171	2365	11.94
1447	12.7	3.175	455.74	1190	9.393	1203	9.49
1466.6	11	2.75	533.3	680	7.15	659	6.93

نمونه محاسبات:

Pined – Pined : $K = 1$

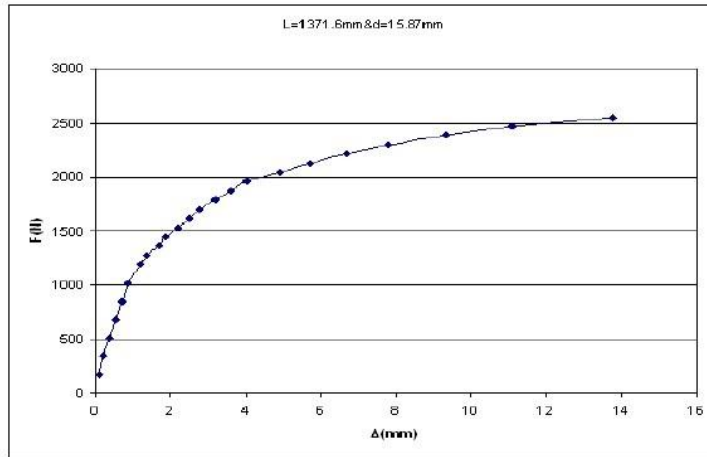
$KL = 1371.6 \text{ mm}$; $d = 15.875 \text{ mm}$

$$r^2 = \frac{I}{A} = \frac{d^2}{16} \Rightarrow r = \frac{d}{4} \Rightarrow r = 3.96875 \text{ mm}$$

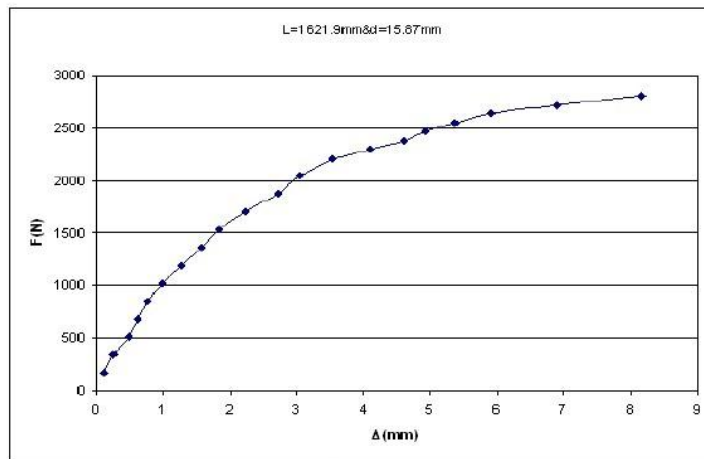
$$\frac{KL}{r} = \frac{1371.6}{3.968} = 345.665$$

$$\text{Theoretical} \left\{ \begin{aligned} F_{cr} &= \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} = \frac{\pi^2 \times 200 \text{ N/mm}^2 \times \pi \times \frac{15.875^4}{64} (\text{mm}^4)}{1371.6^2 (\text{mm}^2)} = 3271.14 \text{ N} \\ \sigma_{cr} &= \frac{F_{cr}}{A} = \frac{3271.14}{197.93} = 16.526 \text{ MPa} \end{aligned} \right.$$

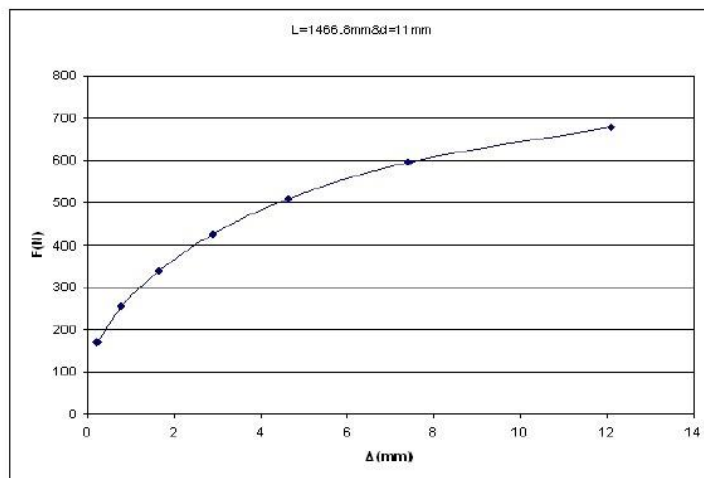
$$\text{experimental} \left\{ \begin{aligned} F_{cr} &= 2550 \text{ N} \\ \sigma_{cr} &= \frac{F_{cr}}{A} = \frac{2550}{197.93} = 12.88 \text{ MPa} \end{aligned} \right.$$



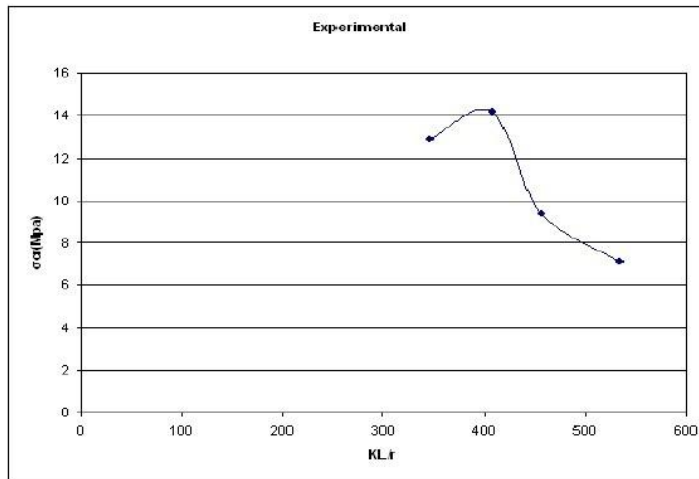
نمودار (1)



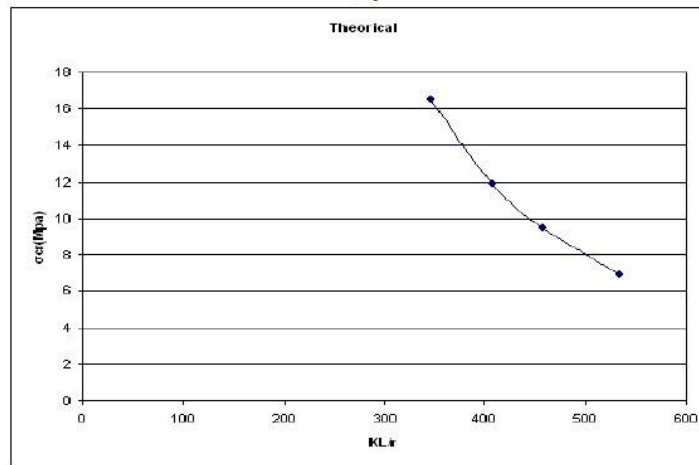
نمودار (2)



نمودار (4)



نمودار (5)



نمودار (6)

بحث و اظهار نظر:

در این آزمایش با مقایسه نتایج تجربی با مقادیر تنوری به وجود خطا در آزمایش پی می بریم به طوریکه در هر چهار آزمایش میزان نیروی بحرانی تجربی نسبت به تنوری مقداری کمتر بدست آمد که علت این امر را می توان در چند مورد خلاصه کرد:

1- از جمله مهمترین و موثرترین علت می توان از عدم مستقیم بودن میله ها نام برد چون وجود کوچکترین شیب در میله سبب خمش در میله شده و در نتیجه میله زودتر به نیروی بحرانی می رسد. این امر را می توان به وضوح در میله دوم مشاهده کرد که شیب موجود در این میله باعث شده اگرچه با توجه به کمترین ضریب لاغری توقع داریم که دیر تر از همه به حد نیروی بحرانی برسد اما در آزمایش خمیدگی میله سبب پدید آمدن خطایی زیاد در آزمایش شده است به طوریکه از میله اول هم نیروی بحرانی کمتر شده است.

2- علت دوم هم می توان در وجود تنش های پسماند و همچنین وجود عیوب در ساختار کریستالی و عوامل ساخت میله و ابعاد آن موثر دانست که سبب شده میزان تنش بحرانی تجربی کمتر از میزان تنش تنوری دانست.

روش یا پیشنهاد جدید برای بهبود آزمایش:

هر چه ابزارهایی که در آزمایش مورد استفاده قرار میگیرد از کیفیت بهتری برخوردار باشند باعث افزایش دقت آزمایش می شود. مانند ساعت اندازه گیر و دستگاه هیدرولیک و همچنین باید هر چند وقت یکبار نمونه های آزمایش عوض شوند زیرا به علت باقی ماندن تنش های پس ماند تغییر شکل داده و از دقت آزمایش می کاهد.

کاربرد علمی - صنعتی:

عضوهای سازه ای و اجزای ماشین بر اساس سه مشخصه انتخاب می شوند: استحکام، سفتی و پایداری. پدیده ناپایداری سازه ای در وضعیت های متعددی، تحت تنش فشاری، رخ می دهد. نمونه هایی از کاربرد کمانش در صنعت به شرح زیر است:

1- ورق های نازک، اگرچه بارهای کششی را بخوبی تحمل می کنند، در انتقال بارهای فشاری تحت کمانش قرار می گیرند.

2- تیرهای باریک که بصورت جانبی مهار نشده اند می توانند به اطراف بپیچند و تحت بار اعمالی درهم بشکنند.

3- مخزن های تحت خلا و نیز بدنه زیردریایی ها، اگر درست طراحی نشده باشند، تحت فشار خارجی بشدت دچار اعوجاج می شوند.

4- پوسته نازک موشک ها، در بعضی مراحل احتراق تحت بارهای فشاری شدید قرار می گیرند.

منابع و مراجع:

1 مقاومت مصالح؛ بیر جانستون

2- جزوه آزمایشگاه مقاومت مصالح؛ یونس علیزاده؛ سال تحصیلی 83-84

خستگی

توضیحات :

در حالی که برای طراحی قطعاتی که تحت بارهای استاتیکی قرار می‌گیرد حد تسلیم ماده از مهمترین کمیت‌های مکانیکی است. برای اجزایی مانند محور توربینها با میل گاردانها، فنرهای معلق و فنرهای سوپاپ واز این قبیل که تحت تنشهای متناوب قرار می‌گیرند بررسی تنش دیگری غیر از حد تسلیم مورد نیاز است زیرا اگر این گونه قطعات تحت تاثیر نیروهای متناوب قرار گیرند پس از مدتی می‌شکنند هرچند که تنشهای وارد بر آنها بسیار پایین تر از استحکام کششی و یا حد تسلیم باشد. پدیده ای را که در نتیجه تنشهای متناوب در جسم ایجاد گشته و به شکست آن می‌انجامد، خستگی و یا فرسودگی می‌نامند. هر چه تعداد تناوب تنشهای وارده بیشتر باشد تنش شکست آن کوچکتر است تنش متناوبی می‌تواند ناشی از چرخش، خمش یا ارتعاش باشد.

حداکثر تنشی را که قطعه از ماده معین بتواند به ازای آن تعداد دور فوق العاده زیادی را بدون اینکه بشکند تحمل کند، استحکام خستگی یا حد خستگی می‌نامند. به منظور بدست آوردن حد تحمل نمونه‌هایی از ماده مورد نظر، که همگی به صورت استاندارد شده دارای یک شکل، سطح مقطع دایره ای شکل، ابعاد مشخص شده، بدون عیب و با شرایط یکسان باشند را انتخاب می‌کنیم. با اعمال بار (به صورت خمشی) به نمونه‌ها در یکی از دستگاه‌های آزمایش خستگی، شکل (5-55) بلافاصله در سطح بالایی نمونه تنش کششی و در سطح زیری تنش فشاری ایجاد می‌شود. بعد از اینکه نمونه نیم دور (۱۸۰) چرخید موضعی که ابتدا تحت تاثیر تنش کششی قرار گرفته بود اکنون تنش فشاری به آن اعمال می‌شود. بنا براین تنش در هر نقطه ای از نمونه به صورت دور تناوب سینوسی کامل، $\sigma(t) = \sigma_m \sin \omega t$ ، تغییر می‌کند. تنش متناوبی می‌تواند بین دو مقدار حداکثر و حداقل در حالت‌های مختلفی از کشش و یا فشار تغییر کند. حالت اول تغییرات بارگذاری می‌تواند به گونه ای باشد که این تنش اعمالی بین دو مقدار σ_{max} (کششی) و σ_{min} (فشاری) تغییر کند و تنش متوسط $\sigma_m = 0$ باشد. شکل (5-55 I). حالت دوم تغییرات تنش می‌تواند به صورتی باشد که حداکثر تنش در موقعیت فشاری کمتر از حداکثر تنش کششی باشد شکل (5-55 II).

در حالت‌های دیگر باردهی به گونه ای باشد که مقدار تنش بین حداکثر و حداقلی در موقعیت کششی یا فشاری تغییر کند شکل (5-55 III). در بسیاری از حالتها به تنش متناوبی می‌تواند مقداری تنش دائمی به صورت استاتیکی به اندازه σ_m افزوده شود. در هر صورت روابط زیر رامی توان برای تنش متناوبی نوشت:

$$\sigma(t) = \sigma_m + \sigma_a \sin \omega t$$

$$\sigma_m = \frac{1}{2} \langle \sigma_{max} + \sigma_{min} \rangle$$

$$\sigma_a = \frac{1}{2} \langle \sigma_{max} - \sigma_{min} \rangle$$

حداکثر تنش اعمال شده به نمونه آزمایش خستگی شکل (5-55-الف) از رابطه زیر بدست می آید :

$$\frac{32 FL}{\pi d^3}$$

در این رابطه F = بار اعمال شده به نمونه L = طول موثر و d = قطر نمونه است بعد از تعداد دور معینی شکست در نمونه ظاهر می شود. سپس مقادیر به دست آمده برای تنش و تعداد دور تا لحظه شکست را در یک سیستم محورهای مختصات با محورهای ساده (تنش) و لگاریتمی (تعداد دور) مشخص می کنیم. نقاط به دست آمده عملاً همگی بر روی یک منحنی قرار نگرفته، بلکه بیشتر در محدوده ای کم و زیاد می شود

تعداد معددی از نقاط به دست آمده از نمونه های آزمایش (حتی در شرایط یکسان آزمایش) میتواند تفاوت بسیاری زیادی از نقاط دیگر داشته باشد که معمولاً حذف می شوند. اکنون بر حسب حساسیت کاربرد ماده می توان با استفاده از نقاط به دست آمده یک منحنی به نام ولر یا منحنی تنش - تعداد دور را رسم کرد، شکل (5-56) برای مثال منحنی را می توان با استفاده از مقدار متوسط از مقادیر مشخص شده به وسیله آزمایش رسم کرد این بدین معنی است که احتمال اینکه تمام نمونه ها به ازای حد معینی از تنش تعداد دور تناوب مربوط به آنرا بدون شکست بتوانند تحمل کنند 60% است

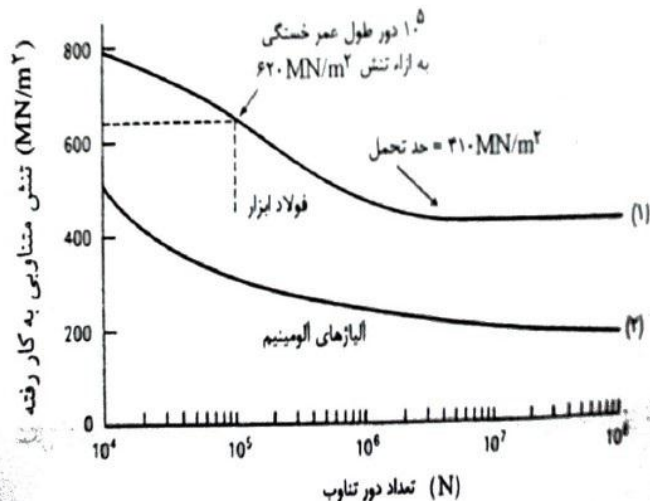
طول عمر خستگی مشخص کننده مدت زمان سوپس دهی قطعه ای است که تنش متناوبی معینی به آن اعمال می شود. برای مثال در شکل (5-56) اگر تنش متناوبی به اندازه 20 Mpa به قطعه فولادی اعمال شود طول عمر خستگی آن 10 به توان 5 دور (چرخه) خواهد بود.

در آزمایش مواد مختلف دو نوع منحنی به دست می آید. در یک نوع از آن منحنی (1) به ازای تعداد 10-10 دور تناوب به حد تنشی خواهد رسید که اغلب فولادهای نرم، آلیاژهای منیزیم و تیتانیوم و بعضی از آلیاژهای آلومینیم از این نوع هستند. در نوع دیگری از تعداد فلزات غیر آهنی از قبیل آلیاژهای مس و بعضی از آلیاژهای منیزیم و آلومینیم چنین حد کاملاً مشخصی ظاهر نمی شود بلکه کاهش پیوسته تنش به ازای افزایش دوره تناوب دیده می شود. منحنی (2) در این حالت تایین حد تحمل چندان ساده نخواهد بود اما از انجایی که دادن کمیتی که بتواند حد خستگی یک ماده را مشخص کند از نظر صنعتی اهمیت دارد لذا در این گونه موارد تنشی را که به ازای آن حدود 100 میلیون دور تناوب هنوز قابل تحمل باشد به عنوان حد تحمل انتخاب می شود. البته آزمایش بدین طریق صورت می گیرد که برای موادی که حد تحمل دارد با تنشی حدود $\frac{2}{3}$ استحکام کششی استاتیکی ماده آغاز می کنیم. موقعی که دو یا سه نمونه، تحت تاثیر تنشی در حد

اقل 70.000 تعداد دور به شکست نینجامد ، آن تنش را به عنوان حد تحمل انتخاب میکنند . اما برای مواد بدون حد تحمل ، حداکثر تنشی که به ازای آن دو و یا سه نمونه حدود 80.000 تعداد دور را بدون شکست انجام دهد ، به عنوان حد تحمل انتخاب می شود . چنانچه منحنی نشان می دهد ، برای افزایش تعداد تناوب مجاز در یک قطعه لازم است تنش وارد بر آن را کاهش دهیم . میزان حداکثر تنش را قبل از شکست بوسیله قسمت افقی منحنی (1) نشان داده شده حد تحمل (استحکام دائمی) مینامند . هرگاه تنش وارد بر یک ماده پایین تر از حد تحمل باشد ، آن ماده می تواند تحت آن تنش تعداد دور تناوب فوق العاده زیاد تر را تحمل کند . برای فولادها و بعضی از مواد دیگر نسبت حد تحمل به استحکام کششی در حدود 0/5 است .

به عنوان نقطه شروع شکست مواضع زیر مورد سوال قرار می گیرد :

عیوب ناشی از کربن گیری کناره های قطعه ، فازهای رسوبی ، ناخالصیهای غیر فلزی ، عیوب داخلی ، کلیه محلهای تجمع تنش ، سوراخها ، کناره های تیز در محل انتقال سطح مقطعها و شیارهایی که در طراحی اجتناب ناپذیر بوده و یا شیارهای ریزی که احیاناً در اثر عملیات پرداختکاری سطحی بوجود آمده است . در تمام اینگونه مواضع (نقاط ضعف) تحت تاثیر تنشهای متناوب با انجام فعل و افعالات میکروسکوپی ابتدا یک ترک بسیار ریز سطحی ایجاد می شود که در اثر ادامه بارهای تناوبی رشد می یابد تا جاییکه سطح مقطع باقی مانده دیگر نتواند بار وارده را تحمل کند و سرانجام قطعه در اثر خستگی مجبوره شکست ناگهانی می شود .



شکل (۵-۵۶) نمودار خستگی الف) برای یکفلز با حد تحمل بالا

در آزمایش خستگی نمونه باید دقیقا صیقل و پولیش داده شده و بدون عیب سطحی باشد. تاثیر بعضی از فاکتورها را تخمین زد. بدین ترتیب که حد تحمل یک نمونه پولیش داده شده تقریبا 20% بیشتر از یک نمونه پرداختکاری شده با سنگ سمباده و حدود 40% بیشتر از یک نمونه شیار دار از همان جنس است. تاثیر موقعیت سطح خارجی در فولاد با افزایش استحکام بیشتر میشود برای مثال موقعیکه پرداختکاری با ماسه پاش انجام میگیرد و یا یک لایه سطحی سختتر بوسیله کربن دهی یا نیتروژن دهی یا با تغییر شکل جزئی سطحی بدست آید حد تحمل میتواند تا حدود 25% افزایش یابد. قعات بزرگتر ماشینها با قطر بیش از 5 سانتیمتر معمولا دارای حد تحملی حدود 20% بیشتر از نمونه های آزمایشگاهی است. یکی دیگر از عواملی که باعث کاهش حد تحمل می شود، خوردگی است که بجز در مورد برخی از فولادهای پر آلیاژی می تواند حد تحمل را شدیداً (حدود 80%) کاهش دهد. در چنین شرایطی باید قبلا پیشگیریهایی از قبیل پوشش دادن با فلزاتی از قبیل روی ویا کادمیم به عمل آورد. عامل دیگری که بروی حد تحمل تاثیر می گذارد تنشهای متناوب اولیه اعم از تنشهای با دامنه بزرگتر یا کوچکتر از حد تحمل است. بدین ترتیب که برای مثال هرگاه یک قطعه ابتدا تحت تاثیر یک تنش متناوب بزرگتر از حد تحمل قرار گیرد، حد تحمل آن به اندازه قابل توجهی کاهش می یابد (خستگی زودرس). برعکس چنانچه تنش متناوب قبلی از مقدار ی بسیار پایین تر از حد تحمل شروع شود و بصورت گام به گام به آن افزوده شود حد تحمل را افزایش می دهد. این پدیده در عمل دارای اهمیت زیادی است و آنرا تمرین دهی برای بالا بردن حد تحمل مینامند.

مثال

شافتی را برای کوره پخت سیمان از جنس فولاد طراحی کنید که طول آن 2.5 متر بوده و بتواند بطور مداوم و بدون شکست برای مدت یکسال بار اعمالی به اندازه 60kN را تحمل کند. این شافت باید در حین سرویس دهی در هر دقیقه یک دور بزند.

حل:

طول عمر خستگی مورد درخواست برای طراحی این شافت برابر تعداد کل دور تناوب در یکسال است:

$$(N=5.256 \times 100000 \text{ سال} / 365 \text{ روز} / 24 \text{ ساعت} / 60 \text{ دور} / \text{ساعت})$$

بنابر این با استفاده از شکل (5-56) باید مقدار تنش کمتر از 500MPa باشد. با توجه به رابطه (5-43) قطر شافت را

$$\frac{32 FL}{\pi d^3}$$

$$D=145\text{mm}$$

بنابراین شافتی به قطر 145mm باید بتواند تحت شرایط محیط کاری معین شده برای یکسال بدون تخریب عمل کند. اما البته مناسب تر است که این شافت طول عمر طولانی تری داشته باشد. لذا با استفاده از همان شکل (5-56) حد خستگی را برابر 410MN.m انتخاب می کنیم در اینصورت حداقل قطر شافت مورد نیاز که بتواند بدون تخریب عمل کند برابر است با :

$$d=(32 \times 0.06\text{MN} \times 2.5) / (\pi \times 410) = 156\text{mm}$$

البته همچنین لازم است توجه شود که عواملی مانند دماهای بالا و شرایط محیط کاری مناسب برای انجام واکنشهای اکسیداسیون و خوردگی و ایجاد شیارها یا حفره های سطحی می تواند به تخریب زودرس شافت کمک کند .

نتایج تست خستگی معمولاً به صورت منحنی های $S\text{-log}N$ نمایش داده می شوند و مهم است که ضمن گزارش نتایج، روش اعمال تنش، نوع ماشینی که به کار گرفته شده، اندازه های نمونه آزمایش و بسامد چرخه، گزارش شوند. داده های آزمایشی می تواند به شکل جدول نیز نشان داده شود. عبارت عمر خستگی و تحمل، برای نشان دادن تعداد چرخه های لازم تا رسیدن به نقطه شکست به کار می رود که معمولاً تعداد آن 10^6 چرخه برای فولاد های ساختمانی و 10^7 چرخه برای انواع دیگر فولاد ها و فلزات غیر آهنی است. عبارت استحکام خستگی و حد تحمل، برای حداکثر سطح تنش قابل اعمال به کار می رود که قطعه ضمن تحمل آن عمر مشخصی را سپری می کند.

در تست خستگی تعداد زیادی متغیر دخالت دارند؛ حتی اگر تمام نمونه های یکسان آزمایش با دقت زیادی تهیه و به طور یکنواخت صیقل داده شوند، نتایج آزمون خستگی ممکن است دارای پراکندگی قابل ملاحظه ای باشند. انجام آزمون خستگی در آزمایشگاه، معمولاً بر اساس شرایط بارگذاری یکنواخت استاندارد است و بنابراین برقراری ارتباط میان نتایج به دست آمده در تست خستگی در آزمایشگاه با آنچه که مستقیماً در هنگام کار اتفاق می افتد، دشوار است و لذا به کار گیری مستقیم نتایج تست خستگی در طراحی مشکل است؛ بنابراین در بعضی موارد لازم است با ابداع و انجام آزمایش خستگی روی تمامی یک سازه مهندسی، آزمون تا شکست کامل ادامه یابد.

به دنبال شکستن نخستین کابین هواپیمای کامت در اثر فشار در دهه 1950، در یک آزمایشگاه ویژه در موسسه سلطنتی هواپیمایی، واقع در شهر فارن بورو اسکلت کامل یک هواپیمای کامت تا انهدام کامل مورد آزمایش قرار گرفت. در آزمایشی نیز تغییرات فشار کابین و بازی بال ها که ضمن هر پرواز اتفاق می افتد، شبیه سازی شد. از همان تاریخ برای هر مدل هواپیمایی که برای خدمات غیر نظامی ساخته می شود یک آزمایش مشابه تا حد انهدام انجام می پذیرد. انجام این آزمایش ها برای دریافت جواز صلاحیت پرواز الزامی است.

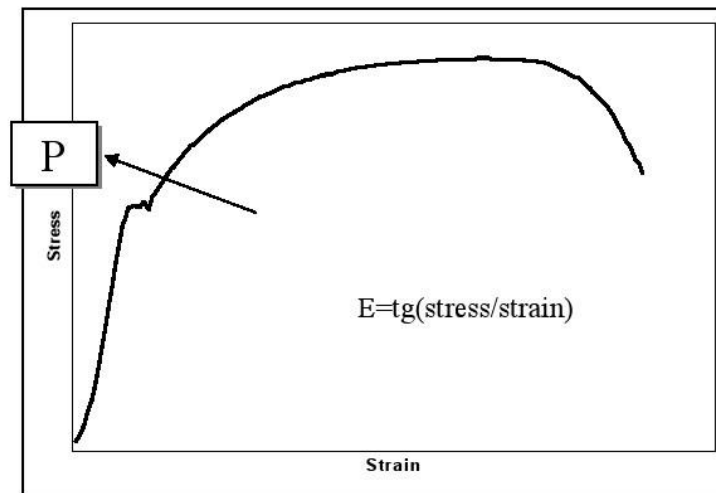
کاربرد استرین گیجها (Strain Gauge) در تعیین مدول الاستیسیته (E) و نسبت پواسون (ν)

هدف آزمایش:

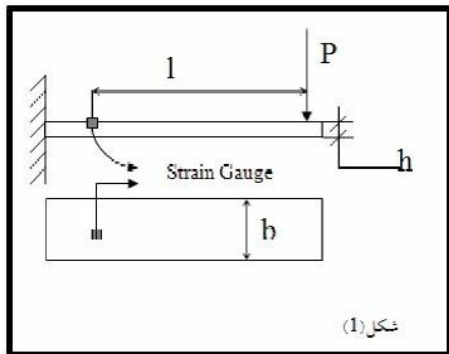
تعیین مدول الاستیسیته و نسبت پواسون یک تیر آلومینیومی به کمک استرین گیج مقاومتی.

چکیده گزارش:

در بررسی منحنی کشش مواد در بخش اول منحنی ناحیه ای خطی وجود دارد. این ناحیه خطی در نقطه P (Proportional Limit) پایان می یابد. شیب این ناحیه خطی مدول الاستیسیته (E) نامیده می شود. E از خصوصیات هر ماده است و با انجام عملیات مکانیکی یا حرارتی و ... تغییر نمی کند.



در آزمایش اول با اندازه گیری کرنش و مشخصات هندسی تیر مورد آزمایش میزان E را بدست می آوریم، به این صورت که داریم:

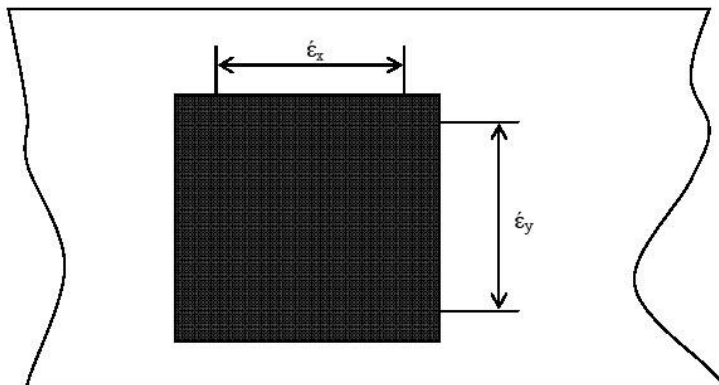


$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{6Fl}{bh^2} \\ \sigma &= E \varepsilon \end{aligned} \right\} \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

در کشش فلزات مشاهده می شود آنها علاوه بر تغییر شکل در جهت کشش، در جهت عمود بر کشش هم تغییر فرم می دهند. از این روست که برای فلزات (و سایر مواد) نسبتی به عنوان نسبت پواسون (Poisson's Ratio) به صورت زیر تعریف می شود:

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right|$$

که در آن ε_x کرنش در جهت کشش و ε_y کرنش در جهت عمود بر کشش است.



شماتیک کرنش سنج [شکل (2)]

در آزمایش دوم که به تعیین این نسبت اختصاص دارد برای بدست آوردن کرنش های اصلاح شده - که در

قسمت "بحث و اظهار نظر" به دلیل اصلاح کردن آن اشاره می کنیم - از روابط زیر بهره می بریم:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = 0.9972(\hat{\varepsilon}_x - k_t \hat{\varepsilon}_y) \\ \varepsilon_y = 0.9972(\hat{\varepsilon}_y - k_t \hat{\varepsilon}_x) \\ k_t = 0.01 \end{cases}$$

ε_x و ε_y : کرنش اصلاح شده

$$R' = R + \Delta R$$

$$\frac{\Delta l}{l} G_f = \frac{\Delta R}{R}; G_f = \text{Gauge Factor} = 2.09.$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta R/R}{G_f}$$

$\hat{\varepsilon}_x$ و $\hat{\varepsilon}_y$: کرنش اندازه گیری شده

این شیوه سنجش به کمک پدیده پل و تستون صورت می گیرد.

درباره مقاومتها می دانیم: $R = \rho \frac{l}{A}$. با ایجاد کرنش در نمونه داریم:

وسایل آزمایش:

1- تیر آلومینیومی

2- استرین گیج های مقاومتی (که در اینجا در روی تیر کاملاً از پیش نصب شده اند در اصل این دو قطعه از لحاظ فیزیکی

یکسان و از لحاظ مقاومتی نسبت به هم عایقتند.)

3- نمایش دهنده استرین

4- وزنه های پابندی

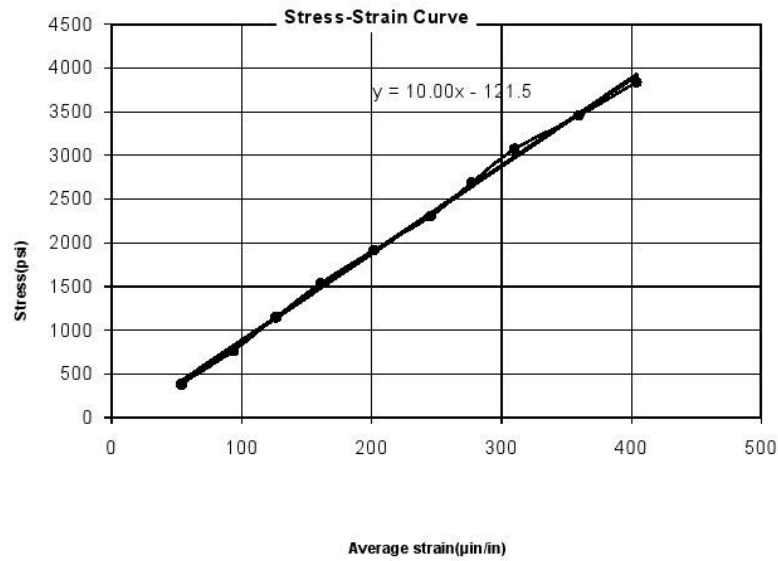
5- آویز برای قرار دادن وزنه ها

6- نگهدارنده تیر

نتایج آزمایش:

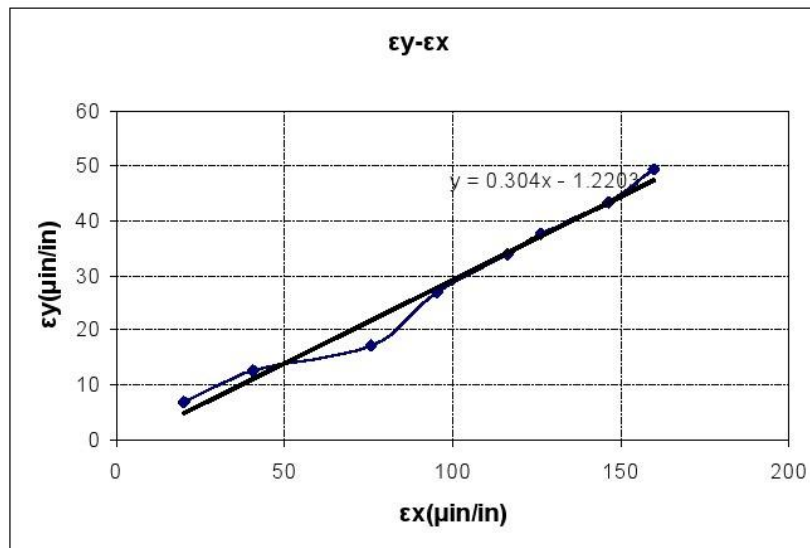
الف) آزمایش تعیین مدول الاستیسیته:

P(lb)	Increasing Strain($\mu\text{in}/\text{in}$)	Decreasing Strain($\mu\text{in}/\text{in}$)	Average Strain($\mu\text{in}/\text{in}$)	σ (psi)
0.1	7.2	3.5	53.5	384
0.2	10.5	8.3	94	768
0.3	13.8	11.5	126.5	1152
0.4	17.2	15.0	161	1536
0.5	21.1	19.3	202	1920
0.6	25.5	23.6	245.5	2304
0.7	28.8	26.6	277	2688
0.8	31.3	30.7	310	3072
0.9	36.6	35.3	359.5	3456
1	40.4	40.4	404	3840



ب) آزمایش تعیین نسبت پواسون

P(lb)	$\epsilon_x(\mu\text{in/in})$	$\epsilon_y(\mu\text{in/in})$	$\epsilon_x(\mu\text{in/in})$	$\epsilon_y(\mu\text{in/in})$
0.2	20	7	19.874196	6.78096
0.4	41	13	40.755564	12.55475
0.6	76	18	75.607704	17.19173
0.8	96	28	95.451984	26.96429
1	117	35	116.32338	33.73528
1.2	127	39	126.25549	37.62436
1.4	147	45	146.13966	43.40812
1.6	161	51	160.04063	49.25171



با توجه به اطلاعات حاصل از آزمایشها، نتایج زیر حاصل آمده اند:

$$\begin{cases} E = 10.002 \times 10^6 \text{ psi} \\ \nu = 0.304 \end{cases}$$

مقادیر اندازه گیری شده از این قرارند:

$$\begin{cases} L = 10'' \\ b = 1'' \\ h = \left(\frac{1}{8}\right)'' \end{cases}$$

نمونه محاسبات:

الف) آزمایش تعیین مدول الاستیسیته:

$$P = 0.5lb \Rightarrow \begin{cases} \text{increasing strain} = 211 \mu \text{ in/in} \\ \text{decreasing strain} = 193 \mu \text{ in/in} \\ \text{average strain} = \frac{193 + 211}{2} = 202 \mu \text{ in/in} \\ \sigma = \frac{6PL}{bh^2} = \frac{6 \times 0.5 \times 10}{1 \times \left(\frac{1}{8}\right)^2} = 1920 \end{cases}$$

ب) آزمایش تعیین نسبت پواسون:

$$P = 1lb \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_x = 0.9972(\hat{\varepsilon}_x - k_t \hat{\varepsilon}_y) = 0.9972(117 - 0.01 \times 35) = 116.32338 \\ \varepsilon_y = 0.9972(\hat{\varepsilon}_y - k_t \hat{\varepsilon}_x) = 0.9972(35 - 0.01 \times 117) = 33.73528 \\ k_t = 0.01 \end{cases}$$

با مراجعه به یکی از کتابهای مرجع جامدات یا طراحی اجزاء خواهیم دید:

$$\begin{cases} E = 10.3 \times 10^6 \text{ psi} \\ \nu = 0.334 \end{cases}$$

با توجه به اطلاعات حاصل از آزمایشها، نتایج زیر حاصل آمده اند:

$$\begin{cases} E = 10.002 \times 10^6 \text{ psi} \\ \nu = 0.304 \end{cases}$$

مقادیر اندازه گیری شده از این قرارند:

$$\begin{cases} L = 10'' \\ b = 1'' \\ h = \left(\frac{1}{8}\right)'' \end{cases}$$

نمونه محاسبات:

الف) آزمایش تعیین مدول الاستیسیته:

$$P = 0.5 lb \Rightarrow \begin{cases} \text{increasing strain} = 211 \mu \text{ in/in} \\ \text{decreasing strain} = 193 \mu \text{ in/in} \\ \text{average strain} = \frac{193 + 211}{2} = 202 \mu \text{ in/in} \\ \sigma = \frac{6PL}{bh^2} = \frac{6 \times 0.5 \times 10}{1 \times \left(\frac{1}{8}\right)^2} = 1920 \end{cases}$$

ب) آزمایش تعیین نسبت پواسون:

$$P = 1 lb \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_x = 0.9972(\hat{\varepsilon}_x - k_t \hat{\varepsilon}_y) = 0.9972(117 - 0.01 \times 35) = 116.32338 \\ \varepsilon_y = 0.9972(\hat{\varepsilon}_y - k_t \hat{\varepsilon}_x) = 0.9972(35 - 0.01 \times 117) = 33.73528 \\ k_t = 0.01 \end{cases}$$

با مراجعه به یکی از کتابهای مرجع جامدات یا طراحی اجزاء خواهیم دید:

$$\begin{cases} E = 10.3 \times 10^6 \text{ psi} \\ \nu = 0.334 \end{cases}$$

بحث و احضار نظر:

دلایل اختلاف در مقادیر به دست آمده و مقادیر موجود در کتاب می تواند مربوط به استفاده مکرر از استرین گیجها، لرزش ایجاد شده در هنگام گذاشتن وزنه ها، خطای شخص قرائت کننده مقادیر از روی عقربه دستگاه، عمر تقریبا بالای وسایل، کاملا کالیبره نبودن دستگاهها و ... باشد.

همچنین وجود تغییر شکل در قسمتهای دایره ای شکل سنج، که مطلوب ما نیست ولی اتفاق می افتد، یکی از دلایل خطاست که تا حدودی با فرمول اصلاحی آن را مرتفع می کنیم. البته این خطا در اندازه گیری کرنش در جهت عمود بر کرنش بیشتر است، زیرا خطای بزرگتری را در اندازه ای کوچک داریم.

با این وجود این روش یکی از روشهای دقیق موجود برای تعیین مدول الاستیسیته و نسبت پواسون است.

روش یا پیشنهاد جدید برای بهبود آزمایش:

استفاده از استرین گیجها و تیر نو که در اثر استفاده مکرر کمی کارآیی خود را از دست داده اند، استفاده از تیر با ارتفاع کمتر (برای کم شدن خطای محاسباتی)، ایجاد تکیه گاه مناسبتر برای وزنه ها که حتی المقدور به تیر متصل شود تا از لرزش و آمد و رفت وزنه ها روی هوا جلوگیری نماید، کوچکتر کردن گام افزایش وزنه ها برای بیشتر شدن تعداد دیتاها و ... می تواند با بهره بردن از وسایل اندازه گیری موجود و ایجاد حداقل تغییرات دقت را افزایش دهند. همچنین به نظر می رسد در عقربه دستگاه هم مقداری اشکال وجود دارد و عکس العملهای غیر عادی (مثل پریدنهای ناگهانی) انجام می دهد. رفع این نقیصه (در صورت وارد بودن ایراد) می تواند کمک کننده باشد.

کاربرد علمی - صنعتی:

این آزمایش ها در تعیین خواص مواد بکار می روند. از استرین گیجهای مقاومتری در تعیین کرنش سازه هایی مانند پلها و هواپیماها، در نیروسنج های الکتریکی، ترازوهای دیجیتال، فشارسنج های الکتریکی (در پرسها)، دماسنج ها، شتاب سنج ها، سرعت سنج ها و ... کاربرد دارند.

منابع و مراجع:

1- طراحی اجزاء ماشین؛ جوزف ادوارد شیگلی؛ ویرایش پنجم.

آزمایش فتوالاستیسیته

فتوالاستیسیته به عنوان اساس یک فن برای مطالعه تنش‌ها در ساختارهای مکانیکی شفاف و کدر بکار می‌رود. چنانچه حبابهای هوا در شیشه در حین ساختن آن کاملاً از بین نرود یا در نصب آن بی دقتی شود، خواه به عنوان شیشه اتومبیل بکار رفته باشد یا به عنوان عدسی تلسکوپ، تنش داخلی در آن ظاهر خواهد شد. و می‌توان آن را به آسانی آشکارسازی کرد. این پدیده به نامهای مختلف نظیر روشکستی مکانیکی، فتوالاستیسیته یا روشکست تنشی مشهور است

تاریخچه

فتوالاستیسیته در سال 1816__1191 توسط سر دیوید بروستر کشف شد. وی دریافت که مواد شفاف همسانگرد معمولی را می‌توان با عمل تنش مکانیکی از نظر نوری ناهمسانگرد کرد

اثر تنش مکانیکی بلور همسانگرد

وقتی که بلور همسانگرد تحت تاثیر تنش مکانیکی قرار می‌گیرد، به علت تراکم یا انبساط به ترتیب خواص یک بلور تک محور منفی (سرعت حرکت در راستایی که بروز قطبش میدان الکتریکی موازی با محور نوری بزرگتر از سرعت حرکت در راستایی که بردار قطبش میدان الکتریکی عمود بر محور نوری است) یا تک محور مثبت (برعکس حالت قبل) به خود می‌گیرد. در هر یک از این دو حالت محور نوری موثر در امتداد تنش و دو شکستی القا شده با تنش متناسب است

آشکارسازی تنش‌های داخلی

اطلاعات مربوط به کرنش سطحی روی اجسام کدر را می‌توان با قرار دادن روکش‌های فتوالاستیک در قسمت‌های مورد مطالعه بدست آورد. بطور متداولتر یک مدل قیاسی شفاف از قسمت مورد نظر را از ماده‌ای که از نظر نوری حساس به تنش است، نظیر اپوکسی گلیتپول، با رزینهای پلی‌استر می‌سازند. پس این مدل را تحت اثر نیروهایی قرار می‌دهند، که

مولفه واقعی به هنگام استفاده ، به آن وارد می کنند. چون دو شکست از نقطه ای به نقطه دیگر در روی سطح این مدل تغییر می کند، وقتی که بین قطبش گرهای متقاطع قرار می گیرد، یک نقش فریز پیچیده رنگارنگ وجود آتش های داخلی را آشکار خواهد کرد

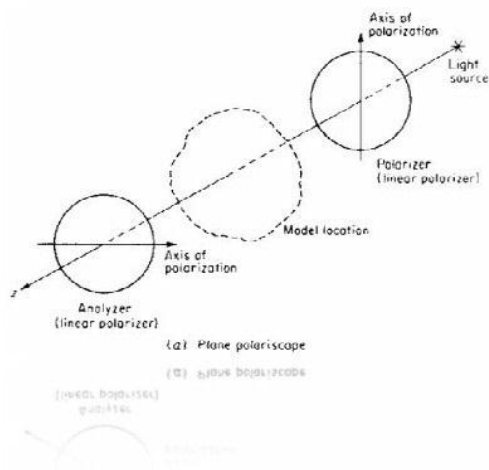
نواحی تکفام

تنش های اصلی و همچنین اختلاف تنش بین دو نقطه از یک ناحیه به ناحیه دیگر تغییر می کند. تحت تابش نور سفید مکان هندسی کلیه نقاط روی نمونه که اختلاف تنش بین آنها مقدار ثابتی است، نواحی تکفام نامیده می شوند. هرکدام از این نواحی به یک رنگ خاص مربوط می شوند. آنچه که روی این فریزهای رنگین برهم نهاده شده اند، مجموعه ای از نوارهای سیاه جداگانه خواهد بود .

نتیجه

وجود تنش در ساختار مکانیکی مواد شفاف ایجاد منظره های زیبایی می کند، که با نگرستن به این فریزها می توان این منظره ها را به چشم دید. علاوه بر این ، نقشه ای کیفی از تنش می توان تهیه کرد و آن را به عنوان اساس محاسبات کمی

بکار برد.



فتوالاستیسه در سال 1816_1191 توسط سر دیوید بروستر کشف شد. وی دریافت که مواد شفاف همسانگرد معمولی را می توان با عمل تنش مکانیکی از نظر نوری ناهمسانگرد کرد .

اثر تنش مکانیکی بلور همسانگرد

وقتی که بلور همسانگرد تحت تاثیر تنش مکانیکی قرار می گیرد، به علت تراکم یا انبساط به ترتیب خواص یک بلور تک محور منفی (سرعت حرکت در راستایی که بروز قطبش میدان الکتریکی موازی با محور نوری بزرگتر از سرعت حرکت در راستایی که بردار قطبش میدان الکتریکی عمود بر محور نوری است) یا تک محور مثبت (برعکس حالت قبل) به خود می گیرد. در هر یک از این دو حالت محور نوری موثر در امتداد تنش و دو شکستی القا شده با تنش متناسب است .

آشکارسازی تنش های داخلی

اطلاعات مربوط به کرنش سطحی روی اجسام کدر را می توان با قرار دادن روکش های فتوالاستیک در قسمت های مورد مطالعه بدست آورد. بطور متداولتر یک مدل قیاسی شفاف از قسمت مورد نظر را از ماده ای که از نظر نوری حساس به تنش است، نظیر اپوکسی گلیتپول ، با رزینهای پلی استر می سازند. پس این مدل را تحت اثر نیروهایی قرار می دهند، که مولفه واقعی به هنگام استفاده ، به آن وارد می کنند. چون دو شکست از نقطه ای به نقطه دیگر در روی سطح این مدل تغییر می کند، وقتی که بین قطبش گرهای متقاطع قرار می گیرد، یک نقش فریز پیچیده رنگارنگ وجود آتش های داخلی را آشکار خواهد کرد .

نواحی تکفام

تنش های اصلی و همچنین اختلاف تنش بین دو نقطه از یک ناحیه به ناحیه دیگر تغییر می کند. تحت تابش نور سفید مکان هندسی کلیه نقاط روی نمونه که اختلاف تنش بین آنها مقدار ثابتی است، نواحی تکفام نامیده می شوند. هرکدام از این نواحی به یک رنگ خاص مربوط می شوند. آنچه که روی این فریزهای رنگین برهم نهاده شده اند، مجموعه ای از نوارهای سیاه جداگانه خواهد بود .

نتیجه

وجود تنش در ساختار مکانیکی مواد شفاف ایجاد منظره های زیبایی می کند، که با نگرستن به این فریزها می توان این منظره ها را به چشم دید. علاوه بر این ، نقشه ای کیفی از تنش می توان تهیه کرد و آن را به عنوان اساس محاسبات کمی بکار برد .

آرایش سه جهته استرین گیج ها (Rosette) و اندازه گیری تمرکز تنش هدف آزمایش:

الف) بدست آوردن تنش ها و در نتیجه کرنش های اصلی در نمونه مورد آزمایش و سپس تعیین ضریب پواسون با کمک این مقادیر به دست آمده و همچنین یافتن محل محورهای اصلی.

ب) تعیین ضریب تمرکز تنش در اطراف یک سوراخ، بریدگی یا شکاف می باشد.

چکیده گزارش:

الف) در این آزمایش یک روزت راستگوشه را روی تیری آلومینیومی با زاویه ای دلخواه نصب می کنیم (این کار قبلا انجام شده است). سیم های مربوطه را به دستگاه متصل کرده و دستگاه را با توجه به گیج فاکتور مربوط به هر گیج (در اینجا برای همه $G_F=2.05$) کالیبره نموده و آن را روی عدد 4500 تنظیم می کنیم. تیر آلومینیومی را تحت بار قرار داده و نتایج را یادداشت می کنیم. این نتایج به کمک فرمولهای موجود مقادیر مورد نظر ما را خواهند داد.

ب) این آزمایش نیز مانند آزمایش بالاست با این تفاوت که 4 استرین گیج داریم و گیج فاکتور این گیج هم 2.09 است که در نهایت ما را مجبور به تصحیح نتایج می کند. البته دستگاه اندازه گیر و مدار اندکی با حالت پیشین متفاوت است، همچنین تیر هم سوراخدار بوده و یک گیج 4 تایی روی آن نصب شده است.

نام وسایل آزمایش:

1. تیر آلومینیومی؛

2. پایه نگه دارنده تیر؛

3. تیر کوچک آلومینیومی 6061-T6 به ابعاد $12\frac{1}{2} \times 1 \times \frac{1}{6}$ همراه با آرایش سه جهته گیج‌ها را به فرم راستگوشه؛

4. دستگاه کرنش سنج (Strain indicator)؛

5. تیر کوچک آلومینیومی 7075-T6 به ابعاد $12\frac{1}{2} \times 1 \times \frac{1}{6}$ با استرین گیج‌ها و سوراخ برای تمرکز تنش؛

6. دستگاه Switch & Balance Unit SB-1؛

7. وزنه های 0.2 پاوندی.

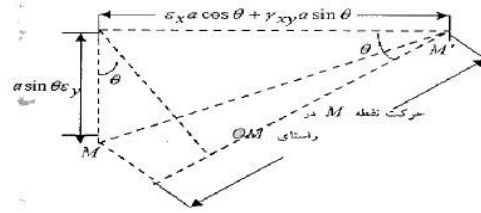
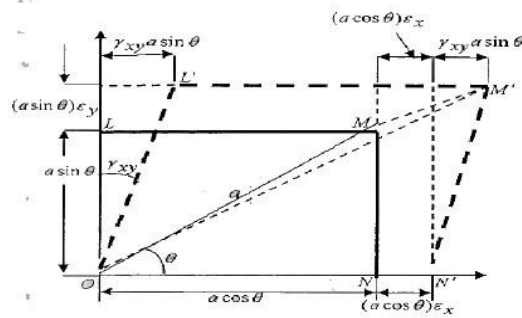


نمونه استرین گیج استفاده شده

تئوری :

برای محاسبه کرنشهای اصلی با استفاده از روابط مقاومت مصالح داریم :

$$\begin{aligned} ON &= a \cos \theta & , & & OL &= a \sin \theta \\ \epsilon_{\theta N} &= \epsilon_x a \cos \theta & , & & \epsilon_{\theta L} &= \epsilon_y a \sin \theta \end{aligned} \quad (1)$$



شکل ۱- کرنشها روی یک المان مسطح

نقطه M در اثر این کرنشها به نقطه M' منتقل خواهد شد که میزان این حرکت در راستای x برابر است با :

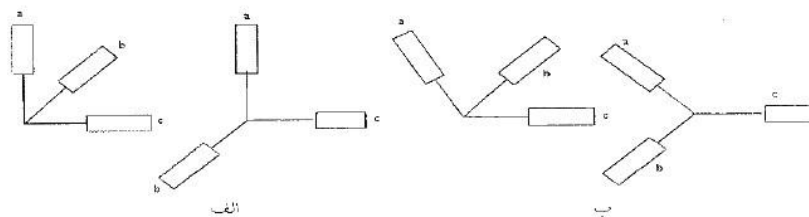
$$\epsilon_{xMM'} = \epsilon_x a \cos \theta + \gamma_{xy} a \sin \theta \quad (2)$$

و مقدار کرنش آن در راستای محور y ها برابر است با :

$$\epsilon_{yMM'} = \epsilon_y a \sin \theta \quad (3)$$

میزان حرکت نقطه M به M' (MM') با صرفنظر از کرنشهای خیلی کوچک برابر خواهد

آرایش مستطیلی و مثلثی استرین گیجها در شکل زیر نشان داده شده اند :

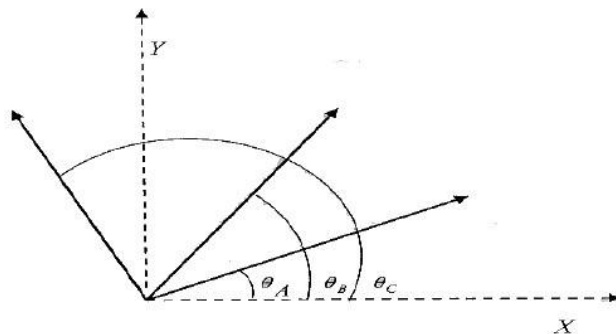


شکل ۳- دو نوع آرایش مختلف استرین گیجها الف-مثلثی ب-مستطیلی

$$\varepsilon_{MM'} = (\varepsilon_x a \cos \theta + \gamma_{xy} a \sin \theta) \cos \theta + (\varepsilon_y \sin \theta) \sin \theta \quad (4)$$

گرنش در راستای OM را می توان به صورت زیر بدست آورد :

$$\begin{aligned} \text{strain along } OM &= \frac{\text{extension}}{\text{original length}} \Rightarrow \\ &= (\varepsilon_x \cos \theta + \gamma_{xy} \sin \theta) \cos \theta + (\varepsilon_y \sin \theta) \sin \theta \\ \varepsilon_\theta &= \varepsilon_x \cos^2 \theta + \varepsilon_y \sin^2 \theta + \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta \end{aligned} \quad (5)$$



شکل ۲- آرایش سه استرین گیج با زوایای مختلف نسبت به محورهای مختصات

بنابراین با داشتن رابطه (۵) کرنشهای سه جهت A, B, C بر حسب گرنش جهات x, y (شکل (۲)) به صورت زیر خواهند بود :

$$\begin{aligned} \varepsilon_A &= \varepsilon_{xx} \cos^2 \theta_A + \varepsilon_{yy} \sin^2 \theta_A + \gamma_{xy} \sin \theta_A \cos \theta_A \\ \varepsilon_B &= \varepsilon_{xx} \cos^2 \theta_B + \varepsilon_{yy} \sin^2 \theta_B + \gamma_{xy} \sin \theta_B \cos \theta_B \\ \varepsilon_C &= \varepsilon_{xx} \cos^2 \theta_C + \varepsilon_{yy} \sin^2 \theta_C + \gamma_{xy} \sin \theta_C \cos \theta_C \end{aligned} \quad (6)$$

برای بدست آوردن کرنشهای اصلی و در نتیجه جهات اصلی بدین صورت باید عمل کرد که با دیفرانسیل گیری از روابط بالا و سپس مشخص کردن مقادیر حداکثر و حداقل کرنشها می توان ، کرنشهای اصلی و جهات اصلی را تعیین نمود .

کرنشهای اصلی را از طریق رسم دایره مور نیز می توان بدست آورد. که با انجام عملیات ذکر شده مقادیر کرنشهای اصلی بصورت زیر خواهد بود :

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) \pm \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + \gamma_{xy}^2}$$

نتایج آزمایش:

الف) آرایش سه جهته استرین گیج ها (Rectangular):

P(lb)	شماره گیج	ضریب گیج (Gf)	مقدار کرنش) ($\mu\text{in/in}$)
0.8	1	2.05	19.0
	2	2.05	24.8
	3	2.05	14
1	1	2.05	22.0
	2	2.05	33.4
	3	2.05	20
1.2	1	2.05	27.9
	2	2.05	37.6
	3	2.05	10

نمونه محاسبات:

0.8Ib

$$\varepsilon_p = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} = \frac{240 + 11}{2} + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(240 - 300)^2 + (300 - 11)^2} = 334.21 \mu$$

$$\varepsilon_q = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} - \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} = -83.21 \mu$$

$$\sigma_p = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_p + \nu \varepsilon_q) = \frac{69 \times 10^9}{1 - 0.75^2} \times (334.21 + 0.75 \times (-83.21)) \times 10^{-6} = 42.87 \text{MPa}$$

$$\sigma_q = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_q + \nu \varepsilon_p) = 26.41 \text{MPa}$$

$$\theta_{p,q} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} = 28.36 \text{deg}$$

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_p} \right| = \frac{83.21}{334.21} = 0.249$$

1Ib

$$\varepsilon_p = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} = \frac{300 + 15}{2} + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(300 - 405)^2 + (405 - 15)^2} = 443.09 \mu$$

$$\varepsilon_q = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} - \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} = -128.09 \mu$$

$$\sigma_p = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_p + \nu \varepsilon_q) = \frac{69 \times 10^9}{1 - 0.75^2} \times (443.09 + 0.75 \times (-128.09)) \times 10^{-6} = 54.73 \text{MPa}$$

$$\sigma_q = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_q + \nu \varepsilon_p) = 32.21 \text{MPa}$$

$$\theta_{p,q} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} = 30.03 \text{deg}$$

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_p} \right| = \frac{128.09}{443.09} = 0.289$$

1.2**b**

$$\varepsilon_p = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} = \frac{353 + 20}{2} + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(353 - 470)^2 + (470 - 20)^2} = 515.28 \mu$$

$$\varepsilon_q = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} - \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} = -142.28 \mu$$

$$\sigma_p = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_p + \nu \varepsilon_q) = \frac{69 \times 10^9}{1 - 0.75^2} \times (515.28 + 0.75 \times (-142.28)) \times 10^{-6} = 64.44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_q = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_q + \nu \varepsilon_p) = 38.51 \text{ MPa}$$

$$\theta_{pq} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} = 29.79 \text{ deg}$$

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_p} \right| = \frac{142.28}{515.28} = 0.276$$

4**b**

$$C = 5.86(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) - 5.44(\varepsilon_2 - \varepsilon_3) = 5.86 \times (516 - 420) - 5.44 \times (420 - 368) = 279.68 \mu$$

$$B = 3.49(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) - 1.2C = -0.576 \mu$$

$$A = \varepsilon_1 - 0.743B - 0.552C = 362.05 \mu$$

$$\varepsilon_0 = A + B + C = -36.7 + 281 + 259.4 = 641.154 \mu$$

$$k_t = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_4'} = \frac{641.154}{367.45} = 1.78$$

ب) تعیین ضریب تمرکز تنش

P(Ib)	شماره گیج	ضریب گیج (Gf)	مقدار کرنش ($\mu\text{in/in}$)	کرنش اصلاح شده ($\mu\text{in/in}$)	Kt تجربی	تئوری Kt	R/x	ϵ
3	1	2.07	391	391			1	605.39
	2	2.07	280	280			0.862069	409.6749
	3	2.07	274	274			0.675676	266.8173
	4	2.09	258	255.53	2.37	1.84	0.384615	226.4929
4	1	2.07	516	516			1	654.09
	2	2.07	420	420			0.862069	524.4799
	3	2.07	368	368			0.675676	414.0436
	4	2.09	371	367.45	1.78	1.84	0.384615	346.5127
5	1	2.07	728	728			1	1062.60
	2	2.07	530	530			0.862069	753.5609
	3	2.07	472	472			0.675676	511.9863
	4	2.09	368	364.48	2.92	1.84	0.384615	407.0612

نمونه محاسبات:

معادلات توسط نرم افزار Maple 8 نوشته و حل شده است .

eqns:=

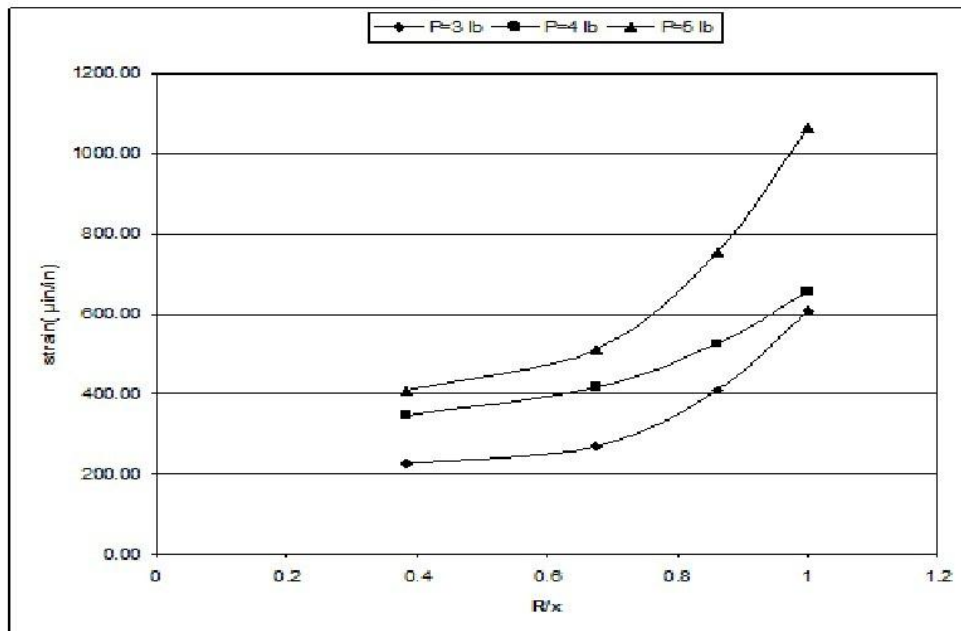
$$\left\{ E1 = A + B\left(\frac{R}{x1}\right)^2 + C\left(\frac{R}{x1}\right)^4, E2 = A + B\left(\frac{R}{x2}\right)^2 + C\left(\frac{R}{x2}\right)^4, E3 = A + B\left(\frac{R}{x3}\right)^2 + C\left(\frac{R}{x3}\right)^4 \right\}$$

$$sols := \left\{ E1 = E3 - B\left(\frac{R}{x3}\right)^2 - C\left(\frac{R}{x3}\right)^4 + B\left(\frac{R}{x1}\right)^2 + C\left(\frac{R}{x1}\right)^4, R = R, x1 = x1, \right.$$

$$A = E3 - B\left(\frac{R}{x3}\right)^2 - C\left(\frac{R}{x3}\right)^4, E2 = E3 - B\left(\frac{R}{x3}\right)^2 - C\left(\frac{R}{x3}\right)^4 + B\left(\frac{R}{x2}\right)^2 + C\left(\frac{R}{x2}\right)^4, x2 = x2,$$

$$E3 = E3, x3 = x3 \left. \right\}$$

منظور از $E1$ و $E2$ و $E3$ همان \mathcal{E} است. (در نرم افزار Maple امکان نوشتن \mathcal{E} نبود!)



شماره (۱)

$$\varepsilon = A + B\left(\frac{R}{x}\right)^2 + C\left(\frac{R}{x}\right)^4 \quad (4)$$

R شعاع سوراخ و x فاصله هر نقطه از مرکز سوراخ می باشد.
 A, B, C ضرایب مجهول معادله می باشند.

با جایگزینی نتایج بدست آمده توسط سه گنج (1) و (2) و (3) در رابطه (4) می توان ضرایب مجهول A, B, C را تعیین نمود:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= A + B\left(\frac{R}{x_1}\right)^2 + C\left(\frac{R}{x_1}\right)^4 \\ \varepsilon_2 &= A + B\left(\frac{R}{x_2}\right)^2 + C\left(\frac{R}{x_2}\right)^4 \\ \varepsilon_3 &= A + B\left(\frac{R}{x_3}\right)^2 + C\left(\frac{R}{x_3}\right)^4 \end{aligned} \quad (5)$$

با قرار دادن کرنش های اندازه گیری شده در معادلات بالا ضرایب A, B, C بدست می آیند چون در لبه سوراخ $\frac{R}{x} = 1$ می باشد پس تغییر طول نسبی حداکثر در لبه سوراخ برابر است با:

$$\varepsilon_{\max} = A + B + C \quad (6)$$

برای محاسبه ضریب تمرکز تنش باید کرنش اسمی را نیز بدست آورد ، که برای این حالت خاص به صورت زیر عمل می شود:
 با توجه به اینکه تنش اسمی در محل سوراخ (نقطه B) برای تیر شکل (1) از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\sigma_{B(nom)} = \frac{M_B C}{I_B} = \frac{6Pl}{(b-d)t^2}$$

مطابق شکل (1)، در مقطع A تنش در پهنای تیر یکنواخت است و می توان آنرا از رابطه زیر حساب کرد:

$$\sigma_A = \frac{M_A C}{I_A} = \frac{6PL}{bt^2}$$

و حالا با در نظر گرفتن اینکه نقطه ای مانند A وجود دارد که تنش در آن نقطه با تنش اسمی در محل سوراخ برابر است ، می توان محل این نقطه را با توجه به روابط (2) و (3) به صورت زیر مشخص نمود:

$$\sigma_A = \sigma_{B(nom)} \Rightarrow \frac{6PL}{bt^2} = \frac{6Pl}{(b-d)t^2}$$

بنابراین:

بحث و اظهار نظر:

با توجه به اعداد بدست آمده و مقایسه آنها با اعداد موجود در جداول استاندارد می فهمیم که علاوه بر خطاهای شخص در اندازه‌گیری و خواندن مقادیر و همچنین خطاهای موجود در خود وسایل اندازه‌گیری علل دیگری نیز وجود دارند که می‌توانند در ایجاد خطا و افزایش آن موثر باشند که از جمله این علل می‌توان به تراز نبودن کفه وزنه‌ها روی تیر و نوسان کردن آنها در هنگام سنجش کرنش اشاره کرد. نیز استفاده از ضریب تصحیح برای گیج شماره 4 نیز باعث ایجاد کمی خطا در محاسبات کرنش واقعی می‌شود و در نهایت یکی دیگر از عوامل ایجادکننده خطا به این ترتیب است که هنگام تحت کرنش طولی قرار دادن تیر و در نتیجه کرنش سنج طولی، مقداری کرنش عرضی نیز بر روی کرنش طولی تاثیر می‌گذارد و در نتیجه موجب بوجود آمدن مقداری خطا و اشکال در محاسبات می‌شوند.

بنابراین برای کاهش دادن خطاها و اشکالات ایجاد شده بایستی پیش از هر چیز دقت شخص آزمایشگر زیاد باشد و نیز از وسایل اندازه‌گیری دقیق برای سنجش و اندازه‌گیری استفاده شود و سعی بر این باشد تا کفه وزنه و وزنه‌ها بصورت کاملاً آرام و بدون نوسان بر روی تیر قرار گیرند، تا بتوانیم خطای ایجاد شده را تا آنجا که امکان دارد کاهش بدهیم.

روش یا پیشنهاد جدید برای بهبود آزمایش:

در صورتیکه در آزمایش تعیین تمرکز کنش بجای تیر مورد آزمایش از یک تیر با پهنای بیشتر و قطر سوراخ کمتر خطای آزمایش کاهش خواهد یافت زیرا به این ترتیب می‌توانیم کرنش سنج‌های مورد نظر را به لبه سوراخ نزدیک کرده و در نتیجه مقدار دقیقتری را محاسبه نماییم تا به این ترتیب آزمایش بهبود پیدا کند. ایجاد تکیه گاه مناسبتر برای وزنه‌ها که حتی المقدور به تیر متصل شود تا از لرزش و آمد و رفت وزنه‌ها روی هوا جلوگیری نماید، و ... می‌توانند با بهره بردن از وسایل اندازه‌گیری موجود و ایجاد حداقل تغییرات دقت را افزایش دهند. همچنین به نظر می‌رسد در عقربه دستگاه هم مقداری اشکال وجود دارد و عکس‌العملهای غیر عادی (مثل پریدنهای ناگهانی) انجام می‌دهد. رفع این نقیصه (در صورت وارد بودن ایراد) می‌تواند کمک کننده باشد

کاربرد علمی - صنعتی:

از انجایی که تئوری‌های ما اگرچه منطقی و درست باشند صرفاً در مورد موارد ساده حقیقی قابل استفاده اند. لذا برای این که از واقعیت تنش‌ها و کرنش‌های موجود در قطعه آگاهی یابیم به ابزارهایی نیاز داریم. استرین گیج‌ها این ابزارها هستند. آنها به طراح کمک می‌کنند که طرح اولیه خود را مبتنی بر این اطلاعات تصحیح کند و امکان تخریب قطعه در حین کار بر اثر تنشهای محاسبه نشده را به حداقل برساند.