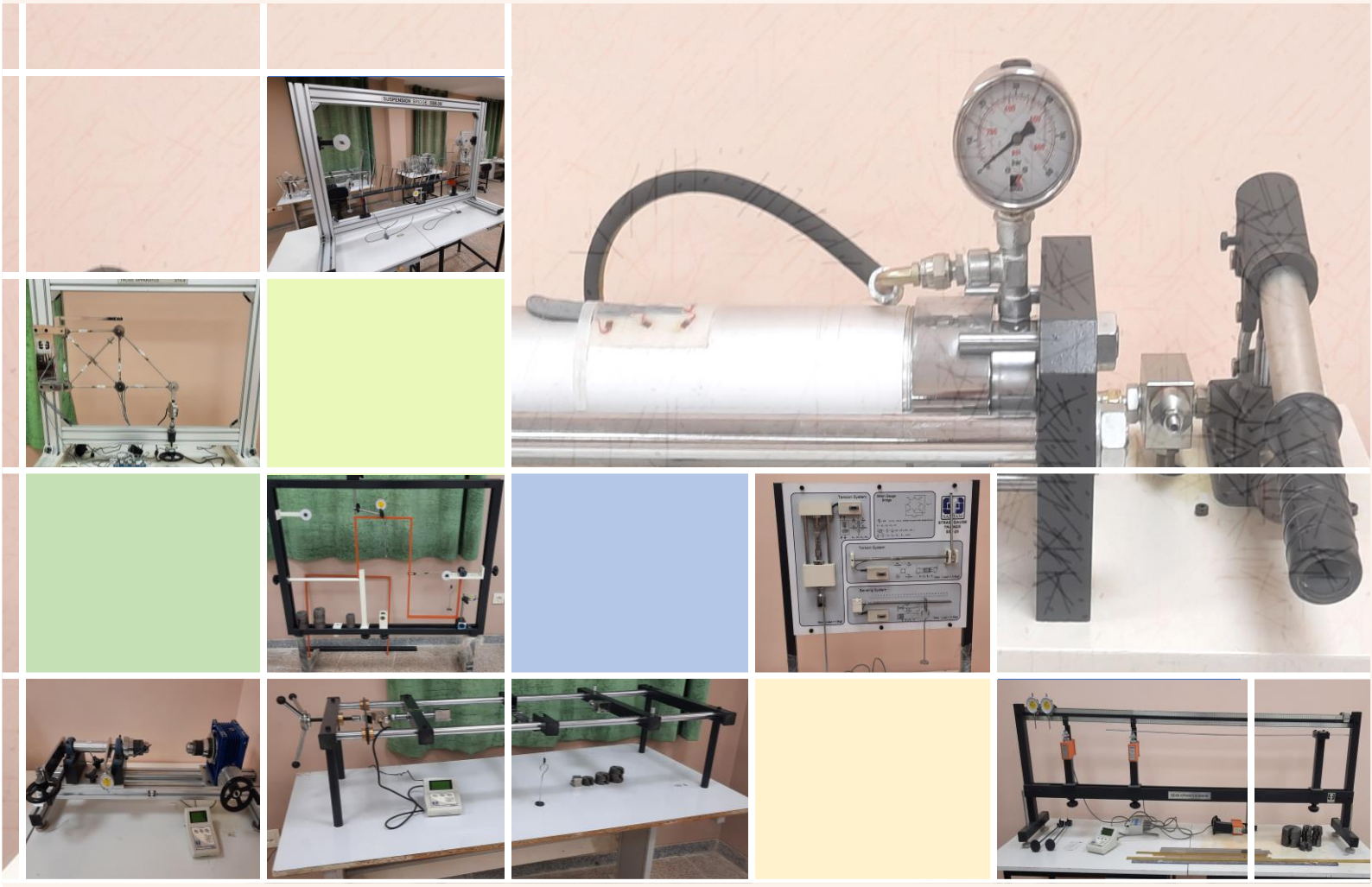
دانشگاه صنعتی همدان

آزمایشگاه مقاومت مصالح

دستورکار



مؤلفین

دکتر جواد پاینده پیمان

مهندس بهنام رفیعی

This page is Blank

بسم الله الرحمن الرحیم

پیشگفتار

به نام خداوند هستی بخش

آزمایشگاه مقاومت مصالح به بررسی عملی و علمی برخی از مفاهیم دروس استاتیک و مقاومت مصالح می‌پردازد که در دوره کارشناسی مهندسی مکانیک برای دانشجویان ارائه می‌شود. در این دستورکار تلاش شده است تا شرحی از دستگاه‌ها، نحوه انجام آزمایش، نحوه محاسبات و نکات تامینی استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی آموزشی مستقر در دانشگاه صنعتی همدان ارائه شود. دستورکار هر آزمایش با بیان هدف آزمایش شروع شده و پس از بیان مختصری از مفاهیم تئوری آن، دستگاه آزمایش معرفی و روش انجام آزمایش و خواسته‌های آزمایش آورده شده است. در انتهای هر آزمایش نکات تامینی مختص آن دستگاه یادآوری شده است. امید است دانشجویان با انجام عملی آزمایش‌ها و فراگیری تجربی مفاهیم پایه مهندسی مکانیک، آمادگی حضور موفق و تأثیرگذار در عرصه‌های شغلی را داشته باشند.

در پایان لازم است از دانشگاه صنعتی همدان و گروه مهندسی مکانیک که امکانات لازم آزمایشگاهی را فراهم کردند نهایت تشکر و قدردانی را داشته باشیم. از ارسال نظرات و پیشنهادات اساتید گرامی، کارشناسان و دانشجویان عزیز به جهت بهبود و تکمیل این دستورکار سپاس‌گزار خواهیم بود.

جواد پاینده پیمان

بهنام رفیعی

تابستان ۱۴۰۱

گروه مهندسی مکانیک

حق طبع، نشر و مالکیت

کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی همدان می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

فهرست مطالب

فصل ۱: تجهیزات عمومی آزمایشگاه ۱

۱-۱- دستگاه نمایشگر دیجیتال ۲

۱-۱-۱- تنظیمات دستگاه ۲

۱-۱-۲- روش استفاده ۳

۱-۲- دستگاه سوئیچر ۴

۱-۲-۱- روش استفاده ۴

۱-۳- ساعت اندازه‌گیری ۶

۱-۳-۱- تنظیمات دستگاه ۶

۱-۳-۲- روش استفاده ۶

۱-۴- کولیس ۸

۱-۴-۱- روش استفاده ۸

فصل ۲: روش آزمایش ۱۰

۲-۱- آزمایش ۱: پیچش الاستیک ۱۱

۲-۱-۱- هدف آزمایش ۱۱

۲-۱-۲- تئوری آزمایش ۱۱

۲-۱-۳- شرح دستگاه آزمایش ۱۱

۲-۱-۴- روش آزمایش ۱۲

۲-۱-۵- نتیجه گیری ۱۳

۲-۱-۶- نکات تامینی ۱۳

۲-۲- آزمایش ۲: تنش - کرنش ۱۴

۲-۲-۱- هدف آزمایش ۱۴

۲-۲-۲- تئوری آزمایش ۱۴

۲-۲-۳- شرح دستگاه آزمایش ۱۸

۲-۲-۴- روش آزمایش ۱۹

۲-۲-۴-۱ آزمایش کشش ۱۹

۲-۲-۴-۲ آزمایش پیچش ۲۰

۲-۲-۴-۳- آزمایش خمش ۲۱

۲-۲-۵- نتیجه گیری ۲۲
۲-۲-۶- نکات تامینی ۲۲
۲-۳- آزمایش ۳: خرپا ۲۳
۲-۳-۱ هدف آزمایش ۲۳
۲-۳-۲ تئوری آزمایش ۲۳
۲-۳-۳- شرح دستگاه آزمایش ۲۵
۲-۳-۴- روش آزمایش ۲۶
۲-۳-۴-۱- محاسبه نیروی اعضای خرپا ۲۶
۲-۳-۴-۲- محاسبه خیز یک نقطه خرپا ۲۷
۲-۳-۵- نتیجه گیری ۲۸
۲-۳-۶- نکات تامینی ۲۸
۲-۴- آزمایش ۴: کمانش ستون‌ها ۲۹
۲-۴-۱- هدف آزمایش ۲۹
۲-۴-۲- تئوری آزمایش ۲۹
۲-۴-۳- شرح دستگاه آزمایش ۳۰
۲-۴-۴- روش آزمایش ۳۱
۲-۴-۴-۱ محاسبه EI تجربی ۳۱
۲-۴-۴-۲ محاسبه نیروی بحرانی ۳۲
۲-۴-۵- نتیجه گیری ۳۳
۲-۴-۶- نکات تامینی ۳۳
۲-۵- آزمایش ۵: پیچش پلاستیک ۳۵
۲-۵-۱- هدف آزمایش ۳۵
۲-۵-۲- تئوری آزمایش ۳۵
۲-۵-۳- شرح دستگاه آزمایش ۳۸
۲-۵-۴- روش آزمایش ۳۸
۲-۵-۴-۱ بررسی رابطه بین گشتاور پیچشی و زاویه پیچش و محاسبه مدول برشی ۳۸
۲-۵-۴-۲ بررسی تنش باقیمانده و رسم منحنی آن ۴۰
۲-۵-۴-۳- بررسی تنش تسلیم ۴۰
۲-۵-۵- نتیجه گیری ۴۱
۲-۵-۶ نکات تامینی ۴۲
۲-۶- آزمایش ۶: تیر متقارن ۱ ..... ۴۳
۲-۶-۱ هدف آزمایش ۴۳
۲-۶-۲ تئوری آزمایش ۴۳
۲-۶-۳ شرح دستگاه آزمایش ۴۴

۴-۶-۲- روش آزمایش..... ۴۵
۱-۴-۶-۲- بررسی نیروهای عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها به صورت تجربی و تئوری..... ۴۵
۲-۴-۶-۲- بررسی خیز تیرها با هندسه و جنس‌های مختلف..... ۴۷
۵-۶-۲- نتیجه گیری..... ۴۸
۶-۶-۲- نکات تامینی..... ۴۸
۷-۲- آزمایش ۷: تیر متقارن ۲..... ۴۹
۱-۷-۲ هدف آزمایش..... ۴۹
۲-۷-۲ تئوری آزمایش..... ۴۹
۳-۷-۲- شرح دستگاه آزمایش..... ۵۳
۴-۷-۲- روش آزمایش..... ۵۴
۱-۴-۷-۲- محاسبه عکس‌العمل تیر نامعین به کمک روش جمع آثار (مقایسه نتایج تجربی با تئوری)..... ۵۴
۲-۴-۷-۲- خمش خالص، محاسبه شعاع انحناء..... ۵۶
۳-۴-۷-۲- تیر طره نامعین..... ۵۷
۵-۷-۲- نتیجه گیری..... ۵۹
۶-۷-۲- نکات تامینی..... ۵۹
۸-۲- آزمایش ۸: سیلندر جدار نازک..... ۶۰
۱-۸-۲- هدف آزمایش..... ۶۰
۲-۸-۲ تئوری آزمایش..... ۶۰
۳-۸-۲- شرح دستگاه آزمایش..... ۶۳
۴-۸-۲- روش آزمایش..... ۶۴
۱-۴-۸-۲- سیلندر جدار نازک باز..... ۶۴
۲-۴-۸-۲- سیلندر جدار نازک بسته..... ۶۵
۵-۸-۲- نتیجه گیری..... ۶۶
۶-۸-۲- نکات تامینی..... ۶۶
۹-۲- آزمایش ۹: قاب‌ها ۱ (قاب U-شکل)..... ۶۸
۱-۹-۲ هدف آزمایش..... ۶۸
۲-۹-۲- تئوری آزمایش..... ۶۸
۳-۹-۲- شرح دستگاه آزمایش..... ۶۹
۴-۹-۲- روش آزمایش..... ۷۰
۱-۴-۹-۲ آزمایش قاب U-شکل، حالت معین استاتیکی..... ۷۰
۲-۴-۹-۲- آزمایش قاب U-شکل، حالت نامعین استاتیکی..... ۷۱
۵-۹-۲- نتیجه گیری..... ۷۲
۶-۹-۲- نکات تامینی..... ۷۲
۱۰-۲- آزمایش ۱۰: قاب‌ها ۲ (قاب S-شکل)..... ۷۳

۱-۱۰-۲- هدف آزمایش ۷۳
۲-۱۰-۲- تئوری آزمایش ۷۳
۳-۱۰-۲- شرح دستگاه آزمایش ۷۴
۴-۱۰-۲- روش آزمایش ۷۵
۱-۴-۱۰-۲ آزمایش قاب S-شکل، حالت نامعین استاتیکی ۷۵
۵-۱۰-۲- نتیجه گیری ۷۶
۶-۱۰-۲- نکات تامینی ۷۶
۱۱-۲- مراجع ۷۸

فصل اول

تجهیزات عمومی آزمایشگاه

۱-۱- دستگاه نمایشگر دیجیتال

دستگاه نمایشگر دیجیتال[1] برای اندازه‌گیری پارامترهای مختلفی از قبیل نیرو، فشار و ... به کار برده می‌شود. تصویر نمایشگر دیجیتال در شکل ۱ نشان داده شده است.

شکل ۱: نمایشگر دیجیتال

۱-۱-۱- تنظیمات دستگاه

هر نمایشگر دارای سه دکمه Mode، Enter و Zero است که جهت تنظیمات استفاده می‌شود. برای وارد شدن به تنظیمات لازم است دکمه Mode به مدت ۲۰ ثانیه نگه‌داشته شده تا وارد بخش Menu نمایشگر شود. سپس با زدن دکمه Mode باید مطابق مشخصات دستگاه آزمایش، کمیت‌های جدول ۱ مقدار دهی شوند. هم‌چنین جهت اصلاح هر پارامتر دکمه Enter زده می‌شود و سپس به کمک دکمه Zero مقدار اصلاح می‌شود. پس از اصلاح و جهت ثبت مقدار مدنظر، دکمه Enter زده می‌شود. در پایان پس از چندین بار فشردن دکمه Mode بر روی گزینه Save setting رفته و با نگه داشتن دکمه Enter، مقادیر جدید ذخیره می‌شوند.

[1] Indicator

جدول ۱: پارامترهای قابل تنظیم در نمایشگر دیجیتال

نمایشگر نیرو		نمایشگر کرنش	
پارامتر	**مقدار**	**پارامتر**	**مقدار**
R.O.	مقدار روی لیبل لودسل وارد شود (دقت لودسل)	R.O.	۳ mv/v
Capacity	مقدار ظرفیت روی لیبل لودسل وارد شود	Capacity	۳
Param Title	Force	Param Title	Strain
Point	۱	Point	۴
Max Channel	تعداد کانال‌ها (عضوهایی که لودسل دارند)	Max Channel	تعداد کانال‌ها (عضوهایی که کرنش‌سنج دارند)

۲-۱-۱- روش استفاده

۱. کابل رابط بین نمایشگر و دستگاه آزمایش را از یک طرف به جای سوکت نمایشگر و از طرف دیگر به محل اتصال کانکتور آزمایش مورد نظر بر روی دستگاه نصب کنید.
۲. کانکتور تغذیه را به محل نشان داده شده در شکل ۱ نصب کرده و آداپتور را به برق متصل کنید.
۳. با استفاده از کلید ON/OFF، دستگاه نمایشگر را روشن کنید.
۴. پس از روشن کردن دستگاه آرم شرکت سازنده دستگاه نمایشگر رو صفحه دیجیتال نشان داده می‌شود.
۵. قبل از انجام آزمایش با زدن کلید صفر (Zero)، مقدار عددی نمایشگر را صفر کنید.
۶. واحد نمایشگر برای اندازه‌گیری ولتاژ mv/v و برای اندازه‌گیری نیرو kgf یا N است.

تذکر:

- اگر نمایشگر دیجیتالی ۱۲۰ s بدون تغییر باقی بماند، به طور اتوماتیک خاموش می‌شود.
- جهت جابجایی نمایشگر دیجیتال، حتما آن را خاموش و اتصالات آن جدا و سپس جابجا کنید.
- از قراردادن نمایشگر دیجیتال زیر قلاب اعمال نیرو و هر جسم افتادنی پرهیز کنید.

۲-۱- دستگاه سوئیچر

زمانی که نیاز به نمایش بیش از یک پارامتر اندازه‌گیری از قبیل نیرو و کرنش بر روی یک دستگاه نمایشگر دیجیتال باشد، از دستگاه سوئیچر[1] استفاده می‌شود. در سوئیچر هر یک از پارامتر ها با کابلی به دستگاه سوئیچر وصل شده و در نهایت خروجی سوئیچر به نمایشگر دیجیتال متصل می‌شود. تصویر سوئیچر سه کاناله در شکل ۲ نشان داده شده است.

شکل ۲: سوئیچر سه کاناله

۱-۲-۱- روش استفاده

۱. کابل‌های رابط بین دستگاه آزمایش و سوئیچر را از یک طرف به محل اتصال کانکتور آزمایش در دستگاه آزمایش و از طرف دیگر به محل‌های سوکت ورودی بر روی سوئیچر نصب کنید (در این حالت هر یک از کانال‌ها، داده‌های یک پارامتر را نشان می‌دهند).
۲. خروجی سوئیچر را به دستگاه نمایشگر دیجیتال وصل کنید.
۳. اتصالات دستگاه نمایشگر دیجیتال را وصل و سپس آن را روشن کنید.
۴. با شروع آزمایش و جهت یادداشت مقدار هر یک از پارامترهای مورد نظر، با فشردن کلید Mode بر روی نمایشگر دیجیتال، کانال مربوط به آن پارامتر تغییر کرده و امکان نمایش داده‌های آن پارامتر در دستگاه نمایشگر وجود دارد.

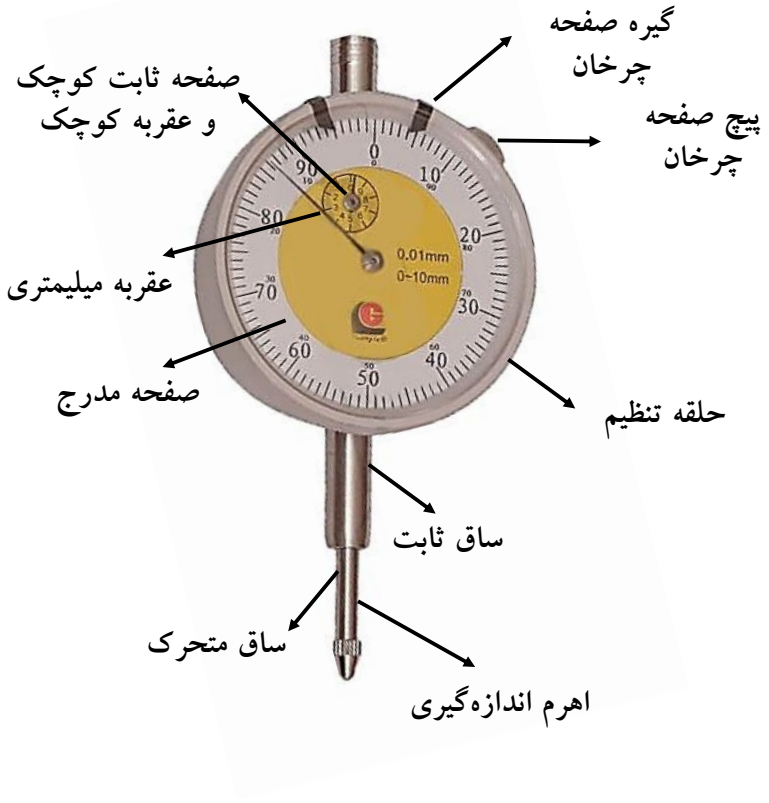
[1] Switcher

تذکر:

- جهت جابجایی سوئیچر، حتما اتصالات آن را جدا کرده و سپس جابجا کنید.
- از قراردادن سوئیچر زیر قلاب اعمال نیرو و هر جسم افتادنی پرهیز کنید.

۳-۱- ساعت اندازه‌گیری

ساعت اندازه‌گیری[1] وسیله‌ای برای سنجش جابجایی اجسام است که می‌تواند به کمک پایه پیچی یا مغناطیسی بر روی دستگاه آزمایش نصب شود. قسمت‌های مختلف ساعت اندازه‌گیری شامل: صفحه مدرج بزرگ، صفحه ثابت کوچک، عقربه میلیمتری، عقربه کوچک، حلقه تنظیم صفحه مدرج (صفحه چرخان)، پیچ صفحه چرخان، گیره صفحه چرخان و اهرم اندازه‌گیری است که تصویر آن در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: ساعت اندازه‌گیری

۱-۳-۱- تنظیمات دستگاه

بر روی هر ساعت اندازه‌گیری یک صفحه مدرج متحرک وجود دارد که جهت صفر کردن از آن استفاده می‌شود. برای این کار ابتدا ساعت اندازه‌گیری بر روی دستگاه آزمایش نصب می‌شود. اهرم اندازه‌گیری را بر روی محلی که جابجایی آن مدنظر است قرار داده شده و با چرخاندن حلقه تنظیم، عقربه میلیمتری بر روی عدد صفر تنظیم می‌شود (لازم است قبل از چرخاندن حلقه تنظیم، پیچ نگهدارنده آن باز شود). سپس پیچ صفحه چرخان سفت شده تا امکان جابجایی و تغییر صفر ساعت اندازه‌گیری وجود نداشته باشد.

۲-۳-۱- روش استفاده

با شروع آزمایش و تغییر مکان اهرم اندازه‌گیری، عقربه میلیمتری چرخیده و میزان جابجایی محاسبه می‌شود.

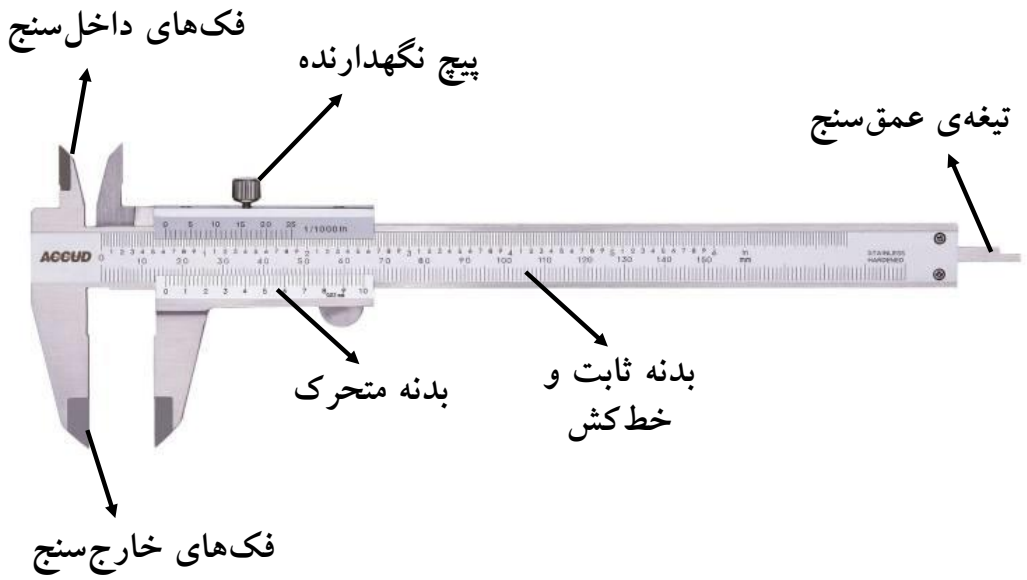
[1] Dial gauge

تذکر:

- صفحه مدرج ساعت اندازه‌گیری از ۱ تا ۱۰۰ درجه‌بندی شده است و با توجه به دقت ساعت اندازه‌گیری، میزان جابجایی به‌دست می‌آید. معمولاً دقت دستگاه و حداکثر میزان اندازه‌گیری آن بر روی صفحه مدرج نوشته شده است (در ساعت اندازه‌گیری شکل ۳، دقت هر درجه دوران عقربه میلیمتری برابر ۰.۰۱ mm و حداکثر میزان اندازه‌گیری جابجایی ۱۰ mm است).
- در صورتی که میزان جابجایی بیش از یک دور دوران عقربه میلیمتری باشد، از صفحه ثابت کوچک جهت محاسبات استفاده می‌شود. با هر دور دوران عقربه میلیمتری، یک درجه به مقدار نمایش دهنده صفحه ثابت کوچک اضافه می‌شود (در ساعت اندازه‌گیری شکل ۳، تعداد درجه‌بندی صفحه ثابت ۱۰-۰ است که هر یک دور آن ۱ mm را نشان می‌دهد).

۴-۱- کولیس

کولیس[1] وسیله‌ای برای اندازه‌گیری ابعاد اجسام است که شامل قسمت‌های مختلف: فک‌های خارج‌سنج، فک‌های داخل‌سنج، تیغه‌ی عمق‌سنج ، بدنه ثابت، بدنه متحرک و پیچ نگهدارنده است (شکل ۴). برای اندازه‌گیری ابعاد خارجی اجسام از فک‌های خارج‌سنج، برای اندازه‌گیری ابعاد داخلی اجسام از فک‌های داخل‌سنج و برای اندازه‌گیری عمق اجسام از تیغه‌ی عمق‌سنج استفاده می‌شود. بر روی بدنه ثابت، خط‌کش اندازه گذاری بر اساس واحدهای متریک و اینچی چاپ شده است که ابعاد کلی جسم به کمک آن‌ها مشخص می‌شود. بدنه متحرک بر روی بدنه ثابت قرار گرفته است و امکان حرکت بر روی آن را دارد. از این قسمت جهت بهبود دقت اندازه‌گیری استفاده می‌شود. به کمک پیچ نگهدارنده هم می‌توان بدنه متحرک را بر روی بدنه ثابت، تثبیت کرد.



شکل ۴: کولیس

۱-۴-۱- روش استفاده

ابتدا هدف از اندازه‌گیری مشخص می‌شود (مشخص کردن اندازه‌گیری خارجی، داخلی یا عمق قطعه).

۱. در اندازه‌گیری خارجی، فک‌های خارج‌سنج را محاط بر قطعه قرار دهید به نحوی که فاصله‌ای بین فک و محیط خارجی قطعه نباشد.
۲. در اندازه‌گیری داخلی، باید فک‌های داخل‌سنج را از درون قطعه به محل مورد اندازه‌گیری مماس کنید.
۳. در اندازه‌گیری عمق هم لازم است که انتهای کولیس را با لبه قطعه مماس کرده و تیغه‌ی عمق‌سنج را از لبه‌ی قطعه به سمت عمق مدنظر باز کنید.

[1] Caliper

پس از تنظیم دقیق کولیس، عددی که خط‌کش ثابت نشان می‌دهد عدد با دقت سانتی‌متر است. برای مشخص کردن دقت میلیمتری کولیس از خط‌کش متحرک استفاده می‌شود. عددی که در آن دو خط اندازه‌گیری در خط‌کش متحرک و خط‌کش ثابت در یک راستا باشند بیانگر مقدار دقت میلیمتری است.

تذکر:

- با توجه به سیستم رایج متریک در اندازه‌گیری‌ها، در این قسمت نحوه اندازه‌گیری بر اساس سیستم متریک آموزش داده شده است.
- طول خط‌کش اندازه‌گیری می‌تواند بر اساس کاربرد آن متفاوت باشد.

فصل دوم

روش آزمایش

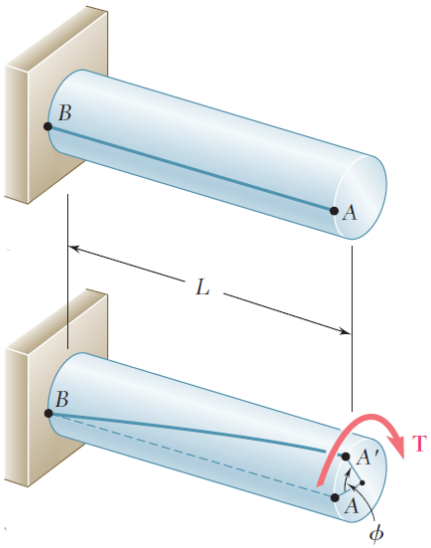
۱-۲- آزمایش ۱: پیچش الاستیک

۱-۱-۲- هدف آزمایش

بررسی صحت رابطه $\phi = \frac{TL}{JG}$ و محاسبه مدول برشی

۲-۱-۲- تئوری آزمایش

میله‌ای به شکل ۱ را فرض کنید که از یک طرف آزاد و از طرف دیگر به تکیه‌گاه ثابت متصل است. اگر گشتاور پیچشی T به انتهای آزاد میله وارد شود، میله گردان می‌پیچد و انتهای آزاد آن به اندازه زاویه ϕ می‌چرخد. در صورتی‌که طول میله برابر L، مدول برشی G و ممان اینرسی قطبی $J = \frac{\pi}{2} r^4$ باشد، مقدار تغییرات زاویه پیچش سطح مقطع میله، ϕ به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱]:



شکل ۱: زاویه پیچشی در میله‌ی یک سر گیردار [۱].

$$\phi = \frac{TL}{JG} \qquad (۱)$$

با توجه به رابطه گشتاور پیچشی $T = \frac{GJ}{L}\phi$، شیب نمودار $T-\phi$ برابر با $k_t = \frac{GJ}{L}$ است. از آنجا که k_t به مقادیر ثابت جنس میله و خصوصیات هندسی میله وابسته است، بنابراین رابطه بین T, ϕ خطی می‌باشد.

۳-۱-۲- شرح دستگاه آزمایش

شکل ۲ دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد. دستگاه از یک فک متحرک همراه با پولی اعمال گشتاور و یک تکیه‌گاه ثابت (فک ثابت) و هم‌چنین دو نقاله جهت به‌دست آوردن زاویه پیچش تشکیل شده است. قطر پولی

اعمال گشتاور cm ۱۰ است. برای هر یک از نقاله‌ها، نشانه‌های قابل نصب بر روی نمونه آزمایش موجود است. میله‌های مورد استفاده، سه میله از جنس فولاد و برنج هستند. هم‌چنین جهت اعمال گشتاور بر میله، آویزی بر روی پولی نصب شده است که با قراردادن وزنه بر روی آن، گشتاور موردنظر اعمال می‌شود.

شکل ۲: تصویر دستگاه آزمایش پیچش الاستیک

۴-۱-۲- روش آزمایش

ابتدا قطر نمونه آزمایش را اندازه‌گیری کرده و آن را بر روی دستگاه نصب کنید. برای نصب نمونه، ابتدا فک‌های سه نظام تکیه‌گاه را باز کرده تا قطعه درون خزینه مخصوص جای گیرد. سپس انتهای دیگر میله را درون فک متحرک قرار داده و با آچار آلن پیچ‌های آن‌را محکم کنید. یک نقاله را به نزدیکی فک متحرک برده و پیچ آن را محکم کنید. نشانه نقاله را بر روی میله آزمایش نصب کرده و مقابل عدد صفر نقاله قرار دهید. طول میله از فک ثابت تا نشانه نقاله را اندازه‌گیری کنید. حال به کمک وزنه‌های مختلف، گشتاور به میله اعمال کرده و زوایای پیچش در هر گشتاور را مطابق جدول ۱ یادداشت کنید (وزن هر گوی gr ۰.۸۸ است).

الف) آزمایش را برای میله‌ی فولادی با قطرهای متفاوت انجام دهید.

ب) آزمایش را با تغییر نمونه آزمایش به برنجی انجام دهید.

جدول ۱: نتایج آزمایشگاهی دستگاه پیچش الاستیک

مشخصات میله: جنس میله: .....، قطر میله: .....، طول میله:								
بار [gr] / تعداد گوی								
زاویه پیچش (ϕ)، [degree]								

خواسته‌های آزمایش پیچش الاستیک

۱. رابطه تئوری زاویه پیچش ($\phi = \frac{TL}{JG}$) را اثبات کنید.

۲. برای هر سه آزمایش (دو میله فولادی، یک میله برنجی)، جدول ۲ را تکمیل کرده و نمودار $T-\phi$ آن‌ها را جداگانه رسم نمایید.

جدول ۲: نتایج آزمایش پیچش الاستیک

مشخصات میله: جنس میله: .....، قطر میله: .....، طول میله:							
بار، [gr]							
گشتاور (T)، [N.mm]							
زاویه پیچش تجربی (ϕ)، [degree]							
زاویه پیچش تجربی (ϕ)، [rad]							
زاویه پیچش تئوری (ϕ)، [rad]							

- شیب نمودار $T-\phi$ بیانگر چه مقداری است؟
- با برازش منحنی بر روی داده‌های نمودار $T-\phi$، مقدار مدول برشی تجربی برای هر سه نمونه آزمایش به‌دست آورده و با مقدار تئوری مقایسه کرده و درصد خطا را گزارش کنید.
- بر اساس مقدار مدول برشی تئوری، نمودار $T-\phi$ تئوری را برای هر سه نمونه رسم کرده و مقایسه کنید (منحنی تجربی و تئوری هر نمونه در یک نمودار باشند).

۳. اثر تغییر قطر و تغییر جنس را توضیح دهید.

۵-۱-۲- نتیجه گیری

در مورد نتایج آزمایش پیچش الاستیک بحث و نتیجه‌گیری کنید.

۶-۱-۲- نکات تامینی

- مقدار بیشینه گشتاور اعمالی برای هر نمونه آزمایش باید از نصف تنش برشی تسلیم نمونه کمتر باشد. بنابراین از اعمال نیروی گشتاور بیش از حد مجاز بپرهیزید (به مسئول آزمایشگاه مراجعه کنید).
- برای جایگذاری میله‌ها، فک‌های سه نظام را به طور کامل باز کنید.
- برای بستن و باز کردن فک‌ها از آچار آلن مخصوص استفاده کنید.
- در هنگام بستن فک‌ها دقت کنید که میله‌ها در مرکز سه نظام قرار گیرند.
- هنگام اعمال وزنه جدید، مراقب باشید تا در صورت آزاد کردن فک‌ها، وزنه‌ها بر روی زمین نیافتند.
- پس از اتمام آزمایش، دستگاه را به حالت قبل از آزمایش مرتب کنید.

۲-۲- آزمایش ۲: تنش – کرنش

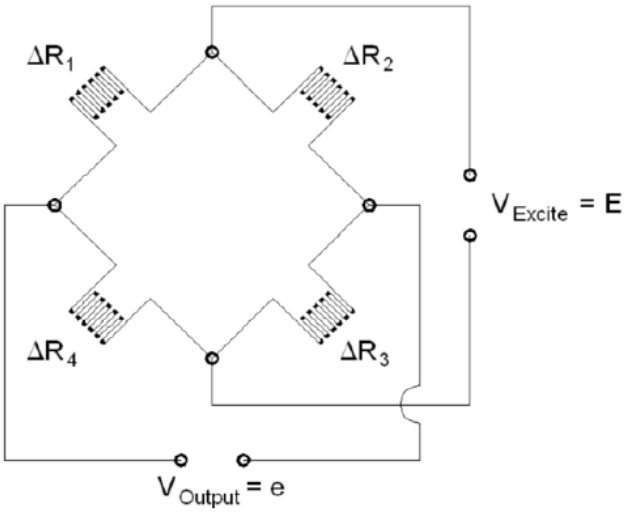
۲-۲-۱- هدف آزمایش

تحلیل تنش-کرنش در بارگذاری‌های مختلف

۲-۲-۲- تئوری آزمایش

زمانی که یک جسم تحت اثر نیرو قرار می‌گیرد، تغییر شکل می‌دهد. میزان تغییر شکل در بارگذاری‌های مختلف کششی، پیچشی و خمشی به کمک کرنش‌سنج‌ها تعیین می‌شود. به منظور محاسبه کرنش در قطعات با بارگذاری‌های مختلف از پل وتستون استفاده می‌شود. هر کرنش‌سنج چسبیده بر روی دستگاه، به همراه سه کرنش‌سنج دیگر که در کنار بُرد دستگاه قرار دارند (و در واقع غیر فعال هستند و عکس‌العملی در برابر تغییرات فشار ندارند) یک پل وتسون را تشکیل می‌دهند.

همانگونه که در شکل ۱ دیده می‌شود، مدار پل وتستون از چهار مقاومت R_1، R_2، R_3 و R_4 تشکیل شده است. در پل وتستون ولتاژ ورودی به دو قسمت تقسیم شده و جریان خروجی از هر دو ولتاژ ورودی تشکیل می‌شود. با توجه به شکل ۱، برای هر پل وتستون رابطه ۱ برقرار است که در آن k ضریب کرنش‌سنج[5]، R مقاومت اولیه کرنش‌سنج و ΔR تغییرات مقاومت کرنش‌سنج است. هم‌چنین در مدار پل وتستون، E ولتاژ تحریک و e ولتاژ خروجی است:



شکل ۱: مدار پل وتسون

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon \qquad .k \approx 2 \tag{۱}$$

[5] Gauge factor

بر روی هر عضو خرپا چهار عدد کرنش‌سنج قرار دارد که تشکیل یک پل وتستون می‌دهند. با توجه به آن‌که مقاومت اولیه کرنش‌سنج‌ها یکسان است، با حل معادلات مدار خواهیم داشت:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$

$$\frac{e}{E} = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4}{\sum_{i=1}^{4} R_i} = \frac{(\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4)}{4R}$$
$$= \frac{k}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4). \ [\frac{mV}{V}] \qquad (۲)$$

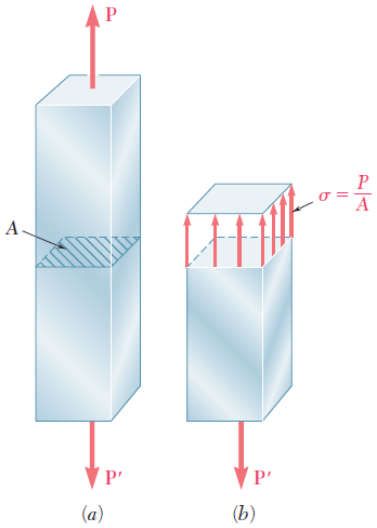
در دستگاه آزمایش تنش–کرنش، کرنش ایجاد شده در آزمایش‌های کشش، خمش و پیچش در اثر اعمال نیرو اندازه‌گیری می‌شود.

الف) آزمایش کشش

قطعه‌ای به طول L و سطح مقطع A را در نظر بگیرید که تحت بار محوری کششی P قرار دارد (شکل ۲). نیرو بر واحد سطح یا شدت نیروهای توزیع شده بر مقطع معین از این قطعه را تنش می‌گویند که به صورت:

$$\sigma = \frac{P}{A} \qquad (۳)$$

علامت مثبت برای نشان دادن تنش کششی (عضو تحت کشش) است.



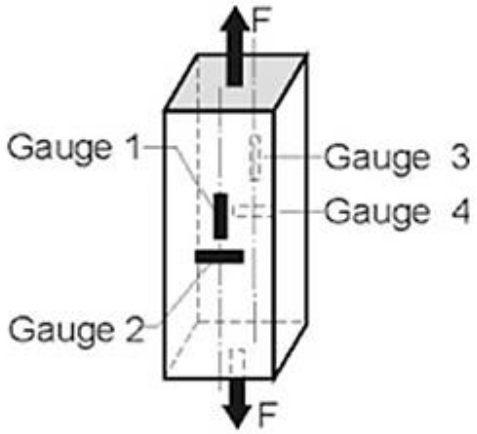
شکل ۲: قطعه با بار محوری کششی [۱]

اگر تنش محوری حاصل از نیروی P از حد تناسب ماده تجاوز نکند، می‌توان قانون هوک را به کاربرد و نوشت:

$$\sigma = E\varepsilon \qquad (۴)$$

که با داشتن کرنش و تنش کششی اعمالی به قطعه، مدول الاستیسیته آزمایشگاهی آن به‌دست می‌آید. از آنجا که کرنش کمیتی بی بعد است، مدول الاستیسیته با همان یکای تنش، یعنی پاسکال بیان می‌شود [۱].

در آزمایشات مشاهده شده است که هر گاه یک نمونه از یک جسم الاستیک همسانگرد تحت تأثیر بار تک محوری قرار گیرد نه تنها در جهت تنش تغییر شکل می‌دهد، بلکه در جهت عمود بر آن نیز دارای تغییر شکل می‌باشد. بنابراین، همانند شکل ۳، برای تعیین کرنش بارگذاری محوری، از چهار کرنش‌سنج استفاده شده است.



شکل ۳: نحوه قرارگیری کرنش‌سنج‌ها بر روی نمونه

طبق رابطه پواسون (ν):

$$\varepsilon_2 = -\nu\varepsilon_1 \quad (۵)$$

هم‌چنین می‌دانیم:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_4 = -\nu\varepsilon_1 = -\nu\varepsilon_3 \quad (۶)$$

در نهایت با جایگذاری فرمول ۶ در فرمول مدار پل وتستون (فرمول ۲) به‌دست می‌آید:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{k}{4}(\varepsilon_1 - (-\nu\varepsilon_1) + \varepsilon_1 - (-\nu\varepsilon_1)) = \frac{k}{2}\varepsilon_1(1+\nu) \quad (۷)$$

بنابراین با داشتن $\frac{V_o}{V_{in}}$ می‌توان کرنش طولی ε_1 را محاسبه کرد.

ب) آزمایش پیچش

میله‌ای به طول L و سطح مقطع A را در نظر بگیرید که تحت بار پیچشی T قرار دارد. مقدار تنش پیچشی در این میله از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\tau = \frac{Tc}{j} \quad (۸)$$

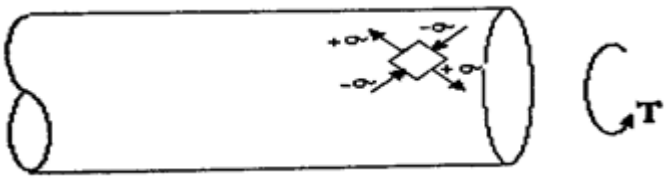
که در آن c شعاع و j لنگر لختی قطبی میله است.

از قانون هوک برای کرنش برشی به‌دست می‌آید [۱]:

$$\tau = G\gamma \quad (۹)$$

که در آن شیب نمودار $\tau - \gamma$، مقدار مدول برشی (G) را می‌دهد.

کرنش‌سنج‌های نصب شده بر روی میله‌ی آزمایش با زاویه ۴۵ درجه نسبت به محور میله قرار دارند. لذا مطابق شکل ۴ المانی بر روی آن فرض می‌شود.



شکل ۴: المان فرض شده بر روی میله

با استفاده تبدیلات تنش کرنش در دایره مور به‌دست می‌آید:

می‌دانیم $\theta = 45°$ $\sigma_x = \sigma_y = 0.$ $\tau = \tau_{xy} = \frac{Tc}{j}$,

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) = 0. \qquad \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) = 0$$

مقدار کرنش‌ها محوری در زاویه ۴۵ درجه:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2}\cos(2\theta) + \frac{\gamma_{xy}}{2}\sin(2\theta)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\gamma_{xy}}{2}$$

در نتیجه کرنش برشی آزمایشگاهی به‌دست می‌آید:

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_1 \qquad (۱۰)$$

برای محاسبه کرنش (ε_1) در آزمایش پیچش از پل وتستون (معادله ۲) استفاده می‌شود:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_2 = -\varepsilon_4$$

$$\frac{e}{E} = \frac{k}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) = \frac{k}{4}(\varepsilon_1 - (-\varepsilon_1) + \varepsilon_1 - (-\varepsilon_1)). = k\varepsilon_1 \quad [\frac{mV}{V}] \qquad (۱۱)$$

ج) آزمایش خمش

تیر یکنواختی را در نظر بگیرید که تحت گشتاور خمشی M قرار گرفته است. تنش اعمالی به این تیر تحت اثر نیروی خمش به صورت زیر است:

$$\sigma = \frac{My}{I} \qquad (۱۲)$$

که در آن y فاصله تا محور خنثی و I گشتاور لختی مقطع تیر است.

از قانون هوک به‌دست می‌آید [۱]:

$$\sigma = E\varepsilon \qquad (۱۳)$$

که در آن شیب نمودار $\sigma - \varepsilon$، مدول الاستیسیته E است.

برای محاسبه کرنش در آزمایش خمش از پل وتستون (معادله ۲) استفاده می‌شود.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_2 = -\varepsilon_4$$

$$\frac{e}{E} = \frac{k}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) = \frac{k}{4}(\varepsilon_1 - (-\varepsilon_1) + \varepsilon_1 - (-\varepsilon_1)) = k\varepsilon_1 \quad [\frac{mV}{V}] \qquad (۱۴)$$

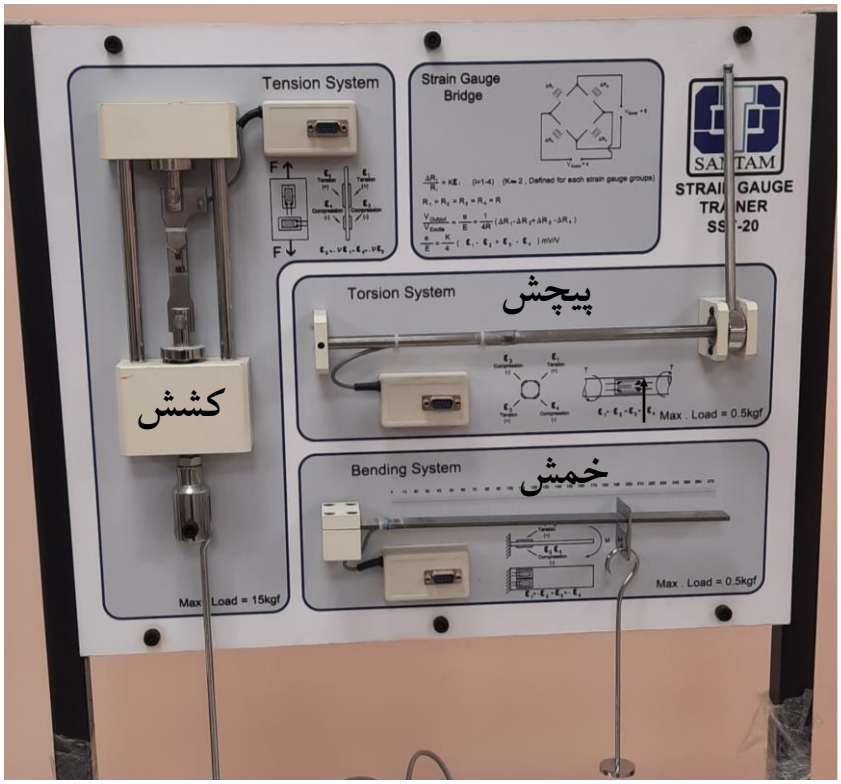
۳-۲-۲- شرح دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش شامل یک تابلو با تجهیزات سه آزمایش کشش، پیچش و خمش نصب بر آن است (شکل۵). این تجهیزات در قسمت‌های مختلف تابلو نصب شده است.

در محل آزمایش کشش، قطعه‌ای فولادی با هندسه مشخص نصب شده است و شامل یک آویز اعمال وزنه جهت اعمال نیروی محوری می‌باشد.

در محل آزمایش پیچش، میله‌ای فولادی یک سر گیردار نصب شده است. در انتهای آزاد میله، یک میله رابط متصل شده است که با اعمال نیرو به آن، گشتاور پیچشی تولید می‌شود.

در محل آزمایش خمش، تیر فولادی یک سر گیرداری نصب شده است. نوار خطکش مدرجی در طول تیر نصب شده تا محل اعمال نیرو از تکیه‌گاه مشخص شود. هم‌چنین با استفاده از آویز و وزنه‌های مختلف، امکان اعمال نیروی خمشی بر روی تیر ایجاد شده است.



شکل ۵: تصویر دستگاه آزمایش تنش ـ کرنش

۲-۲-۴- روش آزمایش

۲-۲-۴-۱ آزمایش کشش

ابتدا کانکتور نمایشگر دیجیتال را به محل اتصال آن در آزمایش کشش بر روی تابلو نصب نمایید. دستگاه نمایشگر دیجیتال را روشن کنید. قلاب اعمال نیرو را در محل مخصوص آن آویزان کرده و با فشردن کلید Zero نمایشگر دیجیتال، مقدار آن را صفر نمایید. سپس با اضافه کردن وزنه‌های مختلف بر روی دستگاه، کرنش‌ها در بار معلوم را از روی نمایشگر قرائت کرده و مطابق جدول ۱ یادداشت کنید.

توجه کنید که حداکثر وزنه اعمالی بر روی دستگاه ۱۵ kgf است. ضریب پواسون ۰.۲۵ و مقدار k تقریبا ۲ فرض می‌شود.

جدول ۱: نتایج آزمایشگاهی کشش

t = ……..., b = ……..								
$W\ [kg]$								
$\frac{e}{E}\ [\times 10^{-4}\frac{mV}{V}]$								

خواسته‌های آزمایش کشش

۱. به ازای وزنه‌های مختلف کرنش‌های آزمایشگاهی را یادداشت کرده و با مقادیر تئوری کرنش‌ها مقایسه کنید (تکمیل جدول ۲).

- دلایل خطا را ذکر کنید.

جدول ۲: مقایسه کرنش‌ها در آزمایش کشش

$W\ [kg]$	$\sigma\ [Mpa]$	$\frac{e}{E}\ [\times 10^{-4}\frac{mV}{V}]$	$\varepsilon_1(exp)$	$\varepsilon_1\ (Theory)$	$Error\ (\varepsilon)$

۲. با رسم نمودار خطی $\sigma - \varepsilon$ و به‌دست آوردن شیب آن، مقدار مدول الاستیسیته تجربی را با تئوری مقایسه کنید.

- منحنی مدول الاستیسیته تئوری را همزمان در کنار مدول الاستیسیته تجربی رسم کنید.
- درصد خطا را گزارش کنید.

۳. ضریب پواسون را تعریف کنید.

۲-۴-۲-۲ آزمایش پیچش

ابتدا کانکتور نمایشگر دیجیتال را به محل اتصال آن در آزمایش پیچش بر روی تابلو نصب نمایید. دستگاه نمایشگر دیجیتال را روشن کنید. رابط اعمال نیرو که در انتهای میله آزمایش قرار دارد را در زاویه ۹۰ درجه ثابت کنید. قلاب اعمال نیرو را در محل مخصوص آن بر روی رابط آویزان کرده و سپس با فشردن کلید Zero نمایشگر دیجیتال، مقدار آن را صفر نمایید. با اضافه کردن وزنه‌های مختلف بر روی رابط اعمال نیرو، گشتاور پیچشی بر میله اعمال می‌شود که می‌توان کرنش‌ها در گشتاور معلوم را از روی نمایشگر قرائت کرده و مطابق جدول ۳ یادداشت کنید.

توجه کنید که حداکثر وزنه اعمالی بر روی دستگاه ۰.۵ kgf است. ضریب پواسون ۰.۲۵ و مقدار k تقریبا ۲ فرض می‌شود.

جدول ۳: نتایج آزمایشگاهی پیچش

r = ……..., L = ……... l = ……					
$W\ [kg]$					
$\frac{e}{E}\ [\times 10^{-4}\frac{mV}{V}]$					

خواسته‌های آزمایش پیچش

۱. به ازای وزنه‌های مختلف کرنش‌های آزمایشگاهی را یادداشت کرده و با مقادیر تئوری کرنش برشی مقایسه کنید (تکمیل جدول ۴).

- دلایل خطا را ذکر کنید.

جدول ۴: مقایسه کرنش‌ها در آزمایش پیچش

$W\ [kg]$	$\tau\ [Mpa]$	$\frac{e}{E}\ [\times 10^{-4}\frac{mV}{V}]$	$\varepsilon_1(exp)$	$\gamma\ (exp)$	$\gamma\ (Theory)$	$Error\ (\gamma)$

۲. با رسم نمودار خطی $\tau - \gamma$ و به‌دست آوردن شیب آن، مقدار مدول برشی تجربی را با تئوری مقایسه کنید.

- منحنی مدول برشی تئوری را همزمان در کنار مدول برشی تجربی رسم کنید.
- درصد خطا را گزارش کنید.

۳-۴-۲-۲- آزمایش خمش

ابتدا کانکتور نمایشگر دیجیتال را به محل اتصال آن در آزمایش خمش بر روی تابلو نصب نمایید. دستگاه نمایشگر دیجیتال را روشن کنید. قلاب اعمال نیرو را در فاصله مشخص آویزان کرده (در مرحله اول در فاصله ۸ cm قرار دهید) و سپس با فشردن کلید Zero نمایشگر دیجیتال، مقدار آن را صفر نمایید. سپس با اضافه کردن وزنه‌های مختلف بر روی دستگاه، کرنش‌ها در بار معلوم (گشتاور خمشی معلوم) را از روی نمایشگر قرائت کرده و مطابق جدول ۵ یادداشت کنید.

توجه کنید که حداکثر وزنه اعمالی بر روی دستگاه ۰.۵ kgf است. ضریب پواسون ۰.۲۵ و مقدار k تقریبا ۲ فرض می‌شود.

جدول ۵: نتایج آزمایشگاهی خمش

t = ……..., b = ……..., l = …….								
$W\ [kg]$								
$\frac{e}{E}\ [\times 10^{-4}\frac{mV}{V}]$								

خواسته‌های آزمایش خمش

۱. ابتدا آویز را در فاصله ۸ cm از محل تکیه‌گاه قرار داده و به ازای وزنه‌های مختلف کرنش‌های آزمایشگاهی را یادداشت کرده و با مقادیر تئوری کرنش‌ها مقایسه کنید (تکمیل جدول ۶).

- دلایل خطا را ذکر کنید.

جدول ۶: مقایسه کرنش‌ها در آزمایش خمش

h = ……..., b = ……..., l = …….					
$W\ [kg]$	$\sigma\ [Mpa]$	$\frac{e}{E}\ [\times 10^{-4}\frac{mV}{V}]$	$\varepsilon_1(exp)$	$\varepsilon_1\ (Theory)$	$Error\ (\varepsilon)$

۲. با رسم نمودار خطی $\sigma - \varepsilon$ برای قسمت ۱ و به‌دست آوردن شیب آن، مقدار مدول الاستیسیته تجربی را با تئوری مقایسه کنید.

- منحنی مدول الاستیسیته تئوری را همزمان در کنار مدول الاستیسیته تجربی رسم کنید.
- درصد خطا را گزارش کنید.

۳. قسمت ۱ و ۲ را در فاصله اعمال نیرو ۱۶ cm تکرار کنید.

۲-۲-۵- نتیجه گیری

در مورد نتایج آزمایش تنش – کرنش بحث و نتیجه‌گیری کنید.

۲-۲-۶- نکات تامینی

- نمایشگر دیجیتال را زیر قلاب اعمال وزنه قرار ندهید تا درصورت رها شدن وزنه‌ها، آسیبی به نمایشگر وارد نشود.
- به محدوده وزنه‌های اعمالی برای هر آزمایش دقت کنید.
- جهت استفاده از نمایشگر دیجیتال: ابتدا تمام اتصالات آن را وصل کرده و سپس روشن کنید. هم‌چنین جهت تغییر آزمایش ابتدا دستگاه نمایشگر دیجیتال را خاموش کرده و سپس جابجا کنید.
- پس از اتمام آزمایش، دستگاه را به حالت قبل از آزمایش مرتب کنید.

۲-۳- آزمایش ۳: خرپا

۲-۳-۱ هدف آزمایش

۱. محاسبه نیروهای اعضای خرپا
۲. محاسبه خیز یک نقطه خرپا

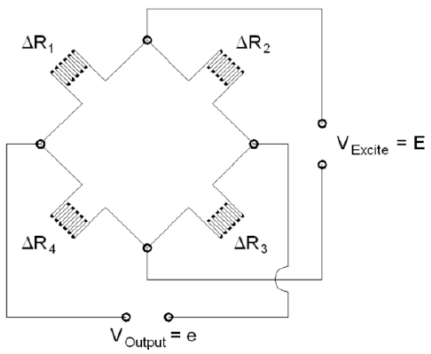
۲-۳-۲ تئوری آزمایش

خرپا سازه‌ای چند عضوی است که تمامی بخش‌های آن به یکدیگر پین شده‌اند. نیرو در اعضای خرپا به‌صورت محوری اعمال می‌شود و هیچ‌گونه گشتاوری بر اعضا وارد نمی‌شود. برای به‌دست آوردن مقدار و جهت نیرو در اعضای خرپا از دو روش مفاصل و روش مقاطع استفاده می‌شود. در روش مفاصل، ابتدا نیروهای تکیه‌گاهی به‌دست می‌آید. سپس با رسم دیاگرام آزاد جسم در هر مفصل، مقدار نیروی مجهول در تمامی عضوهای خرپا محاسبه می‌شوند. در روش مقطع زنی، برش‌هایی مناسب خرپا را به دو یا چند قسمت تقسیم می‌کند. سپس با حل معادلات تعادل برای هر بخش جدا شده، نیروهای مجهول در اعضا به‌دست می‌آیند.

الف) محاسبه نیروهای اعضای خرپا

با اعمال نیروی خارجی به یکی از مفاصل خرپا، اعضای خرپا تحت تاثیر نیروی اعمالی تغییر شکل می‌دهند. بنابراین برای محاسبه نیروها در اعضای مختلف خرپا از کرنش‌سنج‌ها استفاده می‌شود. کرنش‌سنج‌ها بر اساس مدار پل وتستون عمل می‌کنند.

همان‌گونه که در شکل ۱ دیده می‌شود، مدار پل وتستون از چهار مقاومت R_1، R_2، R_3 و R_4 تشکیل شده است. در پل وتستون ولتاژ ورودی به دو قسمت تقسیم شده و جریان خروجی از هر دو ولتاژ ورودی تشکیل می‌شود. با توجه به شکل ۱، برای هر پل وتستون رابطه ۱ برقرار است که در آن k ضریب کرنش‌سنج، R مقاومت اولیه کرنش‌سنج و ΔR تغییرات مقاومت کرنش‌سنج است. هم‌چنین در مدار پل وتستون، E ولتاژ تحریک و e ولتاژ خروجی است:



شکل ۱: مدار پل وتسون

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon \qquad .k \approx 2 \tag{۱}$$

بر روی هر عضو خرپا چهار عدد کرنش‌سنج قرار دارد که تشکیل یک پل وتستون می‌دهند. با توجه به آن‌که مقاومت اولیه کرنش‌سنج‌ها یکسان است، با حل معادلات مدار خواهیم داشت:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$

$$\frac{e}{E} = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4}{\sum_{i=1}^{4} R_i} = \frac{(\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4)}{4R}$$
$$= \frac{k}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4). \ [\frac{mV}{V}] \tag{۲}$$

با توجه به اینکه دو عدد کرنش‌سنج‌ها به صورت طولی و دو عدد کرنش‌سنج‌ها به صورت عرضی بر روی عضو خرپا نصب شده‌اند، بنابراین کرنش آن‌ها به کمک ضریب پواسون محاسبه می‌شود.

طبق رابطه پواسون (ν):

$$\varepsilon_2 = -\nu\varepsilon_1 \tag{۳}$$

هم‌چنین می‌دانیم:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_4 = -\nu\varepsilon_1 = -\nu\varepsilon_3 \tag{۴}$$

در نهایت با جایگذاری فرمول ۴ در فرمول مدار پل وتستون (فرمول ۲) به‌دست می‌آید:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{k}{4}(\varepsilon_1 - (-\nu\varepsilon_1) + \varepsilon_1 - (-\nu\varepsilon_1)) = \frac{k}{2}\varepsilon_1(1+\nu) \tag{۵}$$

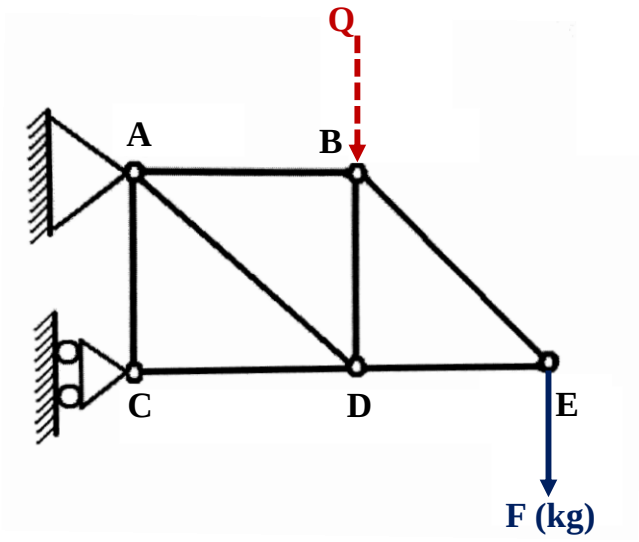
برای تعیین نیروی محوری در اعضای خرپا از رابطه تنش و قانون هوک استفاده می‌شود:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \ \sigma = E\varepsilon_1$$
$$F = E\varepsilon_1 A \tag{۶}$$

ب) محاسبه خیز یک نقطه خرپا

برای به‌دست آوردن جابجایی نقطه‌ای از خرپا (مانند B) نیاز است یک نیروی غیر واقعی مانند Q بر نقطه مورد نظر اعمال شود (شکل ۲). سپس با روش کاستیگلیانو، مقدار جابجایی عمودی کل خرپا محاسبه می‌شود. جابجایی عمودی Y_B نقطه B طبق قضیه کستیگلیانو [۱]:

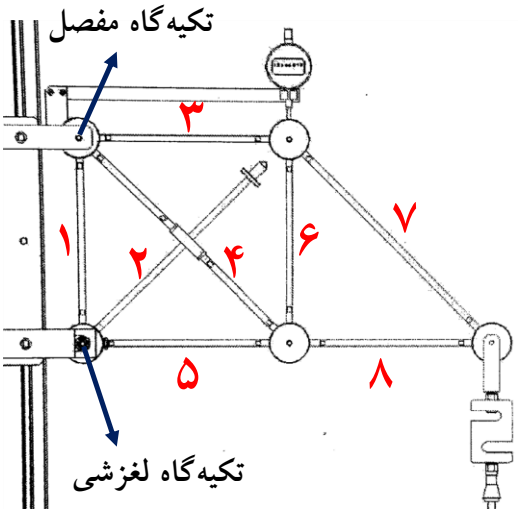
$$Y_B = \sum_{i=1}^{n}(\frac{F_i L_i}{A_i E})\frac{\partial F_i}{\partial Q} = \frac{1}{E}\sum_{i=1}^{n}(\frac{F_i L_i}{A_i})\frac{\partial F_i}{\partial Q} \tag{۷}$$

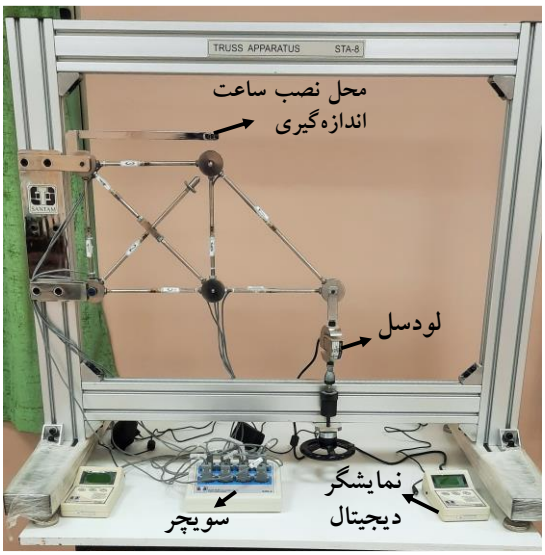


شکل ۲: شماتیک خرپا مورد آزمایش

۳-۳-۲- شرح دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش خرپا دارای ۸ عضو دو نیرویی (شماره ۱-۸) است که مطابق شکل ۳ در ساختمان سازه خرپا به کار رفته است. مجموعه خرپا دارای دو تکیه‌گاه است که دو حالت لغزنده و ثابت دارند. از یک لودسل جهت اعمال نیروی خارجی رو به پایین استفاده شده است. به کمک چرخاندن فلکه متصل به لودسل، نیروی خارجی مدنظر به خرپا اعمال می‌شود. جهت اندازه‌گیری جابجایی عمودی خرپا، در قسمت بالای خرپا اهرمی قرار دارد تا با نصب ساعت اندازه‌گیری بر روی آن، جابجایی عمودی خرپا نشان داده شود. هم‌چنین یک عدد سوئیچر ۸ کاناله‌ای و دو عدد نمایشگر دیجیتال برای نمایش میزان کرنش و نیروی هر عضو تعبیه شده است.





شکل ۳: تصویر دستگاه آزمایش خرپا

۴-۳-۲- روش آزمایش

ابتدا کانکتورهای هر عضو خرپا مطابق شماره خودش به پورت‌های سوئیچر وصل شود. کابل سوئیچر جهت نمایش سیگنال هر عضو به نمایشگر کرنش متصل شود. در گام دیگر نمایشگر نیرو با کابل به لودسل وصل شود. ضمناً آداپتور نمایشگرها باید به پریز برق وصل شوند.

۱-۴-۳-۲- محاسبه نیروی اعضای خرپا

دستگاه‌های نمایشگر کرنش و نیرو را روشن کنید. در ابتدا با چرخاندن فلکه نیرو، پیش‌باری در حدود kgf ۵ بر انتهای خرپا اعمال شود به طوری که مقدار آن در صفحه نمایشگر نیرو مشاهده شود. در این حالت نیاز است مقدار کرنش و نیرو تمامی اعضا با فشردن کلید Zero نمایشگرها، صفر شوند.

برای انجام آزمایش با چرخاندن فلکه نیرو در هر مرحله kgf ۵ نیرو به خرپا اعمال می‌شود. کرنش‌ها در بار معلوم را از روی نمایشگر قرائت کرده و مطابق جدول ۱ یادداشت کنید. هم‌چنین به ظرفیت لودسل (kgf ۲۰۰) و حداکثر نیرو اعمالی به خرپا توجه داشته باشید.

مقادیر قطر، طول اعضای خرپا را یادداشت کنید. ضریب پواسون ۰.۲۵ و مقدار k تقریبا ۲ فرض می‌شود.

جدول ۱: نتایج آزمایشگاهی محاسبه نیروی اعضای خرپا

Force [kgf]	$\frac{e}{E}[\times 10^{-4}\frac{mV}{V}]$							
Force	**Channel 1**	**Channel 2**	**Channel 3**	**Channel 4**	**Channel 5**	**Channel 6**	**Channel 7**	**Channel 8**

خواسته‌های آزمایش محاسبه نیروی اعضای خرپا

۱. به کمک روابط تئوری، مقادیر نیرو در هر یک از عضوهای خرپا را بر حسب نیروی خارجی F به‌دست آورید.

۲. به کمک روابط تجربی، مقدار نیرو در هر عضو خرپا را به‌دست آورده و با مقادیر تئوری آن مقایسه کنید (تکمیل جدول ۲ برای هر عضو).

جدول ۲: مقایسه نیرو هر عضو ۱ در آزمایش خرپا

Link 1						
d = ……..., L = ……...						
$F\ [kgf]$	$F\ [N]$	$\frac{e}{E}[\times 10^{-4}\frac{mV}{V}]$	$\varepsilon_1(exp)$	F_{exp}	F_{Theory}	$Error\ (F)$

۳. قسمت ۱ و ۲ را با بستن قطعه ثابت کننده تکیه‌گاه بر روی مفصل غلطکی تکرار کنید (در این حالت مفصل C گیردار می‌شود).

۲-۴-۳-۲- محاسبه خیز یک نقطه خرپا

ابتدا دستگاه ساعت اندازه‌گیری را در محل مخصوص خود نصب کنید. دستگاه نمایشگر نیرو را روشن کنید. در ابتدا با پیچاندن فلکه نیرو، پیش‌باری در حدود ۵ kgf بر انتهای خرپا اعمال شود به طوری که مقدار آن در صفحه نمایشگر نیرو مشاهده شود. در این حالت نیاز است مقدار نیرو با فشردن کلید Zero نمایشگر، صفر شود. هم‌چنین مقدار دستگاه ساعت اندازه‌گیری هم بر روی صفر تنظیم شود.

برای انجام آزمایش با چرخاندن فلکه نیرو در هر مرحله ۵ kgf نیرو به خرپا اعمال می‌شود. میزان جابجایی نقطه مورد نظر در هر بارگذاری و مطابق جدول ۳ یادداشت شود. در زمان آزمایش به دقت دستگاه ساعت اندازه‌گیری، ظرفیت لودسل (۲۰۰ kgf) و حداکثر نیرو اعمالی به خرپا توجه داشته باشید.

مقادیر قطر، طول اعضای خرپا را یادداشت کنید. ضریب پواسون ۰.۲۵ و مقدار k تقریبا ۲ فرض می‌شود.

جدول ۳: نتایج آزمایشگاهی محاسبه خیز یک نقطه خرپا

$Force\ [kgf]$								
$Y_{B\,(exp)}\ [mm]$								

خواسته‌های آزمایش محاسبه خیز یک نقطه خرپا

۱. به کمک روابط تئوری (قضیه کاستیلیانو)، مقادیر جابجایی نقطه مورد نظر (نقطه B در شکل ۲) را بر حسب نیروی خارجی F به‌دست آورید.

۲. مقدار تجربی جابجایی نقطه مورد نظر (نقطه B در شکل ۲) را با مقادیر تئوری آن مقایسه کنید (تکمیل جدول ۴).

جدول ۴: مقایسه نتایج تجربی و تئوری خیز یک نقطه خرپا

$F\ [kgf]$	$F\ [N]$	$Y_{B\,(exp)}\ [mm]$	$Y_{B\,(Theory)}\ [mm]$	$Error\ (Y_B)$

۳. قسمت ۱ و ۲ را با بستن قطعه ثابت کننده تکیه‌گاه بر روی مفصل غلطکی تکرار کنید (در این حالت مفصل C گیردار می‌شود).

۴. دلایل خطا در دو آزمایش خرپا را بیان کنید.

۲-۳-۵- نتیجه گیری

در مورد نتایج آزمایش خرپا بحث و نتیجه‌گیری کنید.

۲-۳-۶- نکات تامینی

- به محدوده بارهای اعمالی برای هر آزمایش دقت کنید.
- پس از بارگذاری بر روی خرپا و جهت بازگردادن به حالت اولیه، لازم است فلکه نیرو را به آهستگی چرخانده و بار برداری کنید.
- جهت استفاده از نمایشگر دیجیتال: ابتدا تمام اتصالات آن را وصل کرده و سپس روشن کنید. هم‌چنین جهت تغییر آزمایش ابتدا دستگاه نمایشگر دیجیتال را خاموش کرده و سپس جابجا کنید.
- پس از اتمام آزمایش، دستگاه را به حالت قبل از آزمایش مرتب کنید.

۴-۲- آزمایش ۴: کمانش ستون‌ها

۱-۴-۲- هدف آزمایش

ملاحظه پدیده کمانش در تیرهای طویل با مقطع باریک تحت تاثیر نیروی فشاری و بررسی:

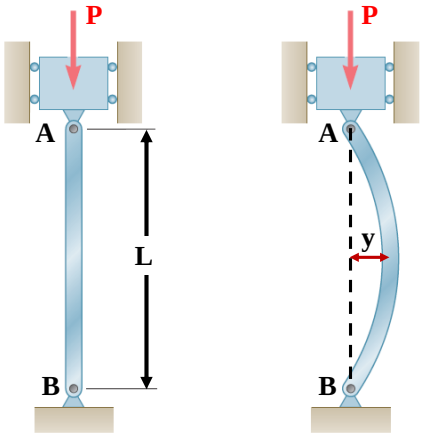
۱. مدول الاستیسیته و مقایسه با مقدار تئوری
۲. نیروی بحرانی و مقایسه با مقدار تئوری

۲-۴-۲- تئوری آزمایش

ستون‌ها سازه‌هایی هستند که طول آن‌ها نسبت به سطح مقطع آن‌ها زیاد است و تحت بار فشاری قرار می‌گیرند. تغییر فرم قائم ستون‌ها قبل از شکست اهمیت بالایی دارد که اصطلاحاً به آن کمانش ستون می‌گویند. مطابق شکل ۱، ستون قائمی با طول L که تحت بار فشاری P قرار گرفته است را در نظر بگیرید. با افزایش نیروی P، تیر به اندازه y تغییر مکان افقی دارد. با نوشتن معادله دیفرانسیل و حل آن، مقدار بار بحرانی به‌دست می‌آید:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{{L_e}^2} \qquad (۱)$$

در معادله (۱)، EI صلبیت خمشی و L_e طول موثر است.



شکل ۱: کمانش ستون دو سر مفصل [۱]

طول موثر (L_e) تابعی از طول (L) است که به توجه به شرایط مرزی، مقدار آن به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [۱].

مفصل – مفصل: $L_e = L$

مفصل – گیردار: $L_e = 0.7\,L$

گیردار – گیردار: $L_e = 0.5\,L$

محاسبه EI

بیشینه جابجایی تیر دو سر مفصل که از وسط تحت بارگذاری عرضی قرار گرفته است، از معادله (۲) به‌دست می‌آید:

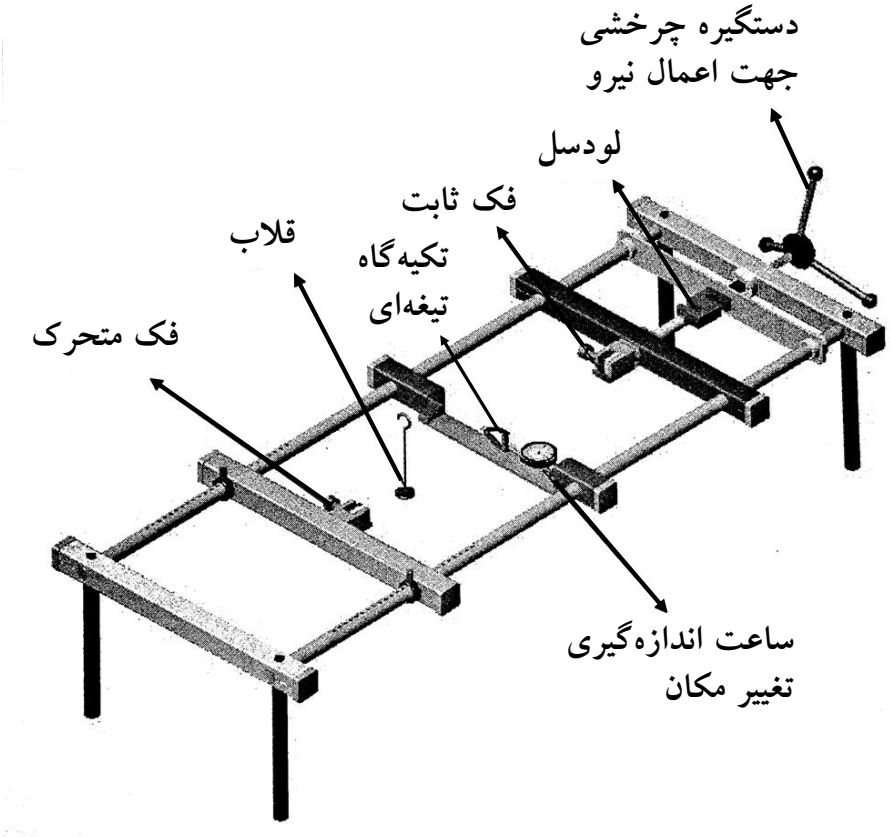
$$y_{max} = \frac{L^3}{48EI} P \qquad (۲)$$

در نتیجه به کمک شیب نمودار $P - y_{max}$، مقدار EI تجربی حاصل می‌شود.

$$P = \frac{48EI}{L^3}\, y_{max} \qquad (۳)$$

۳-۴-۲- شرح دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش کمانش از دو فک ثابت و متحرک، دستگاه چرخشی (جهت اعمال نیروی فشاری) و یک ساعت اندازه‌گیری جهت به‌دست آوردن تغییر مکان قائم تیر تشکیل شده است (شکل ۲). فک متحرک به کمک دو پین دستی قابل تغییر مکان است. به کمک یک نیروسنج دیجیتال که مستقیما به لودسل متصل است، نیروی اعمالی به تیر قابل مشاهده است. فک‌های دستگاه دارای پیچ و صفحات مخصوص جهت ایجاد شرایط انتهایی مختلف (پین و گیردار) هستند.



شکل ۲: تصویر دستگاه آزمایش کمانش

۴-۴-۲- روش آزمایش

۱-۴-۴-۲ محاسبه EI تجربی

به منظور محاسبه EI تجربی، به تیر نیروی عرضی وارد کرده و به ازای نیروهای وارده، مقدار خیز تیر در مرکز تیر به‌دست می‌آید.

برای این کار، یک تیر فولادی را جهت نصب روی دستگاه آزمایش انتخاب کنید. یک انتهای تیر را به حالت پین درون فک ثابت قرار داده و سمت دیگر تیر را به حالت پین درون فک متحرک قرار دهید (آنقدر مکان فک متحرک را جابجا کنید تا تیر در جای خود قرار گیرد). حال پین‌های فک متحرک را در جای خود قرار دهید تا این فک هم ثابت شود و با چرخاندن فلکه نیرو، تیر را در جای خود تثبیت کنید. تکیه‌گاه تیغه‌ای را در فاصله وسط تیر تنظیم کرده و ساعت اندازه‌گیری و قلاب اعمال نیرو را در محل خود بر روی آن قرار دهید. دقت کنید قبل از تثبیت تیر در جای خود، حلقه‌ی قلاب اعمال نیرو به دور تیر انداخته شود. حال مقدار ساعت اندازه‌گیری را صفر کرده و با قرار دادن وزنه‌های مختلف بر روی قلاب، مقادیر تغییر مکان تیر را مطابق جدول ۱ یادداشت کنید.

مقادیر طول، عرض، ضخامت و جنس تیر را یادداشت کنید.

الف) آزمایش را برای تیر فولادی با ابعاد متفاوت انجام دهید.

ب) آزمایش را با تغییر جنس نمونه آزمایش به برنجی تکرار کنید.

جدول ۱: نتایج آزمایشگاهی تغییر مکان تیر جهت محاسبه EI تجربی.

L = ……, b = ……, t = …… , Material……								
$W\ [kg]$								
$y_{\max(exp)}$ $[\times 10^{-2}\ mm]$								

خواسته‌های آزمایش محاسبه EI تجربی

۱. به کمک روابط تئوری، مقدار EI را برای تیر به‌دست آورید.

۲. به کمک روابط تجربی و رسم نمودار $y_{max} - P$، مقدار EI تجربی به‌دست آورید و با مقدار تئوری مقایسه کنید (از برازش منحنی بر روی داده‌ها استفاده کنید).

- درصد خطای نسبی را به‌دست آورید.
- دلایل خطا را بیان کنید.

۳. قسمت‌های ۱ و ۲ را برای تیرهای فولادی با ابعاد متفاوت و برنجی به‌دست آورید.

۲-۴-۴-۲ محاسبه نیروی بحرانی

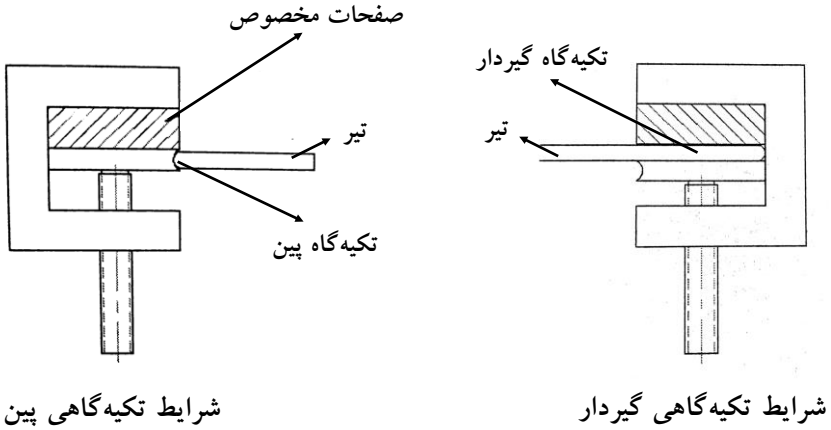
در قسمت دوم آزمایش، نیروی بحرانی تیر را در شرایط تکیه‌گاهی متفاوت (پین ـ پین، پین ـ گیردار، گیردار ـ گیردار) و برای سه تیر مختلف فولادی و برنجی به‌دست می‌آید.

برای این کار، یک تیر فولادی را جهت نصب روی دستگاه آزمایش انتخاب کنید. دو سر تیر را همانند شکل ۳ جهت اعمال شرایط تکیه‌گاهی مختلف قرار دهید.

- **حالت پین ـ پین:** در این حالت و مطابق شکل ۳، موقعیت تیر در فک باید طوری باشد که تیر در وسط شکاف قرار بگیرد (برای هم راستا کردن از صفحات مخصوص مکعبی شکل استفاده شود). تیر را در جای خود تثبیت کرده و ساعت اندازه‌گیری را در وسط تیر تنظیم کنید. برای شروع آزمایش، نمایشگر دیجیتال را روشن کنید. کمی پیش بار اعمال کرده و سپس مقدار نمایشگر و ساعت اندازه‌گیری را صفر کنید. حال به کمک فلکه چرخشی نیرو اعمال کرده و مقادیر نیرو (P) و جابجایی مرکز تیر (δ) را مطابق جدول ۲ یادداشت کنید. نیرو را تا جایی افزایش دهید که دیگر با افزایش تغییر مکان، مقدار نیرو افزایش پیدا نکند.
- **حالت تکیه گاهی پین ـ گیردار:** لازم است یک سمت تیر به صورت پین در فک قرار گیرد (بهتر است فک ثابت باشد تا نیرو با دقت بیشتری اعمال شود) و یک سمت دیگر تیر مطابق شکل ۳ به صورت گیردار در داخل فک ثابت شود (در این فک به کمک صفحات مکعبی دو سمت تیر را در یک راستا تنظیم کنید).
- **حالت تکیه گاهی گیردار ـ گیردار:** هر دو سمت تیر به صورت گیردار در فک‌ها قرار می‌گیرد.

جدول ۲: نتایج آزمایشگاهی محاسبه بار بحرانی (حالت پین ـ پین).

L = ……, b = ……, t = …… , Material……							
$P\ [kgf]$							
$\delta_{exp}\ [\times 10^{-2}\ mm]$							



شکل ۳: شرایط متفاوت تکیه‌گاهی

نکات مهم این آزمایش:

- ✓ حتما به ظرفیت لودسل دقت کنید و از اعمال نیرو بیش از ظرفیت لودسل بپرهیزید. در صورتی که نیروی بحرانی تیر بیش از ظرفیت لودسل بود، آزمایش را متوقف کنید.
- ✓ اگر کمانش تیر در جهت محل قرارگیری ساعت اندازه‌گیری تغییر مکان داشت، تیر را برگردانده و آزمایش را انجام دهید.
- ✓ برای محاسبه ساده‌تر بار بحرانی، بهتر است مقدار جابجایی را در هر مرحله معیار قرار دهید.
- ✓ مقادیر طول، عرض، ضخامت و جنس تیر را یادداشت کنید.
- ✓ طولی از تیر که در شرایط تکیه‌گاهی گیردار داخل فک قرار گرفته است را از طول کل تیر کم کنید.
- ✓ در این آزمایش به قلاب اعمال نیرو نیاز نیست.

الف) آزمایش را برای تیر فولادی با ابعاد متفاوت انجام دهید.

ب) آزمایش را با تغییر جنس نمونه آزمایش به برنجی تکرار کنید.

خواسته‌های آزمایش محاسبه نیروی بحرانی

۱. به کمک روابط تئوری، مقدار نیروی بحرانی را برای تیر به‌دست آورید.

۲. به کمک روابط تجربی و رسم نمودار $P-\delta$، مقدار بار بحرانی را به‌دست آورید و با مقدار تئوری آن مقایسه کنید.

- درصد خطای نسبی را محاسبه کنید.
- دلایل خطا را بیان کنید.

۳. قسمت‌های ۱ و ۲ را برای تیرهای فولادی با ابعاد متفاوت و برنجی به‌دست آورید.

۴. منحنی‌های $P-\delta$ یک تیر که در سه شرایط متفاوت تکیه‌گاهی به‌دست آمده است را در یک نمودار رسم کنید و تاثیر شرایط تکیه‌گاهی در نیروی بحرانی را بررسی کنید.

۵. منحنی‌های $P-\delta$ را در شرایط تکیه‌گاهی یکسان برای هر سه تیر در یک نمودار رسم کنید و تاثیر تغییر جنس و تغییر ابعاد بررسی کنید.

۵-۴-۲- نتیجه گیری

در مورد نتایج آزمایش کمانش ستون‌ها بحث و نتیجه‌گیری کنید.

۶-۴-۲- نکات تامینی

- به ظرفیت لودسل جهت اعمال نیرو دقت کنید.

- در شرایط تکیه‌گاهی گیردار ـ گیردار، در صورتی که نیروی بحرانی تیر بیش از ظرفیت لودسل بود، آزمایش را متوقف کنید.
- پس از بارگذاری بر روی دستگاه آزمایش و جهت بازگردادن به حالت اولیه، لازم است فلکه نیرو را به آهستگی چرخانده و بار برداری کنید.
- جهت استفاده از نمایشگر دیجیتال: ابتدا تمام اتصالات آن را وصل کرده و سپس روشن کنید. هم‌چنین جهت تغییر آزمایش ابتدا دستگاه نمایشگر دیجیتال را خاموش کرده و سپس جابجا کنید.
- پس از اتمام آزمایش، دستگاه را به حالت قبل از آزمایش مرتب کنید.

۵-۲- آزمایش ۵: پیچش پلاستیک

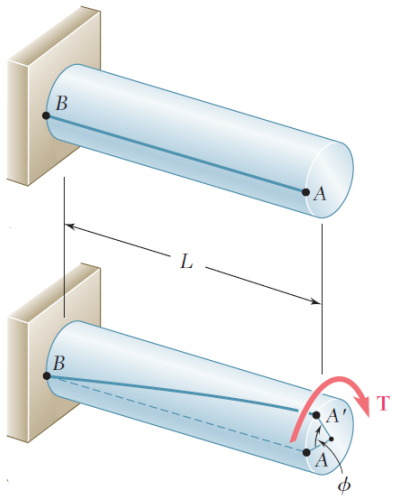
۱-۵-۲- هدف آزمایش

۱. بررسی رابطه بین گشتاور پیچشی و زاویه پیچش و محاسبه مدول برشی
۲. بررسی مقدار تنش باقیمانده و رسم منحنی آن
۳. بررسی تنش تسلیم در جسم تحت پیچش

۲-۵-۲- تئوری آزمایش

الف) پیچش در ناحیه الاستیک

میله‌ای به شکل ۱ را فرض کنید که از یک طرف آزاد و از طرف دیگر به تکیه‌گاه ثابت متصل است. اگر گشتاور پیچشی T به انتهای آزاد میله وارد شود، میله گردان می‌پیچد و انتهای آزاد آن به اندازه زاویه ϕ می‌چرخد. در صورتی‌که طول میله برابر L، مدول برشی G و ممان اینرسی قطبی $J=\frac{\pi}{2}r^4$ باشد، مقدار تغییرات زاویه پیچش سطح مقطع میله، ϕ به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱]:



شکل ۱: زاویه پیچشی در میله‌ی یک سر گیردار [۱]

$$\phi=\frac{TL}{JG} \qquad (۱)$$

با توجه به رابطه گشتاور پیچشی $T=\frac{GJ}{L}\phi$، شیب نمودار $T-\phi$ برابر با $k_t=\frac{GJ}{L}$ است. از آنجا که k_t به مقادیر ثابت جنس میله و خصوصیات هندسی میله وابسته است، بنابراین رابطه بین T,ϕ خطی می‌باشد. لذا با داشتن شیب نمودار $T-\phi$، مقدار مدول برشی میله در ناحیه الاستیک به‌دست می‌آید.

ب) پیچش در ناحیه پلاستیک

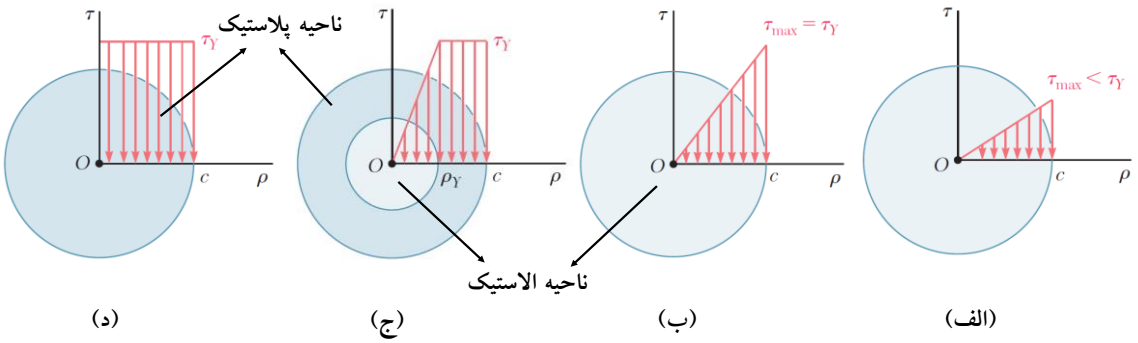
یک شفت توپر دایره‌ای از ماده ایده‌آل الاستوپلاستیک را در نظر بگیرید. تا زمانی‌که تنش برشی از تنش تسلیم τ_Y بیشتر نباشد، توزیع تنش به صورت خطی است و قانون هوک برقرار است (شکل ۲– الف). در این حالت تنش برشی بیشینه طبق رابطه زیر است.

$$\tau_{max} = \frac{Tc}{J} \qquad (۲)$$

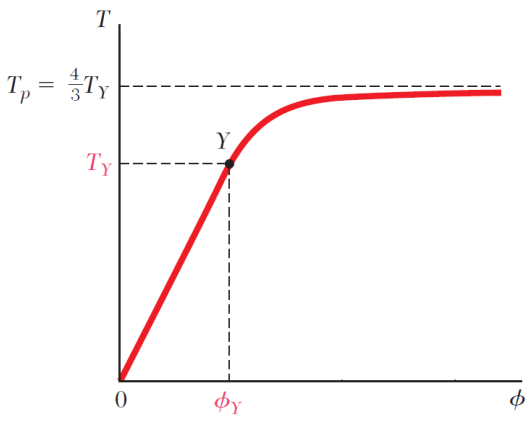
که در آن c شعاع میله است. با افزایش گشتاور پیچشی، تنش برشی بیشینه به تنش تسلیم می‌رسد. به این گشتاور، بیشینه گشتاور الاستیک (T_Y) می‌گویند (شکل ۲– ب). با افزایش بیشتر گشتاور، ناحیه پلاستیک در میله به‌وجود می‌آید. این ناحیه در پیرامون یک هسته الاستیک به شعاع ρ_Y تشکیل می‌دهد (شکل ۲– ج). در حالت (ناحیه) پلاستیک، تنش به صورت یکنواخت τ_Y است. با افزایش بیشتر گشتاور، ناحیه پلاستیک گسترش می‌یابد تا تمام میله را فرا گیرد (شکل ۲– د). در این حالت گشتاور، که متناظر با تغییر شکل پلاستیک کامل است، گشتاور پلاستیک (T_P) نام دارد و به صورت حدی به به‌دست می‌آید:

$$T_P = \frac{4}{3}T_Y \qquad (۳)$$

نمودار تنش تغییر شکل این فرایند در شکل ۳ نشان داده شده است [۱].



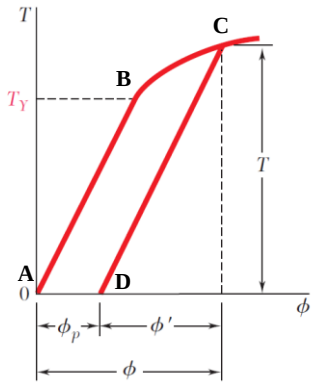
شکل ۲: توزیع تنش در مقاطع عرضی شفت بر اثر افزایش گشتاور [۱]



شکل ۳: نمودار تنش پلاستیک – زاویه پیچش [۱]

ج) تنش‌های باقیمانده

در قسمت‌های قبل مشاهده شد که وقتی گشتاور پیچشی وارد بر یک میله به اندازه کافی بزرگ است، ناحیه پلاستیک در میله به‌وجود می‌آید. در این حالت، با حذف تدریجی گشتاور (فرایند باربرداری)، تنش و کرنش در امتداد یک خط کاهش می‌یابند اما تنش نهایی در شفت معمولاً صفر نیست و تنش باقیمانده در اغلب نقاط شفت به‌وجود می‌آید. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، تنش میله در فرایند بارگذاری از نقطه A تا نقطه C حرکت کرده است. قسمت A تا B در ناحیه الاستیک و قسمت B تا C در ناحیه پلاستیک است. سپس در فرایند بار برداری از نقطه C به D حرکت کرده است. ملاحظه می‌شود که مقدار زاویه پیچش در انتهای فرایند باربرداری صفر نمی‌شود. در واقع فرایند بارگذاری – بار برداری باعث ایجاد تغییر شکل دائمی در میله می‌شود.



شکل ۴: نمودار تنش – زاویه پیچش در ماده الاستوپلاستیک [۱]

د) معیار تسلیم

تئوری‌های مختلفی برای شکست فلزات وجود دارد که معمولاً کاربرد آن‌ها بر اساس شکل پذیر یا شکننده بودن مواد متفاوت است. از تئوری‌های پذیرفته شده شکست برای مواد شکل پذیر (معیارهای تسلیم)، معیار ترسکا (بیشترین تنش برشی)، معیار فون–مایزز (انرژی واپیچش) در اینجا معرفی می‌شود.

- **معیار ترسکا:**

بنابر معیار ترسکا، تنش برشی تسلیم زمانی آغاز می‌شود که بیشترین تنش برشی در هر جزء ماده با بیشترین تنش برشی در نمونه آزمایش کشش همان ماده زمانی که شروع به تسلیم می‌کند برابر یا بیشتر باشد.

بنابراین با توجه به تعریف معیار ترسکا، استحکام تسلیم برشی برابر است [۲]:

$$\tau_Y = S_{Sy} = 0.5\, S_y \qquad (۴)$$

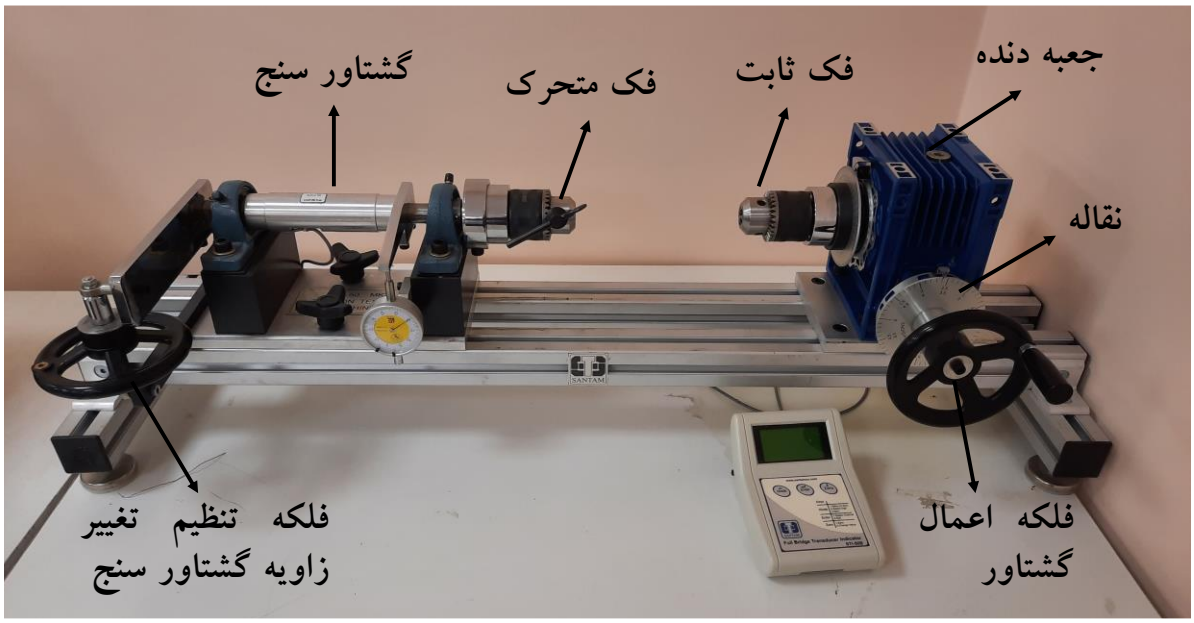
- **معیار** فون–مایزز:

بنابر تئوری انرژی واپیچش، تسلیم هنگامی رخ می‌دهد که انرژی کرنشی واپیچش در واحد حجم ماده برابر یا بیشتر از انرژی کرنشی واپیچش در واحد حجم نمونه‌ای از همان ماده در نقطه تسلیم در آزمایش کشش یا فشار ساده شود. فرمول نهایی این تئوری به صورت زیر به‌دست می‌آید [۲]:

$$\tau_Y = S_{Sy} = 0.577\ S_y \qquad (۵)$$

۲-۵-۳- شرح دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش از دو فک ثابت و متحرک، یک جعبه‌دنده ۱/۶ جهت اعمال گشتاور، دو نقاله جهت سنجش مقدار زاویه پیچش، یک گشتاورسنج و یک سیستم متعادل کننده تشکیل شده است (شکل ۵). نمونه آزمایش بین دو فک قرار گرفته و گشتاور اعمالی باعث تغییر زاویه نمونه آزمایش و گشتاورسنج می‌شود. مقدار تغییر زاویه گشتاورسنج از حالت اولیه به کمک فلکه سمت چپ دستگاه قابل تصحیح است. به این ترتیب تغییر زاویه نمونه آزمایش به کمک نقاله‌ها با دقت ۰.۱ درجه قابل خواندن است. هم‌چنین به ازای هر ۱ دور دوران فلکه اعمال گشتاور، نمونه آزمایش ۶ درجه دوران می‌کند.



شکل ۵: دستگاه آزمایش پیچش پلاستیک

۲-۵-۴- روش آزمایش

۲-۵-۴-۱ بررسی رابطه بین گشتاور پیچشی و زاویه پیچش و محاسبه مدول برشی

به منظور محاسبه مدول برشی تجربی و بررسی رابطه گشتاور پیچشی و زاویه پیچش در ناحیه الاستیک، به شفت گشتاور وارد کرده و به ازای گشتاورهای وارده، مقدار زاویه پیچش شفت به‌دست می‌آید (فرایند بارگذاری).

برای این کار، یک نمونه فولادی را جهت نصب روی دستگاه آزمایش انتخاب کنید. دو انتهای شفت را درون فک‌ها قرار داده و به کمک پیچ تنظیم صفر، گشتاورسنج را صفر کنید. قاب ساعت سیستم متعادل کننده را بچرخانید تا عقربه ساعت روی عدد صفر تنظیم شود. دستگاه نمایشگر دیجیتال را روشن کنید. برای فرایند بارگذاری (مرحله رفت)، با چرخاندن فلکه جعبه‌دنده گشتاور را اعمال کرده و مقادیر گشتاور و زاویه پیچش

را مطابق جدول ۱ یادداشت کنید. فرایند بارگذاری تا جایی ادامه دارد که تغییرات گشتاور نسبت به زاویه کم شود. مقادیر طول، قطر و جنس شفت را یادداشت کنید. لازم به ذکر است که هر ۱ دور دوران فلکه جعبه دنده، نمونه آزمایش ۶ درجه دوران می‌کند.

الف) آزمایش را با تغییر جنس نمونه آزمایش به آلومینیومی تکرار کنید.

ب) آزمایش را با تغییر جنس نمونه آزمایش به برنجی تکرار کنید.

جدول ۱: نتایج آزمایشگاهی محاسبه مدول برشی در آزمایش پیچش پلاستیک (فرایند بارگذاری).

L = ……, t = …… , Material……								
فرایند بارگذاری	ϕ [°]							
	T_{exp} $[N.m]$							

خواسته‌های آزمایش بررسی رابطه بین گشتاور پیچشی و زاویه پیچش و محاسبه مدول برشی

۱. با توجه به داده‌های آزمایش، جدول ۲ را تکمیل کنید.

جدول ۲: نتایج آزمایش پیچش پلاستیک برای نمونه آزمایش فولادی

ϕ $[degree]$	ϕ $[rad]$	T $[N.m]$	τ $[MPa]$	*Shear modulus*		*Principal stresses*	
				G $[GPa]$	G_{theory}	σ_1	σ_2

۲. نمودار $T-\phi$ تجربی را رسم کرده و مقدار مدول برشی تجربی را به‌دست آورید و با مقدار تئوری مقایسه کنید (از برازش منحنی بر روی داده‌ها استفاده کنید).
- درصد خطای نسبی را به‌دست آورید.
- دلایل خطا را بیان کنید.

۳. با توجه به داده‌های آزمایش، نمودار $\tau-\gamma$ در ناحیه الاستیک را برای نمونه فولادی رسم کنید.

۴. با توجه به رابطه بین تنش‌های اصلی و τ در پیچش، رابطه بین γ و E و G را به‌دست آورید؟

۵. برای یکی از حالات فوق دایره موهر رسم نموده و از روی آن تنش‌های اصلی و جهات آنرا تعیین کنید ؟

۶. قسمت‌های ۱ و ۲ را برای تیرهای آلومینیومی و برنجی به‌دست آورید.

۲-۴-۵-۲ بررسی تنش باقیمانده و رسم منحنی آن

این قسمت در ادامه آزمایش الف است. پس از اتمام فرایند بارگذاری (مرحله رفت)، مرحله باربرداری (مرحله برگشت) انجام می‌شود. برای فرایند باربرداری، با چرخاندن فلکه جعبه‌دنده، گشتاور اعمالی را کاهش داده و مقادیر گشتاور و زاویه پیچش را مطابق جدول ۳ یادداشت کنید. فرایند باربرداری تا جایی ادامه دارد که مقدار گشتاور صفر شود.

الف) آزمایش را با تغییر جنس نمونه آزمایش به آلومینیومی تکرار کنید.

ب) آزمایش را با تغییر جنس نمونه آزمایش به برنجی تکرار کنید.

جدول ۳: نتایج آزمایشگاهی بررسی تنش باقیمانده در آزمایش پیچش پلاستیک (فرایند باربرداری).

L = ……, t = …… , Material……								
فرایند باربرداری	ϕ [°]							
	T_{exp} $[N.m]$							

خواسته‌های آزمایش بررسی تنش باقیمانده

۱. مقدار زاویه پیچشی باقیمانده را برای شعاع خارجی میله به‌دست آورید.

۲. نمودار $T-\phi$ تجربی را رسم کرده (فرایند بارگذاری و باربرداری) و مقدار مدول برشی تجربی را در فرایند بارگذاری (A تا B) و باربرداری (C تا D) به‌دست آورید و با هم مقایسه کنید (از برازش منحنی بر روی داده‌ها استفاده کنید).

- توضیح دهید که چرا دو خط با هم موازی هستند.

۳. قسمت‌های ۱ و ۲ را برای تیرهای آلومینیومی و برنجی به‌دست آورید.

۳-۴-۵-۲- بررسی تنش تسلیم

در این قسمت آزمایش، مجدداً به نمونه فولادی گشتاور اضافه کرده تا به ناحیه پلاستیک برسد و در نهایت منجر به شکست آن شود. مقادیر گشتاور و زاویه پیچشی را مطابق جدول ۴ یادداشت کنید.

الف) آزمایش را با تغییر جنس نمونه آزمایش به آلومینیومی تکرار کنید.

ب) آزمایش را با تغییر جنس نمونه آزمایش به برنجی تکرار کنید.

جدول ۴: نتایج آزمایشگاهی بررسی تنش تسلیم در آزمایش پیچش پلاستیک.

L = ……, t = …… , Material……									
ϕ [°]									
T_{exp} $[N.m]$									

خواسته‌های آزمایش بررسی تنش تسلیم

۱. رابطه زیر را اثبات کنید.

$$T = \frac{4}{3}T_y(1 - \frac{1}{4}\frac{\phi_y^3}{\phi^3})$$

۲. نمودار $T - \phi$ تجربی را رسم کنید (فرایند کامل).

۳. در مقابل چه مقدار از T تمام جسم وارد منطقه پلاستیک می‌شود.

۴. در مورد روش‌های معیارهای فون-مایزز و ترسکا توضیح دهید و هم‌چنین روابط $\tau_y = 0.577\ S_y$ و $\tau_y = 0.5\ S_y$ را به‌دست آورید.

۵. از روی منحنی $T - \phi$ مقادیر T_y و ϕ_y را به‌دست آورید و از آنجا τ_y را محاسبه کنید و با مقادیر به‌دست آمده از روش‌های تئوری (ترسکا و ون میسز) مقایسه کنید (از نتایج آزمایش کشش و یا کتاب برای S_y تئوری استفاده کنید) (تکمیل جدول ۵).

جدول ۵: مقایسه نتایج تجربی و تئوری تنش برشی تسلیم

	$\phi_{y(exp)}$ $[rad]$	$T_{y(exp)}$ $[N.m]$	$\tau_{y(exp)}$ $[Mpa]$	$S_{y\,(Theory)}$ $[Mpa]$	$\tau_{y(Theory)}$ $[Mpa]$	$Error$ (τ_y)
Tresca theory						
Von Mises theory						

۶. قسمت‌های ۲، ۳ و ۵ را برای تیرهای آلومینیومی و برنجی به‌دست آورید.

۵-۵-۲- نتیجه گیری

در مورد نتایج آزمایش پیچش پلاستیک بحث و نتیجه‌گیری کنید.

۶-۵-۲ نکات تامینی

- به ظرفیت لودسل جهت اعمال گشتاور دقت کنید.
- پس از بارگذاری بر روی دستگاه آزمایش و جهت بازگردادن به حالت اولیه، لازم است فلکه گشتاور را به آهستگی چرخانده و باربرداری کنید.
- جهت استفاده از نمایشگر دیجیتال: ابتدا تمام اتصالات آن را وصل کرده و سپس روشن کنید. هم‌چنین جهت تغییر آزمایش ابتدا دستگاه نمایشگر دیجیتال را خاموش کرده و سپس جابجا کنید.
- پس از اتمام آزمایش، دستگاه را به حالت قبل از آزمایش مرتب کنید.

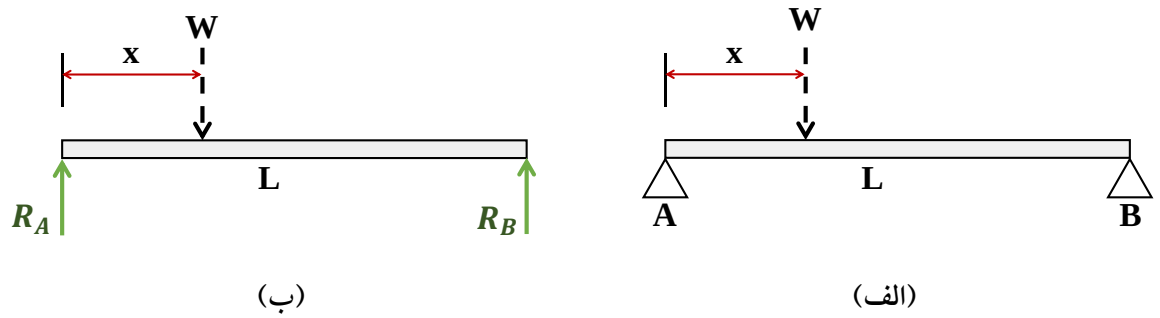
۶-۲- آزمایش ۶: تیر متقارن ۱

۱-۶-۲ هدف آزمایش

۱. محاسبه عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی با جابه‌جایی نیرو در طول تیر و مقایسه آن با مقادیر تئوری
۲. بررسی خیز تیرها با هندسه و جنس‌های مختلف

۲-۶-۲ تئوری آزمایش

تیر متقارنی به طول L را در نظر بگیرید که در فاصله x از تکیه‌گاه A، بار متمرکز W به آن وارد می‌شود (شکل ۱- الف). دیاگرام آزاد این تیر به شکل ۱- ب رسم شده است.



شکل ۱: شماتیک تیر تحت بار متمرکز W.

در این حالت نیروهای عکس‌العمل تیر به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$R_A = \frac{W(L-x)}{L} \quad (۱)$$

$$R_B = \frac{W\,x}{L} \quad (۲)$$

زمانی که تیر منشوری تحت اثر خمش خالص به شکل کمانی از دایره در می‌آید، در محدوده الاستیک مقدار انحنای سطح خنثی از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (۳)$$

که در آن ρ شعای انحنا، M گشتاور خمشی، E مدول الاستیسیته و I گشتاور لختی سطح حول محور خنثای آن است. زمانی که تیر در معرض بارگذاری عرضی قرار می‌گیرد، معادله‌ی ۳ در هر مقطع دلخواه عرضی صدق می‌کند. اما گشتاور خمشی و انحنای سطح خنثی هر دو از مقطعی به مقطع دیگر تغییر می‌کنند. اگر x فاصله مقطع از انتهای سمت چپ تیر باشد، شعاع انحنا برابر است با:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M(x)}{EI} \qquad (۴)$$

برای تعیین شیب و تغییرمکان تیر در هر نقطه، ابتدا معادله دیفرانسیل خطی مرتبه دوم زیر را نوشته می‌شود.

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \qquad (۵)$$

اگر بتوان گشتاور خمشی را به ازای کلیه مقادیر x با تابع M(x) نشان داد، تغییر مکان در هر نقطه از تیر را می‌توان با دو انتگرال‌گیری پیاپی به‌دست آورد. دو ثابت انتگرال گیری را می‌توان از شرایط مرزی حاکم بر مسئله به‌دست آورد.

بنابراین برای تیر شکل ۱ که تحت بار مرکزی W قرار گرفته است، اگر $x = 0.5$ باشد. در این صورت با نوشتن معادله دیفرانسیل خطی و حل آن، مقدار تغییر مکان تیر در وسط تیر برابر است با [۱]:

$$y = \frac{1}{48}\frac{WL^3}{EI} \qquad (۶)$$

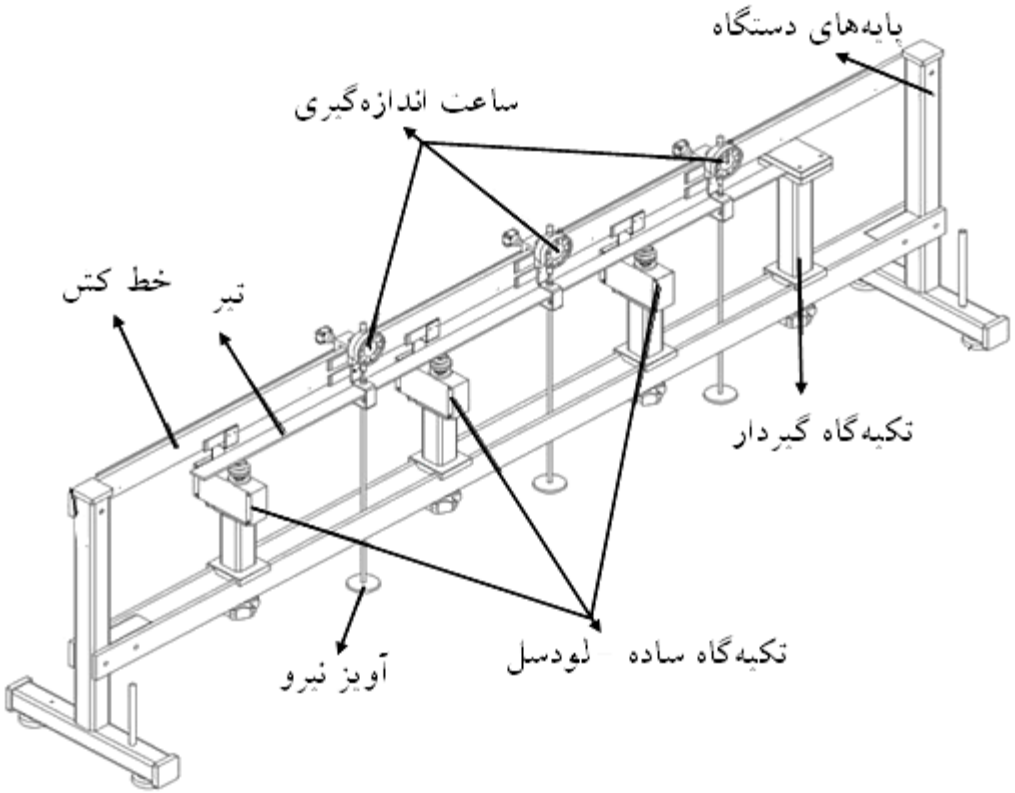
۳-۶-۲ شرح دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش شامل یک اسکلت فلزی است که در آن تیرهای افقی جهت نصب بر روی تکیه‌گاه‌ها، چهار تکیه‌گاه، ساعت‌های اندازه‌گیری، نمایشگر دیجیتال، سوئیچر سه کاناله و یک خط‌کش افقی در بالای تیر جهت تعیین فاصله‌ها تعبیه شده است (شکل ۲).

تکیه‌گاه‌ها از دو نوع ساده و گیردار هستند. تیغه تکیه‌گاه‌ها را می‌توان توسط پیچ تنظیم آن (زیر تیغه) در ارتفاع مورد نظر تنظیم کرد. تکیه‌گاه‌های ساده به صورت نیرو سنجی هستند (سه تکیه‌گاه) که نیروی وارد بر تکیه‌گاه‌ها در اثر اعمال نیرو را بر روی نمایشگر نیرو نشان می‌دهند. تکیه‌گاه گیردار را می‌توان با بستن چهار پیچ آلن، ثابت کرد.

در این آزمایش‌ها جهت اعمال نیرو از آویزهای نیرو استفاده می‌شود که نیرو با قرار دادن وزنه‌هایی در انتهای آویز اعمال می‌شود.

توجه: دقت کنید که نشانه‌های تعبیه شده در روی کلیه لوازم مثل ساعت‌های اندازه‌گیری، تکیه‌گاه‌ها و آویزها همگی ۵ cm از نقطه اثر آن‌ها فاصله دارند.



شکل ۲: دستگاه آزمایش تیر متقارن

۴-۶-۲- روش آزمایش

۱-۴-۶-۲- بررسی نیروهای عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها به صورت تجربی و تئوری

ابتدا یک تیر فولادی را بین دو تکیه‌گاه ساده و در فاصله دلخواه قرار دهید (مثلا حدود ۱۰۰ cm). به کمک پیچ‌های تنظیم تکیه‌گاه‌ها، ارتفاع دو تکیه‌گاه ساده را جهت افقی قراردادن تیر تنظیم کنید (به کمک ساعت اندازه‌گیری).

دستگاه نمایشگر دیجیتال را روشن کنید. وسط تیر را پیدا کرده و علامت بزنید. آویز اعمال نیرو را در وسط تیر گذاشته و مقدار نمایشگر نیرو را صفر نمایید. یک بار مشخص بر روی آویز گذاشته و مقادیر نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها را مطابق جدول ۱ یادداشت کنید (به کمک سوئیچر و تعویض کانال، مقدار نیرو هر تکیه‌گاه در نمایشگر نیرو قابل مشاهده است). حال فاصله بین دو تیر را به چندین فاصله‌ی مساوی تقسیم کرده و با انتقال آویز به آن فواصل و قرار دادن بار مشخص بر روی آویز، مقدار نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها را در جدول ۱ یادداشت کنید.

جهت محاسبات تجربی و تئوری، مقادیر طول، ضخامت، عرض و جنس تیر را یادداشت کنید. توجه کنید قبل از اعمال نیرو در هر فاصله‌ی جدید، مقدار نیروسنج را صفر نمایید. هم‌چنین از قراردادن نمایشگرهای نیرو در زیر آویز بپرهیزید.

- **آزمایش را با تغییر اندازه نیرو متمرکز تکرار کنید.**

جدول ۱: نتایج آزمایشگاهی محاسبه نیروهای عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها در آزمایش تیر متقارن.

L = ……, t = …… , b = …… Material…… $M\ [kg]$ = ……,									
$x\ [cm]$									
$R_1\ [N]$									
$R_2\ [N]$									

خواسته‌های آزمایش بررسی نیروهای عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها

۱. فرمول‌های ۱ و ۲ را اثبات کنید.

$$R_A = \frac{W(L-x)}{L}.\ R_B = \frac{W\,x}{L}$$

۲. با توجه به داده‌های آزمایش، جدول ۲ را تکمیل کنید.

- دلایل خطا را بیان کنید

جدول ۲: مقایسه نتایج تجربی و تئوری نیروهای عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها در آزمایش تیر متقارن.

L = ……, t = ……, b = …… $M\ [kg]$ = ……, Material: ……							
x $[cm]$	W $[N]$	$R_{1(exp)}$ $[N]$	$R_{2(exp)}$ $[N]$	$R_{1(Theory)}$ $[N]$	$R_{2(Theory)}$ $[N]$	$Error$ (R_1) [%]	$Error$ (R_2)[%]

۳. منحنی عکس‌العمل‌های تکیه‌گاه‌ها نسبت به تغییر فاصله $(R-x)$ را رسم نموده و با مقدار تئوری مقایسه کنید. منحنی تئوری و تجربی هر یک از تکیه‌گاه‌ها را در یک نمودار رسم کنید (از برازش منحنی بر روی داده‌ها استفاده کنید).

- به کمک برازش بر روی داده‌ها، معادله خط بین نیرو عکس‌العمل و فاصله را برای منحنی تجربی به‌دست آورید.

۴. قسمت‌های ۲ و ۳ را برای بار متمرکز دیگری هم به‌دست آورید.

۲-۴-۶-۲- بررسی خیز تیرها با هندسه و جنس‌های مختلف

ابتدا یکی از تیرهای فولادی را روی تکیه‌گاه‌های ساده قرار دهید (دقت کنید که تیر افقی قرار بگیرد). سپس یک آویز در وسط فاصله دو تکیه‌گاه قرار داده و ساعت اندازه‌گیری را روی آن قرار دهید. ساعت اندازه‌گیری دقیقاً روی نقطه اثر نیرو قرار داده شده و مقدار آن را صفر شود. در این مرحله با اضافه کردن وزنه به تیر، خیز تیر را از روی ساعت اندازه‌گیری یادداشت کنید. به تدریج بار را اضافه نموده و خیز تیر را مطابق جدول ۳ یادداشت نمایید. جهت محاسبات تجربی و تئوری، مقادیر طول، ضخامت، عرض و جنس تیر را یادداشت کنید.

الف) آزمایش را تغییر ابعاد تیر فولادی تکرار کنید.

ب) آزمایش را با تغییر جنس تیر آزمایش به برنجی تکرار کنید (دو تیر برنجی با ابعاد متفاوت).

جدول ۳ : نتایج آزمایشگاهی محاسبه خیز تیر در آزمایش تیر متقارن.

L = ……, t = …… , b = …… Material…… x = ……,									
$M\ [kg]$									
$\delta\ [\times 10^{-2}mm]$									

خواسته‌های آزمایش بررسی خیز تیرها با هندسه و جنس‌های مختلف

۱. رابطه زیر را اثبات کنید.

$$y = \frac{1}{48}\frac{WL^3}{EI}$$

با توجه به داده‌های آزمایش، جدول ۴ را تکمیل کنید.

- دلایل خطا را بیان کنید.

جدول ۴: مقایسه نتایج تجربی و خیز تیر در آزمایش تیر متقارن.

L = ……, t = ……, b = …… $M\ [kg]$ = ……, Material: ……			
$M\ [kg]$	$\delta_{exp}[\times 10^{-2}mm]$	$\delta_{theory}[\times 10^{-2}mm]$	Error (δ) [%]

۲. برای هر تیر منحنی خیز در مقابل نیرو ($\delta - W$) را رسم نمایید. شیب منحنی را به‌دست آورید (از برازش منحنی بر روی داده‌ها استفاده کنید).
۳. به کمک نتایج قسمت ۲، مقدار مدول الاستیسیته تجربی را برای هر تیر به‌دست آورید و با مقدار تئوری مقایسه کنید.
   - درصد خطا را محاسبه کنید.
۴. تحلیل کنید که چرا منحنی خیز در مقابل نیروی اعمال شده خطی است.
۵. قسمت‌های ۱ تا ۳ را برای تیر فولادی با ابعاد متفاوت و دو تیر برنجی هم به‌دست آورید.

۵-۶-۲- نتیجه گیری

در مورد نتایج آزمایش تیر متقارن ۱ بحث و نتیجه‌گیری کنید.

۶-۶-۲- نکات تامینی

- به ظرفیت لودسل جهت اعمال گشتاور دقت کنید.
- از قراردادن نمایشگر دیجیتال در زیر آویزهای اعمال نیرو بپرهیزید.
- در زمان حرکت دادن ساعت‌های اندازه‌گیری و نیروسنج‌ها بر روی ریل‌های روی دستگاه، علاوه بر شل کردن پیچ‌های محکم کننده، آنها را به آرامی حرکت داده تا از صدمه زدن به تلق‌های متصل به آن‌ها اجتناب شود.
- جهت استفاده از نمایشگر دیجیتال: ابتدا تمام اتصالات آن را وصل کرده و سپس روشن کنید. هم‌چنین جهت تغییر آزمایش ابتدا دستگاه نمایشگر دیجیتال را خاموش کرده و سپس جابجا کنید.
- پس از اتمام آزمایش، دستگاه را به حالت قبل از آزمایش مرتب کنید.

۷-۲- آزمایش ۷: تیر متقارن ۲

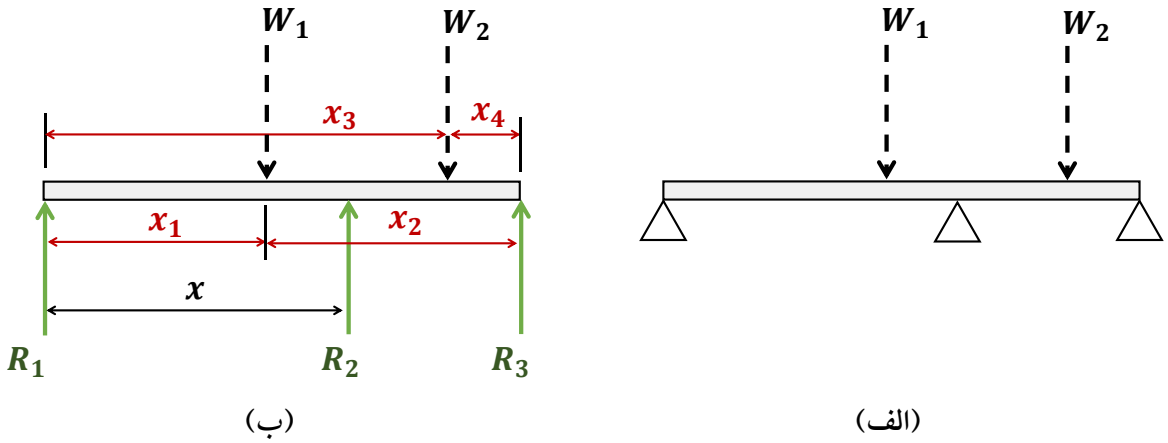
۱-۷-۲ هدف آزمایش

۱. مقایسه نتایج تجربی با تئوری روش جمع آثار[1] در به‌دست آوردن عکس‌العمل تیرهایی که از نظر استاتیکی نامعین هستند.
۲. محاسبه انحنای تیر، خمش خالص
۳. بررسی تیر طره نامعین

۲-۷-۲ تئوری آزمایش

الف) تیر نامعین - روش جمع آثار

تیر متقارنی به مطابق شکل ۱ - الف را در نظر بگیرید که دارای سه تکیه‌گاه و دو بار متمرکز است. دیاگرام آزاد این تیر به شکل ۱- ب رسم شده است.



شکل ۱: شماتیک تیر نامعین تحت بار متمرکز W.

تیر در نظر گرفته شده دارای سه تکیه‌گاه است و از لحاظ استاتیکی نامعین بوده و محاسبه نیروهای عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها از طریق استاتیکی میسر نیست. در این حالت عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها از روش جمع آثار به‌دست می‌آید.

در این حالت فرض می‌شود که نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه ۲ (R_2) هم یک نیروی متمرکز مانند نیروهای W است. بنابراین مسئله با دو نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها تیر قابل حل است. پس از حل مسئله و به‌دست آوردن معادله خیز تیر، از برابر قراردادن خیز تیر ناشی از عکس‌العمل تکیه‌گاه ۲ با مجموع خیز تیر ناشی از بارهای متمرکز، مقدار نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه ۲ به‌دست می‌آید.

[1] Super position

طبق روش جمع آثار، ابتدا فرض می‌شود که تنها نیروی عکس‌العمل R_2 به تیر وارد می‌شود و دو بار متمرکز W_1 و W_2 صفر هستند. مقدار خیز تیر در نقطه x به ازای R_2 به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$y_{(x)} = \frac{R_2 x^2 (L-x)^2}{3EIL} \quad (۱)$$

اگر W_1 وجود داشته باشد و R_1 و W_2 در نظر گرفته نشوند، مقدار خیز تیر در نقطه x به ازای W_1 برابر است با:

$$y_{1(x)} = \frac{W_1 x_1}{6EIL}[(L-x)^3 - (L^2 - x_1^2)(L-x)] \quad (۲)$$

اگر W_2 وجود داشته باشد و R_1 و W_1 در نظر گرفته نشوند، مقدار خیز تیر در نقطه x به ازای W_2 برابر است با:

$$y_{2(x)} = \frac{W_2 x_4}{6EIL}[x^3 - (L^2 - x_4^2)x] \quad (۳)$$

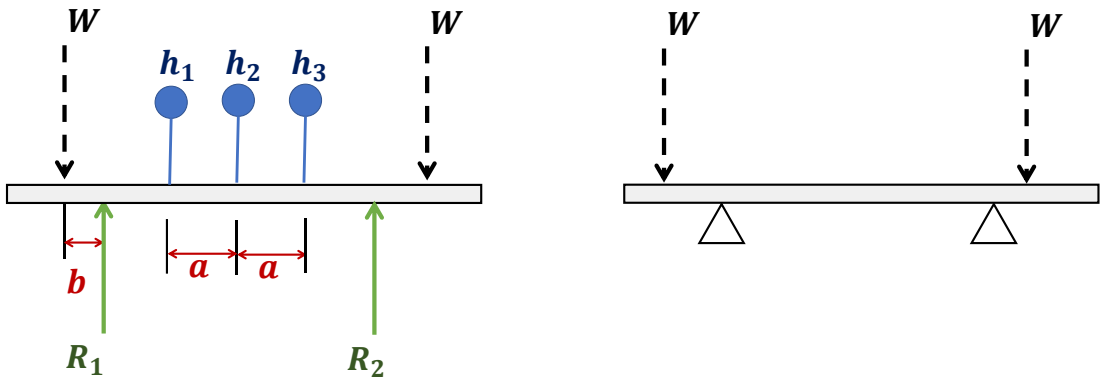
به دلیل اینکه در نقطه x جابه‌جایی نداریم (محل تکیه‌گاه ۲)، در نتیجه:

$$y_{(x)} = y_{1(x)} + y_{2(x)} \quad (۴)$$

علاوه بر رابطه به‌دست آمده‌ی ۴، می‌توان رابطه تعادل نیروها در راستای عمودی و هم‌چنین رابطه تعادل گشتاورها را نیز در نظر گرفت و با سه معادله، سه نیروی مجهول R_1، R_2 و R_3 را به‌دست آورد.

ب) انحنای تیر

تیر متقارنی مطابق شکل ۲ – الف را در نظر بگیرید که دارای دو تکیه‌گاه و دو بار متمرکز است. بارهای متمرکز در مقطع بیرونی تیر اعمال شده‌اند و لذا باعث انحنای تیر می‌شوند. دیاگرام آزاد این تیر به شکل ۲– ب رسم شده است.



شکل ۲: شماتیک تیر معین تحت بار متمرکز W.

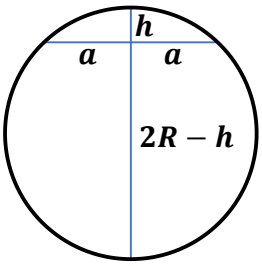
همانطور که از محاسبات ریاضی در دایره‌ای مطابق شکل ۳ به‌دست می‌آید: (چرا؟)

$$h(2R-h)=a^2 \quad \rightarrow \quad 2hR-h^2=a^2$$

$$\rightarrow \frac{1}{R}=\frac{2h}{a^2} \qquad (۵)$$

چون معمولاً مقدار h^2 بسیار کوچک است (h خیز وسط تیر است)، مقدار آن صفر در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه به دست می‌آید:

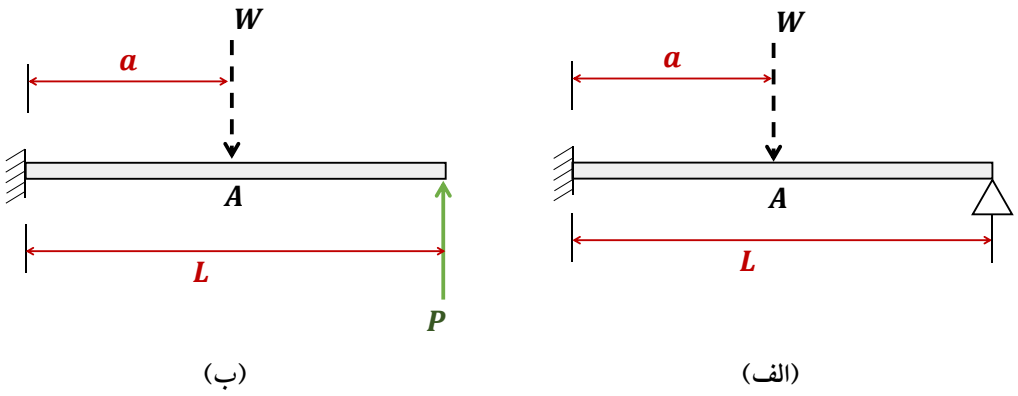
$$\frac{1}{R}=\frac{2h}{a^2}=\frac{M}{EI} \qquad (۶)$$



شکل ۳: تعیین شعاع انحنا به کمک دایره.

ج) تیر نامعین طره

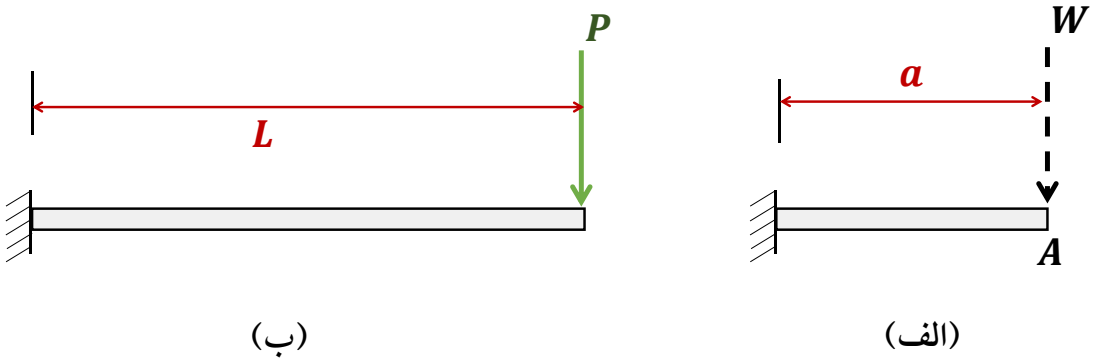
تیر طره‌ی نامعینی مطابق شکل ۴ را در نظر بگیرید. برای حل آن، نیروی فرضی P به جای تکیه‌گاه ساده جایگزین شده است.



شکل ۴: شماتیک تیر طره تحت بار متمرکز W.

اگر تیری مطابق شکل ۵ – الف، در انتهای آزاد آن بارگذاری شده باشد، مقدار خیز در انتهای آزاد برابر است با:

$$y=\frac{Wa^3}{3EI} \qquad (۷)$$



شکل ۵: شماتیک تیر طره تحت بار متمرکز W در انتهای آزاد آن.

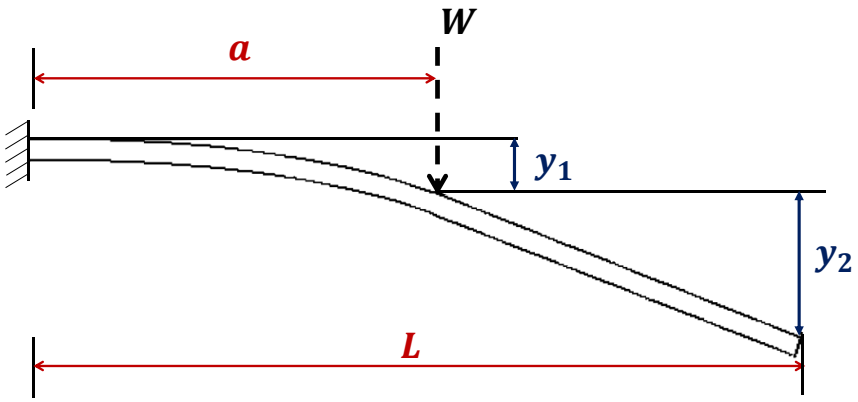
پس در مسئله اصلی (تیر رسم شده در شکل ۴)، در صورتی که نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه P به تنهایی اعمال شود (شکل ۵ – ب)، مقدار خیز تیر در انتهای آزاد برابر می‌شود با:

$$y_P = \frac{PL^3}{3EI} \qquad (۸)$$

حال فرض شود که بار P درنظر گرفته نشود و تنها بار W در فاصله a از تکیه‌گاه گیردار اعمال شود (شکل ۶)، مقدار جابجایی انتهای تیر ناشی از نیروی W برابر است با:

$$y_w = y_1 + y_2 = \frac{W(a)^3}{3EI} + \frac{(\frac{Wa^2}{2EI})(L-a)}{\sqrt{1+\left(\frac{Wa^2}{2EI}\right)^2}} \qquad (۹)$$

در شکل ۶، منحنی میانه سمت راست تیر به صورت خطی است که دارای شیب $\frac{w(\frac{L}{2})^2}{2EI}$ است. بنابراین علاوه بر جابه‌جایی نقطه میانی، جابه‌جایی ناشی از شیب را نیز حساب شده است.



شکل ۶: شماتیک خیز تیر طره تحت بار متمرکز W.

حال با توجه به اینکه در انتهای تیر تکیه‌گاه قرار دارد، لذا جابجایی انتهای تیر برابر صفر است و داریم:

$$y_w + y_P = 0 \quad \rightarrow \quad y_W = y_P \tag{۱۰}$$

$$\rightarrow \frac{P(L)^3}{3EI} = \frac{W(a)^3}{3EI} + \frac{\left(\frac{Wa^2}{2EI}\right)(L-a)}{\sqrt{1+\left(\frac{Wa^2}{2EI}\right)^2}} \rightarrow \left(\frac{Wa^2}{2EI}\right)^2 \approx 0 \rightarrow$$

$$P = W\left(\frac{a}{L}\right)^3 + \frac{3}{2}W\left(\frac{a}{L}\right)^2\left(1-\frac{a}{L}\right)$$

اگر نسبت a به L با c تعریف شود ($c = \frac{a}{L}$):

$$if: c = \frac{a}{L} \quad \rightarrow \quad P = W(c)^3 + \frac{3}{2}W(c)^2(1-c) = \frac{Wc^2}{2}(3-c)$$

$$\rightarrow \ P = \frac{Wc^2}{2}(3-c) \tag{۱۱}$$

در نتیجه مقدار نیروی مجهول عکس‌العمل تکیه‌گاه بر حسب بار متمرکز W و نسبت فاصله‌ها به‌دست می‌آید.

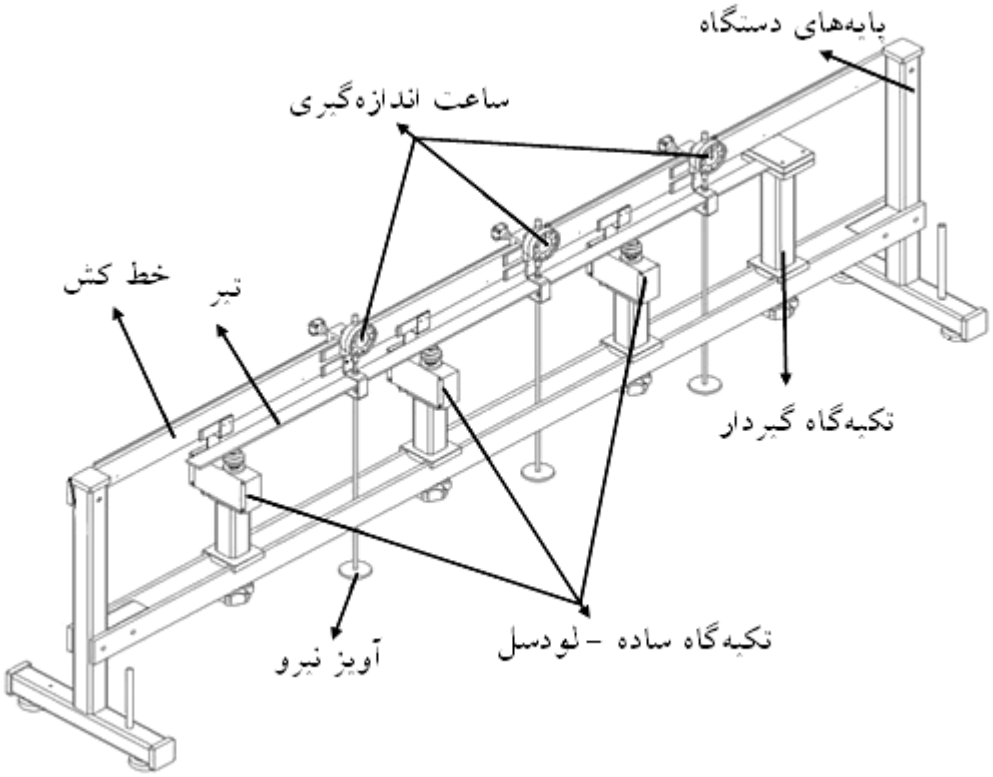
۳-۷-۲- شرح دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش شامل یک اسکلت فلزی است که در آن تیرهای افقی، چهار تکیه‌گاه، ساعت‌های اندازه‌گیری، نمایشگر دیجیتال، سوئیچر سه کاناله و یک خط‌کش افقی در بالای تیر جهت تعیین فاصله‌ها تعبیه شده است (شکل ۷).

تکیه‌گاه‌ها از دو نوع ساده و گیردار هستند. تیغه تکیه‌گاه‌ها را می‌توان توسط پیچ تنظیم آن (زیر تیغه) در ارتفاع مورد نظر تنظیم کرد. تکیه‌گاه‌های ساده به صورت نیروسنجی هستند (سه تکیه‌گاه) که نیروی وارد بر تکیه‌گاه‌ها در اثر اعمال نیرو را بر روی نمایشگر نیرو نشان می‌دهند. تکیه‌گاه گیردار را می‌توان با بستن چهار پیچ آلن، ثابت کرد.

در این آزمایش‌ها جهت اعمال نیرو از آویزهای نیرو استفاده می‌شود که نیرو با قرار دادن وزنه‌هایی در انتهای آویز اعمال می‌شود.

دقت کنید که نشانه‌های تعبیه شده در روی کلیه لوازم مثل ساعت‌های اندازه‌گیری، تکیه‌گاه‌ها و آویزها همگی ۵ cm از نقطه اثر آن‌ها فاصله دارند.



شکل ۷: دستگاه آزمایش تیر متقارن

۴-۷-۲- روش آزمایش

۱-۴-۷-۲- محاسبه عکس‌العمل تیر نامعین به کمک روش جمع آثار (مقایسه نتایج تجربی با تئوری)

ابتدا سه تکیه‌گاه ساده که مجهز به لودسل هستند را در فاصله‌های غیر یکسان از هم بر روی دستگاه آزمایش نصب کنید (مثلاً فاصله ما بین آن‌ها از هم ۶۰ cm و ۳۰ cm باشد). یک تیر فولادی را انتخاب و بر روی لودسل‌ها قرار دهید. به کمک پیچ‌های تنظیم تکیه‌گاه‌ها، ارتفاع سه تکیه‌گاه را جهت افقی قراردادن تیر تنظیم کنید (به کمک ساعت اندازه‌گیری).

دستگاه‌های نمایشگر دیجیتال نیرو را روشن کنید. ما بین هر دو تکیه‌گاه به فاصله برابر یک آویز قرار دهید و سپس مقدار نمایشگر نیرو در هر دو لودسل را صفر نمایید (به کمک سوئیچر و تعویض کانال، مقدار نیرو هر تکیه‌گاه در نمایشگر نیرو قابل مشاهده است). بر روی هر یک از آویزها بار مشخص غیر یکسان گذاشته و مقادیر نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها را مطابق جدول ۱ یادداشت کنید. در هر مرحله با افزایش مقادیر بار، تغییرات نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها یادداشت کنید (مقادیر W_1 و W_2 با هم برابر نیستند).

جهت محاسبات تجربی و تئوری، مقادیر طول، ضخامت، عرض و جنس تیر را یادداشت کنید. توجه کنید قبل از اعمال نیرو در هر فاصله‌ی جدید، مقدار نیروسنج را صفر نمایید. هم‌چنین از قراردادن نمایشگرهای نیرو در زیر آویز بپرهیزید.

جدول ۱: نتایج آزمایشگاهی بررسی عکس‌العمل تیر نامعین به کمک روش جمع آثار در آزمایش تیر متقارن.

L = ……, t = …… , b = …… Material……									
$M_1\ [kg]$									
$M_2\ [kg]$									
$R_1\ [N]$									
$R_2\ [N]$									
$R_3\ [N]$									

خواسته‌های آزمایش محاسبه عکس‌العمل تیر نامعین به کمک روش جمع آثار

۱. با استفاده از تئوری نیز مقادیر تکیه‌گاه ها را در هر حالت به‌دست آورید و با نتایج تجربی آن مقایسه نمائید (تکمیل جدول ۲).

جدول ۲: مقایسه نتایج تجربی و تئوری نیروهای عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها در آزمایش تیر متقارن.

L = ……, t = …… , b = …… Material……										
Load		$Experimental$			$Theory$			$Error$		
W_1 $[N]$	W_2 $[N]$	R_1 $[N]$	R_2 $[N]$	R_3 $[N]$	R_1 $[N]$	R_2 $[N]$	R_3 $[N]$	$e(R_1)$ $[\%]$	$e(R_2)$ $[\%]$	$e(R_3)$ $[\%]$

۲. منحنی عکس‌العمل هر یک از تکیه‌گاه‌ها را نسبت به بارهای مختلف $(R-W)$ رسم نمائید و با تئوری مقایسه کنید (منحنی تئوری و تجربی هر یک از تکیه‌گاه‌ها را در یک نمودار رسم کنید، از برازش منحنی بر روی داده‌ها استفاده کنید).

۳. مهم‌ترین فرضی که در این آزمایش در نظر گرفته می‌شود، چیست؟ (از چه عاملی صرف نظر می‌شود)

۴. در صورت وجود خطا بین نتایج به‌دست آمده از تئوری و نتایج عملی آزمایش علل وجود خطا را ذکر نمائید.

۲-۴-۷-۲- خمش خالص، محاسبه شعاع انحناء

دو تکیه‌گاه ساده که مجهز به لودسل هستند را در فاصله‌ی مشخصی بر روی دستگاه آزمایش نصب کنید. یک تیر فولادی را انتخاب و بر روی لودسل‌ها قرار دهید به نحوی که بخشی از تیر از دو سمت تکیه‌گاه‌ها بیرون باشد تا شرایط اعمال بار در دو انتهای تیر به‌وجود آید (مثلاً ۲۰ cm از هر سمت بیرون باشد). به کمک پیچ‌های تنظیم تکیه‌گاه‌ها، ارتفاع آن‌ها را جهت افقی قراردادن تیر تنظیم کنید (به کمک ساعت اندازه‌گیری). یک ساعت اندازه‌گیری (h_2) را درست در وسط تکیه‌گاه‌ها نصب کنید. سپس دو ساعت اندازه‌گیری دیگر را به فاصله یکسان در دو سمت ساعت اندازه‌گیری اول نصب کنید (h_1 و h_3 در شکل ۲- ب). آویزهای اعمال نیرو در محل اعمال بارهای مرکزی (Wها) بر روی تیر قرار داده و سپس مقدار ساعت‌های اندازه‌گیری را صفر کنید (مقدار وزنه‌ها در دو سمت تیر یکسان است).

جهت شروع آزمایش در هر مرحله وزنه‌های مساوی بر روی آویزها اضافه کرده و مقدار جابجایی ساعت‌های اندازه‌گیری را مطابق جدول ۳ یادداشت کنید. برای ۵ بار مختلف نتایج را یادداشت کنید. هم‌چنین جهت محاسبات تجربی و تئوری، مقادیر طول، ضخامت، عرض و جنس تیر را یادداشت کنید.

الف) آزمایش را با تغییر جنس تیر آزمایش به برنجی تکرار کنید.

جدول ۳: نتایج آزمایشگاهی بررسی شعاع انحناء تیر در آزمایش تیر متقارن.

L = ……, t = …… , b = …… Material……					
M_1 ,$M_2[kg]$					
h_1 $[\times 10^{-2}mm]$					
h_2 $[\times 10^{-2}mm]$					
h_3 $[\times 10^{-2}mm]$					

خواسته‌های آزمایش خمش خالص، محاسبه شعاع انحناء

۱. با توجه به نتایج آزمایش و فرمول‌های زیر، جدول ۴ را تکمیل کنید.

$$h = h_2 - y$$

$$y = \frac{1}{2}(h_1 + h_3)$$

جدول ۴: مقایسه نتایج تجربی و تئوری بررسی شعاع انحناء تیر در آزمایش تیر متقارن.

	W $[N]$	b $[m]$	a $[m]$	h_1 $\times 10^{-2}$ $[mm]$	h_2 $\times 10^{-2}$ $[mm]$	h_3 $\times 10^{-2}$ $[mm]$	y $\times 10^{-2}$ $[mm]$	$h_{(exp)}$ $\times 10^{-2}$ $[mm]$	$h_{(Theory)}$ $\times 10^{-2}$ $[mm]$	$Error\ (h)$ $[\%]$
Material:										
L =										
t =										
b =										
Material:										
L =										
t =										
b =										

۲. منحنی h در مقابل W را برای هر آزمایش رسم کنید و ثابت کنید که خطی است.

۳. با توجه به رابطه‌های $\frac{1}{R}=\frac{2h}{a^2}=\frac{M}{EI}$ و $M = W.b$ و هم‌چنین شیب نمودار $h - W$ (که از برازش منحنی در قسمت ۲ محاسبه می‌شود)، مقدار E را محاسبه کنید.

۳-۴-۷-۲- تیر طره نامعین

یک تیر فولادی را انتخاب کرده و از یک سمت درون تکیه‌گاه گیردار و سمت دیگر را روی تکیه‌گاه ساده دارای لودسل قرار دهید. با جابجایی تکیه‌گاه‌ها، طول مشخصی از تیر را انتخاب کرده و پیچ‌های تکیه‌گاه‌ها را سفت کنید (مثلاً ۱۰۰ cm). سعی کنید طول اضافی تیر را در سمت تکیه‌گاه گیردار قرار دهید.

طول تیر را به چند فاصله یکسان نقسیم کنید (مثلاً ۲۰ cm). دستگاه نمایشگر دیجیتال را به لودسل متصل و سپس روشن کنید (با کمک کلید Mode در نمایشگر نیرو، کانال تکیه‌گاه تحت بارگذاری را انتخاب کنید). آویز نیرو را بر روی یکی از فاصله‌ها گذاشته و مقدار نمایشگر نیرو را صفر نمایید. در هر مرحله با اضافه کردن وزنه‌ای مشخص، مقدار نیروی عکس‌العمل را از روی نیروسنج بخوانید (برای ۵ بار مختلف نتایج را یادداشت کنید). پس از تکمیل بارگذاری در نقطه‌ی اول، به آرامی بار برداری کرده و سپس این مراحل را در فاصله دوم تکرار کنید. این کار را در تمام طول تیر انجام داده و نتایج را در جدول ۵ یادداشت کنید.

هم‌چنین جهت محاسبات تجربی و تئوری، مقادیر طول، ضخامت، عرض و جنس تیر را یادداشت کنید. از قراردادن نیروسنج در زیر آویز نیرو بپرهیزید.

جدول ۵: نتایج آزمایشگاهی بررسی تیر طره در آزمایش تیر متقارن.

L = ……, t = …… , b = …… Material……					
	$\boldsymbol{R}\ [\boldsymbol{N}]$				
$\boldsymbol{M}\ [\boldsymbol{kg}]$ / $\boldsymbol{x}\ [\boldsymbol{cm}]$					

خواسته‌های آزمایش تیر طره نامعین

۱. با توجه به نتایج آزمایش، جدول ۶ را تکمیل کنید.

- از روی نتایج جدول ۶، مقادیر $\frac{\Delta P}{\Delta W}$ متوسط را به‌دست آورید.

جدول ۶: مقایسه تغییرات نیرو و عکس‌العمل تکیه‌گاه ساده در تیر طره، آزمایش تیر متقارن.

		$\boldsymbol{x_1 = 20\ cm}$		$\boldsymbol{x_2 = \cdots}$		$\boldsymbol{x_3 = \cdots}$		$\boldsymbol{x_4 = \cdots}$	
$\boldsymbol{W}$ $[\boldsymbol{N}]$	$\boldsymbol{\Delta W}$	$\boldsymbol{P_{20}}$ $[\boldsymbol{N}]$	$\boldsymbol{\Delta P_{20}}$	$\boldsymbol{P_{x2}}$ $[\boldsymbol{N}]$	$\boldsymbol{\Delta P_{x2}}$	$\boldsymbol{P_{x3}}$ $[\boldsymbol{N}]$	$\boldsymbol{\Delta P_{x3}}$	$\boldsymbol{P_{x4}}$ $[\boldsymbol{N}]$	$\boldsymbol{\Delta P_{x4}}$
Average (Δ)		——		——		——		——	

۲. به ازای هریک از نیروها (Wها)، مقادیر تئوری و تجربی P را با تکمیل جدول ۷ مقایسه کنید. (برای هر W یک جدول نیاز است، مجموعاً ۵ جدول)

- دلایل خطا را بیان نمایید.

جدول ۷: مقایسه نتایج تئوری و تجربی نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه ساده در تیر طره، آزمایش تیر متقارن.

$\boldsymbol{W = \cdots}\ [\boldsymbol{N}]$				
$\boldsymbol{c}$				
$\boldsymbol{P_{Theory}}\ [\boldsymbol{N}]$				
$\boldsymbol{P_{Exp}}\ [\boldsymbol{N}]$				
$\boldsymbol{Error\ (P)}$ [%]				

۲-۷-۵- نتیجه گیری

در مورد نتایج آزمایش تیر متقارن ۲ بحث و نتیجه‌گیری کنید.

۲-۷-۶- نکات تامینی

- به ظرفیت لودسل جهت اعمال گشتاور دقت کنید.
- از قراردادن نمایشگر دیجیتال در زیر آویزهای اعمال نیرو بپرهیزید.
- در زمان حرکت دادن ساعت‌های اندازه‌گیری و نیروسنج‌ها بر روی ریل‌های روی دستگاه، علاوه بر شل کردن پیچ‌های محکم کننده، آنها را به آرامی حرکت داده تا از صدمه زدن به تلق‌های متصل به آن‌ها اجتناب شود.
- جهت استفاده از نمایشگر دیجیتال: ابتدا تمام اتصالات آن را وصل کرده و سپس روشن کنید. هم‌چنین جهت تغییر آزمایش ابتدا دستگاه نمایشگر دیجیتال را خاموش کرده و سپس جابجا کنید.
- پس از اتمام آزمایش، دستگاه را به حالت قبل از آزمایش مرتب کنید.

۸-۲- آزمایش ۸: سیلندر جدار نازک

۱-۸-۲- هدف آزمایش

محاسبه تنش‌های اصلی در سیلندر جدار نازک

۱. حالت انتها باز

۲. حالت انتها بسته

۲-۸-۲ تئوری آزمایش

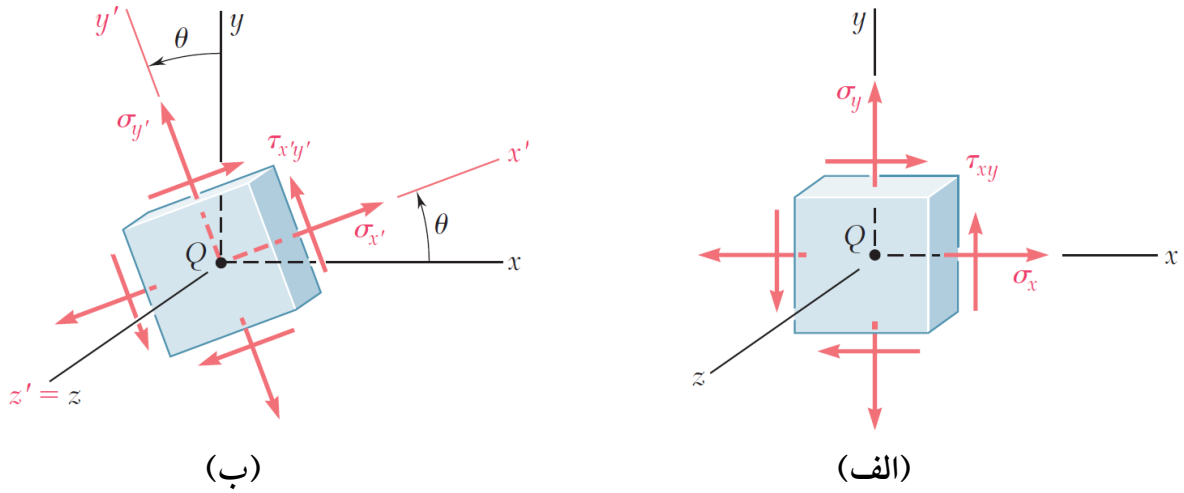
الف) تحلیل تنش صفحه‌ای

محاسبه‌ی تنش در یک نقطه نیازمند تحلیل المانی از آن نقطه است. بنابراین المانی مانند شکل ۱- الف را در نظر بگیرید که حالت تنش صفحه‌ای دارد (با $\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$). تنش‌های وارده بر این المان با σ_x، σ_y و τ_{xy} مشخص شده‌اند. در صورتی که المان به اندازه زاویه θ دوران داشته باشد، تنش‌ها در صفحه جدید $(x'y')$ به صورت زیر به‌دست می‌آیند [۱]:

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} cos2\theta + \tau_{xy} sin2\theta \quad (۱)$$

$$\sigma_{y'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} cos2\theta - \tau_{xy} sin2\theta \quad (۲)$$

$$\tau_{x'y'} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} sin2\theta + \tau_{xy} cos2\theta \quad (۳)$$



شکل ۱: تبدیلات تنش صفحه‌ای [۱]

ب) تنش در مخازن جدار نازک

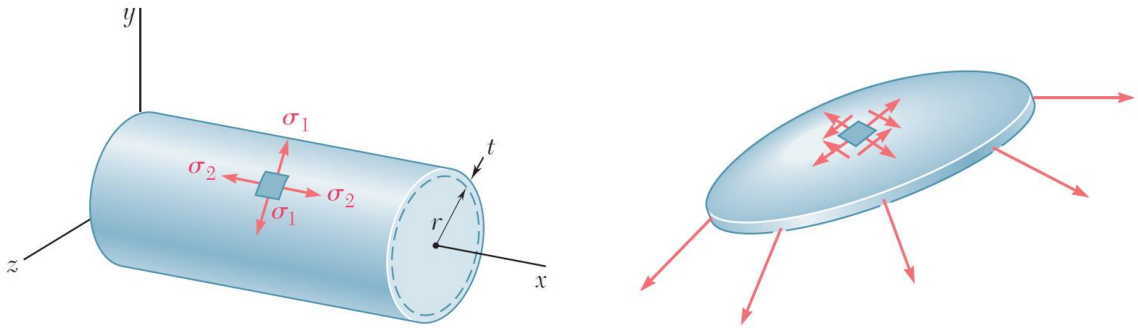
مخازن تحت فشار جدار نازک، زمینه‌ی کاربردی مهمی برای تحلیل تنش صفحه‌ای ($\frac{r}{t} \leq 0.1$) به‌شمار می‌آیند. به‌علت اینکه جدار آن‌ها مقاومت کوچکی در برابر خمش نشان می‌دهد، می‌توان فرض کرد که نیروهای داخلی وارد بر قسمت معینی از جدار آن‌ها بر سطح مخزن مماس هستند (شکل ۲- الف). بنابراین تنش‌های حاصل بر روی جزء کوچکی از جدار در صفحه‌ای مماس بر سطح مخزن قرار می‌گیرند.

یکی از رایج ترین مخازن جدار نازک، مخازن جدار نازک استوانه‌ای هستند. مخزنی استوانه‌ای به شعاع r و ضخامت جدار t حاوی سیال تحت فشاری را در نظر بگیرید (شکل ۲- ب). تنش‌های وارد بر جزء کوچکی از جدار را با اضلاعی به ترتیب موازی یا عمود بر محور استوانه تعیین شده است. در این حالت تنش‌های σ_1 را تنش محیطی (مماسی) و تنش‌های σ_2 را تنش طولی می‌نامند که مقدار آن‌ها به‌دست می‌آید:

$$\sigma_1 = \frac{Pr}{t} \qquad (۴)$$

$$\sigma_2 = \frac{Pr}{2t} \qquad (۵)$$

که در آن‌ها P نشانگر فشار پیمانه‌ای (فشار نسبی) سیال است. یعنی فشار اضافه داخلی نسبت به فشار جو. در صورتی که سیلندر جدار نازک باز باشد، مقدار تنش طولی در آن صفر است اما اگر سیلندر جدار نازک بسته باشد، مقدار تنش‌های طولی و محیطی (مماسی) غیر صفر هستند [۱].



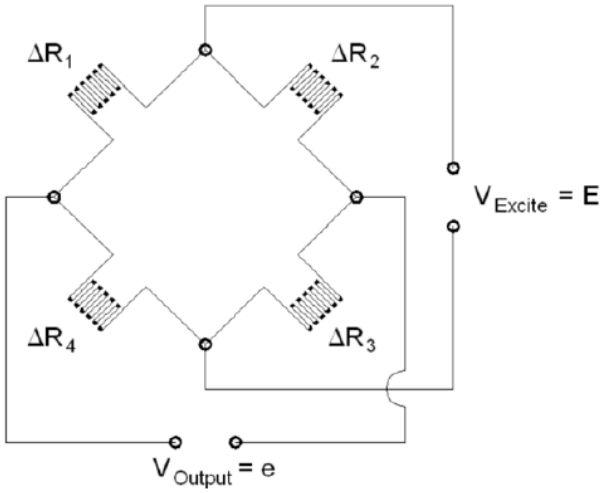
(ب) (الف)

شکل ۲: مقاطع جدار نازک. الف) توزیع تنش در سطح جدار نازک تحت فشار، ب) تنش‌های مماسی و طولی در سیلندر تحت فشار [۱]

ج) کرنش‌سنج

بر روی سطح سیلندر جدار نازک، کرنش‌سنج‌هایی نصب شده تا مقدار تنش‌ها در آن محاسبه شود. کرنش‌سنج‌ها بر اساس مدار پل وتستون عمل می‌کنند. همان‌گونه که در شکل ۳ دیده می‌شود، مدار پل وتستون

از چهار مقاومت R_1، R_2، R_3 و R_4 تشکیل شده است. در پل وتستون ولتاژ ورودی به دو قسمت تقسیم شده و جریان خروجی از هر دو ولتاژ ورودی تشکیل می‌شود. با توجه به شکل ۳، برای هر پل وتستون رابطه ۶ برقرار است که در آن k ضریب کرنش‌سنج، R مقاومت اولیه کرنش‌سنج و ΔR تغییرات مقاومت کرنش‌سنج است. هم‌چنین در مدار پل وتستون، E ولتاژ تحریک و e ولتاژ خروجی است.



شکل ۳: مدار پل وتسون

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon \qquad .k \approx 2 \tag{۶}$$

بر روی سیلندر جدار نازک چهار عدد کرنش‌سنج قرار دارد که تشکیل یک پل وتستون می‌دهند. با توجه به آن‌که مقاومت اولیه کرنش‌سنج‌ها یکسان است، با حل معادلات مدار خواهیم داشت:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$

$$\frac{e}{E} = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4}{\sum_{i=1}^{4} R_i} = \frac{(\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4)}{4R} \qquad [\frac{mV}{V}] \tag{۷}$$

با جایگزینی رابطه ۶ در رابطه ۷ و هم‌چنین توجه به این نکته که در این دستگاه سه عدد کرنش‌سنج‌ها مدار پل هیچ تغییر فرمی ندارند و تنها کرنش‌سنج روی بدنه سیلندر دچار تغییر می‌شود، بنابراین از رابطه ۷ به‌دست می‌آید:

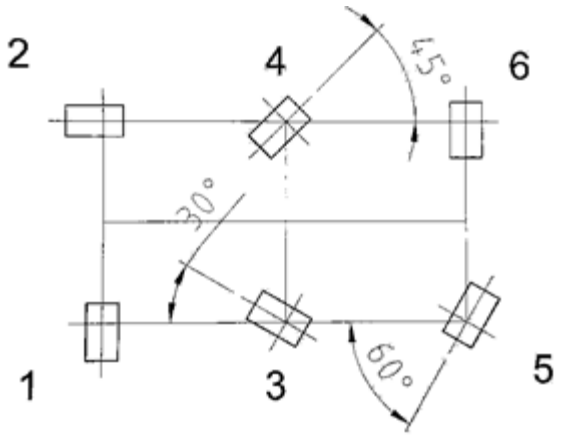
$$\Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$$

$$\frac{e}{E} = \frac{k\varepsilon_1}{4} \qquad [\frac{mV}{V}] \tag{۸}$$

در نهایت برای تعیین تنش از رابطه تنش و قانون هوک استفاده می‌شود:

$$\sigma = E\varepsilon_1 \tag{۹}$$

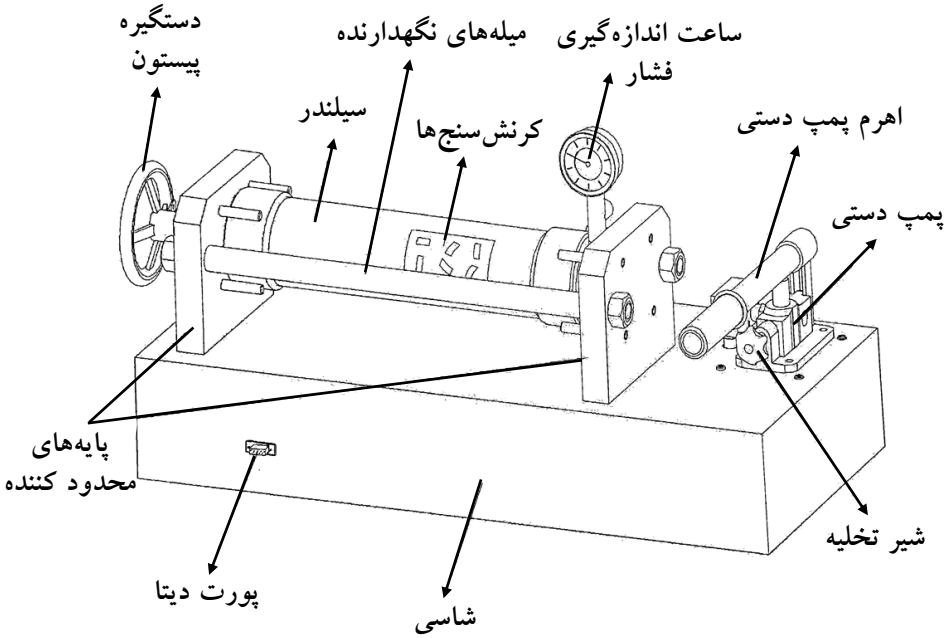
بر روی دستگاه آزمایش ۶ عدد کرنش‌سنج در زاویه‌های مختلف مطابق شکل ۴ نصب شده است. برای محاسبه می‌توان با توجه به زاویه‌ی هر یک از کرنش‌سنج‌ها، مقدار مدنظر را محاسبه کرد.



شکل ۴: زاویه کرنش‌سنج‌های نصب شده بر روی دستگاه آزمایش

۳-۸-۲- شرح دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش شامل یک سیلندر جدار نازک آلومینیومی، دستگیره پیستون، ساعت اندازه‌گیری فشار، پمپ دستی، اهرم پمپ دستی، شیر تخلیه، کرنش‌سنج‌ها و یک نمایشگر دیجیتال است (شکل ۵).



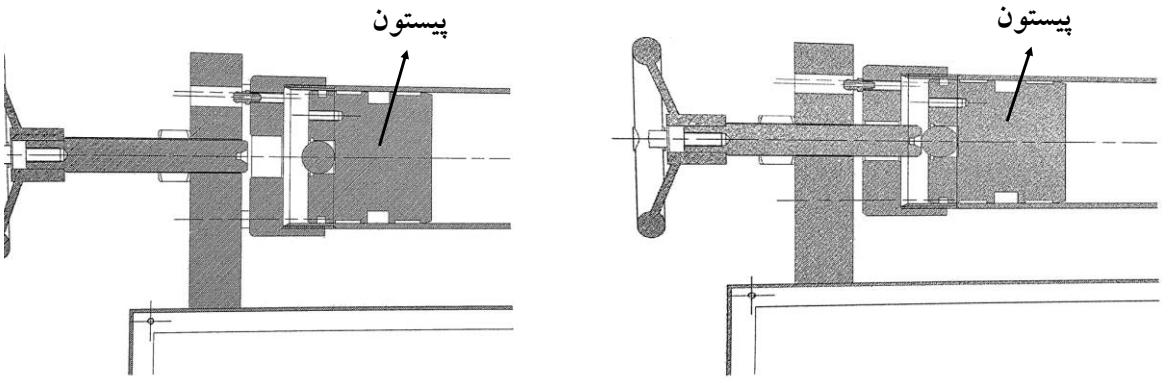
شکل ۵: دستگاه آزمایش سیلندر جدار نازک

طراحی دستگاه آزمایش به نحوی است که امکان ایجاد شرایط سیلندر جدار نازک باز و سیلندر جدار نازک بسته فراهم شود.

- **سیلندر جدار نازک باز (تنش مماسی)**: وقتی پیچ تغییر وضعیت بسته شود تا به فریم بچسبد، این پیچ با شافت پیستون تماس می‌یابد و آن را به سمت داخل هل می‌دهد و پیستون از جدار انتهایی سیلندر جدا

می‌شود. در این حالت با افزایش فشار سیلندر نیروی وارده به پیستون به پیچ و سپس به فریم منتقل می‌شود، بنابراین سیلندر از تمامی تنش‌های طولی آزاد می‌شود. نیروی وارد شده به فریم نیز توسط میله‌ها مهار می‌شود (شکل ۶- الف).

- **سیلندر جدار نازک بسته (تنش مماسی و طولی):** وقتی پیچ تغییر وضعیت باز شود و وضعیت از فریم فاصله بگیرد، در صورت افزایش فشار داخل سیلندر نیرویی به پیستون وارد می‌شود که می‌خواهد پیستون را از سیلندر خارج کند ولی به جدار انتهایی سیلندر گیر می‌کند. در این حالت سیلندر مانند یک مخزن کاملا بسته عمل می‌کند که به یک فریم تکیه داده است (شکل ۶- ب).



الف) سیلندر باز **(ب) سیلندر بسته**

شکل ۶: وضعیت باز و بسته بودن سیلندر جدار نازک. الف) حالت باز، ب) حالت بسته.

مشخصات هندسی دستگاه آزمایش در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات هندسی دستگاه آزمایش سیلندر جدار نازک

مشخصه	مقدار
قطر داخلی سیلندر (mm)	۸۰
ضخامت سیلندر (mm)	۳
مدول الاستیسیته سیلندر (آلومینیوم) (Gpa)	۷۷
ضریب کرنش‌سنج	۲.۰۵

۴-۸-۲- روش آزمایش

۱-۴-۸-۲- سیلندر جدار نازک باز

ابتدا شیر تخلیه را کاملاً باز کنید. جهت اعمال شرایط سیلندر باز، فلکه تغییر وضعیت را بچرخانید تا به فریم برسد (پیچ بسته شود). حال شیر تخلیه را کاملاً ببندید و به کمک اهرم دستی پمپ، یک فشار اولیه اعمال

کنید. این فشار اولیه برای حذف اثر اصطکاک و خطاهای ناشی از آن است. نمایشگر دیجیتال را روشن کرده و با انتخاب تک تک کانال‌های روی نمایشگر و فشردن کلید ZERO تمامی کانال‌ها را به طور مستقل صفر کنید. حال دستگاه برای آزمایش سیلندر انتهای باز آماده است.

در هر مرحله با استفاده از اهرم پمپ دستی، فشار سیلندر را ۵ بار افزایش دهید و عدد کرنش هر ۶ کانال را مطابق جدول ۲ یادداشت کنید. این عمل را تا فشار ۳۰ بار تکرار کنید. توجه داشته باشید که بیشترین فشار کاری دستگاه ۵۰ bar است و دقت کنید فشار داخل سیلندر از ۴۰ بار بیشتر نشود.

در صورتی که مقدار فشار اعمالی بیش از مقدار مورد نظر بود، کافی است شیر تخلیه کمی باز شود تا فشار روغن داخل سیلندر کاهش یابد.

پس از اتمام آزمایش و جهت بازگردادن دستگاه به حالت اولیه، شیر تخلیه به آرامی باز شود تا فشار روغن درون سیلندر کاهش یابد. از بازکردن ناگهانی شیر تخلیه بپرهیزید.

جدول ۲: نتایج آزمایشگاهی مقادیر کرنش اندازه‌گیری شده در شرایط سیلندر انتهای باز.

$P\ [bar]$	$[mV/V]$					
	$Ch.1$	$Ch.\ 2$	$Ch.\ 3$	$Ch.\ 4$	$Ch.\ 5$	$Ch.\ 6$

خواسته‌های آزمایش سیلندر جدار نازک باز

۱. دایره مور تنش و کرنش را برای المان‌ها در حالت تجربی و تئوری رسم نمایید و مقادیر را با هم مقایسه کنید.
   - درصد خطا نسبی را به‌دست آورید.
   - در صورت وجود خطا بین نتایج به‌دست آمده از تئوری و نتایج عملی آزمایش، علل وجود خطا را ذکر نمائید.
۲. از نتایج تجربی به‌دست آمده، ضریب پواسون را محاسبه کرده و با مقادیر کتب مرجع مقایسه کنید.
   - درصد خطا نسبی را به‌دست آورید.

۲-۴-۸-۲- سیلندر جدار نازک بسته

ابتدا شیر تخلیه را کاملاً باز کنید تا ساعت اندازه‌گیری فشار، مقدار صفر را نشان دهد. جهت اعمال شرایط سیلندر بسته، پیچ تغییر وضعیت را کاملاً باز کنید. حال شیر تخلیه را ببندید و به کمک اهرم دستی پمپ، یک فشار اولیه اعمال کنید. این فشار اولیه برای حذف اثر اصطکاک و خطاهای ناشی از آن است. نمایشگر دیجیتال

را روشن کرده و با انتخاب تک تک کانال‌های روی نمایشگر و فشردن کلید ZERO تمامی کانال‌ها را به طور مستقل صفر کنید. حال دستگاه برای آزمایش سیلندر انتهای بسته آماده است.

در هر مرحله با استفاده از اهرم پمپ دستی، فشار سیلندر را ۵ بار افزایش دهید و عدد کرنش هر ۶ کانال را مطابق جدول ۳ یادداشت کنید. این عمل را تا فشار ۳۰ بار تکرار کنید. توجه داشته باشید که بیشترین فشار کاری دستگاه ۵۰ bar است و دقت کنید فشار داخل سیلندر از ۴۰ بار بیشتر نشود.

در صورتی که مقدار فشار اعمالی بیش از مقدار مورد نظر بود، کافی است شیر تخلیه کمی باز شود تا فشار روغن داخل سیلندر کاهش یابد.

پس از اتمام آزمایش و جهت بازگردادن دستگاه به حالت اولیه، شیر تخلیه به آرامی باز شود تا فشار روغن درون سیلندر کاهش یابد. از بازکردن ناگهانی شیر تخلیه بپرهیزید.

جدول ۳: نتایج آزمایشگاهی مقادیر کرنش اندازه‌گیری شده در شرایط سیلندر انتهای بسته.

$P\ [bar]$	$[mV/V]$					
	$Ch.1$	$Ch.\ 2$	$Ch.\ 3$	$Ch.\ 4$	$Ch.\ 5$	$Ch.\ 6$

خواسته‌های آزمایش سیلندر جدار نازک بسته

۱. دایره مور تنش – کرنش را برای المان‌ها در حالت تجربی و تئوری رسم نمایید و مقادیر را با هم مقایسه کنید.
   - درصد خطا نسبی را به‌دست آورید.
   - در صورت وجود خطا بین نتایج به‌دست آمده از تئوری و نتایج عملی آزمایش، علل وجود خطا را ذکر نمائید.

۲. از نتایج تجربی به‌دست آمده، ضریب پواسون را محاسبه کرده و با مقادیر کتب مرجع مقایسه کنید.
   - درصد خطا نسبی را به‌دست آورید.

۵-۸-۲- نتیجه گیری

در مورد نتایج آزمایش سیلندر جدار نازک بحث و نتیجه‌گیری کنید.

۶-۸-۲- نکات تامینی

- بیشترین فشار کاری دستگاه ۵۰ bar است و دقت کنید فشار داخل سیلندر از ۴۰ بار بیشتر نشود.

- در صورتی که مقدار فشار اعمالی بیش از مقدار مورد نظر بود، کافی است شیر تخلیه کمی باز شود تا فشار روغن داخل سیلندر کاهش یابد.
- پس از اتمام آزمایش و جهت بازگردادن دستگاه به حالت اولیه، شیر تخلیه به آرامی باز شود تا فشار روغن درون سیلندر کاهش یابد. از بازکردن ناگهانی شیر تخلیه بپرهیزید.
- جهت استفاده از نمایشگر دیجیتال، ابتدا تمام اتصالات آن را وصل کرده و سپس روشن کنید.
- پس از اتمام آزمایش، دستگاه را به حالت قبل از آزمایش مرتب کنید.

۹-۲- آزمایش ۹: قاب‌ها ۱ (قاب U-شکل)

۱-۹-۲ هدف آزمایش

به‌دست آوردن جابجایی در قاب U-شکل تحت تاثیر نیروهای متفاوت

۲-۹-۲- تئوری آزمایش

سازه‌ای را یک قاب می‌نامند که حداقل یکی از عضوهای منفرد آن عضو چند نیرویی باشد. عضو چند نیرویی، عضوی است که سه یا تعداد بیشتری نیرو بر آن اعمال می‌شود و یا تحت تاثیر دو یا چند نیرو و یک یا چند کوپل قرار گیرد. قاب‌ها برای نگهداری بارهای وارد شده طراحی می‌شوند و معمولاً در موقعیت خود ثابت هستند. به طور کلی به‌علت اینکه قاب‌ها دارای عضو چند نیرویی هستند، نیروهای این عضوها در امتداد عضو نخواهند بود [۳].

برای تحلیل قاب‌ها ابتدا دیاگرام آزاد کل قاب رسم می‌شود و معادلات تعادل آن نوشته می‌شود و نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها محاسبه می‌شود. سپس اعضای قاب را از هم جدا کرده و اعضای دو نیرویی و چند نیرویی مشخص می‌شود و با نوشتن معادلات تعادل برای هر عضو، نیروهای مجهول به‌دست می‌آیند [۴].

قضیه تغییر شکل کاستیگلیانو

در حالت کلی، اگر یک سازه الاستیک تحت n بار قرار گیرد، تغییر مکان مربوط به نقطه اثر یک نیرو که در امتداد خط اثر آن نیرو اندازه‌گیری می‌شود را می‌توان به صورت مشتق جزئی انرژی کرنشی سازه نسبت به بار بیان کرد:

$$\Delta X = \frac{\partial U}{\partial P} \qquad (۱)$$

برای محاسبه مقدار جابه‌جایی قاب تحت نیروهای اعمالی می‌توان مقدار انرژی هر بخش از سازه را طبق روابط پایین محاسبه نمود. آنگاه می‌توان به کمک دیفرانسیل گیری نسبت به بار مربوط به محلی که جابجایی آن خواسته شده است، مقدار جابجایی را به‌دست آورد. معادلات انرژی به صورت زیر هستند [۱].

انرژی کرنشی حاصل از بارگذاری محوری:

$$U = \int_0^L \frac{F^2}{2EA} dx \qquad (۲)$$

انرژی کرنشی حاصل از گشتاورهای اعمالی:

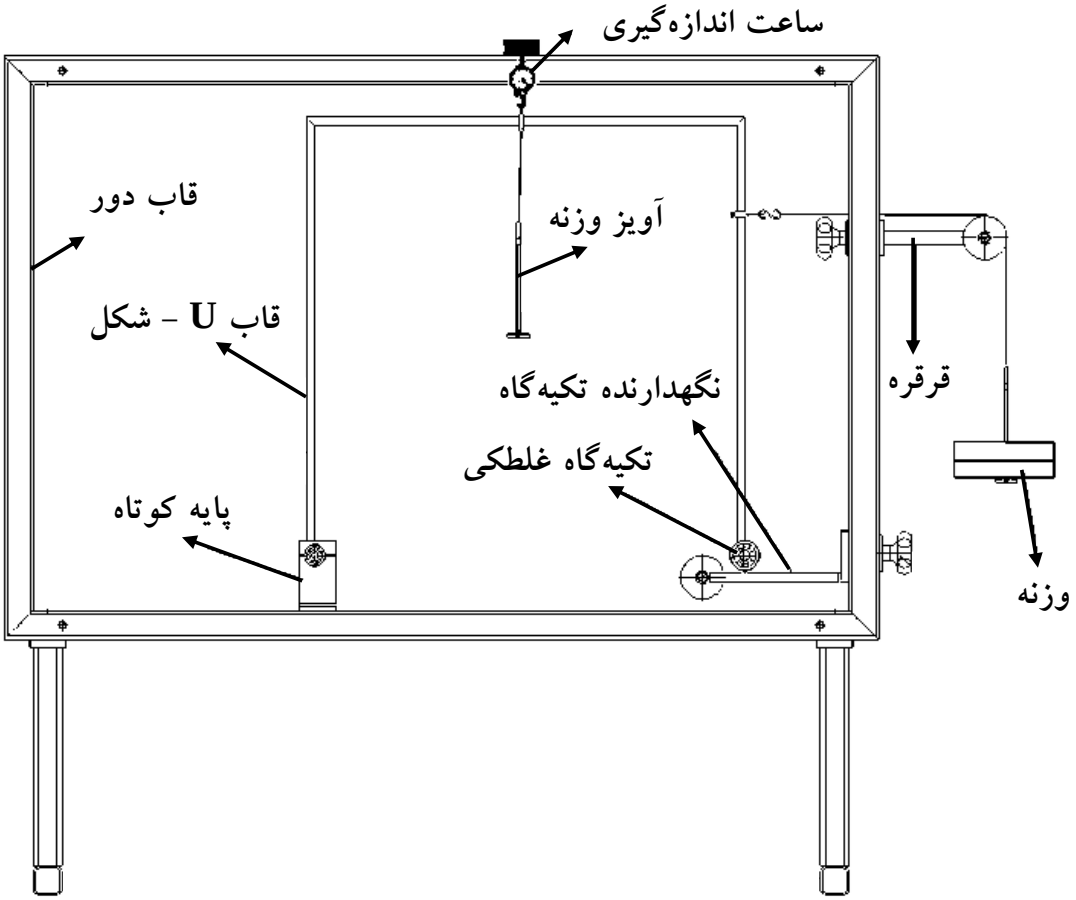
$$U = \int_0^L \frac{M^2}{2EI} dx \qquad (۳)$$

تغییر مکان با استفاده از قضیه کاستیگلیانو:

$$\Delta X = \frac{\partial U}{\partial P} = \int \frac{F}{EA}\frac{\partial F}{\partial P}dL + \int \frac{M}{EI}\frac{\partial M}{\partial P}dL \quad (۴)$$

۳-۹-۲- شرح دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش شامل پایه و مجموعه قاب دستگاه، قاب U–شکل، ساعت اندازه‌گیری، پایه مغناطیسی ساعت اندازه‌گیری، ریسمان و آویز وزنه، قرقره، تکیه‌گاه غلطکی، نگهدارنده تکیه‌گاه غلطکی، پایه کوتاه معین استاتیکی و نامعین استاتیکی و وزنه است (شکل ۱).



شکل ۱: دستگاه آزمایش قاب U–شکل

مشخصات هندسی دستگاه آزمایش قاب U–شکل در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات هندسی دستگاه آزمایش قاب U–شکل

مشخصه	مقدار
طول هر یک از سه بخش نمونه U–شکل (cm)	۶۰
سطح مقطع (cm×cm)	۱ × ۲

۴-۹-۲- روش آزمایش

۱-۴-۹-۲ آزمایش قاب U–شکل، حالت معین استاتیکی

ابتدا لازم است که نمونه U–شکل مطابق شکل ۲ بر روی قاب دور نصب شود. برای این منظور، پایه کوتاه معین استاتیکی و نگهدارنده تکیه‌گاه غلطکی را به کمک گیره پیچی بر روی قاب دور نصب کنید. سپس نمونه به کمک پیچ‌های آلنی پایه کوتاه معین استاتیکی و تکیه‌گاه غلطکی بر روی دستگاه نصب شود (توجه کنید که هنگام بستن پیچ‌ها باید به جهت خزینه بر روی نمونه توجه شود). مطابق شکل آویزهای وزنه و ساعت‌های اندازه‌گیری جابجایی در محل خود بر روی دستگاه نصب می‌شوند.

جهت انجام آزمایش با قراردادن وزنه‌های مختلف بر روی آویزها، میزان جابجایی قاب در محل‌های مورد نظر (محل‌های نصب ساعت‌های اندازه‌گیری)، مطابق جدول ۲ یادداشت کنید.

آزمایش را در سه مرحله انجام دهید.

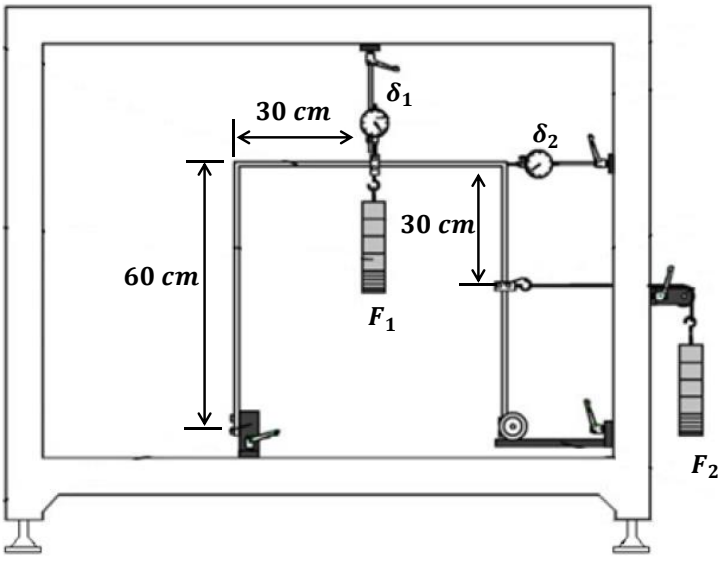
۱. تنها آویز نیرو ۱ بارگذاری شود $(F_1 \neq 0 \, . F_2 = 0)$

۲. تنها آویز نیرو ۲ بارگذاری شود $(F_1 = 0 \, . F_2 \neq 0)$

۳. هر دو آویز نیرو بارگذاری شوند $(F_1 \neq 0 \, . F_2 \neq 0)$

پس از بارگذاری، فرایند باربرداری را نیز به ترتیب انجام داده و میزان جابجایی‌ها را یادداشت کنید.

- قبل از شروع فرایند بارگذاری، ابتدا با بررسی چند وزنه، میزان جابجایی قاب را بررسی کنید تا از اعمال وزنه بیش از حد به قاب جلوگیری شود.
- برای به‌دست آوردن جابجایی صحیح آزمون، باید جایگاه مغناطیسی مربوط به هر ساعت اندازه‌گیری درست انتخاب شود و ضمناً تعامد ساعت اندازه‌گیری نسبت به نمونه رعایت شود.



شکل ۲: محل نصب آویزهای وزنه و ساعت‌های اندازه‌گیری جابجایی در قاب U–شکل

جدول ۲: نتایج تجربی میزان جابجایی قاب U–شکل در حالت معین استاتیکی.

حالت	$F_1\ [kg]$	$F_2\ [kg]$	$\delta_1\ [\times 10^{-2}\ mm]$	$\delta_2\ [\times 10^{-2}\ mm]$
بارگذاری				
باربرداری				

خواسته‌های آزمایش قاب U–شکل، حالت معین استاتیکی

۱. به کمک نرم افزار یا به صورت تئوری، مقدار جابجایی در نقاط مدنظر را به‌دست آورده و با مقادیر تجربی مقایسه کنید (تکمیل جدول ۳).
- درصد خطا را به‌دست آورید.
- دلایل خطا را بیان کنید.

جدول ۳: مقایسه نتایج تجربی و تئوری جابجایی در قاب U–شکل حالت معین استاتیکی

		Experimental		Ansys/Theory		Error	
F_1 $[kg]$	F_2 $[kg]$	δ_1 $[\times 10^{-2}\ mm]$	δ_2 $[\times 10^{-2}\ mm]$	δ_1 $[\times 10^{-2}\ mm]$	δ_2 $[\times 10^{-2}\ mm]$	$e(\delta_1)$ [%]	$e(\delta_2)$ [%]

۲. نمودار بار– جابجایی را برای حالت‌های مختلف رسم کنید.

۳. چرا مقدار جابجایی در زمان باربرداری با بارگذاری متفاوت است.

۲-۴-۹-۲- آزمایش قاب U–شکل، حالت نامعین استاتیکی

در این حالت شرایط مربوط به تکیه‌گاه مفصلی تغییر کرده و به‌صورت گیردار نصب می‌گردد. برای این کار باید پایه کوتاه استاتیکی نامعین را به‌جای پایه کوتاه استاتیکی معین بر روی نمونه بسته شود. سایر شرایط آزمون مانند حالت الف تنظیم و محاسبه می‌شود.

آزمایش را در سه مرحله زیر انجام دهید و نتایج را مطابق جدول ۲ یادداشت کنید.

۱. تنها آویز نیرو ۱ بارگذاری شود $(F_2 = 0 \ . F_1 \neq 0)$

۲. تنها آویز نیرو ۲ بارگذاری شود $(F_1 = 0 \ . F_2 \neq 0)$

۳. هر دو آویز نیرو بارگذاری شوند $(F_2 \neq 0 \ . F_1 \neq 0)$

- قبل از شروع فرایند بارگذاری، ابتدا با بررسی چند وزنه، میزان جابجایی قاب را بررسی کنید تا از اعمال وزنه بیش از حد به قاب جلوگیری شود.

خواسته‌های آزمایش قاب U–شکل، حالت نامعین استاتیکی

۱. به کمک نرم افزار یا به صورت تئوری، مقدار جابجایی در نقاط مدنظر را به‌دست آورده و با مقادیر تجربی مقایسه کنید (تکمیل جدول ۴).
   - درصد خطا را به‌دست آورید.
   - دلایل خطا را بیان کنید.

جدول ۴: مقایسه نتایج تجربی و تئوری جابجایی در قاب U–شکل حالت نا معین استاتیکی

		Experimental		Ansys/Theory		Error	
F_1 $[kg]$	F_2 $[kg]$	δ_1 $[\times 10^{-2}\, mm]$	δ_2 $[\times 10^{-2}\, mm]$	δ_1 $[\times 10^{-2}\, mm]$	δ_2 $[\times 10^{-2}\, mm]$	$e(\delta_1)$ [%]	$e(\delta_2)$ [%]

۲. نمودار بار– جابجایی را برای حالت‌های مختلف رسم کنید.

۳. به ازای بارهای یکسان بین حالت استاتیکی معین و استاتیکی نامعین، مقدار جابجایی چه تغییری می‌کند.
   - در مورد دلایل آن بحث کنید.

۵-۹-۲- نتیجه گیری

در مورد نتایج آزمایش قاب U–شکل بحث و نتیجه‌گیری کنید.

۶-۹-۲- نکات تامینی

- قبل از شروع فرایند بارگذاری، ابتدا با بررسی چند وزنه، میزان جابجایی قاب را بررسی کنید تا از اعمال وزنه بیش از حد به قاب جلوگیری شود.
- حداکثر با اعمالی بر روی هر آویز kg ۸ است.
- در زمان نصب قاب بر روی دستگاه، دقت کنید که قاب بر روی زمین نیافتد. هم‌چنین در زمان نصب قاب، با مهار وزن آن، مانع از آسیب رسیدن به تکیه‌گاه‌ها شوید.
- پس از اتمام آزمایش، دستگاه را به حالت قبل از آزمایش مرتب کنید.

۱۰-۲- آزمایش ۱۰: قاب‌ها ۲ (قاب S-شکل)

۱-۱۰-۲- هدف آزمایش

به‌دست آوردن جابجایی در قاب S-شکل تحت تاثیر نیروهای متفاوت

۲-۱۰-۲- تئوری آزمایش

سازه‌ای را یک قاب می‌نامند که حداقل یکی از عضوهای منفرد آن عضو چند نیرویی باشد. عضو چند نیرویی، عضوی است که سه یا تعداد بیشتری نیرو بر آن اعمال می‌شود و یا تحت تاثیر دو یا چند نیرو و یک یا چند کوپل قرار گیرد. قاب‌ها برای نگهداری بارهای وارد شده طراحی می‌شوند و معمولاً در موقعیت خود ثابت هستند. به طور کلی به‌علت اینکه قاب‌ها دارای عضو چند نیرویی هستند، نیروهای این عضوها در امتداد عضو نخواهند بود [۳].

برای تحلیل قاب‌ها ابتدا دیاگرام آزاد کل قاب رسم می‌شود و معادلات تعادل آن نوشته می‌شود و نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها محاسبه می‌شود. سپس اعضای قاب را از هم جدا کرده و اعضای دو نیرویی و چند نیرویی مشخص می‌شود و با نوشتن معادلات تعادل برای هر عضو، نیروهای مجهول به‌دست می‌آیند [۴].

قضیه تغییر شکل کاستیگلیانو

در حالت کلی، اگر یک سازه الاستیک تحت n بار قرار گیرد، تغییر مکان مربوط به نقطه اثر یک نیرو که در امتداد خط اثر آن نیرو اندازه‌گیری می‌شود را می‌توان به صورت مشتق جزئی انرژی کرنشی سازه نسبت به بار بیان کرد:

$$\Delta X = \frac{\partial U}{\partial P} \qquad (۱)$$

برای محاسبه مقدار جابه‌جایی قاب تحت نیروهای اعمالی می‌توان مقدار انرژی هر بخش از سازه را طبق روابط پایین محاسبه نمود. آنگاه می‌توان به کمک دیفرانسیل گیری نسبت به بار مربوط به محلی که جابجایی آن خواسته شده است، مقدار جابجایی را به‌دست آورد. معادلات انرژی به صورت زیر هستند [۱].

انرژی کرنشی حاصل از بارگذاری محوری:

$$U = \int_0^L \frac{F^2}{2EA} dx \qquad (۲)$$

انرژی کرنشی حاصل از گشتاورهای اعمالی:

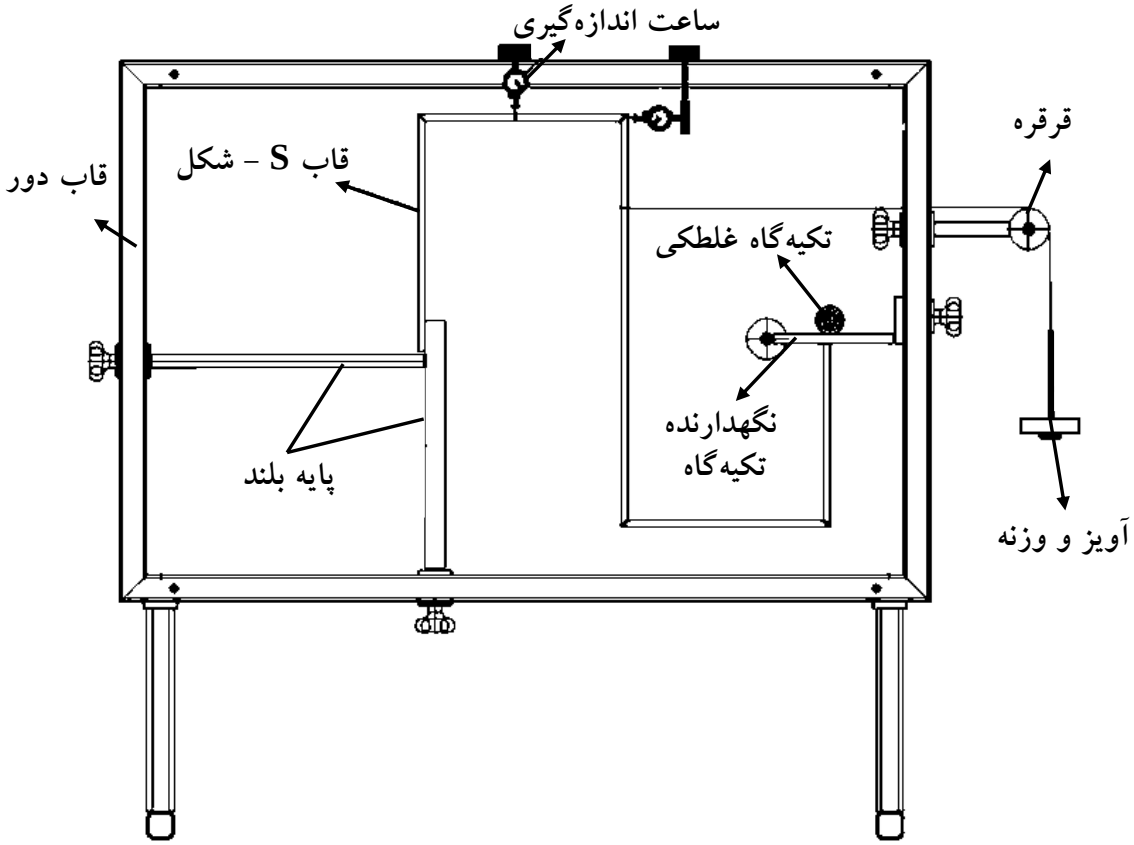
$$U = \int_0^L \frac{M^2}{2EI} dx \qquad (۳)$$

تغییر مکان با استفاده از قضیه کاستیگلیانو:

$$\Delta X = \frac{\partial U}{\partial P} = \int \frac{F}{EA}\frac{\partial F}{\partial P}dL + \int \frac{M}{EI}\frac{\partial M}{\partial P}dL \quad (۴)$$

۳-۱۰-۲- شرح دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش شامل پایه و مجموعه قاب دستگاه، قاب S–شکل، ساعت اندازه‌گیری، پایه مغناطیسی ساعت اندازه‌گیری، ریسمان و آویز وزنه، قرقره، تکیه‌گاه غلطکی، نگهدارنده تکیه‌گاه غلطکی، پایه بلند و وزنه است (شکل ۱).



شکل ۱: دستگاه آزمایش قاب S–شکل

مشخصات هندسی دستگاه آزمایش قاب S–شکل در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات هندسی دستگاه آزمایش قاب S–شکل

مشخصه	مقدار
طول هر یک از بخش‌های نمونه S–شکل (cm)	۳۰ و ۶۰
سطح مقطع (cm×cm)	۱ × ۲

۴-۱۰-۲- روش آزمایش

۱-۴-۱۰-۲ آزمایش قاب S–شکل، حالت نامعین استاتیکی

ابتدا لازم است که نمونه S–شکل مطابق شکل ۲ بر روی قاب دور نصب شود. برای این منظور، پایه بلند در یک طرف نمونه S–شکل و نگهدارنده تکیه‌گاه غلطکی به همراه تکیه‌گاه غلطکی در سمت دیگر بسته می‌شود (لازم است حتما پیچ تکیه‌گاه بلند از دو طرف بر روی قاب دور بسته شود). سپس نمونه به کمک پیچ‌های آلن بر روی تکیه‌گاه‌ها نصب می‌شود. مطابق شکل ۲ آویزهای وزنه و ساعت‌های اندازه‌گیری جابجایی در محل خود بر روی دستگاه نصب می‌شوند.

جهت انجام آزمایش با قراردادن وزنه‌های مختلف بر روی آویزها، میزان جابجایی قاب در محل‌های مورد نظر (محل‌های نصب ساعت‌های اندازه‌گیری) را مطابق جدول ۲ یادداشت کنید.

آزمایش را در سه مرحله انجام دهید.

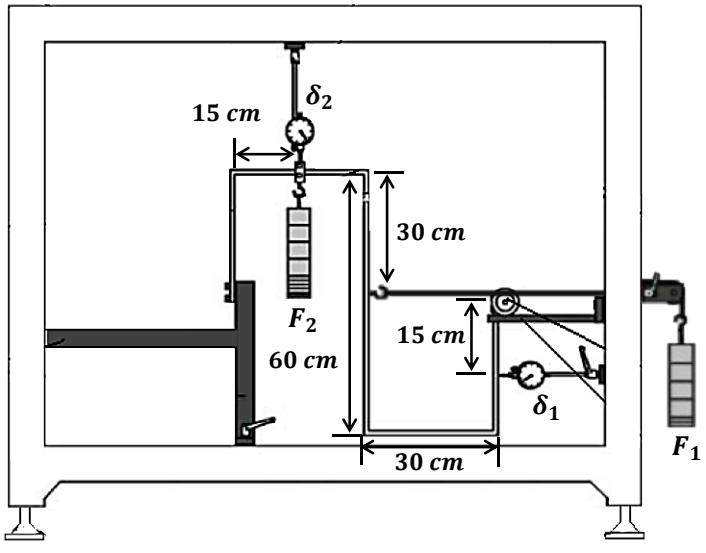
۱. تنها آویز نیرو ۱ بارگذاری شود $(F_1 \neq 0 \, . F_2 = 0)$

۲. تنها آویز نیرو ۲ بارگذاری شود $(F_1 = 0 \, . F_2 \neq 0)$

۳. هر دو آویز نیرو بارگذاری شوند $(F_1 \neq 0 \, . F_2 \neq 0)$

پس از بارگذاری، فرایند باربرداری را نیز به ترتیب انجام داده و میزان جابجایی‌ها را یادداشت کنید.

- قبل از شروع فرایند بارگذاری، ابتدا با بررسی چند وزنه، میزان جابجایی قاب را بررسی کنید تا از اعمال وزنه بیش از حد به قاب جلوگیری شود.
- برای به‌دست آوردن جابجایی صحیح آزمون، باید جایگاه مغناطیسی مربوط به هر ساعت اندازه‌گیری درست انتخاب شود و ضمناً تعامد ساعت اندازه‌گیری نسبت به نمونه رعایت شود.



شکل ۲: محل نصب آویزهای وزنه و ساعت‌های اندازه‌گیری جابجایی در قاب S–شکل

جدول ۲: نتایج تجربی میزان جابجایی قاب S–شکل در حالت معین استاتیکی.

حالت	$F_1\ [kg]$	$F_2\ [kg]$	$\delta_1\ [\times 10^{-2}\ mm]$	$\delta_2\ [\times 10^{-2}\ mm]$
بارگذاری				
باربرداری				

خواسته‌های آزمایش قاب S–شکل، حالت نامعین استاتیکی

۱. به کمک نرم افزار یا به صورت تئوری، مقدار جابجایی در نقاط مدنظر را به‌دست آورده و با مقادیر تجربی مقایسه کنید (تکمیل جدول ۳).
- درصد خطا را به‌دست آورید.
- دلایل خطا را بیان کنید.

جدول ۳: مقایسه نتایج تجربی و تئوری جابجایی در قاب S–شکل حالت معین استاتیکی

		Experimental		Ansys/Theory		Error	
F_1 $[kg]$	F_2 $[kg]$	δ_1 $[\times 10^{-2}\ mm]$	δ_2 $[\times 10^{-2}\ mm]$	δ_1 $[\times 10^{-2}\ mm]$	δ_2 $[\times 10^{-2}\ mm]$	$e(\delta_1)$ $[\%]$	$e(\delta_2)$ $[\%]$

۲. نمودار بار– جابجایی را برای حالت‌های مختلف رسم کنید.

۳. چرا مقدار جابجایی در زمان باربرداری با بارگذاری متفاوت است.

۵–۱۰–۲– نتیجه گیری

در مورد نتایج آزمایش تحلیل قاب S–شکل بحث و نتیجه‌گیری کنید.

۶–۱۰–۲– نکات تامینی

- قبل از شروع فرایند بارگذاری، ابتدا با بررسی چند وزنه، میزان جابجایی قاب را بررسی کنید تا از اعمال وزنه بیش از حد به قاب جلوگیری شود.
- حداکثر با اعمالی بر روی هر آویز ۸ kg است.

- در زمان نصب قاب بر روی دستگاه، دقت کنید که قاب بر روی زمین نیافتد. هم‌چنین در زمان نصب قاب، با مهار وزن آن، مانع از آسیب رسیدن به تکیه‌گاه‌ها شوید.
- پس از اتمام آزمایش، دستگاه را به حالت قبل از آزمایش مرتب کنید.

۲-۱۱- مراجع

۱. Beer, F., et al., *Mechanics of Materials. 7th_Edition.* New York. MeGraw-Hill Education Ltd, 2015.
۲. Budynas, R.G. and J.K. Nisbett, *Shigley's mechanical engineering design*. Vol. 9. 2011: McGraw-hill New York.
۳. Meriam, J. and L. Kraige, *Engineering Mechanics: Statics: Statics*. 2011: Wiley Global Education.
۴. Beer, F., E. Johnston, and D. Mazurek, *EBOOK: Vector Mechanics for Engineers: Statics (SI units)*. 2012: McGraw Hill.