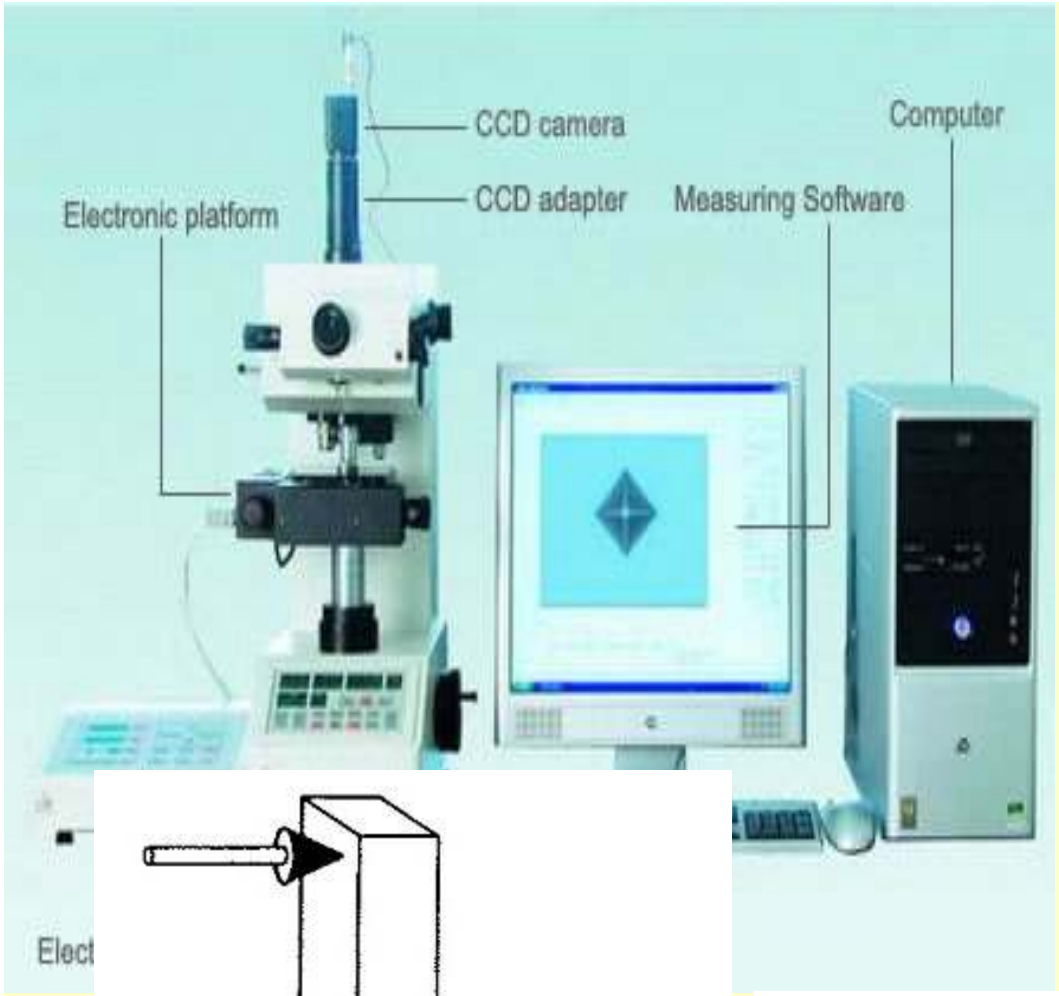
دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
دانشکده مهندسی و علم مواد

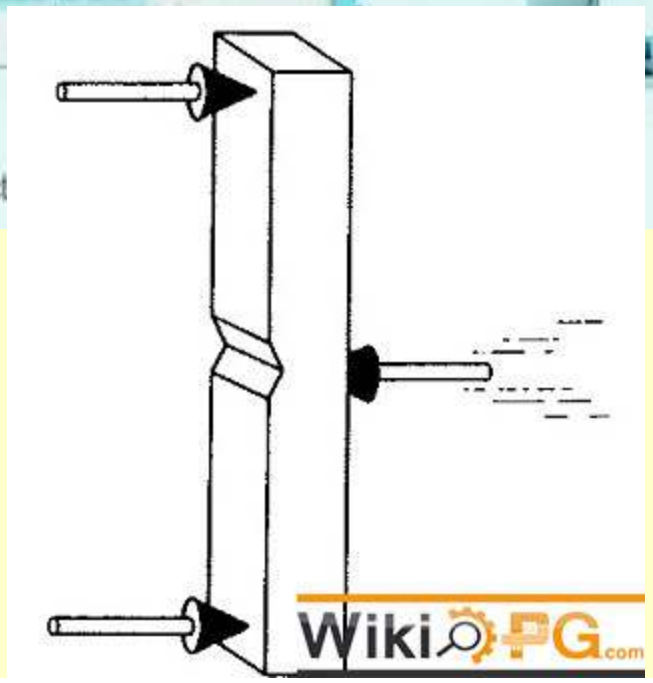
اصول مهندسی پلیمر

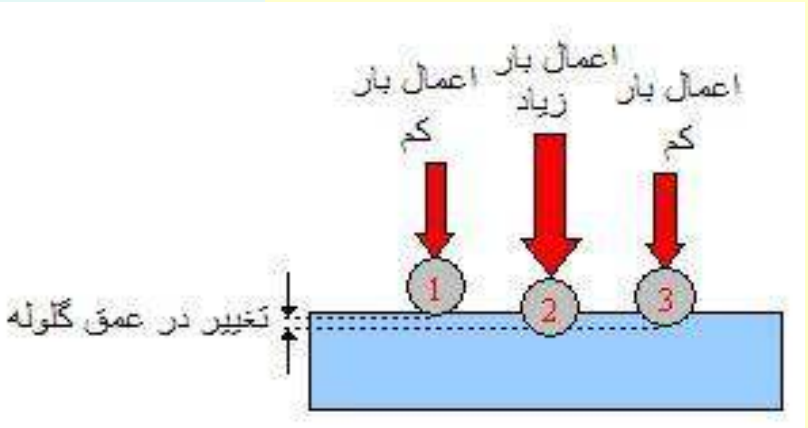
جلسه هشتم
(آزمایش های مکانیکی پلیمرها)

دکتر رضا اسلامی فارسانی



آزمایش های مکانیکی پلیمرها

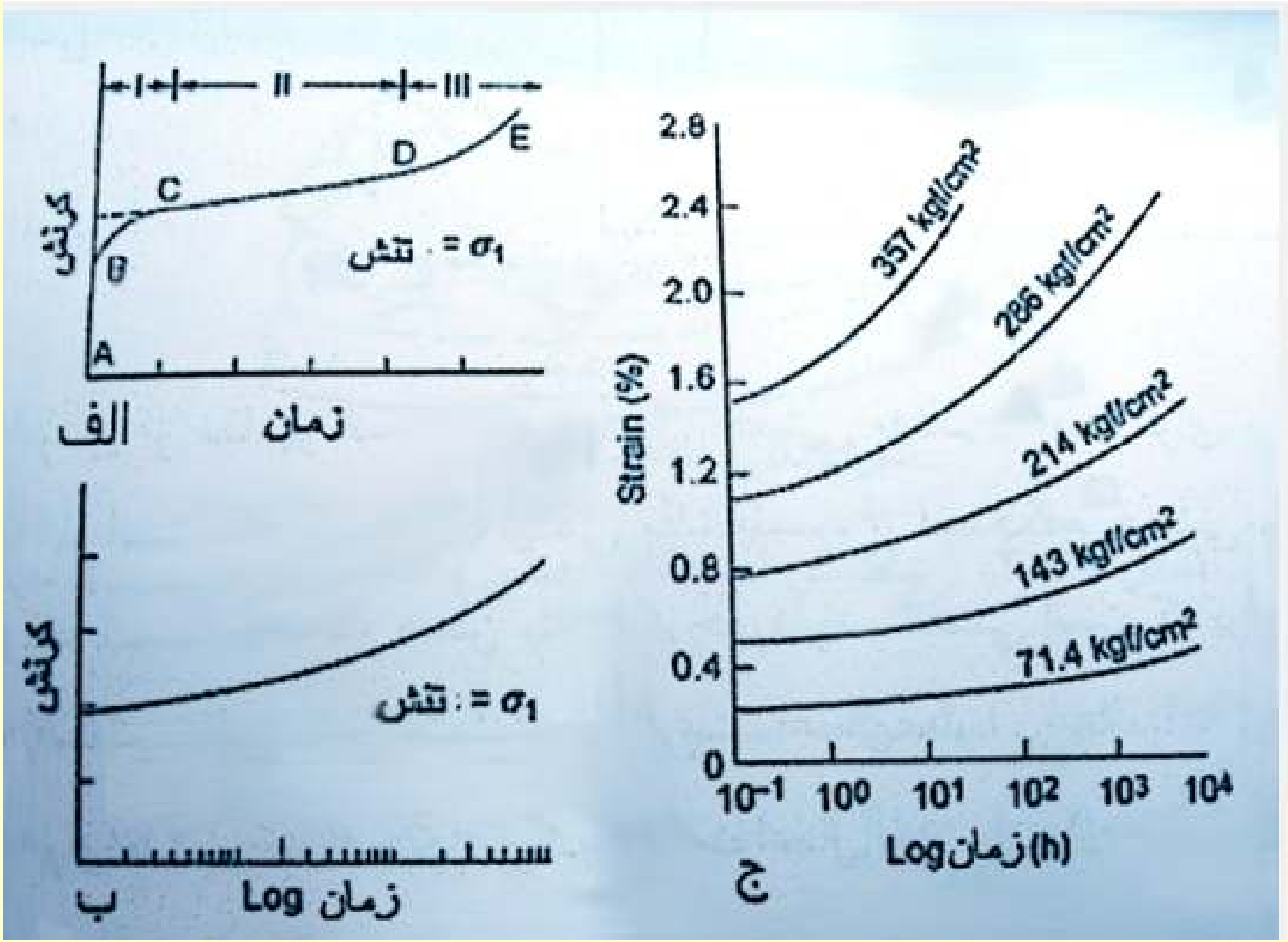




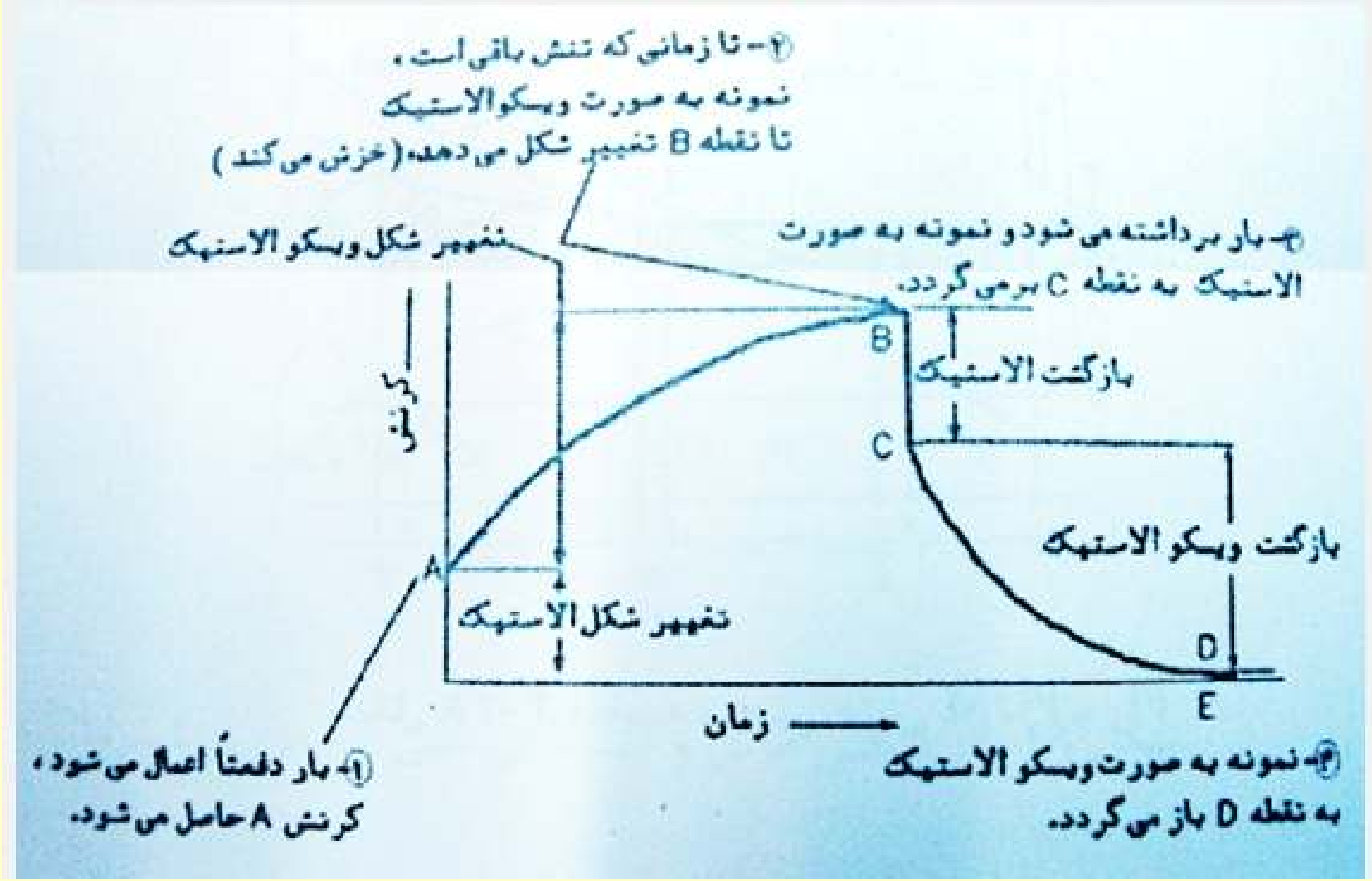
خزش (*creep*)

پلیمرها بر اثر اعمال تنش ثابت واکنشی از نوع تغییر کرنش وابسته به زمان از خود نشان می دهند. این رفتار را خزش می نامند. منحنی عمومی خزش پلیمرها را در دو مقیاس معمولی و لگاریتمی نشان می دهند. با افزایش تنش اولیه میزان خزش افزایش می یابد (مشابه نمودار رسم شده برای پلیمر PMMA).

خزش (*creep*)


I
II
III
A
B
C
D
E
کرنش
تنش : σ_1 =
زمان
الف
کرنش
تنش : σ_1 =
Log زمان
ب
Strain (%)
2.8
2.4
2.0
1.6
1.2
0.8
0.4
0
357 kgf/cm²
286 kgf/cm²
214 kgf/cm²
143 kgf/cm²
71.4 kgf/cm²
10^{-1}
10^0
10^1
10^2
10^3
10^4
Log زمان (h)
ج

با برداشتن تنش اعمال شده به پلاستیک در ناحیه الاستیک، کرنش موجود در پلاستیک با گذشت زمان از میان رفته و پلاستیک به ابعاد اولیه خود باز می گردد.

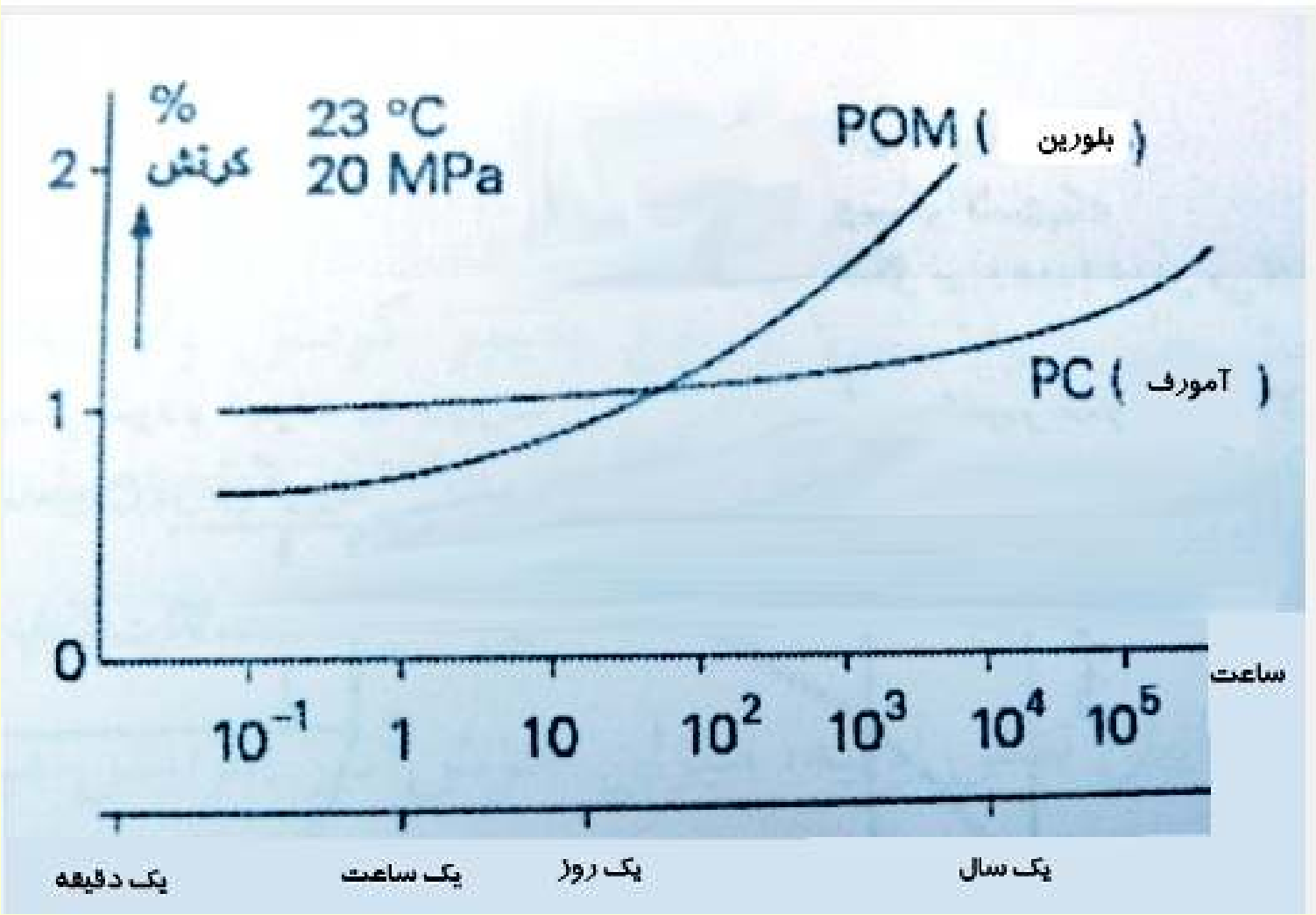


خزش (*creep*)

این پدیده نقش مهمی در طراحی قطعه دارد. خزش در دماهای بالاتر اهمیت بیشتری می یابد و به عنوان عامل مهمی در انتخاب نوع گرید ماده مطرح می شود. پدیده خزش بیانگر عدم ثبات مدول یک پلاستیک است و می توان نتایج حاصل از تغییرات مدول پلاستیک تحت خزش را در مقایسه با مدول الاستیک برای کارهای طراحی دقیق تر و مناسب تر دانست.

خزش (*creep*)

رفتار خزش در مواد آمورف و کریستالی متفاوت است. مواد کریستالی عمدتا تحت اعمال تنش مساوی خزش بیشتری نسبت به مواد آمورف از خود نشان می دهند. شکل زیر مقایسه دو پلاستیک آمورف و کریستالی را در شرایط یکسان نشان می دهد. ملاحظه می شود که میزان خزش در POM (پلیمر کریستالی) نسبت به PC (پلیمر آمورف) بیشتر است.

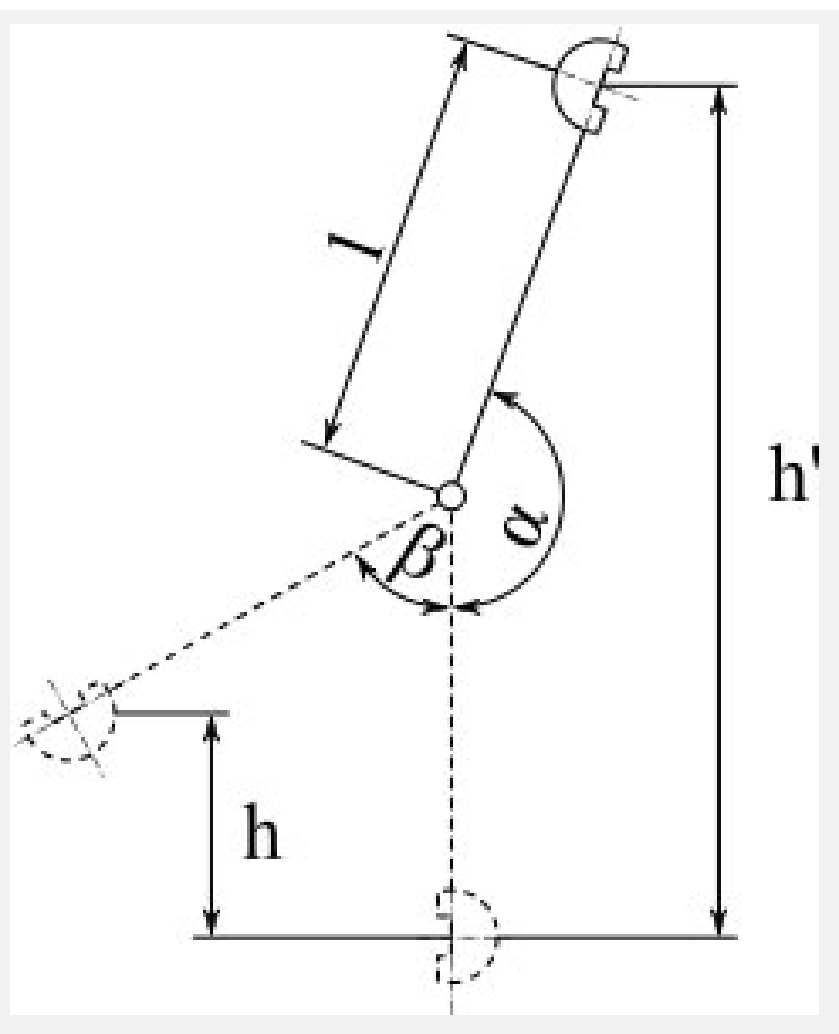


مقایسه خزش در *POM* (پلیمر کریستالین) نسبت به *PC* (پلیمر آمورف)

استحکام ضربه پذیری (*impact strength*)

یکی از راه های تعیین چقرمگی یک ماده آزمایش ضربه است. این تست نشان می دهد که یک پلیمر چه مقدار انرژی ضربه ای را می تواند تا قبل از شکست در خود ذخیره کند. اگر مقدار این انرژی کم باشد، می توان نتیجه گرفت که ماده ترد بوده و حساسیت بالایی نسبت به نیروهای ضربه ای دارد. اگر مقدار انرژی جذب شده بالا باشد، ماده نرم و شکل پذیر است و نیروی ضربه بیشتری را تحمل می کند و به عبارت دیگر چقرمگی بالایی دارد. مهم ترین و متداول ترین روش های آزمایش ضربه دو روش Charpy و Izod هستند.

استحکام ضربه پذیری (*impact strength*)



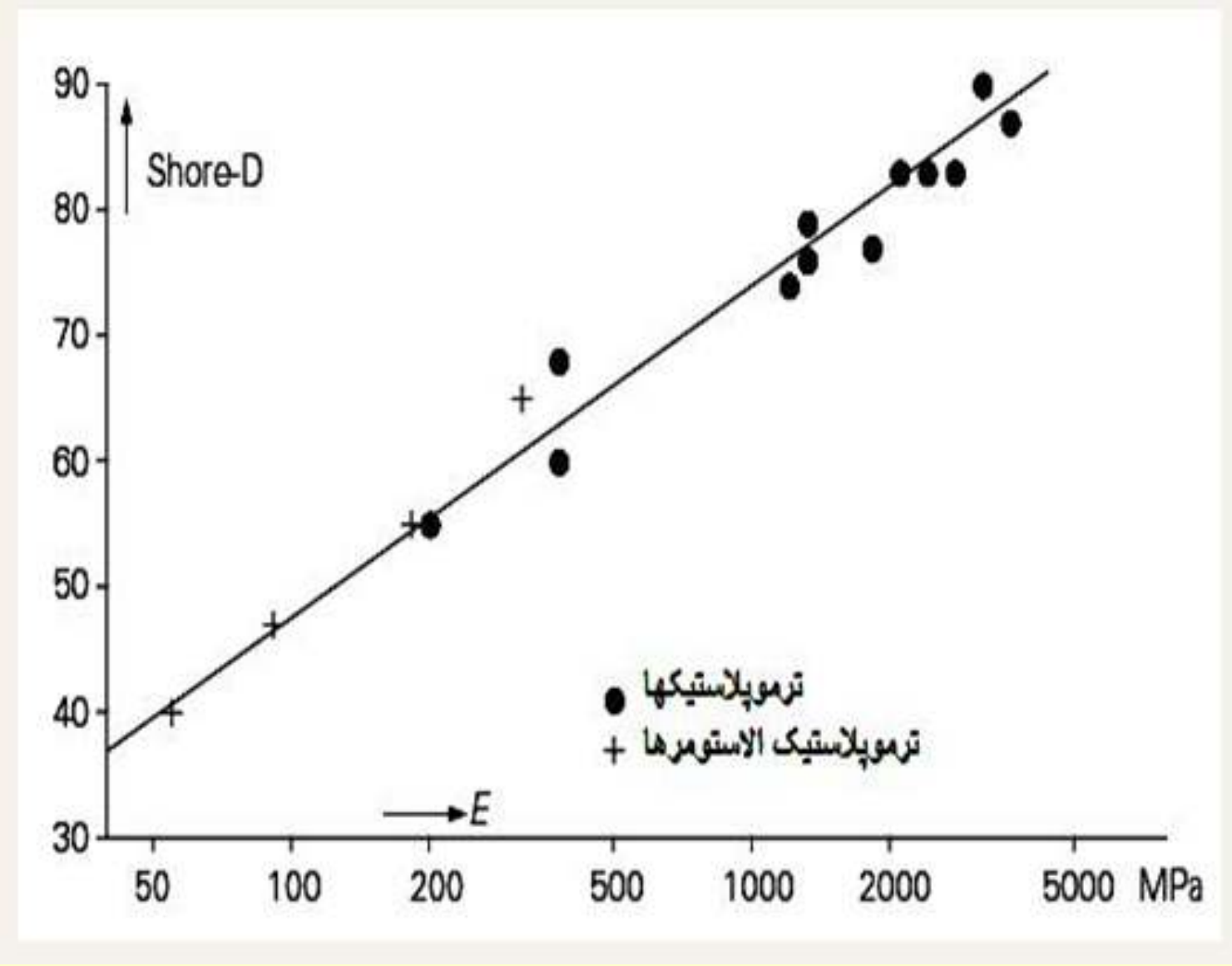
ضربه توسط آونگی که از نقطه تعادل خود رها می شود، به نمونه وارد می گردد. اختلاف ارتفاع آونگ در بروز رفتار شکننده و چقرمه در یک ماده، به دما و سرعت ضربه بستگی دارد. همانند دیگر خواص فیزیکی، دمای تبدیل شیشه ای و سهولت تبلور در استحکام ضربه ماده نقشی اساسی دارد.

در دماهای بسیار پایین تر از دمای Tg، پلیمرهای آمورف به صورتی شکننده پاره می شوند. این در حالی است که همین پلیمرها با نزدیک شدن به دمای Tg چقرمه تر خواهند بود. در بالای دمای Tg، حالت لاستیکی اتفاق افتاده و استحکام ضربه پذیری اهمیت زیادی نخواهد داشت. در پلیمرهای بلورین چقرمگی به میزان بلورینگی بستگی دارد. در حالت بلورینگی بالا، توده پلیمر انعطاف پذیر بوده و استحکام ضربه پذیری مناسبی خواهد داشت.

سختی (*Hardness*)

مقاومت ماده در برابر نفوذ جسم صلب در آن را سختی می نامند. اندازه گیری سختی جسم می تواند معرف سختی لایه رویی و یا عمق آن باشد. روش های سختی سنجی به بیان سختی ایجاد اثر در سطح قطعه و یا میزان نفوذ یک شیئی نوک تیز به داخل نمونه می پردازد. از بین روش های موجود، روش اندازه گیری راکول و shore برای ترموپلاستیک ها عمومیت بیشتری دارد. مطالعات نشان می دهد که تقریبا رابطه خطی بین مدول و سختی ترموپلاستیک ها برقرار است. لذا برای انتخاب روش اندازه گیری سختی می توان معیاری را براساس مدول الاستیسیته مواد پلیمری ارائه داد.

سختی (*Hardness*)



رابطه سختی و مدول الاستیسیته

	ماده	روش آزمون
مدولهای پایین	Rubber	Shore A or BS 903
↑	Plasticized PVC	Shore A or BS 2782
↑	Low-density polyethylene	Shore D
↑	Medium-density polyethylene	Shore D
↑	High-density polyethylene	Shore D
↑	Polypropylene	Rockwell R
↑	Toughened polystyrene	Rockwell R
↑	ABS	Rockwell R
↑	Polystyrene	Rockwell M
مدولهای بالا	Poly(methyl methacrylate)	Rockwell M

روش سختی BARCOL

این روش مطابق با استاندارد ASTM D۲۵۸۳ میزان سختی ترموست ها را بین مقیاس ۰ تا ۱۰۰ نشان می دهد. عدد ۱۰۰ مبین جسم سخت تر است.

روش سختی IRHD

برای سختی لاستیک ها از سختی سنجی IRHD (International Rubber Hardness Degree) مطابق استاندارد ASTM D۱۴۱۵ یا ISO۴۸ استفاده می شود. این آزمون مقاومت ماده لاستیکی یا الاستومری را نسبت به عمق نفوذ یک گلوله نشان می دهد. این شاخص بین صفر تا ۱۰۰ بوده و مقدار صفر آن به ماده ای با مدول یانگ صفر و مقدار ۱۰۰ با مدول یانگ بی نهایت، اختصاص دارد. برای مواد الاستیک سختی IRHD با سختی Shore A قابل مقایسه است. این تست در شرایطی مختلف انجام می شود.

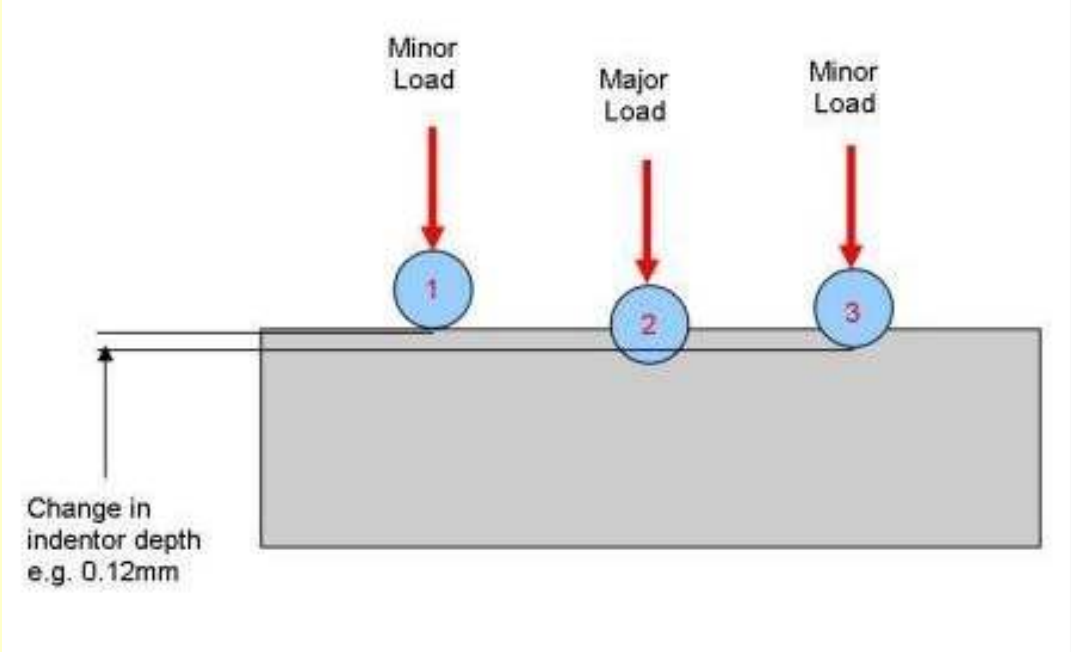
روش های مختلف سختی *IRHD*

جدول زیر حدودی از شرایط انجام آزمون در حالت های نرمال، سختی بالا و سختی کم و میکرو را نشان می دهد.

روش انجام آزمون	قطر گلوله *(mm)*	نیروی تماس *(N)*	کل نیرو *(N)*	ضخامت *(mm)*	محدوده *IRHD*
نرمال *(N)*	۲.۵	۰.۳	۵.۷	۴	۳۰ تا ۹۵
سختی بالا *(H)*	۱.۰	۰.۳	۵.۷	۴	۸۵ تا ۱۰۰
سختی پایین *(L)*	۵.۰	۰.۳	۵.۷	۶	۱۰ تا ۳۵
میکرو *(M)*	۰.۳۹۵	۰.۰۰۸۳	۰.۱۵۳	۴	۳۰ تا ۹۵

روش سختی راکول

روش تست راکول در شکل زیر نشان داده شده است. این روش عمدتا برای پلاستیک های سختی که در آنها ارتجاع یا خزش پلیمر تاثیر کمی بر نتیجه تست دارد (مانند PC، Nylon و PS) مورد استفاده قرار می گیرد.



روش سختی راکول

آزمون سختی سنجی راکول مطابق با استاندارد ASTM D۷۸۵ یا ISO۲۰۳۹ انجام می شود. مقادیر متفاوتی از آزمون راکول بر اساس اندازه گلوله فولادی و میزان بار اعمال شده گزارش می شود. سه روش عمومی که در مورد پلاستیک ها کاربرد بیشتری دارد عبارتند از: راکول E، M و R. نتایج حاصل از راکول L کمتر استفاده می شود. همچنین مقادیر راکول A، B و C معمولا برای سختی سنجی فلزات مورد استفاده قرار می گیرد.

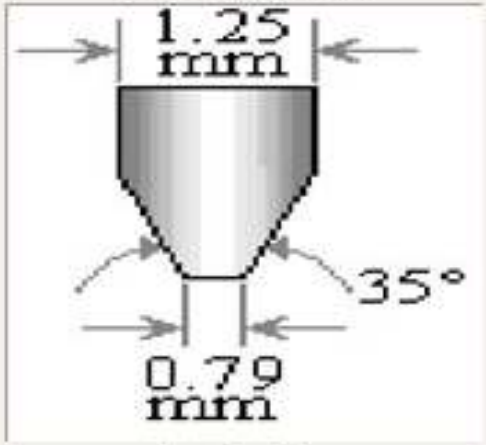
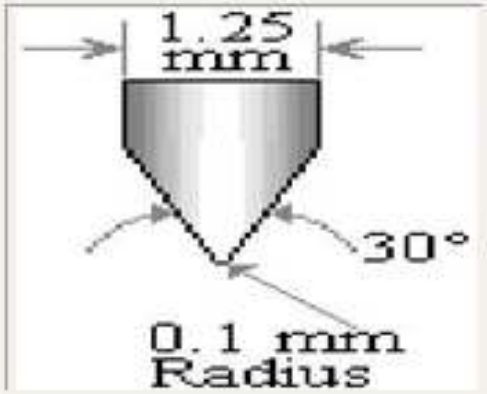
روش های مختلف اندازه گیری سختی راکول

نام روش	اعمال بار کم *(kg)*	اعمال بار زیاد *(kg)*	قطر گلوله *(in)*	قطر گلوله *(mm)*
R	۱۰	۶۰	۰.۵	۱۲.۷
L	۱۰	۶۰	۰.۲۵	۶.۳۵
M	۱۰	۱۰۰	۰.۲۵	۶.۳۵
E	۱۰	۱۰۰	۰.۱۲۵	۳.۱۷۵
K	۱۰	۱۵۰	۰.۱۲۵	۳.۱۷۵

روش سختی Shore

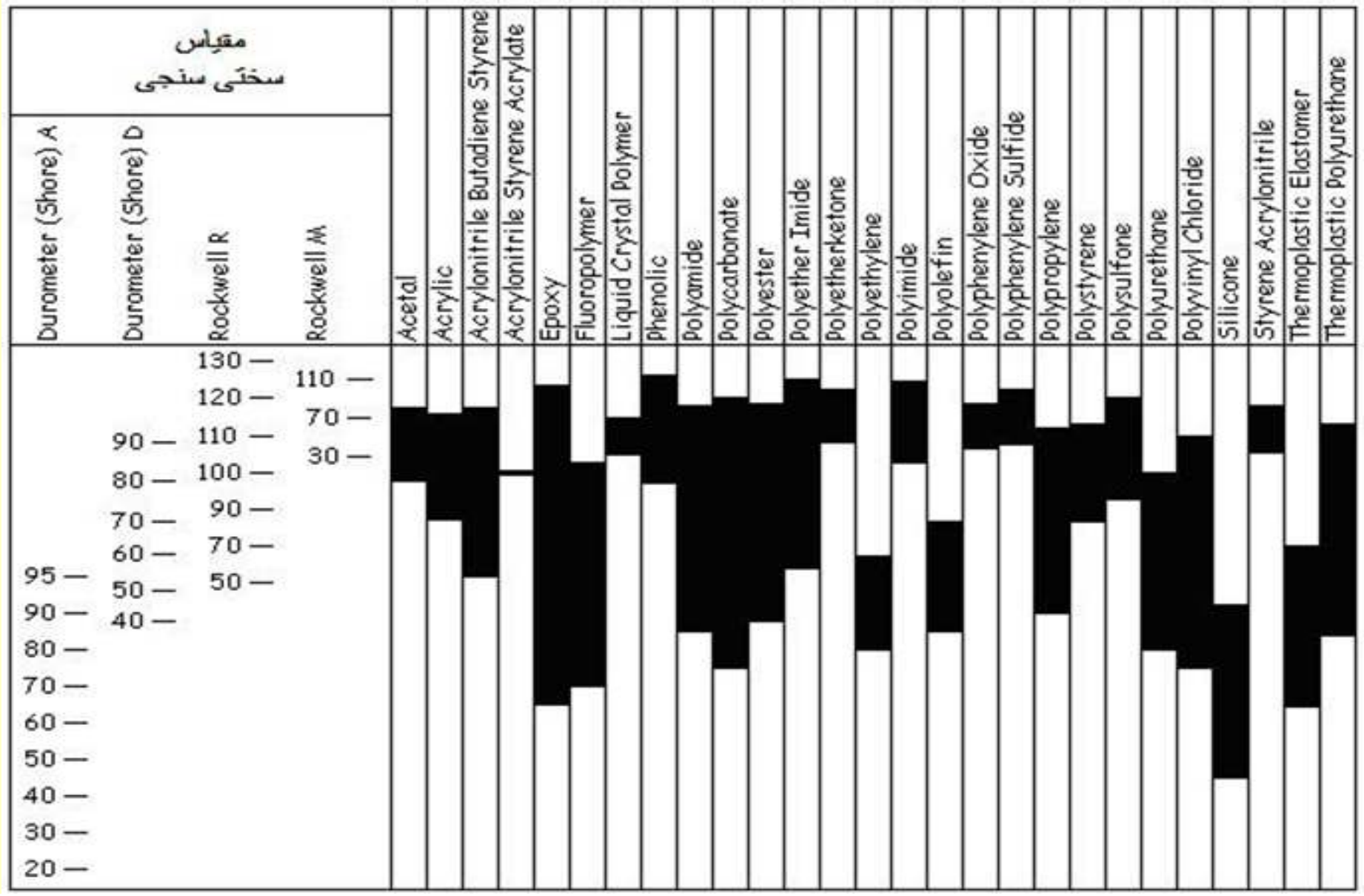
از روش های دیگر برای اندازه گیری سختی، روش Shore است. این روش برای سختی سنجی پلاستیک های نرم و لاستیک ها با استفاده از دو روش A و D بکار می رود. Shore A برای لاستیک های نرم و D برای انواع سخت تر بکار می رود. سختی Shore انواع دیگری نظیر O و H نیز در دارد که در موارد معدودی بکار می رود. سختی Shore توسط دستگاهی به نام Durometer اندازه گیری می شود. با توجه به ارتجاعیت لاستیک ها و پلاستیک های نرم مقدار فرو رفتگی با زمان تغییر می کند. لذا معمولا مقدار اثر حاصل همراه زمان قرائت نتیجه گزارش می شود. این آزمون مطابق استاندارد ASTM D۲۲۴۰ یا ISO۸۶۸ قابل انجام است.

روش سختی Shore

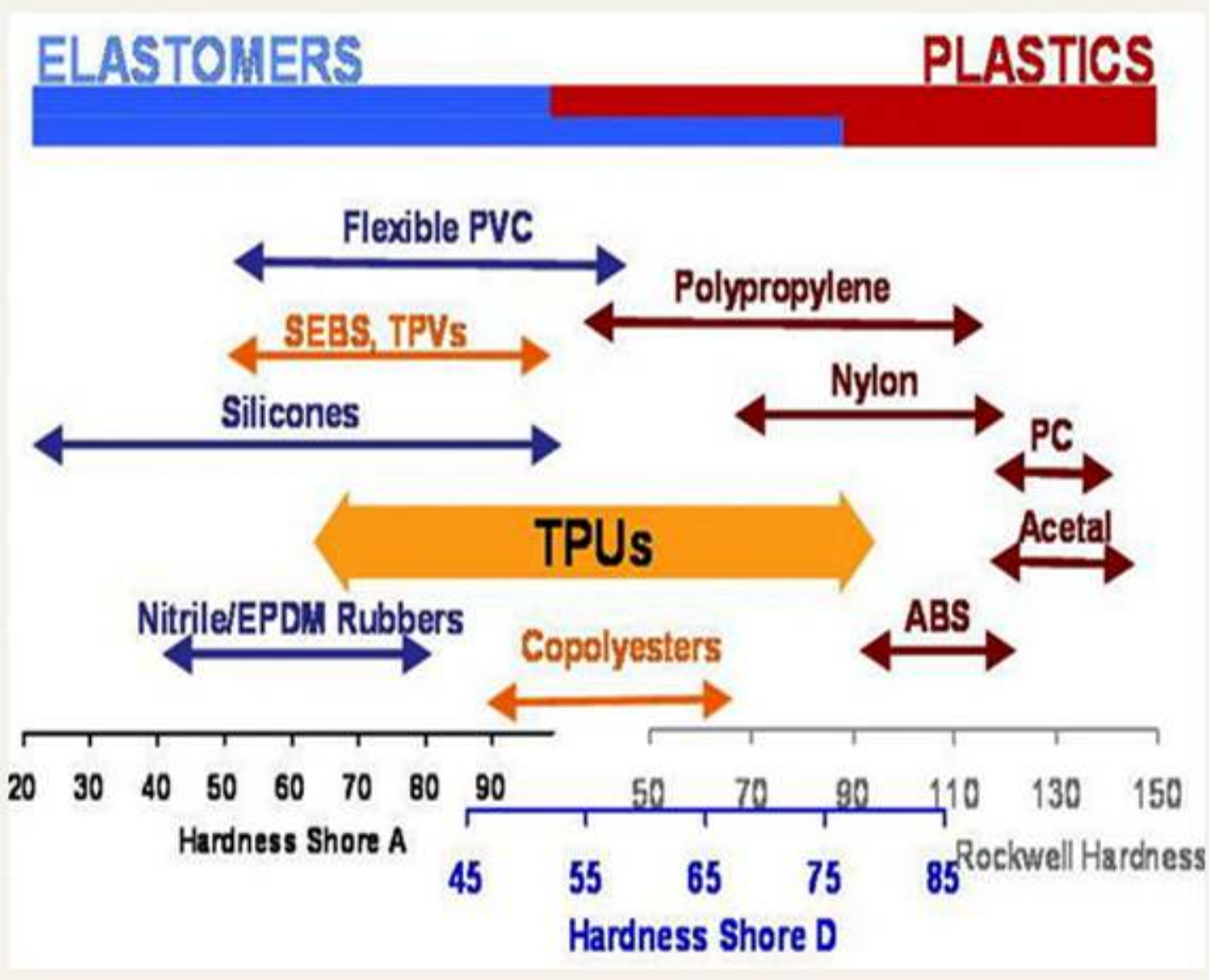
Durometer	نوع کاربرد	ابعاد نشانه گر
A	استفاده برای مواد نرم	
D	استفاده برای مواد سخت	

نتایج حاصل از تست های سختی مقادیر مفیدی را در خصوص مقاومت ماده در برابر نفوذ جسم صلب در گریدهای مختلف یک پلیمر بدست می دهد. گفتنی است که مقدار گزارش شده برای آزمون سختی همانند تست های استحکام کششی، مقاومت به خراش، سایش، فرسایش نبوده و نمی تواند به تنهایی به عنوان یک ویژگی طراحی مورد استفاده واقع شود.

مقایسه مقادیر سختی چند نوع پلیمر به روش های راکول و Shore

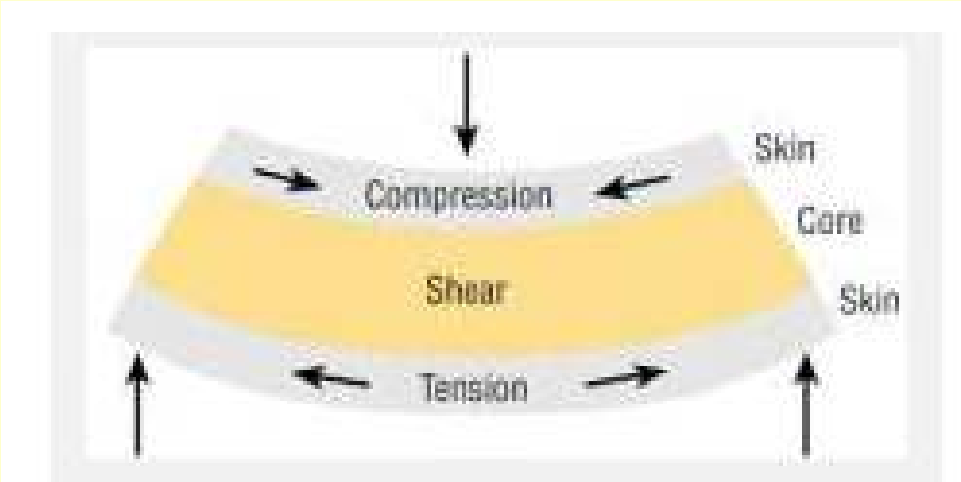


دامنه سختی در مواد پلیمری مختلف



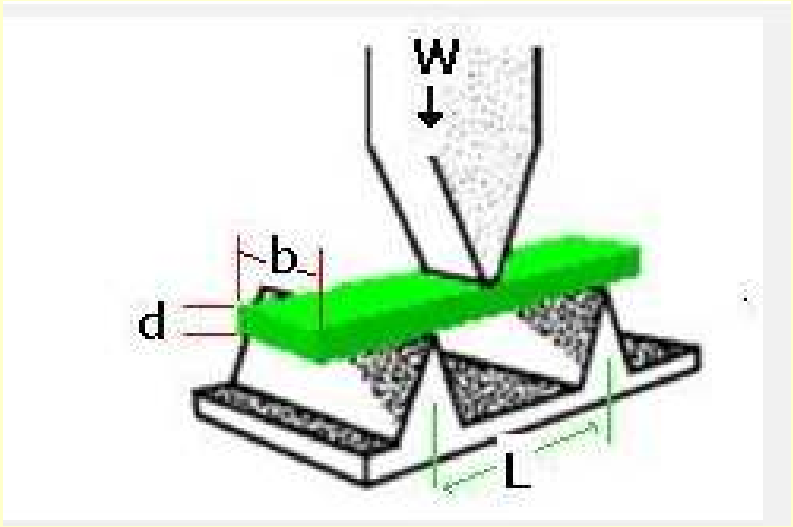
استحکام خمشی (*Flexural Strength*)

توانایی مقاومت مواد در برابر تغییرشکل تحت بار را استحکام خمشی می نامند. برای اندازه گیری استحکام خمشی از روش های بارگذاری سه نقطه ای، چهار نقطه ای، تیرچه یکسر درگیر و ... استفاده می شود. ارتباط بین تنش خمشی، کششی و فشاری در شکل زیر نشان داده شده است.



استحکام خمشی (*Flexural Strength*)

یکی از روش های اندازه گیری استحکام خمشی، آزمون سه نقطه ای است. با توجه به ابعاد نمونه مورد آزمون و بار اعمال شده، میزان استحکام خمشی و مدول خمشی از روابط زیر قابل محاسبه است.



$$\delta = \frac{3WL}{2bh^2}$$

$$E = \frac{\delta}{\varepsilon} = \frac{WL^3}{4bd^3\gamma}$$

W: بار اعمال شده

d: ضخامت نمونه

b: عرض نمونه

L: فاصله بین دو محل قرارگیری نمونه روی ابزار

استحکام خمشی (*Flexural Strength*)

به صورت تجربی برای موادی که تحت اعمال بار کاملا تغییرشکل داده، اما نمی شکنند، تنش لازم برای ایجاد ۵٪ تغییرشکل به عنوان استحکام خمشی در نقطه تسلیم گزارش می شود.

استانداردهای ASTM D۷۹۰ و ISO۱۷۸ برای رفتار خمشی پلیمرها مورد استفاده قرار می گیرند.

برای نمونه هایی که با تغییری کوچک در خمش می شکنند، سرعت اعمال بار حدود ۰،۰۱ mm/min تنظیم می شود.

جدول زیر حدودی از مقادیر استحکام و مدول خمشی بدست آمده برای برخی پلیمرها را ارائه می دهد. مشخص است که گریدهای پلیمر تقویت شده با الیاف از استحکام خمشی بالاتری نسبت به گریدهای همان پلیمر به صورت تقویت نشده برخوردارند.

Flexural Modulus (GPa	(Flexural Strength (MPa	Polymer Type
2.5	75	ABS
7	120	ABS + 30% Glass Fiber
2.5	85	Acetal Copolymer
7.5	150	Acetal Copolymer + 30% Glass Fiber

3	100	Acrylic
2.3	85	Nylon 6
5	175	Polyamide-Imide
2.3	90	Polycarbonate
0.7	40	Polyethylene, MDPE
1	80	(Polyethylene Terephthalate (PET
3	140	Polyimide
12	270	Polyimide + Glass Fiber
1.5	40	Polypropylene
2.5	70	Polystyrene