شبيه سازي سه بعدي فرايند اكستروژن مستقيم خارج از مركز با روش اجزاء محدود و مقايسه با نتايج تجربي

كارن ابري نيا*[۱] و جلال پورحسيني باب الدشتي[۲]

[۱]استاديار دانشكده مهندسي مكانيک- پرديس دانشكده هاي فني- دانشگاه تهران

[۲]دانش آموخته كارشناسي ارشد مهندسي مكانيک- پرديس دانشكده هاي فني- دانشگاه تهران

(تاريخ دريافت ۸۳/۱۲/۲۲ ، تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۴/۸/۲۲ ، تاريخ تصويب ۸۵/۷/۸)

چكيده

در اين مقاله به شبيه سازي فرايند اكستروژن مستقيم سه بعدي با روش اجزاء محدود (FEM) توسط نرم افزار ABAQUS پرداخته شده است و نتايج بدست آمده از اين مقاله با نتايج تجربي و تئوري حد بالا مقايسه شده است. ماده استفاده شده براي شبيه سازي سرب مي باشد كه اثر كارسختي نيز در تحليل در نظر گرفته شده است. اين فرايند در محيط ضمني نرم افزار آباكوس شبيه سازي شده است. براي همه مدل ها المان قطعه C3D8R و المان قالب R3D4 در نظر گرفته شده است. در اين مقاله اكستروژن دايره و مربع خارج از مركز مورد بررسي قرار گرفته است. در مدل هاي تعريف شده اثر طول قالب، ضريب اصطكاک، پروفيل قالب و درصد خارج از مركزي بر نيروي اكستروژن و انحناي پروفيل خروجي از قالب بررسي شده اند. نتايج بدست آمده از شبيه سازي ارائه شده براي قالب هاي خطي با نتايج تئوري حد بالا و نتايج تجربي ديگر محققان مقايسه گرديده و توافق خوبي مشاهده شد. علاوه بر اين با استفاده از پروفيل هاي پيشرفته براي قالبهاي اكستروژن نتايج بدست آمده نسبت به قالب هاي خطي ده درصد كاهش در فشار اكستروژن را نشان مي دهد.

واژه هاي كليدي: اكستروژن مستقيم - اجزاء محدود - خارج از مركز - پروفيل خطي - پروفيل پيشرفته

مقدمه

در فرايند اكستروژن براي دستيابي به يک محصول مناسب بايد عوامل مهمي را از جمله فشار اكستروژن، دماي فرايند، روانكاري سطح قالب، طول قطعه كار، هندسه قالب و كار سختي را در نظر گرفت. غير از روش هاي آزمايشگاهي، تئوري هاي مختلفي نيز وجود دارند كه از آنجمله مي توان به تئوري هاي كار ايده آل[۱]، تحليل قاچي[۲] ، ميدان خطوط لغزش[۳] ، حد بالا[۴] و روشهاي عددي[۵] اشاره كرد.

در سال ۱۹۷۸ وبستر[۱] در رساله دكتراي خود يک روش اجزاء محدود براي تحليل سه بعدي اكستروژن مقاطع با شكل هاي مختلف ارائه كرد. وي در تحليل خود براي قطعه از المان هاي ۲۰ گرهي و براي در نظر گرفتن اثر اصطكاک از المان لغزش ۸ نقطه اي استفاده كرد و با استفاده از روش فوق تغييرات دما، نرخ كرنش، كرنش و فشار هيدرواستاتيک ماده در ناحيه تغيير شكل را محاسبه كرد. نتايج تئوري و تجربي، براي مقاطع دايره به دايره و دايره به مربع مقايسه شده و توافق خوبي مشاهده گرديد.

در سال ۱۹۹۵ زنگ، ونگ و چن [۲] مقاله اي ارائه كردند كه در آن از روش اجزاء محدود براي تحليل مسائل اكستروژن و اتوكاري براي بهينه سازي زاويه قالب اكستروژن استفاده كردند. آنها در تحليل خود مواد را كاملا پلاستيک فرض كردند.

چانگ [۳] مقاله اي ارائه داد كه در آن تحليل اكستروژن كرنش صفحه اي بوسيله روش اجزاء محدود در يک قالب خطي (مخروطي) بر اساس تئوري حد بالا ارائه شده بود و اثر اصطكاک، زاويه قالب، درصد كاهش سطح مقطع و كرنش سختي ماده بر نيروي اكستروژن مورد بررسي قرار گرفت.

در سال ۱۹۹۸ گوريا، رودريگس و مارتينز [۴] درمقاله خود اكستروژن مستقيم به روش سرد را با استفاده از روش اجزاء محدود مدل كردند. كار قابل توجه در مقاله آنها اين بود كه بر خلاف اغلب حلهاي عددي كه از روش لاگرانژي استفاده مي شود، آنها راه حلي ارائه كرده بودند كه از تركيب دو روش لاگرانژي و اويلري استفاده شده بود و نتيجه آن بسيار رضايت بخش بود. نتايج حاصل از اين روش براي الگوي جريان و توزيع كرنش در ناحيه تغيير

* نويسنده مسئول : تلفن : ۶۱۱۱۴۰۲۶ ، فاكس : ۸۸۰۱۲۰۳۹ ، Email: Cabrinia@ut.ac.ir

شکل پلاستیک توافق خوبي را با نتایج آزمایشگاهي و همچنین نتایج تئوري هاي دیگر نشان مي داد. آنها از این رابطه جدید براي تحلیل شرایط اصطکاکي دیواره قالب استفاده کردند. در سال هاي ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ کلیک و چیتکارا [۵،۶،۷] مقالاتي ارائه کردند که در آنها اکستروژن مستقیم فلز سرب را براي تبدیل مقطع دایره به مربع خارج از مرکز، دایره خارج از مرکز، مقاطع T، U و I بر اساس روش حد بالا مورد بررسي قرار دادند. آنها در این مقاله اثر کارسختي را براي سرب در نظر گرفتند و اثر پارامتر هایي نظیر طول قالب، پروفیل قالب، ضریب اصطکاک، درصد کاهش سطح مقطع و درصد خارج از مرکزي را بر نیروي اکستروژن مورد بررسي قرار دادند. آنها در نهایت نیروي اکستروژن بر حسب تغییر مکان کوبه و همچنین شکل پروفیل خروجي از قالب را بدست آوردند و براي هر یک از داده هاي تئوري آزمایش نیز انجام دادند و نتایج کار خود را در شکل ها و گرافهایي نشان داده و با هم مقایسه کردند.

در یک کار تحلیلي زارع و ابري نیا [۸] با استفاده از روش حد بالا حل جدیدي براي اکستروژن مستقیم مقاطع پیچیده ارائه نمود. آنها با استفاده از یک میدان سرعت جدید توانستند تا حد بالاي بهبود یافته اي را نسبت به نتایج قبلي بدست آورند. همچنین حلهاي جدیدي را براي مقاطعي که هیچ حلي براي آنها ارائه نشده بود ارائه نمودند.

رضایي زاده و ابري نیا [۹] در مقاله اي به تحلیل مسائل اکستروژن مستقیم و متقارن با استفاده از روش اجزاء محدود پرداختند. آنها براي تحلیل اکستروژن با روش اجزاء محدود از نرم افزار آباکوس استفاده کردند و تحلیل خود را در محیط استاندارد نرم افزار انجام دادند. دو نوع رفتار ویسکوپلاستیک و الاستیک – ویسکو پلاستیک همراه با اثر کار سختي براي رفتار مواد در نظر گرفته شد. اثر پروفیل هاي قالب نظیر پروفیل هاي کسینوسي، بیضوي، خطي (مخروطي)، چند جمله اي درجه ۳ و چند جمله اي درجه ۴ مورد بررسي قرار گرفت. آنها در ادامه اثر پارامتر هایي نظیر درصد کاهش سطح مقطع، ضریب اصطکاک و سرعت فرایند را نیز بر فشار اکستروژن، تغییر شکل المان ها، کانتورهاي دما، کانتورهاي کرنش، کانتورهاي تنش و بردار هاي سرعت مواد در طول انجام فرایند بررسي نمودند نتایج حاصله توافق خوبي را با سایر روش هاي تئوري و همچنین نتایج آزمایشگاهي داشت.

درمقاله حاضر از روش عددي المان محدود براي شبیه سازي سه بعدي اکستروژن مستقیم خارج از مرکزمقاطع مختلف استفاده شده است. نتایج این شبیه سازي براي بررسي اثر خارج از مرکزي بر انحناي پروفیل خروجي و اصطکاک و درصد کاهش سطح مقطع بر فشار اکستروژن استفاده شده است. همچنین اثر پروفیل قالب بر فشار اکستروژن مورد بررسي قرار گرفته است.

شبیه سازي فرایند اکستروژن مستقیم

در زمینه روش اجزاء محدود نرم افزارهاي مختلفي ارائه شده است که در این میان نرم افزار آباکوس یکي از نرم افزارهاي قدرتمند در تحلیل فرایندهاي شکل دهي و تحلیل هاي پلاستیک و غیر خطي مي باشد. لذا در این مقاله براي تحلیل فرایند اکستروژن مستقیم سه بعدي از نرم افزار آباکوس(ABAQUS/CAE Version 6.4) استفاده شده است.

براي همه مدل هاي ارائه شده قطر قالب،۲۵,۴ میلیمتر، قطر قطعه،۲۵,۴ میلیمتر و طول قطعه،۳۸,۱ میلیمتردر نظر گرفته شده است. در این مقاله سرعت کوبه در حدود ۸ میلیمتر در دقیقه است لذا از اثر سرعت در تحلیل فرایند صرفنظر مي شود و در نتیجه از نرخ کرنش نیز صرفنظر مي شود. همچنین نظر به اینکه مواد مورد استفاده به صورت سرد اکسترود مي شوند لذا از آثار حرارتي نیز صرفنظر شده است. ماده استفاده شده براي شبیه سازي آلیاژ سرب[۶] مي باشد که رابطه تنش-کرنش موثر آن در ادامه آمده است :

$$\bar{\sigma} = 32.1\bar{\varepsilon}^{0.20} MN/m^2 \quad (1)$$

رفتار پلاستیک ماده مطابق فرمول (۲) وارد نرم افزار شده است:

$$\bar{\sigma} = 32.1(\bar{\varepsilon} + 5*10^{-4})^{0.20} MN/m^2 \quad (2)$$

که البته همانطور که ملاحظه مي شود تفاوت چنداني با معادله (۱) ندارد و تنها بلحاظ سهولت استفاده در نرم افزار به این شکل بکارگرفته شده است.

شبیه سازي فرایند اکستروژن در محیط ضمني

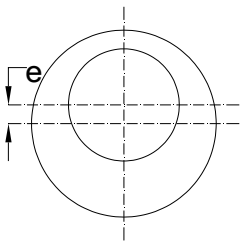
انجام شده است و براي قالب هـاي داراي روانكـار ضـريب اصطكاک ۰,۱۲ و براي قالب هـاي بـدون روانكـار ضـريب اصطكاک ۰,۲ در نظر گرفته شده است.در اين پروژه قطعه خام به صورت قطعه تغيير شكل پذير سه بعدي و قالب به صورت پوسته صلب تعريف شده است. براي همه مـدل هـا المان قطعه C3D8R و المان قالب R3D4 است.

دايره خارج از مركز

درصد خارج از مركزي بر اساس فرمول (۳) محاسـبه مي شود.

$$e\%=(e/R)*100 \quad (۳)$$

كه e درصد خارج از مركزي[۷] ناميـده مـي شـود. خـارج از مركزي در همه مـدلها مطـابق شـكل (۱) و فقـط در يـك راستا است.



شكل ۱ : نماي عمومي سطح مقطع قالب هاي اكستروژن دايره خارج از مركز.

جدول ۱ : پارامترهاي شبيه سازي اكستروژن مقاطع دايره خارج از مركز با قالب با پروفيل خطي (مخروطي).

ضريب اصطكاک	درصد خارج از مركزي	درصد كاهش سطح مقطع	طول قالب (ميليمتر)	نام مدل	رديف
۰,۱۲	۲۲,۰۵	۵۷	۱۲,۷	cr-1	۱
۰,۲	۲۲,۰۵	۵۷	۱۲,۷	cr-2	۲
۰,۱۲	۲۲,۰۵	۵۷	۱۰	cr-3	۳
۰,۲	۲۲,۰۵	۵۷	۱۰	cr-4	۴
۰,۱۲	۲۲,۰۵	۵۷	۲۲	cr-5	۵
۰,۲	۲۲,۰۵	۵۷	۲۲	cr-6	۶
۰,۱۲	۳۵,۴۳	۵۷	۲۲	cr-7	۷
۰,۲	۳۵,۴۳	۵۷	۲۲	cr-8	۸
۰,۱۲	۲۲,۰۵	۶۵,۱	۱۲,۷	cr-9	۹
۰,۱۲	۲۲,۰۵	۶۵,۱	۱۰	cr-10	۱۰
۰,۱۲	۲۲,۰۵	۵۷	۱۲,۷	cr-11	۱۱
۰,۱۲	۲۲,۰۵	۵۷	۱۰	cr-12	۱۲

در جـدول (۱) پـارامتر هـاي شـبيه سـازي مدل هاي دايره خارج از مركز با قالـب بـا پروفيـل خطـي (مخروطي)، در جدول (۲) پارامتر هاي شبيه سـازي مـدل هاي دايره خارج از مركز با قالب بـا پروفيـل پيشـرفته، در جدول (۳) پارامتر هاي شبيه سازي مدل هاي مربع خارج از مركز با قالب با پروفيل خطـي (مخروطـي) و در جـدول (۴) پارامترهاي شبيه سازي اكستروژن مقاطع مربع خارج از مركز با قالب با پروفيل پيشرفته ارائه شده اند.

جدول ۲: : پارامترهاي شبيه سازي اكستروژن مقاطع دايره خارج از مركز با قالب با پروفيل پيشرفته.

ضريب اصطكاک	درصد خارج از مركزي	درصد كاهش سطح مقطع	طول قالب (ميليمتر)	نام مدل	رديف
۰,۱۲	۲۲,۰۵	۵۹	۱۵,۶	ca-1	۱
۰,۲	۲۲,۰۵	۵۹	۱۵,۶	ca-2	۲
۰,۱۲	۲۲,۰۵	۵۷	۱۲,۷	ca-3	۳
۰,۱۲	۲۲,۰۵	۵۷	۱۰	ca-4	۴

جدول ۳ : پارامتر هاي شبيه سازي اكستروژن مقاطع مربع خارج از مركز با قالب با پروفيل خطي (مخروطي).

ضريب اصطكاک	درصد خارج از مركزي	درصد كاهش سطح مقطع	طول قالب (ميليمتر)	نام مدل	رديف
۰,۱۲	۲۵,۲	۶۰	۱۶,۶۵	sr-1	۱
۰,۲	۲۵,۲	۶۰	۱۶,۶۵	sr-2	۲
۰,۱۲	۲۵,۲	۶۰	۱۲,۷	sr-3	۳
۰,۲	۲۵,۲	۶۰	۱۲,۷	sr-4	۴
۰,۱۲	۲۵,۲	۶۰	۱۰	sr-5	۵
۰,۲	۲۵,۲	۶۰	۱۰	sr-6	۶

جدول ۴: : پارامترهاي شبيه سازي اكستروژن مقاطع مربع خارج از مركز با قالب با پروفيل پيشرفته.

ضريب اصطكاک	درصد خارج از مركزي	درصد كاهش سطح مقطع	طول قالب (ميليمتر)	نام مدل	رديف
۰,۱۲	۲۵,۲	۶۰	۱۶	sa-1	۱
۰,۲	۲۵,۲	۶۰	۱۶	sa-2	۲

بررسي و تحليل نتايج

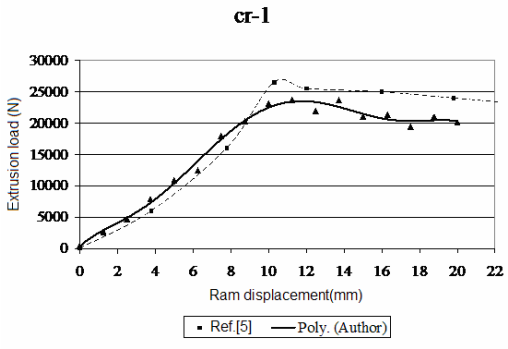
در اين بخش نتايج بدست آمده از مدلهاي ارائـه شده را براي روش هاي تجربي، حد بالا و اين مقالـه ارائـه مي كنيم.

در شکل (۲) تغییرات نیروي اکستروژن مدل cr-1 بر حسب تغییر مکان کوبه براي نتایج بدست آمده از این مقاله و نتایج تجربي مرجع[۵] رسم شده است. منحني رسم شده براي نتایج حاصل از این مقاله با توجه به تعدد داده ها یک چند جمله اي درجه شش مي باشد. در شکل (۲) مشاهده مي شود که این مقاله حداکثر نیروي مورد نیاز براي انجام فرایند را ۳,۵ کیلو نیوتن کمتر از مقدار واقعي مورد نیاز نشان مي دهد. لذا خطاي این مقاله در این تحلیل حدود ۱۳ درصد مي باشد.

اختلاف موجود در تحلیل فوق مي تواند ناشي از دو تفاوت عمده بین شبیه سازي و شرایط واقعي انجام فرایند باشد:

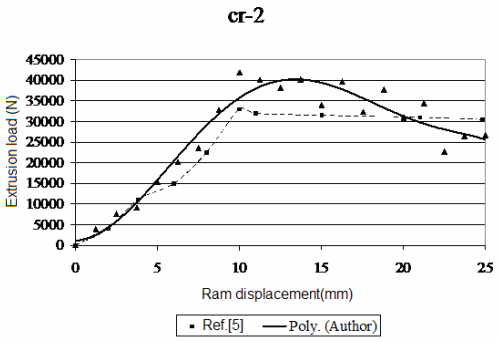
الف) براي شبیه سازي فرایند اکستروژن در این مقاله حرکت کوبه و قالب ایده آل فرض شده است در صورتیکه در عمل بین کوبه و سطح داخلي قالب اصطکاک وجود دارد لذا مقدار نیروي مورد نیاز براي اکستروژن بیشتر از مقدار پیش بیني شده آن توسط این مقاله مي باشد.

ب) ضریب اصطکاک بین قطعه و قالب روانکاري شده با روغن آلوانیا در فرایند اکستروژن ۰,۱۲ مي باشد. در این مقاله مقدار ضریب اصطکاک در طول فرایند ثابت فرض مي شود ولي در عمل تامین چنین شرایطي بسیار مشکل است، زیرا براي دسترسي به چنین شرایطي باید ضخامت فیلم روغن در همه سطح قالب و همچنین در طول فرایند ثابت بماند. لذا چون در عمل در اثر فشار بالاي تماسي بین قالب و قطعه، فیلم روانکاري نازک و یا پاره مي شود، ضریب اصطکاک از مقدار پیش بیني شده بیشتر مي شود و در نتیجه نیروي حداکثر اکستروژن افزایش مي یابد.

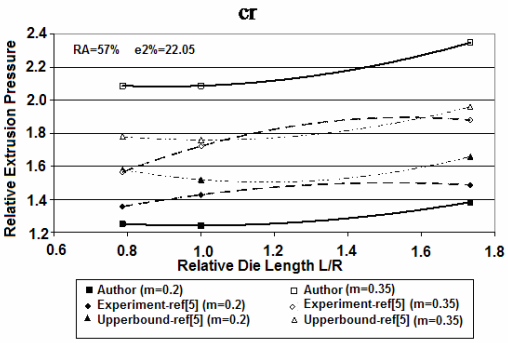


شکل ۲ : منحني تغییرات نیروي اکستروژن بر حسب تغییر مکان کوبه براي مدل cr-1.

در شکل (۳) مشاهده مي شود که براي مدل cr-2 نیروي ماکزیمم اکستروژن در نتایج تجربي تقریبا ۷ کیلو نیوتن کمتر از مقدار این مقاله مي باشد. لذا خطاي این مقاله در این تحلیل حدود ۱۷,۵ درصد مي باشد. دلیل این اختلاف آنست که ضریب اصطکاک بین قطعه و قالب خشک در فرایند اکستروژن ۰,۲ مي باشد که همین مقدار بطور ثابت به نرم افزار داده شده است. ولي در عمل مخصوصا فلز سرب بطور طبیعي تا حدودي از خود قابلیت روانکاري نشان مي دهد لذا ماده از خود در حین انجام فرایند رفتار کاملا خشک نشان نمي دهد. لذا ضریب اصطکاک از مقدار پیش بیني شده کمتر مي شود و در نتیجه نیروي حداکثر اکستروژن کاهش مي یابد.



شکل ۳ : منحني تغییرات نیروي اکستروژن بر حسب تغییر مکان کوبه براي مدل cr-2.



شکل ۴ : مقایسه نتایج تجربي مرجع (۵) و تئوري حد بالا و نتایج این مقاله براي اکستروژن خارج از مرکز مقطع دایره با قالب پروفیل خطي (مخروطي).

در شکل (۴) نتایج ارائه شده تجربي و روش حد بالا و نتایج بدست آمده از این مقاله براي مدل هاي دایره خارج از مرکز با پروفیل قالب خطي (مخروطي) در دو حالت داراي روانکار و بدون روانکار نمایش داده شده است.

چنانچه مشاهده مي شود براي قالب هاي داراي روانکار نتایج این مقاله به نتایج تجربي نزدیکتر است ولي براي قالب هاي خشک نتایج ارائه شده توسط مرجع (۵) با روش حد بالا به نتایج تجربي نزدیکتر است. ولي همانطور

که در این شکل دیده مي شود نتايج مرجع (۵) براي قالب خشک در ناحيه ۱,۱ تا ۱,۶ کمتر از نتايج تجربي مي باشد که چون روش اين مرجع حد بالا مي باشد نبايد در هيچ ناحيه اي منحني آن از نتايج تجربي کمتر شود.

تاثير طول قالب بر نيروي اکستروژن

براي هر پروفيل قالب، بسته به در صد کاهش سطح مقطع، سطح مقطع خروجي قالب، طول قالب، روانکاري قالب و مواد اکستروژن يک طول قالب بهينه بدست مي آيد. در شکل (۴) مشاهده مي شود که براي اکستروژن دايره خارج از مرکز با پروفيل قالب خطي (مخروطي) روانکاري شده نسبت طول قالب بهينه به شعاع قالب برابر يک مي باشد و همين نسبت براي قالب خطي (مخروطي) خشک حدود ۰,۹ مي باشد.

تاثير ضريب اصطکاک بر نيروي اکستروژن

يکي از پارامتر هاي تاثير گذار بر نيروي اکستروژن روانکار مي باشد. در منحني هاي ارائه شده براي نيروي اکستروژن بر حسب تغيير مکان کوبه و همچنين در شکل (۴) تفاوت نيروي اکستروژن با تغيير ضريب اصطکاک نشان داده شده است. با توجه به نتايج بدست آمده در اين مقاله با افزايش ضريب اصطکاک از ۰,۱۲ به ۰,۲ نيروي اکستروژن بين ۳۵ تا ۴۰ درصد افزايش مي يابد.

جدول ۵ : مقايسه نتايج تجربي مرجع (۵) و نتايج اين مقاله.

ردیف	نام مدل	نيروي اکستروژن(N)		درصد خطا
		این مقاله	تجربي	
۱	cr-1	۲۳۵۰۰	۲۷۰۰۰	۱۲,۹۶
۲	cr-2	۴۰۰۰۰	۳۳۰۰۰	۲۱,۲
۳	cr-3	۲۴۰۰۰	۲۶۰۰۰	۷,۷
۴	cr-4	۴۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۳,۳
۵	cr-5	۲۶۵۰۰	۲۸۵۰۰	۷
۶	cr-6	۴۵۰۰۰	۳۶۰۰۰	۲۵
۷	cr-7	۲۷۰۰۰	۲۹۰۰۰	۶,۹
۸	cr-8	۴۵۰۰۰	۳۷۰۰۰	۲۱,۶
۹	ca-1	۲۷۰۰۰	۳۲۰۰۰	۱۵,۶
۱۰	ca-2	۴۵۰۰۰	۴۱۵۰۰	۸,۴

در جدول (۵) براي مدل هاي مختلف نتايج اين مقاله با نتايج تجربي مقايسه شده است و اختلاف آنها براي هر مدل محاسبه شده است. در اين جدول به دو دليل نتايج حد بالاي مرجع (۵)ارائه و مقايسه نشده است : يکي از دلايل آن است که در مقاله مرجع (۵) ماکزيمم نيروي اکستروژن با صراحت ذکر نشده است و فقط نسبت فشار اکستروژن به تنش تسليم ماده ارائه شده است و لذا مبناي مقايسه صحيحي وجود ندارد. ديگر اينکه هر چند بطور غير مستقيم نيروي ماکزيمم اکستروژن با استفاده از تنش تسليم قابل محاسبه مي باشد ولي نتايج ارائه شده در مرجع (۵) بعلت تفاوت در انتخاب تنش تسليم براي ماده اکستروژن قابل استناد نمي باشد. بنابراين تنها به مقايسه نتايج تجربي بسنده شده است.

بررسي انحناى خروجى قالب

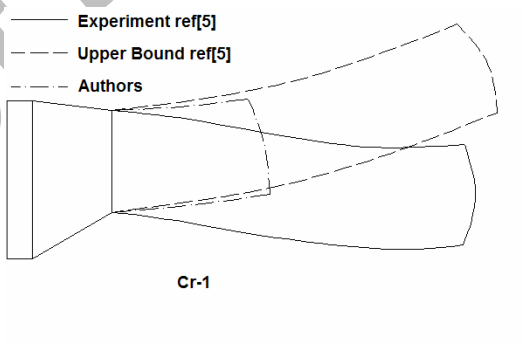
يکي از مشکلات فرايند اکستروژن براي طراحي قالب انحناي پروفيل خروجي از قالب مي باشد. اگر پروفيل قالب درست طراحي نشود امکان انحنا و اعوجاج پروفيل خروجي از قالب وجود دارد که اين انحنا مي تواند تا حدي باشد که باعث تغيير شکل غير قابل اصلاح پروفيل خروجي شود.

انحناي پروفيل خروجي از قالب اگر باعث تغيير شکل در سطح مقطع آن نشود، مي تواند با عمليات کشش جبران شود ولي اگر باعث تغيير شکل در سطح مقطع شود پروفيل غير قابل استفاده خواهد بود. حتي در صورتي که سطح مقطع تغيير شکل ندهد نيز عمليات کشش يک کار اضافي است که باعث افزايش هزينه و زمان است. لذا طراحي صحيح قالب و پيش بيني شکل و انحناي پروفيل خروجي از اهميت زيادي برخوردار است.

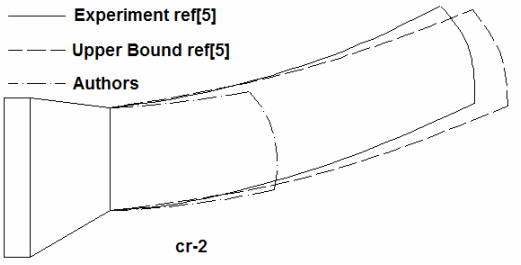
در ادامه نتايج بدست آمده از آزمايش، روش حد بالا و اين مقاله براي انحناي پروفيل خروجي از قالب در مدل هاي در نظر گرفته شده ارائه گرديده است. مرجع (۵) در مقاله خود شکل انحناي پروفيل خروجي از قالب را با استفاده از روش حد بالا پيش بيني کرد و نتايج خود را با نتايج بدست آمده از آزمايش مقايسه کرد. در اين مقاله براي مشخصات هندسي معين قالب، حداکثر نيروي اکستروژن و همچنين شکل انحناي پروفيل خروجي از قالب پيش بيني شده است ولي از روش حد بالا نمي توان منحني تغييرات نيروي اکستروژن بر حسب تغيير مکان کوبه را براي مدل هاي تعريف شده بدست آورد، در صورتيکه در مقاله حاضر منحني تغييرات نيروي اکستروژن بر حسب تغيير مکان کوبه که بار اعمالي به پرس را در حين فرايند

اکستروژن مـي دهـد و همچنـين شـکل انحنـاي پروفيـل خروجي از قالب ارائه شده است.

شکل (۵) انحناي پروفيل خروجي از قالب براي مدل cr-1 را نشان مي دهد. در اين شکل، انحناي خط چين، نتايج بدست آمده با روش حد بالا توسط مرجع (۵) مي باشد و خط پر، انحناي پروفيل خروجي بدست آمده از آزمايش است. خط نقطه انحناي پروفيل خروجي از قالب مدل cr-1 بدست آمده از اين مقاله را نشان مي دهد. همانطور که از مقايسه شـکل هـاي مـذکور مشـاهده مـي شـود انحنـاي عمومي نتايج مرجع (۵) و اين مقاله با نتايج تجربي توافـق خوبی ندارد. در شکل (٦) نيـز نتـايج بدسـت آمـده بـراي انحناي پروفيل خروجي از مدل cr-2 از روش هاي تجربي، حد بالا و اجزاء محدود ارائه شده و مقايسه شده اسـت. در اين شکل توافق خوبي بين نتايج تجربي وحد بـالای ارائـه شده توسط مرجع (۵) و اين مقاله مشاهده مي شود.



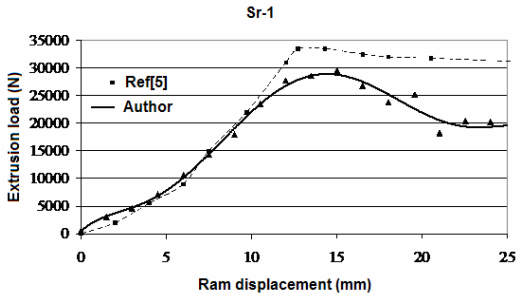
شکل ۵ : انحناي پروفيل خروجي از قالب براي مدل cr-1، خط پر: نتايج تجربي ارائه شده در مرجع (۵) و خط چين: نتايج حاصل از روش حد بالا ارائه شده درمرجع (۵)، خط نقطه: نتايج بدست آمده از اين مقاله.



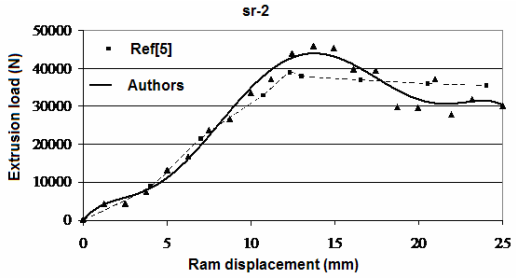
شکل ٦ : انحناي پروفيل خروجي از قالب براي مدل cr-2، خط پر: نتايج تجربي ارائه شده در مرجع (۵) و خط چين: نتايج حاصل از روش حد بالا ارائه شده در مرجع (۵)و خط نقطه نتايج بدست آمده از تحليل با اين مقاله.

بررسي و مقايسه نتايج مدلهاي مربع خارج از مرکز

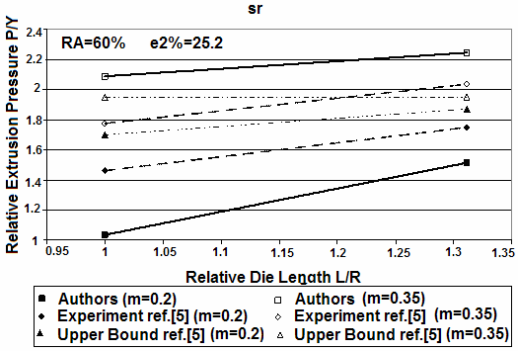
در اين بخش نيز نتايج بدست آمده از اين مقاله و نتايج تجربي و نتايج حد بالاي ارائه شده توسط مرجع (۶) ارائه مي گردد. در شکلهای (۷) و (۸) مقايسه نتايج نيروی اکستروژن بر حسب تغيير مکان کوبه بـرای نتـايج تجربـی مرجع (۵) و اين مقاله مشاهده مـی گـردد. نتـايج رونـدی مشابه نتايج تجربي را نشان می دهند اما مدل sr-2 نتايج بهتری را پيش بينی مينمايد.



شکل ۷ : منحني تغييرات نيروي اکستروژن بر حسب تغيير مکان کوبه براي مدل sr-1.



شکل ۸ : منحني تغييرات نيروي اکستروژن بر حسب تغيير مکان کوبه براي مدل sr-2.



شکل ۹ : مقايسه نتايج تجربي و تئوري حد بالا مرجع [۵]و نتايج اين مقاله براي اکستروژن خارج ازمرکز مقطع مربع با استفاده از قالب با پروفيل خطي (مخروطي).

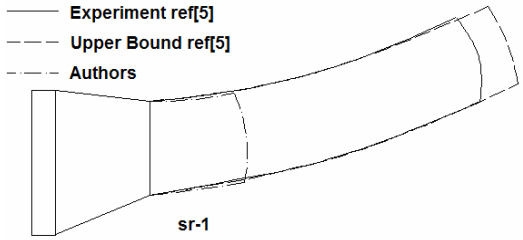
در شکل (۹) نتايج ارائـه شـده تجربـي و روش حـد بـالا و نتايج بدست آمده از اين مقاله براي مدل هاي مربع خـارج از مرکز با پروفيل قالـب خطـي (مخروطـي) در دو حالـت

داراي روانكار و بدون روانكار نمـايش داده شـده اسـت. در اين شكل نيز همانطور كه مشاهده مي شود نتـايج مرجـع (۵) براي قالـب خشـك در ناحيـه بعـد از ۱,۲۵ كمتـر از نتايج تجربي مي باشد كه چون روش مرجع (۵) حـد بـالا مي باشد نمـي بايسـت در هـيچ ناحيـه اي منحنـي آن از نتايج تجربي كمتر شود. همانطور كه در بخش قبـل بيـان شد يكي از پارامتر هاي تاثير گـذار بـر نيـروي اكسـتروژن روانكار مي باشد كه همانطور كه در شكل (۹) نيز مشخص است با افزايش ضريب اصطكاك نيروي اكستروژن افـزايش مي يابد. در جدول (۶) براي مدل هاي مختلف نتايج ارائـه شده توسط اين مقاله با نتايج تجربي مقايسـه شـده اسـت اختلاف آنها براي هر مـدل محاسـبه شـده اسـت. در ايـن جدول نيز مانند نتايج دايره خارج از مركز و بنا بـه همـان دلايلي كه در آنجا ذكر شـد تنهـا بـه ذكـر نتـايج تجربـي مرجع (۵) بسنده شده است.

جدول ۶ : مقايسه نتايج تجربي مرجع [۵] و نتايج اين مقاله براي اكستروژن خارج از مركز.

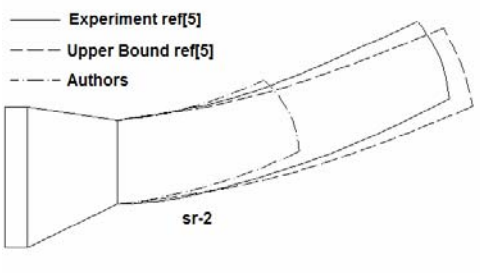
ردیف	نام مدل	نيروي اكستروژن		درصد خطا
		اين مقاله	تجربي	
۱	sr-1	۲۹۰۰۰	۳۳۵۰۰	۱۳,۴
۲	sr-2	۲۵۰۰۰	۳۹۰۰۰	۱۰,۳
۳	sr-3	۴۰۰۰۰	۲۸۰۰۰	۱۰,۷
۴	sr-4	۴۰۰۰۰	۳۴۰۰۰	۱۷,۶
۵	sa-1	۲۵۰۰۰	۳۳۵۰۰	۲۵,۴
۶	sa-2	۴۲۰۰۰	۴۱۵۰۰	۱,۲

شكل (۱۰) انحناي پروفيل خروجي از قالب براي مدل sr-1 را نشان مي دهد.. همانطور كـه از مقايسـه شـكل هـاي مذكور مشاهده مي شود انحناي عمومي نتايج مرجع (۵) و شبيه سازی اين مقاله توافق خوبي را با نتايج تجربي نشان مي دهد.



شكل ۱۰ : انحناي پروفيل خروجي از قالب براي مدل sr-1، خط پر: نتايج تجربي ارائه شده در مرجع (۵) و خط چين: نتايج حاصل از روش حد بالا ارائه شده در مرجع (۵)، خط نقطه نتايج بدست آمده از تحليل با اين مقاله.

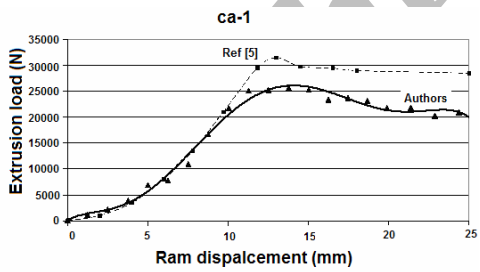
شكل (۱۱) انحناي پروفيل خروجي از قالب مدل sr-2 بدست آمده از اين مقاله را نشان ميدهـد. همـانطور كه از مقايسه شكل هاي مذكور مشاهده مي شود انحنـاي عمومي نتايج مرجع (۵) و ايـن مقالـه توافـق خـوبي را بـا نتايج تجربي نشان مي دهد.



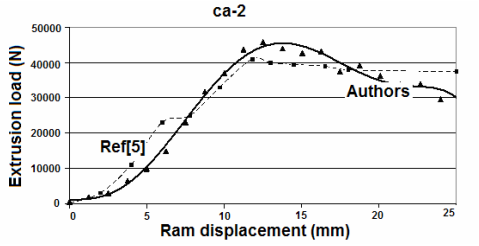
شكل ۱۱ : انحناي پروفيل خروجي از قالب براي مدل sr-2، (الف) خط پر: نتايج تجربي ارائه شده در مرجع (۵) و خط چين: نتايج حاصل از روش حد بالا ارائه شده درمرجع (۵)، (ب) نتايج بدست آمده از تحليل با اين مقاله.

پروفيل قالب پيشرفته

در اين بخش به بررسي نتايج بدسـت آمـده از مـدل هاي دايره خارج از مركز بـا پروفيـل قالـب پيشـرفته مـي پردازيم. شكل هاي (۱۲) و (۱۳) منحني نيروي اكستروژن بر حسب تغيير مكان كوبه را براي پروفيل قالـب پيشـرفته نشان مي دهد كه درصد خطـاي آن بـا نتـايج تجربـي در جدول (۵) ارائه شده است.

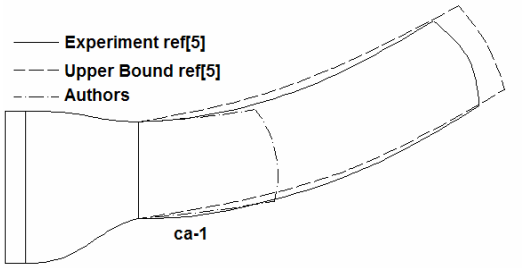


شكل ۱۲ : منحني تغييرات نيروي اكستروژن بر حسب تغيير مكان كوبه براي مدل ca-1.

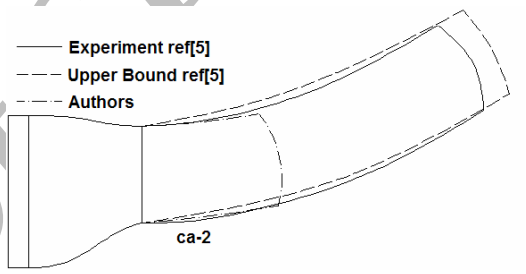


شكل ۱۳ : منحني تغييرات نيروي اكستروژن بر حسب تغيير مكان كوبه براي مدل ca-2.

در شكل هـاي (۱۴) و (۱۵) انحنـاي پروفيـل خروجـي از قالب نشان داده شده است كه نتايج ارائه شده توسط ايـن مقاله و مرجع (۵) توافق خوبي را بـا نتـايج تجربـي نشـان مي دهد.

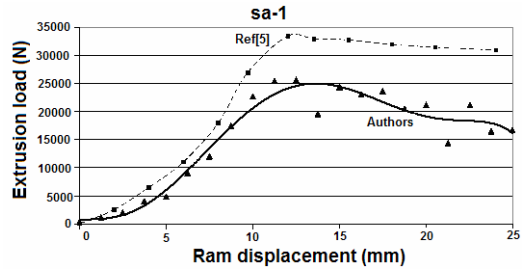


شكل ١٤ : انحناي پروفيل خروجي از قالب براي مدل ca-1، خط پر: نتايج تجربي ارائه شده در مرجع (۵) و خط چين: نتايج حاصل از روش حد بالا ارائه شده درمرجع (۵)، خط نقطه: نتايج بدست آمده از تحليل با اين مقاله.



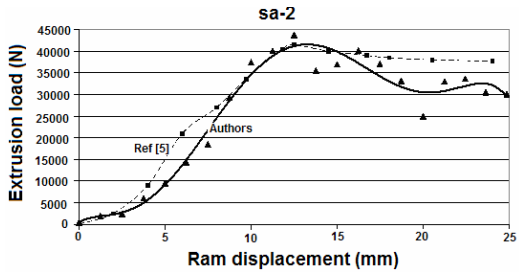
شكل ١٥ : انحناي پروفيل خروجي از قالب براي مدل ca-2، خط پر: نتايج تجربي ارائه شده در مرجع (۵) و خط چين: نتايج حاصل از روش حد بالا ارائه شده در مرجع (۵)، خط نقطه نتايج بدست آمده از تحليل با اين مقاله.

در اين بخش به بررسي نتايج بدست آمده از مـدل هـاي مربع خارج از مركز با پروفيل قالب پيشرفته مـي پـردازيم. شـكل هـاي (۱۶) و (۱۷) منحنـي نيـروي اكسـتروژن بـر حسب تغيير مكان كوبه را بـراي پروفيـل قالـب پيشـرفته نشان مي دهد كه درصد خطـاي آن بـا نتـايج تجربـي در جدول (۶) ارائه شده است.

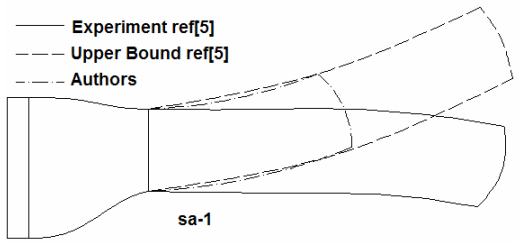


شكل ١٦ : منحني تغييرات نيروي اكستروژن بر حسب تغيير مكان كوبه براي مدل sa-1.

در شكل هـاي (۱۸) و (۱۹) انحنـاي پروفيـل خروجـي از قالب نشان داده شده اسـت كـه نتـايج ارائـه شـده توسـط مرجع (۵) توافق خوبي را با نتايج ارائـه شـده توسـط ايـن مقاله نشان مي دهد.

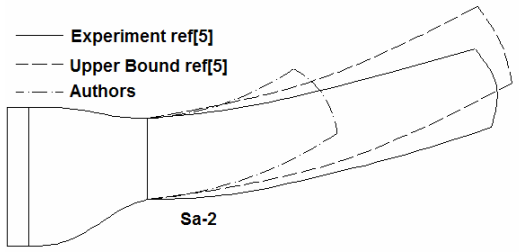


شكل ١٧ : منحني تغييرات نيروي اكستروژن بر حسب تغيير مكان كوبه براي مدل sa-2.



شكل ١٨ : انحناي پروفيل خروجي از قالب براي مدل sa-1، خط پر: نتايج تجربي ارائه شده در مرجع (۵) و خط چين: نتايج حاصل از روش حد بالا ارائه شده درمرجع (۵)، خط نقطه نتايج بدست آمده از تحليل با اين مقاله.

اين نتايج براي مدل sa-2 توافق خوبي با نتايج تجربي دارد. ولي چنانچه در شكل (۱۹) مشاهده مي شود نتايج پيش بيني شده توسط مرجع (۵) و اين مقاله با نتايج بدست آمده از آزمايش متفاوت مي باشد.



شكل ١٩ : انحناي پروفيل خروجي از قالب براي مدل sa-2، خط پر: نتايج تجربي ارائه شده در مرجع (۵) و خط چين: نتايج حاصل از روش حد بالا ارائه شده در مرجع (۵)، خط نقطه نتايج بدست آمده از تحليل با اين مقاله.

تاثير پروفيل قالب بر نيروي اكستروژن

براي تبديل سطح مقطع دايره اي سيلندر به سطح مقطع خروجي قالب از پروفيـل هـاي متفـاوتي در فراينـد اكستروژن اسـتفاده مـي شـود. از جملـه ايـن پروفيـل هـا

مي توان پروفيل هاي چند جمله اي[8]، تخت[9]، مثلثاتي، خطي (مخروطي)[10] و به طور كلي پروفيل هاي پيشرفته[11] را نام برد. اين مدل ها فقط در پروفيل قالب متفاوت مي باشند لذا تاثير پروفيل قالب بر نيروي اكستروژن را مي توان براي آنها محاسبه كرد. با توجه به نتايج ارائه شده، نيروي اكستروژن در مدل sa-1 تقريبا ۱۳,۸ درصد از نيروي اكستروژن مدل sr-1 كمتر است. همين مقدار براي مدل sa-2 حدود ۲,۳ درصد از نيروي اكستروژن مدل sr-2 كمتر مي باشد. لذا مي توان گفت تغيير پروفيل قالب از خطي (مخروطي) به پيشرفته مي تواند نيروي اكستروژن را به طور متوسط ۱۰ درصد كاهش دهد.

مراجع

1 - Webster, W. (1978). *A three dimensional analysis of extrusion and metal forming by the finite element method*, PhD dissertation, Missouri – Rolla Univ.

2 - Zhan, Y., Wang, Z. R. and Chen, W. (1995). "Numerical for extrusion and ironing and die angle optimization." *J. Materials processing technology*, Vol. 55, PP. 44 – 59.

3 - Chung – Lee, H. (1997). "Plane strain extrusion sequential limit analysis." *Int.J.Mech.Sci,* Vol. 39, No. 7, PP 807 – 817.

4 - Goureia, B. P. P. A., Rodrigues, J. M. C. and Martins, P. A. F. (1998). "Finite element modeling of cold forward extrusion using updated Lagrangian and combined Eulerian – Lagrangian formulation." *J. Materials processing technology*, Vol. 80 – 81, PP. 647 – 652.

5 - Celik, K. F. and Chitkara, N. R. (2000). "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.

6 - Celik, K. F. and Chitkara, N. R. (2002). "Extrusion of non – symmetric U- and I- shaped sections through ruled – surface dies: numerical simulations and experiments." *Int. J. Mech. Sci.,* Vol. 44, PP.217 – 246.

7 - Chitkara, N. R. and Celik, K. F. (2001). "Extrusion of non – symmetric T- shaped sections, an analysis and some experiments." *Int. J. Mech. Sci.,* Vol. 43, PP.2961– 2987.

8 - Zare-Baghdadabadi, H. and Abrinia, K. (2003). "A new solution for the extrusion of complex sections." *11th International ISME Conference*, Ferdossi University, Mashhad, I.R.Iran, (In Farsi).

9 - Rezaeezadeh, M. and Abrinia, K. (2005). "An analysis of the forward axisymmetric extrusion using FEM." *13th ISME Conference*, Isfahan University of Technology, Isfahan, I.R.Iran, (In Farsi).

واژه هاي انگليسي به ترتيب استفاده در متن

1 - Ideal Work Method
2 - Slab Method
3 - Slip Line Field Method
4 - Upper Bound Method
5 - Finite Element and Finite Difference Method
6 - Tellurium lead
7 - Off-Centric
8 - Polynomial surface die
9 - Flat surface die
10 - Ruled surface die
11 - Advanced surface die