

بسمه تعالی



دانشگاه کاشان

دانشکده مهندسی مکانیک

آزمایشگاه مقاومت مصالح

(تئوری و کاربرد)

استاد: دکتر احمد رضا قاسمی

تهیه و تنظیم: مهدی مرادی

مهر ۹۲

فهرست عناوین

ب	فهرست عناوین
خ	فهرست تصاویر
۱	آزمایش سختی
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۱-۱-۱ آزمایش برینل
۳	۱-۱-۲ آزمایش ویکرز
۴	۱-۱-۳ آزمایش راکول
۴	۲-۱ روش انجام آزمایش
۴	۱-۲-۱ آزمایش برینل
۴	۳-۱ خواسته های آزمایش
۶	ضربه
۷	۱-۲ مقدمه
۷	۱-۱-۲ مبانی و تئوری ضربه
۹	۲-۱-۲ محاسبه ی ضریب تراکم (مقاومت جسم در برابر ضربه)
۱۰	۳-۱-۲ دستگاه آزمایش
۱۰	۲-۲ دستورکار آزمایش
۱۱	۳-۲ خواسته های آزمایش
۱۲	خستگی
۱۳	۱-۳ مقدمه
۱۳	۱-۱-۳ مبانی بارگذاری خستگی:
۱۷	۲-۱-۳ دستگاه آزمایش
۱۸	۲-۳ دستورکار آزمایش

۱۹.....	۳-۳ خواسته های آزمایش.....
۲۰.....	تیر.....
۲۱.....	۱-۴ مقدمه.....
۲۱.....	۱-۱-۴ تئوری.....
۲۲.....	۲-۱-۴ انحراف تیرها.....
۲۲.....	۲-۴ دستورکار آزمایش.....
۲۲.....	۱-۲-۴ مطالعه ی خیز در تیر دوسر مفصل.....
۲۳.....	۲-۲-۴ تیر یکسرگیردار و یک بار متمرکز به سر تیر.....
۲۴.....	۳-۲-۴ بررسی اصل جمع آثار قوا.....
۲۴.....	۳-۴ خواسته های آزمایش.....
۲۵.....	خمش نامتقارن.....
۲۶.....	۱-۵ مقدمه.....
۲۶.....	۱-۱-۵ تئوری.....
۲۹.....	۲-۵ دستورکار آزمایش.....
۲۹.....	۱-۲-۵ معرفی دستگاه.....
۳۱.....	۲-۲-۵ روش آزمایش.....
۳۳.....	۳-۲-۵ اصلاح اعداد.....
۳۳.....	۳-۵ خواسته های آزمایش.....
۳۴.....	خیز تیرهای منحنی.....
۳۵.....	۱-۶ مقدمه.....
۳۵.....	۱-۱-۶ تیر نیم دایره ی کنسولی با بار قائم تنها.....
۳۶.....	۲-۱-۶ تیر ربع دایره کنسولی با بار قائم در انتها.....
۳۶.....	۲-۶ روش آزمایش.....

۳۶	..... ۳-۶ دستور کار انجام آزمایش
۳۷	..... ۴-۶ خواسته های آزمایش
۳۸	..... آزمایش پیچش ارتجاعی
۳۹	..... ۱-۷-۱ مقدمه
۳۹	..... ۱-۱-۷ مبانی تئوری پیچش
۳۹	..... ۱-۱-۱-۷ محاسبه ی تنش برشی
۴۰	..... ۲-۱-۱-۷ محاسبه ی تغییر شکل برشی - زاویه ی پیچش
۴۰	..... ۲-۷ دستگاه آزمایش
۴۱	..... ۳-۷ آزمایش اول
۴۱	..... ۱-۳-۷ روش انجام آزمایش
۴۲	..... ۴-۷ آزمایش دوم
۴۲	..... ۱-۴-۷ روش انجام آزمایش
۴۲	..... ۵-۷ آزمایش سوم
۴۲	..... ۱-۵-۷ روش انجام آزمایش
۴۳	..... ۶-۷ آزمایش چهارم
۴۳	..... ۱-۶-۷ روش انجام آزمایش
۴۳	..... ۷-۷ آزمایش پنجم
۴۳	..... ۱-۷-۷ روش انجام آزمایش
۴۴	..... ۸-۷ خواسته های آزمایش
۴۵	..... آزمایش پیچش مقاطع جدارنازک
۴۶	..... ۱-۸ مقدمه
۴۶	..... ۱-۱-۸ تئوری پیچش مقاطع توخالی جدارنازک
۴۶	..... ۲-۸ دستگاه آزمایش

۴۷	..... ۳-۸ روش آزمایش
۴۷	..... ۱-۳-۸ اهداف آزمایش
۴۷	..... ۴-۸ دستور کار انجام آزمایش
۴۸	..... ۵-۸ خواسته های آزمایش
۴۹	..... پیچش پلاستیک
۵۰	..... ۱-۹ مقدمه
۵۰	..... ۱-۱-۹ هدف
۵۰	..... ۲-۱-۹ تئوری آزمایش
۵۲	..... ۳-۱-۹ دستگاه آزمایش
۵۲	..... ۴-۱-۹ کالیبراسیون دستگاه
۵۳	..... ۲-۹ روش آزمایش
۵۳	..... ۱-۲-۹ روش قراردهی نمونه روی دستگاه
۵۴	..... ۲-۲-۹ روش بارگذاری نمونه
۵۵	..... ۳-۹ خواسته های آزمایش
۵۶	..... آزمایش کشش
۵۷	..... ۱-۱۰ مقدمه
۵۷	..... ۱-۱-۱۰ مبانی و تئوری کشش
۵۹	..... ۲-۱-۱۰ نقاط مهم منحنی تنش-تغییر طول نسبی
۶۰	..... ۳-۱-۱۰ دستگاه آزمایش
۶۱	..... ۲-۱۰ روش آزمایش
۶۱	..... ۱-۲-۱۰ هدف آزمایش
۶۱	..... ۲-۲-۱۰ دو نکته ی مهم در انجام آزمایش شکست
۶۱	..... ۳-۱۰ دستور کار انجام آزمایش

۶۲	..... ۴-۱۰ خواسته های آزمایش
۶۳	..... کمانش تیر اوپلری
۶۴	..... ۱-۱۱ مقدمه
۶۵	..... ۳-۱۱ تئوری آزمایش
۶۵	..... ۴-۱۱ توضیح دستگاه آزمایش
۶۶	..... ۵-۱۱ شرح آزمایش
۶۶	..... ۶-۱۱ خواسته های آزمایش
۶۸	..... مخزن جدار ضخیم تحت فشار داخل
۶۹	..... ۱-۱۲ مقدمه
۷۰	..... ۳-۱۲ مبانی و تئوری آزمایش مخزن جدار ضخیم تحت فشار داخل
۷۱	..... ۴-۱۲ دستگاه آزمایش
۷۲	..... ۵-۱۲ روش آزمایش
۷۵	..... ۶-۱۲ خواسته های آزمایش
۷۶	..... منابع

فهرست تصاویر

- شکل ۱ آزمایش برینل برای تعیین سختی جسم..... ۳
- شکل ۲ آزمایش برینل..... ۳
- شکل ۳ منحنی تنش کرنش برای مواد نرم و سخت..... ۸
- شکل ۴ تغییرات سفتی با دمای فولاد در آزمایش Charpy..... ۸
- شکل ۵ آزمایش ضربه برای مواد مختلف..... ۹
- شکل ۶ مولفه های آزمایش ضربه..... ۱۰
- شکل ۷ دستگاه آزمایش ضربه..... ۱۰
- شکل ۸ نمونه های شکسته شده بر اثر خستگی..... ۱۳
- شکل ۹ بارگذاری فنر با مقدار متوسط تنش غیر صفر..... ۱۴
- شکل ۱۰ اصول تست خستگی (Rotary Bending)..... ۱۵
- شکل ۱۱ آزمایش Wohler..... ۱۵
- شکل ۱۲ نمودار خستگی برای مواد آهنی و غیرآهنی..... ۱۶
- شکل ۱۳ روابط مختلف ضریب اطمینان عمر خستگی..... ۱۶
- شکل ۱۴ ابعاد نمونه..... ۱۷
- شکل ۱۵ دستگاه آزمایش خستگی..... ۱۸
- شکل ۱۶ تیر تحت خمش..... ۲۱
- شکل ۱۷ تیر تحت بارگذاری..... ۲۲
- شکل ۱۸ تیر یک سر گیردار..... ۲۳
- شکل ۱۹ انواع پروفیل های مختلف..... ۲۶
- شکل ۲۰ سیستم مختصات پروفیل..... ۲۶
- شکل ۲۱ تغییرات گشتاور خمشی..... ۲۷
- شکل ۲۲ تغییرات تنش در مقطع تیر..... ۲۷
- شکل ۲۳ خط خمش تیر..... ۲۷
- شکل ۲۴ مختصات محلی مقطع پروفیل..... ۲۸
- شکل ۲۵ دستگاه خمش نامتقارن..... ۳۰
- شکل ۲۶ روش نصب صحیح ساعت ها..... ۳۱
- شکل ۲۷ روش محاسبه نیروی وارده بر تیر..... ۳۳

- شکل ۲۸ تیر نیم دایره ی کنسولی..... ۳۵
- شکل ۲۹ تیر ربع دایره ی کنسولی..... ۳۶
- شکل ۳۰ میله تحت پیچش..... ۴۰
- شکل ۳۱ تفاوت محل اعمال بار و نصب ساعت..... ۴۰
- شکل ۳۲ دستگاه پیچش الاستیک..... ۴۱
- شکل ۳۳ پیچش در مقاطع توخالی..... ۴۶
- شکل ۳۴ مفهوم کلی دستگاه آزمایش پیچش مقاطع توخالی..... ۴۷
- شکل ۳۵ میله تحت پیچش..... ۵۰
- شکل ۳۶ میله ی تحت پیچش و زاویه ی ایجاد شده..... ۵۱
- شکل ۳۷ دستگاه تست پیچش..... ۵۲
- شکل ۳۸ نمونه منحنی کالیبراسیون تست پیچش..... ۵۳
- شکل ۳۹ دستگاه تست پیچش..... ۵۴
- شکل ۴۰ نمونه‌های تحت آزمایش کشش..... ۵۷
- شکل ۴۱ منحنی تنش کرنش و نقاط مهم آن..... ۵۹
- شکل ۴۲ دستگاه آزمایش کشش..... ۶۰
- شکل ۴۳ دستگاه آزمایش کمانش..... ۶۴
- شکل ۴۴ شرایط تکیه گاهی مختلف آزمایش کمانش..... ۶۵
- شکل ۴۵ کمانش در شرایط تکیه گاهی مختلف..... ۶۶
- شکل ۴۶ نحوه ی قرار گیری کرنش سنج ها در شعاع..... ۷۰
- شکل ۴۷ توزیع تنش در مخزن جدار ضخیم، به ترتیب از راست: محوری، شعاعی، مماسی..... ۷۰
- شکل ۴۸ منحنی تنش کرنش تجربی و تحلیلی..... ۷۱
- شکل ۴۹ طرحواره دستگاه..... ۷۲
- شکل ۵۰ دستگاه آزمایش سیلندر جدار ضخیم به تفکیک اجزا..... ۷۲
- شکل ۵۱ نرم افزار دستگاه و کالیبره کردن آن..... ۷۳

۱

آزمایش سختی

(Hardness Experiment)

۱-۱ مقدمه

سختی یک ماده عبارت است از مقاومت آن ماده در برابر نفوذ جسم دیگر درون ماده. در صنعت سختی فلزات را به صورت مقاومت در برابر نفوذ جسم دیگر بر روی فلز مورد نظر تعریف کرده آن را اندازه‌گیری می‌کنند. برای اندازه‌گیری سختی، جسم سختی با شکل معین را بر روی فلز مورد نظر قرار داده و بروی آن نیرویی قراردادی وارد می‌کنند و بر اساس اندازه و یا عمق اثر بجا مانده سختی را تعیین می‌کنند.

برای انجام آزمایش‌های سختی روش‌های متعددی وجود دارد که مقایسه‌ی بین نتایج آنها مشکل است. زیرا جسم فرورونده، شرایط آزمایش و نحوه‌ی وارد نمودن فشار یکسان نیست. معروفترین آزمون‌های سختی عبارتند از: برینل، ویکرز و راکول. جدول زیر انتخاب نوع آزمایش مناسب برای مواد مختلف را نشان می‌دهد.

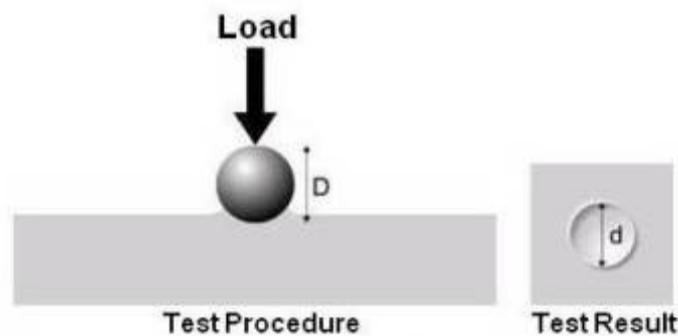
Material test	Soft	Medium Hard	Hard
Brinell	*	*	
Vickers	*	*	*
Rockwell B	*	*	
Rockwell C		*	*

۱-۱-۱ آزمایش برینل

۱-۱-۱-۱ مبانی

در این آزمایش یک گلوله به قطر $2/5$ ، 5 و یا 10 میلیمتر تحت تاثیر نیروی $1/25$ تا 30 کیلونیوتون قرار می‌گیرد. بار برای مدت زمان معینی نگه داشته می‌شود که این مدت زمان برحسب نوع ماده متغیر است. (برای فولاد این زمان برابر 15 ثانیه است)

به وسیله‌ی میکروسکوپ اندازه‌گیر، قطر فرورفتگی اندازه‌گیری می‌شود و سپس به کمک جداول و یا رابطه‌ی آزمایش برینل، سختی برینل HB به دست می‌آید. سختی برینل برابر است با بار تقسیم بر سطح کروی نفوذی (سطح عرقچین). آزمایش برینل را بروی مواد نرم و نیمه سخت می‌توان انجام داد زیرا میزان فرورفتگی نسبتاً زیاد است.



شکل ۱ آزمایش برینل برای تعیین سختی جسم

۱-۱-۱ مقررات آزمایش

برای داشتن یک فرورفتگی روشن و واضح، نمونه‌ی آزمایش باید مسطح بوده و به خوبی صیقل داده شود. ضخامت نمونه باید حداقل ۸ برابر عمق اثر باشد. مرکز اثر نیرو بایستی به اندازه‌ی دو برابر قطر فرورفتگی، از لبه فاصله داشته باشد.

۱-۱-۱ تئوری آزمایش

پارامترهای اصلی در آزمایش برینل شامل موارد زیر است:

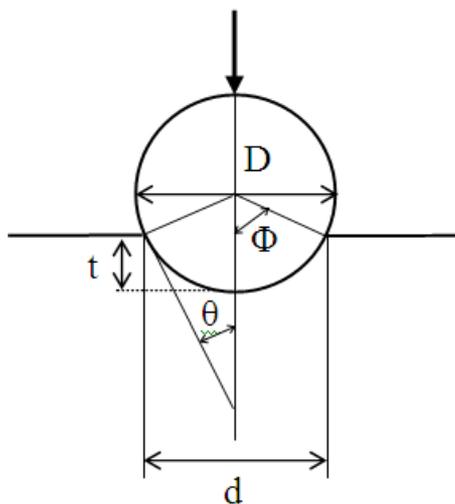
P : بار وارده بر حسب کیلوگرم نیرو

D : قطر گلوله بر حسب میلی‌متر

d : قطر اثر گلوله بر حسب میلی‌متر

t : عمق اثر بر حسب میلی‌متر

سختی برینل بر حسب رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:



شکل ۲ آزمایش برینل

$$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

۱-۱-۲ آزمایش ویکرز

در این آزمایش از یک اهرم مربع القاعده‌ی الماسی استفاده می‌شود. شکل هرم بگونه‌ای است که کمترین میزان نیرو لازم است (۵۰-۱۲۰۰ نیوتن) و فرورفتگی آنقدر کوچک است که نمونه تخریب نمی‌شود. برای تعیین قطر فرورفتگی از میکروسکوپ اندازه‌گیر استفاده می‌شود و سختی HV بدست می‌آید. سختی ویکرز عبارت است از خارج قسمت بار تقسیم بر سطح فرورفتگی هرم نمونه.

$$HV = \frac{1.8544P}{d^2}$$

در این رابطه بار بر حسب kgf و قطر بر حسب mm است. چون بار وارد شده بسیار کم است از این آزمایش می توان برای مواد نازک و یا موادی که دارای لایه های سطح نازک هستند استفاده کرد.

۱-۱-۳ آزمایش راکول

دو نوع آزمایش راکول عبارتند از:

الف. Rockwell B (B مخفف Ball) که در آن از یک گلوله ی فلزی استفاده می شود.

ب. Rockwell C (C مخفف Cone) که در آن یک مخروط الماسی مورد استفاده قرار می گیرد.

در این آزمایش ماشین، عمق نفوذ را - به جای قطر - به کمک یک صفحه ی مدرج که به نفوذکننده متصل است اندازه می گیرد. صفحه ی مدرج به ۱۰۰ قسمت تقسیم شده است. هرچه عمق فرورفتگی بیشتر باشد عدد سختی کوچکتر است. عمق نفوذ طوری تنظیم شده است که عدد راکول را مستقیماً می توان روی صفحه ی مدرج خواند. عدد سختی راکول به بار وارد شده، عمق نفوذ و شکل آن بستگی دارد. بنابراین انواع مختلفی از آزمایش راکول قابل انجام است. راکول B برای مواد نرم و نیمه سخت استفاده می شود. در حالی که آزمایش راکول C برای مواد سخت و نیمه سخت مورد آزمایش قرار می گیرد.

۱-۲ روش انجام آزمایش

۱-۲-۱ آزمایش برینل

۱. بروی دستگاه نمایشگر نیرو کلید قرمز و سپس کلید سبزنگ را فشار دهید.
۲. جسم مورد آزمایش را بروی کفی دستگاه قرار دهید.
۳. اهرم را پایین آورید تا با جسم تماس پیدا کند و نیروی خود را به حدود ۴۰۰ کیلوگرم برسانید (توجه کنید که نیرو نباید به صورت ضربه ای وارد شود)
۴. اهرم را بالا آورده جسم مورد آزمایش را زیر میکروسکوپ قرار دهید.
۵. قطر فرورفتگی را به وسیله ی درجه بندی مشاهده شده در میکروسکوپ اندازه گیری نمایید.
۶. برای مشاهده ی ماکزیمم نیروی وارد شده مجدداً کلید سبزنگ را فشار دهید.

۱-۳ خواسته های آزمایش

۱. با استفاده از رابطه ی سختی برینل مقدار نیرو را محاسبه نموده و جدول زیر را کامل کنید.

جنس نمونه	P	D	d	HB _{exp}	HB _{theory}
آلومینیوم					
برنج					
فولاد					

۲. با استفاده از جدول خواص مواد، سختی نمونه مورد آزمایش را بدست آورید و با مقداری که از آزمایش بدست آورده‌اید مقایسه کنید و درصد خطا را بیابید.

$$err. percent. = \frac{|HB_{exp} - HB_{theory}|}{HB_{theory}}$$

۳. با استفاده از جدول خواص مواد، سختی نمونه مورد آزمایش را بدست آورید و با مقداری که از آزمایش بدست آورده‌اید مقایسه کنید و درصد خطا را بیابید.

۴. به نظر شما چه عواملی باعث ایجاد خطا در آزمایش نسبت به مقدار تئوری می‌شود؟

۵. آزمایش سختی در عمل چه کاربردهایی دارد؟

۶. حدس می‌زنید سختی لاستیک خودرو چند باشد؟

۷. در جدولی سه روش تست سختی را با هم مقایسه کنید.

٢

ضربه

(Impact)

۲-۱ مقدمه

شکست ترد (Brittle Fracture) و فلزات از سال‌های ۱۸۸۶ در تانک، کپسول‌های فشار خط لوله و پل‌ها مورد بررسی بوده است. در خلال جنگ جهانی دوم توجه زیادی به شکست ترد، جوشکاری در کشتی‌ها و تانکرها مبذول می‌شد. بعضی از کشتی‌ها هنگام حرکت در آب‌های متلاطم و یا هنگام توقف در لنگرگاه کاملاً به دو نیمه شکسته می‌شدند. این اتفاق بیشتر در فصل زمستان اتفاق می‌افتاد و نشان دهنده‌ی این واقعیت بود که برخی از انواع فولادها که در حالت معمولی نرم و انعطاف پذیرند (Ductile) تحت شرایطی ترد (Brittle) می‌شوند.

تحقیقات وسیعی در این زمینه صورت گرفته و معلوم شده است که برای کلیه‌ی استفاده‌های ساختمانی فولاد لازم است که دارای مجموعه‌ی مناسبی از استحکام (Strength) و سفتی (Toughness) باشد. استحکام مقاومت در برابر تغییر شکل است و سفتی مقاومت در برابر گسیختگی (Fracture) می‌باشد. معمولاً در یک جسم این دو خاصیت با هم نسبت عکس دارند و مثلاً عملیاتی که استحکام فولاد را زیاد می‌کند معمولاً سفتی را کاهش می‌دهند بنابراین دانستن میزان و راه اندازه‌گیری این خواص مهم است.

متأسفانه در حالی که استحکام را می‌توان به سادگی بر حسب نقطه‌ی تسلیم بیان کرد برای سفتی چنین شاخصی وجود ندارد. ساده‌ترین راه اندازه‌گیری سفتی آن است که یک قطعه از جسم را با چکش ضربه زده و شکستن آن را بررسی کنیم. ولی چون نتایج چنین آزمایشی به عوامل دیگری از قبیل وضع نیرو و شکل نمونه بستگی دارد لازم است که آزمایش تحت شرایط معین و استاندارد صورت گیرد.

عوامل خارجی مهمی که موجب ترد و شکنندگی می‌شوند عبارتند از:

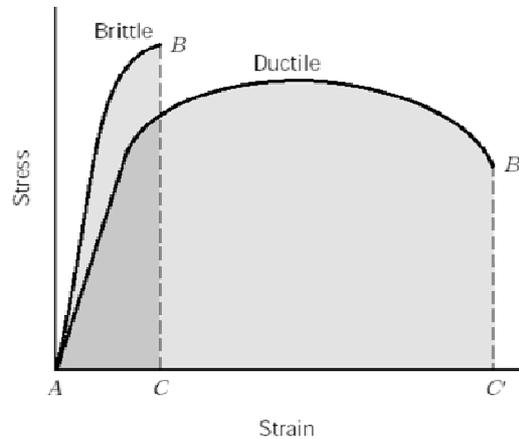
۱. کاهش درجه حرارت
۲. افزایش تنش سه محوری
۳. افزایش سرعت تغییر شکل ناشی از وجود تنش سه محوری

درجه حرارت پایین موجب بیشتر شکست‌های ترد می‌باشند. فولادهایی که در کشش یا در پیچش رفتارشان کاملاً به هم شبیه است. و آزمایش ضربه اختلاف زیادی را نشان می‌دهد و این اختلاف رفتار فولادها به این دلیل است که به هنگام ضربه نیرو به صورت شوک (و در یک لحظه) به آنها اعمال می‌شود.

۲-۱-۱ مبانی و تئوری ضربه

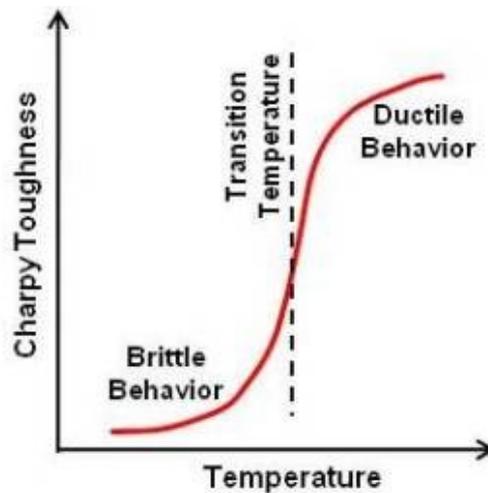
آزمایش ضربه، مقدار انرژی لازم برای شکستن یک نمونه‌ی استاندارد با یک ضربه را اندازه می‌گیرد این آزمایش معمولاً در دماهای معین انجام می‌گیرد. انرژی لازم برای شکستن جسم نمایانگر سفتی آن است. به

عبارت دیگر سفتی یک ماده توانایی جذب انرژی در مقیاس پلاستیکی است. یکی از راههای تعریف سفتی محاسبه‌ی سطح زیر منحنی تنش-کرنش است. این مساحت برابر مقدار کار لازم به واحد حجم قطعه برای شکستن آن است.



شکل ۳ منحنی تنش کرنش برای مواد نرم و سخت

متداولترین آزمایش تعیین سفتی، آزمایش شارپی (Charpy Impact Test) است. آزمایش را در چند درجه حرارت (زیر صفر و بالای صفر) انجام می‌دهند و بدین ترتیب منحنی ضربه بدست می‌آید که از چند نظر حائز اهمیت است. یک حالت کلی از این منحنی در شکل زیر نشان داده شده است.



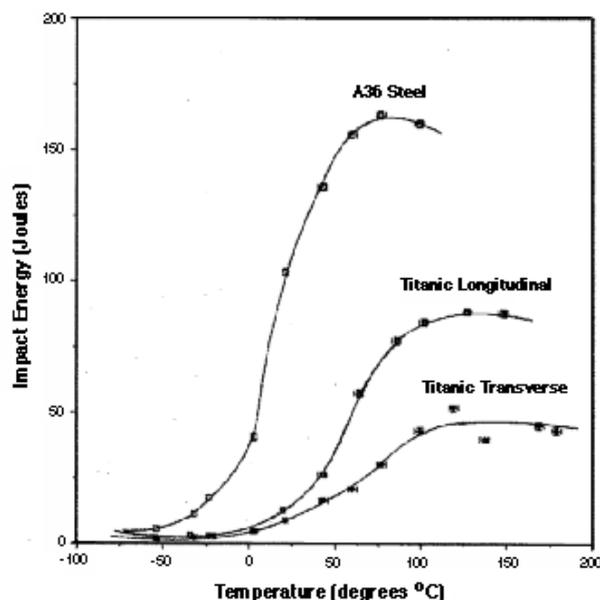
شکل ۴ تغییرات سفتی با دمای فولاد در آزمایش Charpy

در درجه حرارت‌های بالاتر از B قطعه کاملاً نرم رفتار می‌کند در حالی که با کاهش درجه حرارت از B انتقال به تردی شروع می‌شود. هرچه درجه حرارت کمتر باشد جسم سردتر شده و درجه حرارت‌های پایین‌تر از A قطعه کاملاً ترد و شکننده می‌شود. برعکس با افزایش درجه حرارت در نقطه‌ی A انتقال از تردی به نرمی شروع شده و با زیاد شدن حرارت قطعه نرم و انعطاف پذیر می‌گردد تا در B که کاملاً جسم نرم رفتار می‌نماید و به همین دلیل در درجه حرارت‌های بالاتر از B احتمال شکست به دلیل تردی بسیار کم است.

درجه حرارت انتقال (Transition Temperature) که بین A,B قرار دارد درجه حرارتی است که نمونه ترد می‌شود. سطوح ترد در حالت شکسته شده در حالت ترد به صورت دانه دانه‌ای (Granular) و در حالت نرم به صورت رشته‌ای یا لایه‌ای است و معمولاً درجه حرارت انتقال آن نقطه‌ای است که ۵۰٪ از مقطع شکسته شده لایه لایه می‌باشد.

عواملی از قبیل ترکیب شیمیایی و ساختمان میکروسکوپی می‌توانند درجه حرارت انتقال را تا حدود زیادی تغییر دهند. (مثلاً در مورد فولاد نرم تا ۱۰۰ درجه‌ی فارنهایت) بطور مثال هرچه مقدار منگنز در فولاد بیشتر و مقدار آن کمتر باشد درجه حرارت انتقال پایین می‌آید و جسم رفتار نرم‌تری نشان می‌دهد. در مورد ساختمان میکروسکوپی به طور اختصار باید گفت که هرچه اندازه‌ی دانه‌ها ریزتر باشد درجه حرارت انتقال کمتر است.

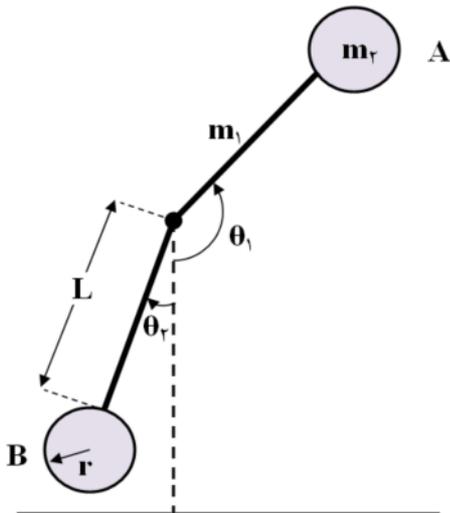
چند نمونه‌ی دیگر از منحنی‌های بدست آمده از آزمایش ضربه در شکل‌های زیر نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است که بعضی اجسام مانند فولاد، آلیاژهای کرم، وانادیم و مولیبدنیم این انتقال را به خوبی نشان می‌دهند و در برخی فلزات دیگر مانند آلومینیوم، طلا، نیکل و نقره این پدیده مشاهده نمی‌گردد و مربوط به ساختمان کریستالی آن‌هاست. یعنی این پدیده در فلزات BCC وجود دارد و در فلزات FCC مشاهده نمی‌گردد.



شکل ۵ آزمایش ضربه برای مواد مختلف

۲-۱-۲ محاسبه‌ی ضریب تراکم (مقاومت جسم در برابر ضربه)

هرگاه مطابق شکل فوق، چکش از نقطه‌ی A رها گردد و پس از برخورد با نمونه در محل B قرار گیرد با در نظر گرفتن وزن محور چکش و خود چکش و روابط زیر می‌توان انرژی را در دو نقطه بدست آورد.



شکل ۶ مولفه های آزمایش ضربه

m_1 : جرم محور (۳/۱۲۵ کیلوگرم)

m_2 : جرم چکش (۶ کیلوگرم)

L : طول محور (۶۳۵ میلیمتر)

r : قطر دایره‌ی چکش (۱۹۵ میلیمتر)

$$U_A = m_1 g \frac{L}{2} [\sin(\theta_1 - 90)] + m_2 g (L + r) [\sin(\theta_1 - 90)]$$

$$U_B = m_1 g \frac{L}{2} [\sin(\theta_2 - 90)] + m_2 g (L + r) [\sin(\theta_2 - 90)]$$

مقدار انرژی لازم برای شکست نمونه:

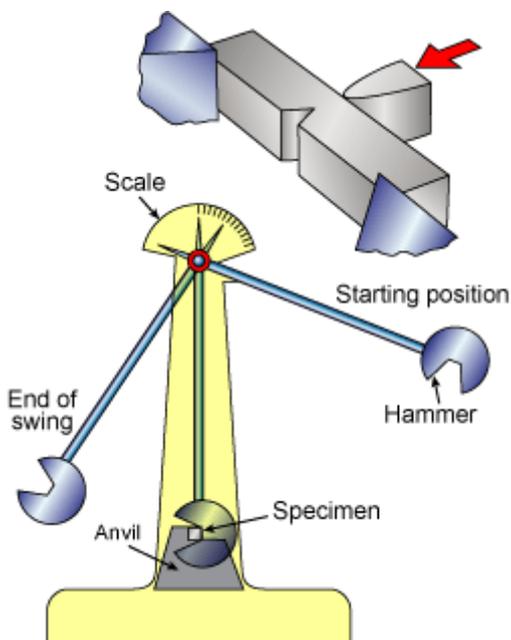
$$\Delta U = U_A - U_B$$

همچنین ضریب تراکم (مقاومت جسم در برابر ضربه) برابر است با:

$$K = \frac{U}{A}, A = b \cdot h$$

۲-۱-۳ دستگاه آزمایش

طرحواره‌ای از دستگاه آزمایش شاری و اجزای آن در شکل زیر نشان داده شده است:



شکل ۷ دستگاه آزمایش ضربه

۱. بدنه‌ی اصلی دستگاه

۲. پاندول ضربه

۳. اهرم اطمینان

۴. دستگیره‌ی رهاکننده‌ی پاندول

۵. عقربه‌ی پلاستیکی

۶. صفحه‌ی مدرج برای تعیین زاویه‌ی پاندول

۷. محافظ دستگاه

۸. محل قرارگیری نمونه

۲-۲ دستورکار آزمایش

۱. پاندول را به بالاترین نقطه‌ی ممکن برده اهرم رها کننده را تنظیم

کنید.

۲. اهرم اطمینان را متصل نمایید.

۳. نمونه مطابق شکل نشان داده شده برای روش شارپی در محل خود قرار دهید.
۴. عقربه را تا انتها حرکت داده و زاویه‌ی اول چکش θ_1 را یادداشت نمایید.
۵. اطرافیان را از نزدیکی دستگاه دور کنید و برای توقف پاندول هرگز از دست خود استفاده نکنید.
۶. عقربه‌ی اطمینان را آزاد نمایید.
۷. اهرم رها کننده را آزاد کنید.
۸. میزان انحراف ثانویه را یادداشت نمایید.
۹. مراحل فوق را بدون نمونه انجام داده زاویه را برای محاسبه‌ی انرژی تلف شه ناشی از اصطکاک بدست آورید. (برای انجام محاسبات انحراف ثانویه را با زاویه‌ای که صرف غلبه بر اصطکاک می‌شود جمع کرده و در رابطه به جای θ_2 قرار دهید).
۱۰. ضریب تراکم را برای نمونه‌ی آزمایش شده بدست آورید.

۲-۳ خواسته‌های آزمایش

۱. علت ایجاد شکاف در نمونه مورد آزمایش چیست؟
۲. مقدار انرژی لازم برای شکستن نمونه و ضریب تراکم را برای نمونه مورد آزمایش حساب کنید.
۳. کدام عملیات حرارتی باعث افزایش مقاومت به ضربه فولاد می‌شود؟
۴. در دو تست ایزود و شارپی نمونه و نحوه قرارگیری آن چه تفاوت هایی با هم دارند؟
۵. تست های مخرب و غیر مخرب چیست؟ چند مورد از هریک را نام ببرید.

۳

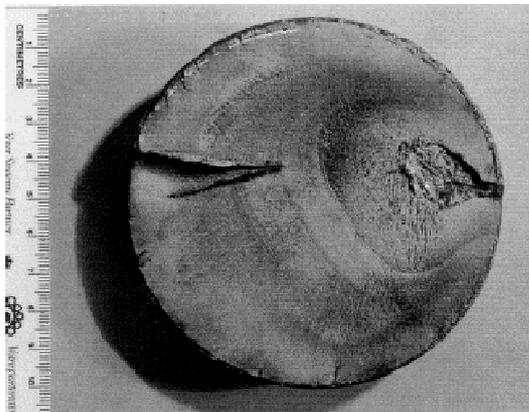
خستگی

(Fatigue Life Prediction Testing)

۳-۱ مقدمه

وقتی یک شکاف در قطعه‌ای از فلز در یک ماشین ظاهر می‌شود اغلب نتیجه وارد آمدن تنش گسیختگی است. در این صورت قطعه تحت بارگذاری دینامیکی بوده است و این پدیده را خستگی می‌نامند.

نقطه‌ی شکست استاتیکی بر اساس وارد آمدن یک بار ایجاد می‌شود. اگر قطعه بخواهد تحت تاثیر یک بار مداوم قرار گیرد باید طوری طراحی شده باشد که بتواند در مقابل خستگی مقاومت کند. بررسی شکست در یک شفت نشان می‌دهد که اولاً یک سطح صاف وجود دارد که خستگی در آن اتفاق افتاده است و ثانیاً یک سطح کوچکتر ناصاف وجود دارد که در آن شکست استاتیکی ظاهر شده است.



شکل ۸ نمونه‌های شکسته شده بر اثر خستگی

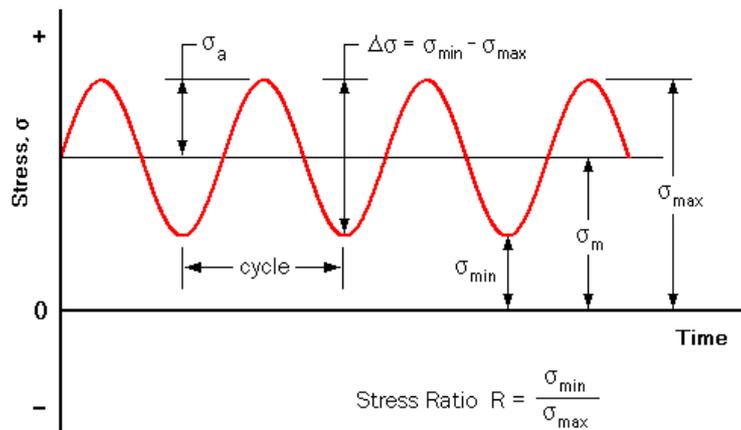
۳-۱-۱ مبانی بارگذاری خستگی:

۳-۱-۱-۱ انواع بارها

انواع مختلف بار که باعث خستگی می‌شوند عبارتند از ۱. بار فشاری-کششی ۲. خمش ۳. خمش گردان (rotary bending)

تغییرات بار می‌تواند از یک وضع نامنظم (مثل فنرهای تعلیق اتومبیل) تا یک وضع منظم (مثل فنرهای سوپاپ valve spring) داشته باشد. یک تقریب از تغییرات بار را می‌توان با به کار بردن یک کشش سینوسی به منظور انجام آزمایش خستگی و محاسبات مربوط به آن ایجاد کرد.

دوفنری که در بالا ذکر شده دارای بار استاتیکی نیز هستند. وزن ماشین برای فنرهای تعلیق و تنش اولیه فنرهای سوپاپ، بارهای استاتیکی برای این دو فنر هستند. اگر هر دو بار منظور شوند منحنی حاصل مطابق شکل زیر می‌باشد.



شکل ۹ بارگذاری فنر با مقدار متوسط تنش غیر صفر

تنش متوسط با σ_m و تنش دامنه با σ_a نشان داده می‌شود. در این صورت تنش موثر روی نمونه‌ی آزمایش برابر خواهد بود با:

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

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$$

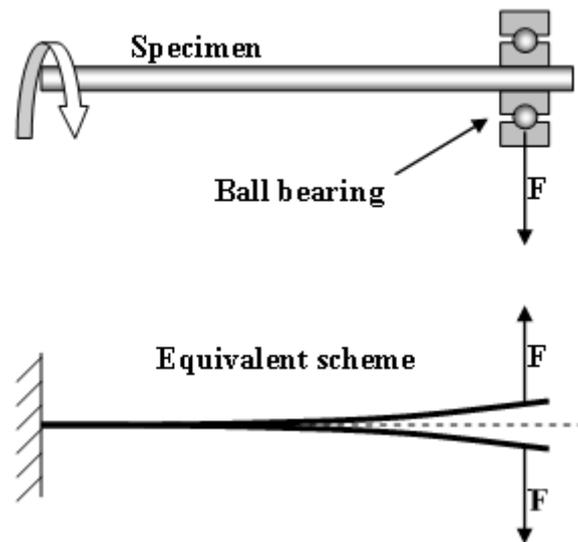
$$\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$$

دو حالت خاص عبارتند از:

۱. تنش متغیر (Changing Tension) یعنی وقتی $\sigma_m = 0$ است.
۲. تنش لرزاننده یا ضربه‌ای (Pulsating Tension) وقتی که $\sigma_m = \sigma_a$ و $\sigma_{\min} = 0$.

۳-۱-۱-۲ مهم‌ترین نوع آزمایش خستگی

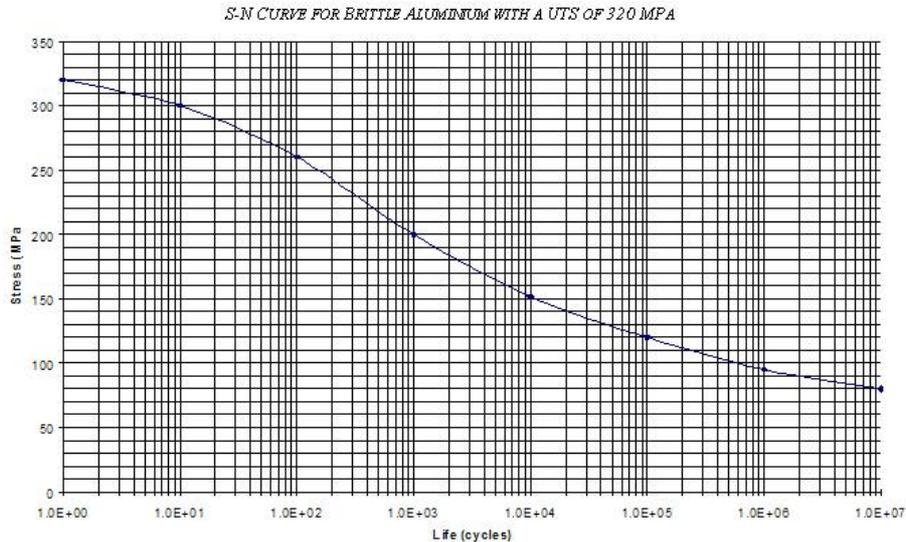
مهم‌ترین نوع آزمایش خستگی عبارت است از خمش چرخنده (Rotary Bending). که در آن تنش مطابق شکل زیر تغییر می‌کند.



شکل ۱۰ اصول تست خستگی (Rotary Bending)

۳-۱-۱-۳ دیاگرام Wohler

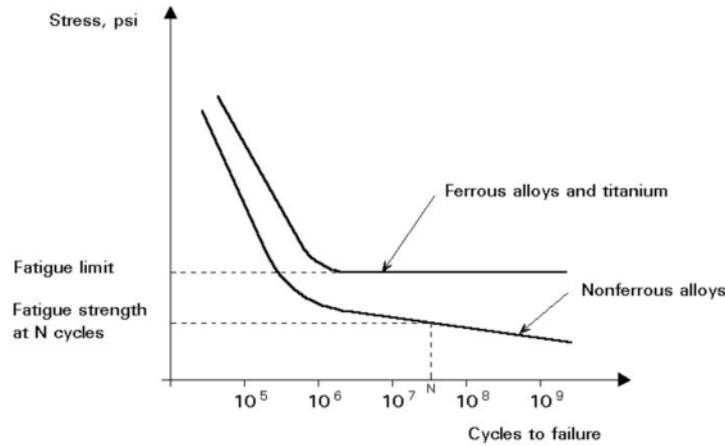
اگر آزمایشات مختلف خستگی را در بارهای متفاوت انجام دهیم و تنش دامنه به صورت تابعی از تغییرات کل بار در نظر گرفته شود یک دیاگرام Wohler می توان رسم کرد.



شکل ۱۱ آزمایش Wohler

وقتی از یک نمونه آزمایش فولادی استفاده می کنیم منحنی شکل ۷ پایین آمده و به مقدار حدی نزدیک می شود. اگر رابطه‌ی $\sigma_a > \sigma_w$ برقرار باشد هیچ شکستی رخ نمی دهد. این مقدار را حد خستگی (Fatigue Limit) نامند. وقتی نمونه تحت آزمایش rotary bending باشد می توان حدود خستگی مختلفی را بر حسب

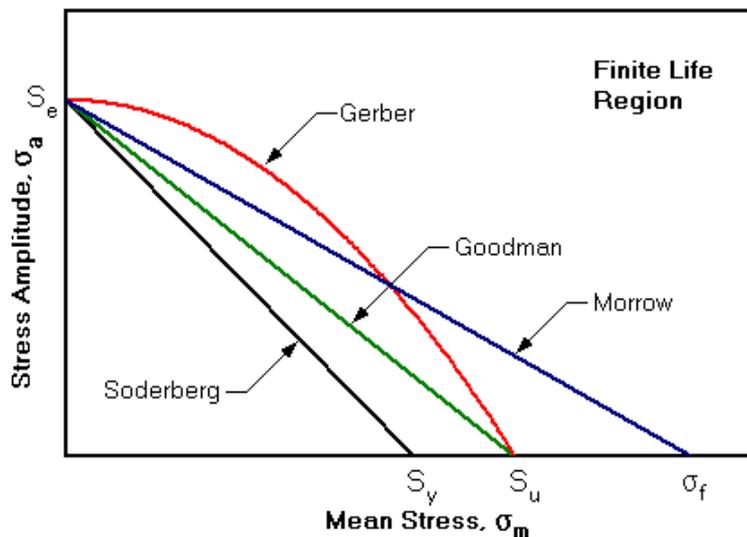
نوع بارگذاری روی نمونه بدست آورد. حدود خستگی را تقریباً بعد از ده میلیون بار تغییرات بار می‌توان بدست آورد. برای مواد دیگر (غیر از فولاد مثل آلومینیوم) حدود خستگی وجود ندارد.



شکل ۱۲ نمودار خستگی برای مواد آهنی و غیر آهنی

۳-۱-۱-۴ دیاگرام Haigh

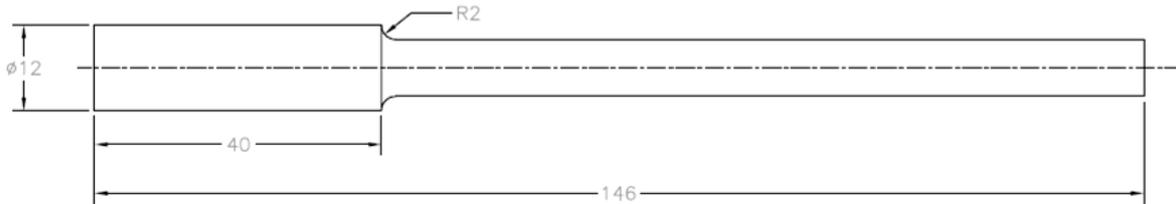
نتیجه تست خستگی می‌تواند به صورت دیاگرامی ارائه شود که محدوده عمر بی نهایت را نشان می‌دهد. در این دیاگرام، محور افقی تنش متوسط و محور عمودی دامنه تنش را نشان می‌دهد. با توجه به تعداد تست زیاد مورد نیاز برای تهیه این نمودار، روابط تجربی مختلفی برای پیش بینی محدوده عمر ارائه شده است (شکل ۱۲).



شکل ۱۳ روابط مختلف ضریب اطمینان عمر خستگی

۳-۱-۱-۵ تاثیر شکل نمونه

همانطور که قبلا ذکر شد، قطعه‌ی مورد آزمایش از روی شعاع گوشه (Fillet) می‌شکند. این مسئله مربوط به این واقعیت است که حد خستگی برای یک ماده ثابت نیست بلکه به فاکتورهای دیگر مربوط است. (مواردی مانند نوع بارگذاری، حجم ماده، صافی سطح و شکل نمونه، خوردگی و...) انواع مختلف بارگذاری قبلا شرح داده شده؛ اینک به شرح سایر مباحث می‌پردازیم.



شکل ۱۴ ابعاد نمونه

۳-۱-۱-۶ اثر کار سرد

در اثر کار سرد روی مواد (کشیدن و نورد فلزات نرم در درجه حرارت اتاق) ماده قوی‌تر می‌شود. نقطه‌ی تسلیم بالا می‌رود و استحکام کششی قدری افزایش می‌یابد. بنابراین باید انتظار داشت که کار سرد در حد تحمل مواد اثر داشته باشد. البته کار سرد شکل‌پذیری را تقلیل می‌دهد. اگر فلز قبلا تحت تاثیر خستگی متناوب کمتر از حد دوام قرار گرفته باشد حد دوام آن بالا رفته است و اگر قبلا تحت اثر خستگی بیش از حد دوام قرار گرفته باشد؛ حد دوام فلز کار سرد شده پایین آمده است.

۳-۱-۱-۷ تاثیر صافی سطح

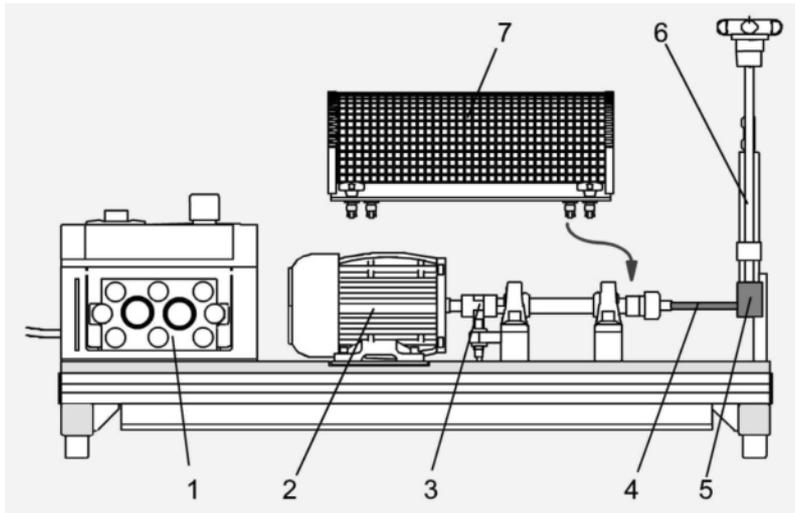
چون شکست با پیدا شدن یک ترک روی سطح شروع می‌شود بنابراین فرم سطح باید تاثیری روی شکستگی در اثر خستگی داشته باشد. ترک‌ها روی سطح خراش‌دار و درهم سریع‌تر شکل می‌گیرند. قطعه‌ای که به خوبی براق شده باشد حد خستگی‌اش بالاتر از وقتی است که خشن و ناصاف باشد.

۳-۱-۱-۸ تاثیر شعاع گوشه‌ها

اغلب قطعات دارای یک یا چند بعد هستند که نسبت به ابعاد اصلی خیلی کوچکتر یا بزرگترند مثلا در یاتاقان‌ها تمرکز تنش تاثیر مهمی روی مقاومت خستگی دارد. ماده‌ای که دارای حساسیت کم نسبت به شعاع گوشه است برای مقاومت در مقابل خستگی مناسب‌تر است. به طور کلی حساسیت شعاع گوشه به طور محسوسی با افزایش حدود شکستگی و سختی ماده افزایش می‌یابد.

۳-۱-۲ دستگاه آزمایش

دستگاه در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۱۵ دستگاه آزمایش خستگی

۱. جعبه کنترل الکتریکی
۲. موتور
۳. کوپلینگ
۴. نمونه آزمایش
۵. بلبرینگ
۶. میله مدرج مشخص کننده نیرو
۷. قفسه محافظ

تنش خمشی در تارهای سطحی حداکثری بوده و مقدار آن برابر است با:

$$\sigma_{\max} = \frac{MC}{I}$$

و در تیرهای با مقطع دایره:

$$I = \frac{\pi d^2}{4}$$

که در آن d قطر نمونه‌ی مقطع بحرانی و l لنگر خمشی برابر است با:

$$M = P \cdot e$$

برای یافتن تنش در حوالی تغییر مقطع نمونه، تنش محاسبه شده را در ضریب تمرکز تنش ضرب می‌کنیم.

۳-۲ دستورکار آزمایش

۱. ابتدا نسبت به قطع بودن کامل برق اطمینان حاصل کنید.
۲. یاتاقان متحرک را آنقدر پایین بیاورید که هم سطح محور ماشین شود.
۳. نمونه را در محل خود بین یاتاقان متحرک و در محل روتور قرار داده، توسط پیچ‌های آلن آن را محکم کنید.
۴. با پیچاندن پیچ تنظیم نیرو و نیروی بین ۱۰ تا ۱۵ کیلوگرم را به انتهای قطعه اعمال کنید.
۵. دوشاخه را به پریز وصل کنید و پس از صفر کردن کنتور آن را روشن کنید.
۶. پس از شکسته شدن نمونه تعداد دورهای آن را ثبت نمایید.
۷. دستگاه را خاموش کرده دوشاخه را از پریز خارج نموده و سپس نمونه را بردارید.
۸. قطر و طول محل شکستگی را یادداشت نمایید (طول: فاصله‌ی محل شکستگی تا محل اعمال نیرو)

جنس قطعه	S_y (MPa)	S_{ut} (MPa)	دامنه تنش (MPa)	نیرو (N)	عمر (دور)	قطر شکستگی (mm)	طول شکستگی (mm)

۳-۳ خواسته های آزمایش

۱. نمونه در چه فاصله‌ای از انتها شکسته شده و علت شکست در این مقطع چیست؟
۲. آیا شکست قطعات در اثر خستگی معمولاً در زیر تنش تسلیم است یا زیر تنش استحکام کششی؟
۳. سطح مقطع شکسته شده را مورد مطالعه قرار داده در مورد آن توضیح دهید.
۴. با وجودی که در این آزمایش نیروی اعمال شده توسط نیرودهنده ثابت است چرا نمونه را تحت تاثیر بارهای دینامیکی گویند؟
۵. با مراجعه به کتاب طراحی اجزا، تنش استحکام دوام (S_e) و ضرایب آن را تعریف کرده و با توجه به نمونه مقدار آن را برای این نمونه بدست آورید.
۶. روابط دیاگرام‌های شکل ۱۳ را نوشته و با استفاده از داده های نمونه اول جدول بالا، ضریب اطمینان را در هر مدل بدست آورید.

نام مدل	رابطه مدل	دامنه تنش (MPa)	تنش متوسط (MPa)	S_{ut} (MPa)	S_y (MPa)	S_e (MPa)	ضریب اطمینان
گربر							
گودمن							
سودربرگ							

۷. تست خستگی در هواپیماها به چه منظوری استفاده می‌شود؟

۴

تیر

(Beam)

۴-۱ مقدمه

وقتی یک تیر تحت اثر نیرو یا کوپل نیرو قرار گیرد تغییر شکل پیدا کرده و در صورتی که این تغییر شکل در حد الاستیک باشد با استفاده از تئوری ساده‌ی تیر و قانون هوک (Hook) می‌توان مقدار این تغییر شکل یا انحراف را محاسبه و تعیین کرد. مقدار انحراف حاصل شده در یک تیر به نوع تیر، تکیه‌گاه‌ها و نیروی اعمال شده بستگی دارد.

برای بررسی توزیع تنش‌ها در یک تیر بسیار مناسب است که فرض کنیم یک تیر از تعدادی صفحات با لایه-های موازی و نازک در جهت محور تیر تشکیل شده است. در این صورت می‌توان اثر یک نیروی عمودئی را بر روی تیر که سبب خمش آن می‌شود چنین تعریف کرد که نیرو لایه‌های مختلف را انحراف می‌دهد به طوری که لایه‌های خارجی کشیده و لایه‌های درونی فشرده می‌شوند و در نتیجه یک تنش کششی در لایه‌ی خارجی و یک تنش فشاری در لایه‌های درونی ایجاد می‌شود در داخل تیر همواره لایه‌ای وجود دارد که در آن تنش فشاری و کششی صفر است و چنین صفحه‌ای را صفحه‌ی خنثی می‌نامند و محل تقاطع آن با مقطع تیر خطی است که محور خنثی نامیده می‌شود. برای اجسام در حالت الاستیک این محور از مرکز ثقل تیر می‌گذرد و ممان اینرسی که بعداً در محاسبه‌ی تنش مورد استفاده قرار می‌گیرد نسبت به این محور محاسبه می‌گردد.

۴-۱-۱ تئوری

اگر تیری تحت خمش قرار گیرد به شکل منحنی درمی‌آید که در حالت الاستیک انحنای سطح خنثی در هر نقطه را می‌توان از رابطه‌ی زیر بدست آورد:

$$\frac{1}{R} = \frac{M}{EI} \Rightarrow \frac{M}{I} = \frac{E}{R} = \frac{\sigma}{y}$$

که در آن:

M : ممان خمشی در مقطع مورد نظر (KN-mm)

I : ممان اینرسی حول محور خنثی (mm^4)

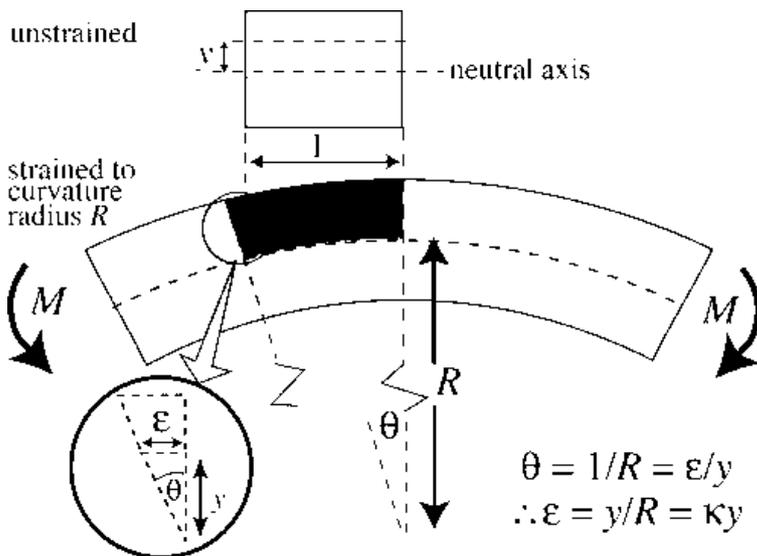
E : ضریب یانگ (ضریب الاستیسیته) (KN/mm^2)

R : شعاع انحنای محور خنثی (mm)

σ : تنش حاصل از خمش در فاصله‌ی y از محور

خنثی (KN/mm^2)

y : فاصله از محور خنثی (mm)



شکل ۱۶ تیر تحت خمش

با استفاده از رابطه‌ی شعاع انحنا خواهیم داشت:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

با صرف نظر از مخرج کسر و دوبار انتگرال گیری می توان رابطه‌ی خیز را برای شرایط تکیه‌گاهی مختلف بدست آورد:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} = \frac{d^2 y}{dx^2}$$

۴-۱-۲ انحراف تیرها

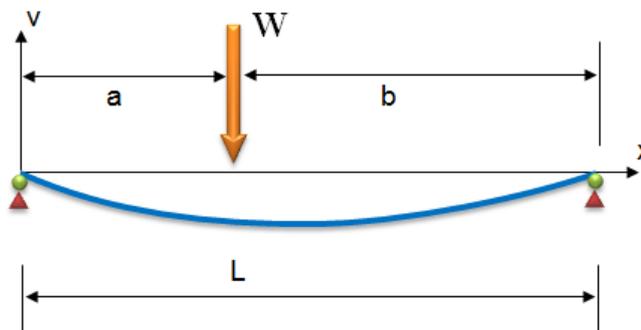
در قسمت مقدمه تا کنون تنش در تیر شرح داده شد اما در عمل معمولاً حدی برای تغییر مکان مجاز تعیین می‌شود در غیراینصورت ممکن است یک تیر از نظر تئوری به اندازه‌ی کافی قوی باشد ولی انحراف آن بی از اندازه باشد. راه‌های مختلفی برای محاسبه‌ی انحراف در تیرها وجود دارد که یکی از آنها روش Macauley است. معادله‌ی دیفرانسیل انحراف تیر در بسیاری از کتب مکانیک جامدات تحلیل و بصورت زیر بیان شده است:

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

۴-۲-۲ دستورکار آزمایش

۴-۲-۱ مطالعه‌ی خیز در تیر دوسر مفصل

شکل زیر تیری با تکیه‌گاه‌های ساده به طول L و تحت تاثیر بار متمرکز W در فاصله‌ی a از تکیه‌گاه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷ تیر تحت بارگذاری

رابطه‌ی خیز تیر مذکور با شرط $a=L/2$ به صورت زیر می‌آید:

$$EIy = \frac{w}{12}x^3 - \frac{w}{6}\left(x - \frac{L}{2}\right) - \frac{xL^2}{16}x$$

فاصله‌ی دو تکیه‌گاه ساده را برابر ۵۰ سانتیمتر تنظیم کنید. تیر را بر روی تکیه‌گاه‌ها قرارداده و ساعت‌های اندازه‌گیری را به دو نقطه (در دو طرف تیر) منتقل کنید.

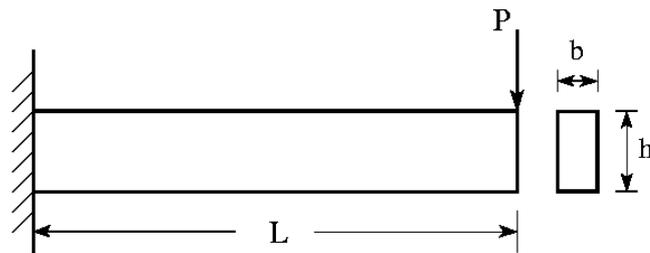
کفه‌ی بارگذاری را در وسط تیر قرار دهید و سپس ساعت اندازه‌گیری را روی صفر تنظیم کنید. وزنه‌ی ۱۰۰ گرمی را بر روی کفه قرار داده اعدادی که ساعت‌ها نشان می‌دهند را یادداشت نمایید.

همچنین جهت انجام محاسبات لازم است ابعاد مقطع تیر (h,b) و فاصله‌ی ساعت‌های اندازه‌گیری از تکیه‌گاه را یادداشت نمایید.

	x_1	x_2	δ_1	δ_2
$m=100g$				
$m=200g$				
$m=300g$				
$L=$	$h=$	$b=$	$E=105 \text{ GPa}$	

۴-۲-۲ تیر یک سرگیردار و یک بار متمرکز به سر تیر

تیری با تکیه‌گاه کاملاً مقید و یک سر آزاد به طول L و تحت تاثیر بار متمرکز w در سر تیر در شکل زیر نمایش داده شده است.



شکل ۱۸ تیر یک سرگیردار

رابطه‌ی خیز این تیر به صورت زیر است:

$$y = \frac{P}{6EI}(x^3 - 3Lx^2)$$

تیر را بروی تکیه‌گاه یک سرگیردار نصب کرده ساعت اندازه‌گیری را در یک محل دلخواه قرارداده و کفه‌ی بارگذاری را در انتهای تیر بگذارید. پس از صفرکردن ساعت اندازه‌گیری آزمایش را مطابق جدول زیر به پیش برید:

	x_1	δ_1	
$m=100g$			
$m=200g$			
$m=300g$			
$L=$	$h=$	$b=$	$E=105 \text{ GPa}$

۳-۲-۴ بررسی اصل جمع آثار قوا

تیر را روی دو تکیه‌گاه ساده قرار دهید و ساعت اندازه‌گیری را در وسط تیر (نقطه‌ی C) بگذارید. ابتدا نیروی معلوم P_1 را در نقطه‌ی A قرار داده و مقدار انحرافی را که ساعت نشان می‌دهد δ_1 بنامید. وزنه‌ی قرارداده شده در نقطه‌ی A را برداشته نیروی معلوم P_2 را در نقطه‌ی B وارد کرده و خیز نقطه‌ی C را δ_2 بنامید. در پایان نیروهای P_1 و P_2 را همزمان به ترتیب در نقاط A و B وارد کرده و مقدار انحراف ساعت نقطه‌ی C را تحت عنوان δ_3 یادداشت کنید.

 $\delta_1=$ $\delta_2=$ $\delta_3=$

$$err. percent = \left| \frac{\delta_3 - (\delta_1 + \delta_2)}{\delta_3} \right| \times 100$$

۳-۴ خواسته‌های آزمایش

- ✓ معادله‌ی خیز تیر دوسر مفصل را بدست آورید.
- ✓ با استفاده از رابطه‌ی تیر دوسر مفصل، خیز تیر را در همان نقاطی که در آزمایش بطور عملی بدست آورده‌اید محاسبه کرده و با مقادیر عملی مقایسه کنید.
- ✓ با استفاده از رابطه‌ی تیر یک سر گیردار خیز تیر را در همان نقاطی که در آزمایش بطور عملی بدست آورده‌اید محاسبه کرده و با مقادیر عملی مقایسه کنید.
- ✓ از رابطه‌ی مربوط به تیر یک سر گیردار خیز ماکزیمم آن را بدست آورید.
- ✓ درستی اصل جمع آثار قوا را با مقایسه‌ی δ_3 و $\delta_1 + \delta_2$ بررسی و درصد خطای آن را محاسبه کنید.
- ✓ در صورتی که سه پروفیل مربع، مثلث متساوی الاضلاع و دایره با ماده یکسان در اختیار داشته باشیم، در بارگذاری مشابه، کدامیک خیز کمتری دارد؟

۵

خمش نامتقارن

(Unsymmetrical Bending)

۵-۱ مقدمه

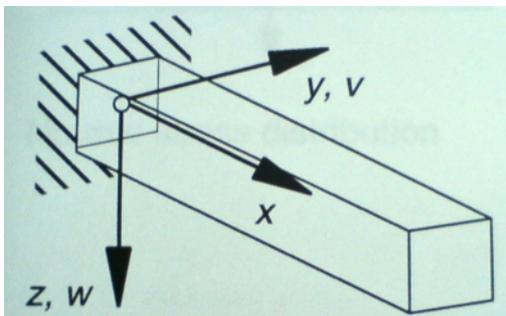
امروزه پروفیل‌های مختلفی از جنس‌های مختلف برای کاربردهای متنوع در صنعت استفاده می‌شود. هدف بسیاری از این پروفیل‌ها متمرکز کردن مواد، دورتر از محور خمشی بهترین راه جهت مقاوم کردن یک قطعه در مقابل خمش است. این مقاطع مواد کمتری را در مقایسه با مقاطع مستطیل احتیاج داشته و در نتیجه ارزانتر از مقاطع توپر و سبکتر از آنها خواهد بود.



شکل ۱۹ انواع پروفیل‌های مختلف

۵-۱-۱ تئوری

در خمش محورهای راست، صفحه بار منطبق با یکی از محورهای اصلی مقطع است. با توجه به این محورهای اصلی می‌توان ممان اینرسی I_y و I_z را بدست آورد که فرض می‌شود بیشینه و کمینه مقادیر هستند. محاسبات انجام شده در این آزمایش بر مبنای محور مختصات زیر است.



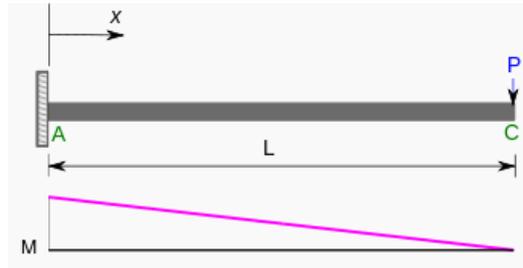
شکل ۲۰ سیستم مختصات پروفیل

- محور x در جهت طول تیر
- محور y افقی و عمود بر محور تیر
- محور z عمودی و عمود بر محور تیر

همچنین صفحه xz صفحه بارگذاری است. برای بارگذاری تیر از یک نیروی متمرکز در انتهای آزاد تیر استفاده می‌شود. در این حالت گشتاور تیر بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$M_{by}(x) = F.(L - x)$$

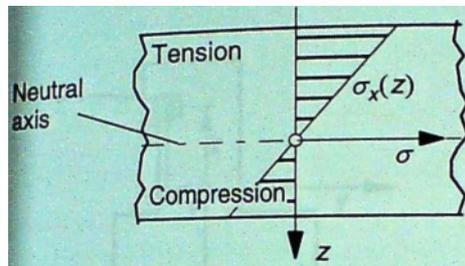
این نیرو در راستای تیر گشتاور خمشی خطی ایجاد می کند که در نقطه $x=0$ بیشترین مقدار است.



شکل ۲۱ تغییرات گشتاور خمشی

مقدار تنش مقطع تیر به صورت کلی زیر بدست می آید:

$$\sigma_x = \frac{M(x)}{I_y} z$$



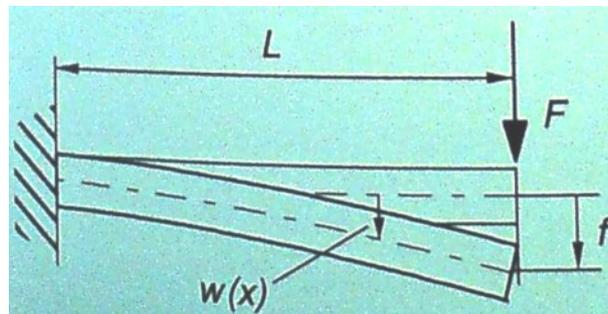
شکل ۲۲ تغییرات تنش در مقطع تیر

همچنین خمش متناظر این تیر نیز بصورت زیر محاسبه می گردد:

$$\frac{d^2W(x)}{dx^2} = -\frac{1}{EI_y} M(x)$$

با جایگذاری مقدار گشتاور و سپس انتگرال گیری از رابطه خواهیم داشت:

$$W(x) = \frac{FL^3}{3EI_y} \left(1 - \frac{3x}{2L} + \frac{x^3}{2L^3}\right)$$

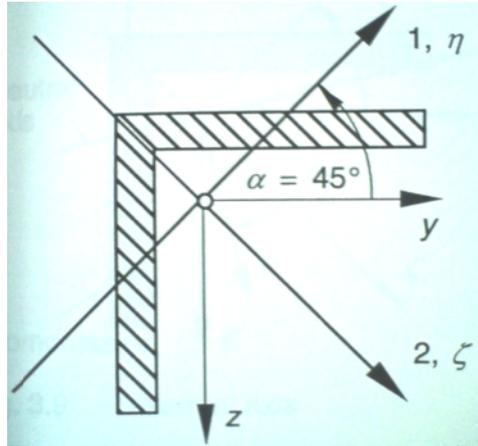


شکل ۲۳ خط خمش تیر

در انتهای تیر مقدار خمش برابر خواهد بود با:

$$W(L) = \frac{FL^3}{3EI_y}$$

در خمش محور با مقطع نامتقارن، دو محور اصلی در داخل مقطع یکدیگر را قطع نمی کنند. با توجه به جهت قرارگیری تیر، گشتاور خمشی تیر به دو بخش در سیستم مختصات جدید η و ζ تقسیم می شود.



شکل ۲۴ مختصات محلی مقطع پروفیل

$$\begin{cases} M_{b\eta} = M_{by} \cos \alpha \\ M_{b\zeta} = M_{by} \sin \alpha \end{cases}$$

به این ترتیب توزیع تنش عمود بر مقطع در محور مختصات η و ζ به صورت زیر بدست می آید:

$$\sigma_x(\eta, \zeta) = \frac{M_{by} \cos \alpha}{I_1} \cdot \zeta - \frac{M_{by} \sin \alpha}{I_2} \cdot \eta$$

با صفر قراردادن مقدار تنش، محور خنثی تیر بدست می آید:

$$\tan \beta = \frac{\eta}{\zeta} = \frac{I_2}{I_1 \tan \alpha}$$

با محاسبه خمش تیر مشخص می شود که نیرو هم باید به دو مولفه تبدیل شود:

$$\begin{cases} F_\eta = F \cos \alpha \\ F_\zeta = F \sin \alpha \end{cases}$$

به همین ترتیب، خمش دو راستای η و ζ انتهای تیر بصورت زیر بدست می آید:

$$\begin{cases} W_\eta = \frac{FL^3}{3EI_1} \cos \alpha \\ W_\zeta = \frac{FL^3}{3EI_2} \sin \alpha \end{cases}$$

مقدار و زاویه خمش برآیند بصورت زیر بدست می آید:

$$\begin{cases} W = \sqrt{W_{\eta}^2 + W_{\zeta}^2} \\ \beta = \arctan \frac{W_{\eta}}{W_{\zeta}} \end{cases}$$

جهت خمش، عمود بر محور خنثی است.

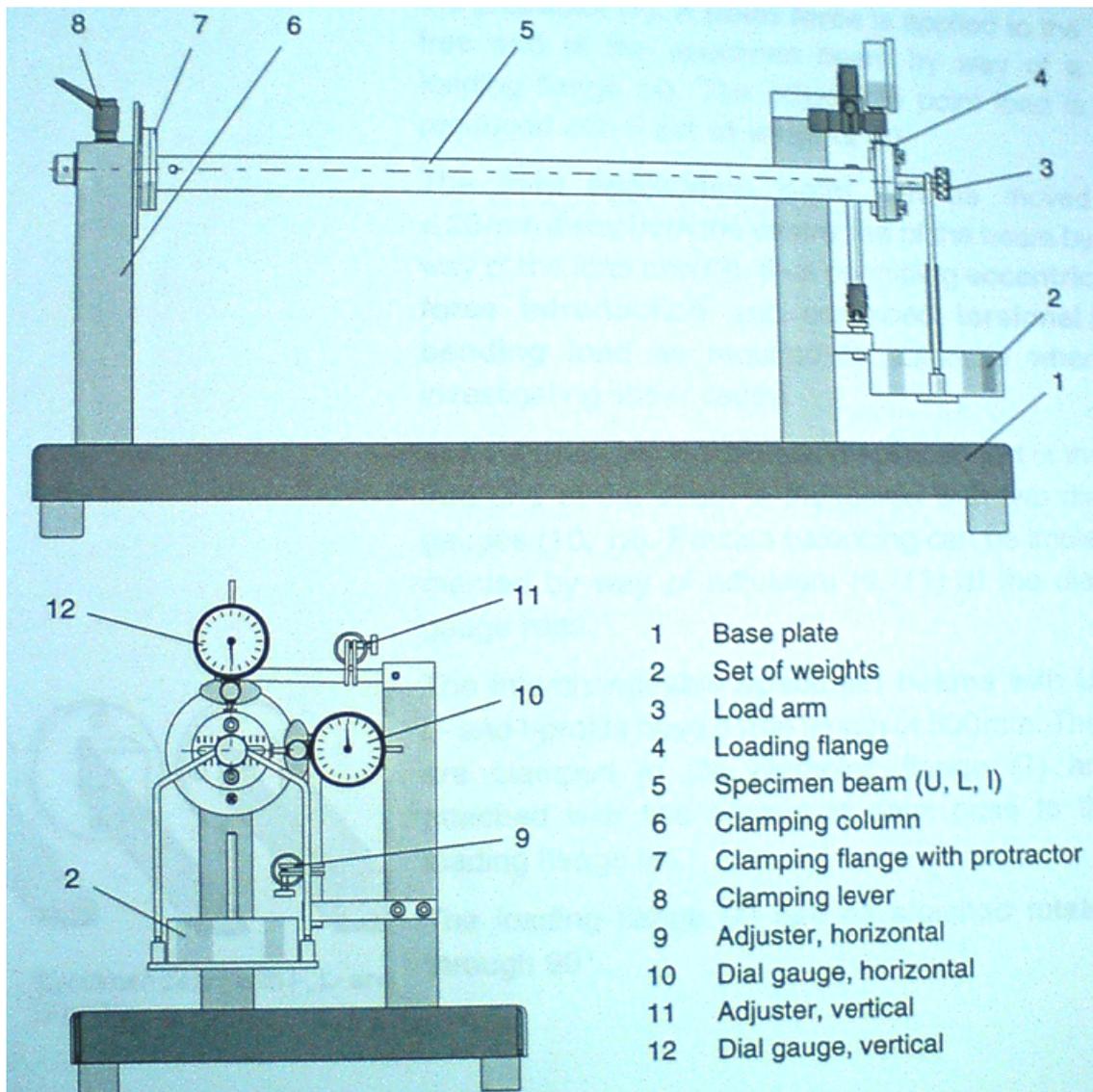
۵-۲ دستورکار آزمایش

۵-۲-۱ معرفی دستگاه

به کمک دستگاه مرکز برش و خمش نامتقارن می‌توان روابط خمش نامتقارن در تیرهای یک سر گیردار با مقاطع نبشی و ناودانی را بررسی کرد و موقعیت مرکز برش را در مقطع ناودانی بدست آورد.

دستگاه دارای یک شاسی محکم و تثبیت شده است که سایر اجزاء دستگاه روی آن قرار می‌گیرد. تیرهای آزمایشی از یک انتها توسط یک تکیه‌گاه گیردار روی شاسی دستگاه ثابت می‌شوند و انتهای آزاد آن توسط وزنه، بارگذاری می‌شود. به کمک دو ساعت اندازه‌گیری، میزان خمش تیرها در دو جهت عمودی و افقی اندازه‌گیری می‌شود.

تکیه‌گاه گیردار طوری طراحی شده است که نمونه را بتوان در زوایای مختلف تحت بار قرار داد. همچنین بارگذاری خارج از مرکز برای اعمال بار پیچشی و خمشی به صورت ترکیبی نیز امکان‌پذیر است.



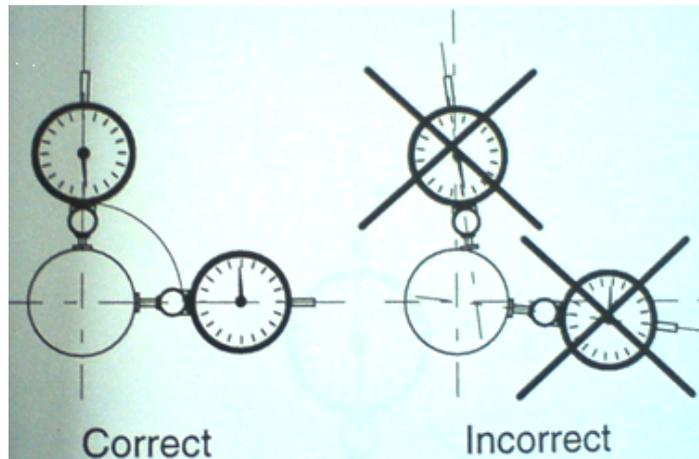
شکل ۲۵ دستگاه خمش نامتقارن

این دستگاه از بخش های زیر تشکیل شده است:

- | | |
|-------------------|-----------------------|
| ۱. پایه دستگاه | ۷. صفحه مدرج چرخش تیر |
| ۲. وزنه ها | ۸. گیره تکیه گاه |
| ۳. آویز وزنه ها | ۹. پیچ تنظیم افقی |
| ۴. صفحه اعمال بار | ۱۰. ساعت افقی |
| ۵. تیر | ۱۱. پیچ تنظیم افقی |
| ۶. ستون دستگاه | ۱۲. ساعت افقی |

۵-۲-۲ روش آزمایش

- ✓ گیره بالای ستون دستگاه را پادساعتگرد بچرخانید تا شل شود. با کشیدن آرام تیر به سمت راست، تیر از تکیه گاه خارج می شود.
- ✓ مراقب باشید که هنگام بیرون کشیدن محور، ساعت های اندازه گیری مزاحم تیر نباشند.
- ✓ حال تیر با مقطع مستطیل را در تکیه گاه قرارداده و گیره تکیه گاه را محکم کنید.
- ✓ با شل کردن آن می توانید زاویه قرارگیری محور را تغییر دهید. ملاک زاویه در آزمایش، قرارگیری عقربه شاخص تیر در صفحه مدرج است.
- ✓ با استفاده از دو پیچ و آچار آلن، محل اعمال بار را بر انتهای تیر پیچ کنید.
- ✓ اهرم آویز وزنه در این صفحه اعمال بار قادر است تا ± 25 میلیمتر از مرکز جابجا شده و بارخارج از محور اعمال کند. با توجه به این آزمایش، این اهرم را در نقطه صفر قرارداده و محکم کنید.
- ✓ حال دو ساعت اندازه گیری را با توجه به شکل زیر قرار دهید. توجه کنید که با استفاده از پیچ های تنظیم، ساعت ها را کاملاً افقی و عمودی نصب کنید.



شکل ۲۶ روش نصب صحیح ساعت ها

- ✓ حال ساعت ها را صفر کنید. در حالت بی باری هر دو عدد افقی و عمودی باید صفر باشند.
- ✓ حال آویز وزنه ها را در محل اعمال بار قرار داده و با اضافه نمودن وزنه ها، اعداد را خوانده و در جدول زیر یادداشت کنید.
- ✓ با چرخاندن تیر برای سه زاویه صفر، ۴۵ و ۹۰ برای مقطع مستطیلی این آزمایش باید صورت گیرد.
- ✓ حال تیر را عوض کرده و از مقطع نبشی استفاده کنید. این مقطع باید در زوایای صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰ درجه آزمایش شود.
- ✓ جنس تیرها آلومینیوم با مدول ۷۰ مگاپاسکال است.

جدول داده های تیر با مقطع مستطیلی

ردیف	زاویه (درجه)	نیروی اهرم (N)	خیز عمودی (mm)			خیز افقی (mm)	
			آزمایش	اصلاح شده آزمایش	تحلیلی	آزمایش	تحلیلی
۱	۰ درجه	۵					
۲		۱۰					
۳		۱۵					
۴		۲۰					
۱	۴۵ درجه	۵					
۲		۱۰					
۳		۱۵					
۴		۲۰					
۱	۹۰ درجه	۵					
۲		۱۰					
۳		۱۵					
۴		۲۰					

جدول داده های تیر با مقطع نبشی

ردیف	زاویه (درجه)	نیروی اهرم (N)	خیز عمودی (mm)			خیز افقی (mm)	
			آزمایش	اصلاح شده آزمایش	تحلیلی	آزمایش	تحلیلی
۱	۰ درجه	۵					
۲		۱۰					
۳		۱۵					
۴		۲۰					
۱	۴۵ درجه	۵					
۲		۱۰					
۳		۱۵					
۴		۲۰					
۱	۱۸۰ درجه	۵					
۲		۱۰					
۳		۱۵					
۴		۲۰					
۱	۲۲۵ درجه	۵					
۲		۱۰					
۳		۱۵					
۴		۲۰					

۵-۲-۳ اصلاح اعداد

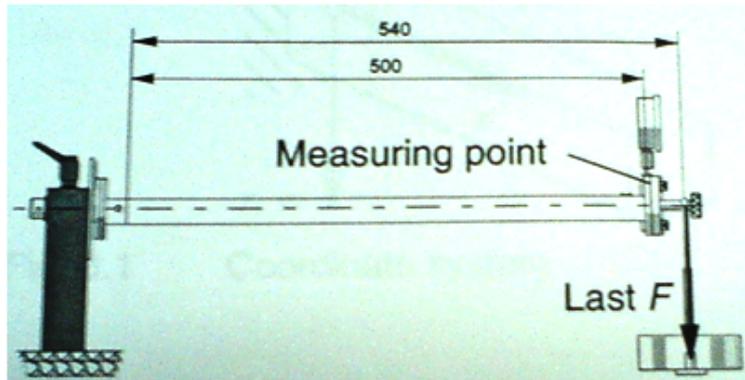
با توجه به اینکه دستگاه دارای تغییر شکل الاستیک کوچکی می‌باشد. مقدار خیز عمودی بدست آمده باید اصلاح گردد:

$$W = W_{measured} - F.k \rightarrow k = 0.035mm / N$$

همچنین F برابر با وزنه اعمالی است. جابجایی افقی نیاز به تصحیح ندارد. همچنین در محاسبه خیز تئوری با توجه به اینکه وزنه آویزان شده از انتهای تیر ۴۰ میلی‌متر فاصله دارد، باید مقدار نیرو بصورت زیر تصحیح گردد:

$$F_{Corrected} = \frac{540}{500} F = 1.08F$$

پس در روابط تحلیلی باید از $F_{Corrected}$ استفاده شود.



شکل ۲۷ روش محاسبه نیروی وارده بر تیر

۵-۳ خواسته‌های آزمایش

۱. جداول داده شده را تکمیل کنید.
۲. منحنی جابجایی های افقی و عمودی بدست آمده را برحسب نیروها و زوایای مختلف رسم کنید (هر دو مقطع).
۳. مقدار نسبت جابجایی های افقی و عمودی بر نیرو در بار ۱۰ نیوتن را در هر زاویه بدست آورده و نمودار $\frac{V}{F}$ و $\frac{W}{F}$ برحسب زوایای مختلف را برای دو مقطع رسم کنید.
۴. برای بخش قبل، مقادیر تحلیلی نمودار $\frac{V}{F}$ و $\frac{W}{F}$ برحسب زوایای مختلف را در یک نمودار رسم کرده و با مقدار آزمایشگاهی مقایسه کنید. چه نتیجه ای گرفته می‌شود؟
۵. با بررسی صنایع مختلف، سه کاربرد از تیر نبشی را بیان کنید. در این کاربردها به چه دلیل از تیر نبشی استفاده شده است؟
۶. در خودروسازی به جز تیر نبشی چه تیرهای نامتقارن دیگری استفاده می‌گردد؟

۶

خیز تیرهای منحنی

(Curved beams deflection)

۶-۱-۶ مقدمه

برای محاسبه‌ی خیز تیر و دوران نقاط مختلف عضو خمیده، از روش‌های انرژی (روش کارمجازی یا تئوری کاستیگلیانو) استفاده می‌شود. اگر U انرژی کرنشی جسم باشد:

$$U = \int \frac{M^2}{2EI} ds + \int \frac{N^2}{2EA} ds + \int \frac{T^2}{2Gj} ds + \int \frac{N^2}{2GA} ds$$

همچنین از آنجایی که معمولاً نیروی ناشی از تغییر شکل محوری (N)، برشی (V) و پیچشی (T) نسبت به انرژی ناشی از خمش (M) خیلی کمتر است در محاسبات از تاثیر تنش‌های فوق صرف‌نظر کرده و سعی می‌شود چگونگی تغییر مکان ناشی از خمش تیرهای خمیده مورد بررسی قرار گیرد. در این آزمایش با دونوع تیر خمیده کار می‌کنیم:

۶-۱-۱-۱ تیر نیم‌دایره‌ی کنسولی با بار قائم تنها

قضیه‌ی کاستیگلیانو بیان می‌دارد که اگر سازه‌ای کشسان در معرض n بار $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ قرار گیرد تغییر مکان x_j نقطه اثر بار P_j را که در امتداد خطر اثر P_j اندازه‌گیری می‌شود را می‌توان به صورت مشتق جزئی انرژی کرنشی سازه نسبت به بار P_j بیان کرد. یعنی:

$$x_j = \frac{\partial U}{\partial P_j}$$

از آنجایی که U برابر است با:

$$U = \int \frac{M^2}{2EI} ds$$

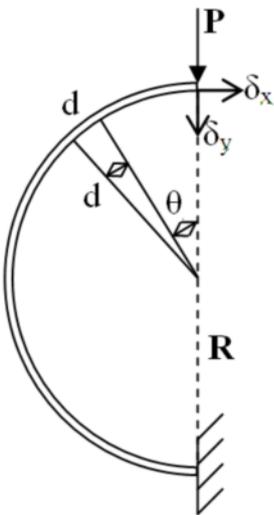
می‌توان نوشت:

$$x_j = \int_0^L \frac{M}{EI} \frac{\partial M}{\partial P_j} ds$$

از مطالعه‌ی شکل زیر و جایگذاری M و همچنین ds در فرمول فوق داریم:

$$M = -PR \sin \theta \Rightarrow \frac{\partial M}{\partial P} = -R \sin \theta$$

$$ds = R d\theta \rightarrow S_y = \int_0^\pi \frac{PR \sin \theta \times R \sin \theta}{EI} R d\theta \Rightarrow S_y = \frac{\pi PR^3}{2 EI}$$



شکل ۲۸ تیر نیم‌دایره‌ی کنسولی

برای بدست آوردن تغییر مکان افقی تیر در یک نقطه، در حالی که تنها نیروی عمودی به آن وارد می‌شود، بارجازی Q_j را در جهت افقی بر همان نقطه وارد می‌کنیم و قضیه‌ی کاستیگلیانو را برای بدست آوردن تغییر مکان ناشی از Q_j و بار واقعی P به کار می‌بریم و سپس Q_j را مساوی صفر قرار می‌دهیم.

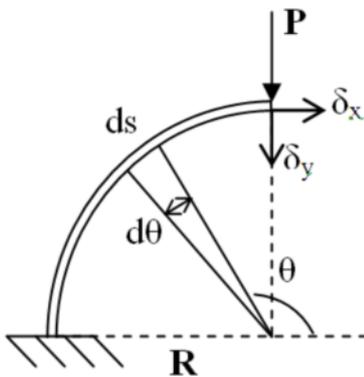
$$x_j = \frac{\partial U}{\partial Q_j} = \int_0^L \frac{M}{EI} \frac{\partial M}{\partial Q_j} ds$$

$$\begin{cases} M = -PR \sin \theta - Q(R - R \cos \theta) \Rightarrow \frac{\partial M}{\partial Q} = -(R - R \cos \theta) \\ Q = 0 \Rightarrow M = -PR \sin \theta \\ ds = R d\theta \end{cases}$$

$$\rightarrow \delta_x = \int_0^\pi \frac{PR \sin \theta (R - R \cos \theta)}{EI} R d\theta \Rightarrow \delta_x = \frac{2PR^3}{EI}$$

۶-۱-۲ تیر ربع دایره کنسولی با بار قائم در انتها

در مورد این تیر نیز مانند روش ذکر شده در قسمت الف عمل کرده و مقادیر جابجایی در دو جهت را بدست می‌آوریم:



$$\delta_x = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \frac{M}{EI} \frac{\partial M}{\partial Q} R d\theta = \frac{PR^3}{2EI}$$

$$\delta_y = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \frac{M}{EI} \frac{\partial M}{\partial P} R d\theta = \frac{\pi PR^3}{4EI}$$

شکل ۲۹ تیر ربع دایره‌ی کنسولی

۶-۲ روش آزمایش

هدف: تعیین تغییر مکان تیرهای خمیده تحت بارگذاری، تحقیق رابطه‌ی نیرو و تغییر مکان، همچنین بررسی تئوری کاستیگلیانو از طریق آزمایش و مقایسه‌ی نتایج تئوری و عملی

۶-۳ دستور کار انجام آزمایش

۱. قبل از انجام آزمایش شعاع تیر خمیده و مشخصات هندسی مقطع آن را اندازه گیری کنید.

۲. قلاب‌های بارگذاری را نصب کرده و سنج‌های اندازه‌گیری تغییر مکان را در دو جهت افقی و عمودی روی صفر تنظیم کنید.

۳. برای هر یک از حالت‌های آزمایش، طبق مقادیر متناسب بارگذاری نموده و جدول را تکمیل کنید.

۱-۳-۶ تیر نیم‌دایره‌ی کنسولی با بار قائم انتها (حداکثر بارگذاری ۱ کیلوگرم)

$E=207 \text{ GPa}$ $b=$

$h=$

$R=$

W(Kg)	عملی		تئوری		خطا (%)	
	$\Delta V(\delta_x)$	$\Delta h(\delta_y)$	$\Delta V(\delta_x)$	$\Delta h(\delta_y)$	$\Delta V(\delta_x)$	$\Delta h(\delta_y)$

۲-۳-۶ تیر نیم‌دایره‌ی کنسولی با بار قائم انتها (حداکثر بارگذاری ۲ کیلوگرم)

$E=207 \text{ GPa}$ $b=$

$h=$

$R=$

W(Kg)	عملی		تئوری		خطا (%)	
	$\Delta V(\delta_x)$	$\Delta h(\delta_y)$	$\Delta V(\delta_x)$	$\Delta h(\delta_y)$	$\Delta V(\delta_x)$	$\Delta h(\delta_y)$

۴-۶ خواسته‌های آزمایش

- ✓ روابط تغییر مکان عمودی و افقی تیر ربع دایره‌ای را بدست آورید.
- ✓ جدول فوق را تکمیل نموده تحویل دهید.
- ✓ با بدست آوردن جابجایی برابند تئوری و عملی در هر بارگذاری، نمودار بار بر حسب جابجایی را در هر دو تیر رسم کنید.

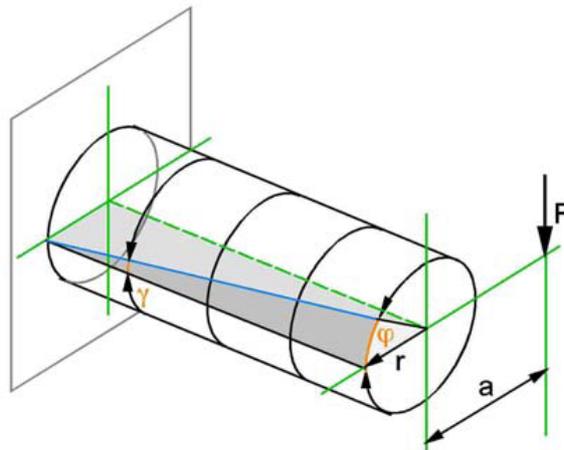
۷

آزمایش پیچش ارتجاعی (Elastic Torsion)

۷-۱-۱-۲ محاسبه‌ی تغییر شکل برشی - زاویه‌ی پیچش

میله‌ی شکل زیر را در نظر بگیرید. خط ab را روی میله علامت بگذارید. بعد از عمل پیچش خط ab به صورت ab' در می‌آید. زاویه‌ی γ را تغییر شکل نسبی برشی میله می‌نامند. نسبت تنش برشی τ به این مقدار تغییر شکل را ضریب الاستیسیته‌ی برشی گویند و با G نشان داده می‌شود. مقدار زاویه‌ی پیچش برای مقطع میله به طول L برابر است با:

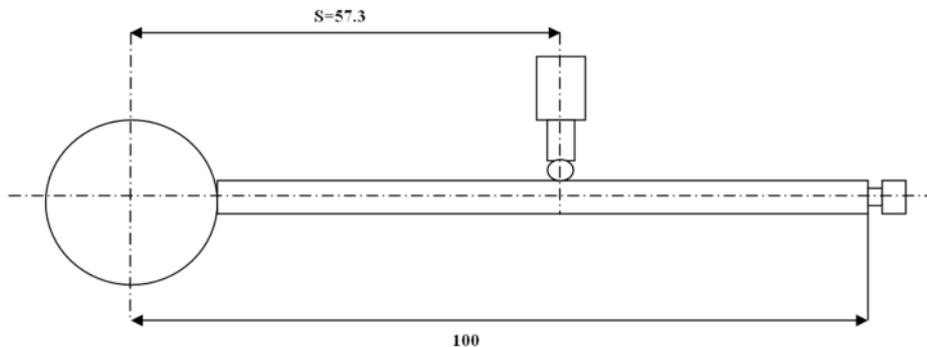
$$G = \frac{\tau}{\gamma} \rightarrow \phi = \frac{\tau L}{Gr} = \frac{TL}{GJ}$$



شکل ۳۰ میله تحت پیچش

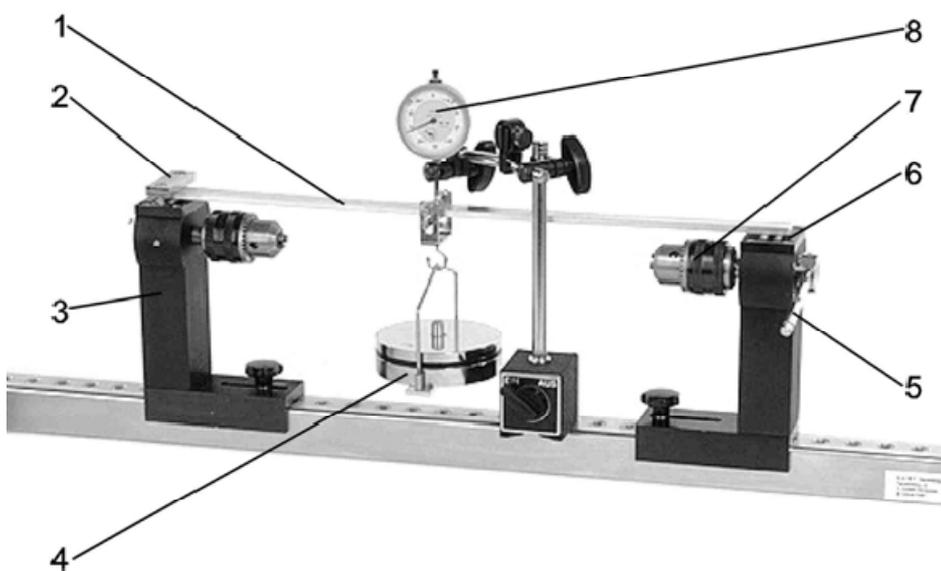
۷-۲ دستگاه آزمایش

در این دستگاه میله‌ی مورد آزمایش از یک طرف در یک سه نظام ثابت بسته شده و از طرف دیگر در سه نظامی بسته می‌شود که نسبت به حرکت چرخشی آزاد است. با قرار دادن وزنه بر روی بازوی عمود بر محور میله یک گشتاور پیچشی توسط سه نظام متحرک به میله وارد می‌شود که باعث تغییر شکل زاویه‌ای در میله می‌شود. این تغییر شکل به وسیله‌ی یک ساعت که بر روی بازو قرار دارد اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۳۱ تفاوت محل اعمال بار و نصب ساعت

بخش های مختلف دستگاه عبارتند از:



۱. میله
۲. تکیه گاه تست خمشی
۳. پایه های دستگاه
۴. وزنه
۵. بازوی گشتاور پیچشی
۶. تکیه گاه تست خمشی
۷. سه نظام تست پیچش
۸. ساعت اندازه گیری

شکل ۳۲ دستگاه پیچش الاستیک

۳-۷ آزمایش اول

هدف: بدست آوردن تغییر شکل تجهیزات.

مقدار تغییر شکلی که توسط ساعت نشان داده می شود ناشی از تغییر شکل میله و تجهیزات است. این در صورتی است که در محاسبات فقط به تغییر شکل میله نیاز است بنابراین باید تغییر شکل مربوط به تجهیزات از مقدار کل کسر شود.

۱-۳-۷ روش انجام آزمایش

در هر مرحله از این بخش میله هایی از جنس های آلومینیوم، مس فولاد... با قطر ۱۰mm و طول ۶۰mm را به گونه ای در سه نظام ها قرار می دهیم که فاصله ی پیشانی سه نظام ها از یکدیگر در حدود ۱mm باشد و وزنه ی ۱ kg را روی بازو می گذاریم. در این حالت تغییر شکل ناشی از میله تقریباً صفر بوده و می توان همه ی تغییر شکل اندازه گیری شده را به تجهیزات نسبت داد. اطلاعات بدست آمده را در جدول زیر وارد کنید.

ردیف	جنس	جابجایی y (۰.۰۱mm)
۱	آلومینیوم	
۲	مس	
۳	برنج	
۴	فولاد	

۴-۷ آزمایش دوم

هدف: در این بخش مدول برشی آلومینیوم، مس و... توسط آزمایش محاسبه شده و با مقدار این مدول ها در جداول معتبر مقایسه می شود.

۱-۴-۷ روش انجام آزمایش

میله هایی از جنس های مختلف به طول $L=340$ (طول مفید میله 300 است) و قطر $d=10$ mm را به ترتیب در سه نظام ها قرار داده و وزنه 1 kg را روی بازو قرار می دهیم و با استفاده از فرمول های زیر، جدول مورد نظر را کامل می کنیم.

$$s = 57.3 \rightarrow \lambda = \frac{d \cdot y'}{2s} \rightarrow \gamma = \frac{\lambda}{L}, W_p = \frac{\pi d^3}{16} \Rightarrow G = \frac{M_t}{W_p \cdot \gamma}$$

جنس	جابجایی کل y (mm)	جابجایی خالص میله y' (mm)	λ (mm)	γ (rad)	مدول بدست آمده از آزمایش (N/mm^2)	مدول بدست آمده از جدول (N/mm^2)
آلومینیوم						۲۶۹۵۰
مس						۴۸۰۰۰
برنج						۳۸۵۰۰
فولاد						۸۰۸۵۰

با استفاده از داده های جدول بالا نمودار جابجایی بر حسب $1/G$ را رسم می کنیم تا رابطه ی میان این دو مشخص شود.

۵-۷ آزمایش سوم

هدف: محاسبه ی رابطه ی بین جابجایی زاویه ای و طول میله.

۱-۵-۷ روش انجام آزمایش

میله هایی از جنس آلومینیوم با قطر 10 mm و طول های مختلف را در دستگاه قرار داده و جابجایی آن ها تحت بار 1 kg را ثبت کرده و نمودار جابجایی بر حسب طول را رسم می کنیم.

طول مفید میله L (mm)	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰
جابجایی کل y (mm)					
جابجایی خالص y' (mm)					

۶-۷ آزمایش چهارم

هدف: بدست آوردن رابطه ی بین جابجایی زاویه ای و گشتاور پیچشی.

۱-۶-۷ روش انجام آزمایش

در این بخش ابتدا رابطه ی جابجایی مربوط به تجهیزات را با مقدار تنش پیچشی اینگونه بدست می آوریم که یک میله ی آلومینیومی به طول ۶۰mm و قطر ۱۰mm را در دستگاه قرار داده و با قرار دادن وزنه های مختلف روی بازو، جابجایی مربوط به هر وزنه را در جدول زیر ثبت می کنیم.

وزن (kg)	۰.۱	۰.۲	۰.۵	۱.۰	۱.۵	۲.۰
جابجایی y (mm) (۰.۰۱)						

پس از آن میله ی آلومینیومی به قطر ۱۰mm و طول ۴۴۰mm را به گونه ای در سه نظام ها قرار می دهیم که طول مفید میله ۴۰۰mm باشد و همان وزنه هایی که در مرحله ی قبل استفاده شد را به ترتیب روی بازو قرار داده و جدول زیر را کامل می کنیم. با استفاده از داده های جدول نمودار جابجایی خالص بر حسب وزن را رسم می کنیم.

وزن (kg)	۰.۱	۰.۲	۰.۵	۱.۰	۱.۵	۲
جابجایی کل y (kg) (۰.۰۱)						
جابجایی خالص میله y' (mm) (۰.۰۱)						

۷-۷ آزمایش پنجم

هدف: یافتن رابطه ی بین جابجایی زاویه ای و قطر میله.

۱-۷-۷ روش انجام آزمایش

ابتدا برای بدست آوردن جابجایی مربوط به تجهیزات، میله هایی از جنس فولاد با طول مفید ۶۰mm و قطر های مختلف را تحت وزن ۱kg در دستگاه قرار داده و جدول زیر را کامل می کنیم.

قطر میله d (mm)	۵	۶	۷	۸	۱۰	۱۲
جابجایی y (mm) (۰.۰۱)						

پس از آن میله هایی از جنس فولاد به طول ۳۴۰mm و طول مفید ۳۰۰mm با قطر های متفاوت را در دستگاه قرار داده و جدول زیر را کامل می کنیم و با استفاده از داده های جدول نمودار $\sqrt[4]{y'}$ بر حسب $1/d$ را رسم می کنیم.

قطر میله d(mm)	جابجایی کل $y(0.01\text{mm})$	جابجایی خالص $y'(0.01\text{mm})$	$\sqrt[4]{y'}$	$\frac{1}{d}$
۵				
۶				
۷				
۸				
۱۰				
۱۲				

۷-۸ خواسته های آزمایش

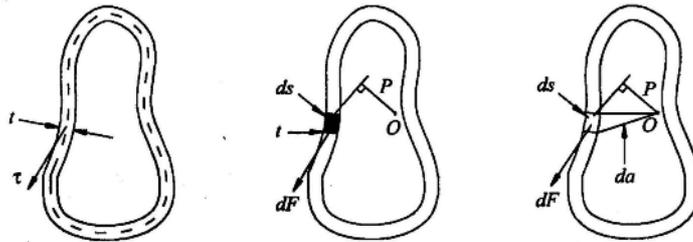
- ✓ جداول را کامل کرده و نمودارهای مربوطه را رسم کنید.
- ✓ زاویه پیچش را بصورت تئوری بدست آورده و با نتایج عملی مقایسه کنید.
- ✓ سه دلیل برای عدم تطابق نتایج تئوری و عملی بیان کنید.

۸

آزمایش پیچش مقاطع جدار نازک (Thin Walled Torsion)

۸-۱ مقدمه

به طور کلی تعیین تنش در اعضای غیرمدور با استفاده از روش‌های ریاضی پیشرفته امکان‌پذیر است. ولی در مورد شفت‌های توخالی جدارنازک غیرمدور می‌توان از محاسبات تقریبی استفاده نموده پخش تنش‌ها را تعیین کرد.



شکل ۳۳ پیچش در مقاطع توخالی

۸-۱-۱ تئوری پیچش مقاطع توخالی جدارنازک

با استفاده از روش انرژی می‌توان زاویه‌ی پیچش شفت توخالی جدارنازک را تعیین نمود. با فرض تغییر شکل ارتجاعی می‌توان نشان داد که زاویه‌ی پیچش مربوط به شفت توخالی جدارنازک برابر است با:

$$\phi = \frac{TL}{4A^2G} \oint \frac{ds}{t}$$

L : طول شفت توخالی جدارنازک

G : مدول برشی

T : گشتاور پیچشی اعمال شده به شفت

A : سطح متوسط

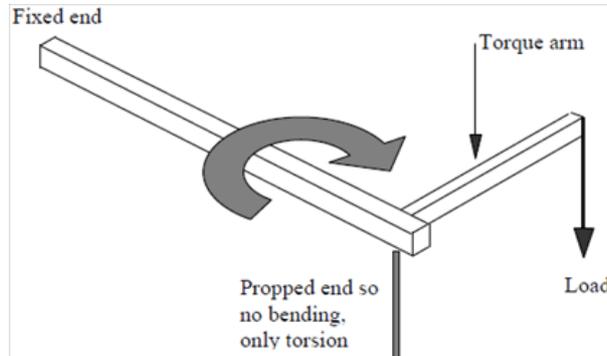
t : ضخامت مقطع

توجه: انتگرال فوق برای طول خط وسط جداره محاسبه می‌شود.

۸-۲ دستگاه آزمایش

این دستگاه از یک قاب فلزی تشکیل شده که بصورت عمودی روی مقطع قرار گرفته است. نمونه از پایین روی یک صفحه‌ی صلب با پیچ ثابت شده‌است و از بالا به اهرم متصل است. دو قرقره روی دستگاه قرار داده شده که با تغییر جهت نیرو اعمال بار به اهرم پیچشی باعث پیچشی جسم توخالی می‌شود. دو ساعت اندازه‌گیری روی دستگاه قرار دارد که با اتصال به اهرم پیچشی، مقدار پیچش نمونه را نشان می‌دهند.

دو کفه بارگذاری به دستگاه متصل است که با بارگذاری روی آنها می توان به جسم لنگر پیچشی وارد نمود. با مشخص بودن طول بازوی پیچش و وزن وزنه‌ها می توان لنگر داده شده را محاسبه نمود.



شکل ۳۴ مفهوم کلی دستگاه آزمایش پیچش مقاطع توخالی

۸-۳ روش آزمایش

۸-۳-۱ اهداف آزمایش

- الف. بررسی پیچش مقاطع توخالی جدارنازک و محاسبه‌ی زاویه‌ی پیچش
ب. محاسبه‌ی مدول برشی (G) و مقایسه‌ی آن با مقدار تئوری موجود در جداول خواص مواد

۸-۴ دستور کار انجام آزمایش

- ۱- مشخصات هندسی نمونه‌ی مورد آزمایش را اندازه‌گیری کنید (b ضلع مقطع مربعی و L طول نمونه)
- ۲- طول بازوی لنگر (d) را اندازه بگیرید.
- ۳- ساعت‌های اندازه‌گیری تغییر مکان را روی صفر تنظیم کنید.
- ۴- فاصله‌ی نوک ساعت تا مرکز دوران را اندازه‌گیری نموده و آن را r بنامید.
- ۵- روی هر قلاب بارگذاری یک وزنه‌ی یک کیلوگرمی قرار دهید.
- ۶- با استفاده از مقدار نیروی وارده و فاصله‌ی زوج نیرو، گشتاور وادشده به میله را محاسبه کنید.
- ۷- تغییر مکان انتهایی بازوی لنگر را از روی ساعت اندازه‌گیری یادداشت و آن را δ بنامید.
- ۸- با داشتن تغییر مکان و شعاع دوران، زاویه‌ی پیچش را محاسبه کنید.
- ۹- آزمایش را برای وزنه‌های ۲، ۳ و ۴ کیلوگرمی تکرار و جدول زیر را تکمیل کنید.

t=۱ mm	L=
b=	d=
m=۱ Kg	δ_1 =
m=۲ Kg	δ_2 =

$m=۳ \text{ Kg}$	$\delta_۳=$
$m=۴ \text{ Kg}$	$\delta_۴=$

۵-۸ خواسته‌های آزمایش

- ✓ برای هر بارگذاری با داشتن زاویه‌ی پیچش و جایگذاری در رابطه مقدار G را بدست آورید و از چهار مقدار بدست آمده میانگین بگیرید.
- ✓ جدول برشی ماده‌ی فلز مورد آزمایش را از جدول خواص مواد یافته و با مقدار بدست آمده از آزمایش مقایسه کنید.
- ✓ اگر مقطع دایره‌ای توخالی با همان ضخامت و محیط جداره نمونه آزمایش داشتیم، آن گاه به ازای لنگر مساوی، زاویه پیچش در یک طول مساوی بیشتر می‌شد یا کمتر؟ نسبت زاویه پیچش در مقطع مربع را به زاویه پیچش در مقطع دایره با حفظ شرایط یاد شده بیابید.

۹

پیچش پلاستیک (Plastic Torsion)

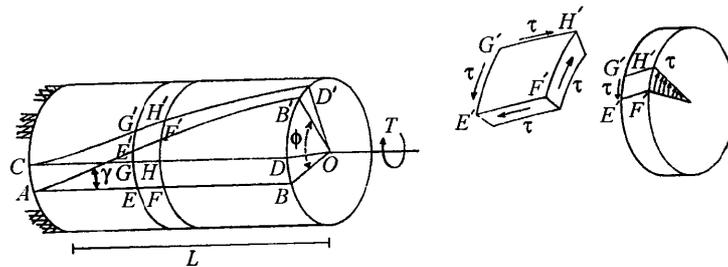
۹-۱ مقدمه

۹-۱-۱ هدف

بررسی رابطه بین گشتاور پیچشی اعمال شده و پیچش برای فلزات مختلف و علت گسختگی در این آزمایش ضمن بررسی رابطه میان لنگر پیچشی با زاویه پیچش نمونه، مشخصات مهم فلز نظیر مدول ارتجاعی برشی (G) و تنش برشی تسلیم نمونه τ_y و تنش برشی گسیختگی τ_u را از روی نمودار به دست می آوریم.

۹-۱-۲ تئوری آزمایش

اگر نمونه ای به شکل میله در نظر بگیریم که تحت لنگر پیچشی T قرار گرفته، در مقاطع عمود بر محور، تنش های برشی، مماس بر دواير و به مرکز محور میله خواهد بود و تنش های برشی در جهت عمود بر آنها نیز الزاما وجود خواهد داشت.



شکل ۳۵ میله تحت پیچش

توزیع تنش برشی روی مقطع میله در امتداد شعاع به دو عامل بستگی دارد:

(الف) نحوه توزیع کرنش برشی در امتداد شعاع.

(ب) رابطه بین تنش برشی و کرنش برشی.

در مورد پیچش میله ای با مقطع دایره ای هنگامی که بارگذاری در حد ارتجاعی انجام می گیرد، تنش برشی در نقطه ای به شعاع r چنین است:

$$\tau = \frac{Tr}{I_p}$$

که در آن لنگر پیچشی و ممان اینرسی قطبی مقطع است. اگر شعاع استوانه r باشد:

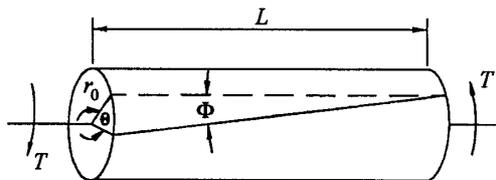
$$I_p = \frac{\pi r_0^4}{2}$$

و اگر τ_0 تنش برشی حداکثر ($r=r_0$) باشد:

$$\tau_0 = \frac{2T}{\pi r_0^3}$$

اما پس از گذشتن از حد ارتجاعی، تنش برشی را نمی توان با رابطه اخیر محاسبه کرد. برای تعیین تنش برشی به کمک منحنی لنگر بر حسب زاویه پیچشی، چند نکته را در نظر می گیریم:

فرض می کنیم ماده ایزوتروپ در طول بارگذاری، ایزوتروپ و مقاطع عمود بر محور، مسطح و شعاع های آنها مستقیم باقی بماند. این فرض شبیه به فرض های پیچشی ارتجاعی میله ای با مقطع دایره است. یک استوانه ایزوتروپ با طول واحد و شعاع r در نظر می گیریم که تحت بارگذاری پیچش پلاستیک قرار گرفته است.



شکل ۳۶ میله ی تحت پیچش و زاویه ی ایجاد شده

اگر γ تغییر حالت برشی در شعاع r باشد، آنگاه:

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \tan \Phi \\ r\theta &= \tan \Phi \end{aligned} \right\} \Rightarrow \theta = \frac{\gamma}{r} = \frac{\gamma_0}{r_0}$$

که تغییر حالت برشی در لایه خارجی می باشد ($r=r_0$). بنابراین لنگر پیچشی مقاوم از رابطه زیر به دست می آید:

$$\left. \begin{aligned} T &= \int_0^{r_0} \tau(2\pi r dr) r \\ r &= \frac{\gamma}{\theta} \Rightarrow dr = \frac{d\gamma}{\theta} \end{aligned} \right\} \Rightarrow T = \frac{2\pi}{\theta^3} \int_0^{r_0} \tau \gamma^2 d\gamma$$

با در نظر گرفتن منحنی $\tau = f(\gamma)$ می توانیم منحنی $T-\theta$ را به دست آوریم. با مرتب کردن دوباره رابطه اخیر و دیفرانسیل گیری بر حسب θ خواهیم داشت:

$$d\left(\frac{T\theta^3}{2\pi}\right) = \tau_0 \gamma_0^2 \theta^2 r_0 d\theta \rightarrow \frac{d}{d\theta}\left(\frac{T\theta^3}{2\pi}\right) = \tau_0 \theta^2 r_0^3$$

$$\frac{dT}{d\theta} \theta^3 + 3T \theta^2 = 2\pi r_0^3 \theta^2 \tau_0 \rightarrow \tau_0 = \frac{1}{2\pi r_0^3} \left(3T + \theta \frac{dT}{d\theta}\right)$$

باید توجه کرد که در رابطه بالا جمله اول $\tau = \frac{3T}{2\pi r_0^3}$ لنگر بر حسب تنش برشی در حالت تمام پلاستیک

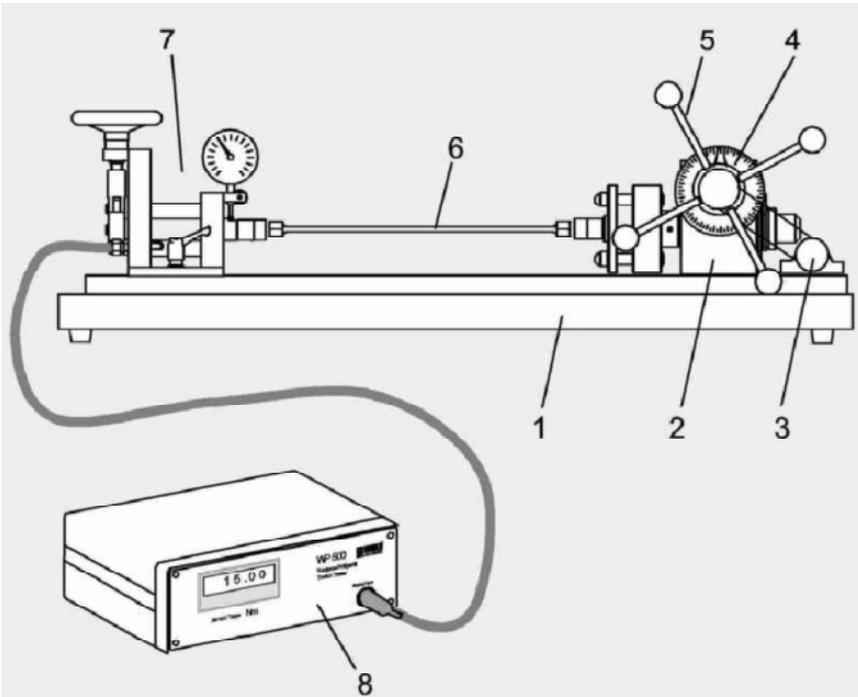
مقطع است. همچنین هنگامی که $\tau-\gamma$ خطی است، $T-\theta$ خطی و جمله دوم یعنی $\theta \frac{dT}{d\theta}$ مساوی با T خواهد

بود و در نهایت رابطه فوق به رابطه ساده تنش برشی در پیچش ارتجاعی یعنی رابطه $\tau_0 = \frac{2T}{\pi r_0^3}$ تبدیل

می شود.

۹-۱-۳ دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش از قسمت های زیر تشکیل شده است:



شکل ۳۷ دستگاه تست پیچش

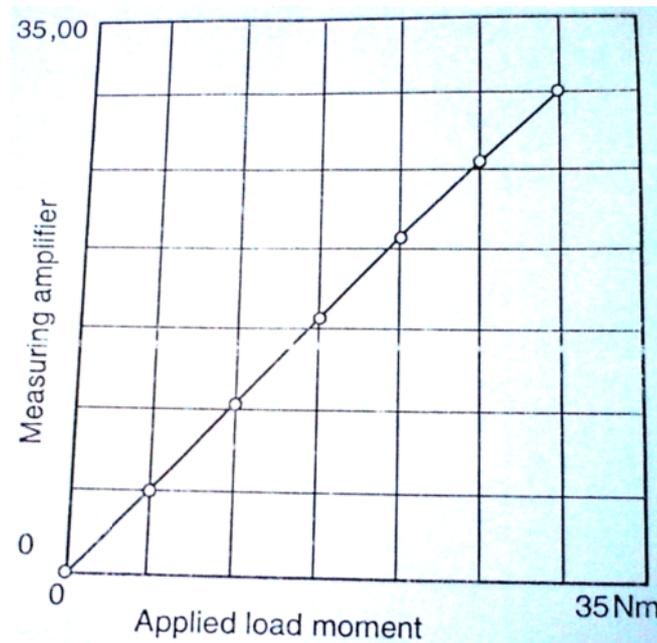
۱. محور اصلی دستگاه پیچشی همراه با فک های نگهدارنده نمونه
۲. چرخ دنده حلزونی
۳. شمارنده تعداد دور لنگر پیچشی
۴. نقاله مشخص کننده زاویه پیچش
۵. دستگیره اعمال گشتاور پیچشی
۶. نمونه آزمایش
۷. ابزار اندازه گیری گشتاور: می تواند در راستای محور حرکت کند و دارای کرنش سنج های روی میله، فرمان ابزار و ساعت برای جبران سازی است.
۸. تقویت کننده به همراه نمایشگر گشتاور

۹-۱-۴ کالیبراسیون دستگاه

با توجه به اینکه در هنگام پیچش نمونه، محور اندازه گیری پیچش نیز دچار پیچش می شود، این مقدار باید از گشتاور پیچشی نمایشگر کم شود. به همین دلیل بصورت زیر باید کالیبراسیون دستگاه صورت گیرد:

- ۱- ابتدا ابزار کالیبراسیون را روی محور دستگاه قرار دهید (این ابزار شامل اهرم و وزنه ای است که با هم در تعادل هستند).
- ۲- با سوکت ۱۵ میلیمتری، دهانه ابزار کالیبراسیون را به ابزار اندازه گیری وصل کنید.
- ۳- فرمان ابزار را بچرخانید تا اهرم آزادانه حرکت کند. در این حالت باید نمایشگر، عدد صفر را نشان دهد.
- ۴- در صورتی که نمایشگر در حالت بدون بار، گشتاور نشان می داد، دکمه ▼ را نگه داشته و سپس دکمه **P** را فشار دهید تا مقدار صفر شود.
- ۵- حال تمامی وزنه ها که ۶۰ نیوتن هستند را از بازو آویزان کنید. با توجه به طول بازوی ۵۰ سانتی متری، میزان گشتاور نمایشگر باید ۳۰ نیوتن متر باشد.
- ۶- حال ساعت اندازه گیری را در جای خود نصب کنید.

- ۷- با چرخاندن فرمان ابزار، گشتاور نمایشگر را به ۳۰ نیوتن متر برسانید.
- ۸- حال وزنه ها را برداشته و اطمینان حاصل کنید که دستگاه گشتاوری را نشان نمی دهد.
- ۹- حال دستگاه کالیبره شده است. بدون تغییر در ساعت و فرمان ابزار، اهرم را جدا کرده و آزمایش را انجام دهید.
- ۱۰- با قرار دادن وزنه های مختلف می توان منحنی کالیبراسیون را بدست آورد. در شکل ۱۶ بخش های غیرخطی نمودار بیانگر غیرخطی بودن فنر پیچشی ساعت اندازه گیری است.



شکل ۲۸ نمونه منحنی کالیبراسیون تست پیچش

۹-۲ روش آزمایش

۹-۲-۱ روش قراردعی نمونه روی دستگاه

- ۱- نمونه را انتخاب کرده و ابعاد آن (L, R) را به دقت اندازه گیری کنید.
- ۲- سوکت های ۶ پر ۱۷ میلیمتری را در دو سر تکیه گاه ها قرار دهید تا فک ها کامل شوند.
- ۳- یک طرف نمونه را در فک واقع در فک نزدیک به صفحه مدرج جای داده و واحد بارگذاری را به طرف نمونه بلغزانید.
- ۴- حال دستگیره دستگاه را بچرخانید تا فک واقع در واحد بارگذاری به طور مناسب در مقابل نمونه قرار گیرد. (در این حالت نمونه بایستی به طور آزاد در بین فک ها قرار گیرد).



شکل ۳۹ دستگاه تست پیچش

- ۵- حال گیره های واحد اندازه گیری را محکم کرده تا تکیه گاه ها هیچ حرکتی نداشته باشند.
- ۶- اهرم اعمال بار را به آرامی بچرخانید تا لقی بین سوکت و نمونه گرفته شود. در این حالت نمایشگر را صفر کنید.
- ۷- همچنین شمارنده تعداد چرخش را صفر کنید (سمت راست دستگاه).
- ۸- حال عقربه های نمایشگر تعداد دور و درجه را روی صفر بیاورید.
- ۹- همچنین نمایشگر ساعت اندازه گیری را با چرخاندن صفحه مدرج و بدون هیچ تغییری صفر کنید.

۹-۲-۲ روش بارگذاری نمونه

- ۱- با چرخاندن دستگیره اعمال لنگر، پیچشی در جهت مثبت مثلثاتی (ساعتگرد) بر نمونه وارد سازید.
- ۲- برای بارگذاری دوره های مختلف، زوایای زیر پیشنهاد می گردد:
در دور اول: هر ۹۰ درجه چرخش برابر ۱.۴۲ درجه پیچش نمونه است.
در دور دوم و سوم: هر ۹۰ درجه چرخش برابر ۱.۴۲۵ درجه پیچش نمونه است.
در دور چهارم: هر ۹۰ درجه چرخش برابر ۱.۴۲۷۵ درجه پیچش نمونه است.
در دور پنجم و به بعد: هر ۹۰ درجه چرخش برابر ۱.۴۲۸۵ درجه پیچش نمونه است (هر میزان چرخش باید تقسیم بر ۶۳ شود تا پیچش نمونه بدست آید).
- ۳- تعداد دور پیچش را از روی نقاله و مقدار لنگر پیچشی را از دستگاه دیجیتالی خوانده و یادداشت کنید. (توجه داشته باشید بعد از هر بار خواندن زاویه پیچش، فرمان اعمال لنگر پیچشی را به صورت تدریجی در جهت عکس می چرخانیم تا مقدار لنگر پیچشی در دستگاه دیجیتالی دوباره صفر شود آن گاه زاویه

پیچش نمونه را می خوانیم. در صورتی که حداکثر مقدار بارگذاری تا آن لحظه در محدوده ارتجاعی باشد، زاویه پیچش نمونه باید صفر باشد. مشاهده عددی غیر از صفر به مفهوم ایجاد تغییر شکل ماندگار در نمونه است. بنابراین لنگر پیچشی و زاویه پیچشی مربوط، نشان دهنده حد حالت ارتجاعی خواهد بود. بعد از مشاهده تغییر شکل ماندگار، لازم نیست در انتهای هر گام دوباره دستگیره اعمال لنگر خمشی در جهت معکوس چرخانده شود.

۴- از این پس به جای خواندن زاویه پیچش، تعداد دورهای اهرم را از روی شمارنده دستگاه خوانده و همراه با گشتاور مربوط به آن یادداشت کنید. آزمایش را تا گسیختگی نمونه ادامه دهید.

نکته: این دستگاه دارای نمونه های بلند نیز است که برای تست آنها باید از سوکت های مخصوص و آچار آلن استفاده کرد. همچنین تعداد پیچش تا شکست این نمونه ها ممکن است تا صدها دور برسد.

۳-۹ خواسته های آزمایش

- ✓ از روی مقادیر، جدول و نمودار لنگر پیچشی را بر حسب زاویه پیچش رسم کنید.
- ✓ مقدار G (مدول برشی) را از آزمایش به دست آورید و با مقدار تئوری $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ مقایسه کنید.
- ✓ با استفاده از مشخصات مربوط به نقطه ارتجاعی خطی، مقدار تنش برشی تسلیم (τ_y) را با روابط موجود در تئوری آزمایش محاسبه کنید.
- ✓ با استفاده از مقدار لنگر پیچشی در لحظه گسیختگی، تنش برشی گسیختگی (τ_u) را به دست آورید.

$$\tau_u = \frac{3T_u}{2\pi R^3}$$

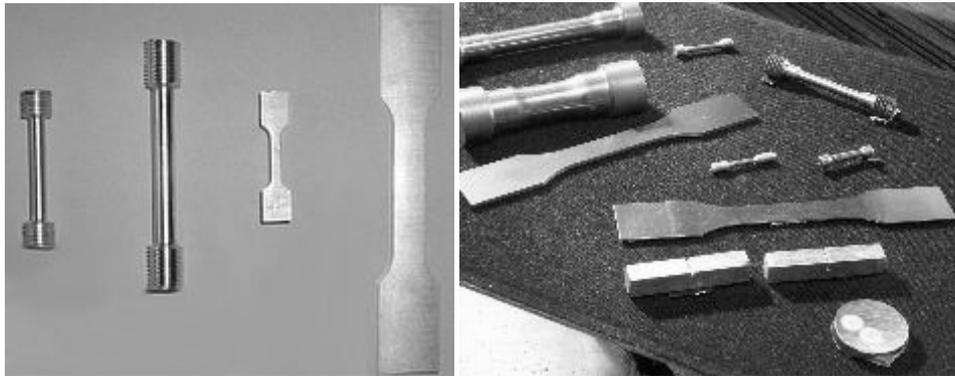
۱۰

آزمایش کشش
(Tensile Test)

۱-۱۰ مقدمه

تولید و استفاده از مواد صنعتی تا حد زیادی به خواص مکانیکی آنها در مقابل کشش، ضربه، فشار، پیچش و ... بستگی دارد لذا انجام یک سری آزمایش های استاندارد جهت تعیین رفتار مکانیکی مواد ضروری است.

آزمایش کشش از متداول ترین روش ها در بررسی خواص مکانیکی اجسام است که در این قسمت مورد مطالعه قرار می گیرد. در زیر تعدادی از نمونه های مختلف آزمایشگاهی و نمودارهای مختلف تنش- کرنش بدست آمده از تست کشش را ملاحظه می کنید.



شکل ۴۰ نمونه های تحت آزمایش کشش

۱-۱-۱۰ مبانی و تئوری کشش

۱-۱-۱-۱۰ تغییر بعد الاستیکی یا برگشت پذیر (Elastic Strain)

سیمي را تحت اثر نیروی کشش قرار می دهیم. با نیروی F طول این سیم از L_0 به L تغییر می کند و اضافه طوری برابر $\Delta L = L - L_0$ پدید می آید. اگر نیرو از مقدار معینی کمتر باشد پس از برداشتن نیرو، سیم به طول اولیه خود بازگشت می نماید. این حالت را حالت الاستیک برگشت پذیر می نامند و مادامی که نیرو از آن حد معین تجاوز نکند گفته می شود که سیم در حد الاستیک قرار دارد. در حد الاستیک برای بسیاری از اجسام، رابطه ی بین تغییر طول و نیرو خطی است. به عبارت دیگر اگر نیرو را دو برابر کنیم ($2F$) تغییر طول نیز دو برابر می شود ($2\Delta L$). ولی برای بعضی از اجسام دیگر مانند لاستیک و بعضی پلاستیک ها تغییرات طول نسبت به نیرو به صورت منحنی درمی آید. ولی در هر صورت اگر نیرو از حد الاستیک جسم کمتر باشد پس از برداشتن نیرو جسم به طول اولیه خود برمی گردد.

۱-۱-۱-۲ تغییر بعد پلاستیک یا دائم

وقتی جسم را بیش از حد الاستیک تحت نیرو قرار دهیم دچار تغییر بعد دائم یا پلاستیک می شود. که با برداشتن نیرو از بین نمی رود این حالت را حالت پلاستیک می نامند.

شاید مهمترین مشخصه‌ی فلزات این باشد که می‌توانند تغییر طول الاستیک و پلاستیک توامان داشته باشند. از این اجسام می‌توان در کاربردهایی مانند فنر استفاده کرد که مقدار نیرو کمتر از حد الاستیک است و با برداشتن نیرو چون تغییر طول دائمی ایجاد نشده است فنر حالت اولیه‌ی خود را بازمی‌یابد. همچنین می‌توانیم این اجسام را تحت نیروهای زیادتری قرار دهیم به طوری که تغییر شکل دائمی نموده و در نتیجه از آنها اشکال مختلفی بسازیم.

۱-۱-۱-۳ تنش مهندسی یا متوسط (Engineering stress)

نسبت نیروی وارده به سطح مقطع اولیه $\sigma = \frac{F}{A}$ است. واحد تنش در سیستم انگلیسی پوند بر اینچ مربع (psi) و در سیستم متریک نیوتن بر متر مربع (Pa) است (هر psi برابر با حدود ۶۸۹۵ Pa است).

۱-۱-۱-۴ تغییر بعد نسبی مهندسی متوسط (Engineering Stress)

نسبت تغییر طول به طول اولیه است. $\left(\frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}\right)$ واحد تغییر بعد نسبی معمولاً اینچ یا سانتی متر است و گاهی نیز به درصد طول اولیه بیان می‌شود.

۱-۱-۱-۵ رابطه‌ی بین تنش و تغییر بعد نسبی

برای فلزات و سرامیکها خطی است و با قانون هوک بیان می‌شود. در این رابطه E برای هر جسم ثابت و نمایانگر استحکام آن است و ضریب ارتجاعی Elastic Modulus خوانده می‌شود.

۱-۱-۱-۶ تنش حقیقی (True Stress)

نسبت نیروی وارد شده به سطح مقطع حقیقی نمونه است. (توجه داشته باشید که چون جسم کشیده می‌شود طول افزایش یافته سطح مقطع کم می‌شود)

۱-۱-۱-۷ تغییر بعد نسبی حقیقی (True Strain)

لگاریتم نسبت تغییر طول به طول اولیه‌ی نمونه در لحظه‌ی اندازه گیری است.

$$E_t = \ln\left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)$$

۱-۱-۱-۸ کاهش سطح مقطع

درصد تغییر سطح نمونه نسبت به سطح مقطع اولیه است.

$$R.F = \frac{A - A_0}{A_0} \times 100$$

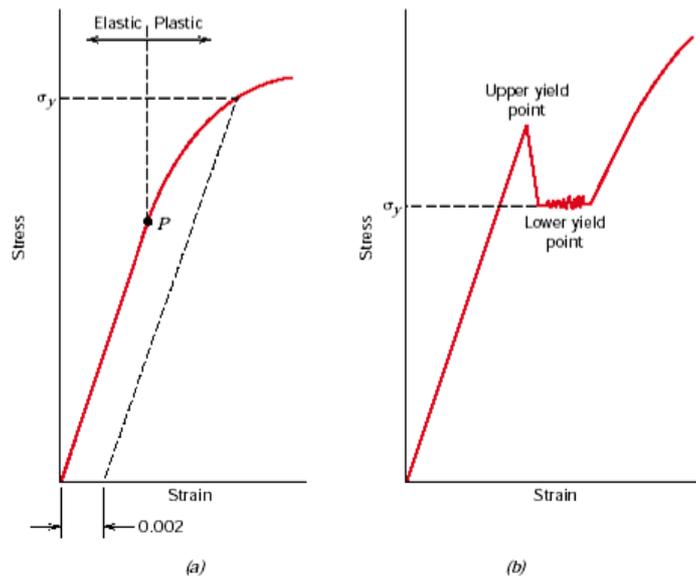
۱-۱-۱-۱۰ ضریب مماسی (Tangent Module)

عبارت است از ضریب زاویه‌ی منحنی تنش-تغییر طول نسبی در ناحیه‌ی پلاستیک

$$T.M. = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

۱-۱-۲-۱۰ نقاط مهم منحنی تنش-تغییر طول نسبی

نقاط مهم منحنی تنش کرنش در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۴۱ منحنی تنش کرنش و نقاط مهم آن

۱-۲-۱-۱۰ حد ارتجاعی (Elastic Limit)

نقطه‌ای است روی منحنی که رفتار جسم را از حالت الاستیک منحرف می‌شود و از آن پس تغییر بعد دائمی آغاز می‌شود. آخرین نقطه‌ای را که منحنی به صورت خطی است گاهی حد تناسب (Proportion Of Limit) می‌نامند و در مواردی ممکن است با حد ارتجاعی مقداری فرق داشته باشد.

۱-۲-۱-۱۰ نقطه‌ی تسلیم (Yield Point)

نقطه‌ای است روی منحنی که در آن نقطه رفتار جسم از الاستیک وارد مرحله‌ی پلاستیک می‌شود بنابراین در تنش‌های کمتر از تنش تسلیم تغییر شکل ارتجاعی (برگشت پذیر) است و هرگاه تنش وارد شده از تنش تسلیم جسم بیشتر شود تغییر شکل دائمی یا پلاستیک ایجاد می‌شود. در برخی فلزات مانند فولاد کم کربن نقطه‌ی تسلیم مشخص وجود دارد که به صورت حد تسلیم بالا و پایین ظاهر می‌شود ولی در اکثر فلزات انتقال از منطقه‌ی الاستیک به پلاستیک به تدریج صورت گرفته حد تسلیم مشخص وجود ندارد و از روش-

های قراردادی استفاده می‌کنند که معمول‌ترین آنها روش مقاومت تسلیم در ۰/۲٪ است. (Offset Yield Strength) است که عبارت است از تنش در ۰/۰۰۲ (یا ۰/۲ درصد) تغییر طول پلاستیکی. توجه به این نکته لازم است که در بیشتر موارد استفاده‌های مهندسی از مواد باید تحت شرایطی باشد شرایطی باشد که تنش وارد شده کمتر از نقطه‌ی تسلیم باشد.

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0}$$

۱-۱-۲-۲ مقاومت کشش (Ultimate Tensile Strength)

نقطه‌ی ماکزیمم منحنی است و مشخص کننده‌ی بزرگترین تنشی است که جسم می‌تواند قبل از باریک شده (Necking) تحمل کند. و در این تنش نمونه در نقطه‌ای از طول خود مقاومتش را از دست داده باریک می‌شود. با این باریک شدن با نیروی کمتری ادامه می‌یابد تا به شکستن جسم منتهی شود.

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{A_0}$$

۱-۱-۲-۳ گسیختگی یا شکست (Fracture)

پس از مقداری باریک شدن اتفاق می‌افتد. در موارد اجسام ترد مانند چدن، قبل از شروع تغییر شکل پلاستیکی شکست واقع می‌شود حال آنکه فلزات نرم مانند مس یا آلومینیوم تغییر شکل زیادی را نشان داده و پس از باریک شدن زیاد شکسته می‌شوند.

۱-۱-۳ دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش از قسمت‌های زیر تشکیل شده است:

۱. جک هیدرولیک دستگاه
۲. محل نمونه‌ی آزمایش
۳. حسگر نیرو
۴. تنظیم کننده ارتفاع فک پایین با قفل ایمنی
۵. قاب دستگاه
۶. نمایشگرها و کنترل کننده‌ها
۷. حسگر مکان



شکل ۴۲ دستگاه آزمایش کشش

۱۰-۲ روش آزمایش**۱۰-۲-۱ هدف آزمایش**

تعیین مقاومت و مطالعه‌ی رفتار اجسام در برابر نیروی کشش و به طور اختصاصی در کمیت‌های:

۱. ضریب یانگ
۲. تنش حد تناسب
۳. حد تسلیم بالایی و پایینی
۴. استحکام کششی یا حد مقاومت U.T.S
۵. تنش در 0.2% برای اجسامی که نقطه‌ی تسلیم مشخصی ندارند.
۶. تنش شکست یا جد انقطاع
۷. درصد ازدیاد طول در نقطه‌ی شکست
۸. درصد کاهش سطح مقطع در نقطه‌ی شکست
۹. نوع شکست نمونه

۱۰-۲-۲ دو نکته‌ی مهم در انجام آزمایش شکست

۱. سرعت انجام آزمایش از موارد مهم است و برای جسم مورد آزمایش باید این سرعت معلوم باشد. این موضوع در اجسام نرم و همچنین اجسام در دمای بالا اهمیت بالایی دارد. در مواقعی که سرعت آزمایش زیاد باشد تنش کشش نهایی زیاد می‌شود و درصد ازدیاد طول کم می‌شود. در این دستگاه کشش این موضوع در نظر گرفته شده و سرعت انجام آزمایش قابل تنظیم است.
۲. دمای آزمایش باید بین ۱۰ الی ۳۰ درجه‌ی سانتیگراد انجام پذیرد.

۱۰-۳ دستور کار انجام آزمایش

۱. اتصال دستگاه به برق و کامپیوتر را چک کرده و نرم افزار دستگاه را اجرا کنید.
۲. ابعاد نمونه را اندازه‌گیری نمایید.
۳. با اجرای نرم افزار از گزینه Setting تخت یا گرد بودن نمونه را تعیین و با توجه به آن ابعاد نمونه را وارد و نوع ماده را تعیین کنید. زمان نمونه‌گیری را نیز یک ثانیه انتخاب کنید.
۴. دستگاه را با کلید اصلی روشن کرده و سپس کلید سبز روشن شدن هیدرولیک را فشار دهید.
۵. عقربه‌ی سرعت را بین ۱ و ۲ (معادل بین ۲۵ تا ۵۰ میلیمتر در دقیقه) و نیرو را روی عدد ۴.۸ (معادل حداکثر بار ۵۰ کیلونیوتن) تنظیم کنید.
۶. با پایین آوردن جک هیدرولیک، فاصله دو فک بالا و پایین را حدود ۱۰ سانتی متر تنظیم کنید.
۷. با استفاده از اهرم‌ها، دهانه فک بالا و پایین را باز کنید.

۸. ابتدا نمونه را در فک بالا به اندازه ۸۰٪ ارتفاع گوه وارد کرده و اهرم قفل شونده آن را فشار دهید تا نمونه محکم شود.
۹. سپس با پایین آوردن آرام فک هیدرولیک بالا و اطمینان از قرار گیری نمونه در فک پایین، تا ۸۰٪ ارتفاع گوه نمونه را داخل فک قرار دهید.
۱۰. از گزینه Files/New Series سری داده جدیدی را نام گذاری کنید. دکمه Tare را فشار دهید تا پیش بار اولیه بر نمودار اعمال شود. سپس با فشار دادن دکمه Take Continuous Record ثبت داده ها آغاز می شود.
۱۱. با فشار دادن و نگه داشتن دکمه حرکت به بالای جک هیدرولیک، آزمایش را انجام دهید.
۱۲. بارگذاری را تا گسیختگی قطعه ادامه دهید. دکمه Stop Continuous Recording را فشار دهید تا داده برداری متوقف شود.
۱۳. نمونه را برداشته دوتکه‌ی آن را روی هم نگه دارید و طول نهایی بین دوعلامت انبساط سنج را اندازه گیری کنید.
۱۴. قطر لاغرشدگی را اندازه بگیرید.
۱۵. آزمایش را برای نمونه‌ای دیگر (فولاد کم کربن) تکرار کنید.
۱۶. داده های بدست آمده را از طریق Files/Save Series ذخیره کنید (فرمت داده *.dat است). فایل ذخیره شده قابل خواندن با نرم افزار Notepad و Excel است.
۱۷. همچنین منحنی و جدول تنش کرنش اسمی را از طریق Files/Print Graph و Files/Print Table ذخیره کنید.

۴-۱۰ خواسته های آزمایش

- ✓ با استفاده از داده های نیرو جابجایی تست، نمودار تنش کرنش را رسم کنید.
- ✓ داده های زیر را تکمیل کنید.

طول نمونه	طول اولیه	قطر اولیه	سطح مقطع اولیه	طول ثانویه	قطر ثانویه	سطح مقطع ثانویه

- ✓ برای نمونه های مختلف مقادیر تنش نقطه تسلیم، مقاومت کشش نهایی، حد الاستیک، حد خطی، درصد ازدیاد طول، درصد کاهش در سطح مقطع و مدول یانگ را بدست آورید.

ضریب ارتجاعی E	σ_{ut}	σ_{yield}	درصد کاهش سطح مقطع	درصد ازدیاد طول	نوع نمونه

۱۱

کمانش تیر اویلری
(Euler Buckling Test)

۱-۱۱ مقدمه

هدف در این قسمت پایداری سازه می باشد یعنی توانایی سازه در نگهداری بار مفروض بدون ایجاد تغییر ناگهانی در پیکر بندی سازه می باشد. در اینجا ما سعی در بررسی سازه های ستونی یعنی تحلیل و طراحی تیرهای عمودی (ستون) که بارهای محور عمودی را تحمل می کند. شروع کمانش یک قسمت مهم در علم مهندسی می باشد. چند مورد از کاربردهای کمانش در مهندسی عبارت است از:

- میله سیلندرهای هیدرولیکی
- میل پیچ های در چرخنده های بالا برنده،
- ستون های ساختمان و ...

۱۱-۲ هدف آزمایش

- آشنایی با تکیه گاه های مختلف و مقایسه آنها با یکدیگر
- بررسی کمانش ستونها و یافتن طول موثر I_e
- نیروی بحرانی (P_{cr}) در شرایط مرزی مختلف

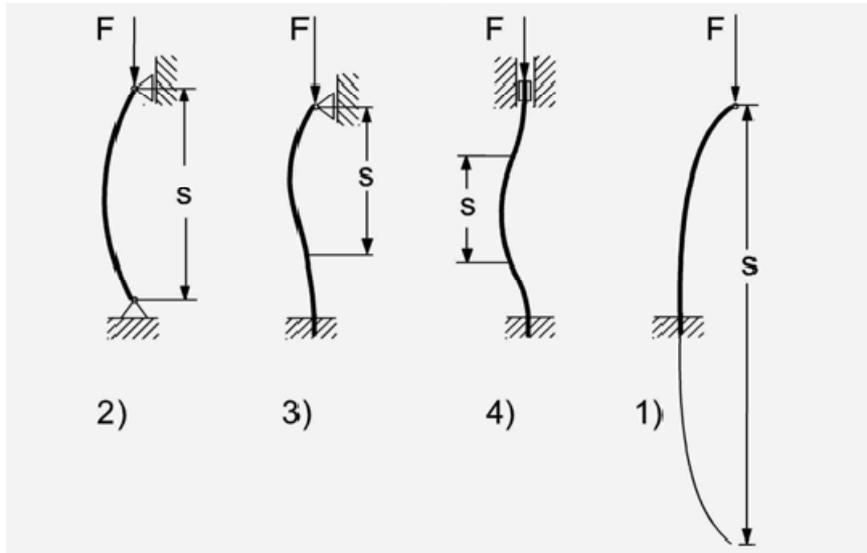


شکل ۴۳ دستگاه آزمایش کمانش

۱۱-۳ تئوری آزمایش

اگر تیری داشته باشیم و بخواهیم میزان کمانش آن را اندازه گیری کنیم ابتدا بروی ستون بارهای گوناگونی قرار داده و میزان انحراف ستون را از حالت قائم بوسیله ساعت اندیکاتور اندازه گیری می کنیم و میزان کمانش را با توجه به روابط استاتیکی محاسبه می کنیم. در اینجا بیشتر بحث آشنایی با تکیه گاه های مختلف و مقایسه آنها با یکدیگر است، به همین علت از ساعت اندیکاتور استفاده نمی شود.

با قرار دادن وزنه های مختلف در ستونهایی با تکیه گاههای متفاوت نتایجی را مشاهده می نماییم. بار بحرانی عملی، مقدار وزنه ای است که در آن به ازای کمترین مقدار بار، ستون کاملاً کمانش کرده و دیگر باری را تحمل نکند. در شکل زیر تکیه گاه های مختلف به همراه طول موثر هر یک نشان داده شده است.



شکل ۴۴ شرایط تکیه گاهی مختلف آزمایش کمانش

بار بحرانی هر نوع تکیه گاه بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{Le^2} = \frac{\pi^2 EI}{L} = P_0$$

۱- ستون دو سر مفصل (شکل شماره ۲):

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{Le^2} = \frac{\pi^2 EI}{(0.5L)^2} = 4P_0$$

۲- ستون دو سر درگیر (شکل شماره ۴):

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{Le^2} = \frac{\pi^2 EI}{(0.7L)^2} = 2.04P_0$$

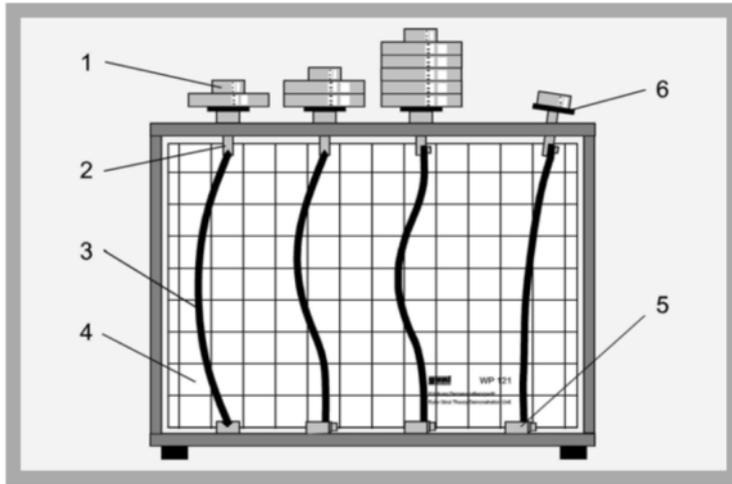
۳- ستون یک سر مفصل و یک سر درگیر (شکل شماره ۳):

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{Le^2} = \frac{\pi^2 EI}{(2L)^2} = 0.25P_0$$

۴- ستون یک سر درگیر و یک سر آزاد (شکل شماره ۱):

۱۱-۴ توضیح دستگاه آزمایش

از این دستگاه می توان برای دو منظور آشنایی با تکیه گاه ها و یا انجام آزمایش استفاده شود. بخش های مختلف دستگاه عبارتند از:



شکل ۴۵ کمانش در شرایط تکیه گاهی مختلف

۱-وزنه ها

۲-تکیه گاه ساده (پین)

۳-تیرها

۴-صفحه نشان دهنده میزان کمانش

۵-تکیه گاه گیردار

۶-پایه وزنه

لازم به ذکر است که ۴ ستون در این آزمایش استفاده می شود که طول آنها ۱۸۰ میلیمتر و عرض مقطع آنها ۰.۵ در ۱۲ میلیمتر است. همچنین جنس ستونها نیز، فولاد ۱.۴۳۱۰ سرد کاری شده است ($E=210\text{Gpa}$).

۱۱-۵ شرح آزمایش

- ابتدا ستون ها و تکیه گاه های مربوط را همانند شکل نصب کنید.
- حال از وزنه ۱ نیوتنی شروع کرده و آن را روی همه تکیه گاه ها امتحان کنید.
- در هر مرحله اعمال بار کمانش را بررسی کرده و در صورت رخ دادن در جدول زیر علامت زده و مقدار بار بحرانی را مشخص کنید.
- در صورتی که کمانش رخ نداد بار را کم کم و با استفاده از وزنه های ۱، ۲ و یا ۵ نیوتنی افزایش دهید تا در همه ستون ها کمانش رخ دهد.

۱۱-۶ خواسته های آزمایش

- بار کمانش ستون ها را به صورت عملی بدست آورید.
- با استفاده از روابط تئوری، بار بحرانی را بدست آورده و با مقدار عملی مقایسه کنید.
- بیشترین و کمترین بار بحرانی برای چه ستون هایی رخ می دهد؟
- در طراحی ستون، وجود چه تکیه گاهی مقاومت به کمانش را افزایش می دهد؟

خطا (%)	$P_{cr}(N)$ تئوری	$P_{cr}(N)$ عملی	نوع ستون
			دو سر مفصل
			دو سر درگیر
			یک سر مفصل یک سر درگیر
			یک سر درگیر یک سر آزاد

١٢

مخزن جدار ضخيم تحت فشار داخل (Thick-Walled Cylinder)

۱-۱۲ مقدمه

مخازن تحت فشار از جمله تجهیزاتی هستند که در شاخه نفت و پتروشیمی و در اغلب صنایع اصلی نظیر نیروگاه و حمل و نقل از کاربرد ویژه و قابل توجهی برخوردار بوده و از این رو توجه به مقوله طراحی و ساخت و تست آنها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. مخزن تحت فشار طبق استاندارد ASME SEC VIII به مخازنی گفته می شود که فشار طراحی داخل آن بیش از ۱۵ psi و کمتر از ۳۰۰۰ psi باشد. این مخازن فلزی معمولاً استوانه‌ای یا کروی برای نگه داری و یا انجام فرآیندهای شیمیایی مایعات و یا گازها می باشند که توانایی مقاومت در برابر بارگذاری‌های مختلف (فشار داخلی یا فشار خارجی و خلا در داخل) را دارا می باشند. استاندارد اصلی برای طراحی این مخازن ASME SECTION VIII می باشد که توسط انجمن مهندسين مکانیک آمریکا تدوین شده و هر چهار سال یکبار مورد بازنگری قرار می گیرد. معیار تبعیت از این استاندارد بیشتر بودن فشار داخلی مخزن از ۱۵psi می باشد. کاربرد عمده این مخازن در صنایع نفت و گاز می باشد اما کاربردهای گوناگون این مخازن در بخش صنعتی، نظامی، غذایی و ... می باشد. این مخازن برای ذخیره هوای فشرده و مخازن آب داغ خانگی کاربرد دارد. نمونه های دیگر از کاربرد آن می توان مخازن تحت فشار استوانه غواصی، برج های تقطیر، اتوکلاو، پالایشگاه های نفت و پتروشیمی، راکتورهای هسته ای، زیر دریایی و کشتی فضایی، مخازن پنوماتیکی و هیدرولیکی تحت فشار، مخازن کیسه هوای خودرو و مخازن ذخیره سازی گاز مایع، مانند آمونیاک، کلر، پروپان، بوتان و LPG نام برد.

مخازن تحت فشار برای اینکه کارکردی ایمن داشته باشند در فشار و دمای ویژه ای طراحی میشوند که اصطلاحاً فشار طراحی و دمای طراحی گفته می شود. طراحی و ساخت اینگونه تجهیزات تحت فشار بدون اصول و استفاده از کدها و استانداردهای طراحی بسیار خطرناک و حادثه آفرین خواهد بود. در تئوری هر ماده ای با تحمل تنش کششی بالا و خاصیت های کششی مناسب میتواند در ساخت مخازن به کار گرفته شود، اما استاندارد های ساخت ASME BPVC SECTION II لیستی از بهترین مواد و محدودیت دما و فشار آن ها را مشخص کرده است.

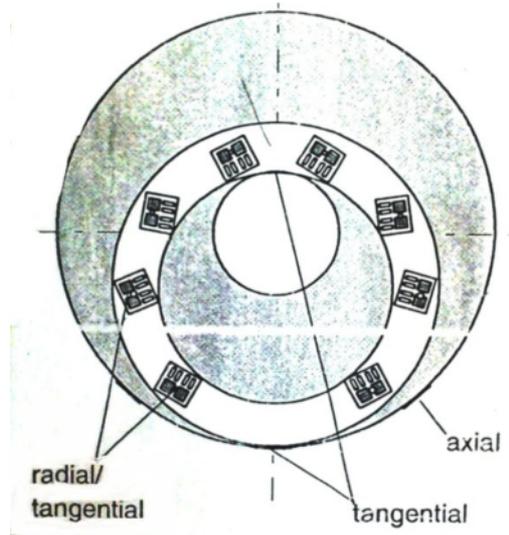
دسته بندی مخازن تحت فشار بر چند اساس می تواند صورت بگیرد: شکل، فشار و ضخامت جداره. از نظر شکل، مخازن به دسته های استوانه ای، کروی و ... تقسیم می شود. بر اساس فشار مخازن به مخزن تحت فشار داخلی و مخزن تحت فشار خارجی طبقه بندی می شود. مخازن بر اساس ضخامت جداره، به دو دسته مخازن جدار نازک و جدار ضخیم تقسیم می شوند. در مخازن جدار نازک نسبت ضخامت پوسته به قطر کمتر از ۰.۵٪ است. در مخازن جدار ضخیم نسبت ضخامت پوسته به قطر بیشتر از ۰.۵٪ است.

۱۲-۲ هدف آزمایش

بررسی تجربی تنش و کرنش در سیلندر جدار ضخیم و مقایسه نتایج با مقادیر تحلیلی

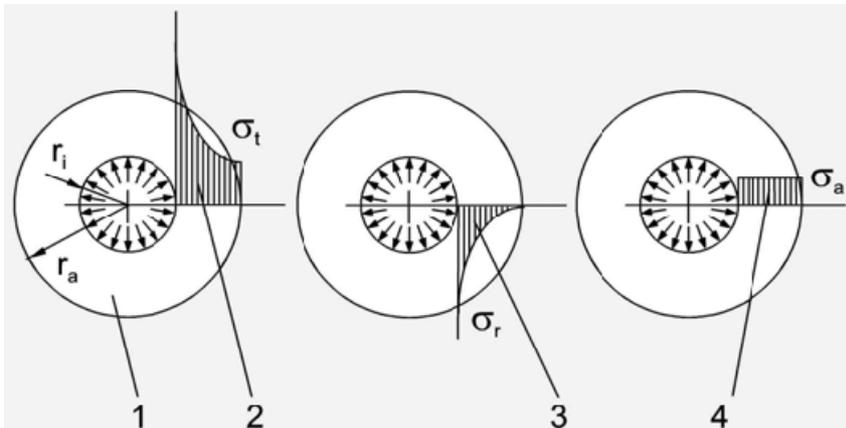
۱۲-۳ مبانی و تئوری آزمایش مخزن جدار ضخیم تحت فشار داخل

آزمایش مخزن جدار ضخیم تحت فشار داخل، به بررسی ارتباط تنش و کرنش نمونه ی آزمایش با میزان فشار اعمالی و مقایسه ی نتایج با مقادیر تحلیلی می پردازد. این آزمایش با فشارهای مختلفی انجام می شود. مقادیر کرنش های مرتبط با این فشارها توسط کرنش سنج اندازه گیری می شود. این کرنش سنج ها به گونه ای قرار گرفته اند که کرنش در جهت ها و شعاع های مختلف اندازه گیری شود. کرنش در جهات شعاعی، مماسی و محوری توسط این کرنش سنج ها اندازه گیری می شود.



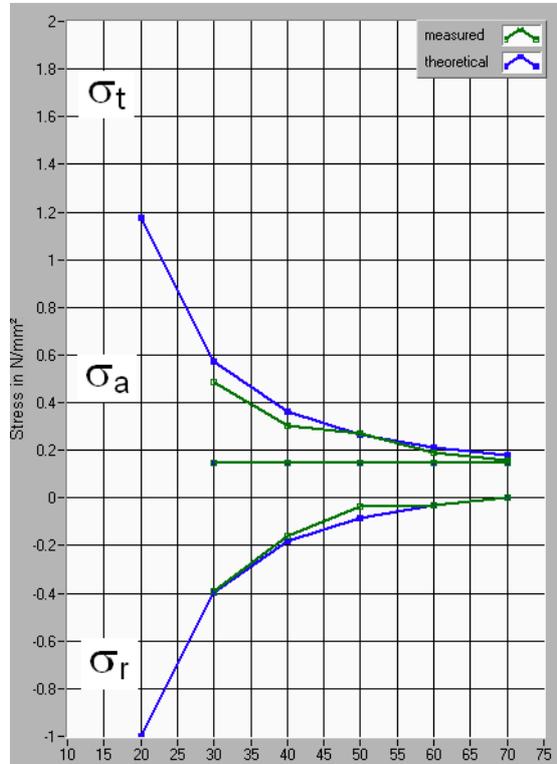
شکل ۴۶ نحوه ی قرار گیری کرنش سنج ها در شعاع

برای هر فشار اعمال شده یک منحنی تجربی تنش شامل تنش مماسی، شعاعی و محوری حاصل می شود. توزیع تنش های شعاعی، مماسی و محوری در یک سیلندر جدار ضخیم تحت فشار داخل به شکل زیر می باشد.



شکل ۴۷ توزیع تنش در مخزن جدار ضخیم، به ترتیب از راست: محوری، شعاعی، مماسی

مقادیر تجربی به دست آمده از این دستگاه، با مقادیر تئوری حاصل از فرمول ها مقایسه می شوند. نمودار زیر یک نمونه از منحنی تنش واقعی و تئوری را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود مطابقت خوبی بین نمودار تحلیلی و تجربی وجود دارد.



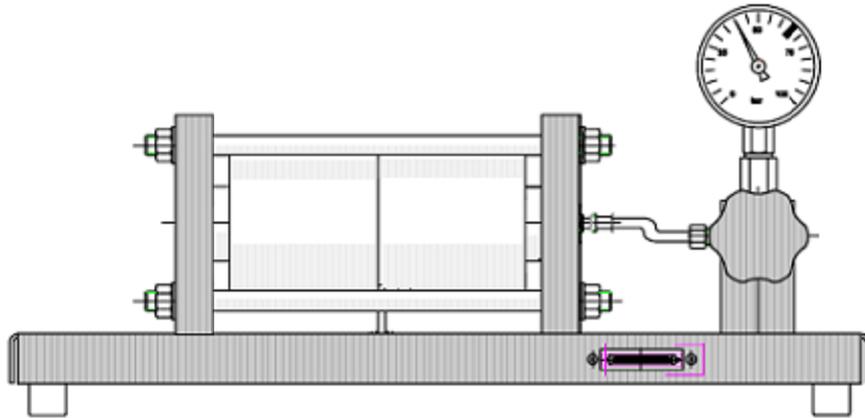
شکل ۴۸ منحنی تنش کرنش تجربی و تحلیلی

به طور کلی با استفاده از دستگاه آزمایش سیلندر جدار ضخیم تحت فشار داخل، موارد ذیل قابل حصول است.

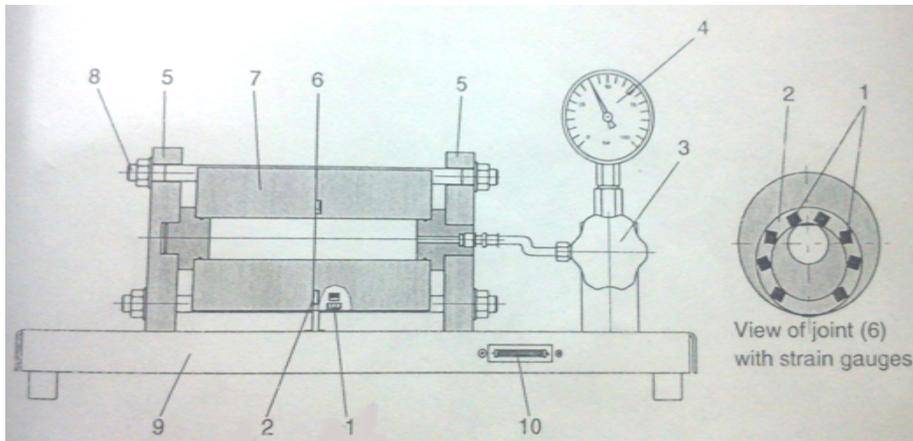
- ۱- اندازه گیری کرنش با استفاده از کرنش سنج ها
- ۲- توزیع تنش در مخزن جدار ضخیم تحت فشار داخل
- ۳- ارتباط بین تنش و کرنش و فشار اعمالی
- ۴- دایره مور تنش و کرنش

۴-۱۲ دستگاه آزمایش

طرحواره‌ای از دستگاه آزمایش و اجزای آن در شکل زیر نشان داده شده است:



شکل ۴۹ طرحواره دستگاه



شکل ۵۰ دستگاه آزمایش سیلندر جدار ضخیم به تفکیک اجزا

۱. کرنش سنج
۲. شکاف
۳. پمپ هیدرولیکی
۴. فشارسنج
۵. صفحه ی پوشاننده
۶. محل اتصال
۷. استوانه ی اندازه گیری
۸. میله ی مهر
۹. صفحه ی زیرین
۱۰. محل اتصال کابل

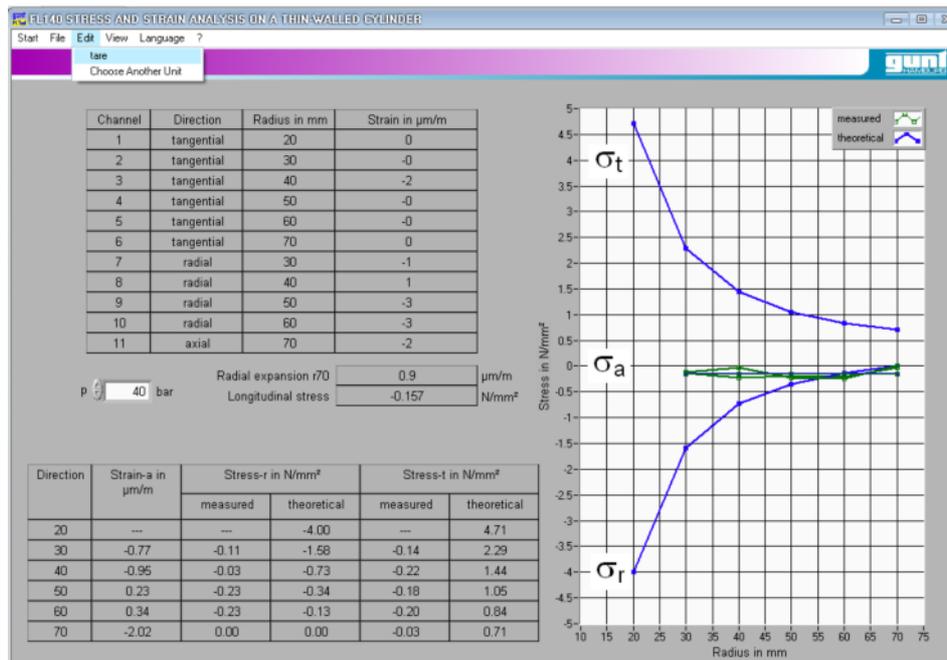
- تذکر ۱: شکل سمت راست نمایی از محل اتصال کرنش سنج ها را نشان می دهد.
- تذکر ۲: مخزن جدار ضخیم از آلومینیوم با مدول الاستیسیته ۷۲۰۰۰ نیوتون بر میلیمتر مربع و ضریب پواسون ۰/۳۳ ساخته شده است.
- تذکر ۳: کرنش سنج بسیار حساس است. به آن دست نزنید!
- تذکر ۴: فشار دستگاه به هیچ وجه نباید از ۷۰ بار بیشتر شود.
- تذکر ۵: طول مخزن ۳۰۰ میلیمتر، قطر آن ۱۴۰ میلیمتر و ضخامت دیواره آن ۵۰ میلیمتر است.

۱۲-۵ روش آزمایش

- ۱- دستگاه را از طریق کابل های مربوطه به آمپلی فایر و کامپیوتر وصل کنید.

۲- نرم افزار را اجرا کنید و کلید پاور آمپلی فایر را روشن کنید. سپس ۳۰ دقیقه صبر کنید تا دستگاه گرم شود.

۳- کالیبره کردن دستگاه: دسته پمپ را در جهت پادساعتگرد بچرخانید تا فشار گیج صفر شود. در این حالت از منوی Edit نرم افزار گزینه ی tare را بزنید. با این کار تنش و کرنش صفر توسط نرم افزار حالت صفر (کالیبره) در نظر گرفته می شود.



شکل ۵۱ نرم افزار دستگاه و کالیبره کردن آن

۴- انجام آزمایش: دسته پمپ را در جهت ساعتگرد بچرخانید تا گیج فشار ۱۰ بار را نشان دهد. در این حالت فشار نرم افزار را هم روی ۱۰ بار قرار دهید.

۵- حال از پنجره نرم افزار مقدار کرنش های کانال را از جدول سمت چپ بالا و مقادیر تنش شعاعی و مماسی را از جدول سمت چپ پایین بخوانید و در جدول زیر یادداشت کنید.

۶- این آزمایش را برای فشارهای ۲۰، ۴۰ و ۵۰ تکرار کنید و جدول را پر کنید.

تذکر: آزمایش برای فشار ۳۰ بار انجام شده و مقادیر تنش و کرنش آن در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مقادیر کرنش

کرنش در فشار ۵۰ بار ($\mu\text{m}/\text{m}$)	کرنش در فشار ۴۰ بار ($\mu\text{m}/\text{m}$)	کرنش در فشار ۳۰ بار ($\mu\text{m}/\text{m}$)	کرنش در فشار ۲۰ بار ($\mu\text{m}/\text{m}$)	کرنش در فشار ۱۰ بار ($\mu\text{m}/\text{m}$)	شعاع (mm)	شماره کانال و نوع کرنش
		۶۳			۲۰	۱) مماسی
		۳۰			۳۰	۲) مماسی
		۱۷			۴۰	۳) مماسی
		۱۱			۵۰	۴) مماسی
		۸			۶۰	۵) مماسی
		۶			۷۰	۶) مماسی
		-۳۲			۳۰	۷) شعاعی
		-۱۵			۴۰	۸) شعاعی
		-۳			۵۰	۹) شعاعی
		-۷			۶۰	۱۰) شعاعی
		۴			۷۰	۱۱) محوری

جدول ۲- تنش های شعاعی و مماسی در یک مخزن جدار ضخیم برای فشار ۳۰ بار

تنش مماسی N/mm^2		تنش شعاعی N/mm^2		شعاع
تئوری	اندازه گیری شده	تئوری	اندازه گیری شده	
۳/۵۳	-----	-۳	-----	۲۰
۱/۷۲	۱/۶۶	-۱/۱۹	-۱/۰۷	۳۰
۱/۰۸	۱/۱۱	-۰/۵۵	-۰/۳۸	۴۰
۰/۷۹	۱/۰۵	-۰/۲۶	۰/۰۳	۵۰
۰/۶۳	۰/۶۶	-۰/۱۰	-۰/۰۸	۶۰
۰/۵۳	۰/۵۶	۰	۰	۷۰

جدول ۳- تنش های شعاعی و مماسی در یک مخزن جدار ضخیم فشار = ---- بار

تنش مماسی N/mm^2		تنش شعاعی N/mm^2		شعاع
تئوری	اندازه گیری شده	تئوری	اندازه گیری شده	
				۲۰
				۳۰
				۴۰
				۵۰
				۶۰
				۷۰

۱۲-۶ خواسته های آزمایش

✓ مقادیر تنش شعاعی و مماسی تئوری را از فرمول های زیر محاسبه و با نتایج آزمایش مقایسه کنید.

$$\sigma_{r,theory}(r) = -P_i \frac{r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \left(\frac{r_a^2}{r^2} - 1 \right), \quad \sigma_{t,theory}(r) = -P_i \frac{r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \left(\frac{r_a^2}{r^2} + 1 \right)$$

✓ نمودار تغییرات تنش شعاعی و مماسی در راستای شعاع را رسم کنید.

✓ با استفاده از روابط بالا تنش های مخازن جدار نازک را بدست آورده و با مخازن جدار ضخیم

مقایسه کنید (راهنمایی: در روابط بالا مقدار شعاع داخلی و خارجی را یکسان در نظر بگیرید).

منابع

[۱] دستور کار آزمایشگاه فیزیک / دانشگاه کاشان / پاییز ۸۹

[۲] دستور کار آزمایشگاه فیزیک / دانشگاه صنعتی اصفهان / پاییز ۸۵

[۳] www.tms.org

[۴] www.doitpoms.ac.uk

[۵] www.saarstahl.com

[۶] www.tms.org

[۷] www.mscsoftware.com

[۸] www.apl-inc.net

[۹] www.abitabout.com

[۱۰] www.fgg.uni-lj.si

[۱۱] www.open.ac.uk

[۱۲] کاتالوگ های شرکت گنت آلمان (Gunt)