ISME

مقايسه نيروي شكل دهي درفورجينگ دقيق و اكستروژن جانبي چرخ دنده هاي ساده

سجاد رسايي[1]
كارشناس ارشد

حشمت اله حقيقت[2]
استاديار

در اين مقاله فرآيند شكل دهي چرخ دنده هاي ساده به دو روش، روش فورجينگ دقيق و روش اكستروژن جانبي مورد مطالعه قرار گرفته است. نيروي شكل دهي در اين دو روش با تئوري كرانه فوقاني محاسبه شده است. براي تحليل كرانه فوقاني به دليل تقارن چرخ دنده ساده، یک نيم دندانه با پروفيل اينولوت به ناحيه هاي تغيير شكل كوچكتر تقسيم شده و مورد تحليل قرار گرفته است. با استفاده از ميدان هاي سرعتي كه در اين مقاله براي هر دو فرآيند شكل دهي ارايه شده، منحني هاي تغييرات نيروي شكل دهي بر حسب كاهش ارتفاع بيلت به دست آمده اند. نتايج حاصل از تحليل كرانه فوقاني براي فرآيندهاي اكستروژن جانبي و فورجينگ دقيق با يكديگر و همچنين با نتايج به دست آمده از شبيه سازي به روش حجم محدود (نرم افزار SuperForge) مقايسه شده اند. نشان داده شده كه نيروي شكل دهي در فرآيند اكستروژن جانبي كمتر از روش فورجينگ دقيق مي باشد. در پايان نيز اثر مدول چرخ دنده و ضريب اصطكاک بر نيروي شكل دهي بررسي شده اند.

واژه هاي راهنما: چرخ دنده ساده، اكستروژن جانبي، فورجينگ دقيق، كرانه فوقاني، حجم محدود.

۱- مقدمه

از چرخ دنده ها براي انتقال دور و گشتاور در ماشين ها استفاده مي شود. در سال هاي اخير، تمايل به توليد چرخ دنده ها با استفاده از روش هاي شكل دهي دقيق بسيار افزايش يافته است. چرخ دنده هايي كه از طريق فرآيند هاي شكل دهي توليد مي شوند در مقايسه با چرخ دنده هايي كه از طريق ماشينكاري ايجاد شده اند، داراي خواص مكانيكي بهتر، سرعت توليد بالاتر و اتلاف ماده خام كمتري مي باشند. در فرآيند شكل دهي چرخ دنده ساده با روش فورجينگ دقيق (precision forging) كه در شكل۱- الف نشان داده شده، مجموعه قالب از یک حفره كه به شكل مادگي چرخ دنده بوده و پانچ كه با شكل چرخ دنده ساده مشابه است، تشكيل شده است؛ در اين فرآيند بيلت داخل حفره قالب قرار گرفته و سپس با اعمال نيرو توسط پانچ ارتفاع آن كاهش يافته و شروع به پرشدن حفره قالب مي نمايد.

روش ديگر شكل دهي چرخ دنده هاي ساده، روش اكستروژن جانبي(lateral extrusion) است. در اين فرآيند كه در شكل۱- ب نشان داده شده، حفره قالب شبيه به حفره قالب در فورجينگ دقيق است اما پانچ

---

[1] كارشناس ارشد، گروه مكانيك، دانشگاه رازي كرمانشاه
[2] نويسنده مسئول، استاديار، گروه مكانيك، دانشگاه رازي كرمانشاه hhaghighat@razi.ac.ir

به شكل استوانه ساده مي باشد. در اين فرآيند بيلت داخل حفره قالب قرار داده شده و با اعمال نيرو توسط پانچ، ماده به صورت شعاعي داخل حفره قالب حركت كرده و حفره قالب را پر مي كند. بنابراين طرح مجموعه قالب اكستروژن جانبي ساده تر از مجموعه قالب فورجينگ دقيق بوده و اين سادگي، سبب كاهش زمان و هزينه ساخت قالب مي شود.

انتخاب فرآيند شكل دهي براي شكل دهي چرخ دنده كه با مصرف كمترين نيرو و انرژي شود، بسيار مهم مي باشد. فورجينگ دقيق چرخ دنده هاي ساده توسط Grover و Juneja مورد بررسي قرار گرفت[۱]، Abdul وDean [۲] و همچنين Chitkara و Bhutta [۳] فورجينگ چرخ دنده هاي ساده را با استفاده از روش كرانه فوقاني تحليل كردند. آنها پروفيل دندانه را به صورت خط صاف موازي با خط تقارن يک دندانه فرض كردند. Chitkara و Bhutta [٤] و El-Domaity و Shabara [٥] همچنين با استفاده از روش تعادل نيروها اين فرآيند را تحليل و به مقايسه اين نتايج با نتايج به دست آمده از روش كرانه فوقاني پرداختند. فورجينگ دقيق چرخ دنده هاي ساده توسط Chitkara و Bhutta [٦]، Chitkara و Yohngjo [۷] و Hsu [۸] مورد مطالعه قرار گرفت. آنها نيروي شكل دهي را با فرض پروفيل خطي براي دندانه با روش كرانه فوقاني پيش بيني و جريان ماده را در طول فرآيند مورد بررسي قرار دادند. Choi و همكاران [۹،۱۰] و Cho و همكاران [۱۱] با درنظر گرفتن پروفيل دندانه اينولوت، اين فرآيند را تحليل كردند. اگرچه فورجينگ دقيق چرخ دنده هاي ساده به طور گسترده اي مورد بررسي و مطالعه قرار گرفته است، اما فرآيند شكل دهي چرخ دنده هاي ساده با روش اكستروژن جانبي كمتر مورد بررسي و تحليل قرار گرفته است. Plancak و همكاران [۱۲] نيروي مورد نياز شكل دهي در اكستروژن جانبي قطعات شبه چرخ دنده (gear like elements) را با استفاده از روش كرانه فوقاني محاسبه كردند. Can و همكاران [۱۳] نيز با استفاده از يک ميدان سرعت اصلاح شده نيروي مورد نياز شكل دهي قطعات شبه چرخ دنده محاسبه كردند، آنها پروفيل دندانه را به صورت خطي در راستاي شعاع، فرض كردند. Altinbalik و Can [١٤] با استفاده از ميدان سرعتي كه Can و همكاران [۱۵] محاسبه كردند، با فرض پروفيل دندانه به صورت خط مستقيم، نيروي شكل دهي را محاسبه و به مقايسه نتايج تحليل با آزمايش پرداختند. تا كنون تحليل اكستروژن جانبي چرخ دنده هاي ساده با پروفيل دندانه اينولوت و مقايسه نيروي شكل دهي آن با فرآيند فورجينگ دقيق، صورت نگرفته است.

اين مقاله به محاسبه نيروي شكل دهي به روش كرانه فوقاني در فورجينگ دقيق و اكستروژن جانبي چرخ دنده هاي ساده و مقايسه با همديگر و همچنين مقايسه با نتايج شبيه سازي به روش حجم محدود (نرم افزار SuperForge) مي پردازد. در پايان نيز اثر مدول و ثابت اصطكاک بر نيرو بررسي شده اند.

۲- تحليل كرانه فوقاني

براي تحليل كرانه فوقاني ابتدا بايد ميدانهاي سرعت در هر ناحيه مشخص شوند. ميدان سرعت بايد شرايط مرزي و شرط تراكم ناپذيري را ارضا كند. شرط تراكم ناپذيري به صورت زير اعمال مي شود:

$$\dot{\varepsilon}_{rr} + \dot{\varepsilon}_{zz} + \dot{\varepsilon}_{\theta\theta} = 0 \qquad (1)$$

در سرتاسر تحليل كرانه فوقانی فرضيات ذيل درنظر گرفته شده اند:

- ماده به صورت همگن وايزوتروپ فرض مي شود.

- پانچ با سرعت ثابت به سمت پائین حرکت می کند.
- در تحلیل، رفتار ماده صلب- پلاستیک در نظر گرفته شده است.

۲- ۱- میدان سرعت براي فرآيند اكستروژن جانبي

براي تحليل از سيستم مختصات استوانه اي (r,θ,z) استفاده و چرخ دنده با N دندانه، به 2N قسمت مشابه تقسيم و سپس هر قسمت به هفت ناحيه تغيير شكل مطابق شكل۲ تقسيم شده است. با فرض اينكه پانچ با سرعت ثابت v_0 به سمت پائين حركت كند، ميدان سرعت براي ناحيه هاي I-VII درجدول۱ آمده است و ثابت هاي C_5، C_6 و C_7 همگي از شرط مرزي برابري مولفه هاي عمود بر مرز مشترك دو ناحيه محاسبه مي شوند.

۲- ۲- ميدان سرعت براي فرآيند فورجينگ دقيق

براي تحليل فرآيند فورجينگ دقيق چرخ دنده ساده با روش كرانه فوقاني همانند فرآيند اكستروژن جانبي، چرخ دنده ساده با N دندانه، به 2N قسمت مشابه تقسيم و سپس هر قسمت به هفت ناحيه تغيير شكل مطابق شكل۳ تقسيم و پس از آن در هر ناحيه ميدان سرعت محاسبه شده است.

با اين فرض كه پانچ با سرعت ثابت v_0 به سمت پائين حركت كند، ميدان سرعت براي ناحيه هاي I-VII محاسبه شده كه نتايج آن در جدول۲ آمده است و ثابت هاي C_2، C_3، C_4، C_5 و C_6 از برابري مولفه هاي عمود بر مرز مشترك دو ناحيه مجاور هم محاسبه مي شوند.

۲- ۳- حل كرانه فوقاني

مولفه هاي نرخ كرنشهاي عمودي و برشي در دستگاه مختصات استوانه اي از رابطه ذيل محاسبه مي شوند :

$$\begin{aligned}
\dot{\varepsilon}_{rr} &= \frac{\partial U_r}{\partial r}, \\
\dot{\varepsilon}_{\theta\theta} &= \frac{1}{r}\left(\frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + U_r\right), \\
\dot{\varepsilon}_{zz} &= \frac{\partial U_z}{\partial z}, \\
\dot{\varepsilon}_{r\theta} &= \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_\theta}{\partial r} - \frac{U_\theta}{r} + \frac{1}{r}\frac{\partial U_r}{\partial \theta}\right), \\
\dot{\varepsilon}_{rz} &= \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_r}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial r}\right), \\
\dot{\varepsilon}_{\theta z} &= \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r}\frac{\partial U_z}{\partial \theta}\right)
\end{aligned} \tag{۲}$$

با استفاده از روابط فوق نرخ كرنش موثر، $\dot{\bar{\varepsilon}}$ از رابطه ذيل قابل محاسبه است :

$$\bar{\dot{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3}}\sqrt{\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}} \qquad (۳)$$

و توان داخلي از رابطه ذيل بدست مي آيد:

$$\dot{W}_i = \int_V \sigma_0 \bar{\dot{\varepsilon}} dV \qquad (٤)$$

توان برشي روي صفحه هاي ناپيوستگي از رابطه زير قابل محاسبه است:

$$\dot{W}_s = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}\int_S |\Delta V| dS \qquad (۵)$$

$|\Delta V|$ مقدار ناپيوستگي سرعت و ΔS المان سطح روي سطوح ناپيوستگي سرعت است. ناپيوستگي سرعت در مرز مشترک نواحي تغيير شکل رخ مي دهد.

توان اصطکاکي از رابطه زير قابل محاسبه است:

$$\dot{W}_f = \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}}\int_S |\Delta V| dA \qquad (۶)$$

که dA المان سطح بر روي سطوح تماس قطعه با ديواره هاي قالب، m ثابت اصطکاک و $|\Delta V|$مقدار ناپيوستگي سرعت بر روي سطح تماس قطعه کار با ديواره قالب است. توان اصطکاکي در سطوح تماسي بيلت با قالب وجود دارد.

توان کل براي يک نيم دندانه نيز از رابطه ذيل محاسبه مي شود:

$$\dot{W} = \sum \dot{W}_i + \sum \dot{W}_f + \sum \dot{W}_s \qquad (۷)$$

محاسبه توانهاي داخلي، اصطکاکي و برشي منجر به انتگرالهايي مي شود که براي محاسبه آنهـا از نـرم افـزار Matlab استفاده شده است.

کل توان خارجي و نيروي متوسط شکل دهي لازم، F_{ave} ، براي شکل دهي چرخ دنده ساده با N دندانه از رابطه هاي زير به دست مي آيند:

$$\dot{W}_{total} = 2N\dot{W} \qquad (۸)$$

$$F_{ave} = \frac{\dot{W}_{total}}{v_0} \qquad (۹)$$

٤- شبيه سازی

يکي از روش هاي حل عددي فرآيندهاي شکل دهي، روش حجم محدود است. در اين روش المانهاي حجمي، تقسيمات ساده اي از فضا مي باشند و به وسيله نقاط اتصالي تعريف مي شوند که اين نقاط در فضا ثابت بوده و لذا شبکه حجم محدود نيز به صورت يک محدوده ثابت مرجع عمل مي نمايد و مواد از بين المانها با حجم ثابت حرکت نموده و جرم، اندازه حرکت و انرژي از هر المان به المان ديگر منتقل مي شود، در نتيجه براي حرکت مواد نيازي به شبکه بندي مجدد نمي باشد. با تحقيقات وسيعي که از بکار گيري روش حجم محدود حاصل گرديده، نرم افزارهاي مختلفي توليد شده اند که در آنها قابليت شبيه سازي فرآيندهاي مختلف شکل دهي فلزات وجود دارد. از جمله اين نرم افزارها، نرم افزار SuperForge مي باشد. SuperForge نرم افزاری بسيار قدرتمند برای شبيه سازی کامپيوتری فرآيند های شکل دهی می باشد. اين نرم افزار

ترکیبی از یک حل کننده حجم محدود و یک نمایشگر گرافیکی است.مراحل شبیه سازي یک فرآیند شکل دهي در این نرم افزار را مي توان به صورت نمودار گردشي نشان داده شده در شکل ۱۱ نشان داد. اولین مرحله در شبیه سازی یک فرآیند شکل دهی در نرم افزار SuperForge، آماده سازی بیلت و قالبهای مورد نیاز می باشد. از آنجا که نرم افزار توانایي مدلسازی قطعات پیچیده را ندارد، بیلت و قالبها در نرم افزار SolidWorks آماده شده اند و سپس به این نرم افزار وارد شده اند. مرحله دوم وارد کردن مشخصات جنس بیلت است که بیلت از جنس $Al99{,}5$ است و رفتار تنش موثر بر حسب کرنش موثر آن به صورت $\bar{\sigma} = 152.49\,\bar{\varepsilon}^{0.292}$ [MPa] مي باشد[١٤]. سپس باید نوع ماشین شکل دهی، ضریب اصطکاک بین بیلت و سطح قالب و شرایط دمايي کار را مشخص کرد. در تحلیل انجام شده در این مقاله ماشین شکل دهی یک پرس هیدرولیکی که با سرعت ثابت حرکت می کند تعریف شده است و شکل دهی سرد فرض شده است.

شبیه سازی عددی سیلان فلز، شکل قطعه و انتقال حرارت با استفاده از المانهای حجم محدود محاسبه می شود. مش بندی بیلت و قالب بصورت اتوماتیک انجام می شود که پس از تعیین اندازه و تعداد المانها مدلها مش بندی می شوند. پس از مش بندی کردن بیلت و قالبها و وارد کردن سایر پارامترها همچون طول کورس و نوع فرآیند شکل دهی (فورج، اکستروژن و ...)، مدل آماده اجرا شدن می باشد.

۵- نتایج و بحث

چرخ دنده نمونه داراي مدول ۲ میلیمتر، زاویه فشار۲۰ درجه، ۱۵ دندانه، ارتفاع چرخ دنده ۱۰ میلي متر و طول محور ۲۰ میلي متر مي باشد. بیلت از جنس$Al99{,}5$ بوده و رفتار تنش موثر بر حسب کرنش موثر آن به صورت$\bar{\sigma} = 152.49\,\bar{\varepsilon}^{0.292}$ [MPa]مي باشد[١٤]. با فرض ثابت اصطکاک برشي ($m = 0.1$) و مشخصات داده شده، منحني تغییرات نیروي شکل دهي برحسب کاهش ارتفاع بیلت (جابجايي پانچ) براي فورجینگ دقیق با روش کرانه فوقاني و شبیه سازي به روش حجم محدود در شکل٤ نشان داده شده اند. همانگونه که در این شکل نشان داده شده، نتایج تحلیل انطباق بسیار خوبي با نتایج شبیه سازي با نرم افزارSuperForge دارند. با افزایش پیشروي پانچ و حرکت ماده داخل حفره قالب، توان تغییر شکل داخلي، توان اصطکاکي و توان برشي افزایش یافته و در نتیجه براي ادامه تغییر شکل نیروي بیشتري لازم است و مقدار آن در پایان کورس حداکثر است.

در شکل۵ منحني تغییرات نیروي شکل دهي برحسب جابجايي پانچ با روش کرانه فوقاني و شبیه سازي به روش حجم محدود براي اکستروژن جانبي نشان داده شده اند. همانگونه که در این شکل نشان داده شده، نتایج تحلیل انطباق بسیار خوبي با نتایج شبیه سازي با نرم افزارSuperForge دارند.

در شکل٦ منحني تغییرات نیروي شکل دهي برحسب جابجايي پانچ براي فورجینگ دقیق و اکستروژن جانبي با هم مقایسه شده اند. همانگونه که در این شکل نشان داده شده، نیروي شکل دهي و در نتیجه انرژي تغییر شکل در روش اکستروژن جانبي کمتر مي باشد.

در شکل هاي۷ و ۸ منحني هاي توان داخلي، برشي و اصطکاکي برحسب جابجايي پانچ براي فورجینگ دقیق و اکستروژن جانبي جانبي نشان داده شده اند. با افزایش پیشروي پانچ و حرکت ماده داخل حفره قالب، توان تغییر شکل داخلي، توان اصطکاکي و توان برشي افزایش مي یابند. همانگونه که نشان داده شده در هر

دو فرآيند سهم توان برشي بيشتر و توان اصطكاكي كمترين سهم را دارد. ولي در اكستروژن جانبي توان برشي بسيار بزرگتر از توان هاي داخلي و اصطكاكي بوده در حالي كه در فورجينگ دقيق سهم توان داخلي چشمگير است.

در شكل ۹ اثر مدول چرخ دنده بر منحني نيروي شكل دهي برحسب جابجايي پانچ براي فورجينگ دقيق و اكستروژن جانبي نشان داده شده است. با افزايش مدول، و با ثابت ماندن ساير پارامترهاي چرخ دنده شامل زاويه فشار و تعداد دندانه اندازه چرخ دنده افزايش مي يابد و بنابراين نيروي مورد نياز شكل دهي آن هم افزايش مي يابد.

در شكل ۱۰ منحني نيروي شكل دهي برحسب جابجايي پانچ براي دو ثابت اصطكاک $m = 0.1$ و $m = 0.6$ براي فورجينگ دقيق و اكستروژن جانبي نشان داده شده است. همانگونه كه در اين شكل نشان داده شده افزايش ثابت اصطكاک باعث افزايش نيرو شده و همچنين شدت اين افزايش براي اكستروژن جانبي بيشتر است.

۶- نتيجه گيري

در اين مقاله دو فرآيند شكل دهي، فورجينگ دقيق و اكستروژن جانبي، چرخ دنـده هـاي سـاده بـا پروفيـل دندانه اينولوت مورد تحليل كرانه فوقاني قرار گرفتند و نتايج زير حاصل شد:

- با تحليل كرانه فوقاني پارامتريک انجام شده زمان محاسبه نيروي اكستروژن بسيار سريع مي باشد.
- نتايج بدست آمده از تحليل با نتايج حاصل از شبيه سازي انطباق بسيار خوبي دارند و بنابراين مي توان از نتايج بدست آمده از تحليل به عنوان جايگزيني براي شبيه سازي و آزمايش كه پر هزينه و زمان بر است، استفاده نمود.
- نيروي شكل دهي و انرژي مصرفي در اكستروژن جانبي نسبت فورجينگ دقيق كمتر مي باشد.
- نیروی شکل دهی در هر دو فرآیند استروژن جانبی و فورجینگ دقیق با افزایش مدول چرخ دنده افزایش می یابد.
- با افزایش اصطکاک نیروی شکل دهی افزایش می یابد، شدت افزایش نیروی شکل دهی در اکستروژن جانبی بیشتر است.

مراجع

[1] Grover, O. P., and Juneja, B. J., "Analysis of Closed-de Forging of Gear-like Elements", Adv. Tech. Plast., Vol. II, pp. 888–93, (1984).

[2] Abdul, N. A., and Dean, T. A., "An Analysis of the Forging of Spur Gear Forms," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 26, pp. 113–23, (1986).

[3] Chitkara, N. R., and Bhutta, M.A., "Near Net Shape Spline Forging: an Experimental Investigation and a Simple Upper Bound Analysis", Int. J. Mech. Sci., Vol. 37, pp. 1247–68, (1995).

[4] Chitkara, N. R., and Bhutta, M.A., "Computer Simulation to Predict Stress, Working Pressures and Deformation Modes in Incremental Forging of Spur Gear Forms," Int. J. Mech. Sci., Vol. 38, pp. 871–89, (1996).

[5] El-domiaty, A., Shabara, M., and Al-Ansary, M., "Closed-die Forging of Gear Like Elements," J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME., Vol. 120, pp. 34–41, (1998).

[6] Chitkara, N. R., and Bhutta, M. A., "Near-net Shape Forging of Spur Gear Forms: An Analysis and some Experiments," Int. J. Mech. Sci., Vol. 38, pp. 891–916, (1996).

[7] Chitkara, N. R., and Yohngjo, K., "An Analysis of External Spline Gear Forming by an Upper Bound Energy Method," Int. J. Mech. Sci., Vol. 38, pp. 777–789, (1996).

[8] Hsu, H. H., "A Study on Precision Forging of Spur Gear Forms and Spline by Upper Bound Method," Int. J. Mech. Sci., Vol. 44, pp. 1543–1558, (2002).

[9] Choi, J. C., Choi, Y., Hur, K. D., and Kim, C. H., "A Study on the Forging of Spur Gears," Int. J. Mech. Sci., Vol. 38, pp. 1333–1347, (1996).

[10] Cho, H., Choi, J.C., Min, G., Choi, Y., and Choi, J., "An Upper Bound Analysis of the Closed-die Forging of Spur Gears," J. Mater. Process Technol., Vol. 67, pp. 83–88, (1997).

[11] Choi, J., Cho, H., and Jo, C. Y., "An Upper-bound Analysis for the Forging of Spur Gears," J. Mater. Process Technol., Vol. 104, pp. 67–73, (2000).

[12] Alves, M. L., Rodrugues, J. M. C., and Martins, P. A. F., "Cold Forging of Gears: Experimental and Theoretical Investigation," Finite Elem. Anal. Des., Vol. 37, pp. 549–558, (2001).

[13] Plancak, M., Bramley, A. N., and Osman, F., "Non-conventional Cold Extrusion," J Mater. Process Technol., Vol. 34, pp. 465–472, (1992).

[14] Plancak, M., Vilotic, D., and Skakun, P., "A Study of Radial Gear Extrusion," Int. J. Forming Process., Vol. 6, pp. 71–86, (2003).

[15] Can, Y., Altinbalik, M. T., and Akata, H. E., "A Study of Lateral Extrusion of Gear Like Elements and Spline," J. Mater. Process Technol., Vol. 166, pp. 128–134, (2005).

فهرست نمادهاي انگليسي

m: ثابت اصطکاک برشی

M: مدول چرخ دنده

N: تعداد دندانه

r: مختصه شعاعي در دستگاه استوانه اي

v_0: سرعت پانچ، m/s

U_r: مولفه سرعت در جهت r

U_θ: مولفه سرعت در جهت θ

U_z: مولفه سرعت در جهت z

V: حجم بيلت، m^3

$\dot{W}_i$: توان داخلي، N.m/s

$\dot{W}_s$: توان برشي، N.m/s

$\dot{W}_f$: توان اصطکاکي، N.m/s

z : مختصه قايم در دستگاه استوانه اي

فهرست نمادهاي يوناني

$\dot{\varepsilon}$: نرخ کرنش، 1/s

θ : مختصه زاويه اي در دستگاه استوانه اي، rad

σ_0 : تنش جريان، Pa

جدولها

جدول۱- مولفه هاي سرعت در نواحي مختلف تغيير شکل

Zone I: $0 \le \theta \le \alpha$ $0 \le r \le r_r$ $b \le z \le l$	$U_r = 0$ $U_\theta = 0$ $U_z = -v_0$
Zone II: $0 \le \theta \le \theta_1$ $0 \le r \le r_r$ $0 \le z \le b$	$U_r = 0$ $U_\theta = \frac{v_0\,\theta}{b} r$ $U_z = -\frac{v_0}{b} z$
Zone III: $\theta_1 \le \theta \le \alpha$ $0 \le r \le r_r$ $0 \le z \le b$	$U_r = \frac{v_0\, r}{2b}\left(\frac{\alpha}{\alpha-\theta_1}\right)$ $U_\theta = \frac{v_0\,\theta_1}{b} r \left(\frac{\alpha-\theta}{\alpha-\theta_1}\right)$ $U_z = -\frac{v_0}{b} z$
Zone IV: $\theta_1 \le \theta \le \theta_s$ $r_r \le r \le r_b$ $0 \le z \le b$	$U_r = \frac{v_0}{2b}\left(\frac{\alpha}{\alpha-\theta_1}\right)\frac{r_r^2}{r}$ $U_\theta = \frac{v_0}{2b}\left(\frac{\alpha}{\alpha-\theta_1}\right)\frac{r_r^2}{r}\left[\frac{r_b^2 - r^2}{\sqrt{-r^4 + [4(r_r + r_f)^2 - 2r_b^2]\ r^2 - r_b^4}}\right]$ $U_z = 0$

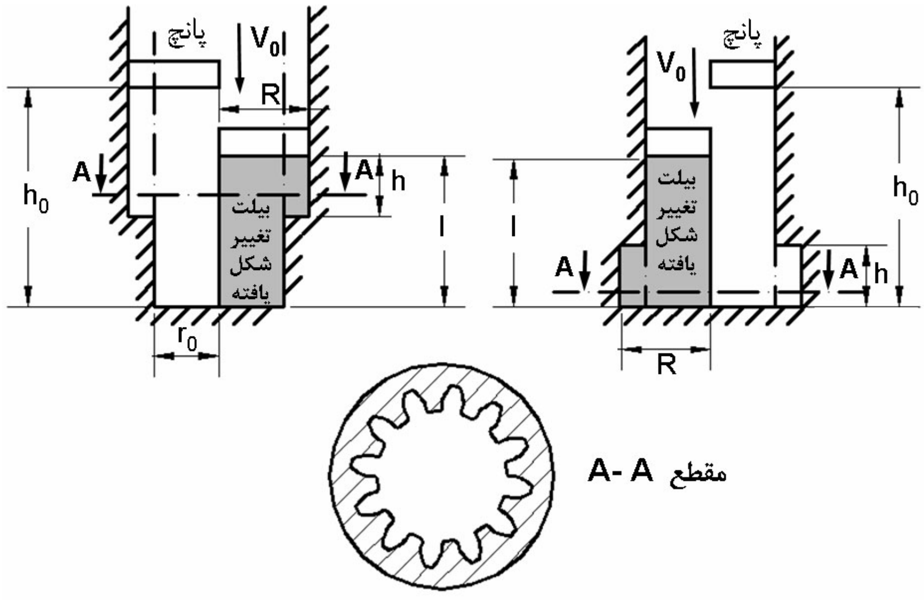
Zone V: $\theta_s \le \theta \le \alpha$, $r_r \le r \le r_b$, $0 \le z \le b$	$U_r = \frac{C_5}{r} + \frac{v_0}{4b}(\frac{\alpha}{\alpha-\theta_s})\frac{r_r^2}{r}\tan^{-1}\left[\frac{-2r_b^4+(-2r_b^2+8r_f r_r+4r_f^2+4r_r^2)\ r^2}{2r_b^2\ \sqrt{-r^4+[4(r_r+r_f)^2-2r_b^2]\ r^2-r_b^4}}\right]$ $-\frac{v_0}{4b}(\frac{\alpha}{\alpha-\theta_s})\frac{r_r^2}{r}\tan^{-1}\left[\frac{r^2+r_b^2-4r_f r_r-2r_f^2-2r_r^2}{\sqrt{-r^4+[4(r_r+r_f)^2-2r_b^2]\ r^2-r_b^4}}\right]$ $U_\theta = \frac{v_0}{2b}(\frac{\alpha}{\alpha-\theta_1})\frac{r_r^2}{r}\left[\frac{r_b^2-r^2}{\sqrt{-r^4+[4(r_r+r_f)^2-2r_b^2]\ r^2-r_b^4}}\right](\frac{\alpha-\theta}{\alpha-\theta_s})$ $U_z = 0$
Zone VI: $\theta_s \le \theta \le inv\phi_R$, $r_b \le r \le R$, $0 \le z \le b$	$U_r = \frac{C_6}{r}$ $U_\theta = \frac{C_6}{r}\frac{\sqrt{r^2-r_b^2}}{r_b}$ $U_z = 0$
Zone VII: $inv\phi_R \le \theta \le \alpha$, $r_b \le r \le R$, $0 \le z \le b$	$U_r = \frac{\sqrt{r^2-r_b^2}}{r_b}\frac{C_6}{(\alpha-inv\phi_R)\,r} + \frac{C_6}{(\alpha-inv\phi_R)\,r}\ \tan^{-1}(\frac{r_b}{\sqrt{r^2-r_b^2}}) + \frac{C_7}{r}$ $U_\theta = \frac{C_6}{r}\frac{\sqrt{r^2-r_b^2}}{r_b}(\frac{\alpha-\theta}{\alpha-inv\phi_R})$ $U_z = 0$

جدول ۲- مولفه هاي سرعت در نواحي مختلف تغيير شكل

Zone I: $0 \le \theta \le \theta_1$, $0 \le r \le r_r$, $1-h \le z \le l$	$U_r = 0$ $U_\theta = \frac{v_0 r}{h}\theta$ $U_z = -\frac{v_0}{h}z$
Zone II: $\theta_1 \le \theta \le \alpha$, $0 \le r \le r_r$, $1-h \le z \le l$	$U_r = \frac{v_0 r}{2h}\left[1+\frac{\theta_1}{(\alpha-\theta_1)}\right]+\frac{C_2}{r}$ $U_\theta = \frac{v_0\theta_1}{h(\alpha-\theta_1)}r(\alpha-\theta)$ $U_z = -\frac{v_0}{h}z$
Zone III: $\theta_1 \le \theta \le \theta_s$, $r_r \le r \le r_b$, $1-h \le z \le l$	$U_r = \frac{ur}{2h}+\frac{C_3}{r}$ $U_\theta = \left[\frac{ur}{2h}+\frac{C_3}{r}\right]\frac{r_b^2-r^2}{\sqrt{-r^4+(4(r_r+r_f)^2-2r_b^2)\ r^2-r_b^4}}$ $U_z = -\frac{v_0}{h}z$

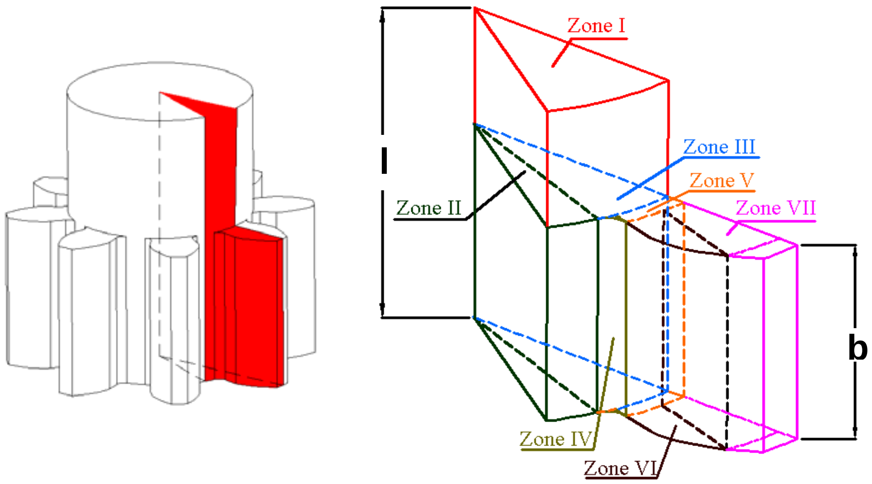
Zone IV: $\theta_s \le \theta \le \alpha$, $r_r \le r \le r_b$, $1-h \le z \le l$	$U_r = \frac{v_0}{4h(\alpha-\theta_s)}\frac{A}{r} + \left[-\frac{v_0(r_r+r_f)^2}{h} + \frac{v_0 r_b^2}{h} - C_3\right]\frac{B}{2r(\alpha-\theta_s)} + \frac{C_3}{2r(\alpha-\theta_s)}D + \frac{v_0 r}{2h} + \frac{C_4}{r}$ $U_\theta = \left[\frac{v_0 r}{2h} + \frac{C_3}{r}\right]\left(\frac{\alpha-\theta}{\alpha-\theta_s}\right)\frac{r_b^2 - r^2}{\sqrt{-r^4 + (4(r_r+r_f)^2 - 2r_b^2)\, r^2 - r_b^4}}$ $U_z = -\frac{v_0}{h}z$
Zone V: $\theta_s \le \theta \le inv\phi_R$, $r_b \le r \le R$, $1-h \le z \le l$	$U_r = \left[\frac{v_0 r}{2h} + \frac{C_5}{r}\right]$ $U_\theta = \left[\frac{v_0 r}{2h} + \frac{C_5}{r}\right]\frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b}$ $U_z = -\frac{v_0}{h}z$
Zone VI: $inv\phi_R \le \theta \le \alpha$, $r_b \le r \le R$, $1-h \le z \le l$	$U_r = \left[\frac{v_0}{6hr}\frac{(r^2 - r_b^2)^{3/2}}{r_b}\right]\frac{1}{\alpha-(\theta_s + inv\phi_R)} + \left[\frac{C_5}{r}\frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b}\right]\frac{1}{\alpha-(\theta_s + inv\phi_R)} + \left[\frac{C_5}{r}\tan^{-1}\left(\frac{r_b}{\sqrt{r^2 - r_b^2}}\right)\right]\frac{1}{\alpha-(\theta_s + inv\phi_R)} + \frac{v_0 r}{2h} + \frac{C_6}{r}$ $U_\theta = \left(\frac{v_0 r}{2h} + \frac{C_5}{r}\right)\frac{\alpha-\theta_s}{\alpha-(\theta_s + inv\phi_R)}\frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b}$ $U_z = -\frac{v_0}{h}z$
Zone VII: $0 \le \theta \le \alpha$, $0 \le r \le r_r$, $0 \le z \le 1-h$	$U_r = 0$ $U_\theta = 0$ $U_z = 0$

شکلها

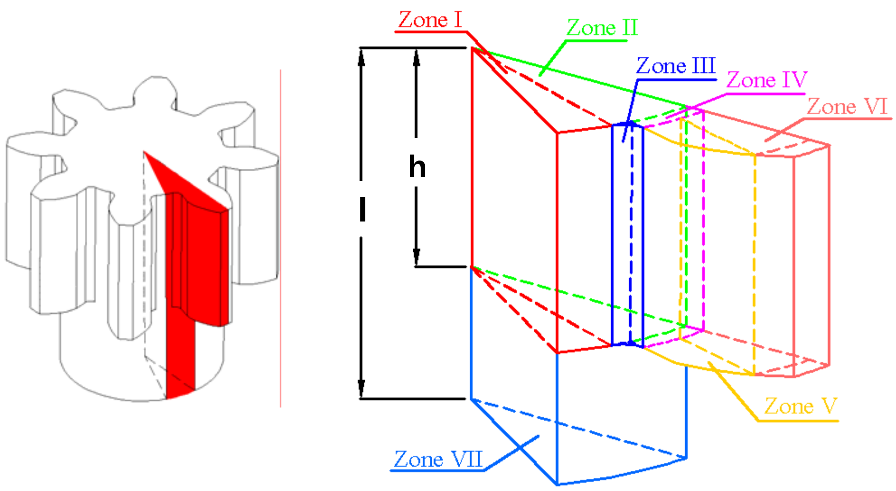


الف- فورجینگ دقیق
ب- اکستروژن جانبي

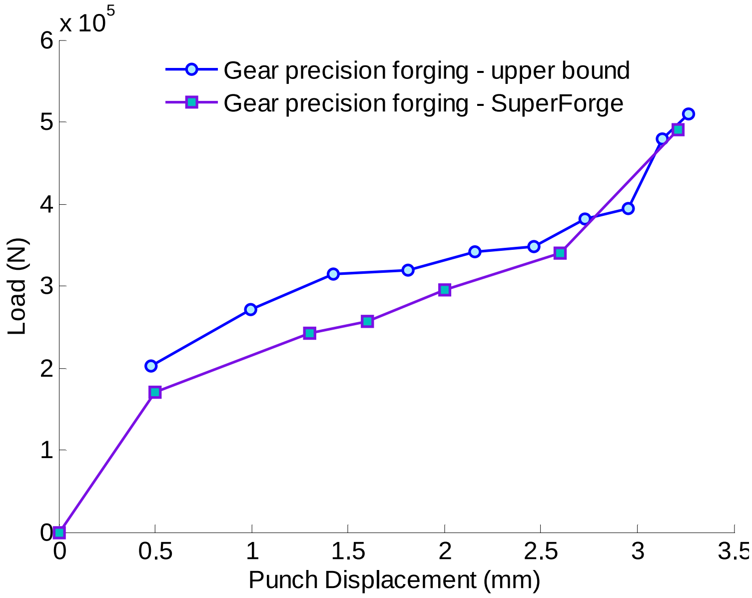
شکل۱- شکل قالب در فرآیند فورجینگ دقیق و اکستروژن جانبي



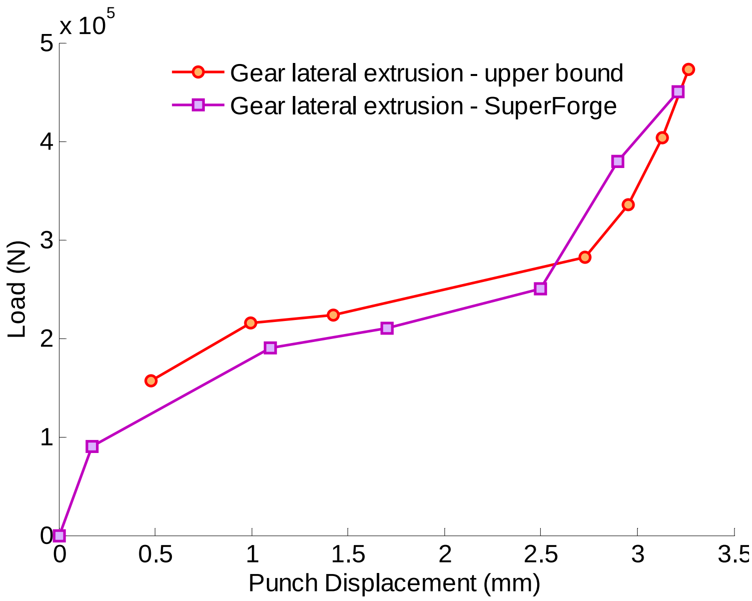
شکل۲- نواحي تغيير شکل بر اي يک نيم دندانه در فرآيند اکستروژن جانبي



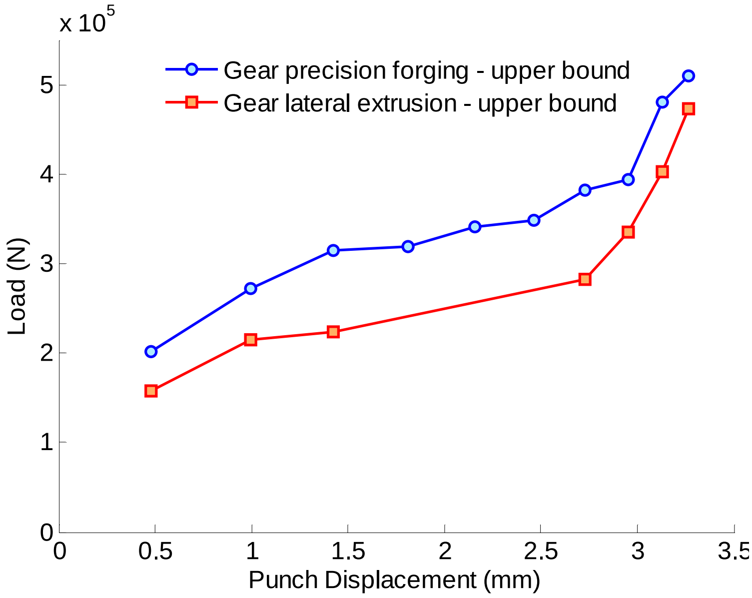
شکل۳- نواحي تغيير شکل براي يک نيم دندانه در فرآيند فورجينگ



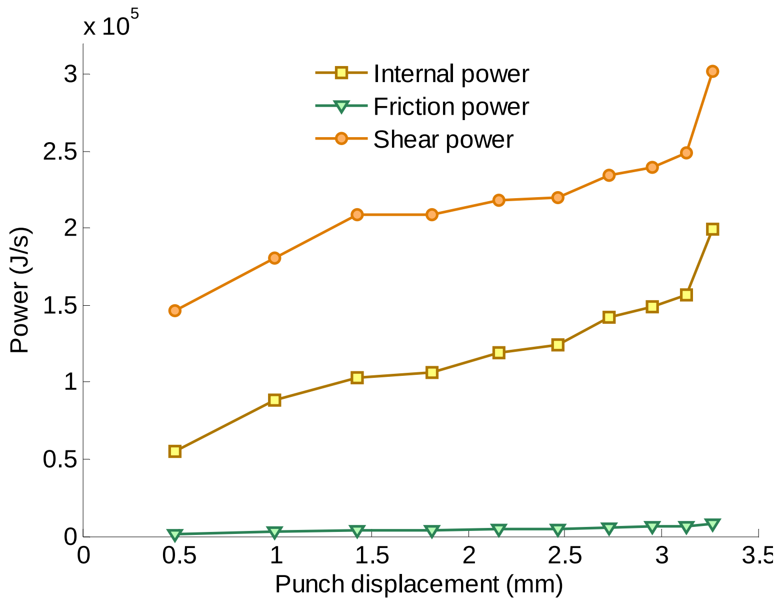
شكل۴- منحني تغيير نيروي شكل دهي بر حسب جابجايي پانچ براي فورجينگ دقيق



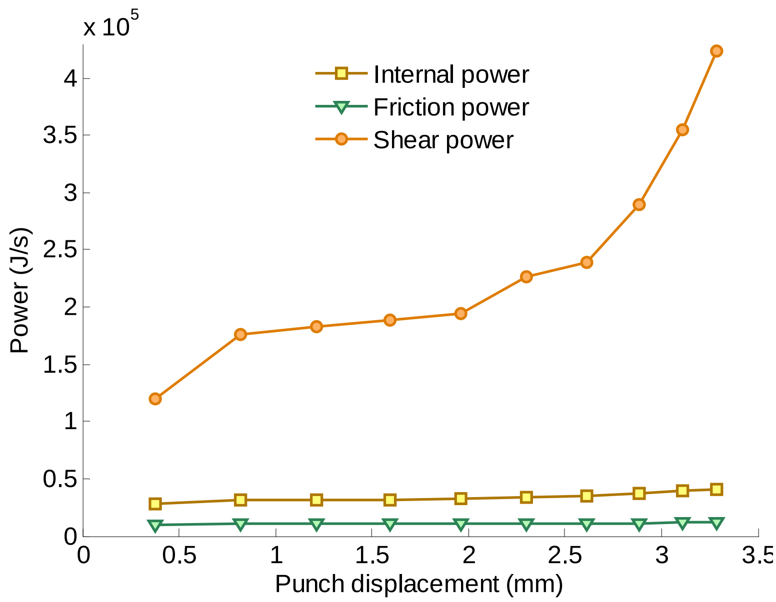
شكل۵- منحني هاي تغيير نيروي شكل دهي بر حسب جابجايي پانچ براي اكستروژن جانبي



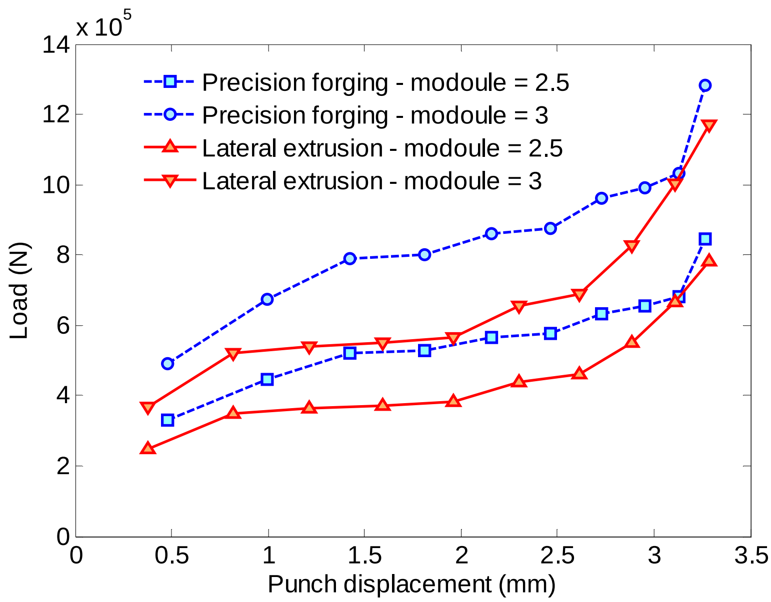
شکل۶- مقایسه منحني تغيير نيروي شكل دهي بر حسب جابجايي پانچ براي فورجينگ دقيق و اكستروژن جانبي



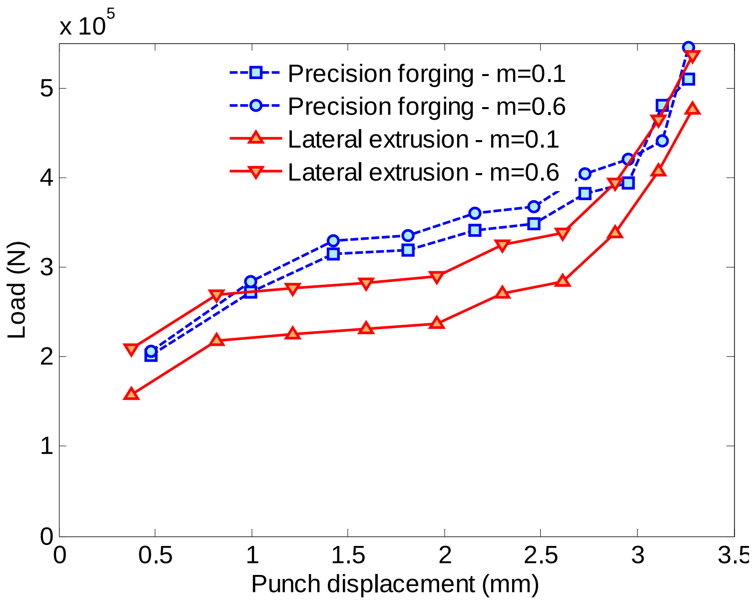
شکل۷- منحني تغيير توان در فورجينگ



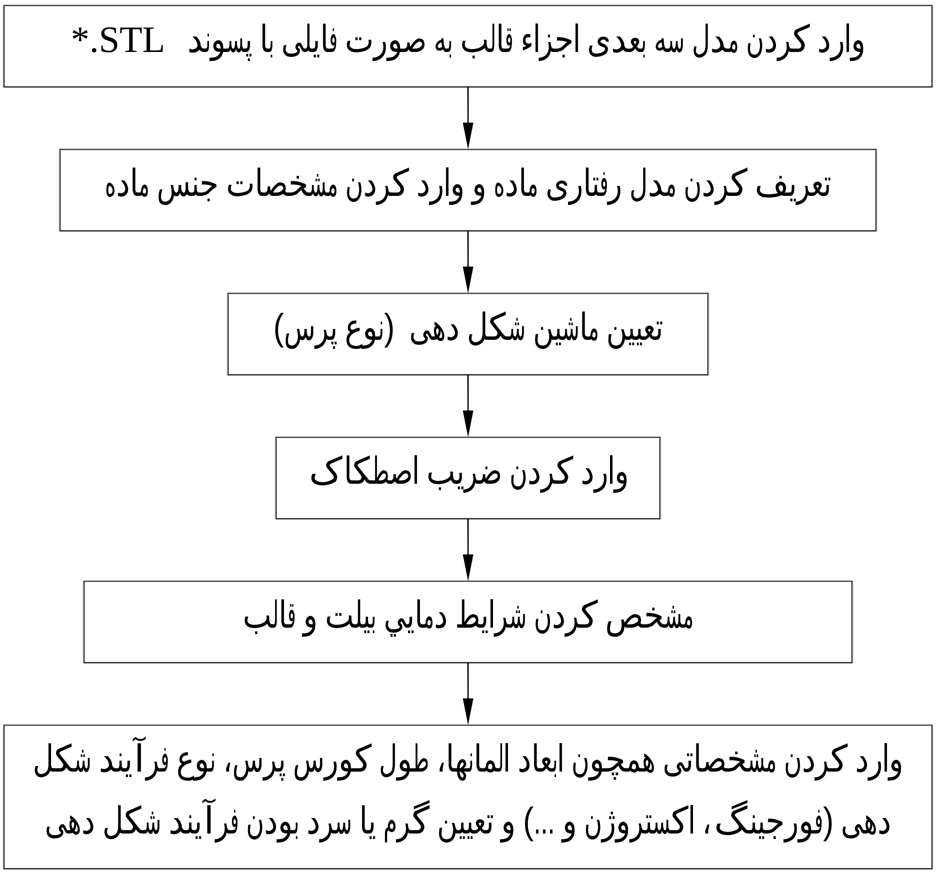
شكل۸- منحني تغيير توان در اكستروژن جانبي



شكل۹- منحني نيروي شكل دهي بر حسب مدول



شکل ۱۰- منحني تغيير نيروي شکل دهي برحسب ثابت اصطکاک (m)



شکل ۱۱- نمودار گردشي شبيه سازي در نرم افزار SuperForge

Abstract

Precision forging and lateral extrusion are important manufacturing procedure of gears. They have advantages of improved strength, good tolerance, saving billet material, dispensing with the cutting, etc. Upper bound analyses of spur gear shafts lateral extrusion and precision forging have been studied in this paper. The material of solid billet was assumed as rigid–plastic and the involute curve has been used to represent the sides of gear tooth. By means of upper bound analysis, load–displacement diagrams have been determined for lateral extrusion and precision forging. The gear shaft with N teeth was divided to 2N deformation units and a deformation unit has been sub-divided to seven deformation zones. Using the present model, various effects of forming parameter such as the friction factor and module upon the forming force have been analyzed. Finally, theoretical obtained load–displacement diagrams of lateral extrusion and precision forging have been compared with each other and have been compared with SuperForge results.