

شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند آهنگری پلوس پراید به روش اویلری - لاگرانژی اختیاری، جهت بهبود فرآیند تولید و قالب‌ها

محمد رضا صیدی^۱، محسن لوح موسوی^۲
Mrezaseidy@yahoo.com

پذیرش مقاله: ۸۹/۰۵/۱۶

دریافت مقاله: ۸۹/۰۲/۱۲

چکیده

یکی از مهمترین قطعات سیستم انتقال قدرت در خوروهای امروزی، مجموعه پلوس است که وظیفه آن، انتقال گشتاور و سرعت دورانی خروجی از گیربکس به چرخ‌ها با نسبت ثابت است. مجموعه پلوس از چهار قطعه تشکیل شده که یکی از آنها کاسه خارجی است. به علت پیچیده بودن قطعه و با توجه به اهمیت آن در خودرو و وجود تنش‌های بالا، تنها راه مقرون به صرفه تولید آن، فرآیند آهنگری می‌باشد. شکل ظاهری قطعه، حداقل دو مرحله آهنگری را برای تولید مطرح می‌سازد. ابتدا شکل‌گیری قسمت دسته توسط اکستروژن مستقیم و سپس قسمت کاسه توسط اکستروژن معکوس. در این تحقیق فرآیندهای اکستروژن مستقیم و معکوس داغ پلوس پراید همراه با پیش گرم و با در نظر گرفتن اتلاف دما تا لحظه اعمال ضربه سنبه، به روش اجزای محدود شبیه‌سازی شده است. قالب‌ها جهت بررسی دما و تنش به صورت توپیر و الاستیک در نظر گرفته شده‌اند. نمودار نیروی لازم در طول فرآیند براساس جابه‌جایی سنبه و سایر نتایج مربوطه، در انتها مورد بحث قرار گرفته‌اند. جهت معتبرسازی، نتایج عددی حاصل، با نتایج حل تئوری مقایسه شده‌اند بطوریکه نتایج این مقایسه از همخوانی خوبی برخوردار است.

کلیدواژه:

آهنگری داغ - پلوس - روش اجزای محدود - اکستروژن مستقیم - اکستروژن معکوس

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی‌شهر

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی‌شهر، loh-mousavi@iaukhsh.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه صنعت خودرو در جهان پیشرفت زیادی داشته و تأمین قطعات، یکی از بخش‌های مهم این صنعت است. یکی از این قطعات، که در سیستم انتقال قدرت خودرو استفاده می‌شود مجموعه پلوس (C.V. Joint) است [۱]. این مجموعه شامل چهار جزء است (شکل (۱)). یکی از این اجزاء، کاسه خارجی (Outer Socket) است. با توجه به وظیفه حساس این قطعه و اعمال تنش‌های بالا به آن [۲]، تنها راه تولید مقرون به صرفه، آهنگری آن است. قطعه خام استوانه‌ای شکل، پس از اکستروژن مستقیم داغ (Hot Forward Extrusion) قسمت دسته را بوجود می‌آورد و پس از آن طی یک مرحله اکستروژن معکوس (Hot Backward Extrusion) قسمت کاسه قطعه، شکل می‌گیرد.

در سال‌های اخیر توجه خاصی به استفاده از کامپیوتر در مهندسی (CAE)، و حل عددی توسط آن، برای پیش‌بینی رفتار مواد در شکل‌دهی و طراحی قالب‌های آهنگری شده است. یکی از روش‌های حل عددی فرآیندهای شکل‌دهی، روش حجم محدود است که در آن مدلسازی در فضای اویلری صورت می‌گیرد و نتایج خوبی از این روش، در شبیه‌سازی فرآیندها از جمله اکستروژن داغ گرفته شده است. به‌عنوان نمونه می‌توان به کار قبلی یکی از نویسندگان مقاله اشاره کرد [۳]. روش دیگر، روش اجزای محدود (FEM) است که بیشتر بر مبنای مدلسازی لاگرانژی انجام می‌شود. توسط این روش، آهنگری چند مرحله‌ای قطعات پیچیده [۴]، تحلیل مراحل آهنگری [۵] و شبیه‌سازی فرآیندهای شکل‌دهی به خصوص آهنگری و اکستروژن [۶ و ۷ و ۱۲] انجام گرفته است هر چند به دلیل اعوجاج زیاد المان‌ها تحلیل فرآیندهای آهنگری چند مرحله‌ای بسیار وقتگیر و مشکل است. با توجه به تحقیقات انجام شده و پاسخ‌های مناسب گرفته شده، مقرر گردید مراحل آهنگری پلوس پراید جهت بهینه‌سازی مراحل ساخت و قالب‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

در این تحقیق دو مرحله اکستروژن و پیش گرم‌های قبل از آن، به منظور بدست آوردن دمای واقعی قطعه در هنگام شروع شکل‌گیری، به روش اجزای محدود شبیه‌سازی شده است. قالب‌ها به‌صورت توپر و الاستیک فرض شده تا بتوان تنش‌ها و تأثیرات دمایی در آنها را بررسی نمود. شبیه‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS و به کمک حل اویلری لاگرانژی اختیاری (ALE) انجام گرفته است. نتایج شامل نیروهای لازم جهت شکل‌گیری، دما و تنش در قطعه و قالب‌ها پس از شکل‌گیری، بدست آمده است. به‌منظور بررسی اعتبار نتایج شبیه‌سازی، نتایج بدست آمده با نتایج تحلیل تئوری مقایسه گردیده است.

۲- مراحل آهنگری

قطعه باید در دو مرحله به‌صورت داغ آهنگری گردد، بنابراین در کوره به دمای 1000°C رسیده و در کمترین زمان ممکن در قالب شکل می‌گیرد. فرض شده است که زمان انتقال از کوره به قالب 10 ثانیه و تأخیر ضربه سنبه 5 ثانیه باشد و قالب‌ها تا دمای 300°C پیش گرم شوند. در زمان انتقال قطعه تا لحظه اعمال ضربه سنبه، قطعه با هوای 20°C انتقال حرارت جابه‌جایی دارد. هنگامی که قطعه در قالب قرار می‌گیرد، مقداری از حرارت به‌طور هدایتی به قالب منتقل می‌شود. ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی با هوا و انتقال حرارت هدایتی با آزمایش‌های انجام شده در مرجع [۶] به ترتیب $600\text{ Wat/m}^2\text{K}$ و $600\text{ Wat/m}^2\text{K}$ معرفی شده است. پرس از نوع هیدرولیکی و سرعت سنبه به‌طور ثابت و برابر $0/3$ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. مدل اصطکاکی به صورت کولمبی و با توجه به مرجع [۸] ضریب اصطکاک، $0/3$ در نظر گرفته می‌شود.

۳- طراحی قالب‌ها

در ابتدا قطعه آهنگری، طراحی شده که در شکل (۲) به همراه قطعه ماشینکاری نهایی نشان داده شده است. قالب اکستروژن مستقیم به گونه‌ای طراحی می‌شود که قسمت دسته به طور کامل شکل بگیرد. سنبه در این مرحله به طور ساده در نظر گرفته می‌شود تا قطعه در قسمت بالا تغییر شکل زیادی نداشته باشد. قالب مرحله اکستروژن معکوس به گونه‌ای طراحی می‌شود که در قسمت دسته تغییر شکل زیادی نداشته باشد و فقط قسمت کاسه توسط جریان معکوس مواد، بین سنبه و ماتریس شکل بگیرد. جنس قالب‌ها DIN 1.2714 (56NiCrMoV7) در نظر گرفته شده که دارای چقرمگی بالاست و در نتیجه تمایل کمتری به شکست دارد [۹]. خواص این ماده، از کتابخانه نرم‌افزار Super Forge استخراج گردیده است.

۴- قطعه خام اولیه

قطعه نهایی در قسمت شیار ساچمه و هزار خاری سختکاری سطحی القایی می‌گردد، بنابراین مناسبترین جنس که هم خواص آهنگری خوب و هم خوش تراش باشد و سختی بالا بپذیرد، DIN 1.1191 یا CK45 است. مراحل شبیه‌سازی به‌صورت کوپل انتقال حرارت و جابه‌جایی در نظر گرفته شده است و خواص جنس فوق برحسب دما برای نرم‌افزار تعریف شود. از کتابخانه نرم‌افزار Super Forge خواص، استخراج گردیده و به‌صورت نمودارهایی در

که در آن، R نسبت تغییرشکل یا همان $\frac{A_0}{A_f}$ است. با توجه به رابطه فوق و پارامترهای مندرج در شکل (۸) نرخ کرنش به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{\epsilon} = 28.9$$

براساس این مقدار و به کمک نمودار تنش-کرنش مربوط به دمای 1000°C (شکل (۷))، میزان σ_0 حدوداً 200Mpa در بدست آید. با توجه به معادله زیر، برای فاکتور اصطکاک داریم:

$$\mu = \frac{m}{1 + 0.5\pi + \cos^{-1}(m) + \sqrt{1 - m^2}} \quad (4)$$

$$\mu = 0.3 \Rightarrow m = 0.95$$

با قراردادن مقادیر با توجه به شکل (۸) و رابطه (۲) برای p_d داریم:

$$\Rightarrow p_d = 1349.2 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

حال برای قسمت دوم معادله با در نظر گرفتن $\tau_i = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}$ و با توجه به پارامترهای نشان داده شده در شکل (۸)، از رابطه (۱) مقدار p_e مطابق زیر بدست می‌آید:

$$p_e = 1795.8 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

حال با استفاده از معادله $F = p_e A$ و قرار دادن سطح مقطع بالای قطعه به‌عنوان A ، برای نیروی لازم جهت تغییر شکل داریم:

$$F = 5.08 \times 10^6 \text{ N}$$

برای بدست آوردن نیروی لازم در اکستروژن معکوس، از رابطه (۱) استفاده می‌شود، با این تفاوت که قسمت دوم، که مربوط به تأثیر اصطکاک بین قطعه و محفظه قالب است، حذف می‌شود. بنابراین رابطه به‌صورت $p_e = p_d$ در خواهد آمد. با قراردادن پارامترهای شکل‌های (۸) و (۹) در رابطه (۲)، برای p_e بدست می‌آوریم:

$$p_e = 673.2 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

حال با استفاده از مساحت تصویر سطح زیر سنبه به‌عنوان A ، در رابطه $F = p_e A$ نیرو به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$F = 1.14 \times 10^6 \text{ N}$$

شکل‌های (۳) تا (۷) نمایش داده شده است. مشخصات قطعه مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است.

۵- حل تئوری

روش‌های گوناگونی جهت محاسبه و پیش‌بینی میدان سرعت و نیروی لازم در فرآیندهای شکل‌دهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از این روش‌ها، روش Slab Method است. با استفاده از این روش می‌توان به سرعت و با دقت نسبتاً خوبی، نیروی لازم جهت اکستروژن را بدست آورد. براساس این روش، فشار لازم برای شکل دهی در اکستروژن توسط De Pierre به‌صورت زیر بیان می‌شود [۱۰]:

$$p_e = p_d + \frac{4\tau_i L}{D} \quad (1)$$

که در آن، τ_i = تنش برشی ماده، L = طول قطعه در محفظه قالب، D = قطر داخلی محفظه قالب و p_d توسط Avitzur به‌صورت عبارت زیر بیان شده است [۱۱]:

$$p_d = \frac{2\sigma_0}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) + \sigma_0 [2f(\alpha) + m \cot \alpha] \ln(r_0/r_f) + 2\sigma_0 m \left[\frac{L_f}{r_0} - \left(1 - \frac{r_f}{r_0} \right) \cot \alpha \right] \quad (2)$$

که در آن، σ_0 ، تنش تسلیم ماده، α ، نصف زاویه قالب، $f(\alpha)$ ، تابعی پیچیده که به‌صورت تقریبی می‌توان مقدار آن را یک در نظر گرفت. m ، فاکتور اصطکاک، r_0 ، شعاع داخلی محفظه قالب، r_f ، شعاع قطعه اکستروژن شده و L_f ، طول قسمت اکستروژن شده است. برای بدست آوردن p_d ، ابتدا مقدار σ_0 و m محاسبه گردید. دمای قطعه خام در کوره به 1000°C می‌رسد و سپس در قالب شکل می‌گیرد. دمای قطعه هنگام تغییر شکل 1000°C فرض شده است و با بدست آوردن نرخ کرنش از روی نمودار تنش-کرنش پلاستیک وابسته به دما، مقداری برای σ_0 استخراج گردید. با توجه به حجم مواد موجود در قسمت مخروطی قالب رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\epsilon}}{t} = \frac{6vD_0^2 \tan \alpha \ln R}{D_0^3 - D_f^3} \quad (3)$$

۶- شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند

کلیه مراحل که در بند مراحل آهنگری توصیف شد، همراه با خواص و شرایط دمایی اولیه، مربوط به قطعه و قالب، و انتقال حرارت از قطعه به هوا و قالب‌ها در نرم‌افزار ABAQUS تعریف گردید (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). قطعه‌ای که در شکل (۱۱) به عنوان قطعه پیش فرم مشخص شده، قطعه بدست آمده در اکستروژن مستقیم است و قطعه نگهدارنده جهت جلوگیری از زیاد طول دسته در اکستروژن معکوس تعبیه شده است. به منظور حل مشکل، اعوجاج المان‌ها در طول فرآیندهای شکل دهی، از الگوی بهینه سازی ALE در نرم‌افزار استفاده شد. تحلیل در زمان کلی حدوداً ۳ ساعت، توسط یک کامپیوتر Quad CPU با سرعت ۲/۷ گیگاهرتز انجام گرفت.

۷- نتایج و بحث

مراحل شکل‌گیری قطعه در اکستروژن مستقیم در شکل (۱۲) ارائه شده است. دمای قطعه خام اولیه در لحظه فرود آمدن سنبه و در انتهای اکستروژن مستقیم در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نمایش داده شده است. دما در سطح قطعه، به دلیل اصطکاک، و انرژی حاصل از تغییر شکل، افزایش داشته است. منحنی نیروی سنبه در اکستروژن مستقیم بر اساس جابه‌جایی سنبه در شکل (۱۵) نشان داده شده است. الگوی تنش در شکل (۱۶) نشان می‌دهد در جایی که افت دمای بیشتر و کاهش سطح مقطع وجود دارد، تنش بیشتر است. همانطور که در شکل (۱۷) مشخص است، قسمت بالای قطعه، کرنش پلاستیک کمتری داشته است. موادی که در سطح قطعه، بر روی قالب کشیده شده و شکل قالب را به خود گرفته‌اند، بیشترین کرنش پلاستیک را دارند. در شکل (۱۸) وضعیت بردار سرعت در انتهای اکستروژن مستقیم بیان می‌نماید که در قسمت انتهایی دسته سرعت مواد به علت کاهش سطح مقطع بیشتر از بقیه نقاط است. شکل‌های (۱۹) و (۲۰) وضعیت تنش و دما را در ماتریس و شکل (۲۱) تنش در سنبه را مشخص می‌نماید. مراحل شکل‌گیری قطعه در اکستروژن معکوس در شکل (۲۲) نشان داده شده است.

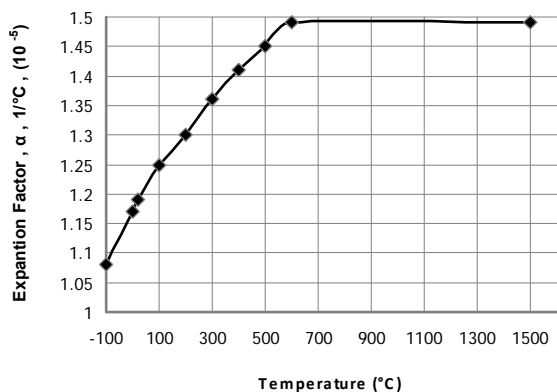
دمای قطعه در لحظه فرود آمدن سنبه و در انتهای فرآیند اکستروژن معکوس در شکل‌های (۲۳) و (۲۴) نشان می‌دهند که قطعه در قسمتی که تغییر شکل زیادی ندارد، بیشترین کاهش دما را در سطح داشته است و در منطقه زیر سنبه به علت تغییر شکل زیاد و وجود اصطکاک، افزایش دما اتفاق افتاده است. نمودار دمای نقاط روی محور تقارن قطعه، از پایین قطعه به بالای آن، در ابتدا و انتهای اکستروژن معکوس، در شکل (۲۵) نشان می‌دهد که در

نقاط ابتدای نمودار (قسمت دسته)، تغییر نامحسوسی در دما وجود دارد که علت آن تأثیر کم انتقال حرارت هدایتی با قالب، روی این نقاط است. ولی در نقاط انتهایی نمودار (قسمت کاسه)، که تغییر شکل بیشتر در آن منطقه رخ می‌دهد، افزایش دما بوجود آمده است. لازم به ذکر است در چند نقطه انتهایی نمودار به دلیل تماس با قالب و انتقال حرارت به آن، دمای نقاط نسبت به نقاط قبل کاهش داشته است. منحنی نیروی سنبه بر اساس جابه‌جایی آن، در شکل (۲۶) نشان می‌دهد که با افزایش سطح تماس مواد با سنبه، نیرو نیز افزایش می‌یابد.

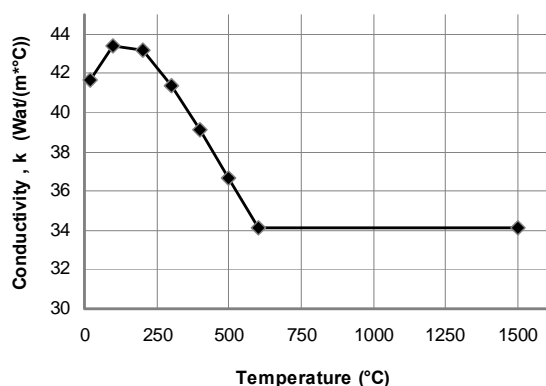
وقتی که مواد بین سنبه و ماتریس رو به بالا حرکت می‌کنند، شیب نمودار افزایش می‌یابد و در ۳ میلی‌متر انتهایی حرکت سنبه، که مواد قالب را پر می‌کنند، بیشترین نیرو لازم است. شکل (۲۷) و (۲۸) وضعیت تنش در ماتریس و سنبه را مشخص می‌کند. همانطور که مشخص است، در لبه‌های تیز که مواد روی قالب تغییر جهت حرکت می‌دهند، بیشترین تنش‌ها بوجود می‌آید. جهت مقایسه نتایج حل تئوری با شبیه‌سازی، از منحنی‌های مربوط به نیروی سنبه، مقادیر نیرو در دو مرحله اکستروژن استخراج شده است. از منحنی نیروی سنبه در اکستروژن مستقیم در شکل (۱۵)، مقدار ماکزیمم آن، در نظر گرفته می‌شود. روی منحنی نیروی سنبه در اکستروژن معکوس شکل (۲۶) مقدار ماکزیمم، مربوط به نیروی لازم جهت پر کردن قالب است و بنابراین مقدار مناسبی جهت مقایسه با نیروی بدست آمده از حل تئوری نیست. از این رو، محل صعود منحنی انتخاب شده است، همانطور که مشخص است نمودار در این منطقه تغییرات زیادی دارد. به منظور میانگین‌گیری از این تغییرات، روی بازه ۲۷/۵ تا ۴۲/۵ میلی‌متر از جابجایی سنبه، انتگرال‌گیری کرده و بر بازه انتگرال‌گیری، تقسیم می‌نمائیم. مقایسه نتایج در جدول (۲) نشان می‌دهد، نتایج شبیه‌سازی همخوانی خوبی با نتایج حل تئوری دارد. حال با استفاده از نتایج بدست آمده می‌توان ادعا نمود که پلوس را توسط دو دست قالب و دو پرس ضربه‌ای، یکی با ظرفیت ۸۰۰ ton (ضریب اطمینان ۱/۵) جهت مرحله اکستروژن مستقیم و دیگری با ظرفیت ۱۸۰ ton (ضریب اطمینان ۱/۵) برای مرحله اکستروژن معکوس، آهنگری کرد.

۸- نتیجه‌گیری

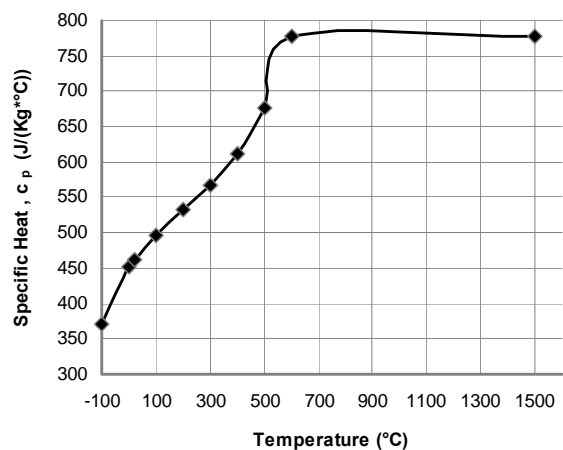
در این تحقیق، فرآیندهای آهنگری پلوس شامل: اکستروژن مستقیم و معکوس داغ، به کمک روش اجزای محدود و توسط نرم افزار ABAQUS شبیه‌سازی شد و نتایج مورد بحث قرار گرفت. نتایج عددی حاصل از این تحلیل با تحلیل تئوری مقایسه گردید



شکل (۴): ضریب انبساط گرمایی برحسب تغییرات دما برای CK45 [۱۳]



شکل (۵): وابستگی ضریب رسانایی گرما به دما [۱۳]



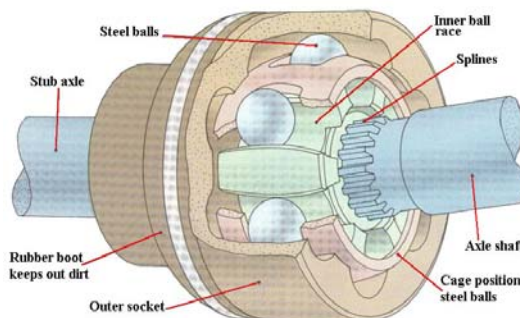
شکل (۶): تغییرات گرمای ویژه برحسب دما [۱۳]

جدول (۱): مشخصات فولاد مورد استفاده [۱۳]

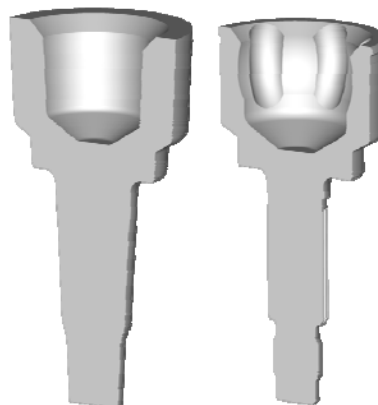
مشخصات قطعه خام	
جنس	CK45 یا DIN 1.1191
چگالی	۷۸۶۰ Kg/m ³
ضریب پواسون	۰/۳
قطر قطعه	۶۰ mm
طول قطعه	۷۲/۷ mm

که با یکدیگر سازگاری خوبی داشتند. بنابراین می‌توان مراحل در نظر گرفته شده جهت تولید پولس را شبیه‌سازی کرده و پس از تحلیل آنها توسط روش اجزای محدود، قالب‌ها و حتی مراحل را بهینه‌سازی نمود و پس از آن با استفاده از نیروهای بدست آمده و مراحل طراحی شده تجهیزات مورد نیاز را پیشنهاد داد.

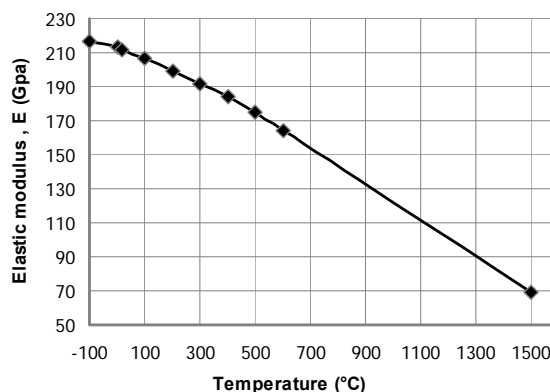
۹- شکل‌ها و جدول‌ها



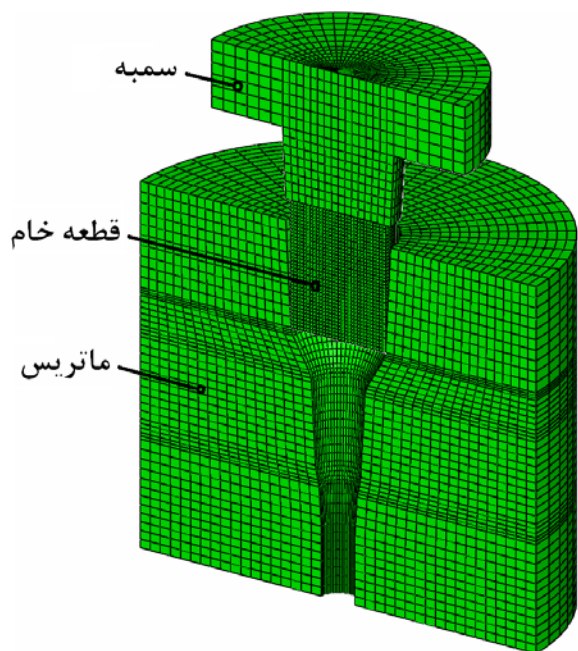
شکل (۱): قطعات مجموعه پولس (C.V. Joint)



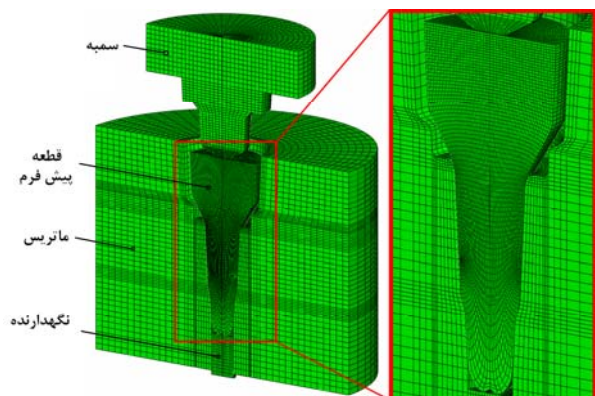
شکل (۲): مدل هندسی قطعه آهنگری شده و قطعه ماشینکاری نهایی



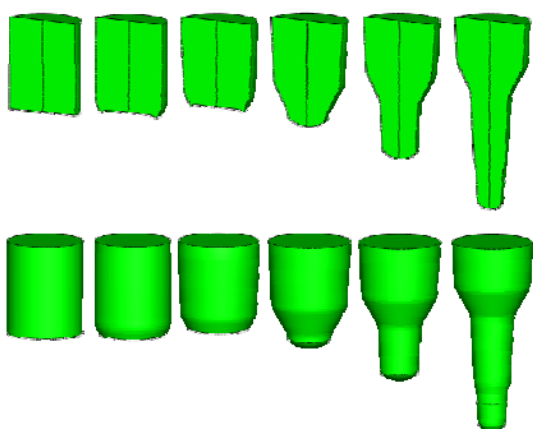
شکل (۳): تغییرات مدول کشسانی CK45 برحسب دما [۱۳]



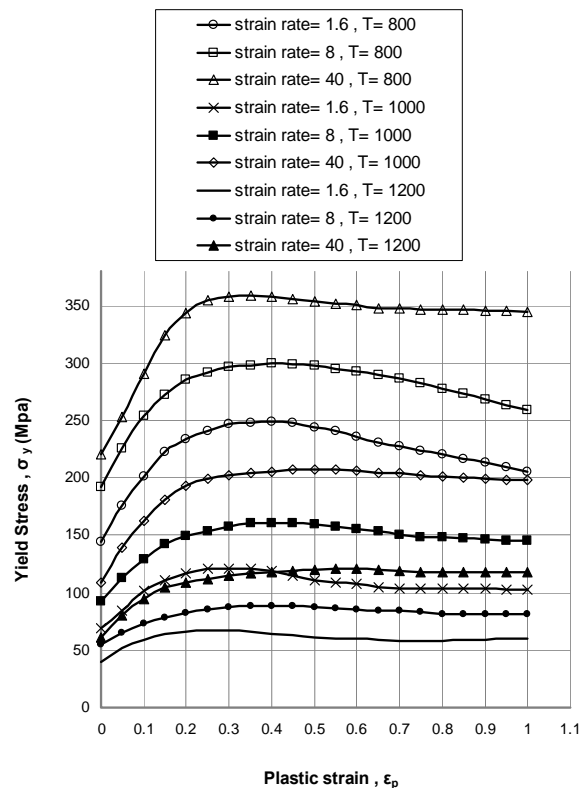
شکل (۱۰): مدل اجزای محدود قطعه و قالب اکستروژن مستقیم مدل شده به وسیله نرم‌افزار ABAQUS



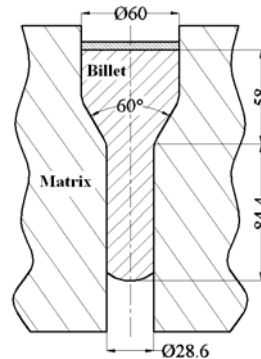
شکل (۱۱): مدل اجزای محدود قطعه و قالب اکستروژن معکوس در نرم‌افزار ABAQUS



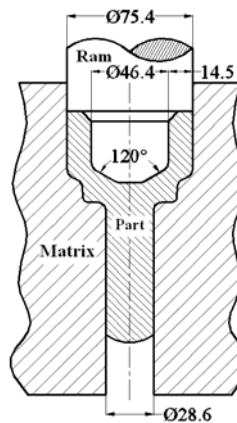
شکل (۱۲): مراحل شکل‌گیری قطعه در اکستروژن مستقیم



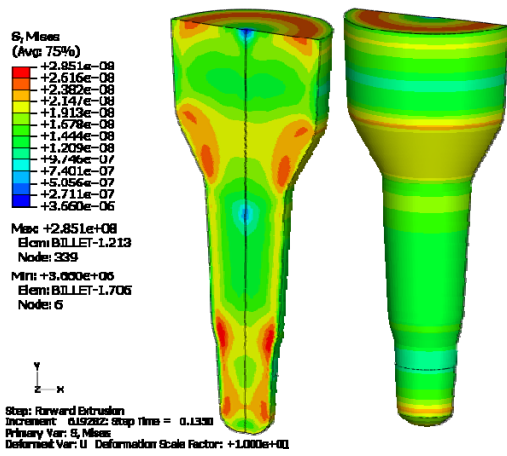
شکل (۷): نمودارهای تنش-کرنش پلاستیک بر اساس دما و نرخ کرنش [۱۳]



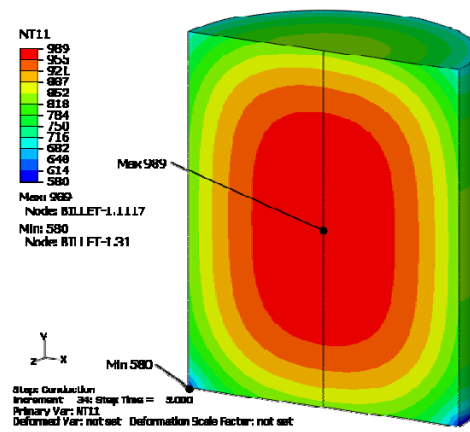
شکل (۸): طرح شماتیک قطعه در انتهای اکستروژن مستقیم



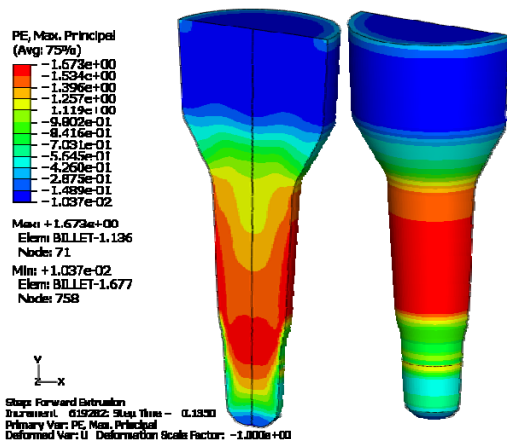
شکل (۹): طرح شماتیک قطعه در انتهای اکستروژن معکوس



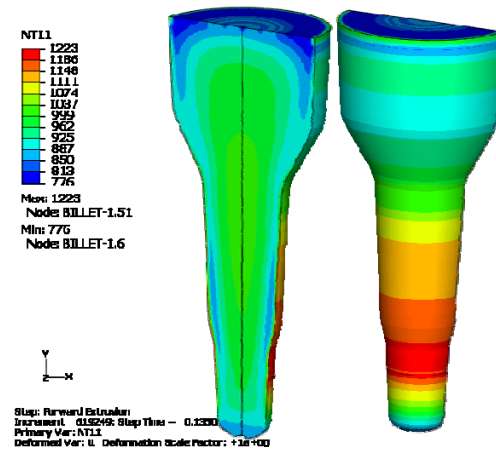
شکل (۱۶): الگوی تنش در قطعه در انتهای اکستروژن مستقیم



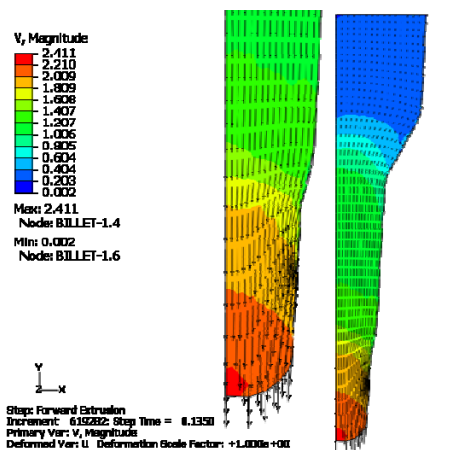
شکل (۱۳): دمای قطعه خام قبل از فرود آمدن سنبه در اکستروژن مستقیم



شکل (۱۷): الگوی کرنش پلاستیک در قطعه در انتهای اکستروژن مستقیم

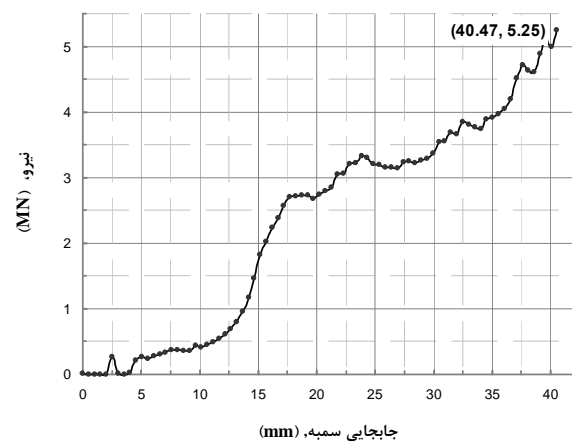


شکل (۱۴): دمای قطعه در انتهای اکستروژن مستقیم

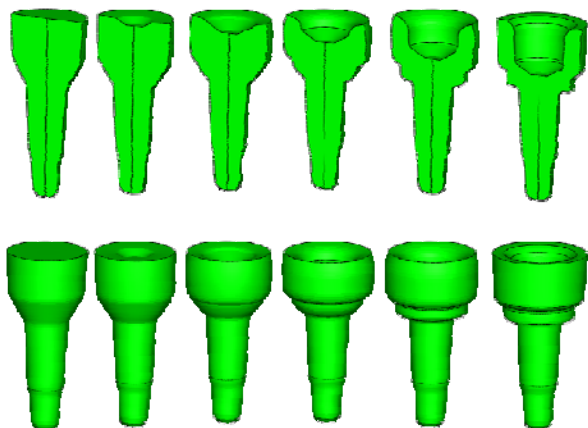


شکل (۱۸): وضعیت بردار سرعت در قطعه در انتهای اکستروژن مستقیم

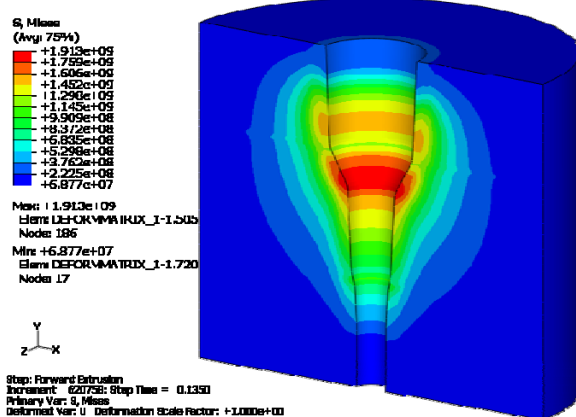
نیروی سنبه در اکستروژن مستقیم (Forward Extrusion)



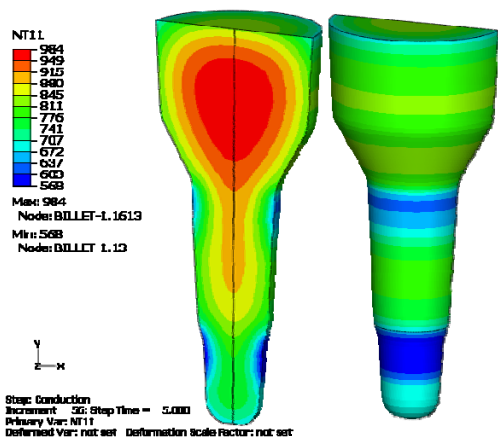
شکل (۱۵): منحنی نیروی سنبه بر اساس جابه‌جایی در اکستروژن مستقیم



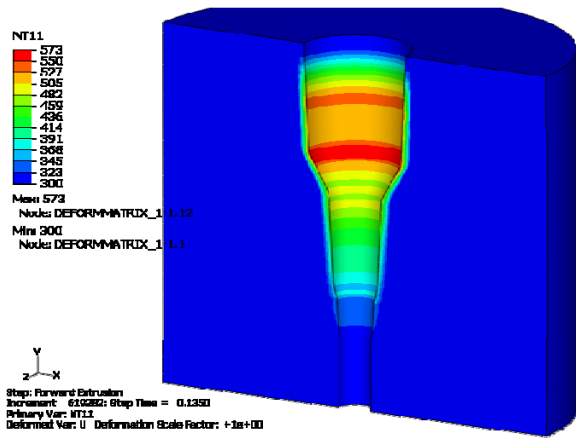
شکل (۲۲): مراحل شکل‌گیری قطعه در اکستروژن معکوس



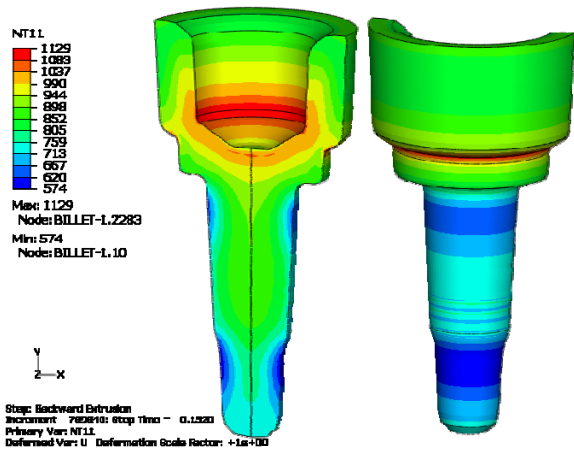
شکل (۱۹): الگوی تنش در ماتریس در انتهای اکستروژن مستقیم



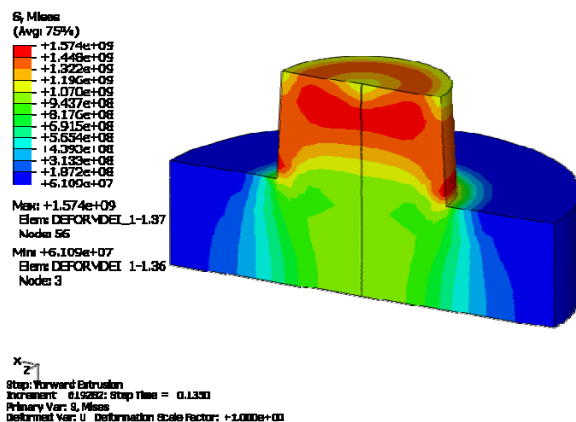
شکل (۲۳): دمای قطعه قبل از فرود آمدن سنبه در اکستروژن معکوس



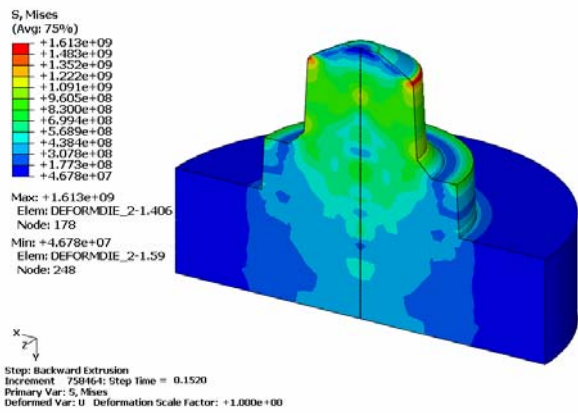
شکل (۲۰): الگوی دمای ماتریس در انتهای اکستروژن مستقیم



شکل (۲۴): دمای قطعه در انتهای اکستروژن معکوس



شکل (۲۱): الگوی تنش در سنبه در انتهای اکستروژن مستقیم



شکل (۲۸): الگوی تنش در سنبه در انتهای اکستروژن معکوس

جدول (۲): مقایسه نتایج حل تئوری با شبیه سازی عددی

فرآیند	نتایج		
	حل تئوری	شبیه سازی	درصد خطا
اکستروژن مستقیم	5.08 MN	5.25 MN	3%
اکستروژن معکوس	1.14 MN	1.19 MN	4%

۱۰- مراجع

[1] Sun, C., Li, S., and Wang, B., "Analysis of The Ironing of a B_j-Type Constant Velocity Joint Outer Race with the Upper Bound Element Method", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 100, Issues 1-3, 2000, pp. 209-213.

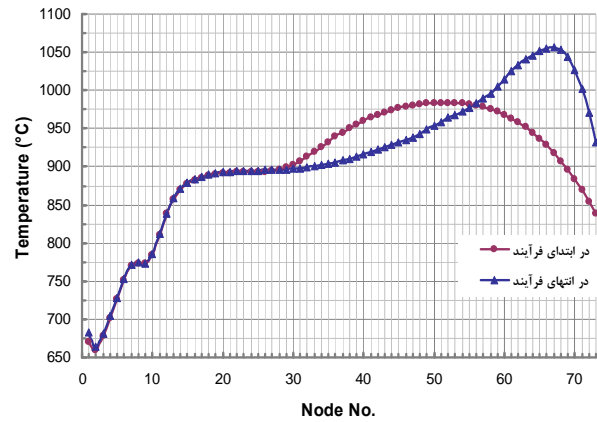
[2] Park, K. S., Kim, B. J., and Moon, Y. H., "Development of a Ball Groove Measuring System for Forged Outer Race Constant Velocity (CV) joints", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 191, Issues 1-3, 2007, pp. 145-148.

[۳] لوح موسوی، م.، بخشی، م.، "شبیه سازی حجم محدود سه بعدی و تحلیل تجربی اکستروژن داغ فولاد"، مجموعه مقالات دوازدهمین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، صفحه ۳۲۱-۳۳۱، ۱۳۸۱.

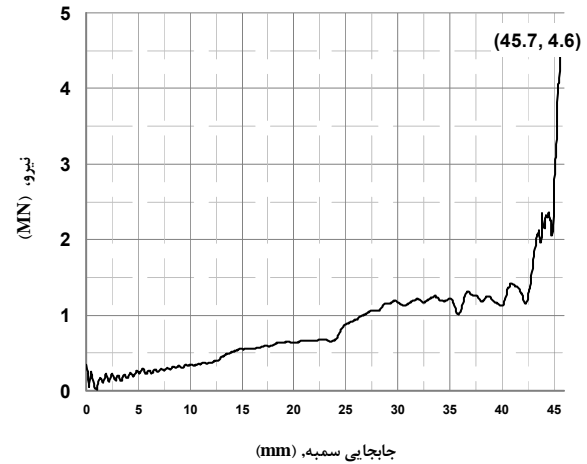
[4] Park, K. S., VanTyne, C. J., and Moon, Y. H., "Process Analysis of Multistage Forging by Using Finite Element Method", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187-188, 2007, pp. 586-590.

[5] Lee, J. H., Kang, B. S., and Lee, J. H., "Process Design in Multi-Stage Cold Forging by the Finite-Element Method", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 58, Issues 2-3, 1996, pp. 174-183.

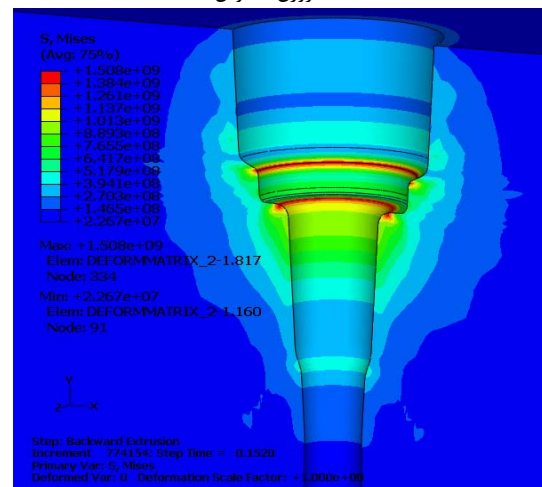
دمای محور تقارن قطعه در ابتدا و انتهای فرآیند اکستروژن معکوس



شکل (۲۵): دمای نقاط روی محور تقارن قطعه، از پایین قطعه به بالای آن، در ابتدا و انتهای اکستروژن معکوس (Backward Extrusion) نیروی سنبه در اکستروژن معکوس



شکل (۲۶): منحنی نیروی سنبه بر اساس جابه جایی در اکستروژن معکوس



شکل (۲۷): الگوی تنش در ماتریس در انتهای اکستروژن معکوس

- [10] DePierre, V., Trans. ASME, J. Lubr. Technol., Vol. 92, 1970, pp. 398-405.
- [11] Avitzur, B., Trans. ASME, Sec. B: J. Eng. Ind., Vol. 85, 1963, pp. 89-96, Vol. 86, 1964, pp. 305-316.
- [۱۲] لوح‌موسوی، م.، بخشی، م.، و حجتی، م. ح.، "شبیه‌سازی اجزای محدود و تحلیل تجربی اکستروژن سرد آلومینیوم"، مجموعه مقالات دهمین کنفرانس مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، صفحه ۹۲۱-۹۱۵، ۱۳۸۱.
- [13] MSC/Superforge Software Version 2002, Materials library.
- [6] Bakhshi-Jooybari, M., et al, "Finite Element Simulation and Experimental Study of Hot Closed-Die Upsetting", Int. J. of Machin Tools and Manufacture, Vol. 36, No. 9, 1996, pp. 1021-1032.
- [7] Rowe, G. W., et al, "Finite Element Plasticity and Metal Forming Analysis", Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1991.
- [8] Barrau, O., Boher, C., Vergne, C., Rezai-Aria, F., and Gras, R., "Investigations of Friction and Wear Mechanisms of Hot Forging Tool Steels", Karlstad University, Vol. 1, 2002, ISBN 91-89422-81-3, pp. 81-94.
- [۹] ولی نژاد، ع.، "طراحی و ساخت قالب و قیود"، چاپ پنجم، صفحه ۶۴، ۱۳۸۱.