



## تحلیل تئوری و تجربی فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی قطعات استوانه‌ای

فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی، فرآیندی مناسب جهت تولید قطعات با اشکال پیچیده یا با نسبتهای کشش بالا می باشد. در این مقاله مدلی تئوری برای تحلیل فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی قطعات استوانه‌ای بر مبنای معیار تسلیم بارلات و لاین ارائه گردیده و اثر فشار سیال، نسبت کشش و شرایط اصطکاکی در منطقه فلنج بر توزیع تنش در قطعه مطالعه شده است. حداکثر فشار قابل استفاده در فرآیند برای جلوگیری از بروز پارگی در قطعه، با استفاده از معیار شکست کرنش صفحه‌ای، به دست آورده شده است. تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل نسبت کشش، خصوصیات ناهمسانگردی و کار سختی ورق و ضخامت آن، شرایط اصطکاکی و شعاع نوک سنبه بر این فشار حدی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نتایج حاصل از تحلیل تئوری با نتایج به دست آمده از آزمایشهای تجربی مورد مقایسه قرار گرفته که تطابق خوبی بین نتایج برقرار بوده است.

حامد دیلمی عضدی<sup>۱</sup>

استادیار

حسن مسلمی نائینی<sup>۲</sup>

استاد

محمد حبیبی پارسا<sup>۳</sup>

استاد

غلامحسین لیاقت<sup>۴</sup>

استاد

واژه‌های کلیدی: کشش عمیق هیدرومکانیکی، فشار بحرانی، پارگی، ناپایداری پلاستیک، معیار تسلیم

### ۱- مقدمه

روشهای هیدروفرمینگ ورقهای فلزی در سالهای اخیر به طور گسترده‌ای برای شکل دهی قطعات در صنعت مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این فرآیندها محیط مایع به روشهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته و در نتیجه فرایندهای مختلفی تحت عنوان روشهای هیدروفرمینگ ورق مطرح شده است که از آن جمله می‌توان فرآیندهای کشش عمیق هیدروفرمینگ، کشش عمیق هیدرومکانیکی، کشش عمیق هیدرومکانیکی و ... را نام برد.

در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی، محفظه‌ای از مایع جایگزین ماتریس شده، شکل نهایی قطعه بر اساس شکل سنبه صلب تعیین می‌گردد (شکل ۱). در مقایسه با روش کشش عمیق سنتی، به علت وجود فشار مایع (معمولاً روغن) اصطکاک بین سنبه و ورق افزایش می‌یابد. همچنین وجود مایع بین سطح

۱ نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی اراک، دانشگاه علم و صنعت ایران  
h.d.azodi@iustarark.ac.ir

۲ استاد، گروه ساخت و تولید، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس moslemi@modares.ac.ir

۳ استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران mhparasa@ut.ac.ir

۴ استاد، گروه طراحی کاربردی، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس ghlia530@modares.ac.ir

ماتریس و ورق باعث کاهش اصطکاک در این سطوح تماسی شده که موجب بهبود وضعیت تنش در قطعه می‌شود. توانایی شکل‌دهی قطعات پیچیده، امکان دستیابی به نسبت‌های کشش بالاتر و در نتیجه کاهش تعداد مراحل شکل‌دهی، بهبود دقت ابعادی و کیفیت سطح، یکنواخت‌تر شدن توزیع ضخامت در قطعه، کاهش برگشت فتری، ساده‌تر شدن مجموعه قالب و کاهش هزینه‌های آن از مزایای عمده فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی نسبت به کشش عمیق سنتی می‌باشد [۴-۱].

در سالهای اخیر برخی مدل‌های تحلیلی جهت بررسی فرآیندهای هیدروفرمینگ ورق ارائه شده است. یوسیفن<sup>۱</sup> و تیروش<sup>۲</sup> با ارائه سری تحلیلیها با استفاده از معیار شکست کرنش صفحه‌ای<sup>۳</sup> و روش انرژی محدود فشار قابل اعمال را در فرآیند کشش عمیق هیدروفرمینگ جهت جلوگیری از ایجاد پارگی و چین‌خوردگی در قطعه، تعیین نمودند [۵-۹]. لو<sup>۴</sup> و هسو<sup>۵</sup> با تحلیل فرآیند هیدروفرمینگ ورق با سنبه نیم کروی، فشار بحرانی ایجاد پارگی در ورق را پیش‌بینی نمودند [۱۰]. الدومیاتی<sup>۶</sup> و شابارا<sup>۷</sup> نیز با ارائه مدلی تحلیلی جهت مطالعه کشش عمیق هیدرومکانیکی، اثر اعمال فشار سیال بر محیط ورق را مورد بررسی قرار دادند [۱۱]. همچنین هسو<sup>۸</sup> و هسیه<sup>۹</sup> مدلی تحلیلی برای هیدروفرمینگ ورق با سنبه نیم کروی ارائه دادند و حد بالا و پایین فشار قابل استفاده در حین فرآیند جهت جلوگیری از ایجاد پارگی و چین‌خوردگی را به‌دست آوردند [۱۲]. فضلی و داریانی نیز با در نظر گرفتن مراحل بالچینگ و کشش قطعه در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی محدوده فشار کاری را برای تولید قطعات متقارن به‌دست آوردند [۱۳].

در این مقاله مدلی بر مبنای معیار تسلیم بارلات و لاین جهت تحلیل فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی ارائه می‌شود. بر مبنای مدل تحلیلی ارائه شده و با استفاده از معیار شکست کرنش صفحه‌ای، حداکثر فشار قابل استفاده در فرآیند جهت جلوگیری از بروز پارگی در قطعه به‌دست می‌آید. همچنین تاثیر پارامترهای هندسی و خصوصیات جنس ورق بر توزیع تنش در قطعه و فشار بحرانی مورد بررسی قرار می‌گیرد. جهت ارزیابی مدل تحلیلی، نتایج تحلیلی با نتایج به‌دست آمده از آزمایشهای تجربی مقایسه می‌گردد.

## ۲- تحلیل تئوری

برای تحلیل فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی، مطابق شکل (۲) قطعه شکل داده شده به سه ناحیه تقسیم می‌شود در حالیکه تنش و کرنش در قطعه پیوسته می‌باشد. ناحیه I شامل فلنج قطعه است که از بالا با سطح زیرین ورقگیر در تماس است و از سمت زیر تحت فشار ناشی از سیال داخل محفظه قرار دارد. ناحیه II منطقه انحنای قطعه بوده و ناحیه III ناحیه ایست که ورق با فشار شدید سیال داخل محفظه به‌طور کاملاً محکم به سنبه چسبیده است.

<sup>1</sup> Yossifon

<sup>2</sup> Tirosh

<sup>3</sup> plane strain failure criterion

<sup>4</sup> Lo

<sup>5</sup> Hsu

<sup>6</sup> El-Domiaty

<sup>7</sup> Shabara

<sup>8</sup> Hsu

<sup>9</sup> Hsieh

فرضهای کلی مورد استفاده در تحلیل فرآیند عبارتند از:

- از مولفه تنش در راستای ضخامت قطعه صرفنظر شده، حالت تنش صفحه‌ای فرض می‌شود.
- جهت‌های شعاعی و محیطی جهت‌های اصلی در نظر گرفته می‌شوند.
- ضخامت ورق در ناحیه‌های ۱ و ۲ حین تغییر شکل ثابت می‌ماند. این فرض با توجه به تغییرات ضخامتی اندک قطعه در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی در مقایسه با کشش عمیق سنتی، قابل قبول می‌باشد.
- ورق به صورت همسانگرد صفحه‌ای فرض شده، ناهمسانگردی آن به وسیله ضریب ناهمسانگردی عمودی ( $R$ ) بیان می‌گردد.
- رابطه تنش و کرنش پلاستیک با استفاده از قانون جریان وابسته<sup>۱</sup> به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$d\varepsilon_{ij} = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (1)$$

که  $\lambda$  ضریب پلاستیک<sup>۲</sup> و  $f$  تابعی اسکالر می‌باشد که با استفاده از معیار تسلیم تعریف شده، پتانسیل پلاستیک<sup>۳</sup> نامیده می‌شود.

- رفتار سخت‌شوندگی فلز به صورت توانی<sup>۴</sup> در نظر گرفته می‌شود.

$$\bar{\sigma} = K\bar{\varepsilon}^n \quad (2)$$

- سطح تسلیم با استفاده از معیار تسلیم بارلات و لاین<sup>۵</sup> تعیین می‌گردد. معیار تسلیم بارلات و لاین در حالت کرنش صفحه‌ای بر حسب تنشهای اصلی به صورت زیر است [۱۴]:

$$\begin{aligned} |k_1 + k_2|^a + |k_1 - k_2|^a + \frac{c}{2-c} |2k_2|^a &= \frac{2}{2-c} \bar{\sigma}^a \\ k_1 &= \frac{\sigma_1 + h\sigma_2}{2}, \quad k_2 = \frac{\sigma_1 - h\sigma_2}{2} \\ c &= 2\sqrt{\frac{R_0}{1+R_0} \frac{R_{90}}{1+R_{90}}}, \quad h = \sqrt{\frac{R_0}{1+R_0} \frac{1+R_{90}}{R_{90}}} \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن  $a$  ثابت ماده و  $R_0, R_{90}$  ضرایب ناهمسانگردی می‌باشند. با در نظر گرفتن شرایط همسانگردی صفحه‌ای برای ورق ( $h=1$ ) معیار تسلیم به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$|\sigma_1|^a + |\sigma_2|^a + \frac{c}{2-c} |\sigma_1 - \sigma_2|^a = \frac{2}{2-c} \bar{\sigma}^a \quad (4)$$

که در آن:

$$c = \frac{2R}{1+R} \quad (5)$$

<sup>1</sup> Associated flow rule

<sup>2</sup> plastic multiplier

<sup>3</sup> Plastic potential

<sup>4</sup> Power law hardening rule

<sup>5</sup> Barlat-Lian yield criterion

و  $R$  ضریب ناهمسانگردی میانگین در صفحه می‌باشد. با استفاده از معیار تسلیم، از قانون جریان وابسته (رابطه ۱) نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon_1}{\text{sign}(\sigma_1)|\sigma_1|^{a-1} + \text{sign}(\sigma_1 - \sigma_2)\frac{c}{2-c}|\sigma_1 - \sigma_2|^{a-1}} &= \\ \frac{d\varepsilon_2}{\text{sign}(\sigma_2)|\sigma_2|^{a-1} - \text{sign}(\sigma_1 - \sigma_2)\frac{c}{2-c}|\sigma_1 - \sigma_2|^{a-1}} &= \\ \frac{-d\varepsilon_3}{\text{sign}(\sigma_1)|\sigma_1|^{a-1} + \text{sign}(\sigma_2)|\sigma_2|^{a-1}} &= \frac{d\bar{\varepsilon}}{\frac{2}{2-c}\bar{\sigma}^{a-1}} \end{aligned} \quad (۶)$$

که  $d\varepsilon_1, d\varepsilon_2, d\varepsilon_3$  مولفه‌های اصلی جزء کرنش پلاستیک می‌باشند.

## ۲-۱- تحلیل تنش و کرنش در منطقه فلنج (ناحیه ۱)

با توجه به تقارن محوری در هندسه قطعه، معادله تعادل برای ناحیه فلنج در دستگاه مختصات قطبی به صورت زیر است:

$$\frac{d(t\sigma_r)}{dr} + \frac{t(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} + F_f(P) = 0 \quad (۷)$$

که  $F_f(P)$  نیروی اصطکاک وارد بر المان فلنج می‌باشد. با در نظر گرفتن درجه معیار تسلیم برابر ۲ ( $a = 2$ ) و با توجه به اینکه جهت‌های شعاعی و محیطی جهت‌های اصلی می‌باشند، از رابطه (۶) نتیجه می‌شود:

$$\sigma_r - \sigma_\theta = \frac{2}{2+c} \frac{\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} (d\varepsilon_r - d\varepsilon_\theta) \quad (۸)$$

با توجه به شرایط در نظر گرفته شده، تنش موثر بر حسب تنشهای شعاعی و محیطی به صورت زیر است.

$$\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 - c\sigma_r\sigma_\theta = \bar{\sigma}^2 \quad (۹)$$

و جزء کرنش موثر با استفاده از روابط (۶) و (۹) بدین صورت بر حسب جزء کرنشهای شعاعی و محیطی به دست خواهد آمد:

$$d\bar{\varepsilon} = 2 \left[ \frac{1}{4-c^2} (d\varepsilon_r^2 + d\varepsilon_\theta^2 + cd\varepsilon_r d\varepsilon_\theta) \right]^{1/2} \quad (۱۰)$$

با صرف نظر کردن از تغییرات ضخامت در ناحیه فلنج و با توجه به ثابت بودن حجم در تغییر شکل پلاستیک می‌توان نوشت:

$$d\varepsilon_r = -d\varepsilon_\theta \quad (11)$$

و بنابراین از رابطه (۱۰) نتیجه می‌شود:

$$\bar{\varepsilon} = 2\sqrt{\frac{1}{2+c}}\varepsilon_r \quad (12)$$

با استفاده از روابط (۸)، (۱۱) و (۱۲) و قانون سخت‌شوندگی توانی می‌توان نوشت:

$$\sigma_r - \sigma_\theta = K \frac{2^{(n+1)}}{(2+c)^{\left(\frac{n+1}{2}\right)}} \varepsilon_r^n \quad (13)$$

با قرار دادن رابطه (۱۳) در رابطه (۷)، در نظر گرفتن اصطکاک کولمب ( $F_f(P) = \mu P$ ) که  $\mu$  جمع ضرایب اصطکاک در دو سطح ورق است و انتگرال‌گیری با توجه به شرط مرزی در لبه ورق:

$$\sigma_r^I(b) = -P \quad (14)$$

نتیجه می‌شود:

$$\sigma_r^I(r) = \int_r^b \frac{K}{r} \frac{2^{(n+1)}}{(2+c)^{\left(\frac{n+1}{2}\right)}} \varepsilon_r^n dr + \frac{P}{t} [\mu(b-r) - t] \quad (15)$$

کرنش شعاعی در هر نقطه به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon_r = -\varepsilon_\theta = -\int_{r_0}^r \frac{dr}{r} = \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) \quad (16)$$

که  $r_0$  موقعیت اولیه المان با موقعیت فعلی  $r$  است. بر اساس فرض ثابت بودن حجم، رابطه  $r$  و  $r_0$  به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} r_0^2 = r^2 - (R_p + t + \rho)^2 + \pi(\rho + t) \left( R_p + t + \rho - \frac{2\rho}{\pi} - \frac{2t}{\pi} \right) + 2R_p(H - \rho - t - r_p) \\ + \pi r_p \left( R_p - r_p + \frac{2r_p}{\pi} \right) + (R_p - r_p)^2 \quad (R_p + t + \rho) \leq r \leq b \end{aligned} \quad (17)$$

و شعاع خارجی فلنج در هر لحظه مطابق رابطه زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} b^2 = b_0^2 + (R_p + t + \rho)^2 - \pi(\rho + t) \left( R_p + t + \rho - \frac{2\rho}{\pi} - \frac{2t}{\pi} \right) - 2R_p(H - \rho - t - r_p) \\ - \pi r_p \left( R_p - r_p + \frac{2r_p}{\pi} \right) - (R_p - r_p)^2 \end{aligned} \quad (18)$$

## ۲-۲- تحلیل تنش و کرنش در منطقه انحنای قطعه (ناحیه ۲)

نیروی اصطکاک در ناحیه انحنای قطعه وجود ندارد و در نتیجه معادله تعادل در این منطقه به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{d(t\sigma_r)}{dr} + \frac{t(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} = 0 \quad (19)$$

با قرار دادن رابطه (۱۳) در رابطه فوق و انتگرال گیری از آن، نتیجه می شود:

$$\sigma_r^{\text{II}}(r) = \int_r^{R_p+t+\rho} \frac{K}{r} \frac{2^{(n+1)}}{(2+c)^{\frac{(n+1)}{2}}} \varepsilon_r^{\text{II}n} dr + C \quad (20)$$

که ثابت انتگرال گیری برابر است با:

$$C = \sigma_r^{\text{I}}(R_p + t + \rho) \quad (21)$$

کرنش شعاعی از رابطه (۱۶) محاسبه می شود. رابطه  $r$  و  $r_0$  در این ناحیه به صورت زیر است.

$$r_0^{\text{II}2} = 2(\rho+t)\left[(R_p+t+\rho)\varphi - (\rho+t)\text{Sin}\varphi\right] + 2R_p(H-\rho-t-r_p) \quad (22)$$

$$+ \pi r_p \left(R_p - r_p + \frac{2r_p}{\pi}\right) + (R_p - r_p)^2 \quad R_p \leq r \leq (R_p + t + \rho)$$

که

$$\varphi = \arccos\left(\frac{R_p - r}{\rho + t} + 1\right) \quad (23)$$

شعاع انحنای  $\rho$  به فشار سیال داخل محفظه بستگی داشته، از رابطه زیر به دست می آید [۶]:

$$\frac{\rho}{R_p} = \left(1 + \frac{2t\sigma_r(R_p)}{PR_p}\right)^{\frac{1}{2}} - 1 \quad (24)$$

توزیع تنش در مناطق فلنج و انحنای قطعه (مناطق  $I$  و  $II$ )، با حل عددی معادله های (۱۵)، (۲۰) و (۲۴) به دست می آید.

## ۲-۳- تحلیل ناپایداری کششی و پارگی

بر خلاف فرآیند کشش عمیق سنتی در کشش عمیق هیدرومکانیکی پارگی در منطقه بالای دیواره قطعه و در نقطه بین مناطق  $II$  و  $III$  روی می دهد [۵]. به سبب تماس چسبنده ورق و سنبه، جزء کرنش محیطی در دیواره قطعه برابر صفر خواهد بود.

$$d\varepsilon_\theta = 0 \quad (25)$$

و شرایط کرنش صفحه‌ای برقرار است. در نتیجه از فرض ثابت بودن حجم در تغییر شکل پلاستیک می‌توان نوشت:

$$d\varepsilon_z = -d\varepsilon_t \quad (26)$$

با توجه به شکل (۳) از معادله تعادل در راستای  $Z$  نیروی سنبه به صورت زیر به دست می‌آید:

$$F = 2\pi(R_p + t)t\sigma_z'''(z)_{[z=H-\rho]} + \pi R_p^2 P + 2\pi R_p(H - \rho - t)F_f(P) \quad (27)$$

با اعمال شرط ناپایداری ( $dF = 0$ ) در معادله فوق و با استفاده از  $d\varepsilon_t = dt/t$  می‌توان نوشت:

$$\frac{d\sigma_z}{d\varepsilon_z} = \sigma_z \quad (28)$$

با در نظر گرفتن شرایط بارگذاری متناسب<sup>۱</sup> در آستانه ناپایداری و در نزدیکی نقطه ناپایداری ( $\alpha = \sigma_\theta/\sigma_z$ )، با کمک معادلات (۶) و (۹) از معادله (۲۸) نتیجه می‌شود:

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} = \bar{\sigma} \left[ \frac{2 - c\alpha}{2(1 - c\alpha + \alpha^2)^{1/2}} \right] \quad (29)$$

و با استفاده از قانون سخت‌شوندگی توانی، کرنش ناپایداری بدین صورت:

$$\bar{\varepsilon}_{cr} = \frac{2n(1 - c\alpha + \alpha^2)^{1/2}}{2 - c\alpha} \quad (30)$$

و تنش محوری بحرانی مطابق زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_{zcr} = K \left( \frac{2n}{2 - c\alpha} \right)^n (1 - c\alpha + \alpha^2)^{\frac{n-1}{2}} \quad (31)$$

$\alpha$  با استفاده از روابط (۶) و (۲۵) برابر  $c/2$  به دست می‌آید و با توجه به اینکه:

$$\sigma_z'''(H - \rho) = \sigma_r''(R_p) \quad (32)$$

از روابط (۱۵)، (۲۰) و (۳۱) فشار بحرانی سیال داخل محفظه به دست می‌آید:

<sup>۱</sup> Proportional loading

$$\bar{P}_{cr} = \frac{P_{cr}}{K} = \frac{1}{\left[ \frac{\mu}{t} (b - R_p - t - \rho) - 1 \right]} \left\{ n^n \left( \frac{4}{4 - c^2} \right)^{\frac{n+1}{2}} - \frac{2^{(n+1)}}{(2+c)^{\frac{(n+1)}{2}}} \left[ \int_{R_p}^{R_p+t+\rho} \frac{\varepsilon_r^{n+1}}{r} dr \right. \right. \\ \left. \left. + \int_{R_p+t+\rho}^b \frac{\varepsilon_r^{n+1}}{r} dr \right] \right\} \quad (33)$$

و شعاع انحنای ورق با استفاده از روابط (۲۴)، (۳۱) و (۳۲) با رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$\frac{\rho}{R_p} = \left( 1 + \frac{2tKn^n}{P_{cr}R_p} \left( \frac{4}{4 - c^2} \right)^{\frac{n+1}{2}} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \quad (34)$$

با حل سیستم معادلات (۳۳) و (۳۴) به صورت عددی با کمک روش نیوتن فشار بحرانی سیال داخل محفظه محاسبه می‌شود.

### ۳- مطالعه تجربی

به منظور مطالعه تجربی فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی قطعات استوانه‌ای و بررسی درستی تحلیل تئوری ارائه شده، با طراحی و ساخت تجهیزات کشش عمیق هیدرومکانیکی، آزمایشهای تجربی جهت تعیین فشار بحرانی پارگی در فرآیند انجام شد. در شکل (۴) تجهیزات آزمایش و نمای شماتیک مدار هیدرولیکی مورد استفاده نشان داده شده است. مشخصات هندسی فرآیند و خصوصیات جنس ورق مورد آزمایش در جدول (۱) آورده شده است. شکل (۵) نیز نمونه‌ای از قطعات پاره شده در حین فرآیند را نشان می‌دهد. چنانکه مشخص است بر خلاف فرآیند کشش عمیق سنتی در کشش عمیق هیدرومکانیکی پارگی در منطقه بالای دیواره قطعه اتفاق افتاده است.

### ۴- نتایج و بحث

#### ۴-۱- مقایسه نتایج تئوری و تجربی

شکل (۶) منحنی فشار بحرانی سیال داخل محفظه را بر حسب جابجایی سنبه که از آزمایشهای تجربی به دست آمده، نشان می‌دهد. چنانچه با حرکت سنبه به داخل محفظه فشار سیال داخل آن از این فشار حدی بیشتر شود، ورق دچار پارگی می‌گردد. بنابراین جهت تولید قطعه‌ای سالم و بدون پارگی لازم است مسیر فشار بگونه‌ای تنظیم شود که در هیچ لحظه‌ای فشار سیال از مقدار حدی بیشتر نشود. نتایج تئوری نیز با استفاده از مدل تحلیلی ارائه شده، برای مشخصات مورد استفاده در آزمایشهای تجربی به دست آورده شده است. چنانکه مشهود است تطابق خوبی بین نتایج تئوری و تجربی برقرار می‌باشد.

#### ۴-۲- اثر پارامترهای فرآیند بر فشار بحرانی

چنانکه ذکر شد، فشار بحرانی سیال داخل محفظه، محدوده کاری در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی را جهت تولید قطعه سالم و بدون پارگی تعیین می‌کند. بررسی اثر عوامل مختلف فرآیند بر این فشار حدی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. در شکل (۷) اثر نسبت کشش بر منحنی فشار بحرانی بر حسب جابجایی



سنبه یا ارتفاع قطعه کشیده شده، نشان داده شده است. مطابق نتایج فشار بحرانی پارگی برای کشش قطعات با نسبت کشش بالاتر، کاهش می‌یابد. در واقع برای تولید قطعات با نسبت‌های کشش بالا، فشار داخل محفظه جهت جلوگیری از بروز پارگی در قطعه، باید در سطح کمتری حفظ شود. بررسی اثر ناهمسانگردی ورق در شکل (۸)، نشان می‌دهد که با افزایش ضریب ناهمسانگردی نرمال ( $R$ ) فشار بحرانی افزایش می‌یابد. در شکل (۹) منحنی‌های فشار بحرانی به ازای مقادیر مختلف توان کارسختی نشان داده شده است. چنانکه در شکل دیده می‌شود، با افزایش  $n$  فشار حدی به مقدار اندکی افزایش می‌یابد به طوری که می‌توان نتیجه گرفت که  $n$  اثر قابل توجهی بر فشار بحرانی ندارد. مطابق شکل (۱۰) افزایش ضخامت ورق، افزایش فشار بحرانی پارگی را در پی دارد. به بیان دیگر در کشش ورق‌های نازک نسبت به ورق‌های با ضخامت بیشتر پارگی در فشارهای پایینتری اتفاق می‌افتد.

اثر شرایط اصطکاکی در تماس ورق با اجزای قالب در منطقه فلنج در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مطابق نتایج به دست آمده افزایش ضریب اصطکاک به طور چشمگیری باعث کاهش فشار حدی در فرایند می‌شود. نتایج نشان داده شده در شکل (۱۲) بیانگر اثر شعاع نوک سنبه بر مقدار فشار بحرانی است. با افزایش مقدار  $r_p$  فشار حدی مقداری کاهش می‌یابد.

#### ۴-۳- اثر پارامترهای فرآیند بر توزیع تنش

با استفاده از روابط تحلیلی ارائه شده برای به دست آوردن مولفه‌های تنش در قطعه در حین عملیات کشش عمیق هیدرومکانیکی، اثر عوامل مهم موثر بر فرایند بر چگونگی توزیع تنش مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۱۳) اثر فشار مورد استفاده در فرایند را بر توزیع تنش‌های شعاعی و محیطی در حین تغییر شکل، نشان می‌دهد. مطابق نتایج، استفاده از فشار سیال کمتر باعث یکنواخت‌تر شدن توزیع تنش‌های شعاعی و محیطی در مناطق فلنج و انحنای قطعه در حین عملیات کشش عمیق هیدرومکانیکی قطعات با نسبت‌های کشش متفاوت، نشان داده شده است. نتایج به دست آمده بیانگر افزایش سطح تنش شعاعی در قطعه با افزایش نسبت کشش می‌باشد. همچنین در شکل (۱۵) تاثیر شرایط اصطکاکی در منطقه فلنج بر توزیع تنش مورد بررسی قرار گرفته است. کاهش ضریب اصطکاک و بهبود شرایط اصطکاکی در منطقه فلنج باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش در حین عملیات و نیز کاهش سطح تنش شعاعی در قطعه می‌شود که می‌تواند موجب تاخیر در بروز پارگی گردد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی تئوری برای تحلیل فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی قطعات استوانه‌ای بر مبنای معیار تسلیم بارلات و لاین ارائه گردید. تاثیر فشار سیال داخل محفظه، به عنوان پارامتری کلیدی در موفقیت عملیات، نسبت کشش و شرایط اصطکاکی در منطقه فلنج بر توزیع تنش در قطعه در حین فرایند مورد بررسی قرار گرفت. همچنین بر مبنای مدل تحلیلی ارائه شده و با استفاده از معیار شکست کرنش صفحه‌ای، حداکثر فشار قابل استفاده در فرایند جهت جلوگیری از بروز پارگی در قطعه بدست آورده شد و اثر عوامل

مختلف از قبیل نسبت کشش، ضریب ناهمسانگردی عمودی، توان کرنش سختی، ضخامت ورق، اصطکاک در ناحیه فلنج و اندازه شعاع نوک سنبه بر این فشار حدی مطالعه گردید. علاوه بر این، با طراحی و ساخت تجهیزات لازم و انجام آزمایشهای تجربی، فشار بحرانی پارگی برای ورق فولاد کم کربن St-12 به صورت تجربی تعیین شد و با مقایسه نتایج تئوری و تجربی درستی تحلیل ارائه شده، مورد ارزیابی قرار گرفت. مهمترین نتایج به دست آمده عبارتند از:

- محدوده فشار قابل استفاده در فرآیند برای تولید قطعات با نسبت کشش بالاتر، کاهش می یابد.
- با افزایش مقدار ضریب ناهمسانگردی نرمال، فشار بحرانی افزایش می یابد.
- اثر توان کرنش سختی بر فشار بحرانی پارگی در فرایند قابل توجه نبوده، هرچند با افزایش  $n$  فشار بحرانی اندکی افزایش می یابد.
- افزایش ضخامت ورق، باعث افزایش فشار ناپایداری می گردد.
- با افزایش اصطکاک در منطقه فلنج، محدوده فشار قابل استفاده در فرایند کاهش می یابد.
- با افزایش شعاع نوک سنبه، فشار حدی مقدار کمی کاهش می یابد.
- استفاده از فشار سیال کمتر باعث یکنواخت تر شدن توزیع تنشهای شعاعی و محیطی در مناطق فلنج و انحنای قطعه می گردد.
- با افزایش نسبت کشش، تنش شعاعی در قطعه به صورت قابل توجهی افزایش می یابد.
- کاهش ضریب اصطکاک در منطقه فلنج باعث توزیع یکنواخت تر تنش در قطعه می گردد.

## مراجع

- [1] Zhang, S. H., Nielsen, K. B., Dankert, J., Kang, D. C., and Lang, L. H., "Finite Element Analysis of the Hydromechanical Deep Drawing Process of Tapered Rectangular Boxes", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 102, pp. 1-8, (2000).
- [2] Becker, H. J., and Bensmann, G., "Further Development in Hydromechanical Deep Drawing, *Developments in the Drawing of Metals*", Metal Society of London, pp. 272-279, (1983).
- [3] Dachang, K., Yu, C., and Yongchao, X., "Hydromechanical Deep Drawing of Superalloy Cups", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 166, pp. 243-246, (2005).
- [4] Zhang, S. H., and Dankert, J., "Development of Hydromechanical Deep Drawing", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 83, pp. 14-25, (1998).
- [5] Yossifon, S., and Tirosh, J., "Rupture Instability in Hydroforming Deep Drawing Process", *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 27, pp. 559-570, (1985).
- [6] Yossifon, S., Tirosh, J., and Kochavi, E., "On Suppression of Plastic Buckling in Hydroforming Process", *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 26, pp. 389-402, (1984).

- [7] Yossifon, S., and Tirosh, J., "On the Permissible Fluid Pressure Path in Hydroforming Deep Drawing Process, Analysis of Failures and Experiment", Transactions ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 110, pp. 146-152, (1988).
- [8] Yossifon, S., and Tirosh, J., "The Maximum Drawing Ratio in Hydroforming Deep Drawing Processes", Transactions ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 112, pp. 47-56, (1990).
- [9] Tirosh, J., Yossifon, S., Eshel, R., and Bezter, A., "Hydroforming Process for Uniform Wall Thickness Products", Transactions ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 99, pp. 685-691, (1977).
- [10] Lo, S. W., Hsu, T. C., and Wilson, W. R. D., "An Analysis of the Hemisphere Punch Hydroforming Process", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 37, pp. 225-239, (1992).
- [11] El-Domiaty, A., and Shabara, M. A., "Improvement of Deep Drawability by Radially Pressurized Fluid", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 35, pp. 739-749, (1995).
- [12] Hsu, T. C., and Hsieh, S. J., "Theoretical and Experimental Analysis of Failure for the Hemisphere Punch Hydroforming Processes", Transactions ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118, pp. 434-438, (1996).
- [13] Fazli, A., and Dariani, B. M., "Theoretical and Experimental Analysis of the Axisymmetric Hydromechanical Deep Drawing Process", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 220, Part B: Journal of Engineering Manufacture, pp. 1429-1437, (2006).
- [14] Barlat, F., and Lian, J., "Plastic Behavior and Stretchability of Sheet Metals. Part I. A Yield Function for Orthotropic Sheets under Plane Stress Conditions", International Journal of Plasticity, Vol. 5, pp. 51-66, (1989).

### فهرست نمادهای انگلیسی

شعاع خارجی فلنج	: $b$
شعاع گرده اولیه	: $b_0$
نسبت کشش	: $DR$
عمق لحظه‌ای قطعه ( مقدار حرکت سنبه)	: $H$
ضریب استحکام	: $K$
توان کرنش سختی	: $n$
فشار سیال داخل محفظه	: $P$
پارامتر بدون بعد فشار سیال داخل محفظه	: $\bar{P}$
ضریب ناهمسانگردی نرمال	: $R$
موقعیت اولیه و فعلی المان ورق	: $r, r_0$

$R_p$ : شعاع سنبه  
 $t$ : ضخامت ورق

### نمادهای یونانی

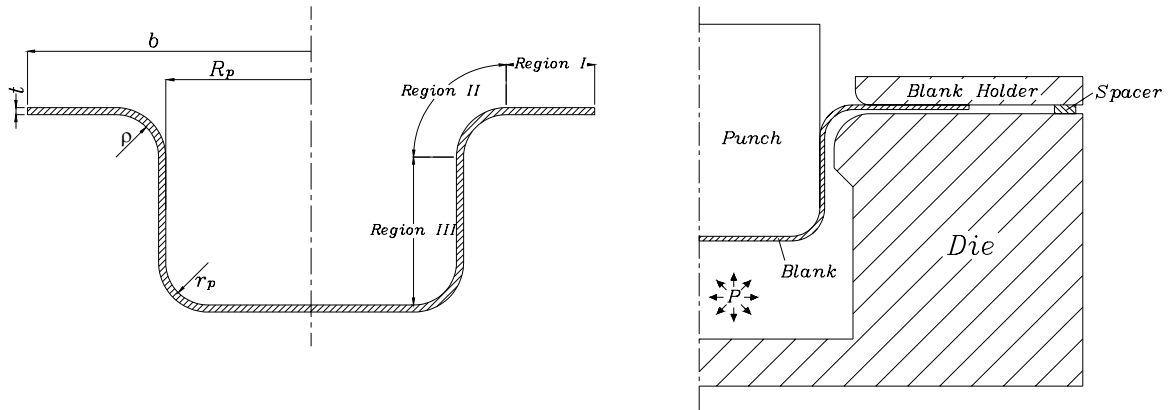
$\alpha$ : نسبت تنش محیطی به محوری  
 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ : مولفه‌های کرنش اصلی  
 $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_t$ : مولفه‌های کرنش شعاعی، محیطی و ضخامتی  
 $\bar{\varepsilon}$ : کرنش موثر  
 $\mu$ : ضریب اصطکاک کولمب  
 $\rho$ : شعاع انحنای قطعه  
 $\sigma_1, \sigma_2$ : مولفه‌های تنش اصلی  
 $\sigma_r, \sigma_\theta$ : مولفه‌های تنش شعاعی و محیطی  
 $\sigma_z$ : تنش محوری در ناحیه III  
 $\bar{\sigma}$ : تنش موثر

### جدولها

**جدول ۱ - مشخصات هندسی فرآیند و خصوصیات جنس ورق مورد آزمایش**

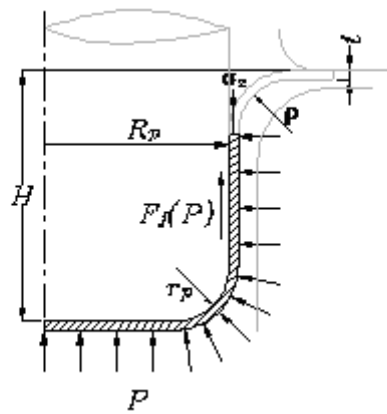
پارامتر	اندازه
جنس ورق	فولاد کم کربن St-12
ضخامت	۱ mm
تنش تسلیم	۲۹۴ MPa
ضریب استحکام ( $K$ )	۵۱۵ MPa
توان کرنش سختی ( $n$ )	۰/۲۳
ضریب ناهمسانگردی نرمال میانگین ( $R$ )	۱/۲
قطر گرده اولیه ( $b_0$ )	۱۱۰ mm
قطر سنبه $2R_p$	۵۰ mm
شعاع نوک سنبه $r_p$	۵ mm
قطر دهانه محفظه	۵۴ mm
شعاع لبه ورودی محفظه	۶ mm

شکلها

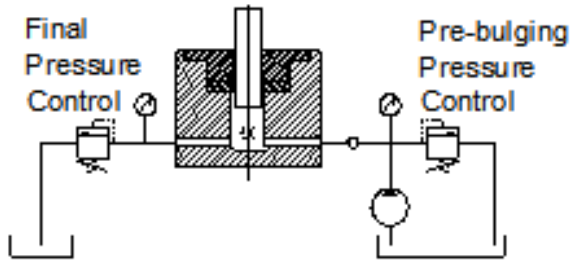


شکل ۱- فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی

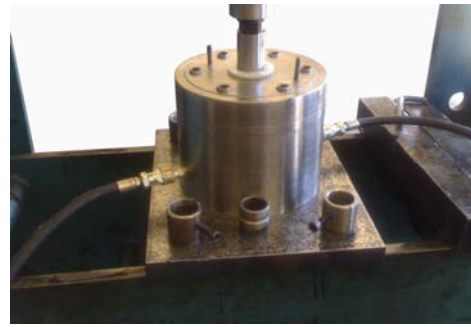
شکل ۲- نواحی تغییر شکل



شکل ۳- نیروها و تنشهای وارد بر ناحیه III



(ب)

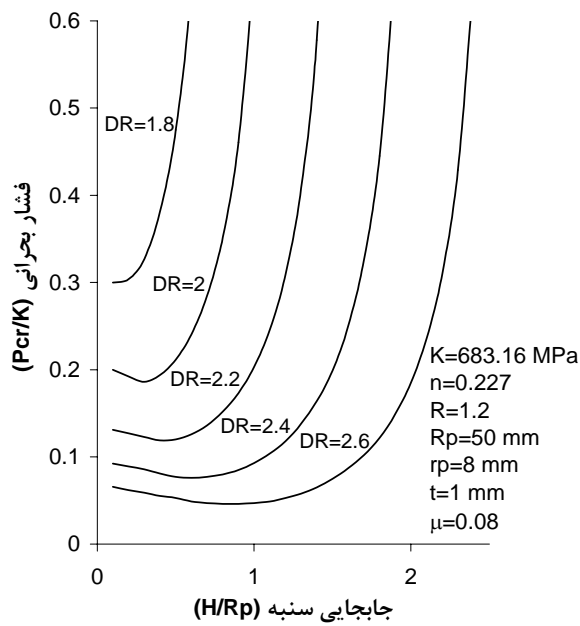


(الف)

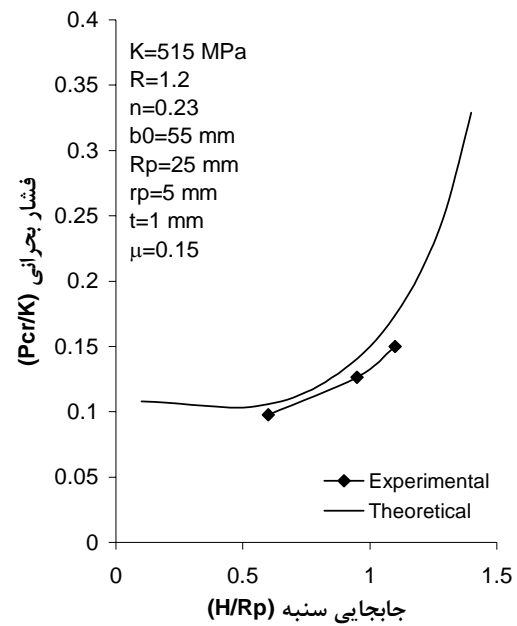
شکل ۴- (الف) تجهیزات آزمایش (ب) نمای شماتیک مدار هیدرولیکی مورد استفاده در آزمایشهای تجربی



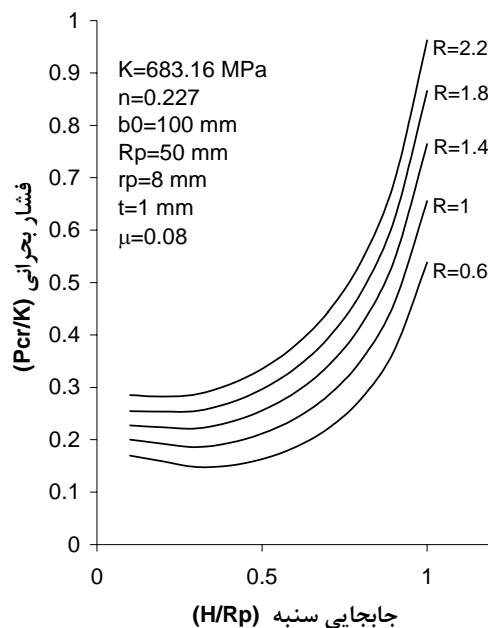
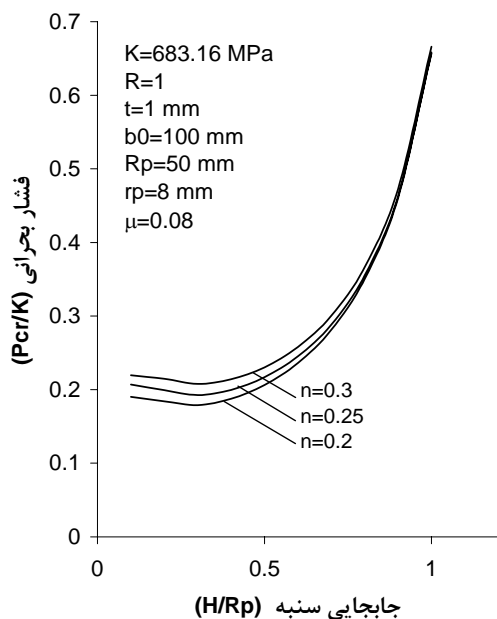
شکل ۵- نمونه قطعه پاره شده در حین فرایند



شکل ۷- اثر نسبت کشش بر فشار بحرانی سیال

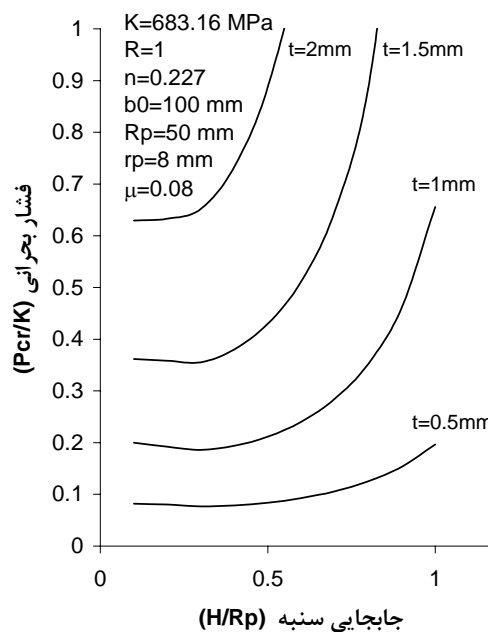
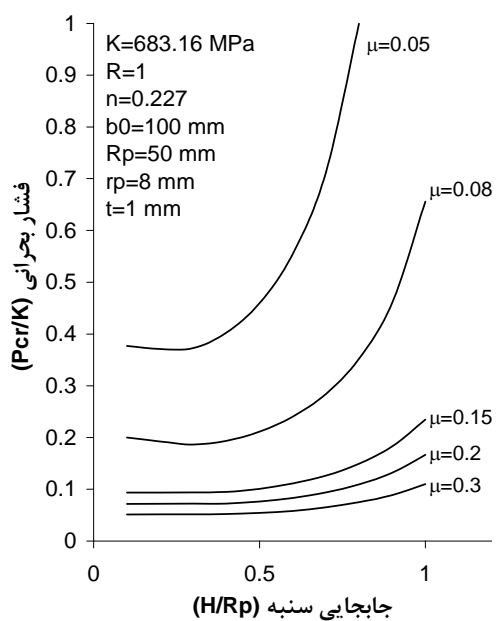


شکل ۶- مقایسه نتایج تئوری و تجربی



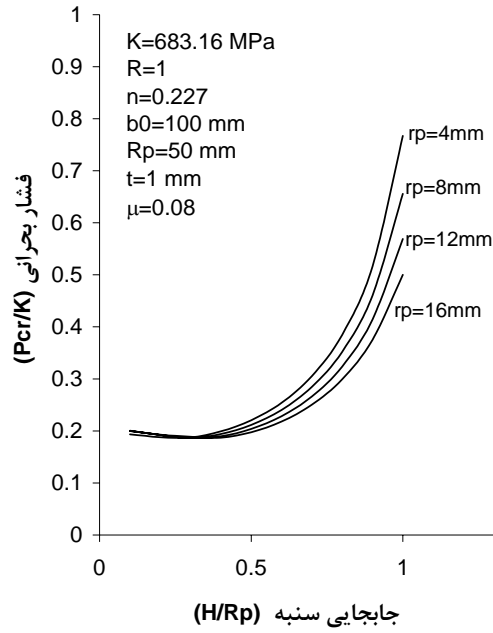
شکل ۹- اثر توان کرنش سختی بر فشار بحرانی سیال

شکل ۸- اثر ضریب ناهمسانگردی نرمال بر فشار بحرانی سیال

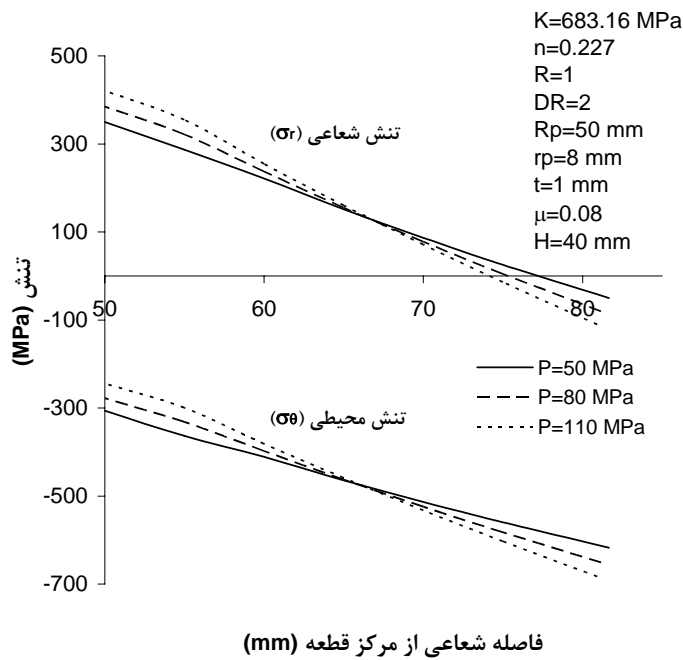


شکل ۱۱- اثر ضریب اصطکاک در ناحیه فلنج بر فشار بحرانی سیال

شکل ۱۰- اثر ضخامت ورق بر فشار بحرانی سیال

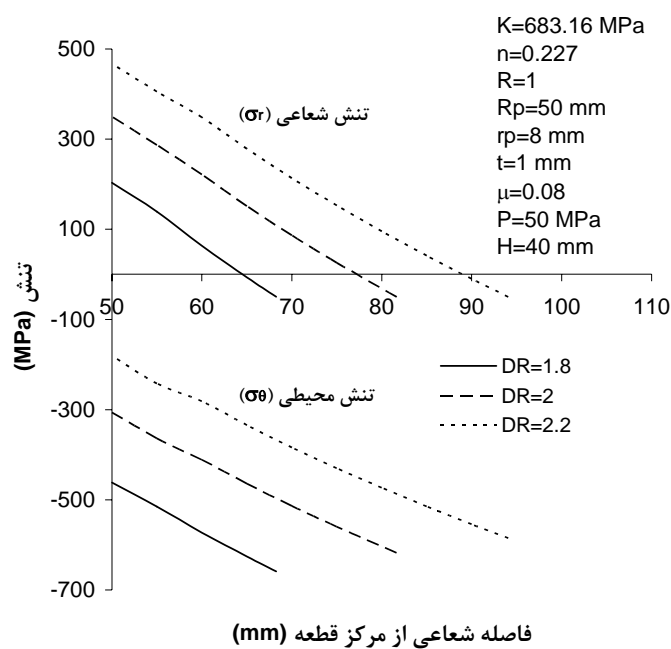


شکل ۱۲- اثر شعاع نوک سنبه بر فشار بحرانی سیال

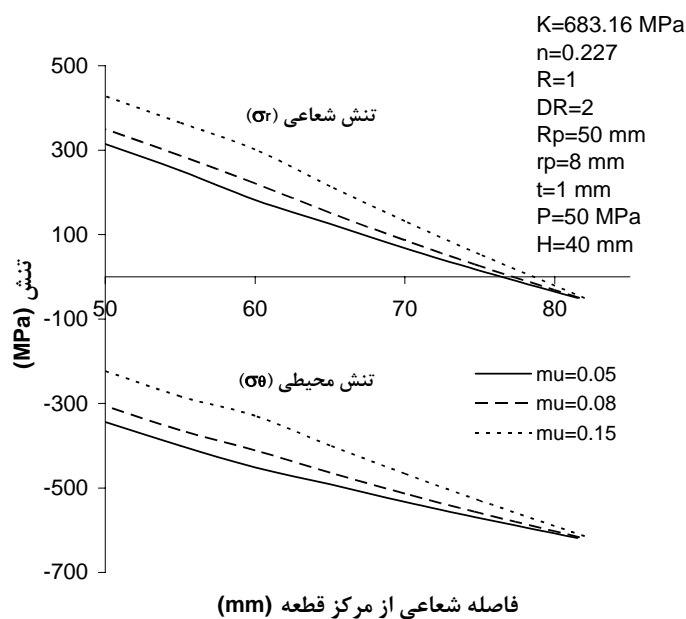


شکل ۱۳- اثر فشار سیال بر توزیع تنشهای شعاعی و محیطی





شکل ۱۴- اثر نسبت کشش بر توزیع تنشهای شعاعی و محیطی



شکل ۱۵- اثر ضریب اصطکاک در ناحیه فلنج بر توزیع تنشهای شعاعی و محیطی

## Abstract

The hydromechanical deep drawing (HDD) process is used to produce parts with intricate shapes or high drawing ratios. In this process, a fluid medium is used in a chamber as the female die. The shape of the workpiece is determined by the punch. In this paper an analytical model has been developed based on Barlat-Lain yield criterion to study the HDD process. The effects of fluid pressure, drawing ratio and frictional condition on the stress distribution of the cup have been investigated. Assuming plane strain failure, the maximum permissible fluid pressure above which rupture occurs, has been achieved. Furthermore, the influences of process and material parameters, such as drawing ratio, anisotropy parameter, strain hardening exponent, sheet thickness, friction coefficient and punch profile radius on the maximum applicable fluid pressure have been studied. The theoretical results have been compared with those obtained from the experiments.