

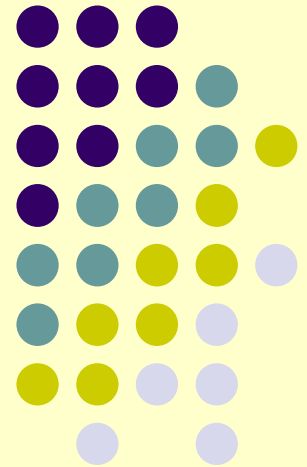
دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
دانشکده مهندسی و علم مواد



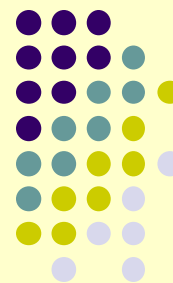
اصول مهندسی پلیمر

جلسه هفتم
(خواص مکانیکی پلیمرها)

دکتر رضا اسلامی فارسانی



خواص مکانیکی پلیمرها



خواص مکانیکی: خواصی از ماده است که ماده هنگام اعمال بار از خود

نشان می دهد نظیر تنش تسلیم، استحکام کششی، سختی، چقرمگی و ...

✓ عوامل موثر بر خواص مکانیکی پلیمرها:

- وزن مولکولی

- شاخه های پلیمری

- پیوندهای عرضی در شاخه های پلیمری

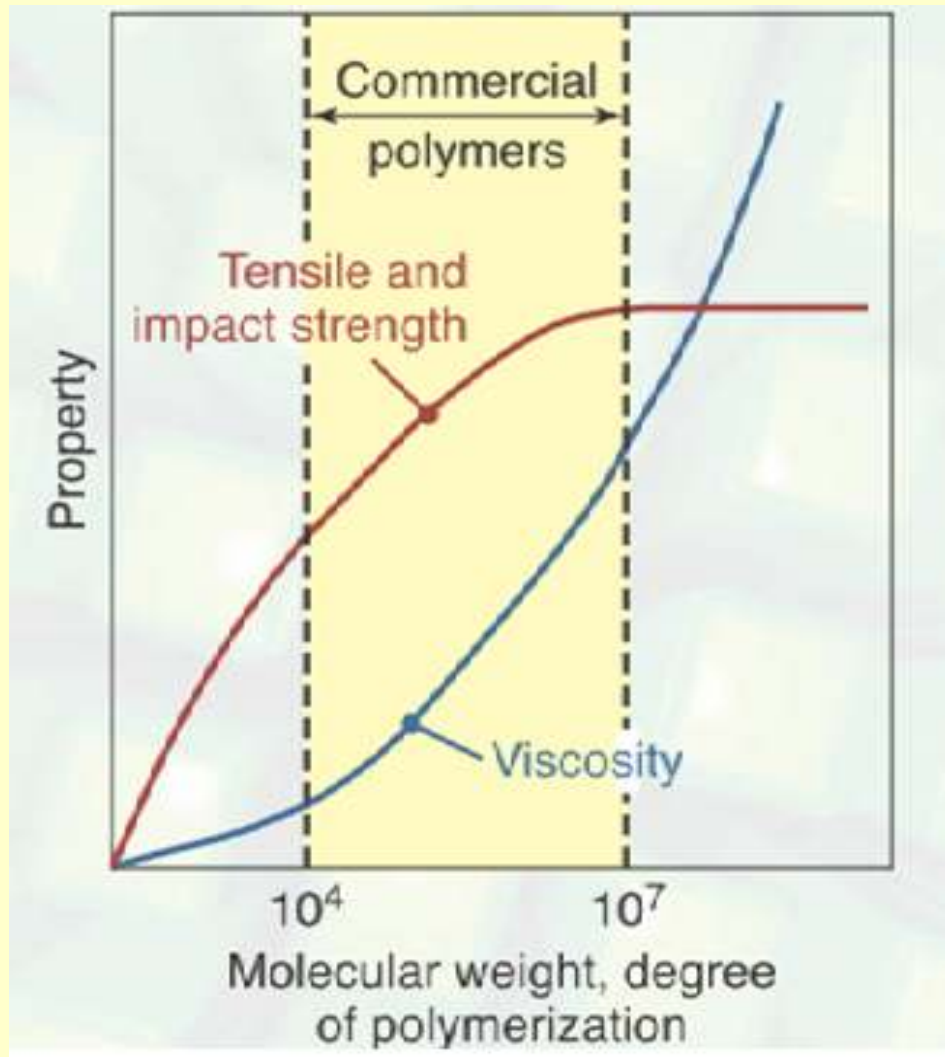
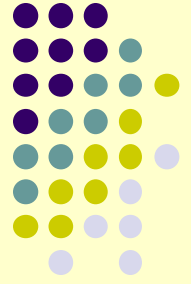
- میزان کریستالی شدن در پلیمر

- افزودنی ها

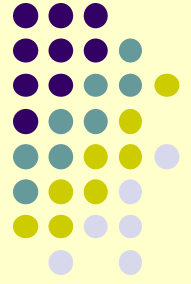
- فرآیند تولید پلیمر

- تاریخچه حرارتی

تأثير وزن مولكولى بر خواص پليمر



رفتار مکانیکی مواد پلیمری



رفتار مکانیکی پلیمرها براساس همان معیارهایی تعریف می شود که برای فلزات تعیین شده است. مدول الاستیک (کشسانی)، استحکام کششی و استحکام تسلیم، سه خاصیت اصلی مکانیکی هستند. خواص پلیمرها عموماً تحت تاثیر سرعت تغییرشکل (سرعت کرنش)، دما و نوع محیط (حضور آب، اکسیژن، حلال آلی و ...) است. در مواد پلیمری بطور کلی سه نوع رفتار تنش - کرنش وجود دارد:

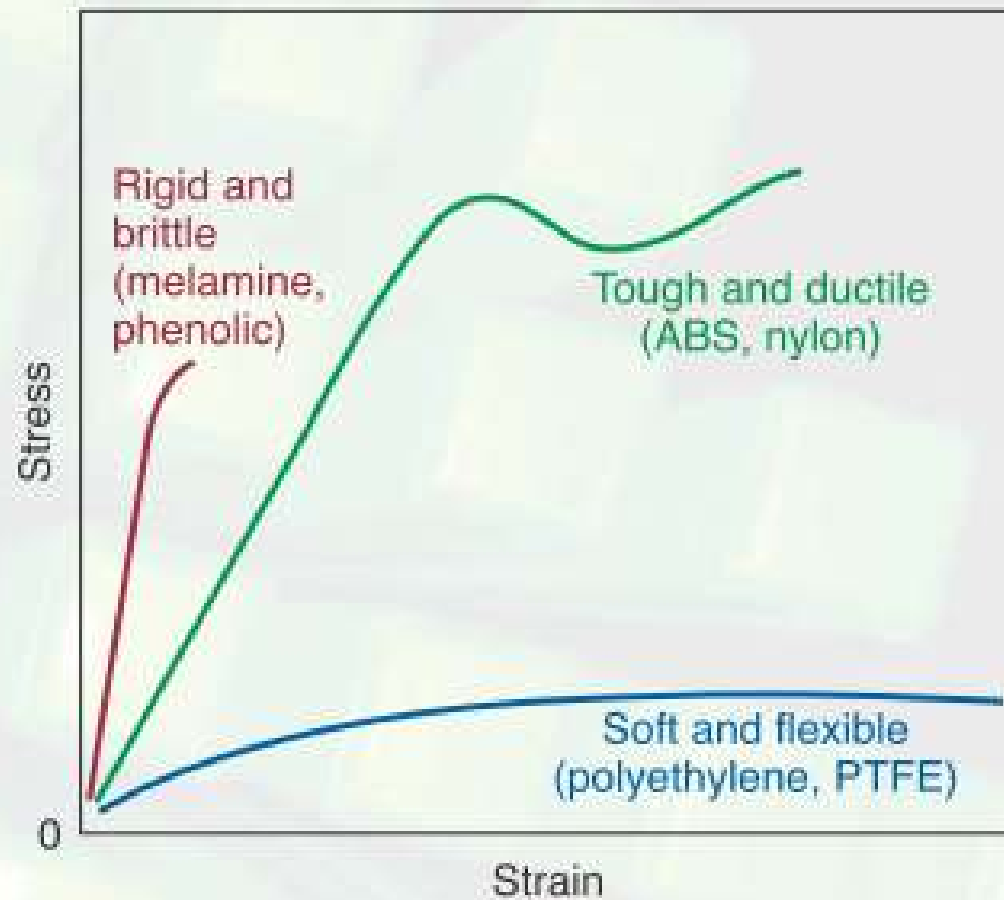
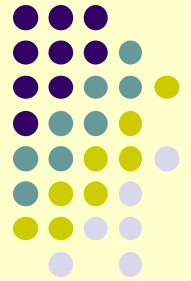
✓ پلیمرهای ترد که در حین تغییرشکل کشسان در آنها شکست روی می دهد.

✓ پلیمرهای مومسان که رفتاری شبیه فلزات دارند.

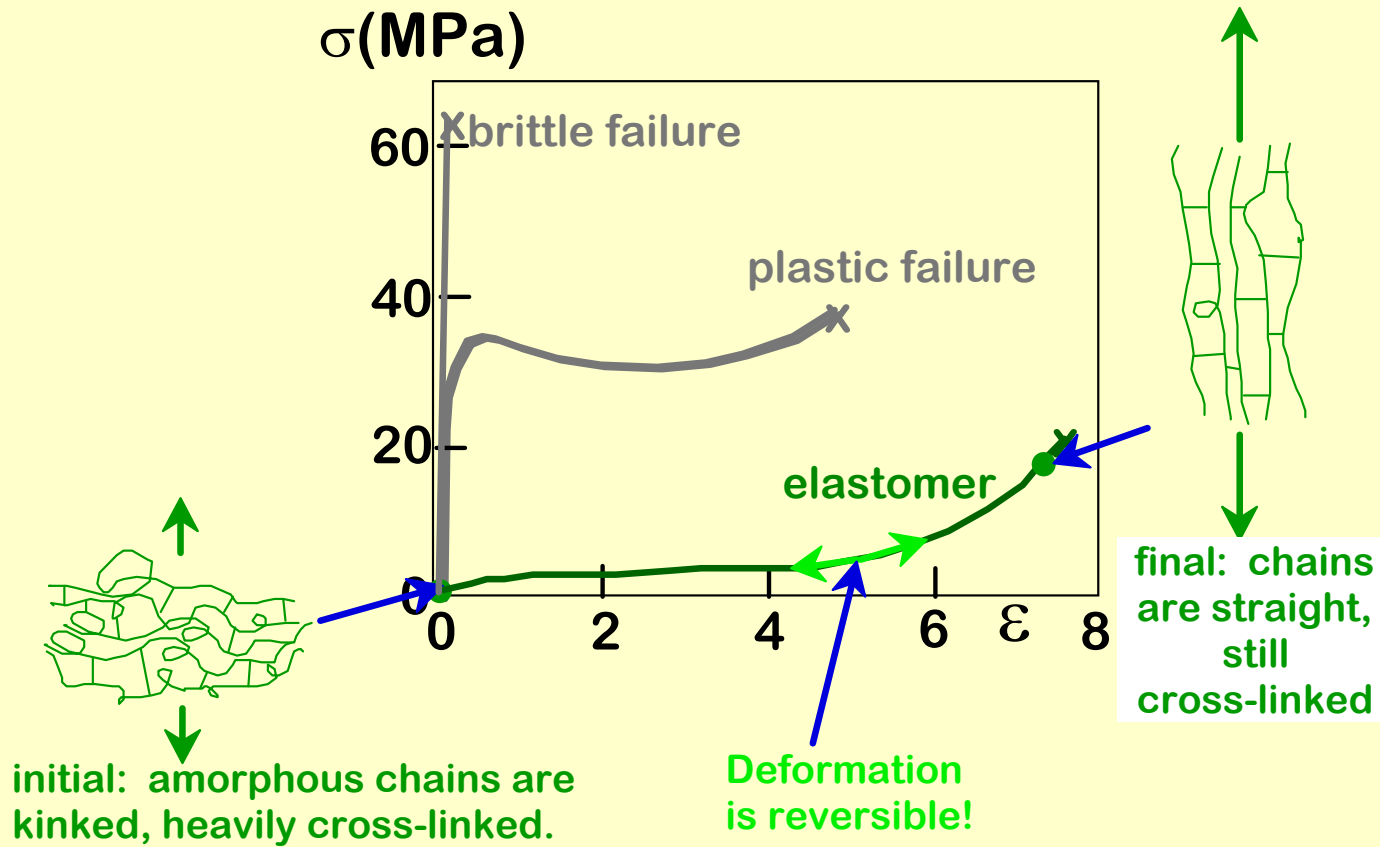
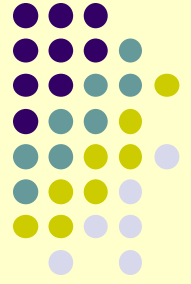
✓ پلیمرهای بسیار کشسان لاستیک مانند که خانواده الاستومرها هستند و با تنش کم، کرنش

برگشت پذیر زیادی تولید می کنند.

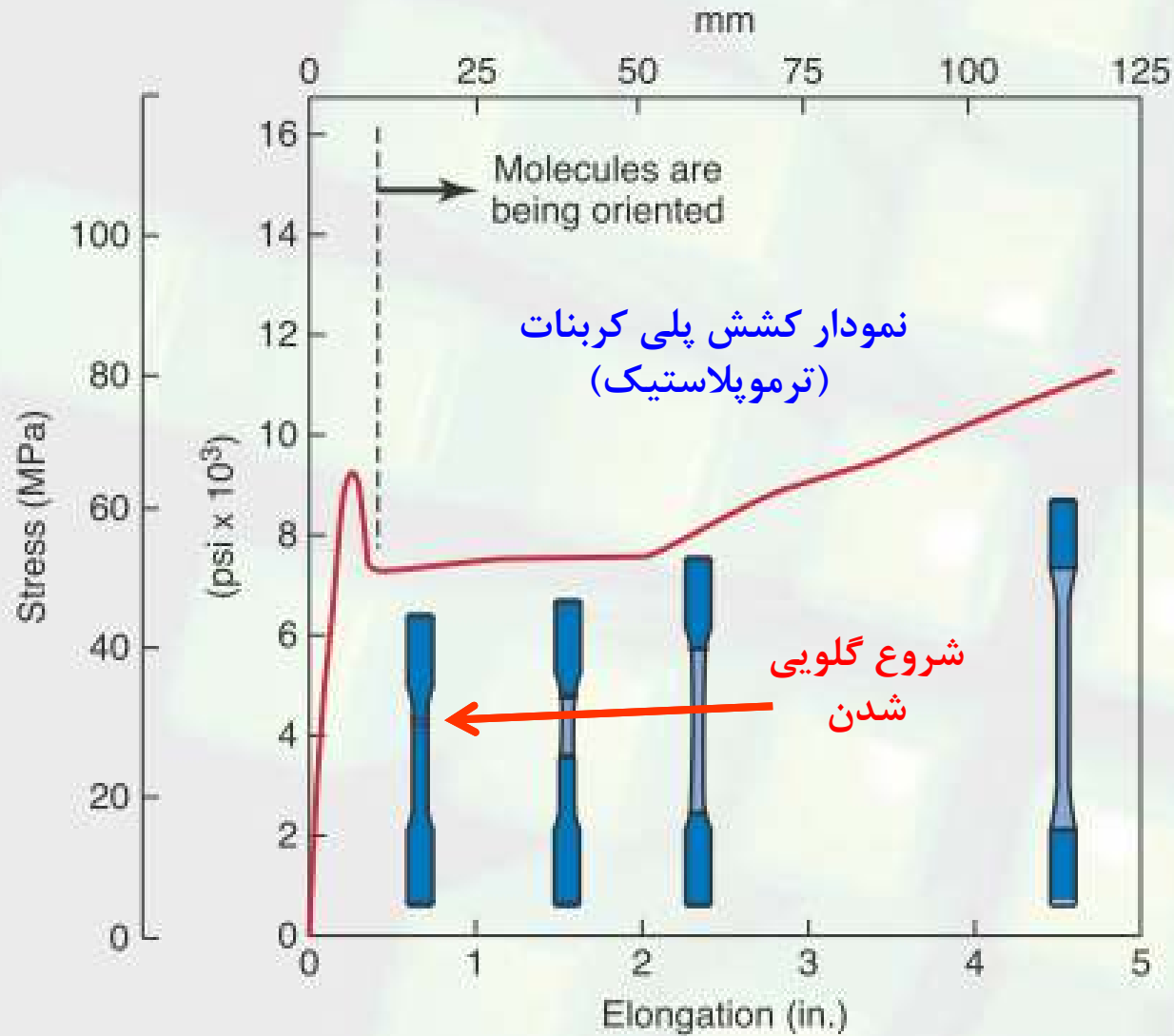
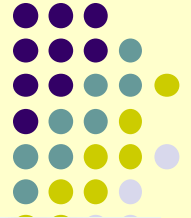
رفتار مکانیکی انواع مواد پلیمری در آزمون کشش



رفتار کششی انواع مواد پلیمری



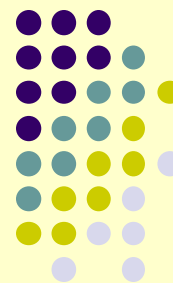
رفتار ماده پلیمری ترموپلاستیک در کشش



(a)

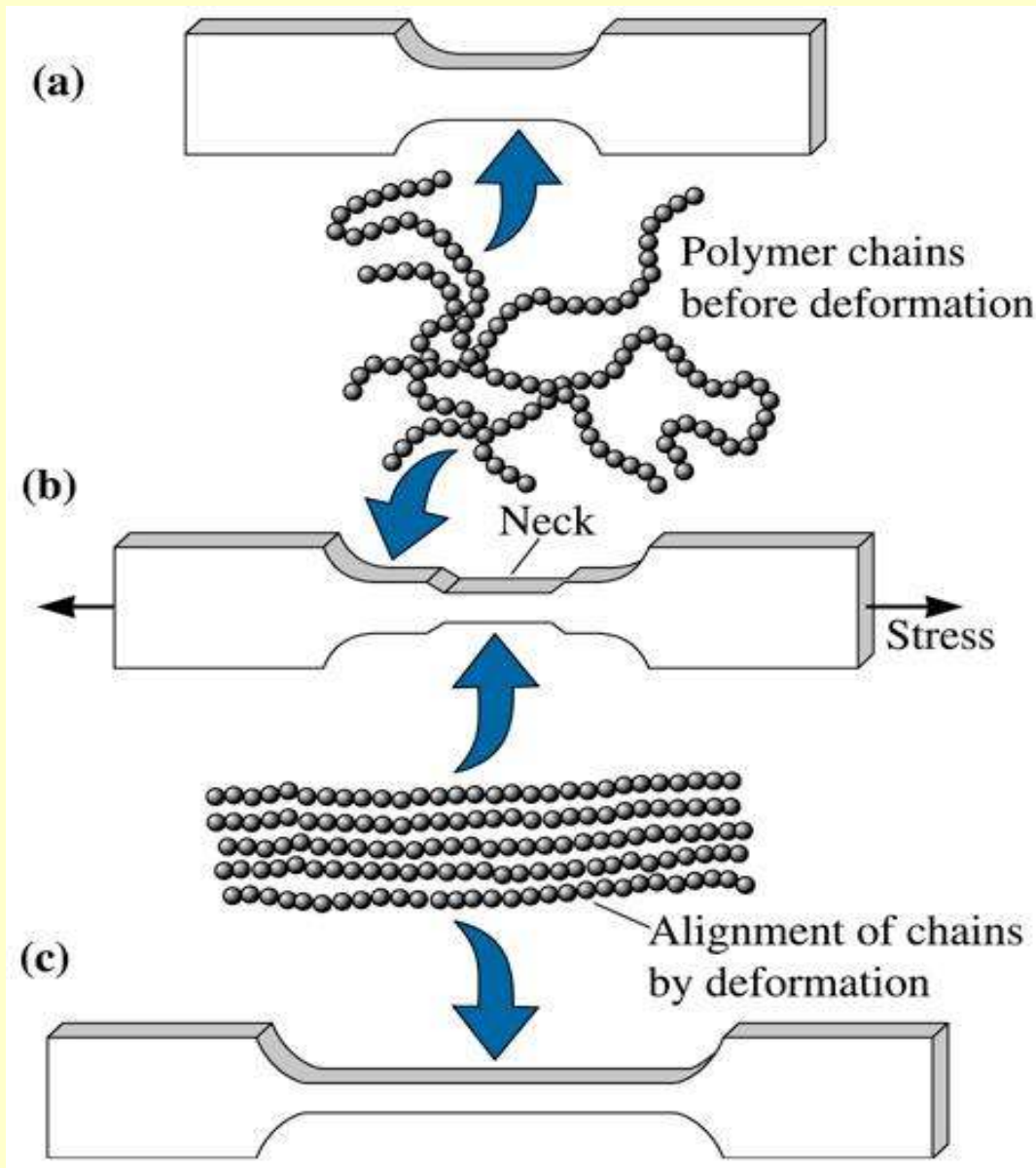
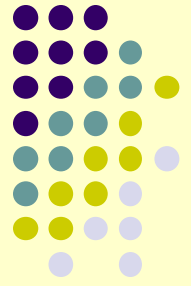
(b)

رفتار ماده پلیمری ترموپلاستیک در کشش



ابتدا با افزایش تنش، به ازای تنش تسلیم، تغییر شکل پلاستیک پلیمر شروع می شود. در ادامه به علت گسسته شدن پیوندها در ساختار زنجیره ای پلیمر، تنش لازم برای ادامه تغییر شکل کاهش می یابد، اما با شروع یک راستا شدن و نظم گرفتن زنجیره های پلیمری در محل گلویی شدن، مقاومت به تغییر شکل زیاد شده و این دو پدیده (گسسته شدن پیوندها و ایجاد نظم و بلوری شدن)، تقریباً اثر هم را خنثی می کنند. لذا تغییر شکل پلاستیک زیادی با اعمال تنش کم خواهیم داشت و شیب نمودار به میزان کمی صعودی خواهد بود. اما با افزایش ناحیه منظم و کریستالی شدن پلیمر این پدیده بر گسستن پیوندها غلبه کرده و با افزایش زیاد شیب نمودار، استحکام پلیمر نیز افزایش می یابد.

تغییر ساختاری در حین کشش نمونه پلیمری ترموپلاستیک

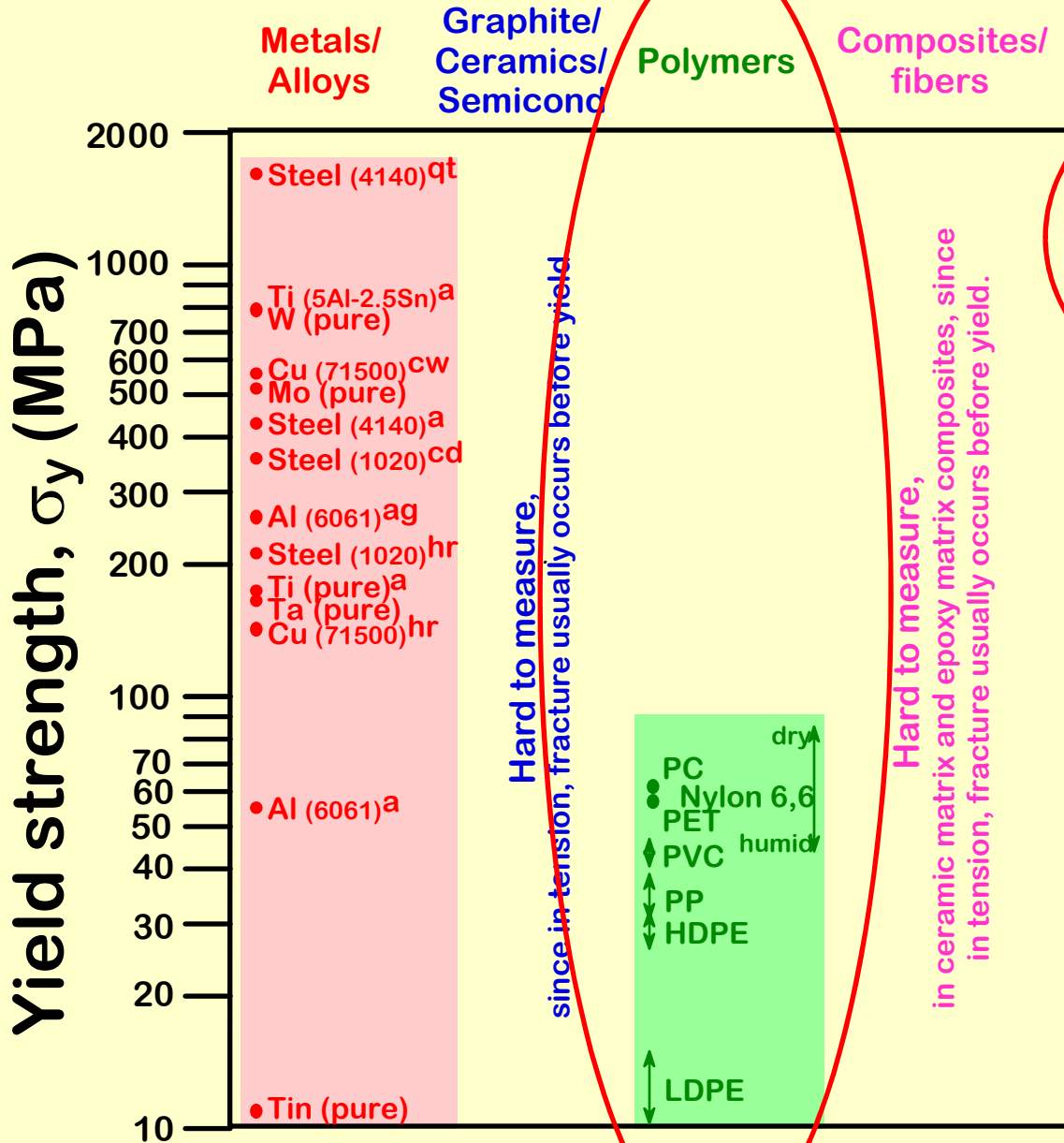
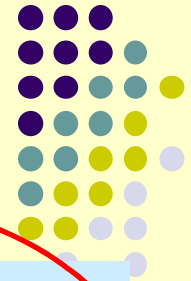


(a) زنجیره های پلیمری بصورت اتفاقی در کنار یکدیگر قرار گرفته اند.

(b) وقتی نمونه تحت کشش قرار می گیرد زنجیره های پلیمری در محل گلوبی شروع به منظم و یک راست شدن می کنند و در این منطقه، پلیمر کریستالی می شود.

(c) در این حالت با افزایش ناحیه منظم و کریستالی، استحکام پلیمر افزایش می یابد.

مقایسه استحکام تسلیم مواد پلیمری با دیگر مواد مهندسی

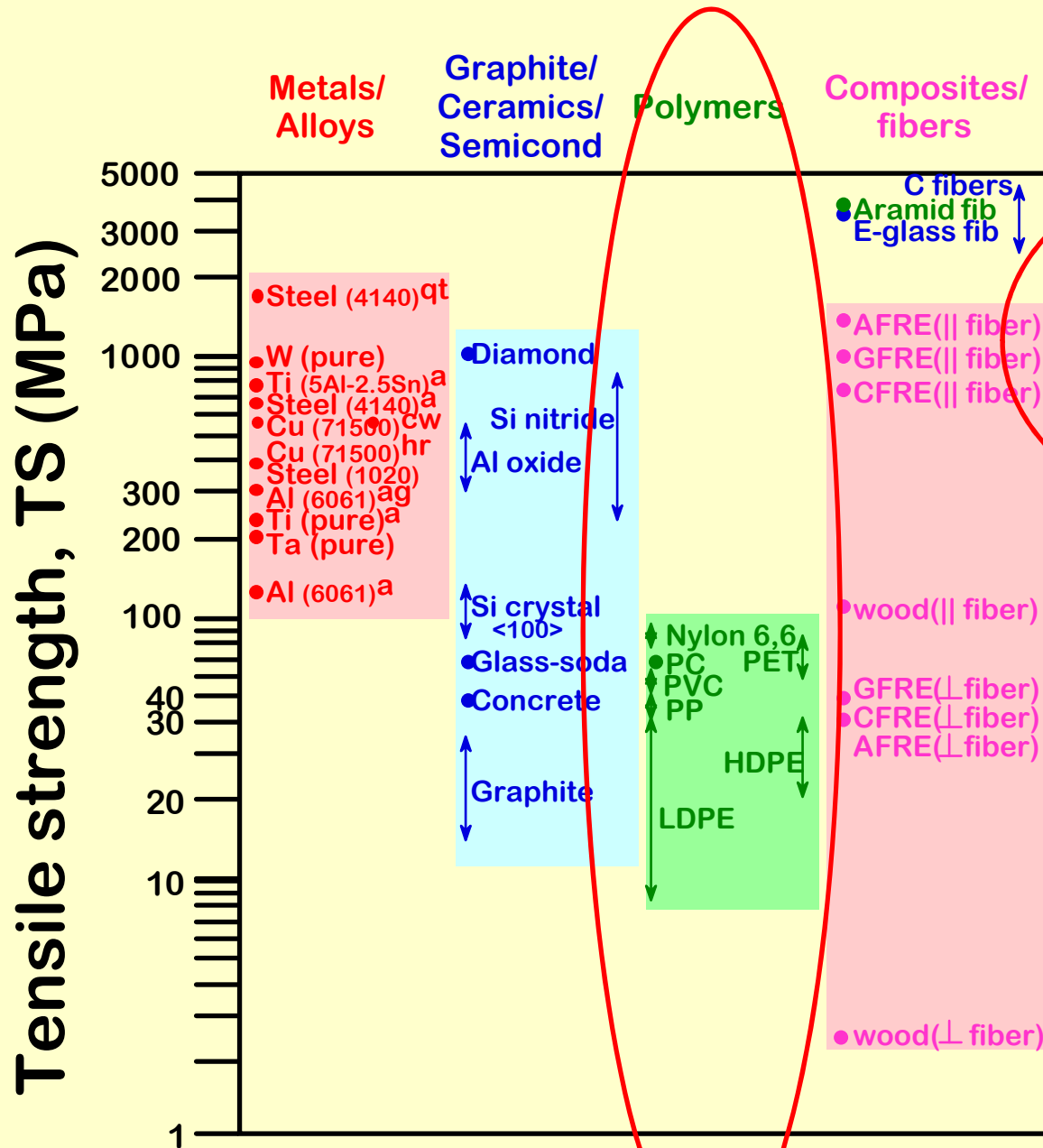
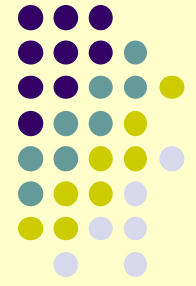


$\sigma_y(\text{ceramics})$
 $\gg \sigma_y(\text{metals})$
 $\gg \sigma_y(\text{polymers})$

آزمایش در دمای محیط

- a = annealed
- hr = hot rolled
- ag = aged
- cd = cold drawn
- cw = cold worked
- qt = quenched & tempered

مقایسه استحکام نهایی مواد پلیمری با دیگر مواد مهندسی

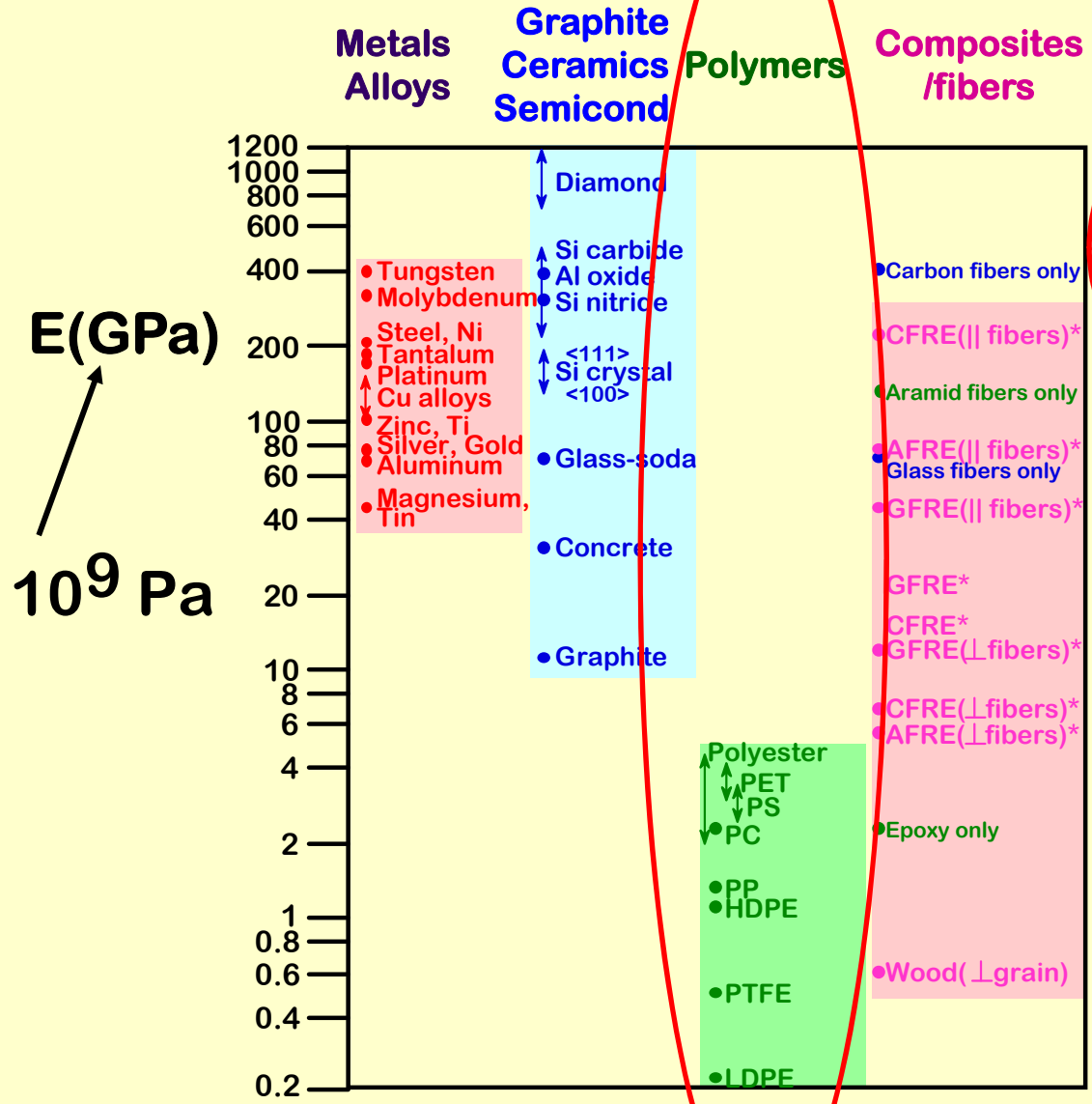
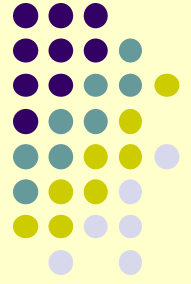


TS(ceram)
 ~ **TS(met)**
 ~ **TS(comp)**
 >> **TS(poly)**

آزمایش در دمای محیط

- a = annealed
- hr = hot rolled
- ag = aged
- cd = cold drawn
- cd = cold worked
- qt = quenched & tempered
- AFRE, GFRE, & CFRE = aramid, glass, & carbon fiber-reinforced epoxy composites, with 60 vol% fibers.

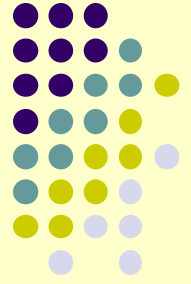
مقایسه مدول یانگ مواد پلیمری با دیگر مواد مهندسی



Eceramics
> Emetals
>> Epolymers

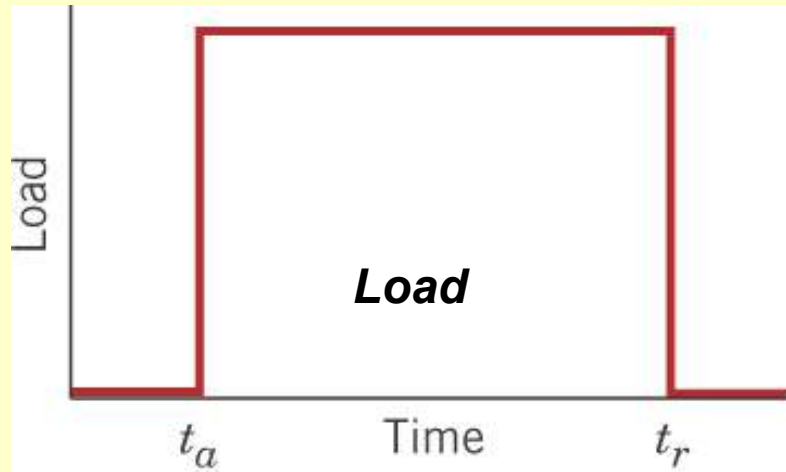
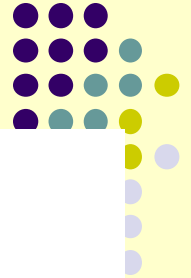
Composite data based on reinforced epoxy with 60 vol% of aligned carbon (CFRE), aramid (AFRE), or glass (GFRE) fibers.

رفتار ویسکوالاستیک پلیمرها



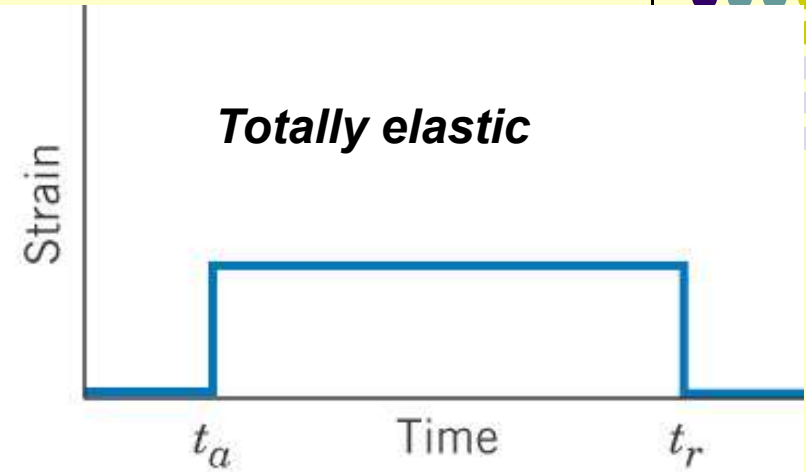
یک پلیمر بی شکل ممکن است در دمای پایین رفتاری شبیه یک شیشه، در دمای متوسط (بالای T_g)، شبیه یک جامد لاستیکی و در دمای بالاتر شبیه یک مایع غلیظ (ویسکوز) داشته باشد.

رفتار مکانیکی در تغییر شکل های کوچک و دمای کم، کشسانی و منطبق بر قانون هوک است. در دمای بالا، رفتار ویسکوز یا شبیه مایع غلبه کرده و در دمای متوسط، رفتار جامد لاستیکی بین دو مشخصه رفتاری مذکور قرار می گیرد که به این نوع رفتار، ویسکوالاستیسیته (Viscoelasticity) می گویند. ویسکوالاستیک به معنای همزمان حالت گرانروی (ویسکوز) و خاصیت کشسانی در ماده است (ویسکوز + الاستیک).



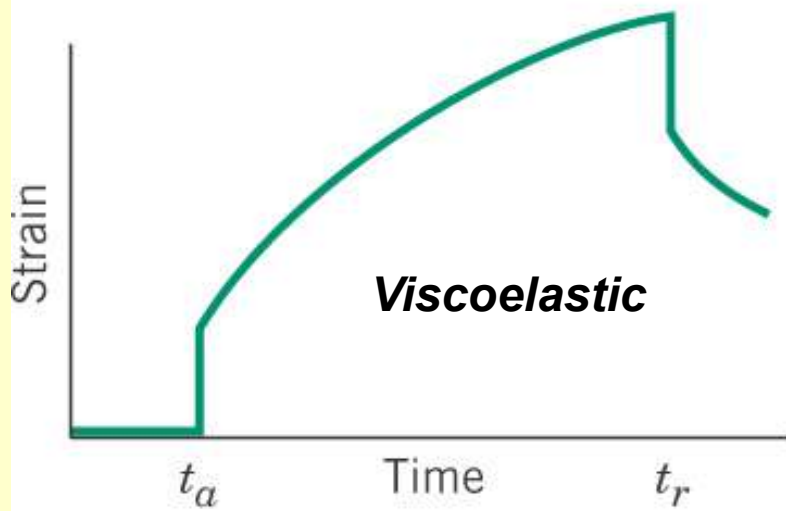
Load

(a)



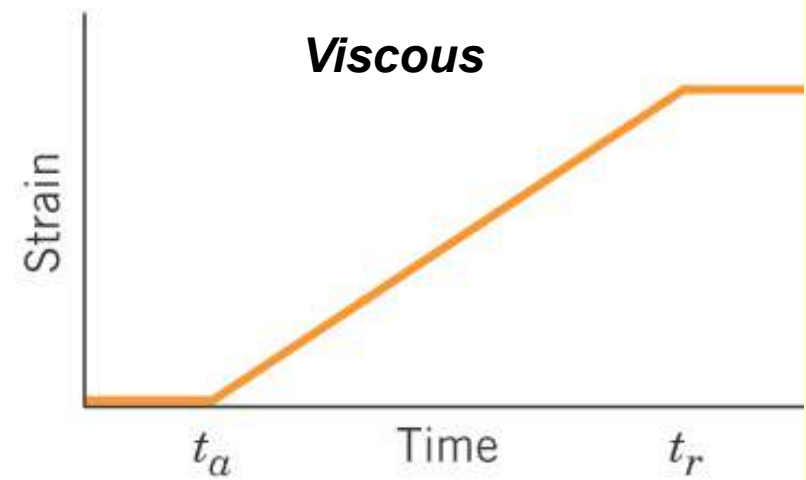
Totally elastic

(b)



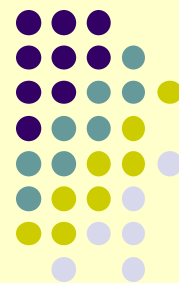
Viscoelastic

(c)



Viscous

(d)



مراحل مختلف در تغییر شکل پلیمر بی شکل

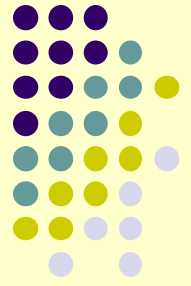
نمودار a- نمودار کلی نیرو- زمان (برای هر سه نمودار b تا d) است که نیرو بطور ناگهانی در زمان t_a اعمال شده و در زمان t_r برداشته می شود.

نمودار b- در رفتار الاستومری (کاملاً کشسان)، تغییر شکل کشسان، ناگهانی است یعنی به محض اعمال تنش یا حذف آن، تغییر شکل روی می دهد و یا نمونه به شکل اولیه باز می گردد. بنابراین، کرنش مستقل از زمان است.

نمودار c- در رفتار ویسکوالاستیک متوسط، در اثر اعمال تنش، کرنش کشسانی ناگهانی است و پس از آن به صورت ویسکوز یعنی کرنش وابسته به زمان ادامه می یابد.

نمودار d- در مواد کاملاً ویسکوز، تغییر شکل ناگهانی نیست بلکه در اثر اعمال تنش با تاخیر و وابسته به زمان، تغییر شکل روی داده و پس از برداشتن تنش نیز کاملاً برگشت پذیر نیست.

مدول رهايش (Relaxation Modulus)



رفتار ویسکو الاستیک مواد پلیمری به زمان و دما وابسته است و قابل اندازه گیری است. نمونه تحت کشش مشخص بسرعت کرنش می یابد و تنش مورد نیاز برای نگهداری این کرنش به عنوان تابعی از زمان در دمای ثابت سنجیده می شود.

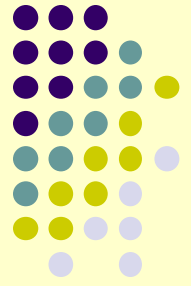
به دلیل فرآیندهای رهایش مولکولی که در پلیمرها روی می دهد، تنش با زمان کاهش می یابد. مدول رهایش، $E_r(t)$ ، برای یک پلیمر ویسکو الاستیک را می توان به صورت یک مدول کشسانی وابسته به زمان براساس رابطه زیر تعریف کرد:

$$E_r(t) = \sigma(t) / \epsilon_0$$

تنش وابسته به زمان

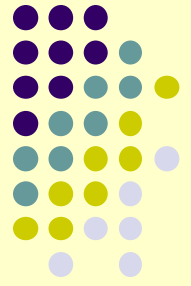
مقدار کرنش که ثابت باقی می ماند

اثر دما بر تغییرات خواص مکانیکی مواد پلیمری



منحنی تنش - کرنش یکی از ابزارهای اولیه در تعیین رفتار مواد پلیمری است. این منحنی تابع دما می باشد. با افزایش دما، استحکام تسلیم و شکست کاهش یافته و با کاهش دما، هر دو افزایش می یابند. ضمن آن که با افزایش دما، مواد شکننده، ضربه پذیرتر می شوند. بنابراین با توجه به کاهش استحکام تسلیم و شکست، بالا رفتن دما سبب افزایش کرنش در نقطه شکست می شود.

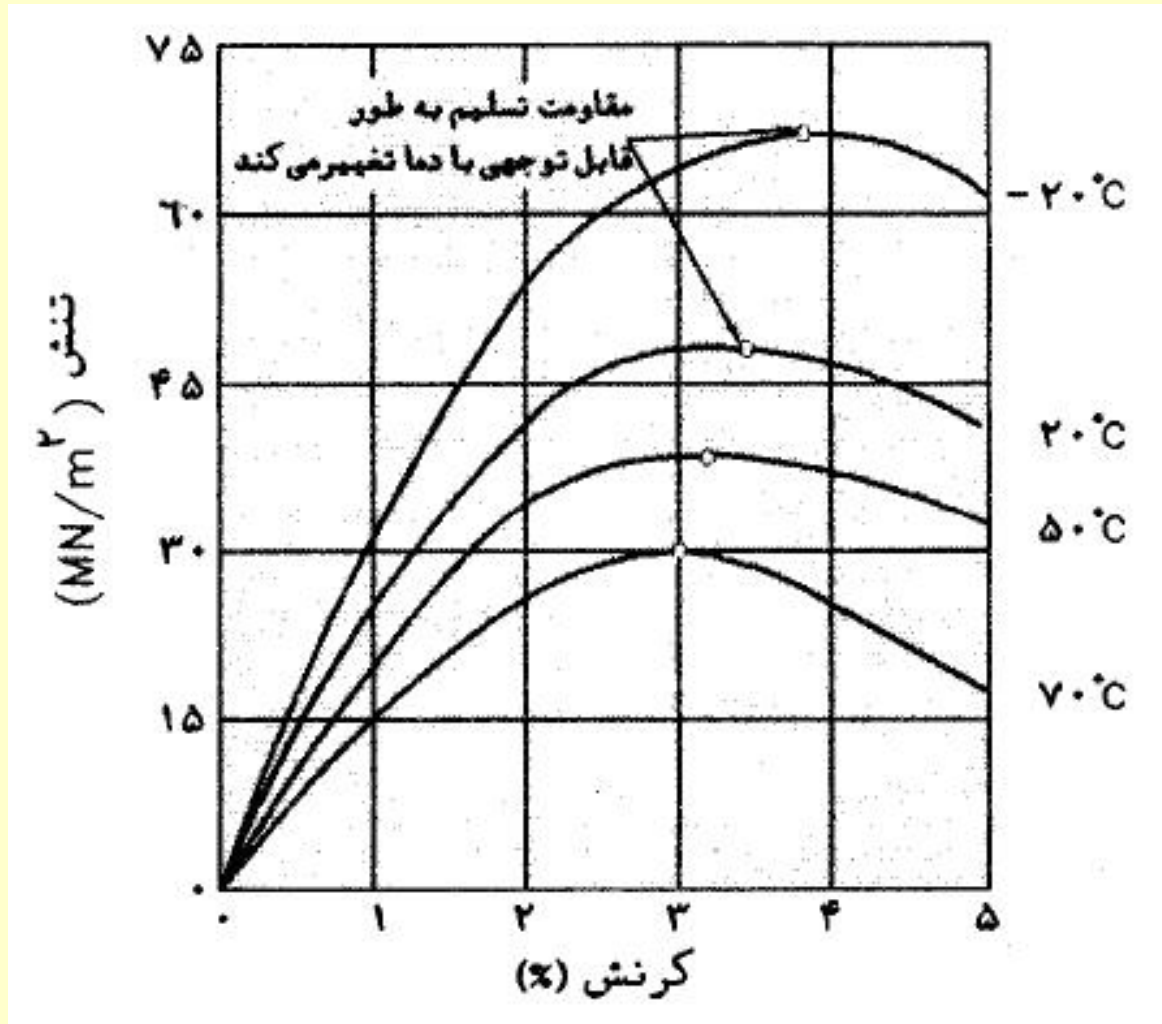
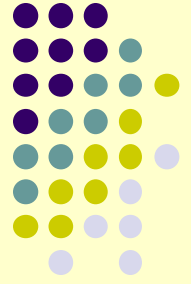
اثر دما بر تغییرات خواص مکانیکی مواد پلیمری



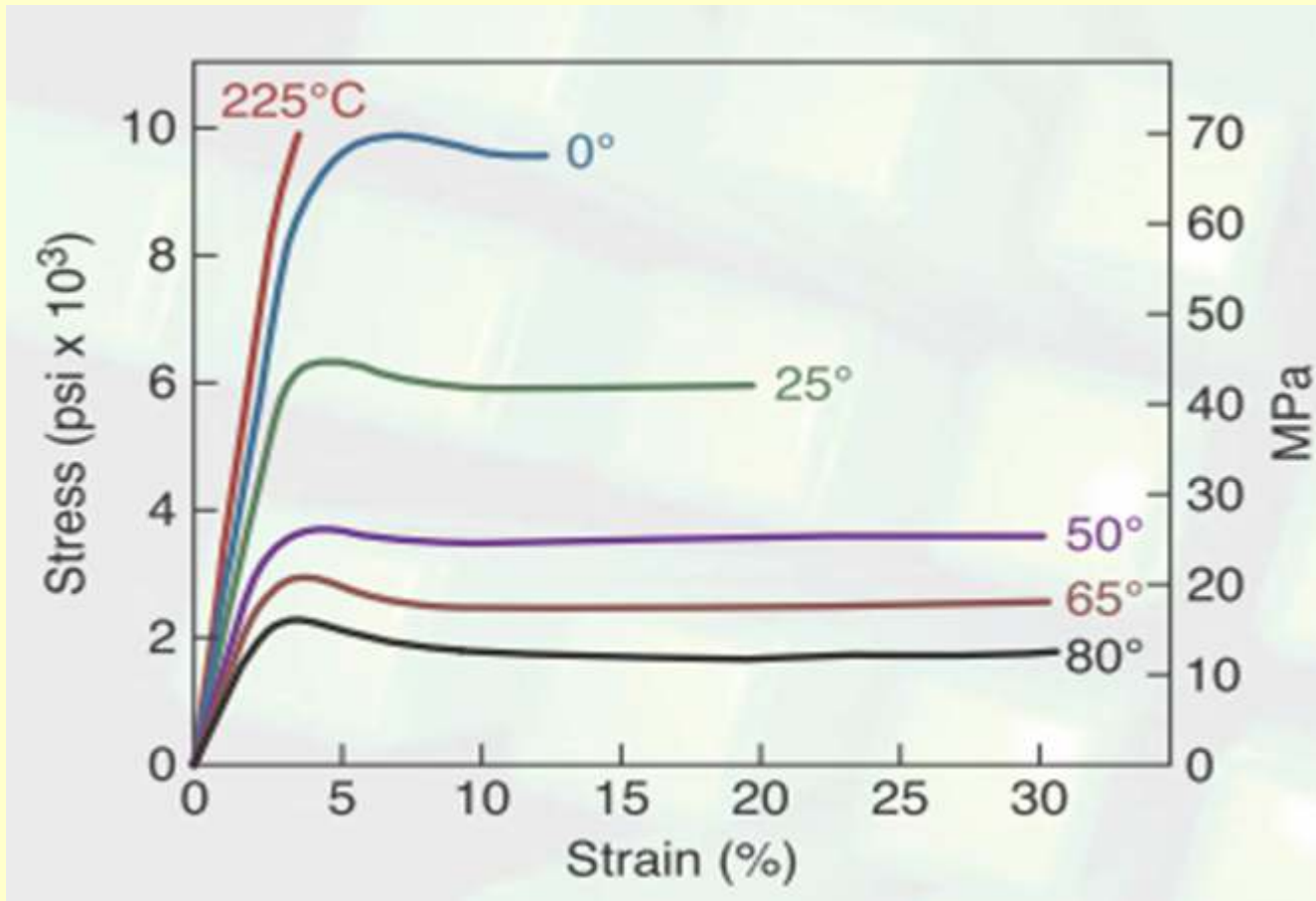
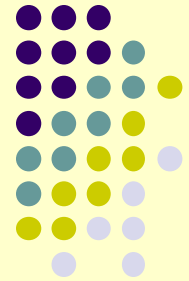
اگر منحنی تغییرات استحکام کششی نهایی با دما رسم شود، فارغ از نوع ماده پلیمری (آمورف یا بلوری)، تقویت شده یا نشده، منحنی حاصل رفتاری تقریباً خطی را بدست می دهد. سرعت کاهش استحکام با دما تابع ساختار ماده بوده و پیش بینی آن مشکل می باشد، اما قاعده کلی مبین این مسئله است که مواد با استحکام بالاتر، با سرعت بیشتری استحکام خود را از دست می دهند.

همچنین سرعت کاهش استحکام کششی با دما از یک رابطه خطی پیروی نمی کند. مشاهدات حاکی از آن است که در بالاترین محدوده دمایی، تمایل به کاهش در میزان استحکام کششی، آهسته تر می شود و برای برخی از مواد نیمه بلوری، کاهش شدید در استحکام کششی، منطبق با محدوده دمای انتقال شیشه ای رخ می دهد.

منحنی اثر دما بر استحکام تسلیم مواد پلیمری

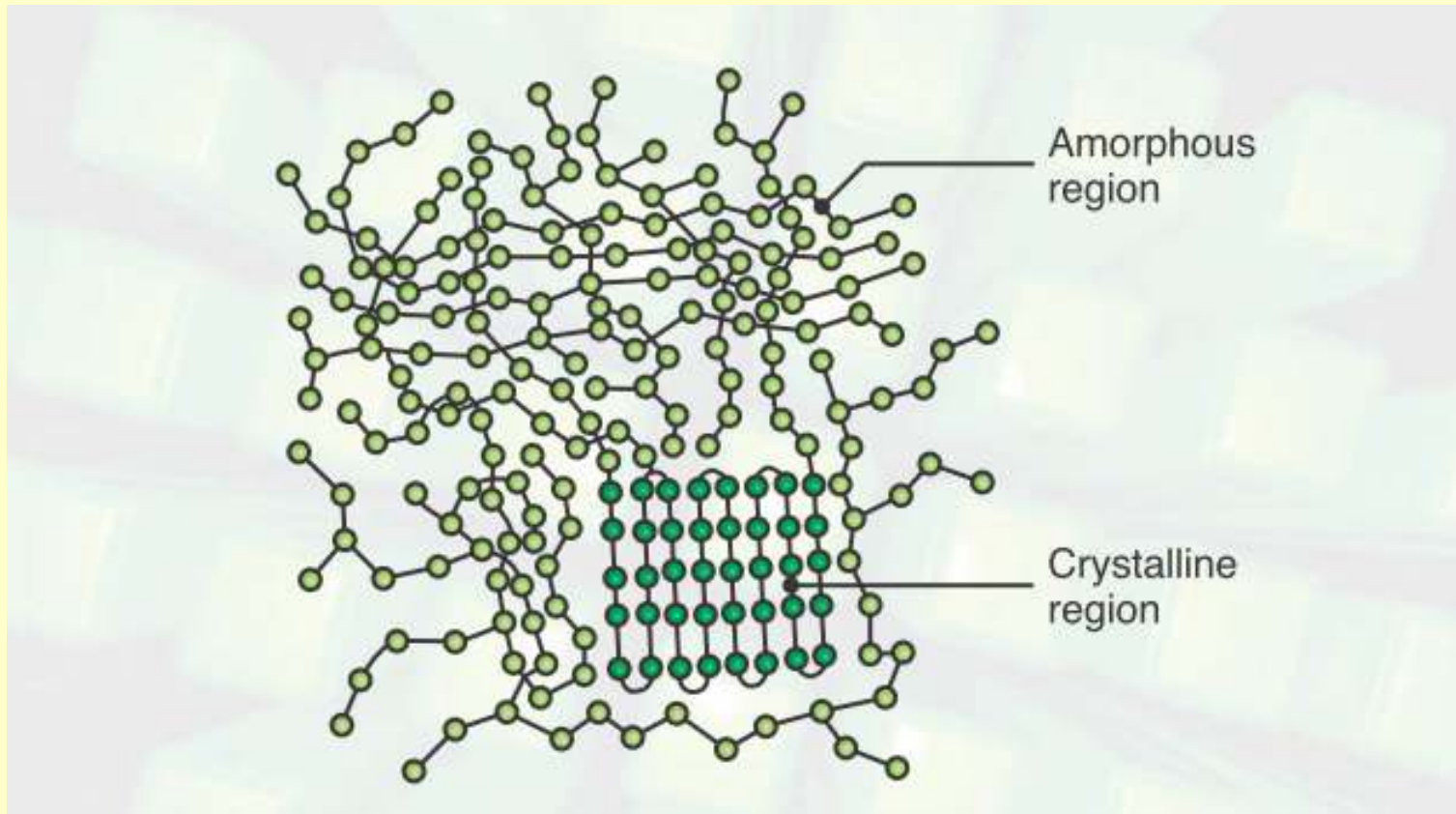
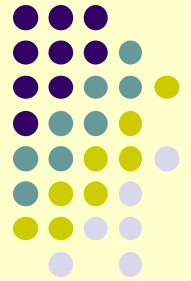


اثر دما بر نمودار تنش - کرنش مواد پلیمری



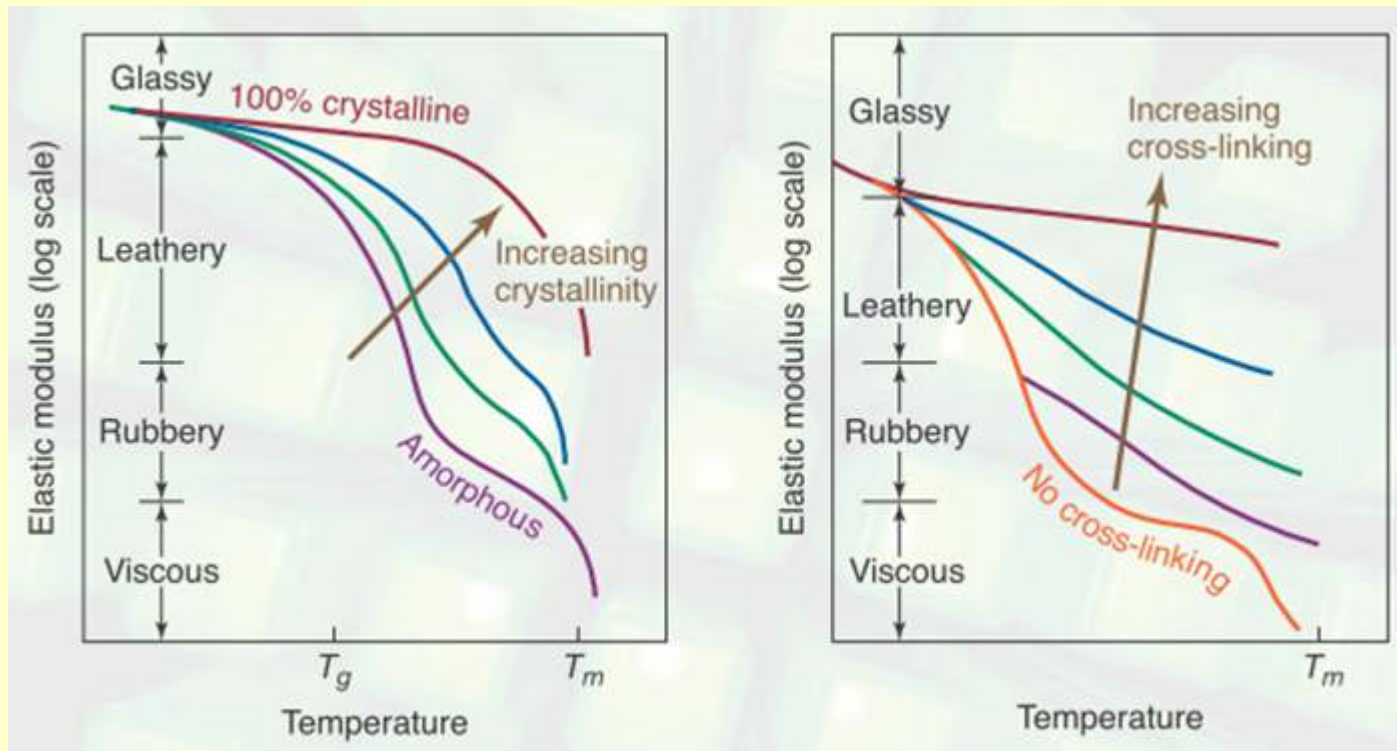
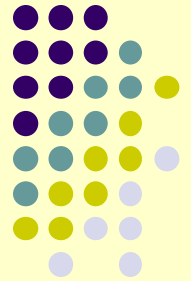
در نمودار تنش - کرنش پلیمر ترموپلاست استات سلولز، با افزایش دما به میزان کم، کاهش زیاد استحکام و نرمی شدید روی می دهد.

تأثیر میزان کریستالی شدن ساختار بر خواص مکانیکی پلیمر



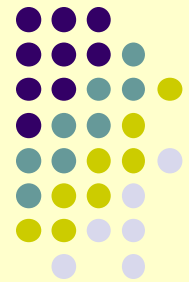
هرچه میزان ساختار کریستالی در ساختار پلیمر بیشتر شود،
ساختار مستحکم تر و خواص مکانیکی بهتر خواهد بود.

تأثیر دما بر مدول الاستیک انواع مختلف پلیمرهای آمورف تا کریستالی و پلیمرهای با میزان اتصال عرضی متفاوت



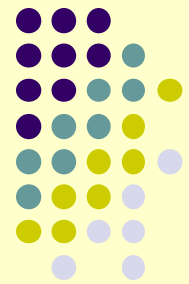
- افزایش دما در هر حالت باعث کاهش مدول الاستیک انواع پلیمر می شود.
- با افزایش بلورینگی و اتصال عرضی، مدول الاستیک افزایش می یابد.

خواص مکانیکی برخی پلیمرهای مهندسی در دمای محیط



Material	UTS (MPa)	E (GPa)	Elongation in 50 mm (%)	Poisson's ratio (ν)
ABS	28-55	1.4-2.8	75-5	-
ABS (reinforced)	100	7.5	-	0.35
Acetals	55-70	1.4-3.5	75-25	-
Acetals (reinforced)	135	10	-	0.35-0.40
Acrylics	40-75	1.4-3.5	50-5	-
Cellulosics	10-48	0.4-1.4	100-5	-
Epoxies	35-140	3.5-17	10-1	-
Epoxies (reinforced)	70-1400	21-52	4-2	-
Fluorocarbons	7-48	0.7-2	300-100	0.46-0.48
Nylon	55-83	1.4-2.8	200-60	0.32-0.40
Nylon (reinforced)	70-210	2-10	10-1	-
Phenolics	28-70	2.8-21	2-0	-
Polycarbonates	55-70	2.5-3	125-10	0.38
Polycarbonates (reinforced)	110	6	6-4	-
Polyesters	55	2	300-5	0.38
Polyesters (reinforced)	110-160	8.3-12	3-1	-
Polyethylenes	7-40	0.1-0.14	1000-15	0.46
Polypropylenes	20-35	0.7-1.2	500-10	-
Polypropylenes (reinforced)	40-100	3.6-6	4-2	-
Polystyrenes	14-83	1.4-4	60-1	0.35
Polyvinyl chloride	7-55	0.014-4	450-40	-

تأثیر افزودنی ها بر خواص مواد پلیمری



- انواع افزودنی ها برای تغییر و اصلاح مشخصات و خواص (فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی) پلیمرها به آنها اضافه می شوند. افزودنی ها عبارتند از:

۱- پرکننده ها (Fillers)

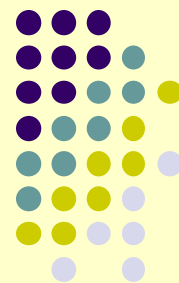
۲- نرم کننده ها (Plasticizers)

۳- پایدار کننده ها (Stabilizers)

۴- مواد رنگی (Pigments یا Colorants)

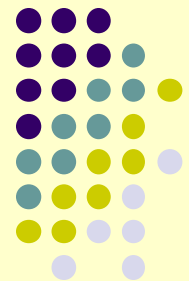
۵- سایر افزودنی ها

تأثیر افزودنی ها بر خواص مواد پلیمری



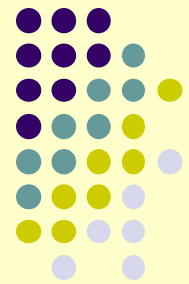
- **مواد پرکننده:** جهت بهبود استحکام کششی و فشاری، مقاومت به سایش، چقرمگی و پایداری حرارتی و ابعادی به پلیمرها اضافه می شوند. دوده، پودر سیلیس، شیشه، تالک و سنگ آهک، پرکننده های اصلی هستند که در بسیاری از موارد علاوه بر اصلاح خواص جایگزین بخشی از حجم پلیمر نیز شده و قیمت محصول را کاهش می دهند.

تأثیر افزودنی ها بر خواص مواد پلیمری



- **مواد نرم کننده:** انعطاف پذیری، نرمی و چقرمگی را بهبود می دهند. عموماً مایعاتی با وزن مولکولی کم بوده که مولکول های کوچک آنها بین زنجیره های بزرگ پلیمر جای می گیرند. این مواد در پلیمرهایی بکار می روند که در دمای محیط ترد هستند (مانند PVC). مواد نرم کننده، دمای تبدیل شیشه ای را کاهش داده تا پلیمرها در دمای محیط با نرمی مناسبی قابل استفاده باشند.

تأثیر افزودنی ها بر خواص مواد پلیمری



- **مواد پایدار کننده:** از تخریب سریع پلیمرها در معرض نور، تشعشع ماوراء بنفش و حرارت جلوگیری می کنند.

- **مواد رنگی:** با اضافه شدن به پلیمر به صورت رنگ و رنگدانه، رنگ و جلوه خاصی به پلیمر می دهند.

- **سایر مواد افزودنی**

شتاب دهنده (Accelerator)

تاخیر انداز اشتعال (Flame Retardant)

ضد اکسید (Antioxidant)

ضد الکتریسیته ساکن (Antistatic Agent)

تقویت کننده (Reinforcement)