

تحلیل کرانه بالایی فرآیند اکستروژن ورق دو فلزی با قالب گوه ای شکل

حشمت اله حقیقت^{۱*} و حامد شایسته^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: اکستروژن، ورق دو فلزی، روش کرانه بالایی، نیروی شکل دهی.</p>	<p>در این مقاله، فرآیند اکستروژن مستقیم ورق‌های دو فلزی با قالب گوه‌ای شکل، به روش کرانه بالایی تحلیل و به روش اجزا محدود شبیه‌سازی شده است. منطقه تغییرشکل به دو ناحیه تغییرشکل تک فلزی و و ناحیه دو فلزی تقسیم شده و بر اساس میدان سرعت داده شده برای هر ناحیه، توان‌های داخلی، برشی و اصطکاکی کل محاسبه شده اند. با مساوی قرار دادن توان خارجی با توان کل، نیروی اکستروژن لازم به دست آمده است. نتایج روش تحلیلی با نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی به روش اجزا محدود (نرم‌افزار ABAQUS) مقایسه شده‌اند. مقایسه نتایج تحلیلی با نتایج شبیه‌سازی، تطابق مناسبی را نشان دادند. در پایان نیز اثر پارامترهای مختلف شامل درصد کاهش سطح مقطع و ثابت اصطکاک بر نیروی اکستروژن و زاویه بهینه قالب بررسی شده اند.</p>

۱- مقدمه

هوایی و خودرو کاربرد دارند [۱]. میله‌های دو فلزی دارای مزایایی می‌باشند که در میله تک فلزی قابل حصول نمی‌باشند. به طور مثال در مقایسه با یک میله مسی، یک میله دو فلزی از مس و آلومینیوم ۴۰ تا ۶۰ درصد سبک‌تر و ۳۰ تا ۴۰ درصد ارزان‌تر می‌باشد [۲]. به دلیل حالت تنش فشاری در فرآیند اکستروژن که امکان ایجاد باندهای متالورژیکی بین دو فلز را می‌دهد، این فرآیند برای ساخت ورق‌های مرکب مناسب است. در این فرآیند، مانند سایر فرآیندهای شکل‌دهی فلزات، آگاهی از میزان نیروی اکستروژن و کمینه نمودن آن دارای اهمیت زیادی است. تخمین نیروی لازم در طراحی قالب و انتخاب دستگاه با ظرفیت لازم بسیار مهم بوده و کاهش نیروی شکل‌دهی دارای مزایای متعددی از جمله سبب کاهش انرژی مصرفی و افزایش عمر قالب می‌شود.

تقاضای صنعت از مواد جدید، استحکام بالا با چگالی پایین می‌باشد. این خواص نمی‌تواند تنها با استفاده از یک ماده واحد فراهم شود. مواد ترکیبی امکان برآوردن خواصی مثل استحکام بالا، چگالی پایین، مقاومت به سایش بهتر، ضریب مقاومت به خوردگی زیاد و هدایت الکتریکی بالا را فراهم می‌کنند. ورق‌های مرکب شامل دو یا تعدادی بیشتر از فلزات مختلف است که به دلیل خواص گوناگونی که دارند به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف استفاده می‌شوند. ورق‌های دو فلزی نیز موادی نو در صنعت بوده که برای تولید سازه‌های سبک وزن در صنایع

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hhaghighat@razi.ac.ir

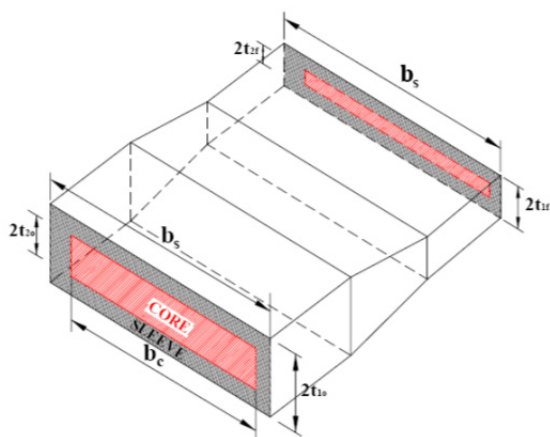
۱. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی

که σ_0 تنش سیلان ماده، $\dot{\epsilon}_{ij}$ تانسور نرخ کرنش، m ثابت اصطکاک برشی، V حجم ناحیه تغییرشکل پلاستیک، S_f و S_r به ترتیب مساحت سطوح ناپیوستگی سرعت و اصطکاکی، Δv مقدار ناپیوستگی سرعت روی سطوح اصطکاکی و سطوح ناپیوستگی سرعت می‌باشند.

در شکل ۱ مقطع ورودی و خروجی در فرآیند اکستروژن مستقیم ورق دو فلزی با پروفیل قالب گوه‌ای نشان داده شده است. در این فرآیند هسته و پوسته از دو جنس مختلف با تنش‌های سیلان σ_c و σ_s بوده و به ترتیب ضخامت هسته و پوسته در $t_{2f}, t_{1f}, t_{2o}, t_{1o}$ ورود و خروج قالب می‌باشند.

طی این فرآیند، طول ورق افزایش و ضخامت آن کاهش یافته و به دلیل این‌که عرض ورق ثابت باقی می‌ماند، فرآیند کرنش صفحه‌ای است.



شکل ۱- فرآیند اکستروژن ورق دو فلزی و پارامترهای هندسی مقطع‌های ورودی و خروجی آن

برای انجام تحلیل کرانه فوقانی اکستروژن ورق دوفلزی، کل منطقه تغییرشکل به دو بخش تک فلزی و دو فلزی تفکیک و جریان فلز در هر بخش به صورت کرنش صفحه‌ای فرض شده است. بخش اکستروژن تک فلزی و اکستروژن دو فلزی به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها زاویه α ، نیم زاویه قالب گوه‌ای شکل می‌باشد.

فرآیند اکستروژن چند فلزی اولین بار توسط هارتلی در سال ۱۹۷۳ برای لوله و با قالب مخروطی مورد تحلیل قرار گرفت [۳]. در سال ۱۹۹۱ توکانو به تحلیل تغییرشکل در اکستروژن میله‌های مرکب به روش کرانه فوقانی و آزمایش پرداخت. وی اثر سختی هسته و پوسته را علاوه بر اثر پارامترهای نیم زاویه قالب، ثابت اصطکاک و درصد کاهش در سطح مقطع را نیز بررسی کرد [۴]. یانگ اکستروژن متقارن محوری میله‌های مرکب با قالب‌های منحنی را به روش کرانه فوقانی تحلیل کرد و نتایج بدست آمده را با نتایج آزمایش مقایسه کرد [۵]. حقیقت و امجدیان در سال ۲۰۰۹ نیروی اکستروژن و طول بهینه قالب در فرآیند اکستروژن مستقیم کرنش صفحه‌ای را برای پروفیل‌های قالب مختلف با روش کرانه فوقانی، شبیه‌سازی با نرم‌افزار اجزا محدود و آزمایش بررسی کردند [۶]. در سال ۲۰۱۲ انگل‌هارت و همکاران به بررسی تجربی و امکان‌پذیری اکستروژن ورق‌های دوفلزی با قالب تخت پرداختند [۱]. ورق‌های دو فلزی اکستروژن شده با استفاده از تست آلتراسونیک و اشعه ایکس مورد بررسی قرار گرفتند.

در این مقاله فرآیند اکستروژن مستقیم ورق‌های دو فلزی با قالب گوه‌ای شکل، برای اولین بار به روش کرانه بالایی تحلیل و به روش اجزا محدود شبیه‌سازی شده است. نتایج روش تحلیلی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی به روش اجزا محدود (نرم‌افزار ABAQUS) مقایسه شده‌اند. در پایان نیز اثر پارامترهای مختلف بر نیروی اکستروژن و زاویه بهینه قالب مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- تحلیل کرانه فوقانی

براساس روش کرانه فوقانی، بین تمام میدان‌های سرعت مجاز، کمترین توان مورد نیاز برای تغییرشکل ماده به صورت زیر بیان می‌شود [۷]:

$$J = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \int_V \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} dV + \int_{S_c} k \Delta v dS + \int_{S_f} m k \Delta v dS \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_{rr} + \dot{\varepsilon}_{\theta\theta} + \dot{\varepsilon}_{zz} = 0 \quad (2)$$

میدان سرعت مجاز در هر ناحیه به تشریح در بخش‌های بعدی آورده شده است.

۲-۱-۱- ناحیه ورودی

این ناحیه شامل قسمتی از ماده است که هنوز وارد قالب نشده است. این ناحیه توسط سطوح ناپیوستگی سرعت S_1 و S_3 و A_1 از ناحیه تغییرشکل جدا شده است و ماده با سرعت ثابت V_o در راستای محور قالب به طرف ورودی قالب در حرکت است. در این ناحیه تغییرشکلی روی نمی‌دهد و رفتار ماده مانند یک جسم صلب می‌باشد. با توجه به فرض کرنش صفحه‌ای بودن در راستای z مولفه سرعت وجود ندارد، و میدان سرعت به شکل زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} \dot{U}_r &= -V_o \cos \theta \\ \dot{U}_\theta &= -V_o \sin \theta \\ \dot{U}_z &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

۲-۱-۲- ناحیه تغییرشکل

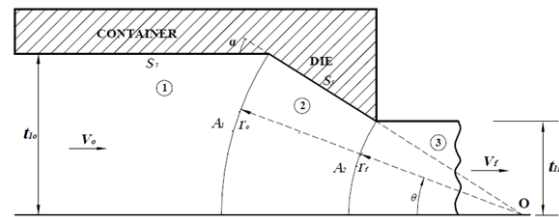
در این ناحیه ضخامت اولیه ماده در طی عبور از حفره قالب کاهش یافته و به ضخامت مورد نظر در خروجی قالب می‌رسد. ناحیه تغییرشکل توسط سطوح ناپیوستگی سرعت S_1 تا S_4 و A_1 و A_2 و A_3 جدا شده است و میدان سرعت در این ناحیه یکسان است.

مؤلفه شعاعی میدان سرعت در ناحیه تغییرشکل، \dot{U}_r ، با نوشتن تعادل جریان حجمی به دست می‌آید. نرخ جریان حجمی که از سطح A_1 و در جهت شعاعی عبور می‌کند برابر است با:

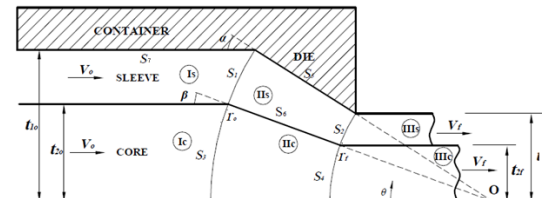
$$dQ = -v_o \cos \alpha r_o l d\theta \quad (4)$$

میزان جریان حجمی عبوری در جهت شعاعی و در بخش ۲ برابر است با:

$$dQ = \dot{U}_r r l d\theta \quad (5)$$



شکل ۲- اکستروژن ورق تک فلزی و نواحی تغییرشکل آن



شکل ۳- اکستروژن ورق دو فلزی و نواحی تغییرشکل آن

۲-۱-۲- میدان مجاز سرعت^۱ در هر ناحیه

اولین گام در تحلیل کرانه فوقانی، پیشنهاد یک میدان مجاز سرعت می‌باشد. فرض میدان سرعت، بر نیرو و جریان فلز تاثیرگذار است. استفاده از میدان سرعتی که حل تا حد ممکن واقعی را ارائه دهد مورد نظر می‌باشد. اگرچه ارائه میدان سرعتی که دقیقاً با رفتار جریان قطعه کار مطابقت کند امکان پذیر نیست اما اگر با دقت انتخاب شود دید با ارزشی درباره فرآیند ارائه دهد.

در این فرآیند برای ارائه میدان سرعت مجاز، دستگاه مختصات استوانه‌ای (r, θ, z) به کار گرفته شده است. مبدا مختصات نیز محل تقاطع پروفیل قالب با خط میانی می‌باشد. برای یافتن میدان سرعت، ماده به ناحیه‌های تغییرشکل کوچکتر (مطابق شکل‌های ۲ و ۳) تقسیم شده است. نواحی ۱ و I_s و I_c بدون تغییرشکل بوده و مجموعاً ناحیه ورودی می‌باشد، بخش‌های ۲ و II_s و II_c ناحیه‌های تغییرشکل بوده و بخش‌های ۳ و III_s و III_c محصول نهایی بوده و ناحیه خروجی می‌باشد.

میدان‌های سرعت بایستی شرط تراکم ناپذیری و شرایط مرزی را برآورد نمایند. شرط تراکم ناپذیری در سیستم مختصات استوانه‌ای به صورت زیر می‌باشد:

¹ Admissible velocity field

$$\sigma_y = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma} \quad (18)$$

تنش سیلان میانگین پوسته (ناحیه‌های 2 و IIS) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_S = 1.15 \frac{\int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon}{\varepsilon}, \quad \varepsilon = \ln \frac{t_{10} b_s - t_{20} b_c}{t_{1f} b_s - t_{2f} b_c} \quad (19)$$

و تنش سیلان میانگین هسته (بخش IIC)، σ_c برابر است با:

$$\sigma_c = 1.15 \frac{\int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon}{\varepsilon}, \quad \varepsilon = \ln \frac{t_{20}}{t_{2f}} \quad (20)$$

۲-۴- توان برشی

توان مصرفی بر روی سطوح ناپیوستگی سرعت از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{W}_S = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_S |\Delta v| dS \quad (24)$$

در فرآیند جاری شش سطح ناپیوستگی سرعت وجود دارد. توان برشی روی هر یک از سطوح از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

برای سطح ناپیوستگی سرعت A_1 :

$$dS = r_o (b_s - b_c) d\theta$$

$$\Delta V = V_o \sin \theta \quad (25)$$

$$\dot{W}_{SA1} = \frac{\sigma_S}{\sqrt{3}} V_o r_o (b_s - b_c) (1 - \cos \alpha)$$

برای سطح ناپیوستگی سرعت A_2 :

$$\dot{W}_{SA2} = \frac{\sigma_S}{\sqrt{3}} V_o r_o (b_s - b_c) (1 - \cos \alpha) \quad (26)$$

توان برشی تلف شده در سطح ناپیوستگی سرعت S_1 و S_2 به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\dot{W}_{S1} = \dot{W}_{S2} = \frac{\sigma_S}{\sqrt{3}} V_o r_o b_c (\cos \beta - \cos \alpha) \quad (27)$$

توان برشی تلف شده در سطح ناپیوستگی سرعت S_3 و S_4 به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{W}_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \int_V \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}} dV \quad (13)$$

همان طور که از روابط ۱۱ و ۱۳ مشخص است توان داخلی تغییرشکل در ناحیه ورودی و خروجی به دلیل حرکت صلب گونه ماده، صفر می‌باشد.

توان داخلی تغییرشکل در ناحیه تغییرشکل با استفاده از رابطه ۱۳ قابل محاسبه است. اجزا حجم ماده بوده و از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$dV = r b d\theta dr \quad (14)$$

b ضخامت ماده در هر بخش از ناحیه تغییرشکل است.

مقدار توان داخلی ناحیه IIS با قرار دادن مؤلفه‌های نرخ کرنش، از معادله (۱۲)، دیفرانسیل حجم از معادله (۱۴) و تنش سیلان میانگین پوسته از معادله ۱۹ در معادله ۱۳ می‌شود:

$$\dot{W}_{ills} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_S V_o b_s r_o \int_{\beta}^{\alpha} \int_{r_f}^{r_o} \frac{1}{r} \left[\sqrt{\frac{\sin^2 \theta}{4} + \cos^2 \theta} \right] dr d\theta \quad (21)$$

مقدار توان داخلی ناحیه 2 برابر است با:

$$\dot{W}_{i2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_S V_o (b_s - b_c) r_o \int_0^{\beta} \int_{r_f}^{r_o} \frac{1}{r} \left[\sqrt{\frac{\sin^2 \theta}{4} + \cos^2 \theta} \right] dr d\theta \quad (22)$$

۲۲ توان داخلی ناحیه IIC از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{W}_{illc} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_c V_o (b_s - b_c) r_o \int_{\beta}^{\alpha} \int_{r_f}^{r_o} \frac{1}{r} \left[\sqrt{\frac{\sin^2 \theta}{4} + \cos^2 \theta} \right] dr d\theta \quad (23)$$

در تغییرشکل کرنش صفحه‌ای داریم:

$$\sigma_z = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \quad (15)$$

و چون در جهت x مواد سیلان دارند، می‌توان فرض کرد:

$$\sigma_x \approx 0 \Rightarrow \sigma_z = \frac{\sigma_y}{2} \quad (16)$$

و تنش موثر برای شرایط کرنش صفحه‌ای:

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

$$= \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sigma_y^2 + \frac{\sigma_y^2}{4} + \frac{\sigma_y^2}{4} \right]} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_y \quad (17)$$

$$J^* = \dot{W}_{i2} + \dot{W}_{i1ls} + \dot{W}_{i1lc} + \dot{W}_{SA1} + \dot{W}_{SA2} + \dot{W}_{S1} + \dot{W}_{S2} + \dot{W}_{S3} + \dot{W}_{S4} + \dot{W}_{f5} + \dot{W}_{f7} \quad (33)$$

در نتیجه با معلوم بودن توان خارجی تغییرشکل، سرعت ورودی و مساحت ماده ورودی، نیروی مورد نیاز شکل‌دهی با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_{ave} = \frac{J^*}{V_o} \quad (34)$$

۳- شبیه‌سازی اجزا محدود

ابعاد اولیه مقطع بیلت دو فلزی در شکل ۴ نشان داده شده است. هسته از جنس آلومینیوم و پوسته از جنس مس و رفتار تنش-کرنش آنها به صورت $\sigma_{Al} = 189.2 \varepsilon^{0.239} MPa$ و $\sigma_{cu} = 335.2 \varepsilon^{0.113} MPa$ بوده و ثابت اصطکاک برشی بین پوسته و قالب و پانچ $m_1 = 0.15$ و بین دو فلز $m_2 = 0.9$ می‌باشد [۸]. بیلت از نوع تغییرشکل‌پذیر و قالب و پانچ به عنوان سطوح صلب مدل شده‌اند. برای تحلیل مسئله از یک مدل سه بعدی استفاده می‌گردد. در تحلیل‌های سه بعدی برای شبیه‌سازی اجزای قطعه کار از المان C3D8R استفاده شده است. به منظور حذف خطای ناشی از اعوجاج بیش از حد اجزا و افزایش دقت محاسبات نرم‌افزار در شبیه‌سازی از روش اجزایبندی مجدد^۱ استفاده می‌شود.

با توجه به تقارن هندسه مدل نسبت به صفحات میانی، تنها یک چهارم اجزا مدل شده‌اند. در شکل ۵ مدل اجزا محدود قبل و بعد از اجرا نشان داده شده است.

¹ Adaptive meshing

$$\dot{W}_{S3} = \dot{W}_{S4} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} V_o r_o b_c (1 - \cos \beta) \quad (28)$$

۲-۵- توان اصطکاکی

توان مصرفی روی سطح اصطکاکی بین دیواره قالب و سطح بیلت را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\dot{W}_f = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} m_f \int_s |\Delta v| dS \quad (29)$$

برای سطح تماس بیلت و دیواره قالب در بخش تغییرشکل داریم:

$$\dot{W}_{f5} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} m_f V_o r_o b_s \cos \alpha \ln\left(\frac{r_o}{r_f}\right) \quad (30)$$

ثابت اصطکاک تماسی بین دیواره قالب و بیلت می‌باشد.

برای سطح اصطکاکی S_6 فرض می‌شود که سرعت نسبی بین دو فلز برابر صفر است و بنابراین:

$$\dot{W}_{f6} = 0 \quad (31)$$

برای سطح تماس پوسته و دیواره قالب در ناحیه ورودی که ماده دارای حرکت بدون تغییرشکل است، داریم:

$$\dot{W}_{f7} = \frac{\sigma_{yp-s}}{\sqrt{3}} m_1 V_o b_s (L_o - x) \quad (32)$$

که x میزان پیشروی بیلت و L_o طول اولیه بیلت و σ_{yp-s} تنش تسلیم پوسته است.

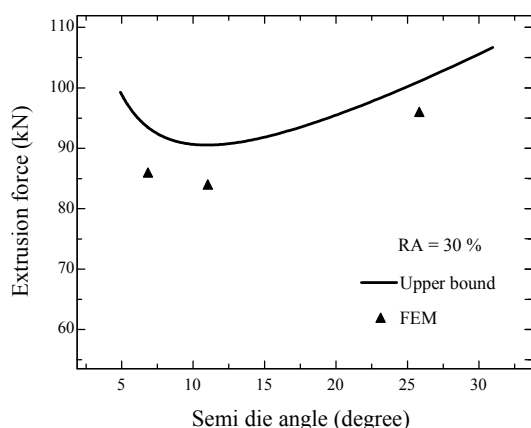
در تحلیل فرض شده است که دو ورق در ابتدا به یکدیگر کاملاً یکپارچه شده‌اند؛ بنابراین طی این فرآیند، در سطوح مشترک بر روی هم نمی‌لغزند.

۲-۶- نیروی شکل‌دهی

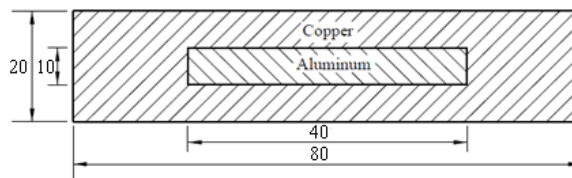
پس از محاسبه توان‌های داخلی، برشی و اصطکاکی حال می‌توان توان خارجی موردنیاز برای انجام فرآیند را محاسبه کرد و از طریق آن فشار متوسط اکستروژن را به‌دست آورد. توان خارجی مورد نیاز فرآیند از مجموع توان‌های فوق به‌دست می‌آید. توان خارجی برابر است با:

هر نقطه برای ناحیه تغییرشکل محاسبه می‌شود. در ادامه توان داخلی، توان برشی، توان اصطکاکی و سپس توان کل خارجی محاسبه شده و نهایتاً نیروی اکستروژن به دست می‌آید. برنامه کامپیوتری نوشته شده برای تحلیل این قابلیت را دارد که محاسبات را برای گستره وسیعی از داده‌های ورودی را انجام و تاثیر هر یک از پارامترها را بر نیروی شکل‌دهی نشان دهد.

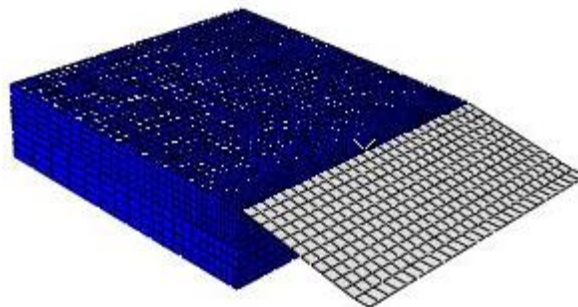
همان‌گونه که از رابطه‌های به دست آمده در قسمت ۳ مطالعه حاضر مشخص می‌باشد، نیروی اکستروژن لازم برای یک هندسه اولیه و نهایی ورق، تابعی از ثابت اصطکاک و نیم زاویه قالب می‌باشد. بنابراین برای یک شرایط داده شده اکستروژن، می‌توان منحنی تغییرات نیروی اکستروژن بر حسب نیم زاویه قالب را ترسیم نمود. برای محاسبه نیم زاویه بهینه قالب و حداقل‌سازی نیروی شکل‌دهی، منحنی تغییرات نیروی اکستروژن بر حسب زاویه قالب در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که نیروی شکل‌دهی برای قالبی با نیم زاویه ۱۱ درجه کمترین مقدار است و همچنین نتایج تحلیل کرانه فوقانی با نتایج شبیه‌سازی فرآیند با روش اجزا محدود، مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، نیروی شکل‌دهی محاسبه شده به روش حاضر حدود ۱۵ درصد از نتایج شبیه‌سازی بیشتر است.



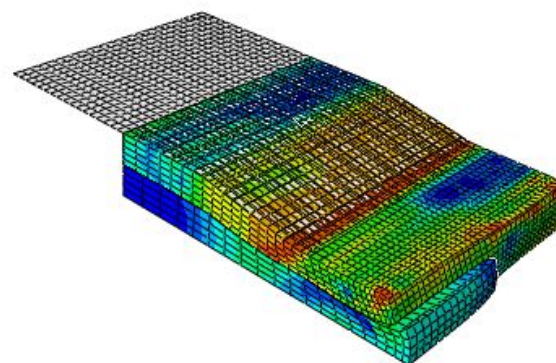
شکل ۶- مقایسه نیروی اکستروژن بر حسب نیم زاویه قالب به روش کرانه فوقانی و اجزا محدود



شکل ۴- ابعاد مقطع ورق اولیه



الف- مدل اجزا محدود قبل از اجرا



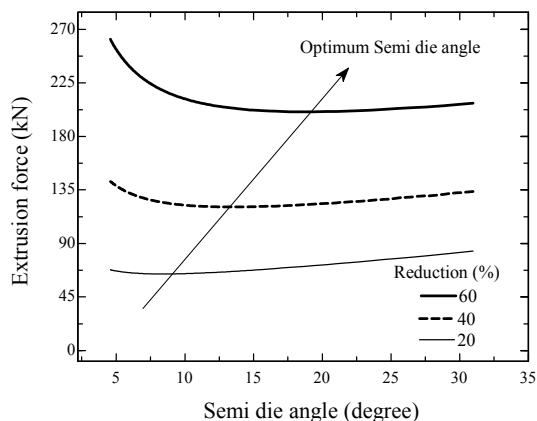
ب- مدل اجزا محدود پس از اجرا

شکل ۵- مدل اجزا محدود قبل و بعد از اجرا

۴- نتایج و بحث

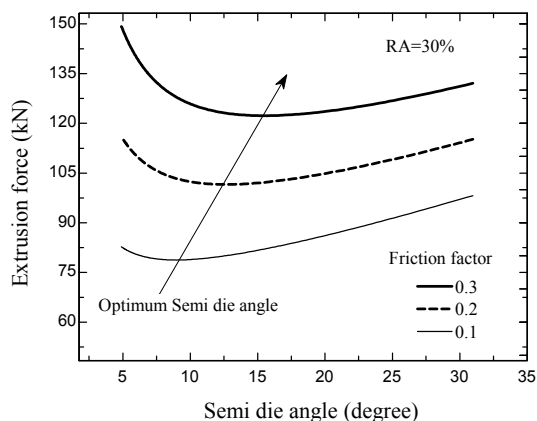
برای تحلیل کرانه فوقانی اکستروژن کرنش صفحه‌ای برنامه کامپیوتری پارامتریک در محیط نرم‌افزار MATLAB نوشته شده است که امکان انجام تمام مراحل به صورت پارامتریک را فراهم می‌سازد. پس از وارد کردن اطلاعات ورودی شامل ضخامت اولیه و نهایی ورق اولیه، ثابت اصطکاک، جنس ماده و مشخصات هندسی قالب به برنامه کامپیوتری نوشته شده در محیط نرم‌افزار MATLAB، برنامه به محاسبه میدان سرعت در هر ناحیه تغییرشکل می‌پردازد. سپس تانسور نرخ کرنش در

قالب و محفظه، نیروی اکستروژن افزایش پیدا می‌کند در حالی که توان‌های داخلی و برشی بدون تغییر باقی می‌مانند.



شکل ۸- اثر درصد کاهش سطح مقطع بر زاویه بهینه قالب

در شکل ۹ منحنی تغییرات نیروی اکستروژن برحسب نیم زاویه قالب با تغییر ثابت اصطکاک برشی بین پوسته و قالب در صورت ثابت بودن درصد کاهش سطح مقطع، نشان داده شده است. باتوجه به شکل مشخص می‌باشد که با افزایش مقدار ثابت اصطکاک بین پوسته و قالب و محفظه، زاویه بهینه قالب افزایش می‌یابد.

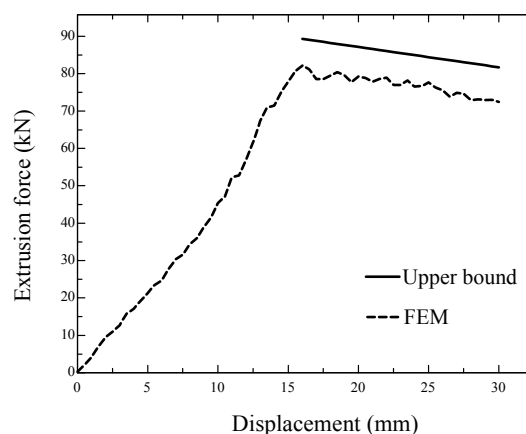


شکل ۸- اثر ثابت اصطکاک بر زاویه بهینه قالب

۵- نتیجه گیری

در این مقاله فرآیند اکستروژن مستقیم ورق‌های دو فلزی با قالب گوه‌ای شکل به روش کرانه بالایی تحلیل و به روش

در شکل ۷ منحنی نیرو-جابجایی پانچ، برای قالب با زاویه بهینه (نشان داده شده در شکل ۶) به روش اجزا محدود و کرانه فوقانی با هم مقایسه شده‌اند. همان گونه که در این شکل نشان داده شده با حرکت پانچ، ماده شروع به پر نمودن قالب می‌نماید و نیروی اکستروژن نیز با پیشروی پانچ افزایش می‌یابد. با پر شدن قالب نیرو به مقدار حداکثر رسیده و پس از آن به دلیل کاهش تماس آن با محفظه، توان اصطکاکی کاهش یافته و نیروی اکستروژن نیز کاهش می‌یابد. نیروی شکل‌دهی پیش‌بینی شده با تحلیل حاضر حدود ۱۲ درصد بیشتر از اجزا محدود است. این موضوع به دلیل طبیعت روش کرانه بالایی و فرض سیلان فلز با توجه به ناحیه بندی ذکر شده در قسمت ۲ مقاله، می‌باشد.



شکل ۷- منحنی نیرو-جابجایی پانچ به روش کرانه فوقانی و اجزا محدود

در شکل ۸ منحنی تغییرات نیروی اکستروژن بر حسب نیم زاویه قالب با تغییر درصد کاهش سطح مقطع در صورت ثابت بودن ثابت اصطکاک برشی نشان داده شده است. مطابق شکل، با افزایش درصد کاهش سطح مقطع، زاویه بهینه قالب افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد کاهش سطح مقطع نیروی اکستروژن افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش درصد کاهش سطح مقطع، ضخامت خروجی قالب کاهش یافته و در نتیجه نیروی بیشتری برای انجام فرآیند لازم است. با افزایش ضریب اصطکاک و در نتیجه افزایش توان اصطکاکی در سطوح تماس بین پوسته و

شد و نیروی شکل دهی کل با جمع نیروی این دو حالت به دست آمد و با نیروی شکل دهی کل فرآیند سه بعدی در نرم افزار اجزا محدود مقایسه شد. این مقایسه همخوانی نتایج را نشان داد.

۳- با افزایش ثابت اصطکاک و با افزایش نسبت سطح مقطع، نیروی شکل دهی لازم و زاویه بهینه قالب افزایش می یابد.

۴- با افزایش نسبت سطح مقطع، نیروی شکل دهی لازم و زاویه بهینه قالب افزایش می یابد.

اجزا محدود شبیه سازی شدند و نتایج بصورت ذیل حاصل شدند:

۱- روش کرانه فوقانی نسبت به روش اجزا محدود زمان بسیار کمتری جهت تحلیل نیاز دارد و به عنوان یک ابزار مناسب برای تحلیل فرآیندهای شکل دهی که تحلیل آن محدود به تخمین نیروی شکل دهی و یا مطالعه جریان فلز در طول فرآیند است، به کار می رود.

۲- فرآیند اکستروژن ورق دو فلزی به دو فرآیند اکستروژن کرنش صفحه ای تک فلزی و دو فلزی تفکیک

مراجع

- [1] Engelhardt, M., Grittener, N., Haverkamp, H.S., Reimche, W., Bormann, D., Bach, F.W. (2012). Extrusion of hybrid sheet metals, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, pp. 1030-1038.
- [2] Ahmed, N. (1978). Extrusion of copper clad aluminum wire, *Journal of Mechanical Working Technology*, Vol. 2, pp. 19-32.
- [3] Hartley, C.S. (1973). Upper Bound Analysis of Extrusion of Axisymmetric. Piecewise Homogeneous Tubes, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 15, pp. 651-663.
- [4] Tokuno, H., Ikeda, K. (1991). Analysis of deformation in extrusion of composite rods, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 26, pp. 323-335.
- [5] Yang, D.Y., Kim, Y.G. Lee, C.M. (1991). An Upper Bound Solution For Axisymmetric Extrusion of Composite Rods Through Curved Dies, *International Journal of Machine Tools Design and Manufacture*, Vol. 31, pp. 565-575.
- [6] Haghghat H., Amjadian, P. (2011). A generalized velocity field for plane strain extrusion through arbitrarily curved dies, *Transaction of ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 133, No. 4.
- [7] Avitzur, B. (1983). *Handbook of Metal-Forming Processes*, New York, Wiley.
- [8] Hwang, Y.M., Hwang, T.F. (2002). An investigation into the plastic deformation behavior within a conical die during composite bar extrusion, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 12, pp. 226-233.