تحلیل نظری آیرونینگ[1] دیواره‌ها برای اجسام کارسخت و غیرایزوترپ

حسن خادمی زاده*

خلاصه

در این مقاله تحلیل نظری جهت پدیدهٔ ایرونینگ برای اجسام غیرایزوترپ و با کارسختی Ludwick ارائه شده است. در این تئوری کار، هموژن، اصطکاک و کار غیرمفید منظور گردیده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که توان در معادله سختی $\sigma = A\varepsilon^n$ اثر قابل ملاحظه‌ای بر روی تنش کششی دیواره و بالاخره با مورد نیاز در ایرونینگ دارد. اثر مقدار n بر فشار قالب نیز نسبتا" زیاد بوده و بر اساس این تئوری اصطکاک بین سنبه و استوانه و اصطکاک بین قالب و استوانه فاکتور موثری در ایرونینگ به شمار می‌رود. افزایش اصطکاک بین سنبه و استوانه کاهش تنش در دیواره و اثر افزایش اصطکاک قالب و استوانه افزایش تنش کششی در دیواره قالب را بهمراه دارد. اثر مقدار R بر روی تنش کششی دیواره و بار کل در پدیده چندان قابل ملاحظه نیست. زاویهٔ Optimum (بار حداقل) در ایرونینگ نیز محاسبه گردیده است.

مقدمه

استوانه‌ایی با جدار نازک را با سنبه کاملا" پر کرده از داخل قالبی عبور دادیم تا ضخامت دیواره‌های استوانه کاهش و در نتیجه طول دیواره‌ها افزایش می‌یابد. این پدیده که معمولا" در صنعت جهت تولید استوانه‌های طویل مورد استفاده قرار می‌گیرد به ایرونینگ دیواره‌ها موسوم است. در بررسی مکانیک این پدیده ضخامت دیواره نسبت به قطر استوانه کوچک فرض

---

* استادیار دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان

1. Ironing

نشریه تحقیقاتی فنی - مهندسی استقلال، دانشگاه صنعتی اصفهان، شماره ۷، تابستان ۶۸

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]

می‌شودتا بتوان تغییرشکل را صفحه‌ای درنظرگرفت .

دیواره استوانه درورودبه قالب برش یافته ودرنتیجه کارسختی دیواره افزایش می‌یابددرداخل قالب دیواره تغییرشکل هموژن داشته ودرخروج ازقالب دیواره مجددا "تحت برش تغییرشکل پلاستیک می‌یابد . باركل ایرونینگ ازجمع بارها دراین سه مرحله محاسبه می‌گردد .

۱ـ محاسبهٔ مولفهٔ هموژن درایرونینگ

الف) معادلات تعادل :

پدیده ایرونینگ برای دیواره درمحدودهٔ قالب درشکل (۱) نشان داده شده است . تنها تنش های σ_x ، $q(\sigma_y)$، σ_z درشکل قابل ملاحظه بوده وتنشهای اصلی دردیواره استوانه می‌باشد . برای یک المان درشکل (۱) معادله تعادل درجهت X بصورت زیرنوشته

$$\delta(\sigma_x . 2\pi rt) = \mu_1 q \cos\alpha . 2\pi(r+t/2)\frac{\delta x}{\cos\alpha} \qquad (۱)$$

$$+ 2\pi(r+t/2)\frac{\delta x}{\cos\alpha} q \sin\alpha - \mu_2 q . 2\pi(r-t/2)\delta$$

که μ_1 و μ_2 بترتیب ضرایب اصطکاک کولمبی قالب واستوانه و q فشارقالب می‌باشد .

برای استوانه های جدارنازک داریم :

$$r + t/2 = r - t/2\, r \qquad (۲)$$

لذا معادله تعادل بصورت زیرنوشته می شود :

$$\frac{d}{dx}(\sigma_x t) = q(\mu_1 - \mu_2 + \tan\alpha) \qquad (۳)$$

ضخامت دیواره را درالمان می‌توان بصورت زیرنوشت :

$$t = t_1 - x\tan\alpha \ , \quad dt = dx\tan\alpha \qquad (۴)$$

ولذا معادلهٔ (۲) به‌شکل نهائی صفحه بعددرمی‌آید :

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]

$$\frac{dt}{t} = \frac{dx}{x_0 - x} = \frac{d\sigma_x}{\sigma_x + q\left(1 + \frac{\mu_1 - \mu_2}{\tan}\right)} \qquad (۵)$$

ب) معادله تسلیم وروابط تنش تغییرطول نسبی درحالت پلاستیک :

معادلهٔ تسلیم Hill [۱] برای اجسام غیرایزترپ بصورت زیر نوشته می‌شود :

$$f(\sigma) = F(\sigma_y - \sigma_2)^2 + G(\sigma_2 - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2$$

$$+ 2L\,\sigma^2_{xy} + 2M\,\sigma^2_{xz} + 2N\,\sigma^2_{zy}$$

که درآن F ، G ، H ، L ، M و N پارامترهای مشخصه غیر ایزتروپی جسم می‌باشندکه برای سیستم با تنشهای اصلی درجسم داریم:

$$f(\sigma) = F(\sigma_y - \sigma_2)^2 + G(\sigma_2 - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 \qquad (۶)$$

روابط تنش وتغییرطول نسبی با مشتق گیری از $f(\sigma_{ij})$ نسبت به σ_{ij} بصورت زیردرمی‌آید :

$$d\varepsilon^p_x = d\lambda\ H(\sigma_x - \sigma_y) + G(\sigma_x - \sigma_z)$$

$$d\varepsilon^p_y = d\lambda\ F(\sigma_y - \sigma_z) + H(\sigma_y - \sigma_x) \qquad (۷)$$

$$d\varepsilon^p_z = d\lambda\ G(\sigma_z - \sigma_x) + F(\sigma_z - \sigma_y)$$

وبا فرض ثابت گرفتن حجم برای یک المان درتغییرشکل پلاستیک داریم :

$$d\varepsilon^p_x + d\varepsilon^p_y + d\varepsilon^z_p = 0$$

پس ازمحاسبه $d\lambda$ درفرمول (۷) ازرابطهٔ Hill (معادله (۶))

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]

مقـــــــدارتنش معادل $\bar{\sigma}$ داریم :

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2}{F + G + H}^{\frac{1}{2}} \quad (۸)$$

ودرنتیجه مقدارتغییرطول نسبی معادل $d\bar{\varepsilon}$ ، ازرابطه زیربدست می‌آیـــد :

$$d\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{3}{2}} (F+G+H)^{\frac{1}{2}} \{F(\frac{G d\varepsilon_y - H d\varepsilon_z}{FG + GH + HF})^2 + \dots \}^{\frac{1}{2}} \quad (۹)$$

چون دربسیاری مواردخاصیت غیرایزوتروپی درصفحه نسبت بـــه خاصیت غیرایزوتروپی به ضخامت قابل اغماض می‌باشدوبا فـــرض تقارن غیرایزتروپیک حول محور z داریم :

$$R_0 = R_{45} = R_{90} = R = \frac{H}{G} = \frac{H}{F}$$

لذا تنش معادل (ازرابطه ۸) برای اجسام فوق بصورت ساده زیر نوشته می‌شود :

$$\sigma = \sqrt{\frac{3}{2}} \left[\frac{(\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + R(\sigma_x - \sigma_y)^2}{2 + R}\right]^{\frac{1}{2}}$$

برای حالت تغییرشکل صفحه ای درمسئله داریم :

$$d\varepsilon_y = 0 = d\lambda [(\sigma_y - \sigma_z) + R(\sigma_y - \sigma_x)]$$

ولذا تنش معادل و تغییرطول نسبی معادل برای حالت تغییـــر شکـــل نسبی فوق بصورت صفحهٔ بعدنوشته می‌شود :

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{R^2 + R + 1}{(R+1)(R+2)}} \cdot (\sigma_x - \sigma_2) \qquad (۱۰$$

ویا :

$$\bar{\sigma} = F(\sigma_x + q)$$

که درآن :

$$q \ , \ F = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{R^2 + R + 1}{(R+1)(R+2)}}$$

فشارقالب می‌باشدو :

$$d\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2(R+2)(R+1)}{3(2R+1)}} \ d\varepsilon_z$$

ویا :

$$d\bar{\varepsilon} = E \, d\varepsilon_z$$

$$\bar{\varepsilon} = E \ln \frac{t_1}{t} \qquad (۱۱)$$

که درآن t_1 ضخامت اولیه و t ضخامت جاری دردیواره است .

ج) محاسبه تنش ها درتغییرشکل هموژن :
توسط آزمایشات متعددتوسط Hill و Green[۲] نشان داده شده که اصطکاک اثرقابل ملاحظه برروی فشارقالب ندارد. لذا در محاسبه تنشها درپدیده ایرونینگ ازاثراصطکاک برفشارقالب صرفنظر می‌شودوبدینترتیب مقدارفشارقالب رابا استفاده از

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]

معـــادلهٔ تعادل وبا فرض اصطکاک صفربدست می آوریم وسپس بـــا اعمال این فشار در معادلهٔ تعادل با منظور نمودن اصطکاک مقدار تنـش کششی را محاسبه می‌کنیم . بنابراین :

$$\frac{dt}{t} = \frac{d\sigma_x}{\sigma_x + q} \qquad (۱۲)$$

حال فرض کنید ماده دیواره دارای کارسختی با رابطه Ludwick[۳] باشد، یعنی :

$$\bar{\sigma} = A\,\bar{\varepsilon}^{\,n} \qquad (۱۳)$$

که در آن A و n مقادیر ثابت می‌باشند .
از ترکیب روابط (۱۰) و (۱۱) و (۱۳) ، داریم :

$$F\,(\sigma_x + q) = A\,\left(E \ln \frac{t_1}{t}\right)^n \qquad (۱۴)$$

و با ازاء گذاری در معادلهٔ (۱۲) :

$$\frac{dt}{t} = \frac{d\sigma_x}{\frac{A}{F}\left(E \ln \frac{t_1}{t}\right)^n} \qquad (۱۵)$$

و با انتگرال گیری معادلهٔ (۱۵) واستفاده از رابطهٔ (۱۴) خواهیم داشت :

$$q = \frac{A}{F}\left(E \ln \frac{t_1}{t}\right)^n \left(1 - \frac{\ln \frac{t_1}{t}}{n+1}\right) \qquad (۱۶)$$

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]

با استفاده از معادلهٔ (۱۶) دررابطهٔ (۵) تغییرضخامت دیواره ازرابطه ذیل بدست می‌آید :

$$\frac{dt}{t}=\frac{d\sigma_x}{\frac{A}{F}(E\ln\frac{t_1}{t})^n+\frac{mA}{F}\ln\frac{t_1}{t}(1+m-m\frac{\ln\frac{t_1}{t}}{n+2})} \qquad (۱۷)$$

که درآن $m=\frac{\mu_1-\mu_2}{\tan\alpha}$ ، با انتگرال گیری ازمعادلهٔ (۱۷) مقدار σ_x :

$$\sigma_x=\frac{AE^n}{F(n+1)}(\ln\frac{t_1}{t})^{n+1}\left[1+m-\frac{m}{n+2}\ln\frac{t_1}{t}\right] \qquad (۱۸)$$

براساس رابطهٔ (۱۶) درشکل (۲) تغییرات فشارقالب باکاهش ضخامت برای مقادیرمختلف نشان داده شده است. منحنی‌های مربوطه دارای ماکزیممی در :

$$\ln\frac{t_1}{t}=n$$

داردکه ازمشتق گیری رابطهٔ (۱۶) بدست می‌آید.
تغییرات تنش کششی σ_x دردیواره درشکل (۳) نشان می‌دهد که مقدار n اثرقابل ملاحظه‌ای برروی کشش دیواره داشته وافزایش n درماده سبب کاهش کشش می‌شود.
اثراصطکاک قالب برروی کشش σ_x بسیارقابل ملاحظه بوده که در شکل (۴) نشان داده شده است. ازنظرتئوری ورابطهٔ (۱۸) نشان می‌دهدکه افزایش μ_2 یعنی اصطکاک بین سنبه واستوانه سبب کاهش

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]

تنش دردیواره ولذا امکان کاهش زیاددردیواره راسبب می‌شودو لذا داشتن روغنکاری خوب بین قالب واستوانه وروغنکاری نسبتا" ضعیف بین سنبه واستوانه درایرونینگ توصیه می‌گردد. اثر برروی σ_x و q ناچیزبوده ودرمجموع افزایش R سبب افزایش σ_x ، q درایرونینگ بود.

۲ـ محاسبه‌تغییرشکل برشی درورودوخروجی قالب

برای محاسبه‌کارحاصل دربرش ازروش Pugh[۴] استفاده گردید. این روش ابتدابرای محاسبه‌کاراضافی دراکستروژن بکاررفت. نحوه تغییرشکل برشی برای ایرونینگ بافرض مرزهای کروی درورودوخروجی قالب درشکل (۵) نشان داده‌شده‌است. کارانجام‌شده درمرز ورودی جهت حرکت ماده ازرابطهٔ :

$$P_{R_1} = \frac{\bar{\sigma}}{F} \left[\frac{\alpha}{\sin^2} - \cot \alpha\right] \qquad (۱۹)$$

بدست می‌آیدکه $\frac{\bar{\sigma}}{F}$ تنش برشی تسلیم برای جسم‌غیرایزترپ و α زاویهٔ قالب می‌باشد. معادلهٔ (۱۹) بصورت زیردرمی‌آید:

$$P_{R_1} = \int_0^{\varepsilon_1} \bar{\sigma}\, d\bar{\varepsilon}$$

که درآن :

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{F} \left[\frac{\alpha}{\sin^2\alpha} - \cot \alpha\right]$$

بوده و $\bar{\sigma}$ برحسب $\bar{\varepsilon}$ ازآزمایش کشش ساده بدست می‌آید،

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]

مقدار P_{R_1} کار اضافی لازم دربرش ورودی قالب ازروی سطح زیرمنحنی $\bar{\sigma} - \bar{\varepsilon}$ تا ε_1 محاسبه می‌شود.
پس ازبرش ورودی ماده داخل قالب به تغییرطول نسبی $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + E \ln \frac{t_1}{t}$ رسیده ومجددا "درموقع خروج ازقالب برش مشابهی نظیرموقع ورودپیدا می‌کند. وبه تغییرطول نسبی زیرخواهدرسید:

$$\varepsilon_3 = 2\varepsilon_1 + E \ln \frac{t_1}{t}$$

لذاکل کار اضافی درورودوخروج ازقالب دردیواره ازرابطه زیر بدست می‌آید:

$$P_R = P_{R_1} + P_{R_2}$$

$$= \int_0^{\varepsilon_2} \bar{\sigma}\, d\bar{\varepsilon} + \int_{\varepsilon_2}^{\varepsilon_3} \sigma\, d\bar{\varepsilon}$$

ویا:

$$P_R = \int_0^{\varepsilon_1} A\varepsilon^{-n}\, d\bar{\varepsilon} + \int_{\varepsilon_2}^{\varepsilon_3} A\varepsilon^{-n} d\bar{\varepsilon}$$

$$= \frac{A\varepsilon_1^{n+1}}{n+1} + \frac{A\varepsilon_3^{n+1} - \varepsilon_2^{n+1}}{n+1}$$

که دررابطه‌ٔفوق مقادیر ε_1، ε_2، ε_3 برابرندبا:

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{F}\left[\frac{\alpha}{\sin^2\alpha} - \cot\alpha\right]$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + E \ln \frac{t_1}{t}$$

$$\varepsilon_3 = 2\varepsilon_1 + E \ln \frac{t_1}{t}$$

۳ـ محاسبهٔ بارکل درایرونینگ

برای محاسبه بارکل مناسب است که باررا بدون بعدبدست آورده و به این منظوربارکل هموژن بدون بعدبصورت زیر

$$P_1 = \frac{2\pi r_1 t_2 \sigma_x}{2\pi r_1 t_1 A}$$

تعریف نموده ، لذا مقداربار بدون بعدهموژن ازمعادلـــــهٔ (۱۸) می‌شود :

$$P_1 = \frac{E^n \left(\ln \frac{t_1}{t_2}\right)^{n+1}}{F\,(n+1)}\left[m+1 - m\,\frac{\ln \frac{t_1}{t_2}}{n+2}\right]\cdot\frac{t_2}{t_1}$$

بارلازم برای غلبه براصطکاک روی سنبه ازرابطه زیربدست می‌آید :

$$P_2 = 2\pi r_1 \int_0^{x_2} \mu_2 q\, d_x$$

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]

باربدون بعدبرای این اصطکاک :

$$P_2 = \frac{E^n \left(\ln \frac{t_1}{t_2}\right)^{n+1} \mu_2 \cot\alpha}{F(n+1)} \cdot \frac{t_2}{t_1}$$

لذا باربدون بعدکل درتغییرشکل هموژن واصطکاک :

$$P = P_1 + P_2$$

$$= \frac{E^n}{\Gamma(n+1)} \cdot \frac{t_2}{t_1} \cdot \left(\ln \frac{t_1}{t_2}\right)^{n+1} \times$$

$$\left[m + 1 - m \frac{\ln \frac{t_1}{t_2}}{n+2} + \mu_2 \cot\alpha \right]$$

ونهایتا "بارکل ایرونینگ درحالت بدون بعدبا افزودن بارحاصل از کارا ضافی برش بصورت زیرنوشته می‌شود :

$$P_T = \frac{E^n \left(\ln \frac{t_1}{t_2}\right)^{n+1}}{F(n+1)} \cdot \frac{t_2}{t_1} \cdot \left[m + 1 - m \frac{\left(\ln \frac{t_1}{t_2}\right)}{n+1} + \mu_2 \cot\alpha \right]$$

$$+ \frac{t_2}{t_1} \left[\frac{\varepsilon_1^{n+1}}{n+1} + \frac{(2\varepsilon_1 + E \ln \frac{t_1}{t_2})^{n+1} - (\varepsilon_1 + E \ln \frac{t_1}{t_2})^{n+1}}{n+1} \right]$$

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]

تغییرات باربدون بعددرایرونینگکه‌برحسب کاهش مقطع برای مقادیر n درشکل (۶)نشان داده‌شده‌است ، نشان می‌دهدکه‌n اثرقابل ملاحظه‌ای روی بارکل دارد. اثراصطکاک قالب برروی باردرشکل (۸) نشان می‌دهدکه باافزایش μ_1 مقداربارافزایش می‌یابد. اثرضریب اصطکاک μ_2 که‌سبب کاهش قابل ملاحظهٔ کشش دیواره‌بوده ، اثرچندانی برروی بارکل ندارد. تغییرات R برروی بارکل وتنش‌کششی دیواره چندان قابل ملاحظه‌نبود وافزایش R افزایش جزئی دربارکل رانشان می‌داد.

اثر زاویهٔ قالب دربارکل ایرونینگ درترم‌مربوط بکاراضافی موثربود وافزایش زاویه درقالب‌سبب افزایش کاراضافی می‌گردید و این افزایش‌کاهش باراصطکاکی رادرایرونینگ سبب می‌شودلذا همواره می‌توان برای یک کاهش مقطع معین ودرشرایط معینی ازاصطکاک‌زاویه‌ای که‌درآن بارکل حداقل مقداررا داشته‌باشدرا محاسبه‌وتعیین نمود. دیاگرام‌های شکل (۹) تغییرات بارکل برحسب زاویه α رانشان می‌دهد وزاویهٔ اپتیمم (Optimum) یازاویه‌حداقل باربرحسب تغییرات مقطع وضرائب اصطکاک بدست می‌آید.

۴ـ کارهای تجربی انجام شده[۵]

کارهای تجربی برروی استوانه‌های تولیدشده‌توسط دروئینگ عمیق (deep - darwing) برروی قالب Tractrix انجام‌شد. سه مرحله‌پروسه ایرونینگ برروی استوانه‌های فولای Mild steel ، براس Brass $70/30$ وآلومینیم‌باروغنکاری مناسب‌بعمل آمد. برای فولاد، موادابتداتمیزوسپس‌با Bonder lule روغنکاری‌گردید. ودرحین پروسه‌های مختلف ایرونینگ هیچگونه روغنکاری اضافی انجام نشد. درموردبراس‌از Droyt Sol. 4M و درموردالومینیم از Droyt Super T.S.S استفاده‌گردید. آزمایشات بر روی ماشین دروئینگ عمیق Hille که‌تغییرات باردرهرپدیده‌را برحسب تغییرمکان

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]

نشان می‌دهد، انجام گردیده است. دردونقطه ازدیواره استوانه شکاف groove ایجاد تا بار مربوط به ضخامت مربوطه دردیواره نشان داده شود. ضخامت شکافها حدود 0.125 mm بودکه درمحل آن باراپرونینگ تغییرات قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌داد. تغییرات ضخامت وبار درهر آزمایش محاسبه وجداول مربوط به بار، کاهش مقطع رسم‌گردید. در آزمایشات ازچهار مرحله کاهش مقطع و ۵ نوع قالب با زوایای گوناگون استفاده گردید. جدول (۴-۲) این نتایج را نشان می‌دهد.

۵- مقایسهٔ نتایج تجربی وتئوری

برای تعیین بارنظری درپدیدهٔ ایرونینگ ضرائب اصطکاک و منحنی تنش تغییرطول نسبی درکشش ساده موردنیازبود. ضرائب اصطکاک را با اندازه‌گیری یکی ازمقادیربار دریک قالب با زاویهٔ دلخواه ودرکاهش مقطع معین بدست آورده شدوآزمایش کشش درموردهرسه ماده انجام گردید. با استفاده ازفرمولهای داده شده بارکل برای زوایای مختلف وکاهشهای مقطع گوناگون درشرایط کارسختی هرمرحله از آزمایش محاسبه گردید.

معادلهٔ تنش تغییرشکل نسبی برای فولاد Mild steel انجام و مقادیرثابت معادله $\bar{\sigma} = A\bar{\varepsilon}^{n}$ ، برابر $A = 579.6\ MN/m^2$ و $n = 0.2$ بدست آمد. ضریب اصطکاک درزاویهٔ ۱۰° درجه قالب وکاهش مقطع ۲۰% برابر $\mu_1 = 0.05$ و $\mu_2 = 0.1$ بدست آمدکه درمرحلهٔ اول ایرونینگ بود. سپس بارهای کل درمراحل بعدی با توجه به همین مقادیر از اصطکاک ووضعیت جدیدکارسختی جسم محاسبه گردید. مقدارتنش تسلیم در هرمرحله با توجه به تغییرشکل قبلی جسم (تغییرشکل همرژن + تغییر شکل اضافی) محاسبه شد. مقادیرنظری و عملی بدست آمده درجدول (۲) نشان دادکه مقادیربدست آمده بسیارنزدیک وپیش بینی تئوری بسیارنزدیک بود.

آزمایشات فوق مجددا "درمورد Brass $70/_{30}$ وآلومینیم‌نیز

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]

انجام و مقادیر در جدول (۳) و (۴) آمده است. مقایسه نتایج تئوری و تجربی نشان می‌دهد که اختلاف بار محاسبه شده و بار حاصله از تجربه در بسیاری موارد کاملا" تطبیق دارد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2] [Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

جدول (۱)

Die Semi-Angle	Results	Ironing load 1st Stage 27.1% reduction Tonf	Ironing load 2st Stage 28.1% reduction Tonf	Ironing load 3st Sta 34.3% reduction Tonf
4.5^0	EXP.	2.50	2.40	2.30
	Theo.	2.60	2.45	2.40
7^0	EXP.	2.35	2.10	2.20
	Theo.	2.40	2.20	2.20
10^0	EXP.	2.25	2.10	2.10
	Theo.	2.20	2.04	2.10
15^0	EXP.	2.35	1.75	2.0
	Theo.	2.30	1.82	1.95
20^0	EXP.	2.60	1.82	2.0
	Theo.	2.55	2.0	1.93

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2] [Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

جدول (۲)

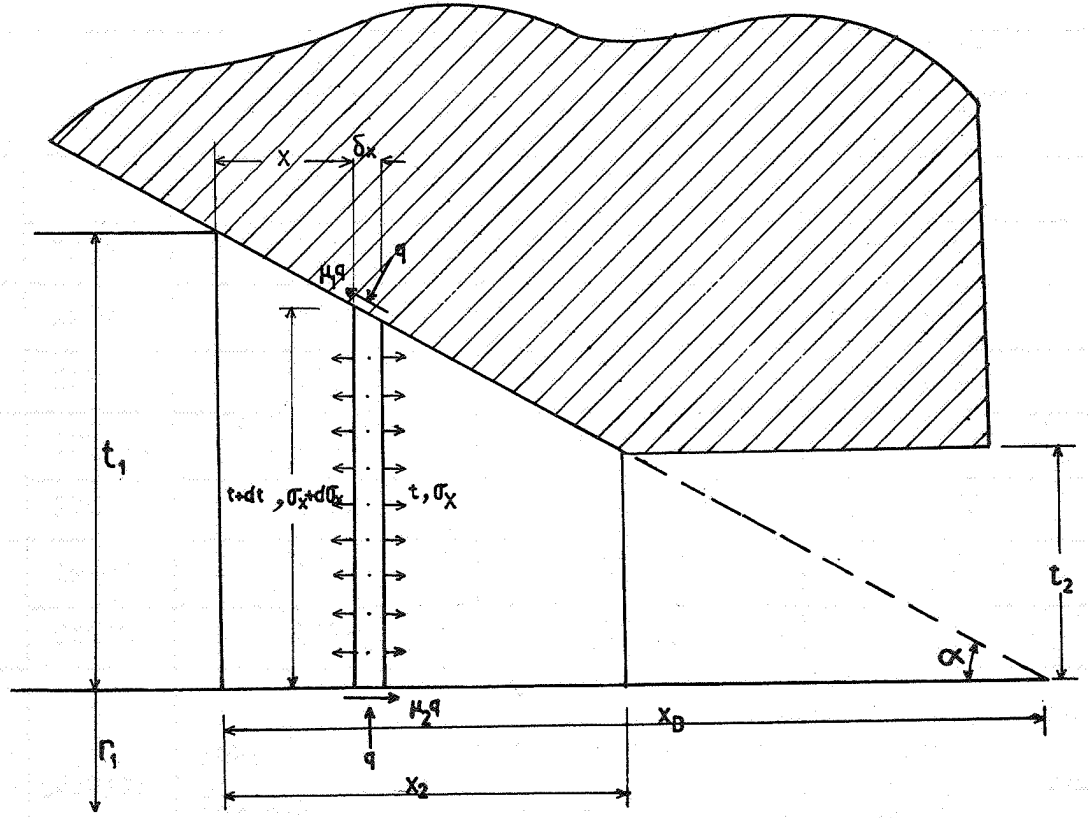
Die Semi-Angle	Results	Ironing load 1st Stage 25.4% reduction Tonf	Ironing load 2st Stage 24.3% reduction Tonf	Ironing Toad 3st Sta 27.3% reduction Tonf
4.5^0	EXP.	1.00	0.80	0.85
	Theo.	1.10	0.82	0.85
7^0	EXP.	0.92	0.80	0.82
	Theo.	0.95	0.81	0.83
10^0	EXP.	0.90	0.70	0.75
	Theo.	0.90	0.72	0.80
15^0	EXP.	0.90	0.65	0.88
	Theo.	0.92	0.68	0.78
20^0	EXP.	1.00	0.65	0.75
	Theo.	1.00	0.63	0.72

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2] [Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

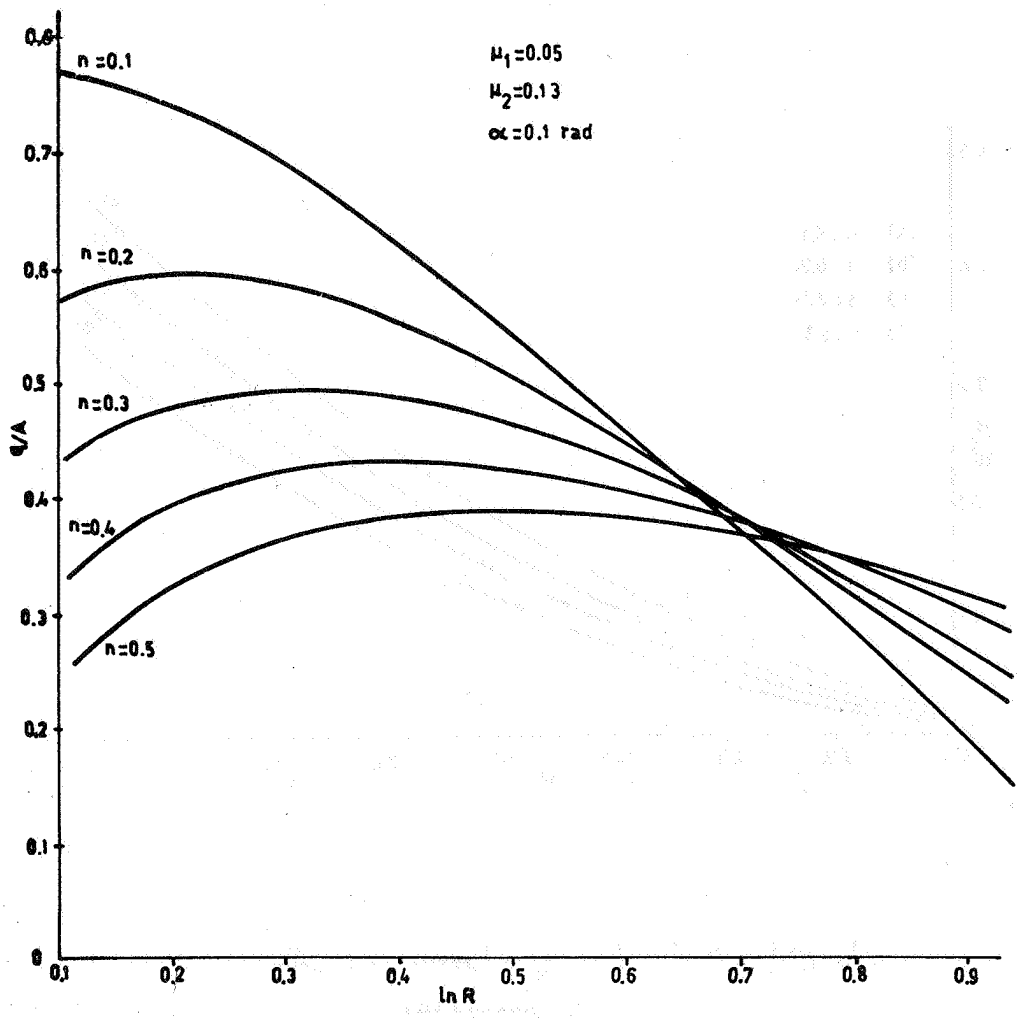
جدول (۳)

Die Semi-Angle	Results	Ironing load 1st Stage 27.1% reduction Tonf	Ironing load 2st Stage 28.1% reduction Tonf	Ironing load 3st Sta 34.4% reduction Tonf
4.5^0	EXP.	2.75	2.27	1.7
	Theo.	2.90	2.20	1.8
7^0	EXP.	2.35	2.26	1.65
	Theo.	2.32	2.16	1.65
10^0	EXP.	2.10	2.25	1.3
	Theo.	2.12	2.15	1.3
15^0	EXP.	2.10	2.25	1.4
	Theo.	2.12	2.10	1.45
20^0	EXP.	2.60	2.25	1.5
	Theo.	2.45	2.28	1.55

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2] [Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

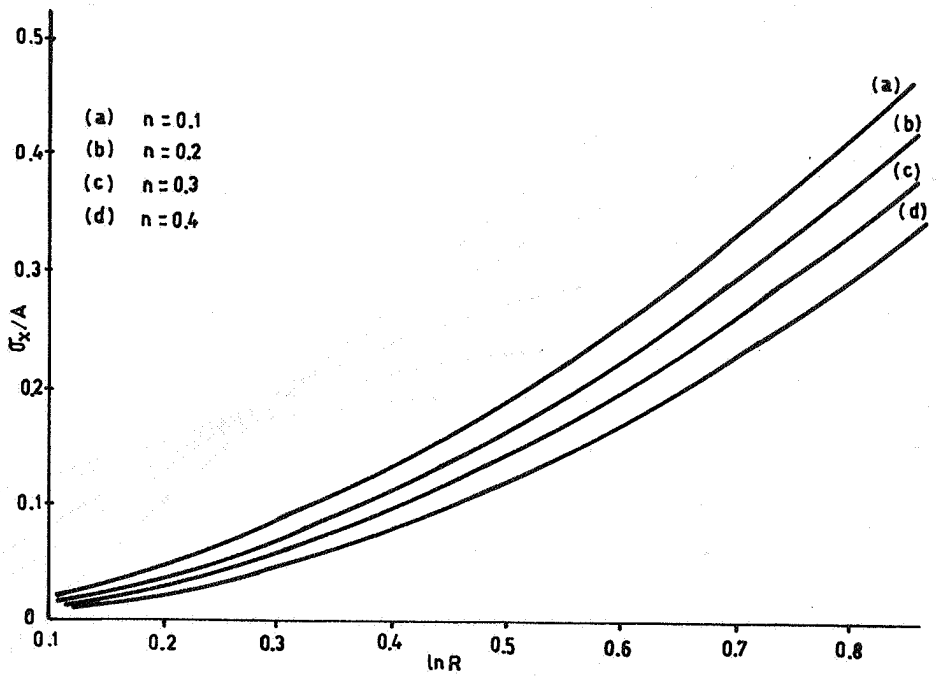


شکل ۱ـ تنش های ایجاد شده در دیواره های استوانه



شکل ۲ ـ تغییرات فشار قالب برحسب کاهش مقطع
در مقادیر مختلف η

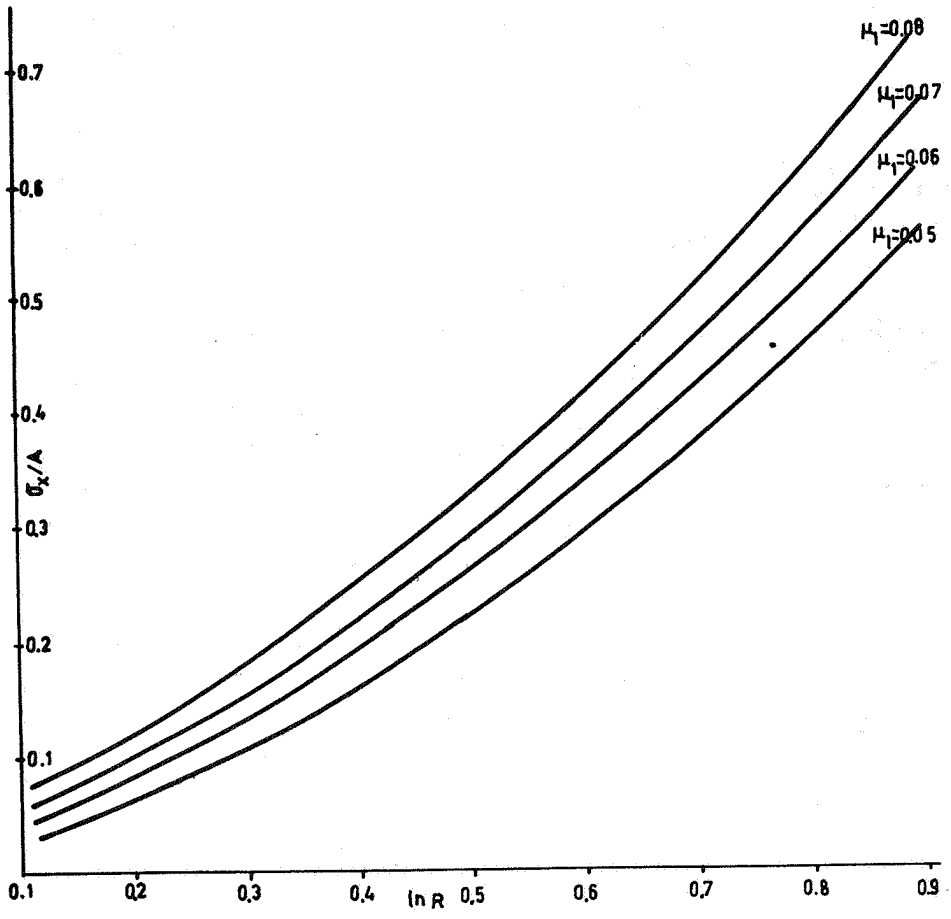
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]



شکل ۳ ـ تغییرات σ_x برحسب کاهش مقطع برای مقادیر η

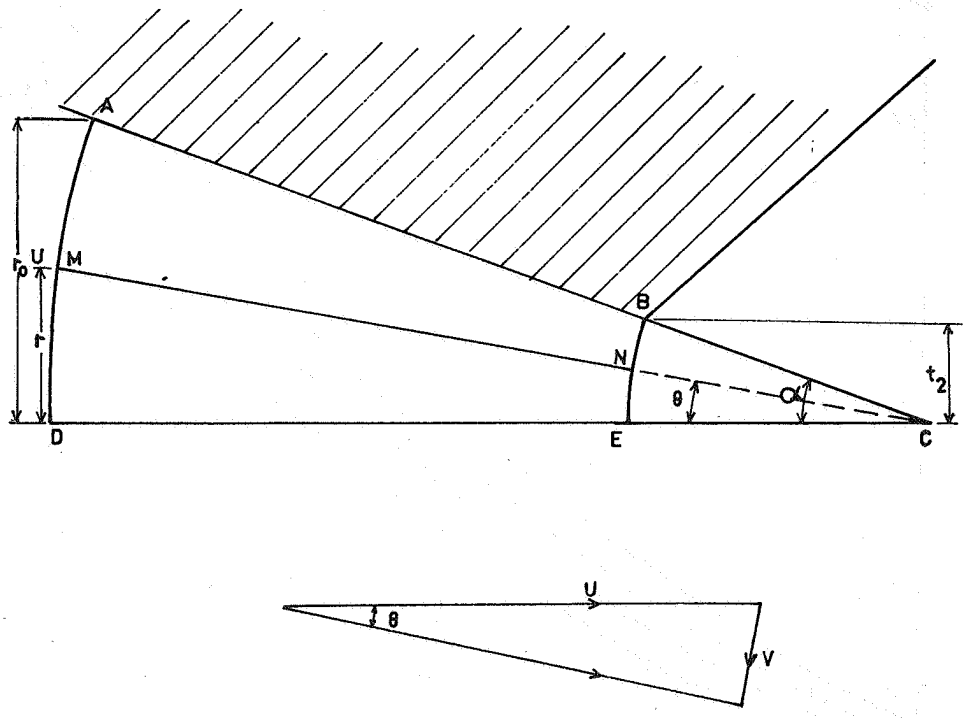
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]



شکل ۴ ـ تغییرات σ_x برحسب کاهش مقطع برای مقادیر مختلف η

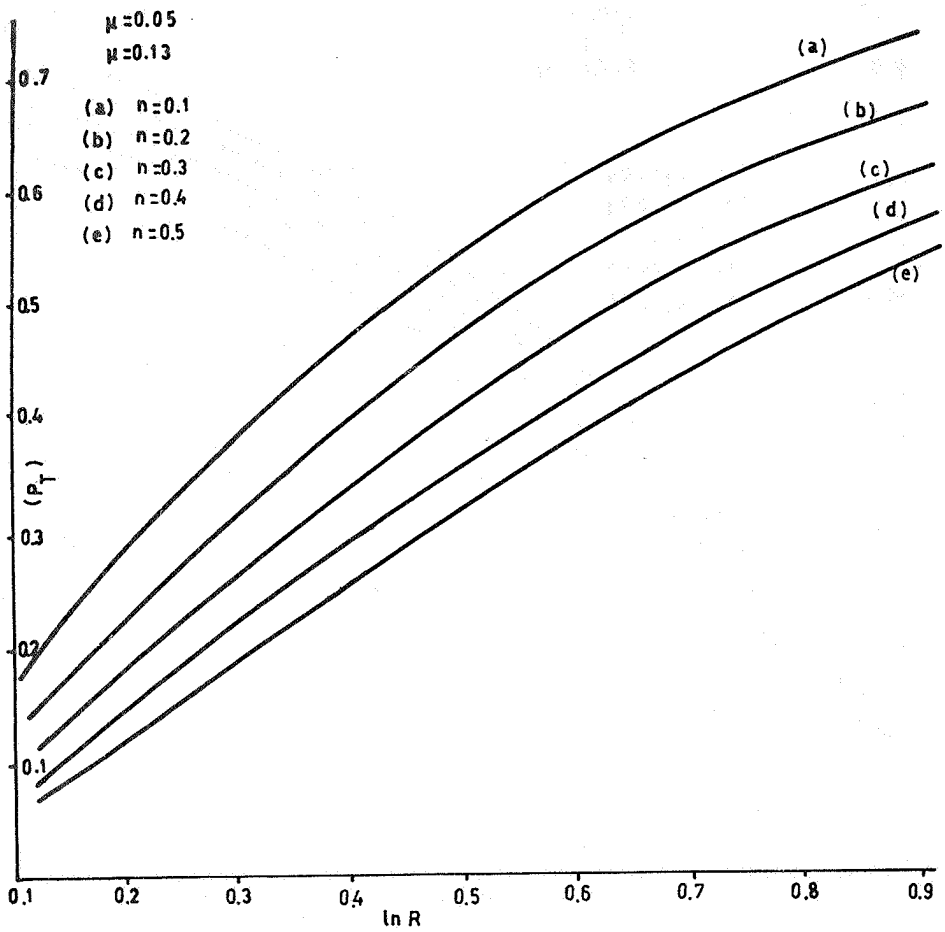
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]



شکل ۵ ـ تغییرشکل برشی در ورود وخروج قالب

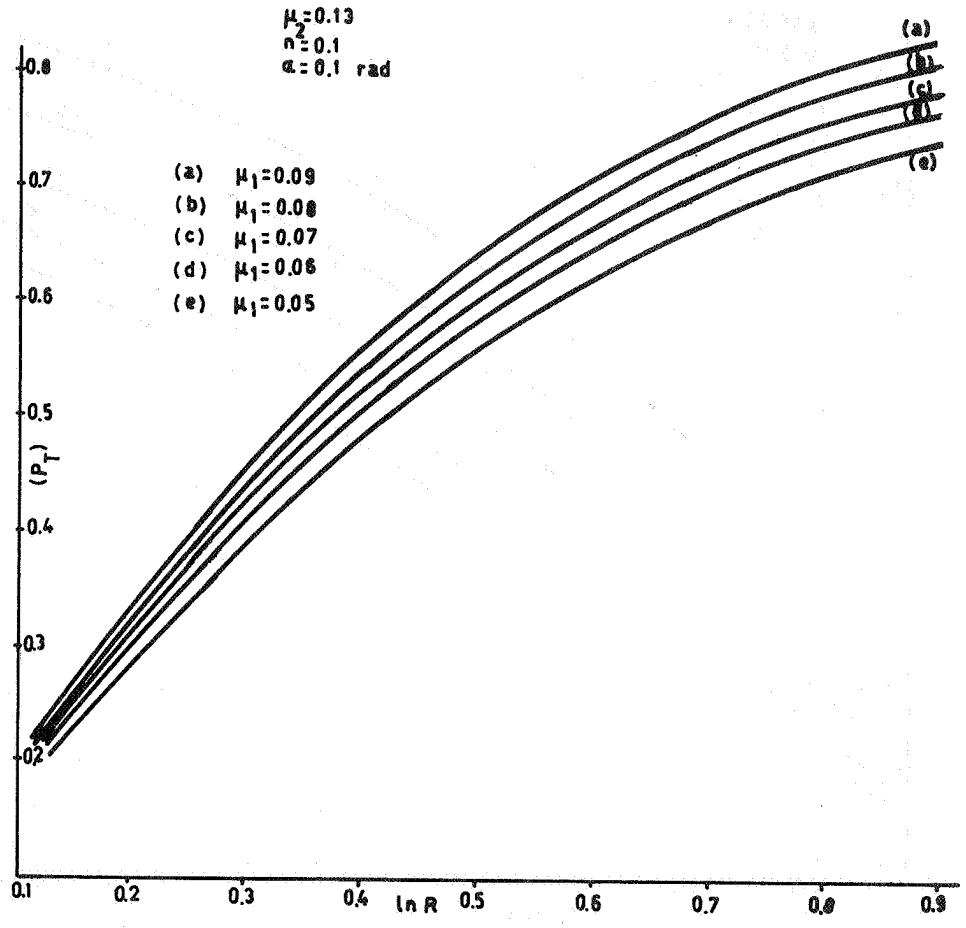
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]



شکل ۶ ــ تغییرات بارکل برحسب کاهش مقطع برای مقادیر η

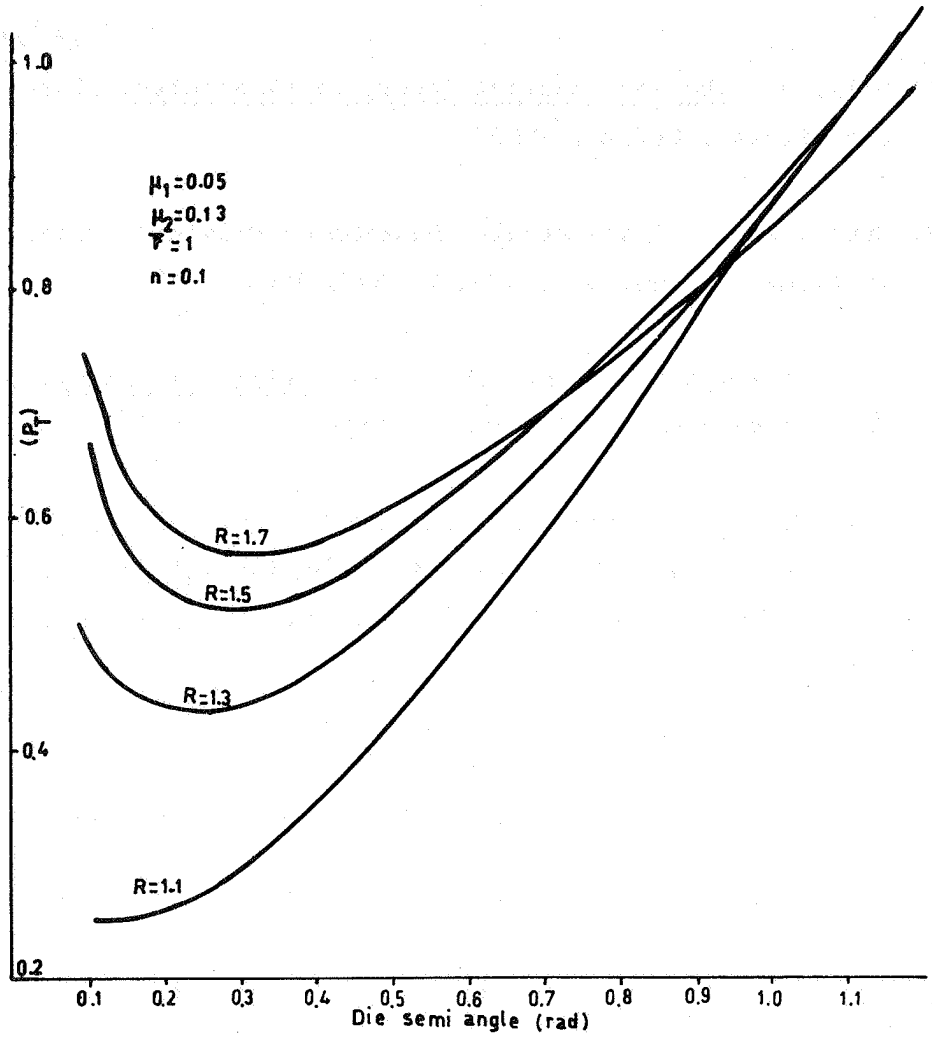
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]



شکل ۷ ـ تغییرات بارکل برحسب کاهش مقطع برای مقادیر η

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]



شکل ۸ ـ تغییرات P_T برحسب زاویهٔ قالب برای مقادیر مختلف کاهش مقطع

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]

مراجع

1. Hill, R., The Mathematical Theory of Plasticity, Clare-udan Press , Oxford, 1950.

2. Green, A.P., "Plane strain Theories of Drawing", Proc. Inst. Mech. Engrs. vol. 174, P. 847, 1960 .

3. Johnson, W, and Mellor, P.B., Engineering Plaslicity, Van Nostrand Reinhold, London, 1973.

4. Pugh, H.Li D., "Redundant work and Friction in Hydrostatic Extrusion of Aluminium and Aluminium Alloy", Journal of Mech. Eng. Science, vol. 6, No. 4, P. 362, 1964 .

5. Khademy- Zadeh, H., Coupland, H.T. and Mellor P.B., "Deep drawing and Ironing of sheet Metal", Metallugica, 1980 .

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.4.2]