

آزمایشگاه‌های آموزشی دانشکده مهندسی شیمی

بهار ۱۴۰۱

○ آزمایشگاه خواص فیزیکی و مکانیکی پلیمرها



آزمایشگاه خواص فیزیکی و مکانیکی پلیمرها

تعریف آزمایشگاه:

آزمایشگاه خواص فیزیکی و مکانیکی پلیمرها به منظور آشنایی عملی دانشجویان رشته مهندسی پلیمر با مفاهیمی است که در درس خواص فیزیکی و مکانیکی پلیمرها به صورت تئوری فراگرفته‌اند.

نام انگلیسی آزمایشگاه:

Physical and Chemical Properties of Polymers Laboratory

شرح وظایف کارشناس آزمایشگاه:

- ۱- نظارت بر حسن اجرای آزمایش‌ها مطابق با دستورالعمل کار با دستگاه‌ها
- ۲- نظارت بر اجرای دقیق آیین‌نامه‌های سلامت، ایمنی و محیط زیستی
- ۳- نظارت بر نظم و تمیزی آزمایشگاه
- ۴- پاسخ‌گویی به سؤال‌ها و اشکال دانشجویان
- ۵- طرح سؤال‌های مفهومی و به چالش کشاندن دانشجویان به منظور تفکیک سطح علمی دانشجویان
- ۶- ارزشیابی پایان‌ترم دانشجویان با برگزاری امتحان نهایی و تنظیم فهرست نمره دانشجویان

دستگاه‌های مورد استفاده:

- ۱- دستگاه اندازه‌گیری نقطه نرمی
- ۲- دستگاه اندازه‌گیری شاخص جریان مذاب
- ۳- دستگاه تنسایل
- ۴- دستگاه سختی سنج Shore
- ۵- دستگاه اندازه‌گیری مقاومت ضربه Charpy
- ۶- آون حرارتی
- ۷- ترازو

دستگاه‌های معیوب یا راه‌اندازی نشده:

۱- سختی سنج راکول

۲- ترازوی مکانیکی

۳- دستگاه کشش

نکات ایمنی:

- ۱- رعایت نظم و نکات ایمنی در آزمایشگاه الزامی است.
- ۲- از محل نگهداری جعبه کمک‌های اولیه، کپسول آتش‌نشانی و نحوه کار آن‌ها مطلع باشید.
- ۳- از دست زدن به دستگاه‌ها یا مواد ناشناس خودداری کنید.
- ۴- هنگام کار با مواد شیمیایی یا دستگاه‌ها، از تجهیزات ایمنی استفاده کنید.
- ۵- تمام مواد شیمیایی باید با فرض سمی بودن بکار گرفته شوند. پس همیشه قبل از کار با ماده موردنظر، MSDS و TDS آن را مطالعه کنید.
- ۶- در پایان کار، میز کار خود را تمیز کرده و وسایل و مواد را سر جای مناسب قرار دهید.
- ۷- هنگام انجام آزمایش، هرگز آزمایش را بدون ناظر رها نکرده و آزمایشگاه را ترک نکنید.
- ۸- هنگام کار با لوله حاوی مواد شیمیایی، دهانه آن را سمت خود یا دوستانتان نگیرید.
- ۹- از خوردن و آشامیدن و استفاده از موبایل در آزمایشگاه، جداً خودداری کنید.
- ۱۰- مدت‌زمان تحویل گزارش کامل، دو هفته بعد از انجام آزمایش هست.
- ۱۱- به نمونه‌ها باید برچسب زده تا قابل‌شناسایی باشند و بعد از انجام هر آزمایش، به کارشناس آزمایشگاه تحویل داده شوند.
- ۱۲- کلیه دانشجویان ملزم به یادگیری و تسلط به کلیه آزمون‌ها و محاسبات مربوطه هستند.
- ۱۳- حین کار باید تمامی جزئیات و مشاهدات آزمون ثبت و در گزارش ارائه شود.
- ۱۴- معیار نمره درس، فعالیت کلاسی، گزارش کامل و امتحان کتبی هست.
- ۱۵- در صورت آسیب دیدن دستگاه‌ها یا وسایل، جبران خسارت بر عهده دانشجو هست.
- ۱۶- جهت قابل استناد بودن نتایج، هنگام کار با دستگاه‌های اندازه‌گیری، دقت بسیار لازم است؛ از طرف دیگر نباید فراموش کرد که کوچک‌ترین آسیب به دستگاه، باعث از رده خارج‌شده آن شده و تعمیر آن عملاً غیرممکن است.
- ۱۷- پس از انجام هر آزمایش، دستگاه را خاموش کرده و اتصال برق دستگاه را قطع کنید.

آزمایش شماره ۱ - شاخص جریان مذاب (Melt Flow Index)

مقدار ماده مذابی که در مدت زمان مشخص (۱۰ دقیقه) از دستگاه استاندارد (دای با ابعاد مشخص)، تحت بار معین و درجه حرارت مشخص خارج می‌شود، شاخص جریان مذاب (MFI) نام دارد. مقدار MFI برای تعیین میزان سهولت قالب‌گیری مواد پلیمری به روش‌های تزریق و اکستروژن مفید بوده و با وزن مولکولی نسبت عکس دارد. هرچه وزن مولکولی پلیمر بیشتر باشد، گره خوردگی زنجیرها بیشتر شده و MFI کمتر خواهد بود. آزمون MFI برای تشخیص ناماناهای مختلف یک پلیمر، کنترل کیفیت ترموپلاستیک‌های با ویسکوزیته نسبتاً پایین و دسته‌بندی آن‌ها بکار می‌رود. دما و بار استاندارد برای آزمون MFI هر پلیمر متفاوت است. برای مثال، دمای آزمایش برای PE، 190°C و برای PP، 230°C است. بار استاندارد برای LDPE و PP معادل 2.16kg و برای HDPE معادل 5kg است. نمونه مورد استفاده می‌تواند به صورت گرانول، پودر، تکه‌های فیلم و یا قطعات قالب‌گیری شده باشد.

روش کار:

دستگاه را روشن کرده، شرایط دمایی را اعمال کرده و سیلندر با میله مخصوص را تمیز می‌کنیم. پس از رسیدن دستگاه به دمای مورد نظر، گرانول PE یا PP را داخل سیلندر ریخته و پیستون را روی مواد داخل سیلندر قرار می‌دهیم. طبق استاندارد، برای PE و PP، زمان پیش‌گرمایش (Preheating) باید به ترتیب ۵ و ۶ دقیقه در نظر گرفته شود. بعد از آن، وزنه‌ها روی پیستون قرار داده می‌شوند. پس از خروج مواد، ماده اکستروژن شده اولیه را که ممکن است حاوی حباب یا مواد آلوده‌کننده باشد، دور ریخته و بعد در فواصل زمانی معین (بسته به نوع ماده) جریان اکستروژن شده را قطع می‌کنیم. سپس مواد بریده‌شده را وزن کرده و بعد از به دست آوردن وزن متوسط آن‌ها، مقدار MFI را بر حسب $\text{g}/10\text{min}$ حساب می‌کنیم.

ابعاد die: قطر = 2.095mm ، ارتفاع = 8mm



مقدار مورد اندازه‌گیری	وضعیت کنونی	شماره سریال	نام دستگاه
شاخص وزن پلیمر خروجی ماده مذاب	سالم	-	MFI

سلامت، ایمنی و محیط زیستی دستگاه:

دستگاه به‌دوراز هرگونه رطوبت و آلودگی قرار گیرد.

دستگاه بایستی متصل به سیم ارت باشد.

قبل از استفاده آموزش‌های لازم از طرف مسئول آزمایشگاه لازم و ضروری است.

به دلیل استفاده از دستگاه در دمای بالا، استفاده از دستکش نسوز لازم است.

پس از پایان کار دستگاه را کاملاً تمیز نموده و از خاموش بودن دستگاه اطمینان پیدا کنید.

فعالیت‌های پژوهشی:

۱. MFI یک ماده پلیمری به چه عواملی بستگی دارد و فرق آن با FR چیست؟ توضیح دهید.

۲. عوامل مؤثر بر نتایج حاصل از اندازه‌گیری MFI در حین آزمایش را شرح دهید.

۳. مقدار MFI برای PE یا PP را به دست آورده، با مقدار حاصل از مراجع مقایسه کرده و دلیل تفاوت را ذکر کنید.

۴. اثر وزنه را بر دبی خروجی نمونه مرود آزمایش، بررسی کنید.

۵. منحنی رئولوژیکی ($\tau-\dot{\gamma}$) نمونه آزمون شده را رسم کنید.

آزمایش شماره ۲ - ساخت کامپوزیت

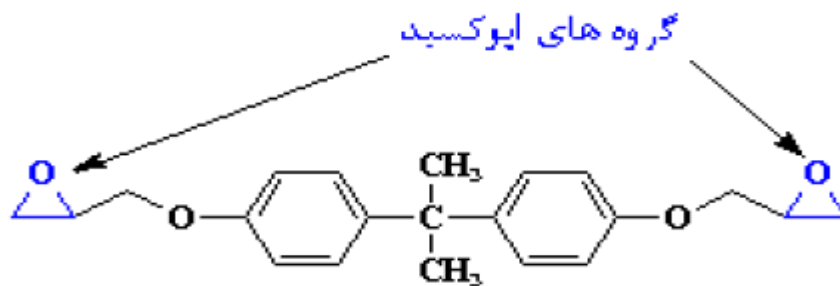
به‌طور کلی کامپوزیت یک مخلوط فیزیکی است که از ماتریس (رزین)، فیلر (تقویت‌کننده خواص)، عامل شبکه‌ای‌کننده، شتاب‌دهنده و آغازگر تشکیل شده است. البته وجود هر یک از اجزا (به‌جز ماتریس و فیلر) در یک کامپوزیت، الزامی نیست.

رزین:

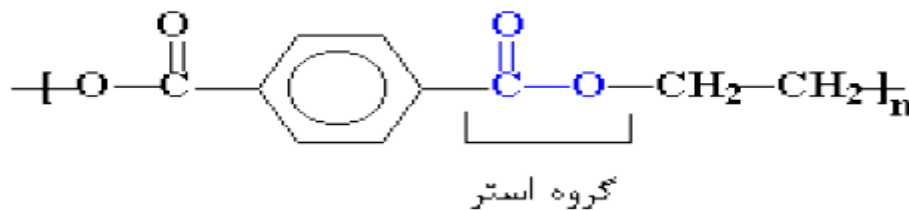
رزین یک پیش پلیمر است، یعنی پلیمری با جرم مولکولی پایین؛ به‌طوری‌که حین واکنش پلیمریزاسیون، به طریقی واکنش خاتمه یافته است.

انواع رزین:

۱ - اپوکسی: یک پلیمر مهندسی است و خواص خوبی دارد؛ شفاف است، اما قیمت نسبتاً بالایی دارد.



۲ - پلی‌استر: ترکیبات غیراشباع ارزان هستند. قایق‌ها با استفاده از الیاف شیشه و این رزین ساخته می‌شوند.



۳ - پلی‌ایمیدها: دسته جدیدی از رزین‌ها هستند که کاربرد نظامی دارند. در نازل راکت‌ها (دمای ذوب حدود 2500°C) استفاده می‌شوند. در شاتل‌های فضایی، لحظه ورود به جو، اصطکاک بسیار زیاد باعث ایجاد دمای بسیار بالا می‌شود. به همین دلیل، بدنه شاتل فضایی را با لایه‌ای از پلیمر ذکر شده می‌سازند.

پلی استرها	
مزایا	معایب
سهولت در مصرف پایین ترین قیمت بین رزین های موجود	مقاومت های مکانیکی متوسط انتشار زیاد استایرن در قالب گیری باز جمع شوندگی زیاد در حین پخت زمان کار محدود بعد از افزودن فعال کننده
وینیل استرها	
مزایا	معایب
مقاومت های شیمیایی و محیطی بسیار بالا مقاومت های مکانیکی بالاتر نسبت به پلی استرها	برای رسیدن به خواص مکانیکی بالا، به پخت تکمیلی نیاز دارد انتشار زیاد استایرن در قالب گیری باز جمع شوندگی زیاد در حین پخت قیمت گران تر از پلی استر
اپوکسی ها	
مزایا	معایب
مقاومت های مکانیکی و حرارتی بالا مقاومت به آب بالا مدت زمان طولانی جهت کار کردن مقاومت حرارتی تا ۱۴۰ درجه سانتی گراد مرطوب و ۲۲۰ درجه سانتی گراد خشک جمع شوندگی کم	حساسیت و آسیب پذیری در اختلاط و به هم زدن قیمت بسیار گران تر از وینیل استرها نیاز به تمهیدات ایمنی هنگام جابجایی و استفاده دارد تمایل به زردشدگی در مقابل نور و حرارت تخریب بسیار در مقابل نور

به طور کلی، نقش ماتریس در ساخت یک کامپوزیت: (۱) نگه دارنده فیلر/تقویت کننده (درون ماتریس پراکنده می شود). گاهی اوقات، هنگامی که فیلرهایی از جنس الیاف شیشه یا کربن روی هم قرار می گیرند، به دلیل سفت و سخن بودن این الیاف، اصطکاک شدید ایجاد می شود و در نتیجه، پس از تحمل چند تنش، خود آن ها باعث از بین رفتن هم می شوند و اصطلاحاً "می برند". برای اینکه این اتفاق رخ ندهد، رزین به عنوان یک جداکننده بین الیاف قرار می گیرد. (۲) در صورت اعمال تنش به کامپوزیت، می تواند تنش را به فیلر منتقل کند و نقش انتقال دهنده نیرو را دارد. (۳) از فیلر در برابر عوامل جوی محافظت می کند.

رزین باید طوری انتخاب شود که میزان Shrinkage یا جمع شدگی (همان نزدیک شدن باندها به هنگام شبکه‌ای شدن) تا حد امکان، کاهش یابد. پس با انتخاب فیلر با ابعاد مناسب و یا کاهش تعداد اتصالات عرضی (افزایش جرم مولکولی اتصالات عرضی) می‌توان جمع‌شدگی را کاهش داد.

فیلر:

عمده خواص مکانیکی یک کامپوزیت به دلیل وجود فیلر است. فیلرها به لحاظ ماهیت شیمیایی، آلی یا معدنی هستند.

عامل شبکه‌ای کننده:

در مورد رزین اپوکسی، عامل شبکه‌ای کننده معمولاً آمینی، آمیدی یا اسیدی است. در رزین پلی‌استر، معمولاً یک کوچک مولکول (استایرن) با باند دوگانه است. این باند دوگانه باز شده، کوچک مولکول تبدیل به رادیکال شده و به زنجیر پیش پلیمر حمله می‌کند.

شتاب‌دهنده و آغازگر:

در تولید صنعتی، به آغازگری با سرعت تخریب مناسب نیاز است. از شتاب‌دهنده‌ها نیز برای افزایش سرعت تخریب آغازگر استفاده می‌شود. آغازگرها موادی ناپایدارند (معمولاً پراکسیدی) که با افزایش دما، تخریب می‌شوند؛ مقدار آن باید مناسب و کنترل شده باشد. شتاب‌دهنده‌ها معمولاً از ترکیبات فلزی مانند Fe ، Ni ، Fe_2O_3 و Co هستند.

روش کار:

می‌خواهیم با رزین اپوکسی و هاردنر (عامل شبکه‌ای کننده) و دو نوع فیلر (گچ و سیمان)، کامپوزیت‌هایی با درصد‌های وزنی مختلف (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) بسازیم. در دو ظرف، ۳۶ g اپوکسی ریخته و ۲ g فیلر (نمونه ۵ درصد) به رزین اضافه کنید (ظرف اول گچ و دوم سیمان) و هم بزنید. حضور حباب هوا درون کامپوزیت، خواص مکانیکی را بسیار کاهش می‌دهد. بهتر است با پمپ خلأ، حباب‌های هوا را خارج کرد. بعد با قطره‌چکان، ۴ g هاردنر اضافه کرده و دوباره هم بزنید. در نهایت نمونه‌های با درصد‌های وزنی مختلف را درون قالب بریزید تا پخت شوند.



فعالیت پژوهشی

- ۱ - تغییر جرم مولکولی در پلیمریزاسیون تراکمی و رادیکالی را مقایسه کنید.
- ۲ - سایر انواع رزین را نام برده و به طور مختصر، در مورد آن‌ها توضیح دهید.
- ۳ - اگر یک رزین را با فیلر گچ مخلوط کنیم و در قالب بریزیم و در آن را ببندیم؛ به طوری که پلیمریزاسیون شروع شده باشد، بهتر است فرایند پلیمریزاسیون اولیه، رادیکالی باشد یا تراکمی؟ چرا؟
- ۴ - انواع فیلر را از نظر شکل و اندازه نام ببرید.
- ۵ - درباره این عبارات را توضیح دهید: dispersion- distribution- percolation- agglomeration

آزمایش شماره ۳ - آزمون سختی دورومتر

سختی، مقاومت ماده در برابر تغییر شکل، بخصوص تغییر شکل دائمی است که یک پارامتر نسبی بوده و معمولاً برای مقایسه پایه‌های مختلف یک نوع پلاستیک بکار می‌رود. یکی از روش‌های اندازه‌گیری سختی، روش دورومتر است که بر پایه نفوذ یک سوزن مخصوص در داخل ماده، تحت بار معین طراحی شده است. این آزمون دورومتر نوع A، B، C و D را پوشش می‌دهد (اعداد خوانده‌شده، بدون بعد هستند) و محدوده‌ای از رابر ولکانیزه نرم تا بعضی پلاستیک‌های سخت را شامل می‌شود. دورومتر A برای اندازه‌گیری مواد نرم‌تر و دورومتر D برای مواد سخت‌تر استفاده می‌شود. با استفاده از این استاندارد، سختی بر اساس فرورفتگی ابتدایی، فرورفتگی بعد از یک زمان معین یا هر دو، اندازه‌گیری می‌شود.

در این روش، سوزن با عمق نفوذ رابطه عکس دارد و وابسته به مدول و رفتار ویسکوالاستیک ماده است. وزنه به‌کاررفته برای Shore A، حدود ۱ kg و برای Shore D، حدود ۵ kg است. دورومتر شامل اجزاء زیر است:

پایه فشار، سوزن فولادی با قطر ۱,۴-۱,۱۵mm و صفحه‌نمایش

نیروی اعمال‌شده توسط دستگاه، از معادلات زیر حساب می‌شود:

$$(1) F = 0.55 + 0.075H_A \quad (2) F = 0.445H_D$$

که H_D و H_A به ترتیب سختی خوانده‌شده از دورومتر نوع A و نوع D می‌باشند.

نمونه باید حداقل ۶mm ضخامت داشته باشد، مگر اینکه مشخص باشد که نتایج به‌دست‌آمده از قطعه باریک‌تر، دقیقاً مساوی است. ابعاد افقی قطعه باید در حدی باشند تا حداقل اندازه‌گیری در محلی به فاصله ۱۲ mm از هر لبه انجام شود، مگر اینکه مشخص شود که نتایج به‌دست‌آمده، هنگامی که اندازه‌گیری‌ها در فاصله کمتر از لبه‌ها انجام می‌شود، یکسان است. آزمون‌ها باید در دمای 23 ± 2 °C انجام شوند، مگر اینکه دمای آزمون معین شده باشد. در مواردی که سختی آن‌ها وابسته به رطوبت نسبی نیست، دورومتر و قطعه‌ها قبل از انجام آزمون باید حداقل یک ساعت در دمای ذکرشده قرار بگیرند.



مقدار مورد اندازه گیری	وضعیت کنونی	شماره سریال	نام دستگاه
میزان سختی کامپوزیت پلیمری	معیوب	-	سختی سنج

سلامت، ایمنی و محیط زیستی دستگاه:

دستگاه به دوراز هرگونه رطوبت و آلودگی قرار گیرد.

قبل از استفاده آموزش‌های لازم از طرف مسئول آزمایشگاه لازم و ضروری است.

به دلیل استفاده از وزنه سنگین، احتیاط لازم به عمل آید.

پس از پایان کار دستگاه کاملاً تمیز شده و در جای مناسب قرار گیرد.

روش کار:

نمونه کامپوزیتی را روی پایه دستگاه قرار دهید. دورومتر را در یک وضعیت عمودی روی قطعه نگه‌دارید؛ به طوری که فاصله سوزن از هر لبه حداقل ۱۲mm باشد. وزنه مناسب را روی دستگاه قرار دهید. پس از ثابت شدن عقربه، مقدار سختی را یادداشت کنید. اندازه‌گیری سختی را در ۵ موقعیت مختلف روی قطعه و حداقل به فاصله ۶ mm از هم انجام دهید و مقدار میانگین را حساب کنید.

بین میزان سختی آزمایش (H) و مقدار نفوذ سوزن در پلیمر (h)، برحسب mm، رابطه زیر برقرار است:

$$H = 100 - 40h \quad (۳)$$

معادله زیر، رابطه بین مدول الاستیسیته پلیمر و عمق فرورفتگی سوزن را نشان می‌دهد.

$$h = \left[\frac{3}{4} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \times F^{\frac{2}{3}} \times R^{\frac{-1}{3}} \quad (۴)$$

که ν_1 ، ν_2 ، E_1 و E_2 به ترتیب ضریب پواسون و مدول سوزن و نمونه، F نیروی اعمال شده و R شعاع نوک سوزن می‌باشند. به دلیل این که مدول فولاد از مدول پلیمر خیلی بالاتر است، از جمله $\frac{1-\nu^2}{E_1}$ صرف نظر می‌شود.

فعالیت پژوهشی

- ۱ - عوامل مؤثر بر سختی پلیمرها را نام ببرید.
- ۲ - روش‌های اندازه‌گیری سختی پلیمرها را نام ببرید.
- ۳ - نیروی اعمال شده به نمونه را حساب کنید.
- ۴ - اثر افزودن درصد‌های مختلف فیلر بر سختی نمونه را به صورت نمودار رسم کنید.
- ۵ - مدول نمونه را با استفاده از معادله ۴ حساب کنید.

آزمایش شماره ۴- تعیین مقاومت ضربه پلیمرها به روش پاندولی

این آزمون به روش‌های متعددی انجام می‌گیرد که مهم‌ترین آن‌ها، روش پاندولی است که خود نیز به دو روش Izod و Charpy تقسیم می‌شود.

روش Izod: در این روش، نمونه به صورت عمودی قرار گرفته و چکش به محل شکاف، برخورد می‌کند.

روش Charpy: در این روش، نمونه به صورت افقی قرار گرفته و شکاف نمونه، پشت به محل برخورد چکش قرار می‌گیرد.

در این آزمایش، از یک دستگاه استاندارد که دارای چکشی با ابعاد مشخص است، استفاده می‌گردد. در حقیقت انرژی مصرف‌شده، شامل شروع ترک، رشد ترک و نیز پرت کردن نمونه است. انرژی شکست، مقدار انرژی مصرف‌شده در اثر شکست یک نمونه با ابعاد استاندارد، توسط برخورد چکش استاندارد دستگاه است. با تقسیم کردن این انرژی به سطح مقطع شکست و یا ضخامت نمونه، مقاومت ضربه با دو روش و دو واحد مختلف محاسبه می‌شود. معمولاً نمونه‌های با مقاومت ضربه بالا را شکاف می‌زنند تا تمرکز تنش به وجود آمده و بتوان رفتار ductile نمونه را به brittle تبدیل کرد. با ایجاد شکاف، انرژی لازم برای به وجود آمدن ترک حذف می‌شود و این حالت به خصوص در مواردی که انرژی زیادی برای ایجاد ترک نیاز است، اهمیت دارد. ابعاد شکاف مطابق استاندارد و با عمق ۲,۵۴mm است.

در صورت تجهیز دستگاه به Strain gauge، Storage، Osiloscope و Load sensor که به دستگاه ضربه‌زننده متصل می‌شوند. می‌توان به اطلاعات مفیدتری از جمله تشخیص نوع شکست (ductile یا brittle) و یا آزمون کشش با سرعت زیاد نیز وجود دارد.



نام دستگاه	شماره سریال	وضعیت کنونی	مقدار مورد اندازه گیری
اندازه گیری مقاومت ضربه	۶۷۰۵	سالم	میزان ضربه پذیری کامپوزیت پلیمری

سلامت، ایمنی و محیط زیستی دستگاه:

دستگاه به دوراز هرگونه رطوبت و آلودگی قرار گیرد.

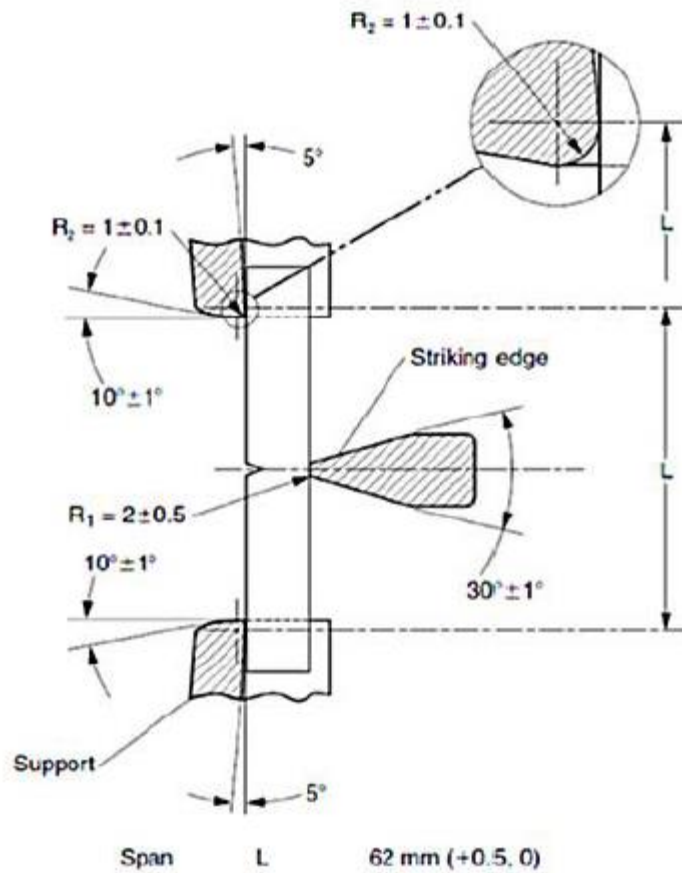
قبل از استفاده آموزش های لازم از طرف مسئول آزمایشگاه لازم و ضروری است.

تا زمانی که پاندول دستگاه از حرکت نایستاده است احتیاط لازم به عمل آید و دست به طرف دستگاه برده نشود.

پس از پایان کار دستگاه کاملاً تمیز شده و در جای مناسب قرار گیرد.

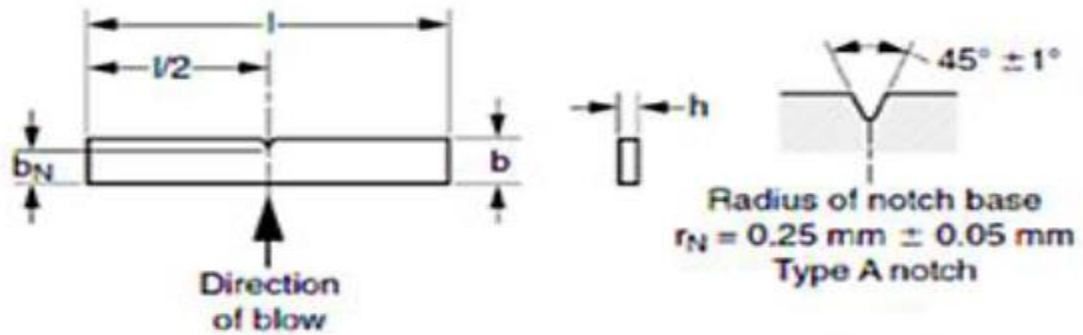
روش کار:

پس از قرار دادن عقربه دستگاه چارپی روی صفر، چکش دستگاه را بدون نمونه رها کنید و مقدار انرژی نشان داده شده را یادداشت کنید. سطح مقطع نمونه های کامپوزیتی را با استفاده از کولیس اندازه بگیرید، سپس نمونه را در دستگاه قرار داده و مقدار انرژی را یادداشت کنید. پس از آن، با استفاده از انرژی حالت اول (بدون نمونه) و دوم، انرژی شکست نمونه ها را به دست آورید.



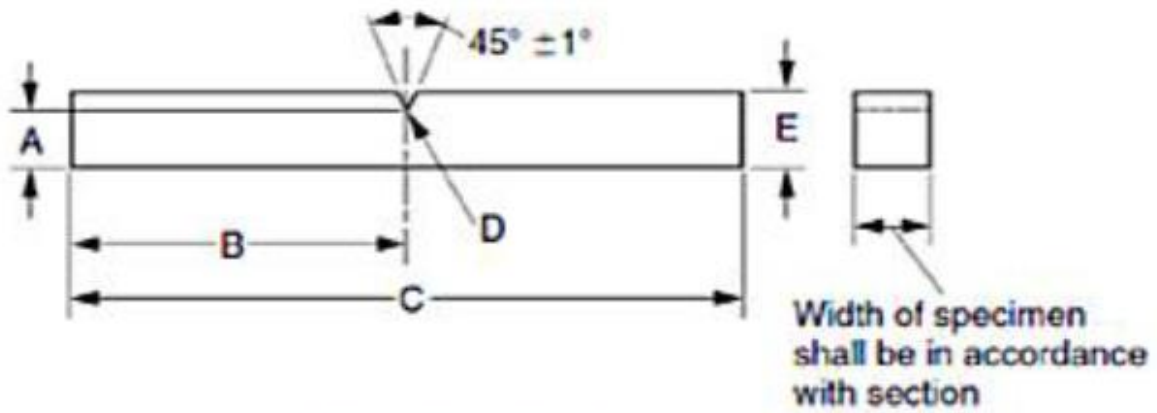
Relationship of support, specimen, and striking edge to each other in Charpy impact test (ISO 179-1: 1998).

نحوه قرار گرفتن نمونه چارپی در دستگاه آزمون



Thickness of specimen	h	$4.0 \pm 0.2 \text{ mm}$
Length of specimen	l	$80 \pm 2 \text{ mm}$
Width of specimen	b	$10 \pm 0.2 \text{ mm}$
Remaining width at notch base	b_N	$8 \pm 0.2 \text{ mm}$

Dimensions of Charpy impact test specimen (ISO 179-1: 1998).



A	10.16 ± 0.05 mm
B	32.0 mm max / 31.5 mm min
C	63.5 mm max / 60.3 mm min
D	0.25 ± 0.05 mm R
E	12.7 ± 0.15 mm

Dimensions of Charpy impact test specimen (ASTM D 256-97).

ابعاد نمونه چارپی مطابق استانداردهای مختلف

فعالیت پژوهشی

- ۱ - مقاومت ضربه نمونه‌ها را محاسبه کنید.
- ۲ - مقاومت ضربه پلیمرها به چه عواملی بستگی دارد و چگونه می‌توان آن را افزایش داد؟
- ۳ - اثر درصد‌های مختلف فیلر بر مقاومت ضربه را به صورت نمودار رسم کنید.
- ۴ - پدیده Stress Whitening چیست و نمایانگر مقاومت ضربه بالا و یا پایین در پلیمرها است؟
- ۵ - اثر شکاف بر مقاومت ضربه پلیمرها چیست؟
- ۶ - چگونه با مشاهده سطح شکست یک پلیمر به میزان تقریبی مقاومت ضربه آن پی می‌بریم؟

آزمایش شماره ۵- تعیین خواص کششی ماده

آزمون تنش- کرنش یک نمونه پلیمری می‌تواند به صورت کششی، خمشی، برشی، فشاری و یا پیچشی انجام شود. یکی از ساده‌ترین و بارزترین آزمایش‌هایی که به منظور بررسی ارتباط تنش وارد بر نمونه و تغییر شکل حاصل از آن، در دما و رطوبت نسبی ثابت انجام می‌شود، آزمایش کشش است. در این آزمایش، یک نمونه استاندارد (دمبلی شکل) ساخته شده و در مراحل دستگاه تنسایل، بین دو فک (یک فک ثابت و دیگری متحرک) تحت کشش با نیروی ثابت قرار گرفته و تا لحظه شکست نمونه، منحنی تغییرات تنش برحسب کرنش توسط دستگاه ترسیم می‌گردد. در شکل، ابعاد استاندارد نمونه مشاهده می‌شود. ضخامت نمونه نباید بیش از ۱۰mm و کمتر از ۱ mm باشد. قطعات آزمایشی باید بین دو فک ثابت و متحرک بسته شوند؛ به طوری که فک به محض وارد شدن بار، آزادانه در یک راستا حرکت کند و تا حد امکان، با جهت کشش هم‌راستا باشد؛ به طوری که هیچ حرکت چرخشی باعث لغزش فک‌ها نشود. فاصله بین دو خط موازی در قسمت باریک‌تر دمبل (کرنش) توسط دستگاه کشش یا دستگاه ازدیاد طول اندازه‌گیری می‌شود.



نام دستگاه	شماره سریال	وضعیت کنونی	مقادیر مورد اندازه‌گیری
Universal testing mchine	-	سالم	استحکام کششی، مدول کششی، نمودار تنش کرنش، تنش تسلیم

سلامت، ایمنی و محیط زیستی دستگاه:

هنگام آزمون کشش سرعت دستگاه روی ۵۰ الی ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم گردد.

گیره‌های مورد استفاده برای نگهداری آزمون‌ها باید به نحوی به دستگاه متصل شوند که محورهای اصلی نمونه با جهت کشش از خط مرکزی هر دو گیره منطبق باشد.

برای اندازه‌گیری مدول کششی ضروری است سرعت کرنش ثابت باشد و تغییر نکند.

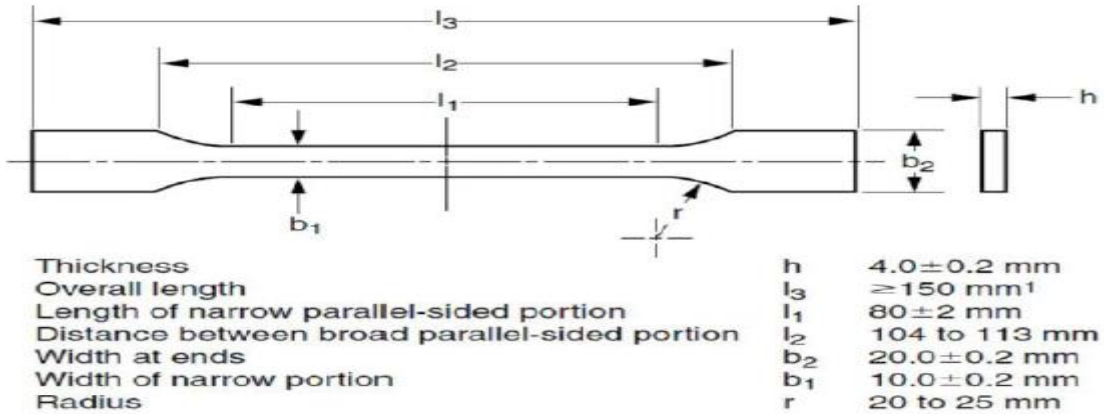
برای کالیبراسیون دستگاه از استاندارد iso9513 استفاده شود.

روش کار:

پس از اطمینان از اتصال دستگاه به برق و روشن کردن آن، نرم‌افزار دستگاه را فعال کنید. فک‌ها را تا فاصله استاندارد به یکدیگر نزدیک کرده و پس از اندازه‌گیری دقیق ابعاد نمونه، آن را به‌طور عمودی و متقارن در بین دو فک قرار داده و فک‌ها را محکم ببندید. در صورت نیاز به نتایج دقیق مدول، اکستنسومتر را نیز بر روی نمونه نصب کنید. سپس ابعاد نمونه، سرعت موردنظر انجام آزمون (سرعت انجام آزمایش، سرعت حرکت نسبی حرکت فک‌ها در طول آزمایش است که با توجه به مرجع یا با توافق تولیدکننده و مشتری تعیین می‌شود. ولی در هر صورت، انتخاب سرعت به‌گونه‌ای است که در زمان حداکثر ۱۰ دقیقه ایجاد شود) و نحوه انجام آزمون (کشش، خمش و ...) را در نرم‌افزار وارد کرده و آزمون را شروع کنید. در این آزمایش، جسم تحت تنش و در نتیجه، کرنش وابسته به آن قرار می‌گیرد. این تنش - کرنش تا نقطه شکست ادامه یافته، سپس منحنی آن رسم می‌شود. هر قطعه‌ای که خارج از محدوده دو گردن نمونه پاره شود، حذف خواهد شد و اگر لازم باشد، آزمایش تکرار می‌شود.



دستگاه تنسایل و دستگاه اکستنسومتر (دستگاه ازدیاد طول)



¹ For some materials, the length of the tabs may need to be extended to prevent breakage or slippage in the jaws of the testing machine.

Figure 11.3 ISO 3167 multipurpose test specimen.

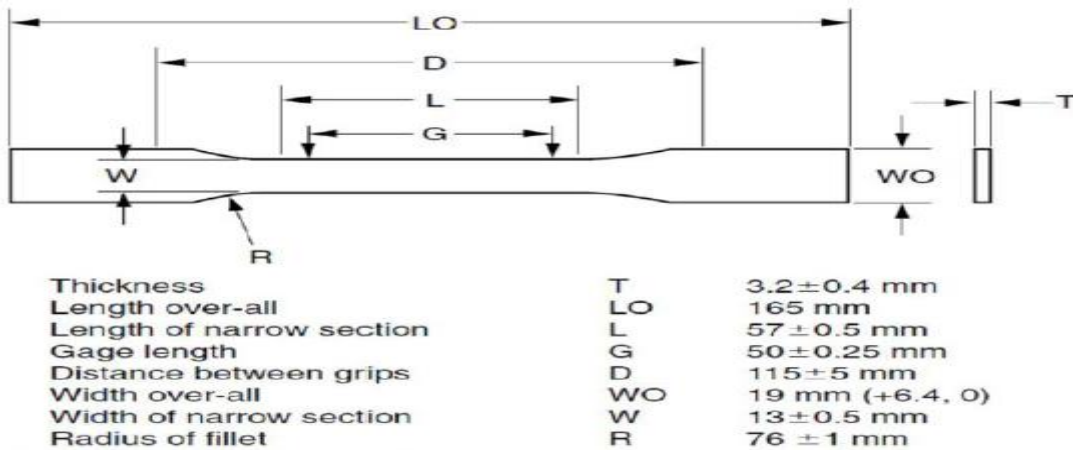


Figure 11.4 ASTM D 638 type I specimen.

ابعاد استاندارد نمونه در آزمون کشش

فعالیت پژوهشی

۱ - اصطلاحات زیر را تعریف کرده و در نمودارهای حاصل، مشخص کنید:

تنش کششی، کرنش کششی، تنش شکست، کرنش شکست، ناحیه کشش سرد، Strain hardening، ناحیه رفتار الاستیک، ناحیه رفتار پلاستیک، نقطه تسلیم، مدول، چقرمگی، رزیلیانس

۲ - رفتار انواع پلیمرها تحت آزمون کشش را با رسم نمودار مشخص کنید.

۳ - پدیده تشکیل گردن در آزمون تنش-کرنش را تعریف کرده و دلایل آن را ذکر کنید.

۴ - انواع فک دستگاه تنسایل را نام ببرید.

۵ - عدد دبورا چیست؟ این عدد برای مواد ویسکوز و الاستیک چه مقداری دارد؟

آزمایش شماره ۶- ساخت فوم و زروژل

ساخت فوم

فوم یک ماتریس جامد یا مایع دارای حباب هوا است. این حباب‌ها، سلول نامیده می‌شوند.

در مورد فوم‌ها، سه پارامتر دارای اهمیت است:

- شعاع سلول: دسته‌بندی فوم‌ها بر اساس شعاع سلول‌های تشکیل‌دهنده آن‌ها، به صورت زیر است:

$> 100 \mu\text{m}$ Macro

10-100 μm Fine

1-10 μm Micro

$< 1 \mu\text{m}$ Nano

- چگالی سلول: تعداد سلول‌ها در یک حجم معین را چگالی فوم می‌نامند.

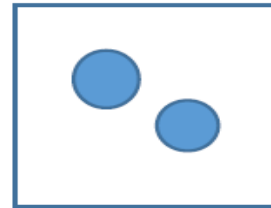
- یکنواختی سلول: هر قدر شعاع این سلول‌ها کمتر باشد، یکنواختی سلول‌ها نیز بیشتر می‌شود.

از نظر سختی، فوم‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند:

۱ - سخت (Rigid)، ۲ - نرم (Flexible) و ۳ - نیمه سخت (Semi Flexible)

همچنین، می‌توان فوم‌ها را بر اساس شکل سلول‌ها نیز تقسیم‌بندی کرد:

سلول بسته سلول باز (سلول‌ها به هم راه دارند)



روش کار:

در یک لیوان، ۵g MDI می‌ریزیم و به آن، ۱۰g پلی آل اضافه می‌کنیم. هر یک از دانشجویان، با استفاده از یک قطره‌چکان، از ۱ تا ۱۰ قطره آب، به لیوان اضافه نموده و با استفاده از چوب بستنی، به‌خوبی محتویات درون لیوان را هم می‌زند.

فوم پلی یورتان: پلی یورتان یک پلیمر ترموست است که از ترکیب MDI با پلی آل و برخی مواد افزودنی شیمیایی دیگر پدید می‌آید. با انتخاب این افزودنی‌ها و تغییر شرایط شیمیایی و فیزیکی فرایند واکنش، می‌توان خواص گوناگونی را برای کاربردهای متنوع به وجود آورد. همین ویژگی پلی یورتان باعث گسترش کاربردهای آن شده است.



پلی یورتان → دی ایزوسیانات + پلی آل

ساخت زروژل

سل: یک سوسپانسیون از ذرات جامد کلوئیدی است که درون مایع پراکنده شده است.

ژل: یک ساختار سه‌بعدی یا شبکه پیوسته که یک فاز دیگر (مایع) را در خود جای داده است. در این ساختار، فاز اصلی جامد و فاز پراکنده، مایع است.

انواع ژل بر اساس حلال:

Hydrogel: فاز مایع درون ساختار شبکه‌ای آب است.

Alchogel: فاز مایع درون ساختار شبکه‌ای الکل است.

روش کار:

هر گروه ۵g رزورسینول را درون ظرف نمونه ریخته و برای ایجاد نسبت‌های مولی رزورسینول به کاتالیزور (R/C) برابر با ۵۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰، به ترتیب مقادیر ۱۷،۰۷g، ۱۷،۱۵g، ۱۷،۱۶g و ۱۷،۱۷g حلال (آب) به رزورسینول اضافه می‌کند و با استفاده از همزن مغناطیسی (استیرر)، مخلوط حاصل را به خوبی هم می‌زند تا رزورسینول به طور کامل در آب حل شود. سپس با توجه به نسبت R/C، به ترتیب مقادیر ۴،۹g، ۱،۲۲g، ۰،۶۱g و ۰،۳۰g از محلول کاتالیزور Na_2CO_3 به محتویات ظرف اضافه کرده و محلول را دوباره به مدت ۱ تا ۲ دقیقه هم می‌زند. پس از آن، مقدار ۱۱،۰۷g فرمالین از زیر هود برداشته و به محتویات ظرف اضافه نموده و مجدداً ظرف به مدت سه تا چهار دقیقه روی همزن قرار داده می‌شود. سپس، حجم محلول حال اندازه‌گیری می‌شود. در نهایت، در ظرف را محکم بسته تا پس از ایجاد ژل و خشک شدن نمونه، تغییرات حجم نمونه اندازه‌گیری می‌شود.



فعالیت پژوهشی

- ۱ - مشاهدات خود را در فرایند ساخت فوم پلی یورتان و همچنین در ساخت زروژل شرح دهید.
- ۲ - در مورد Foaming Agent و انواع آن توضیح دهید.
- ۳ - انواع روش‌های خشک کردن ژل‌ها را توضیح دهید.
- ۴ - چرا در آزمایش ساخت زروژل، پس از خشک شدن نمونه، رنگ محتویات ظرف‌ها متفاوت است؟
- ۵ - مقدار چگالی، Shrinkage و درصد تخلخل نمونه را گزارش کنید.
- ۶ - مقدار به‌دست‌آمده از سؤال ۵ را برای نمونه‌های دارای R/C متفاوت مقایسه کنید.

آزمایش شماره ۷- تعیین میزان جمع‌شدگی حجمی رزین‌های ترموست (Shrinkage)

مجموع جمع‌شدگی در خلال پخت و جمع‌شدگی بعد از پخت، وقتی یک قطعه ریخته‌گری شده تا دمای محیط خنک شود را Shrinkage می‌گویند. این پدیده به دو صورت خطی و حجمی اندازه‌گیری می‌شود. این آزمایش برای اندازه‌گیری جمع‌شدگی، از طریق اندازه‌گیری ابعاد قالب و پلاستیک قالب‌گیری شده، برای ماده ترموست یا ترموپلاستیک، هنگامی که تحت شرایط خاص به صورت تزریقی، انتقالی یا فشاری قالب‌گیری می‌شوند، بکار می‌رود. در قالب‌گیری فشاری، در صورتی که طراحی به‌گونه‌ای باشد که ماکزیمم ماده به صورت جامد داخل حفره قالب یا قسمت‌هایی از آن رود و یا اینکه قطعه قالب‌گیری شده هنگامی که هنوز تحت فشار است، به وسیله خنک کاری سخت گردد، جمع‌شدگی ممکن است خیلی پایین‌تر از حالتی باشد که ماده در قالب بوده، ولی فشار کافی بر پشت آن اعمال نمی‌گردد و یا هنگامی که ماده قالب‌گیری شده، قبل از اینکه کاملاً سخت شود، از قالب بیرون آورده شود. در قالب‌گیری تزریقی، همانند قالب‌گیری فشاری، اختلاف بین ابعاد قالب و قطعه قالب‌گیری شده، بسته به طراحی و عملکرد قالب تغییر می‌کند. این اختلاف ممکن است با نوع و اندازه ماشین قالب‌گیری، ضخامت قسمت‌های قالب‌گیری شده، درجه و جهت جریان و حرکت مواد در قالب و اندازه نازل، راهگاه‌ها، دمای قالب و طول زمانی که فشار پشت قالب می‌ماند، تغییر کند. همانند قالب‌گیری فشاری، جمع‌شدگی هنگامی که حداقل می‌رسد که طراحی و عملکرد به‌گونه‌ای باشد که ماکزیمم ماده با فشار، داخل حفره قالب رفته و در حالی که هنوز تحت فشار است، سرد شود. از طرف دیگر، هنگامی که ماده داخل قالب جریان می‌یابد، اما فشار کافی برای فشردن آن اعمال نمی‌شود، همانند قالب‌گیری فشاری، ممکن است جمع‌شدگی بسیار بالا باشد. در قالب‌گیری انتقالی، همانند قالب‌گیری فشاری یا تزریقی، اختلافات بین ابعاد قالب و قطعه قالب‌گیری شده، با توجه با سایز و عملکرد قالب تغییر می‌کند. همچنین، به وسیله اندازه و دمای سیلندر، فشار وارده بر آن، دمای قالب و سیکل قالب‌گیری تغییر می‌کند. آزمایش‌ها را در اتمسفر استاندارد $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ و رطوبت نسبی 50 ± 5 درصد انجام می‌دهند، مگر اینکه شرایط دیگری تأکید شده باشد.

روش کار:

به وسیله استوانه مدرج، لوله‌آزمایش را تا حجم مشخصی از آب پر کرده و علامت‌گذاری کنید. سپس آب را خالی کرده و لوله‌ها را کاملاً خشک کنید. پس از اختلاط رزین پلی‌استر غیراشباع موردنظر با درصد استاندارد از آغازگر و شتاب‌دهنده، لوله‌آزمایش را تا محل علامت‌گذاری شده آر رزین حاوی آغازگر و شتاب‌دهنده پر کنید. به نمونه‌ها فرصت داده تا پخت شوند، سپس آن‌ها را به مدت مشخص در 130°C قرار دهید تا پخت آن‌ها کامل شود. نمونه‌ها را از لوله‌آزمایش خارج کرده و کاهش حجم آن‌ها را با قرار دادن نمونه‌ها در استوانه مدرج حاوی آب، اندازه‌گیری کنید.

فعالیت پژوهشی

- ۱ - علت پدیده جمع شدگی چیست؟
- ۲ - خطاهای احتمالی در این آزمون را نام ببرید.
- ۳ - اثر فیلر بر میزان جمع شدگی چیست؟
- ۴ - روش‌های کاهش جمع شدگی پلی استرها را نام ببرید.

آزمایش شماره ۸- اندازه‌گیری نقطه نرمی وایکت

حرارت اثر زیادی بر خواص (به‌خصوص خواص مکانیکی) مواد پلیمری دارد، زیرا درجه حرارت بالا، موجب انجام واکنش شیمیایی بین مولکول‌های ماده پلیمری و اکسیژن هوا شده و در نتیجه، ساختمان شیمیایی پلیمر تغییر می‌کند. برای تعیین مقاومت مواد پلیمری در برابر یک تنش، در یک درجه حرارت معین، آزمون‌های استاندارد از قبیل وایکت و HDT به‌کاربرده می‌شوند. در هر یک از این دو روش، نمونه تحت تنش از درجه حرارت اتاق، به‌تدریج با یک سرعت معین حرارت داده‌شده و تغییر شکل آن ثبت می‌گردد. درجه حرارتی را که در آن دما، مقدار معینی (قراردادی) تغییر شکل در نمونه حاصل می‌شود را به‌عنوان مقاومت حرارتی آن ماده تعریف می‌کنند. آزمون وایکت صرفاً برای مواد گرمانرم قابل‌استفاده است. این آزمون به چهار روش زیر قابل انجام است:

روش A50: با اعمال نیروی ۱۰N و نرخ حرارت دهی 50°C/h

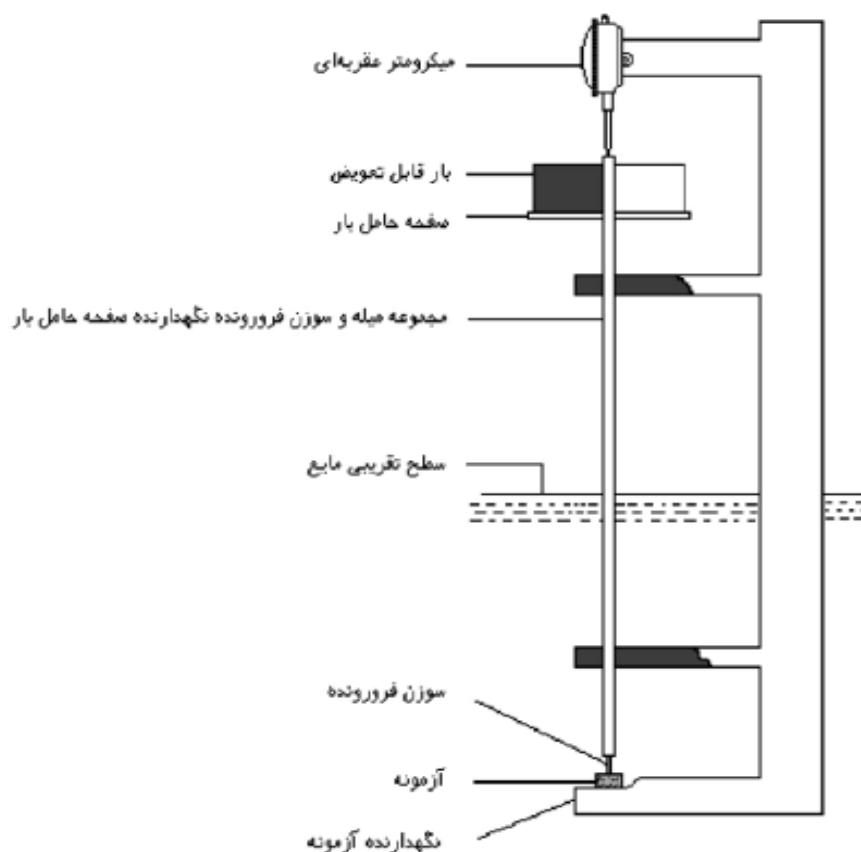
روش B50: با اعمال نیروی ۵N و نرخ حرارت دهی 50°C/h

روش A120: با اعمال نیروی ۱۰N و نرخ حرارت دهی 120°C/h

روش B120: با اعمال نیروی ۵N و نرخ حرارت دهی 120°C/h

اصول کلی این روش عبارت است از تعیین دمایی که در آن، یک سوزن استاندارد، تحت یکی از بارهای مذکور و با نرخ یکنواخت افزایش دما، به‌اندازه ۱mm در سطح نمونه فرورود. این دما، دمای نرم وایکت نامیده می‌شود. دستگاه اندازه‌گیری وایکت، امکان انجام هم‌زمان آزمون سه یا چهار نمونه را به‌طور هم‌زمان فراهم کرده و شامل بخش‌های زیر است:

- میله‌ای که به یک صفحه بارگذاری مجهز است (مطابق شکل).
- سوزن: ترجیحاً از جنس فولاد سخت به طول ۳mm و با سطح مقطع دایره‌ای که به انتهای میله متصل شده است.
- میکرومتر (یا دستگاه اندازه‌گیری مناسب دیگر)، برای اندازه‌گیری میزان نفوذ سوزن در داخل نمونه
- تجهیزات حرارت دهی، شامل حمام حرارت دهی.
- چرخش هوا یا نیتروژن: این تجهیزات باید مجهز به یک کنترل‌کننده دما با قابلیت افزایش دما با نرخ یکنواخت 5 ± 50 یا 12 ± 120 درجه سانتی‌گراد بر ساعت باشد.



نمونه‌ای از دستگاه با حمام حرارتی، جهت اندازه‌گیری دمای نرمی وایکت

دستگاه می‌تواند به‌گونه‌ای باشد که زمانی که نفوذ سوزن به مقدار موردنظر رسید، حرارت دهی را به‌صورت خودکار قطع کرده و آژیوری را به صدا درآورد. نمونه باید دارای ضخامتی بین ۳mm تا ۶,۵mm و سطح مقطع مربعی شکل به ضلع حداقل ۱۰mm یا دایره‌ای به قطر ۱۰mm باشد. سطوح نمونه باید صاف و موازی هم بوده و فاقد هرگونه ناهمواری باشد. این آزمایش برای اغلب پلاستیک‌ها قابل‌استفاده است، ولی برای پلاستیک‌هایی مثل اتیلن سلولز، پلی وینیل کلراید نرم و سایر موادی که دارای دامنه وسیعی از نقطه نرمی وایکت هستند، توصیه نمی‌شود. این معیار خاصیت مهمی در انتخاب پلاستیک‌ها برای مصارفی است که پلیمر باید در برابر بار و دمای بالا قرار گیرد. نتایج حاصل از آزمون وایکت برای مواد پلیمری با مدول نسبتاً پایین (نسبتاً نرم) بهتر از آزمون HDT است.

روش کار:

نمونه را زیر سوزن دستگاه گذاشته و پس از اعمال بار، حرارت دهی با سرعت $120^{\circ}\text{C}/\text{h}$ آغاز می‌شود. سپس، عمق نفوذ سوزن برحسب دما اندازه‌گیری می‌شود.



سلامت، ایمنی و محیط زیستی دستگاه:

دستگاه باید متصل به سیم ارت باشد.

هنگام کار با دستگاه از دست‌کش نسوز استفاده شود.

به‌طور مداوم دمای کنترلر دستگاه و دماسنج پشت دستگاه بررسی شود.

دستگاه به‌دوراز هرگونه رطوبت باشد.

پس از استفاده از دستگاه تا زمانی که دما به 80°C درجه سانتی‌گراد نرسیده به‌هیچ‌عنوان در کوره باز نشود.

نرخ گرمادهی باید به یکی از دو روش زیر تصدیق شود:

۱- بررسی و ثبت خودکار دما در کل دامنه دمایی

۲- با بررسی و ثبت دستی تغییرات دما در فواصل زمانی ۶ دقیقه در دامنه تصدیق شده

در صورت استفاده از حمام گرمادهی پرشده با مایع یا بستر روان آزمون را به صورت افقی زیر سوزن فرورونده متصل به میله بدون بار عمود بر نوک سوزن قرار دهید. در صورت استفاده از واحد گرمادهی از طریق تماس مستقیم آزموده را به صورت افقی و عمود بر جهت حرکت نوک سوزن، به طوری که نوک سوزن با آزمون تماس نداشته باشد قرار دهید.

حداکثر دمای محفظه دستگاه در شروع هر آزمون باید ۲۵ درجه سانتی‌گراد باشد.

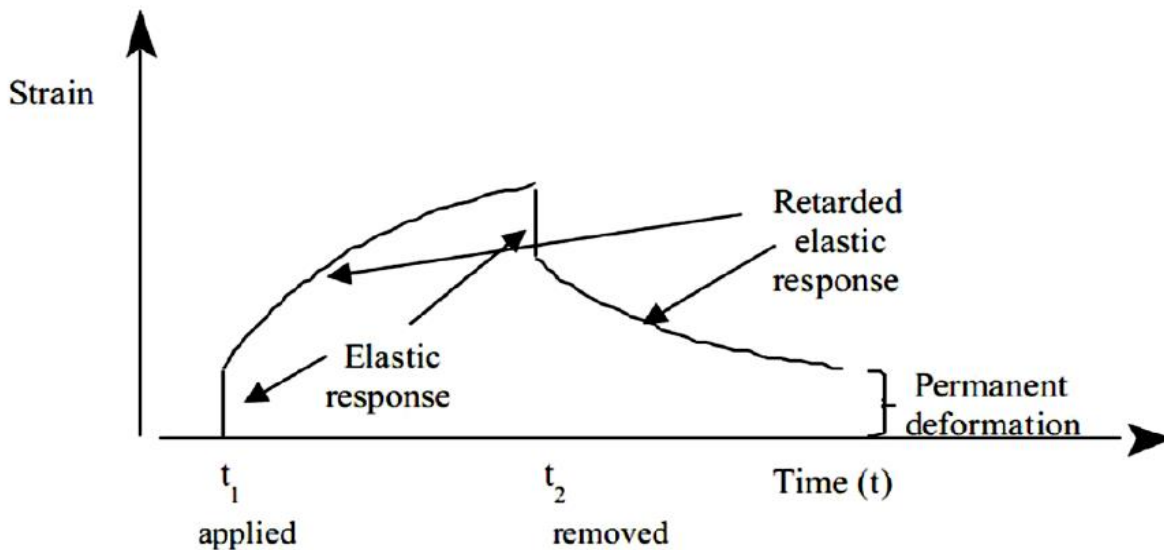
فعالیت پژوهشی

- ۱- دلایل بروز خطا در نتایج آزمون وایکت را ذکر کنید.
- ۲- نقطه نرمی وایکت با چه پارامترهایی در پلیمر ارتباط دارد؟
- ۳- به نظر شما، سیال موجود در حمام وایکت، چه ویژگی‌هایی نیاز دارد؟ چند سیال مناسب نام ببرید.
- ۴- نمودار عمق نفوذ سوزن بر حسب دما را رسم کنید.

پیوست‌ها

آزمون رهایی از تنش

در آزمون رهایی از تنش (یا افت تنش)، مقداری معین تغییر شکل (معمولاً کششی) بر نمونه پلیمری، در درجه حرارت ثابت اعمال شده و با زمان، ثابت نگه‌داشته می‌شود. حفظ ثابت تغییر شکل با زمان به علت ویسکوالاستیسیته ماده، کاهش تنش با گذشت زمان را به دنبال خواهد داشت. مقدار کاهش تنش با زمان، توسط دستگاه ثبت شده و به صورت نموداری شبیه زیر، ارائه می‌شود. برای یک مهندس طراح، اندازه‌گیری خزش کاربردی‌تر و مهم‌تر از آزمون افت تنش است. اما در مطالعه و بررسی تئوری‌های ویسکوالاستیسیته، نتایج حاصل از این آزمون، ارزشمندتر از سایر آزمون‌هاست، زیرا در این آزمون، شکل نمونه تغییر نیافته و تفسیر و توجیه نتایج حاصل، ساده‌تر است. از طرف دیگر، استفاده از این آزمون در برخی کاربردها، نظیر نگهداری یک فلز داخل قطعات پلاستیکی و یا تعیین کارایی آنتی‌اکسیدان‌ها ضروری است. دستگاه‌ها و آزمون‌های متنوعی جهت اندازه‌گیری افت تنش مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای مواد انعطاف‌پذیر مثل رابرها و پلاستیک‌های با مدول پایین، دستگاه‌های اندازه‌گیری ساده بوده؛ درحالی‌که برای نمونه‌های با مدول بالا، از چنین دستگاه‌هایی نمی‌توان استفاده کرد، زیرا برای مواد سخت، اندازه‌گیری دقیق تنش و مقدار خیلی کم تغییر شکل، دشوار است. این مسئله وقتی حاد می‌شود که سختی نمونه و دستگاه اندازه‌گیری، به هم نزدیک باشند؛ در نتیجه، تغییر شکل دستگاه و لغزش نمونه، سبب ایجاد خطا می‌شود. در کل باید یادآور شد که جهت دستیابی به نتایج قابل استناد، این آزمون بسیار زمان‌بر است.



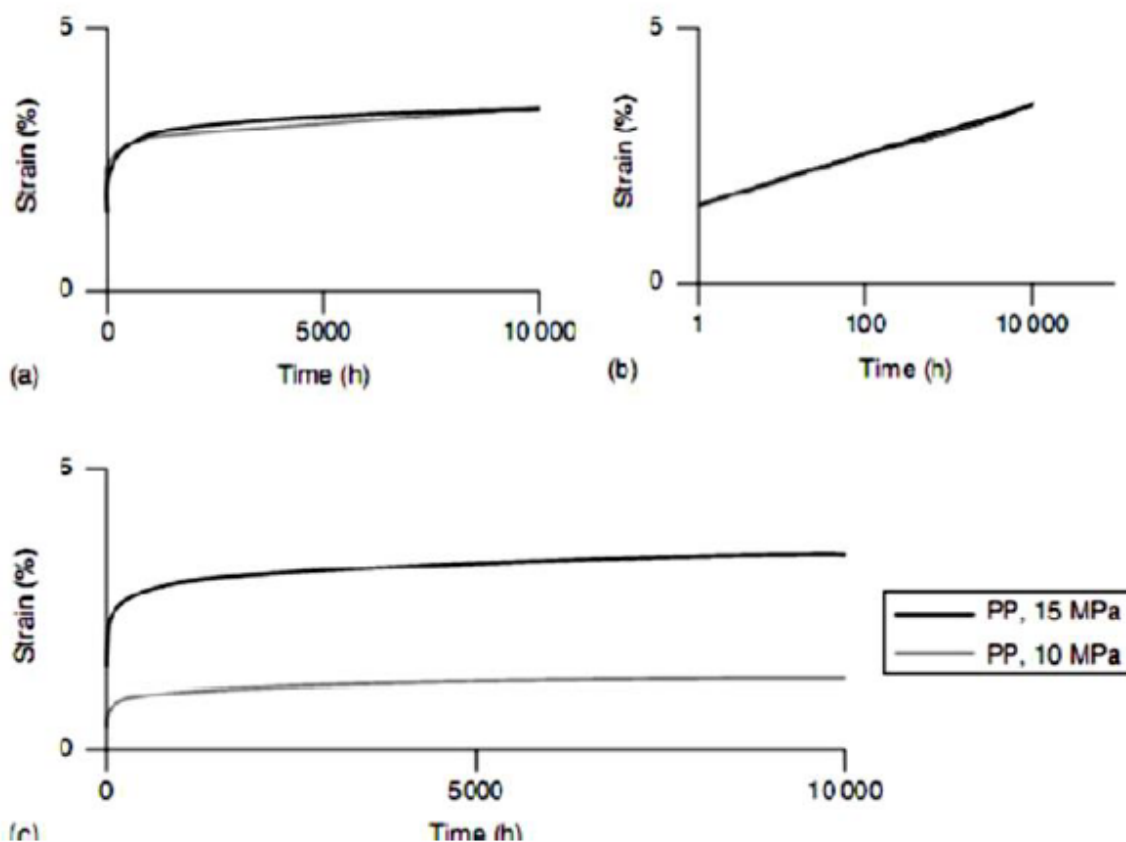
نمودار آزمون رهایی از تنش

اندازه‌گیری خزش پلیمرها:

خزش تغییر شکل آهسته و ممتد یک نمونه پلاستیکی با زمان، تحت تنش ثابت است. پدیده خزش در پلیمرهای با وزن مولکولی بالا و سایر مواد، حتی فلزات مشاهده شده است؛ اما درحالی‌که پلیمرها در درجه حرارت کمتر از اتاق هم خزش نشان می‌دهند، فلزات در درجه حرارت حدود $0.4 T_m (K)$ شروع به خزش می‌کنند.

در بسیاری از کاربردها، پایداری ابعادی اجسام پلیمری مهم است، به طوری‌که اغلب قطعات پلاستیکی سخت، باید قادر به تحمل مقدار معینی تنش برای مدت طولانی بدون تغییر ابعاد باشند. به طور مثال، تایرهای یک کامیون، بدون حرکت، حتی به مدت هفته‌ها نباید در اثر وزن ماشین تغییر شکل دهند؛ یا یک لباس پلاستیکی باید بدون تغییر ابعاد، قادر به تحمل وزن خود در جالباسی باشد. مثال‌های ذکرشده، اهمیت بررسی خزش را نشان می‌دهد. از طرف دیگر، متخصصینی که به مطالعه مقوله ویسکوالاستیسیته می‌پردازند، جهت ارائه معادله‌های جامع که توجیه‌کننده کلیه رفتار پلیمرها باشد، نیاز به اندازه‌گیری خزش دارند.

انجام آزمون خزش، مانند آزمون تنش- کرنش و رهایی از تنش، از روش‌های گوناگونی نظیر کشش، فشار، خمش و برش امکان‌پذیر است. روش معمول اندازه‌گیری این پارامتر، قرار دادن نمونه در معرض تنش کششی ثابت در درجه حرارت مشخص و اندازه‌گیری تغییر شکل با زمان است. با وجود سادگی این آزمون، انجام آن به دستگاه با دقت بالا نیاز داشته، زمان‌بر بوده و تغییر شکل دستگاه سبب بروز خطا می‌شود. معمولاً نتایج آزمون به صورت تغییرات درصد ازدیاد طول برحسب زمان، توسط دستگاه ثبت می‌شود. این امر بدین دلیل است که در بررسی‌های تئوریک پلیمرها، فرض بر این است که مدول نمونه یا کامپلیانس (کامپلیانس عکس مدول بوده که از تقسیم طول در هر مقطع زمانی بر تنش اعمالی حاصل می‌شود) مستقل از تنش اعمال شده است، اما این فرض در بسیاری از مواد، تنها در مقادیر پایین تنش حاکم بوده و هنگامی‌که تنش از حدی بیشتر شود، کامپلیانس با تنش تغییر می‌کند. در مورد موادی که کامپلیانس آن‌ها با تنش تغییر می‌کند، در آزمون خزش، کامپلیانس برحسب زمان رسم می‌شود. در اینجا نیرویی ثابت در ناحیه الاستیک نمونه به آن اعمال شده و تغییر طول با زمان ثبت می‌شود. توسط این آزمون می‌توان زمان تأخیر نمونه به تنش اعمالی را تعیین کرد.



درصد ازدیاد طول در تنش و دمای ثابت (خزش)

رفتار ویسکوالاستیک پلیمرها، توسط مدل‌هایی مانند مدل ماکسول و مدل کلویین بررسی می‌شود. در مدل ماکسول، فنر و دشیپات به صورت سری قرار گرفته و در مدل کلویین، این اجزا به صورت موازی قرار می‌گیرند. فنر معیاری از رفتار الاستیک ماده و دشیپات معیاری از رفتار ویسکوز ماده است. مدل ماکسول برای توصیف رفتار رهایی از تنش، و مدل کلویین برای توصیف رفتار خزش پلیمرها مناسب‌تر است.

آزمون خمشی

از آنجایی که به دست آوردن مدول پلیمرهای شکننده، از طریق آزمایش‌های تنش- کرنش مشکل است، برای تعیین مدول این مواد، معمولاً از آزمون خمشی استفاده می‌شود. استحکام خمشی عبارت است از توانایی ماده در برابر نیروهای خمشی که عمود بر محور طولی نمونه اعمال می‌شوند. خواص خمشی پلیمرها نه فقط برای سازندگان قطعات، بلکه برای طراحان نیز حائز اهمیت است. این آزمون به دو روش سه‌نقطه‌ای و چهار نقطه‌ای انجام می‌شود. روش سه‌نقطه‌ای برای کنترل و تعیین مشخصات مواد مفید بوده، اما برای مواردی که توسط این روش نمی‌شکنند و مقدار خمشی زیادی دارند، روش چهار نقطه‌ای مناسب‌تر است. جهت انجام این آزمون، از همان دستگاه آزمون کشش می‌توان استفاده کرد و تنها باید ابتدا، فک‌های خمشی دستگاه را نصب کرد. نمونه مورد آزمایش، به شکل مکعب مستطیل با ابعاد مختلف بوده که بسته به ضخامت قطعه، دیگر ابعاد مطابق استاندارد تعیین می‌شوند. معمولاً به‌طور رایج، از نمونه با ابعاد $127 \text{ mm} * 12.7 \text{ mm} * 3 \text{ mm}$ استفاده می‌شود. تنش‌های ایجادشده در نمونه، مخلوطی از تنش‌های فشاری و کششی است (سطح پایینی نمونه تحت کشش و سطح بالایی تحت فشار قرار می‌گیرد که اگر مدول فشاری و کششی نمونه با هم برابر باشند، در وسط نمونه، میزان تنش صفر خواهد بود) و در نمونه‌های ضخیم، نیروهای برشی نیز به وجود می‌آید. بر اثر اعمال نیرو، مرکز نمونه از حالت اولیه، انحراف یافته که اگر این انحراف کم باشد و نمونه الاستیک و ایزوتروپ در نظر گرفته شود، می‌توان از روابط هوکین برای به دست آوردن مدول آن استفاده نمود که در این حالت، مدول یانگ مساوی با مدول خمشی است.

قابل ذکر است که وقتی از روش خمشی استفاده می‌کنیم، دیگر مدول شیب نمودار تنش - کرنش، در قسمت خطی نبوده و مدول خمشی از رابطه زیر به دست می‌آید:

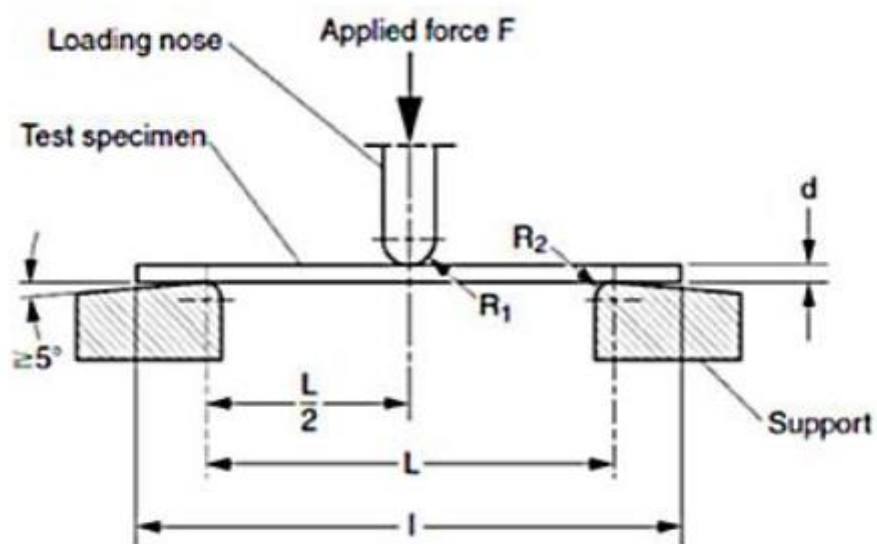
$$\sigma = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{6dY}{L^2} \quad (2)$$

$$E = \frac{FL^3}{4bd^3Y} \quad (3)$$

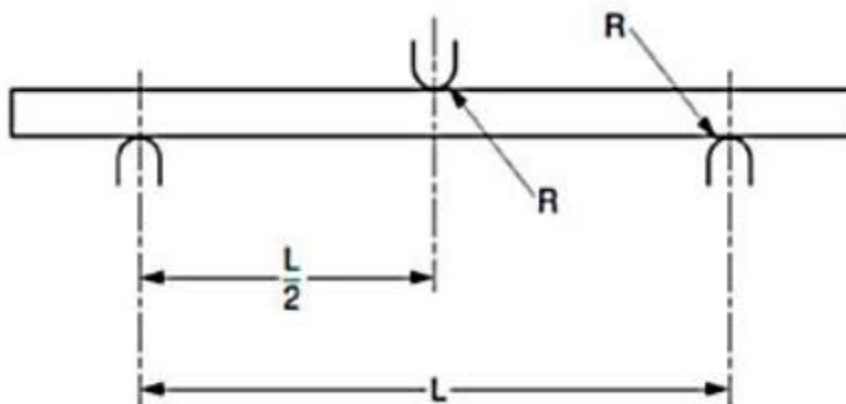
Y = Central Deflection

که F ، L ، b ، d و Y به ترتیب میزان نیرو، فاصله دو تکیه‌گاه، پهناي نمونه، ضخامت نمونه، مدول خمشی و مقدار انحنای آن است.



Thickness	d	4.0 ± 0.2 mm
Length	l	80 ± 2 mm
Loading nose radius	R_1	5.0 ± 0.1 mm
Support radius	R_2	5.0 ± 0.1 mm
Span length	L	60–68 mm

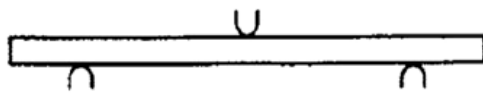
Position of test specimen at the start of the flexural test (ISO 178):



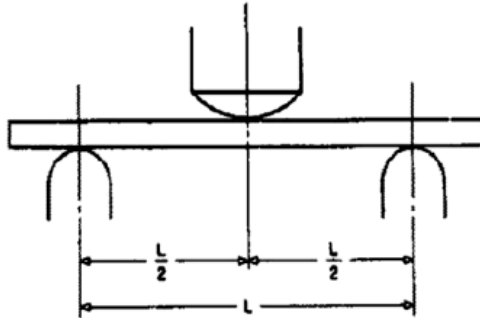
Support and loading nose radius	R	5.0 ± 0.1 mm
Span length	L	49.5–50.5 mm

Position of test specimen at the start of the flexural test (ASTM D 790-98):

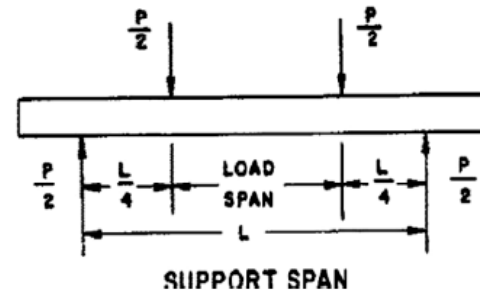
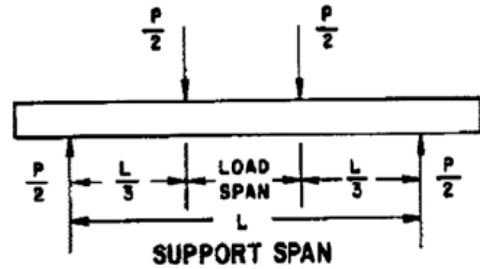
استانداردهای رایج اندازه‌گیری مقاومت خمشی



(A)



(B)



محل قرار گرفتن تکیه‌گاه و نیرو در آزمون خمشی سه‌نقطه‌ای و چهار نقطه‌ای

دستورالعمل انتخاب ابعاد نمونه و سرعت انجام آزمون خمشی (آزمون سه‌نقطه‌ای)

Nominal Specimen Depth, mm (in.)	Specimen Width, mm (in.)	Support Span-to-Depth Ratio (See Note 6)											
		L/d = 16 to 1			L/d = 32 to 1			L/d = 40 to 1			L/d = 60 to 1		
		Specimen Length, mm (in.)	Support Span, mm (in.)	Rate of Cross-head Motion (Procedure A), mm (in.) / min ^A	Specimen Length, mm (in.)	Support Span, mm (in.)	Rate of Cross-head Motion (Procedure A), mm (in.) / min ^A	Specimen Length, mm (in.)	Support Span, mm (in.)	Rate of Cross-head Motion (Procedure A), mm (in.) / min ^A	Specimen Length, mm (in.)	Support Span, mm (in.)	Rate of Cross-head Motion (Procedure A), mm (in.) / min ^A
0.8 (1/32)	25 (1)	50 (2)	16 (5/8) ^a	0.5 (0.02)	50 (2)	25 (1)	1.3 (0.05)	60 (2 1/4)	30 (1 1/4)	2.0 (0.08)	60 (2 1/2)	48 (1 7/8)	4.8 (0.19)
1.6 (1/16)	25 (1)	50 (2)	25 (1)	0.8 (0.03)	80 (3)	50 (2)	2.8 (0.11)	90 (3 1/2)	60 (2 1/2)	4.3 (0.17)	124 (4 7/8)	95 (3 3/4)	9.4 (0.37)
2.4 (3/32)	25 (1)	60 (2 1/2)	40 (1 1/2)	1.0 (0.04)	100 (4)	80 (3)	4.1 (0.16)	120 (4 3/4)	95 (3 3/4)	6.4 (0.25)	185 (7 9/32)	143 (5 5/8)	14.2 (0.56)
3.2 (1/8)	25 (1)	80 (3)	50 (2)	1.3 (0.05)	130 (5)	100 (4)	5.3 (0.21)	180 (7)	130 (5)	8.4 (0.33)	247 (9 3/4)	190 (7 1/2)	18.8 (0.74)
4.8 (3/16)	13 (1/2)	100 (4)	80 (3)	2.0 (0.08)	191 (7 1/2)	150 (6)	8.1 (0.32)	240 (9 1/2)	191 (7 1/2)	12.7 (0.50)	372 (14 5/8)	286 (11 1/4)	28.4 (1.12)
6.4 (1/4)	13 (1/2)	130 (5)	100 (4)	2.8 (0.11)	250 (10)	200 (8)	10.9 (0.43)	330 (13)	250 (10)	17.0 (0.67)	495 (19 1/2)	381 (15)	37.8 (1.49)
9.6 (3/8)	13 (1/2)	191 (7 1/2)	150 (6)	4.1 (0.16)	380 (15)	300 (12)	16.3 (0.64)	480 (19)	380 (15)	25.4 (1.00)	744 (29 1/8)	572 (22 1/2)	56.8 (2.24)
12.7 (1/2)	13 (1/2)	250 (10)	200 (8)	5.3 (0.21)	495 (19 1/2)	410 (16)	21.6 (0.85)	640 (25)	510 (20)	34.0 (1.34)	991 (39)	782 (30)	76.2 (3.00)
19.1 (3/4)	19 (3/4)	380 (15)	300 (12)	8.1 (0.32)	740 (29)	610 (24)	32.5 (1.28)	940 (37)	760 (30)	50.8 (2.00)	1466 (58 1/2)	1143 (45)	114 (4.49)
25.4 (1)	25 (1)	495 (19 1/2)	410 (16)	10.9 (0.43)	990 (39)	810 (32)	43.4 (1.71)	1240 (49)	1020 (40)	67.8 (2.67)	1981 (78)	1524 (60)	152 (5.98)