



دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی و علم مواد

آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد

آزمایش شماره 5 :

بررسی تاثیر آهنگ تغییر شکل بر خواص کششی نمونه های فولادی

نگارش :

پیام مرادی بانیارانی

**98107728**

گروه :

**دوشنبه ساعت 13:30 تا 16:30**

اساتید :

دکتر سیامک سراج زاده

مهندس جعفر مهدی اخگر

تاریخ انجام آزمایش :

**1401/01/29**

## عنوان : آزمایش نرخ کرنش

نرخ کرنش به صورت  $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$  و به طور قراردادی واحد آن "به ثانیه" بیان می شود.  
تشریف ال شود

نرخ کرنش اثر مهمی بر روی تنش سیلان ایجاد می کند، به گونه ای که هر چه نرخ کرنش افزایش یابد تنش سیلان هم افزایش می یابد.

وابستگی نرخ کرنش و استحکام، با افزایش دما، افزایش پیدا می کند.

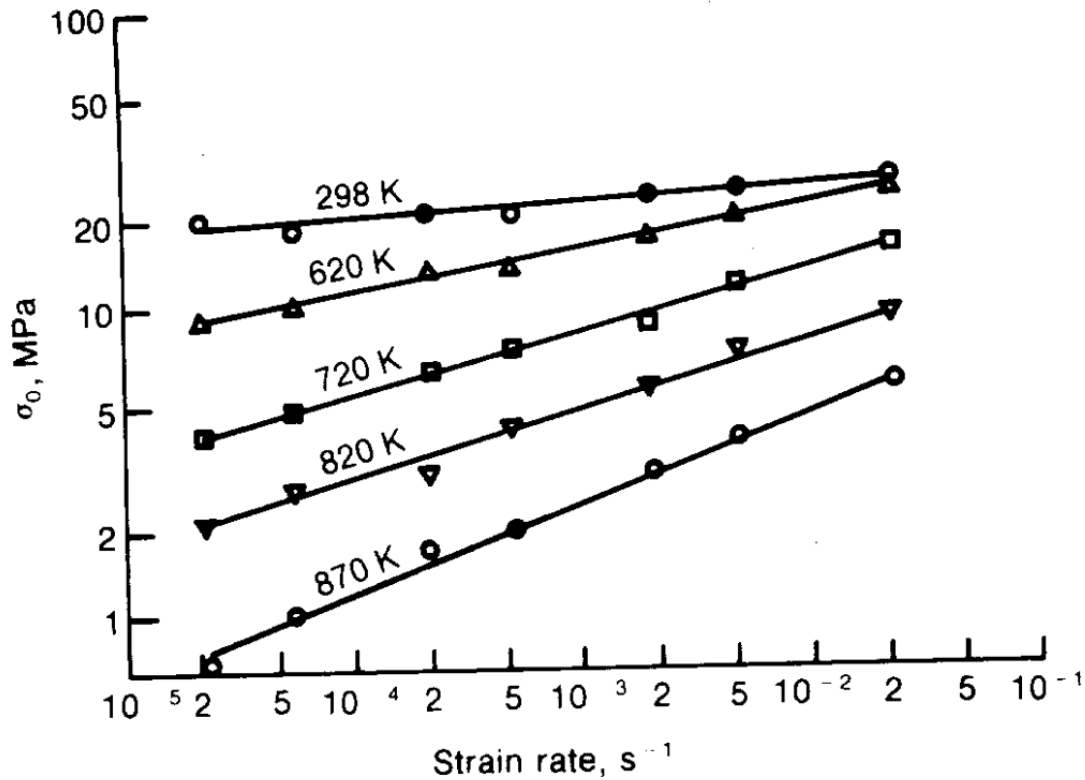
تنش تسلیم و تنش سیلان در کرنش های پلاستیک کم، بیشتر به نرخ کرنش وابسته است تا استحکام تسلیم (UTS).

در جدول (۵.۱) طیفی از نرخ کرنش های متفاوت را می بینیم.

جدول 5.1 طیف های مختلف از نرخ کرنش ها

Range of strain rate	Condition or type test
$10^{-8}$ to $10^{-5} \text{ s}^{-1}$	Creep tests at constant load or stress
$10^{-5}$ to $10^{-1} \text{ s}^{-1}$	"Static" tension tests with hydraulic or screw-driven machines
$10^{-1}$ to $10^2 \text{ s}^{-1}$	Dynamic tension or compression tests
$10^2$ to $10^4 \text{ s}^{-1}$	High-speed testing using impact bars (must consider wave propagation effects)
$10^4$ to $10^8 \text{ s}^{-1}$	Hypervelocity impact using gas guns or explosively driven projectiles (shock-wave propagation)

در شکل (۵.۱) تاثیر نرخ کرنش بر تنش سیلان در دماهای متفاوت را می بینیم.



شکل 5.1 تغییرات تنش سیلان در کرنش ثابت دو هزارم بر حسب نرخ کرنش در دما های متفاوت برای آلیاژ 6063 آلومینیوم

همان‌طور که از شکل (5.1) نمایان است هرچه دما بیشتر شود، نسبت تغییرات تنش سیلان به نرخ کرنش بیشتر شده و این یعنی در دماهای بالاتر، با افزایش نرخ کرنش ما شاهد افزایش بیشتر تنش سیلان نسبت به دماهای پایین‌تر هستیم.

نادیا (Nadia) یکی از آنالیز ریاضی از وجود کشش‌هایی که در آن <sup>نقطه</sup> استوانه‌ای که یک انتهای آن ثابت و انتهای دیگر قابل حرکت است، کشیده می‌شود. سرعت حرکت Crosshead این ماشین  $v = \frac{dL}{dt}$  می‌باشد و نرخ کرنش در قلاب کرنش‌دهی  $\dot{\epsilon}$  می‌باشد.

$$\dot{\epsilon} = \frac{de}{dt} = \frac{d(L-L_0)/L_0}{dt} = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} = \frac{v}{L_0} \quad (5.1)$$


پس نرخ کرنش قراردادی متناسب است با سرعت Crosshead.

نرخ کرنش حقیقی  $\dot{\epsilon}$  است و به صورت زیر نوشته می‌شود.


$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d(\ln(L/L_0))}{dt} = \frac{1}{L} \frac{dL}{dt} = \frac{v}{L} \quad (5.2)$$


در رابطه زیر ارتباط بین نرخ کرنش حقیقی و قراردادی آورده شده است.

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{L} = \frac{L_0}{L} \frac{de}{dt} = \frac{1}{1+e} \frac{de}{dt} = \frac{\dot{e}}{1+e} \quad (5.3)$$

در رابطه (5.2) می بینیم در سرعت crosshead ثابت، هر قدر که نمونه بیشتر کشیده شود نرخ کرنش حقیقی هم کاهش می یابد. برای اینکه نرخ کرنش را ثابت نگه داریم از  حلقه-باز استفاده کنیم (open-loop control). یعنی با افزایش طول نمونه به طور متناسب سرعت crosshead روم باید افزایش دهیم و این افزایش به صورت رابطه (5.4) می باشد.

$$v = \dot{\epsilon} L_0 \exp(\dot{\epsilon} t) \quad (5.4)$$

حال اگر وارد سیلان الاستیک موضعی و یا فعال ناهمگن شویم دیده کنترل حلقه-باز (open-loop control) جوابگو نیست. حال ضروری است که از کنترل حلقه بسته در  تغییر شکل، سطح مقطع آبی gauge length در

استفاده کنیم. برای  تغییر شکل که در حجم ثابت و نرخ کرنش حقیقی ثابت می باشد، سطح مقطع نمونه باید به صورت رابطه زیر تغییر کند.

$$A = A_0 \exp(-\dot{\epsilon} t) \quad (5.5)$$

همانطور که در شکل (5.1) می بینیم، یک رابطه کلی بین کنش سیلان و نرخ کرنش در کرنش ثابت و دما به صورت زیر است.

$$\sigma = C (\dot{\epsilon})^m \bigg|_{\epsilon, T} \quad (5.6)$$

که در این رابطه  $m$  به عنوان حساسیت نرخ کرنش شناخته می شود. توان  $m$  را از شیب نمودار  $\log \sigma$  بر حسب  $\log \dot{\epsilon}$  بدست می آید.

$$m = \left( \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right)_{\epsilon, T} = \frac{\dot{\epsilon}}{\sigma} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\epsilon}} \right)_{\epsilon, T} = \frac{\Delta \log \sigma}{\Delta \log \dot{\epsilon}} = \frac{\log \sigma_2 - \log \sigma_1}{\log \dot{\epsilon}_2 - \log \dot{\epsilon}_1} = \frac{\log \left( \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)}{\log \left( \frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1} \right)} \quad (5.7)$$

حساسیت نرخ کرنش غلظت در دمای اتاق کم می باشد (۰.۱)؛ اما  $m$  با دما افزایش می یابد.

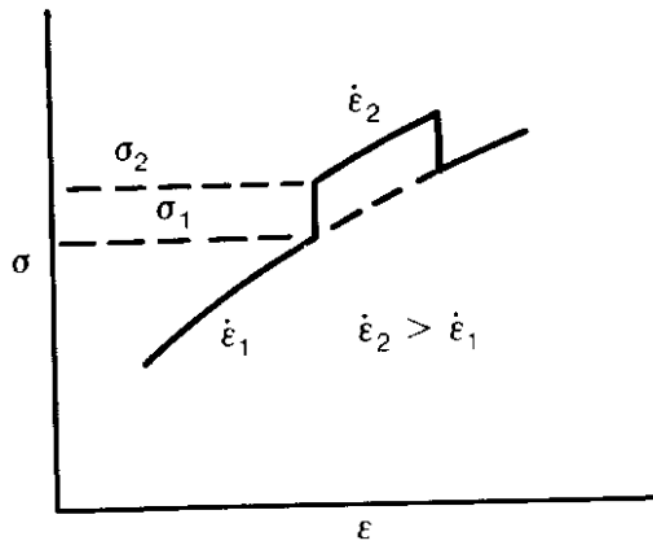


مخصوصاً در دماهای بالاتر از نصف نقطه ذوب.  
 در شرایط کار داغ (Hot-working) مقدار  $m$  به طور رایج در محدوده ۰.۱ تا ۰.۲ قرار دارد.  
 معادله (۵.۶) بهترین تفسیر در مورد وابستگی تنش سیلان به کرنش مربوط به فولادها نیست.  
 برای این مواد از رابطه نیمه تجربی بین تنش سیلان و نرخ کرنش استفاده می شود و به قرار زیر است.

$$\sigma = k_1 + k_2 \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \quad (5.8)$$

که در آن  $\dot{\epsilon}_0$  و  $k_1$  و  $k_2$  ثابت هستند.

در شکل (۵.۲) می توان به کمک رابطه (۵.۷) مقدار  $m$  را محاسبه کرد.



شکل ۵.۲ تغییر نرخ کرنش برای تعیین حساسیت نرخ کرنش  $m$

حساسیت نرخ کرنش یک دفاور خودی از تغییرات رفتار تغییر شکل می باشد و همچنین با اندازه گیری های  $m$  و توانیم ارتباط کلیدی بین مفهوم نابجایی های که منجر به تغییر شکل پلاستیک می شوند و اندازه گیری های ماکروکوپی که درست کرنش است، اطلاعاتی را بدست می آوریم.

ما دیدیم که سرعت حرکت نابجایی ها به طور خیلی خوبی با کرنش ارتباط دارند در رابطه زیر این ارتباط را می بینیم.

$$v = A \sigma^{m'} \quad (5.9)$$

همچنین ارتباط بین نرخ کرنش و سرعت نابجایی های حرکت به صورت زیر است.

$$\dot{\epsilon} = \rho b v \quad (5.10)$$

از رابطه (5.7) و (5.10) خواهیم داشت:

$$\frac{1}{m} = \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \sigma} = \frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln \sigma} + \frac{\partial \ln v}{\partial \ln \sigma} \quad (5.11)$$

از رابطه (5.9) هم داریم:

$$\frac{\partial \ln v}{\partial \ln \sigma} = m' \quad (5.12)$$

پس خواهیم داشت:

$$m' = \frac{1}{m} - \frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln \sigma} \quad (5.13)$$

بنا بر این اگر هیچ تغییری در چگالی ناهنجاری های مریک با افزایش تنش نداشته باشیم خواهیم داشت  $m' = \frac{1}{m}$ . این فرض به ندرت، فرض قابل قبولی است.

همانطور که دیدیم در دمای اتاق حساسیت نرخ کرنش در غلظت کم می باشد؛ اما در غلظت دیگر این مقدار قابل ملاحظه می باشد. مثال حدی این مورد جامد ویسکوز نیوتونی می باشد که در آن تنش به صورت زیر تعریف می شود.

$$\sigma = \eta \dot{\epsilon} \quad (5.14)$$

و با مقایسه این رابطه با رابطه (5.4) می بینیم که  $m=1$  می باشد.

حساسیت نرخ کرنش بالا یک ویژگی از غلظت و آلیاژهای سوپر پلاستیک می باشد.

سوپر پلاستیک به مواد اتلاقی می شود که به طور خیلی زیادی کشیده می شوند ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ درصد.

غلظت سوپر پلاستیک دارای اندازه دانه یا فاصله بین فازهای نازک تر به  $\mu m$  دارند.

یک حمله استخوان از سوپر پلاستیک با سطح مقطع  $A$  را در نظر بگیرید که در آن نیروی  $P$  به صورت عمودی بر آن وارد می شود.

$$\frac{P}{A} = \sigma = C (\dot{\epsilon})^m \Rightarrow \dot{\epsilon} = \left( \frac{P}{C} \right)^{\frac{1}{m}} \left( \frac{1}{A} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (5.15)$$

و از تعریف نرخ کرنش حقیقی داریم:

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{L} \frac{dL}{dt} = - \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \quad (5.16)$$

و با ترکیب دو رابطه (5.15) و (5.16) داریم:

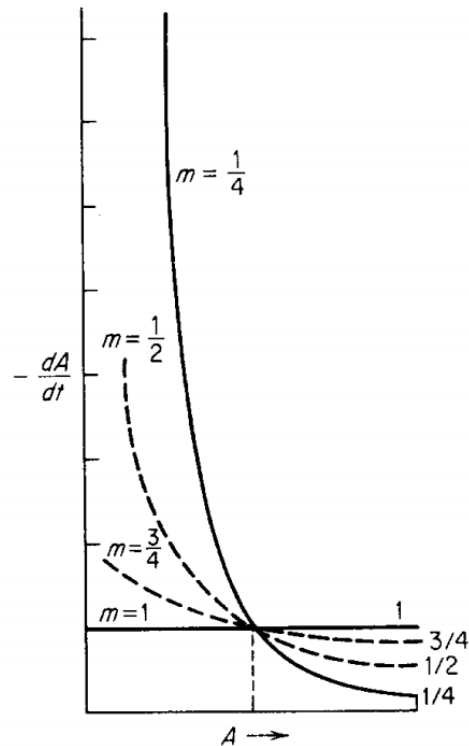
$$\begin{aligned} - \frac{dA}{dt} &= A \dot{\epsilon} = A^{1-\frac{1}{m}} \left( \frac{P}{C} \right)^{\frac{1}{m}} \\ \Rightarrow - \frac{dA}{dt} &= \left( \frac{P}{C} \right)^{\frac{1}{m}} \left( \frac{1}{A^{(1-m)/m}} \right) \end{aligned} \quad (5.17)$$

از رابطه (5.17) می توان مشاهده کرد تا زمانی که  $m < 1$ ، هر چه مقدار سطح مقطع کوچک تر باشد

سطح مقطع سریع تر کاهش پیدا می کند.

شکل (5.3) نشان می دهد که چگونه با مقادیر مختلف  $m$ ، سطح مقطع کاهش می یابد.



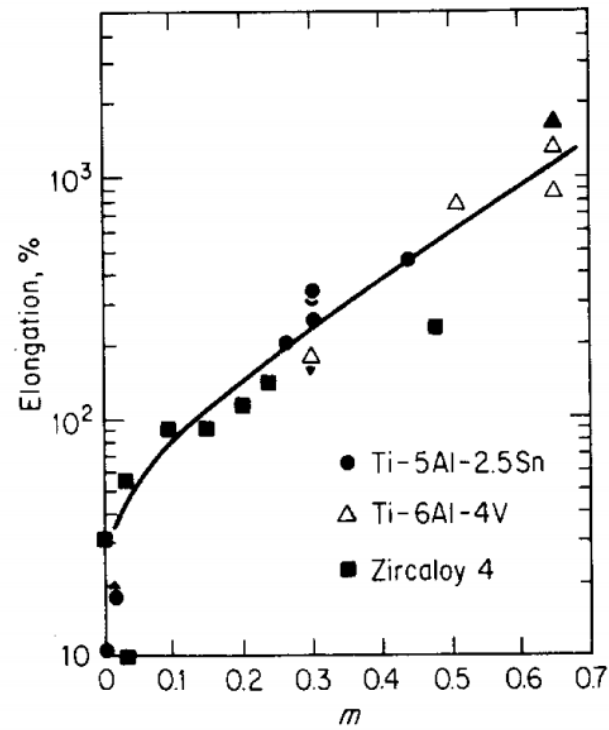


شکل 5.3 نمایش گرافیکی از رابطه (5.17) وابستگی نرخ کاهش مساحت سطح مقطع برای مقادیر مختلف حساسیت نرخ کرنش

و هنگامی که  $m=1$  باشد تغییر شکل ویسکوز نیوتنی است و  $\frac{dA}{dt}$  مستقل از  $A$  و هر کالون نشدن به راحتی در طول افزایش طول، گدازنده نشود و به داخل رشدش کند. و هر چه قدر که  $m$  به سمت واحد بخش رود، نرخ رشد نخستین کالون صاف ها به طور قابل توجهی کاهش می یابد.

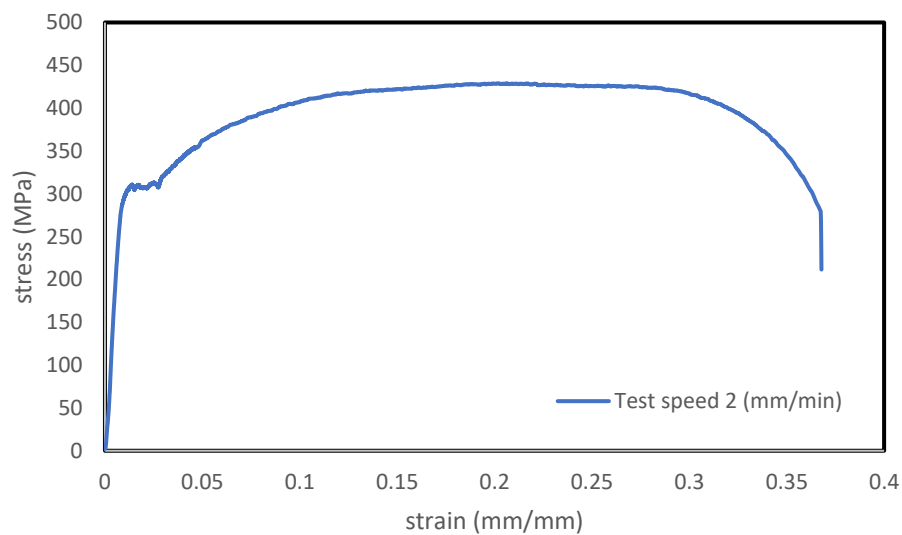
شکل (5.4) نشان می دهد که چگونه استحکام افزایش طول آلیاژهای سبیل الاستیک با حساسیت نرخ کرنش افزایش می یابد و در توافق با آنچه در بالا مطرح شد می باشد.



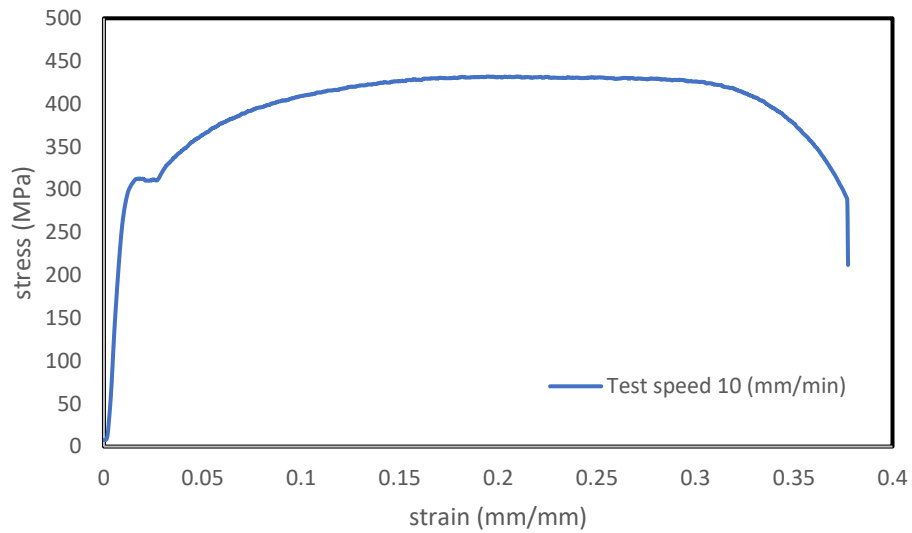


شکل 5.4 وابستگی tensile elongation به حساسیت نرخ کرنش

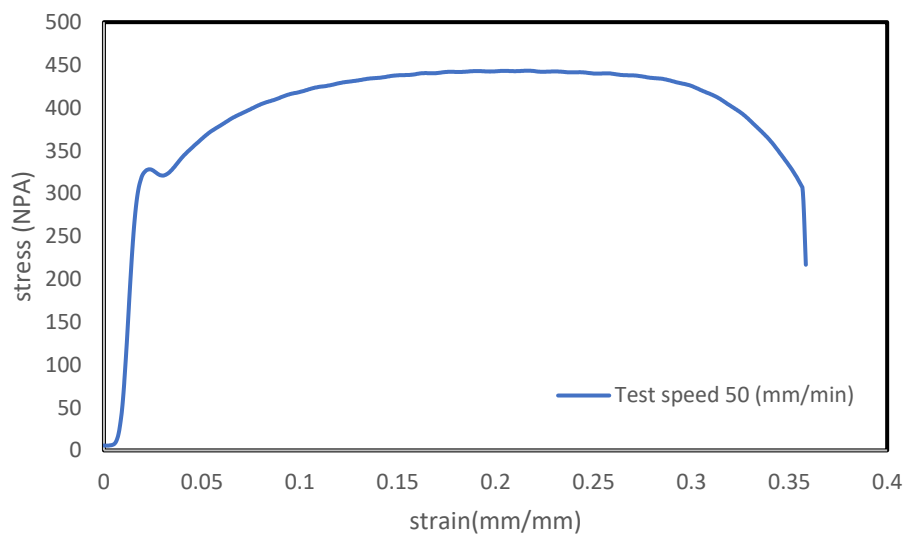
خواسته شماره 1 :



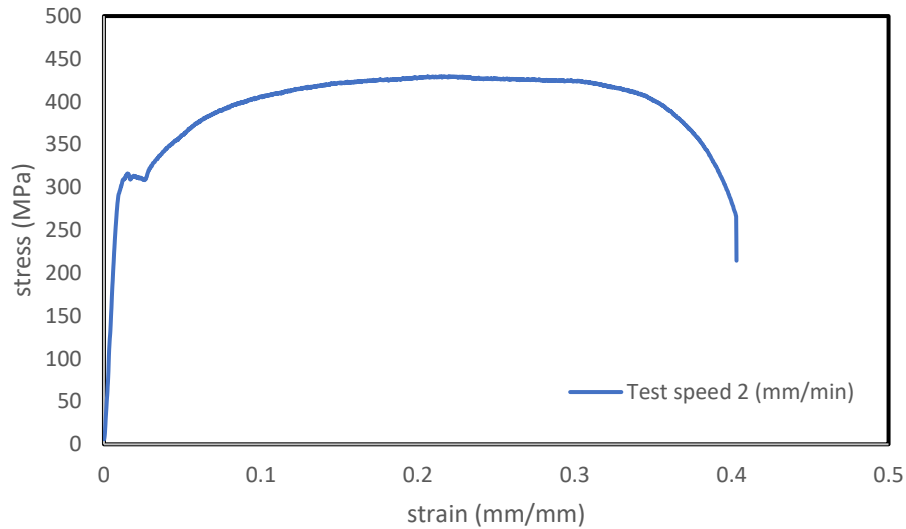
شکل 5.5 منحنی تعییرات تنش مهندسی بر کرنش با سرعت تست 2 میلی متر بر دقیقه با سطح مقطع 3\*6.04



شکل 5.6 منحنی تغییرات تنش مهندسی بر حسب کرنش با سرعت تست 10 میلی متر بر دقیقه با سطح مقطع 6\*3



شکل 5.7 منحنی تغییرات تنش مهندسی بر حسب کرنش با سرعت تست 50 میلی متر بر دقیقه با سطح مقطع 5.9\*3



شکل 5.8 منحنی تغییرات تنش مهندسی بر حسب کرنش با سرعت تست 2 میلی متر بر دقیقه با سطح مقطع 3\*5.8

خواسته شماره 2 :

طول نسبی نمونه ها یعنی  $\frac{L-L_0}{L_0}$  و سرعت تغییر هر نمونه یعنی  $\frac{d}{dt} \left( \frac{L-L_0}{L_0} \right)$  که همان نرخ کرنش قراردادی است.

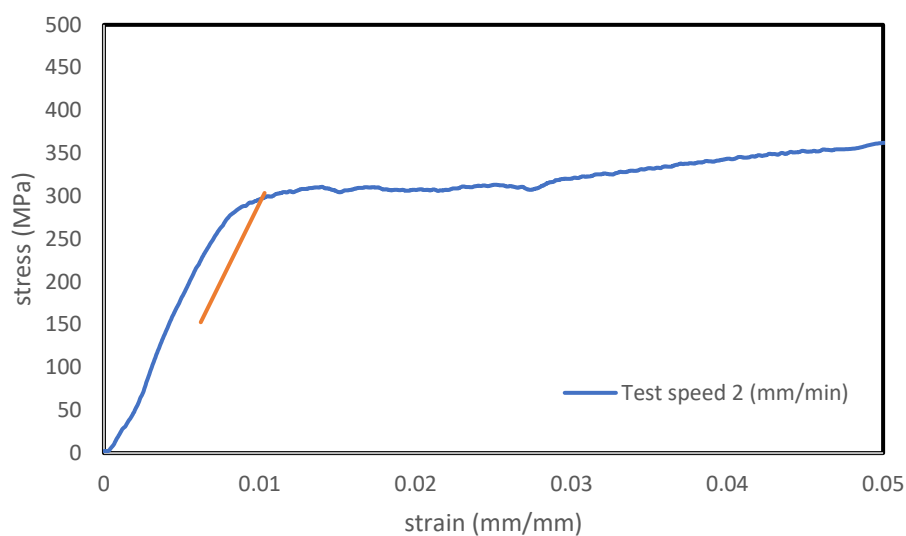
$$\dot{\epsilon} = \frac{de}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{L-L_0}{L_0} \right) = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} = \frac{v}{L_0}$$

$$v = 2 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \Rightarrow \dot{\epsilon} = \frac{2}{32} = 0.0625 \frac{1}{\text{min}}$$

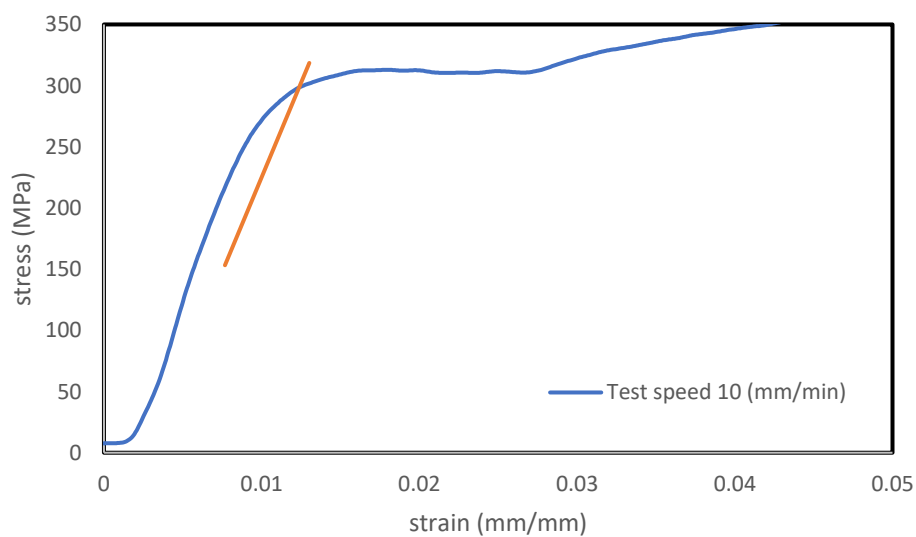
$$v = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \Rightarrow \dot{\epsilon} = \frac{10}{32} = 0.3125 \frac{1}{\text{min}}$$

$$v = 50 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \Rightarrow \dot{\epsilon} = \frac{50}{32} = 1.5625 \frac{1}{\text{min}}$$

خواسته شماره 3 :

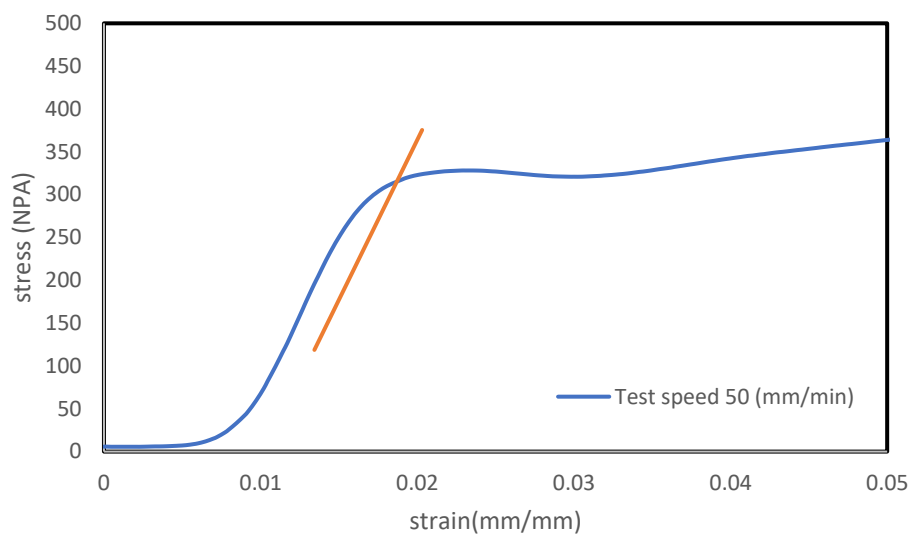


شکل 5.9 تعیین تنش تسلیم نمونه با سرعت تست 2 میلی متر بر دقیقه برای نمونه با سطح مقطع 6.04\*3



شکل 5.10 تعیین تنش تسلیم با سرعت تست 10 میلی متر بر دقیقه برای نمونه با سطح مقطع 6\*3

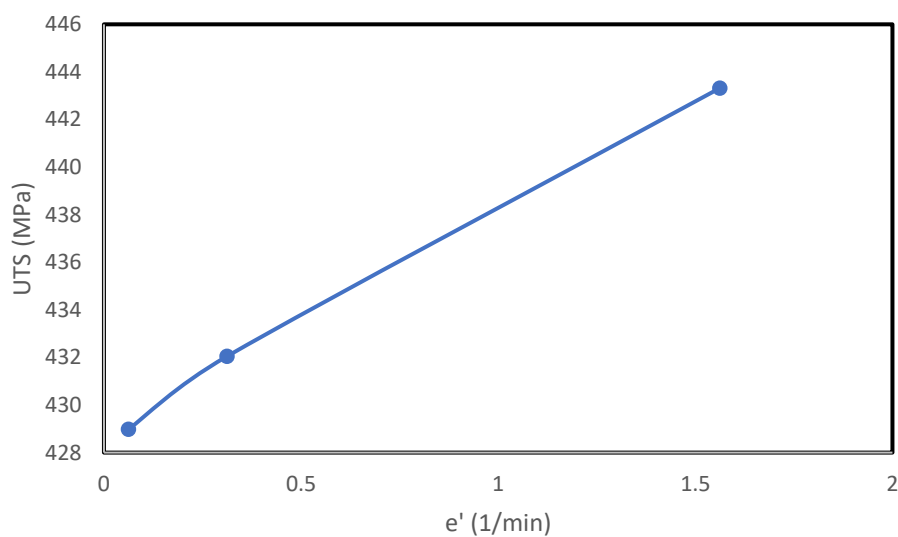




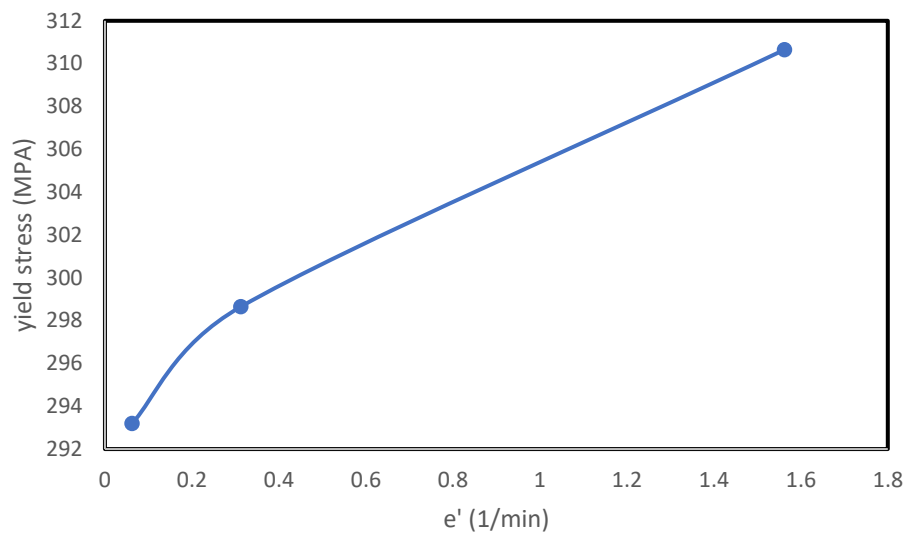
شکل 5.11 تعیین تنش تسلیم با سرعت تست 50 میلی متر بر دقیقه برای نمونه با سطح مقطع 3\*5.9

جدول 5.2 تعیین مقادیر خواسته شده در خواسته شماره 3

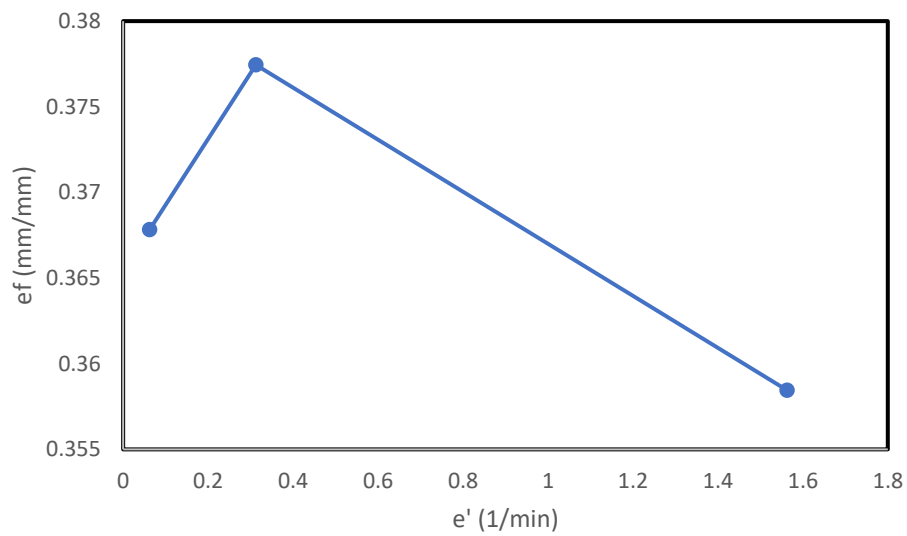
V	e'	UTS	Yield stress	ef
2	0.0625	428.9845	293.2	0.367828
10	0.3125	432.05	298.648	0.377447
50	1.5625	443.322	310.65	0.358459



شکل 5.12 منحنی تغییرات استحکام تسلیم در نرخ کرنش های متفاوت



شکل 5.13 منحنی تغییرات تنش تسلیم در نرخ کرنش های متفاوت



شکل 5.14 منحنی تغییرات کرنش در شکست مهندسی در نرخ کرنش های متفاوت

در مورد تغییرات نقطه UTS در کرنش های متفاوت، متوجه می شویم که در کرنش های بالاتر میزان UTS بیشتر است و این موضوع بهر آنکه در به تاثیر نرخ کرنش های بیشتر در این پدیده، می توان این پدیده را به کفیل شدن بیشتر نایجایی ها و مانع حرکت گلیت شدن آنها دانست.

در مورد کرنش تسلیم به دلیل درگیر شدن نایجایی ها با یکدیگر در نرخ کرنش های بالاتر، یعنی هرچه که نرخ کرنش افزایش یابد نایجایی ها بیشتر در هم قفل می کنند و این موضوع باعث وجود کرنش تسلیم های بیشتر در نرخ کرنش های بالاتر می شود. همچنین تاثیر نرخ کرنش بر کرنش تسلیم از تاثیر نرخ کرنش به استحکام تسلیم بیشتر است چرا که در کرنش تسلیم ما در ابتدای گیر کردن و قفل شدن نایجایی ها هستیم، پس تاثیر نرخ کرنش بر کرنش تسلیم، نسبت به استحکام تسلیم بیشتر است.

در خصوص کرنش در شکست نمونه ها انتظار می رود هرچه که نرخ کرنش افزایش یابد، کرنش در شکست هم کاهش یابد، اما در این نمودار ما یک انحراف از این موضوع داریم ولی در نرخ کرنش ۱.۵۶۶۵ نسبت به ۰.۰۵۶۶۵، کرنش در شکست کاهش یافته است.

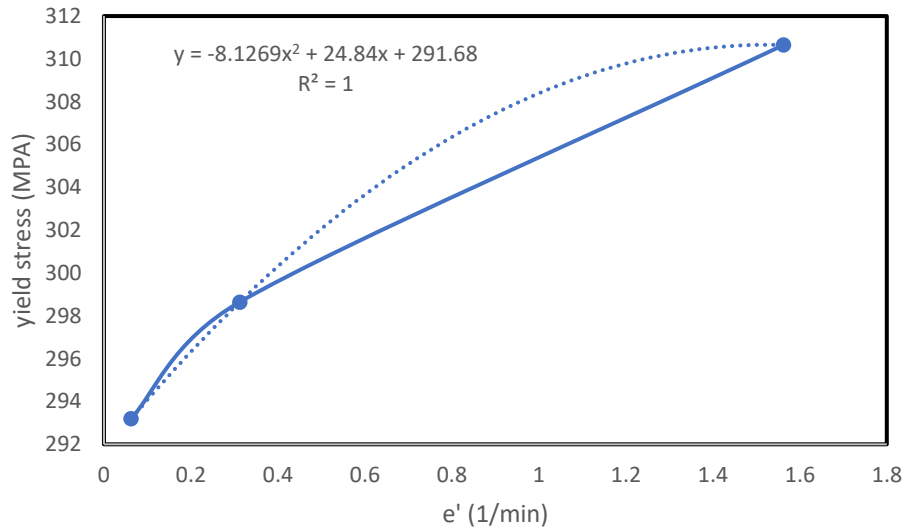
شاید این انحراف از آنچه که ما انتظار داریم، به خاطر خطای خرد آزمایش که در قراردادن نمونه درون دستگاه باشد، ممکن است این فرد به طور دقیق درست این نمونه را در داخل دستگاه گذاشت قرار نداده و همین موضوع باعث انحراف از واقعیت و آنچه انتظار داریم می شود.

خواسته شماره 4 :

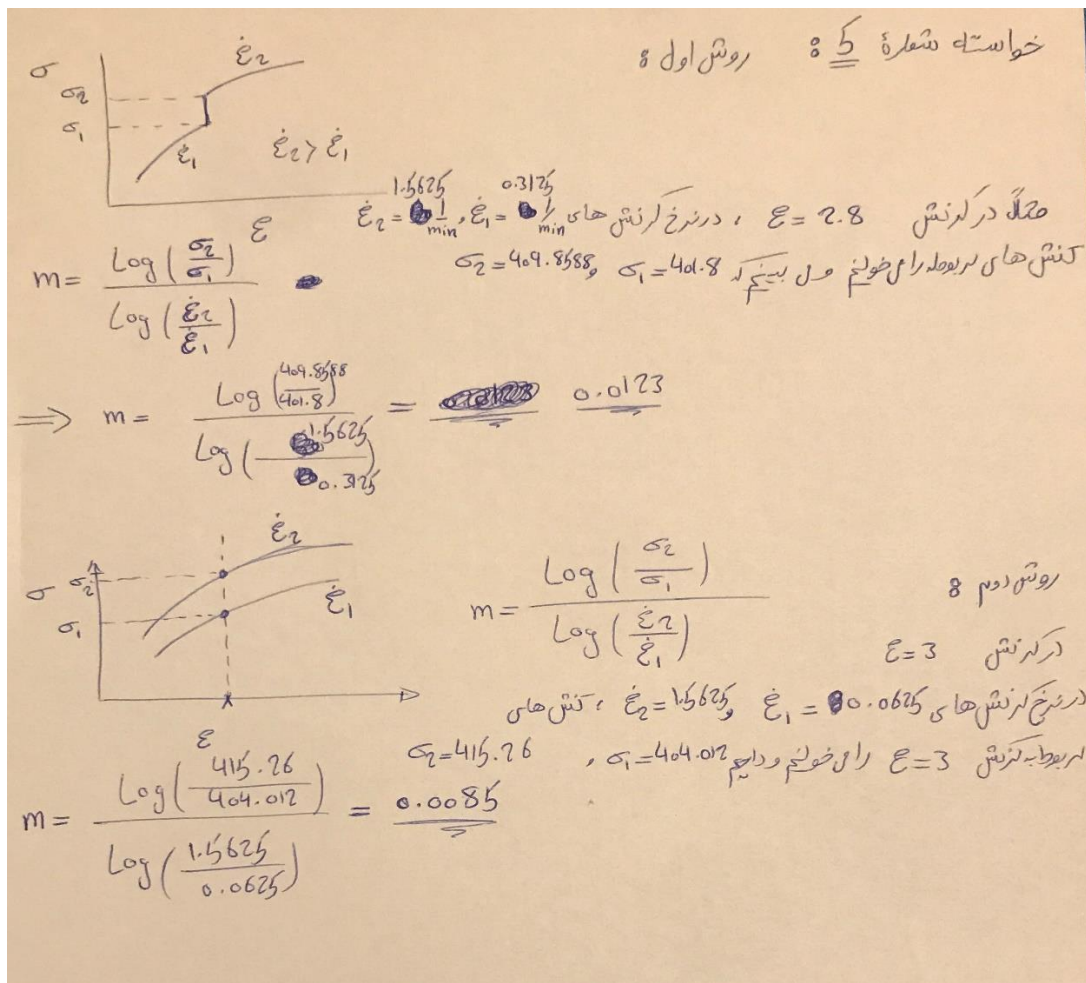
$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{L_0} = \frac{0.5}{32} = 0.015625 \frac{1}{s} \times \frac{60 \times 60}{1 \text{ min}} = 0.9375 \frac{1}{\text{min}}$$

حال می آیم و با بیون یابی نمودار  $\sigma - \epsilon$  مسئله را حل می کنیم.

همانطور که از نمودار و با توجه به بیون یابی و جابجایی  $n = 0.9375$  خواص دات  $\sigma_y = 307.8247 \text{ MPa}$



شکل 5.15 تعیین تنش تسلیم در نرخ کرنش 0.5 بر ثانیه با استفاده از برون یابی





منابع :

کتاب دیتر