

تخمین فشار در فرایند شکل‌دهی هیدرولیکی ورق‌های فلزی با روش تحلیل کران بالا

احمد عاصم‌پور (دانشیار)
محمدرضا امامی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

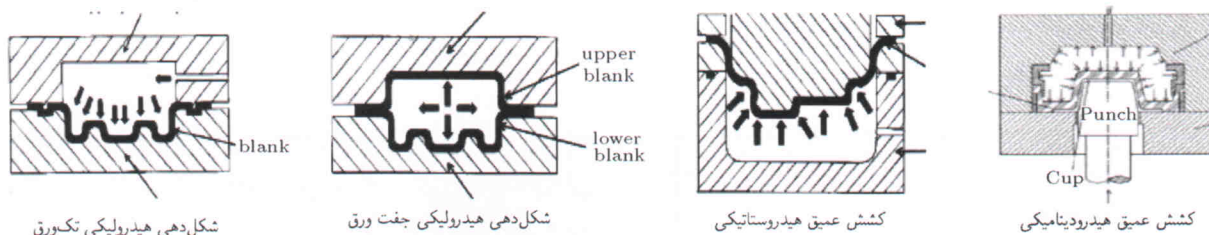
فرایند شکل‌دهی هیدرولیکی یکی از فرایندهای شکل‌دهی فلزات است که در ابتدا برای ساخت قطعات توخالی تحت فشار سیال به‌کار گرفته می‌شد. پارامتر اساسی در این فرایند کنترل فشار سیال است. این نوشتار به تخمین فشار در فرایند شکل‌دهی هیدرولیکی یک جفت ورق فلزی می‌پردازد. پس از به دست آوردن میدان سرعت سازگار سینماتیکی، با کمک روش تحلیل کران بالا، معادله‌ی فشار به دست می‌آید. اثرات پارامترهای کارسختی، اصطکاک، ابعاد قطعه‌ی خام^۱ و همچنین شرایط اتساع در داخل حفره‌ی قالب در نظر گرفته شده‌اند. معادله‌ی تخمین فشار به دست آمده برای هر نوع هندسه‌ی بی شرط آنکه بتوان هندسه‌ی لحظه‌ی ورق در منطقه‌ی حفره‌ی قالب را به‌صورت تحلیلی بیان کرد، کاربرد دارند. به‌منظور ارزیابی روابط به دست آمده، این معادلات برای تخمین فشار درمورد یک قطعه‌ی نیم‌کروی به‌کار گرفته شده‌اند. نتایج به دست آمده از این کار با نتایج تجربی موجود مقایسه شده است.

مقدمه

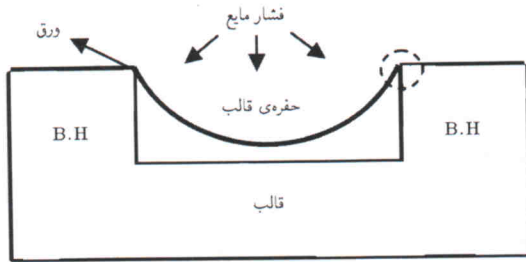
در این نوشتار به فرایند شکل‌دهی هیدرولیکی یک جفت ورق فلزی بدون درزجوش می‌پردازیم. مزیت اصلی این فرایند بر فرایند شکل‌دهی هیدرولیکی تک‌ورق در قابلیت شکل‌دهی یک جفت ورق به‌طور هم‌زمان و همچنین قابلیت شکل‌دهی قطعات پوسته‌ی ماند بازوئی تعلیق خودرو در یک قالب است. همچنین مزیت اصلی این روش بر روش‌های کشش عمیق هیدروستاتیکی و هیدرودینامیکی، استفاده از سیال به‌جای پانچ صلب و توزیع یکنواخت‌تر فشار و ضخامت در قطعه‌ی شکل‌یافته است.

تحقیقات در زمینه‌ی این روش روز به روز افزایش می‌یابد و محققان می‌کوشند تا اثرات پارامترهای مختلف بر این فرایند را به‌طور دقیق معین کنند. در این میان تحقیقات در زمینه‌ی تخمین فشار مورد نیاز برای شکل‌دهی قطعات، به‌منظور اعمال کنترل بر فرایند جایگاه ویژه‌ی دارد. همین یک مدل تحلیلی ساده برای تخمین فشار بر قطعات دلخواه در فرایند شکل‌دهی هیدرولیکی جفت‌ورق ارائه داد.^[۳] او در کار خود اثر

شکل‌دهی هیدرولیکی فرایندی جهت شکل‌دهی قطعات توخالی به‌کمک فشار سیال و قالب است. کاربرد این فرایند خصوصاً در خودروسازی کاربرد رو به افزایش دارد. مهم‌ترین مزیت این روش شکل‌دهی دست‌یابی به نسبت استحکام به وزن بالا در قطعات تولیدی در این روش است. در ابتدا این فرایند فقط برای تولید قطعات تیوب شکل به کار می‌رفت، ولی به مرور زمان قطعات ورق‌ی شکل، مانند بدنه‌ی خودرو، نیز در دامنه‌ی تولیدات این روش قرار گرفت. شکل‌دهی هیدرولیکی ورق‌های فلزی عمدتاً ۴ نوع است که شامل کشش عمیق هیدروستاتیکی، کشش عمیق هیدرودینامیکی، شکل‌دهی تک‌ورق با فشار بالای داخلی (شکل‌دهی هیدرولیکی تک‌ورق) و شکل‌دهی جفت‌ورق با فشار بالای داخلی (شکل‌دهی هیدرولیکی جفت‌ورق) است.^[۲] شکل ۱ شماتیک کلی فرایندهای شکل‌دهی هیدرولیکی ورق‌های فلزی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. شماتیک کلی فرایندهای شکل‌دهی هیدرولیکی ورق‌های فلزی.^[۲]

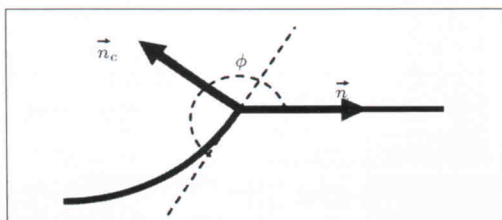


شکل ۲. شماتیک کلی یک نیمه از قالب در فرایند شکل دهی هیدرولیکی جفت ورق.

الف) تغییر شکل خمیری فلزی که روی لبه‌ی حفره‌ی قالب قرار دارد به صورت تغییر شکل برشی در سطح ناپوستگی سرعت که به صورت یک لبه‌ی تیز مدل شده است صورت می‌گیرد (از خم لبه‌ی قالب صرف نظر شده است)؛ ب) تغییر شکل خمیری ناحیه‌ی بال به صورت دوبعدی (کرنش صفحه‌یی) صورت می‌گیرد و از کرنش ضخامت در ناحیه‌ی بال صرف نظر شده است؛ ج) تغییر شکل ورق به صورت خمیری با قابلیت کارسختی در نظر گرفته شده است (از تغییر شکل کشسانی صرف نظر می‌شود)؛ د) گرفتگی ورق در ناحیه‌ی حفره‌ی قالب به صورت یکنواخت در تمام نقاط آن انجام می‌شود. برای شروع کار باید بتوان یک مدل تحلیلی برای بیان سطح لحظه‌یی ورق تغییر شکل یافته در ناحیه‌ی حفره قالب، در مختصات استوانه‌یی یافت.

$$F(r, \theta, z) = 0 \quad (1)$$

مسئله‌ی قابل توجه در فرایند شکل دهی هیدرولیکی تک ورق و جفت ورق در بیان معادله‌ی فوق برخلاف فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی [۶،۵] این است که در اینجا با پیشرفت فرایند در هر لحظه هندسه‌ی ورق تغییر می‌کند و لذا باید در هر مرحله معادله‌ی جدید برای هندسه‌ی ورق تغییر شکل یافته به دست آورد. حال آنکه در کشش عمیق هیدرومکانیکی، هندسه‌ی ورق تغییر شکل یافته تابع شکل پانچ صلب با هندسه‌ی ثابت است. به عبارت دیگر از آنجا که تابع F در هر لحظه تغییر می‌کند، مقادیر پارامترهای وابسته به تابع F می‌کنند که در حین محاسبات میدان سرعت باید آن را مد نظر داشت. با توجه به شکل‌های ۳ و ۴ فرض می‌شود که ضخامت ورق در فاصله‌ی ε از ورودی و خروجی لبه‌ی ناپوستگی سرعت برابر باشد؛ [۵، ۶]



شکل ۳. بردارهای واحد نرمال در لبه‌ی حفره‌ی قالب.

اصطکاک را مد نظر قرار داد و تنش سیلان را به صورت متوسط در نظر گرفت. ه. م. سنگ نیز در مقاله‌یی که در زمینه‌ی فرایند بالچ ارائه داد، اثر تغییر شرایط سیلان مواد به درون حفره‌ی قالب بر فشار سیال مورد نیاز را به منظور شکل دهی قطعه‌ی نیم‌کروی را مورد بررسی قرار داد. [۴] در این نوشتار محاسبات بر پایه‌ی روابط هندسی صورت گرفته است. محققان روش کران بالا را برای تخمین فشار در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی برای قطعاتی که بتوان هندسه‌ی پانچ را به صورت تحلیلی بیان کرد، به کار گرفتند. [۵] آنان در کار خود اثر پارامترهای کارسختی، اصطکاک و ابعاد قطعه‌ی خام را بر فشار سیال مورد بررسی قرار دادند و در کار خود از تغییر ضخامت ورق در ناحیه‌ی بال صرف نظر کردند. عاصم پور و باقرزاده روش کران بالا را در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی برای قطعاتی که بتوان هندسه پانچ را به صورت تحلیلی بیان کرد، به کار گرفتند [۶] و اثر کارسختی، اصطکاک و ابعاد قطعه‌ی خام را در کار خود در نظر گرفتند. آنها همچنین اثر تغییرات ضخامت در ناحیه فلنج را نیز وارد محاسبات کردند. نتیجه‌ی کار ایشان بیانگر این مسئله بود که تغییرات ضخامت در ناحیه‌ی بال تأثیر زیادی در میزان فشار سیال مورد نیاز برای شکل دهی ندارد.

در این نوشتار روش کران بالا برای تحلیل فرایند شکل دهی هیدرولیکی جفت ورق فلزی به کار گرفته شده است. از تغییرات ضخامت ورق در ناحیه‌ی بال صرف نظر شده است. تفاوت کار حاضر با کار تجربی موجود [۶،۵] در چند مسئله است: اولاً در اینجا پانچ صلب وجود ندارد و سیال به عنوان پانچ عمل می‌کند. لذا هندسه‌ی لحظه‌یی ورق در ناحیه‌ی حفره‌ی قالب که تابع سیال است، در هر لحظه متغیر است؛ ثانیاً در کشش عمیق هیدرودینامیکی پس از چسبیدن ورق به سطح پانچ صلب، فرض بدون تغییر شکل ماندن ورق چسبیده به پانچ در مراحل بعدی فرایند وجود دارد، ولی در اینجا ورق در ناحیه‌ی حفره‌ی قالب و در تماس با سیال دچار گرفتگی می‌شود که باید آن را در محاسبات انرژی مصرفی فرایند وارد کرد.

برای محاسبه‌ی فشار، ابتدا روابط مربوط به میدان سرعت سینماتیکی استخراج شده و سپس با به کارگیری روش تحلیلی کران بالا و بهینه‌سازی انرژی، میزان فشار مورد نیاز شکل دهی به دست آمده است. اثرات پارامترهای کارسختی، اصطکاک و ابعاد قطعه‌ی خام بررسی شده است. نتایج حاصل با نتایج تجربی موجود [۴] مقایسه شده است.

میدان سرعت سازگار سینماتیکی در ناحیه‌ی بال

شکل ۲ شماتیک کلی مقطع نیمه از قالب در فرایند شکل دهی هیدرولیکی جفت ورق را نشان می‌دهد. برای تجزیه و تحلیل فرایند شکل دهی هیدرولیکی فرض‌های ساده‌کننده‌ی زیر در نظر گرفته می‌شود:

به عنوان تقریب و برای ساده سازی، اصطلاحات $a_i(r)$ و $b_i(r)$ به صورت خطی انتخاب می شوند یعنی $a_i(r) = a_i r$ و $b_i(r) = b_i r$. بنابراین مؤلفه های سرعت به صورت ساده تر زیر درمی آید.

$$u_r = \frac{C(\theta)}{r} + \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cdot \cos(i\theta) + \sum_{i=1}^{\infty} b_i \cdot \sin(i\theta)$$

$$u_\theta = - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_i}{i} \cdot \sin(i\theta) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{b_i}{i} \cdot \cos(i\theta) + b_0 \cdot r \quad (5)$$

به این ترتیب میدان سرعت سازگار سینماتیکی برای شکل دهی هیدرولیکی جفت ورق، برای قطعات با شکل دلخواه دو یا سه بعدی که در آنها هندسه ی لحظه ی ورق تغییر شکل یافته در حین فرایند به صورت تحلیلی قابل بیان باشد، به دست می آید. معادلات ۵ هم شرط تراکم ناپذیری و هم شرط مرزی را ارضا می کنند. بنابراین معادلات ۵ یک میدان سازگار سینماتیکی به شمار می روند. تعیین میدان نرخ کرنش، کرنش و تنش در ناحیه ی بال نیز با مشتق گیری از میدان سرعت چنین انجام می شود:

$$\epsilon_r^* = \frac{du_r}{dr} \quad \epsilon_{ij}^* = \int \dot{\epsilon}_{ij}^* \cdot d(\text{time})$$

$$\epsilon_\theta^* = \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \quad \sigma = k \cdot (\epsilon^* + \epsilon_0)^n \quad (6)$$

تحلیل کران بالا^۳

پس از به دست آوردن میدان سرعت، نوبت اعمال این میدان در معادلات مربوط به تحلیل کران بالا است. اگر σ_{ij}^* میدان تنش واقعی، $\dot{\epsilon}_{ij}^*$ میدان نرخ کرنش مربوط به آن و σ_{ij}^* میدان تنش تسلیم در حجم ماده باشد، آنگاه رابطه ی ۷ برقرار است: [۷]

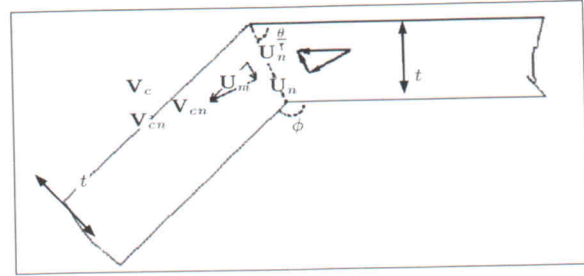
$$\sigma_{ij}^* \cdot \dot{\epsilon}_{ij}^* \leq \sigma_{ij}^* \cdot \dot{\epsilon}_{ij}^* \quad (7)$$

با انتگرال گیری روی حجم و اعمال نظریه ی دیورژانس، نامعادله ی ۷ به رابطه ی کلاسیک کران بالای شماره ۸ تبدیل می شود. [۸]

$$\int_{S_u} T_i \cdot U_i^* \cdot dS_u \leq \int_V \sigma_{ij}^* \cdot \dot{\epsilon}_{ij}^* \cdot dV - \int_{S_T} T_i \cdot U_i^* \cdot dS_T \quad (8)$$

در بررسی فرایند شکل دهی هیدرولیکی جفت ورق، اصطلاح سمت چپ نامعادله ی ۸ بیانگر کار انجام شده توسط فشار مایع است. اصطلاح اول سمت راست نامعادله بیانگر نرخ انرژی تغییر شکل داخلی در ناحیه ی بال و حفره ی شامل موارد زیر است:

۱. نرخ انرژی تغییر شکل داخلی مصرفی در ناحیه ی بال، روی حجم V_{fl} (حجم ماده ی زیر ورق گیر) که بین لبه ی ناپوستگی سرعت و لبه ی خارجی قطعه ی خام قرار دارد.



شکل ۴. لبه ی ناپوستگی سرعت و مؤلفه های سرعت در روی لبه ی حفره ی قالب.

لذا با توجه به روابط مثلثاتی می توان گفت که لبه ی ناپوستگی سرعت نیمساز زاویه ی ϕ است. بنابراین شیب لبه ی ناپوستگی سرعت چنین محاسبه می شود:

$$\tan\left(\frac{\phi}{2}\right) = \frac{\sin\phi}{1 + \cos\phi} = \frac{\sqrt{1 - \cos\phi}}{\sqrt{1 + \cos\phi}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial \theta}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial \theta}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2} - \frac{\partial F}{\partial z}} \quad (2)$$

با نوشتن شرط سازگاری سینماتیکی در روی صفحه ی ناپوستگی سرعت $(|u_n| = |v_c|)$ و شرط تراکم ناپذیری $(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{r} u_r + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} = 0)$ مقادیر مؤلفه های سرعت روی ناحیه ی بال $(u_\theta$ و $u_r)$ به دست می آید: [۵]

$$u_r = \frac{C(\theta)}{r} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_i(r)}{r} \cos(i\theta) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{b_i(r)}{r} \sin(i\theta)$$

$$u_\theta = - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{da_i(r)}{dr} \frac{\sin(i\theta)}{i} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{db_i(r)}{dr} \frac{\cos(i\theta)}{i} + b_0(r) \quad (3)$$

پارامترهای a_i و b_i پارامترهای بهینه سازی اند که برای تخمین فشار فرایند به کار می روند. با اعمال شرط مرزی سازگاری سینماتیکی، مقدار c به دست می آید:

$$C(\theta) = \left[\frac{r \cdot V_c}{\left(\frac{\partial F}{\partial r}\right)} \right] \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial \theta}\right)^2} - r \right]$$

$$\left[\sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_i(r)}{r} \cdot \cos(i\theta) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{b_i(r)}{r} \cdot \sin(i\theta) \right] - \left[\frac{\left(\frac{\partial F}{\partial \theta}\right)}{\left(\frac{\partial F}{\partial r}\right)} \right] \cdot \left[- \sum_{i=1}^{\infty} \frac{da_i(r)}{dr} \frac{\sin(i\theta)}{i} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{db_i(r)}{dr} \frac{\cos(i\theta)}{i} + b_0(r) \right] \quad (4)$$

۲. نرخ انرژی تغییر شکل داخلی مصرفی در ناحیه‌ی حفره‌ی قالب، روی حجم V_{ca} (حجم ماده در ناحیه‌ی حفره‌ی قالب) که ناشی از کشش در ناحیه‌ی حفره‌ی قالب است.

اصطلاح دوم نامعادله در سمت راست نامعادله‌ی انتگرال سطحی شامل موارد زیر است:

۱. نرخ انرژی اضافی به علت وجود ناپیوستگی سرعت مماسی ΔU^* روی سطح ناپیوستگی سرعت (S_γ) با حداکثر تنش برشی ممکن K . در حالت کلی ممکن است m سطح ناپیوستگی سرعت وجود داشته باشد.

۲. نرخ انرژی اصطکاکی مصرفی در محل تماس قطعه‌ی کار با قالب که با S_f نشان داده می‌شود. چون در فرایندهای بدون درزجوش، دو ورق روی هم حرکت می‌کنند، علاوه بر اصطکاک میان ورق‌ها و قالب یک نوع سطح اصطکاکی هم بین دو ورق وجود دارد (از آنجا که در حالتی که دو طرف قالب متقارن‌اند، حرکت نسبی بین ورق‌ها ناچیز است؛ از اصطکاک بین ورق‌ها در این شرایط می‌توان صرف‌نظر کرد).

با توجه به موارد ذکر شده، نامعادله‌ی ۸ به نامعادله‌ی ۹ تبدیل می‌شود:

$$\frac{P.V_d}{T} \leq \int_{V_{fl}} \sigma_{ij}^* \cdot \dot{\epsilon}_{ij}^* \cdot dV_{fl} + \int_{V_{ca}} \sigma_{ij}^* \cdot \dot{\epsilon}_{ij}^* \cdot dV_{ca} + \sum_{i=1}^m \int_{S_{\gamma_i}} (K \cdot \Delta U_i^* \cdot dS_{\gamma_i}) + \int_{S_f} \mu \cdot P_o \cdot U^* \cdot dS_f \quad (9)$$

در محاسبه‌ی V_d باید میزان کشش در ناحیه‌ی حفره‌ی قالب را نیز در نظر گرفت، زیرا اصطلاح چپ نامعادله بیانگر کل کار انجام شده است. لذا V_d کل افزایش فضای داخلی حفره‌ی قالب با در نظر گرفتن کشش است. برای محاسبه‌ی فشار کل لازم، نامعادله‌ی ۹ باید برای هر دو نیمه‌ی قالب به کار گرفته شود. برای تأمین فشار آب‌بندی قالب باید داشته باشیم:

$$P_o \cdot S_{P_o} > P \cdot S_{eff} \quad (10)$$

لذا حداقل فشار آب‌بندی مورد نیاز عبارت است از:

$$P_o = \frac{1}{S_{P_o}} (P \cdot S_{eff}) \quad (11)$$

با جایگذاری معادله‌ی ۱۱ در نامعادله‌ی ۹، رابطه‌ی تخمین فشار

شکل‌دهی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$P_{Max} = \frac{T}{V_d} \left(\int_{V_{fl}} \sigma_{ij}^* \cdot \dot{\epsilon}_{ij}^* \cdot dV_{fl} + \int_{V_{ca}} \sigma_{ij}^* \cdot \dot{\epsilon}_{ij}^* \cdot dV_{ca} + \sum_{i=1}^m \int_{S_{\gamma_i}} (K \cdot \Delta U_i^* \cdot dS_{\gamma_i}) + \int_{S_f} \frac{\mu}{S_{P_o}} (P_{Max} \cdot S_{eff}) \cdot U^* \cdot dS_f \right) \quad (12)$$

در بیان معادله‌ی ۱۲، از آنجا که معادله را به صورت لحظه‌ی حل می‌کنیم، می‌توان P_{Max} را ثابت فرض کرد و از انتگرال خارج کرد. همچنین فرض می‌شود که به ازای هر افزایش Z (به عنوان مراحل محاسبه‌ی فشار)، زمان به اندازه‌ی $g(z)$ افزایش باید (یعنی $T = g(z)$). لذا خواهیم داشت:

$$P_{Max} = \frac{g(z)}{V_d} \left(\int_{V_{fl}} \sigma_{ij}^* \cdot \dot{\epsilon}_{ij}^* \cdot dV_{fl} + \int_{V_{ca}} \sigma_{ij}^* \cdot \dot{\epsilon}_{ij}^* \cdot dV_{ca} + \sum_{i=1}^m \int_{S_{\gamma_i}} (K \cdot \Delta U_i^* \cdot dS_{\gamma_i}) \right) \frac{1}{\left(1 - \frac{g(z)}{V_d} \mu \int_{S_f} \frac{U^* \cdot S_{eff}}{S_{P_o}} \cdot dS_f \right)} \quad (13)$$

با توجه به شکل ۴، ناپیوستگی سرعت به صورت معادله‌ی ۱۴ به دست می‌آید:

$$\Delta U^* = \sqrt{\left(V_c \cdot \sin\left(\frac{\phi}{\psi}\right) \right)^2 + u_r^2 + u_\theta^2} \quad (14)$$

همچنین المان سطح در ناپیوستگی سرعت به صورت معادله‌ی ۱۵ به دست می‌آید. [۵]

روش حل معادلات

برای حل معادلات به صورت لحظه‌ی عمل می‌کنیم و میزان فشار سیال در هر مرحله را ثابت در نظر می‌گیریم. حجم ورق موجود در ناحیه‌ی حفره‌ی قالب در هر مرحله برابر است با مجموع حجم مواد موجود در مرحله‌ی قبل، و حجم مواد سیلان یافته به حفره‌ی قالب. با فرض آنکه اتساع ورق در ناحیه‌ی حفره‌ی قالب تأثیری بر میزان جریان مواد به درون قالب ندارد، برای محاسبه‌ی میدان سرعت در ناحیه‌ی بال می‌توان اثر اتساع ورق در هر مرحله از فرایند را بر هندسه‌ی لحظه‌ی ورق نادیده گرفت.

الگوریتم تخمین فشار سیال در فرایند شکل‌دهی هیدرولیکی جفت‌ورق در شکل ۵ نشان داده شده است. برای تخمین فشار سیال

$$dS_{\gamma} = \frac{\sqrt{r} t r \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial \theta}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2} - \left(\frac{\partial F}{\partial r}\right) \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial \theta}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial \theta}\right)^2}} . d\theta \quad (15)$$

تحلیلی امری اساسی در این روش حل است.

تغییر حجم فضای حفره‌ی قالب که سیال ورودی را در خود جای می‌دهد ناشی از دو مسئله است: جریان یافتن مواد به درون حفره‌ی قالب از ناحیه‌ی بال، و اتساع ورق در ناحیه‌ی حفره‌ی قالب. همان گونه که در تعیین میدان سرعت بال بیان شد، از آنجا که اتساع ورق در ناحیه‌ی حفره تأثیری بر میدان سرعت در ناحیه‌ی بال ندارد، در تعیین میدان سرعت باید حجم سیال ناشی از سیلان مواد ورق از ناحیه‌ی بال به درون حفره‌ی قالب را در محاسبات وارد کنیم. از پارامتر γ برای تخمین اثر میزان اتساع ورق در تغییر حجم حفره‌ی قالب استفاده می‌کنیم؛ این پارامتر بیانگر درصد افزایش حجم حفره‌ی قالب ناشی از اتساع ورق در ناحیه‌ی حفره‌ی قالب است. یعنی:

$$V_i' = V_i - \gamma \times V_i \quad (16)$$

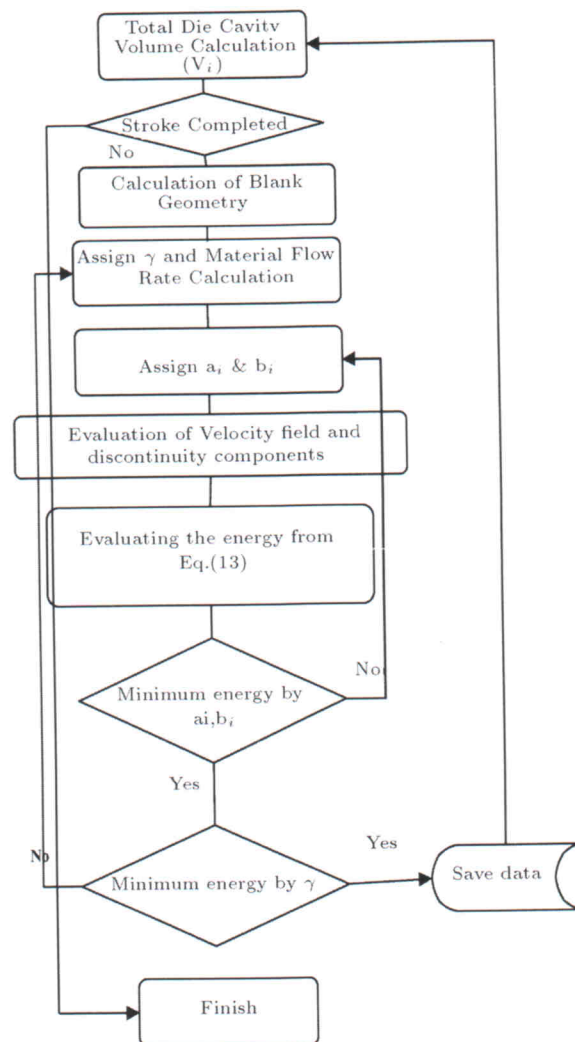
که در آن V_i' افزایش حجم فضای داخل حفره‌ی قالب ناشی از جریان مواد از ناحیه‌ی بال به درون حفره‌ی قالب است. به این ترتیب افزایش حجم سیال درون حفره ناشی از اتساع ورق در حفره‌ی قالب قابل تعیین است.

$$V_i'' = V_i - V_i' \quad (17)$$

V_i'' افزایش حجم حفره‌ی قالب ناشی از اتساع ورق در حفره‌ی قالب است. با توجه به V_i'' می‌توان سرعت مواد در خروجی لبه‌ی ناپیوستگی سرعت (V_c) را به دست آورد و به کمک روابط گفته شده، میدان سرعت در ناحیه‌ی بال و سطح ناپیوستگی سرعت را به دست آورد.

با معلوم بودن مقادیر ضریب اصطکاک و ضریب کارسختی و سایر ورودی‌های مسئله می‌توان مقدار نرخ انرژی مصرفی در ناحیه‌ی بال، نرخ انرژی اصطکاکی و نرخ انرژی اضافی روی سطح ناپیوستگی سرعت را با محاسبه‌ی اصطلاحات معادله‌ی ۱۲ به دست آورد.

برای تعیین نرخ انرژی مصرفی ناشی از اتساع درون حفره‌ی قالب لازم است نرخ کرنش ناشی از اتساع ورق در حفره‌ی قالب محاسبه شود. نرخ کرنش با توجه به تغییر حجم سیال ناشی از اتساع (V_i'') یا به عبارت دیگر تغییر حجم فضای حفره از V_i' به V_i به این صورت محاسبه می‌شود که هندسه‌ی لحظه‌ی ورق در ناحیه‌ی حفره برای حجم V_i و V_i' به دست می‌آید و از طریق این تغییر هندسه نرخ کرنش به دست می‌آید. با معلوم بودن نرخ کرنش و زمان هر مرحله تغییر شکل، کرنش و به تبع آن تنش ناشی از اتساع در حفره‌ی قالب در هر مرحله



شکل ۵. الگوریتم حل مسئله و تخمین فشار سیال در فرایند شکل‌دهی هیدرولیکی جفت‌ورق بدون درزجوش.

مرحله به مرحله عمل کرده و فرض می‌کنیم مدت زمان هر مرحله T ثانیه باشد.

برای تعیین میدان سرعت در ناحیه‌ی بال باید شرط مرزی معینی وجود داشته باشد. در اینجا ما دبی (Q) پمپی که سیال را به درون حفره‌ی قالب وارد می‌کند به عنوان ورودی مسئله در نظر می‌گیریم. در آغاز فرایند ورق تخت روی دهانه‌ی قالب قرار دارد. پس از یک مرحله حجمی معادل $V_i = Q \times T$ وارد حفره‌ی قالب می‌شود. با توجه به حجم سیال داخل حفره‌ی قالب (V_i) می‌توان معادله‌ی تحلیلی سطح ورق تغییر شکل یافته را به دست آورد. تخمین معادله‌ی

بدون درزجوش متقارن (دو حفره متقارن) است؛ چراکه در اینجا نیز حرکت نسبی بین دو ورق وجود ندارد. تنها نکته‌ی قابل توجه در اینجا تغییر ساختار ورق در ناحیه‌ی جوش است.

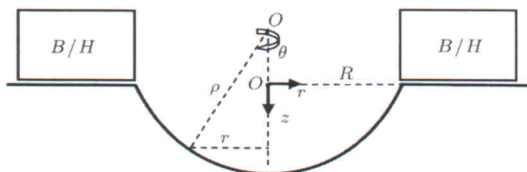
ارزیابی معادلات و بررسی نتایج

به علت عدم وجود نتایج تجربی برای قطعات نیم‌کروی در فرایند شکل‌دهی هیدرولیکی جفت‌ورق، به فرایند شکل‌دهی هیدرولیکی تک‌ورق می‌پردازیم. به‌عنوان یک مثال ساده، یک قطعه‌ی نیم‌کروی را در نظر می‌گیریم. شماتیک کلی این فرایند در شکل ۶ آورده شده است. یک تقریب نزدیک به واقعیت هندسه‌ی لحظه‌ی حفره‌ی قالب را به‌صورت قسمتی از یک نیم کره نشان می‌دهد که شعاع آن در هر لحظه تغییر می‌کند. در این فرایند شعاع لحظه‌ی کره از بی‌نهایت تا شعاع حفره‌ی قالب کاهش می‌یابد و در لحظه‌ی آخر ناگهان کل سطح ورق به حفره می‌چسبد؛ لذا اصطکاکی بین ورق و حفره‌ی قالب وجود ندارد. مشخصات قطعه و فرایند لازم برای شکل‌دهی یک قطعه‌ی نیم‌کروی در جدول ۱ آورده شده است. معادله‌ی کره در مختصات استوانه‌ی چینی بیان می‌شود:

$$f(r, \theta, z) = r^2 + z^2 - \rho^2 = 0 \quad (18)$$

در ادامه، مقایسه‌ی نتایج به دست آمده در تخمین فشار سیال و ضخامت ورق در مرکز حفره‌ی قالب با روش کران بالا را با نتایج تجربی نشان می‌دهد.^[۴] لازم به ذکر است که تخمین فشار در فرایند شکل‌دهی هیدرولیکی در شرایط مختلف برای جریان ورق به درون حفره‌ی قالب است، که معادلات آن فقط برای یک قطعه‌ی نیم‌کروی به دست آمده است و این معادلات عمومی نیستند.

نمودار ۱ میزان فشار سیال مورد نیاز در فرایند را برای حالتی که به قطعه‌ی خام اجازه سیلان داده شده است، نشان می‌دهد. اثر کارسختی باعث افزایش فشار سیال مورد نیاز می‌شود اما، از طرف دیگر سطح زیر ورق‌گیر در حال کم شدن است که این مسئله باعث کاهش انرژی مصرفی زیر ورق‌گیر و در نتیجه کاهش فشار سیال مورد نیاز با توجه به این پارامتر می‌شود. مشابه آنچه در فرایند کشش عمیق مطرح است، در اینجا نیز در ابتدای فرایند اثر کارسختی بیشتر است و لذا فشار سیال



شکل ۶. شماتیک کلی قالب و ورق تغییر شکل یافته برای یک قطعه‌ی نیم‌کروی در شکل‌دهی هیدرولیکی تک‌ورق.

به دست می‌آید. حال می‌توان نرخ انرژی مصرفی ناشی از اتساع را به دست آورد.

اما با توجه به طبیعت فرایندها، یک فرایند به‌گونه‌ی انجام می‌شود که انرژی مصرفی کمینه شود. برای بهینه‌سازی انرژی لازم است از یک الگوریتم بهینه‌سازی استفاده کنیم. پارامترهای بهینه‌سازی در اینجا عبارت‌اند از γ, a_i, b_i که بهینه‌سازی روی آنها چنان انجام می‌شود که انرژی مصرفی (سمت راست نامعادله‌ی ۹) کمینه شود. با استفاده از مقادیر به دست آمده برای پارامترهای بهینه‌سازی به کمک رابطه‌ی ۱۳ می‌توان فشار سیال را به دست آورد.

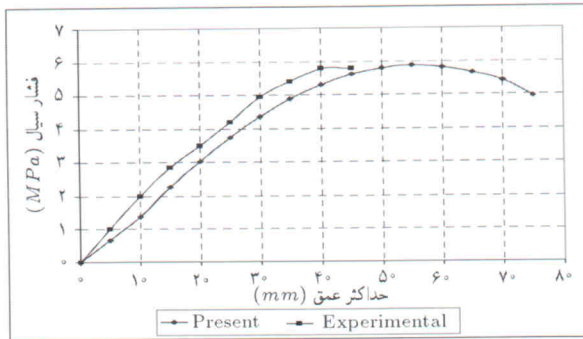
در حل معادلات، برای مشتق‌گیری عددی (به دست آوردن میدان نرخ کرنش از میدان سرعت) از روش مشتق‌گیری جزئی و برای انتگرال‌گیری از روش گاوس-لواندر چهار نقطه‌ی استفاده می‌شود.^[۸] همچنین کمینه‌سازی انرژی کل مصرفی با روش بهینه‌سازی Nelder-Mead و با در نظر گرفتن سه پارامتر آزاد صورت می‌گیرد.^[۸]

با تکرار این الگوریتم حل در چند مرحله تا اتمام فرایند، می‌توان میزان فشار مورد نیاز سیال در کل فرایند شکل‌دهی هیدرولیکی جفت‌ورق بدون درزجوش را برای کلیه‌ی قطعاتی که بتوان هندسه‌ی لحظه‌ی ورق تغییر شکل یافته را با رابطه‌ی تحلیلی نمایش داد و نمودار تغییرات فشار سیال را براساس کورس و زمان تعیین کرد.

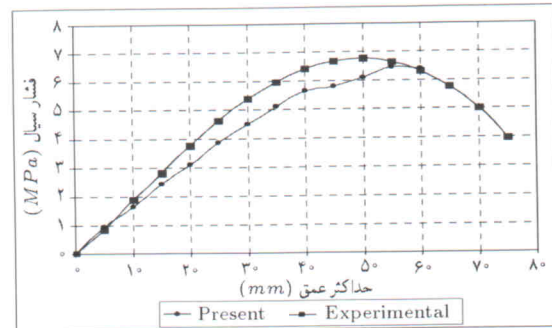
تخمین فشار سیال برای شکل‌دهی قطعه‌ی نیم‌کروی

برای تأیید معادلات به دست آمده، این معادلات را به منظور تخمین فشار در فرایند شکل‌دهی هیدرولیکی تک‌ورق به کار می‌گیریم. مسئله‌ی که باید به آن اشاره کرد این است که تفاوت شکل‌دهی هیدرولیکی تک‌ورق با شکل‌دهی هیدرولیکی جفت‌ورق برای تخمین فشار سیال در این است که شکل‌دهی هیدرولیکی تک‌ورق لازم نیست انرژی فرایند (سمت راست نامعادله‌ی ۹) و حجم سیال (در رابطه ۹)، برای در نظر گرفتن جفت‌ورق و دو حفره‌ی قالب، دو برابر شود. ولی در اینجا بر خلاف شکل‌دهی هیدرولیکی جفت‌ورق دو سطح اصطکاکی در زیر و روی ورق با سطح ورق‌گیر در تماس‌اند. که این مسئله باعث دو برابر شدن اصطکاک می‌شود. این دو مسئله باید در محاسبات فشار مدنظر قرار گیرد. همچنین در شکل‌دهی هیدرولیکی جفت‌ورق، از آنجا که اصطکاک بین ورق و قالب به دلیل توانایی انجام کار روی سطح قالب معمولاً کم‌تر از اصطکاک ورق با ورق است، با توجه به میزان حرکت نسبی بین دو ورق، انرژی اصطکاکی به دست آمده ممکن است کم‌تر یا بیشتر از چیزی باشد که برای شکل‌دهی هیدرولیکی تک‌ورق به دست آوردیم.

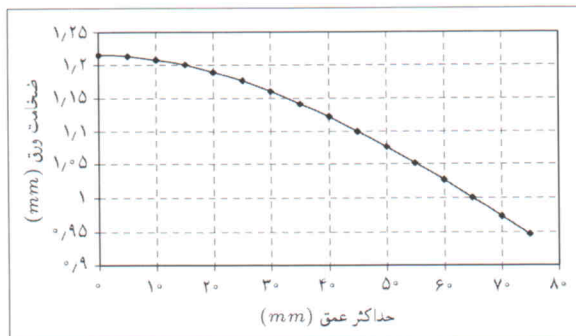
فرایندهای شکل‌دهی هیدرولیکی جفت‌ورق با درزجوش در تخمین فشار سیال بسیار شبیه به فرایندهای شکل‌دهی هیدرولیکی جفت‌ورق



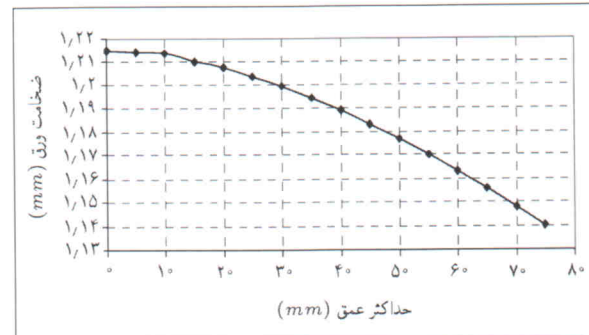
نمودار ۳. مقایسه‌ی فشار موردنیاز سیال برای شکل‌دهی قطعه‌ی نیم‌کروی در شرایطی که اجازه‌ی سیلان به قطعه‌ی خام داده نشده است. [۴]



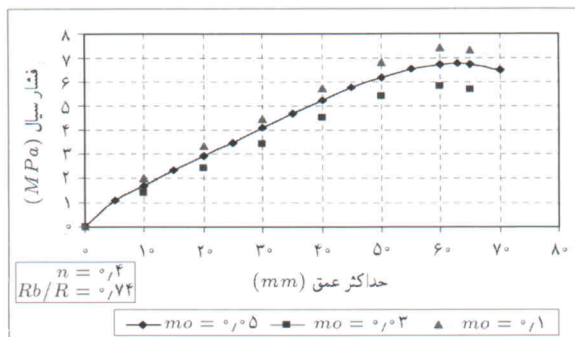
نمودار ۱. مقایسه‌ی فشار موردنیاز سیال جهت شکل‌دهی قطعه نیم‌کروی در شرایطی که اجازه‌ی سیلان به قطعه‌ی خام داده شده است. [۴]



نمودار ۴. ضخامت مرکز ورق نیم‌کروی تغییر شکل‌یافته در شرایطی که اجازه‌ی سیلان به قطعه‌ی خام داده نشده است (کار حاضر).



نمودار ۲. ضخامت مرکز ورق نیم‌کروی تغییر شکل یافته در شرایطی که اجازه‌ی سیلان به قطعه‌ی خام داده شده است (کار حاضر).



نمودار ۵. اثر ضریب اصطکاک بر فشار مورد نیاز سیال (کار حاضر).

نمودارهای ۵ تا ۷ اثر پارامترهای اصطکاک، ابعاد قطعه‌ی خام، و توان کارسختی را بر فشار سیال نشان می‌دهند. نمودار ۵ نشان می‌دهد که با افزایش ضریب اصطکاک، فشار مورد نیاز سیال افزایش می‌یابد.

مورد نیاز افزایش می‌یابد اما با پیشرفت فرایند اثرات این دو پارامتر به تعادل رسیده و در نهایت اثر کاهش سطح مقطع زیر ورق‌گیر غلبه کرده و فشار مورد نیاز رو به کاهش می‌گذارد.

نمودار ۲ ضخامت مرکز ورق تغییر شکل یافته‌ی نیم‌کروی در طول فرایند را نشان می‌دهد. واضح است که با پیشرفت فرایند ضخامت ورق کاهش می‌یابد. می‌توان از مشخصات کششی ورق به‌عنوان ملاکی برای تعیین پارگی ورق استفاده کرد.

نمودارهای ۳ و ۴ به‌ترتیب نشانگر فشار سیال و ضخامت مرکز قطعه‌ی نیم‌کروی در شرایطی است که اجازه‌ی سیلان به ورق داده نشده است (اتساع). چنان که مشاهده می‌شود با اجازه ندادن به سیلان ورق به‌علت حذف انرژی مصرفی در ناحیه‌ی بال میزان فشار سیال کاهش می‌یابد اما میزان عمق قابل دستیابی با توجه به کاهش ضخامت ناشی از اتساع ورق کم‌تر می‌شود.

جدول ۱. مشخصات قطعه و فرایند برای شکل‌دهی یک قطعه‌ی نیم‌کروی.

دبی سیال ورودی به حفره قالب Q (mm ³ /s)	ضخامت ورق t (mm)	ضریب اصطکاک μ		شعاع قطعه‌ی خام Rb (mm)	شعاع نیم‌کره R (mm)	تنش معادل (MPa)
		ورق با ورق‌گیر	ورق یا ورق			
۴۰۰۰	۱٫۲۱۵	۰٫۱	۰٫۰۵	۱۲۰	۸۹	$۷۵۰ \epsilon^{۰.۴}$

تغییر شکل یافته در ناحیه‌ی حفره‌ی قالب با معادلات تحلیلی است، که با داشتن این معادله در هر لحظه از فرایند می‌توان میدان سرعت در ناحیه‌ی بال و نیز میزان اتساع در حفره‌ی قالب را تخمین زد. شکل نیم‌کره تقریب نسبتاً خوبی برای برازش هندسه‌ی لحظه‌ی ورق تغییر شکل یافته در ناحیه‌ی حفره‌ی قالب، برای تولید قطعات کروی و نیز کلیه‌ی قطعاتی که در آنها دهانه‌ی ورودی قالب به صورت دایره است.

معادلات مطرح شده برای تخمین فشار سیال در مورد تمامی قطعاتی که بتوان هندسه‌ی لحظه‌ی ورق در حین تغییر شکل را به صورت تحلیلی بیان کرد، کاربرد دارد. این معادلات برای تخمین فشار در فرایند شکل‌دهی هیدرولیکی تک‌ورق به شکل نیم‌کره به کار گرفته شد. نتایج به دست آمده اختلاف قابل قبولی را با نتایج تجربی نشان می‌دهند، که با حذف فرض‌های ساده‌کننده می‌توان به جواب‌های دقیق‌تر دست یافت. هنگامی که اجازه‌ی سیلان به ورق داده شده است، به علت تأثیر روابط تحلیل کران بالا، مقدار فشار تخمینی بیشتر از مقدار تجربی به دست می‌آید. ولی در شرایطی که به ورق اجازه‌ی سیلان داده نشده است، میدان سرعت حذف شده و صرفاً اتساع در حفره‌ی قالب وجود دارد؛ بنابراین میزان فشار حاصله کم‌تر از مقادیر تجربی به دست می‌آید.

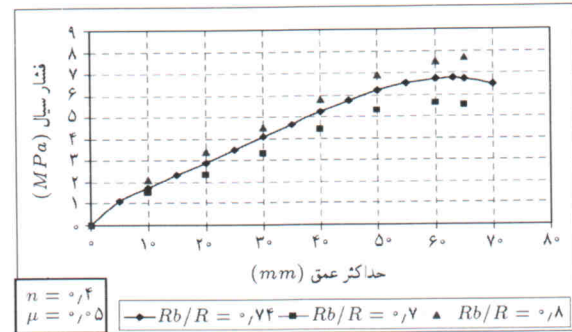
با افزایش ضریب اصطکاک، میزان فشار مورد نیاز سیال برای شکل‌دهی افزایش می‌یابد، لذا با انجام عملیات سطحی می‌توان به فشار سیال کم‌تری نیاز پیدا کرد. از سوی دیگر، با افزایش نمای کار سختی میزان فشار مورد نیاز سیال کم‌تر شده و نقطه‌ی بیشینه‌ی منحنی فشار به سمت راست کشیده می‌شود، که این مسئله با این واقعیت که فلزات آیل شده نیاز به فشار کم‌تری برای شکل‌دهی دارند، تطابق دارد. در مورد ابعاد قطعه‌ی خام نیز مشابه فرایند کشش عمیق، افزایش ابعاد قطعه‌ی خام باعث افزایش اصطکاک ناحیه‌ی بال و نیز کارآید ال تغییر شکل ناحیه‌ی بال می‌شود، لذا فشار مورد نیاز سیال برای شکل‌دهی افزایش می‌یابد.

پانوش

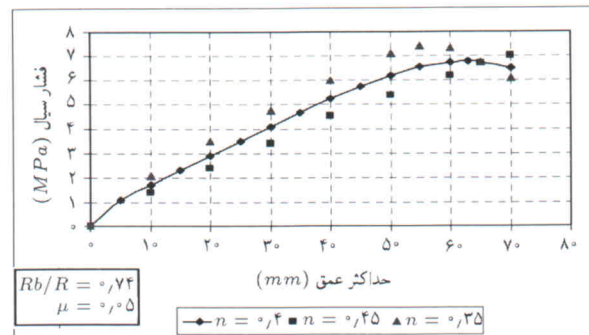
1. blank
2. upper bound

منابع

1. Shin, Y.S., Kim, H.Y., Jeon, B.H., Oh, S.I., "Prototype Tryout and Die Design for Automotive Parts Using Welded Blank Hydroforming", *Journal of Material Processing Technology*, **130-131**, PP. 121-127 (2002).
2. Thiruvurudchelvan, S., Lewis, W., "A Note on



نمودار ۶. اثر ابعاد قطعه‌ی خام بر فشار مورد نیاز سیال (کار حاضر).



نمودار ۷. اثر توان کارسختی بر فشار مورد نیاز سیال (کار حاضر).

همچنین با افزایش ابعاد قطعه‌ی خام به دلیل افزایش سطح بال و در نتیجه افزایش انرژی مصرفی در این ناحیه، فشار سیال نیز افزایش می‌یابد، این مسئله در نمودار ۶ نشان داده شده است. چنان که در نمودار ۷ آمده است مواد با داکتیلیته‌ی بالاتر به فشار کم‌تری برای شکل‌دهی نیاز دارند.

نتیجه‌گیری

مسئله‌ی اساسی برای تخمین فشار سیال در فرایند شکل‌دهی هیدرولیکی جفت‌ورق و تک‌ورق با روش کران بالا، برازش هندسه‌ی لحظه‌ی ورق

Hydroforming with Constant Fluid Pressure", *Journal of Material Processing Technology*, **88**, PP. 51-56 (1999).

3. Hein, P., Vollertsen, F., "Hydroforming of Sheet Metal Pairs", *Journal of Material Processing Technology*, **87**, PP. 154-164, (1999).
4. Shang, H.M., Qin, S., Tay, C.J., "Hydroforming Sheet Metal with Intermittent Changes in the Draw-in Condition of Flange", *Journal of Material Processing Technology*, **63**, PP. 72-76 (1997).

5. Noh, T.S., Yang, D.Y., "A General Formulation for Hydroforming of Arbitrarily Shaped Boxes and Its Application to Hydroforming of an Elliptic-Circular Box", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **120**, PP. 481-488 (1998).
6. Assempour, A., Bagherzadeh, M., Emami, M.R., "An Upper Bound Approach for analysis of Hydroforming of sheet metals", *International Journal of Engineering*, **17**(4), Tr. B (2004).
7. Hill, R., "The Mathematical Theorem of Plasticity", Oxford Clarendon Press, PP. 67-68 (1950).
8. Mathews, J.H., "Numerical Methods for Computer Science, Engineering, and Mathematics", Prentice-Hall, INC. (1987).

