

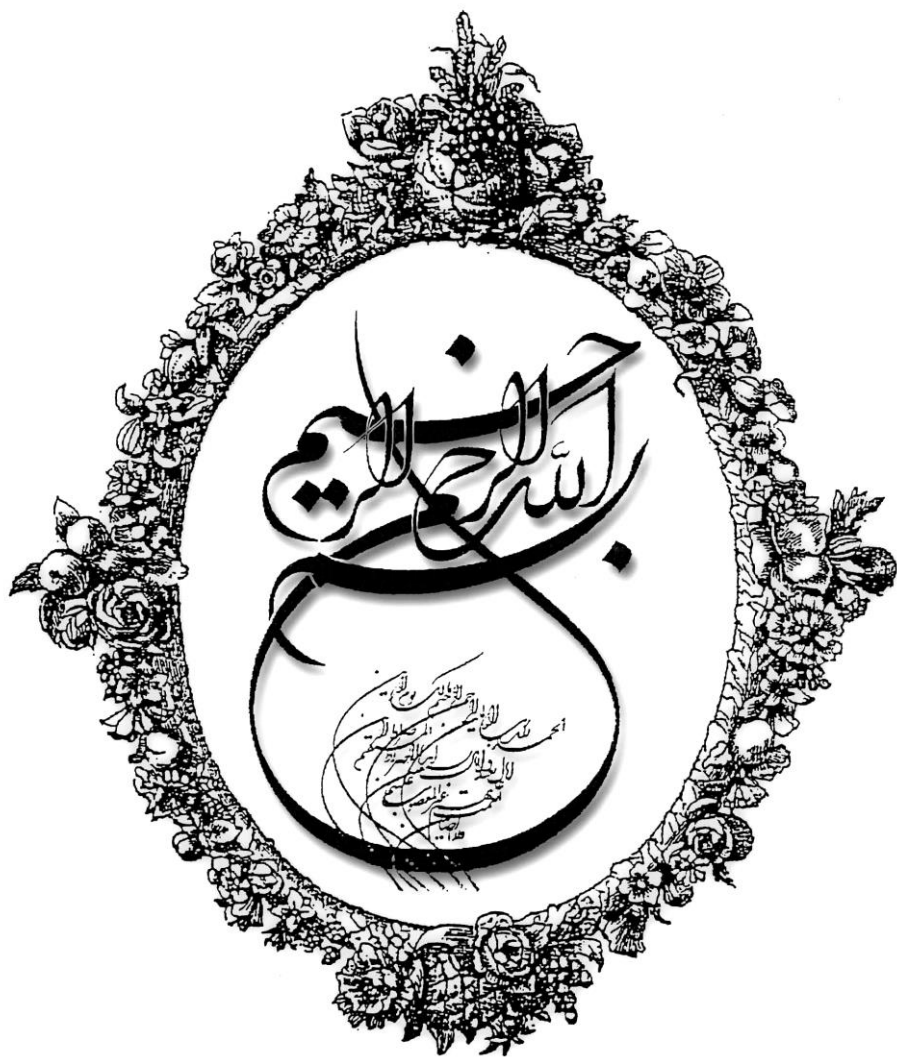


دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

جزوه آزمایشگاه مقاومت مصالح

نویسنده: مهندس حسین مقبل

ویرایش: مائده رنجبر - محمد سیلانی



فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۱.....	مقدمه
۲.....	الف- آزمایش های تخریبی ماده
۴.....	ب- آزمایش های غیر تخریبی
۸.....	آزمایش ۱: خستگی Fatigue Life Prediction Testing
۹.....	مقدمه
۹.....	مبانی بارگذاری خستگی
۱۳.....	۱- دستگاه آزمایش (MT 3012)
۱۴.....	۲- قطعات مورد آزمایش
۱۴.....	۳- روش انجام آزمایش
۱۴.....	محکم کردن نمونه مورد آزمایش
۱۵.....	چگونگی انجام آزمایش
۱۵.....	۴- شرح آزمایش
۱۷.....	۵- نحوه انجام محاسبات و به دست آوردن نتایج
۲۰.....	۶- سوالات
۲۱.....	آزمایش ۲: سختی Hardness Experiments
۲۲.....	مقدمه
۲۲.....	۱- آزمایش برینل برای تعیین سختی یک ماده
۲۵.....	۲- آزمایش Vickers
۲۶.....	۳- آزمایش راکول
۲۸.....	ضمائم
۲۸.....	ضمیمه الف
۲۸.....	ضمیمه ب
۲۸.....	ضمیمه ج
۳۰.....	ضمیمه د
۳۱.....	آزمایش ۳: اندازه گیری کرنش خطی Linear Strain Measurment
۳۲.....	مقدمه
۳۲.....	۱- روش های مهم اندازه گیری کرنش
۳۲.....	روش اول: روش های نوری (Optical methods)
۳۳.....	روش دوم: زنگ (لاک) ترد (Brittle Lacquer)
۳۳.....	روش سوم: استفاده از کرنش سنج ها (Strain gauges)
۳۵.....	۲- پل اندازه گیر کرنش (Strain Gauge Bridge MT 3004)

- ۳- دستگاه آزمایش ۳۶
- ۴- روش آزمایش کرنش، با راهنمای استفاده از اندازه گیر کرنش (Strain Gauge Briage MT3004) ۳۶
- ۵- نحوه انجام محاسبات و به دست آوردن نتایج ۳۶
- ۶- سوالات ۳۷

آزمایش ۴: اندازه گیری کرنش و تنش در استوانه ها ۳۸

- قسمت اول: استوانه جدار نازک تحت فشار ۳۹
- مقدمه ۳۹
- ۱- مبانی و تئوری استوانه های جدار نازک ۳۹
- الف- تجزیه و تحلیل تنش و کرنش در حالت کلی ۳۹
- ۲- دستگاه آزمایش و عملکرد آن ۴۵
- ۳- روش انجام آزمایش ۴۹
- ۴- نحوه انجام محاسبات و به دست آوردن نتایج ۵۰
- محاسبه ضریب پوآسون و محاسبه کرنش های اصلی ۵۰
- سوالات ۵۲
- قسمت دوم: استوانه جدار ضخیم ۵۳
- مقدمه ۵۳
- ۱- بررسی تئوری کرنش و تنش در استوانه جدار ضخیم ۵۳
- ۱-۱- تنش و کرنش صفحه ای ۵۳
- ۱-۲- معادلات تعادل در حالت تنش صفحه ای در مختصات استوانه ای ۵۳
- ۱-۳- معادلات تعادل در صورت وجود تقارن محوری ۵۵
- ۱-۴- روابط کرنش ها بر حسب تغییر مکان، در مختصات استوانه ای ۵۶
- ۱-۵- روابط کرنش ها در صورت وجود تقارن محوری ۵۸
- ۱-۶- توزیع تنش در استوانه جدار ضخیم ۵۸
- ۱-۷- تنش در استوانه تحت فشار با درپوش های انتهایی ۵۹
- ۱-۸- تنش ها در استوانه ای که در انتهایش پیستون قرار گرفته است ۶۱
- ۱-۹- بررسی تئوریک مسئله مورد آزمایش ۶۲
- ۱-۱۰- روابط کرنش ها و تنش ها در مختصات کارترین و استوانه ای ۶۵
- ۲- محاسبات کرنش ها با توجه به دستگاه آزمایش ۶۶
- ۲-۱- کرنش های حلقوی ۶۶
- ۲-۲- کرنش های شعاعی ۶۶
- ۲-۳- کرنش های طولی ۶۶
- ۳- محاسبات تنش ها با توجه به دستگاه آزمایش: ۶۶
- ۴- دستگاه آزمایش ۶۷
- ۴-۱- استوانه جدار ضخیم ۶۷

- ۲-۴ مشخصات دیگر دستگاه آزمایش به شرح زیر است ۶۹
- ۳-۴ آشنایی با دستگاه اندازه گیری کرنش دیجیتالی (E10 MK II) ۶۹
- ۴-۴ اتصال کرنش خوان به یک واحد ۱۶ کلیدی ۷۱
- ۵- روش انجام آزمایش ۷۱
- ۶- نحوه انجام محاسبات و به دست آوردن نتایج ۷۴
- ۷- سوالات ۷۵

آزمایش ۵: کشش Tensile Test ۷۶

- مقدمه ۷۷
- ۱- مبانی و تئوری کشش ۷۷
- ۱-۱ تعاریف ۷۷
- ۲-۱ نقاط مهم منحنی تنش - تغییر طول نسبی ۷۹
- ۲- دستگاه آزمایش ۸۱
- ۳- روش آزمایش ۸۱
- ۳-۱ هدف آزمایش ۸۱
- ۳-۲ دو نکته ی مهم در انجام آزمایش کشش ۸۲
- ۳-۳ دستور کار انجام آزمایش ۸۲
- ۴- نحوه انجام محاسبات و به دست آوردن نتایج ۸۴
- ۵- سوالات ۸۴
- ضمیمه: نمونه جداول ۸۵

آزمایش ۶: تیر Beam Test ۸۶

- مقدمه ۸۷
- ۱- مبانی و تئوری تئوری خمش: ۸۷
- ۱-۱ تنش خمشی ۸۷
- ۲-۱ محاسبه ی شعاع انحنا ۸۸
- ۳-۱ انحراف در تیرها ۸۹
- ۴-۱ قانون ماکسول ۹۰
- ۲- دستگاه آزمایش ۹۱
- ۳- روش آزمایش ۹۱
- ۳-۱ هدف آزمایش ۹۱
- ۲-۳ تحقیق در معادله خمش تیر: $\frac{M}{I} = \frac{E}{R}$ ۹۱
- ۳-۳ تعیین ضریب یانگ (E) ۹۲
- ۴-۳ شکل تیر یک سر در گیر تحت اثر وزن خود و یک نیروی متمرکز ۹۲
- ۵-۳ بررسی قانون ماکسول ۹۳

آزمایش ۷: پیچش Torsion Test ۹۴

- مقدمه ۹۵
- ۱- مبانی و تئوری پیچش ۹۵
- ۲-۱ محاسبه‌ی تنش برشی ۹۵
- ۳-۱ محاسبه‌ی تغییر شکل برشی - زاویه پیچش ۹۶
- ۲- دستگاه آزمایش ۹۷
- ۳- روش آزمایش ۹۸
- ۳-۱-۱ هدف آزمایش ۹۸
- ۳-۲-۱ دستور کار انجام آزمایش ۹۹
- ۴- نحوه انجام محاسبات، به دست آوردن نتایج ۹۹
- ۵- سوالات ۹۹

آزمایش ۸: ضربه Impact Test ۱۰۰

- مقدمه ۱۰۱
- ۱- مبانی و تئوری ضربه ۱۰۱
- ۲- دستگاه آزمایش ۱۰۴
- ۳- روش آزمایش ۱۰۵
- ۳-۱-۱ هدف آزمایش ۱۰۵
- ۳-۲-۱ وسایل آزمایش ۱۰۵
- ۳-۳-۱ دستور کار انجام آزمایش ۱۰۵
- ۴- نحوه انجام محاسبات، به دست آوردن نتایج و سوالات ۱۰۶

آزمایش ۹: ستون Buckling Test ۱۰۷

- مقدمه ۱۰۸
- ۱- مبانی و تئوری کماتش ۱۰۸
- ۱-۱ ستون با دو انتهای لولائی ۱۰۹
- ۲-۱ ستون با دو انتهای ثابت ۱۱۰
- ۲- دستگاه آزمایش ۱۱۱
- ۳- روش آزمایش ۱۱۱
- ۳-۱-۱ هدف آزمایش ۱۱۱
- ۳-۲-۱ دستور کار انجام آزمایش ۱۱۱
- ۴- نحوه انجام محاسبات و به دست آوردن نتایج ۱۱۲
- ۵- سوالات ۱۱۲
- ضمیمه: جدول مربوط به اعداد و نتایج آزمایش ۱۱۳

آزمایش ۱۰: خزش Creep Test..... ۱۱۴

- مقدمه ۱۱۵
- ۱- مبانی و تئوری خزش ۱۱۵
- ۲- دستگاه آزمایش ۱۱۷
- ۳- روش آزمایش ۱۱۸
- ۳-۱- هدف آزمایش ۱۱۸
- ۳-۲- وسایل مورد نیاز آزمایش ۱۱۸
- ۳-۳- دستور کار انجام آزمایش ۱۱۸
- ۴- نحوه انجام محاسبات و به دست آوردن نتایج ۱۱۹
- ۵- سوالات ۱۱۹
- ضمیمه: جداول مربوط به اعداد و نتایج آزمایش ۱۲۰

آزمایش ۱۱: اندازه گیری انحراف و کرنش در دیافراگم دایروی ۱۲۱

- مقدمه ۱۲۲
- ۱- مبانی و تئوری خمش ورق های دایروی ۱۲۲
- ۱-۱- معادلات عمومی ۱۲۳
- ۲-۱- اعمال شرایط مرزی ورق مواد آزمایش ۱۲۹
- ۲-۱-۱- به دست آوردن رابطه انحراف ورق با توجه به شرایط مرزی دیافراگم ۱۲۹
- ۲- شرح دستگاه آزمایش و متعلقات آن ۱۳۳
- ۲-۱- سیستم هیدرولیک دستگاه ۱۳۳
- ۲-۲- اطلاعاتی در باره کرنش سنج ها ۱۳۴
- ۳-۲- اندازه گیری انحراف به وسیله دستگاه آزمایش ۱۳۵
- ۳- روش انجام آزمایش ها، محاسبات، بررسی نتایج و سوالات ۱۳۵
- ۳-۱- روش های انجام آزمایش ۱۳۵
- ۳-۲- روش اندازه گیری کرنش های سطح و ثبت نتایج ۱۳۹

بسمه تعالی

امام صادق (ع):

«هر کس دانش آموزد و آن را به کار بندد و برای خدا به دیگران بیاموزد، در ملکوت آسمان‌ها به بزرگی یاد می‌شود و گویند برای خدا دانش فرا گرفت، برای خدا به آن عمل کرد و برای خدا به دیگران آموخت».

اصول کافی

مقدمه

یک مهندس طراح، بعد از داشتن نحوه و میزان توزیع تنش در شرایط مختلف بارگذاری روی یک سازه، با این مسئله روبروست که ماده مورد نظر و ابعاد را طوری انتخاب نماید که سازه بتواند در مقابل شرایط متفاوت بارگذاری مقاومت کند. بدین منظور لازم است که اطلاعاتی در مورد خواص الاستیک و پلاستیک و مشخصات استحکامی مواد، در شرایط متفاوت، را در اختیار داشته باشد.

بررسی رفتار ماده در کشش، فشار، پیچش و چگونگی مقاومت آن در برابر پدیده‌های خستگی، خزش و ضربه، همچنین سختی ماده و نیز بررسی پدیده کمانش و... از موارد بسیار ضروری برای مهندس مکانیک است و اطلاعاتی از این قبیل را فقط در آزمایشگاه و با تحقیقات تجربی می‌توان یافت.

آزمایشگاه‌های مربوط به تست مواد، با ماشین‌های مختلف مجهز شده است و به کمک آن‌ها می‌توان در شرایط مختلف بارگذاری، رفتارهای فوق را بررسی و نتیجه را تحلیل کرد. این آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های استاندارد صورت می‌گیرد و نتایج آن‌ها پس از جرح و تعدیل در عمل به کار می‌رود.

در واقع می‌توان گفت که آزمایش‌های مکانیکی به منظور تعیین مشخصات مکانیکی و مقاومت اجسام انجام می‌شود و مورد نیاز مهندسين برای محاسبه، طراحی و ساخت می‌باشد. در هر یک از آزمایش‌ها کوشش می‌شود که اطلاعاتی در مورد مصالح به کار رفته و مشخصات آن‌ها به دست آید. البته به ندرت می‌توان مشخصات کامل و دقیق جنس به کار رفته را به دست آورد زیرا نمونه‌ای که برای آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد به عنوان نماینده‌ای از تمام جنس است در صورتی که ممکن است این نمونه کاملاً نماینده‌ی واقعی تمام جنس نباشد. همچنین باید توجه کرد که شرایط آزمایش و شرایط کار برای مصالحی که به کار رفته است همیشه نمی‌تواند یکسان باشد. اما با همه این‌ها تمام محاسبات و طراحی ساختمان‌ها، ماشین‌ها و غیره بر پایه همین آزمایش‌هایی است که در این آزمایشگاه صورت می‌گیرد و بدون انجام آزمایش‌ها نمی‌توان دستگاه‌ها، ماشین‌آلات، سازه‌ها و ساختمان‌ها را طرح و محاسبه نمود.

اولین مشخصه‌ای که از مصالح مهندسی مورد نظر است، مقاومت آن‌هاست که برای تعیین آن‌ها به آزمایش‌های زیر نیاز داریم. به طور خلاصه اهداف کلی این آزمایش‌ها در زیر آمده است و اهداف جزئی‌تر در طول آزمایش‌ها، بررسی می‌شود:

۱- آزمایش کشش و فشار: برای تعیین مقاومت جسم در برابر این پدیده‌ها و مقایسه جنس‌های مختلف.

۲- آزمایش پیچش: برای بررسی مقاومت جسم در برابر گشتاور پیچشی و مقایسه جنس‌های مختلف.

- ۳- آزمایش ضربه: برای بررسی مقاومت جسم در برابر بار ناگهانی و شدید.
- ۴- آزمایش خزش: برای بررسی مقاومت جسم در حالت پلاستیک وقتی که تنش کمی در مدت زمان زیاد بر جسم اثر کند.
- ۵- آزمایش خستگی: برای بررسی مقاومت جسم در برابر بارهای متناوب.
- ۶- آزمایش سختی: برای بررسی مقاومت جسم در برابر نفوذ جسم دیگر در آن.
- ۷- آزمایش کماتش: برای بررسی پایداری جسم در برابر بار وارده در حد معین.
- ۸- آزمایش‌های تیر: برای بررسی پدیده خمش، میزان انحراف تیر، تعیین ضریب ینگ،... و مقایسه جنس‌های مختلف.
- ۹- استوانه جدار ضخیم و جدار نازک برای بررسی تنش‌ها و کرنش‌های ایجاد شده در استوانه‌های تحت فشار.
- ۱۰- آزمایش‌های اندازه‌گیری کرنش: برای یافتن کرنش و همچنین تنش در جهات مختلف به روش عملی.
- کلیات دیگری در مورد آزمایش‌های مقاومت مصالح در رابطه با مواد مختلف در ادامه آمده است.

کلیاتی راجع به آزمایش‌های مربوط به مواد و مقاومت مصالح

آزمایش برای استحکام و خواص مواد مهندسی مهمترین قسمت از پروسه ساخت و تولید است. کیفیت ساختمان و همگن بودن ماده عوامل مهمی هستند که در طراحی کل سازه یا یک جزء آن دارای اهمیت فراوانند.

آزمایش مواد را می‌توان تحت سه حالت انجام داد:

- آزمایش‌های توسعه و تحقیق
- کنترل تولید
- کنترل بعد از اتمام

آزمایش‌های در حین تحقیق، به منظور کشف کیفیت مواد جدید صورت می‌گیرد. کنترل تولید به منظور تشخیص این مسئله که محصول تولیدی دارای مشخصات کنترل باشد، لازم است و کنترل بعد از اتمام روی کل تولیدات صورت می‌گیرد و هرگونه رد کردن ضروری، انجام می‌شود. برای انجام تمام بررسی‌های مورد نیاز روی یک ماده آزمایش‌های مواد مختلفی لازم است که برخی از آن‌ها آزمایش‌های تخریب‌کننده ماده و برخی آزمایش‌های غیر تخریبی هستند.

الف- آزمایش‌های تخریبی ماده

الف-۱- آزمایش کشش

این آزمایش اطلاعاتی بسیار دقیق در مورد خواص ماده را به ما می‌دهد. یک نمونه گرد شده یا مسطح در هر دو انتها محکم بسته شده و تا زمان شکستن کشیده می‌شود. این آزمایش خاصیت الاستیسیته ماده را ثابت می‌کند و حد الاستیک، نقطه شکست و... را به ما می‌دهد.

برای انجام یک آزمایش فشار، به دو انتهای نمونه نیروی فشاری وارد می‌شود تا بتوان فهمید که ماده چه مقدار فشار را، قبل از کماتش و شکستن، می‌تواند تحمل کند.



شکل ۱- نمونه‌ای از دستگاه کشش

الف- ۲- آزمایش سختی

این آزمایش مقاومت ماده را در مقابل تغییر فرم بررسی می‌کند. سه روش اصلی برای این بررسی عبارتند از: آزمایش برینل: یک گلوله سخت شده یا یک نقطه الماسی به داخل سطح مقطع ماده فرو می‌رود (برای یک بار معین در زمان معین) آزمایش ویکرز: یک هرم الماسی کوچک به داخل یک سطح مسطح فرو می‌رود. فرورفتگی به قدری کوچک است که نمونه تخریب نمی‌شود. آزمایش راکول: این آزمایش با استفاده از یک گلوله کوچک با یک مخروط کوچک انجام می‌شود این آزمایش، نمونه را تخریب نمی‌کند. به طور کلی سختی ماده را می‌توان به کمک عمق، اندازه و شکل فرورفتگی، اندازه‌گیری کرد.



شکل ۲- نمونه دیجیتال دستگاه آزمایش راکول

الف- ۳- آزمایش ضربه

این آزمایش نشان دهنده مقاومت مواد مختلف در مقابل یک ضربه شدید است. نمونه آزمایش دارای یک شکاف

است و به وسیله یک پاندول سنگین نوسان کننده شکسته می شود.



شکل ۳- نمونه ای از دستگاه آزمایش ضربه

الف - ۴- آزمایش خستگی

ماده تحت آزمایش، تنش های معکوس شونده متعددی را می پذیرد. یک اندازه گیری از این خاصیت را می توان به وسیله آزمایش خستگی به دست آورد. مهمترین تنش ها یا بارها، عبارتند از: کشش، فشار، خمش و خمش گردان، تمام این آزمایش های تخریب کننده، بعداً توضیح داده می شود.



شکل ۴- نمونه ای از دستگاه آزمایش خستگی

ب- آزمایش های غیر تخریبی

این آزمایش ها به منظور کنترل ماده مورد نظر در رابطه با وجود ترک یا حفره (یا هر دو) انجام می شود. این آزمایش ها (همه یا قسمتی از آنها)، معمولاً روی محصولاتی انجام می شود که کنترل کیفیت آنها لازم است تا بدانیم آیا محصول از نظر کیفی باید رد شود یا بهبود یابد. مشهورترین روش های آزمایش عبارتند از:

ب-۱- آزمایش هایی که در آنها از سیالات نفوذکننده استفاده می شود.

ب-۲- آزمایش هایی که در آنها از پودر مغناطیسی استفاده می شود.

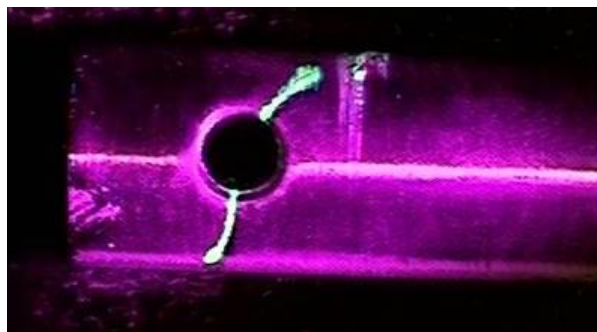
ب-۳- آزمایش هایی که در آنها از القاء الکتریکی استفاده می شود.

ب-۴- آزمایش های صدای مافوق صوت

ب-۵- رادیوگرافی

ب-۱- آزمایش‌هایی که در آن‌ها از سیالات نفوذکننده استفاده می‌شود (Penetrating Fluid Test):

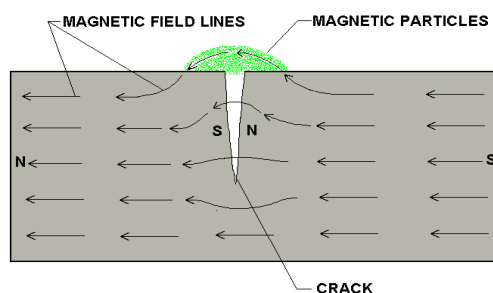
این آزمایش برای چک کردن عیوب سطح یا پوسته مورد استفاده قرار می‌گیرد و می‌توان آن را بر روی تمام مواد انجام داد. ابتدا ماده مورد آزمایش را به طور کامل از کثیفی، روغن و گریس پاک می‌کنیم، آن‌گاه سیال مورد نظر که دارای یک رنگ قرمز کمکی است به کار می‌رود. سیال جستجوی خود را شروع می‌کند و به داخل هر ترک نفوذ می‌کند. آن‌گاه سطح ماده پاک می‌شود و فقط سیال رنگی موجود در ترک باقی می‌ماند. یک داروی ظهور روی نمونه آزمایش پاشیده شده و سیال از درون ترک بیرون کشیده می‌شود در حالی که نوارهای قرمزی روی یک مبنای سفید رنگ باقی مانده است.



شکل ۵- آزمایش غیر تخریبی با سیال نفوذکننده

ب-۲- آزمایش‌هایی که در آن‌ها از پودر مغناطیسی استفاده می‌شود:

این آزمایش‌ها را فقط روی مواد مغناطیسی می‌توان انجام داد و فقط عیوب سطح را نشان می‌دهد. نمونه مغناطیس شده پودر آهن روی سطح پاشیده می‌شود. اگر عیبی روی سطح باشد، یک رخنه در فلولی مغناطیسی ظاهر می‌شود که باعث می‌شود پودر آهن تغییر مسیر دهد. در صورتی که ترک‌های خیلی نازک در سطح وجود داشته باشد، نوارهایی از پودر آهن ظاهر می‌شود.



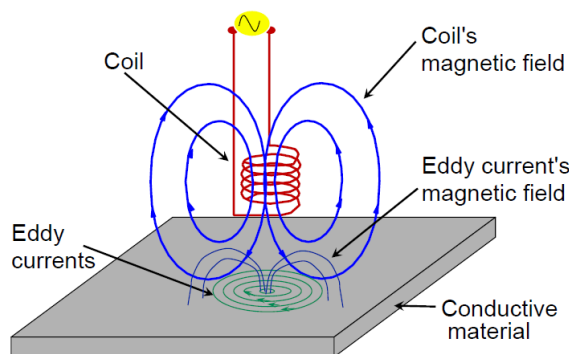
شکل ۶- آزمایش غیر تخریبی با پودر مغناطیسی

ب-۳- آزمایش‌هایی که در آن‌ها از القاء الکتریکی استفاده می‌شود:

این روش آزمایش دارای عمق نفوذ نسبتاً کم است، برای آزمایش کردن روی لوله‌ها مناسب می‌باشد تمام مواد فلزی را می‌توان مورد آزمایش قرار داد.

نمونه آزمایش در داخل یک سولونوئید قرار داده شده است که به یک جریان AC متصل است. یک میدان مغناطیسی حول سیم پیچ برقرار شده و یک جریان القایی در سطح نمونه آزمایش، شکل می‌گیرد. این جریان‌های القایی

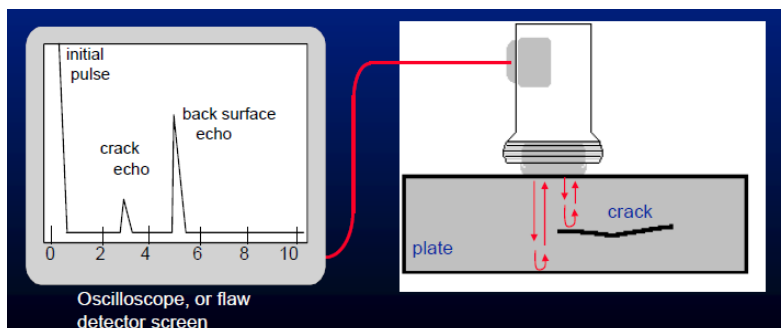
در مخالفت با میدان مغناطیسی هستند. اگر نمونه آزمایش دارای نقص باشد، میدان مغناطیسی متأثر می‌شود و این مسئله را روی وسیله اندازه‌گیری می‌توان مشاهده کرد. همچنین اگر نمونه‌های آزمایش متفاوت مورد استفاده قرار گیرند میدان مغناطیسی تغییر می‌کند. به این دلیل، آزمایش القاء الکتریکی را باید روی موادی با سطح مقطع ثابت انجام داد. یک فایده این نوع آزمایش این است که آزمایش‌های بسیاری را می‌توان در زمان کوتاهی انجام داد.



شکل ۷- آزمایش القاء الکتریکی

ب-۴- آزمایش‌های صدای مافوق صوت:

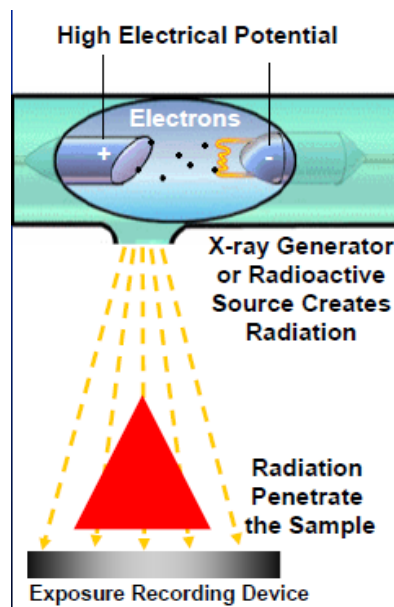
این آزمایش را می‌توان روی اغلب مواد فلزی انجام داد. این روش آزمایش عیوب داخلی و خارجی نمونه را می‌تواند ثبت کند. یک نمونه آزمایش تحت تأثیر امواج صدای فوق صوت قرار می‌گیرد که دارای یک فرکانس بین ۰/۵ و ۱۰ MHz است. این امواج صوت در یک تولیدکننده صوت تولید می‌شود، به وسیله یک فرستنده تقویت شده و به سطح ماده مورد آزمایش هدایت می‌شود. همانطور که این امواج از درون نمونه عبور می‌کند، انعکاس‌های صدائی تولید می‌شود. ابتدا یک انعکاس صدای شروع و بالاخره وقتی که موج به انتهای نمونه می‌رسد انعکاس صدای انتها، به وجود می‌آیند. دامنه این امواج انعکاس صداها را می‌توان روی پرده یک اسیلوسکوپ مشاهده کرد. اگر عیبی در نمونه باشد، امواج به طرف عیب منعکس می‌شود تا یک انعکاس صدای مربوط به آن عیب را تولید کنند. از نتایج مشاهده شده روی اسیلوسکوپ، موقعیت و اندازه نقص را می‌توان تحقیق کرد. برای اینکه بتوان این آزمایش را به خوبی انجام داد تجربه مورد نیاز است.



شکل ۸- آزمایش صدای مافوق صوت

ب-۵- رادیوگرافی:

تمام مواد را می‌توان با این روش آزمایش کرد و تأکید آن روی عیوب داخلی نمونه است. از یک اشعه X یا یک اشعه رادیواکتیو می‌توان استفاده کرد. اشعه‌ها از درون یک مخلوط‌کننده و نمونه مورد آزمایش عبور کرده و آن‌گاه روی یک فیلم ظاهر می‌شود. نوار نگه دارنده این فیلم زیر نمونه قرار دارد. اگر عیبی در نمونه باشد، فیلم یک مساحت خیلی سیاه‌تر را در جایی که عیب قرار دارد، نشان می‌دهد.



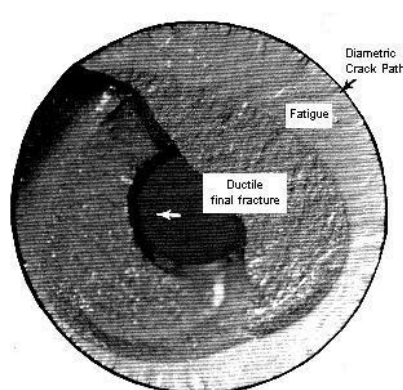
شکل ۹- رادیوگرافی

آزمایش ۱: خستگی

Fatigue Life Prediction Testing



وقتی یک شکاف در قطعه‌ای فلزی از یک ماشین ظاهر می‌شود اغلب نتیجه وارد آمدن تنش گسیختگی است. در این صورت قطعه ماشین تحت بار دینامیکی بوده و این پدیده را خستگی نامند. نقطه شکست استاتیکی بر اساس وارد آمدن یک بار ایجاد می‌شود. اگر قطعه بخواهد تحت تأثیر یک بار مداوم قرار گیرد باید طوری طراحی شده باشد که بتواند در مقابل خستگی مقاومت کند. بررسی شکست در یک شافت (شکل ۱) نشان می‌دهد که اولاً یک سطح صاف وجود دارد که خستگی در آن اتفاق افتاده و ثانیاً یک سطح کوچکتر ناصاف وجود دارد که در آن شکست استاتیکی ظاهر شده است.

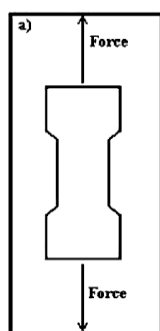


شکل ۱- نمونه شکست‌ها در مقطع شکسته شده

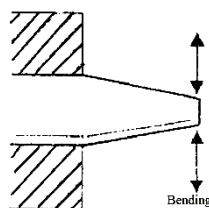
مبانی بارگذاری خستگی

الف- انواع بارها

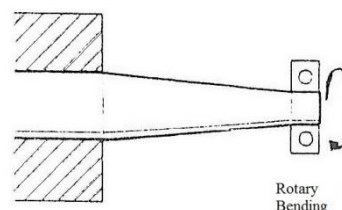
انواع مختلف بار که باعث خستگی می‌شوند، عبارتند از: ۱- بار فشاری- بار کششی ۲- خمش ۳- خمش گردان (rotary bending)



الف



ب



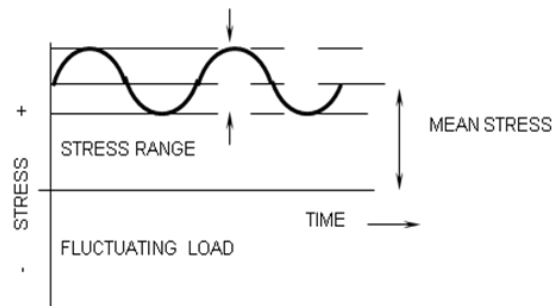
ج

شکل ۲- انواع بارها

تغییرات بار می‌تواند از یک وضع نامنظم (مثل فنرهای تعلیق اتومبیل) تا یک وضع منظم (مثل فنرهای سوپاپ

Valve springs) تغییر داشته باشد. یک تقریب از تغییرات بار را می‌توان با به‌کاربردن یک کشش سینوسی به منظور انجام آزمایش خستگی و محاسبات مربوطه ایجاد کرد.

دو فری که در بالا ذکر شد، دارای بار استاتیکی نیز هستند. وزن ماشین برای فنرهای تعلیق و تنش اولیه برای فنرهای سوپاپ، بارهای استاتیکی برای این دو فنر هستند. اگر هر دو بار منظور شوند منحنی حاصل مطابق شکل ۳ می‌باشد.



شکل ۳- تغییرات بار وارده

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

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

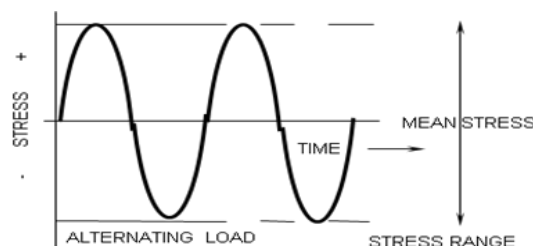
$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$$

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

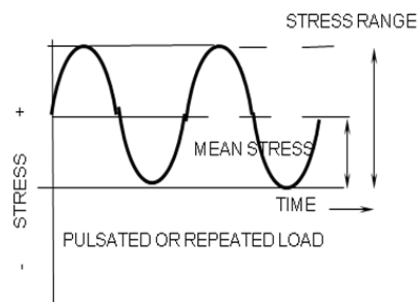
دو حالت خاص عبارتند از:

۱- تنش متغیر (changing tension) یعنی، وقتی که تنش متوسط $\sigma_m = 0$ است (شکل ۴).

۲- تنش لرزاننده یا ضربه ای (Pulsating tension) وقتی که $\sigma_m = \sigma_a$ و $\sigma_{\min} = 0$ (شکل ۵).



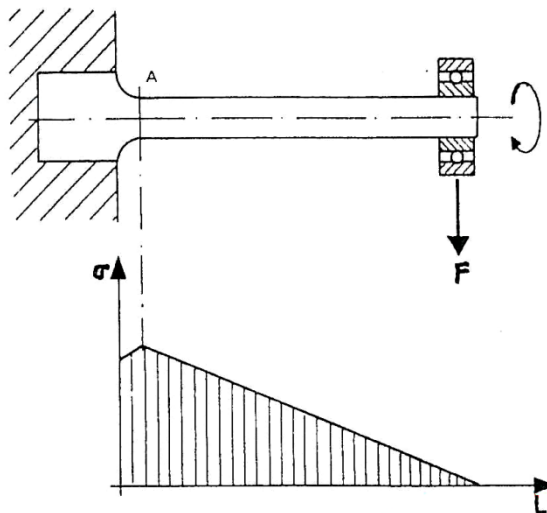
شکل ۴- تنش متغیر



شکل ۵- تنش لرزاننده

ب- مهمترین نوع آزمایش خستگی:

مهمترین نوع آزمایش خستگی خمش چرخنده (rotary bending) است (شکل ۶). که در آن تنش مطابق شکل ۴ تغییر می کند.

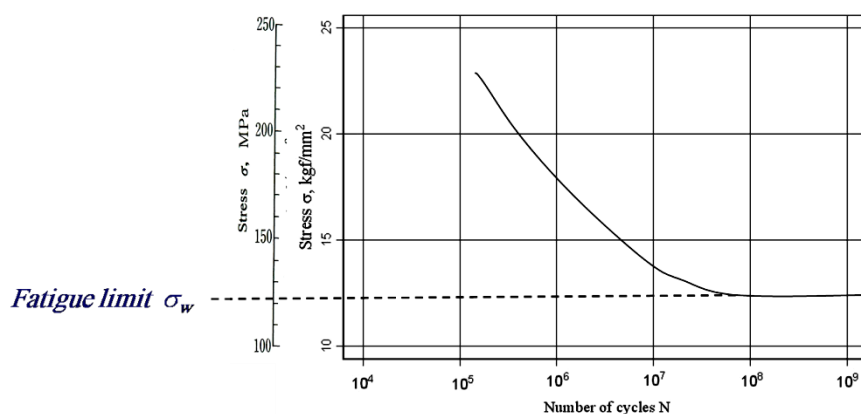


شکل ۶- دیاگرام تنش

همانطور که از دیاگرام تنش دیده می شود نقطه A مستعدترین نقطه است و خستگی در این نقطه ظاهر خواهد شد. دلیل این مسئله بعداً خواهد آمد.

ج- دیاگرام Wohler

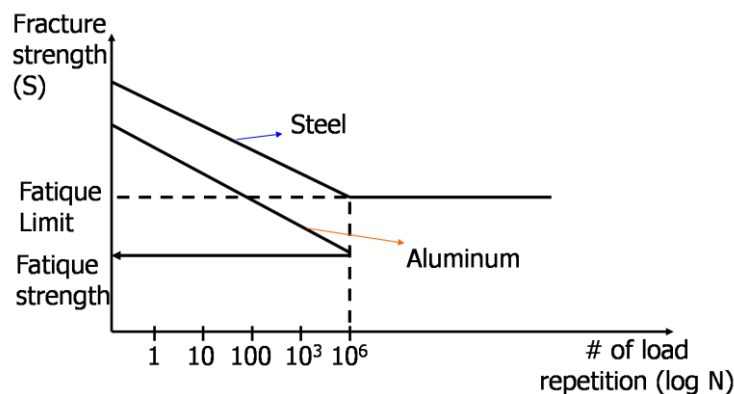
اگر آزمایش های مختلف خستگی را در بارهای متفاوت انجام دهیم و تنش دامنه به صورت تابعی از تغییرات کل بار در نظر گرفته شود یک دیاگرام Wohler را می توان رسم کرد (شکل ۷).



For $\sigma < \sigma_w$, $N = \infty$

شکل ۷- دیاگرام Wohler

وقتی از یک نمونه آزمایشی فولادی استفاده می‌کنیم منحنی شکل ۷ پایین آمده و به مقدار حدی نزدیک می‌شود. اگر رابطه $\sigma_a < \sigma_w$ برقرار باشد، هیچ شکستگی اتفاق نمی‌افتد. این مقدار حدی را حد خستگی (fatigue limit) نامند. وقتی که نمونه تحت آزمایش rotary bending باشد، می‌توان حدود خستگی مختلفی را برحسب نوع بارگذاری روی نمونه به دست آورد. حدود خستگی را تقریباً بعد از ۱۰ میلیون بار تغییرات بار می‌توان به دست آورد (10^7). برای مواد دیگر (غیر از فولاد مثل آلایزهای آلومینیوم) حدود خستگی وجود ندارد (شکل ۸).



شکل ۸- مقایسه دیاگرام Wohler برای آلایزهای آلومینیوم و فولاد

د- تأثیر شکل نمونه‌ها

همانطور که قبلاً تذکر داده شد، قطعه مورد آزمایش در 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 [مثل نوع بارگذاری، حجم ماده، صافی سطح و شکل نمونه، خوردگی (corrosion)]. انواع مختلف بارگذاری قبلاً شرح داده شد، اینک به تشریح بقیه مباحث می‌پردازیم.

ه- اثر کار سرد

در اثر کار سرد روی مواد (کشیدن و نورد فلزات نرم در درجه حرارت اتاق) ماده قوی‌تر می‌شود. نقطه 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.

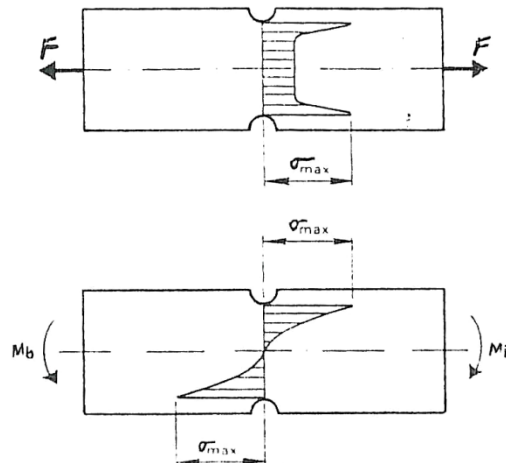
اگر فلز قبلاً تحت تأثیر خستگی متناوب کمتر از حد دوام قرار گرفته باشد، حد دوام آن بالا رفته است و اگر قبلاً تحت اثر خستگی بیش از حد دوام قرار گرفته باشد، حد دوام فلز کار سرد شده پایین آمده است.

و- تأثیر صافی سطح

چون شکست با پیدا شدن یک ترک روی سطح شروع می‌شود، بنابراین فرم سطح باید تأثیری روی شکستگی در اثر خستگی داشته باشد. ترک‌ها روی سطح خراش دار و در هم، سریع‌تر شکل می‌گیرند. قطعه‌ای که به خوبی براق شده باشد حد خستگی‌اش بیشتر از وقتی است که به طور خشن و ناصاف مورد استفاده قرار گیرد.

ز- تأثیر شعاع گوشه

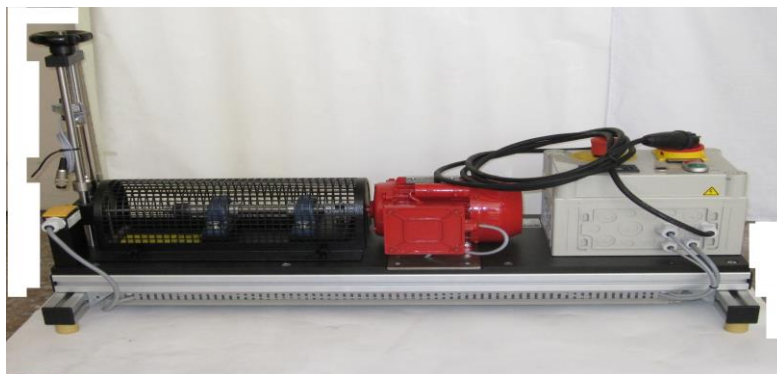
اغلب قطعات دارای یک یا چند بعد هستند که نسبت به ابعاد اصلی خیلی کوچکتر یا بزرگترند، مثلاً در یاتاقان‌ها، تمرکز تنش تأثیر مهمی روی مقاومت خستگی دارد. ماده‌ای که دارای حساسیت کم نسبت به شعاع گوشه است برای مقاومت در مقابل خستگی، مناسب‌تر است. به طور کلی، حساسیت شعاع گوشه به طور محسوسی با افزایش حدود شکستگی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



شکل ۹- تمرکز تنش

۱- دستگاه آزمایش (MT 3012)

این دستگاه با موتوری در ۳۰۰۰ rev/min رانده می‌شود و با برق ۲۲۰V تک فاز کار می‌کند. موتور روی جایگاه خود نصب شده، از یک طرف به دستگاه شمارنده تعداد دور ۷ رقمی متصل است و از طرف دیگر به شافتی متصل است که نمونه در آن طرف بسته می‌شود. قطعه‌ای که توسط آن بار وارد می‌شود دارای یک بلبرینگ کروی و یک میکروسویچ است که به طور اتوماتیک وقتی که شکست رخ می‌دهد، چرخش را قطع می‌کند. با چرخش چرخ باردهنده در جهت عقربه‌های ساعت، می‌توان میزان بار وارده روی نمونه آزمایش را افزایش داد. یک ترازوی spring balanced مقدار بار را اندازه می‌گیرد.



شکل ۱۰- ماشین آزمایش خستگی MT 3012

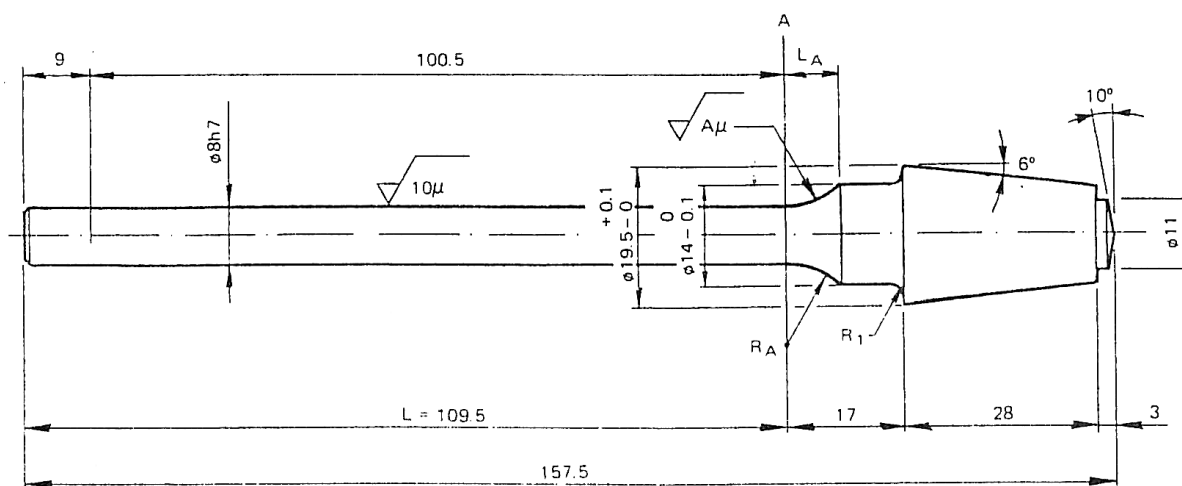
۲- قطعات مورد آزمایش

ابعاد نمونه‌ها مطابق جدول زیر است:

جدول ۱

Test piece no mark	شعاع گوشه R_A	طول راکورد L_A	صافی سطح A_μ	Material
۱	۰/۵	۰/۵	۴	۱۵۵۰
۲	۱	۱	۴	۱۵۵۰
۳	۲	۲	۴	۱۵۵۰
۴	۲	۲	۲۵	۱۵۵۰

و نمونه‌های اندازه آن مطابق شکل زیر است:



شکل ۱۱- نمونه آزمایش

اگر نمونه‌ها در محل آزمایشگاه بخواهند تولید شوند، ابعاد فوق باید در نظر گرفته شود. طول نمونه آزمایش طوری انتخاب شده است که بار N در خلال شکست، حساسیت دو برابر را بدهد.

۳- روش انجام آزمایش

محکم کردن نمونه مورد آزمایش

- ۱- وارد کننده بار را تا همان ارتفاعی که شافت قرار دارد، پایین آورید.
- ۲- مهره قفل کننده را روی نمونه آزمایش بغلتانید.
- ۳- انتهای بار یک نمونه را در داخل یاتاقانی که به وارد کننده بار متصل است قرار دهید.
- ۴- قسمت مخروطی نمونه را در شافت مربوطه قرار داده و مهره قفل کننده را محکم کنید.

چگونگی انجام آزمایش

- ۱- نمونه را مطابق دستورات بالا محکم کنید.
- ۲- شمارنده را روی صفر تنظیم کنید.
- ۳- نمونه را بارگذاری کنید (مثلاً تا ۲۰۰N).
- ۴- آزمایش را با به کار انداختن میکروسویچ شروع کنید.
- ۵- آزمایش در حال انجام است و مدتی طول خواهد کشید تا نمونه بشکند.
- ۶- وقتی شکست اتفاق افتاد، میکروسویچ به طور اتوماتیک سیستم را قطع می کند.
- ۷- مهره قفل کننده را شل کرده و آن را بردارید، قسمت مخروطی نمونه را با یک ضربه در بیاورید.

۴- شرح آزمایش

آزمایش الف- تأثیر صافی سطح و شعاع گوشه بر روی مقاومت خستگی

هدف: بررسی تأثیر مذکور برای نمونه فولادی

روش آزمایش

- ۱- سه آزمایش خستگی مطابق جدول ۱ باید صورت گیرد.
- ۲- قطعه مورد آزمایش را در ماشین آزمایش قرار دهید.
- ۳- میزان بار را روی ۲۰۰N قرار دهید.
- ۴- آزمایش خستگی را مطابق مواردی که در بخش ۳ توضیح داده شده است، کامل کنید.
- ۵- وقتی که شکست اتفاق افتاد، تعداد تغییرات بار را بخوانید و نتایج را در جدول زیر یادداشت کنید.

جدول ۲

شماره نمونه مورد آزمایش	R_{Amm}	L_{Amm}	A_μ	تعداد تغییرات بار
۱				
۲				
۳				

مطابق شکل (۱۱)، A_μ : صافی سطح، R_A : شعاع گوشه و L_A : طول را کورد می باشد.

- ۶- نمونه مورد آزمایش را تغییر دهید و آزمایش را برای نمونه های متعدد انجام دهید.
- ۷- تأثیر شعاع گوشه روی عمر نمونه چگونه است؟ نمونه های ۱ و ۲ را مقایسه کنید.
- ۸- تأثیر صافی سطح روی عمر نمونه چگونه است؟ نمونه های ۲ و ۳ را مقایسه کنید.
- ۹- سطح شکست را مطالعه کرده و شکل آن را توضیح دهید.

آزمایش ب- دیاگرام Wohler ساده شده

هدف: برای رسم دیاگرام و هلر، سه نمونه را مورد استفاده قرار دهید و دو مقدار را محاسبه کنید.

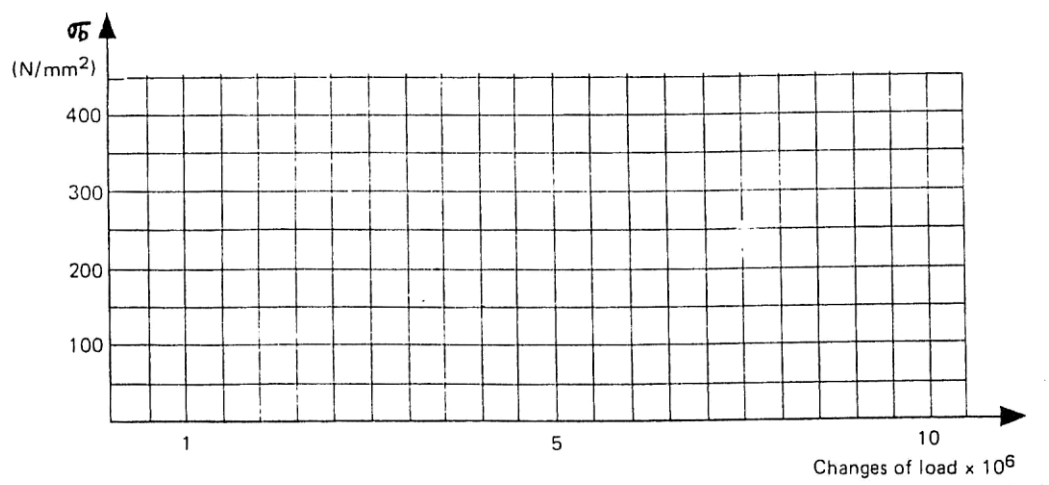
روش آزمایش

- ۱- به توضیحات تکنیکی در بخش ۳ توجه کنید.
- ۲- سه آزمایش خستگی باید انجام شود. در خلال انجام آزمایش با نمونه اول، حد خستگی تعدیل شده
- (reduced fatigue limit) باید معین شود. در خلال انجام آزمایش دوم، حد شکست در 2×10^6 تعداد تغییرات بار، باید محاسبه شود. از نمونه اول شروع کرده و نتایج را، که برای محاسبات بعدی مورد نیاز است، ثبت کنید.
- ۳- نمونه آزمایش با مشخصات $RA = 1$ و $A\mu = 4$ را مورد استفاده قرار دهید (نمونه شماره ۲).
- ۴- نمونه را در داخل دستگاه آزمایش قرار دهید.
- ۵- مطابق جدول، بارگذاری کرده و آزمایش را کامل کنید. تعداد تغییرات را یادداشت نمایید و نمونه را با بار بعدی مورد آزمایش قرار دهید. R_m را با ضرب کردن مقدار بار در دو، محاسبه کنید.

جدول ۳

تعداد تغییرات در بار	$R_m(N/mm^2)$	بار (N)

- ۶- مقادیر اندازه گیری شده را روی دیاگرام ببرید. برای 10×10^6 تغییرات بار، منحنی و هلر به همراه حد خستگی پایین آمده و بدون اینکه واقعاً به آن مقدار برسد، حد خستگی را تعقیب می کند. منحنی و هلر را رسم کنید.



شکل ۱۲

۵- نحوه انجام محاسبات و به دست آوردن نتایج

۵- الف- محاسبه حد خستگی تعدیل شده (کاهش یافته)

۱- یک شافت از جنس STS ۱۹۴۰، وقتی که تحت تأثیر خمش چرخشی قرار می گیرد دارای حد خستگی $\sigma_{ub} = \pm 240 \text{ N/mm}^2$ است.

۲- این حد خستگی با توجه به ابعاد نمونه، صافی سطح و شعاع گوشه به مقدار زیادی کاهش می یابد. حد خستگی حاصل را می توان از فرمول زیر به دست آورد (b=Bending):
که در آن:

$$\sigma_{u,red} = \frac{\sigma_{ub}}{\beta} \cdot \delta \cdot k$$

β = فاکتور شیار (notch factor)

δ = فاکتور بعد (dimension factor)

k = فاکتور سطح (surface factor)

۳- فاکتور شیار β را از فرمول زیر می توان به دست آورد:

$$\beta = 1 + \eta (a - 1)$$

η = ضریب حساسیت مربوط به شعاع گوشه

a = فاکتور شکل (form factor)

جدول زیر ضریب حساسیت مربوط به شعاع گوشه را برای مواد مختلف نشان می دهد:

جدول ۴

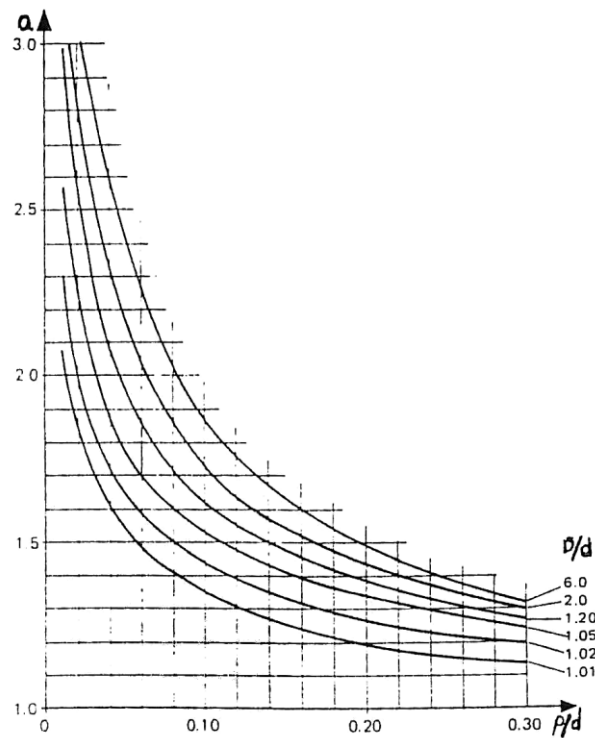
Non alloyed carbon steel	$\eta \approx 0.2 - 0.5$
Alloyed carbon steel	$\eta \approx 0.5 - 0.8$
Hardened Steel	$\eta \approx 0.7 - 1.0$
Grey cast iron	$\eta \approx 0$
Nodular cast iron	$\eta \approx 0.3$
Cast Steel	$\eta \approx 0.3 - 0.5$
Light metal	$\eta \approx 0.5 - 0.8$

فولاد SIS ۱۹۴۰ یک فولاد با کیفیت عالی و غیرآلیاژی است و بنابراین حساسیت شعاع گوشه بالایی دارد. حالا

ضریب حساسیت شعاع گوشه مناسب را انتخاب کنید.

فاکتور شکل a از منحنی ۱ به دست می آید. برای استفاده از منحنی باید ابتدا مقادیر D/d و p/d (D قطر بزرگ، d

قطر کوچک و p شعاع انحنا) برای نمونه مورد آزمایش محاسبه شود.

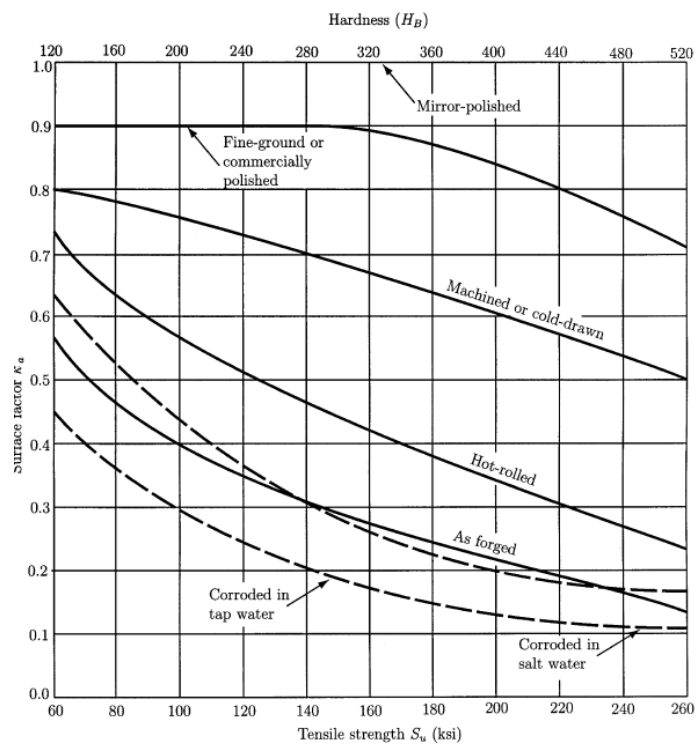


منحنی ۱- فاکتور شکل

محاسبات مربوط به فاکتور شیار را انجام دهید:

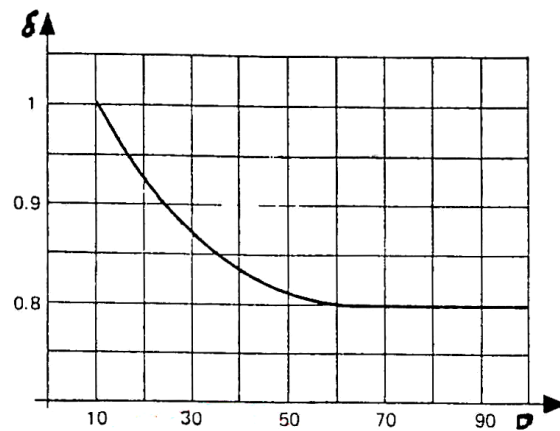
۴- فاکتور سطح k را از منحنی ۲ به دست آورید. برای نمونه SIS ۱۵۵۰ می‌دانیم که:

$$\sigma_{ub} = 490 \text{ N/2}$$



منحنی ۲- فاکتور سطح k

۵- فاکتور بعد δ با استفاده از منحنی ۳ به دست می آید (اگر بیشترین قطر مربوط به نمونه مورد آزمایش یعنی قطر D را بدانیم) حدود خستگی موجود در جدول برای نمونه‌هایی به قطر ۱۰mm است.

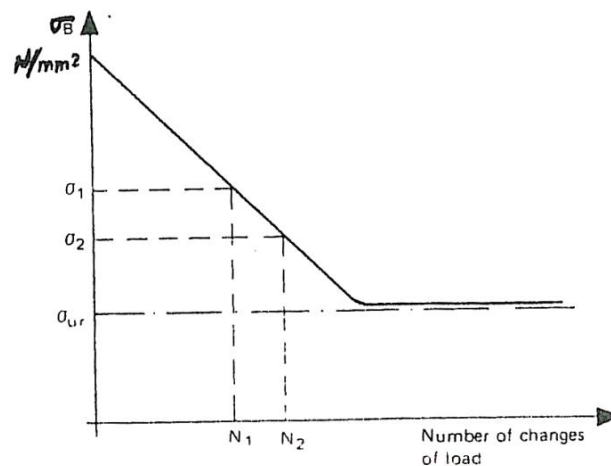


منحنی ۳- فاکتور بعد

۶- $\sigma_{u,red}$ را به صورت نمودار شکل، ۱۲ نمودار وهرلر، رسم کنید.

۵- ب- تعیین حد شکست بعد از 2×10^6 مورد تغییرات بار

۱- اگر دیاگرام وهرلر به صورتی رسم شود که محور X لگاریتمی باشد، نمودار مطابق نمونه زیر خواهد شد. یک ضربان واضح در مقدار تقریب $6-7 \times 10^6$ تغییرات بار مشاهده می شود. این نقطه را با شکل ۷ مقایسه کنید.



شکل ۱۳- تعداد تغییرات بار

نمودار، باید از این نقطه به بعد همان خط حد خستگی را تعقیب کند، اما هیچ وقت به آن نمی رسد.

۲- فرمول زیر فقط روی قسمت شیبدار منحنی، صادق است.

$$\sigma_2 = \sigma_1 \log (N_1/N_2)$$

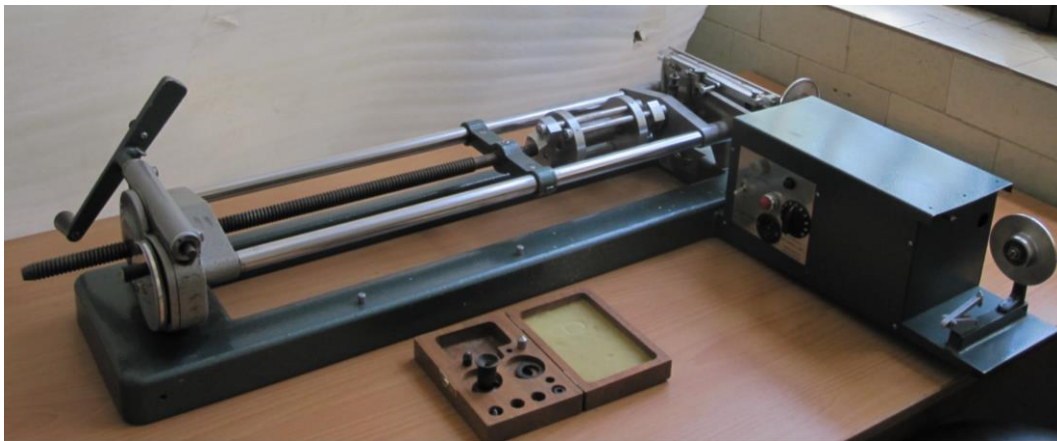
وقتی اولین آزمایش خستگی کامل شد، σ (حد خستگی) را برای 2×10^6 تغییرات بار را می توان محاسبه کرد. آنرا

محاسبه کنید و در نمودار وهلر آن را نشان دهید.

۶- سوالات

- ۱- آیا ساختمان داخلی مصالح تحت تأثیر تنش‌های متناوب تغییر می‌کند یا پدیده دیگری باعث ایجاد خستگی می‌شود؟ توضیح دهید.
- ۲- مفاهیم زیر را تبیین کنید.
 - الف- ضریب عدم تقارن در دیاگرام تنش-زمان
 - ب- تنش متوسط یا خستگی متوسط
 - ج- تنش دامنه
 - د- حد دوام (Endurance limit)
- ۳- آیا بین حد دوام (Endurance limit) و استحکام کششی (Ultimate strength) رابطه‌ای وجود دارد؟
- ۴- آیا سرعت تناوب (فرکانس) در حد دوام تأثیر دارد؟ چگونه؟
- ۵- چرا اغلب نتیجه آزمایش‌های خستگی متناوب (دیاگرام $\sigma-N$) را در یک دستگاه نیمه لگاریتمی رسم می‌کنند؟
- ۶- آیا شکست قطعات در اثر خستگی معمولاً در زیر تنش تسلیم است یا زیر تنش استحکام کششی؟
- ۷- اثر تنش‌های پسماند Residual stress در خستگی و حد دوام چیست؟
- ۸- دیاگرام Goodman در خستگی چیست؟ چه کاربردی دارد؟

آزمایش ۲: سختی Hardness Experiments



مقدمه:

سختی یک ماده عبارت است از ظرفیت آن برای مقاومت در مقابل نفوذ جسم دیگر در آن. در صنعت، سختی فلزات را به صورت مقاومت در برابر نفوذ جسم دیگر بر روی سطح فلز مورد نظر تعریف کرده و آن را اندازه می گیرند. برای اندازه گیری سختی، یک جسم سخت با شکل معین را، بر روی فلز قرار داده و بر روی آن نیرویی قراردادی وارد می کنند و بر اساس اندازه و یا عمق اثر بر جای مانده، سختی را تعیین می کنند.

برای انجام آزمایش های سختی روش های متعددی وجود دارند که در آن ها مقایسه ی نتایج مشکل است، چون جسم فرورونده، شرایط آزمایش، نحوه ی آن و فشارها، مشابه نیستند. معروفترین آزمایش های سختی عبارتند از: برینل^۱، ویکرز^۲ و راکول^۳. جدول زیر انتخاب نوع آزمایش مناسب برای مواد مختلف را نشان می دهد.

جدول ۱- انتخاب نوع آزمایش سختی

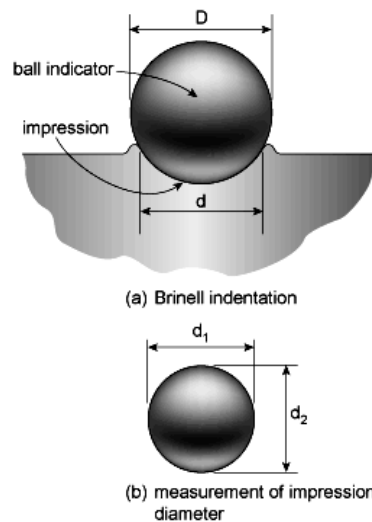
Material test	Soft	Medium Hard	Hard
Brinell	☆	☆	
Vickers	☆	☆	☆
Rockwell B	☆	☆	
Rockwell C		☆	☆

۱- آزمایش برینل برای تعیین سختی یک ماده:

الف- مبانی

در این آزمایش یک گلوله به قطر 2.5 mm، 5 mm یا 10 mm، تحت تاثیر نیروی 1.25 kN تا 30 kN قرار می گیرد. بار برای یک مدت زمانی معین نگه داشته می شود که این زمان، برحسب نوع ماده متغیر است (برای فولاد این زمان برابر 15 ثانیه است).

به وسیله ی یک میکروسکوپ اندازه گیر، قطر فرورفتگی اندازه گرفته می شود (شکل ۱). آن گاه به کمک جداول یا رابطه آزمایش برینل، سختی برینل HB به دست می آید. سختی برینل HB عبارت است از بار تقسیم بر سطح کروی نفوذ (سطح عرقچین). آزمایش برینل را روی مواد نرم و نیمه سخت می توان انجام داد، زیرا میزان فرورفتگی نسبتاً زیاد است.



شکل ۱- اندازه قطر فرورفتگی در آزمایش سختی برینل

ب- مقررات مربوط به نمونه‌ی آزمایش:

برای داشتن یک فرورفتگی روشن و واضح، نمونه آزمایش باید مسطح بوده و به خوبی صیقلی شود. ضخامت نمونه باید حداقل 8 برابر عمق اثر باشد. مرکز اثر نیز بایستی حداقل به اندازه‌ی دو برابر قطر فرورفتگی، از لبه فاصله داشته باشد.

ج- انتخاب گلوله فولادی و بار:

اگر قطر فرورفتگی ۰/۵-۰/۲ برابر قطر گلوله باشد، دقت خواندن بیشتر است. برای مواد سخت‌تر عدد ثابت در ستون دوم از جدول ۲، به‌طور واقعی، بزرگتر است. با توجه به جدول ۱ سختی یا نرمی مواد نیز بر بار وارده تاثیر می‌گذارد. در واقع میزان بار از رابطه $F = KD^n$ محاسبه می‌شود که D قطر گوی است و K به جنس ماده و شرایط آزمایش وابسته است.

جدول ۲- میزان نیروی لازم برای آزمایش سختی برینل

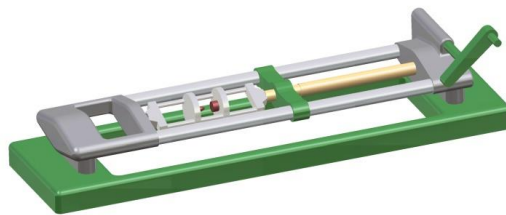
Material	K
Castiron steel	30
Copper and aluminium alloys	10
Softer Metals	2.5 or 1
Sintered Metals	10

د- هدف آزمایش:

سنجش سختی آلومینیوم، فولاد، برنج و مس.

ه- دستگاه آزمایش:

با استفاده از دستگاه آزمایش کشش (tensometer) و دستگاهی که نیروی کششی را به نیروی فشاری تبدیل می‌کند و یک میکروسکوپ که قطر اثر را اندازه می‌گیرد، آزمایش سختی را می‌توان انجام داد.



شکل ۲- دستگاه اندازه گیری سختی برینل

و- روش انجام آزمایش:

- ۱- نمونه را تمیز کرده و روی آن را با سمباده صیقلی کنید.
- ۲- در یک طرف دستگاه فشاری که روی (tensometer) سوار می شود، سندان و در طرف دیگر گوی با قطر 5 mm را قرار دهید.
- ۳- با از بین بردن لقی، سطح جیوه را روی صفر تنظیم کنید. توسط دستگاه انتقال نیرو، نیروی لازم را بر نمونه ی مورد نظر وارد آورید. نیرو باید خیلی سریع به نمونه وارد شود، مقدار نیروی لازم برای هر نمونه، در جدول (۵) ضمیمه داده شده است. مقادیر این جدول با توجه به جدول (۲) به دست آمده است.
- ۴- پس از رسیدن به نیروی مورد نظر مدت ۱۵ ثانیه صبر کرده و سپس نیرو را به صفر برگردانید. هرگونه حرکت نمونه در حین آزمایش باعث گشاده شدن سوراخ شده و سختی کمتری را نشان می دهد.
- ۵- پس از خارج کردن نمونه از دستگاه، قطر سوراخ ایجاد شده را با استفاده از میکروسکوپ اندازه گیری نمایید.
- ۶- برای هر نمونه حداقل چهار بار آزمایش سختی را در نقاط مختلف سطح آن تکرار نمایید. نقاط انتخابی نباید نزدیک به هم و نزدیک به لبه های نمونه باشند.
- ۷- عدد سختی برینل (Brinell Hardness Number) از فرمول زیر به دست می آید:

$$BHN = \frac{\text{نیروی وارد بر نمونه (kgf)}}{\text{سطح سوراخ شده (mm}^2\text{)}} = \frac{P}{\pi Dh}$$

$$h = (\text{mm}) \text{ عمق فرو رفتگی} = \frac{1}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

$D = (\text{mm})$ قطر گوی

$d = (\text{mm})$ قطر فرو رفتگی

ز- نحوه انجام محاسبات و به دست آوردن نتایج

- ۱- میانگین قطر سوراخ های ایجاد شده روی هر نمونه را محاسبه و با استفاده از فرمول، عدد سختی برینل را به دست آورید.
- ۲- مقادیر به دست آمده BHN برای نمونه های مورد آزمایش را مطابق جدول زیر تنظیم نموده و روی نتایج به دست آمده بحث کنید.

سختی برینل BHN	میانگین (d)	d_4	d_3	d_2	d_1	نوع نمونه

۳- مقدار تقریبی مقاومت کششی نمونه‌های فولادی و برنجی را به دست آورید.

ح- سوالات:

۱- مورد استفاده BHN چیست؟

۲- آیا مقدار BHN تحت اثر نیروهای مختلف وارد شده روی یک نمونه (با گوی ثابت) ثابت است یا تفاوت دارد؟

۳- آیا تغییرات قطر گوی (با نیروی ثابت) بر مقدار BHN اثر می‌گذارد؟ چگونه این قطرها برای فلزات مختلف

انتخاب می‌شوند؟

۴- در آزمایش سختی اگر قطر گوی n برابر و قطر سوراخ نیز n برابر شود، مقدار نیروی وارده چقدر باشد تا BHN

برای نمونه مورد آزمایش تغییر نکند؟

۵- آلیاژ گوی آزمایش سختی چیست؟

۶- اگر نقاط انتخابی روی سطح نمونه نزدیک به هم و یا نزدیک به لبه‌ی نمونه باشند چه تأثیری در نتیجه‌ی

آزمایش دارد؟

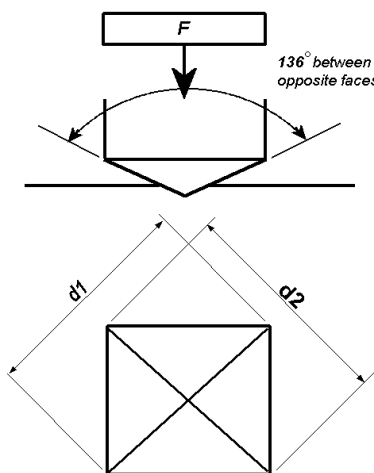
۷- چه رابط‌های بین عدد سختی و مقاومت کششی (استحکام کششی) وجود دارد؟

۲- آزمایش Vickers

در این آزمایش از یک هرم الماسی استفاده می‌شود (شکل ۲). شکل هرم به گونه‌ای است که کمترین میزان نیرو لازم است (50-1200 N) و فرورفتگی اینقدر کوچک است که نمونه تخریب نمی‌شود. برای تعیین قطر فرورفتگی از یک میکروسکوپ اندازه‌گیری استفاده می‌شود و سختی HV از جدول به دست می‌آید. سختی ویکرز (HV) عبارت است از خارج قسمت بار تقسیم بر سطح فرورفتگی هرم در نمونه.

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

در این رابطه بار بر حسب kgf و قطر بر حسب میلیمتر می‌باشد.



شکل ۲- آزمایش ویکرز

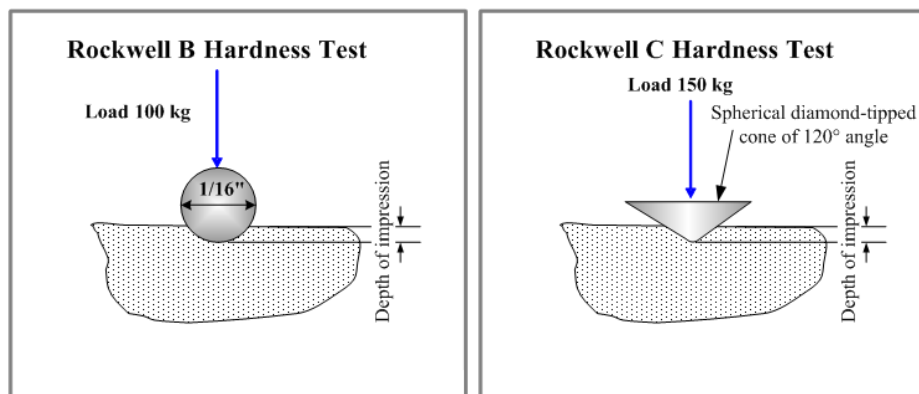
چون بار وارده بسیار کم است، از این آزمایش می‌توان برای مواد نازک و یا موادی که دارای لایه‌های سطح نازک هستند، استفاده کرد. آزمایش ویکرز را می‌توان هم برای مواد نرم و هم مواد سخت انجام داد. آزمایش را در ۴ نقطه از سطح نمونه انجام داده و برای عدد سختی ویکرز یک مقدار متوسط بیابید.

۳- آزمایش راکول

الف- مبانی

دو نوع آزمایش راکول (شکل ۳) عبارتند از:

- ۱- Rockwell B (حرف اول Ball) که در آن از یک گلوله‌ی فولادی استفاده می‌شود.
- ۲- Rockwell C (حرف اول Cone) که در آن یک مخروط الماسی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۳- آزمایش راکول B و C

در آزمایش راکول، ماشین عمق نفوذ را (به جای قطر) اندازه می‌گیرد. اندازه‌گیری به کمک یک صفحه‌ی مدرج که به نفوذکننده متصل است صورت می‌گیرد. صفحه‌ی 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 می‌توان روی صفحه‌ی مدرج خواند. عدد سختی راکول به بار وارده، نوع نفوذکننده و شکل آن بستگی دارد. بنابراین انواع مختلف آزمایش راکول را می‌توان داشت. راکول B برای مواد نرم و مواد نیمه سخت استفاده می‌شود. در حالی که آزمایش راکول C برای مواد سخت و نیمه سخت مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

ب- روش انجام آزمایش سختی راکول به کمک دستگاه Hardness tester durometer

هدف: انجام آزمایش سختی راکول B و راکول C روی ۴ نمونه مختلف.

روش آزمایش:

- ۱- نفوذکننده را در محل خود نصب کنید (برای HRB از گلوله‌ی فولادی با قطر 1.16 in و برای HRC از الماس راکول استفاده کنید) و سپس پیچ مربوطه را سفت کنید.
- ۲- بار و زمان را تنظیم کنید. (بار به وسیله‌ی یک پیچ که در جلو ماشین نصب شده، قابل تنظیم است و زمان با چرخاندن

کلید اصلی بین ۱۰ تا ۱ تنظیم می‌شود. عدد ۱۰ نشان‌دهنده‌ی ۳۰ ثانیه است) برای انجام این عمل، به جدول ۳ توجه کنید.

۳- چرخ‌دستی را پایین آورده، یک سندان مسطح را روی نگه‌دارنده‌ی آن قرار داده و نمونه‌ی آزمایش را روی آن بگذارید.

۴- چرخ‌دستی را طوری بچرخانید که نمونه بالا آمده (درجه سنجش روی صفر قرار داشته باشد) و تا وقتی که چراغ سبز روشن شود این کار را ادامه دهید (چراغ سبز به معنی شروع آزمایش است).

۵- آزمایش به طور خودکار انجام می‌شود، بار اصلی وارد شده و بعد از گذشت زمان مورد نظر، بار برداشته می‌شود.

۶- سیکل کار کامل شده است، عدد سختی را به کمک صفحه‌ی مدرج بخوانید (اعداد زرد برای HRC و اعداد قرمز برای HRB).

اگر چرخ‌دستی به اندازه‌ای چرخانده شود که لامپ قرمز روشن گردد، راهی برای انجام آزمایش وجود ندارد و مجدداً باید آزمایش را از اول شروع کنید.

جدول ۳- نمایش میزان تنظیم زمان و بار برای آزمایش‌های سختی

موقعیت زمان سنج	مقدار بار kgf	نوع آزمایش سختی
۳-۶	۶۰	راکول
	۱۰۰	
	۱۵۰	
۵-۱۰	۶۲/۵	برینل
	۱۸۷/۵	
	۲۵۰/۰	
۳-۱۰	۱۰	ویکرز
	۲۰	
	۳۰	



شکل ۴- دستگاه durometer

ضمائم:

ضمیمه الف:

جدول ۴- آزمایش های مختلف راکول به صورت گسترده تر

Indenter Total Load kp (kgs)	Steel ball				B-diamond
	1/16"	1/8"	1/4"	1/2"	
60	HRF	HRH	HRL	HRR	HRA
100	HRB	HRE	HRM	HRS	HRD
150	HRC	HRK	HRP	HRV	HRC

ضمیمه ب:

جدول ۵- اندازه ی گلوله و بار برای آزمایش های برینل

Ball Diameter D (mm)	Load in kp (kgs)				
	30 D ²	10 D ²	5 D ²	2.5 D ²	D ²
10	3000	1000	500	250	100
5	750	250	125	62.5	25
2.5	187.6	62.5	31.25	15.6	6.25
2	120	40	20	10	4
1	30	10	5	2.5	1
Used for	Iron , steel	Hard copper , alloy	Soft copper , aluminum	Softer metals	

ضمیمه ج:

جدول ۶- تبدیل سختی برای ورقه های آلیاژی

عدد سختی ویکرز یا الماسی	برینل		سختی راکولی		سختی شور اسکلروسکوپ	مقاومت کششی $1000 \frac{lb}{in^2}$
	قطر تورفتگی (mm) 3000 ks Load and 10 mm. Ball	عدد سختی	C Scale 100 kg and 120 ⁰ Diamond	B Scale 100 kg and 1/16 in. Ball		
1220	2.20	780	68	..	96	..
1114	2.25	745	67	..	94	..
1021	2.30	712	65	..	92	354
940	2.35	682	63	..	89	341
867	2.40	653	62	..	86	329
803	2.45	627	60	..	84	317
746	2.50	601	58	..	81	305
694	2.55	578	56	..	78	295
949	2.60	555	55	..	75	384
608	2.65	534	53	..	73	273
587	2.70	514	51	..	71	263
551	2.75	495	50	..	68	253
534	2.80	477	48	..	66	242
502	2.85	461	47	..	64	233
474	2.90	444	46	..	62	221
460	2.95	429	44	..	60	211
435	3.00	415	43	..	58	202
423	3.05	401	42	..	56	193
401	3.10	388	41	..	54	185
390	3.15	375	39	..	52	178
380	3.20	363	38	..	51	171
361	3.25	352	37	..	49	165
344	3.30	341	36	..	48	159
335	3.35	331	35	..	46	154

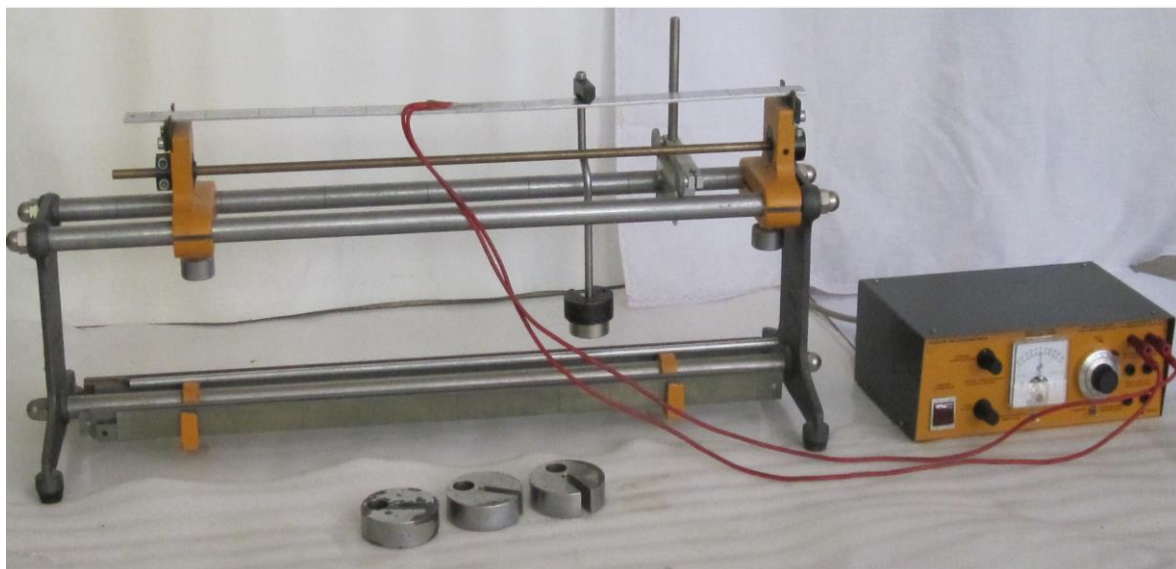
320	3.40	321	34	..	45	148
312	3.45	311	32	..	43	143
305	3.50	302	31	..	42	139
291	3.55	293	30	..	41	135
285	3.60	285	29	..	40	131
278	3.65	277	28	..	38	127
272	3.70	269	27	..	37	124
261	3.75	262	26	..	36	121
255	3.80	255	25	..	35	117
250	3.85	248	24	100	34	115
240	3.90	241	23	99	33	112
235	3.95	235	22	99	32	109
226	4.00	229	21	98	32	107
221	4.05	223	20	97	31	105
217	4.10	217	18	96	30	103
213	4.15	212	17	95	30	100
209	4.20	207	16	95	29	98
197	4.30	197	14	93	28	95
186	4.40	187	12	91	27	91
177	4.50	179	10	89	25	87
171	4.60	170	8	87	24	84
162	4.70	163	6	85	23	81
154	4.80	156	4	83	23	78
149	4.90	149	2	81	22	76
144	5.00	143	0	79	21	74
136	5.10	137	3	77	20	71

خواص مکانیکی برخی از فلزات معروف

Mechanical properties of selected metals at room temperature

Metal	Young's modulus (<i>E</i>), GPa	Shear modulus (<i>G</i>), GPa	Poisson's ratio, <i>ν</i>	Yield strength, MPa	Tensile strength, MPa	Elongation, %
Aluminum	67	25	0.345	15-20	40-50	50-70
Beryllium	303	142	0.07	262-269	380-413	2-5
Cadmium	55	19.2	0.43	...	69-83	50
Chromium	248	104	0.210	...	83	0
Cobalt	211	80	0.32	758	945	22
Copper	128	46.8	0.308	33.3	209	33.3
Gold	78	27	0.4498	...	103	30
Iron	208.2	80.65	0.291	130	265	43-48
Lead	26.1	5.6	0.44	9	15	48
Magnesium	44	16.3	0.35	21	90	2-6
Molybdenum	325	260	0.293	200	600	60
Nickel	207	70	0.31	59	317	30
Niobium	103	37.5	0.38	...	585	5
Silver	71.0	26	0.37	...	125	48
Tin	44.3	16.6	0.33	9	...	53
Titanium	120	45.6	0.361	140	235	54
Tungsten	345	134	0.283	350	150	40
Zinc	69-138	...	...	...	...	...
Zirconium	49.3	18.3	0.35	230	...	32

آزمایش ۳: اندازه‌گیری کرنش خطی
Linear Strain Measurement



هر وقت ما با یک جزء پیچیده سروکار داریم آنالیز ما تقریبی خواهد بود و باید بر حسب نیازی که داریم درجه‌ای از دقت را اختیار کنیم. تنها راهی که واقعاً می‌توان فهمید که یک قطعه تحت تأثیر بارهای وارده چگونه رفتار می‌کند، این است که آن قطعه را تا شکست تحت آزمایش قرار دهیم و چون یک قطعه ممکن است تحت تأثیر شرایط مختلف بارگذاری قرار داشته باشد ما نیز باید آزمایش‌های متعددی را در شرایط مختلف، تا شکست آن قطعه، انجام دهیم. این مسئله با توجه به صرف وقت و پول زیاد، عملاً امکان پذیر نیست.

وقتی یک آزمایش خیلی مهم انجام می‌دهیم یا قطعات خیلی گران را مورد بررسی قرار می‌دهیم، دوست داریم حتی الامکان از یک تست ساده حداکثر اطلاعات لازم را به دست آوریم، اطلاعاتی که اعتماد یا شک ما را نسبت به آنالیزمان مورد تأکید قرار دهد. به این ترتیب دقت تصمیم‌گیری‌ها و اعتماد به تحلیل خودمان را افزایش می‌دهیم. ما باید قادر باشیم که تنش‌ها و کرنش‌ها را، در تمام روی یک جسم یا در داخل آن، وقتی که بارگذاری شده است اندازه بگیریم. اما در واقع، عموماً ما فقط مشاهداتی از قسمت خارجی یک قطعه می‌توانیم داشته باشیم. آن‌گاه از مشاهدات خارجی، شرایط داخلی قطعه را باید بتوانیم استنباط کنیم. به علاوه عموماً نمی‌توان تنش را به طور مستقیم اندازه گرفت؛ زیرا وسایل فیزیکی برای این کار در اختیار نداریم و بنابراین آنچه که می‌توانیم انجام دهیم، این است که تغییر مکان‌ها و تغییر فرم‌هایی را که به علت بارگذاری ایجاد شده است اندازه بگیریم و از این اندازه‌گیری‌ها تنش‌ها را استخراج کنیم. حوزه‌ای که به نام «آنالیز تجربی تنش» معروف است، در واقع شامل اندازه‌گیری کرنش است که از آن، مقادیر تنش استنباط می‌شود.

روش‌ها و وسایل متعددی برای اندازه‌گیری کرنش موجودند. یک نکته اساسی این است که اغلب مواد مهندسی دارای مدول الاستیسیته بالا می‌باشند و کرنش‌هایی که باید اندازه گرفته شوند خیلی کوچک است. برای موادی مثل لاستیک که خاصیت الاستیک آن‌ها بالاست، ممکن است بتوان تغییر شکل یک دایره که روی یک سطح حکاکی شده است را مشاهده کرد، اما در مورد فولاد این کار ممکن است مشکل باشد و باید از روش‌ها و وسایلی استفاده کنیم که ذاتاً نسبت به تغییر مکان‌ها یا کرنش‌های خیلی کوچک، حساس می‌باشند.

به همین دلیل تعدادی از روش‌های مهم اندازه‌گیری کرنش را به طور خلاصه مورد بحث قرار می‌دهیم.

۱- روش‌های مهم اندازه‌گیری کرنش

روش اول، روش‌های نوری (Optical methods)

چون طول موج نور کوچک و قابل تولید است، روش‌های نوری متعددی برای اندازه‌گیری کرنش وجود دارد:

۱- هولوگرافی (Holography)

ما را قادر می‌سازد که تغییر مکان‌های نقاط متعدد واقع روی سطح یک جسم را به طور همزمان مشاهده کنیم. اما این روش، هنوز به اندازه کافی توسعه نیافته است.

۲- فتوالاستیسیته (Photoelasticity)

روش بسیار توسعه یافته‌ای است که به طور خاص برای مسائل تنش صفحه‌ای (Plane stress) قابل کاربرد است. قطعه مورد نظر به صورت مدلی که دارای خاصیت انکسار مضاعف نور است در می‌آید و بارگذاری می‌شود در حالی که نور پلاریزه از میان آن عبور داده شده است. وقتی این عمل به طرز صحیح انجام شده باشد، خطوط نور یا انکسارات را می‌توان مشاهده کرد و کرنش مربوطه را می‌توان تعبیر کرد.

۳- فتوالاستیسیته انکساری (Reflective Photoelasticity)

این روش شامل به کار بردن یک لایه یا ماده دارای خاصیت انکسار مضاعف بر روی سطح یک قطعه است. نور پلاریزه از قطعه منعکس می‌شود و بر حسب کرنش‌های سطح تعبیر می‌گردد.

۴- فتوالاستیسیته سه بعدی

این روش شامل استفاده از تکنیک‌های «انجماد» و «جزء جزء کردن» است اما استفاده از آن خیلی مشکل می‌باشد.

روش دوم: رنگ (لاک) ترد (Brittle Lacquer)

مواد ترد ذاتاً به کرنش بسیار حساسند و اگر در کشش خیلی زیاد کرنش یابند، بریده می‌شوند. از این مسئله در روش رنگ ترد (Brittle Lacquer) برای ثبت کرنش استفاده می‌شود. اساساً لایه‌ای نازک از یک رنگ لاک خیلی بی دوام روی سطح قطعه گسترده می‌شود. بعد از اینکه لاک سخت شد، قطعه بارگذاری می‌شود. اگر قطعه دقیقاً مورد مطالعه قرار گیرد، اولین ترک‌هایی که در لاک مشاهده می‌شود نشان دهنده نقطه ماکزیمم کرنش کششی خواهد بود. در حین ادامه بارگذاری، شخص می‌تواند بارهایی را که در آن‌ها در سطح‌های مختلف پوشش، ترک ظاهر می‌شود را ثبت کند. این مسئله برخی اطلاعات را در مورد کرنش نسبی سطوح به او می‌دهد. این یک آزمایش ساده است که نتایج کیفی خوبی را به دست می‌دهد. به علاوه جهات کرنش‌های اصلی را از روی جهات ترک‌ها می‌توان فهمید.

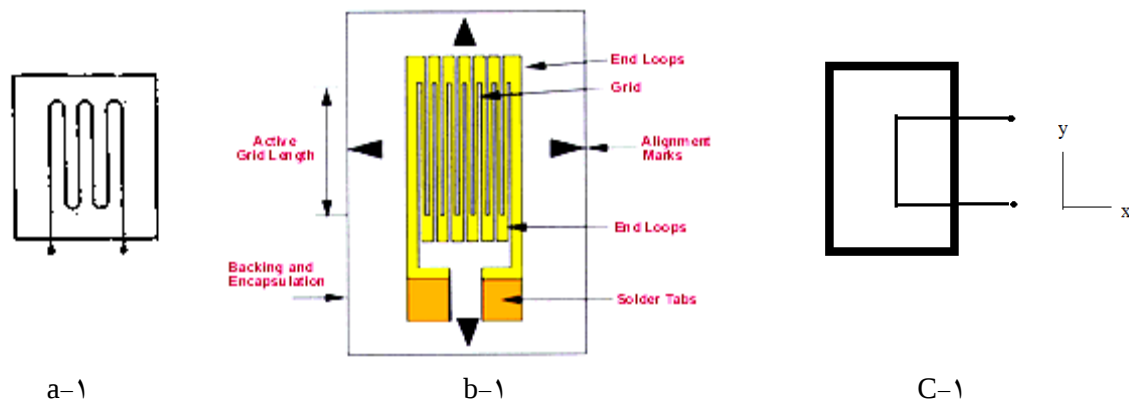
روش سوم: استفاده از کرنش‌سنج‌ها (Strain gauges)

یکی از متدهای اندازه‌گیری کرنش، عبارت است از تکنیک‌های اندازه‌گیری الکترونیکی. هرهادی یا نیمه‌هادی، اگر کشیده یا فشرده شود، یک تغییر در مقاومت الکتریکی را متحمل می‌گردد و نیمه‌هادی‌ها شاید ۵۰ تا ۲۰۰ برابر حساس تر از هادی‌ها هستند.

“Strain gauge” یک نام عام است که به وسایل متعددی که برای اندازه‌گیری الکترونیکی کرنش به کار می‌روند اطلاق می‌شود. کرنش‌سنج‌ها به مقدار زیاد نه فقط برای ثبت کرنش در طراحی و آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرند، بلکه به عنوان مبدل (transducer) در بسیاری از وسایل اندازه‌گیری نیرو، فشار، شتاب و غیره به کار می‌روند. چون کرنش‌سنج‌ها خیلی گسترده هستند و نتایج کمی خوبی ارائه می‌دهند، آن‌ها را به طور جزئی تر شرح می‌دهیم.

انواع مختلف کرنش‌سنج‌ها

شکل زیر سه نوع از اندازه‌گیری‌ها که برای اندازه‌گیری کرنش در جهت γ مورد استفاده قرار می‌گیرند را نشان می‌دهد.



شکل ۱- انواع کرنش سنج

طول اندازه گیرها (L) نوعاً 0.06 in تا 0.5 in است و آنها به صورت ساده‌ای روی سطح مورد آزمایش چسبانده شده‌اند.

شکل (a-1): در اندازه گیرهای سیمی (Wire gauges) از یک سیم به قطر 0.001 in استفاده می‌شود. برای چنین قطر کمی، نسبت مساحت سطح قطعه به مساحت مقطع سیم، بالاست و وقتی که قطعه کشیده شود، سیم نیز کشیده خواهد شد. سیم به صورت یک سیم پیچ مسطح درآمده و بین لایه‌های صفحات مجزا چسبانده شده است.

شکل (b-1): در اندازه گیرهایی که در آنها از ورقه‌های فلزی نازک استفاده می‌شود (foil gauges) و امروز به طور گسترده‌ای مورد استفاده هستند، کوئل از یک لایه ورقه فلزی نازک به ضخامت 0.0001 in که بین لایه‌های پلاستیک قرار گرفته ساخته شده است.

شکل (c-1): در اندازه گیرهای نیمه‌هادی (Semiconductor gauges) کرنش سنج از قطعه‌ای خیلی نازک و ماده‌ای نیمه‌هادی از نوع P یا N، با اتصالات دو سر، ساخته شده است و بین لایه‌های پلاستیک محکم قرار گرفته است. وقتی اندازه گیرهای فلزی نشان داده شده در شکل ۱ در جهت y کشیده شوند، مقاومت آنها به علت افزایش طول و کاهش سطح مقطعشان افزایش می‌یابد (اثر پوآسون).

حساسیت اندازه گیر بر حسب تغییر در مقاومت تقسیم بر مقاومت اولیه بیان می‌شود.

ضریب اندازه گیر (gauge factor) عبارت است از تغییر نسبی مقاومت تقسیم بر کرنش محوری

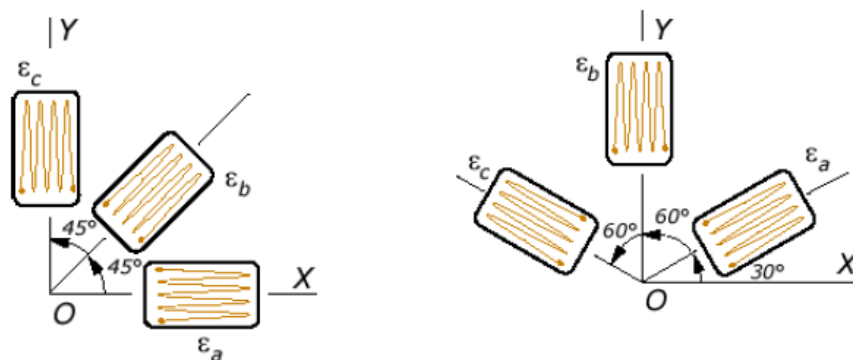
اندازه گیرهای نیمه‌هادی، به علت تغییر در قابلیت تحرک الکترون که با کرنش ایجاد شده همراه است تغییر در مقاومت خیلی بزرگتری را تحمل می‌کنند. محدوده ضریب اندازه گیر آنها از ۵۰ تا ۳۰۰ است. این حساسیت بالا با اثر حرارتی غیر قابل نیاز و نسبتاً بزرگ همراه است.

در بسیاری از کاربردها، اندازه گیرهای کرنش به داخل یک پل وتستون (Wheatstone Bridge) سیم کشی شده‌اند، ترکیبی از ۴ مقاومت کننده که تمام آنها (یا هر کدام آنها) می‌توانند اندازه گیر کرنش باشند. با قرار دادن درست و سیم کشی صحیح اندازه گیر، بسیاری از اثرات غیر دلخواه را می‌توان از خروجی حذف کرد. همچنین اندازه گیرهایی برای حالت عمومی کرنش ساخته شده‌اند.

چگونگی استفاده از پل وتستون و خوشه کرنش سنج (Strain rosettes)

وقتی جسم بارگذاری می‌شود، کرنش سنج‌ها تغییر شکل می‌دهند و اگر کرنش در جهت کرنش سنج باشد، باعث یک تغییر جزئی در مقاومت الکتریکی اندازه‌گیر می‌شود. با استفاده از پل وتستون، این تغییر کوچک در مقاومت الکتریکی را می‌توان اندازه گرفت و از این اندازه‌گیری، کرنش عمودی در جهت کرنش سنج را به دست آورد. با به کار بردن حفاظ‌های مخصوص، می‌توان کرنش سنج‌ها را در زیر آب یا در نواحی با درجه حرارت خیلی بالا (بالا تر از 2000°F برای اندازه‌گیری‌های ویژه) به کار برد. چون یک کرنش سنج فقط کرنش عمودی در یک جهت را اندازه می‌گیرد، برای به دست آوردن اطلاعات مربوط به حالت کرنش در یک نقطه (مثلاً کرنش‌های اصلی در یک نقطه) باید یک خوشه از کرنش سنج‌ها (Strain rosettes) را مورد استفاده قرار دهیم.

ترتیبی شبیه آنچه در شکل (۲-سمت چپ) نشان داده ایم را یک خوشه راست گوشه (Rectangular) و ترتیب شبیه شکل (۲-سمت راست) را خوشه متساوی الزاویه (equiangular) نامند. باید توجه داشت که خوشه باید نسبت به جسم به قدر کافی کوچک باشد تا اندازه‌گیرها با مفهوم «کرنش در یک نقطه روی سطح» مطابقت داشته باشد.



شکل ۲- کرنش سنج‌های خوشه‌ای

۲- پل اندازه‌گیر کرنش (Strain Gauge Bridge MT 3004)

MT3004 یک پل اندازه‌گیری برای مطالعه خیز و تغییرات بار است که همزمان با ماشین‌های آزمایش خمش و پیچش MT3005، قابل استفاده است. نمونه‌های فولادی و آلومینیومی با این پل قابل آزمایش است. نمونه‌های آزمایش با دو Strain Gauge (120Ω) تهیه شده و کابل‌ها و اتصالات مربوطه اندازه‌گیرهای کرنش را به پل اندازه‌گیر مربوط می‌کنند. Gauge در مقابل رطوبت و خطرات مکانیکی دیگر، محافظت شده است.

پل اندازه‌گیر از مدارهای بزرگی ساخته شده است. کرنش در واحد طول (Strain) مستقیماً از روی پتانسیومتر مدرج ده دوری، قابل خواندن است. پل، همچنین برای اتصال با یک اسیلوسکوپ برای مطالعه تغییرات بار، دارای یک خروجی است.

۳- دستگاه آزمایش

ولتاژ تولیدی:	۲۲۰-۲۴۰ V AC ۵۰-۶۰ HZ
قدرت مصرفی تقریبی:	۲۰ W
محدوده اندازه گیری کرنش:	۰-۲۰۰۰ μ Strain
دقت:	$\pm 1\%$
ابعاد:	۲۷۵×۱۷۵×۱۰۰ mm
وزن:	۲kg

۴- روش آزمایش کرنش، با راهنمای استفاده از اندازه گیر کرنش Strain Gauge Briage MT3004

- ۱- نمونه را روی دو تکیه گاه قرار دهید (طول L و نیروهای F، اختیاری است).
- ۲- برق ۲۲۰V را به پل وصل کنید.
- ۳- انتهای یکی از اندازه گیرهای کرنش را به Reference Gauge یا مبنای اندازه گیری وصل کنید و دیگری را به Active Gauge متصل نمایید.
- ۴- با تنظیم اولیه پتانسیومتر، پل را روی صفر تنظیم کنید (به وسیله تنظیم دکمه Initial Adjustment)
- ۵- به نمونه نیرو وارد کنید و این دفعه پل را به وسیله تنظیم کردن دکمه Strain Balance با پتانسیومتر ده دوری مدرج، روی صفر قرار دهید، کرنش را مستقیماً از روی این پتانسیومتر بر حسب μ -strain بخوانید.
- برای یافتن مقدار واقعی کرنش، اعداد خوانده شده از روی پتانسیومتر را باید نصف کرد.

۵- نحوه انجام محاسبات و به دست آوردن نتایج

- ۱- پل، برای یک ضریب اندازه گیر $k=2/10$ طرح شده است، اگر Gauge مورد استفاده فاکتوری غیر از $2/10$ داشته باشد، باید موازنه لازم صورت بگیرد.
- مثال:

$$\text{Gauge factor} = 2/15$$

کرنش اندازه گرفته شده روی پل:

$$2000 (10)^{-6} \text{ mm}$$

مقدار واقعی کرنش:

$$2000 \times \frac{2/10}{2/15} \times 10^{-6} = 1860 \times 10^{-6} \text{ mm} = (2/15) \text{ ضریب اندازه گیر}$$

طبق معمول، ضریب اندازه گیر کرنش برای هر Gauge روی نمونه ها نوشته است، به علامت روی نمونه ها توجه کنید.

۲- وقتی کرنش خطی در یک حالت بارگذاری خاص پیدا شد، تنش را می توان به کمک قانون هوک پیدا کرد، که در آن:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

مدول الاستیسیته برای ماده مورد نظر بر حسب

$$\sigma = \dots \text{ kgf} / \text{ mm}^2$$

$$E = \dots \text{ kgf} / \text{ mm}^2$$

کرنش خطی در واحد طول

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \dots$$

۳- با اندازه گیری دهانه پل، بار F و ابعاد نمونه، برای حالت بارگذاری خاص، تنش را به روش تئوری محاسبه کنید و با مقادیر عملی مقایسه کنید.

۶- سوالات

- ۱- طرز کار Strain gauge، روابط مربوطه و چگونگی اندازه گیری کرنش توسط آن را بنویسید.
- ۲- در مورد انواع مختلف Strain gauge تحقیق کرده و نتیجه را بنویسید.
- ۳- یک بررسی در مورد کرنش های اصلی و دایره موهر کرنش ها در سه بعد انجام داده و نتیجه را بنویسید.
(تعریف کرنش اصلی، روابط تبدیل کرنش از یک مختصات به مختصات دیگر، دایره موهر کرنش و...)
- ۴- فرقهادی ها و نیمه هادی ها را بنویسید.

آزمایش ۴: اندازه‌گیری کرنش و تنش در استوانه‌ها



قسمت اول: استوانه جدار نازک تحت فشار

مقدمه

اندازه گیری کرنش و تنش در استوانه های جدا نازک، کاربردهای فراوانی در صنعت دارد. به کمک دستگاه موجود می توان کرنش را اندازه گرفته، نتایج را مورد بررسی و دقت قرار داده و با نتایج حاصل از مقادیر تئوری مقایسه کرد. ضمناً برای یافتن ثوابت مهندسی یک ماده (v,E) از این آزمایش می توان استفاده نمود.

۱- مبانی و تئوری استوانه های جدار نازک

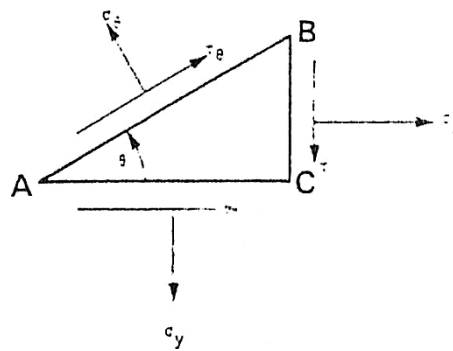
الف- تجزیه و تحلیل تنش و کرنش در حالت کلی

الف-۱- علائم و اختصارات: کمیت های مورد استفاده در این دستور کار را با علائم و اختصارات زیر نشان داده ایم:

$\sigma (MN / m^2)$	تنش عمودی
$\tau (MN / m^2)$	تنش برشی
θ (degree)	موقعیت زاویه ای کرنش سنج ها
$P (MN / m^2)$	فشار داخلی استوانه
$\mu \epsilon$	کرنش $\mu = 10^{-6}$
E	ضریب یانگ
ν	نسبت پواسون
d	قطر داخلی استوانه
t	ضخامت دیواره استوانه
H با زیرنویس	تنش یا کرنش حلقوی یا محیطی
L با زیرنویس	تنش یا کرنش طولی
*	کرنش در حالت انتهای باز

الف-۲- تحلیل تنش و کرنش

در شکل ۱ نیروهای وارد بر یک المان دو بعدی نشان داده شده است:



شکل ۱

با تجزیه نیروها در امتداد σ_θ داریم:

$$\begin{aligned}\sigma_\theta &= (\sigma_y \cos \theta) \cos \theta + (\sigma_x \sin \theta) \sin \theta + (\tau_{xy} \cos \theta) \sin \theta + (\tau_{xy} \sin \theta) \cos \theta \\ \sigma_\theta &= \sigma_y \cos^2 \theta + \sigma_x \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \\ \sigma_\theta &= \sigma_y \left(\frac{\cos 2\theta + 1}{2} \right) + \sigma_x \left(\frac{1 - \cos 2\theta}{2} \right) + \tau_{xy} \sin 2\theta \\ \sigma_\theta &= \frac{1}{2}(\sigma_y + \sigma_x) + \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta\end{aligned}\quad (1-1)$$

و با تجزیه نیروها در امتداد τ_θ داریم:

$$\begin{aligned}\tau_\theta &= (\sigma_y \cos \theta) \sin \theta - (\sigma_x \sin \theta) \cos \theta + (\tau_{xy} \sin \theta) \sin \theta - (\tau_{xy} \cos \theta) \cos \theta \\ \tau_\theta &= \sigma_y \left(\frac{\sin 2\theta}{2} \right) - \sigma_x \left(\frac{\sin 2\theta}{2} \right) + \tau_{xy} \sin^2 \theta - \tau_{xy} \cos^2 \theta \\ \tau_\theta &= \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \sin 2\theta - \tau_{xy} \cos 2\theta\end{aligned}\quad (2-1)$$

الف-۳- صفحات اصلی:

(صفحات اصلی تنش) صفحاتی هستند که تنش‌های وارده روی آنها فقط تنش‌های عمودی می‌باشند و تنش‌های برشی روی این صفحات وجود ندارند. بنابراین در معادله ۱-۲، با قرار دادن $\tau_\theta = 0$ می‌توان مقادیری از σ_x ، τ_{xy} و σ_y (که باعث ایجاد تنش‌های اصلی در امتداد θ می‌شوند) را به دست آورد:

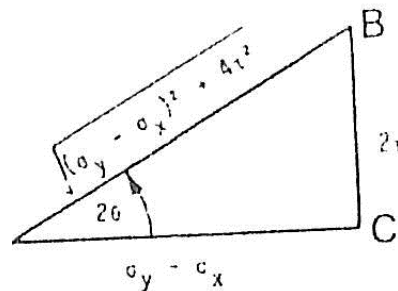
$$\frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \sin 2\theta - \tau_{xy} \cos 2\theta = 0$$

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \tan 2\theta$$

$$\tan 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_y - \sigma_x}\quad (3-1)$$

با داشتن مقادیر σ_x ، σ_y و τ_{xy} می‌توان دو امتداد اصلی با زاویه 2θ را یافت که بر روی المان اختیار شده از جسم در آن امتداد، به اندازه 90° از یکدیگر فاصله دارند (θ_1, θ_2) .

اگر معادله (۳-۱) را به صورت شکل (۲) رسم کنیم، خواهیم داشت:



شکل ۲

$$\sin 2\theta = \pm \frac{2\tau_{xy}}{\sqrt{(\sigma_y - \sigma_x)^2 + 4\tau^2}} \quad (۴-۱)$$

$$\cos 2\theta = \pm \frac{\sigma_y - \sigma_x}{\sqrt{(\sigma_y - \sigma_x)^2 + 4\tau^2}} \quad (۵-۱)$$

الف - ۴- تنش‌های اصلی:

تنش‌های وارد روی صفحات اصلی تنش‌های اصلی نامیده می‌شود و از جنس تنش‌های عمودی هستند. با جایگزینی مقادیر فوق در معادله (۱-۱) داریم:

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \pm \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_y - \sigma_x)^2 + 4\tau^2} \quad (۶-۱)$$

تنش‌های اصلی، حداکثر و حداقل مقادیر تنش در سیستم مورد نظر را نشان می‌دهند. علامت این تنش‌ها نشان دهنده نوع آن‌ها است (تنش فشاری با علامت منفی و تنش کششی با علامت مثبت نشان داده می‌شود).

با توجه به شکل ۳ و با این فرض که صفحات BC و AC صفحات اصلی تنش هستند. (یعنی روی آن‌ها $\tau = 0$), σ_1 و σ_2 تنش‌های اصلی می‌باشند و مقدار تنش برشی در زاویه θ از رابطه زیر حاصل می‌شود:

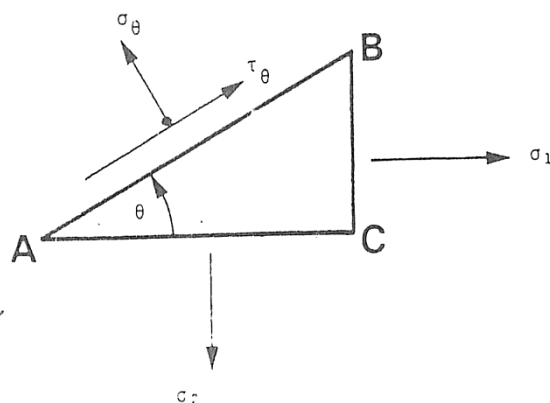
$$\tau_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_1) \sin 2\theta \quad (۷-۱)$$

وقتی $\theta = 45^\circ$ باشد $\sin 2\theta = 1$ است. بنابراین تنش برشی ماکزیمم روی صفحاتی که با جهات اصلی تنش زاویه 45° می‌سازند اتفاق می‌افتد و:

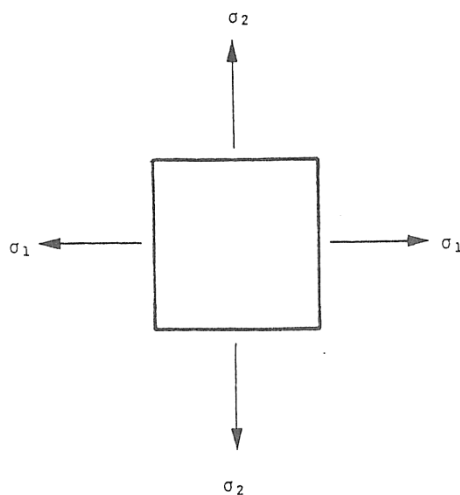
$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_1) \quad (۸-۱)$$

و یا با استفاده از معادله (۶-۱)

$$\tau_{\max} = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau^2} \quad (۹-۱)$$



شکل ۳- تنش در دستگاه مختصات اصلی



شکل ۴- نمودار تنش‌های اصلی روی المان

الف-۵- کرنش‌های اصلی

کرنش‌های ایجاد شده در جهات اصلی را کرنش‌های اصلی گویند (ϵ_1, ϵ_2) و عبارتند از:

$$\left\{ \begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{\sigma_1}{E} - \frac{\nu \sigma_2}{E} \end{aligned} \right. \quad (۱۰-۱) \text{ در جهت ۱:}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \epsilon_2 &= \frac{\sigma_2}{E} - \frac{\nu \sigma_1}{E} \end{aligned} \right. \quad (۱۱-۱) \text{ در جهت ۲:}$$

علامت (-) برای فشار و علامت (+) برای کشش منظور شده است.

الف-۶- دایره موهر کرنش

از کرنش‌های فوق می‌توان برای رسم دایره موهر کرنش استفاده کرد. با توجه به شکل (۵):

$$OB = \epsilon_1 = \text{کرنش اصلی ماکزیمم}$$

$$OA = \epsilon_2 = \text{کرنش اصلی مینیمم (در صفحه عمود بر کرنش اصلی ماکزیمم اتفاق می‌افتد)}$$

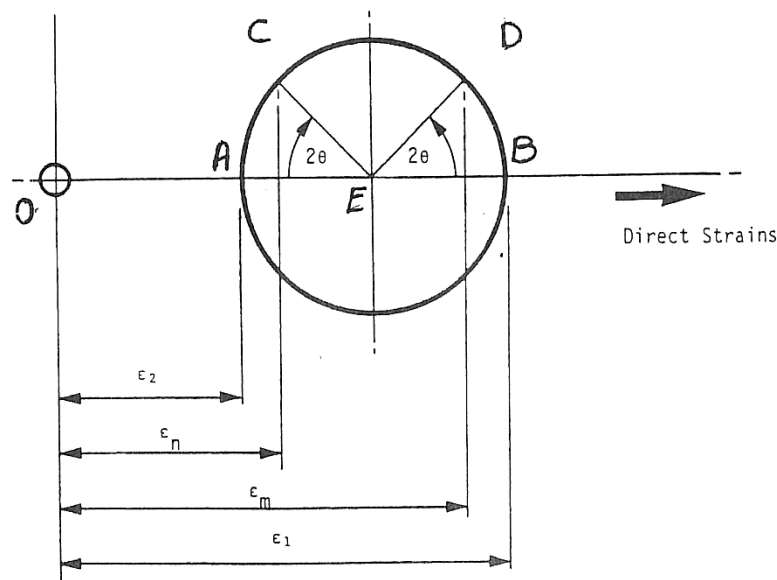
$$E = \text{مرکز دایره موهر کرنش}$$

اکنون، با توجه به شکل (۵) روابط زیر را می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} \epsilon_m = \epsilon_2 + \left(\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \right) + \left(\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \right) \cos 2\theta \\ \epsilon_n = \left(\frac{\epsilon_2 + \epsilon_1}{2} \right) + \left(\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \right) \cos 2\theta \end{cases} \quad (12-1)$$

و:

$$\begin{cases} \epsilon_n = \epsilon_2 + \left(\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \right) - \left(\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \right) \cos 2\theta \\ \epsilon_n = \left(\frac{\epsilon_2 + \epsilon_1}{2} \right) - \left(\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \right) \cos 2\theta \end{cases} \quad (13-1)$$



شکل ۵- نمایش کرنش‌های روی دایره موهر

ب- تحلیل تنش و کرنش در دستگاه آزمایش استوانه جدار نازک

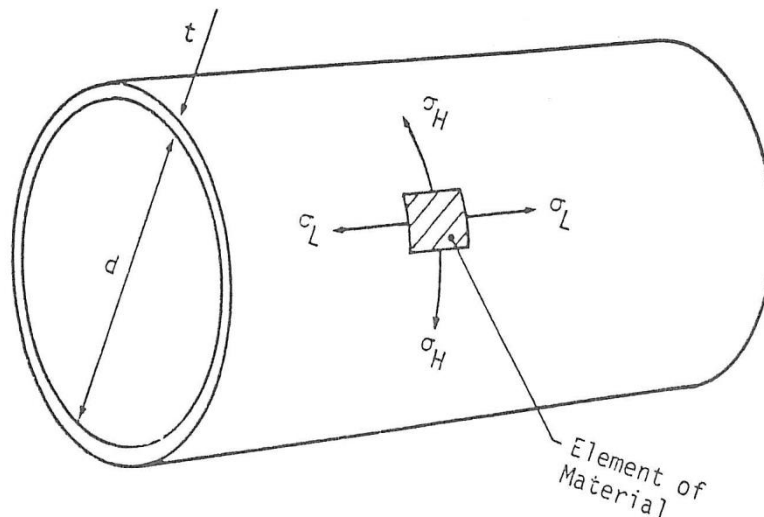
در استوانه جدار نازک، که نسبت ضخامت به قطر داخلی آن کمتر از $\frac{1}{20}$ می‌باشد، می‌توان مقادیر σ_L و σ_H

یعنی تنش‌های حلقوی و طولی را در ضخامت دیواره استوانه را به عنوان مقادیری ثابت در نظر گرفته و از تنش‌های

شعاعی کوچک ایجاد شده صرف نظر نمود. از تقارن معلوم است که دو تنش اصلی موجود در جداره استوانه (σ_L, σ_H) همان تنش‌های اصلی هستند و از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\sigma_H = \frac{Pd}{2t} \quad (۱۴-۱)$$

$$\sigma_L = \frac{Pd}{4t} \quad (۱۵-۱)$$



شکل ۶- استوانه جدار نازک و نمایش تنش‌های اصلی روی المانی از جداره آن

همانطور که در بخش روش انجام آزمایش اشاره خواهد شد به کمک وسایل تعبیه شده در دستگاه آزمایش می‌توان دو حالت از تنش را در استوانه ایجاد کرد. این دو حالت، تحت نام‌های «حالت انتهای باز» و «حالت انتهای بسته» نامگذاری شده‌اند.

ب-۱- حالت انتهای باز برای ایجاد تنش و کرنش

در این حالت هیچ قیدی در انتهای استوانه نیست بنابراین تنش طولی σ_L صفر است، اما به خاطر وجود اثر پواسون مقداری کرنش در این امتداد وجود دارد. اگر یک المان از ماده را در نظر بگیریم، کرنش‌های اصلی حلقوی (ε_H^*) و طولی (ε_L^*) که هر دو به خاطر وجود تنش حلقوی ایجاد شده‌اند، عبارتند از:

$$\varepsilon_H^* = \frac{\sigma_H}{E} \quad (۱۶-۱)$$

$$\varepsilon_L^* = -\frac{\nu \sigma_H}{E} \quad (۱۷-۱)$$

همانطور که از معادله (۱۷-۱) مشاهده می‌شود، در این حالت (ε_L^*) مقداری منفی دارد، یعنی استوانه در امتداد طولی تحت فشار است.

ب-۲- حالت انتها بسته برای ایجاد تنش و کرنش

با مقید کردن دو انتهای استوانه، تنش‌های طولی (σ_L) و محیطی (σ_H) به استوانه تحمیل می‌شود. کرنش‌های حلقوی و طولی برای یک المان از ماده بخاطر وجود تنش حلقوی، عبارتند از:

$$\varepsilon_H = \frac{\sigma_H}{E} \quad (18-1)$$

$$\varepsilon_L = \frac{\nu \sigma_H}{E} \quad (19-1)$$

و کرنش‌های حلقوی و طولی ناشی از تنش طولی، برابرند با:

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_L}{E} \quad (20-1)$$

$$\varepsilon_H = \frac{\nu \sigma_L}{E} \quad (21-1)$$

در این حالت، کرنش‌های اصلی، از ترکیب کرنش‌های طولی و حلقوی به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\varepsilon_H = \frac{1}{E} (\sigma_H - \nu \sigma_L) \quad (22-1)$$

$$\varepsilon_L = \frac{1}{E} (\sigma_L - \nu \sigma_H) \quad (23-1)$$

با توجه به فرمول‌های فوق، می‌توان کرنش‌های اصلی را محاسبه کرد.

برای هر کدام از حالات انتهای باز یا انتهای بسته، می‌توان کرنش‌های اصلی را محاسبه نموده و دایره موهر مربوطه را رسم کرد. به کمک این دایره، می‌توان در هر موقعیت کرنش را نسبت به محورهای اصلی، تعیین نمود.

ب-۳- تعیین مقدار ضریب پواسون:

با تقسیم معادله (۱۷-۱) به (۱۶-۱)، رابطه‌ای برای یافتن این ضریب در حالت (انتهای باز) به دست می‌آید:

$$\frac{\varepsilon_L^*}{\varepsilon_H^*} = -\nu \quad (24-1)$$

۲- دستگاه آزمایش و عملکرد آن

این دستگاه در شکل ۷ نشان داده شده و استوانه‌ای جدار نازک است که روی سطح خارجی‌اش، در مکان‌ها و امتدادهای مختلف، کرنش‌سنج‌هایی نصب گردیده است. از این کرنش‌سنج‌ها برای تعیین و تفسیر کرنش‌ها و تنش‌های حاصله در یک سیستم تنش دو بعدی (یعنی حالت دو انتها بسته) استفاده می‌شود. همچنین برای رها کردن استوانه از همه

تنش‌های طولی، وسایلی در آن تعبیه شده است، از این حالت به عنوان (حالت دو انتها باز) نام می‌بریم و به کمک آن می‌توان مقدار ضریب پوآسون و مدول یانگ (که ثابت مهندسی مهم یک ماده هستند) را به طور دقیق تعیین کرد.

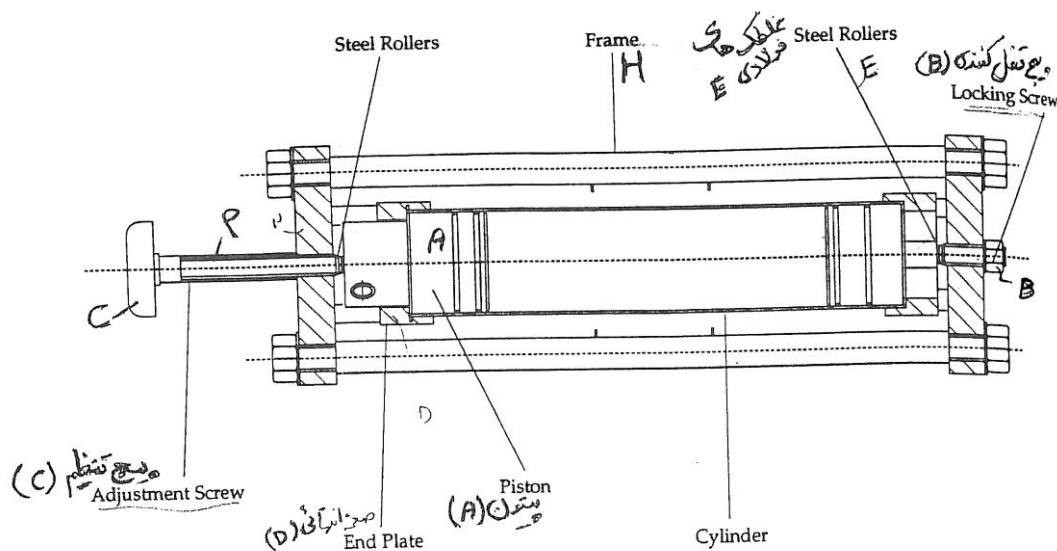
- حالت دو انتها بسته: حالت تنش دو محوری (تنش‌های طولی و محیطی)
- حالت دو انتها باز: حالت تنش تک محوری (تنش محیطی)



شکل ۷

۲-الف - چگونگی عملکرد استوانه جدار نازک

شکل ۸ استوانه جدار نازک آلومینیومی را نشان می‌دهد که به یک پایه ثابت متصل است. این استوانه شامل یک پیستون آزاد است (پیستون A) که به کمک یک پیچ تنظیم می‌تواند به سمت داخل یا خارج استوانه حرکت کند و شرایط انتهایی استوانه را تغییر دهد. به منظور تعیین فشار داخلی موجود در استوانه، یک فشارسنج ($0.3/5 \text{ MN/m}^2$) بر روی دستگاه نصب شده است. با استفاده از یک پیچ قفل‌کننده (B) و یک پیچ تنظیم (C)، استوانه را به صورت محوری قرار داده ایم.

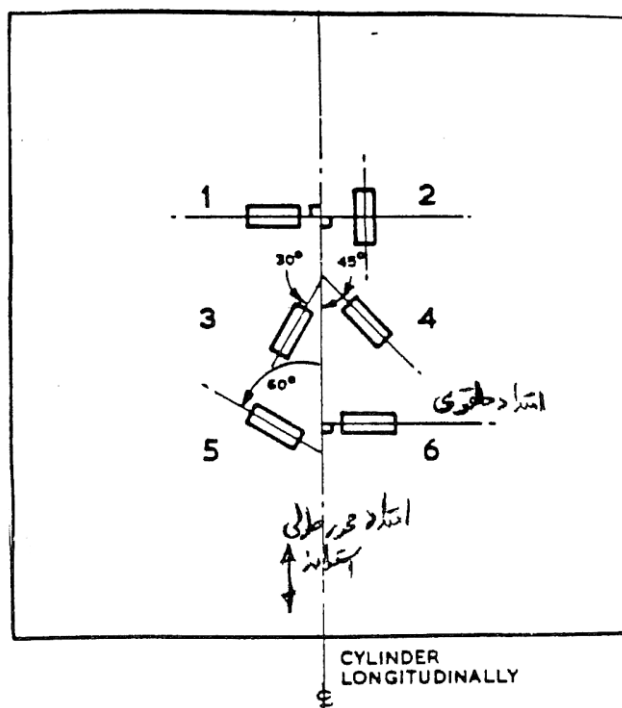


شکل ۸ - مقطع طولی دستگاه آزمایش استوانه جدار نازک

وقتی پیچ تنظیم (C) به طرف خارج پیچانده شود، روغن موجود در سیلندر، که تحت فشار است، باعث فشردن

پیستون در برابر صفحه انتهایی (D) می‌شود و هنگامی که پیچ (C) به طرف داخل پیچانده شود در جهت دور شدن از صفحه انتهایی به پیستون نیرو وارد کرده و نتیجتاً تمام بار محوری به قاب وارد می‌شود و استوانه از همه تنش‌های طولی تخلیه می‌گردد. برای انتقال بار محوری خالص از استوانه به قاب، از غلتک‌های فولادی سخت شده‌ای (E) که در انتهای پیچ قفل‌کننده (B) و پیچ تنظیم (C) نصب شده استفاده می‌شود.

شکل ۱-۳ نشان دهنده موقعیت و امتداد ۶ عدد کرنش سنج فعالی است که روی سطح خارجی استوانه نصب شده‌اند.



شکل ۹- نمایش مکان‌ها و امتدادهای نصب کرنش‌سنج‌ها روی سطح خارجی استوانه

این کرنش‌سنج‌ها، کرنش‌سنج‌هایی از نوع خود جبران برای درجه حرارت هستند و متناسب با خواص حرارتی استوانه انتخاب شده‌اند. هر کرنش سنج، وقتی در مدار قرار گیرد، یک بازوی پل و تسون را تشکیل می‌دهد و سه بازوی دیگر پل و تسون، به طور دائمی در داخل دستگاه اندازه‌گیر کرنش قرار گرفته‌اند. اتصال بین کرنش‌سنج‌های موجود در پل و کرنش سنج نصب شده روی استوانه به وسیله یک کلید چند شاخه صورت می‌گیرد. در این آزمایش به کمک پل کرنش سنج E-۱۰ در هر موقعیت خاص می‌توان میزان کرنش ایجاد شده در هر کرنش سنج را به طور دقیق اندازه گرفت. برای ارسال روغن تحت فشار به داخل استوانه، شیر برگشتی را، که روی پمپ دستی نصب شده، بسته و با استفاده از پمپ دستی، روغن به داخل استوانه فرستاده می‌شود. فشارسنج نصب شده روی دستگاه، میزان فشار را در هر وضعیت خاص نشان می‌دهد. با باز کردن شیر برگشت، روغن به داخل پمپ برگشته و فشار از داخل استوانه برداشته می‌شود.

ظرفیت استوانه	تقریباً ۲ لیتر روغن
فشار داخلی	حداکثر تا $3/5 \text{ MN/m}^2$
قطر داخلی	$76/14 \text{ mm}$
ضخامت دیواره	$3/18 \text{ mm}$
طول استوانه	$360/00 \text{ mm}$
جنس استوانه	آلیاژ آلومینیوم
مدول یانگ استوانه	69 GN/m^2
ضریب پوآسون استوانه	$0/33$

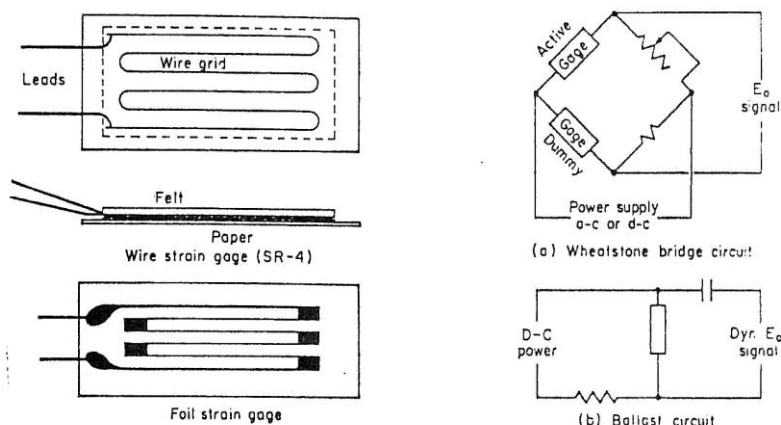
۲-ج- توضیحاتی در مورد کرنش سنج ها و کرنش های اندازه گیری شده

هر کرنش سنج دارای «ضریب اندازه گیر» معینی است که توسط کارخانه سازنده آن داده می شود. در دستگاه آزمایش مورد نظر ما، ضریب اندازه گیر برای همه کرنش سنج ها مساوی و برابر با $2/15$ می باشد.

$$\text{ضریب اندازه گیر برای یک کرنش سنج} = \frac{\text{تغییر نسبی مقاومت الکتریکی کرنش سنج}}{\text{کرنش محوری ایجاد شده در آن کرنش سنج}}$$

کرنش بر حسب $\mu\epsilon$ ($10^{-6} \times \text{کرنش}$) توسط دستگاه کرنش سنج خوانده می شود. برای هر کرنش سنج رابطه $\epsilon = \frac{\Delta R / R}{G_f}$ نشان دهنده میزان کرنش اندازه گیری شده است که در آن ΔR عبارت است از تغییر مقاومت الکتریکی اندازه گیری شده و ϵ کرنشی است که باعث این تغییر مقاومت شده است. برای اینکه بتوانیم سیگنال حاصل از تغییر در مقاومت الکتریکی کرنش سنج را آشکار کنیم، از یک واحد اندازه گیری کرنش که اغلب شامل یک پل وتستون یا یک مدار [مشابه شکل ۱۰ (a و b)] می باشد، استفاده کنیم.

کرنش و سیگنال مربوطه غالباً آنقدر کوچک اند که نیاز به تقویت کننده وجود دارد. سیگنال توسط یک گالوانومتر، اسیلوسکوپ یا وسیله ای دیگر خوانده می شود و دستگاه کرنش سنج به کمک ترکیبی از وسایل فوق، کرنش را مستقیماً اندازه می گیرد. اطلاعات بیشتر در مورد کرنش سنج ها در دستور کار مربوط به آزمایش «اندازه گیری کرنش خطی» آمده است.



شکل ۱۰- نمونه هایی از مدارهای شامل کرنش سنج

۳- روش انجام آزمایش

اهداف آزمایش

- الف- اندازه گیری کرنش ها در استوانه جدار نازک
 - ب- محاسبه کرنش های تنوری و مقایسه آن ها با مقادیر تجربی
 - ج- به دست آوردن ضریب یانگ برای یک ماده (E)
 - د- به دست آوردن ضریب پواسون برای یک ماده (ν)
 - ه- شناخت، اندازه گیری و محاسبه کرنش های اصلی
 - و- رسم دواير موهر کرنش
 - ز- شناخت کرنش ها و تنش های اصلی و محاسبه آن ها
- برای انجام آزمایش با دستگاه استوانه جدار نازک، می توان آن را در دو حالت مورد استفاده قرار دارد. روش انجام آزمایش در هر حالت به طور جداگانه ذیلاً توضیح داده می شود:

۳- الف- روش انجام آزمایش در حالت (انتهای باز)

- در این حالت فقط تنش های محیطی خالص وجود دارد و تنش طولی صفر است. برای اندازه گیری کرنش محیطی، با توجه به شکل (۱-۲) به صورت زیر عمل نمایید:
- ۱- شیر برگشت را کاملاً باز کنید به نحوی که روغن بتواند به مخزن روغن برگردد.
 - ۲- پیچ تنظیم (C) را تا وقتی که متوقف شود بپیچانید. این کار باعث دور شدن پیستون A از صفحه سمت چپی (D) و انتقال بار طولی به قاب (H) می شود و از انتقال بار طولی به استوانه جلوگیری می کند.
 - ۳- در این حالت مقدار ضریب یانگ (E) برای ماده استوانه و نیز مقدار ضریب پواسون را برای آن می توان تعیین کرد.

۴- برای تعیین مقدار ضریب یانگ به صورت زیر اقدام نمایید:

- الف- دستگاه اندازه گیری کرنش را به استوانه متصل کرده و هر کدام از کانال های کانال یاب را با روی یک رقم (که نشان دهنده شماره کرنش سنج می باشد) قرار داده و دستگاه را روی کرنش صفر تنظیم نمایید، به نحوی که برای هر شماره، کرنش سنج کرنش صفر را نشان دهد.
 - ب- فشار داخل استوانه را از صفر تا 3 MN/M^2 (با افزایش های 0.5 MN/m^2) به تدریج افزایش داده و کرنش های حلقوی به دست آمده در این حالت (یعنی ϵ_H برای کرنش سنج های ۱ و ۶) را بخوانید.
- توجه: هیچ وقت اجازه ندهید که فشار بیشتر از 5 MN/m^2 بشود.

۳- ب- روش انجام آزمایش در حالت (انتهای بسته)

- در این حالت همانطور که قبلاً ذکر شد، یک سیستم تنش دو محوری ایجاد می شود که برای ایجاد این سیستم تنش و اندازه گیری کرنش های طولی و محیطی در استوانه، به صورت زیر عمل می نمایم.
- الف- کرنش صفر را برای کانال های مورد نظر واقع روی دستگاه کانال یاب (برای هر کرنش سنج) تنظیم نمایید.

ب- از باز بودن کامل شیر نصب شده روی پمپ، اطمینان حاصل کنید.

ج- پیچ تنظیم (C) را باز کنید و قطعه P را به سمت چپ فشار دهید تا با قاب (H) و صفحه انتهایی (M) تماس حاصل کند.

د- شیر برگشت (نصب شده روی پمپ) را بسته و با پمپ دستی روغن را از پمپ روغن به استوانه وارد کنید تا پیستون (A) را به انتهای استوانه بفشارد.

ه- بنابراین وقتی استوانه تحت فشار قرار گرفت، هم تنش‌های طولی و هم تنش‌های محیطی در جداره آن ایجاد شده است.

۴- نحوه انجام محاسبات و به دست آوردن نتایج

۴-الف - محاسبات و نتایج در حالت (انتهای باز)

۱- برای تعیین ضریب یانگ با توجه به معادله (۱-۱۴)، مقادیر تنش‌های حلقوی (σ_H) را در فشارهای متوسط متفاوت به دست آمده و در جداول (۱-۱) ثبت کنید. همچنین مقادیر کرنش حلقوی اندازه گرفته شده را در جدول مذکور یادداشت نمایید.

جدول ۱ - نتایج حاصل از حالت (انتهای باز)

فشار داخلی استوانه MN/m^2	تنش حلقوی از معادله $\text{MN/m}^2 \quad \sigma_H = \frac{Pd}{2t}$	کرنش‌های حلقوی اندازه گرفته شده (μm)	
		کرنش سنج شماره ۱	کرنش سنج شماره ۶

۲- با توجه به نتایج فوق، نمودار ($\sigma_H - \epsilon_H$) را رسم کرده، ضریب یانگ را با توجه به معادله ۱-۱۶ برای استوانه به دست آورید (برای دو کرنش سنج ۱ و ۶، متوسط E را حساب کنید).

۳- مقدار ضریب یانگ به دست آمده را با مقدار واقعی آن مقایسه کرده و درصد خطا را تعیین نمایید.

۴- به منظور به دست آوردن ضریب پوآسون برای ماده استوانه، با توجه به معادلات ۱-۱۶، ۱-۱۷ و ۱-۲۴، مقادیر ϵ_L^* ، ϵ_H^* را محاسبه و سپس ν را بیابید.

محاسبه ضریب پوآسون و محاسبه کرنش‌های اصلی

۵-۱- به کمک نتایج حاصل از کرنش سنج‌های محیطی ۱ و ۶ و کرنش طولی ۲ و به کمک معادله $\nu = \frac{\epsilon_L^*}{\epsilon_H^*}$

ضریب پوآسون را بیابید.

$$\nu = \frac{\text{کرنش واقعی طولی در کرنش سنج ۲}}{\text{کرنش متوسط واقعی حلقوی در کرنش سنج‌های ۱ و ۶}}$$

۴-ب- محاسبات و نتایج در حالت (انتهای بسته)

۱- کرنش‌های تجربی و تئوری را یافته و جدول ۴ را مشابه با جدول ۲، برای این حالت تکمیل نمایید.

جدول ۴- مقایسه کرنش‌های تجربی و تئوری در فشار...

درصد خطا	کرنش تئوری	کرنش واقعی	شماره کرنش سنج
			۱
			۲
			۳
			۴
			۵
			۶

سوالات

- الف- یک ماده غیر ایزوتروپ و غیرهمگن چند ثابت مهندسی دارد؟ (با استفاده از قانون هوک تعمیم یافته)
- ب- یک ماده ایزوتروپ و همگن چند ثابت مهندسی دارد؟
- ج- برای یک ماده ایزوتروپ و همگن و دارای مشخصه تقارن (تقارن صفحه‌ای- تقارن محوری- تقارن زاویه‌ای) چند ثابت مهندسی می‌شناسید؟ آن‌ها را نام ببرید؟
- د- استوانه جدار نازک را با استوانه جدار ضخیم (از نظر مشخصات هندسی، تنش‌ها، کرنش‌ها، کاربردها و...) مقایسه کنید.
- ه- موارد کاربرد کرنش‌های اصلی و تنش‌های اصلی چیست؟
- و- در مورد ایجاد پدیده کماتش در استوانه‌های جدار نازک چه می‌دانید؟
- ز- ثابت‌های مهندسی چه کاربردی دارند؟
- ح- موارد کاربرد کرنش سنج‌ها (strain gages) و انواع آن‌ها را توضیح دهید.
- ط- یک ماده برحسب تعداد ثابت‌های مستقل آن به دسته‌های زیر تقسیم می‌شود؛ مفهوم هر یک از این دسته‌ها را توضیح دهید:

1. Anisotrop
2. Monoclinic
3. Orthorop
4. Cubic
5. Isotrop

مقدمه

تحلیل و بررسی چگونگی توزیع تنش در یک استوانه جدار ضخیم اهمیت عملی قابل ملاحظه‌ای در ظروف تحت فشار و لوله‌های اسلحه‌ها و موارد دیگر دارد. به کمک آزمایشی که ارائه می‌شود، می‌توان فرمول‌های به دست آمده از طریق تئوری، برای کرنش و تنش را، با نتایج اندازه‌گیری شده واقعی مقایسه کرد. این کار با نصب کرنش‌سنج‌هایی (Strain gauges) در امتدادهای مختلف از یک مقطع استوانه و در شعاع‌های مختلفی از دیواره استوانه جدار ضخیم امکان پذیر است. در این روش، کرنش در امتدادها و شعاع‌های مختلف (در یک استوانه که تحت فشار داخلی قرار گرفته است)، اندازه گرفته شده و به کمک آن، تنش در نقاط مذکور پیدا گشته و با مقادیر تئوری مقایسه می‌شود.

۱- بررسی تئوری کرنش و تنش در استوانه جدار ضخیم

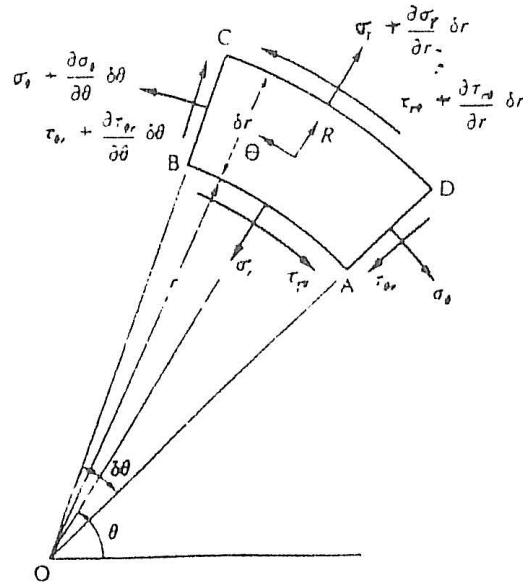
برای بررسی روابط تنش و کرنش در استوانه جدار ضخیم، ابتدا روابط اولیه مورد نیاز را به دست می‌آوریم.

۱-۱- تنش و کرنش صفحه‌ای

- اگر مولفه تنش در امتداد z صفر باشد ($\sigma_z = 0$)، مسئله را یک مسئله تنش صفحه‌ای گویند. (Plane stress). بدیهی است در این حالت کرنش در سه بعد وجود خواهد داشت.
- اگر مولفه کرنش در امتداد z صفر باشد ($\epsilon_z = 0$)، حالت مسئله را کرنش صفحه‌ای (Plane strain) گویند. بدیهی است که در این حالت، تنش در سه بعد وجود خواهد داشت.

۱-۲- معادلات تعادل در حالت تنش صفحه‌ای در مختصات استوانه‌ای

برای بررسی مسئله استوانه، دیسک، میله‌های منحنی شکل و موارد مشابه، بهترین مختصات، مختصات استوانه‌ای r, θ, z است. شکل زیر چگونگی به دست آوردن معادلات تعادل را نشان می‌دهد. المان ABCD را در نظر می‌گیریم، این المان به وسیله خطوط شعاعی OC و OD که به اندازه زاویه $\delta\theta$ از هم فاصله دارند و نیز به وسیله قوس‌های AB و CD که به ترتیب در شعاع‌های r و $r + \delta r$ در نظر گرفته شده‌اند، محصور شده است. ضخامت المان δz است.



شکل ۱- المان انتخابی در مختصات استوانه‌ای جهت بررسی معادلات تعادل

بردارهای تنش در روی سطوح المان انتخابی، نشان داده شده است. نیروهای R و θ نیروهای بدنی (Body force) هستند. R نیروی شعاعی و θ نیروی مماسی وارد به المان در واحد حجم می‌باشد. با در نظر گرفتن تعادل المان در امتداد خط مرکز شعاعی المان، علاوه بر نیروهای ناشی از تنش‌های شعاعی، مولفه‌های نیروهای وارده توسط تنش‌های حلقه‌ای و تنش‌های برشی نیز در معادله وارد می‌شود و داریم:

$$\begin{aligned} & \left(\sigma_r + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \right) (r + \delta r) \delta \theta \delta z - \sigma_r r \delta \theta \delta z \\ & - \left(\sigma_\theta + \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} \delta \theta \right) \delta r \delta z \sin \frac{\delta \theta}{2} - \sigma_\theta \delta r \delta z \sin \frac{\delta \theta}{2} \\ & + \left(\tau_{\theta r} + \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} \delta \theta \right) \delta r \delta z \cos \frac{\delta \theta}{2} - \tau_{\theta r} \delta r \delta z \cos \frac{\delta \theta}{2} + R = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

وقتی $\delta \theta \rightarrow 0$ ، داریم:

$$\sin \frac{1}{2} \delta \theta \rightarrow \frac{1}{2} \delta \theta$$

و

$$\cos \frac{1}{2} \delta \theta \rightarrow 1$$

با حذف ترم‌های درجه دو و بالاتر و تقسیم رابطه بر $(r \delta r \delta \theta \delta z)$ ، داریم:

$$\begin{aligned} & \frac{\sigma_r}{r} + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} - \frac{\sigma_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} + R = 0 \\ & \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + R = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

همچنین با تصویر کردن نیروها در امتداد مماس و نوشتن معادله تعادل در این امتداد، داریم:

$$\begin{aligned}
 & \left(\sigma_{\theta} + \frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial \theta} \right) \delta r \delta z \cos \frac{\delta \theta}{2} - \delta r \delta z \cos \frac{\delta \theta}{2} \\
 & + \left(\tau_{\theta r} + \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} \delta \theta \right) \delta r \delta z \sin \frac{\delta \theta}{2} - \tau_{\theta r} \delta r \delta z \sin \frac{\delta \theta}{2} \\
 & + \left(\tau_{\theta r} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} \delta r \right) (r + \delta r) \delta \theta \delta z - \tau_{\theta r} r \delta \theta \delta z \\
 & + \theta r \delta r \delta \theta \delta z = 0
 \end{aligned} \tag{۳}$$

در حد وقتی $\delta \theta \rightarrow 0$ ، با حذف ترم‌های درجه دو و بالاتر و تقسیم بر $(r \delta r \delta \theta \delta z)$ ، خواهیم داشت:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial \theta} - \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{\tau_{\theta r}}{r} + \theta = 0 \tag{۴}$$

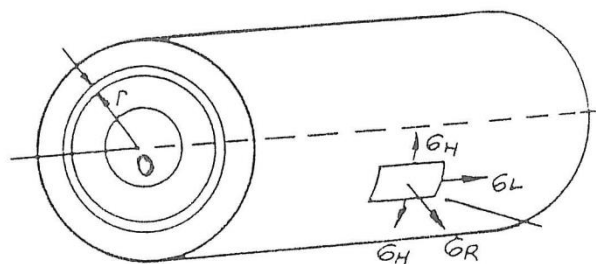
۱-۳- معادلات تعادل در صورت وجود تقارن محوری

در برخی موارد، مثل استوانه، دیسک و حلقه و.... جسم حول یک محور مرکزی z (و گذرنده از O) تقارن دارد (شکل ۲). بنابراین به خاطر وجود تقارن، مولفه‌های تنش فقط به r بستگی دارند و σ_{θ} در هر شعاع خاصی، ثابت است. همچنین به خاطر وجود تقارن، مولفه تنش برشی $(\tau_{\theta r})$ صفر است. بنابراین معادله (۴) وجود ندارد و فقط معادله تعادل (۲) وجود دارد، یعنی:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\theta}}{r} + R = 0 \tag{۵}$$

و اگر نیروی بدنی R در نظر گرفته نشود، خواهیم داشت:

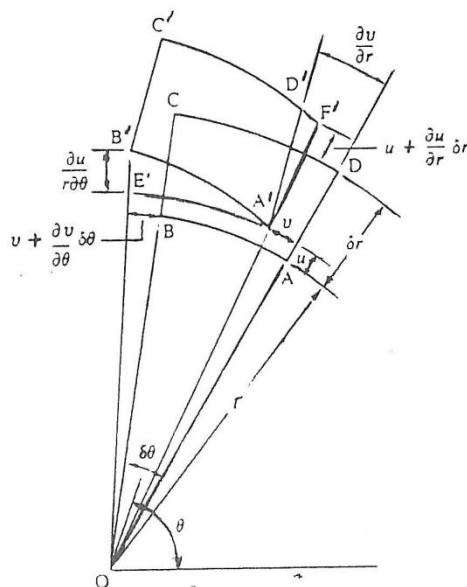
$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\theta}}{r} = 0 \tag{۶}$$



شکل ۲

۱-۴- روابط کرنش‌ها بر حسب تغییر مکان، در مختصات استوانه‌ای

المان ABCD شکل ۳ را در نظر بگیرید.



شکل ۳- المان انتخابی جهت به دست آوردن روابط کرنش

این المان، با یک برش زاویه‌ای به اندازه زاویه $\delta\theta$ و نیز با در نظر گرفتن ضلع AB شعاع r و ضلع CD شعاع $(r + \delta r)$ ، به وجود آمده است. المان ABCD به موقعیت $A'B'C'D'$ تغییر مکان داده است به نحوی که تغییر مکان‌های شعاعی و مماسی نقطه a به ترتیب برابر با u و v می‌باشد. تغییر مکان نقطه D به D' در امتداد r برابر است $u + \left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)\delta r$ که در آن $\frac{\partial u}{\partial r}$ برابر است با نرخ تغییر u نسبت به r .

۱-۴-۱- کرنش شعاعی

بنابراین تغییر در طول AD برابر است با $\left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)\delta r$ و بنابراین، کرنش در امتداد شعاع برابر است با:

$$\epsilon_r = \frac{\frac{\partial u}{\partial r}\delta r}{\delta r} = \frac{\partial u}{\partial r} \quad (V)$$

۱-۴-۲- کرنش مماسی

در امتداد مماسی دو اثر تغییر مکان روی کرنش وجود دارد. اولاً وقتی B به B' منتقل می‌شود.

تغییری در v نسبت به θ حادث می‌شود که این افزایش طول را می‌توان با عبارت $\left(\frac{\partial v}{\partial \theta}\right)\delta\theta$ و کرنش مربوطه را با

عبارت زیر بیان کرد:

$$\frac{\left(\frac{\partial v}{\partial \theta}\right) \delta \theta}{r \delta \theta} \neq \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \quad (۸)$$

ثانیاً یک کرنش مماسی مربوط به المان، به خاطر حرکت المان از شعاع r به شعاع جدید $(r+u)$ ، ایجاد می‌شود که با عبارت زیر قابل بیان است:

$$\frac{\text{افزایش طول}}{\text{طول اولیه}} = \frac{(r+u) \delta \theta - r \delta \theta}{r \delta \theta} = \frac{u}{r} \quad (۹)$$

بنابراین کل کرنش مماسی، عبارت است از:

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u}{r} \quad (۱۰)$$

۱-۴-۳- کرنش برشی

این کرنش با عبارت $\gamma_{r\theta}$ نشان داده شده است و عبارت است از اختلاف بین $\angle DAB$ و $\angle D'A'B'$ که برابر است با:

$$\gamma_{r\theta} = \angle D'A'F' + \angle B'A'E' \quad (۱۱)$$

اما $\angle D'A'F'$ برابر است با: اختلاف بین تغییر مکان مماسی D و D' ، یعنی $\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right) \delta r$ یعنی: $\angle D'A'F' =$ اختلاف زاویه‌ای بین تغییر مکان مماسی D به D' ، و دوران جسم صلب حول نقطه O = اختلاف بین $\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right) \delta r$ به صورت زاویه $\frac{\partial v}{\partial r}$ و زاویه $\angle DOF'$ که برابر است با $\frac{v}{r}$ پس:

$$\angle D'A'F' = \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \quad (۱۲)$$

و نیز $\angle B'A'E'$ بر حسب تغییر مکان شعاعی u می‌باشد و بنابراین برابر است با $\frac{\partial u}{r \partial \theta}$ ، پس:

$$\angle B'A'E' = \frac{\partial u}{r \partial \theta}$$

بنابراین:

$$\gamma_{r\theta} = \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} \quad (۱۳)$$

بنابراین کرنش‌های سه گانه بر حسب تغییر مکان‌ها، عبارتند از:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} \quad (۱۴)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u}{r} \quad (۱۵)$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{v}{r} \quad (۱۶)$$

۱-۵- روابط کرنش‌ها در صورت وجود تقارن محوری

برای مسائلی که حول محور z ، گذرنده از O ، متقارن هستند، تغییر مکان مماسی v وجود ندارد. همچنین $\gamma_{r\theta}$ وجود ندارد، زیرا $\tau_{r\theta}$ صفر است. بنابراین معادلات بالا به صورت زیر در می‌آیند:

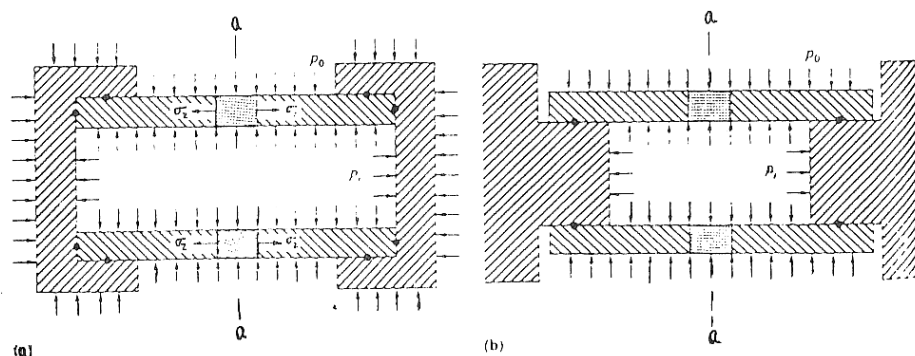
$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{du}{dr} \quad (۱۷)$$

و چون σ_θ برای هر مقدار r ، ثابت است، داریم:

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (۱۸)$$

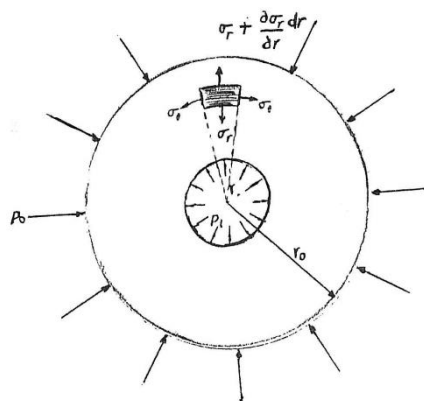
۱-۶- توزیع تنش در استوانه جدار ضخیم

استوانه‌ای با سوراخ طویل در نظر می‌گیریم که به طور یکنواخت تحت فشار داخلی و خارجی قرار دارد.



شکل ۴

برای برقراری و نگهداری فشار در درون استوانه، از دو روش می‌توان استفاده کرد، یکی به وسیله درپوش‌های انتهایی که به استوانه متصل شده‌اند (شکل ۴-ا) و دیگر با پیستون‌هایی که در دو انتهای استوانه تعبیه شده است (شکل ۴-ب). سطح مقطع $a-a$ را که در شکل ۵ نشان داده شده است در نظر بگیرید. تغییر شکل‌های تولیدی، نسبت به محور طولی استوانه، متقارن هستند و ماده موجود در دیواره استوانه، سیستم تنش وارده را تحمل می‌کند. این وضعیت شبیه حالت عمومی شکل ۱ است با این فرق، که به خاطر وجود تقارن محوری $\tau_{r\theta}=0$ و σ_θ در هر شعاع خاصی، ثابت است. بنابراین σ_r و σ_θ تنش‌های اصلی هستند و کاملاً مستقل از نحوه بستن انتهای استوانه می‌باشند.



شکل ۵

با در نظر گرفتن تنش محوری σ_z و کرنش محوری ϵ_z ، هر دو این‌ها در حالت استفاده از سرپوش‌های انتهایی (شکل ۴-ا) ظاهر می‌شود. وقتی در دو انتها پیستون وجود داشته باشد $\sigma_z=0$ و ϵ_z فقط به خاطر تأثیر ضریب پوآسون ظاهر می‌شود.

به خاطر تقارن سیستم و نیز برای یک استوانه طویل، به این نتیجه می‌رسیم که سطح مقطع‌های صفحه‌ای، وقتی تحت فشار قرار گیرند، به صورت صفحه باقی می‌مانند و نتیجتاً تغییر شکل محوری w ، در عرض مقطع، مستطیل از r می‌باشد و $\frac{dw}{dr} = 0$ است.

۲-۱- تنش در استوانه تحت فشار با درپوش‌های انتهایی

معادله تعادل برای یک المان ساده عبارت است از:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (19)$$

و به خاطر وجود درپوش‌ها

$$\frac{d\sigma_z}{dz} = 0 \quad (20)$$

معادلات کرنش، تغییر مکان عبارتند از:

$$\epsilon_r = \frac{du}{dr} \quad (21)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (22)$$

$$\epsilon_r = \frac{dw}{dz} \quad (23)$$

و روابط تنش، کرنش (از قانون هوک تعمیم یافته) وقتی با روابط بالا مقایسه می‌شوند به صورت زیر در می‌آیند:

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_\theta + \sigma_z) = \frac{du}{dr} \quad (24)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{\sigma_\theta}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_z + \sigma_r) = \frac{u}{r} \quad (25)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_r + \sigma_\theta) = \frac{dw}{dz} \quad (26)$$

اگر از معادله (۲۵) نسبت به r مشتق بگیریم:

$$\frac{E}{r} = \left(\frac{du}{dr} - \frac{u}{r} \right) = \frac{d\sigma_\theta}{dr} - \nu \frac{d\sigma_z}{dr} - \nu \frac{d\sigma_r}{dr}$$

با قرار دادن مقادیر $\frac{u}{r}$ و $\frac{du}{dr}$ از معادلات (۲۴) و (۲۵) و ساده کردن داریم:

$$\frac{1+\nu}{r} = (\sigma_r - \sigma_\theta) = \frac{d\sigma_\theta}{dr} - \nu \frac{d\sigma_z}{dr} - \nu \frac{d\sigma_r}{dr} \quad (27)$$

حالا، چون $\varepsilon_z = \text{cte}$ است و $\frac{d\varepsilon_z}{dr} = 0$ است، با مشتق‌گیری از معادله (۲۶):

$$\frac{d\sigma_z}{dr} - \nu \left(\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{d\sigma_\theta}{dr} \right) \quad (28)$$

با قرار دادن $\frac{d\sigma_z}{dr}$ از معادله (۲۸) در معادله (۲۷) و عبارت $\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r}$ از معادله (۱۹) در معادله (۲۸) و ساده کردن، داریم:

$$(1 - \nu^2) \left(\frac{d\sigma_\theta}{dr} + \frac{d\sigma_r}{dr} \right) = 0 \quad (29)$$

از معادلات (۲۹) و (۲۸) مشاهده می‌کنیم $\frac{d\sigma_z}{dr} = 0$ است و بنابراین σ_z در درون ضخامت دیواره استوانه، ثابت است.

با انتگرال‌گیری از معادله (۲۹)، داریم:

$$(\sigma_\theta + \sigma_r) = \text{cte} = 2A \quad (30)$$

با حذف σ_θ بین معادلات (۳۰) و (۱۹)، داریم:

۶ \

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2\sigma_r - 2A}{r} = 0 \quad (31)$$

با ضرب در r^2 :

$$2Ar - 2r\sigma_r - r^2 \frac{d\sigma_r}{dr} = 0 \rightarrow 2Ar - \frac{d}{dr}(r^2 \sigma_r) = 0$$

و با انتگرال گیری:

$$Ar^2 - r^2 \sigma_r = 0$$

بنابراین:

$$\sigma_r = A - \frac{B}{r^2} \quad (32)$$

و از معادله

$$\sigma_\theta = A + \frac{B}{r^2} \quad (33)$$

A و B ثابت‌هایی هستند که با استفاده از شرایط مرزی باید آن‌ها را یافت.

۸-۱- تنش‌ها در استوانه‌ای که در انتهایش پیستون قرار گرفته است

در این حالت با توجه به شکل (۹-b)، $\sigma_z=0$ است و یک حالت تنش صفحه‌ای داریم. حال این استوانه را نیز بررسی می‌کنیم تا نشان دهیم که با به دست آوردن یک معادله دیفرانسیل، بر حسب تغییر مکان u ، به همان عبارت برای σ_r و σ_θ می‌رسیم.

اگر در معادله (۲۴) و (۲۵)، $\sigma_z=0$ را قرار دهیم و معادلات را برای σ_r و σ_θ بر حسب u حل کنیم، داریم:

$$\sigma_r = \left(\frac{du}{dr} + \frac{vu}{r} \right) \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (34)$$

$$\sigma_\theta = \left(\nu \frac{du}{dr} + \frac{u}{r} \right) \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (35)$$

از معادله (۳۴) داریم:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \left(\frac{d^2 u}{dr^2} + \nu \frac{du}{dr} - \frac{vu}{r} \right) \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (36)$$

با جایگزینی معادلات (۳۴) و (۳۵) و (۳۶) در معادله (۱۹) و ساده کردن، داریم:

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0 \quad (۳۷)$$

این معادله، یک معادله دیفرانسیل است که تغییر مکان شعاعی را در دیواره سیلندر مشخص می‌کند. حل کلی این معادله، عبارت است از:

$$u = cr + \frac{c'}{r} \quad (۳۸)$$

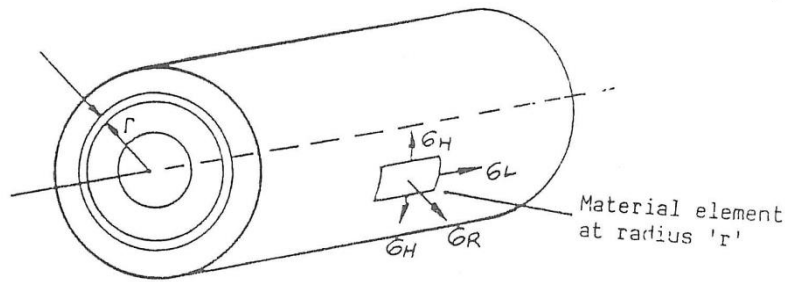
با جایگزینی u و du در معادلات (۳۴) و (۳۵)، داریم:

$$\sigma_r = \left\{ C(1+\nu) - \frac{c'}{1^2}(1-\nu) \right\} \frac{E}{(1-\nu^2)} \quad (۳۹)$$

$$\sigma_e = \left\{ C(1+\nu) - \frac{c'}{1^2}(1-\nu) \right\} \frac{E}{(1-\nu^2)} \quad (۴۰)$$

۹-۱- بررسی تئوریک مسئله مورد آزمایش

شکل ۶ نشان دهنده وجود یک استوانه توخالی است، که تحت تأثیر یک فشار داخلی یکنواخت P قرار گرفته است.



شکل ۶

یک المان از ماده را در شعاع r در نظر گرفته‌ایم. طراحی دستگاه آزمایش طوری است که σ_L (تنش طولی) را در مقایسه با دو تنش دیگر می‌توان فراموش کرد و فقط کافی است که یک سیستم تنش دو محوره را در نظر بگیریم. تنش‌ها عبارتند از تنش‌های اصلی σ_H و σ_R (چرا؟). ضمناً مسئله در حالت تنش صفحه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. تغییر شکل‌های تولیدی حول محور استوانه، متقارن هستند و کرنش‌های اصلی با روابط زیر مشخص می‌شوند.

$$\varepsilon_H = \frac{\sigma_H}{E} - \frac{\nu \cdot \sigma_R}{E} = \frac{1}{E} (\sigma_H - \nu \cdot \sigma_R) \quad (۴۱)$$

$$\varepsilon_R = \frac{\sigma_R}{E} - \frac{\nu \cdot \sigma_H}{E} = \frac{1}{E} (\sigma_R - \nu \cdot \sigma_H) \quad (42)$$

$$\varepsilon_L = \frac{-\nu \cdot \sigma_H}{E} - \frac{\nu \cdot \sigma_R}{E} = \frac{-\nu}{E} (\sigma_H + \sigma_R) \quad (43)$$

قراردادهای معمول به این صورت است که تنش و کرنش فشاری را با مقادیر (-) و تنش و کرنش کششی را با مقادیر (+) نشان می‌دهند.

حالا با در نظر گرفتن معادلات مقدماتی 'Lame:

$$\sigma_H = A - \frac{B}{r^2} \quad (44)$$

$$\sigma_R = A + \frac{B}{r^2} \quad (45)$$

(A) و (B) ثابت هستند. برای تعیین این ثابت‌ها شرایط مرزی را در نظر می‌گیریم:

در $r = R_1$ $\sigma_R = -P$ (علامت فشار منفی است).

در $r = R_2$ $\sigma_R = 0$ (فشار اتمسفر) (که می‌توان از این فشار در مقایسه با فشار P صرف نظر کرد و در نتیجه $\sigma_R = 0$)

$$\sigma_R = -P = A + \frac{B}{r_1^2}$$

بنابراین در R_1 :

با حل داریم:

$$B = \frac{-P \cdot R_2^2 \cdot R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2)} \text{ and } A = \frac{P \cdot R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2)}$$

با جایگذاری در معادلات S داریم:

$$\sigma_R = \frac{P R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2)} \left(\frac{R_1^2}{r^2} \right)$$

$$\sigma_R = \frac{P}{(K^2 - 1)} \left(1 - \frac{R_1^2}{r^2} \right) \quad (46)$$

با قرار دادن مقادیر A و B در (44) داریم:

$$\sigma_H = \frac{P \cdot R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2)} \left(1 + \frac{R_1^2}{r^2} \right)$$

$$\sigma_H = \frac{P}{(K^2 - 1)} \left(1 + \frac{R_1^2}{r^2} \right) \quad (47)$$

مثبت بودن علامت معادله (۴۷) در همه حال، نشان دهنده این است که σ_H در هر جا کششی است، در حالی که منفی بودن نتیجه معادله (۴۶) دلالت دارد بر اینکه σ_R در کل استوانه، فشاری است. به طور خاص، ماکزیمم σ_R در شعاع داخلی (R_1) رخ می‌دهد؛ یعنی:

$$\sigma_R = -P$$

و مینیمم σ_R در شعاع خارجی (R_2) اتفاق می‌افتد؛ یعنی:

$$\sigma_R = 0$$

ماکزیمم σ_H در شعاع داخلی (R_1) اتفاق می‌افتد؛ یعنی:

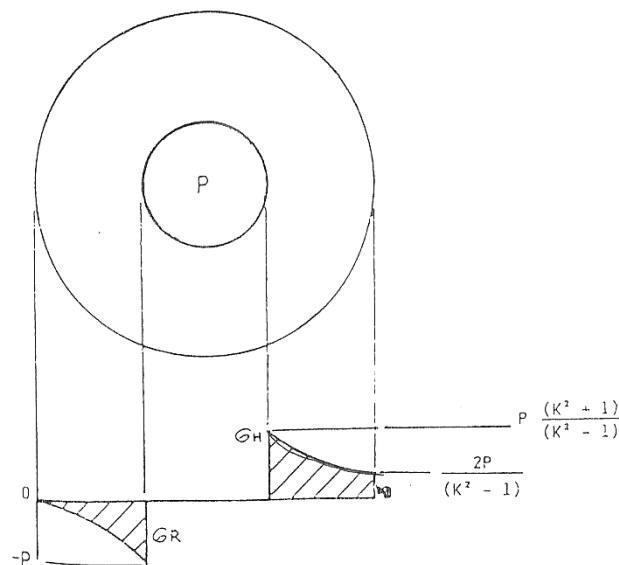
$$\sigma_H = P \cdot \frac{(K^2 + 1)}{K^2 - 1}$$

و مینیمم σ_H در شعاع خارجی (R_2) اتفاق می‌افتد؛ یعنی:

$$\sigma_H = \frac{2P}{K^2 - 1}$$

$$K = \frac{R_2}{R_1}$$

شکل ۷ نشان‌دهنده تغییرات این تنش‌ها در کل دیواره سیلندر است.



شکل ۷

برای یک استوانه، که تحت فشار داخلی و آزاد از بارگذاری محوری است، تنش‌های برشی ماکزیمم پوسته در شعاع داخلی ظاهر خواهد شد. یعنی، ماکزیمم تنش برشی (τ_{max}) عبارت است از:

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} \times (\text{اختلاف دو تنش اصلی}) = \frac{\sigma_R - \sigma_H}{2} \quad (48)$$

با جایگزینی مقادیر σ_H و σ_R در این رابطه، داریم:

$$\bar{\tau} = \frac{P.R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2)} \Rightarrow \bar{\tau} = \frac{P.k^2}{(k^2 - 1)} \quad (49)$$

برای استوانه موردنظر در دستگاه آزمایش:

$$K = \frac{R_2}{R_1} = \frac{150}{37} = 4.054$$

بنابراین:

$$\bar{\tau} = 1.065 P \quad (50)$$

۱-۱۰ روابط کرنش‌ها و تنش‌ها در مختصات کارتیزین و استوانه‌ای

در مختصات کارتیزین، با توجه به تعمیم قانون هوک [برای مواد متجانس یا ایزوتروپ، یعنی موادی که به خاطر وجود کریستال‌های نامنظم در ساختمان کریستالی آن‌ها، خواص آن‌ها در جهات مختلف مشابه است، خواصی مثل ضریب یانگ، ضریب پوآسون و...] در صورت وارد شدن تنش‌های عمودی در سه جهت x, y, z به جسم، روابط زیر را برای کرنش‌های محوری داریم:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \quad (51)$$

$$\varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \quad (52)$$

$$\varepsilon_z = -\nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} \quad (53)$$

به همین نحو در مختصات استوانه‌ای، کرنش‌ها در امتدادهای $R =$ شعاعی، $H =$ حلقه‌ای، $L =$ طولی از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon_H = \frac{\sigma_H}{E} - \nu \frac{\sigma_R}{E} - \nu \frac{\sigma_L}{E} \quad (54)$$

$$\varepsilon_R = \frac{\sigma_R}{E} + \frac{\nu \sigma_H}{E} - \nu \frac{\sigma_L}{E} \quad (55)$$

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_L}{E} - \nu \frac{\sigma_H}{E} - \nu \frac{\sigma_R}{E} \quad (56)$$

۲- محاسبات کرنش‌ها با توجه به دستگاه آزمایش

۲-۱- کرنش‌های حلقوی

با جایگزینی معادلات (۴۶) و (۴۷) در معادله (۴۱) داریم:

$$\varepsilon_H = \frac{P}{\varepsilon(k^2 - 1)} \left[\left(1 + \frac{R_2^2}{r^2} \right) - v \left(1 - \frac{R_2^2}{r^2} \right) \right] \quad (57)$$

۲-۲ کرنش‌های شعاعی

با جایگزینی روابط (۴۶) و (۴۷) در معادله (۴۲) خواهیم داشت:

$$\varepsilon_R = \frac{P}{\varepsilon(k^2 - 1)} \left[\left(1 + \frac{R_2^2}{r^2} \right) - v \left(1 - \frac{R_2^2}{r^2} \right) \right] \quad (58)$$

۲-۳ کرنش‌های طولی

با جایگزینی روابط (۴۶) و (۴۷) در معادله (۴۳) داریم:

$$\varepsilon_L = \frac{-vP}{\varepsilon(k^2 - 1)} \left[\left(1 + \frac{R_2^2}{r^2} \right) - v \left(1 - \frac{R_2^2}{r^2} \right) \right] \quad (59)$$

اکنون مقادیر کرنش‌های تئوری را با مقادیر کرنش‌های تجربی مقایسه نمائید.

۳- محاسبات تنش‌ها با توجه به دستگاه آزمایش:

از معادله (۴۶) و (۴۲) داریم:

$$\begin{aligned} \sigma_H &= E\varepsilon_H + v\sigma_R \\ \sigma_R &= E\varepsilon_R + v\sigma_H \end{aligned} \quad (60)$$

$$\sigma_H = \frac{E}{1 - v^2} (v\varepsilon_R + \varepsilon_H) (N / m^2) \quad (61)$$

$$\sigma_R = \frac{E}{1 - v^2} (v\varepsilon_H + \varepsilon_R) (N / m^2) \quad (62)$$

با جایگزینی مقادیر تجربی کرنش از جدول ۱ در این معادلات، تنش‌های تجربی را می‌توان به تفکیک یافت. آن‌گاه این مقادیر را می‌توان با مقادیر تئوری [محاسبه شده از معادلات (۴۶) و (۴۷)] مقایسه کرد. نتایج حاصل از محاسبه تنش‌ها (تنش‌های تئوری و تنش‌های تجربی) در جدول ۲ منعکس می‌شود. (این جدول در

بخش نتایج و محاسبات، آورده شده است).

چون کرنش شعاعی ε_R در سطح خارجی را نمی‌توان اندازه گرفت (چرا؟) مقادیر محاسبه شده برای تنش حلقه‌های σ_H در این شعاع‌ها را نمی‌توان با استفاده ساده از معادلات (۶۰) و (۶۱) یافت. بنابراین با در نظر گرفتن معادله (۴۱)، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_H = \varepsilon_H \cdot E + \nu \cdot \sigma_R \quad (۶۳)$$

که σ_H با آزمایش به دست آمده است و مقادیر σ_R در قطر داخلی و قطر خارجی به ترتیب عبارتند از:

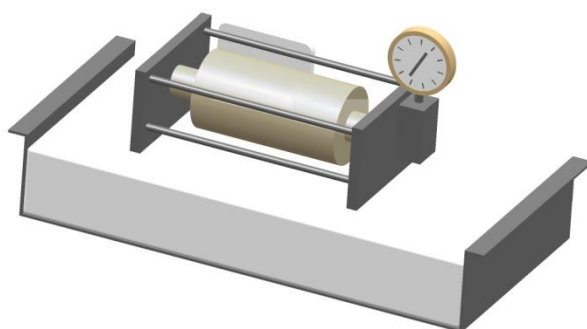
$$\frac{MN}{m^2} (0 - P).$$

بنابراین تنش حلقوی در قطر داخلی و قطر خارجی را می‌توان به دست آورد و با مقادیر تئوری خالص مقایسه کرد.

۴- دستگاه آزمایش

۴-۱- استوانه جدار ضخیم

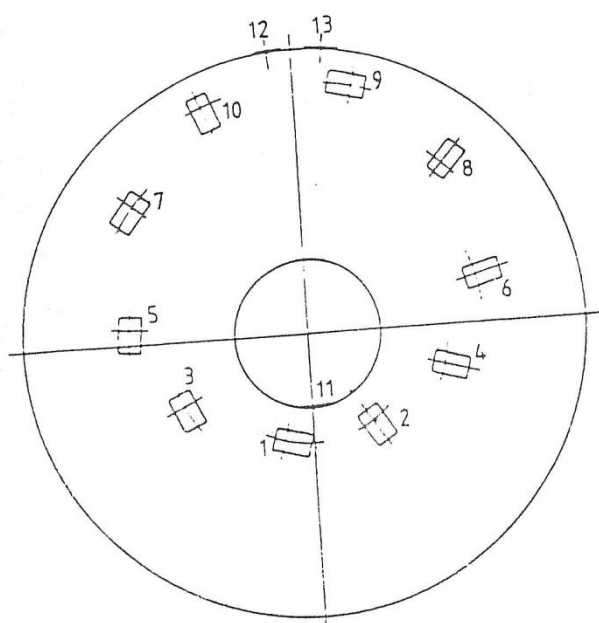
شکل ۸ نشان دهنده دستگاه آزمایش SM III می‌باشد. این دستگاه یک استوانه جدار ضخیم است که به منظور اندازه‌گیری کرنش‌ها، به یک کرنش‌خوان رقمی (دیجیتالی) متصل می‌شود (E10 MK II).



شکل ۸- دستگاه آزمایش استوانه جدار ضخیم

قطعات، دو نیم استوانه را نشان می‌دهد که سطح مشترک آن‌ها به صورت محکمی به یکدیگر چسبانده شده است. یکی از سطوح اتصال یافته، دارای شیار دایروی و کم عمق است که مسیر این شیار به صورت خارج از مرکز به دور سوراخ وسط استوانه کشیده شده است. ده عدد کرنش سنج فعال در موقعیت‌های مختلفی در داخل این شیار، ثابت شده اند. شکل ۹ کرنش‌سنج‌های ۱ تا ۱۰ نشان دهنده این کرنش‌سنج‌ها هستند.

GAUGE NUMBER	RADIUS (mm)	STRAIN
1	28	Hoop
2	28	Radial
3	36	Hoop
4	36	Radial
5	45	Hoop
6	45	Radial
7	56	Hoop
8	56	Radial
9	63	Hoop
10	63	Radial
11	18.3	Circumferential
12	75	Longitudinal
13	75	Circumferential



شکل ۹- مکان‌های نصب کرنش‌سنج‌ها (Strain Gauges) و نوع کرنش‌های قابل اندازه‌گیری توسط آن‌ها

همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، کرنش‌های شعاعی و حلقه‌ای را می‌توان در ۵ شعاع مختلف اندازه گرفت. شیار مورد نظر، با ماده‌ای چسبنده کاملاً پر شده است. کرنش‌سنج‌های دیگری نیز در امتدادهای طولی و حلقه‌ای (روی دیواره داخلی و روی قطر خارجی استوانه) نصب شده است تا بتوانیم کرنش‌های اصلی روی این سطح را اندازه بگیریم (کرنش‌سنج‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ در شکل ۱۰).

بنابراین ۱۳ کرنش‌سنج در درون دیواره استوانه نصب شده که به کمک آن‌ها می‌توان تحلیل کاملی از تغییرات کرنش و (نتیجتاً تنش) را در دیواره استوانه تحت فشار انجام داد. هر کرنش‌سنج، یک بازوی پل و تستونی را تشکیل می‌دهد که ۳ بازوی دیگر آن در درون دستگاه اندازه‌گیر کرنش وجود دارند. پل اندازه‌گیر کرنش تا ± 250 میکرواسترین مدرج شده است. دستگاه اندازه‌گیر کرنش، عبارت است از یک دستگاه کرنش‌خوان رقمی (E10 MK II) که به وسیله سیم رابط به یک سوئیچ ۱۶ کاناله مربوط است و سوئیچ ۱۶ کاناله توسط یک رابط ۵۰ شاخه‌ای به قسمت پایین (سمت چپ) استوانه جدار ضخیم متصل است. شرح دستگاه کرنش‌خوان بعداً خواهد آمد.

در موقع استفاده از کرنش خوان E10 کلید انتخاب پل را روی Half قرار دهید. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، یک محور مرکزی E (که از جنس فولاد است) به وسیله اورینگ های لاستیکی، در دو انتها در داخل استوانه محکم شده است. برای انتقال روغن از پمپ دستی به شیار دایروی بین قسمت داخلی استوانه و شافت، از محور E استفاده می شود و به این ترتیب، استوانه تحت فشار قرار می گیرد. انتهای شافت، در طرف مدخل روغن به یک قطعه فولادی (G) پیچ شده است. مغزی هواگیر (O) در یک انتهای استوانه تعبیه شده است که می تواند پمپ روغن را هواگیری کند. به منظور حفاظت بیشتر استوانه، آن را بین دو مانع فولادی (P) نگه داشته ایم. این مانع ها، با محکم کردن مهره های (Q) به دو انتهای استوانه فشار وارد می کنند. کل استوانه در درون قاب اصلی (C) متشکل از دو صفحه فلزی در دو انتهای دستگاه، که به وسیله ۴ میله فولادی به یکدیگر بسته شده است، قرار گرفته است. هیچ تنشی به وسیله این چارچوب، روی استوانه وارد نمی شود.

۴-۲ مشخصات دیگر دستگاه آزمایش به شرح زیر است:

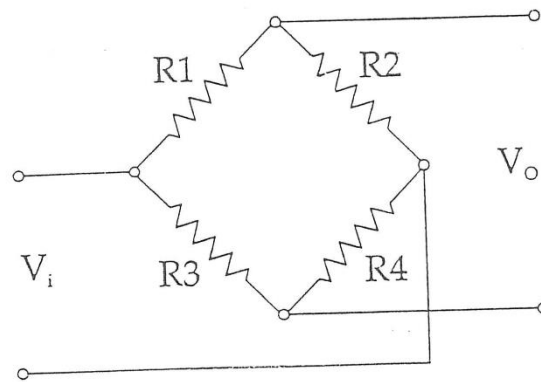
0.7 MN/m ²	- محدوده فشار قابل اعتماد توسط پمپ دستی
203mm	- ابعاد استوانه: طول استوانه
150 mm	قطر خارجی
37 mm	قطر داخلی
آلیاژ آلومینیوم	- جنس استوانه:
E = 69GN/m ²	- مدول یانگ ماده استوانه:
v = 0.33	- ضریب پوآسون:
6.89 MN/m ²	- ماکزیمم فشار مجاز برای آزمایش:
از نوع مقاوم الکتریکی	- کرنش سنج ها:
Castor (از روغن های دیگری استفاده نکنید).	- ظرفیت پمپ: ۰/۵۷ لیتر روغن
توجه: تمام کرنش سنج های مورد استفاده، دارای ضریب سنجش (Gauge Factor) یکسانی هستند که این ضریب سنجش، در جلو دستگاه نوشته شده است.	

۴-۳ آشنایی با دستگاه اندازه گیری کرنش دیجیتالی (E10 MK II)

این دستگاه قادر به اندازه گیری کرنش در محدوده صفر تا $20/000 \mu m \pm$ است و در کلیه آزمایش های اندازه گیری کرنش، کاربرد دارد به کمک این دستگاه می توان کرنش را، هم با استفاده از اندازه گیرهای کرنش سیمی (Wire gauges) و هم با اندازه گیرهای کرنش که از ورق نازک ساخته شده است (foil gauges) اندازه گرفت و عدد کرنش را مستقیماً قرائت کرد.

توضیح:

پایه اغلب اندازه گیرهای کرنش، پل وتستون است که در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰ پل وتستون

اگر R_1, R_2, R_3, R_4 کاملاً معادل باشند، ولتاژ خروجی دقیقاً صفر است و این مسئله به ولتاژ ورودی V_i بستگی ندارد (ولتاژ ورودی هر چه باشد، ولتاژ خروجی در این حالت صفر است).

فرض کنید مثلاً مقاومت R_2 تغییر کند. آن گاه V_o به نسبت تغییر مقاومت تغییر می کند (به شرط اینکه تغییر در R_2 کوچک باشد). مادامی که کرنش سنج ها طوری طراحی شده باشند که تغییر در مقاومت آن ها با کرنش متناسب باشد، می توان این نتیجه را گرفت که ولتاژ خروجی V_o متناسب با کرنش خواهد بود و بنابراین می توان کرنش را اندازه گرفت.

۴-۳-۱ دستگاه های کرنش سنج عموماً به دو نوع تقسیم می شوند

الف- سیستم های عامل (Carrier)، که در آن ها V_i یک ولتاژ جریان متناوب (a.c.) است. در این حالت، سیگنال محتوی اطلاعات (تغییر طول کرنش سنج ها)، توازن ولتاژ متناوب خروجی را به هم می زند. فایده اساسی این نوع از سیستم ها این است که در آن ها اثرات ترموالکتریک، تأثیری بر اندازه گیری کرنش ندارد.

ب- سیستم های D.C. که در آن ها V_i یک ولتاژ d.c. است. فایده این نوع سیستم سادگی آن است، اما اثرات ترموالکتریک می تواند در ترازهای کرنش کوچک، ایجاد مشکل نماید.

دستگاه اندازه گیری ما در آزمایشگاه، یک سیستم d.c. است که در آن از اجزاء مدرنی که می توانند اثرات حرارتی را کاهش دهند، استفاده شده است. ولتاژ ورودی، توسط خود دستگاه به میزان، $4V_o$ تنظیم می شود.

۴-۳-۲ عملکرد دستگاه اندازه گیری کرنش و طرز استفاده از آن

نوع پل مورد استفاده و اتصالات مربوط به آن:

دستگاه کرنش خوان، با استفاده از یک (Socket) که در جلو آن نصب شده به پل وصل می شود، این Socket می تواند به سه صورت اتصال یابد:

الف- اتصال به یک کرنش سنج ساده

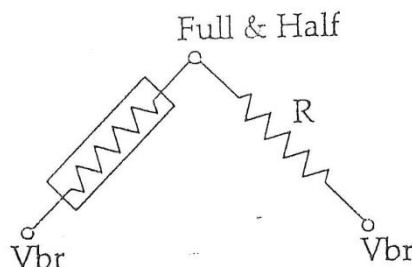
ب- اتصال به دو کرنش سنج

ج- اتصال به ۴ کرنش سنج

- حالت الف (اتصال به یک کرنش سنج ساده): در این حالت مقاومت R به اندازه مقاومت کرنش سنج است

($\pm 1\%$) در این شیوه وقتی که کرنش سنج در حالت کشش باشد، خروجی مثبت خواهد بود.

- حالت ب (اتصال به دو کرنش سنج):



شکل ۱۱- اتصال دستگاه کرنش خوان به کرنش سنج

در این حالت، یا اتصال مثل حالت قبل است، با این فرق که کرنش سنجی که به جای مقاومت R جایگزین شده است روی یک سطح غیر کرنش دار نصب شده است و به صورت اندازه گیری که حرارت را جبران می کند، عمل می نماید و یا اینکه اتصال در هر دو طرف است، به قسمتی که یک اندازه گیر همیشه در حالت کشش خواهد بود در حالیکه دیگری در حالت فشاری است. در این شیوه، خروجی دو برابر می شود.

در موقع اتصال به صورت های الف و ب، باید دستگاه روی Half Bridge قرار داده شود. نیمه باقی مانده پل در داخل دستگاه با مقاومت های با دقت بالا تکمیل شده است.

۴-۴ اتصال کرنش خوان به یک واحد ۱۶ کلیدی

دستگاه کرنش خوان را می توان به هر واحد کلیدداری وصل کرد، مشروط بر اینکه پل، بیش از حد بارگذاری نشود. ماکزیمم خروجی از وسیله برای توانا کردن پل ها (وقتی از برق شهر استفاده شود) برابر با ۴۷ در شدت جریان یک آمپر است. وقتی از باتری استفاده شود، ماکزیمم خروجی ۴۷ در هفتاد میلی آمپر خواهد بود. اگر این نرخ ها برای یک زمان طولانی افزایش یابد، هیچ آسیبی به دستگاه وارد نخواهد شد، به جز اینکه باتری ها به سرعت تخلیه می شوند، دستگاه اصلی به طور خود کار خود را حفظ خواهد کرد اما نتایج غلطی داده خواهد شد. ماکزیمم تعداد کرنش سنج هایی که در حالت نیمه پل (Half Bridge) به طور همزمان و از درون واحد ۱۶ کلیده می توان به استوانه متصل کرد، به مقاومت اندازه گیر مربوط است.

۵- روش انجام آزمایش

اهداف

- ۱- اندازه گیری کرنش های شعاعی و محیطی در یک استوانه جدار ضخیم تحت فشار داخلی.
- ۲- تعیین تنش های تجربی شعاعی و محیطی، در استوانه مذکور.
- ۳- مقایسه کرنش ها و تنش های شعاعی و محیطی تجربی، با کرنش ها و تنش های به دست آمده از فرمول های

تئوری.

- ۴- رسم نمودار چگونگی توزیع کرنش، تجربی و تئوری، در دیواره استوانه.
- ۵- رسم نمودار نمایش روابط لامی (Lame Lines).
- ۶- رسم نمودارهای نشان دهنده توزیع تنش، تجربی و تئوری، در دیواره استوانه.
- ۷- بررسی کاربردهای مختلف آزمایش.

روش کار:

- ۱- درپوش مخزن روغن پمپ را باز کرده و لاستیک رویی آن را بردارید. درپوش را مجدداً محکم کنید (لاستیک رویی برای جلوگیری از نشت روغن در هنگام حمل و نقل دستگاه است).
 - ۲- اگر هوا وارد سیستم هیدرولیکی شده است، باید آن را خارج کنید، این کار به طریق زیر صورت می گیرد:
الف- لوله پلاستیکی کوتاهی (لوله هواگیری) را روی مغزی هواگیر سوار کنید. با پمپ دستی فشار کمی وارد کنید و مغزی را باز کنید تا مقداری روغن خارج شده و دستگاه هواگیری شود.
ب- حباب های هوای خروجی را در داخل روغن مشاهده کنید و پیچاندن دسته پمپ را آنقدر ادامه دهید تا هوای روغن تخلیه شود، یا دسته پمپ کاملاً به داخل پیچانده شود. وقتی این حالت به انجام رسید، مغزی را محکم کنید و دسته پمپ را باز کنید.
 - ۳- لوله هواگیری را از دستگاه جدا کنید.
 - ۴- دستگاه اندازه گیری کرنش را به صورت زیر آماده و میزان کنید:
الف- وسیله را روی نیمه پل قرار دهید (Half Bridge)
ب- دستگاه کرنش سنج را از قسمت پشت آن، به برق وصل کنید.
ج- از جلو دستگاه، آن را روی برق اصلی (main)، یا باتری (Battery) قرار دهید.
د- بررسی کنید که آیا آشکارساز کرنش، روشن شده است یا خیر؟ اگر تمام ممیزها (وقتی که دستگاه در حالت باتری قرار گرفته است) دیده می شود، دلیل بر این است که باتری ها به شارژ احتیاج دارند. در این صورت، دستگاه را به برق اصلی وصل کنید، باید ممیزها در یک دقیقه (یا حدود آن) مستهلک شود.
ه- به مدت ۵ دقیقه به دستگاه اجازه پایداری شدن بدهید.
 - و- با استفاده از کنترل کننده های Coarse (خشن) و Fine (ظریف)، آشکارساز را خنثی به نحوی که به طور متناوب (+) و (-) شود.
- برای اینکه دستگاه کرنش سنج بازرسی و متوازن شود، قطعه ای به نام آزمایش کننده پل (E10/18) ساخته شده است. برای بازرسی دستگاه کرنش سنج E10 عملیات زیر را انجام دهید:
- قطعه آزمایش کننده پل را با وصل کردن سه عدد دو شاخه ۴ میلی متری آن با Socket های ۴mm روی صفحه جلویی دستگاه کرنش خوان، به آن وصل کنید (قرمز به قرمز و سیاه به سیاه).
 - دستگاه اندازه گیری کرنش E10 را روشن کنید و کلید Bridge را روی Half قرار دهید.
 - با استفاده از کنترل های Coarse، Fine، Offset و ظاهر کننده اعداد را روی «۰۰۰۰» قرار دهید.

تذکر: بین این حالت با حالتی که در آن ۴ صفر ظاهر می گردد و در قسمت چپ و بالای گوشه ظاهر کننده، علامت داده می شود فرق قائل شوید.

ح- دستگاه کرنش سنج E10 اکنون برای استفاده آماده است. قطعه آزمایش کننده پل را می توانید از آن جدا کرده و کنار بگذارید.

ط- هر کدام از کرنش سنج های نصب شده روی استوانه باید قبل از استفاده، کرنش صفر را نشان دهد. همچنین مطمئن شوید که با استفاده از کلید مربوط به ضریب اندازه گیر Gauge Factor که در پشت دستگاه E10 قرار گرفته آن را روی ضریب دلخواه تنظیم کرده باشید.

ی- به کمک کلید کنترل Offset کرنش سنج را موازنه کنید.

ل- استوانه را به روشی که در زیر شرح داده شده است تحت کرنش قرار دهید و مستقیماً میزان کرنش را بخوانید.

تذکرات مهم:

- دستگاه می تواند از یک طرف، به نحو موثری محدوده مقادیر کرنش را تا $4000 \mu m$ نشان دهد.
- وجود کرنش های تا سطح $2000 \mu m$ یا بیشتر در استوانه، باعث می شود که آشکارساز عدد ۰۰۰۰ را بخواند و نشان دهنده خروج از محدوده دستگاه (که در گوشه سمت چپ دستگاه E10 قرار گرفته) علامت بدهد.
- قسمت BNC خروجی را می توان به یک دستگاه ثبات نقشه، یا یک اسیلوسکوپ وصل کرد، که برای scale Full، مقدار $200 \pm$ ولت می دهد.

۵- استوانه جدار ضخیم را به دستگاه کرنش سنج متصل نمایید. برای این کار، از سوئیچ ۱۶ کاناله در بین دو دستگاه استفاده کنید.

۶- وقتی فشار وارد به سیستم (فشار داخل استوانه) صفر است، برای هر کدام از کرنش سنج های نصب شده در داخل استوانه، کرنش خوان را میزان کنید. مثلاً برای کرنش سنج شماره ۱ (پس از قرار دادن سوئیچ ۱۶ کاناله روی عدد ۱) روی دستگاه کرنش خوان عدد صفر را بسازید. برای بقیه کرنش سنج ها نیز به همین ترتیب عمل نمایید و اعداد مبنای به دست آمده، برای هر کدام از کرنش سنج ها، از شماره ۱ تا ۱۳ را یادداشت نمایید.

۷- به وسیله پمپ دستی، فشار را به داخل استوانه اعمال کنید (تا حدی که به فشار موردنظر برسد) و این فشار را ثابت نگه دارید. توصیه می شود که آن را تا نزدیک فشار مجاز $6/89 \text{ N/m}^2$ بیشتر بالا نبرید تا به نتیجه دلخواه و مناسبی برسید.

۸- برای هر کدام از کرنش سنج ها (۱ تا ۱۳)، مجموعه ای از کرنش های متوازن شده را قرائت کنید.

۹- تفاضل مقادیر قرائت شده اولیه (برای فشار صفر) از مقدار نهایی (مقدار خوانده شده در حال اعمال فشار)، مقادیر کرنش را به دست می دهد.

۱۰- مقادیر اندازه گیری شده کرنش را در جدول ۱ ثبت نمایید.

TABLE 1 STRAINS

Internal cylinder pressure= MN/m^2

Radius (mm)	28		36		45		56		63		18.5	75	
Gauge number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Nature of Strain	ϵ_H	ϵ_R	ϵ_H	ϵ_R	ϵ_H	ϵ_R	ϵ_H	ϵ_R	ϵ_H	ϵ_R	ϵ_H	ϵ_L	ϵ_H
Measured Strain($\times 10^{-6}$)													
Calculated Strain($\times 10^{-6}$)													
Error Difference													

- ۱۱- روش مذکور را برای فشارهای مختلف تکرار نمایید و کرنش‌های مربوطه را اندازه بگیرید و در جدول وارد کنید (برای ۳ فشار مختلف).
- ۱۲- دستگاه را از حال آزمایش خارج کرده و به حال اولیه برگردانید و لاستیک رویی روغن را در روی مخزن پمپ دستی قرار دهید.

۶- نحوه انجام محاسبات و به دست آوردن نتایج

- ۱- با مطالعه بخش‌های بعدی این دستور کار، مقادیر کرنش تئوری ϵ_H و ϵ_R را برای هر کدام از کرنش‌سنج‌ها، تحت فشار معینی که به داخل استوانه اعمال شده است، محاسبه نموده و همراه با مقادیر اندازه گرفته شده (مقادیر تجربی) در جدول مربوطه ثبت نمایید.
- ۲- خطای مقادیر تجربی را محاسبه کرده و در جدول در جای خود ثبت کنید.
- ۳- نمودارهای مربوط به چگونگی توزیع کرنش‌های شعاعی و حلقه‌ای در دیواره استوانه (بر حسب شعاع استوانه برای یک فشار معین) به صورت نمودارهای توزیع تجربی و تئوری (به تفکیک) رسم کنید.
- ۴- مقادیر تئوری تنش‌های شعاعی و حلقه‌ای را با توجه به مطالعه تئوری آزمایش، برای هر حالت خاص، محاسبه کرده و این مقادیر را در جدول ۲ یادداشت نمایید.
- ۵- مقادیر تجربی تنش را به کمک مقادیر تجربی کرنش، یافته و در جدول ۲ بنویسید.

جدول ۲- تنش‌ها

شعاع r mm	مقادیر تجربی محاسبه شده تنش‌ها		مقادیر تئوری	
	σ_H N/m ²	σ_R N/m ²	σ_H N/m ²	σ_R N/m ²
۱۸/۵				
۲۸				
۳۶				
۴۵				
۵۶				
۶۳				
۷۵				

۶- نمودارهای توزیع تنش‌های شعاعی و حلقه‌ای در جداره استوانه بر حسب شعاع (به تفکیک برای مقادیر تنش‌های شعاعی و حلقه‌ای، تئوری و تجربی) رسم نمائید.

۷- با استفاده از معادلات ۴۵ و ۴۶ در بخش تئوری این دستور کار، نمودارهای σ_R و σ_H را (به ترتیب بر حسب $-\frac{1}{r^2} \times 10^3 \text{ m}^{-2}$ ، $+\frac{1}{r^2} (10^3) \text{ m}^{-2}$) برای مقادیر تجربی و تئوری رسم کرده و خطوط مربوط به روابط Lamé را نشان داده و مقادیر تنش‌های شعاعی و حلقه‌ای تئوری و تجربی را مقایسه کنید.

۷- سوالات

- ۱- درصد خطای حاصل از مقایسه مقادیر تئوری و تجربی را برای هر کدام از کرنش‌ها و تنش‌های ϵ_R ، ϵ_H و σ_R ، σ_H را یافته و علل خطا را ذکر کنید.
- ۲- کاربردهای آزمایش استوانه جدار ضخیم را در صنعت تحقیق کرده و موارد آن را با ذکر چگونگی کاربرد، مطابق جدول زیر بیان کنید.

جدول ۳- بررسی کاربرد آزمایش در صنعت

نوع فلز مورد استفاده به عنوان جداره استوانه	اهمیت کاربرد	نوع کاربرد آزمایش در صنعت

- ۳- در مورد نمودارهای تئوری و تجربی رسم شده برای کرنش‌ها و تنش‌ها، بحث کنید.
- ۴- نیروهای بدنی Body force چه نیروهایی هستند؟
- ۵- منظور از نیروهای سطحی Surface force چه نیروهایی است؟
- ۶- حالات تنش صفحه‌ای و کرنش صفحه‌ای را توضیح دهید و برای هر کدام یک مثال عملی بزنید.
- ۷- با توجه به معادلات (۳۹) و (۴۰) در بخش تئوری، معادلات تنش‌های شعاعی و حلقوی را برای مسائل زیر بیابید.

الف- در حالتی که فشار داخلی استوانه P_i و فشار خارجی استوانه P_o باشد.

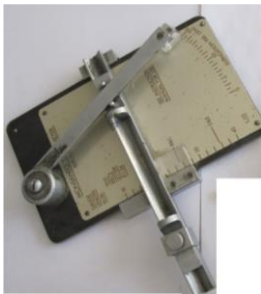
ب- در حالتی که فشار داخلی P_i وارد شود.

۸- چرا در دستگاه آزمایش ما σ_H ، σ_R ، تنش‌های اصلی هستند.

۹- مسئله لامی چیست؟

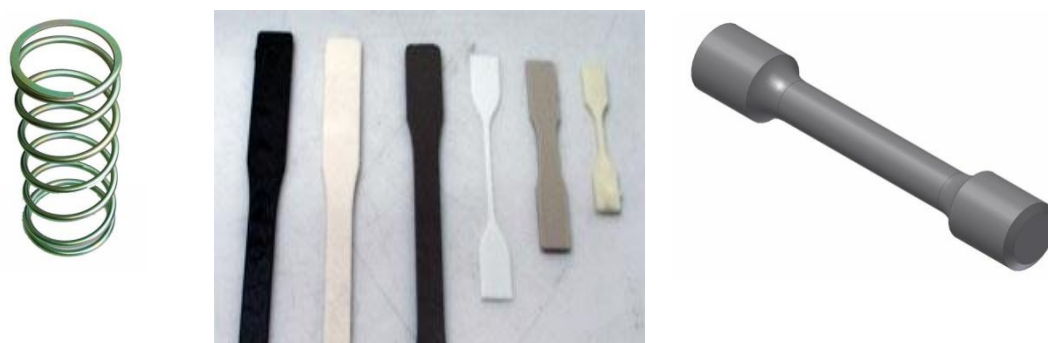
۱۰- چرا کرنش شعاعی در قطر خارجی را نمی‌توان اندازه گرفت؟

آزمایش ۵: کشش Tensile Test

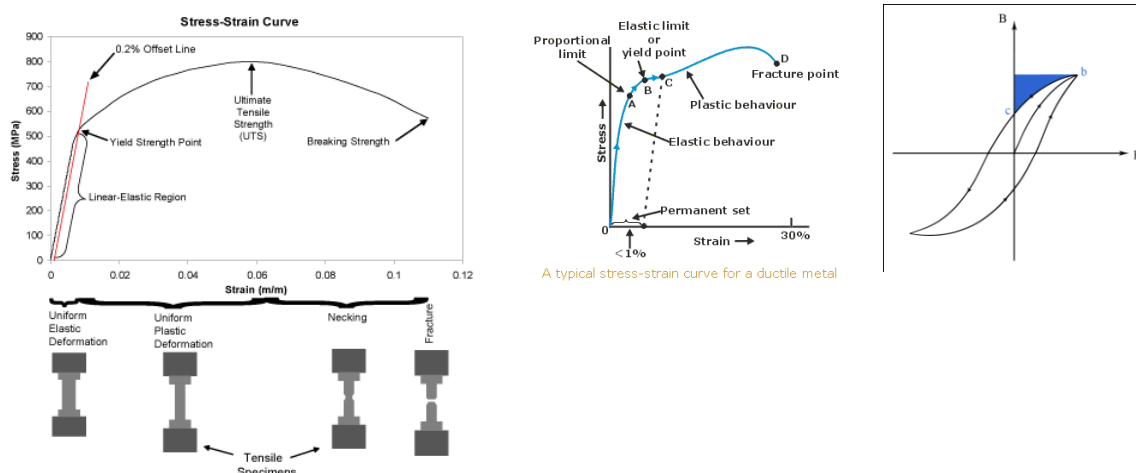


مقدمه

تولید و استفاده از مواد صنعتی تا حدود زیادی به خواص مکانیکی آن‌ها در مقابل کشش، ضربه، فشار، پیچش و غیره بستگی دارد. لذا انجام یک سری آزمایش‌های استاندارد جهت تعیین رفتار مکانیکی مواد ضروری است. آزمایش کشش از متداول‌ترین روش‌ها در بررسی خواص مکانیکی اجسام است که در این قسمت مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در زیر تعدادی از نمونه‌های مختلف آزمایشگاهی و نمودارهای مختلف تنش- کرنش بدست آمده از تست کشش را ملاحظه می‌کنید.



شکل ۱- نمونه‌های مختلف آزمایشگاهی



شکل ۲- نمودارهای مختلف تنش- کرنش

۱- مبانی و تئوری کشش

۱-۱- تعاریف

۱-۱-۱- تغییر بعد الاستیکی یا برگشت پذیر (Elastic strain)

سیمي را تحت اثر نیروی کشش قرار می‌دهیم. با نیروی F طول این سیم از L_0 به L تغییر می‌کند و اضافه طولی برابر $\Delta L = L - L_0$ پدید می‌آید. اگر نیرو از مقدار معینی کمتر باشد پس از برداشتن نیرو، سیم به طول اولیه خود (L_0) بازگشت می‌نماید. این حالت را حالت الاستیکی یا برگشت پذیری می‌نامند و مادامی که نیرو از آن حد معین تجاوز نکرده است گفته می‌شود.

می‌شود که سیم در حد الاستیکی‌اش قرار دارد. در حد الاستیکی، برای بسیاری از اجسام، رابطه بین تغییر طول و نیرو خطی است. به عبارت دیگر اگر نیرو را دو برابر کنیم ($2F$) تغییر طول نیز دو برابر ($2\Delta L$) خواهد شد. ولی برای بعضی از اجسام دیگر مانند لاستیک و بعضی پلاستیک‌ها تغییرات طول نسبت به نیرو به صورت منحنی در می‌آید. ولی در هر دو صورت اگر نیرو کمتر از حد الاستیکی جسم باشد پس از برداشتن نیرو، جسم به طول اولیه‌ی خود بازگشت می‌نماید.

۱-۱-۲- تغییر بعد پلاستیکی یا دائمی: موقعی که جسم را بیش از حد الاستیکی‌اش تحت نیرو قرار دهیم ایجاد تغییر بعد دائمی (یا پلاستیکی) می‌نماید که با برداشتن نیرو از بین نمی‌رود. این حالت را حالت پلاستیکی می‌نامند. شاید مهمترین مشخصه‌ی فلزات این باشد که می‌توانند هم تغییر طول الاستیکی و هم پلاستیکی داشته باشند. از این اجسام می‌توان در کاربردهایی مثل فنر استفاده کرد که مقدار نیرو کمتر از حد الاستیکی است و با برداشتن نیرو چون تغییر طول دائمی ایجاد نشده فنر حالت اولیه‌اش را به خود می‌گیرد. همچنین می‌توانیم این اجسام را تحت نیروهای زیادتر قرار دهیم به طوری که ایجاد تغییر شکل دائمی نموده و در نتیجه از آن‌ها اشکال مختلفی بسازیم.

توجه: هر دو خاصیت الاستیک و پلاستیک را برای یک ماده می‌توان در یک آزمایش کشش اندازه‌گیری نمود.
۱-۱-۳- تنش مهندسی یا متوسط (Engineering stress): نسبت نیروی وارده به سطح مقطع اولیه، ($\sigma = F/A$) است. واحد تنش در سیستم انگلیسی پوند بر اینچ (psi) و در سیستم متریک نیوتن بر متر مربع (پاسکال Pa) است.

۱-۱-۴- تغییر بعد نسبی مهندسی متوسط (Engineering strain): نسبت تغییر طول به طول اولیه است. ($\frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$). واحد تغییر بعد نسبی معمولاً اینچ یا سانتیمتر بر سانتیمتر است و گاهی نیز به درصد طول اولیه بیان می‌شود.

۱-۱-۵- ضریب ارتجاعی (Elastic Modulus): رابطه‌ی بین تنش و تغییر بعد نسبی در ناحیه‌ی الاستیک 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.

۱-۱-۶- تنش حقیقی (True stress): نسبت نیروی وارده به سطح مقطع حقیقی نمونه است. $\sigma_t = F / A$ (توجه داشته باشید که چون جسم کشیده می‌شود طولش افزایش یافته و سطح مقطع آن به تدریج کاهش می‌یابد).

۱-۱-۷- تغییر بعد نسبی حقیقی (True strain): لگاریتم نسبت تغییر طول به طول اولیه‌ی نمونه در لحظه اندازه‌گیری می‌باشد. $\epsilon_t = \ln(\Delta L / L_0)$

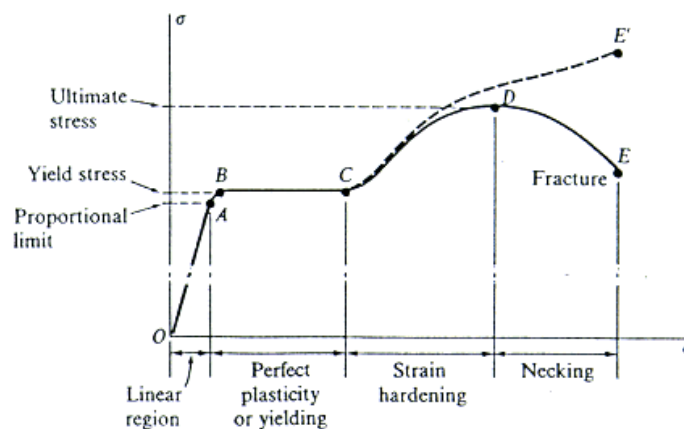
۱-۱-۸- کاهش سطح مقطع: درصد تغییر سطح مقطع نمونه نسبت به سطح مقطع اولیه است. $R.f = \frac{A - A_0}{A_0} \times 100$

۱-۱-۹- ضریب مماسی (Tangent Modulus): عبارت است از ضریب زاویه منحنی تنش - تغییر طول نسبی در

ناحیه‌ی پلاستیک $T.M. = d\sigma/d\epsilon$

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

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



شکل ۳- نقاط مهم در منحنی تنش کرنش

۱-۲-۱- حد ارتجاعی (Elastic limit)

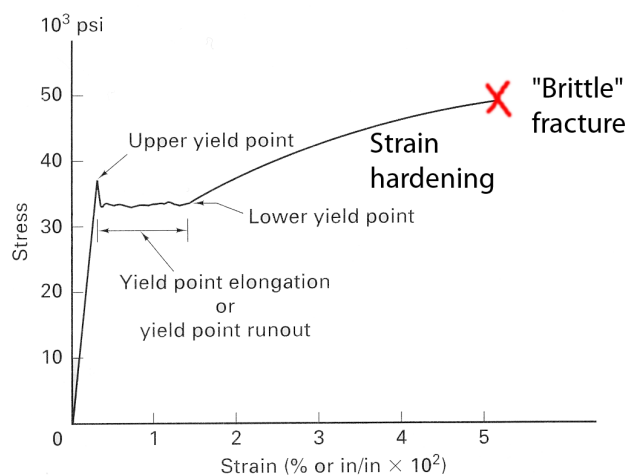
نقطه‌ای است روی منحنی که رفتار جسم از حالت الاستیک خطی منحرف می‌شود و از آن پس تغییر بعد دائمی آغاز می‌گردد. آخرین نقطه‌ای را که منحنی به صورت خطی است گاهی حد تناسب (Proportional limit) می‌نامند و در مواردی ممکن است با حد ارتجاعی مقداری فرق داشته باشد.

۱-۲-۲- نقطه‌ی تسلیم (yield point)

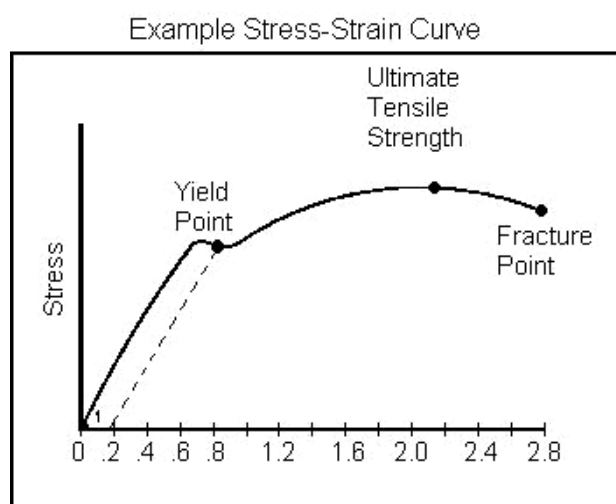
نقطه‌ای است روی منحنی که رفتار جسم از الاستیک وارد مرحله‌ی پلاستیک می‌شود. بنابراین در تنش‌های کمتر از تنش تسلیم، تغییر شکل ارتجاعی (یا برگشت‌پذیر) است و هرگاه تنش وارده از تنش تسلیم جسم بیشتر شود تغییر شکل دائمی یا پلاستیکی ایجاد می‌شود. در برخی از فلزات مانند فولاد کم کربن نقطه‌ی تسلیم مشخص وجود دارد که به صورت حد تسلیم بالا و پایین ظاهر می‌شود. (شکل ۴) ولی در مورد اکثر فلزات انتقال از منطقه الاستیک به پلاستیک به تدریج صورت گرفته حد تسلیم مشخصی وجود ندارد و از روش‌های قراردادی استفاده می‌کنند که معمول‌ترین آن‌ها روش مقاومت تسلیم در ۰.۲٪ (offset yield strength) است که عبارت است از تنش در ۰.۰۰۲ (یا ۰.۲ درصد) تغییر طول پلاستیکی. روش فوق در شکل ۵ نشان داده شده است.

توجه به این نکته لازم است که در بیشتر استفاده‌های مهندسی، مواد باید تحت شرایطی باشد که تنش وارده کمتر از

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0} \text{ نقطه‌ی تسلیم باشد.}$$



شکل ۴- نقاط تسلیم بالا و پایین



شکل ۵- تنش تسلیم مهندسی

۱-۲-۳- مقاومت کشش (Ultimate Tensile Strength)

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

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{A_0} = \text{مقاومت کشش}$$

۱-۲-۴- 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.

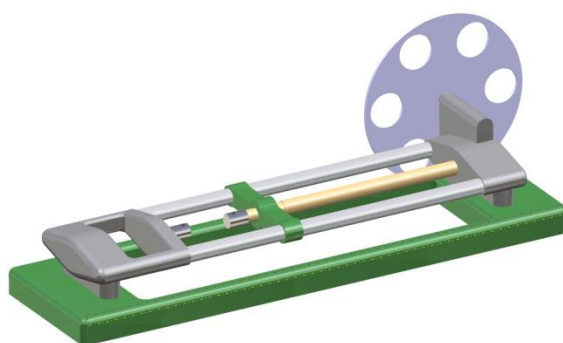
۲- دستگاه آزمایش

نیروی وارد بر نمونه به صفحه ارتجاعی منتقل شده و باعث تغییر شکل آن می‌شود. این تغییر شکل توسط اهرمی به پیستون جیوه منتقل شده و جیوه را در لوله شیشه‌ای به جلو می‌راند. استوانه دوار دارای سه نسبت دنده ۱۶/۱ و ۸/۱ و ۴/۱ است که تغییر طول نمونه را به این نسبت‌ها بزرگ می‌کند.

قسمت‌های مهم ماشین آزمایش کشش عبارتند از:

- | | | |
|---------------------|------------------------|------------|
| ۱- دسته انتقال نیرو | ۴- پینیون | ۷- گیره‌ها |
| ۲- استوانه دوار | ۵- خط کش مدرج | ۸- فک‌ها |
| ۳- سوزن | ۶- پیچ تنظیم ستون جیوه | |

شکل دستگاه کشش در زیر آمده است:



شکل ۶- دستگاه کشش

۳- روش آزمایش

۳-۱- هدف آزمایش

تعیین مقاومت و مطالعه رفتار اجسام در برابر نیروی کششی و به طور اختصاصی بررسی کمیت‌های زیر:

- ۱- ضریب یانگ
- ۲- تنش حد تناسب (proportional of limit)
- ۳- حد تسلیم بالایی و پایینی
- ۴- استحکام کششی یا حد مقاومت، U.T.S (ultimate tensile strength)
- ۵- تنش در ۰.۲٪ برای اجسامی که نقطه تسلیم مشخصی ندارند. (proof stress تنش مفروض یا معیار)
- ۶- تنش شکست یا حد انقطاع (fracture)
- ۷- درصد ازدیاد طول در نقطه شکست
- ۸- درصد کاهش سطح مقطع در نقطه شکست
- ۹- نوع شکست نمونه

۲-۳- دو نکته‌ی مهم در انجام آزمایش کشش:

- الف- سرعت انجام آزمایش از موارد مهم است و برای جسم مورد آزمایش باید این سرعت معلوم و مشخص باشد. این موضوع در مورد اجسام نرم و همچنین برای اجسام در دماهای بالا خیلی اهمیت دارد.
- در مواقعی که سرعت آزمایش زیاد باشد، تنش کششی نهائی زیاد می‌شود و درصد ازدیاد طول کم است.
- در ماشین‌های آزمایش کشش پیشرفته، این موضوع در نظر گرفته شده و سرعت انجام آزمایش قابل تنظیم است.
- ب- دمای آزمایش: آزمایش باید بین ده درجه سانتی‌گراد و سی درجه سانتی‌گراد انجام پذیرد.

۳-۳- دستور کار انجام آزمایش

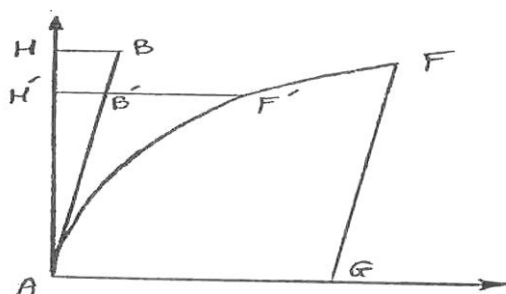
- ۱- قطر و طول قسمت میانی نمونه را بدقت اندازه‌گیری کنید.
 - ۲- نمونه را در دستگاه‌های سنجش ازدیاد طول و کاهش سطح مقطع قرار داده، حالت اولیه‌ی آن را بر روی صفر تنظیم نمایید. (نمونه‌ها از نوع B و D است).
 - ۳- صفحه ارتجاعی (spring lean) و خط کش مدرج را بسته به نوع نمونه و با توجه به جدول ۲ انتخاب کرده و بر روی دستگاه سوار کنید.
 - ۴- با درگیر کردن دنده‌های پینیون با دنده‌های استوانه دوار نسبت لازم را (۴/۱ یا ۸/۱ یا ۱۶/۱) به دست آورید. (برای این کار استوانه دوار را بیرون آورید تا باعث خورده شدن دنده‌ها نگردد.) کاغذ میلیمتری را نیز بر روی استوانه قرار دهید.
 - ۵- سوزن را روی خط صفر کاغذ قرار دهید، در این صورت باید لبه شاخص در مقابل صفر خط کش قرار گیرد. به این ترتیب تقسیمات کاغذ با خط کش منطبق شده است.
 - ۶- نمونه را داخل فک‌های A و B قرار داده و فک‌ها را بر روی گیره‌ها سوار کنید.
 - ۷- با فشار دادن روی دو سر صفحه ارتجاعی آن را به تکیه‌گاه‌هایش بچسبانید، و در این لحظه سطح جیوه را روی صفر تنظیم نموده و سپس صفحه ارتجاعی را رها نمایید.
 - ۸- دسته انتقال نیرو را به آهستگی بچرخانید تا سطح جیوه مقابل عدد صفر قرار گیرد. در این لحظه لقی بین گیره‌ها از بین رفته است. سپس استوانه را بچرخانید تا سوزن در نقطه مناسبی طرف راست فنر نگهدارنده کاغذ و روی خط صفر قرار گیرد؛ طوری که شاخص در مقابل ستون جیوه باشد.
 - ۹- موتور را روشن کرده (forward درجه) و نمونه را تحت کشش قرار دهید. حرکت جیوه را در لوله شیشه‌ای با شاخص دنبال کرده و با فشردن سوزن روی کاغذ میلیمتری مقدار نیرو را در لحظات مختلف ثبت نمایید. به این ترتیب ازدیاد طول نمونه به محیط استوانه منتقل شده است. این عمل را با دقت تا شکسته شدن نمونه ادامه دهید.
 - ۱۰- نمونه شکسته شده را از دستگاه خارج کرده، درصد ازدیاد طول و درصد کاهش سطح مقطع آن را تعیین کنید.
 - ۱۱- کاغذ میلیمتری را از روی استوانه باز نموده و محور نیرو را به کمک خط کش مقابل لوله شیشه‌ای جیوه و محور ازدیاد طول را با خط کش میلیمتری درج کنید.
 - ۱۲- خود دستگاه (صفحه ارتجاعی، فک‌ها، گیره‌ها و غیره) نیز مقداری ازدیاد طول در اثر نیرو دارد.
- در نتیجه مشخصات خود دستگاه را نیز باید در نظر گرفت. برای بدست آوردن مقدار ازدیاد طول در هر نقطه F

(شکل ۷) مقدار ازدیاد طول دستگاه ($H-B'$) را از مقدار ازدیاد طولی که توسط دستگاه ثبت شده ($H-F'$) کم می کنیم تا $F-B'$ ازدیاد طول واقعی نمونه در اثر نیروی $A-H'$ بدست آید.

در شکل ۷ نقطه H بالاترین حد نیروست (۱۰۰۰ یا ۲۰۰۰ کیلوگرم) که بسته به نوع نمونه از جدول زیر بدست می آید.

جدول ۱- بالاترین حد نیرو

نمونه	HB (m.m)
فولادی	۴۱
آلومینیومی	۳۲
برنجی	۳۲



شکل ۷- ازدیاد طول دستگاه

برای مثال اگر مقدار ازدیاد طول نمونه را در لحظه شکست بخواهیم، باید از F (نقطه شکست) خطی موازی AB رسم نموده، مقدار AG را اندازه گیری کرده و بر ضریب بزرگ نمائی تقسیم کنیم تا مقدار ازدیاد طول واقعی نمونه بدست آید.

۱۳- در موقع ثبت تغییرات $F-\Delta L$ برای یکی از نمونه های آزمایش، یک بار در ناحیه ی الاستیک و یک بار در ناحیه ی پلاستیک، بار را از روی نمونه بردارید و چگونگی تغییرات منحنی $F-\Delta L$ را بعد از وارد کردن مجدد نیرو بررسی کنید.

۱۴- به کمک دستگاه مخصوص، منحنی $F-\Delta L$ را در ناحیه ی الاستیک برای نمونه های بلند ثبت کرده و ضریب یانگ را بیابید.

جدول ۲- انتخاب صفحه ارتجاعی و خط کش مدرج بر حسب نوع نمونه

نمونه	صفحه ارتجاعی	بزرگ نمایی	خط کش
فولاد	۲۰۰۰ Kg	۱۶/۱	C- 180
برنج و آلومینیوم	۱۰۰۰ Kg	۱۶/۱	D-191

۴- نحوه انجام محاسبات و به دست آوردن نتایج

۱- از روی یافته‌های آزمایش (منحنی نیرو در مقابل ازدیاد طول)، تنش و تغییر طول نسبی را بدست آورده در جداول مربوطه قرار دهید. منحنی تنش - تغییر طول نسبی را برای هریک از نمونه‌ها رسم کرده و قسمت‌های زیر را روی آن‌ها مشخص کنید:

ناحیه‌ی الاستیک (تغییر شکل برگشت پذیر) - ناحیه‌ی پلاستیک (تغییر شکل دائمی) مقاومت کششی - تنش شکست - نقطه‌ی تسلیم نمونه - حد تناسب

۲- تمام خواص مندرج در هدف آزمایش را محاسبه و آن‌ها را در جداول مربوطه قرار دهید.

۳- مقاومت کششی بدست آمده از آزمایش را با مقادیر مندرج در کتاب‌های مقاومت مصالح مقایسه کنید.

۴- کلیه‌ی مقادیر تجربی را با مقادیر تئوری که از کتب مربوطه استخراج کرده‌اید، مقایسه کنید.

۵- سوالات

۱- آیا فلزات مورد آزمایش جزء مواد نرم (Ductile) هستند؟ چرا؟

۲- اختلاف بین نمونه‌های مورد آزمایش را بیان کنید؟ (از نظر نحوه‌ی شکست، تردی و نرمی، درصد ازدیاد طول و درصد کاهش سطح مقطع)

۳- نمودار تنش - تغییر طول نسبی مهندسی را با نمودار تنش تغییر طول نسبی واقعی در حالت کلی (به صورت شماتیک) مقایسه کنید.

۴- منظور از ضریب مماسی (Tangent modulus) چیست؟ آن‌را برای نمونه‌ها در ابتدای ناحیه پلاستیک محاسبه کنید؟

۵- مواد شکننده (Brittle) از نظر منحنی تنش - کرنش چه فرقی با مواد نرم دارند؟ فهرست وار بنویسید.

۶- نرمی (Ductility) در آزمایش کشش، عبارت است از خاصیت جسم به صورتی که بتوان آن‌را از حدیده در حالت خمیری (پلاستیک) عبور داد بدون آن که شکسته یا پاره شود. این خاصیت را در این آزمایش چگونه و به چه روش‌هایی اندازه گرفتیم؟

۷- آیا نمودارهای کشش و فشار برای تمام مواد یکسان است؟ چه موادی استثناء هستند؟ آن‌ها را نام ببرید.

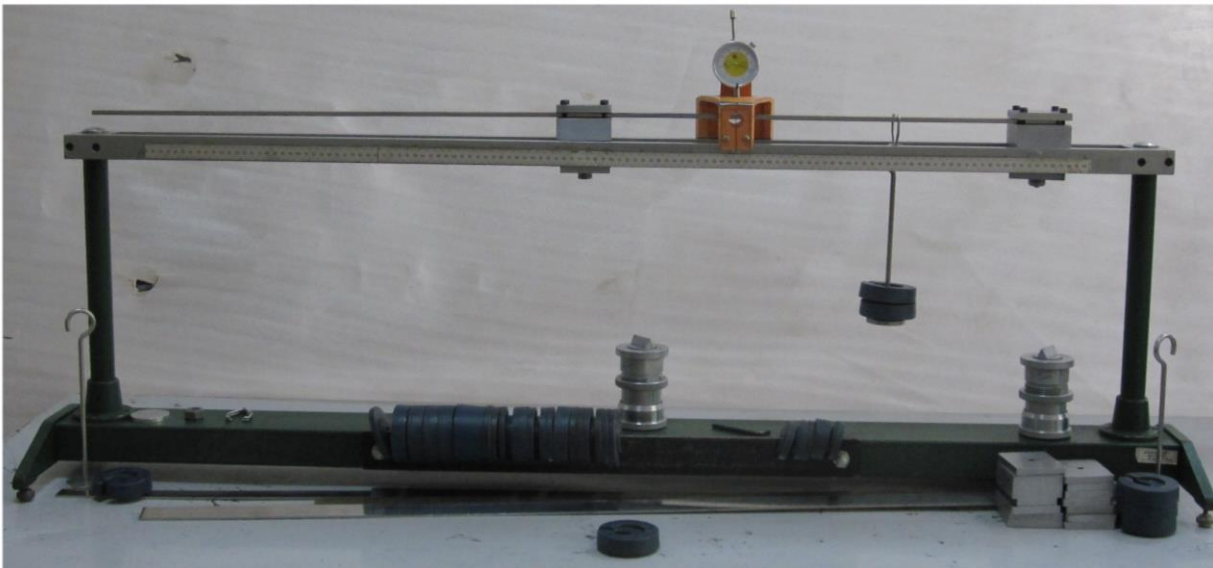
ضمیمه: نمونه جداول

نوع نمونه	طول m.m	قطر m.m	بزرگنمایی	درصد ازدیاد طول	درصد کاهش سطح مقطع	سطح مقطع (m.m) ²

نوع نمونه	بار Kg	ازدیاد طول ΔL	تنش (Kg/cm ²)	تغییر طول نسبی

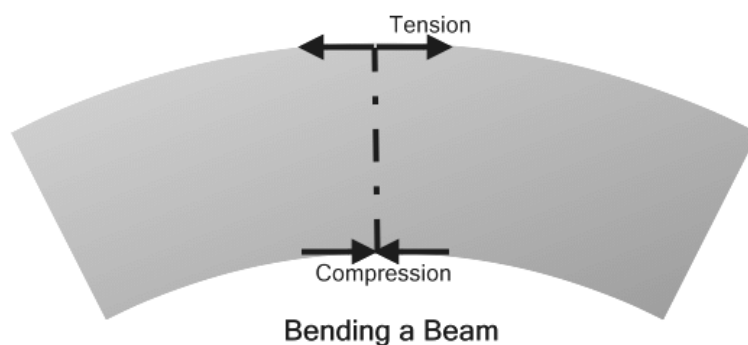
نوع نمونه	ضریب ارتجاعی E	تنش حد تناسب	حد تسلیم بالائی و پائینی یا تنش در ۰.۲٪	مقاومت کششی	تنش گسیختگی

آزمایش ۶: تیر Beam Test



مقدمه:

وقتی یک تیر Beam 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 ساده تیر و قانون هوک Hook می‌توان مقدار این تغییر شکل یا انحراف را محاسبه و تعیین کرد. مقدار انحراف حاصله در یک تیر به نوع تیر، تکیه‌گاه‌ها و نیروهای اعمال شده بستگی دارد. برای بررسی توزیع تنش‌ها در یک تیر بسیار مناسب است که فرض کنیم یک تیر از تعدادی صفحات با لایه‌های موازی و نازک در جهت محور تیر تشکیل شده است. در این صورت می‌توان اثر یک نیروی عمودی را برروی 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 می‌گردند و در نتیجه یک تنش کششی در لایه‌ی خارجی (شکل-۱) 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.



شکل ۱- کشش و فشار در بیم تحت خمش

۱- مبانی و تئوری تئوری خمش:

۱-۱- تنش خمشی

در مسائلی که مربوط به خمش تیرها می‌شود، بعضی فرض‌ها که آنالیز تیر را ساده می‌کنند در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌کنیم تیر در حالت "خمش خالص" (Pure bending) قرار می‌گیرد و از تئوری ساده خمش بتوان استفاده کرد. معادله‌ی اصلی که متغیرهای مهم را به هم ربط می‌دهد معادله‌ی خمش است:

$$\frac{M}{I} = \frac{E}{R} = \frac{\sigma}{Y} \quad (1)$$

که در آن:

M ممان خمشی در مقطع مورد نظر (KN-mm)

I ممان اینرسی مقطع حول محور خنثی (mm^4)

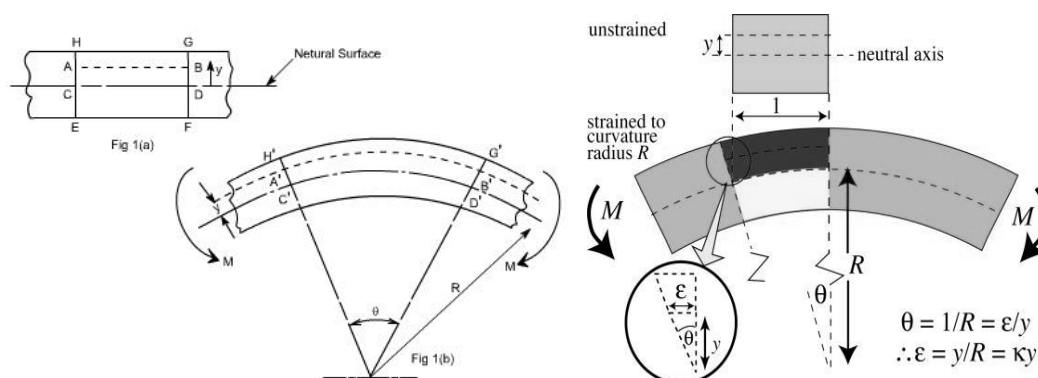
E ضریب یانگ (ضریب الاستیسیته) (KN / mm^2)

R شعاع انحنای محور خنثی (mm)

σ تنش حاصل از خمش در فاصله ی از محور خنثی (KN / mm^2)

Y فاصله از محور خنثی می باشد (mm)

۲-۱- محاسبه ی شعاع انحنا



شکل ۲- شعاع انحنا در تیر تحت خمش

شکل ۲- تیر AB به طول L را که در وسط به اندازه ΔY انحراف پیدا کرده و به شکل قوسی از دایره با شعاع R

درآمده نشان می دهد.

با استفاده از خاصیت وتر در دایره:

$$\frac{L}{2} \times \frac{L}{2} = \Delta Y (R + x)$$

و نیز:

$$X = R - \Delta Y$$

بنابراین:

$$\frac{L^2}{4} = \Delta Y (R + R - \Delta Y) = \Delta Y (2R - \Delta Y)$$

$$\frac{L^2}{4} = 2R\Delta Y - \Delta Y^2$$

$$R = \frac{\frac{L^2}{4} + \Delta Y^2}{2\Delta Y}$$

چون ΔY کوچک است می توان از ΔY^2 صرف نظر کرد و در نتیجه خواهیم داشت:

$$R = \frac{L^2}{8\Delta Y}$$

(۲)

توضیح: در شکل ۲ تیر مورد نظر در فاصله ی AB تحت ممان ثابت M می باشد.

۳-۱- انحراف در تیرها:

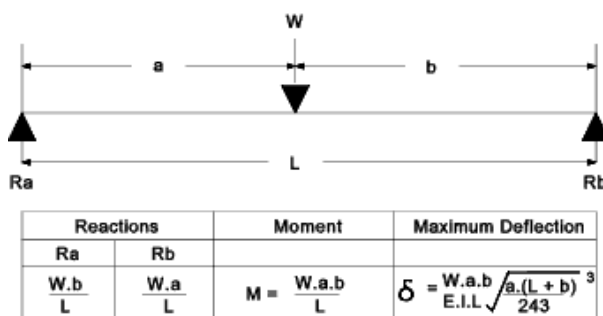
در قسمت مقدمه تنش در تیر شرح داده شد. در عمل معمولاً حدی برای تغییر مکان مجاز تعیین می شود و گرنه ممکن است یک تیر از نظر تئوری به اندازه ی کافی قوی باشد ولی انحراف آن بیش از اندازه باشد. راه های مختلفی برای محاسبه ی انحراف تیرها وجود دارد که یکی از آنها روش Macauley است.

معادله دیفرانسیل انحراف تیر در بسیاری از کتب مکانیک جامدات تحلیل و به صورت زیر بیان شده است:

$$-EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M \quad (۳)$$

۳-۱-۱- تیر با تکیه گاه های ساده و یک بار متمرکز:

شکل ۳- تیری با تکیه گاه های ساده، به طول L و تحت تأثیر بار متمرکز W در فاصله a از تکیه گاه را نشان می دهد.



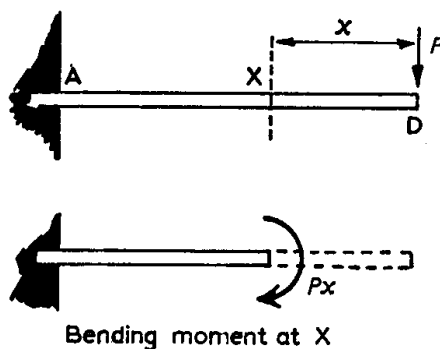
شکل ۳- تیر با تکیه گاه ساده

با استفاده از روش Macauley پس از انتگرال گیری و جایگذاری شرایط حدی مقدار انحراف تیر برای $x \geq a$ از رابطه ی زیر بدست می آید:

$$y = [(W a) * (L/b (x-a)^3 - x^3 + (L^2 - b^2) x)] / (6 E I L) \quad (۴)$$

۳-۱-۲- تیر یک سر در گیر تحت اثر وزن تیر و یک نیروی متمرکز در انتهای آزاد:

شکل ۴- ترتیب قرار گرفتن نیروی متمرکز را نشان می دهد.



شکل ۴- تیر یک سر گیردار با بار متمرکز

اگر مبدأ را در D جهت مثبت محور x را به سمت چپ، نیروی وزنه را p و وزن واحد طول تیر را s فرض کنیم خواهیم داشت:

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

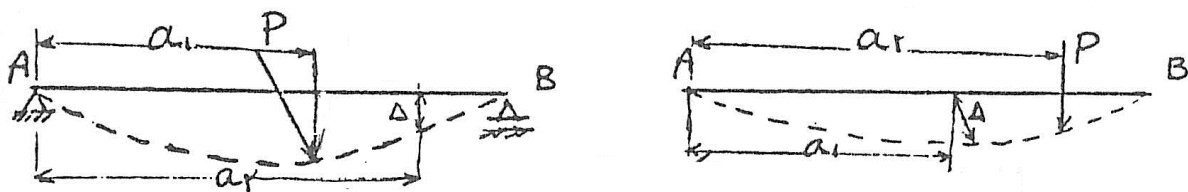
پس از انتگرال گیری و جایگذاری شرایط، مقدار انحراف در هر نقطه از تیر از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$y_{\max} (x=0 \text{ در ماکزیمم انحراف}) = \frac{1}{EI} \left(-\frac{PL^3}{3} - \frac{sL^4}{8} \right) \quad (5)$$

$$y = \frac{1}{EI} \left(-\frac{sx^4}{24} - \frac{Px^3}{6} + \left(\frac{pL^2}{2} + \frac{sL^3}{6} \right) x - \frac{pL^3}{3} - \frac{sL^4}{8} \right)$$

۱-۴- قانون ماکسول:

قانون ماکسول: برای تیر الاستیک مقدار انحراف در $x = a_2$ وقتی باری در $x = a_1$ اعمال شود (شکل ۵-الف) برابر است با مقدار انحراف در امتداد همان نیرو در $x = a_1$ وقتی که نیروی مزبور را در همان امتداد انحراف اولیه قرار دهیم. (شکل ۵-ب)

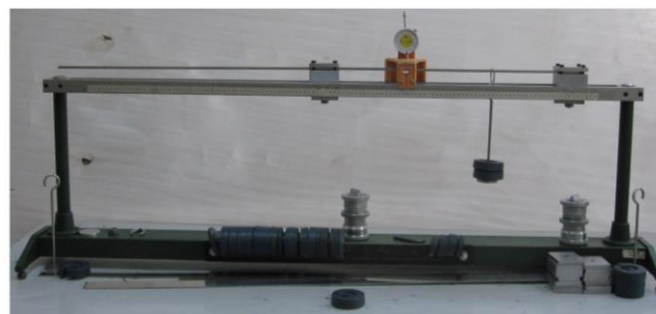


شکل ۵- قانون ماکسول

صحت قانون فوق را می توان از طریق آزمایش (د) به اثبات رسانید. اثبات قانون ماکسول از طریق تئوری با استفاده از کار مجازی در اغلب کتاب های تئوری سازه ها یافت می شود.

۲- دستگاه آزمایش:

دستگاه آزمایش را در شکل زیر مشاهده می کنید:



شکل ۶- دستگاه آزمایش خمش

۳- روش آزمایش:

۳-۱- هدف آزمایش:

$$1- \text{تحقیق در صحت معادله‌ی خمشی تیر به صورت: } \frac{E}{R} = \frac{M}{I}$$

۲- رسم نمودار نیرو در برابر انحراف (در تیر با دو تکیه‌گاه ثابت) در حد الاستیک و تعیین ضریب یانگ E برای

مواد مختلف

۳- تحقیق در شکل تیر یک سر در گیر تحت اثر وزن تیر و یک نیروی متمرکز در انتهای آزاد آن

۴- بررسی قانون ماکسول

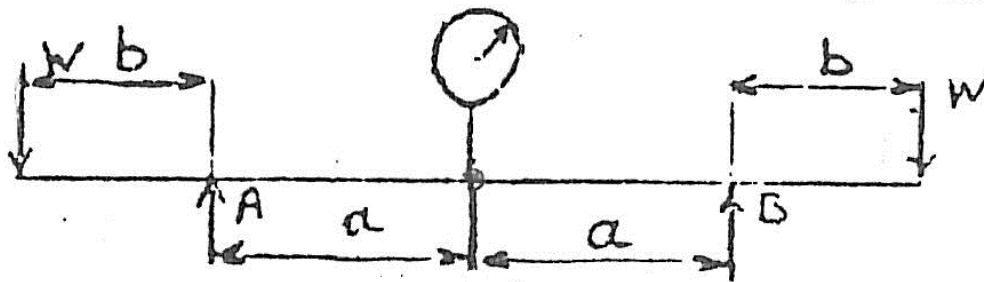
در هر آزمایش ابتدا جنس تیر مورد آزمایش را مشخص نموده و سپس مقطع آن را اندازه‌گیری کنید.

$$3-2- \text{تحقیق در معادله خمشی تیر: } \frac{M}{I} = \frac{E}{R}$$

ساده‌ترین روش برای تحقیق در صحت معادله تیر، قراردادن تیر روی لبه تکیه‌گاه‌های ساده به فاصله‌ی 2a و

بارگذاری در دو انتهای تیر به فاصله‌ی b از تکیه‌گاه (شکل ۷- v) می‌باشد که به این طریق مقدار ممان در فاصله AB ثابت

و برابر wb می‌شود.



شکل ۷- تیر با تکیه‌گاه ساده و بار متمرکز در دو انتها

یک انحراف سنج نیز برای اندازه‌گیری انحراف در وسط تیر قرار می‌گیرد. بعد از قراردادن وزنه آویزها در دو انتهای تیر، انحراف سنج را روی صفر تنظیم نمایید. بارگذاری را از وزنه‌ی ۲۰۰ گرمی شروع و تا ۱.۵ کیلوگرم ادامه داده و هر بار انحراف وسط تیر را بخوانید. برای دقت بیشتر مقدار انحراف را در بارگذاری و باربرداری بخوانید و متوسط این دو مقدار را Δy قرار دهید. برای باربرداری پس از قراردادن وزنه‌ی ۱.۵ کیلوگرمی وزنه‌ای بالاتر به تیر وارد نموده سپس آن را بردارید تا به این وسیله باربرداری وزنه ۱.۵ کیلوگرمی نیز مشخص شود آن‌گاه به ترتیب وزنه‌ها را برداشته و مقادیر انحراف باربرداری را به دست آورید. مقدار انحراف در صفر را از انحراف دیگر وزنه‌ها در باربرداری کم کرده تا میزان انحراف در باربرداری در حالت بدون بار صفر گردد. نتایج آزمایش را در جدول ۱- نوشته و شعاع انحنا R را بر حسب متر محاسبه کنید.

جدول-۱

انحراف متوسط (mm)	انحراف باربرداری (mm)	انحراف بارگذاری (mm)	مقدار نیروی وارده (kgf)w

۳-۳- تعیین ضریب یانگ (E)

تیر مورد نظر را روی دو تکیه گاه ساده به فاصله L از یکدیگر قرار داده (شکل-۳)، وزنه آویز را در نقطه C به فاصله a از تکیه گاه آویزان کنید، یک انحراف سنج نیز در محل وزنه آویز روی تیر قرار داده آن را روی صفر تنظیم نمائید. بارگذاری را از ۵۰۰ گرم شروع و تا ۳.۵ کیلوگرم ادامه دهید. برای دقت بیشتر، انحراف تیر در محل وزنه آویز را برای بارگذاری و باربرداری خوانده و متوسط آن را در نظر بگیرید. نتایج آزمایش را در جدول-۲ مرتب نمائید.

جدول-۲

انحراف متوسط (mm)	انحراف باربرداری (mm)	انحراف بارگذاری (mm)	مقدار نیروی وارده (kgf)w

۳-۴- شکل تیر یک سر در گیر تحت اثر وزن خود و یک نیروی متمرکز:

ابتدا بلوک فولادی مربوط به تکیه گاه گیردار در محل مورد نظر بین دو میله بالائی دستگاه محکم می شود. سپس تیر مورد آزمایش به طول L در یک انتها مطابق شکل-۴ در تکیه گاه گیردار بین بلوک اصلی و صفحه بالائی جای داده و محکم پیچ می شود. سپس وزنه آویز تا آن جا که ممکن است نزدیک به انتهای آزاد تیر قرار گیرد. انحراف سنج باید در نزدیک ترین نقطه به تکیه گاه گیردار صفر شده، مقادیر انحراف تیر در فواصل مشخصی از انتهای گیردار (فاصله (L-x)) خوانده شود.

هر چند فنر تعبیه شده در انحراف سنج ضعیف است با این وجود امکان انحراف بیشتر تیر بر اثر عکس العمل فنر وجود دارد، بنابراین پیشنهاد می شود به خصوص در مورد تیرهای نازک، میله انحراف سنج با دست کنترل شود تا تماس کمی با تیر پیدا کند و سپس مقدار انحراف تیر خوانده شود.

اشکال دیگر این است که در بعضی موارد ممکن است تیر کاملاً راست نباشد. برای جلوگیری از هرگونه اشتباه در مقادیر خوانده شده انحراف، بهتر است تیر دوبار از پشت و رو آزمایش شود و مقدار متوسط انحراف در نظر گرفته شود. نتایج آزمایش را مطابق جدول-۳ تنظیم نمائید.

جدول-۳

X (mm)	L-X (mm)	میزان انحراف (mm)		
		متوسط	پشت تیر	روی تیر

۳-۵- بررسی قانون ماکسول:

تیر مورد آزمایش را مطابق شکل ۴ تنظیم نمائید. مقدار انحراف را در وسط تیر، وقتی که نیرو در انتهای تیر وارد می شود اندازه گیری کنید. سپس مقدار انحراف را در انتهای آزاد تیر وقتی که همان نیرو در وسط تیر وارد می شود بدست آورید. این آزمایش را برای دقت دوبار از پشت و روی تیر انجام داده و مقدار انحراف متوسط را در دو حالت در نظر بگیرید.

۴- نحوه انجام محاسبات، به دست آوردن نتایج و سوالات

آزمایش تحقیق در معادله خمش تیر::

میانگین درصد خطای مقادیر بدست آمده برای R را از طریق آزمایش و تئوری پیدا کنید و دلایل اختلاف آن‌ها را بنویسید. (نتایج آزمایش و تئوری را در جدول ۴- تنظیم نمائید).

جدول ۴-

درصد خطا (%)	R تیر تئوری	R تیر آزمایش	انحراف متوسط (mm)	انحراف باربرداری (mm)	انحراف بارگذاری (mm)	نیروی وارد (kgf)W

آزمایش تعیین ضریب یانگ:

با استفاده از جدول ۲- نمودار بار را بر حسب انحراف متوسط رسم کرده و با استفاده از شیب منحنی مقدار ضریب یانگ E را محاسبه و با مقدار واقعی آن مقایسه کنید.
تأثیر بارگذاری و باربرداری را در نتیجه آزمایش ذکر کنید.

آزمایش تیر یک سر درگیر تحت وزن خود:

نتایج آزمایش را در جدول ۵- تنظیم نمائید. با استفاده از آن نمودار انحراف تیر در راستای عمودی را در برابر فاصله (L-x) (راستای افقی) برای مقادیر انحراف بدست آمده از آزمایش و تئوری رسم نمائید.
نتایج آزمایش و تئوری را با یکدیگر مقایسه و علت اختلاف را بیان کنید.

جدول ۵-

درصد خطای انحراف (%)	انحراف تئوری (mm)	انحراف آزمایش (mm)	انحراف پشت تیر (mm)	انحراف روی تیر (mm)	(L-x) (mm)	X (mm)

آزمایش قانون ماکسول:

۱- با استفاده از آزمایش (د) درستی قانون ماکسول را از طریق آزمایش اثبات نمائید.

۲- در آزمایش ماکسول تأثیر وزن تیر را چگونه باید از بین برد؟

آزمایش ۷: پیچش Torsion Test



اگر میله‌ای را محکم در یک انتها ثابت نموده و انتهای دیگر آن را به وسیله‌ی یک کوپل یا (Torque) تحت پیچش قرار دهیم در حالی که این کوپل در صفحه عمود بر میله باشد گفته می‌شود که میله تحت تاثیر یک پیچش ساده قرار دارد. اثر کوپل پیچشی ایجاد یک تغییر مکان زاویه‌ای در مقطع و یک تنش برشی (shear stress) روی مقطع میله که عمود بر آن است می‌نماید. چون غالباً "عمل پیچش بوسیله‌ی چندین کوپل نیرو ایجاد می‌شود مقدار جبری این ممان‌ها را که در یک طرف میله قرار دارد به‌عنوان ممان پیچش یا (M_T) Twisting moment در محاسبات مورد استفاده قرار می‌دهند. کمیت ممان اینرسی قطبی (J) مقطع نیز در محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱- مبانی و تئوری پیچش

۱-۱- محاسبه‌ی تنش برشی

برای یک میله با مقطع دایره (توپر یا توخالی) که تحت ممان پیچشی T قرار دارد، مقدار تنش برشی در فاصله‌ی r از مرکز مقطع میله از رابطه‌ی

$$\tau = \frac{Tr}{J} \quad (۱)$$

بدست می‌آید که در آن J مقدار ممان قطبی مقطع بوده و برابر است با:

$$J = \frac{\pi}{32} (D_o^4 - D_i^4) \quad (۲)$$

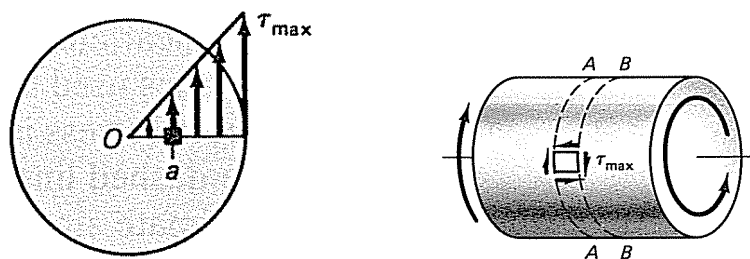
که D_o اندازه‌ی قطر خارجی و D_i اندازه‌ی قطر داخلی میله است و در موردی که میله توپر باشد $D_i=0$ و در نتیجه:

$$J = \frac{\pi}{32} D_o^4 \quad (۳)$$

در مورد لوله‌هایی که دارای جداره‌ی نازک به ضخامت t و قطر تقریبی D باشند J از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد:

$$J = \frac{\pi}{4} t D^3 \quad (۴)$$

همانطور که از رابطه‌ی ۱ دیده می‌شود مقدار تنش برشی از صفر در مرکز شروع و به مقدار حداکثر آن در لایه‌ی خارجی تغییر می‌کند و باید توجه داشت که هیچ نقطه‌ای از میله نباید از حد تناسب الاستیک جسم بیشتر تنش پیدا کند تا رابطه‌ی فوق صادق باشد. شکل ۱ توزیع تنش برشی را در مقطع دایره‌ای میله نشان می‌دهد.



شکل ۱- توزیع تنش برشی در مقطع دایره‌ای تحت پیچش

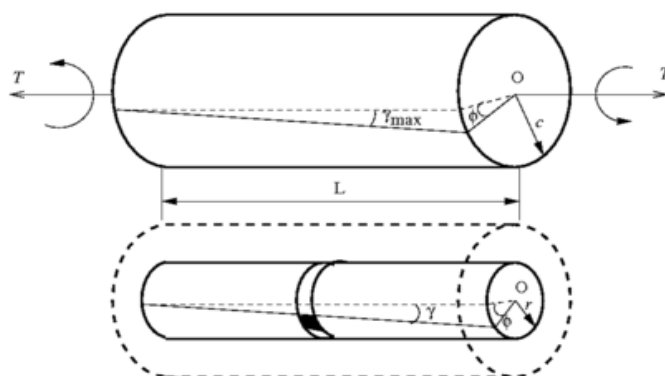
۲-۱- محاسبه‌ی تغییر شکل برشی - زاویه پیچش:

میله شکل ۲ 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 γ را ضریب الاستیسیته در برش گویند و با G نشان داده می‌شود.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (5)$$

مقدار زاویه‌ی پیچش برای مقطع میله به طول L می‌شود:

$$\theta = \frac{\tau L}{Gr} = \frac{TL}{GJ} \quad (6)$$



شکل ۲- زاویه پیچش و تغییر شکل برشی

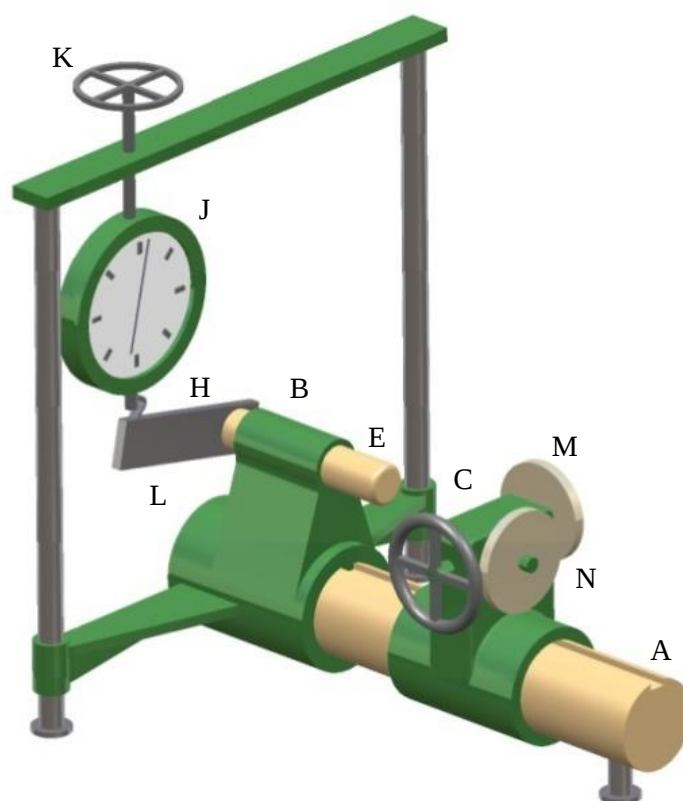
۲- دستگاه آزمایش:

دستگاه آزمایش پیچش شکل ۳ از یک محور ریل دار فولادی (A) به قطر ۷۶ میلیمتر تشکیل شده است. یکی از فک‌های در برگیرنده‌ی نمونه‌ی پیچش در انتهای محور، ثابت (B) و فک دیگر روی محور، متحرک (C) می‌باشد که به وسیله‌ی چرخ‌دستی که روی آن نصب شده می‌توان به نمونه پیچش وارد کرد. فک متحرک دارای یک چرخ‌دنده کاهنده با نسبت ۱:۶۰ است و طوری قرار گرفته که می‌تواند روی ریل در طول محور حرکت کند. گیره‌ی (D) روی فک متحرک نصب شده که می‌تواند بسته به طول نمونه فک متحرک را در هر نقطه از طول محور ثابت نگه دارد. فک

ثابت دارای محوری است (E) که طوری قرار گرفته که با حرکت در داخل فک ثابت می‌تواند تغییر طول جزئی نمونه را در اثر پیچش تحمل نماید. در انتهای آزاد این محور یک بازوی گشتاور (H) به شعاع ۱۲۵ میلیمتر قرار گرفته و گشتاور می‌تواند در هر جهتی به نمونه وارد شود. این گشتاور توسط گشتاورسنج مدرج (J) که روی دستگاه نصب شده بر حسب نیوتن متر اندازه‌گیری می‌شود. به وسیله‌ی چرخاندن یک چرخ دستی (K) که روی چهارچوب دستگاه نصب شده می‌توان بازوی گشتاور (H) را به حالت افقی برگردانده از تراز (L) روی بازوی گشتاور (H) برای افقی کردن این بازو استفاده می‌شود. در طول آزمایش نمونه بین دو فک ثابت و متحرک قرار می‌گیرد. چرخ دستی که روی فک متحرک قرار دارد می‌تواند به نمونه پیچش وارد کند. پیچاندن نمونه می‌تواند در جهت عقربه‌های ساعت یا خلاف آن باشد و زاویه‌ی پیچش توسط دو صفحه‌ی مدرج (M) و (N) یا به وسیله‌ی کنتور دورسنج اندازه‌گیری می‌شود.

صفحه‌ی مدرج (M) از صفر تا ۶ درجه در هر دو جهت درجه‌بندی شده و صفحه‌ی (N) از صفر تا ۳۶۰ درجه در هر دو جهت برای اندازه‌گیری زوایای پیچشی بزرگتر مدرج شده است. کنتور دورسنج به ازای هر یک دور ۶ درجه زاویه پیچش را نشان می‌دهد.

نمونه‌های مورد آزمایش برنجی و فولادی است که طول کلی آن‌ها (۱۴۳ میلیمتر) و در دو انتها ۶ گوش و در وسط دایره‌ای می‌باشد.



شکل ۳- دستگاه آزمایش پیچش

۳- روش آزمایش:

۳-۱- هدف آزمایش

- الف- بررسی رفتار مواد در عمل پیچش در حد الاستیک
- ب- تعیین ضریب ثابت ارتجاعی در برش G (Rigidity)
- پ- تعیین تنش برشی در نقطه‌ی تسلیم (Yield point)
- ت- بررسی حالت مواد در حالت تغییر شکل دائمی (Plastic) و مشاهده‌ی پدیده‌ی کار سختی (Work hardening)
- ث- مقایسه‌ی مقاومت آلیاژهای مختلف در حالت پیچش

۳-۲- دستور کار انجام آزمایش

- ۱- طول موثر (مقطع دایره‌ای شکل) و قطر نمونه را اندازه‌گیری کنید.
- ۲- خطی در طول مقطع دایره‌ای نمونه رسم شود تا زاویه پیچش نمونه را در طول آزمایش نشان دهد.
- ۳- گشتاورسنج را از انتهای بازوی گشتاور (H) آزاد و با پیچ مربوطه روی صفر تنظیم نمایید.
- ۴- نمونه را طوری در فک‌ها قرار دهید، که تمام طول ۶ ضلعی در فک فرو رود. نمونه را ابتدا در فک متحرک محکم نموده و سپس نمونه را آنقدر وارد فک ثابت کنید که فنر پشت فک ثابت کمی فشرده شود.
- ۵- وقتی نمونه در فک‌ها محکم شد فک متحرک را توسط گیره (D) روی ریل قفل نمایید.
- ۶- به کمک چرخ دستی روی فک متحرک تراز را افقی کنید.
- ۷- چرخ دستی بالای گشتاورسنج را بچرخانید تا تماس کمی بین قلاب گشتاورسنج و انتهای بازوی گشتاور (H) برقرار شود. چرخ دستی بالای گشتاورسنج را آنقدر بچرخانید تا عقربه‌ی گشتاورسنج در آستانه‌ی حرکت قرار گیرد.
- ۸- صفحات زاویه‌سنج و کنتور دورسنج را توسط پیچ‌های مربوطه صفر کنید.
- ۹- با چرخاندن چرخ دستی روی فک متحرک برای فواصل زاویه‌ای مشخص به نمونه گشتاور وارد کنید. قبل از یادداشت مقدار گشتاور وارده بازوی گشتاور (H) را توسط چرخ دستی (K) افقی کنید.
- ۱۰- برای هر زاویه‌ی پیچش مقادیر زیر را یادداشت کنید.
 - الف) زاویه‌ی پیچش نمونه (θ) بر حسب درجه
 - ب) گشتاور وارده (T) بر حسب نیوتن متر
 - ج) فواصل زاویه‌ی پیچش را برای نمونه‌ی فولادی نیم درجه و برای نمونه‌ی برنجی یک درجه در حد الاستیک انتخاب کنید.
 - د) وقتی که نمونه از حالت الاستیک عبور کرد آزمایش را تا شکست نمونه ادامه دهید. منتهی فواصل پیچشی را افزایش دهید.

۴- نحوه انجام محاسبات، به دست آوردن نتایج

ابعاد زیر را اندازه گیری کنید.

۱- قطر نهایی نمونه

۲- طول کلی نمونه در آخر

نتایج آزمایش را در جدول زیر مرتب کنید:

جدول-۱

زاویه ی پیچش (θ) بر حسب رادیان	گشتاور وارده (T) بر حسب (N.m)	زاویه ی پیچش (θ) بر حسب درجه

الف) با استفاده از جدول بالا منحنی T (N.m) را در مقابل θ (رادیان) را برای تمام طول آزمایش تا شکست نمونه رسم کنید.

ب) با استفاده از جدول بالا و منحنی قسمت الف منحنی گشتاور T را در مقابل زاویه ی پیچش θ (رادیان) را برای ناحیه ی برگشت پذیر رسم کنید و با استفاده از شیب منحنی، ضریب ثابت ارتجاعی (G) را محاسبه و با مقدار واقعی آن مقایسه کنید. همچنین با استفاده از این منحنی گشتاور در حد تناسب را پیدا و تنش برشی مربوطه را محاسبه کنید.

ج) با استفاده از منحنی قسمت (ب) مقاومت نقطه ی تسلیم یا تنش برشی تقریبی را در 0.001 rad/in (Proof stress) از طول میانی اولیه ی نمونه را حساب کنید.

د) مقدار متوسط انرژی جذب شده را بر واحد حجم تا تنش حد تناسب محاسبه کنید.

۵- سوالات:

۱- خطاهایی را که باعث اختلاف بین مقادیر واقعی و بدست آمده از آزمایش می شود ذکر کنید.

۲- چرا بازوی گشتاور قبل از خواندن گشتاور باید به حالت افقی برگردانده شود؟

۳- کارسختی (work hardening) چیست و در این آزمایش به چه صورت مشاهده می شود.

آزمایش ۸: ضربه Impact Test



شکست ترد (Brittle Fracture) فلزات از سال‌های حدود ۱۸۸۶ در تانک‌ها، کپسول‌های فشار، خطوط لوله و پل‌ها مورد بررسی بوده است. در خلال جنگ دوم توجه زیادی به شکست ترد جوشکاری در کشتی‌ها و تانکرها مبذول می‌شد. بعضی از کشتی‌ها، به هنگام حرکت در آب‌های متلاطم و یا هنگام توقف در لنگرگاه، کاملاً به دو نصفه شکسته می‌شد. این بیشتر در فصل زمستان اتفاق می‌افتاد، و نشان دهنده 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 کلیه استفاده‌های ساختمانی، فولادی لازم است که دارای مجموعه مناسبی از استحکام (Strength) و سفتی (Toughness) باشد. استحکام، مقاومت در برابر تغییر شکل است و سفتی مقاومت در برابر گسیختگی (Fracture) می‌باشد. معمولاً برای یک جسم این دو خاصیت با یکدیگر نسبت عکس دارند و مثلاً عملیاتی که استحکام فولاد را زیاد می‌کنند معمولاً سفتی را کاهش می‌دهند. بنابراین دانستن میزان و راه اندازه‌گیری این خاصیت‌ها مهم است.

متأسفانه در حالیکه استحکام را می‌توان به سادگی بر حسب نقطه 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 شرایط 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 تردی و شکنندگی می‌شوند عبارتند از:

۱- کاهش درجه حرارت

۲- افزایش تنش سه محوری

۳- افزایش سرعت تغییر شکل

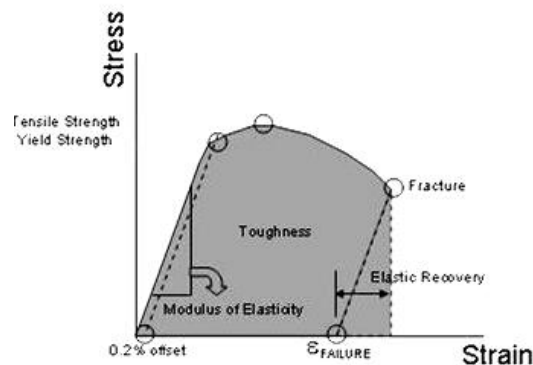
وجود تنش سه محوری (همچنانکه در شکاف یک نمونه بوجود می‌آید) و درجه حرارت پایین موجب بیشتر شکست‌های ترد می‌باشند. فولادهایی که در کشش یا پیچش رفتارشان کاملاً بهم شبیه است در آزمایش ضربه اختلاف زیادی را نشان می‌دهند و این اختلاف رفتار فولادها بدین دلیل است که به هنگام ضربه، نیرو بصورت شوک (و در یک لحظه) به آن‌ها اعمال می‌شود.

برای اجتناب از این نوع شکست، در قطعاتی که ساخته می‌شود سعی بر این است که جوشکاری‌های بهتری عرضه گردد، از نقاطی که تنش را تمرکز می‌دهند (مانند شکاف) اجتناب شده و قطعات ساخته شده کاملاً یکپارچه نباشند مثلاً در کشتی‌ها می‌توان بجای جوش دادن قطعات آن‌ها را به یکدیگر پرچ کرد تا اگر شکستی در یک قسمت اتفاق افتاد به سایر قطعات سرایت نکند.

۱- مبانی و تئوری ضربه

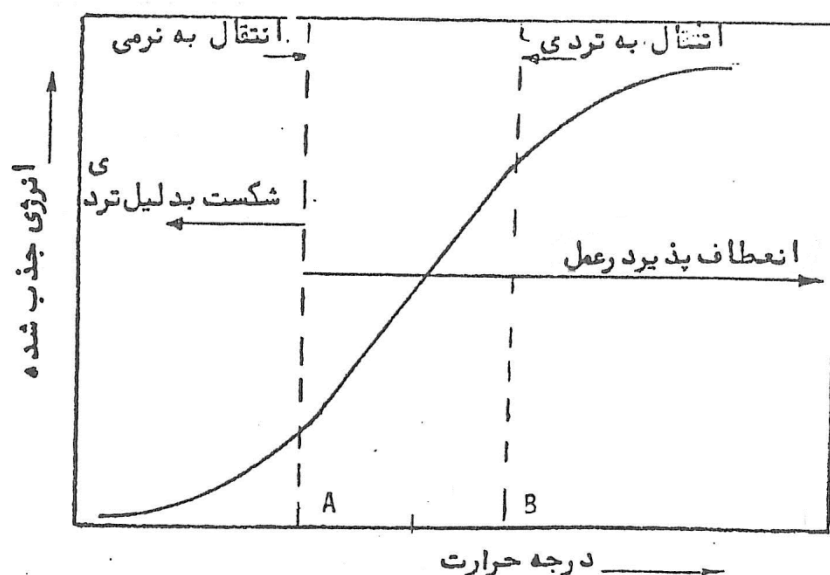
آزمایش ضربه مقدار انرژی لازم برای شکستن یک نمونه استاندارد با یک ضربه را اندازه می‌گیرد. این آزمایش معمولاً در دماهای معین انجام می‌شود.

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 محاسبه سطح زیر منحنی تنش - تغییر بعد نسبی است این مساحت برابر مقدار کار لازم به واحد حجم قطعه برای شکستن آن است. (شکل ۱)



شکل ۱- منحنی تنش - تغییر طول نسبی

متداولترین آزمایشی که برای تعیین سفتی انجام می‌شود آزمایش ضربه‌ای چارپی (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 (۳) نشان داده شده است.



شکل ۲- منحنی کلی آزمایش ضربه (انرژی جذب شده - درجه حرارت)

در درجه حرارت‌های بالاتر از B، قطعه کاملاً نرم (Ductile) رفتار می‌کند. حال با کاهش درجه حرارت از B، انتقال به تردی (Brittleness) شروع می‌شود. هرچه درجه حرارت کمتر باشد جسم تردتر شده و در درجه حرارت‌های پایین‌تر از A، قطعه کاملاً ترد و شکننده می‌شود و به هنگام استفاده در عمل به آسانی شکسته می‌شود. برعکس، با

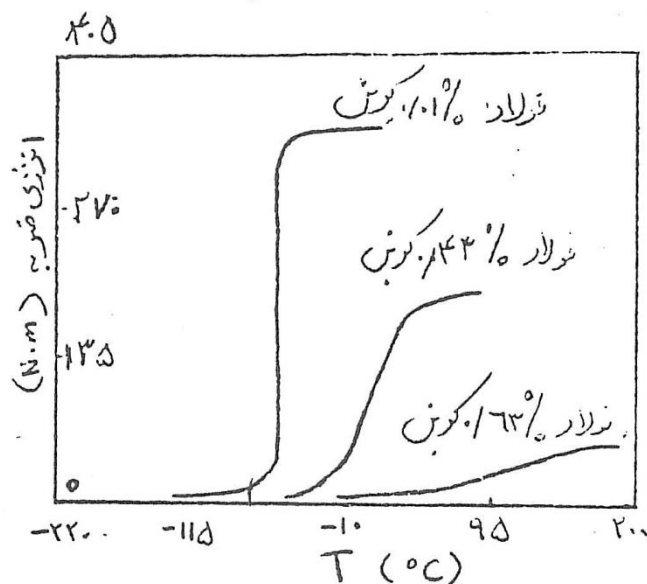
افزایش درجه حرارت، در نقطه A انتقال از تردی به نرمی شروع شده و با زیاد شدن حرارت قطعه نرم و انعطاف پذیرتر می‌گردد تا در B که جسم کاملاً نرم رفتار می‌نماید و به همین دلیل در درجه حرارت‌های بالاتر از B احتمال شکست به دلیل تردی بسیار کم است.

درجه حرارت انتقال (Transition Temperature) که بین A و B قرار دارد آن درجه حرارتی است که نمونه ترد می‌شود.

مقطع شکسته شده در حالت ترد بصورت دانه‌دانه‌ای (Granular) و در حالت نرم بصورت رشته‌ای یا لایه‌ای است و معمولاً درجه حرارت انتقال آن نقطه‌ای است که ۵۰ درصد از مقطع شکسته شده لایه لایه باشد.

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 درجه فارنهایت) به‌طور مثال هرچه مقدار منگنز در فولاد بیشتر و مقدار کربن کمتر باشد درجه حرارت انتقال پایین می‌آید و جسم رفتار نرمتری نشان می‌دهد. در مورد ساختمان میکروسکوپی به‌طور اختصار باید گفت که هرچه اندازه دانه‌ها ریزتر باشد درجه حرارت انتقال کمتر است.

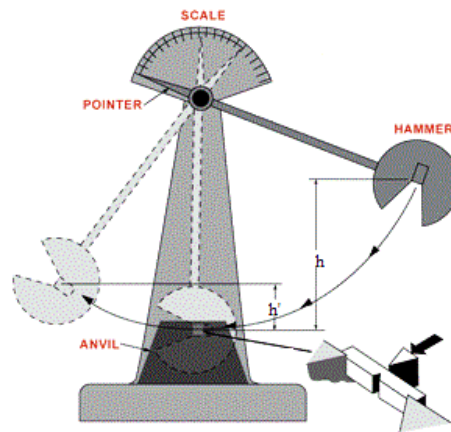
چند نمونه دیگر از منحنی‌های بدست آمده از آزمایش ضربه در شکل (۳) نشان داده شده اند لازم به ذکر است که بعضی اجسام مانند فولاد، آلیاژهای کرم، وانادیم و مولیبدنم این انتقال را به خوبی نشان می‌دهند و در برخی فلزات دیگر مانند آلومینیم، نیکل، طلا و نقره این پدیده مشاهده نمی‌گردد و این مربوط به ساختمان کریستالی آن‌هاست؛ یعنی این پدیده در فلزات bcc وجود دارد و در فلزات FCC چنین موردی مشاهده نمی‌گردد.



شکل ۳- منحنی آزمایش ضربه برای ۳ نوع فولاد

۲- دستگاه آزمایش

در آزمایش ضربه، یک چکش نوسان کننده به نمونه شکاف داری (اندازه های مشخص) برخورد کرده و موجب شکستن آن می گردد. انرژی اولیه ذخیره شده در چکش مساوی با حاصلضرب وزن چکش (W) در ارتفاع مرکز ثقل چکش از مرکز نمونه (h) است (شکل ۴).



شکل ۴- دستگاه آزمایش ضربه

با برخورد چکش، مقداری از انرژی آن جذب گردیده و نمونه از محل شکاف شکسته می شود. در نتیجه چکش تا محل اولیه خود بالا نرفته بلکه در ارتفاع کمتری (h') متوقف می شود. در این حالت انرژی چکش برابر با (Wh') است (منظور انرژی پتانسیل است). اختلاف این دو مقدار، انرژی جذب شده توسط قطعه را نشان می دهد:

$$\text{انرژی جذب شده} = Wh - Wh' = W(h - h')$$

(برای محاسبه دقیق تر بهتر است مقدار انرژی که صرف اصطکاک و مقاومت هوا می شود نیز، در نظر گرفته شود).
عقربه ای که به ماشین ضربه وصل شده چنان تنظیم گردیده که مستقیماً انرژی ضربه (انرژی جذب شده) را بر حسب فوت - پاوند (1b-ft) یا کیلوگرم متر (Kg-m) یا نیوتن - متر (N.m) نشان می دهد.

در این آزمایش از دستگاه نشان داده شده در شکل ۵- استفاده می شود ولی اساس کار همان است که در بالا برای دستگاه شکل ۴- بحث شد. برای دستگاه نشان داده شده در شکل ۵- وزن کلی بین دو چکش قسمت شده است. بنابراین اگر وزن هر کدام W_1 و ارتفاعشان h باشد انرژی ذخیره شده در آن ها برابر با $2W_1h$ خواهد بود.



شکل ۵- دستگاه تست ضربه چارپی

۳- روش آزمایش

۳-۱- هدف آزمایش

الف: نشان دادن شکل کلی منحنی ضربه‌ای و درجه حرارت انتقال (Transition Temp.)

ب- مقایسه قدرت کششی با قدرت ضربه‌ای اجسام

۳-۲- وسایل آزمایش

دستگاه آزمایش ضربه‌ای، گیره فلزی، چراغ گاز، یخ خشک (CO₂)، پارافین و نمونه‌های آزمایشی شامل: فولادهای مختلف با درصد کربن متفاوت

۳-۳- دستور کار انجام آزمایش

در این آزمایش دقت کنید تا پاندول‌ها موقع حرکت به بدن مخصوصاً انگشتان اصابت نکند.

۱- برای باز کردن دستگاه ابتدا کلید ایمنی را در خلاف عقربه‌های ساعت آنقدر چرخانده تا آنکه پین را بتوان بیرون کشید. حال پاندول‌های دستگاه می‌توانند حول محور اصلی بچرخند.

۲- برای اطمینان از رها نشدن پاندول‌ها به‌طور ناگهانی یک کلید اطمینان در روی چکش متحرک قرار گرفته است و پیچ آزادکننده فندار را به‌طرف خود کشیده سپس چکش متحرک را بالا آورده و پیچ آزادکننده را رها کنید.

۳- پاندول خارجی را در دست چپ و پاندول داخلی را در دست راست خود گرفته، دو پاندول را با هم آنقدر بالا برده تا بوسیله ضامن‌ها نگه‌داشته شود.

۴- بدون قرار دادن نمونه در دستگاه، پیچ آزادکننده را با یک دست به‌طرف خود کشیده و با دست دیگر چکش متحرک را که در بالا قرار گرفته روی ضامن‌ها رها کنید تا پاندول‌ها را آزاد کند. پاندول‌ها توسط نگهدارنده در بالاترین ارتفاع متوقف می‌شوند دقت شود تا در این حالت عقربه صفحه مدرج روی صفر قرار گیرد.

سپس ضامن را آزاد کرده و دو پاندول را همزمان با دو دست نگه‌داشته پاندول‌ها را کمی بالا ببرند تا صدای (تق) شنیده شود آن‌گاه پاندول‌ها را با احتیاط همزمان با هم پایین آورده تا در پایین‌ترین ارتفاع خود قرار گیرند.

۵- برای آزمایش مجدد با نمونه مراحل ۲ و ۳ بالا را تکرار نمایید.

۶- نمونه‌های داده شده را در محیط‌های مناسب به مدت ۱۰ الی ۱۵ دقیقه قرار دهید طوری که نمونه‌ها به درجه حرارت لازم برسند. با استفاده از گیره فلزی و دست کش نمونه‌ها را به سرعت از محیط مربوطه خارج کرده، زبانه نگه‌دارنده نمونه را بیرون کشیده و نمونه را سریعاً در داخل شکاف واقع در پاندول داخلی قرار دهید.

دقت کنید که نوک زبانه نگه‌دارنده نمونه در داخل شکاف نمونه قرار گیرد.

۷- پاندول‌ها را طبق مرحله ۴ به طرف پایین رها کنید تا نمونه توسط پاندول‌ها شکسته شود.

۸- مقدار انرژی جذب شده برای شکستن نمونه را از روی صفحه مدرج خوانده و یادداشت نمایید.

مراحل بالا برای نمونه‌های مختلف در درجه حرارت‌های زیر باید انجام شود.

درجه حرارت‌های آزمایش:

- ۱- یخ خشک (گاز کربنیک) -64°C
- ۲- مخلوط یخ و نمک -12°C
- ۳- مخلوط آب و یخ 0°C
- ۴- درجه حرارت اتاق 20°C - 25°C
- ۵- آب جوش 100°C
- ۶- پارافین 200°C - 280°C

۴- نحوه انجام محاسبات، به دست آوردن نتایج و سوالات

- ۱- منحنی انرژی جذب شده بر حسب درجه حرارت را برای هر یک از فولادهای روی کاغذ میلی متری داده شده رسم کرده و آنرا تشریح کنید.
- ۲- با استفاده از این منحنی‌ها و سطح شکسته شده نمونه‌ها چگونگی شکست را توضیح داده و آنرا به درجه حرارت مربوطه‌اش ربط دهید.
- ۳- تأثیر درصد کربن روی قدرت جذب انرژی ضربه‌ای و مقاومت کششی نمونه‌های مورد آزمایش را بیان نمایید. به نظر شما کدامیک از قدرت‌ها را (قدرت جذبی انرژی و نقطه تسلیم) برای انتخاب این دو نوع فولاد برای مصارف عملی باید مورد توجه قرار داد؟
- ۴- در آزمایش ضربه، هنگام آزمایش بدون نمونه چه عواملی باعث می‌شوند که عقربه صفحه مدرج روی صفر قرار نگیرد؟
- ۵- انواع ساختمان‌های کریستالی مواد را توضیح دهید.

آزمایش ۹: ستون
Buckling Test



ستون قطعه‌ای است که تحت فشار کار کند و ضخامت آن نسبت به طولش کم بوده، در اثر باری کمتر از حد مجاز فشاری کمانش پیدا کرده و کمانش موجب گسیختگی گردد. یک قطعه فشاری معمولاً موقعی ستون خوانده می‌شود که طول قطعه تحت بار بیشتر از ۱۰ برابر ضعیف‌ترین بعد مقطع آن باشد.

ستون‌ها را معمولاً به دو دسته تقسیم می‌کنند، طویل و متوسط. گاهی اوقات قطعه فشاری کوتاه نیز به عنوان دسته سوم محسوب می‌گردد و این سه گروه از روی عملکردشان متمایز می‌گردند. ستون‌های طویل در اثر کمانش یا خمش جانبی زیاد، گسیخته می‌شوند. ستون‌های متوسط در اثر ترکیبی از کمانش و تنش فشاری گسیخته و قطعات فشاری کوتاه در اثر تنش فشاری گسیخته می‌شوند.

اگر ستون کاملاً مستقیمی را تحت اثر نیروی محوری (بدون خروج از مرکز) قرار دهیم واضح است که در حالت مستقیم همواره یک جواب برای تعادل سیستم می‌باشد ولی به ازای مقادیر خاص انرژی محوری (که بستگی به مقطع ستون، طول و شرایط مرزی ستون دارد) به غیر از حالت مستقیم ستون، منحنی الاستیک دیگری (تغییر مکان‌های بینهایت کوچک) می‌تواند جواب تعادل سیستم باشد. به عبارت دیگر به ازای این مقادیر خاص حالات دیگری به غیر از حالت مستقیم ستون می‌تواند جواب معادله تعادل سیستم باشد.

چنان که مشاهده می‌شود سیستم همواره حالت تعادلی به صورت مستقیم خواهد داشت ولی عملاً هیچ ستونی به صورت تئوری، مستقیم (بدون هیچ انحنائی) و بارگذاری کاملاً محوری وجود نخواهد داشت. به این دلیل بارگذاری محوری روی ستون‌ها باعث خمش ستون می‌گردد. می‌توان در این حالت بار بحرانی را چنان تعریف کرد که مقداری از نیروی محوری است که به ازای آن تغییر مکان جانبی ستون به سمت بینهایت میل کند (البته برای تغییر مکان‌های بینهایت کوچک) و می‌توان ثابت نمود که بار بحرانی مستقل از عامل مولد خمش می‌باشد (عامل مولد خمش می‌تواند انحنای اولیه ستون، بار غیر محوری و یا نیروی جانبی روی ستون باشد).

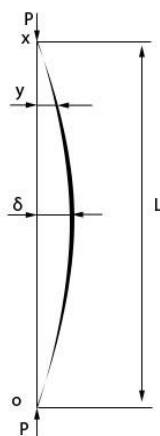
یک ستون موقعی ایده‌آل فرض می‌شود که متجانس بوده و دارای سطح مقطع ثابت باشد و تحت اثر نیروی فشاری محوری قرار گیرد. با وجود این ستون‌های معمولی همیشه در اثر جنس مصالح و نوع ساخت دارای خروج از مرکزیت مختصری هستند.

۱- مبانی و تئوری کمانش

در نوعی از ستون‌ها در اثر نیروی فشاری قبل از رسیدن به حد تناسب تنش فشاری، کمانش اتفاق می‌افتد. این نیرو را نیروی بحرانی می‌نامند و مقدار آن را می‌توان از تئوری اویلر به دست آورد. تئوری اویلر برای ۳ حالت استاندارد در زیر بیان شده است.

۱-۱- ستون با دو انتهای لولائی:

در شکل ۱، ستون تحت اثر نیروی P قرار دارد. معادله خمشی تیر را می‌نویسیم:



شکل ۱- ستون با دو انتهای لولایی

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M = -Py \rightarrow \frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{Py}{EI} = 0 \rightarrow \frac{d^2 y}{dx^2} + \alpha^2 y = 0, \quad \frac{P}{EI} = \alpha^2$$

حل معادله‌ی دیفرانسیل بالا به صورت زیر است:

$$y = A \sin \alpha x + B \cos \alpha x$$

ثابت‌های A و B با استفاده از شرایط حدی به دست می‌آید:

$$x = 0, \quad y = 0 \Rightarrow B = 0$$

$$x = l, \quad y = 0 \Rightarrow A \sin \alpha l = 0$$

و از آنجا $\sin \alpha l = 0$ زیرا در غیر این صورت $A=0$ و در نتیجه $P=0$

حداقل مقداری که در معادله $\sin \alpha l = 0$ صدق می‌کند برابر است با:

$$\alpha l = \pi \Rightarrow \alpha^2 = \frac{\pi^2}{l^2} = \frac{P}{EI}$$

از معادله‌ی بالا حداقل مقدار نیروی P به دست می‌آید که باعث کمانش ستون خواهد شد. این نیرو را "بار بحرانی

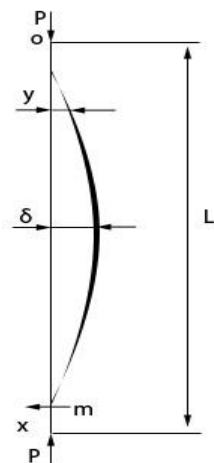
اوایلر" می‌نامیم:

$$P_e = \pi^2 \frac{EI}{l^2} \quad (۱)$$

که در آن I حداقل ممان اینرسی مقطع ستون است.

۲-۱- ستون با دو انتهای ثابت:

تئوری این قسمت نیز شبیه قسمت قبل است، با این تفاوت که مقدار ممان در دو انتها برابر m می باشد (شکل ۲) و معادله خمشی ستون به صورت زیر است:



شکل ۲- ستون با دو انتهای ثابت

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -Py + m$$

از حل این معادله مقدار بار بحرانی اویلر به دست می آید:

$$P_e = 4\pi^2 \frac{EI}{l^2} \quad (۲)$$

۳-۱- ستون با یک انتها ثابت و یک انتها لولائی:

مقدار نیروی بحرانی در این حالت از رابطه زیر به دست می آید:

$$P_e = 2.05 \pi^2 \frac{EI}{l^2} \quad (۳)$$

مقاومت هر عضو در مقابل خمشی به وسیله EI مشخص می شود. مقدار I را می توان به صورت $I = AK^2$ نوشت. برای یک ماده ی به خصوص، نیروی وارد بر واحد سطح که هر عضو می تواند تحمل کند با K رابطه دارد. هر مقطع ستون دو ممان اینرسی دارد که اگر مقدار کمتر را انتخاب کنیم، خواهیم داشت:

$$\frac{\text{طول عضو}}{\text{نسبت باریک اندامی ستون یا ضریب لاغری}} = \frac{l}{K} = \text{حد اقل شعاع ژیراسیون}$$

مقدار عددی ضریب لاغری مشخص کننده ی این است که عضو مورد نظر در طبقه بندی ستون هایی است که به حد تناسب فشاری می رسند یا ستون هایی که در آنها کماتش اتفاق می افتد.

۲- دستگاه آزمایش

نمای کلی دستگاه در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۳- نمای کلی دستگاه آزمایش ستون

وسایل دیگری که از آن‌ها در این آزمایش استفاده می‌شود:

انحراف سنج، نیروسنج، میله‌های آزمایش به طول‌هایی از ۴۰۰ تا ۷۵۰ میلی‌متر برای شرایط انتهایی مختلف، وزنه‌ها

۳- روش آزمایش

۳-۱- هدف آزمایش

تحقیق فرمول اویلر برای ستون‌های مختلف و بررسی اثر انواع اتصالات روی آن

۳-۲- دستور کار انجام آزمایش

ستون‌هایی با طول‌های متفاوت و با اتصالات یکسان مورد آزمایش قرار می‌گیرند:

۱- ابعاد مقطع ستون را اندازه بگیرید.

۲- میله میانه اداره کننده نیرو باید طوری افقی قرار گیرد که ستون با تکیه‌گاه بالایی تماس داشته و قائم باشد.

۳- بسته به نوع تکیه‌گاه‌ها و طول ستون مورد آزمایش، از دو نوع نیروسنج، یکی با حداکثر نیروی 390 N و دیگری با 3900 N استفاده می‌شود. در صورت لزوم وسیله رابط بین نیروسنج و چرخ‌دستی پائین را که توسط آن نیرو وارد می‌شود، بر روی دستگاه نصب کنید.

۴- مقدار وزنه‌های لازم برای خنثی کردن میله افقی و نیروسنج و میله‌ی رابط را به نحی که در انتهای سمت راست میله میانی بسته شده آویزان کنید.

۵- پس از قرار دادن ستون بین تکیه‌گاه‌ها و وصل کردن میله رابط به چرخ‌دستی، میله میانی را به کمک دسته

گردان و چرخ‌دستی و تراز، همزمان طوری به حالت افقی در آورید که ستون با تکیه‌گاه بالائی تماس پیدا کند. سپس ستون را در تکیه‌گاه محکم کنید. در مورد ستون‌های کوتاه باید دقت شود که فنر دسته گردان به اندازه‌ی کافی جا برای فشرده شدن داشته باشد.

۶- محل قرقره طوری روی پایه سمت چپ دستگاه تنظیم شود که نیروی افقی به وسط ستون وارد گردد. نیروی افقی ۳۰۰g برای میله‌های ۴۰۰mm و ۴۵۰mm و نیروی افقی ۱۵۰g برای میله‌های ۵۰۰mm و ۶۰۰mm اعمال شود.

۷- محل انحراف سنج را در وسط ستون تنظیم کنید.

۸- نیرو توسط چرخ‌دستی پائینی به ستون وارد می‌شود. هر بار قبل از خواندن نیرو و مقدار انحراف، باید میله میانی را افقی کنید. این کار به کمک دسته گردانی که در سمت چپ میله‌ی میانی و ترازوی که روی این میله قرار دارد امکان‌پذیر است. مقدار نیرو و انحراف وسط میله را هر بار یادداشت کنید.

۹- نقطه بحرانی وقتی است که با تغییر جزئی در مقدار نیرو، مقدار انحراف خیلی زیاد تغییر می‌کند. در این نقطه ستون شکل یک کمان را دارد که با یک ضربه کوچک کاملاً به جهت مخالف انحناء پیدا می‌کند. در نقطه‌ی بحرانی، انحراف سنج را از روی دستگاه جدا کنید تا صدمه‌ای نبیند.

۱۰- با زدن ضربه‌ی کوچکی به ستون، مقدار نیروی لازم برای کمانش در دو جهت مخالف را به دست آورید. نیروی بحرانی، میانگین این دو نیرو است.

۴- نحوه انجام محاسبات و به دست آوردن نتایج

- ۱- نمودار نیروی فشاری (N) بر حسب انحراف وسط ستون (mm) را برای نمونه‌های مختلف رسم نمائید.
- ۲- منحنی تغییرات تنش بحرانی را بر حسب ضریب لاغری برای میله‌های مختلف در شرایط اتصالی یکسان رسم کنید. (منحنی‌های تئوری و عملی)
- ۳- مقادیر به دست آمده از آزمایش و تئوری را در جدول وارد کرده و تنش‌های بحرانی را مقایسه کرده و درصد خطای آن را محاسبه کنید.

۵- سوالات

- ۱- فرمول اوپلر برای حالت یک انتها ثابت و انتهای دیگر لولائی را به دست آورید.
- ۲- چرا نیروی بحرانی به دست آمده از آزمایش کمتر از مقدار محاسبه شده توسط فرمول است؟
- ۳- طول معادل یک ستون با دو انتهای لولائی چقدر باشد تا همان مقاومت یک میله با دو انتهای ثابت و طول L به دست آید؟
- ۴- نمودار نیروی فشاری در مقابل انحراف به صورت تئوری چگونه است؟
- ۵- طول موثر یک ستون چیست؟

ضمیمه: جدول مربوط به اعداد و نتایج آزمایش

الف - مقادیر مربوط به هر آزمایش را در جدولی مشابه جدول زیر بنویسید:

جدول-۱

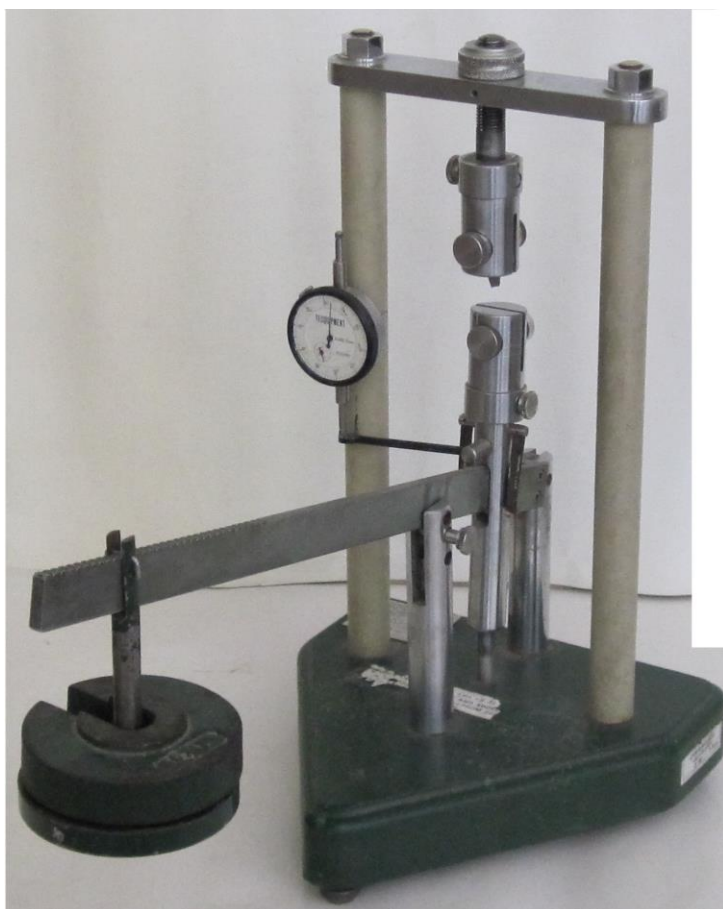
				نوع تکیه گاه			
				طول ستون			
				ابعاد مقطع ستون			
P (N)							
δ (m.m)							

ب- مقادیر بار و تنش بحرانی تئوری و عملی را برای ستون‌های مختلف و ضریب لاغری را در جدول زیر بنویسید
(محاسبات مربوطه نیز در برگه جداگانه‌ای نوشته شود):

جدول-۲

طول ستون (m.m)	عملی (حقیقی)		تئوری		ℓ/K	نوع اتصال
	Pc(N)	$\sigma_c(N/mm^2)$	Pc(N)	$\sigma_c(N/mm^2)$		
						دو سر لولا
						دو سر ثابت
						یک سر لولا یک سر ثابت

آزمایش ۱۰: خزش
Creep Test



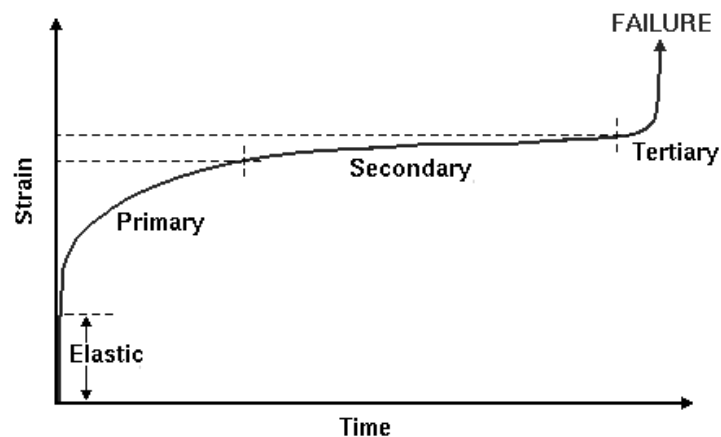
یکی از خواص مکانیکی بسیار مهم فلزات و آلیاژها از نظر کاربرد صنعتی مقاومت در مقابل تغییر فرم تدریجی آن ها تحت بار کم و با گذشت زمان است که به آن خزش می گویند. این تغییر فرم برای زمان های کوتاه با در نظر گرفتن نیروی وارده (که عملاً بسیار کوچک می باشد) ناچیز بوده و قابل صرف نظر کردن است. ولی با در نظر گرفتن زمان مورد استفاده قطعه در عمل که گاهی به چندین سال می رسد، دیده می شود که مقاومت در مقابل خزش فاکتور مهمی برای استفاده از قطعه می باشد. خزش در هر درجه حرارتی بالاتر از درجه حرارت صفر مطلق امکان دارد. ولی عملاً از درجه های بالاتر از $0.4-0.5$ برابر درجه ذوب فلز (بر حسب درجه مطلق، $273 +$ درجه سانتیگراد = T) خزش اهمیت پیدا می کند. به عنوان مثال می توان خزش قسمتی از پره های توربین جت را که در درجه حرارت های بالا (حدود 400 تا 600°C) قرار دارند نام برد. مثال ساده تر روزمره آن خزش فیلامان لامپ های معمولی است که وقتی روشن است دارای درجه حرارت های بالایی بوده و تحت نیروی ثقل (وزن فیلامان) اگر به مدت خیلی زیاد روشن بمانند می توانند تغییر طول داده و پس از مدتی فیلامان پاره شود. نکته ای که در این مثال به خصوص باید توجه کرد بزرگ شدن دانه های ساختمانی فیلامان می باشد که خود اثر زیادی در شکست تدریجی فیلامان پس از استفاده طولانی آن دارد و این خود کمک زیادی به «خزش» می کند.

این مثال ها نشان می دهد که در طرح مواد مختلف صنعتی علاوه بر در نظر گرفتن مقاومت این مواد در مقابل تغییر شکل های ناگهانی (ضربه ای) و کوتاه مدت (مثلاً مقاومت کشش با فشاری در مقیاس آزمایشگاهی) که در آن ها ماده تحت نیروی زیادتر از نقطه تسلیم قرار می گیرد. باید مقاومت آن ها در مقابل تغییر فرم های درازمدت که در آن نیروی وارده کوچک می باشد نیز مدنظر قرار گیرد.

برای بررسی این خاصیت مکانیکی در آزمایشگاه سعی می شود که تا حد امکان درجه حرارت و بار زیاد در نظر گرفته شود تا سرعت خزش زیاد شده و بتوان مقاومت در مقابل خزش را در مقیاس آزمایشگاهی (زمان کوتاه تر از زمان عملی در صنعت) مطالعه نمود. باید ذکر شود که ممکن است مکانیزم خزش در درجه ها و تحت بار خیلی بالا با مکانیزم آن در درجه های عملی در صنعت و تحت تنش های صنعتی تفاوت داشته باشد ولی به طور کلی همیشه می توان به طریقی مکانیزم دوم را از اولی نتیجه گرفت و آن ها را به هم ربط داد.

۱- مبانی و تئوری خزش

اگر تغییر بعد نسبی یک نمونه را بر حسب زمان رسم نمائیم «منحنی خزش» به دست می آید که حالت عمومی آن در شکل زیر نمایان است.



شکل ۱- منحنی عمومی خزش

ملاحظه می شود که با وارد کردن یک نیرو یا تنش ثابت، بلافاصله مقداری تغییر بعد نسبی الاستیکی ایجاد می گردد و سپس تغییر فرم دائمی (یا پلاستیکی) به طور آهسته و پیوسته با گذشت زمان زیاد شده تا سرانجام به شکستن جسم منتهی می گردد.

به طور کلی منحنی خزش از سه قسمت تشکیل می شود:

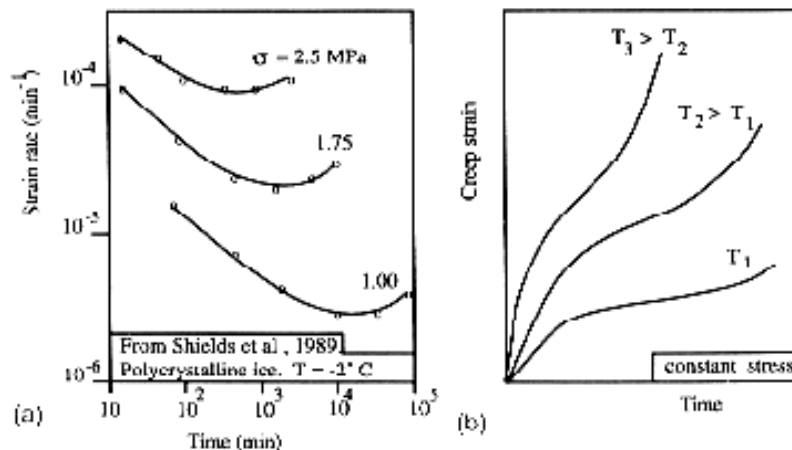
ناحیه ۱ (Primary): خزش ناپایدار یا Transient Creep که در آن سرعت تغییر شکل پلاستیکی با ازدیاد زمان کم می شود. سرعت خزش (Creep Rate) یا سرعت تغییر شکل پلاستیکی عبارت است از شیب منحنی خزش در هر نقطه.

$$\text{سرعت خزش} = \dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$$

ناحیه ۲: خزش پایدار یا Steady state Creep که برای مدت زمان قابل توجهی ادامه دارد و در آن سرعت تغییر شکل پلاستیکی ثابت است.

ناحیه ۳: خزش سریع یا Accelerated Creep که در آن سرعت تغییر شکل پلاستیکی با زمان زیاد می شود و منتهی به شکستن جسم می گردد. مکانیزم خزش در هر یک از این سه مرحله را می توان با استفاده از تئوری نابه جایی ها توجیه نمود. معمولاً ناحیه اول منحنی که در آن سرعت تغییر بعد نسبی با گذشت زمان کم و یا در ناحیه دوم منحنی که در آن سرعت تغییر شکل ثابت می ماند به مقادیر نسبی «کار سختی» و بازیابی نسبت داده می شود. در مرحله اول سرعت کار سختی بیشتر از سرعت بازیابی است و بنابراین قطعه به تدریج سخت شده و از سرعت خزش آن کاسته می شود. در مرحله دوم سرعت بازیابی و کار سختی برابر بوده و سرعت خزش تغییر نمی کند. در مرحله سوم با اینکه می توان توجیه کرد که سرعت بازیابی بیشتر از سرعت کار سختی است و بنابراین سرعت خزش نیز باید زیاد شود. ولی معمولاً در مورد این مرحله و شکست قطعه می توان گفت که شکاف ها و سوراخ های کوچکی که در داخل قطعه پس از مرحله دوم، ایجاد می شود باعث می گردد که «سطح مقطع موثر نمونه» کم شده و بنابراین با بار ثابت می توان گفت که تنش زیاد شده و

باعث ازدیاد سرعت خزش می گردد و بالاخره شکست ایجاد می کند.^۱ وجود و ادامه هر یک از نواحی سه گانه منحنی به نوع فلز، ساختمان فلز، و شرایط درجه حرارت و تنش بستگی دارد و تحت شرایطی ممکن است قسمت هایی از منحنی مشاهده نگردند. (شکل ۲).



شکل ۲- منحنی کلی خزش و اثر درجه حرارت و بار روی شکل دهی منحنی

باید توجه داشت که علاوه بر این منحنی های معمولی که در شکل ۲ نشان داده شده است معمولاً منحنی های خزش در مورد اکثر مواد مهندسی خیلی پیچیده تر از نوع منحنی های ذکر شده در بالاست. ولی در حال حاضر این نوع منحنی ها مورد نظر آزمایشگاه نمی باشد.

۲- دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش خزش را در شکل ۳ مشاهده می کنید:

۱- نمونه

۲ و ۳- نگهدارنده های نمونه

۴- وزنه و نگهدارنده

۵- انحراف سنج

۶- اهرم

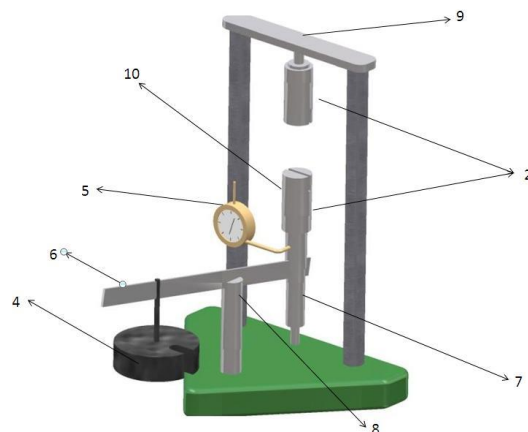
۷- لولای اهرم

۱- منظور از کارسختی (Work hardening) این است که وقتی یک فلز تحت تغییر شکل قرار می گیرد، قسمت تغییر فرم یافته قطعه سخت می گردد. این عمل را سخت شدن می نامند. این موضوع را به طور ساده با چند بار خم و راست کردن و یا پیچاندن یک میله فلزی می توان مشاهده کرد که پس از هر دفعه عمل خمش یا پیچش، خم کردن و یا پیچاندن مجدد مشکل تر می گردد. عمل بازیابی (Recovery) عکس عمل کارسختی است. بدین ترتیب که فلز سخت شده پس از این که مدتی در درجه حرارت بالا قرار گرفت سختی خود را از دست داده و نرم تر می گردد و بعضی خواص قبل از سخت شونده را بازیابی می کند.

8- پین وارد کننده بار

9- مهره تنظیم ارتفاع نمونه

10- پین نگهدارنده نمونه



شکل ۳-۳- دستگاه آزمایش خزش

۳- روش آزمایش

۳-۱- هدف آزمایش

آشنایی با خزش - به دست آوردن منحنی کلی خزش - اثر تنش روی شکل منحنی - استفاده از نتایج آزمایش برای تعیین فرمول تئوری خزش پایدار.

۳-۲- وسایل مورد نیاز آزمایش

کولیس، کرومومتر، نمونه های سربی، تراز

۳-۳- دستور کار انجام آزمایش:

۱- ابتدا دستگاه را با استفاده از تراز، افقی نمائید.

۲- ابعاد سطح مقطع و طول موثر نمونه سربی را دقیقاً اندازه گیری کنید.

۳- نمونه را ابتدا در فک پایینی و سپس در فک بالایی قرار دهید. با پایین آوردن فک بالایی توسط مهره بالای دستگاه سوراخ فوقانی نمونه را روبروی سوراخ فک بالایی قرار دهید (دقت کنید که نمونه تحت هیچ گونه کششی، فشار، خمش یا پیچش قرار نگیرد).

۴- انتهای انحراف سنج را روی صفحه تغییر مکان قرار دهید.

۵- با سفت کردن مهره بالایی دستگاه، نمونه را در حالت قائم قرار دهید به طوری که انحراف سنج ۰/۵ میلیمتر

تغییر مکان را نشان دهد.

۶- با بیرون آوردن پین زیر اهرم و با استفاده از مقادیر داده شده، وزنه مناسب را در فاصله لازم قرار دهید و در

همان لحظه کرونومتر را به کار انداخته و در فواصل زمانی مشخص (۱۰ ثانیه) تغییر طول را اندازه بگیرید. (در ناحیه پایدار می توان فواصل زمانی را بیشتر انتخاب کرد). بار واقعی از فرمول زیر به دست می آید.

$$L = \text{طول اهرم}$$

$$P = (ml + 3/2) 9/81 Nt \quad m = \text{وزن وزنه ها}$$

۷- آزمایش را ادامه دهید تا نمونه بشکند. سپس با نمونه های دیگر، آزمایش را تکرار کنید.

۴- نحوه انجام محاسبات و به دست آوردن نتایج

- ۱- نتایج به دست آمده را در جداول وارد کنید (نمونه های جداول در قسمت ۸ مشخص شده است).
- ۲- منحنی های تغییر بعد نسبی- زمان را برای هر یک از نمونه ها رسم کرده و آن ها را تشریح نمایید و سرعت خزش ناحیه ۲ (ناحیه پایدار) را برای هر یک محاسبه کرده و با هم مقایسه کنید (محاسبات نوشته شود).
- ۳- با استفاده از نتایج جدول الف-۸ آزمایش و رسم منحنی های $(\epsilon^\circ - \sigma)$ و $(\ln \epsilon^\circ - \ln \sigma)$ و $(\ln \epsilon^\circ - \sigma)$ نتیجه بگیرید که کدامیک از فرمول های $(\epsilon_s^\circ = A \cdot \sigma)$ یا $(\epsilon_s^\circ = B \sigma^n)$ یا $(\epsilon_s^\circ = C \exp(\beta \sigma))$ بیشتر برای سرب صادق است. مقادیر ثابت فرمول صحیح را به دست آورید. (σ) تنش و ϵ° سرعت تغییر نسبی ناحیه پایدار Steady State می باشد).

۵- سوالات

- ۱- کدام نمونه زودتر شکسته می شود و علت آن چیست؟
- ۲- اگر آزمایش در درجه های پایین تر و بالاتر از درجه حرارت محیط انجام می گیرد (به فرض اینکه بار در همه حالات یکی باشد) منحنی تقریبی (شماتیک) این آزمایش ها همراه با منحنی تقریبی آزمایش در درجه حرارت محیط را برای یکی از وزنه ها به صورت ترسیمی نشان دهند.
- ۳- اهمیت خزش در مهندسی چیست؟
- ۴- چرا در این آزمایش از فلز سرب استفاده می شود؟ آیا می توان از فلزات دیگر هم استفاده نمود؟

ضمیمه: جداول مربوط به اعداد و نتایج آزمایش

الف- جدولی به صورت زیر برای هر نمونه رسم و اعداد در آن نوشته شود:

جدول-۱

نوع نمونه	L	m kg	P Nt	طول موثر m.m	ضخامت × عرض m.m ²	σ N/mm ²	Ln σ	ε°	Ln ε°
۱									
۲									
۳									

ب- نوشتن اعداد در جدولی به صورت زیر (برای هر نمونه)

شماره نمونه

t	δ	ε

جدول-۲

آزمایش ۱۱: اندازه‌گیری انحراف و کرنش در دیافراگم دایروی



ورق‌های دایروی در کاربردهای مختلف مهندسی به میزان زیادی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عنوان مثال در واحدهای کنترل و ثبات، پوشش‌های جداره استوانه‌ها، ورق‌های آب‌بندی، و در انتهای مسطح ظروف تحت فشار و مخازن مواد، از این ورق‌ها استفاده می‌شود.

ورق‌های دایروی تحت تأثیر فشار جانبی قرار گرفته و خم می‌شوند. لبه‌های خارجی آن‌ها را می‌توان کاملاً محکم بست، به نحوی که با وجود گشتاورهای خمشی وارد به لبه، شیب لبه به صفر برسد. همچنین می‌توان این گونه ورق‌ها را به کمک تکیه‌گاه‌های ساده نگه داشت به نحوی که گشتاورهای خمشی در لبه آن‌ها صفر باشد. عملاً در اکثر مواقع، لبه‌ها به صورت ناقص بسته می‌شوند و در این حالت گشتاور خمشی و شیب لبه به طور همزمان ظاهر می‌شود. در این آزمایش، ابتدا نظریه تغییر مکان‌ها و شیب‌های ورق، انحناءها، تنش‌ها و کرنش‌های سطح برای هر ورق دایروی یکنواخت تحت بارگذاری متقارن و شرایط تکیه‌گاهی متقارن حول محور مرکزی بیان شده است. آن‌گاه به منظور پیش‌بینی انحرافات و کرنش‌های سطح در یک دیافراگم دایروی با شرایط اولیه گیرداری و تحت فشار جانبی یکنواخت، نظریه تبیین شده مورد استفاده قرار گرفته است.

دستگاه آزمایش دیافراگم دایروی (SM108) طوری طراحی شده است که مقادیر دقیق کمیاب مذکور را به صورت تجربی اندازه گرفته و در اختیار ما قرار می‌دهد تا با مقادیر تئوری مقایسه نمایم.

۱- مبانی و تئوری خمش ورق‌های دایروی

الف- نمای جانبی ورق (انحرافات بزرگ شده‌اند)

ب- نمایش دستگاه مختصات از نمای بالا

با مقادیر r و z تعریف شده است توسط رابطه $z\phi$ نشان داده می‌شود. اگر این تغییر مکان را U بنامیم، داریم:

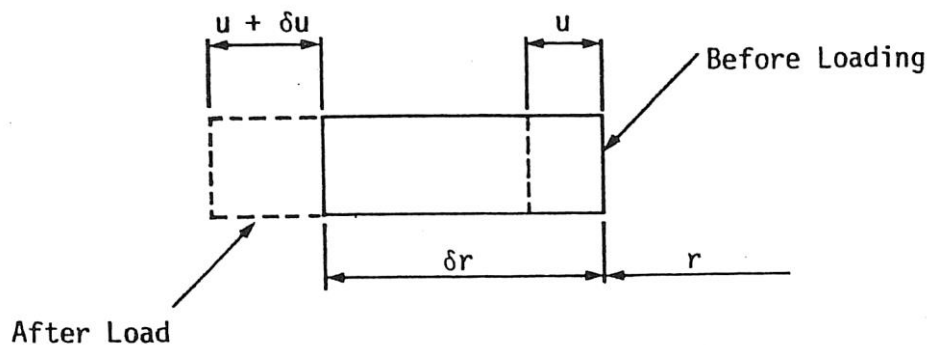
$$U = z\phi \quad (1)$$

ϕ ، عبارت است از شیب صفحه در شعاع r (شکل ۱-الف).

تغییر مکان قائم صفحه از وضعیت اولیه‌اش (در موقعیت بدون بار) را با w نشان می‌دهیم. جهت مثبت w به سمت بالا و رابطه w ، r و ϕ به شکل زیر است:

$$\phi = -\frac{dw}{dr} \quad (2)$$

علامت ϕ به خاطر این است که در تعریف ϕ در شکل (۱) در نظر داشتیم که w با افزایش r کاهش می‌یابد. از این به بعد فرض می‌کنیم که انحراف‌های صفحه و شیب‌ها کوچک‌اند، به نحوی که صفحه وسط ورق در هر شعاعی کشیده نشده است. کرنش شعاعی در هر موقعیتی در درون صفحه، با تعریف کرنش که عبارت است از مقدار تغییر طول تقسیم بر طول اولیه مشخص می‌شود.



شکل ۲: کرنش یک جزء کوچک بالای صفحه وسط ($z > 0$)

برای محاسبه کرنش شعاعی، یک جزء طول δr در شعاع r ، تحت تأثیر بار وارده مطابق شکل (۱) حرکت می‌کند و کرنش آن ϵ_r به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\epsilon_r = \frac{(\delta r + \delta u) - \delta r}{\delta r} = \frac{\delta u}{\delta r}$$

$$\epsilon_r = \frac{\delta u}{\delta r}$$

و در حد:

از معادلات (۱) و (۲) داریم:

$$u = -\frac{zdw}{dr}$$

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} = -z \frac{d^2w}{dr^2}$$
(۳)

به طریق مشابهی می‌توان کرنش محیطی در هر ترکیبی از r و z را به دست آورد:

$2\pi r$ = محیط دایره قبل از بارگذاری

$2\pi(r+u)$ = محیط دایره بعد از بارگذاری

$$\varepsilon_r = \frac{2\pi(r+u) - 2\pi r}{2\pi r} = \frac{u}{r}$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{z}{r} \frac{dw}{dr}$$
(۴)

۲-۱-۱ روابط تنش و کرنش

تنش در راستای z (σ_z) روی یکی از وجوه ورق برابر با صفر و روی دو وجه دیگر برابر با $(-p)$ است (علامت منفی به خاطر وجود تنش فشاری). همچنین تنش‌های شعاعی و محیطی حاصل از خمش ورق، تمایل دارند که خیلی بزرگتر از P باشند. بنابراین منطقی است که σ_z را در درون ضخامت ورق، خیلی کوچک در نظر بگیریم. با استفاده از این فرض و با توجه به اینکه E ضریب یانگ، ν ضریب پواسون، σ_r تنش شعاعی و σ_θ تنش محیطی است، با استفاده از رابطه عمومی تنش - کرنش الاستیک داریم:

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\sigma_r - \nu\sigma_\theta)$$
(۵)

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\sigma_r - \nu\sigma_\theta)$$
(۶)

با حذف σ_θ بین معادلات (۵) و (۶):

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_r + \nu\varepsilon_\theta) = -\frac{EZ}{(1-\nu^2)}\left(\frac{d^2w}{dr^2} + \frac{\nu}{r}\frac{dw}{dr}\right)$$
(۷)

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_\theta + \nu\varepsilon_r) = -\frac{EZ}{(1-\nu^2)}\left(\frac{1}{r}\frac{dw}{dr} + \nu\frac{d^2w}{dr^2}\right)$$
(۸)

قابل ذکر است که دو تنش مذکور، به طور خطی با z تغییر می‌کند و در $z=0$ (روی صفحه وسط) صفراند. واضح است که اگر تغییر مکان صفحه w را بتوان به صورت تابعی از r تعیین کرد، از معادلات (۷) و (۸) می‌توان تنش‌های شعاعی و محیطی را به دست آورده و سپس مقادیر تنش‌ها را در معادلات (۵) و (۶) قرار داده و کرنش‌های مربوطه را محاسبه نمود. بدین منظور، ابتدا معادلات مربوط به گشتاورهای خمشی M_r و M_θ را یافته، آن‌گاه معادلات دیفرانسیل

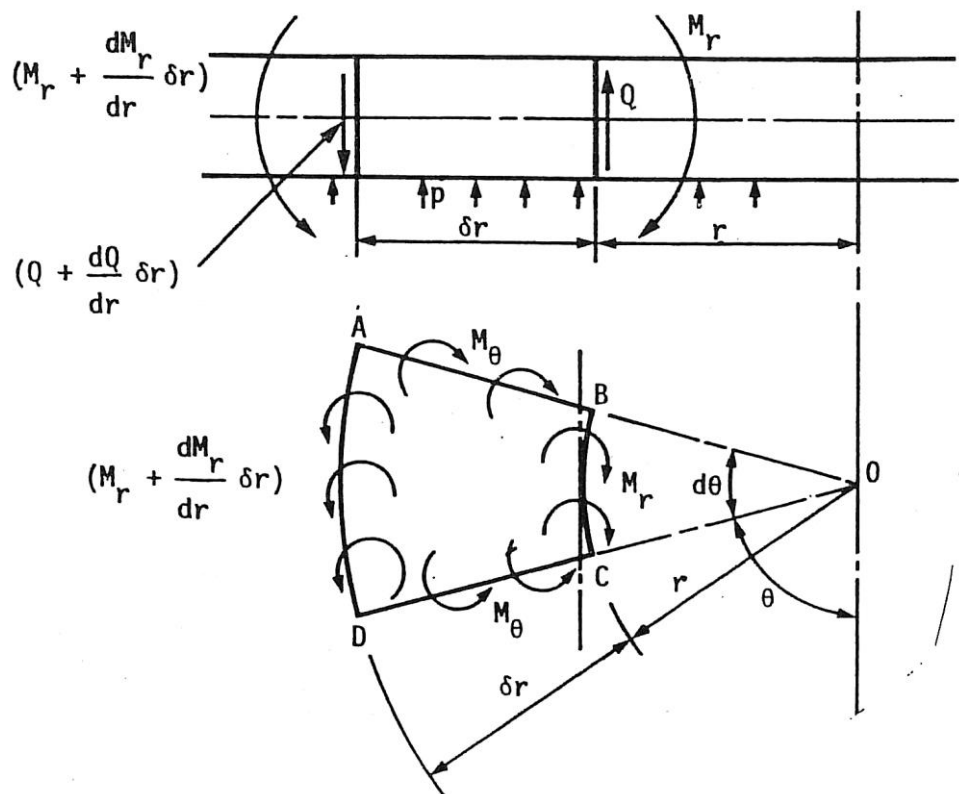
نمایش تغییرات w بر حسب r را به دست می آوریم.

۳-۱-۱ معادلات M_r و M_θ بر حسب r و w

شکل ۳ جزء کوچکی از ورق ABCD را نشان می دهد. به منظور واضح بودن شکل، این جزء را خیلی بزرگ در نظر گرفته ایم.

در این شکل، M_r گشتاور خمشی مربوط به تنش های و M_θ گشتاور خمشی مربوط به تنش های محیطی است. M_r و M_θ بر حسب گشتاور خمشی در واحد عرض ورق بیان شده اند و به خاطر تقارن ورق با تغییر θ تغییر نمی کند ولی با تغییر r تغییر می نمایند.

چون M_r و M_θ با σ_r و σ_θ ارتباط دارند، می توان آن ها را با w ، r و z نیز مرتبط ساخت، اینکار با در نظر گرفتن باریکه ای به عرض واحد در ارتفاع z از صفحه وسط، مطابق شکل ۴، امکان پذیر است.



شکل ۳ تعریف گشتاورهای خمشی برای یک جزء کوچک ورق

جمع گشتاورهای مربوط به نیروها در هر کدام از باریکه ها، گشتاور کل را می دهد. بنابراین می توان M_r را به صورت زیر بیان کرد:

$$M_r = \sum \sigma_r (1 \times \delta z) z = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{EZ^2}{(1-\nu^2)} \left[\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dw}{dr} \right] dz$$

$$M_r = - \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \left[\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dw}{dr} \right]$$

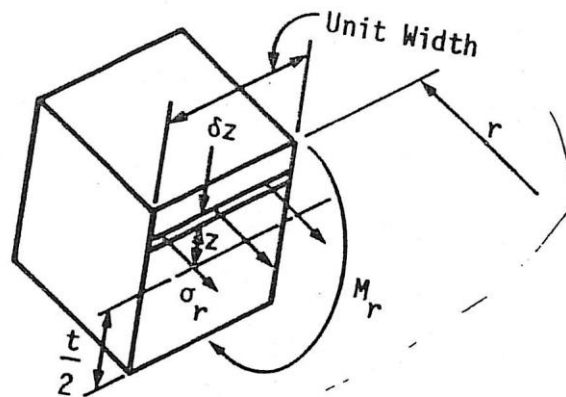
$$\left\{ \begin{aligned} M_r &= -D \left[\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{v}{r} \frac{dw}{dr} \right] \\ D &= \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

و یا

D = صلیب خمشی ورق

$$M_\theta = \sum \sigma_\theta (1 \times \delta z) z$$

$$M_\theta = -D \left(\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} + \frac{d^2 w}{dr^2} \right) \quad (10)$$



شکل ۴: نمایش مبنای محاسبه برای گشتاور خمشی در راستای شعاع

۱-۱-۴ معادله دیفرانسیل w بر حسب r

جزئی از طول ورق (δr) را در نظر بگیرید که مطابق شکل (۳)، زاویه $(\delta \theta)$ را در مرکز ورق در بر گرفته است. علاوه بر گشتاورهای وارد روی ۴ لبه این جزء لبه‌های BC و AD باید هر کدام یک نیروی برشی را تحمل کنند. نیروی برشی در لبه BC توسط فشار وارد بر صفحه بالایی قطعه OBC ایجاد شده است، در حالی که نیروی برشی در لبه AD، فشار وارد از طرف قطعه OAD را تحمل کند. بنابراین نیروی برشی در واحد عرض ورق، که به صورت Q تعریف می‌شود، بر حسب r تغییر می‌کند. بر روی لبه‌های AB و CD نیروی برشی وجود ندارد. زیرا هر کدام از این لبه‌ها را می‌توان به صورت یک صفحه تقارن کل ورق تصور کرد و می‌دانیم که تنش‌های برشی روی صفحات تقارن وجود ندارد.

جزء ABCD، تحت اثر ترکیب بارگذاری خارجی، باید در حال تعادل باشد، بنابراین مولفه‌های معادله تعادل برای

جزء مذکور، با گشتاورگیری حول نقطه تماس خط مماس بر وسط BC، عبارتند از:

الف - $M_r \delta \theta$ ، به خاطر گشتاور روی لبه CB

ب - به خاطر گشتاور روی لبه AD:

$$-\left(M_r + \frac{dM_r}{dr} \delta r \right) (r + \delta r)$$

ج- به خاطر گشتاور روی لبه AB، که به موازات خط مماس بر وسط BC تجزیه شده است:

$$M_{\theta} \delta r \sin \frac{\delta \theta}{2}$$

د- به خاطر گشتاور روی لبه CD، که به موازات خط مماس بر وسط BC تجزیه شده است:

$$M_{\theta} \delta r \sin \frac{\delta \theta}{2}$$

ه- به خاطر نیروی برشی روی لبه AD:

$$-\left(Q + \frac{dQ}{dr} \delta r\right)(r + \delta r) \delta \theta \delta r$$

و- به خاطر فشار وارد، روی جزء ABCD:

$$Pr \delta \theta \delta r \frac{\delta r}{2}$$

برای ایجاد تعادل، باید جمع مولفه‌های مذکور، صفر باشد، پس:

$$M_r \delta \theta - \left(M_r + \frac{dM_r}{dr} \delta r\right)(r + \delta r) \delta \theta + 2M_{\theta} \delta r \sin \frac{\delta \theta}{2} - \left(Q + \frac{dQ}{dr} \delta r\right)(r + \delta r) \delta \theta \delta r + Pr \delta \theta \delta r \frac{\delta r}{2} = 0$$

با بسط معادله فوق و حدگیری وقتی که:

$$\delta \theta \rightarrow 0, \delta r \rightarrow 0, \sin \frac{\delta \theta}{2} \rightarrow \frac{\delta \theta}{2}$$

معادله فوق به صورت زیر در می‌آید:

$$M_r + r \frac{dM_r}{dr} - M_{\theta} + Qr = 0 \quad (11)$$

Q = نیروی برشی در واحد عرض ورق

با جایگذاری مقادیر M_r و M_{θ} از معادلات (۹) و (۱۰) در معادله (۱۱) و ساده کردن، داریم:

$$\frac{d^3 w}{dr^3} + \frac{1}{r} \frac{d^2 w}{dr^2} - \frac{1}{r^2} \frac{dw}{dr} = \frac{-Q}{D} \quad (12)$$

این معادله را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \frac{Q}{D} \quad (13)$$

برابری معادلات (۱۲) و (۱۳) را با دیفرانسیل گیری از معادله (۱۳) می توان اثبات کرد. Q به صورت تابعی از r تعیین شده است زیرا در هر شعاع r ، نیروی برشی کل روی محیط دایره ای به شعاع r ، باید برابر با بارگذاری فشاری وارد، در درون دایره باشد. مثلاً اگر فشار p روی تمام ورق به کار رود، آن گاه:

$$z\pi r(Q) = P\pi r^2 \Rightarrow Q = \frac{Pr}{2} \quad (14)$$

به کمک معادلات (۱۳) و (۱۴) می توان w ، یعنی میزان انحراف ورق را بر حسب P, r و D تعیین نمود. تنش ها و کرنش ها مستقیماً از معادلات (۵) تا (۸) پیدا می شود.

۱-۲ اعمال شرایط مرزی ورق مواد آزمایش

دیافراگم با لبه های گیردار و بارگذاری فشاری یکنواخت

در بخش قبل نظریه کلی در زمینه خمش و نحوه محاسبه تنش و کرنش در ورق بیان شد. اکنون می توان حالت خاص دیافراگم موجود در دستگاه آزمایش (SM108) را بررسی نمود.

۱-۲-۱ به دست آوردن رابطه انحراف ورق با توجه به شرایط مرزی دیافراگم

اگر شعاع خارجی دیافراگم برابر R ، ضخامتش t و فشار وارده برابر با p باشد، از معادلات (۱۳) و (۱۴) می توان با انتگرال گیری متوالی انحراف را پیدا کرد:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \frac{Pr}{2D} \quad (15)$$

با انتگرال گیری از دو طرف معادله نسبت به r :

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) = \frac{Pr^2}{4D} + C_1 \quad (16)$$

C_1 ثابت انتگرال گیری است که از شرایط مرزی حکم بر مسئله به دست می آید. با ضرب کردن در r :

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) = \frac{Pr^3}{4D} + C_1 r \quad (17)$$

و با انتگرال گیری مجدد:

$$r \frac{dw}{dr} = \frac{p}{16} \frac{r^4}{D} + C_1 \frac{r^2}{2} + C_2 \quad (18)$$

با تقسیم بر r :

$$\frac{dw}{dr} = \frac{p}{16} \frac{r^3}{D} + \frac{C_1 r}{2} + \frac{C_2}{r} \quad (19)$$

قبل از اعمال شرایط مرزی، می‌توان انتگرال‌گیری بعدی را انجام داد، ولی توجه به یک نکته در اینجا لازم است: φ شیب ورق و از معادله (۲):

$$\frac{dw}{dr} = \varphi$$

به خاطر تقارن ورق حول محورش، در $r=0$:

$$-\frac{dw}{dr} = 0$$

با مقدارگذاری در معادله (۱۹)، $C_2=0$ است، پس:

$$\frac{dw}{dr} = \frac{p}{16} \frac{r^3}{D} + C_1 \frac{r}{2} \quad (20)$$

شرط مرزی دیگر این است که در محل‌های درگیری، شیب صفحه صفر است، یعنی:

$$\text{در } r=0, \quad -\frac{dw}{dr} = 0 \quad \text{است و از معادله (۲۰) داریم:}$$

$$\frac{p}{16} \frac{r^3}{D} + \frac{C_1 r}{2} = 0, \quad C_1 = -\frac{p}{8} \frac{r^2}{D}$$

معادله (۲۰) به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{dw}{dr} = \frac{p}{16} \frac{r^3}{D} - \frac{p}{16} \frac{R^2 r}{D} \quad (21)$$

با انتگرال‌گیری داریم:

$$w = \frac{p}{64} \frac{r^4}{D} - \frac{p R^2 r^2}{32 D} + C_3 \quad (22)$$

با استفاده از شرایط مرزی مربوط به وجود انحراف صفر در $r=R$ ، ضریب C_3 به دست می‌آید، یعنی:

$$\frac{p}{64} \frac{r^4}{D} - \frac{p}{32} \frac{r^4}{D} + C_3 = 0, \quad C_3 = \frac{p R^4}{64 D}$$

بنابراین معادله نهایی انحراف، به صورت زیر در می آید:

$$w = \frac{P}{64D} (r^4 - 2R^2 r^2 + R^4)$$

$$w = \frac{P}{64D} (r^2 - R^2)^2 \quad (23)$$

۲-۲-۱ روابط تنش ها در سطح ورق

برای یافتن روابط تنش ها در سطح ورق، می توان با قرار دادن عبارت w در معادلات (۷) و (۸)، که در آن مقدار z در سطح ورق برابر با $\frac{t}{2}$ قرار داده شده است، روابط تنش را به دست آورد (در وجهی از ورق که تحت فشار قرار نگرفته است، مقدار z برابر با $\frac{t}{2}$ است).
با مشتق گیری از معادله (۲۱):

$$\frac{d^2 w}{dr^2} = \frac{P}{16D} (3r^2 - R^2)$$

با مقدار گذاری از معادله فوق و $\frac{dw}{dr}$ از معادله (۲۱) در معادلات (۷) و (۸)، داریم:

$$\sigma_r = \frac{3}{8} \frac{P}{t^2} [(1 + \nu)R^2 - (3 + \nu)r^2] \quad (24)$$

و

$$\sigma_\theta = \frac{3}{8} \frac{P}{t^2} [(1 + \nu)R^2 - (1 + 3\nu)r^2] \quad (25)$$

۳-۲-۱ روابط کرنش ها در سطح ورق

با جایگزینی عبارات σ_r و σ_θ در معادلات (۵) و (۶)، می توان کرنش های سطح در $z = \frac{t}{2}$ را به دست آورد:

$$\varepsilon_r = \frac{3P}{8Et^2} (1 - \nu^2) (R^2 - 3r^2) \quad (26)$$

و

$$\varepsilon_\theta = \frac{3P}{8Et^2} (1 - \nu^2) (R^2 - r^2) \quad (27)$$

قابل ذکر است که کرنش‌های شعاعی و محیطی در مرکز ورق، جایی که $r=0$ است، برابرند. علت آن این است که در $r=0$ نمی‌توان تمایزی بین جهات شعاعی و محیطی قائل شد. برای تنش‌های شعاعی و محیطی [معادلات (۲۴) و (۲۵)] و در $r=0$ نیز می‌توان همین نتیجه‌گیری را نمود. این نکات، کنترل‌کننده‌های خوبی برای مقایسه نتایج تئوری و تجربی است.

بررسی معادلات (۲۶) و (۲۷) نشان می‌دهد که کرنش محیطی در لبه گیردار دیافراگم، صفر و در مرکز آن ماکزیمم است. کرنش شعاعی در مرکز است (کششی) و در لبه گیردار دیافراگم، منفی (فشاری) می‌باشد. کرنش شعاعی وقتی $R^2 - 3r^2 = 0$ باشد؛ یعنی وقتی $r = 0.577 R$ باشد، صفر خواهد بود.

از ۸ کرنش سنج نصب شده روی دستگاه آزمایش، هفت عدد آن در جهات شعاعی و محیطی قرار گرفته‌اند و معادلات (۲۶) و (۲۷) مقادیر تئوری این کرنش‌ها را بر حسب فشار وارده، می‌دهد. ۸ کرنش سنج مذکور، جهات شعاعی و مماسی را به دو قسمت تقسیم می‌کند. بنابراین لازم است که کرنش تئوری در آن جهات را نیز تعیین کنیم. می‌توان نشان داد که کرنش مستقیم در جهتی که زاویه α با امتداد شعاعی می‌سازد از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{1}{2}(\varepsilon_r + \varepsilon_{\theta}) - \frac{1}{2}(\varepsilon_r - \varepsilon_{\theta}) \cos 2\alpha \quad (28)$$

برای کنترل اعتبار این معادله، با جایگزینی مقادیر $\alpha = 0^\circ$ و $\alpha = 90^\circ$ خواهیم: $\varepsilon_0 = \varepsilon_r$ و $\varepsilon_{90} = \varepsilon_{\theta}$. این مقادیر کاملاً با تعریف α مطابقت دارد.

معادله (۲۸) یک پایه اساسی برای رسم دایره موهر کرنش است. قابل ذکر است که برای یافتن ε_{α} باید زاویه 2α را در روی دایره موهر مورد بررسی قرار داد. وقتی که کرنش سنج، جهات شعاعی و مماسی را نصف می‌کند، $\alpha = 45^\circ$ است و از معادله (۲۸) داریم:

$$\varepsilon_{45^\circ} = \frac{1}{2}(\varepsilon_r + \varepsilon_{\theta})$$

رابطه فوق بعداً مورد نیاز خواهد بود.

۲- شرح دستگاه آزمایش و متعلقات آن



شکل ۵ وسیله اندازه گیری کرنش در دیافراگم (SM108) و اجزاء آن

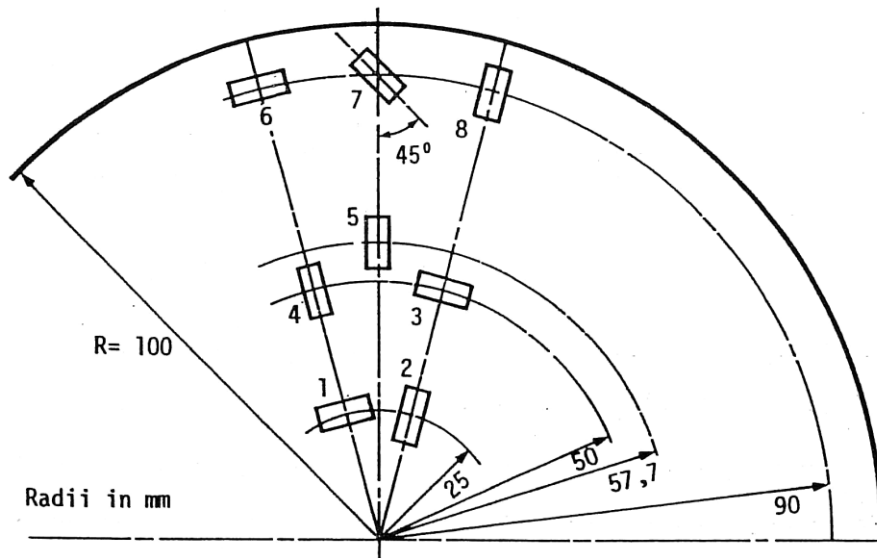
دستگاه آزمایش، مطابق شکل ۵ از یک ورق آلومینیوم که بین دو حلقه سنگین گیردار شده است تا دیافراگمی با شرایط گیرداری موثر ایجاد کند، تشکیل شده است. ضخامت اسمی ورق $3/18 \text{ mm}$ می باشد. که در قسمت های مختلف ممکن است کمی تغییر داشته باشد.

۸ کرنش سنج روی سطح دیافراگم نصب شده است تا اندازه گیری کرنش های سطح را امکان پذیر سازد. همچنین برای اندازه گیری میزان انحراف های دیافراگم و تعیین شکل انحراف یافته ورق، یک انحراف سنج روی دستگاه نصب شده است.

مجموعه دیافراگم، به یک پایه با ورق فلزی که شامل یک سیستم هیدرولیک برای بارگذاری روی دیافراگم می باشد، به صورت محکم بسته شده است. یک فشارسنج Bourdon برای اندازه گیری فشار زیر دیافراگم، در دستگاه آزمایش تعبیه شده است. یک صفحه اطلاعاتی که شامل جزئیات ابعاد دیافراگم، مکان های نصب کرنش سنج ها و ضریب اندازه گیر آن ها است، در قسمت جلو پایه دستگاه نصب شده است.

۲-۱ سیستم هیدرولیک دستگاه

این سیستم، از یک ظرف روغن و یک تلمبه دستی برای تلمبه کردن روغن به داخل حفره موجود در زیر دیافراگم، تشکیل شده است. با پیچاندن چرخ دستی در جهت عقربه های ساعت، فشار وارد بر دیافراگم افزایش می یابد. فشارسنج میزان فشار وارده را نشان می دهد. ابتدا چرخ را نیم دور بچرخانید، آن گاه به پیستون واقع در وسط چرخ دستی فشاری وارد کنید و مجدداً چرخ دستی را بچرخانید. ممکن است فشارسنج مقدار کمی پسماند داشته باشد، بنابراین بهتر است قبل از خواندن عدد فشار مورد نظر ضربه کوچکی به آن بزنیم. بیشترین فشار مجاز وارد بر دستگاه 75 KN/m^2 است و افزایش آن مجاز نیست.



شکل ۶: کرنش سنج‌ها و مواضع نصب آن‌ها

مطابق شکل ۶ هشت کرنش سنج در مواضع مختلفی از دیافراگم نصب شده است. سه دسته از این کرنش سنج‌ها (۱، ۲، ۳، ۴، ۶، ۷) کرنش‌های محیطی و شعاعی را در موقعیت شعاعی مورد نظر اندازه می‌گیرند. کرنش سنج شماره ۵ در نقطه کرنش صفر شعاعی (تئوری)، یعنی در نقطه‌ای که $\frac{r}{R} = 0.577$ نصب شده است. کرنش سنج شماره ۸ در همان شعاع کرنش سنج‌های ۶ و ۷ ($\frac{r}{R} = 0.9$) اما در موقعیت زاویه‌ای 45° نصب شده است. این کرنش سنج، کرنش دیگری را می‌خواند و آزمایش‌کننده را قادر می‌سازد که در مورد کرنش در زاویه 45° تحقیق کرده و ثابت کند که این کرنش بین کرنش‌های اصلی شعاعی و محیطی قرار دارد. در پشت دستگاه دیافراگم، برای اتصال کرنش سنج‌ها به دستگاه اندازه‌گیر کرنش یک پریز نصب شده است.

دستگاه اندازه‌گیر کرنش می‌تواند پل کرنش سنج E۳۱ یا E۱۰ به همراه سوئیچ E۱۸ یا هر وسیله اندازه‌گیر دیگر کرنش باشد. سیم اتصال مورد استفاده برای اتصال با دستگاه‌های اندازه‌گیر کرنش E۳۱ یا E۱۸ جهت دستگاه آزمایش دیافراگم تهیه دیده شده است.

این سیم اتصال دارای یک سر چند راهه با سه سیم زنگی به رنگ‌های سیاه، سفید و سبز است که باید در مکان‌های جداگانه، به دستگاه کرنش سنج وصل شوند. سر چند راهه، کانال‌های کرنش سنج‌های ۱ تا ۶ را وصل می‌کند و سه سیم زنگی باید به صورت زیر وصل شوند:

- سر سیاه به کانال ۷
- سر سفید به کانال ۸
- سر سبز به اتصال زمین

۲-۳ - اندازه‌گیری انحراف به وسیله دستگاه آزمایش

مجموعه‌ای که انحراف سنج را حمل می‌کند، دارای ۳ پیچ سر ساچمه‌ای گلوله‌ای انتهائی است. دو پیچ تراز کننده در سمت چپ شکل ۵ به منظور موازی کردن حامل انحراف سنج با سطح دیافراگم است و پیچ قفل کننده واقع در طرف راست، برای قفل کردن حامل در موقعیت موردنظر می‌باشد. این پیچ نباید کاملاً محکم شود. به منظور تعیین موقعیت حامل، از یک خط کش و یک موقعیت سنج استفاده شده است. هدف از نصب خط کش این است که در موقع اندازه‌گیری شکل انحراف یافته دیافراگم، به وسیله آن مبنائی برای تعیین نتایج دقیق ایجاد نمایم.

یک انحراف سنج، که تا ۰/۰۱ میلی متر انحراف را اندازه می‌گیرد، روی عرض تیر حامل نصب شده و با لغزاندن آن در طول تیر می‌توان عرض دیافراگم را پیمود. به منظور نگهداری مطمئن انحراف سنج در پشت تیر حامل، یک آهنربا نصب شده و برای خواندن موقعیت شعاعی انحراف سنج، خط کشی بر روی تیر حامل قرار دارد.

۳- روش انجام آزمایش‌ها، محاسبات، بررسی نتایج و سوالات

آزمایش‌های مربوط به دیافراگم در دو زمینه انجام می‌گردد:

۱- اندازه‌گیری انحرافات و شکل انحراف یافته دیافراگم و مقایسه نتایج تجربی و تئوری

۲- اندازه‌گیری کرنش‌های سطح دیافراگم و مقایسه نتایج حاصله با تئوری

این دیدگاه‌ها را در دو سطح مختلف می‌توان مورد تحقیق و ارزیابی قرار داد.

۱- به منظور نمایش نتایج ۲- یا برای انجام آزمایش‌های ساده در زمان محدود. روش آزمایش، عبارت است از: اندازه‌گیری انحراف در چند نقطه روی دیافراگم و خواندن کرنش به وسیله مجموعه‌ای از کرنش سنج‌ها در یک فشار مناسب. نتایج مذکور، برای نشان دادن شکل انحراف یافته دیافراگم و نیز برای نشان دادن تغییرات کرنش در روی سطح دیافراگم، کافی است، هرچند ممکن است دارای دقت نسبتاً کم بوده و برای مقایسه جدی با مقادیر تئوری مناسب نباشد. به منظور انجام آزمایش‌های جدی و دقیق، باید اندازه‌گیری‌های انحراف به طور جدی و دقیق انجام شده و مقادیر کرنش، حداقل برای سه مقدار فشار اندازه‌گیری شود. در این صورت با در دست داشتن این نتایج، می‌توانیم نمودار کرنش در برابر فشار را رسم کرده و مقادیر متوسطی را برای مقایسه با تئوری پیدا کنیم. برای این کار، با تعیین شیب‌های خطوط (برحسب $\mu\epsilon$ یا KN/m^2) این مقایسه را می‌توان صورت داد. بدین ترتیب پراکندگی نتایج، که معمولاً در آزمایش‌های ساده بروز می‌کند، از بین خواهد رفت. در بخش‌های بعد روش‌های کامل انجام آزمایش‌ها تشریح خواهد شد.

۳-۱ روش‌های انجام آزمایش

۳-۱-۱ تدارک و آماده سازی دستگاه آزمایش

در بسیاری از وسایل اندازه‌گیری کرنش، به منظور اندازه‌گیری دقیق کرنش، تعیین یک محدوده زمانی جهت رسیدن دستگاه به پایداری لازم است. بدین منظور، نیم ساعت قبل از انجام آزمایش، باید دستگاه را روشن کرد. برای شروع به کار با دستگاه اندازه‌گیر کرنش، اقدامات زیر باید به صورت پذیرد:

۱- سیم چند راهه را به پریز موجود در دیافراگم دایروی و پریز ورودی برای کانال‌های ۱-۶ روی وسیله اندازه‌گیر

کرنش، وصل کنید. وسیله اندازه گیر کرنش می تواند دستگاه E۳۱ یا E۱۰ و واحد سوئیچ E۱۸ یا هر گونه وسیله اندازه گیر کرنش باشد.

۲- سه سیم آزاد موجود در سر سیم رابط را به صورت زیر به دستگاه اندازه گیر کرنش وصل کنید:

الف- سیم سیاه به کانال ۷ پریز ورودی

ب- سیم سفید به کانال ۸ پریز ورودی

ج- سیم سبز به زمین (E)

۳- وسیله اندازه گیر کرنش را روشن کرده و قبل از خواندن اعداد، اجازه دهید که به منظور پایدار شدن از نیم ساعت روشن بماند.

۳-۱-۲ روش اندازه گیری انحراف ها و شکل انحراف یافته دیافراگم

۱- حامل انحراف سنج را روی حلقه بالایی دیافراگم قرار داده و انحراف سنج را روی تیر عرضی مدرج بلغزانید.
۲- حامل را در موقعیت زاویه ای صفر قرار دهید، اما هنوز پیچ قفل کننده را محکم نکنید. برای اندازه گیری دقیق انحراف های مربوط به فشار وارده ابتدا لازم است که شکل دیافراگم را در فشار صفر تعیین کنید. مقدار انحراف اولیه باید از مقادیر اندازه گیری شده در فشار انتخابی کم شود. بهترین شیوه این است که اندازه ها را همانطور که برداشته می شود کنترل کنیم. اگر قبل از شروع آزمایش، حامل انحراف سنج را موازی با سطح دیافراگم قرار دهیم، بهتر است. روش اعمال این مورد به صورت زیر است:

۳- انحراف سنج را تا وقتی که ساقه آن درست با لبه داخلی حلقه مقید کننده صفحه، تماس حاصل نماید به طرف راست حرکت دهید. کنترل کنید که انحراف سنج کاملاً روی تیر عرضی نصب شده باشد، آن گاه با چرخاندن زائده روی انحراف سنج، آن را روی صفر تنظیم نمایید.

۴- انحراف سنج را به طرف لبه سمت چپ دیافراگم حرکت دهید و اندازه ها را یادداشت نمایید. دو پیچ تراز کننده را تنظیم کنید تا عقربه به صفر برگردد.

۵- حالا باید تیر عرضی موازی با سطح دیافراگم باشد. این موضوع را کنترل کرده و آن گاه حامل را با استفاده از پیچ قفل کننده در موقعیت خود قفل کنید.

تذکر: ممکن است دیافراگم کاملاً مسطح نباشد. اما باید اعداد قرائت شده در لبه ها تقریباً یکسان باشد.

۶- در فشار صفر، انحراف سنج را از عرض دیافراگم عبور داده و در فواصل ده میلیمتری اعداد را بخوانید. قابل ذکر است که در موقعیت $R=100\text{mm}$ پهنای تهِ انحراف سنج مانع ثبت قرائت ها در لبه های واقعی دیافراگم است. بنابراین در نقاط پایانی هر کدام از اعداد قرائت شده، حتی الامکان آن اعداد باید در نزدیکی لبه قرائت شده باشد (یعنی در ۹۷ میلیمتر).

۷- همانطوری که در بخش ۲-۱ گفته شد، فشار را مثلاً تا مقدار 75KN/m^2 افزایش داده، با ملایمت ضربه ای به اندازه گیر فشار زده و چرخ دستی را تنظیم کنید تا فشار مورد نظر به دست آید.

۸- مجموعه ای دیگر از اعداد قرائت شده برای انحراف سنج را، مطابق گام ۶، بخوانید. آن گاه شکل انحراف یافته واقعی دیافراگم را با کم کردن قرائت های اولیه از قرائت های ثانویه به دست آورید.

۳-۱-۳ روش اندازه گیری کرنش های سطح

- ۱- حداقل از نیم ساعت قبل از انجام این قسمت از آزمایش، وسیله اندازه گیری کرنش باید روشن شده و اجازه پایداری کامل به آن داده شود.
- ۲- چرخ دستی را کاملاً به طرف راست چرخانده و باز کنید تا فشار روغن به صفر برگردد.
- ۳- ضریب اندازه گیر کرنش سنج را به کمک قسمت کنترل کننده این ضریب که بر روی دستگاه اندازه گیر کرنش نصب شده، بر روی عدد مربوطه قرار دهید. اطلاعات مربوط به ضریب اندازه گیر را از تابلو اطلاعات نصب شده در جلو دستگاه آزمایش، بخوانید.
- ۴- اگر از پل کرنش سنج E_{31} استفاده می کنید، برای هر کدام از کانال ها در موقع توازن (Null balance)، کرنش های قرائت شده را یادداشت کنید. اگر از پل کرنش سنج قابل جابجایی E_{10} و سوئیچ E_{15} استفاده می کنید، کنترل های توازن را برای به دست آوردن عدد صفر، برای هر کانال، تنظیم کنید.
- ۵- برای سه عدد فشار انتخابی، مجموعه کرنش ها را بخوانید.
- ۶- بعد از اتمام اندازه گیری ها، فشار را به صفر برگردانده و مقادیر صفر اولیه را مجدداً کنترل کنید. انجام این کار باعث یک کنترل مفید در هر پیشامدی است و باعث وجود دقت خوبی در نتایج خواهد شد.

۳-۱-۴ ثبت نتایج آزمایش انحراف

- ۱- مقادیر قرائت شده برای انحراف های نقاط مختلف دیافراگم را در جدول زیر وارد کنید. (هر فشار یک جدول). اعداد خوانده شده، در فواصل ۱۰ mm در عرض دیافراگم می باشد. همچنین در فاصله ۹۷ میلیمتر روی هر کدام از لبه های خط مرکز نیز این اعداد قرائت شده است.

جدول ۱: ثبت نتایج انحراف دیافراگم تحت فشار، در نقاط مختلف آن

موقعیت شعاعی (mm)	عدد (0.01 mm) خوانده شده		انحراف داخلی (W/0.01 mm)	مقادیر اندازه گرفته شده W/Wmax	مقادیر تئوری W/Wmax
	P= 0	P=			
۹۷					
۹۰					
۸۰					
۷۰					
۶۰					
۵۰					
۴۰					
۳۰					
۲۰					
۱۰					
۰					

۱۰				
۲۰				
۳۰				
۴۰				
۵۰				
۶۰				
۷۰				
۸۰				
۹۰				
۹۷				

۲- مقادیر قرائت شده در فشار صفر را در موقعیت‌های مختلف در جدول یادداشت کنید. نشان می‌کنید که مقدار کمی انحراف در فشار صفر در نقاط مختلف صفحه وجود دارد.

۳- برای یافتن انحراف‌های واقعی در هر فشار غیر صفر، باید مقادیر مربوط به فشار صفر را از مقدار انحراف در آن نقطه، کم کرده و انحراف به دست آمده را بر ماکزیمم انحراف (W_{max}) تقسیم نمود.

۴- مقادیر واقعی را با مقادیر محاسبه شده از معادله ۲۳ می‌توان مستقیماً کرد. البته مناسب است که از مقادیر بدون بعد استفاده کنیم، زیرا شکل بدون بعد دیافراگم، بدون توجه به ابعاد دیافراگم و فشار وارد، یکسان است و محاسبات تئوریک ساده‌تر خواهد بود.

۵- انحراف تئوریک در هر نقطه از معادله ۲۳ به دست می‌آید:

$$w = \frac{P}{64 D} (r^2 - r^2)^2$$

که در آن D صلیبیت خمشی است و از رابطه $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$ به دست می‌آید. با جایگزینی و خارج کردن R^2 از گروه:

$$w = \frac{3PR^4}{16Et^3} (1-\nu^2) \left[1 - \frac{r^2}{R^2} \right]^2 \quad (29)$$

بیشترین انحراف در مرکز (در $\frac{r}{R} = 0$) خواهد بود. بنابراین:

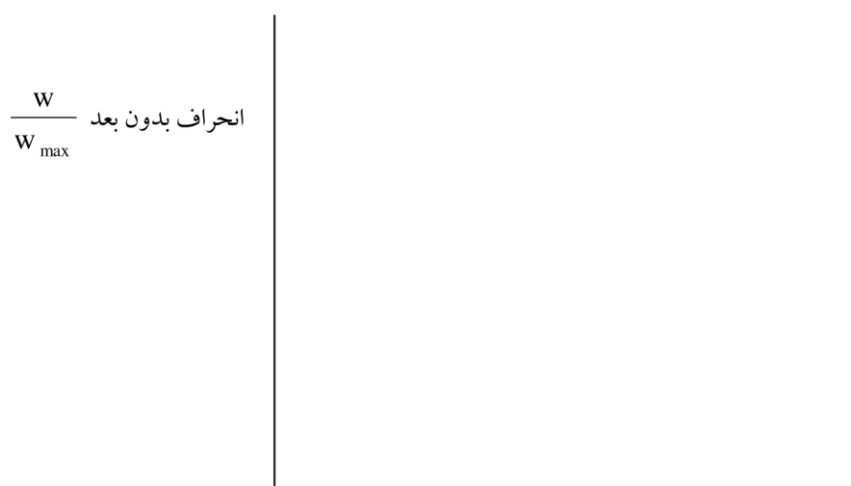
$$w_{max} = \frac{3PR^4}{16Et^3} (1-\nu^2) \quad (30)$$

بالاخره، برای به دست آوردن شکل بدون بعد، معادله ۱-۴ را بر معادله ۲-۴ تقسیم می‌کنیم:

$$\frac{W}{W_{\max}} = \left[1 - \frac{r^2}{R^2} \right]^2 \quad (31)$$

از معادله فوق آشکار است که مقدار $\frac{W}{W_{\max}}$ فقط تابعی از نسبت شعاع $\frac{r}{R}$ است و بنابراین مستقل از ابعاد دیافراگم و فشار به کار رفته می باشد.

۶- اکنون، نمودار انحراف بدون بعد بر حسب $\frac{r}{R}$ را برای مقادیر تئوری و تجربی رسم نمائید.



نمودار ۴-۱: نسبت فاصله شعاعی به شعاع کل دیافراگم

۳-۱-۵ محاسبات و بررسی نتایج انحرافها

۱- بر روی نتایج به دست آمده از نمودار $\frac{W}{W_{\max}} - \frac{r}{R}$ و علت وجود اختلاف جزئی در نتایج تئوری و تجربی بحث کنید.

۲- مقادیر انحراف ماکزیمم اندازه گرفته شده و انحراف تئوریک ماکزیمم را در هر کدام از فشارهای وارده با یکدیگر مقایسه کرده و درصد خطا را محاسبه نمائید.

۳-۲ روش اندازه گیری کرنش های سطح و ثبت نتایج

۳-۲-۱ کرنش های سطح را که به کمک دستگاه اندازه گیر کرنش به دست آمده است در جدول زیر مرتب نمائید.

جدول ۲ کرنش های اندازه گرفته شده برای فشارهای مختلف

شماره کرنش سنج	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
شعاع (mm)	۲۵	۲۵	۵۰	۵۰	۵۷/۵	۹۰	۹۰	۹۰
موقعیت	محیطی	شعاعی	محیطی	شعاعی	شعاعی	محیطی	۴۵ درجه	شعاعی
کرنش در فشار صفر درجه								

کرنش در فشار صفر درجه								
کرنش در فشار صفر درجه								
کرنش در فشار صفر درجه								
کرنش در فشار صفر درجه								
شیب بهترین خط راست $\mu\epsilon \text{ per KN}/\epsilon^2$								
شیب تئوری $\mu\epsilon \text{ per KN}/\epsilon^2$								

اگر از دستگاه اندازه گیر کرنش $E10$ و سوئیچ $E18$ استفاده شده باشد، مقادیر کرنش به طور مستقیم به دست می آید و محاسبه ای لازم نیست. برای انواع دیگر از وسایل اندازه گیری کرنش، لازم است که از یک ضریب تصحیح اندازه گیر استفاده نمود. در این حالت، برای مقادیر محاسبه شده و نوشتن نتایج در جدول فضای اضافی لازم است. با رسم مقادیر اندازه گرفته شده در مقابل فشار، کرنش های تجربی به خوبی با تئوری مقایسه می شوند و شیب این خطوط را می توان با مقادیر تئوری مقایسه کرد. این مقادیر تئوری با مرتب کردن مجدد معادلات (۲۶) و (۲۷) و (۲۹) به دست می آیند:

برای کرنش های شعاعی:

$$\frac{\epsilon_r}{P} = \frac{3R^2}{8Et^2} (1 - \nu^2) \left[1 - \frac{3r^2}{R^2} \right] \quad (32)$$

برای کرنش های محیطی:

$$\frac{\epsilon_\theta}{P} = \frac{3R^2}{8Et^2} (1 - \nu^2) \left[1 - \frac{r^2}{R^2} \right] \quad (33)$$

در زاویه 45° :

$$\epsilon_{45^\circ} = \frac{1}{2} (\epsilon_r + \epsilon_\theta)$$

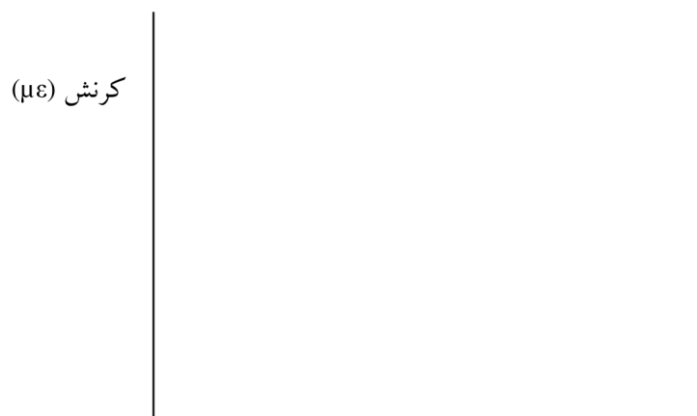
به منظور مقایسه با مقادیر تجربی، مقادیر تئوری را در جدول ۲ وارد کنید.

۳-۲-۲ رسم منحنی ها و بررسی نتایج

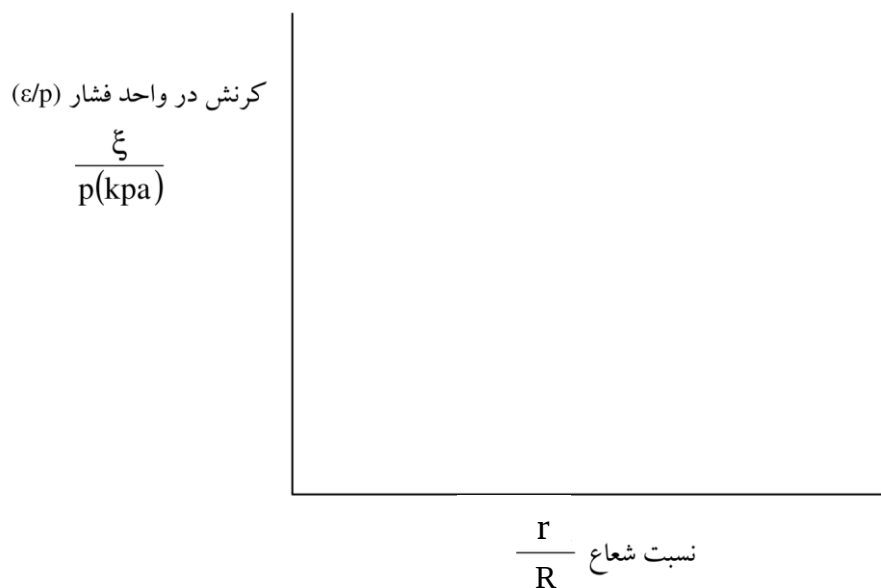
۱- نمودار کرنش های اندازه گیری شده نسبت به فشار وارده را رسم کرده و با رسم بهترین خط مستقیم از میان هر دسته از نقاط، شیب خطوط را به دست آورده و یادداشت کنید (نمودار ۴-۲). برای یافتن شیب هر کدام از معادلات، بهترین و دقیق ترین روش این است که به وسیله ماشین حساب های مدرن یا کامپیوتر، خط حداقل مربعات را که برای هر دسته از نتایج رسم کرده اید بر آن منطبق کرده و سپس شیب را از معادله هر خط به دست آورید.

۲- اکنون نمودار مقایسه مقادیر اندازه گرفته شده کرنش با مقادیر تئوری را به صورت نمودار $\left(\frac{\epsilon}{P} \right)$ بر حسب $\frac{r}{R}$

را برای هر دسته از خطوط رسم کنید (نمودار ۴-۳).



نمودار ۲: تغییرات کرنش (μ ϵ) بر حسب فشار وارده (KN/m²) برای هر کدام از کرنش سنج‌ها



نمودار ۳: مقایسه تغییرات کرنش تجربی با تئوری

۳- نمودار ۳ را برای کرنش‌های محیطی و شعاعی در زاویه ۴۵° رسم کنید.

۴- با توجه به نمودار ۲ بهترین خط مستقیم را رسم کرده و با مقادیر تئوری مقایسه کنید.

۵- بر روی نتایج برای هر دسته از منحنی‌ها در موارد زیر بحث نمایید.

۱-۵ مقایسه نتایج تئوری و تجربی در منحنی‌های $\left(\frac{\epsilon}{p} - \frac{r}{R}\right)$.

۲-۵ مقایسه نتایج تئوری و تجربی برای کرنش سنج‌های شعاعی.

۳-۵ مقایسه نتایج تئوری و تجربی برای کرنش سنج‌های محیطی.

۴-۵ مقایسه نتایج تئوری و تجربی برای کرنش سنج ۷.

۶- بررسی کرنش‌ها در $\left(\frac{r}{R} = 0.9\right)$ $r = 90 \text{ mm}$. اهمیت نصب دقیق کرنش سنج‌ها در این شعاع را توضیح دهید.

(به نمودار ۴) توجه نمائید.

۷- کرنش‌های مربوط به کرنش‌سنج‌های ۶، ۷ و ۸ را بر روی موهر کرنش (برای شعاع ۹۰mm) رسم کرده و توضیح دهید که اگر هر کدام از کرنش‌سنج‌های مذکور به اندازه ۵ درجه در جای واقعی خود نصب نشوند، کرنش‌های اندازه گرفته شده چه مقدار خطا خواهند داشت؟

۸- چه خطاهایی ممکن است در نتایج آزمایش تأثیر بگذارد؟

۹- گیردار کردن دقیق دیافراگم، چه تأثیری در نتایج آزمایش (تفاوت بین مقادیر تئوری و تجربی) می‌گذارد؟

۱۰- کاربردهای این آزمایش را ذکر کنید.