

امکان سنجی اکستروژن مقاطع واگرا بر اساس روشهای تئوری و عددی

میثم مکارمی^۱، کارن ابری نیا^۲، محمدکاظم بشارتی گیوی^۲

چکیده

اکستروژن مقاطع بزرگ با توجه به مسائل فنی و اقتصادی تولید همواره با مشکلاتی مواجه بوده است. یکی از راههای تولید چنین قطعاتی گسترش جریان مواد به کناره‌ها و طراحی قالب‌هایی با ابعاد بزرگتر از بیلت اولیه است. برای این منظور یک فرمولاسیون جدید براساس تئوری حد بالا ارائه شده است. میدان سرعت سینماتیکی مجاز برای هندسه تغییر شکل مفروض تعریف شده است. با استفاده از این فرمولاسیون اکستروژن مقاطع مستطیلی دارای ابعاد بزرگتر از بیلت اولیه برای نخستین بار مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. مقادیر فشار اکستروژن تحت تاثیر متغیرهای فرایند برای مسائل فوق‌الذکر بدست آمدند. نتایج نشان می‌دهند که تولید این مقاطع با قالب‌های پیشنهادی امکان پذیر می‌باشند. در مرحله بعدی این فرایند به کمک روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفت و در پایان نتایج بدست آمده با یکدیگر مقایسه شدند نتیجه کار انطباق نزدیکی بین روشهای مورد بررسی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: اکستروژن مقاطع واگرا- حدبالا- گسترش جریان به کنار- المان محدود

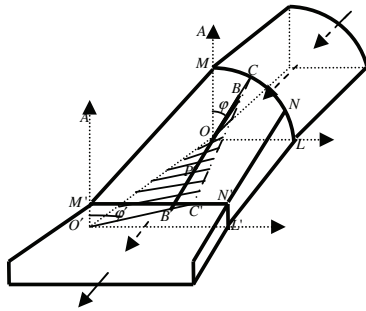
۱- مقدمه

کرده و یک حل کلی برای اکستروژن مقاطع با شکل‌های مختلف از بیلت استوانه‌ای بدست آورد. سپس بلوربر [۴] از میدان سرعت ابری نیا و چیتکارا استفاده کرد با این تفاوت که فضای تغییر شکل را تغییر داد و با این کار باعث شد که مولفه محوری سرعت که قبلاً ثابت فرض می‌شد تغییر کند. همچنین ابری نیا و بلوربر [۵] و ابری نیا [۶] مقالات دیگری با استفاده از همان تئوری ارائه نمودند. در سال ۲۰۰۰ کلیک و چیتکارا [۷] مقاله‌ای ارائه کردند که در آن اکستروژن مستقیم فلز سرب را برای تبدیل مقطع دایره به مربع خارج از مرکز بر اساس روش حد بالا مورد بررسی قرار دادند

فرایند اکستروژن به دلیل پیچیدگیهای خاص خود همواره مورد توجه قرار گرفته و تحقیقات فراوانی در این زمینه انتشار یافته است. گاناسکارا و هوشینو [۱] برای تحلیل سه بعدی مسائل اکستروژن مقاطع چند ضلعی میدان سرعت مبتنی بر خطوط جریان حد بالا بر روی فشار اکستروژن را ارائه نمودند. سپس چیتکارا و ابری نیا [۲] مقاله‌ای ارائه نمودند که در آن یک میدان سرعت کلی در مختصات استوانه‌ای برای جریان مواد در نظر گرفته شده بود که ساده‌تر شدن محاسبات توان تغییر شکل، توان اصطکاکی و توان ناشی از انفصال سرعت از ویژگیهای مهم آن می‌باشد. پس از آن ابری نیا [۳] از این میدان سرعت استفاده

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (ساخت و تولید) و عضو باشگاه پژوهشگران جوان: makaremi@engmail.ut.ac.ir

۲- دانشیار دانشگاه تهران



شکل (۱): اکستروژن مقطع مستطیلی دارای ابعاد بزرگتر از بیلت اولیه

که R شعاع اولیه قطعه (شعاع بیلت)، n نصف عدد تقارن و OB شعاع اولیه مقطع ورودی و در شکل (۱) نشان داده شده‌اند، و L طول قالب می‌باشد. در مختصات کارتزین معادله (۱) را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} x &= f(u, q, t) \\ y &= g(u, q, t) \\ z &= h(u, q, t) \end{aligned} \quad (3)$$

از طرفی با در نظر گرفتن سطح قالب خطی، شکل ماتریسی معادله بصورت زیر در می‌آید:

$$\bar{r} = [l \quad t] \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{r}_1 \\ \bar{r}_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

که \bar{r}_1, \bar{r}_2 بردارهای سطح مکان ورودی و خروجی قالب می‌باشند و با توجه به شکل (۱):

$$\begin{aligned} \bar{r}_1 &= OB \sin \varphi \bar{i} + OB \cos \varphi \bar{j} \\ \bar{r}_2 &= O'B' \sin \varphi' \bar{i} + O'B' \cos \varphi' \bar{j} + L\bar{k} = f_2 \bar{i} + g_2 \bar{j} + L\bar{k} \\ f_2 &= O'B' \sin \varphi' \\ g_2 &= O'B' \cos \varphi' \end{aligned} \quad (5)$$

که در نهایت با قرار دادن رابطه (۵) در (۴) بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} x &= u [R \sin(\pi q / n)(1-t) + f_2 t] \\ y &= u [R \cos(\pi q / n)(1-t) + g_2 t] \\ z &= Lt \end{aligned} \quad (6)$$

که برای یک بیلت استوانه‌ای و مقطع خروجی مستطیلی می‌شود:

$$\begin{aligned} F_2 &= b/2 & \text{for } 0 < \varphi < \pi/2 \\ G_2 &= \pi q \eta R^2 / b \\ F_2 &= (1/\eta + 1)b/2 - \pi q R^2 / a & \text{for } \pi/2 < \varphi < \pi \\ G_2 &= \pi a/2 \end{aligned} \quad (7)$$

η نسبت کاهش سطح مقطع و a, b اضلاع مستطیل خروجی هستند.

۲-۲-۲- میدان سرعت سینماتیکی

فرض کنید که سرعت در راستای Z تابعی از t, q, u باشد و از آنجائی که بردار سرعت در هر نقطه مماس بر مسیر حرکت می‌باشد بنابراین:

سپس کلیک و چیتکارا [۸] مقاله دیگری ارائه کردند که تفاوت آن با کار قبلی این بود که این بار به بررسی و تحلیل اکستروژن مستقیم فلز سرب برای تبدیل مقطع دایره به دایره خارج از مرکز بر اساس روش حد بالا پرداخته بودند. هوانگ، هوانگ و بائه [۹] در سال ۲۰۰۱ فرآیند اکستروژن معکوس برای تولید قطعات بدون تقارن محوری را با استفاده از روش المانی حد بالا تحلیل کردند. زارع و ابری نیا [۱۰] با ارائه یک فرمولاسیون جدید برای میدان سرعت و حد بالا برای فشار اکستروژن مقاطع پیچیده بدون هیچگونه تقارنی را بدست آوردند، بود و سرانجام در این تحقیق فرایند اکستروژن مقاطع واگرا بر اساس روشهای حد بالا و المان محدود مورد تحلیل قرار گرفت و لازم به ذکر است که در زمینه تحلیل مقاطع عریض تا بحال هیچگونه کار تحلیلی منتشر نشده و این کار نقطه شروعی برای حل این قبیل مسائل می‌باشد.

۲- تحلیل حد بالا

مراحل حل تئوری بدین صورت می‌باشد که ابتدا یک میدان تغییر شکل برای فرایند تعریف کرده که از آن نرخ کرنشها و جریان مواد بدست می‌آید، سپس همانگونه که اشاره شد از تئوری حد بالا برای بدست آوردن توان و فشار نسبی اکستروژن استفاده می‌شود.

۲-۱- میدان تغییر شکل

از آنجایی که میدان سرعت و در نتیجه توان اکستروژن مستقیماً از میدان تغییر شکل حاصل می‌شوند در نخستین گام به بیان ریاضی میدان تغییر شکل و سطح قالب پرداخته و تابع میدان تغییر شکل (\bar{r}) را بصورت زیر بیان می‌کنیم:

$$\bar{r} = f(u, q, t)\bar{i} + g(u, q, t)\bar{j} + h(u, q, t)\bar{k} \quad (1)$$

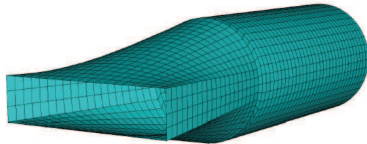
که u, q, t بین صفر و یک تغییر می‌کنند و عبارتند از:

$$\begin{aligned} u &= OB / R \\ q &= n\varphi / \pi \\ t &= L / z \end{aligned} \quad (2)$$

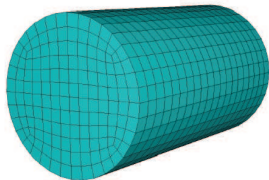
جدول (۱): ویژگیهای فلز سرب

مقدار	ویژگی
۱۵۰۰۰ Mpa	مدول الاستیسته
۱۵ Mpa	تنش تسلیم
۲۵ Mpa	استحکام نهائی
۱۱۳۴۰ Kg/m ³	چگالی

در همه موارد قطر بیلت اولیه ۲۰mm و طول آن ۳۰mm برای همه حالات در نظر گرفته شده‌اند و این فرآیند در سه مرحله انجام شده است. المانها برای قطعه تغییر شکل پذیر، از نوع هشت نقطه‌ای C3D8R و برای قالب صلب از نوع چهار نقطه‌ای R3D4 انتخاب شده‌اند. نمونه‌ای از قطعه و قالب شبیه سازی شده در شکل (۲) و (۳) نشان داده شده‌اند.



شکل (۲): نمونه ای از قالب مش بندی شده دارای ابعاد بزرگتر از بیلت اولیه



شکل (۳): نمونه‌ای از بیلت اولیه مش بندی شده

$$v_z = M(u, q, t) \quad (۸)$$

$$v_x = \frac{f_t}{h_t} M(u, q, t)$$

$$v_y = \frac{g_t}{h_t} M(u, q, t)$$

که h, g, f از رابطه (۶) بدست آمده همچنین اندیسه‌های t, q, u بیانگر مشتق جزئی نسبت به این متغیرها می‌باشند.

۳-۲- حد بالای نیروی اکستروژن:

در این قسمت با استفاده از روش حد بالا یک مقدار بیشینه از توان اکستروژن بدست آورده می‌شود:

$$J^* = W_f + W_i + W_e + W_o \quad (۹)$$

W_f توان صرف شده برای غلبه بر اصطکاک بین مواد و دیواره قالب می‌باشد و عبارتست از:

$$W_f = m \frac{\sigma_{ave}}{\sqrt{3}} \int_{s_f} \Delta v_f ds_f \quad (۱۰)$$

که m ضریب اصطکاک، σ_{ave} تنش موثر متوسط، s_f سطوح اصطکاکی و v_f سرعت در این سطوح می‌باشند. W_i توان لازم برای تغییر شکل حجمی می‌باشد و عبارتست از:

$$W_i = \int_v \sigma \epsilon dv \quad (۱۱)$$

w_e و w_o توان صرف شده بر اثر انفصال سرعت در ورودی و خروجی می‌باشند:

$$W_e = \frac{\sigma_{ave}}{\sqrt{3}} \int_{s_e} \Delta v_e ds_e \quad (۱۲)$$

$$W_o = \frac{\sigma_{ave}}{\sqrt{3}} \int_{s_o} \Delta v_o ds_o$$

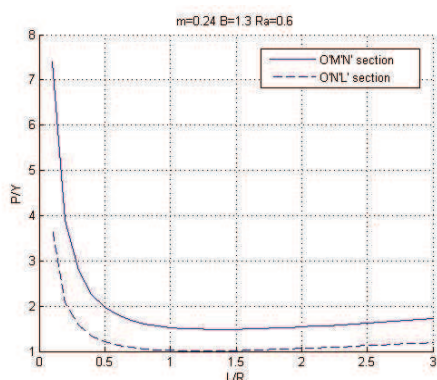
و در نهایت فشار متوسط بدین صورت بدست می‌آید:

$$P_{ave} = \frac{J^*}{\pi R^2 v_0} \quad (۱۳)$$

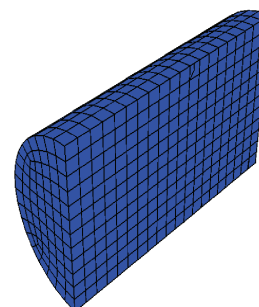
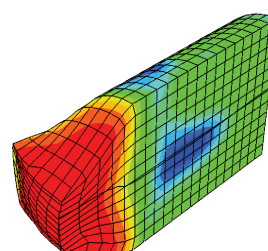
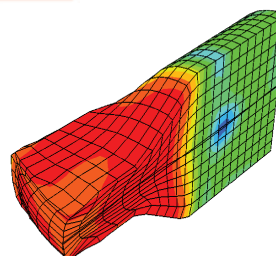
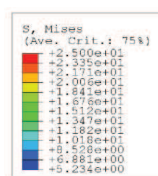
۳- تحلیل المان محدود^۲

در این مرحله فرایند اکستروژن مقاطع مستطیلی دارای ابعاد بزرگتر از بیلت اولیه بوسیله نرم افزار المان محدود ABAQUS بصورت سه بعدی و به روش Explicit شبیه سازی شده است.

پارامترهای متغیر طول قالب (L)، نسبت افزایش ابعادی (B=b/2R)، ضریب اصطکاک (m) و درصد کاهش سطح مقطع می‌باشند (RA). بیلت اولیه استوانه‌ای شکل و از جنس سرب می‌باشد. خواص این ماده در جدول (۱) نشان داده شده است:

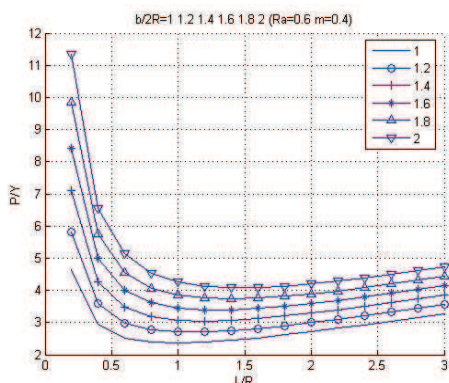


شکل (۵): مقایسه نیروی فرایند برای دو مقطع 'O'M'N' و 'O'N'L'



شکل (۴): تغییرات تنش مواد در قالبهای مستطیلی

همانگونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود برای نسبت کاهش سطح مقطع و ضریب اصطکاک ثابت، با افزایش نسبت افزایش ابعادی (یا نسبت واگرایی)، فشار نسبی اکستروژن بیشتر می‌شود، این موضوع از آنجا ناشی می‌شود که با افزایش این نسبت نیروی تغییر شکل زیاد شده بنابراین نیروها افزایش می‌یابند. بعلاوه با افزایش نسبت واگرایی، طول بهینه قالب (طولی که کمترین مقدار نیرو را برای فرایند نتیجه می‌دهد) افزایش می‌یابد چنانچه ملاحظه می‌شود برای نسبت واگرایی ۱ طول بهینه حدود ۱ بوده ولی برای نسبت ابعادی ۲ این طول تقریباً ۱/۵ می‌باشد.



شکل (۶): اثر افزایش نسبت واگرایی بر روی فشار نسبی فرایند (روش حد بالا)

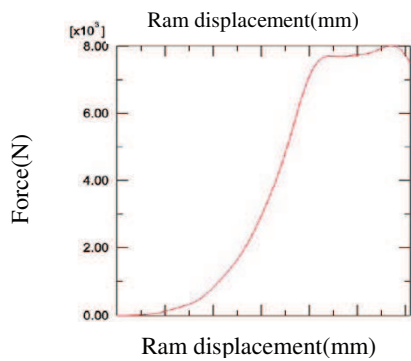
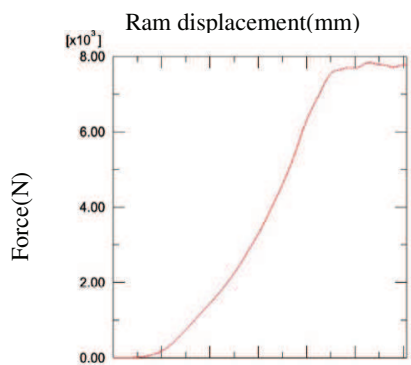
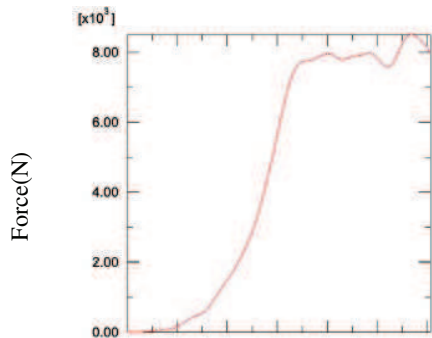
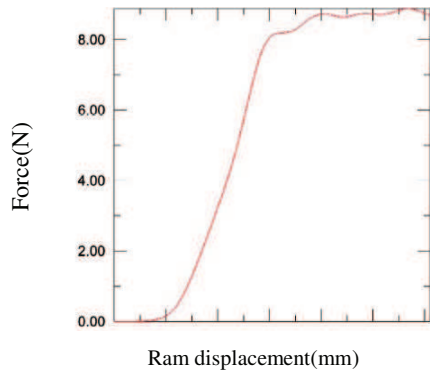
برای یک درصد کاهش سطح مقطع و نسبت افزایش ابعادی ثابت، افزایش ضریب اصطکاک باعث افزایش مولفه اصطکاکی نیرو می‌شود در نتیجه بر نیروی اکستروژن افزوده می‌شود. که این مسئله در شکل (۷) نشان داده شده است. همچنین در این شکل دیده می‌شود که برای ضریب اصطکاک ۰/۱ طول بهینه

۴- بحث و بررسی

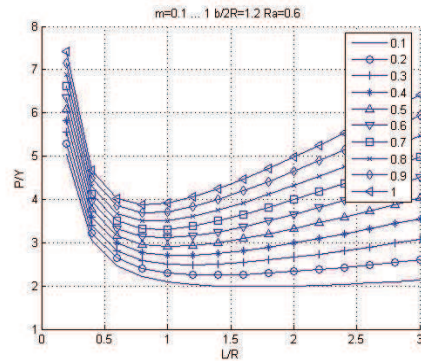
۴-۱- نتایج روش حد بالا

در آغاز مقاطع مستطیلی را به کمک روش حد بالا تحلیل کرده و اثر پارامترهای مختلف را بر روی آن بررسی می‌نماییم. در شکل (۵) تغییرات فشار نسبی، نسبت به طول نسبی برای دو قسمت 'O'M'N' و 'O'N'L' نشان داده شده است. قسمت 'O'N'L' بخشی است که جریان مواد همگرا می‌باشد و 'O'M'N' بخشی است که در آن جریانهای واگرا رخ می‌دهد. از این شکل می‌توان دریافت که نیروهای بیشتری صرف تغییر شکل قسمت 'O'M'N' می‌شود که این موضوع به دلیل سطوح اصطکاکی بیشتر می‌باشد.

قالب ۱/۷ بوده ولی برای ضریب اصطکاک ۱، این مقدار حدود ۱/۳ می‌باشد بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با افزایش اصطکاک، طول بهینه قالب کاهش می‌یابد.

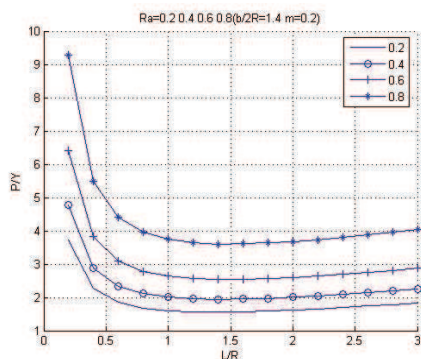


شکل (۹): نمودار نیرو بر حسب جابجائی مقاطع مستطیلی برای طولهای مختلف قالب



شکل (۷): تاثیر افزایش ضریب اصطکاک بر روی فشار نسبی (تحلیل حد بالا)

پارامتر بعدی درصد کاهش سطح مقطع می‌باشد. با توجه به شکل (۸) برای یک نسبت افزایش ابعادی و ضریب اصطکاک در مقاطع دارای ابعاد بزرگتر از بیلت اولیه، با افزایش درصد کاهش سطح، نیروی صرف شده برای تغییر شکل پلاستیک افزایش می‌یابد بنابراین تناژ پرس بالا می‌رود. در شکل مذکور برای نسبت کاهش سطح مقطعیهای مختلف، طول بهینه حدود ۱/۵ می‌باشد. از این موضوع نتیجه می‌شود که برای این فرایند با تغییر درصد کاهش سطح مقطع طول بهینه قالب تقریباً ثابت می‌باشد.



شکل (۸): اثر تغییرات درصد کاهش سطح مقطع بر روی نیروی پرس (روش حد بالا)

۲-۴- نتایج تحلیل المان محدود

پس از تحلیل فرایند به کمک تئوری حد بالا، حل عددی آن به منظور مقایسه و بررسی صحت نتایج در نظر گرفته شد، بدین منظور جمعاً دوازده حالت در چهار مرحله به کمک نرم افزار ABAQUS مورد بررسی قرار گرفت.

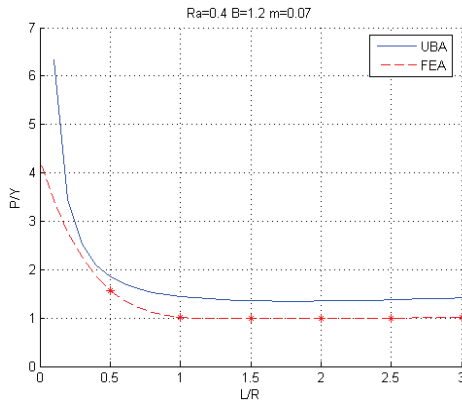
در مرحله بعدی پارامتر متغیر نسبت افزایش ابعادی بوده که شامل مقادیر ۱/۲، ۱/۴ و ۱/۶ بوده و بعلاوه ضریب اصطکاک برابر ۰/۲۴، درصد کاهش سطح مقطع برابر ۱/۴ و طول قالب برابر ۱۰ میلیمتر برای هر سه فرایند در نظر گرفته شده‌اند. سومین مرحله دارای پارامترهای ثابت ضریب اصطکاک، نسبت واگرایی و طول قالب بوده و پارامتر متغیر، درصد کاهش سطح مقطع می‌باشد که به ترتیب ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ انتخاب شده‌اند و مرحله آخر شبیه سازی برای دو ضریب اصطکاک ۰/۰۷ و ۰/۲۴ انجام شده است و پارامترهای ثابت، نسبت واگرایی برابر ۱/۴، درصد کاهش سطح مقطع ۰/۴ و طول قالب برابر ۱۰ میلیمتر می‌باشند.

۳-۴- مقایسه نتایج تئوری حد بالا و اجزاء محدود

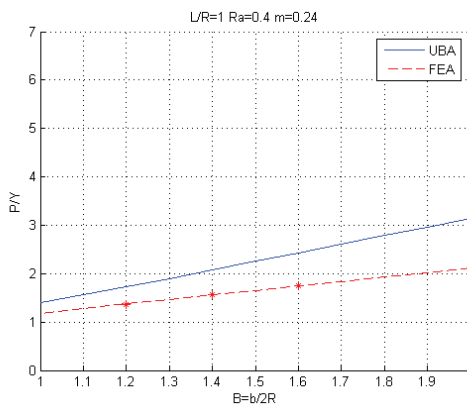
در نمودارهای حاصله نیرو بر سطح مقطع بیلت اولیه تقسیم شده و فشار نسبی فرایند بدست می‌آید و برای مقایسه دو روش با یکدیگر می‌بایست فشار نسبی را بر تنش موثر تقسیم نمود.

مقایسه نتایج حاصل از دو روش حد بالا و اجزاء محدود و اثر پارامترهای مختلف بر روی آن برای مقاطع مستطیلی در اشکال (۱۰) تا (۱۳) بیان شده است.

در شکل (۱۰) اثر افزایش طول بررسی شده است. ملاحظه می‌شود که توافق خوبی بین دو روش حد بالا و المان محدود در نسبت نیروهای بدست آمده در طولهای مختلف وجود دارد. در هر دو روش با افزایش طول نیروها کاهش می‌یابند البته برای طولهای زیاد نیروها تقریباً به یک میزان ثابتی می‌رسند. باید توجه نمود که روش حد بالا، مقدار بیشینه نیروها در نقاط مختلف را می‌دهند بنابراین طبیعی است که نمودار حاصله از این روش مقدار بیشتری از روش عددی ارائه دهد.



شکل (۱۰): مقایسه تأثیر طول قالب بر نیرو، در دو روش تحلیل عددی و حد بالا



شکل (۱۱): مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی و حد بالا بر نسبت واگرایی

نسبت واگرایی بطور خطی بر نیروی فرایند تأثیر می‌گذارد. با افزایش این پارامتر نیروی لازم برای شکل دهی مقاطع مستطیلی دارای ابعاد بزرگتر از بیلت اولیه، افزایش می‌یابد. این موضوع بوسیله هر دو روش مذکور، در شکل (۱۱) به خوبی نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۱۲) مشخص می‌شود که با افزایش درصد کاهش سطح مقطع نیروی پرس به صورت منحنی وار افزایش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که تأثیر این پارامتر بر فشار نسبی بیش از پارامتر قبلی می‌باشد. همچنین ملاحظه می‌گردد که همخوانی بسیار خوبی بین حل عددی و تئوری حد بالا وجود دارد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از روشهای حد بالا و المان محدود تحلیل‌های جامعی بر روی فرایند اکستروژن مقاطع مستطیلی دارای ابعاد بزرگتر از بیلت اولیه برای نخستین بار صورت پذیرفت و امکان انجام آن مورد تایید قرار گرفت همچنین تاثیر پارامترهای مختلف، بر روی نیروی فرایند بررسی گردید. در پایان بطور خلاصه می‌توان نتیجه گرفت که:

(۱) امکان انجام فرایند اکستروژن برای مقاطع عریض مورد تایید می‌باشد.

(۲) با افزایش نسبت افزایش ابعادی در این مقاطع فشار نسبی اکستروژن بصورت خطی افزایش می‌یابد.

(۳) افزایش ضریب اصطکاک باعث افزایش نیرو و فشار نسبی اکستروژن می‌گردد.

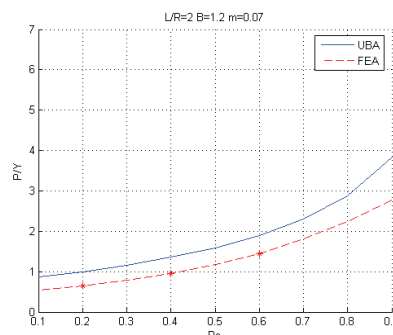
(۴) نیروی فرایند با افزایش درصد کاهش سطح مقطع بصورت تصاعدی بیشتر می‌شوند.

(۵) با افزایش طول نیروها کاهش می‌یابند البته برای طولهای زیاد نیروها تقریباً به یک میزان ثابتی می‌رسند.

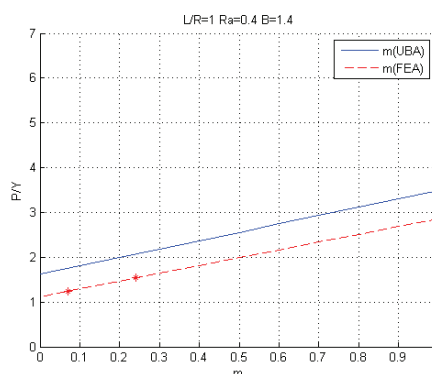
پی نوشت:

- 1- Upper bound Analysis
- 2- Finite Element Analysis

هر دو روش بررسی شده در این پژوهش نشان می‌دهند که با افزایش ضریب اصطکاک نیروی صرف شده برای شکل دادن مواد بیشتر می‌شود که این مطلب در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل (۱۲): بررسی نتایج حاصل از تحلیل عددی و حد بالا بر روی اثر درصد کاهش سطح



شکل (۱۳): مقایسه نتایج حل عددی و حد بالا بر روی اثر تغییرات ضریب اصطکاک

مراجع

- 1- Gunasekera JS, Hoshino S. Analysis of extrusion of polygonal sections through streamlined dies. Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry (1985);107:229.
- 2- Chitkara, N.R. and Abrinia, K. "Analysis generalized upper solution for three dimensional extrusion of shaped section using CAD – CAM bilinear surface dies", 28th International MATADOR Conferences on CIM, FMS & Robotics. CAD – CAM Manufacturing Metrology and Metal forming. 18th and 19th April (1990).
- ۳- کارن ابری نیا، رساله دکترا، "یک روش جدید بر اساس تئوری حد بالا برای تحلیل مسائل اکستروژن سه بعدی با استفاده از شیوه‌های (CAD-CAM)"، دانشگاه منچستر (۱۹۹۲)
- ۴- حسن بلوربر، پایان نامه کارشناسی ارشد، "یک حل کلی جدید برای اکستروژن مقاطع مختلف با استفاده از تئوری حد بالا و تکنیک‌های CAD"، دانشکده فنی دانشگاه تهران، (۱۳۷۳)
- ۵- کارن ابری نیا و حسن بلوربر، "یک روش حل کلی بهبود یافته برای تحلیل مسائل اکستروژن"، سومین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک ایران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۲۵ الی ۲۷ اردیبهشت ماه (۱۳۷۴)

۶- کارن ابری نیا، "یک حل کلی حد بالا برای اکستروژن سه بعدی مقاطع با اشکال مختلف با استفاده از قالب‌های خطی دوگانه"، دومین کنفرانس سالانه مهندسين مکانیک ایران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۲ الی ۱۶ اردیبهشت ماه (۱۳۷۳)

7- Celik, K.F. and Chitkara, N.R. "Application of an upper bound method to off – centric extrusion of squared sections, analysis and experiments", *Int.J.Mech.Sci*, Vol. 42, pp 321 – 345, (2000).

8- Celik, K.F. and Chitkara, N.R. "Off – centric extrusion of circular rods through streamlined dies, CAD/CAM applications, analysis and some experiments", *Int.J.Mech.Sci*, Vol. 42, pp 295 – 320, (2000).

9- Hwang, B.C., Hong, S.J. and Bae, W.B. "An UBET analysis of nonaxisymmetric extrusion/forging process" *Journal of Material Processing Technology*, (2001), 111, 135-141

۱۰- حمید زارع بغدادآبادی و کارن ابری نیا، "راه حل کلی برای اکستروژن مقاطع پیچیده" پنجمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران - ۱۳۸۱

۱۲- کارن ابری نیا، میثم مکارمی و قادر فرجی "بررسی اثر پارامترهای مختلف بر روی نیروهای فرآیند اکستروژن مقاطع دارای جریانهای واگرا"،

همایش: مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، آذر ۱۳۸۵ - تهران - ایران